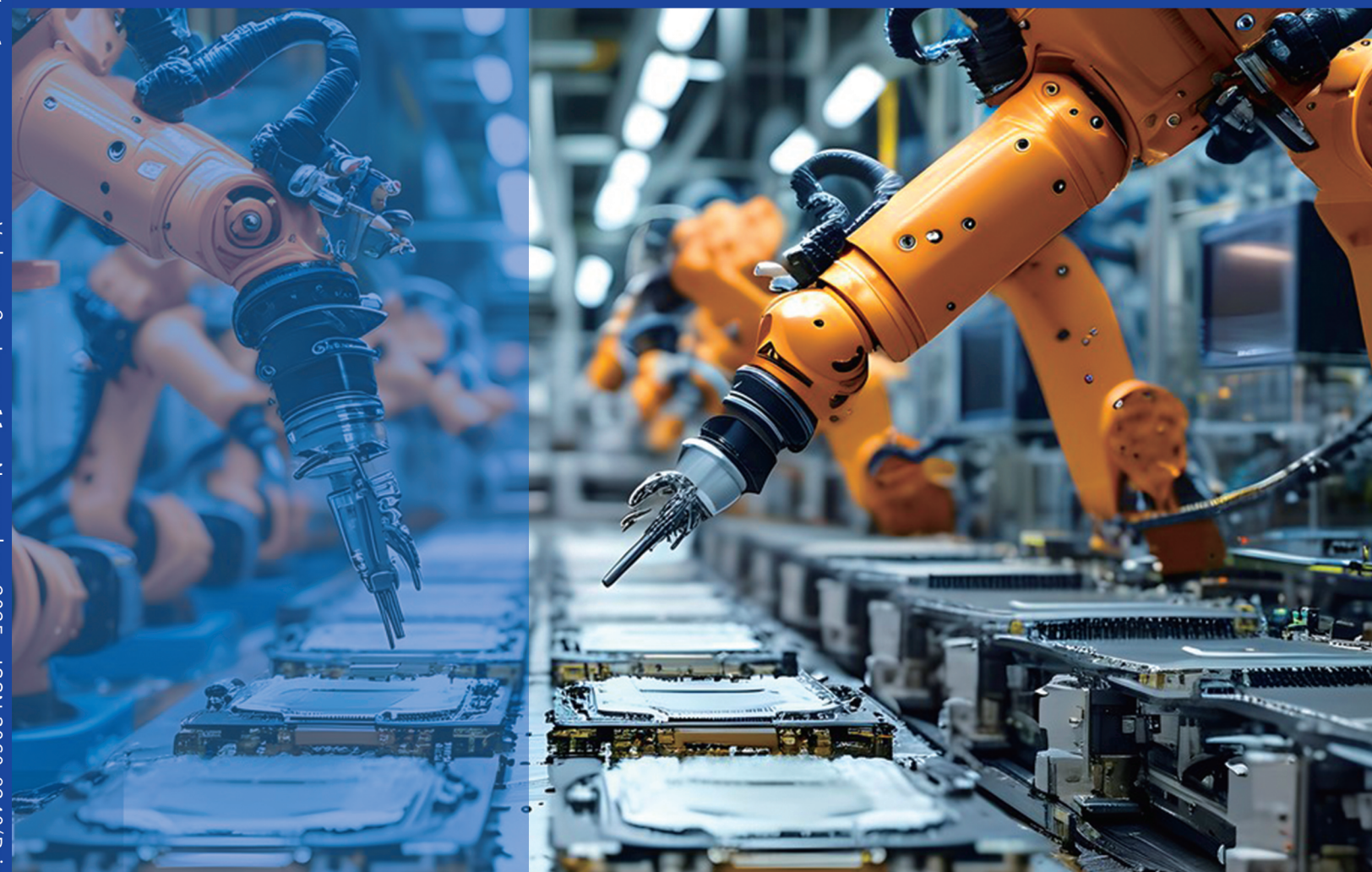


# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 11 • November 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



现代工业与技术  
Modern Industry and Technology  
Volume 2 • Issue 11 • November 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
Tel.:+65 62233839

E-mail:contact@nassg.org

Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (纸质) 3060-9259 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《现代工业与技术》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 11· November 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

## 编委会

### 主 编

蒋 晶 郑州大学

### 编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

郭乃信 通力电梯有限公司

- |    |  |    |  |
|----|--|----|--|
| 1  | 浅论人工智能检测技术在汽车维修中的应用<br>/ 王伟东               | 28 | 电气工程自动化控制技术研究<br>/ 林萍                              |
| 4  | 智能制造在汽车工业中的实施与挑战<br>/ 王强                   | 31 | 长输油气管道地质灾害区段风险评估与防护加固技术<br>/ 吴毅辉 崔雅光               |
| 7  | 药物合成结晶技术相关研究<br>/ 桑光明                      | 34 | 基于增量配电网的“源—网—荷—储”协同运行与优化调度策略研究<br>/ 黄胜奇            |
| 10 | 智能电网背景下电力工程技术应用与发展研究<br>/ 王玲玲              | 37 | 基于《中国药典》2025年版的中成药制剂成品抽样量计算模型研究<br>/ 赵向东 赵恒        |
| 13 | 桥梁结构健康监测与评估系统应用研究<br>/ 普玉富                 | 41 | 面向复杂工业场景的计算机视觉轻量化检测方法研究<br>/ 宋涛 莫定源                |
| 16 | 智能化开采模式下综采工作面高效生产工艺探析<br>/ 齐树鹏             | 44 | 智能电网下电力系统故障诊断方法研究<br>/ 史剑锋                         |
| 19 | 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术及防控机制研究<br>/ 余立群         | 47 | “三维四层”地市烟草企业安全生产动态风险评估模型构建<br>/ 王高强                |
| 22 | 电力系统提质增效目标下配电工程智慧规划与物资精益化管理研究<br>/ 杨竣贺 周春羽 | 50 | 基于和面机类设备磁控开盖联锁安全保护装置的研制与应用<br>/ 高校娟 王高强 杨云 潘君君 王亭亭 |
| 25 | 配电网规划建设融合电网自动化运行的物资一体化管控模式探究<br>/ 周春羽 杨竣贺  |    |  |

- 1 A Brief Analysis on the Application of Artificial Intelligence Detection Technology in Automotive Maintenance / Weidong Wang
- 4 Implementation and Challenges of Smart Manufacturing in the Automotive Industry / Qiang Wang
- 7 Research on Crystallization Technology for Drug Synthesis / Guangming Sang
- 10 Research on Application and Development of Power Engineering Technology under the Background of Smart Grid / Lingling Wang
- 13 Research on the Application of Bridge Structure Health Monitoring and Evaluation System / Yufu Pu
- 16 Exploration of Efficient Production Process of Fully Mechanized Mining Face under Intelligent Mining Mode / Shupeng Qi
- 19 Research on Intelligent Early Warning Technology and Prevention Mechanism for Safety Risks in High-rise Residential Structure Construction / Liqun Yu
- 22 Research on Smart Planning of Distribution Projects and Lean Management of Materials under the Goal of Improving the Efficiency of Power System / Junhe Yang Chunyu Zhou
- 25 Research on the Integrated Material Management Model for Distribution Network Planning and Automation Operation / Chunyu Zhou Junhe Yang
- 28 Research on Automation Control Technology in Electrical Engineering / Ping Lin
- 31 Risk assessment and protection reinforcement technology for geological hazard sections of long-distance oil and gas pipelines / Yihui Wu Yaguang Cui
- 34 Research on the Collaborative Operation and Optimization Scheduling Strategy of “Source-Grid-Load-Storage” Based on Incremental Distribution Network / Shengqi Huang
- 37 Study on the Calculation Model of Finished Product Sampling Quantity for Traditional Chinese Patent Medicine Preparations Based on the Chinese Pharmacopoeia (2025 Edition) / Xiangdong Zhao Heng Zhao
- 41 Research on lightweight detection methods for computer vision in complex industrial scenarios / Tao Song Dingyuan Mo
- 44 Research on Power System Fault Diagnosis Methods in Smart Grid / Jianfeng Shi
- 47 Construction of a Dynamic Risk Assessment Model for Work Safety of Municipal Tobacco Enterprises Based on the “Three - Dimension and Four - Layer” Framework / Gaoqiang Wang
- 50 Development and application of magnetic control opening interlock safety protection device based on dough machine equipment / Xiaojuan Gao Gaoqiang Wang Yun Yang Junjun Pan Tingting Wang



# A Brief Analysis on the Application of Artificial Intelligence Detection Technology in Automotive Maintenance

Weidong Wang

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

## Abstract

With the intelligent upgrading of automotive maintenance technology, the application of artificial intelligence detection technology has gradually attracted industry attention. This paper employs theoretical analysis to conduct a comparative study of existing intelligent detection processes and traditional fault diagnostic methods. Artificial intelligence technology can achieve rapid identification and accurate diagnosis of automotive faults, thereby improving maintenance efficiency, reducing operational costs, and enhancing overall service quality. This research provides a practical basis for the intelligent transformation of the automotive maintenance industry and holds positive demonstrative significance for promoting technological innovation. The theoretical framework proposed in the paper offers guiding value for the widespread application of intelligent detection technology.

## Keywords

Artificial intelligence detection technology; Automotive maintenance; Fault diagnosis

## 浅论人工智能检测技术在汽车维修中的应用

王伟东

内蒙古铁辰智能装备有限公司, 中国, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

## 摘要

伴随汽车维修技术朝智能化升级发展, 人工智能检测技术的应用逐步引发业界关注。本文运用理论探讨方法, 对于现有智能检测流程和传统故障诊断方式开展了比较研究。借助人工智能技术能够达成对于汽车故障的迅速确定与精确诊断, 进而增强维修效率、减少运营成本并且改善整体服务质量。此研究给汽车维修行业的智能升级带来了实践依据, 对于促进技术革新拥有正面示范意义。文中给出的理论框架对智能检测技术推广使用具备指引意义。

## 关键词

人工智能检测技术; 汽车维修; 故障诊断

## 1 引言

汽车维修行业现在正处在从老旧模式转向现代数字化和智能化的关键时期, 人工智能检测技术属于最新信息科技领域里面的一个重要部分, 人们把故障诊断工作和维修操作过程结合到一起使用, 这个做法已经变成学术研究人员和实际生产工作者都非常关注的一个重要话题。针对当前这种实际情况, 很多研究人员开始考虑使用人工智能算法, 依靠大量数据的仔细处理和机器学习的先进功能, 来完成汽车故障的模式识别以及位置确定。多项科学研究和实际测试都已经清楚地表明, 借助人工智能检测技术能够大大减少车辆维修所需的时间长度, 同时还能在一定范围内提高整体服务

品质水平, 最终帮助整个行业迈向更加现代化的技术发展道路。

## 2 汽车维修行业现状与挑战

### 2.1 汽车维修市场背景

伴随汽车保有量的连续增加并且汽车技术的持续更新, 汽车维修行业出现了明显进步, 同时展现出巨大的市场潜力。现代社会对于交通工具的依赖程度逐渐提高, 汽车不再单纯是日常出行的主要载体, 反而变成物流运输、服务业等等领域的核心设备。市场需求的扩大和车辆技术复杂化的发展, 造成传统维修行业慢慢走向崭新的发展阶段。汽车维修市场不但显示出规模化扩张的趋势, 而且遭遇行业服务质量尚需改善的真实困难。

汽车维修行业现在正处在转型升级的重要阶段。因为汽车电子化、智能化进步加快, 车辆的故障分布从机械问题逐渐朝传感器、芯片及通信等技术性问题聚集。此类变化恶化了维修技术方案与实际市场需求之中的矛盾。消费者对维

【作者简介】王伟东(1989-), 男, 中国内蒙古鄂尔多斯人, 本科, 工程师, 从事汽车检测与故障诊断技术、新能源汽车运用技术、整车热管理系统优化、汽车维修工艺与技术研究。

修周期、故障处理能力及服务体验发出了更优的要求，传统的故障检测与维修模式在新兴技术支持需求下表现疲软。

智能技术推动车辆维修行业进步，汽车维修市场竞争表现出技术化和服务化的两个方向。面对技术革新带来的市场变化，处理繁杂故障诊断速度慢、运营费用高等问题，已经变成行业发展最重要的难题。这样的环境让人工智能检测技术得到广泛应用，也给后续技术支持留下很多发展空间。

## 2.2 传统维修模式局限

常规维修方式已经汽车行业里面长期占据主要位置，缺点慢慢暴露出来，很难跟上现在迅速发展的技术要求。常规维修完全依靠工人凭经验加上常用工具，遇到复杂或者多种情况的故障判断速度慢，结果准确度也停留在Uncertain。随着汽车电子化和智能化水平不断提升，车辆出现的故障变得越来越复杂，常规方式无法快速处理来自不同来源的数据，也无法完成精确检查的要求。在判断故障时候通常花费很多时间，这样就导致修理需要的时间变得更长，最终造成运行费用增加，同时也会降低服务水平。常规维修方式还存在工人的技术水平差别很大的情况，修理出来的品质也就没有办法做到统一标准。这些缺点明显阻碍汽车维修行业向先进方向前进，同时也给整个行业实现智能化转变带来了全新困难。要想彻底解决这些问题，把人工智能检测方法跟当前维修系统结合起来，已经成为一种非常有效的解决办法。

## 3 人工智能检测技术概况

### 3.1 技术原理及优势

人工智能检测技术用在汽车维修行业，依靠前沿的技术原理，可以使用大数据处理和机器学习算法来完成复杂故障的检测和诊断任务。核心原理是通过传感器收集车辆运行过程中产生的各种数据，仔细监测并深入研究温度、压力、速度还有震动等关键参数，借助预先设计好的模型，对不正常的数值进行细致的匹配和分析，最后形成一套科学合理的维修方案。采用这种方法能够整合多种来源的数据，让检测工作的细致程度和覆盖范围都得到加强，显著提升对故障的预测能力，彻底改变过去完全靠人工经验来判断的情况，最终达到更好的维护效果。

人工智能检测技术的优势体现在很多地方。它的运作过程自动化水平很高，可以完成故障诊断的完整过程智能化反应，尽量减少因为人工参与可能出现的错误。这项技术处理数据时具有很强的速度和准确性特点，依靠大量数据快速运算和整理，明显提高检测的正确率。这种技术使用能够大幅缩短故障诊断需要的时间长度，并且降低维修所需的人力和机器费用。这项技术面对复杂系统的故障诊断显示出很强的适应能力，可以处理各种不同的故障情况，不会停留在限制在单一的检测指标上，从而让整个维修过程变得更加灵活和迅速。

借助智能技术的广泛应用，汽车维修逐渐朝智能化发展，给行业带来崭新的技术动力。这不但改进了服务流程，并且提高了行业竞争力。人工智能检测技术的推广应用，将为未来技术升级和行业转型起到关键作用。

### 3.2 智能检测流程构成

智能检测流程包括几个关键部分，首先是数据采集，接着是数据处理，然后是智能分析，最后是故障诊断。数据采集这部分需要用到车载传感器和各种检测设备来收集车辆运行时的各种指标，比如车速、内部温度、震动情况等。数据处理这部分会把采集到的原始数据进行信号转换和归一化等技术处理，变成能够被算法识别的输入格式。智能分析这部分是整个流程的核心部分，利用人工智能算法对这些输入数据进行建模和深度学习操作，提取出有用的特征向量，并且判断出异常模式。故障诊断这部分根据分析得到的结果制作出详细的故障报告，同时还会调用专家系统或者知识库来提高诊断的准确性和全面性。

## 4 智能检测在汽车维修中的体现

### 4.1 故障快速定位机制

智能检测技术在汽车维修领域的应用，让故障定位变得更加容易，同时也带来了全新的工作方式。过去，诊断故障全靠技术人员积累的经验和手动检查的方式，很容易出现误判或者遗漏问题，整个过程显得特别漫长。现在，人工智能技术的加入，让故障检测变得相当迅速和精确，大大节省了时间成本，同时也提高了工作的可靠性。

人工智能利用整合传感器、数据采集、机器学习算法，把车辆运行数据即时获取并且开展解析。依托大数据的深度学习模型可以自行辨识异常特征，同历史数据开展对比，迅速确定故障出现的位置和原因。此流程不依靠人为因素，高效减少人为疏漏，提升诊断的准确性。智能检测系统可以独立检测常见问题，例如引擎故障、电子系统异常等等，并且产出详尽的诊断报告，给技师开展验证和维修。

智能检测不但不局限于单一故障，还可对于潜在问题开展预警，防范于未然。于车辆显现异常尚未时，系统可以预估部件磨损或者性能降低的趋势，提示适时维护，因此降低突发故障引发的停机时间。借助上述机制，人工智能检测技术于提高故障诊断效率的同时并且给汽车维修行业节省了众多人力和时间成本，增强了客户满意度，促进了行业全面服务质量的提高。

### 4.2 维修效率与成本管控

智能检测技术可以提升维修工作的效率，同时还能有效减少运营所需的费用，展现出非常突出的优势。说到维修效率这个方面，人工智能检测技术会利用大数据分析和机器学习算法，对车辆的运行状况进行监控和故障的提前预判，一旦发现不正常的情况就会迅速发出警报，指出问题的具体来源在哪里。这样的准确诊断方法可以规避传统方式中人工

评估可能出现的错误,也能减少诊断所需的操作步骤,使得维修人员能够直接针对故障的位置开展维修工作,从而大大缩短整个维修所需要的时间。

在成本管控方面,智能检测技术可以高效发挥汽车故障数据,协助维修企业精确拟定个性化解决方案,降低反复维修或者错修造成的资源浪费。依托人工智能的预测性维护策略可以预先察觉隐性故障,防止由于设备突然故障引发的多余损失,因此明显缩减维修投入成本。智能检测的自动化、精准化特点降低了对于专业维修技师的依靠,有利于改善人力资源配置,更深入地缩减人工成本。

借助于在维修效率与成本管理领域的应用,智能检测技术不但明显提升了维修作业的准确度与及时性,并且给汽车维修行业的智能化发展给予了技术支撑与商业价值。

## 5 未来发展方向与实践意义

### 5.1 转型升级驱动因素

随着汽车维修行业朝智能化方向不断迈进,人工智能检测技术的应用已经慢慢变成促进整个行业革新升级的关键推动力量。从技术层面来看,人工智能领域取得的突破性进展让汽车维修工作拥有了更加出色的智能化表现。借助机器学习和深度学习这些前沿技术手段,人们可以马上处理各种故障数据,同时针对车辆内部的复杂系统进行非常准确的故障诊断,这种依靠海量数据分析来实现的智能检测方式,能够明显提高维修工作的合理性和准确性。大数据技术的大范围应用同样给汽车维修工作提供了多方面的数据支持基础,这样就形成了提前预判故障的能力,有助于及时发现并避免可能出现的安全隐患问题。

从市场需求的角度分析,现代消费者越来越看重汽车维修服务的质量和效率表现。人工智能检测技术完全可以达成消费者对于快捷、可靠、迅速服务的需求期望,助力维修行业实现服务体验成为核心目标的目标转变。处于政策扶持和产业发展的环境条件之下,智能化维修解决方案得到了普遍运用,给行业企业带来技术方面的支持机会,帮助提升市场竞争实力和市场占有率。

### 5.2 行业智能化前景讨论

智能检测技术已经变成汽车维修行业今后发展最重要发展方向。人工智能检测技术得到广泛使用预计会在技术创新和商业模式改变两个方面产生长远而且深刻影响。智能检测技术能够慢慢完成从过去依靠人工操作完全转变成现在实现自动化诊断,这样就能给遇到复杂故障时候处理工作提

供更加方便快速而且准确技术支持。智能检测技术带来数据分析能力会推动整个维修流程变得更加标准统一,从而让服务过程变得更加公开透明并且质量保持稳定可靠。这样的变化既改善了顾客实际使用体验,同时也帮助整个行业变得更加强大更有竞争实力。随着智能网联技术和大数据两个方面进一步深入融合在一起,汽车维修行业里面智能服务体系慢慢变得更加完善齐全,维护保养业务从过去仅仅停留在简单功能转变成为现在覆盖全面多种服务方式成为一种全新发展潮流。智能检测技术得到普遍推广以后还会给整个行业带来技术升级和商业模式改变提供强大推动力量,同时为整个行业建立起牢固技术基础和发展框架提供坚实支撑保障。

## 6 结语

文章全面考察人工智能检测技术用于汽车维修过程。仔细比较现在智能检测流程跟传统故障诊断方式,清楚说明人工智能技术快速找到故障位置并且准确判断故障具备明显好处,明显提升维修效率,降低运行费用,而且整体提高服务水平。文章建立完整理论框架,给智能检测技术实际使用提供科学依据,同时给汽车维修行业走向智能化提供实践基础。必须关注目前研究还存在数据收集不够全面、算法模型适用范围不够广泛这些缺点,针对检测流程精确程度以及现场环境复杂程度需要继续深入验证。接下来工作可以集中几个方向开展,利用大量真实车辆实验加上海量数据帮助,完善检测样本库,提升模型精确程度。改进算法设计,增强系统面对各种故障类型自动识别能力。加强不同专业之间合作,促进相应技术标准以及规则制定,给汽车维修技术向智能化转变提供更加完整技术支持。文章给智能检测技术用于汽车维修过程带来有用探索以及理论指导,具有很高实用价值以及推广价值。

### 参考文献

- [1] 袁苑谢凯.人工智能技术在电气故障诊断中的应用[J].现代制造技术与装备,2022,58(02):197-199.
- [2] 孙琳.人工智能技术在智能网联汽车中的应用[J].汽车测试报告,2023,(12):40-42.
- [3] 邓登云.人工智能背景下汽车维修技术发展研究[J].汽车测试报告,2023,(14):91-93.
- [4] 帅宗良.人工智能检测技术在汽车维修中的应用[J].移动通信,2023,45(05):138-139.
- [5] 张栋,周海波,周毅,李许,徐晓光.人工智能技术在设备故障检测中的应用[J].化纤与纺织技术,2021,50(04):109-110.

# Implementation and Challenges of Smart Manufacturing in the Automotive Industry

Qiang Wang

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

## Abstract

As the global manufacturing sector moves towards intelligent transformation, the automotive industry is experiencing a critical period of technological advancement and production capacity restructuring. Based on the core concepts of smart manufacturing, this paper examines its application pathways in the automotive industry from the perspectives of system planning, information integration, and equipment connectivity. Through theoretical analysis and field research, key implementation stages and operational bottlenecks are summarized. The findings indicate that smart manufacturing significantly enhances production efficiency and product quality, yet challenges remain in areas such as technology integration, collaborative management, and organizational change. The study also highlights the importance of corporate culture in facilitating technological convergence and fostering cross-disciplinary collaborative innovation, providing theoretical support and practical insights for the high-quality transformation of the automotive industry.

## Keywords

Smart manufacturing; Automotive industry; System planning; Technology integration; Cross-disciplinary collaborative innovation

## 智能制造在汽车工业中的实施与挑战

王强

内蒙古铁辰智能装备有限公司，中国，内蒙古 鄂尔多斯 017000

## 摘要

伴随全球制造业走向智能化转型，汽车产业正在经历技术升级和产能重构的重要时期。本文基于智能制造核心理念，自系统规划、信息集成与装备互联等方面研究其于汽车工业中的应用路径，借助理论梳理和实地调研，总结出关键实施环节与障碍瓶颈。研究结果表明，智能制造显著提高了生产效率和产品质量，然而于技术融合、协同管理以及组织变革等方面依旧遭遇挑战。研究也阐明了企业文化与技术融合的重要性，促进跨界协同创新，给汽车产业达成高质量转型供给理论支持和实践启示。

## 关键词

智能制造；汽车产业；系统规划；技术融合；跨界协同创新；

## 1 引言

全球制造业智能化转型的大潮一直都在推动向前发展，汽车工业因此不得不面对技术方面的更新换代、生产规模的重新调整以及整个组织结构的彻底改变等各种难题。国内汽车产业的年产量和整体规模都得到了非常明显的提升，但是随之而来的问题也变得越来越突出，例如装备的数字化升级不够到位，信息之间的整合还不够完善。希望通过研究找出企业在推行智能制造时碰到的技术难点和管理问题所在，寻找企业文化与技术创新结合的方式，最终为汽车产业实现更高层次的发展提供全面的理论依据和具体的实践指导建议。

【作者简介】王强（1990-），男，中国内蒙古包头人，本科，工程师，从事电池系统、电驱系统、整车热管理、决策与控制、无人化特种装备、5G+多机编队研究。

## 2 汽车工业与智能制造背景

### 2.1 汽车产业现状与转型动力

汽车产业现在正处在历史性的变化关键时期，先进制造方式的出现给这个古老行业带来了全新发展的活力。全世界汽车制造业都在进行一场深刻的科技升级和整体调整，当前情况清楚显示，自动控制加上数字工具的普遍使用已经变成必然方向。汽车生产厂家除了承受价格上涨带来的困难和市场里面的激烈竞争，还要面对客户想要拥有独特并且充满智能特点的车型这些要求。解决上面提到的各种难题，先进制造方式依靠追求更少浪费、响应速度更快以及能够长期持续发展这三个优点，逐渐转变成为汽车制造业摆脱当前困境、达成高效批量生产的最重要方法。

智能制造的重点在于运用前沿的信息技术和生产方法，来完成整个生产链的连接、合作以及改进。这样能够提高生产流程的智慧化程度，同时还能增强企业适应市场变动的灵

活程度和反应效率。智能制造在汽车产业里面的使用已经取得了一定进展,涵盖了数字化的设计方案、智慧型的生产线、还有车联网这些新兴技术的实际测试和广泛推广。想要完成从传统生产方式到智能制造模式的彻底转变,还需要认真处理好技术整合、数据保护、标准统一等一系列难题。政策支持 and 产业链之间的联合也在帮助汽车产业向智能化方向发展方面发挥有关键作用。通过不断的技术革新和管理升级,智能制造将会带领汽车产业迈向更加高能、环保和智能的发展道路。

## 2.2 智能制造核心理念与全球趋势

智能制造是一种全新的制造方式,重点是利用数字化、网络化和智能化的技术手段来改善生产流程,让资源得到合理分配,达到最好的使用效果。核心思想是收集和分析各种信息,把生产设备连接起来,让机器具备自主判断的能力,从而让整个生产过程变得更加智能。全球很多国家和地区都非常关注这种技术的发展,美国提出工业互联网这个概念,德国推出工业4.0计划,中国也制定了中国制造2025的具体方案,目的都是促进智能制造技术在传统产业中的应用和推广。这种技术被看作是提高国家制造业竞争能力的关键方法,对全世界的制造行业产生了很大的作用。制造效率得到了很大提升,生产的适应性也变得更强大,产品的个性化需求能够更好地满足。随着物联网、云计算、大数据和人工智能这些技术的广泛应用,智能制造领域成功打破了技术上的障碍,推动了全球汽车产业链向更加紧密合作和灵活适应的方向发展,最终引领汽车工业进入一个充满智慧和数字特征的新时代。

## 3 信息系统与装备互联架构

### 3.1 系统规划框架与信息集成

在智能制造的大环境下,汽车工业的信息系统和装备之间建立了紧密的连接关系,这种连接关系起到了非常关键的作用。想要实现信息系统和装备之间的互联互通,就必须先搭建起一个清晰的规划框架,只有这样才能为后续工作提供坚实的基础。在规划这个框架的时候,需要特别关注信息流、工作流和物料流的合理融合,做到这些融合的同时,必须重视技术上的全面统一,还要注重组织和协调方面的细致安排。信息集成是系统规划中一个不可或缺的部分,必须对数据的收集、传输和处理进行彻底的改进和优化,确保能够迅速做出反应,并且给予精确的决策支持。

信息融合的另一重要方面是数据的互通性和规范性。对来自不同渠道收集到的数据实施规范化整理,可以增强系统彼此的适配性,降低信息壁垒问题。这必须依据行业准则建立数据传输规则,来确保各个信息子系统以及设备部件能够顺畅连接,防止因为准则差异造成的障碍,推动不同部门之间信息传递更为流畅并且高效。

信息集成还涵盖借助尖端的数据分析技术对于海量数

据实施处理,来获得有价值的业务洞察。这些技术涵盖机器学习、人工智能和大数据分析等等,它们于提高系统的智能化与自动化水平内担当了关键作用。这不但推动了生产环节的改进和效率提高,亦给质量控制和产品创新带来了稳固的数据基础。借助彻底的信息系统集成,智能制造在汽车工业内的应用可以达成更加迅速、更加机动的生产管理,给行业的技术变革和创新驱动给予了支撑。

### 3.2 装备互联功能与资源整合

装备之间连接功能以及资源共享对智能制造发挥关键作用。借助物联网技术,生产设备能够完成实时数据传送和互相连接,推动工厂车间转向智慧化方向发展。装备彼此信息互通和即时互动,让生产流程的改善和调节变得更加准确,明显减少资源损耗和能量消耗。资源共享层面,智能调度系统加上大数据分析工具的使用,使设备的利用效率和生产效能大幅提高。依托云计算平台,不同生产线还有供应链上下游的资源共享变得流畅,构建出弹性的生产网络以及供应体系,加快对市场变动的应变能力。装备智慧化以及资源共享方式,不但协助企业达成生产过程的可视化和透明化,而且给管理决策给予数据依据。装备智慧化以及资源共享方式,已经成为促进汽车工业迈向智能制造的主要途径。

## 4 技术融合与跨界协同创新

### 4.1 关键技术对接与融合机制

于智能制造朝汽车工业深入融入的过程中,关键技术的对接与融合机制形成了一个关键要素。智能制造涵盖物联网、大数据分析、人工智能以及云计算等诸多技术,它们彼此融合可以构建出一个智慧化、信息化的生产系统。于这一过程中,核心取决于把差异技术模块高效整合,构建统一和谐的运作体系。把大数据分析运用于生产过程中,能达成对于设备状态的即时监测和故障预测,因此增强生产线的可靠性和效能。借助人智能算法对于生产数据开展深刻分析,能察觉隐含的工艺优化点,改善生产精度与产品质量。物联网技术的应用,令差异生产设备和系统彼此可以开展迅速的信息互通与交流,达成资源的最优分配。

云计算技术的导入,带来了海量数据处理和存储的支撑,让生产系统可以面对巨大的数据量,并达成实时响应与调节。在此基础上,企业必须构造一个开放且弹性的技术架构,用以支撑新技术的导入与整合。这必须在内部搭建一个极度敏捷的技术响应与刷新机制,保证在迅捷变动的技术环境中,可以持久维持技术前沿。另外应当重视技术与管理和业务流程的深入结合,突破常规的组织边界,达成各部门间的高效协作,促进技术整合的成功执行。只有通过多方协作配合,方能完全激发智能制造在汽车工业中的潜能,达成高效、高水平的生产能力提高。

### 4.2 跨界协同中的文化契合

于达成智能制造过程中,跨界协同中的文化契合担当

了关键角色。文化契合推动了技术领域之间的顺畅连接还有组织之间的协作。企业内部文化的开放性和适应性变成驱动跨界协同的核心动力。开放的企业文化激励创新,提升员工于技术融合环境中的接纳度和投入度。此种文化环境给员工给予了钻研与掌握的空间,提升了跨学科团队交流与领会能力。跨界协同仍需处理差异文化之间的矛盾,借助构建一致的目标和认同的价值观,企业可以降低冲突,达成更加高效的交流与协作。一个优秀的文化契合环境不但提升了协同创新的效率,并且为智能制造的顺利执行筑牢了基础。企业在推动智能转型之际,应当强化文化建设,促进协同效应的极致化。

## 5 实施障碍与对策探索

### 5.1 技术瓶颈与管理难题

汽车工业里面推进智能制造工作时候,技术障碍和管理困难构成非常突出的挑战。技术障碍最主要表现就是智能制造系统跟现在使用的技术结合起来特别难。各个技术平台之间接口标准完全不一样,造成数据实时获取和互相分享出现很大阻碍,信息处理速度无法得到明显提高。先进自动化设备跟传统生产线存在配合不好情况,直接引发生产过程经常发生中断并且大量资源白白消耗掉。管理困难主要表现在企业内部文化能不能跟得上、不同部门之间合作是不是高效顺畅。处于快速变动技术环境当中,企业内部文化对于新技术接受水平显得特别关键,员工掌握并熟练使用智能制造系统能力成为系统顺利实施最重要条件。

管理层处理人力资源和技术资源方面的困难时会遇到很多麻烦,因为智能制造系统需要不同部门之间的密切合作和共同努力,所以搭建一套顺畅的沟通方式来确保信息能够准确无误地传递出去,这是一个非常重要的难题。不同区域之间的产业链合作效率比较低,严重阻碍了智能制造系统走向国际市场的步伐。有些公司没有采用创新思维来管理,使得新技术的接受和使用速度变得很慢,反应也显得特别迟缓,这种情况让技术实施过程中遇到的困难变得更加严重。想要解决这些难题,必须从技术标准制定、管理体系更新、企业文化塑造等多个方面全面进行改进,只有这样才能让智能制造技术在汽车行业中得到顺利推广和发展。这样做可以大幅提升生产效率和产品质量水平,提供非常稳固的支持基础,同时还能有效促进整个汽车行业的高质量发展和转型升级目标的实现。

### 5.2 组织变革与跨域协作机制

智能制造环境里面,汽车工业内部组织调整以及跨行

业协作方式面对全新困难。组织调整成为企业适应智能制造需求最重要因素,具体表现转变传统层级分明结构成为扁平并且网络形式结构。这种转变加快消息传递速度,提高反应效率,并且支撑创造能力。这种转变通常伴随管理复杂程度增加以及权力分配重新安排。跨行业协作方式建设成为缩小技术跟实际使用之间差异最重要路径,具体做法整合各个专业领域资源跟知识,实现价值链条联合产生更大效果。协作过程需要消除传统部门界限,加大公开交流与资源共同利用,从而增强整体竞争实力。成功跨行业协作依靠企业彼此信赖建立跟维持,这个过程必须包含共同目标跟相互帮助原则,还要涵盖文化认同跟沟通渠道优化。

## 6 结语

深入研究智能制造的核心思想在汽车工业里面的使用方法,完整整理出从整体设计规划、信息整合连接到设备互连接这些重要部分,清楚说明了技术结合、团队合作以及组织方式改变里面遇到的主要困难。研究得出的结论显示,智能制造可以大幅提高生产速度并且明显提升产品品质,同时给汽车工业完成高水平转变提供了理论基础和具体操作例子。研究同时也指出,跨系统数据合并、企业文化互相融合以及不同行业之间合作创新这些方面仍然面临很大困难,特别是在技术标准统一、信息安全保护以及知识产权维护这几个具体领域,目前应用还没有完全解决这些问题。接下来研究建议应该集中力量在以下三个方面开展工作,第一,把智能制造技术真正深入融入到传统制造方式里面去;第二,建立覆盖多个层次、涉及不同领域的合作管理机制;第三,积极寻找一套完整的政策支持体系和标准规范体系,来帮助智能制造技术能够更加顺利地更大范围内得到应用和推广。继续深入开展研究将会推动汽车产业以更快的速度、更可靠的方式完成智能化转变,为相关的理论研究和实际操作探索提供全新的发展方向和宝贵经验。

### 参考文献

- [1] 伊万.智能汽车产业链如何协同融合[J].汽车纵横,2021,(07):51-55.
- [2] 李锦程.装备智能制造5G技术在汽车工业制造中的应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022,(02):0260-0262.
- [3] 左常宁.智能制造在汽车制造业中的应用[J].汽车测试报告,2023,(11):4-6.
- [4] 马庭松.智能制造在汽车总装专业的应用[J].汽车工艺师,2023,(03):6-9.
- [5] 陈健华王孝勇.汽车产业智能制造转型升级建议[J].汽车知识,2023,23(02):10-12.

# Research on Crystallization Technology for Drug Synthesis

Guangming Sang

Chia Tai Tianqing Pharmaceutical Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222062, China

## Abstract

The rapid development of socio-economic progress and continuous advancement in scientific research have significantly propelled pharmaceutical production technologies. As a critical component in drug manufacturing, drug synthesis crystallization plays a pivotal role in determining therapeutic efficacy and patient outcomes. Consequently, this technology has become a key focus in pharmaceutical industry research in recent years. Key challenges in crystallization technology include achieving higher purity crystals and ensuring drug activity. Effective process control can be achieved through three critical steps: dissolution curve analysis, mesophilic zone width measurement, and crystallization kinetics studies. Integrating crystallization techniques with precision process controls will enhance the practical application outcomes of pharmaceutical synthesis crystallization technologies.

## Keywords

Drug synthesis crystallization technology; Technical process; Technical control; Drug production

## 药物合成结晶技术相关研究

桑光明

正大天晴药业集团股份有限公司, 中国·江苏连云港 222062

## 摘要

经济社会的迅速发展以及科技研究的不断深入使得药物生产技术也得到了长足发展。药物合成结晶作为药物生产中十分重要的组成部分, 结晶质量直接影响药物疗效与临床应用, 因此近几年来药物合成结晶技术也成为了医药行业研究的技术重点。如何合成更高纯度的结晶、保障药物活性是药物合成结晶技术研究中需主要分析的问题, 可以从测定溶解度曲线、测定介稳区宽度、研究结晶动力学三个环节做好药物合成结晶过程的把控, 配合结晶技术的应用和技术控制提高药物合成结晶技术的应用成效。

## 关键词

药物合成结晶技术; 结晶过程控制; 结晶工艺优化; 药物纯度

## 1 引言

药物合成结晶技术是采用结晶处理的方式提取出药物成分, 借助结晶法分离并提纯药物, 保证药品药效。近几年来制药行业对于药物纯度的要求在不断上升, 药物合成结晶技术的科学应用更是成为了相关企业及研究人员关注的焦点问题, 了解药物合成结晶过程、常用的药物合成结晶技术及其技术控制方法是十分必要的。

## 2 药物合成结晶过程

以某药物合成结晶为例, 可从如下几个环节出发加强过程控制, 保障药物合成结晶效果, 如图 1 所示。首先应测定溶解度曲线, 对结晶溶解度作出适当调整。在溶解度曲线测定的过程中可向三角瓶中加入适量溶剂, 密封后通过恒温水浴来进行测定, 测定期间应确保溶剂使用过量, 待固液平

衡并静置一天以上取上层饱和清液稀释定容, 落实吸光度检测, 确定溶剂含量, 绘制溶解度曲线。

其次需要测定介稳区宽度, 介稳区宽度可有效分析药物合成结晶时溶液过饱和度和结晶体的关联性, 可通过介稳区宽度测定来更好地确保后续合成结晶的稳定性, 保障结晶质量。因在药物合成结晶中晶体、温度、搅拌力度等相应因素都很有可能会影响结晶效果和结晶质量, 而介稳区宽度测定则可以为后续各参数的调整提供参考, 保障合成结晶的效果。在介稳区宽度测定期间需要引入药物合成结晶时使用的饱和溶液, 将其倒入到三角瓶内, 同样通过水浴的方式进行检测。在检测中需要调节冷却水, 控制温度变化速率, 饱和溶液需要在高于恒定温度的条件中, 恒温维持 10 分钟以后快速冷却至饱和温度, 将相同药物结晶体放置于溶液当中至溶液析出大量晶体记录温度数据, 计算该温度和饱和温度的最大差值, 绘制溶解度曲线, 分析介稳区宽度。

最后需要研究结晶动力学, 悬浮密度、过饱和度、粒度是结晶动力学研究的核心和重点, 做好这三个要素的控制

【作者简介】桑光明 (1985-), 男, 中国江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 从事药物研发研究。

可更好地保障药物合成结晶的速率和稳定性。悬浮密度是指在同等单位体积的溶液中能够析出的药物结晶体质量，悬浮密度对于药物合成结晶的速率影响是相对较大的，可通过悬浮密度测试对药物合成结晶技术参数作出调整，确保药物合成结晶处于最佳状态。过饱和度主要分析的是药物合成晶体在结晶时的溶液体系，分析结晶所用溶液，可采用粒度分析仪进行检测，明确结晶体的粒度大小及结晶时的分布状态。



图 1: 药物合成结晶过程

## 3 药物合成结晶技术

### 3.1 结晶技术

就现阶段来看，在制药的过程中常用的药物合成结晶技术主要为近平衡态结晶和远平衡态结晶，近平衡态结晶是指在药物合成结晶的过程中需确保在近平衡态条件下完成药物合成，通过结晶技术应用生成非均匀或均匀的结晶体。在药物合成过程中形成结晶的场所内出现均匀结晶体的概率会大大增加，且能够有序均匀的排列。一般情况下药物合成结晶受多重因素的影响，生成均匀结晶体的难度较高，且排列顺序也是相对而言较为混乱的，可借助容器壁、杯体等相应基质将晶体排列在介质表面。为了进一步提高药物合成结晶效果，在实践操作中可选用较为粗糙的介质体，使药物结晶体能够在介质体中生长。当然若想使结晶药物更加光滑，在介质体选择的过程中则应当倾向于材质细腻的物品。

远平衡态结晶是指在药物结晶的过程中打破近平衡态的结晶体系，提高药物结晶的效率和稳定性。可以在药物结晶前期借助高浓度生长体系缓慢破坏药物溶质，同时生长体系中的外部压力也会随之发生变化，逐渐增大，以此来满足药物结晶需求。在药物结晶期间还会受到周期张力的影响，药物结晶会随着时间的推移向生长体系中心点方向移动，并由内而外的扩散。若药物结晶体在生长体系范围内进行扩散同时会带动一些小晶体形成大量药物结晶体。

### 3.2 技术控制

药物合成结晶技术的干扰因素是相对较多的，想要保证结晶体的药效就必须加强技术控制，做好药物合成结晶技术过程的管控。在技术控制上可以紧抓过饱和度、多晶型管理、颗粒度与形貌调控、杂质去除四大关键点展开分析，如图 2 所示。

#### 3.2.1 过饱和度

过饱和度是结晶的根本驱动力，也是控制结晶体成核和生长的关键变量，当溶液浓度超过其平衡溶解度时系统就会处于过饱和状态，存在晶体析出的趋势，这时如何释放能

量、保障最终晶体品质则成为了十分关键的问题。在结晶的过程中介稳区是十分重要的区域，在该区域内溶液虽然已经达到饱和状态但却不会自发成核。在技术控制期间可通过控温或反溶剂滴加等多种方式使体系的过饱和度维持在该区间，为晶体生长提供较好的环境。但是若控制不当则会导致过饱和度瞬间飙升，越过介稳区上限进而产生大量细小且不规则的晶体，难以过滤洗涤，还很有可能会包裹母液和杂质影响产品质量<sup>[1]</sup>。



图 2: 药物合成结晶技术控制要点

而就现阶段来看在过饱和度控制上可供借鉴和选择的方法是相对较多的。例如聚焦光束反射测量技术的应用则可以实时监测体系内颗粒数量和尺寸的变化，若发现颗粒数量急剧增加则意味着可能出现了二次成核问题，系统会自动发出反馈信息，并通过降温速率或搅拌速度调节拉回至可控范围，确保晶体能够平稳且有序的生长。

#### 3.2.2 多晶型管理

同一化学物质可能会有不同的晶体结构存在，而不同晶型在溶解度、熔点、密度和稳定性上存在着鲜明差异，会影响药物的溶出速率和生物利用度，因此做好多晶型管理、锁定目标晶型也是药物合成结晶过程中十分重要的一环。多晶型控制的本质是通过热力学和动力学的分析精准控制结晶路径。一般情况下在药品制作的过程中稳定的晶型溶解度更低，但在某些条件下亚稳态的晶型可能会优先析出<sup>[2]</sup>。

在多晶型管理中控制要点在于分析如何利用不同晶型的溶解度曲线，精确控制结晶方向，绕过亚稳态晶型的析出区。例如可借助精准技术在介稳区内向体系中投入目标晶型的纯品作为种子，引导溶质分子在较低过饱和度下，优先在晶体表面进行有序排列和生长，遏制其他晶型的成核。此外在晶型管理中溶剂的科学应用与选择也是十分重要的，部分溶剂分子可能会嵌入晶格中生成溶剂化物或改变晶面的生长速率进而生成特定晶型。在工艺开发及技术管理中可通过晶型筛选，配合在线拉曼光谱等 PAT 工具监控晶型转变过程，确保晶型的单一性和稳定性，避免混晶导致药品质量受到冲击<sup>[3]</sup>。

#### 3.2.3 粒度与形貌调控

药物的粒度分布和晶体形貌对于药物后续的过滤、干燥、混合、压片等相应工序的质量和效率也会产生至关重要

的影响,想要确保晶体粒径适中、具备良好的流动性,就必须加强粒度与形貌调控。在粒度调控上可通过平衡成核与生长达到预期目标,在该环节搅拌起到了十分重要的作用,可通过搅拌来推动传质传热,确保体系均匀。但是需要注意剪切力过高可能会导致正在生长的晶体被打碎产生二次晶核,致使粒度变小。因此需要在结晶初期提高转速,确保溶解和混合效果,在生长阶段则需要降低转速,为晶体生长提供温和稳定的生长环境。若晶体形貌不佳这时则可通过温度循环技术对晶体形状进行优化,即可通过周期性小幅度升降温度,借助奥斯特瓦尔德熟化原理溶解尖锐细小的晶体,使溶质沉积至较大晶体的凹陷处,让晶体更加饱满、规整<sup>[4]</sup>。

### 3.2.4 杂质去除

结晶的目的是为了提纯,保障药品纯度,进而提高药品质量,而在结晶的过程中晶体内也很有可能存在杂质。一般情况下这些杂质会吸附于晶体表面或通过母液包裹的形式影响晶体质量。若杂质在晶体表面吸附,其去除难度是相对较低的,可通过洗涤步骤的适当优化,使用冷溶剂对晶体进行洗涤,置换掉吸附于晶体表面的母液去除杂质。但是母液包裹的杂质在清理上较为困难,这类杂质往往是在晶体生长过程中出现的,如果晶体生长速度过快,母液来不及从晶体表面排开,就会存留于晶格内部难以去除。因此想要更好的去除杂质就需要在晶体生长期间加强生长速率的管控,通过缓慢的降温速率或反溶剂滴加速率的调节,让晶体能够有充足的时间进行有序排列,将杂质分子排斥在晶格之外。此外获得粒度较大、形貌完整的晶体,其表面积更小,也可以减少表面吸附杂质的总量,有利于固液分离,提高产品纯度<sup>[5]</sup>。

### 3.3 新技术应用

就现阶段来看常见的药物合成结晶技术主要包含降温法、蒸发法、盐析法等等,而随着技术研究的不断深化和发展,新型结晶技术不断涌现,为药物合成结晶提供了更多的技术选择,较为常见的主要包含准乳化结晶技术、超临界流

体结晶技术等相应的结晶技术。准乳化结晶技术可以先将药物溶液分散在连续的小液滴内均相成核,为非均匀成核提供了新的技术选择,保障了成核效果。超临界流体结晶技术则是利用超临界药物溶液快速膨胀或气体抗溶剂过程,加速溶液饱和度达到结晶成核的目标。此外微重力结晶技术、超重力结晶技术、高通量结晶技术等相应药物合成结晶技术的应用也可以更好地保障药物生产质量,需根据实际情况进行科学选择<sup>[6]</sup>。

## 4 结语

药物合成结晶技术的合理应用是确保药物生产质量和生产品质的重要基石,必须引起关注和重视,紧抓测定溶解度曲线、测定介稳区宽度、研究结晶动力学完成过程控制,在此基础之上合理选择结晶技术,并通过过饱和度控制、多晶型管理、粒度与形貌调控、杂质去除提高结晶质量。

## 参考文献

- [1] Paul, E. L., et al. (2005). "Organic crystallization processes." *Powder technology* 150(2): 133-143.
- [2] Nordstrom, F. L., et al. (2023). "Prevalence of Impurity Retention Mechanisms in Pharmaceutical Crystallizations." *Organic Process Research & Development* 27(4): 723-741.
- [3] Herman, C., et al. (2012). "Use of in Situ Raman, FBRM, and ATR-FTIR Probes for the Understanding of the Solvent-Mediated Polymorphic Transformation of II-I Etiracetam in Methanol." *Organic Process Research & Development* 16(1): 49-56.
- [4] 刘培鸿,丁朝旺,石艳彩,等. 基于连续流微反应-结晶耦合技术的阿托伐他汀钙母核绿色合成工艺研究 [J]. *化学研究与应用*, 2026, 38 (02): 450-455.
- [5] 张苗苗,何蕙利,屈撑囤. 碳酸氢钠结晶抑制剂的合成与性能评价 [J]. *石油化工应用*, 2025, 44 (12): 6-9.
- [6] 杨超,刘红宇,钟家春,等. 高分子量结晶性聚芳醚腈的合成与性能 [J]. *塑料工业*, 2025, 53 (10): 13-18+70.

# Research on Application and Development of Power Engineering Technology under the Background of Smart Grid

Lingling Wang

State Grid Henan Electric Power Company Anyang County Power Supply Company, Anyang, Henan, 455000, China

## Abstract

Driven by the dual objectives of carbon peaking and carbon neutrality alongside the development of new power systems, smart grids have emerged as a pivotal direction for the power industry's transformation and upgrading. Power engineering technologies are undergoing profound changes toward digitalization, intelligentization, and greenification. As a key industrial city and energy hub in northern Henan Province, Anyang City has vigorously advanced smart grid-powered power engineering projects by leveraging local industrial characteristics and grid modernization needs. Significant phased achievements have been made in areas such as renewable energy integration, intelligent power transmission and distribution, energy storage applications, and virtual power plant deployment. This paper analyzes typical smart grid application cases in Anyang's power engineering sector based on core technological features, identifies current technical challenges and shortcomings, and forecasts future development trends. The findings provide theoretical references and practical insights for intelligent upgrades of power engineering systems and efficient grid operations in Anyang and similar cities.

## Keywords

smart grid; power engineering technology; Anyang City; new energy grid integration; virtual power plant

## 智能电网背景下电力工程技术应用与发展研究

王玲玲

国网河南省电力公司安阳县供电公司, 中国·河南 安阳 455000

## 摘要

在“双碳”目标与新型电力系统建设的双重驱动下,智能电网成为电力行业转型升级的核心方向,电力工程技术也朝着数字化、智能化、绿色化方向深度变革。安阳市作为豫北地区重要的工业城市与能源枢纽,依托本地产业特色与电网升级需求,大力推进智能电网背景下的电力工程建设,在新能源并网、智能输配电、储能应用、虚拟电厂等领域取得阶段性成果。本文结合智能电网核心技术特征,剖析安阳电力工程典型应用案例,梳理当前技术应用痛点与短板,进而预判未来发展趋势,为安阳及同类城市电力工程智能化升级、电网高效运维提供理论参考与实践思路。

## 关键词

智能电网; 电力工程技术; 安阳市; 新能源并网; 虚拟电厂

## 1 引言

智能电网是以物理电网为基础,融合大数据、人工智能、物联网、柔性输电等先进技术,实现电网发电、输电、变电、配电、用电、调度全环节智能感知、协同调控与高效运行的新型电力系统,具备自愈、兼容、互动、高效等核心优势。电力工程技术作为智能电网建设的核心支撑,贯穿电网规划、建设、运维、改造全流程,直接决定电网智能化水平与供电可靠性<sup>[1]</sup>。

安阳市地处豫晋冀三省交界,既是传统重工业基地,也是豫北能源输送关键节点,近年来电动重卡、分布式光伏、

新型化工产业园等新业态快速发展,对电网供电能力、稳定性、灵活性提出更高要求。为破解负荷激增、新能源消纳、供电瓶颈等难题,安阳持续推进电力工程智能化改造,落地移动式变电站、虚拟电厂、配网自动化升级等一批重点项目,逐步构建适配本地需求的智能电网体系。基于此,本文立足安阳电力工程实践,探究智能电网技术的落地应用与未来发展路径,具有较强的现实意义。

## 2 智能电网核心电力工程技术概述

智能电网依托多学科交叉技术,形成了覆盖全产业链的电力工程技术体系,核心技术可分为四大类,为电网智能化升级提供技术支撑。

### 2.1 智能输变电技术

智能输变电技术以柔性直流输电、装配式/移动式变电

【作者简介】王玲玲(1991-),女,中国河南安阳人,本科,工程师,从事电力工程技术研究。

站、智能监测设备为核心，突破传统输变电工程建设周期长、运维难度大、灵活性不足的短板。其中，柔性直流输电技术可实现新能源高效并网与远距离低损耗输电；装配式、移动式变电站采用模块化设计，大幅缩短建设周期，适配应急供电与负荷激增场景；智能监测设备可实时采集变电设备运行数据，实现故障提前预警<sup>[2]</sup>。

## 2.2 配电自动化与微电网技术

配电自动化技术通过部署智能开关、故障定位装置、配电终端，实现配电网故障快速隔离、自愈恢复，提升供电可靠性；微电网技术整合分布式光伏、储能、负荷等资源，实现局部区域能源自治，既能并网运行也能孤岛运行，有效提升电网抗扰动能力，适配分布式能源大规模接入场景。

## 2.3 新能源并网与储能技术

针对风电、光伏等新能源间歇性、波动性特征，新能源并网技术通过功率预测、虚拟同步机、无功补偿装置，稳定并网电压与频率；储能技术采用电化学储能、共享储能模式，实现电能“削峰填谷”，提升新能源消纳率，缓解电网调峰压力。

## 2.4 电网调度与数字化管控技术

依托大数据、人工智能、数字孪生技术，构建智能调度平台，整合电网运行、气象、负荷、新能源出力等数据，实现负荷精准预测、潮流优化调控；虚拟电厂技术聚合分布式光伏、储能、可控负荷等分散资源，形成统一调控的“云端电厂”，参与电网调峰调频，提升电网资源利用率。

# 3 安阳市智能电网电力工程技术应用实践

近年来，安阳市紧扣产业发展与民生供电需求，聚焦供电瓶颈破解、新能源消纳、电网韧性提升，落地多项智能电网电力工程，形成了一批可复制的本地应用案例。

## 3.1 移动式 / 装配式变电站工程：破解应急供电与负荷激增难题

安阳作为重工业城市，电动重卡、新型化工产业快速发展，充电站、产业园负荷激增导致局部电网主变重过载问题凸显。2025年，安阳在省电力公司支持下，投入专项资金5.95亿元，创新实施移动式变电站工程，仅用1个月完成内黄东庄、林州申家泊、汤阴古贤等5座110kV移动式变电站投运，新增供电能力16万千伏安，创下省内110kV移动变投运新速度。同时，在安阳县铜冶镇新型化工园区投运首座110kV装配式变电站，建设周期仅3个月，远短于传统变电站1-1.5年的工期，精准满足电动重卡充电与产业园供电需求。

该工程采用模块化预制、车载式部署模式，具备机动性强、投运快、占地少的优势，既解决了重卡充电补能瓶颈，也为电网迎峰度夏、应急保供提供了有力支撑。截至2025年7月，安阳已投运重卡充电站161座，充换电服务业售电

量同比增长176.21%，电网供电能力显著提升<sup>[3]</sup>。

## 3.2 虚拟电厂工程：盘活分布式能源资源

为破解分布式光伏分散、调控难、消纳率低的问题，安阳启动虚拟电厂项目建设，由安投格林科技有限公司牵头，整合全市分布式光伏、储能设施、工商业可调节负荷、电动汽车充电网络等分散资源，构建数字化云端管控平台。该工程通过智能终端实时采集各节点能源数据，依托算法优化实现资源统一调度，既能为电网提供调峰调频服务，缓解高峰供电压力，也能帮助企业优化用电策略、降低用电成本。

虚拟电厂工程的落地，标志着安阳从传统集中式供电向“集中+分散”协同供电转型，有效提升了分布式能源利用率，助力全市清洁能源消纳比例稳居全省前列。

## 3.3 配电网智能化升级工程：提升供电可靠性

针对主城区配电网老旧、故障响应慢的问题，安阳实施市区首条10千伏公用电缆智能化升级工程，部署智能故障定位装置、自动化开关与在线监测设备，实现配电网故障秒级响应、快速隔离自愈。同时，优化20个配网改造项目，通过网架结构柔性互联、负荷灵活转移，提升区域配网供电能力15万千伏安，彻底解决了核心城区与产业园区供电瓶颈。此外，在部分台区建设自适应微电网，配置一体化储能柜，破解光伏反向送电导致的线路重载问题，进一步增强配电网韧性<sup>[4]</sup>。

## 3.4 高压输变电骨干工程：强化电网支撑能力

2026年2月，安阳220千伏展鹏变电站及配套线路工程顺利投产，成为河南省当年首座投运的220千伏变电站。该工程作为铜冶新型化工产业园的核心供电保障项目，破解了区域原有变电站供电不足、网架薄弱的难题，提升了豫北区域电网互联能力与输电稳定性，为大型产业项目落地提供了坚强电力支撑。

# 4 安阳市电力工程技术应用现状分析

## 4.1 安阳智能电网电力工程建设成效统计

见表1。

## 4.2 现存问题与短板

尽管安阳智能电网电力工程建设取得阶段性成果，但结合本地实际，仍存在三大突出问题：一是技术融合深度不足，部分智能设备与现有电网调度平台兼容性差，数据孤岛现象明显，大数据、人工智能技术未实现全流程渗透；二是城乡电网智能化不均衡，主城区、产业园区智能化水平较高，县域、农村地区智能终端覆盖率低，配网自动化程度偏弱；三是专业人才缺口较大，兼具电力工程技术与数字化技能的复合型人才稀缺，制约智能电网运维与技术迭代；四是新能源并网配套工程滞后，部分农村分布式光伏并网流程繁琐、无功补偿设备不足，影响消纳效率。

表1 安阳智能电网电力核心项目及建设成效表

工程类型	核心项目	建设成效	应用价值
移动式/装配式变电站	5座110kV移动变、1座110kV装配式变	新增供电能力16万千伏安,建设周期缩短70%以上	破解负荷激增、应急供电难题
虚拟电厂	分布式能源聚合管控平台	整合光伏、储能等资源超千处,调峰能力显著提升	提升新能源消纳率,优化电网调度
配网智能化升级	10千伏电缆智能化改造、20项配网优化	故障响应时间缩至秒级,供电能力提升15万千伏安	增强供电可靠性,改善营商环境
高压骨干输变电	220千伏展鹏变电站	强化区域电网互联,保障产业园供电	支撑重大产业项目,完善电网网架

## 5 智能电网背景下安阳电力工程技术发展趋势

### 5.1 深化数字技术与电力工程深度融合

未来安阳将推进数字孪生、5G、人工智能与电力工程全场景融合,构建全域感知、全网协同、全业务智能的电网管控体系。一方面,搭建全市统一的电网数字孪生平台,实现输变配设备三维建模、运行仿真、故障预判;另一方面,依托5G低时延、大连接特性,升级智能终端通信网络,实现电网数据实时传输、调度指令秒级下达,推动电网从“自动化”向“智慧化”转型。

### 5.2 推进城乡智能电网一体化建设

聚焦乡村振兴与新型城镇化需求,安阳将加大县域、农村电网智能化改造投入,推广低成本智能终端、模块化配电设备,实现配网自动化全覆盖;同时,结合农村分布式光伏、乡村充电基础设施建设,完善微电网、共享储能配套工程,打通新能源并网“最后一公里”,实现城乡电网供电能力、智能化水平均衡提升。

### 5.3 强化新能源与储能协同工程建设

依托安阳清洁能源资源优势,大力推进风电、光伏集中式并网与分布式开发配套工程,布局规模化共享储能电站,构建“新能源+储能”一体化电力工程体系;优化虚拟电厂管控平台,扩大可控负荷、储能资源聚合范围,提升电网调峰调频能力,助力全市能源结构绿色转型,助力“双碳”目标落地。

### 5.4 打造复合型电力工程人才队伍

加强校企合作,与本地高校、职业院校共建电力工程智能化专业,定向培养数字化电力人才;开展在职人员技能培训,重点提升智能设备运维、大数据分析、电网智能调度等核心技能,打造一支懂技术、善运维、能创新的专业队伍,为电力工程持续升级提供人才保障。

### 5.5 完善智能电网工程标准与运维体系

结合安阳本地电网特征,制定适配的智能电网电力工程建设标准、设备运维规范;建立全生命周期运维管理机制,依托智能监测平台实现设备状态检修、隐患提前处置,降低运维成本,提升电网长期运行可靠性<sup>[5]</sup>。

## 6 结论

智能电网是电力行业转型升级的必然趋势,电力工程技术作为核心支撑,其创新应用直接决定电网高质量发展水平。安阳市通过移动式变电站、虚拟电厂、配网智能化升级等电力工程实践,有效破解了供电瓶颈、提升了新能源消纳能力与供电可靠性,但仍面临技术融合不足、城乡发展不平衡、人才短缺等问题。

未来,安阳需紧扣智能电网发展方向,立足本地产业与电网实际,深化数字技术赋能,推进城乡电网一体化升级,强化新能源与储能协同建设,补齐人才与标准短板,推动电力工程技术持续迭代升级,构建安全、高效、绿色、智能的现代电力系统,为全市经济社会高质量发展提供坚强电力保障。

### 参考文献

- [1] 高中亮,王博,高兴飞.智能电网中电力工程技术的应用与发展研究[J].科技视界,2024(47):89-92.
- [2] 国家能源局.新型电力系统发展蓝皮书[R].北京:国家能源局,2022.
- [3] 国网河南省电力公司.安阳地区智能电网建设三年行动计划(2024-2026)[Z].2024.
- [4] 李刚.柔性输电技术在区域电网升级中的应用研究[J].电力工程技术,2025,44(2):112-116.
- [5] 安阳市发展和改革委员会.安阳市能源绿色低碳转型实施方案(2025-2030)[Z].2025.

# Research on the Application of Bridge Structure Health Monitoring and Evaluation System

Yufu Pu

Sujiao Group Testing and Certification Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211112, China

## Abstract

This article conducts comprehensive and in-depth research and discussion on the health monitoring and evaluation system for bridge structures, systematically analyzing the practical application value and implementation path of this technology system in modern bridge engineering. The article first clarifies the core components of the system, covering key modules such as high-precision sensor deployment, multi-source data acquisition and stable transmission, intelligent data analysis and processing, structural state evaluation and early warning, etc. All links work together to achieve full process and real-time monitoring of bridge structural status. The study further emphasizes that the bridge structure health monitoring and evaluation system is not only an important technical means to ensure the safety of bridge operation and prevent major safety accidents, but also can optimize maintenance strategies through long-term data accumulation, effectively extend the service life of bridges, and provide scientific basis for bridge operation and maintenance management, disease control, and expansion decisions, significantly improving the intelligent and scientific level of bridge lifecycle management. In addition, based on current engineering application practices, the article objectively summarizes the practical problems of the system in terms of long-term reliability of sensors, efficient processing of massive data, precise identification of complex damages, and multi system fusion adaptation. Based on industry development trends, the article provides a forward-looking outlook on the future development direction of bridge structure health monitoring and evaluation from the dimensions of technological innovation, standard improvement, and intelligent upgrading.

## Keywords

bridge structure; Health monitoring; Evaluation system; Case Analysis

## 桥梁结构健康监测与评估系统应用研究

普玉富

苏交科集团检测认证有限公司, 中国·江苏 南京 211112

## 摘要

本文围绕桥梁结构健康监测与评估系统展开全面、深入的研究与探讨, 系统解析了该技术体系在现代桥梁工程中的实际应用价值与实施路径。文章首先明确了系统的核心构成, 涵盖高精度传感器布设、多源数据采集与稳定传输、智能数据分析与处理、结构状态评估与预警等关键模块, 各环节协同运作, 实现对桥梁结构状态的全流程、实时化监测。研究进一步强调, 桥梁结构健康监测与评估系统不仅是保障桥梁运营安全、防范重大安全事故的重要技术手段, 更能通过长期数据积累优化养护策略, 有效延长桥梁使用寿命, 同时为桥梁运维管理、病害治理、改扩建决策提供科学依据, 显著提升桥梁全生命周期管理的智能化与科学化水平。此外, 文章结合当前工程应用实践, 客观梳理了系统在传感器长期可靠性、海量数据高效处理、复杂损伤精准识别、多系统融合适配等方面存在的现实问题, 并立足行业发展趋势, 从技术创新、标准完善、智能升级等维度, 对桥梁结构健康监测与评估领域的未来发展方向进行了前瞻性展望。

## 关键词

桥梁结构; 健康监测; 评估系统; 实例分析

## 1 引言

桥梁作为交通基础设施的关键组成部分, 其结构健康状况直接关系到交通的安全与顺畅。随着桥梁建设规模的不断扩大和服役年限的增长, 桥梁结构健康监测与评估系统的应用变得日益重要。该系统能够实时、动态地监测桥梁结构

的响应, 及时发现潜在的安全隐患, 为桥梁的维护、管理和决策提供科学依据<sup>[1]</sup>。

## 2 桥梁结构健康监测与评估系统的组成

### 2.1 传感器

传感器是桥梁结构健康监测系统的前端感知设备。应变传感器可以测量桥梁结构在荷载作用下的应变变化, 如光纤光栅应变传感器在大型跨海大桥中被广泛应用。加速度传感器能够监测桥梁在风荷载、地震荷载等动态荷载作用下的振动加速度, 像在山区高墩桥梁中, 加速度传感器可实时捕

【作者简介】普玉富(1991-), 男, 中国云南大理人, 本科, 工程师, 从事交通运输工程、桥梁隧道试验检测研究。

捉桥梁的振动情况。还有位移传感器、温度传感器等，它们分别从不同的角度获取桥梁结构的状态信息。

## 2.2 数据采集与传输

数据采集系统负责将传感器获取的模拟信号转换为数字信号，并进行初步的处理和存储。在一些大型桥梁中，如港澳大桥，由于桥梁结构庞大，需要布置大量的传感器，其数据采集系统必须具备高采样频率、大容量存储和稳定的数据传输能力。数据传输方式包括有线传输（如光纤传输）和无线传输（如 ZigBee、GPRS 等）。有线传输稳定性高，适用于长距离、大数据量的传输，而无线传输则具有灵活性强、安装方便等优点，适用于一些难以布线的区域。大桥结构健康监测系统建成后将包括的下列四个子系统。

这四个子系统将运行于四个层次：第一层次是传感器子系统的各传感器在线拾取大桥关键部位的信号；第二层次是将采集到的传感器信号转换成数字信号存储在本地工业用计算机内，同时通过计算机光纤网络输送到数据处理与管理子系统；第三层次是由计算机服务器与工作站组成的计算机系统完成数据的后处理、归档、显示及存储；并根据健康评估系统的指令为其提供特定格式和内容的数据以及处理结果；第四层次是健康评估系统根据监测系统送来的数据进行分析、统计、阈值判别给出评估意见及报警信息，并为养护工作提出建议。

## 2.3 数据分析处理

数据分析处理是桥梁结构健康监测与评估系统的核心环节。通过对采集到的数据进行分析，可以得到桥梁结构的各种响应特征。常用的分析方法包括时域分析、频域分析、小波分析等。时域分析可以直接观察桥梁结构的响应随时间的变化规律，在桥梁遭受突发事件（如车辆碰撞）后的结构状态评估中具有重要作用。频域分析则能够揭示桥梁结构的固有频率等动力特性，对于识别桥梁结构的损伤具有较高的灵敏度。小波分析结合了时域和频域的优点，在处理非平稳信号方面具有独特的优势，可用于分析桥梁在复杂荷载作用下的结构响应。

监测中心内部、数据中心内部网络架构不变，对监测中心到网络中心间的网络连接进行升级优化，采用基于二进制流、文本文件、数据库文件三种数据存储模式。

升级监测中心到数据中心间 VPN 设备版本，增加接入带宽，并优化安全策略。增加数据中心的接入线路数量及带宽，同时应用负载均衡技术，进一步提升接入

带宽、网络安全性与可靠性等，满足更多并发、更大数据量的传输需求。网络层预留基于 4G/5G 的传输接口，未来作为应急备份方案<sup>[2]</sup>。

# 3 桥梁结构健康监测与评估系统的应用实例分析

## 3.1 某跨江大桥概况

该跨江大桥为单跨 730m 的悬索桥，主跨大、交通繁忙。

主桥采用加劲钢桁梁，由主桁架、上下平联、横向桁架组成。主桁架采用华伦式，桁高 5m，桁宽 17.5m，小节间长度 5.0m，大节间（即一个标准节段）长度 10.0m，在每小节处均设横向桁架。上、下平联采用 X 型体系。所有杆件均采用宜加工的工字型截面。全桥共分 73 个节段组拼安装，节段最大吊装长度 10m，节段最大吊装重量 42T。每个节段在工地拼装场地组拼，采用施工缆索吊装就位拼装。

由于地理位置重要，实时监测桥梁健康状况至关重要。大桥安装了应变传感器、加速度传感器和风速仪等设备。应变传感器布置于主塔和主梁关键部位，监测车辆和风荷载作用下的应变；加速度传感器用于监测振动特性。长期数据分析发现，在特定风向和风速下，桥梁振动加速度异常波动，经验证为桥塔附近缆索风致振动引起。为此，采取附加阻尼器等措施抑制缆索振动，确保桥梁安全运营。（二）监测系统的设计原则

大桥结构监测要求监测系统与外部系统互联互通、数据共享，实时展示监测结构”等规定，同时应考虑遵循“先进、适用、稳定、安全、经济、实用”的原则，系统具有有效性、可靠性、经济性及灵活性的特点：

**有效性：**系统的监测数据与预警信号必须有较高的准确性，以降低无谓的复检及应急处理投入。

**可靠性：**系统必须具有较低的故障率以及较好的耐久性，以降低维护成本。

**经济性：**系统造价必须合理，具有较高的性价比，以适应刚构桥梁对状态监测与安全预警的需求。

**灵活性：**系统的传感技术以及数据采集、传输方式必须灵活，并可与人工检测灵活组合，以适应不同桥梁的具体特点有针对性地进行监测与预警。

为了满足《公路桥梁结构监测技术规范》对于单体桥梁结构健康监测系统应与省级长大桥梁结构健康监测平台、部级长大桥梁结构数据平台实现系统互联、数据共享，三级系统平台应统一数据接口、数据格式和传输协议的要求，更新了结构健康监测系统软件平台数据接口、数据格式和传输协议。

## 3.2 监测系统检查及维修

系统自诊断分为系统硬件系统的诊断以及各系统软件的自诊断。作为一个完整的健康监测系统，需要从各方面考虑系统的完好性。既需要考虑结构的硬件系统，也要考虑系统的软件系统，看软件系统是否能完好的工作。软件系统包括信号传输、显示的功能，报表的生成，数据的运转等，这些都需要进行分析，以保证整个系统的完好。

远程监视和控制结构监测系统成为一种趋势也成为一种必要。用户通过因特网访问大桥健康系统，能够及时察看系统的运行状态并及时发现问题、解决问题。方便桥梁管理人员地实时查看健康监测系统的状态及预警信息，迅速快捷地做出应对措施处理。维护健康监测系统更加方便简化，大大减少人员上桥维护次数，节约人力、时间、财力等。

健康监测系统数据作为桥梁状态信息的第一手监测资料,需采取各种措施保证监测数据安全。特别是在硬件设备、软件系统出现故障后,如何保证数据安全至关重要。传感器等硬件系统及采集控制程序等软件系统在运行过程中的损坏不可避免,因此需采用适当措施保证监测数据的安全,拟采取以下措施:定期对监测数据数据库进行备份;派专人对监测数据进行监测,如发现数据异常,及时派人排查问题,并提出处置意见,减少无效数据;在确定传感器硬件系统损坏后,按服务响应程序及时对硬件进行修复或更换;对传感器维护更换后,采取数据修复理论,消除传感器维护对监测数据的影响,保证数据一致性<sup>[9]</sup>。

## 4 桥梁结构健康监测与评估系统应用的意义

### 4.1 保障桥梁安全

通过实时监测桥梁结构的响应,可以及时发现结构的损伤和安全隐患,如裂缝的产生、构件的变形等,从而采取相应的措施进行修复和加固,避免桥梁发生灾难性的破坏。

### 4.2 延长桥梁使用寿命

基于监测数据,可以对桥梁结构的性能退化进行准确评估,合理安排桥梁的维护和保养工作。根据结构的疲劳损伤情况,调整车辆荷载限制或提前进行局部构件的更换,从而延缓桥梁结构的性能衰退,延长其使用寿命。

### 4.3 提升桥梁管理决策的科学性

桥梁结构健康监测与评估系统提供的数据为桥梁管理部门提供了丰富的信息。管理人员可以根据监测数据制定更加合理的桥梁维护计划、交通管制措施等,提高桥梁管理的效率和科学性。

## 5 桥梁结构健康监测与评估系统应用中存在的问题

### 5.1 传感器的耐久性和可靠性

在桥梁长期服役过程中,传感器可能会受到环境因素的影响,导致其性能下降甚至失效。在海边的桥梁,盐雾环境可能会腐蚀传感器的金属部件,影响传感器的测量精度和寿命。

### 5.2 数据处理与分析的复杂性

由于桥梁结构健康监测系统采集的数据量大、数据类型复杂,如何从海量的数据中提取有效的信息并准确评估桥梁结构的健康状况是一个挑战。不同的分析方法可能会得出不同的结果,需要建立更加科学合理的数据分析框架。

### 5.3 系统的成本效益问题

建设和维护桥梁结构健康监测与评估系统需要投入大量的资金,包括传感器的采购、安装,数据采集与传输设备的配置,以及数据分析软件的开发等。如何确保系统带来的

效益能够弥补系统的建设和维护成本,是在推广应用该系统时需要考虑的重要因素。

## 6 桥梁结构健康监测与评估系统的未来发展方向

### 6.1 传感器技术的创新

研发更加耐用、高精度、自诊断功能的传感器,以适应桥梁复杂的服役环境。例如,开发新型的光纤传感器,利用光纤的抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,提高传感器的性能。

### 6.2 大数据与人工智能技术的融合

随着大数据和人工智能技术的发展,将其应用于桥梁结构健康监测与评估领域。利用大数据技术对海量的监测数据进行存储和管理,通过人工智能算法对数据进行分析和处理,提高桥梁结构健康状况评估的准确性和智能化水平。

### 6.3 多源信息融合

将桥梁结构健康监测数据与桥梁设计资料、施工过程数据、维护历史数据等多源信息进行融合,建立更加全面的桥梁结构健康评估模型,为桥梁的全寿命周期管理提供更加准确的决策依据。

## 7 结论

桥梁结构健康监测与评估系统在现代桥梁工程建设与运维管理中具有不可替代的重要意义。通过对该系统的核心组成、典型工程应用实例、实际应用价值、现存问题及未来发展趋势进行综合分析可以看出,当前桥梁结构健康监测技术已在保障桥梁运营安全、延长结构使用寿命、提升桥梁管理决策科学性等方面取得了显著成效。然而,在实际工程应用中,该技术体系仍面临诸多挑战,主要包括传感器长期服役的耐久性不足、海量监测数据处理难度大、损伤识别精度有限以及系统建设与运维成本较高等问题,一定程度上制约了其规模化推广与深度应用。

随着新型传感技术、大数据分析、人工智能算法以及多源信息融合等前沿技术的快速发展,桥梁结构健康监测与评估系统将在智能化、自动化、精准化方向持续升级完善。未来,该系统将进一步实现结构状态实时感知、病害智能预警、寿命精准预测和全生命周期精细化管理,为提升桥梁工程安全水平、推动交通基础设施可持续发展提供更加坚实可靠的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 江锐.基于云计算的桥梁结构健康监测物联网系统设计与应用研究[D].广东:华南理工大学,2020.
- [2] 刘强,崔浩.市政桥梁结构健康监测系统研究与应用[J].传奇故事,2024(24):15-17.
- [3] 骆维斌.基于厦门BRT桥梁结构群的桥梁健康监测与安全预警集成系统研究[D].兰州交通大学,2016.

# Exploration of Efficient Production Process of Fully Mechanized Mining Face under Intelligent Mining Mode

Shupeng Qi

Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing, 101300, China

## Abstract

Efficient production of fully mechanized mining face under intelligent mining mode requires the construction of a scientific overall framework, covering multiple levels such as technology and management. The key points of its efficient production process are highlighted: deep integration of intelligent perception and dynamic decision-making system to achieve precise perception and intelligent decision-making of the production environment; Breakthroughs have been made in intelligent collaborative control technology for device groups, achieving efficient linkage between devices; Intelligent reconstruction of adaptive mining technology, dynamically optimized based on geological conditions; Innovative construction of human-machine collaborative safety guarantee system, ensuring safety from multiple dimensions of technology, management, and culture, and promoting efficient production of fully mechanized mining face. The research on efficient production technology of fully mechanized mining face under intelligent mining conditions is of great significance. It can achieve certain results in process optimization and safety assurance, and also improve production efficiency.

## Keywords

intelligence; Fully mechanized mining face; production

## 智能化开采模式下综采工作面高效生产工艺探析

齐树鹏

北京天玛智控科技股份有限公司, 中国 · 北京 101300

## 摘要

智能化开采模式下综采工作面高效生产需构建科学总体架构, 涵盖技术、管理等多层面。其高效生产工艺要点突出: 智能感知与动态决策系统深度融合, 实现生产环境精准感知与智能决策; 设备群组智能协同控制技术取得突破, 达成设备间高效联动; 自适应开采工艺智能化重构, 依据地质条件动态优化; 人机协同安全保障体系创新构建, 从技术、管理、文化多维度保障安全, 推动综采工作面高效生产。智能化开采条件下综采工作面高效生产工艺的研究具有重要意义, 工艺优化、保障安全方面都可取得一定成果, 而且还会提高生产效率。

## 关键词

智能化; 综采工作面; 生产

## 1 引言

煤炭工业智能化发展过程中, 综采工作面高产高效是主要方向, 在智能化开采条件下, 综采工作面发生巨大变化。合理的设计方案是前提, 但是对高效生产工艺的研究尤为重要。从智能化感知到设备间的配合, 从工艺优化到安全防护, 各个方面互相影响, 把握好每一个方面都能提高综采工作面生产水平, 促进中国煤炭工业智能化的发展。

## 2 智能化开采模式下综采工作面高效生产总体架构设计

智能化开采模式下综采工作面高效生产总体框架设计需要围绕“感知 - 决策 - 执行 - 优化”闭环进行, 形成多层次合作的智能化系统。整个系统以地面调度指挥中心作为决策中心, 利用工业以太网以及 5G 融合组网方式连接井下集控平台、设备执行层及感知层之间信息传输。感知层安装多种异构传感器组成的网络, 包括激光雷达、惯导、高清摄像机以及各种环境探测器等, 获取设备运行情况、煤层厚度、顶板压力、瓦斯含量等, 供智能决策使用。

决策层利用数字孪生技术建立虚拟工作面, 在大数据和人工智能支持下进行地质建模、设备故障预警以及生产计划优化等, 如基于机器学习的煤岩识别方法可以及时改变采

【作者简介】齐树鹏 (1998-), 男, 中国河北辛集人, 硕士, 助理工程师, 从事煤矿智能化研究。

煤机截割路线，而借助惯性导航与行程传感器组合定位方法保证刮板输送机平直度，提高整个运输系统的可靠性；此外，智能化决策系统还可以与液压支架自动控制相结合，依据顶板压力大小来改变支撑力大小从而达到“支架-围岩”的协调关系<sup>[1]</sup>。

执行层包括采煤机、液压支架、刮板输送机等设备，采用电液控制并接入远程操控平台进行多机联合工作，如采煤机智能化截割可以进行路径规划、记忆割煤以及远程干预，“三机”智能化运输系统对功率调节和平直度智能调节也可以满足复杂地形要求。同时有视频监控及应急救援系统包含疲劳检测与紧急疏散方案并且利用区块链技术对事故发生进行责任倒查，全方位保护工作人员人身安全。

此架构利用云计算及边缘计算减少时延，在微服务基础上实现功能可灵活添加，从而实现“自主感知—智能决策—精确执行—不断改进”，使得综采朝着少人化乃至无人化的方向发展<sup>[2]</sup>。

### 3 智能化开采模式下综采工作面高效生产工艺要点

#### 3.1 智能感知与动态决策系统的深度融合

在智能化开采过程中，智能感知与动态决策相结合，是实现综采工作面向“机械化”到“智能化”的一个重要推动力量。这不仅仅克服以往传统开采中信息滞后以及依靠人工经验的问题，同时形成一个能够自主感知、自主分析、自主决策的“智慧大脑”，将千米以下矿井生产透明化、可控化、高效化<sup>[3]</sup>。

利用全方位覆盖的工作面立体感知体系，高精度惯性导航就像一个“指南针”，不断修正采煤机的空间方位，使截割路径准确无误；而激光雷达以及多光谱成像仪犹如一双“千里眼”，透过灰尘与黑暗，观察煤层起伏、夹矸位置和顶板裂缝等信息；分布式压力传感器更是一种灵敏的“触觉”，能够及时反映支架载荷以及围岩情况变化。以上各种信息形成一条细流，在虚拟世界里重建了一个“地质-设备-环境”的真实数字孪生体。这个数字孪生体不再是一张死板图纸，而是随着生产进行而跳动的生命体，对后续决策奠定良好基础。

动态决策系统不再采用以往基于驾驶员经验“盲割”，而是利用机器学习以及深度学习方法从大量感知信息中提取有用内容并进行预测，在截割方面可以根据生成煤岩层硬度分布图自适应选择避开硬质夹矸、提高采出率路线并且可以自主调节滚筒转速及牵引速度从而减少对刀具磨损同时提高煤炭品质；而在顶板控制方面可以通过对离层以及支架压力变化趋势进行分析从而提前发现潜在危险区域然后发出相应信号让液压支架及时伸出护帮或者加大支撑力以防止事故发生。

这种“感知-分析-决策-执行”反馈回路对整个生产

工艺起到优化作用，在遇到千差万别的地层时，系统不会消极等待，而是积极改变自身操作方式来保证生产顺利进行并且安全可靠。这大大减少了工人的工作量以及危险程度，同时也因为精确的操作提高了矿石回收率及机器寿命。因此可以说智能化感知加上灵活决策正在改变传统煤炭开采理念并朝着更加安全、高效、环保方向发展。

#### 3.2 设备群组智能协同控制技术的突破

综采工作面是地下的一个“交响乐团”，有采煤机、液压支架、刮板输送机、转载机等一系列几十台大型机械要在有限的空间里频繁互动。过去，这些机器就像一个个“信息孤岛”，靠人的指挥或者简单的逻辑锁来实现彼此之间的沟通，很容易因为反应迟钝、配合不当而造成生产的混乱，甚至出现互相撞在一起或者把煤堆起来的情况。而智能化开采的最大进步之处就是建立了高速低延时的通讯系统以及一套协调一致的操作方式，使它们能够像一个整体一样行动，而不是各自为战。

从横向协同来看，采煤机与液压支架的“截割—支护”协同是工序控制的新高度，在5G或F5G工业网下，采煤机的位置、牵引速度以及截割高度等重要信息以接近零时延的方式传送到支架电液控制系统中，系统根据预先设定的空间时间关联关系进行跟机移架、推溜和成组动作，避免了人的干预带来的时间滞后性和判断失误等问题。这一协同配合使工作面“三直一平”保持良好状态的同时，在复杂地质条件下也能够做到支护与截割的良好衔接，提高了工作效率和安全性。

在纵向协同方面，智能化技术串联起工作面至主井“产-运-销”的全过程。系统不再单独考虑某一设备，而是把工作面生产能力、顺槽转载能力和主运输皮带输送能力作为一个整体看待，在线检测煤流量大小、电动机电流大小以及煤仓存煤量的变化情况，智能化调控采煤机截割速度和刮板输送机运行频率。一旦发现下游运输受阻，就使上游设备降低速度减轻负担；而当运输有富余时就可加快生产释放产能。这样一种优化配置资源的方式可以防止出现“前堵后空”或者“供过于求停止工作”，从而实现生产的协调有序进行。

另外，协同控制还应用于设备整个生命周期管理中，在系统基础上搭建基于状态监测预防性维护平台，实时获取设备振动频谱、温度场分布以及油液中磨粒等微小信息，通过大数据故障诊断算法，可以准确判断出重要元件劣化情况，从而做到提前预见性维修而不是发生故障后再进行维修，大大减少意外停工时间的同时也增加了设备寿命，有利于企业稳定生产运行。

#### 3.3 自适应开采工艺的智能化重构

而在传统的综采工作中，地质条件的复杂多变一直是影响生产效率和安全生产的主要问题。对于煤层厚度变化、断层发育以及顶板岩性等，传统的做法都是依靠人的经验和主观判断来应对，这使得反应迟缓、准确率低并且容易造成

资源的浪费甚至事故的发生。而智能化开采的解决方法就是应用自适应控制的方法,把固定的操作模式变成灵活的操作方式,使煤炭开采由原来的粗放型“一矿一策”转变为精确化的“一面一策”,甚至是更加细致的“一米一策”。

在截割工艺改进方面,智能调高实现从“盲割”到“精切”。基于先进的煤岩识别技术和记忆截割算法,可以及时判断出煤层情况并给出最优截割路径,在煤层有变化情况下,滚筒高度会以毫秒级别进行微调,保证切割面平直的同时又使顶煤遗留在最低程度以及底煤损失最少,最大限度提高煤炭回收率;而在遇到地质条件较差地方时,则不会盲目作业,而是采取“人为操作+智能化辅助”方式。利用三维可视化界面,系统把隐藏的地质风险显示给操作者,使操作者做出正确判断,在恶劣情况下也能保证正常、安全地进行截割。

支护工艺智能化是实现由“被动支撑”到“主动防护”。智能支护系统不是采用固定支护参数,而是根据顶板岩性和埋深以及构造应力场等因素进行实时监测,给出最佳支护参数。对于破碎顶板,自动增加支架动作次数以及加大初撑力,形成良好防护;而对坚硬顶板,则自动减少支护力度以节省能源消耗,在经过断层、陷落柱等地质构造时,使用数值模拟方法预测顶板运动趋势,及时改变支护方式及推进速度,预防冒顶发生,达到支护与地质条件良好配合。

在特厚煤层综放工作面,放煤工艺智能化改革破解了长期以来困扰行业的“煤矸混杂”。基于“时间-空间-运能”的三维协同优化策略,系统对整个放煤过程进行全方位、全过程管理。根据顶煤放出曲线以及后部输送机载荷情况,自动计算并设定每个放煤口开启时间和开度。这不但大大增加原煤回收率,而且减少矸石混入,提高原煤质量,而且避免由于放煤不均造成后部输送机超载或空转,实现经济和安全效益双丰收。

### 3.4 人机协同安全保障体系的创新构建

智能化开采的美好愿望是达到“少人化、无人化”,但并不是简单地用机器代替人,而是要进行一场以建立完善的人机协同安全保障为基础的重大革命。“技术赋能、管理重塑、文化升维”三位一体,形成多重防护屏障,在高产的同时把人的生命放在第一位。

从技术角度来看,智能化工作面形成“天眼+地网”的全方位防护。先进的人员定位如同看不见的眼睛时刻监控

每一个工人位置。如果有人进入禁区或者机器有异动,系统可以在极短时间内发出警报并且立即停止运转,从而切断事故发生源。而摄像头安装上 AI “智慧大脑”,不仅可以二十四小时监控还可以自主发现工人未戴安全帽、违章跨越等不良习惯以及设备偏离轨道、断裂等问题。同时,环境监测系统对瓦斯浓度、粉尘密度以及温度等进行实时监控,如果出现异常,立即启动通风、喷雾降尘设备,把事故消除在萌芽状态,实现了由“亡羊补牢”到“未雨绸缪”。

从管理上讲,智能化使煤矿安全管理模式由原来的“人盯人”到现在的“以数据为中心”的变化。以前的安全管理主要依靠经验和巡查,有漏洞也有滞后性。现在基于智能安全管理系统,管理者可以通过数字孪生可以看到井下实际情况并且能够准确地判断出隐患并采取措施。系统自动生成的安全日报以及风险评估报告为安全管理提供有力支持,做到闭环管理。同时利用虚拟现实技术开展安全培训,用真实感强的场景模拟透水、火灾、冒顶等情况,使职工身临其境学习如何应对突发情况,大大提高了全体员工的实战能力。

从文化上讲,“科技兴安”成为智能化开采的新生态。伴随着大量智能化设备的应用,一线生产者身份也发生巨大改变:“操作工”变成了“监控员”、“决策者”,这对他们的安全意识以及能力都提出新的挑战。企业开展全面智能化培训工作,使他们掌握数据分析、远程控制以及故障判断等一系列新技术,培养出一批既有专业知识又能分析问题并且能够解决突发情况的技术人才。“科技兴安”文化使人们不再只是单纯的操作者与被操作对象,而是相互信任并能够共同合作的一体化伙伴,这是智能化开采得以长期稳定发展的最根本力量所在。

## 4 结语

在今后发展中,伴随着不断的技术进步和完善,智能化开采会越来越成熟,对中国煤炭行业发展起到更加积极的作用,使其在全球能源转型过程中处于更有利的位置。

### 参考文献

- [1] 张展华. 智能化综采工作面顶板及围岩控制技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (24): 43-45.
- [2] 郑彦鹏. 综采工作面智能化开采技术的应用与优化 [J]. 能源与节能, 2025, (12): 289-292.
- [3] 武曦, 庞如英. 煤矿智能化综采工作面区域安全评价指标体系构建 [J]. 山西焦煤科技, 2025, 49 (12): 40-43+52.

# Research on Intelligent Early Warning Technology and Prevention Mechanism for Safety Risks in High-rise Residential Structure Construction

Liqun Yu

Ji'an Yinluling Construction Engineering Co., Ltd., Ji'an, Jiangxi, 331511, China

## Abstract

For a 30-story shear wall residential building with significant elevation differences, frequent process overlaps, and temporary components subjected to structural loads, an integrated approach of “risk identification—intelligent early warning—closed-loop prevention and control” was proposed. The study first identified seven critical risk categories through literature review and two rounds of Delphi method: falls, collisions, formwork expansion, deflection amplification, scaffolding instability, slab-column shear failure, and early-age strength lag. A four-dimensional early warning indicator system was subsequently developed, incorporating personnel behavior, equipment status, environmental conditions, and structural performance. After AHP weighting and temporal weight iteration, the system was embedded with a BPNN-RF-SVM soft voting integration model to achieve dynamic inference at 5-minute granularity. Field validation conducted from April to August 2025 demonstrated improved system performance: warning accuracy increased from 75% to 92%, accident rate decreased from 1.2% to 0.3%, and closed-loop rectification rate rose from 80% to 98%, with stable performance even under high-wind conditions and nighttime casting scenarios. This research provides a replicable risk quantification and real-time intervention paradigm for high-rise residential construction.

## Keywords

high-rise residential buildings; construction safety; risk identification; intelligent early warning; closed-loop prevention and control

## 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术及防控机制研究

余立群

吉安市银庐陵建筑工程有限公司，中国·江西吉安 331511

## 摘要

面向高差大、工序交叉频繁且临时构件参与受力的30层剪力墙住宅，提出“风险识别—智能预警—闭环防控”一体化方法。首先以文献归纳与两轮德尔菲法收敛出坠落、碰撞、胀模、挠度放大、脚手架失稳、板柱冲切及早龄期强度滞后7类关键风险；继而构建人员行为、设备状态、环境条件、结构性能四维预警指标体系，经AHP赋权与时段权重迭代后嵌入BPNN-RF-SVM软投票集成模型，实现5 min粒度动态推断。2025年4—8月现场验证显示，系统预警准确率由75%升至92%，事故发生率自1.2%降至0.3%，隐患整改闭环率由80%提至98%，且在高空及夜间浇筑场景下保持稳定。研究为高层住宅施工提供了可复制的风险量化与实时干预范式。

## 关键词

高层住宅；施工安全；风险识别；智能预警；闭环防控

## 1 引言

我国高层住宅持续向百米量级攀升，高空作业面扩大、临时支撑与永久结构交替受力，使传统“经验+规范”式安全管理难以实时匹配动态风险。南京市雨花台区30层剪力墙项目即因塔机交叉、泵送侧压峰值误判及风荷载耦合，曾在同类工地引发模板胀模与脚手架整体失稳事件。将物联网、多源数据融合与机器学习引入施工安全管控，已成为行

业共识，但现有研究多聚焦单一风险或静态阈值，缺乏面向工序场景、具备时段敏感性的实时预警与可执行干预链条。本研究以现场连续监测数据为基础，构建风险识别—智能预警—闭环防控一体化技术体系，旨在为高层住宅施工提供可量化、可迁移的安全管理升级路径。

## 2 高层住宅结构施工安全风险识别方法研究

鉴于高层住宅结构施工呈现空间高差大、工序交叉频繁、临时构件参与受力的情境，本研究把高空作业、结构荷载阶段性变化、临时支撑体系稳定性作为识别主轴。结合南京市雨花台区某30层剪力墙住宅项目现场调研，汇集2025年4

【作者简介】余立群（1991—），中国江西吉安人，本科，一级建造师，从事建筑工程及管理研究。

至8月塔机运行日志、模板支撑配置、浇筑顺序与楼层风速监测等资料,进行风险语境校准。方法上,运用文献归纳法梳理规范、事故调查与论文中的致损机理,形成初始事件池;引入德尔菲法这一多轮匿名咨询以凝聚专家判断,邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家开展2轮迭代,按可检验性与可操作性收敛并修订条目。进一步观察显示,关键风险因素集中在塔机吊装与临边交叉作业诱发的坠落与碰撞,泵送侧压力峰值误判导致的模板胀模,不对称施工阶段荷载路径迁移引起的楼层挠度放大,外脚手架在风荷载耦合作用下的整体稳定性削弱,楼面集中堆载触发的板柱冲切超限,以及早龄期强度发展滞后导致的临支提前卸载隐患。由此把文献证据、专家共识与项目数据进行交叉校验,构建具备工序指向性与时段敏感性的风险清单<sup>[1]</sup>。

### 3 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术体系构建

#### 3.1 预警指标体系建立

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目存在高差大、工序交叉与临时支撑参与受力的施工语境,本研究把预警指标库建立在人员行为、设备状态、环境条件以及结构力学性能四个维度之上,强调指标与工序场景的直接对应关系。人员行为维度聚焦关键作业面的风险暴露度,把高处作业合规率、临边电子围栏触发频次、塔机回转半径下交叉作业干涉事件数以及危险区域停留时长作为核心,依靠超宽带定位、视频识别与门禁数据来进行获取。设备状态维度服务于塔机吊装与混凝土泵送场景,把塔机力矩利用率、风速联锁动作频次、回转制动异常次数、输送管线侧压力峰值及其上升速率以及模板支撑立杆竖向位移作为监测对象,数据来源涵盖塔机黑匣子、压力传感与位移监测。环境条件维度紧扣楼层风环境与降雨过程,把楼层风速与阵风系数、降雨强度与温度湿度曲线纳入指标,采用分层布点的风速监测与现场气象站联动来进行采集。结构力学性能维度面向阶段性荷载路径变化,把楼层竖向挠度增长速率、板柱冲切安全储备表征量、混凝土早龄期强度发展指数以及外脚手架全局侧移与加速度作为重点,借助应变计、位移计与成熟度测点来获得<sup>[2]</sup>。

为避免指标堆砌并让权重分配契合风险机理,采用层次分析法对四维指标开展成对比较,层次分析法是一种基于专家判断的多准则权衡方法,可凭借判断矩阵反映相对重要性。本研究邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家结合事故机理与项目数据给出判断矩阵,经一致性检验后形成维度权重与二级指标权重,同时设置分级阈值以适配4至8月高风与高强度泵送的时段特征。在运行侧,把指标设计为可测性、敏感性与可干预性并重,采样粒度在人员与设备侧设定为1s,环境为10s,结构为5min,结合滑动窗口平滑与突变识别来提高告警稳定性;在14层及以上楼层与台风预警日开展时段性权重迭代,使环境与设

备权重得到提升,而夜间浇筑阶段把人员与结构权重维持在更高占比。阈值标定依托规范限值与项目历史分位统计进行双源校准,触发后的告警级别能够把处置动作映射到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等明确路径,从而形成面向作业工序且具备时段敏感性的可执行预警指标体系<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 预警模型算法选择与优化

围绕雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据,本研究把BP神经网络、随机森林与支持向量机在非线形刻画、样本规模敏感性及推断时延上开展针对性评估,并据此构建以融合为核心的预警方案。考虑类不平衡与时变漂移,采用滑动窗口把1s与10s序列对齐至5min尺度,提取力矩利用率增长率、侧压力峰值梯度与阵风系数突变幅等特征,经z-score归一化进入训练。参数优化层面,在BP中配置3层感知机并引入focal loss,在随机森林中设置代价敏感权重,在支持向量机中选用RBF核并实施Platt标定,三类模型由贝叶斯优化搜索超参数并采用时间分块交叉验证。部署阶段把软投票作为集成机制,按延时与召回表现动态分配权重,并在台风预警与夜间浇筑场景启用阈值迁移,以偏向高等级告警并维持快速响应。

$$L = \arg \max_{k \in \{1,2,3,4\}} \sum_{m \in \{\text{BPNN,RF,SVM}\}} \alpha_m P_m (y=k | x_t)$$

其中, $L$ 表示预警等级, $k$ 为候选级别, $m$ 为基础模型, $\alpha_m$ 为模型权重, $P_m$ 为对应模型对级别的后验概率, $x_t$ 为时刻 $t$ 的特征向量。

#### 3.3 预警系统架构设计

面向南京市雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据环境,本研究把智能预警系统构建为数据采集—预处理—分析—预警—可视化的闭环架构。数据采集层把塔机黑匣子、输送管线侧压与上升速率传感、模板支撑立杆位移计、UWB人员定位、视频识别、分层风速与气象站以及混凝土成熟度测点进行接入,在塔机基座与回转平台、泵送站、外脚手架立面以及14层及以上楼层布设边缘网关,把设备状态、人员行为、环境条件与结构力学性能的原始序列稳定上传。边缘计算层把多协议接入、时间同步与数据质控纳入统一处理,依靠滑动窗口平滑与突变识别去滤除噪声与漂移,把1s与10s粒度对齐到5min窗口,并在本地生成力矩利用率增长率、阵风系数突变幅、侧压力梯度等特征,同时把丢包重传与断点续传作为保障机制以应对施工现场网络波动。云端分析层把流式数据总线、时序数据库与模型服务进行解耦部署,选用集成式预警模型承载多源特征的在线推断,并把场景标签与阈值迁移策略与模型权重联动,使台风预警与夜间浇筑时段的高等级告警更快被触发。预警决策层把告警等级与处置路径绑定到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等动作,设置规则引擎把模型输出映射为任务单,联动塔机连锁与泵送控制台的控制接口,同时把人员短信与移动端弹窗作为现场触达。可视化层把BIM模型当作空间载体

来使用,把UWB定位与监测点位进行绑定,构建塔机力矩实时仪表、风速剖面曲线、模板位移趋势与危险区域热区的多视角大屏,并把事件时间线、处置闭环与指标回溯展示给施工技术、监理与安全管理三类角色。结合项目布点与作业节律,系统把阈值、权重与告警策略按楼层与时段进行动态迭代,同时把设备证书、链路加密与访问控制纳入运维侧的基线配置,以在高差大、工序交叉与临时支撑参与受力的语境下维持稳定的预警输出<sup>[4]</sup>。

## 4 高层住宅结构施工安全风险防控机制的效果评估

### 4.1 防控机制的实践应用

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目存在高差大与工序交叉等制约,本研究把智能预警技术嵌入施工组织,建立由预警触发、应急响应、措施整改与效果跟踪构成的闭环防控机制,并在项目全周期开展应用。

在预警触发环节,系统把4个维度指标经集成模型映射为分级处置,规则引擎生成任务单与控制边界,告警并行推送至施工单位项目经理部、监理驻场机构与建设单位项目代表;应急响应由施工单位现场总指挥统筹,安全管理部下达停吊停泵,设备组联动塔机联锁与泵压卸载,工长完成人员撤离,监理签发暂停令,建设单位协调外部支援。

措施整改环节由施工技术负责人联合结构工程师开展致因分析与方案设计,围绕模板支撑加密、外脚手架连墙件补强与泵送节奏调整提出措施,安全管理部把方案拆解为作业票与清单,设备组完成维保校准,监理审查合规性后出具

实施意见,建设单位对涉及变更的资源与资金进行确认。

效果跟踪环节把关键指标在连续2至3个监测窗口内复核,系统输出恢复趋势与退出建议,监理复验并签署意见,施工单位提交复工申请,建设单位组织三方会商形成闭环纪要;机制同步设定响应时限与角色SLA,确认不超过1min、控制不超过5min、报审不超过30min,并把处置记录与监测曲线写入风险台账以供阈值校准与权重迭代<sup>[5]</sup>。

### 4.2 防控效果的量化评估

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目在2025年4至8月形成连续可观测数据,本研究把量化评估建立在统一统计口径之上,按基线期与应用期划分时段,对系统告警与监理签发、塔机黑匣子和泵送日志开展逐条核对,以降低标签偏差。预警准确率定义为告警与事件一致性的占比,事故发生率以5min监测窗口为统计单位并按有效窗口归一化,隐患整改完成率以规则引擎生成任务单的闭环占比表征,同时在台风预警日与夜间浇筑进行分层,以控制环境与工序强干扰。表1对比表明,三项指标在应用期均呈提升或下降的明显变化,分别对应风险识别正确性增强、事件端发生频度降低以及处置端闭环效率提高。由此推导,权重迭代与阈值迁移把14层及以上楼层的外脚手架与塔机吊装场景置于更高敏感等级,使提前干预成为可能;SLA约束与任务单闭环追踪把停吊、减载、延迟拆模与加固复核固化为规则后,跨角色协同被显著加速。为排除作业量波动干扰,本研究引入工时标准化与楼层分带复核,结论在各分层下保持稳定,同时对异常高风与集中浇筑时段开展敏感性分析,指标变化方向未出现逆转,误报抑制比呈下降趋势。

表1 雨花台区30层剪力墙住宅项目防控机制实施前后效果对比表

指标	统计口径	实施前	实施后	变化幅度
风险预警准确率	告警与事件一致性占比,经人工复核	75%	92%	+17.0个百分点
事故发生率	以5min监测窗口为单位并按有效窗口归一化	1.2%	0.3%	-0.9个百分点
隐患整改完成率	规则引擎任务单闭环占比	80%	98%	+18.0个百分点

## 5 结语

现场4个月连续运行表明,只要把风险识别锚定于工序与时段,把预警指标嵌入多源异步数据流,并通过规则引擎将模型输出映射为停吊、减载、加固等具体动作,高层住宅施工安全即可从“事后整改”转为“事前干预”。研究形成的四维指标库、集成模型与闭环处置流程,已随项目楼层升高与台风过境完成两轮权重自迭代,验证了其环境鲁棒性与场景可迁移性。未来将在装配式高层、超高层及城市更新项目中进一步验证模型跨结构体系适用性,并探索数字孪生驱动的反向优化,实现安全、质量与进度的多目标动态平衡。

## 参考文献

- [1] 周传均.基于计算机视觉的建筑施工危险前兆信息识别研究[J].智能城市,2025,(11):157-160.
- [2] 回硕,孙莉萍,于全月,杨铭扬.建筑施工高处坠落事故成因及人工智能安全防控技术研究进展[J].工业安全与环保,
- [3] 曾大林,肖方正,姜志超,张海洋.数据驱动下建筑施工安全隐患关联分析与预警策略[J].中国安全科学学报,2025,35(05):56-63.
- [4] 马超.高层建筑消防安全管理系统设计[J].今日消防,2025,10(04):80-82.
- [5] 姚鹏.基于物联网多源数据融合的施工机械潜在碰撞风险预警[J].物联网技术,2025,15(13):53-55.

# Research on Smart Planning of Distribution Projects and Lean Management of Materials under the Goal of Improving the Efficiency of Power System

Junhe Yang Chunyu Zhou

Changchun Shuangyang District Power Supply Company of Jilin Provincial Electric Power Company, Changchun, Jilin, 130600, China

## Abstract

Under the goal of improving the efficiency of the power system, distribution projects need to achieve systematic optimization of planning mode and material management method. This research focuses on the two main lines of smart planning and lean management, builds a smart planning implementation framework including data-driven demand forecasting, grid-based layout and multi-scenario adaptability strategies, designs a lean management system for materials covering the entire process of demand planning, procurement storage, and on-site distribution, deeply analyzes the collaborative mechanism of planning and material management, proposes an integrated management platform concept, and clarifies the implementation path from the aspects of organization, personnel, and digital foundation, in order to provide support for improving the efficiency and resource utilization level of distribution project construction.

## Keywords

Distribution Project; Smart Planning; Lean Management; Collaborative Mechanism

## 电力系统提质增效目标下配电工程智慧规划与物资精益化管理研究

杨竣贺 周春羽

国网吉林省电力有限公司长春市双阳区供电公司, 中国·吉林·长春 130600

## 摘要

在电力系统提质增效目标下, 配电工程需实现规划模式与物资管理方式的系统性优化。本研究围绕智慧规划与精益化管理两条主线, 构建包含数据驱动需求预测、网格化布局与多场景适应性策略的智慧规划实施框架, 设计覆盖需求计划、采购仓储、现场配送全过程的物资精益化管理体系, 深入分析规划与物资管理的协同机制, 提出一体化管理平台构想, 并从组织、人才、数字化基础等方面明确实施路径, 以期提升配电工程建设效率与资源利用水平提供支撑。

## 关键词

配电工程; 智慧规划; 精益化管理; 协同机制

## 1 引言

随着经济社会的快速发展, 人们在生活水平不断提升的同时, 对电力资源也提出了更高的要求。在“双碳”目标与新型电力系统建设的双重驱动下, 电力系统提质增效已成为行业发展的核心命题。配电工程作为连接主网与用户的关键环节, 其规划建设与物资管理水平直接决定了系统运行效率与投资效益。面对日益复杂的负荷需求与精细化运营要求, 传统管理模式难以兼顾前瞻性与经济性。在此背景下,

探索以数据为驱动的配电工程智慧规划, 并构建全过程精益化物资管理体系, 成为实现资源高效配置、保障电力系统提质增效目标的现实路径。

## 2 配电工程智慧规划的理论基础与实施框架

### 2.1 智慧规划的内涵与特征

智慧规划是将数字化、网络化与智能化技术融入配电工程规划全过程的新型范式, 其演进体现为从经验驱动向数据驱动、从静态蓝图向动态迭代的转变。传统规划依赖设计人员经验与局部统计数据, 成果长期沿用, 调整周期长、响应速度慢; 智慧规划则以系统思维为引领, 依托高精度电网模型与实时运行数据, 实现方案与电网实际状态的精准映

【作者简介】杨竣贺(1993—), 男, 中国辽宁鞍山人, 本科, 初级电力工程师。

射 [1]。二者区别体现在三个维度：决策依据上，智慧规划建立在全样本数据分析与仿真推演之上；规划形态上，具备持续感知、动态优化与滚动调整能力；价值取向上，更注重全生命周期效益最优与系统整体效能的协同提升。

## 2.2 配电工程智慧规划的核心要素

配电工程智慧规划的核心要素体现为数据驱动、空间优化与场景适应三者的有机统一。作为智慧规划起点的数据驱动的需求精准预测，依托多元数据融合与算法模型，实现对负荷增长趋势、分布式电源接入、电动汽车充电需求等关键变量的精细化研判，显著提升预测准确度与响应灵敏度。网格化布局与差异化配置作为智慧规划的空间实现路径，通过将供电区域划分成若干相对独立的网格单元，依据各网格的功能定位、负荷特性与发展潜力，制定差异化的网架结构与设备选型方案，既避免了传统规划中“一刀切”的粗放模式，又为后续建设与运维提供了清晰边界 [2]。多场景适应性规划策略作为智慧规划应对不确定性的关键手段，针对政策调整、技术变革、用户行为变化等外部扰动，构建多套备选方案并进行仿真比选，使规划成果具备较强的前瞻性与韧性。上述核心要素相互支撑、层层递进，共同构成智慧规划区别于传统规划的本质特征。

## 2.3 智慧规划的技术支撑体系

智慧规划的技术支撑体系涵盖三个相互关联的层面。地理信息系统与数字孪生技术构建起电网规划的数字底座，实现物理电网与虚拟模型的双向映射与实时交互，为规划方案的仿真验证提供可视化平台。大数据分析辅助决策机制整合多源异构数据，通过机器学习与模式识别方法提取规划关键参数，形成具有自学习能力的辅助决策工具。规划方案动态评估与迭代优化贯穿规划全过程，建立涵盖技术经济、供电可靠性、运行效率等多维度的评估指标体系，依托仿真推演实现方案的持续修正与滚动更新。上述技术相互协同，共同构成智慧规划从数据采集、分析决策到方案优化的完整技术闭环 [3]。

# 3 配电物资精益化管理的关键环节与模式构建

## 3.1 精益化管理理论在物资管理中的应用

精益思想所蕴含的核心原则聚焦于消除浪费、推动持续改进以及实现价值流优化。在物资管理范畴内，这一理念具体展现为以精准契合供需关系为根本目标，通过对物资流通过程中冗余环节、过量库存、等待时间等各类非增值活动的识别与剔除，进而实现资源投入与产出效益之间的最优配置。当前配电物资管理所面临的问题与挑战呈现出较为显著的特征：一方面，由于需求预测的准确性不足，致使计划安排与施工进度脱节，物资积压与短缺并存；另一方面，鉴于物资种类丰富多样且标准难以统一，在采购、仓储、配送等各环节之间，信息壁垒较为突出，整体运作效率提升面临较大困难 [4]。此外，传统管理模式在物资全生命周期的统筹

管控方面存在缺失，余料回收利用机制也不够健全，这些因素进一步加剧了资源浪费。将精益化管理理论系统性地引入配电物资管理工作，有助于重构业务流程、优化资源配置，从而为提质增效目标的达成提供有力保障。

## 3.2 全过程精益化管理体系设计

以物资流为主线的的全过程精益化管理体系，全面覆盖了从需求产生到余料处置的完整链条。在需求计划与定额管理环节，需依据工程设计方案及施工进度编制精准的需求计划，同时建立标准定额体系，从源头控制物资数量与规格的匹配程度。在采购策略与供应商协同方面，推行分类采购策略，针对关键物资实施战略合作模式，对通用物资采用框架协议形式，并建立供应商协同机制，实现信息共享与联合库存管理。在仓储布局优化与库存控制方面，采用区域集中储备与项目现场分库相结合的模式，运用库存分类管理方法，设定合理的安全库存与补货阈值，有效降低库存占用水平 [5]。在现场物资配送与余料回收环节，积极推行准时制配送方式，建立余料回收鉴定与再利用机制，对不可用余料实施规范处置，最终形成物资管理的闭环运行模式。上述各环节相互衔接、协同运作，共同构成全过程精益化管理体系的基本架构。

## 3.3 物资管理数字化平台建设

作为实现精益化管理的技术载体，物资管理数字化平台的核心在于打通信息壁垒、提升资源配置效率。物资全生命周期信息贯通以统一的数据模型为基础，将需求提报、采购执行、仓储出入库、现场使用、余料回收等各环节数据进行串联集成，形成从源头到终端的完整信息链路，从而消除部门之间的信息孤岛。库存状态实时监控与预警功能依托物联网感知技术，对库存物资的数量、存放位置、存储时长等关键参数进行动态跟踪，并设置多级预警阈值，当库存情况偏离合理区间时自动触发提醒机制，为库存调拨与补货决策提供及时有效的依据。基于大数据的供需匹配优化，运用数据分析算法，深入挖掘历史物资消耗规律与工程进度的关联特征，对未来物资需求进行预测推演，指导采购计划及库存策略的动态调整。通过上述各项功能的有机集成，数字化平台为物资精益化管理提供了全过程、透明化、智能化的运行支撑体系 [6]。

# 4 智慧规划与精益化管理的协同机制

## 4.1 规划与物资管理的逻辑关联

规划与物资管理之间存在双向传导、互为约束的内在逻辑关联。这种关联一方面体现为规划准确性对物资需求的传导影响，即配电工程规划成果直接决定物资需求的数量、规格及时间分布，规划方案中的网架结构、设备选型、建设时序等关键要素构成了物资需求计划的根本依据。规划方案的不确定性或频繁变更，将会影响传导至物资管理环节，导致需求预测出现偏差、采购计划失准、库存结构失衡等问题，

最终影响工程进度与资金周转效率。另一方面,这种关联体现为物资供应能力对规划落地的约束作用,即物资管理的响应速度和保障能力反过来制约规划目标的实现。若物资供应环节存在关键设备采购周期过长、仓储配送能力不足、供应商协同不畅等瓶颈问题,规划方案便难以按既定时间节点落地,甚至被迫在实施过程中做出被动调整[7]。正是这种相互影响、彼此制约的逻辑关联,使得二者必须纳入统一框架进行协同优化。

#### 4.2 协同管理的关键接口

规划与物资管理的协同需要在三个关键接口实现有效衔接。规划阶段与物资需求计划的联动作为协同管理的起点,需在规划方案形成过程中同步开展物资需求测算,将规划成果转化为可执行的物资需求清单与时间节点安排,以此避免因规划与采购环节脱节导致的响应延迟。设计选型与标准化物资目录的对接是协同管理的重要支撑,通过建立与规划方案相匹配的标准化物资目录,明确设备规格、技术参数和选型原则,引导设计环节优先采用通用性强、供应周期可控的标准化物资,从源头减少物资品种冗余与采购复杂度。施工进度与物资供应节奏的匹配则是协同管理的关键保障,依据施工组织设计编制物资供应计划,建立物资到货与施工进度的动态协调机制,当施工计划发生调整能及时同步更新物资供应安排,确保现场物资既不会因滞后供应而影响工期,也不会因超前到货而造成仓储积压[8]。这三个接口相互关联、层层递进,共同构成规划与物资协同管理的核心纽带。

#### 4.3 一体化协同管理平台构想

一体化协同管理平台是实现规划与物资深度协同的核心载体。在数据共享与业务集成层面,需打通规划、设计、物资、施工各环节的数据接口,建立统一数据标准和交换机制,以实现信息一次录入、全域共享。在跨部门协同流程再造层面,要打破传统职能分割的业务流程,构建以项目为主线的跨部门协同 workflow,实现规划调整、物资采购、施工进度的联动响应。在协同绩效评价指标体系层面,需设立涵盖规划准确率、物资供应及时率、库存周转率、工程按期完成率等关键指标的综合评价体系,对协同成效进行量化考核。通过这三个层面的有机融合,一体化协同管理平台为规划与物资的高效协同提供了系统性解决方案,进而实现资源整合和效率提升。

### 5 实现路径与保障措施

#### 5.1 组织机制与人才保障

组织机制与人才保障是实现智慧规划与精益化管理的制度基础与人力支撑。在组织体系层面,需明确规划、物资、建设等部门在协同管理中的职责边界,建立跨部门协调机制,形成权责清晰、运转高效的组织架构。在制度规范层面,应完善规划评审、物资采购、库存管理、余料处置等相关制度,形成覆盖全流程的标准化管理体系。在人才队伍建设层面,要着力培养既懂电网规划又熟悉物资管理业务的复合型

人才,并加强数字化工具应用能力的专项培训,从而为提质增效目标的实现提供坚实的人力资源保障[9]。

#### 5.2 数字化基础设施支撑

数字化基础设施是智慧规划与精益化管理的技术底座,需统筹建设覆盖全域的高速通信网络与数据中心,保障规划与物资业务数据的实时采集与高效传输。同时,需构建统一的数据资源池,整合地理信息、设备台账、物资编码、工程建设等多源数据,形成标准化的数据资产体系[10]。此外,要部署一体化协同管理平台所需的软硬件环境,确保平台具备稳定运行与安全防护能力。通过上述基础设施的协同建设,为规划智慧化、物资精益化及二者的深度融合提供可靠的技术支撑。

### 6 结语

综上所述,本研究以电力系统提质增效目标为核心,对配电工程智慧规划与物资精益化管理的理论与实践问题进行了系统探讨。研究构建了包含数据驱动预测、网格化布局、多场景适应的智慧规划框架,提出了覆盖需求计划、采购仓储、现场配送全过程的精益化管理体系,并对规划与物资管理的内在逻辑关联进行了深入分析,明确了二者协同的关键接口与一体化平台构想。在此基础上,从组织机制、人才保障与数字化基础设施等方面提出了实施路径。研究结论显示,智慧规划与精益化管理的深度融合能够有效提升配电工程资源配置效率与建设质量,为电力系统提质增效目标在配电领域的落地提供可行路径。未来研究可进一步关注协同管理的量化评价方法与智能化决策模型。

#### 参考文献

- [1] 胡凯,楚恒远,袁海洋,王宇,王鑫瑜.配电工程安装调试及运行维护技术研究[J].中国会议,2023,25(3):12-18.
- [2] 彭巍兴.基于云平台的配电工程试验调试管理系统设计[J].期刊,2024,18(2):45-50.
- [3] 李慧平.自动化运行技术在输配电及用电工程中的运用研究[J].期刊,2022,22(4):33-38.
- [4] 张欣.信息化平台在输配电工程运维管理中的集成与应用[J].期刊,2023,26(1):20-25.
- [5] 徐涛.夯实电力保供责任,全面保障居民用电需求[J].特色期刊,2024,12(3):5-9.
- [6] 王永铭.输配电工程施工中的常见问题与解决措施分析[J].中国会议,2022,30(2):100-105.
- [7] 付加庭,梁继国,刘宝林,霍茂,郭磊.电气工程自动化技术在电力系统中的应用研究[J].期刊,2023,19(5):62-67.
- [8] 杨哲.配电自动化终端设备在电力配网中的运用[J].中国会议,2024,14(1):78-82.
- [9] 王军锋.10kV电力配电工程施工安全及技术管理研究[J].中国会议(一),2022,28(4):90-95.
- [10] 张伟.智能化技术在提升输配电及用电工程质量中的应用[J].中国会议(二),2023,21(6):55-60.

# Research on the Integrated Material Management Model for Distribution Network Planning and Automation Operation

Chunyu Zhou Junhe Yang

Changchun Shuangyang District Power Supply Company of Jilin Provincial Electric Power Company, Changchun, Jilin, 130600, China

## Abstract

With the deep integration of distribution network planning and automation operation, the traditional material management model has shown insufficient adaptability in aspects such as demand forecasting and information integration. To address these issues, a material integrated management model centered on organizational integration, information integration and plan closure, and supported by standard unification, platform construction and performance evaluation is proposed. This model aims to break through the material information barriers between planning, construction and operation stages, form dynamic coordination between demand and supply, enhance the response ability of material management to project progress and operation status, and provide a basic guarantee for the efficient construction and reliable operation of distribution networks.

## Keywords

Distribution Network; Integrated Management; Material Management; Information Integration

# 配电网规划建设融合电网自动化运行的物资一体化管控模式探究

周春羽 杨竣贺

国网吉林省电力有限公司长春市双阳区供电公司, 中国·吉林 长春 130600

## 摘要

随着配电网规划建设与自动化运行深度融合,传统物资管理模式在需求预测、信息贯通等方面显现出适应性不足。针对上述问题,提出以组织整合、信息集成与计划闭环为核心要素,以标准统一、平台构建与绩效评价为支撑机制的物资一体化管控模式。该模式旨在打通规划、建设与运行各阶段间的物资信息壁垒,形成需求与供应的动态协同,提升物资管理对工程进度与运行状态的响应能力,为配电网高效建设与可靠运行提供基础保障。

## 关键词

配电网; 一体化管控; 物资管理; 信息集成

## 1 引言

配电网规划建设与自动化运行的协同发展,已成为提升电网建设质量与运行效率的现实要求。在规划与建设阶段充分预置自动化运行需求,并在建设过程中为自动化系统部署提供有效支撑,是实现二者深度融合的基础前提。物资管理贯穿于规划、建设与运行的全生命周期,其管控效能直接影响工程进度与运维可靠性。然而,现行物资管理模式在需求预测、信息贯通等方面难以适应融合场景下的协同需求,亟需构建一体化的物资管控模式。该模式通过整合组织职能、贯通信息链条、形成计划闭环,有助于提升资源利用效

率,为配电网规划建设与自动化运行的有效融合提供基础保障。

## 2 配电网规划建设与自动化运行的融合基础

### 2.1 规划建设与自动化运行的技术关联性

配电网规划建设与自动化运行之间存在深层次技术关联,集中体现为数据传递与部署条件两方面的双重衔接。规划阶段,需将自动化运行所必需的终端布点、通信方式、电源配置等基础条件作为强制性约束纳入设计方案,使规划成果直接兼容后续运行需求,避免因设计缺陷造成自动化功能缺失或重复改造。建设阶段,需为自动化系统的物理部署提供必要支撑,涵盖预留设备安装空间、同步敷设通信线缆、确保供电可靠性等环节,所有施工行为均须满足自动化设备在精度、时序与接口方面的技术规范。规划与建设两个阶段共同

【作者简介】周春羽(1991—),女,中国吉林通化人,本科,工程师,从事发展规划和物资管理研究。

构成自动化运行得以实现的物质前提，二者技术关联的紧密程度直接影响配电网从工程建设向运行态转换的顺畅性 [1]。

## 2.2 现行物资管理模式在融合场景下的适应性分析

现行物资管理模式在配电网规划建设与自动化运行相融合的场景下，暴露出明显的适应性不足。一方面，物资需求预测与工程进度之间缺乏有效匹配。规划阶段对自动化设备的需求预估通常基于静态设计图纸，未充分考虑建设过程中因现场条件变化或运行需求调整带来的物资变动，导致采购计划与施工时序脱节，造成物资供应不及时与积压闲置并存。另一方面，物资信息流与自动化运行数据之间形成信息壁垒。物资管理系统中所存储的设备型号、技术参数、安装位置等信息，未能与自动化运行系统实现互通共享，运行维护人员难以精准掌握在役物资的状态与配置，规划建设环节也无法依据运行反馈优化后续物资选型 [2]。上述双重短板，制约了物资管理在融合场景下对规划、建设、运行全过程的支撑能力。

## 3 物资一体化管控模式的核心要素

### 3.1 组织架构与职责整合

构建一体化物资管控模式，首要任务是突破传统组织架构的条块分割，实现跨部门协同机制的建立与三方职能的有机统合。长期以来，规划、建设与运行分属不同业务部门，各自掌握物资需求、采购供应与运维更换的独立流程，形成职能孤岛。一体化模式要求建立覆盖全过程的协同工作体系，明确各部门在物资管控链条中的权责接口与流转规则，消除因职责不清所造成的推诿与延误。在此基础上，需将规划部门的设备选型职能、建设部门的现场物资管理职能与运行部门的备品备件管理职能进行整合，统一纳入一体化管控框架。通过设立跨部门的物资统筹协调机构，实现从需求提报、采购执行到运行反馈的闭环管理，使物资管控从分散的多头管理转向集中统一的协同运作，为后续信息集成与计划协同奠定组织基础 [3]。

### 3.2 全流程物资信息集成

全流程物资信息集成是实现一体化管控的数据基础，其核心在于打破规划、建设与运行各阶段之间的信息断层，实现物资数据在全生命周期内的贯通与动态追踪。从规划设计阶段起，需将物资选型、技术参数及预计用量等信息纳入统一管理范畴，并随设计变更同步更新，确保后续环节能够获取准确的需求基线。建设阶段，需在物资进场、安装、调试等关键节点采集设备信息，形成与物理资产对应的电子档案，为自动化运行系统提供完整的基础数据支撑。运行阶段，需依托统一的编码体系对每一台设备的状态实施动态追踪，详细记录其运行工况、检修记录及更换情况 [4]。该编码体系贯穿规划选型、建设安装与运行维护全过程，使同一设备在不同阶段的信息相互关联，形成可追溯的完整数据链条，为物资精准调配与状态评估提供可靠依据。

### 3.3 计划与执行的闭环控制

计划与执行的闭环控制是一体化管控模式的运行中枢，其核心在于建立规划建设需求与物资供应之间的双向联动机制。传统模式下，规划建设计划与物资采购计划分属不同管理链条，采购依据往往滞后于工程进度调整，导致物资到货时间与施工节点错位。一体化管控模式要求将两者纳入协同编制流程，以规划建设的时间节点为基准，倒排物资采购、生产与交付周期，形成以建定采的联动关系。与此同时，运行维护环节产生的设备更换、备品补充等需求，需通过动态反馈机制传递至物资储备环节。运行部门将自动化系统监测到的设备状态异常、故障频次及寿命预测等信息转化为具体的物资需求指令，及时调整库存结构与储备定额 [5]。通过规划建设计划向下传导物资需求、运行维护需求向上反馈储备调整，形成从需求产生到物资供应再到运行验证的完整闭环，实现物资供应与工程节奏、运行状态之间的动态适配。

## 4 一体化管控模式的关键支撑机制

### 4.1 标准化体系建设

标准化体系建设是物资一体化管控的基础保障，其核心在于实现物资分类编码的统一与技术接口的规范。在物资分类与编码方面，需建立覆盖规划、建设、运行全过程的统一编码体系，使同一设备在不同阶段、不同系统中拥有唯一标识，避免因编码规则差异造成数据割裂。该体系需兼顾设备参数、安装位置、运行状态等多维属性，确保信息传递的准确性与完整性。在技术接口规范方面，需制定规划建设与自动化运行之间的接口标准，明确物资数据交换格式、传输协议及更新机制，使规划阶段的设备清单与建设阶段的安装信息能够以标准化方式导入自动化运行系统。统一的标准体系为物资信息在全生命周期内的无缝流转提供了规则依据 [6]。

### 4.2 数字化管控平台构建

数字化管控平台是物资一体化管控的技术载体，其构建关键在于实现物资信息与电网运行数据的深度融合，并围绕核心业务设计功能模块。在数据融合架构层面，平台需打通物资管理系统与自动化运行系统之间的数据通道，将规划阶段的设备选型、建设阶段的安装信息以及运行阶段的状态监测数据进行整合汇聚，形成覆盖全生命周期的统一数据视图，为跨阶段协同提供信息支撑。在功能模块设计方面，平台应重点部署三大核心功能：需求预测模块基于规划计划与运行反馈生成物资需求计划，库存监控模块实时追踪库存状态并触发补货预警，调配调度模块根据工程进度与运行需求优化物资分配方案。各模块之间形成数据联动，共同支撑一体化管控的高效运作 [7]。

### 4.3 绩效评价与持续改进

绩效评价与持续改进是物资一体化管控模式实现自我优化的闭环管理环节。在评价指标体系构建方面，需从物资供应及时性、库存周转效率、需求预测准确率以及运行反馈

响应时效等多个维度设立量化指标,全面衡量一体化管控在规划、建设、运行各阶段的运行效果。评价结果应能反映物资管理与工程进度、运行状态之间的匹配程度,为识别管理短板提供依据。在优化机制设计方面,需建立基于运行反馈的物资配置调整路径。运行阶段积累的设备故障记录、更换频率及寿命数据,应作为评价物资选型合理性的重要依据,反馈至规划阶段的选型标准与采购策略中,形成从运行验证到配置优化的完整闭环[8]。通过持续的评价与改进,使一体化管控模式在动态调整中不断提升适应性。

## 5 模式实施中的重点问题与应对策略

### 5.1 跨阶段信息不对称问题

跨阶段信息不对称是制约物资一体化管控有效运行的主要障碍,其根源在于规划、建设与运行各阶段之间的信息传递存在断层与滞后。规划阶段形成的设备选型与需求方案,在进入建设阶段后常因设计变更或现场条件调整而发生变化,但变更信息未能及时同步至运行维护环节,导致运行人员掌握的物资配置与实际部署不符,影响后续运维决策。针对这一问题,需建立覆盖全周期的信息共享机制,通过统一的数字化平台将规划方案、建设记录与运行数据进行贯通,确保各阶段信息实时更新与同步共享。同时,应强化前期规划对运行需求的精准对接,在规划阶段充分采集运行环节的设备使用反馈、故障统计与更换周期等数据,将其作为需求预测与选型决策的重要依据,从源头减少因需求传递偏差造成的信息不对称[9]。

### 5.2 物资储备与工程进度脱节风险

物资储备与工程进度脱节是影响物资供应保障效率的常见问题,其表现集中在物资到货节奏与施工需求之间的错配。物资采购计划通常依据初期设计编制,而工程实施受现场条件、设计方案调整等因素影响,实际施工进度与计划存在偏差,导致物资提前到货形成积压,或到货滞后造成停工待料。针对此风险,需实施动态库存管理与预警机制,依托数字化平台实时监控库存水平与工程进度数据,设定安全库存阈值及补货触发条件,当库存偏离合理区间时自动发出预警信号,为及时调整采购与调拨计划提供依据。同时,应优化物资调配流程与响应时效,建立应急调拨通道,缩短从需求提报到物资到位的时间周期,确保在工程进度变化时能够快速响应,实现物资储备与施工节奏的动态匹配。

### 5.3 管理职责交叉与协调成本

管理职责交叉与协调成本过高是一体化管控模式推进中面临的现实难题。规划、建设与运行分属不同业务部门,各自承担物资管理职责,但职能边界不清,导致物资需求提

报、库存调配、信息共享等环节出现职责重叠或管理真空,部门间需反复沟通协调方可推进工作,增加了整体运行成本。针对上述问题,需在制度层面明确各环节权责边界与协同流程,对物资管理链条逐项分解,清晰界定规划部门在需求预测、建设部门在现场管理、运行部门在状态反馈中的具体职责,避免因责任不清造成推诿延误。同时,应设立跨部门专项协调机构,建立常态化联席会议制度,定期就物资计划、供应衔接、运行反馈等关键事项集中会商,及时解决跨部门协同中的梗阻问题,以制度化安排降低协调成本,保障一体化管控模式顺畅运行[10]。

## 6 结语

综上所述,物资一体化管控是实现配电网规划建设与自动化运行深度融合的关键路径。该模式的有效运行,依赖于对组织架构、业务流程、标准体系与数字化平台的系统性重构,以此消除跨阶段信息壁垒,形成计划与执行的闭环控制。通过整合规划、建设、运行三方职能,贯通全流程物资信息,建立需求与供应的动态协同机制,能够显著提升物资管理对工程进度与运行状态的响应能力,为配电网高效建设与可靠运行提供基础保障。后续研究应进一步聚焦新型电力系统建设背景下物资管控模式的适应性演进,以及数字化技术驱动下管控能力的智能化提升路径。

## 参考文献

- [1] 褚卓卓.考虑建设时序的配电网规划项目优选应用研究[J].电力系统规划研究, 2024, 12(3): 45-50.
- [2] 郑昕颖; 吴昀昕.新型农村配电网建设模式实践分析[J].产品可靠性报告, 2024, 41(5): 78-82.
- [3] 贾沈翔.10kV配电网规划中智能技术的应用分析[J].电气技术与经济, 2023, 28(4): 112-116.
- [4] 刘涵予.配电网规划项目评价优选应用研究[J].电力规划与管理, 2023, 15(2): 33-38.
- [5] 石宇杰.国网Y市供电公司配电网运维管理改进研究[J].电网运维技术, 2023, 20(1): 25-30.
- [6] 王江伟; 罗宇强; 张婧.配电网及其自动化技术[J].电力技术应用, 2023, 10(6): 88-92.
- [7] 徐昊.浅析城市能源主动配电网规划设计策略研究[J].中国设备工程, 2022, 39(7): 55-59.
- [8] 罗志杰.主动配电网适应性与扩展性规划研究[J].智能电网研究, 2022, 8(3): 41-46.
- [9] 陈雪琴.浙江乡村未来社区电气化建设[J].农村电气化, 2022, 33(2): 66-70.
- [10] 吴玉霞; 陈露东.贵州电网: 163个配套配电网项目助力乡村振兴[J].农村电工, 2022, 40(1): 72-75.

# Research on Automation Control Technology in Electrical Engineering

Ping Lin

Beijing Huashang Electric Lamp Co., Ltd., Beijing, 101400, China

## Abstract

Automated control in electrical engineering holds significant importance for production, safety, and industry development. It not only enhances production efficiency and quality stability but also bolsters the safety and reliability of system operation, while promoting innovative development in the industry. The technical highlights encompass multiple aspects: it necessitates the deep integration of core control theories and algorithms to adapt to complex scenarios; it requires the collaborative optimization of high-precision sensors and actuators to ensure accurate data acquisition and control output; it promotes the integration of hierarchical distributed architectures and industrial communication networks to enhance system integration; and it necessitates the implementation of safety mechanisms and redundancy designs to reduce the risk of failures and ensure stable system operation.

## Keywords

Electrical engineering; Automation; Control

# 电气工程自动化控制技术研究

林萍

北京华商电灯有限公司, 中国·北京 101400

## 摘要

电气工程自动化控制对生产、安全及行业发展意义重大,既能提升生产效率与质量稳定性,又可增强系统运行的安全性与可靠性,还能推动行业创新发展。其技术要点涵盖多方面:需实现核心控制理论与算法深度融合,以适应复杂场景;要进行高精度传感器与执行器协同优化,保障数据采集与控制输出精准;要推动分层分布式架构与工业通信网络融合,提升系统集成度;还需落实安全机制与冗余设计,从而降低故障风险,确保系统的稳定运行。

## 关键词

电气工程; 自动化; 控制

## 1 引言

随着社会快速发展,在电力行业中也发生翻天覆地的变化,而自动化控制是促进它发展的重要因素。电气工程自动化控制不仅可以提高工作效率,保证产品品质,还可以提高系统的安全性、可靠性,对行业起到积极作用。但是要想发挥自动化控制作用必须掌握核心技术。包括控制理论与方法结合;传感器与执行机构配合;结构与网络集成;安全冗余等,每一个方面都很重要,都是构成电气工程自动化控制的基础。

## 2 实现电气工程自动化控制的意义

### 2.1 提升生产效率与质量稳定性

在电气工程中,实现自动化对提高工作效率以及保证

产品质量稳定性有着举足轻重的作用。传统的手工操作由于受到人的身体条件的影响,比如疲劳、注意力不够集中等因素,在长期、大量的工作中,操作精准度及速度很难保持一致。但是自动化控制系统可以不分昼夜地根据预先设定好的指令准确无误地完成各项工作任务,而且它的工作速率远远大于人类的手工操作。

自动化控制可以让每个工序都有一定的时序要求,在原料进厂、零件加工直至最后装配的过程中,每一步都可以按时完成而不至于由于人为的原因造成耽误生产进度的问题。而且自动化控制可以按照设定好的工艺条件来进行工作,使每一个电气产品都符合同样的质量标准。而在电气元器件焊接上,自动化焊接机可以很好地把握住焊接温度、时间和压力等参数,使得焊接效果很稳定,不会因为人手焊接水平高低不同导致废品率上升,这样就极大地提升了整个工厂的工作效率以及产品的稳定程度。

### 2.2 增强系统运行的安全性与可靠性

电气工程系统一般都会涉及到高压、大电流等问题,

【作者简介】林萍(1979—),女,中国河北秦皇岛人,本科,高级技师,从事电气工程师研究。

在这种情况下人工操作是具有一定风险性的，而实现自动控制就可以减少人们进入危险区域的机会，从而提高整个系统的安全性。自动化控制系统有很好的故障监测与报警能力，可以随时监控到电气设备的工作状况，对于出现的问题也会立刻报警并且进行相应的防护。

当电气设备存在过载、短路等问题时，自动控制系统能够及时断电，防止事态恶化，以免造成火灾、爆炸等重大事故；同时也可以对电气设备的工作状态进行及时调节与优化，使设备处于良好工况下工作，降低设备出现问题的可能性，提高设备寿命。而在一些比较大的电气工程项目当中，比如电力系统或工厂自动化生产线上，自动控制系统的正常工作对于保证整个项目顺利开展具有重要意义，它可以预防由于某一部分问题而使全部停止运作的现象出现，从而提升系统的整体稳定性和鲁棒性。

### 2.3 推动电气工程行业的创新与发展

电气工程自动化控制是电气工程行业发展必然趋势，它的发展对行业创新以及进步起到积极推动作用。自动化控制技术的应用使电气工程不断有新思想、新技术出现，例如人工智能、物联网、大数据等，促进电气工程与其他学科之间交流与合作。

利用人工智能技术在电气工程自动化控制方面的应用可以使设备具有自我判断能力并能独立工作，从而提升整个系统智能化程度。而物联网技术能够使电气设备实现远距离监视以及操控，在任何时间地点都能及时了解设备运行情况。大数据技术可以对电气设备工作时产生的大量信息进行研究和提取有用内容，以便更好地改进产品设计以及预防可能出现的问题。以上各种新技术都极大地提升了电气工程整体质量和工作效率，同时也给电气工程领域带来了新机遇和发展空间，有利于其长远发展。同时，随着自动化控制技术的应用推广对电气工程领域人才提出了更高要求，使人们不断学习新知识、新技能，从而提高整个行业的整体水平。

## 3 电气工程自动化控制技术要点

### 3.1 核心控制理论与算法的深度融合

电气工程自动化控制技术的关键是控制理论和算法的高度结合，这是保证系统的精确控制、快速响应以及智能化的前提条件，传统的控制理论例如PID控制由于其结构简单并且具有较强的鲁棒性，在目前工业控制系统中仍然占据主导地位，在温度、压力、流量等被控参数为连续量的情况下，PID通过对比例、积分、微分三个部分进行配合使用可以很好地消除静差并达到良好的控制效果；但是当系统变得越来越复杂之后，传统的控制方法对于多变量、非线性和时变等系统就显得力不从心。

现代控制理论是以状态空间法为基础，在此基础上利用矩阵运算及线性代数的方法可同时考虑多个输入、输出变量，适合对较为复杂的系统进行描述与研究。如最优控制是

通过定义一个目标函数来求解在一定限制条件下使该目标函数取得最小值或最大值时对应的控制方法；而自适应控制是不断改变控制系统参数使其能更好地跟踪外界情况的变化以及参数的变化等。这些都是为了满足高精度、快响应的要求而提出的。

在电气工程自动化控制中，智能算法起着越来越重要的作用，促使着控制技术的发展进步。模糊控制模仿人的自然语言以及思维方式，将专家的经验知识变成明确的控制规则，在不确定性和非线性的条件下有独特的优势，可以很好地处理各种复杂的工况。神经网络控制利用多层感知机或者是深度学习的方法，以数据为基础对系统进行建模与控制，由于其良好的自我学习能力和泛化能力，能够从大量的信息中找到隐藏的联系并对系统实施精确的控制。强化学习让智能体不断的与外界进行互动，在不断地尝试错误的过程中改进自身的控制方法，从而使系统具有自主做决定的能力。而当这些智能算法与经典的、现代的控制理论相结合就形成了新的方法论——“混合智能控制”。它取各家之长，既有经典理论的稳定性，又有现代理论的灵活性，再加上智能算法的智能化，使得系统在复杂的环境下具有更好的鲁棒性和适应性，对电气工程自动化控制的发展起到积极的作用。

### 3.2 高精度传感器与执行器的协同优化

传感器和执行器是自动控制系统“感觉器官”、“手脚”，它们的工作质量决定了整个系统的控制质量和响应速度。开发高质量传感器并投入使用，给系统提供准确及时的信息。温度传感器利用热电偶或者热电阻来测量微小温差变化；压力传感器用压阻效应或者电容式来测量微小压力变化；光电传感器则是基于光电效应来测量物体的位置以及速度等信息。它们不仅具有很高的灵敏度而且还带有数字接口以及抗干扰能力从而保证通信的质量。

气动执行器是以压缩空气为动力源，结构简单、价格便宜，在不需很高速度情况下使用；而液压执行器是利用液压力传递能量，输出力大、反应快，一般用于负载较大、速度较快场合；电动执行器则是由电动机带动精密减速器组成，可以做到较高精度定位以及加速度。近年来，智能执行器出现使整个系统更加智能化。比如带有编码器伺服电机可以及时知道其所在位置从而构成闭环控制系统；有扭力反馈电动夹钳可以根据所抓取物体大小改变自身施加力度防止破坏等<sup>[1]</sup>。

通过对传感器以及执行器进行量程和精度标定保证采集的数据与反馈给控制器信号的一致性；使用同步控制方法使多个轴的执行器运动一致从而完成较为复杂的任务；用预测控制的方法依据传感器获得的信息及时改变执行器的工作状态以减少系统的延迟，这样可以更好地提高控制质量和鲁棒性。

### 3.3 分层分布式架构与工业通信网络的融合

分层分布式结构是当前工业控制系统的特点，它基于

功能分层以及设备分布来保证整个系统的可靠性和灵活性。管理层是整个系统的“大脑”，用于监视全厂情况，分析数据并进行优化等操作。如 SCADA 系统利用人机界面 (HMI) 显示设备工作状况以及生产信息，便于管理人员进行远程观察及干预；而 MES 系统侧重于生产调度管理，通过对排程、质量管理等工作改进提高产量及品质。控制层是整个系统的核心，负责实时控制的任务。PLC 通过计算以及顺序控制使生产线自动运转；DCS 使用多个分散的小型控制器来进行对连续工艺进行精细调整等。工业 PC 由于具有很强的运算性能可以实现复杂的算法以及大量的数据进行分析。

工业通信网络是连接管理级与控制级、设备级与设备级的“神经系统”，它对整个系统是否具备良好的及时性和稳定性起着至关重要的作用。现场总线技术比如 PROFIBUS、Modbus，利用串行通信方式实现现场设备与控制器之间信息传递，其优点是经济实惠并且安装方便；工业以太网技术例如 EtherNet/IP、PROFINET，由于其大带宽以及高传输速度可满足大量设备连接以及快速数据传输需求，因而成为工业控制领域的主要通信手段；而无线通信技术如 Wi-Fi、蓝牙、Zigbee 等则在移动设备监测或灵活布线场合发挥重要作用<sup>[2]</sup>。

分层分布式架构与工业通信网络结合促使系统朝着“管控一体化”的方向发展。通过统一通信协议以及数据格式使得各层之间以及各个设备之间可以互相连接；使用时间敏感网络 (TSN) 保证重要数据的及时性传输以适应实时控制的要求；借助边缘计算在设备上完成一部分的数据分析工作从而释放服务器资源加快整个系统的反应速度。这将使整个系统更加紧密同时也有利于以后工业互联网以及智能制造的发展。

### 3.4 安全机制与冗余设计的全面保障

安全是一套自动化控制系统的核心，它包括功能安全、信息安全以及物理安全三个方面。功能安全是为了防止危险的发生或者是减少其影响而保障人们的生命安全和设备不受损害，比如安全仪表系统 (SIS) 利用独立的传感器、逻辑控制器及执行机构一旦发现异常就会立即做出相应的响应动作；安全完整性等级 (SIL) 是对系统可靠性的评价，从而进行安全的设计。信息安全则是为了防止系统受到网络攻击以及信息泄露等，在工业互联网时代，由于工业控制系统越来越频繁地暴露在互联网中，所以它会面临更多的外部风

险，例如病毒、数据被篡改或者服务被拒绝连接等，可以通过部署防火墙、入侵检测系统以及使用加密通信等手段来提高安全性。使用零信任架构，对每一个访问请求都进行身份认证以及权限检查以避免非法访问。

物理安全是指设备在恶劣环境下能够正常工作。比如，采用防爆设计保证传感器和执行器能在易燃易爆环境中安全运转；取得 IP 防护等级证书以防止灰尘和水分对设备造成损害；配备有备用电源以及冷却装置以防由于温度过高或者失电导致设备出现问题等。冗余是提高系统的可靠性的有效方法，在系统出现某些问题的情况下可以使整个系统仍然可以正常工作的冗余即为冗余，硬件冗余包括两个 PLC 系统、两个电源模块等用主备切换的方式来避免单一故障点的存在；软件冗余则是指两套不同的控制策略或者数据备份与恢复机制来保证控制系统工作的准确性。网络冗余例如环形拓扑、双链路通信等方式都是利用多条路径进行通信以保证通信可靠性的方法。

安全机制以及冗余设计所提供的全方位保护，不仅可以减少系统的故障率，还可以提高生产的连续性，如在电力系统中，冗余设计可以使电网在设备发生故障的情况下仍然可以正常供电，在智能制造系统中，安全机制可以避免生产的数据泄露以及生产设备受到黑客攻击等，而这些正是使自动化控制系统可以在一些重要行业得到广泛使用的基础也是实现工业向“无人化”、“自主化”的前提条件<sup>[3]</sup>。

## 4 结语

电气工程自动化控制技术主要包括几方面内容，其中核心控制理论和算法相结合使系统具有一定的自主判断能力，高性能传感器以及执行机构配合使用保证控制精确度，分层分布结构及工业通信网络结合提高了系统整体性和及时性，安全保障措施以及容错设计全方位保护系统正常工作。理解和利用以上要点有助于提高电气工程自动化控制技术水平，有利于电气工程行业发展，更好地服务社会发展。

### 参考文献

- [1] 徐文婧. 机械设备电气工程自动化供配电节能控制技术分析[J]. 模具制造, 2025, 25 (12): 183-185.
- [2] 刘畅. 人工智能技术在石化企业电气工程自动化控制中的运用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (22): 177-179.
- [3] 李松林,李明. 电气工程自动化控制现状及智能化技术的有效应用分析[J]. 中国设备工程, 2025, (22): 28-30.

# Risk assessment and protection reinforcement technology for geological hazard sections of long-distance oil and gas pipelines

Yihui Wu Yaguang Cui

Xi'an Oil and Gas Transportation Branch Northwest Pipeline Company, State Pipeline Network, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

China's long-distance oil and gas pipelines often pass through complex geological conditions such as mountainous areas, loess areas, and karst areas. Geological disasters such as landslides, loess subsidence, and mudslides occur frequently, seriously threatening the safety of pipeline operation and the stable supply of oil and gas resources. In order to carry out risk assessment of pipelines in areas prone to geological disasters and improve the efficiency of pipeline disaster prevention and reinforcement, this article combines field geological surveys, comprehensively uses monitoring and numerical analysis methods, constructs a pipeline risk management system in disaster prone areas, analyzes the failure modes of pipelines under various geological disasters, and studies supporting disaster prevention and reinforcement technologies. The research results can be used for identifying and assessing the risk level of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines, providing efficient technical means to reduce pipeline operation risks, ensuring safe and stable pipeline operation, and providing technical ideas for risk control and governance of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines.

## Keywords

Long-distance oil and gas pipelines; Geological hazards; Risk assessment; Protection reinforcement

## 长输油气管道地质灾害区段风险评估与防护加固技术

吴毅辉 崔雅光

国家管网西北公司西安输油气分公司, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

我国长输油气管道多途经山区、黄土区、岩溶区等地质条件复杂地段, 滑坡、黄土湿陷、泥石流等地质灾害频发, 严重威胁管道运行安全与油气资源稳定供应。为开展地质灾害易发区管道风险评估、提升管道防灾加固效率, 本文结合外业地质调查, 综合运用监测与数值分析方法, 构建灾害易发区管道风险管理体系, 分析各类地质灾害作用下管道的失效模式, 研究配套防灾加固技术。研究成果可用于长输油气管道地质灾害易发区识别与风险等级评估, 提供高效技术手段降低管道运行风险, 保障管道安全稳定运行, 为地质灾害易发区长输油气管道风险管控与治理提供技术思路。

## 关键词

长输油气管道; 地质灾害; 风险评估; 防护加固

## 1 引言

伴随着长输油气管道工程建设规模的持续加大, 在工程建设期间势必会对沿途环境造成不同程度的破坏并遗留地下地质风险隐患, 而在运营期管道也会遭受到人类工程活动的侵扰和自然环境的破坏, 在管道的全生命周期中, 由地质灾害引发的管道事故将不可避免的时有发生, 这给管道安全运营造成了巨大威胁。根据第十次欧盟天然气管道事故数据报告, 1970 ~ 2016 年, 世界范围地质灾害致管道失效占总

失效事故约 14%, 其中滑坡占 64.66%, 洪水占 14.66%, 河流冲蚀占 4.31%, 采矿占 3.45%, 溃堤占 0.86%, 其他因素占 13.5%。随着 21 世纪全球管道总里程的高速增长, 地质灾害对管道安全运营造成的不良影响以及如何提高管道公司地质灾害管控水平将越来越被重视。开展长输油气管道沿线地质灾害重点区段风险识别与防护加固研究, 实现地质灾害风险精准识别与针对性防护加固, 提升管道防灾、抗灾、减灾能力, 对保障长输油气管道运营安全、保护沿线生态环境与公共安全具有重要现实意义与紧迫性。

【作者简介】吴毅辉 (1988—), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 管道管理技师, 从事长输管道地灾、风险评估研究。

## 2 长输油气管道地质灾害类型与致灾机理分析

### 2.1 典型地质灾害类型及分布特征

长输油气管道沿线地质灾害类型受地形地貌、岩土工程地质条件、气象水文、地质构造等因素控制,不同区域地质灾害发育特征差异显著。西北湿陷性黄土区以黄土湿陷、地面塌陷、边坡坍塌为主,该区域黄土疏松多孔,遇水浸湿后土体结构易破坏,产生不同程度湿陷变形,灾害多分布于管道穿越黄土塬、梁、峁、沟谷等部位;西南山地丘陵区地形复杂、岩体破碎、降雨集中,易诱发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,灾害多沿线路两侧边坡分布,具有突发性强、破坏力大的特点;南方岩溶地貌区岩土体中溶洞、土洞发育,地下水活动频繁,易引发地面塌陷,导致管道地基失稳、受力不均。不同区域管道地质灾害类型差异明显,常出现多种灾害叠加发生或同一部位反复致灾的情况,管道受损兼具渐变与突发双重特征<sup>[1]</sup>。

### 2.2 地质灾害对管道的破坏机理

各类地质灾害作用方式不同,对管道的损伤破坏机理存在差异。黄土湿陷、地面沉降主要引发管道不均匀沉陷变形,土体局部快速沉降使管道承受弯曲应力,当应力集中超过管道材料屈服应力时,会造成管道弯曲、防腐层刮擦破损,甚至断裂;滑坡、泥石流主要通过崩滑体与泥石流体的重力作用,以冲击、拖拽、挤压方式破坏管道,产生侧向推力与拉应力,导致管道受拉扭断、拉脱、挤压变形,甚至被直接剪断;崩塌落石以冲击荷载为主,落石冲击管道上方覆土,作用力传递至管道,造成管道局部凹陷、刮擦、开裂;岩溶地面塌陷导致管道下部土体瞬间悬空,管道在覆土自重与输送介质重力作用下,易发生拉伸破裂、接口松动、介质泄漏<sup>[2]</sup>。管道损伤破坏均与岩土体变形、应力传递及管道自身受力状态相关,多因素耦合作用会加剧管道损伤。

### 2.3 灾害致灾影响因素耦合分析

长输油气管道地质灾害是自然营力与人类活动共同作用的结果。坡度、岩土体性质、地质构造、降雨、地下水位是主要自然致灾因素:坡度大于 $15^\circ$ 、黄土湿陷系数大于0.3、岩层破碎区域,地质灾害发生概率显著升高;降雨强度增大会快速降低土体抗剪强度,易引发边坡失稳、黄土湿陷等灾害。人为致灾因素主要包括管道建设施工、沿线工程活动、地下水资源开采等:管道施工中边坡开挖会扰动原状土体结构,处置不及时易诱发滑坡;沿线农田灌溉、工程排水导致地下水位抬升,会加剧黄土湿陷、岩溶塌陷等灾害。通过分析自然与人为致灾因素,识别主控因素并明确耦合作用规律,可为地质灾害防控与加固治理提供依据。

## 3 长输油气管道地质灾害区段风险评估技术

### 3.1 针对性风险评估指标体系构建

结合各段长输油气管道地质灾害的区域特征,构建层次化、差异化、针对性强且贴合现场实际的指标体系,替代

通用型指标体系。指标体系分为目标层、准则层、指标层:目标层为地质灾害易发区管道综合风险等级;准则层包含地质灾害易发性、管道易损性、防控难易性3类指标;指标层选取原则与准则层对应。其中,地质灾害易发性指标包括地质类型、灾害规模、地形稳定性、降水敏感度;管道易损性指标包括管道材料强度、管道埋深、管径、管道使用年限;防控难易性指标包括交通条件、施工作业空间、管道监测布设难度<sup>[3]</sup>。结合不同地质灾害特征分配指标权重,湿陷性黄土区适当提高湿陷系数、地形高差、地下水位等指标权重,山区适当提高坡度系数、岩体风化破碎程度等指标权重,提升评估结果的准确性。

### 3.2 多方法融合风险评估模型

采用野外勘测、多手段监测与数值模拟相结合的耦合评价方法,弥补单一评价方法的缺陷。通过野外地质调查、原位测试获取沿线岩土条件、灾害点分布等基础数据;利用分布式光纤、InSAR监测、边坡测斜仪等设备,实时监测管道地表沉降、土体含水率、管道应力等数据,精准识别威胁管道安全的灾害点。采用层次分析法计算指标权重,结合模糊评价与FLAC3D数值分析,定量评价灾害风险概率与管道破坏后果等级,从单体灾害体到线路区间综合划分风险等级,将管道区段划分为高风险、中风险、低风险、无风险四级,指导后续防护加固工作。

### 3.3 工程案例风险评估实践

以西北某长输天然气管道黄土湿陷区段为研究对象,该管道管径813mm,已运行8年,途经黄土沟壑地段长度12.6km,区域黄土湿陷等级为II~III级,曾发生3处局部湿陷变形。采用上述评估方法对该区段开展风险评估,选取10处典型灾害隐患点,依据评估指标体系统计各项指标并赋值,评价结果见表1。结果显示,该区段高、中、低风险隐患点分别为3处、4处、3处,高风险点主要分布于黄土沟壑边坡及灌溉区下方,致灾类型为黄土湿陷与边坡滑塌耦合。该评估结果可精准锁定高风险管控区段,为后续重点防护加固提供依据,验证了该方法的可行性与有效性。

## 4 长输油气管道地质灾害区段防护加固技术

### 4.1 分灾害类型针对性防护技术

针对不同类型地质灾害采取差异化防治措施,实现因地制宜、精准治理。湿陷性黄土灾害点采用“地表封闭+土体加固+导排水系统”综合措施:地表采用黏土、混凝土盖板封闭,阻隔雨水、灌溉水下渗引发黄土湿陷;周边布设排水暗沟与截水沟,快速疏排地表水;湿陷严重区段采用灰土挤密桩加固土体,提升土体强度与地基稳定性。山地滑坡、泥石流灾害点采用“边坡锚固+拦挡工程+生态防护”综合措施:采用锚杆、锚索、框架梁加固边坡土体,抑制滑坡发育;坡脚设置拦石坝、泥石流导流槽,避免泥石流冲击管道;边坡表面栽植乡土植被,固土保水、减少坡面冲刷。

岩溶地面塌陷灾害点采用回填灌浆、梁板跨越、地基加固等措施：中小型溶洞采用砂、水泥浆回填灌浆加固；大型溶洞

采用梁板跨越结构，使管道支承于稳定地层；塌陷区地基采用 CFG 桩加固，提升地基密实度<sup>[4]</sup>。

表 1 管道湿陷性黄土区段风险评估结果

隐患点编号	灾害类型	地质灾害危险性评分	管道易损性评分	防控难度评分	综合风险值	风险等级
1	黄土湿陷+滑塌	86	72	68	78.5	高风险
2	地面沉降	71	69	65	68.3	中风险
3	黄土湿陷	83	70	66	75.2	高风险
4	边坡滑塌	75	68	63	69.1	中风险
5	地面沉降	62	65	60	62.7	低风险
6	黄土湿陷	80	71	64	73.8	高风险
7	边坡滑塌	73	67	62	67.9	中风险
8	地面沉降	60	64	59	61.2	低风险
9	黄土湿陷	70	66	61	66.4	中风险
10	地面沉降	58	63	58	59.8	低风险

#### 4.2 管道本体加固与抗变形技术

对受地质灾害影响轻微、已产生变形的在建及已建管道开展本体加固与抗变形改造，提升管道自身防灾能力。对于弯管变形、应力轻微超标管道，采用机械校正+局部补强加固工艺：使用管道校正器校正变形部位，粘贴碳纤维布或安装钢制套管进行局部加厚补强，恢复管道承载能力；对于接口破损、防腐层损坏管道，更换密封垫、修补防腐层，同时安装软接头，提升接口变形协调能力，分散土体变形应力，防止接口再次开裂。对于地质灾害高风险区段的已建与新建管道，宜选用抗变形能力强的柔性管材，并适当加大管道埋深，将管顶埋深控制在 2.0m 及以下，以此减小地表变形对管道的直接影响；同时在管道外壁与周边土体之间设置缓冲垫层，利用垫层的变形与耗能作用消散土体变形产生的附加应力，缓冲地质灾害对管道的冲击作用，提升管道在复杂地质条件下的抗变形与抗破坏能力。在管道应力敏感位置布设应力监测传感器，实现管道应力实时监测、早发现早处置。

#### 4.3 监测预警与长效运维保障技术

构建空地一体监测预警体系，实现地质灾害超前预警，结合长效运维管理，形成“提前防护+持续监测+动态管控”模式。地面监测采用分布式光纤应变传感器、孔隙水压力传感器、位移传感器，实时监测灾害易发边坡、湿陷区段的应变变形、土体含水率、管道应力等数据；空中监测采用无人机 LiDAR、InSAR 等遥感技术，定期扫描管道沿线地表形变，预判地质灾害隐患。建立监测预警阈值体系，数据接近限值时及时发出预警，为应急处置预留时间<sup>[5]</sup>。建立长效运维机制：地质灾害易发区段执行定期巡检制度，高风险区段缩短巡检周期，雨季、汛期加大巡检力度；建立隐患台账，定期检查防护加固工程质量，及时维修破损部位；定期开展运维

人员专业培训，提升应急处置能力，保障防护加固工程长效发挥作用。该技术体系应用于西北黄土管道案例后，高风险点灾害隐患得到有效控制，管道形变控制在允许范围内，未再发生湿陷、滑塌致管道损伤情况，防护效果显著。

### 5 结语

长输油气管道地质灾害易发区段风险防控是保障能源运输“生命线”安全的基础。定向风险评估技术可精准识别地质灾害风险点、划分风险等级，为防护加固提供依据；分类靶向防护加固技术可有效抵御地质灾害，降低灾害对管道的损伤程度，提升油气管道防灾安全性与运行可靠性。未来应持续推进大数据、人工智能与地质灾害风险评估技术融合，提升风险识别与预测精度；研发绿色高效、耐久的防护加固材料与施工技术，控制工程经济成本；强化全流程风险管理，逐步实现长输油气管道地质灾害事前精准预报、事中有效防控、事后高效养护，为管道地质灾害防治提供全方位技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 蓝明新.长输油气管道单体泥石流灾害风险评价研究[J].管道保护,2026,3(01):47-52+71.
- [2] 王宇.长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析[J].化工矿产地质,2021,43(04):356-363.
- [3] 王珀,姜垣良,刘英吉.中缅油气管道(缅甸段)地质灾害防治工程管理与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(01):92-94.
- [4] 薛俊卓,詹辉,张国良,等.长输油气管道河沟段水毁灾害气象风险评估研究[J].安全与环境工程,2020,27(02):168-174.
- [5] 宋一纯.长输油气管道安全影响因素分析及安全监控管理体系研究[J].石油化工安全环保技术,2021,37(06):16-19+5-6.

# Research on the Collaborative Operation and Optimization Scheduling Strategy of “Source-Grid-Load-Storage” Based on Incremental Distribution Network

Shengqi Huang

State Power Investment Corporation Xuchang Comprehensive Smart Energy Co., Ltd., Xuchang, Henan, 461000, China

## Abstract

This study investigates operational challenges arising from high renewable energy integration in incremental distribution networks, focusing on coordinated optimization of “source-grid-load-storage” systems. By analyzing system characteristics and operational challenges, the research develops refined models for distributed generation, flexible loads, and energy storage systems. An optimized scheduling framework is established with objectives of cost-effectiveness, stability, and low-carbon performance, incorporating a multi-time-scale collaborative scheduling approach and a full-cycle optimization strategy that includes day-ahead planning, rolling adjustments, and real-time control. The findings demonstrate that this methodology significantly enhances system efficiency, improves renewable energy utilization, and ensures power supply stability, providing theoretical support and practical guidance for optimizing incremental distribution network operations.

## Keywords

Incremental distribution network; Source-grid-load-storage coordination; Optimal dispatching; Multi-time scale; Operation strategy

## 基于增量配电网的“源—网—荷—储”协同运行与优化调度策略研究

黄胜奇

国电投许昌综合智慧能源有限公司, 中国·河南许昌 461000

## 摘要

本文研究增量配电网中高比例新能源接入所引起的运行问题,“源-网-荷-储”协调优化调度的研究。分析系统特性及运行难题,创建分布式电源、柔性负荷和储能系统的精细模型;塑造以经济性、稳定性、低碳性为目标的优化调度模型,规划多时间尺度协同调度框架并给出包含日前计划、日内滚动调整和实时控制的全周期优化策略。研究结果显示,此方法能很好地提高系统的运行效率、改善新能源的利用、保证供电的稳定性,为增量配电网优化操作给出一定的理论支撑及实践指导。

## 关键词

增量配电网; 源-网-荷-储协同; 优化调度; 多时间尺度; 运行策略

## 1 引言

随着能源转型步伐加快与电力体制改革推进,增量配电网成了配电网侧达成能源改良调配及多种主体互动的关键平台。和传统配电网相比较,增量配电网的结构特征、运行模式以及负荷特性等都存在着明显的区别,大量的高比例分布式能源,多元化的柔性负荷和储能装置被接入之后,使得整个系统的复杂性也极大提高<sup>[1]</sup>。因此,“源-网-荷-储”的协同运行及优化调度成为提高系统运行水平、保证电网的

安全稳定以及推动清洁能源利用的重要技术手段,具备很高的理论研究意义和工程实用价值。

## 2 增量配电网与“源—网—荷—储”系统概述

### 2.1 增量配电网基本特征

增量配电网就是指除了传统电力公司的存量资产以外的新增配电网部分,一般由社会资本来投资、建设以及运维。基本特点和传统配电网明显不同。在投资和运营主体方面形成多元化态势,多个主体以竞争形式取得特许经营权,从而形成了市场化竞争的机制,并提高了运营效率和服务品质。另外,在网架结构上,增量配电网一般服务新建的工业园区、商业中心或者城镇新区,因而网络规划更具有前瞻性,设备相对比较新,容易接受先进的智能化技术<sup>[2]</sup>。最后负荷特性

【作者简介】黄胜奇(1992—),男,中国河南平顶山人,本科,工程师,从事综合智慧能源领域的技术研究与工程实践研究。

方面,增量配电网区域内一般有较多高可靠性的需求或者可调节的工业、商业负荷,为实行需求侧响应和柔性调度创造有利条件。

## 2.2 “源-网-荷-储”协同体系构成

源、网、荷、储协同系统是一个有机整体,各个部分之间相互影响、互相作用。“源”主要是接入配电网的分布式电源,有光伏发电、风力发电以及天然气分布式能源。它们是清洁能源供应的主要部分,但是其出力具有间歇性、不稳定性。“网”代表增量配电网自身,包括线路、变压器、开关设备及保护、控制和通信系统<sup>[3]</sup>。它作为能量传输与分配的物理载体,又是实现协同控制的关键枢纽。“荷”指的是电力负荷,特别有调节能力的柔性负荷比如可中断负荷、可移位负荷等。它们从原来的被动的电能消费者变成了可以参与到系统调节过程中的积极因素。“储”是储能系统的意思,比如电化学储能等,充放电双向性赋予它调峰填谷、充当备用容量的关键灵活功能。

## 2.3 协同运行面临的挑战

高效的源-网-荷-储协同运行存在很多困难。一是由于分布式电源的强不确定性、波动性导致的。高比例新能源接入使净负荷曲线难以预测,给系统功率平衡及安全稳定运行造成巨大压力。二是多主体之间存在利益协调和信息交互的复杂性。电源、电网、用户、储能可以属于不同的所有者,它们的目标函数也不相同,怎样设计出一个合适的市场机制或者协调策略来满足各个方面的利益需求并且使得整个系统的效益达到最大值,这是需要解决的问题。三是协同控制的实时性强。系统状况变化很快,需要对大量的信息做迅速的处理,并及时地作出判断决策,因此对于通信网络来说可靠性要高,对运算方法来讲效率需要很高,对操纵信号而言精度要强。

## 3 系统建模与特性分析

### 3.1 分布式电源建模

精确建立分布式电源模型是实现优化调度的前提条件。光伏出力受光照、温度以及太阳能电池组件自身影响而产生变化,其数学表达式可以用上述几个变量之间的关系来描述,出力曲线具有一定的日内波动及季节性特点<sup>[4]</sup>。风力发电机的输出功率与风速高度有关,并且一般服从某种概率分布,其出力具有较强的随机性和反调峰特性。微型燃气轮机可控分布式电源需要建立燃料消耗、出力范围、爬坡率等约束模型来描述其可控性能。

### 3.2 柔性负荷特性分析

柔性负荷属于“源、网、荷、储”协调系统中的一种可调节资源,依据它的反应特性可以分出大略三类。一是可中断负荷,在系统出现紧急情况的时候可以断开的负荷,为电力系统提供备用保障,模型的核心就是中断的时间长度和补偿方式。二是可以移动负荷,例如电动汽车的充电、部分

生产工艺等,用电总量固定,但用电的时间段可选择在规定时间内调节使用,有利于削峰填谷。三是可调负荷,例如中央空调、储能式电采暖等,在一定范围内可以连续调节自己的功率,给电网供应持续的功率。

## 3.3 储能系统运行模型

储能系统在协同运行中起着调节器、稳定器的作用,因此对它的运行模型要能准确地反映它的工作状态以及能量的变动情况。数学模型需要有荷电状态方程来描述其内部能量储存的状态,这可以保证储能系统能够安全地运作。需要创建一个充放电功率和效率模型,充放电功率会受其额定功率的影响,并且充放电的过程中会有效率损失<sup>[5]</sup>。除此之外还有最大最小荷电状态约束以及循环寿命损耗约束等。这些模型组成了在调度中对储能系统行为的描述。

## 4 协同运行优化模型构建

### 4.1 优化目标与约束条件

协同运行优化模型属于一个多目标优化问题,主要的核心优化目标为使系统的总运营成本最优化,在该过程中要兼顾购电成本、燃料费、设备运维费和需求响应补偿费用等各个方面;其次是要将网络损耗降至最低限度;最后是要最大限度地消化可再生能源;这样可以使得清洁能源得以被充分利用。这些目标一般需要利用加权等方式转成单目标问题来解决。约束条件保证了优化的结果可靠有效,系统需要满足功率平衡的限制,这是基本的物理法则<sup>[6]</sup>。网络结构要符合节点电压约束和线路传输容量约束等安全运行的要求,各个单元的运行还要遵守自身的技术限制,比如分布式电源出力的上下限,储能系统的SOC限制、柔性负荷响应能力的限制等。

### 4.2 多时间尺度调度框架

为解决可再生能源预测精度随时间尺度缩短而提高的特点,需采用多时间尺度调度框架。该框架通常包含日前调度、日内滚动调整和实时控制三个层级。日前调度以未来24小时为周期,基于预测数据制定初步的调度计划,确定各单元大致的出力曲线和启停状态。日内滚动调整以小时或15分钟为周期,利用更新的预测数据对日前计划进行修正,以应对预测误差。实时控制则以秒或分钟级运行,基于超短期预测和实时测量数据,对机组出力和负荷进行微调,确保系统的实时功率平衡。

### 4.3 模型求解算法

所建立的优化模型往往具有高维、非线性、多约束等特点,要选用合适的求解方法。对于可以近似为线性的模型来说,使用线性规划或者混合整数线性规划是比较好的选择。非线性模型要使用非线性规划或者智能优化算法来实现,遗传算法、粒子群算法等都属于这一类算法,它们都有很强的全局搜索能力,可以解决复杂非线性问题,但是运算量较大。根据模型的复杂程度以及对计算速度的要求来选择

适当的算法或者多种算法相结合的方法求解。

## 5 协同优化调度策略

### 5.1 日前经济调度策略

日前经济调度策略属于全局优化的重要部分。在日前时间点里，它以未来的24小时内全系统的总发电成本最低作为主要目的，在考量了电力需求、可再生发电量预测以及电网电价等其他因素之后制定了电源、储能和负荷的调节计划<sup>[7]</sup>。计划确定了常规分布式机组启停的状态及出力的基点，安排储能系统在低谷充盈、峰段排空的基本策略，并同可调负荷用户达成次日负荷调整时长、能力的相关协议，为次日电网经济运行打下基础。

### 5.2 日内滚动调整策略

日内滚动调整策略主要是应对不确定性。运行日不断推移，在此期间根据最新的超短期风光出力及负荷预测数据，对未来的数个小时的调度计划做滚动优化。该策略对日前计划做偏差校正，比如实际光伏发电量大于预测时可以令储能系统少放电或者多充电；也可以减少从主网购电。负荷突然增加的时候，储能可以快速放电，或者调用需求侧资源。该策略明显提升了调度计划对现实情况的适应能力，增加了系统稳定性。

### 5.3 实时平衡控制策略

实时平衡控制策略为保障系统的安全稳定运行的最后一道防线，以实时量测信息为基础数据，在分钟或秒的尺度上运行，采取基于电网实测数据的快速本地或者分布式控制办法，对于系统出现的一时性的功率短缺或盈余做出补偿。用储能系统毫秒级的快速响应能力去抑制频率的变化，或者利用预设好的负荷控制指令切除非重要负荷。实时控制策略侧重于响应速度以及控制的可靠性，可以作为日前、日内调度的有效补充，二者一起构成了一个完整的协同优化调度体系。

## 6 策略分析与验证

### 6.1 优化结果分析

分析优化调度策略的结果，以判断该策略的有效性。需要把重点放在优化前后的系统关键指标对比上。重点考察系统总的运行成本变化的趋势，分析出成本节约的原因到底是来源于购电费用的降低、设备利用率的提高还是网损的减少<sup>[8]</sup>。并且需要对可再生能源的消纳率展开详细的剖析工作，查看弃风弃光的现象是否已经得到很好的缓解，在调度计划

里面也要仔细研究各个单元输出功率的变化趋势，并检查储能系统的工作方式、柔性负荷的表现情况能否达到预定的标准要求，以此来评定协同方法是不是切实可行且有效。

### 6.2 系统性能评估

系统性能评估要从全方位衡量出协同优化调度给增量配电网运行质量所起到的改善效果。应该包含安全方面的数据指标，比如各个节点电压是否保持在标准范围内、各条输电线路是否出现了过负荷的现象以及整个电力系统的稳定性如何等。除了总成本这个经济性指标之外还可以用资产利用程度、投资收益等作为经济性指标，而供电可靠率是否因为优化调度有了提高，则是衡量可靠性的一项标准。对这些多维的性能指标进行整体评价，可以公允地体现“源-网-荷-储”协同工作产生的综合效益。

### 6.3 与传统调度方式对比

与传统的调度方式相比，用提出的协同优化调度方法来突出优势。而传统调度方式一般采取“源随荷动”的刚性调度模式，并不能很好地应对分布式能源和负荷的波动性，常常会表现出较高的运行成本、有限的可再生能源接入能力以及紧张的系统运行裕度等弊端<sup>[9]</sup>。用相同边界的仿真进行对比，能定性地表现出协同调度对于减少运行费用、提高新能源接纳能力、增加系统调峰的灵活性、保障供电稳定的作用明显，能够论证其先进性和必要性。

## 7 结语

本文对增量配电网中源、网、荷、储的协调优化调度问题进行了系统的研究，并构建了完整建模和优化框架。利用了多种时间尺度下的协同控制算法从而实现了系统的经济性、稳定性以及低碳性的最佳优化效果，从研究结果中可以看出，该方法可以有效的提升对新能源的消耗能力并且使得电力网络供应更稳定<sup>[10]</sup>。本文给增量配电网优化运行提供理论支撑以及实践指导，未来将在提高预测精度、市场规则设计、人工智能技术运用等方面展开更深入研究，推动“源-网-荷-储”协同技术继续发展。

### 参考文献

- [1] 袁桂丽,丁宁,杨彪,等.源网荷储协同优化的主动配电网日前调度[J].科学技术与工程,2024,24(24):10337-10347.
- [2] 陈将宏,李雪莲,袁腾,等.源网荷储协同的主动配电网多时间尺度优化调度[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(03):343-353.
- [3] 范馨予,黄媛,吴疆,等.考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J].电力建设,2023,44(04):63-73.

# Study on the Calculation Model of Finished Product Sampling Quantity for Traditional Chinese Patent Medicine Preparations Based on the Chinese Pharmacopoeia (2025 Edition)

Xiangdong Zhao<sup>1</sup> Heng Zhao<sup>2</sup>

1. Shanxi Provincial Drug Safety Risk Monitoring Center, Taiyuan Shanxi, 030031, China

2. Shanxi Medical Device Testing Center, Tanyuan, Shanxi, 030012, China

## Abstract

**Objective:** To investigate the formation logic of finished product sampling quantity for traditional Chinese patent medicine preparations under the framework of the Chinese Pharmacopoeia (2025 Edition), and to establish a calculation model applicable to regulatory sampling and inspection practice. **Methods:** Based on the monographs and general chapters of traditional Chinese patent medicine preparations in the Chinese Pharmacopoeia (2025 Edition), together with statistical data on sampling quantities, the sample consumption characteristics of inspection items for different dosage forms were analyzed. The formation basis of the "total quantity" and "double quantity" was clarified, and a calculation model for sampling quantity was established. **Results:** The finished product sampling quantity of traditional Chinese patent medicine preparations is not a fixed empirical value, but a cumulative result of statutory inspection item consumption, further adjusted by parallel tests, reinspection, retained samples, minimum package conversion, and operational loss. Considerable differences were observed among dosage forms. Tablets and capsules mainly relied on cumulative unit dosage numbers, pills were characterized by mixed conversion between mass units and dosage units, while liquid preparations were primarily based on cumulative volume with consideration of transfer losses. **Conclusion:** The determination of sampling quantity for finished traditional Chinese patent medicine preparations should shift from empirical judgment to an item-driven calculation model based on pharmacopoeial quality standards. Establishing a unified calculation framework is conducive to improving the scientific validity, standardization, and traceability of sampling practice.

## Keywords

Chinese Pharmacopoeia (2025 Edition); Traditional Chinese patent medicine preparations; Finished product sampling; Sampling quantity calculation; Quality standard

## 基于《中国药典》2025年版的中成药制剂成品抽样量计算模型研究

赵向东<sup>1</sup> 赵恒<sup>2</sup>

1. 山西省药品安全风险监测中心, 中国·山西太原 030031

2. 山西省医疗器械检测中心, 中国·山西太原 030012

## 摘要

**目的:** 探讨《中国药典》2025年版框架下中成药制剂成品抽样量的形成逻辑, 构建适用于监督抽样与检验实践的计算模型。**方法:** 以《中国药典》2025年版中成药制剂品种标准及剂型通则为依据, 结合中成药制剂抽样统计资料, 对不同剂型检验项目的耗样特征进行归纳分析, 解析“合计量”与“二倍量”的形成机制, 并建立抽样量计算模型。**结果:** 中成药制剂成品抽样量并非固定经验值, 而是由法定检验项目耗样量逐项累加形成, 并在此基础上结合平行试验、复核、留样、最小包装换算及操作损耗进行修正。不同剂型的抽样量形成机制存在明显差异: 片剂、胶囊剂以单位制剂数累加为主, 丸剂以质量单位与制剂单位混合换算为特征, 液体制剂则以体积累加并兼顾分装损耗。**结论:** 中成药制剂成品抽样量确定应由经验判断转向基于药典质量标准的项目驱动型计算模式。建立统一的抽样量计算框架, 有助于提高抽样工作的科学性、规范性和可复核性。

## 关键词

中国药典2025年版; 中成药制剂; 成品抽样; 抽样量计算; 质量标准

**【基金项目】**《〈中国药典〉中药制剂检验用样品量标准化研究》(项目编号: SXSGGLYB2531)。

**【作者简介】**赵向东(1970—), 男, 中国山西运城人, 本科, 副主任药师, 从事临床药学、药品风险监测研究。

## 1 引言

药品抽样是药品质量监管和实验室检验工作的前提环节, 其实施质量直接影响后续检验结论的准确性与可追溯性。与化学药相比, 中成药制剂具有处方组成复杂、生产工

艺差异大、剂型类型多样、包装规格不统一等特点，因此其成品抽样量的确定更具技术复杂性。若取样不足，可能造成法定检验项目无法完成、复检样品缺失及技术争议难以处理；若取样过多，则会造成不必要的资源消耗，增加监管和企业成本。由此可见，建立一套兼顾法规要求与检验实践的抽样量计算方法，对于中成药质量监督具有现实必要性。

《中国药典》2025年版是药品法定标准体系的重要组成部分。虽然药典并未以单独章节对中成药制剂成品抽样量作出统一公式化规定，但在各品种标准及剂型通则中，通过“取本品若干片”“取内容物若干克”“精密量取若干毫升”等形式，已经提供了抽样量核算的基础数据来源。同时，片剂、胶囊剂、丸剂、颗粒剂、口服液、注射剂等不同剂型通则中关于差异性检查、微生物限度、无菌、装量、可见异物等项目的要求，也进一步决定了样品需求量的下限。

现有关于药品抽样的研究，多集中于抽样程序、统计抽样原理或监督抽样规范的制度层面，而对中成药制剂抽样量如何由质量标准项目逐步推导形成，讨论相对不足。尤其在药典文本与抽样执行之间，尚缺乏一套清晰的项目化计算逻辑。基于此，本文结合《中国药典》2025年版中成药制剂相关标准及抽样统计资料，对成品抽样量的形成依据、计算思路及剂型差异进行系统分析，并尝试建立适用于中成药制剂的抽样量计算模型，为抽样标准化管理提供参考。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

本文所用资料主要包括两个部分：一是《中国药典》2025年版中成药制剂各品种质量标准及相关剂型通则；二是中成药制剂抽样统计资料。后者涵盖注射剂、颗粒剂、片剂、散剂、口服液、酞剂、酒剂、糖浆剂、合剂、丸剂、胶囊剂、眼用制剂、栓剂、软膏剂等剂型，并按品种、规格和检验项目列出抽样合计量与二倍量，同时保留部分药典原文中的取样描述。

### 2.2 研究方法

本研究采用文献梳理、归纳比较与模型分析相结合的方法。首先，对药典中与中成药制剂检验相关的取样要求进行提取与整理；其次，按照剂型类别和检验项目类型对样品消耗方式进行归类；再次，结合抽样统计资料，对“合计量”和“二倍量”的形成规律进行分析；最后，在此基础上提出中成药制剂成品抽样量的计算模型，并讨论其适用条件。

### 2.3 基本概念界定

为保证分析口径一致，本文将有关概念界定如下：

“单项耗样量”指单个检验项目完成所需要的最低样品量；

“基础检验量”指完成药典规定全部法定检验项目时所需样品量的总和；

“合计量”指对基础检验量进行必要折算、合并后的

总样品需求量；

“二倍量”指在合计量基础上，考虑复核、留样及争议处理需要而确定的放大量。

## 3 中成药制剂成品抽样量的依据与特点

### 3.1 品种质量标准是抽样量测算的直接来源

中成药制剂抽样量的确定首先受制于法定质量标准。药典品种项下通常包括鉴别、检查、含量测定以及必要时设置的特征图谱、指纹图谱和专项安全性检验。每一个检验项目均以特定方式消耗样品，因此品种标准中列明的取样量可以视为抽样量推算的原始单元。对于固体制剂，多以片、粒或克作为耗样单位；对于液体制剂，则多以毫升计量。换言之，抽样量并非脱离标准而独立存在，而是由检验项目直接“生成”。

### 3.2 剂型通则项目构成通用样品消耗部分

除品种项目外，各剂型通则中的共性检验要求同样决定了抽样量。例如片剂需实施重量差异、崩解时限等检查；胶囊剂需完成装量差异和崩解时限；液体口服制剂往往需进行装量、pH值、相对密度、微生物限度检查；注射剂则涉及无菌、细菌内毒素、可见异物和不溶性微粒等。虽然这些内容并不一定在每个品种标准中完整重复出现，但实际检验时属于不可省略项目，因此应统一纳入抽样量核算范围。

### 3.3 抽样量具有项目依赖性与剂型依赖性

从中成药制剂抽样统计结果看，即便属于同一剂型，不同品种之间的抽样量也存在明显差别。这表明抽样量不是单纯由剂型决定，更重要的是受检验项目数量、方法学要求及样品处理方式影响。另一方面，不同剂型由于样品形态差异、检验项目构成不同，也决定了其抽样量形成逻辑存在显著差异。因此，中成药制剂抽样量具有典型的双重依赖特征，即既依赖于质量标准项目，也依赖于剂型性质。

## 4 中成药制剂抽样量的形成逻辑

### 4.1 各法定检验项目耗样量的总和构成基础抽样量

中成药制剂抽样量的计算应建立在项目耗样逐项统计的基础上。这里的关键点在于，抽样量并不是“取单项最高值”，而是“按项目逐项累计”。原因在于不同项目所需样品在用途上通常互不替代。例如差异性检查需要完整包装单位中的独立制剂，含量测定则通常需要粉碎、混匀后称量，微生物限度则要求样品未受分析过程污染。故同一份样品难以同时满足全部项目要求，项目累加是抽样量测算的基础逻辑。

### 4.2 方法学重复要求会提高实际样品需求

在定量分析和部分专项检验中，实验室通常需要开展平行试验或重复测定，以增强检验结果的可靠性。例如高效液相色谱法往往至少需要重复制备供试品溶液，微生物限度项目涉及不同培养基和不同检验条件，图谱类项目也常存在重复确认要求。虽然标准文本中未必逐一写明重复取样量，

但在实际执行中这些重复过程会消耗额外样品,因此抽样量测算不应局限于理论最低值。

#### 4.3 复检与留样需求决定推荐抽样量上浮

药品监督抽样不同于普通实验室内部取样,其结果可能涉及行政判定、企业异议、技术复核和仲裁检验。因此,抽样时不仅要满足一次性检验需要,还应为可能的复检和追溯留有余量。抽样统计资料中的“二倍量”正体现了这一思路,即在完成法定项目所需基础量的基础上,再预留一份接近等量的样品,以备复核、仲裁或留样使用。这种做法兼顾了监管严谨性与操作稳定性。

#### 4.4 理论样品量需通过包装规格换算为实际抽样件数

药典标准中的耗样量通常以片、粒、克或毫升为单位,而实际抽样则必须落实到最小销售包装。因此,理论计算结果必须转换为完整包装件数,并向上取整。例如理论需要一定数量的片剂时,若单盒片数不足,则必须增加整盒数量;液体制剂如以支装销售,同样需要按整支换算。由此可见,最小包装规格在实际抽样执行中对最终抽样件数具有直接影响。

#### 4.5 样品前处理过程中的损耗应纳入修正范围

在样品称量、粉碎、提取、过滤、转移及分装过程中,往往存在不可避免的操作损失。特别是液体制剂、膏剂和易挥发样品,其损耗比例相对更高。若抽样量计算完全按理论最低值执行,可能在实际检验中出现样品不足的问题。因此,在建立抽样量模型时,应保留合理的损耗修正空间。

### 5 不同剂型抽样量的计算路径

#### 5.1 片剂和胶囊剂:以单位制剂数为基础进行累计

片剂、胶囊剂的抽样量通常以“片”或“粒”为基本单位。此类制剂需要考虑差异性检查、崩解时限、鉴别、含量测定及微生物限度等项目的独立耗样需求。统计资料显示,即使规格相近,不同品种的总抽样量仍会因检验项目构成不同而出现较大差异。因此,该类制剂的抽样量计算应以单位制剂数逐项叠加,再配合复核留样进行修正。

#### 5.2 丸剂:需在质量单位与丸数之间建立换算关系

丸剂的抽样量测算具有较强的规格依赖性。药典中既可能以克数表达取样要求,也可能以丸数表示,因此在计算时必须将质量需求与制剂单位需求统一换算。特别是大蜜丸、水蜜丸、小蜜丸等不同规格剂型之间,单位丸重差异显著,导致相同质量对应的丸数和包装件数存在较大不同。因此,丸剂抽样量应首先确定总质量需求,再依据规格折算为丸数及实际件数。

#### 5.3 颗粒剂和散剂:以质量累加后换算袋数或盒数

颗粒剂和散剂的主要耗样单位为克。常见检验项目包括粒度、水分或干燥失重、装量差异、鉴别、含量测定和微生物限度等。此类制剂抽样量形成的主要思路是:按项目统计总质量需求,再依据每袋或每盒包装量折算为实际抽样数

量。由于装量差异及微生物限度通常需要独立样品,故其总样品需求往往高于单纯理化分析所需。

#### 5.4 液体制剂:按总体积核算并预留分装损耗

口服液、合剂、糖浆剂等液体制剂的抽样量主要以毫升为计量基础。除鉴别和含量测定外,通常还需进行装量、pH值、相对密度及微生物限度等检查。由于液体样品在开启后易污染、分层或挥发,多个项目不能完全共用同一样品,且分装过程中存在明显损耗,因此其抽样量计算应以总体积累加为基础,并适当留出分装损耗裕量。

#### 5.5 注射剂、眼用制剂与栓剂:安全性检验显著提高抽样需求

注射剂和眼用制剂在常规鉴别、含量测定外,还承担更高层次的安全性检测任务,如无菌、细菌内毒素、可见异物、不溶性微粒等,部分中药注射剂还涉及溶血、过敏和异常毒性项目。栓剂则需考虑重量差异、融变时限、微生物限度和含量测定等。由于此类项目具有独立样本需求,且样品在检测中不可逆消耗较大,故其抽样量通常高于一般口服制剂。

### 6 抽样量计算模型

综合药典标准文本、统计资料及检验实际需求,可将中成药制剂成品抽样量表示为:

$$Q = \sum q_i + q_p + q_r + q_s + q_l$$

式中,  $Q$  为抽样总量;  $q_i$  为各法定检验项目所需样品量;  $q_p$  为平行试验附加量;  $q_r$  为复检或仲裁预留量;  $q_s$  为留样量;  $q_l$  为操作损耗修正量。

若用于监督抽样等需兼顾复核与留样的场景,可采用简化表达:

$$Q_2 \approx 2 \times \sum q_i$$

即以基础检验总量为核心,按二倍量执行。该方式与现有抽样统计资料中“合计量一二倍量”的结构相符,具有较好的实务适应性。

### 7 讨论

#### 7.1 模型化抽样有助于提升抽样规范性

相较于经验抽样,基于药典项目需求的模型化抽样更能体现法定标准要求,减少不同抽样人员、不同机构之间因经验差异造成的执行偏差。尤其对于中成药这类项目结构复杂的制剂,模型化抽样有助于形成统一技术口径。

#### 7.2 “二倍量”更符合监管实践中的稳健控制原则

监督抽样不仅面向一次性检验,还面向复核和争议处理,因此推荐抽样量不能仅满足“最低完成量”。二倍量能够在操作上保持简洁,同时又覆盖多数复检与留样需要,因而具有较强实用性和监管适配性。

#### 7.3 后续研究应加强实证验证

本文主要基于药典文本和抽样统计资料开展理论分析,尚未结合多实验室实测耗样量进行量化验证。不同实验室在

样品前处理、重复次数和损耗控制方面存在差异,未来可过多中心实证研究进一步优化模型参数,提高适用精度。

## 8 结语

中成药制剂成品抽样量的形成并非依赖经验判断,而应建立在法定检验项目耗样量逐项统计的基础上。按照“项目累加—复核放大—包装换算—损耗修正”的思路,可以构建较为稳定的抽样量计算模型。该模型既能够解释不同剂型、不同品种间抽样量差异,也有助于推动监督抽样和检验实践的标准化、规范化与可复核化。

## 参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 四部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025.
- [3] 王芳, 李强, 赵敏. 药品监督抽样技术规范研究进展[J]. 中国药事, 2022, 36(8): 912-918.
- [4] 张磊, 马会敏. 中成药质量标准与抽样检验关联性分析[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(15): 4210-4215.
- [5] 刘洋, 陈晨. 药品检验中样品量确定原则及应用[J]. 药物分析杂志, 2021, 41(10): 1801-1806.
- [6] 孙静, 周楠. 中成药不同剂型抽样检验关键问题探讨[J]. 中国药品标准, 2020, 21(6): 457-462.
- [7] 国家市场监督管理总局. 药品质量抽查检验管理办法[Z]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2023.
- [8] World Health Organization. Guidelines for sampling of pharmaceutical products and related materials[R]. Geneva: World Health Organization, 2021.

# Research on lightweight detection methods for computer vision in complex industrial scenarios

Tao Song Dingyuan Mo

College of Mathematical and Statistical Sciences Baise University, Baise, Guangxi, 533099, China

## Abstract

Complex industrial scenes present challenges such as variable illumination, cluttered backgrounds, and small targets, making it difficult for traditional computer vision detection models to balance detection accuracy and lightweight deployment requirements. This paper reviews four types of lightweight detection methods based on network architecture optimization, model compression, transfer and few-shot learning, and multi-modal fusion. It compares the advantages and disadvantages of various methods, analyzes key issues and solutions in combination with application practices, and verifies the effectiveness of the methods through the construction of an evaluation index system and comparative experiments. The research shows that lightweight methods integrating multiple technologies can better adapt to complex industrial scenes, achieving a balance between accuracy and efficiency, and providing theoretical support for the implementation of intelligent and lightweight industrial detection.

## Keywords

Complex industrial scene; Computer vision; Lightweight detection; Multimodal fusion

## 面向复杂工业场景的计算机视觉轻量化检测方法研究

宋涛 莫定源

百色学院数理科学与统计学院, 中国·广西 百色 533099

## 摘要

复杂工业场景存在光照多变、背景杂乱、目标微小等问题, 传统计算机视觉检测模型难以兼顾检测精度与轻量化部署需求。本文梳理基于网络架构优化、模型压缩、迁移与小样本学习、多模态融合的四类轻量化检测方法, 对比各类方法优劣, 结合应用实践分析关键问题与解决方案, 通过构建评估指标体系和对比实验验证方法有效性。研究表明, 融合多技术的轻量化方法能更好适配复杂工业场景, 实现精度与效率的平衡, 为工业检测智能化、轻量化落地提供理论支撑。

## 关键词

复杂工业场景; 计算机视觉; 轻量化检测; 多模态融合

## 1 引言

在智能制造向纵深发展过程中, 工业检测作为质量控制的核心环节, 对检测实时性、部署便捷性的需求越来越迫切。复杂工业场景中, 由于光照变化、设备干扰、微小故障等因素, 传统检测模型存在精度不足、难以适应新需求的问题, 也有模型烦琐、算力耗费大, 不能部署到边缘设备的痛点。当前, 计算机视觉检测技术虽广泛应用于工业领域, 但轻量化和高精度难以兼得, 仍是影响其落地的关键瓶颈。现有轻量化方法各有局限, 很难充分适配复杂工业场景的多样化需求。本文系统分析各类轻量化检测方法, 结合应用实践和实验验证, 探索适应复杂工业场景的最佳技术路径, 解决精度与轻量化的平衡难题, 助力工业生产向高效、智能、低

成本模式转型。

## 2 面向复杂工业场景的计算机视觉轻量化检测方法概述

### 2.1 基于网络架构优化的轻量化检测方法

基于网络架构优化的轻量化检测方法, 核心是重构网络结构、对冗余模块进行简化, 在不会显著造成检测精度下降的状况下, 减少模型参数和计算量, 适配复杂工业场景边缘部署的需求。该方法摒弃传统检测网络的冗余卷积层, 采用深度可分离卷积以及分组卷积等轻量化算子, 结合注意力机制确切聚焦工业目标, 同时优化特征融合结构, 解决复杂场景中光照变化大、背景杂乱造成的特征提取不准确问题。MobileNet、ShuffleNet 等系列模型作为典型代表, 其通过通道重排、bottleneck 结构设计, 大幅度减少算力耗费。该方法的优点是推理速度快、部署成本低, 可用于工业流水线的实时检测, 然而对架构设计经验的要求比较高, 在微小

【作者简介】宋涛 (1971—), 男, 中国河北高阳人, 博士, 高级工程师, 从事数据科学研究。

缺陷检测场景下易造成精度的损失<sup>[1]</sup>。

## 2.2 基于模型压缩的轻量化检测方法

基于模型压缩达成的轻量化检测方法，是在已训练好的高精度检测模型基础上，通过裁剪、量化、蒸馏等手段，清除多余的参数，实现模型“瘦身”，兼顾精度和轻量化。在复杂工业场景下，裁剪策略把聚焦点放在冗余卷积核与全连接层，留存和工业目标检测有关的核心特征提取组件；把浮点型参数转化为整型的量化过程，降低存储以及计算的成本；知识蒸馏借助教师模型（高精度）来指导学生模型（轻量化）开展训练，传承主要检测能力。此方法不用重新设计网络，适配性强，可快速把成熟的模型应用于工业边缘设备，解决传统模型部署所面临的困难问题。其不足是压缩程度难以平衡，过度压缩会造成复杂场景的检测精度下降，而量化过程有很大可能引入噪声，影响微小缺陷被识别的效果。

## 2.3 基于迁移学习与小样本学习的轻量化检测方法

基于迁移学习与小样本学习的轻量化检测方法，针对复杂工业场景中缺陷样本不多、标注成本高的痛点，把通用场景训练的模型知识迁移到工业检测任务，结合小样本学习对模型加以优化，实现轻量化和高精度的平衡。这种方法先在大规模通用数据集上来预训练轻量化基础模型，然后运用少量工业缺陷样本对模型参数微调，适合特定的工业场景。以迁移学习降低模型训练的难度，减少参数冗余；借助小样本学习算法，提升模型对稀缺样本的适配能力。其优势是不用大量标注过的样本，训练效率高，适配多种不同的复杂工业场景，但在迁移过程中易有领域适配不足的问题，需针对性优化特征迁移策略。

## 2.4 基于多模态融合的轻量化检测方法

基于多模态融合的轻量化检测方法，以融合图像、红外、超声等多种工业检测模态特征的方式，弥补单一模态于复杂场景下检测的欠缺，同时采用轻量化的融合组织，避免模型复杂度大幅提升。在复杂工业场景中，单一视觉模态易受光照、遮挡方面的影响，而多模态融合可集合不同模态的优势。以轻量化融合模块为途径，做到多源信息的有效使用。此方法能提高复杂场景下缺陷检测的准确率和鲁棒性，满足工业流水线多方面检测需求。其不足是多模态数据采集成本比较高，融合模块开展轻量化设计难度大，易产生模态冗余以及计算量增加的问题，需优化融合策略，以平衡性能和轻量化的相关需求。

## 2.5 各类方法的对比分析

四类轻量化检测方法各有优劣，适配不同复杂工业场景的需求。网络架构优化方法推理速度最快、部署成本最低，可用于对实时性要求较高的流水线检测，但架构设计难度大，微小缺陷检测精度一般；模型压缩方法适配性良好，可较快复用成熟的模型，适合已有高精度模型的工业领域，却存在精度与压缩程度难以平衡的问题<sup>[2]</sup>。迁移与小样本学习方法无需大量标注样本，适用于缺陷样本不多的场景，但

领域迁移的适配性不足；多模态融合方法有着最强的检测鲁棒性，适宜复杂光照、多维度检测场景，却存在数据采集成本高、融合模块设计复杂的短板。综合来看，单一方法很难完整适配复杂工业场景，实际应用中需结合场景需要，融合多种方法的优势，实现最优检测效果。

## 3 面向复杂工业场景的轻量化检测方法应用实践

### 3.1 典型复杂工业场景应用案例

选取机械制造、冶金冶炼、化工管道三个典型复杂工业场景，开展轻量化检测方法并验证效果。机械制造场景中，采用基于网络架构优化的 MobileNet 改进模型，实时对精密零件表面的划痕、变形等缺陷进行检测，部署于生产线边缘设备，检测的速度达到 30 帧/秒，缺陷识别准确率 98.2%，较传统模型算力消耗降低 65%。冶金冶炼场景，融合红外与视觉模态的轻量化模型，适配高温环境以及粉尘干扰，做到钢水液位、炉壁破损检测，解决单模态检测精度不精准的问题，响应时间控制在 50ms 内。化工管道场景，采用模型压缩后的 YOLO 轻量化模型，检测管道腐蚀、泄漏缺陷，部署于便携式检测设备，适合野外复杂的环境，检测效率与人工检测相比提升 8 倍，大幅度降低人工检测的风险及成本。

### 3.2 应用过程中的关键问题与解决方案

应用过程中主要面临三大关键问题，针对性提出解决方案。一是复杂场景（光照、粉尘、振动）的干扰造成检测精度下降，借助自适应光照补偿算法对输入图像加以优化，结合注意力机制强化对目标特征的提取，减少环境干扰影响，提升精度。二是边缘设备算力有限，轻量化模型仍存在推理延迟，通过把模型量化到 INT8 格式，去除掉冗余特征层，进一步缩小模型体积，保证推理延迟控制在工业所要求的范围内。三是多场景的适配性不佳，同一模型难以适配不同工业场景，设计模块化的模型结构，按照不同场景对特征提取模块和检测头（Head）进行微调，提升模型适应性，降低场景更替造成的部署成本，实现多场景快速推进。

### 3.3 应用案例总结与启示

综合三个典型场景应用实践总结：轻量化检测方法可有效破解复杂工业场景中“高精度与轻量化难以平衡”“部署困难”等痛点，不同方法适配不同场景所提出的需求，网络架构优化适合实时性要求高的流水线，多模态融合适合干扰强的场景，模型压缩适合快速复用成熟模型。核心启示为，轻量化检测方法落地要与场景特点相结合，杜绝“一刀切”，优先考虑环境干扰、设备算力、样本情况等实际因素<sup>[3]</sup>。重视模型的模块化以及可扩展性，方便后续对场景做适配与优化。此外，工业场景落地需有数据积累以及算法迭代，要根据实际检测反馈不断微调模型，才能取得轻量化与检测性能的最优平衡，切实带动工业智能化升级。

## 4 轻量化检测方法的性能评估与对比实验

### 4.1 评估指标体系构建

结合复杂工业场景的检测需求,构建兼顾精度、效率和轻量化程度的三维评估指标体系,保证评估全面并贴合实际应用。精度指标选取平均精度(mAP)、缺陷识别准确率以及召回率。其中mAP用来测评模型对不同类型工业缺陷的综合检测能力,准确率聚焦正样本识别效果,召回率可以防止工业关键缺陷的漏检,三者一起反映模型检测的可靠程度。效率指标有推理速度(FPS)、推理延迟,适配工业流水线实时检测需求,直接体现模型是否具备部署的可行性。轻量化指标所选取的是模型参数数量、模型体积、算力消耗(FLOPs),量化模型部署的便捷性,适配工业边缘设备算力有限的情况。各指标权重按照工业场景优先级予以设定,其中精度权重0.4,效率权重0.3,轻量化权重0.3,通过加权计算得出综合得分,做到对各类轻量化检测方法的全面、客观评判。

### 4.2 实验环境与数据集

实验环境由硬件与软件两部分组成,保证实验能复现且符合工业实际的部署场景。硬件采用工业级边缘计算设备(CPU: Intel Core i5-12400, GPU: NVIDIA Jetson Xavier NX, 内存16GB),对工业现场边缘部署环境进行模拟;软件环境基于Python 3.8,框架采用PyTorch 1.12.0,结合OpenCV开展图像预处理,保障实验高效运行。数据集采用自制的复杂工业缺陷数据集,覆盖机械零件、冶金炉体、化工管道3类场景,包含12000张图像,其中缺陷样本8500张,包括划痕、腐蚀、破损等8类工业常见缺陷,按7:2:1的比例对数据进行划分,得到训练集、验证集、测试集。把光照变化、粉尘干扰、目标遮挡等模拟复杂工业环境的样本加入数据集,保证实验结果能真实体现模型在实际场景中的性能。

### 4.3 对比实验设计与结果分析

对比实验选取本文研究的四类轻量化检测方法,同时引入传统未轻量化检测模型(YOLOv5s、Faster R-CNN)作为对照组,针对复杂工业场景核心需求设计实验。实验分为两组:一组测试标准数据集下不同方法的性能,验证精度与轻量化的平衡效果;另一组测试模拟复杂干扰(强光、粉尘)下的鲁棒性,对应工业实际环境。结果显示,基于多模态融合的轻量化方法综合得分最高,mAP达97.8%,推理速度

28FPS,模型体积仅12MB;网络架构优化方法有着最快的推理速度,为35FPS,但微小缺陷召回率比较低(88.3%);模型压缩方法有良好的适配性,然而过度压缩后精度降低5.2%;迁移与小样本学习方法在少样本场景优势十分明显,标准数据集下精度比其他方法略低。对照组传统模型的精度略高,但模型体积、算力消耗是轻量化方法的3-5倍,无法适配边缘部署。

### 4.4 实验结论与讨论

实验结论表明,四类轻量化检测方法均可以达成复杂工业场景的部署要求,同时各有适配优势:多模态融合方法的综合性能是最好的,适合干扰强、对检测精度有高要求的场景;网络架构优化做法适用于实时性优先的流水线检测过程;模型压缩方法适合快速复用成熟模型的场景;迁移及小样本学习方法适用于缺陷样本不多的场景。对比传统模型,轻量化方法在保证检测精度大体上满足工业需求的前提下,模型体积、算力消耗大幅降低,可高效部署到工业边缘的相关设备。讨论发现,现有的这些方法仍存在不足:多模态融合方法数据收集成本较高,网络架构优化方法对微小缺陷的检测能力有限。未来可对多模态数据采集方案加以优化,结合小样本学习提升微小缺陷检测精度,进一步平衡轻量化和检测性能,推动方法在更多复杂工业场景中的推广应用。

## 5 结语

综上所述,本文针对复杂工业场景计算机视觉轻量化检测问题,系统梳理了四类核心方法,通过应用实践和比较实验,明确各类方法所适配的场景和优劣。研究发现,单一轻量化方法难以满足复杂工业场景多样化的需求,多技术融合已成为未来的发展趋势。本文研究为复杂工业场景下轻量化检测模型的设计和部署提出了理论参考与实践借鉴,但仍存在对极端场景适配欠佳等局限。未来可聚焦小样本、极端环境下的方法优化,推动轻量化检测技术与工业实际深度融合,进一步提升其在智能制造中的应用价值。

### 参考文献

- [1] 杨育学,林炜阳,王博,等.基于计算机视觉的PCB异常检测系统[J].物联网技术,2025,15(21):43-49.
- [2] 张琦.基于计算机视觉的深度学习图像识别算法优化研究[J].信息与电脑,2025,37(19):1-3.
- [3] 孙仁科,营鹏,李仲年,等.基于轻量化SSD的弱小目标检测[J].计算机仿真,2024,41(10):355-361.

# Research on Power System Fault Diagnosis Methods in Smart Grid

Jianfeng Shi

Beijing Huairou Power Supply Company Beijing Electric Power Company, Beijing, 101400, China

## Abstract

With the large-scale construction of smart grids, power systems have evolved from traditional high-proportion conventional energy systems to complex systems featuring high-proportion new energy integration and multi-source information interaction. The characteristics of randomness and concealment in fault occurrence have become increasingly evident, and traditional diagnostic methods have been unable to meet the requirements for safe and stable system operation. To address the main issues of low fault location accuracy, poor robustness in waveform recognition, and low utilization of multi-source information in power systems, a comprehensive diagnostic system encompassing fault feature extraction, location identification, fusion diagnosis, and threshold optimization has been established. Through theoretical analysis and simulation testing, the real-time performance and reliability of diagnostic algorithms have been improved, breaking through the bottleneck of traditional methods in complex operating conditions and providing technical support for rapid fault handling and safety protection in smart grids.

## Keywords

Smart grid; Power system; Fault diagnosis; Deep learning; Multi-source information fusion

# 智能电网下电力系统故障诊断方法研究

史剑锋

北京市电力公司怀柔供电公司, 中国·北京 101400

## 摘要

随着智能电网大规模建设, 电力系统由原来的高比例常规能源系统向高比例新能源接入、多源信息交互的复杂系统转变, 故障发生具有随机性和隐蔽性的特点越来越明显, 传统的诊断方法已经不能满足系统安全稳定运行的要求。针对电力系统故障定位精度低、波形识别鲁棒性差、多源信息利用率低等主要问题, 创建包含故障特征提取、定位识别、融合诊断、阈值优化的全流程诊断体系, 借助理论分析和仿真检验, 改善诊断算法的实时性和可靠性, 冲破传统方法在复杂工况下应用的瓶颈, 给智能电网故障迅速处置和安全守护赋予技术助力。

## 关键词

智能电网; 电力系统; 故障诊断; 深度学习; 多源信息融合

## 1 引言

智能电网依靠先进的传感测量技术、通信技术和控制技术, 对电力生产、传输和分配全过程进行智能化的控制, 但是由于它的内部结构比较复杂以及运行工况的波动性, 造成故障演化路径具有非线性特点, 单一故障很容易引起连锁反应, 从而危及整个系统的安全。新能源高比例接入使得故障特征更加复杂, 传统的诊断方法依靠固定的阈值和单个的测量数据, 不能捕捉到故障暂态过程中微小的变化, 容易造成误判或者漏判。故障诊断是电力系统安全防护的重要环节, 其性能好坏直接影响到系统故障处理的速度和效率, 现有的故障诊断方法在复杂的工况下适应性较差, 不能满足智

能电网对故障诊断的实时性、准确性、鲁棒性等严格要求, 因此开展智能电网下电力系统故障诊断方法的研究, 解决目前的技术瓶颈, 完善诊断理论和技术体系。

## 2 故障诊断理论基础

### 2.1 智能电网故障特征分析

智能电网故障特征同系统运行工况、故障类型以及新能源接入比例存在关联, 故障产生之时, 系统电压、电流这些电气量会表现出明显的畸变现象, 伴随着暂态分量和谐波分量出现异常变动。暂态分量是故障初期的主要特征, 它的幅值和频率的变化可以体现故障的严重程度以及发展趋向, 但是它持续的时间短、幅值小, 容易受到系统噪声的干扰, 造成特征提取的困难<sup>[1]</sup>。新能源发电设备接入系统后, 会使系统故障电流幅值和相位发生改变, 造成传统的故障特征出现畸变, 产生多维、非线性特征集合, 不同故障类型的特征

【作者简介】史剑锋(1971—),男,中国北京人,本科,高级技师,从事电气、电力研究。

差别变得越来越小,诊断难度也越来越大。故障特征提取要冲破噪声干扰和特征畸变的双重束缚,准确把握故障暂态过程中关键的信息,给后续诊断识别赋予可靠支撑,现有的特征提取办法很难兼顾特征完整性和抗干扰性,致使诊断精确度受限制。

## 2.2 传统诊断方法局限性

传统的电力系统故障诊断方法主要是基于模型的诊断方法和基于信号处理的诊断方法,前者依靠准确的系统数学模型,用模型预测值和实际测量值之间的差异来完成故障诊断,但是它对于模型精度的要求很高,智能电网复杂的工况和参数波动会使模型失配,从而产生诊断误差。后者通过滤波、分解等方式对电气量信号进行处理,提取故障特征并完成诊断,但是它大多依靠单一的信号源,不能利用多源信息的互补性,在故障特征微弱或者畸变的时候,容易出现误判的情况<sup>[2]</sup>。

## 2.3 数据驱动诊断机理

数据驱动诊断机理把电力系统运行过程中产生的大量监测数据当作核心,用机器学习、深度学习这些算法去完成故障特征的自动提取、识别和诊断工作,而不需要依靠精确的系统数学模型,适合智能电网复杂多变的运行情况。其基本思路就是通过学习和训练历史故障数据来建立故障特征和故障类型、位置之间的映射关系,当系统出现故障的时候,用实时监测的数据输入到已经训练好的模型中,得到故障诊断结果。数据驱动诊断方法可以捕捉到故障特征的非线性变化,适合于新能源接入造成的特征畸变问题,而且可以将多源监测数据结合起来,利用不同数据之间的互补性来提高诊断精度,但是它的性能取决于数据的质量和算法的合理性,数据缺失、噪声干扰都会影响到诊断的效果,目前的数据驱动方法存在着特征提取不够充分、模型泛化能力差等缺点。

# 3 关键诊断方法设计

## 3.1 基于广域测量的故障定位

广域测量技术就是对电力系统各个节点上的同步相量测量装置进行部署,从而获得全系统的电气量信号,并且将这些信号同步地传送到控制中心,以此来实现故障定位。根据广域测量故障定位方法,把各个节点同步测量的电压、电流信号结合起来,利用故障暂态分量传播的特点来建立故障定位模型,准确找到故障点。其核心就是用同步相量技术消除测量数据的时间误差,保证各个节点测量数据的一致性,利用暂态分量的传播速度和相位变化来确定故障区,克服传统定位方法在复杂电网结构中定位精度低的难题。故障定位时要结合电网拓扑结构,对测量数据实施降噪处理,剔除系统噪声和干扰信号的影响,并考虑新能源接入对故障暂态分量产生的影响,改良定位算法,保证定位结果的准确性和可靠性,防止由于拓扑复杂或者特征畸变造成定位误差<sup>[3]</sup>。

## 3.2 深度学习波形识别算法

深度学习波形识别算法以故障暂态波形的特征提取和识别为研究重点,利用深度学习模型的非线性拟合特性,可以自动地从暂态波形中找出微小的特征,从而达到对故障类型进行准确识别的目的。选择适合暂态波形处理的深度学习模型,用历史故障波形数据进行训练,建立波形特征和故障类型的映射关系,可以很好地适应新能源接入引起的波形畸变问题,克服传统波形识别方法对特征提取的限制。波形识别之前先对采集到的暂态波形做预处理,用滤波、归一化等方式去除噪声干扰和数据冗余,得到波形的时域、频域特征,然后把特征输入训练好的深度学习模型中,实现故障类型快速识别。模型训练过程中需要对网络结构和超参数进行调节来提高模型的泛化性能和计算效率,防止由于单一故障造成过度拟合的情况发生,保证各种故障场景下都能够得到比较稳定的识别效果,能够迅速地完成任务,满足实时诊断的需求。

## 3.3 多源信息融合诊断模型

多源信息融合诊断模型把广域测量数据、设备状态监测数据、环境监测数据等各类数据融合起来,采用信息融合技术来弥补各个数据源之间的不足,从而提高诊断方法的准确性以及鲁棒性。不同的监测数据从不同的角度反映系统的故障状态,广域测量数据关注的是故障的电气量特征,设备状态监测数据反映的是设备运行的状态以及存在的故障隐患,环境监测数据反映的是外部工况对系统故障的影响,利用信息融合技术把各种数据融合起来,消除单一数据源的不足,提高故障特征提取的完整性、准确性。融合时用分层融合策略,先对单个类型的数据做预处理和特征提取,再将不同类型的特征融合起来,得到多维融合特征向量,输入诊断模型中进行故障诊断,加入权重分配机制,根据各个数据源的可靠性和相关性给不同的数据源分配不同的权重,保证融合结果的合理性,防止无效数据影响诊断结果。

## 3.4 自适应阈值判据构建

自适应阈值判据克服了传统固定阈值不能适应智能电网工况动态变化的缺点,根据系统的运行工况和故障特征来建立动态调节的阈值判据,提高诊断方法的鲁棒性和适应性。阈值判据的建立是以系统正常工作时电气量的波动范围为依据,根据故障特征变化的规律,在系统运行过程中不断监测系统的运行参数,动态地改变阈值范围,使系统处于正常工作状态和故障状态之间能够准确地区分出来。自适应阈值的调整要联系深度学习模型的输出结果和实时监测数据,经由反馈机制,及时改良阈值参数,防止因为工况变动而产生误判或者漏判情况出现,还要顾及噪声干扰的因素,设置合适的阈值冗余,从而在保证诊断准确度的同时,维持系统的实时运行状态。阈值判据要适应各种故障类型的特点差别,对不同的故障类型采取不一样的自适应调节办法,

从而保证故障诊断的精确性和针对性，冲破传统固定阈值的束缚。

## 4 方法验证与优化策略

### 4.1 典型故障场景仿真验证

搭建智能电网仿真平台，模拟各种类型的故障场景，即线路短路、设备故障和新能源出力波动引起的故障等，根据实际电网拓扑结构和运行参数来设置仿真工况，采集故障过程中各个方面的监测数据。用仿真环境来试验所设计的故障诊断方法，把仿真得到的结果同实际故障情况比较，检验不同类型的故障识别准确率以及定位正确率。在仿真过程中主要模拟复杂的工况下出现的各种故障情况，例如极端气象条件下、多故障叠加、新能源占比高的情况等，来考查诊断方法的适用性，并且记录诊断响应时间，考察实时性能，利用仿真结果来确定诊断方法的优势和不足，为之后的优化提供依据。

### 4.2 诊断准确率对比分析

选择传统的故障诊断方法和所设计的诊断方法，在相同的仿真场景下做对比测试，主要从诊断准确率、误判率、漏判率这三个方面来分析不同的方法之间的性能差别。传统方法选择以信号处理为基础的诊断方法和传统的数据驱动方法，用对比试验来确定所设计的诊断方法在故障识别准确率方面优于其他方法，在复杂的工况以及有特征畸变的情况下也表现良好。排除测试工况差异的影响，保证测试结果的客观性、公正性，深入剖析差异产生的原因，明确所设计方法在特征提取、信息融合等各方面的优势，为方法优化指明方向，验证所设计方法相比传统方法更加先进、实用。

### 4.3 实时性与鲁棒性测试

实时性测试主要考察的是诊断方法的响应速度，采用仿真测试和实际场景测试的方式，记录故障出现到诊断完成所需要的时间，评价诊断方法能否达到智能电网故障快速处置的要求，对于响应时间过长的问题进行改进，提高算法运算速度和特征提取速度，从而缩短诊断时间。鲁棒性测试采用模拟系统参数波动、新能源出力波动、噪声干扰等各种复杂的工况，检验诊断方法在各种工况下诊断性能的好坏，观察诊断准确率的变化情况，针对鲁棒性不足的问题，改进特征提取算法和信息融合策略，提高方法的抗干扰能力。测试

时主要关注极端工况的诊断性能，保证诊断方法在各种复杂的环境下都能保持稳定，防止由于工况的变化而造成诊断性能的降低。

### 4.4 轻量化部署优化方案

考虑到智能电网现场设备的计算资源有限，对于所设计的故障诊断方法，提出轻量化部署优化方案，在保证诊断性能的基础上，简化算法结构，降低计算复杂度，满足现场设备的部署要求。在优化过程中，对深度学习模型进行轻量化处理，裁剪冗余的网络结构，优化参数设置，减小模型计算量和存储空间，改进特征提取算法，简化数据处理过程，缩短运算时间。采用边缘计算技术把诊断算法放到边缘节点上，完成故障数据的本地处理和诊断，削减数据传输延迟，加强诊断的实时性，缩减对云端计算资源的依赖，改善系统独立性和可靠性。优化方案要兼顾诊断性能和部署成本，保证轻量化处理之后，诊断方法的精度、实时性和鲁棒性不会受到太大的影响，满足现场部署的要求。

## 5 结语

智能电网环境下电力系统故障诊断方法研究，关键之处在于冲破传统方法的束缚，契合系统复杂多变的运行状况和故障特性，加强诊断的准确性，即时性以及鲁棒性。设计出基于广域测量的故障定位方法、深度学习波形识别算法、多源信息融合诊断模型和自适应阈值判据，形成了一条完整的故障诊断链路，经过仿真验证并加以改进，较好地克服了以往诊断手段在恶劣工况中出现的精度不高、鲁棒性差等缺陷，可以准确找到故障种类及其所在之处，并且迅速作出反应以满足故障的要求。故障诊断方法的改进和提高，给智能电网的安全稳定运行赋予了可靠的科技支持，助力新能源高比例接入环境下电力系统安全防护和高效运转。

### 参考文献

- [1] 金文杰. 新能源配电网电力调度优化方法研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (21): 106-108.
- [2] 陈帝宁. 电力系统配电网自动化实现技术研析 [J]. 电力设备管理, 2025, (20): 50-52. DOI:10.26977/j.cnki.dlsbgl.2025.20.057.
- [3] 马骥. 基于声发射技术的配电网电力智能运维检修方法研究 [J]. 电声技术, 2025, 49 (10): 208-210. DOI:10.16311/j.audioe.2025.10.064.

# Construction of a Dynamic Risk Assessment Model for Work Safety of Municipal Tobacco Enterprises Based on the “Three - Dimension and Four - Layer” Framework

Gaoqiang Wang

Changle Branch, Shandong Weifang Tobacco Co. Ltd., Weifang, Shandong, 262400, China

## Abstract

In response to the problems of risk identification lag and passive management in traditional safety production management models for tobacco commercial enterprises, this paper proposes and constructs a “three-dimensional-four-level” dynamic risk assessment model for safety production. The model, with state dimension, process dimension, and trend dimension as the evaluation framework, and basic data layer, index calculation layer, comprehensive evaluation layer, and decision application layer as data support, forms a stereoscopic risk assessment system. By setting up a key indicator system and establishing a warning and intervention mechanism, it achieves the visualization, quantification, and early warning of safety risks. Practice shows that the model effectively promotes the transformation of safety management from post-event accountability to pre-event prevention and process control, significantly improving the enterprise’s safety management level and risk prevention capability. This study provides theoretical reference and practical path for the intelligent and refined safety management of enterprises.

## Keywords

municipal tobacco enterprise; safety production; dynamic risk assessment; risk early warning; three-dimensional-four-level model

## “三维四层” 地市烟草企业安全生产动态风险评估模型构建

王高强

山东潍坊烟草有限公司昌乐分公司, 中国 · 山东 潍坊 262400

## 摘要

传统烟草商业企业安全生产管理模式具有风险识别滞后、管理被动等风险, 本文提出并构建了一个“三维度-四层级”评估模型用于评估安全生产动态风险。该模型从状态维度、过程维度和趋势维度等几个维度进行评估, 以基础数据层、指标计算层、综合评估层和决策应用层提供数据支撑, 构成立体化风险评估体系。通过设定关键指标体系, 建立预警干预机制, 实现安全风险的可视化、可量化、可预警。实际应用显示, 该模型显著提升了企业安全管理水平和风险防控能力, 安全管理重点从事后问责转变为事前预防和过程控制。这项研究为企业智能化、精细化安全管理提供了理论参考和实践路径。

## 关键词

地市烟草企业; 安全生产; 动态风险评估; 风险预警; 三维度-四层级模型

## 1 引言

安全生产是烟草商业企业持续健康发展的基础保障, 随着烟草行业市场化改革深入推进, 地市烟草商业企业业务范围不断扩大, 物流、仓储、运输等多个环节安全风险日益复杂。传统的安全管理多采用定期检查、事后追责的方式, 存在风险识别滞后、管理被动、资源分配不合理等问题, 难以有效应对日益复杂的安全风险。因此, 企业需要一套科学、动态、可操作的安全风险评估模型, 实现安全风险可视化、可量化、可预警, 推动安全管理重心从事后问责向事前预防、

过程控制转变, 这已成为当前烟草商业企业安全管理急需解决的问题。

## 2 文献综述

安全管理研究早期最具影响力的模型是 Haddon 于 1970 年提出的“Haddon 矩阵”(Haddon Matrix)。该模型从宿主(人)、致伤因子(物/能量)和环境(物理与社会)多重因素进行事前、事中、事后的动态分析, 揭示了安全事故的生成原因与动态演化过程, 是风险的系统性分析的基础。

管理流程的标准化和评估手段的智能化两个方向的研究都是在这个此理论基础上的。在流程化方面, 例如王小明(2015)基于 PDCA 循环的安全管理模型研究深入探讨了 PDCA 循环在安全管理的应用研究。在技术驱动方面,

【作者简介】王高强(2005-), 中国山东潍坊人, 本科, 从事烟草产业管理与优化研究。

例如李华等（2018）大数据驱动下的风险智能识别与预测方法。

### 3 模型设计

#### 3.1 设计目标与原则

本模型设计目标是实现安全风险的可视化、可量化、可预警，推动安全管理从事后问责向事前预防、过程控制转变。模型设计遵循以下原则：

- （1）系统性原则：覆盖人、机、环、管各要素，贯穿物流、交通、资金、信息等全流程。
- （2）动态性原则：评估数据实时或者定期更新，展示出安全状况的动态变化数据。
- （3）导向性原则：评估结果直接指导风险整改和资源投入。
- （4）可操作性原则：指标可测量、数据可获取以及评估可执行。

#### 3.2 模型核心架构

本模型由三个评估维度和四个数据层级构成，形成“三维度 - 四层级”立体化评估体系。

#### 3.2.1 三个评估维度

- （1）状态维度（结果性指标）：特定时间点的安全状态，主要展示指标：隐患数量、设备完好率。
- （2）过程维度（过程性指标）：安全管理活动的执行率和质量，主要展示指标：安全检查完成率、培训演练参与率。
- （3）趋势维度（预警性指标）：安全风险的变化趋势，主要展示指标：隐患整改周期变化趋势、同类违章重复发生趋势。

#### 3.2.2 四个数据层级

- （1）L1 基础数据层：来自一线、实时或定期采集的原始数据。
- （2）L2 指标计算层：用模型算法，将基础数据计算为各类安全指标。
- （3）L3 综合评估层：对指标进行加权、聚合处理，形成部门、区域、专项的综合评估分数以及风险等级。
- （4）L4 决策应用层：最终生成评估报告、预警信号和整改建议，用于管理决策。

表 1 地市烟草商业企业安全生产关键指标体系

类别	一级指标	二级指标（示例）	数据来源 / 频率	权重建议	维度归属
A. 仓储物流安全	A1 仓库安全	消防设施完好率、温湿度监控达标率、电气线路检查合格率	物联网传感器、日常点检记录 / 实时、日	较高	状态、过程
	A2 作业现场安全	装卸作业违章率、叉车等设备定检率、现场“5S”管理评分	视频监控 AI 识别、检查记录 / 实时、周	高	状态、过程
	A3 库存安全	卷烟库存周转效率（防积压）、高价值商品防盗措施落实率	WMS 系统、安保记录 / 周、月	中	状态
B. 交通运输安全	B1 车辆状态	公务车辆、配送车辆年检率、日常检查故障率、配送车辆车载 GPS/GIS 在线率	车管平台、驾驶员上报 / 日、实时	高	状态、过程
	B2 驾驶行为	超速、疲劳驾驶、违规停车报警次数	GPS/OBD 监控系统 / 实时	极高	状态、预警
	B3 配送过程	在途货物异常事件数	手持终端、工作报告 / 每单、日	高	过程、状态
C. 公共场所安全	C 办公楼安全	门禁系统有效性、消防通道畅通率、食堂燃气检查合格率	安防系统、行政检查 / 周、月	中	状态、过程
D. 安全管理效能	D1 风险管控	风险辨识更新及时性、重大风险管控措施落实率、隐患排查治理闭环率	安全信息系统 / 月、季	极高	过程、趋势
	D2 培训与意识	安全培训计划完成率、一线员工岗位安全规程抽考合格率	培训记录、在线考试系统 / 季	中	过程
	D3 应急能力	应急预案修订及时性、应急演练开展率及效果评估、应急物资完好率	预案文档、演练记录 / 半年、年	中	过程、状态
	D4 事件管理	未遂事件上报数量与质量、安全事故“四不放过”落实率	事件报告系统 / 实时、事件后	极高	状态、趋势

### 4 关键评估指标体系

根据烟草商业企业特点，设定以下核心指标体系（见下表）。

### 5 动态评估方法与流程

#### 5.1 数据采集与接入

- （1）自动采集：物联网（消防、温湿度）、车联网（GPS）、

视频 AI 分析、业务系统（WMS、ERP）数据自动对接。

- （2）手动录入：通过移动终端 APP，实现安全检查、培训记录、隐患上报的在线化、标准化录入。

- （3）周期报送：部门定期报送总结性数据。

#### 5.2 指标计算与评分

每个二级指标的参数：目标值、预警值、报警值。用设定好的函数将参数数值计算为标准分。

举个例子，隐患整改闭环率得分为(已闭环数/应闭环总数)\*100，若计算结果低于及格分数90分则触发预警。

### 5.3 综合评估与可视化

(1) 权重设置：采用层次分析法(AHP)或专家打分法设定各层级指标权重，在设定权重的时候，“事故、事件管理”、“风险管控”、“驾驶行为”等严格管控指标赋予更高权重。

(2) 动态评分：按照日、周、月等时间周期，系统动态自动计算各部门、各业务板块的安全得分。

(3) 风险四色图：根据结果分数在地图或组织架构图上标注“红、橙、黄、蓝”四色标识风险等级。

(4) 管理驾驶舱：建立领导层可视化的面板，展示核心指标、趋势图、预警列表等管理内容。

### 5.4 预警与干预机制

(1) 阈值预警：当任一关键指标超过预设阈值时，系统自动将预警信息发送给相关责任人以及安全管理部门。

(2) 趋势预警：通过环比、同比分析，识别指标恶化趋势并进行趋势预警。

(3) 专项预警：在重大节假日、汛期、极端天气前，根据历史数据及外部通知，进行专项安全预警。

## 6 实践应用与效果评估

### 6.1 实施情况

我们选取某地市烟草商业企业进行了本模型的试点应用，试点范围包括：12个县区烟草公司、5个物流中心、3个配送中心。截至到评估日期，已成功将超过2000个关键安全风险点接入系统持续进行监控。

我们用模型分析了人员行为、设备状态、作业环境及管理流程等多个维度的风险点，把收集的结果用Haddon矩阵框架进行标定。对物联网传感器、视频监控、作业日志及巡检记录等多个源数据进行实时采集，将采集的数据进行融合分析，初步构建了企业级安全生产动态感知网络。

### 6.2 效果评估

经过近一年的系统化运行，模型的应用效果通过多项关键绩效指标(KPI)得到了显著体现。具体量化对比如下表所示：

表2 系统运行效果对比表

评估维度	关键指标	实施前状况	实施后状况	提升效果
风险识别效率	平均识别周期	约7天	≤2天	缩短约71%
	识别准确率	基准值	提高35%	误报、漏报率显著降低
隐患整改效能	整改闭环率	78%	92%	提升14个百分点
	重大隐患整改及时率	未专项统计	95%	建立了专项跟踪与预警机制
安全绩效结果	可记录安全事故数量	年度基准值	同比下降32%	事故严重程度同步下降
	未遂事件/轻微事件数量	年度基准值	同比下降28%	潜在风险得到有效控制

## 7 结论与展望

本研究构建的“三维度-四层级”模型，在试点地市烟草商业企业中进行安全生产动态风险评估，得到了预期的效果，将安全风险做到可视化、可量化、可预警，把安全管理模式从事后问责模式转变为事前预防、过程控制模式。

根据收集的数据显示，应用模型提升了风险识别效率、隐患整改闭环率及整体安全绩效，可以作为烟草商业企业的现代安全管理体系的有效支撑工具。

展望未来，该模型可与AI相结合，结合科学算法使风险预测更加精准，并且进一步拓宽数据来源渠道，整合更多的内外部安全信息，搭建一个全面的风险感知网络，最终实

现安全与业务管理的融合。

### 参考文献

- [1] Haddon W. The many faces of injury prevention. *American Journal of Public Health*, 1970, 60(1): 19-29.
- [2] 王小明. 基于PDCA循环的安全管理模型研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(6): 143-148.
- [3] 李华, 等. 基于大数据的安全生产风险评估方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(11): 101-107.
- [4] 国家烟草专卖局. 烟草行业安全生产标准化建设指南[Z]. 2020.
- [5] 张强, 等. 烟草企业安全管理创新与实践[M]. 北京: 中国烟草出版社, 2022.

# Development and application of magnetic control opening interlock safety protection device based on dough machine equipment

Xiaojuan Gao Gaoqiang Wang Yun Yang Junjun Pan Tingting Wang

Fangzi Marketing Department, Shandong Weifang Tobacco Co., Ltd., Weifang, Shandong, 261206, Chian

## Abstract

[Background and Purpose] To install safety protection devices on noodle machine equipment, eliminate hidden problems during use, and improve its “intrinsic safety” level. [Methods] Study the structure and working principle of the equipment used in noodle making machines, analyze the advantages and disadvantages of common cover opening interlock protection devices, and determine the type of interlock protection device to be installed. [Results] The magnetic control safety interlock device has a wide range of applications, simple structure, low cost, and does not require professional installation and maintenance. And the magnetic switch is completely enclosed, waterproof and dustproof, with high safety. Easy to operate and effective. [Conclusion] The installation and application of magnetic control safety interlock protection devices can effectively improve the “intrinsic safety” level of such equipment, and the installation cost is low and the service life is long. It can effectively solve the safety problems and hidden dangers of surface machinery equipment, and significantly improve the safety management level of enterprises.

## Keywords

Magnetic control safety interlock device; Intrinsic safety; Potential safety hazards; Enterprise safety management level

# 基于和面机类设备磁控开盖联锁安全保护装置的研制与应用

高校娟 王高强 杨云 潘君君 王亭亭

山东潍坊烟草有限公司坊子营销部, 中国·山东 潍坊 261206

## 摘要

【背景和目的】为和面机类设备加装安全保护装置, 消除使用过程中的问题隐患, 提升其“本质安全”水平。【方法】研究和面机类设备的构造及工作原理, 分析常见开盖联锁保护装置的优缺点, 确定加装联锁保护装置的类型。【结果】磁控式安全联锁装置适用范围广, 结构简单, 费用低廉, 不需要专业人员安装维护。且磁控开关完全封闭, 防水防尘, 本身安全性高。操作简便, 效果良好。【结论】磁控式安全联锁保护装置的加装应用, 能切实提升该类设备“本质安全”水平, 且加装成本低、使用寿命长, 可有效解决和面机类设备安全问题隐患, 显著提升企业安全管理水平。

## 关键词

磁控式安全联锁装置; 本质安全; 安全问题隐患; 企业安全管理水平

## 1 引言

党的十八大以来, 以习近平同志为核心的党中央高度重视安全生产工作, 总书记发表一系列重要论述、作出一系列重要指示批示, 反复强调, “人民至上、生命至上”, “安全是发展的前提, 发展是安全的保障”。当前, 烟草行业坚决贯彻落实总书记关于安全生产的重要论述, 将安全生产工作摆在突出位置, 从“讲政治”的高度安排部署安全生产工作。本文围绕烟草企业职工餐厅和面机使用安全, 运用风险根源分析、风险控制措施分析等方法, 查找影响和面机类设

备安全问题的制约因素, 并有针对性地提出具体解决措施, 提升该类设备“本质安全”, 全力提升企业安全管理水平。

## 2 常规和面机类设备存在的安全隐患

### 2.1 现状分析

通过查阅近几年各类生产安全事故报告, 社会层面和面机类设备机械伤害事故层出不穷, 例如因操作不当手臂被卷入、头发被缠绕、儿童好奇被机器伤害等事故时有发生; 据了解, 烟草行业内也曾发生过类似事件。其直接原因虽然是工作人员违反操作规程, 但该类设备未设置开盖联锁保护也是事故发生的直接原因之一。因此, 为和面机类设备加装开盖联锁保护装置, 提升机器本质安全是消除设备隐患最直接、最有效的手段。

【作者简介】高校娟(1981—), 本科, 经济师, 从事企业管理、安全管理研究。

## 2.2 调查分析

### 2.2.1 风险根源分析

运用事故致因理论——轨迹交叉理论进行了风险根源（危险源）分析和研究。

从“人的不安全行为”进行分析

该类设备潜在的风险在于操作人员不能实现精准掌握设备箱体内部投料的量和比例，需要反复开盖查看，或者在设备运转状态下始终保持开盖状态，这就导致箱内异物掉入的可能性大大增加，在本已违反操作规程的情况下（设备处于运转状态开盖即违反操作规程），对搅拌臂转速的判断失误，将手伸入或衣服、头发等掉入箱内，卷入搅拌臂内引发事故。因此，人的不安全行为是导致事故发生的主要原因。

从“物的不安全状态”进行分析

该类设备的风险在于，一是在正常状态下设备存在固有的缺陷，即基于设备成本控制和风险较低的角度考虑，绝大多数该类中小型设备生产厂家未关注此类设备的开盖联锁保护装置配备；二是在设备异常状态下发生安全事故，包括电机故障、部件断裂、皮带松动断裂、线路老化、超寿命使用等等。

通过上述分析，可以看出该类设备事故发生的主要因素是“人的不安全行为”即操作人员的失误，但依据安全生产领域“事故致因理论”和“轨迹交叉理论”以及人类本身存在的自然局限即必然存在的“非理性行为”，即便是安全教育、培训、法规、制度规定、应急处置等各项管理措施均落实到位，仍然无法完全避免事故的发生。

因此降低或消除该类风险的控制措施重点应放在控制或消除“物”（设备）的不安全状态，弥补设备固有缺陷，切断事故发生的根源中“人”的致因轨迹，实现该类设备的“本质安全”，就可以消除操作人员失误或违反操作规程导致的风险根源。

（名词解释：本质安全是指通过设计等手段使生产设备或生产系统本身具有安全性，即使在误操作或发生故障的情况下也不会造成事故的功能。）

### 2.2.2 风险控制措施分析

运用风险控制措施原则顺序理论（风险控制措施层次模型）：消除、替代、工程控制（ $\square$ 隔离）、管理（行政控制）、个体防护（PPE），从针对性、可操作性、经济性三个方面逐项进行分析研究。

消除：能否把这个机械伤害的风险消除掉？

（1）分析：和面机做为面食初级加工设备，综合其加工效率和人工成本控制的实际情况，为确保满足就餐要求，该类设备必然存在，那么该类风险也就必然存在。

（2）结论：该项措施否定。

替代：能否用其他更安全的设备替代该类设备？

（1）分析：

①中小型和面机的功能单一，设备采购成本相对较低，

目前社会市场上并没有带有开盖联锁保护功能的中、小型和面机类设备来实现替代。

②自动化程度高具有多功能的更安全的食品加工机械均属大型设备，多适用于面食加工厂家，其生产的食品供应的是社会市场，其市场价格均在数十甚至数百万元以上，基于烟草行业内商业单位的就餐人员实际面食供应需求和内部食堂的后勤保障性质，职工食堂不可能采用更安全更自动化的面食加工机械。

（2）结论：该项措施否定。

工程控制：工程控制即工程技术控制措施，结合行业特点和要求，可理解为“防止事故发生”的安全技术措施，分析是否能通过工程技术手段进行有效的风险控制。

（1）分析：工程技术控制措施一般有以下三种。

①故障安全控制即设备发生故障仍能保持操作人员安全，和面机类设备故障一般为动力故障、控制故障、传动故障等，这些故障较为直观，一般能够通过观察和检查及时发现。按其构造相对简单的特点，故障安全控制技术对该类设备作用较小。

②失误安全控制即人员操作失误（包括违规操作）仍然保证安全，如在设备运转时，人员违规动作发生，设备即停止运转，实现失误安全。针对该类设备的结构特点，采用失误安全控制技术能够有效控制该类设备风险，对防止事故发生起到关键性的作用。

③自动化控制，结合行业特点和商业各单位的实际以及实现该类设备自动化的复杂性，实现自动化控制不具有可行性。

（2）结论：从针对性、有效性和经济性三个方面对上述措施进行综合对比分析，采用工程控制技术措施中的失误安全控制技术是可行的措施。

标识、警告和管理控制以及个体防护：

以上均属于管理措施，烟草行业各单位按照烟草行业安全生产标准化规范的要求进行落实，结合前述轨迹交叉理论分析结果，以上四项管理措施不能完全消除或控制风险。因此结论是否定。

根据上述对风险产生的根源和工程控制技术措施的分析，可以看出针对和面机未设置开盖联锁保护问题，采用失误安全控制技术（安装开盖联锁保护装置）以实现和面机的本质安全化，能够有效控制该类设备机械伤害事故的发生。

## 2.3 确定最佳方案

### 2.3.1 设备构造及工作原理

要实现工程技术控制措施，首先要了解和面机类设备构造以及工作原理。以和面机为例，通过查阅该设备的结构图和工作原理以及对现场设备静态和运转状态的观察，确认该类设备主要的部件分为机械构件包括设备框架（角铁焊接）、箱体（不锈钢轧板）、钢轴、搅拌臂、传动皮带、调速齿轮等，电气构件包括电机、电源线、双向调控开关等。

其工作原理为电源接入双向调控开关，控制电源开关和电动机的顺、逆转向，电动机通过调速齿轮带动搅拌臂在箱体内部转动，实现和面动作。其次，按照操作规程的要求，为确保操作安全，设备运转时箱体的顶盖应当呈关闭状态，箱体内部的面粉和液体搅拌的过程操作人员不可视。

### 2.3.2 常见开盖联锁保护装置的类别及特点

#### 机械式安全联锁装置

机械式安全联锁装置使用物理原理来实现开盖联锁，设置机械式接触开关，通过开盖动作，依靠盖板自身重力压触到开关，中断电路设备停止运转。优点是结构相对简单，安装操作容易，费用较低，缺点是盖板必须放置到位，部件需定期保养和及时更换，不易实现完全封闭，缺乏防爆效果（面粉具有可燃爆性）。

#### 电子式安全联锁装置

电子式安全联锁装置使用电子控制器来实现开盖联锁，通过多个传感器监测开盖动作，将动作信号传递给前置控制电路，根据预设的判断条件，完成设备电路中断与开启。优点是动作快、准确，适应性广，缺点是需加设前置控制电路，结构复杂，设计安装费用高，且安装和维护需要专业人员。

点是动作快、准确，适应性广，缺点是需加设前置控制电路，结构复杂，设计安装费用高，且安装和维护需要专业人员。

#### 光电式安全联锁装置

光电式安全联锁装置使用红外线技术实现开盖联锁，红外线发射和接收端固定在箱体特定位置，通过设备开盖动作切断和接通红外线束来控制前置电路。优点是动作准确，适应性好，缺点是需要加设前置控制电路，结构复杂，设计安装费用高，安装和维护需要专业人员，且对人员的操作有一定干扰，不能完全避免风险的产生。

#### 磁控式安全联锁装置

磁控式安全联锁装置使用磁控开关实现开盖联锁，将磁控开关的“磁铁端”和“开关端”分别装设于箱体与箱盖上，通过磁铁端和开关端的接近和分离来控制前置控制电路的开关。优点是适应范围广，结构简单，安装操作容易，费用低廉，不需要专业人员安装维护，且磁控开关是完全封闭的，防水防尘，本身安全性高，安装后对操作人员无干扰。缺点是需设置前置控制电路。

表 1 常见开盖联锁保护装置使用可行性分析表

评价因素	结构复杂性	设计安装费用	安装难易度	是否需要前置控制	是否影响正常工作	是否需要专业维保	是否产生新的风险	评价分值 (优选顺序由低到高)	综合评定结论 (可行性)
类别	1. 评价因素权重平均; 2. 设定分值低1, 中2, 高3; 是1, 否0								
机械式	1	2	1	0	0	0	1	5	不可行
电子式	3	3	3	1	0	1	1	12	不可行
光电式	2	2	2	1	1	1	1	10	不可行
磁控式	1	1	1	1	0	0	0	4	可行

通过对上述四种方式统计对比，可以看出工程技术措施最优方案为采用磁控式联锁保护装置。

## 3 和面机类设备磁控开盖联锁安全保护装置的应用

### 3.1 磁控电路设计思路

运用人机工程学防呆防错原理，按照《电气设备安全设计导则》安全设计原则，以实现开盖联锁保护为目标进行设计。将磁控开关与交流接触器连接形成前置控制电路，把设备双向调控开关与前置控制电路进行串联，通过磁控开关的“磁控端”与“开关端”接近和分离来控制前置控制电路，达到设备电源的通、断。因为交流接触器的接线端外露，为防止产生电火花，需要将交流接触器进行封闭，与磁控开关连接好后，放入防爆盒内。

### 3.2 对比分析

结合目标要求，经过功能、价格、体积等综合对比，确定使用 PS-3150 磁性接近磁控开关（常开式）和交流接触器 NCH8-20/20（中小型和面机电机功率通常在 1kw 以下，如功率超过 1.2kw，则应更换与功率相配的交流接触器），因

该类磁控开关只能接低功率负载（通常应用在门柜上控制灯具），所以需要与交流接触器组合形成前置控制电路进行使用。



图 1 磁控开盖

（长 2.4cm, 宽 1.4cm, 单片厚度 0.6cm; 感应距离 1-4mm, 寿命可达 100 万次，价格 20 元以下）



图 2 交流接触器

(负载功率 1.2KW 以下, 价格 20 元以下)



图 3 前置控制电路组合、配套铝质防爆盒

前置控制电器组合连接好之后, 可先用普通灯泡加照明开关进行测试, 磁控开关能够在 220V 电压下与交流接触器配合使用, 控制效果良好, 测试结果与设计思路一致。

### 3.3 安装验证

将磁控开关和前置控制电路进行上机安装, 然后对设备效果进行测试和验证。具体做法包括, 拆解设备双向控制开关, 将开关电源与交流接触器串联, 磁控开关的“磁控端”固定在箱盖左前角, “开关端”用联线固定在箱体的正面左上角, 在盒盖状态下, 磁控端和开关端合二为一, 开关端的线路接入防爆盒内与交流接触器相连接, 测试验证通过后, 对全部线路进行套管固定, 防爆盒的出线口用胶封闭。

## 4 结语

(1) 经过测试验证及食堂面食操作人员、安全管理人员评价反馈, 该成果对消除和面机类设备操作过程中的安全隐患起到了明显的作用, 具有很强的实用性、可操作性, 对烟草商业企业普遍存在的共性问题具有良好的推广应用价值。

(2) 创新运用风险控制层级理论, 对问题产生根源进行深入分析, 为行业安全生产风险预防和隐患排查治理体系探

索了科学的问题解决思路, 对烟草行业各类专业设备的安全性改进提供了理念方法上的指导。

(3) 该开盖联锁安全保护装置的设计应用, 填补了社会市场和面机类设备联锁保护装置缺失的空白, 鉴于其能够实现该类设备“本质安全”的安全科技属性和防水、防尘、高寿命、低成本且易于实现消费市场量产的特点, 能够带来良好的社会效益。



图 4 安装测试好后的正常使用状态 (侧面) (设置开盖联锁保护装置)

## 参考文献

- [1] 龙克文, 刘利, 颜天宝. 家用和类似用途电动食品加工器具机械式磁性接近开关应用[J]. 家用电器, 2015(6): 82-85.
- [2] 李明福. 和面机安全联锁装置[J]. 劳动保护, 1995(4): 28-29.
- [3] 洪茂耀. 食品加工机安全连锁装置改善探讨[D]. 台南: 嘉南药理大学, 2016.
- [4] 李涛, 于广成. 一种盖式和面机安全限位装置: CN103609629B[P]. 2015-12-02.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 家用和类似用途电器的安全 第38部分: 商用电动饮食加工机械的特殊要求: GB/T 4706.38-2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.