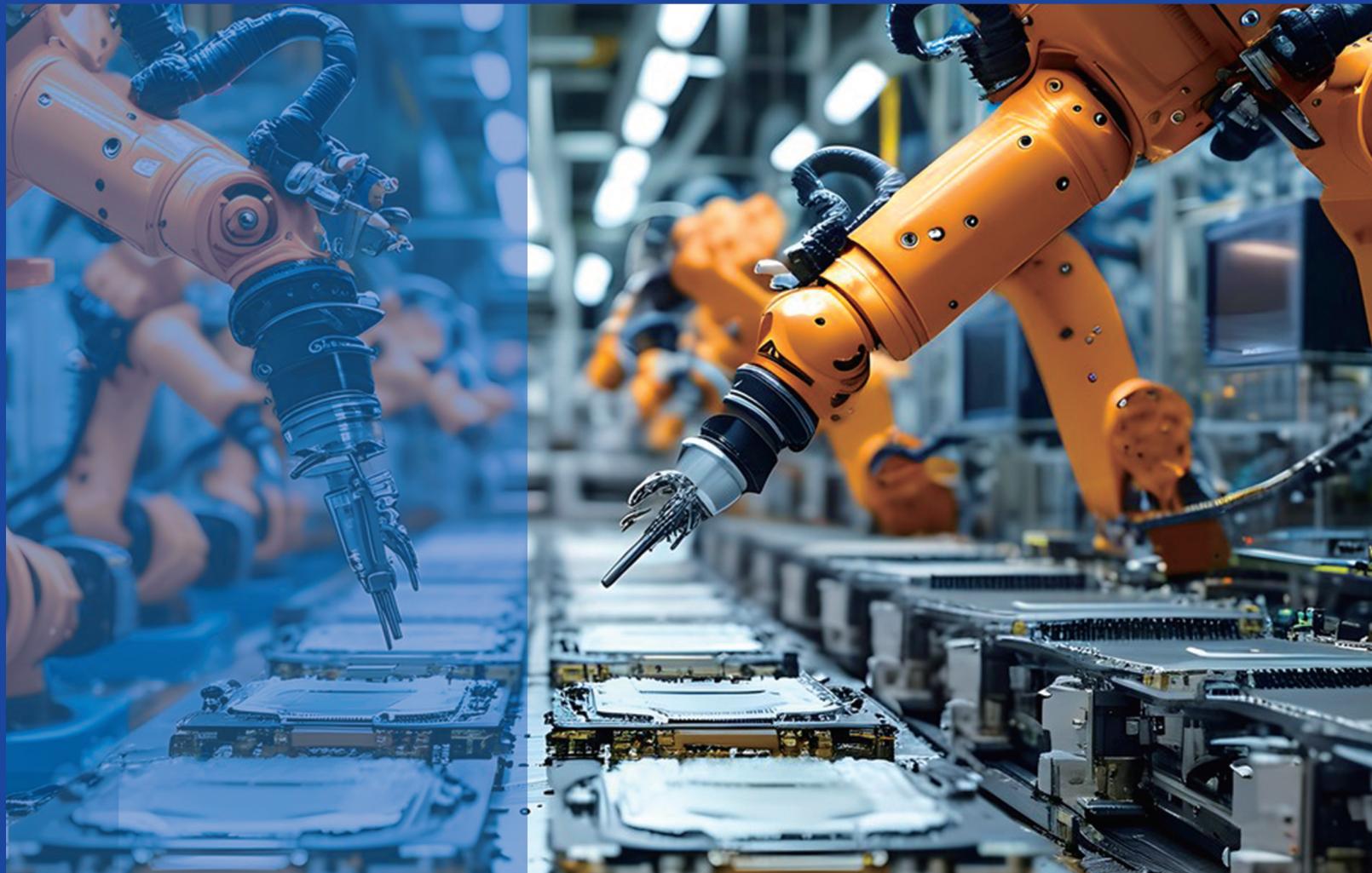


# 现代工业与技术

**Modern Industry and Technology**

Volume 2 • Issue 7 • July 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Tel.: +65 62233839

E-mail: [contact@nassg.org](mailto:contact@nassg.org)

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



现代工业与技术 Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 7 • July 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



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

### 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

## Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 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

### 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>



### 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 7· July 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

## 编委会

### 主 编

蒋 晶 郑州大学

### 编 委

李伟峰	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  | 基于 PLC 的化工企业智能制造与数字化改造研究<br>/ 黄珂                     | / 李志仁   |
| 4  | 技术圈作为宇宙晚期物质 - 能量转化的潜在热力学实体——一个基于耗散结构假说的理论探索<br>/ 何政洲 | 25 化工企业安全生产责任制量化考核管理的实践与探索<br>/ 韩玉莲 赵凤翔 姜能刚 崔志强       |
| 7  | 船舶机舱设备布置对船舶使用维护的重要性<br>/ 张增涛                         | 28 高效节能设备在工业生产中的应用及碳排放控制<br>/ 张林                      |
| 10 | 复杂工况下机械液压系统自适应优化设计与应用<br>/ 李岭科                       | 31 石化生产装置蒸汽管网优化运行研究<br>/ 刘晓英                          |
| 13 | 水电站变压器冷却系统智能调控与能效提升技术研究<br>/ 刘丹                      | 34 基于用户体验的智能模块化旅居产品工业设计方法研究<br>/ 陈海亚                  |
| 16 | PLC 技术在泥沙环境水轮机振动控制中的分段关闭应用<br>/ 袁良                   | 37 双电源自动切换开关的分类区别及在磨煤机油站控制柜中的应用分析<br>/ 张永亮 何玉龙        |
| 19 | 红外气体检测技术在化工安全生产中的作用与应用措施<br>/ 唐祝瑾                    | 40 输电线路铁塔企业“智改数转”的转型研究和探讨<br>/ 周新                     |
| 22 | 基于大数据的化工安全风险预警模型                                     | 43 电热板消解 - 原子吸收测定海洋生物体中重金属的方法研究<br>/ 朱玉亮 孙鹏 刘进阳 郭浩 王甡 |

- 1 Research on Intelligent Manufacturing and Digital Transformation of Chemical Enterprises Based on PLC / Ke Huang
- 4 The Technosphere as a Potential Thermodynamic Entity in Late-Universe Matter-Energy Conversion-A Theoretical Exploration Based on the Dissipative Structure Hypothesis / Zhengzhou He
- 7 The importance of ship cabin equipment layout for ship use and maintenance / Zengtao Zhang
- 10 Adaptive Optimization Design and Application of Mechanical Hydraulic System under Complex Working Conditions / Lingke Li
- 13 Research on Intelligent Control and Energy Efficiency Improvement Technology of Transformer Cooling System in Hydropower Station / Dan Liu
- 16 Application of PLC Technology in the Segmental Shutdown of Turbine Vibration Control in Sediment Environment / Liang Yuan
- 19 The Role and Application Measures of Infrared Gas Detection Technology in the Safe Production of Chemical Industry / Zhujin Tang
- 22 Big Data-Based Chemical Safety Risk Early Warning Model / Zhiren Li
- 25 Practice and Exploration of Quantitative Assessment Management for Safety Production Responsibility System in Chemical Enterprises / Yulian Han Fengxiang Zhao Nenggang Jiang Zhiqiang Cui
- 28 Application of high-efficiency and energy-saving equipment in industrial production and carbon emission control / Lin Zhang
- 31 Research on Optimization Operation of Steam Pipeline Network in Petrochemical Production Plant / Xiaoying Liu
- 34 Research on Industrial Design Method of Intelligent Modular Travel Residence Product Based on User Experience / Haiya Chen
- 37 Classification and Application of Dual Power Automatic Switch in Control Cabinet of Coal Grinding Oil Station / Yongliang Zhang Yulong He
- 40 Research and Discussion on the Transformation of Transmission Line Tower Enterprises towards “Intelligent Transformation and Digital Transition / Xin Zhou
- 43 Study on the Method of Digestion Using Electric Heating Plate and Atomic Absorption Spectrometry for Determining Heavy Metals in Marine Organisms / Yuliang Zhu Peng Sun Jinyang Liu Hao Guo Shen Wang

# Research on Intelligent Manufacturing and Digital Transformation of Chemical Enterprises Based on PLC

Ke Huang

CNOOC(Hainan)Fudao Chemical Ltd., Dongfang, Hainan, 572600, China

## Abstract

With the continuous advancement of information technology and automation, intelligent manufacturing and digital transformation have become crucial strategies for the chemical industry to enhance production efficiency, optimize resource allocation, and reduce operational costs. As a core automation control technology, PLC (Programmable Logic Controller) plays a pivotal role in the intelligent manufacturing and digital transformation of chemical enterprises. Through PLC system applications, chemical companies can achieve automated production processes, precise control, and remote monitoring, thereby improving the intelligence level of production workflows and data transparency.

## Keywords

PLC; intelligent manufacturing; digital transformation; chemical enterprises; automated control

# 基于 PLC 的化工企业智能制造与数字化改造研究

黄珂

海洋石油富岛有限公司，中国·海南东方 572600

## 摘要

随着信息技术和自动化技术的不断发展，智能制造和数字化转型已成为化工行业提升生产效率、优化资源配置、降低生产成本的重要手段。PLC（可编程逻辑控制器）作为核心自动化控制技术之一，在化工企业的智能制造和数字化改造中发挥着至关重要的作用。通过PLC系统的应用，化工企业能够实现生产过程的自动化、精准控制和远程监控，从而提高生产过程的智能化水平和数据透明度。

## 关键词

PLC；智能制造；数字化改造；化工企业；自动化控制

## 1 引言

化工行业在全球经济中占据着重要地位，随着市场需求的多样化和生产过程的日益复杂化，传统的生产模式已难以满足现代化高效、安全、环保的要求。因此，化工企业面临着转型升级的巨大压力，智能制造和数字化改造成为行业发展的必然趋势。PLC技术作为自动化控制系统的重要组成部分，在化工生产中的应用已有多年历史，其高效、可靠的特点使其成为智能制造的重要支撑。数字化改造则是指通过信息化、自动化等技术手段，优化生产过程中的资源配置、管理流程和技术设备，实现生产流程的智能化和数字化。PLC技术与数字化改造的结合，为化工企业带来了生产效率、资源利用率和管理效能的显著提升。

## 2 基于 PLC 的化工企业智能制造概述

### 2.1 PLC 在智能制造中的作用

PLC作为自动化控制的核心组件，在智能制造中具有不可或缺的作用。它通过实时监控和精准控制生产过程中的各类设备和系统，保证了生产流程的稳定性和高效性。PLC不仅能够进行数据采集和分析，还能与其他智能设备进行联动，形成一个完整的生产控制体系。通过实现生产线的自动化和信息化，PLC有效减少了人工干预，降低了生产成本，并提高了生产效率。其高度的可编程性和灵活性使其可以根据不同生产需求进行调整和优化，从而在智能制造中扮演着基础性角色。此外，PLC的稳定性和抗干扰能力使其在恶劣的工业环境中仍然能保持高效运作，为化工企业的数字化转型提供了坚实的技术支撑。

### 2.2 化工企业智能制造的特点与挑战

化工企业智能制造的特点主要体现在自动化程度高、信息化水平强和生产灵活性好。通过将先进的自动化控制技术与数字化技术相结合，化工企业能够实现生产过程的精细

【作者简介】黄珂（1990-），男，中国山西人，本科，工程师，从事电气工程及其自动化研究。

化管理，提高生产线的稳定性和安全性。然而，化工企业在智能制造过程中仍面临诸多挑战。首先，化工生产工艺复杂，涉及的物料、设备、参数繁多，如何在智能制造中实现精准控制是一个重要难题。其次，传统设备与新兴自动化技术的融合存在技术障碍，企业往往需要大规模的设备改造，投入成本较高。最后，数据安全与隐私保护在智能制造中也成为企业必须关注的问题，如何在保障生产效率的同时，确保信息的安全和保密性，是智能化改造面临的关键挑战<sup>[1]</sup>。

### 2.3 智能制造的关键技术与发展趋势

智能制造的核心技术包括自动化控制技术、物联网技术、大数据分析、人工智能与机器学习等。PLC 作为自动化控制的基础，为智能制造提供了可靠的技术支持。物联网技术的应用使得设备之间能够实时传输数据，形成智能化的生产网络，大大提升了生产线的自动化和互联互通能力。大数据分析技术能够帮助企业从大量的生产数据中提取有价值的信息，进行精准预测和决策，从而优化生产过程，提高生产效率。人工智能则通过自主学习与决策，进一步提升了生产的智能化水平。未来，智能制造将更加注重信息技术与生产技术的深度融合，推动工艺流程的自动化、智能化和绿色化。随着技术的不断发展，智能制造将朝着更高效、更安全、更环保的方向发展，全面提升企业的市场竞争力。

## 3 PLC 控制系统在化工企业中的应用

### 3.1 PLC 控制系统的根本原理与结构

PLC 是以数字计算机技术为基础，专为工业自动化控制设计的一种电子设备。PLC 控制系统由输入部分、处理部分和输出部分组成。输入部分通过传感器或信号采集装置接收来自现场的信号，如温度、压力、流量等参数，然后将这些信号传输到 PLC 的处理器。处理部分即 PLC 的中央处理单元（CPU），负责接收、处理输入信号，并根据预设的程序进行逻辑运算、控制判断，最终输出控制信号。输出部分将处理结果传递给现场执行设备，如电机、阀门、传送带等，完成自动化控制任务。PLC 系统的灵活性、可靠性和可编程性使其在工业自动化中得到了广泛应用，特别是在化工企业中，PLC 能够实时监控和调整生产过程中各类参数，保证生产的精确度和稳定性。

### 3.2 PLC 在化工生产流程中的应用分析

在化工生产过程中，PLC 控制系统广泛应用于多个环节，包括物料配料、反应过程控制、温度压力监测、设备启停管理等。PLC 可以根据不同生产工艺和设备需求，灵活调整控制策略。比如，在反应过程的自动化控制中，PLC 能够根据设定的温度、压力和流量等参数，精确调节反应炉的加热和冷却系统，确保反应过程在最佳条件下进行，从而提高产品的质量和生产的安全性。此外，PLC 在化工企业中的应用还包括对设备运行状态的监控，通过实时数据采集与反馈，能够及时发现设备故障或异常，减少停机时间和维

修成本。PLC 的高可靠性和实时控制能力使其在化工生产中起到了至关重要的作用，确保了生产过程的高效、安全和稳定。

### 3.3 PLC 与其他自动化技术的集成方式

在现代化工企业中，PLC 常与其他自动化技术，如 DCS（分布式控制系统）、SCADA（数据采集与监控系统）、MES（制造执行系统）等进行集成，形成一个完整的自动化生产控制系统。PLC 与 DCS 系统的结合，可以实现大规模生产过程中各个环节的集中控制与远程监控，提升了生产过程的智能化与自动化水平。PLC 与 SCADA 系统的集成，能够实现数据的实时监控、远程报警和历史数据查询，确保生产的透明度和可追溯性。PLC 还可以与 MES 系统集成，通过实时数据交换与生产调度，优化生产排程、提升生产效率和产品质量。通过这些技术的集成，化工企业能够实现高度智能化的生产控制系统，提升整体生产水平，确保生产安全与稳定。

## 4 化工企业数字化改造的必要性与目标

### 4.1 数字化改造对提升企业竞争力的重要性

随着全球化和科技进步的不断加速，化工行业面临着市场需求变化、生产环境复杂化以及成本压力不断增加等多方面挑战。传统的生产模式已经难以适应现代化管理与竞争的要求。数字化改造为企业提供了一种通过信息技术与智能化手段提升竞争力的有效途径。通过引入先进的自动化控制、数据分析、智能决策等技术，化工企业能够实现生产过程的精确控制、资源的高效配置以及生产效率的显著提升。数字化转型不仅能够降低运营成本，优化生产流程，还能够提升产品质量，增强企业的市场适应能力和创新能力。通过实现生产的智能化、信息化，化工企业能够提高应对市场变化的灵活性，增强企业的核心竞争力，从而在激烈的市场竞争中立于不败之地<sup>[2]</sup>。

### 4.2 化工企业数字化改造的主要目标

化工企业数字化改造的核心目标是通过信息技术与智能化手段的深度融合，提升生产过程的效率、透明度和安全性。首先，数字化改造能够实现生产设备的智能化，通过实时监控与反馈机制，确保生产过程中的每个环节都在最佳条件下运行，降低故障率并提高生产稳定性。其次，通过数据采集与分析技术，企业能够实时获取生产数据，进行精准预测和优化决策，从而提升生产效率和资源利用率。数字化改造还可以通过提高产品质量控制的精确度，实现产品的可追溯性，进一步增强市场竞争力。最后，数字化改造还需促进企业管理模式的升级，实现生产、销售、库存、供应链等各个环节的协同与信息共享，提升整体运营效率，推动企业朝着智能化、绿色化的方向发展。

### 4.3 数字化转型的实施路径与战略

化工企业的数字化转型需要系统性规划和实施，以确

保各个环节能够高效协同。数字化转型的首要步骤是确定数字化改造的战略目标，分析企业的当前技术水平与需求，制定切实可行的改造方案。其次，企业需要在数字化转型过程中进行基础设施的建设，提升信息技术基础设施、通信网络以及设备的智能化水平。对于生产环节，企业应逐步实现自动化与信息化的深度融合，通过引入 PLC、工业物联网、云计算、大数据等技术，优化生产过程中的资源配置与调度管理。在管理方面，企业应建立起全员参与的数字化文化，促进技术与管理的双向升级。最后，企业应注重人才的培养与技术支持，建设专业的数字化管理团队，以保障数字化改造的持续推进与技术创新。

## 5 PLC 在化工企业数字化改造中的关键技术

### 5.1 PLC 与工业物联网（IIoT）的结合

工业物联网（IIoT）技术使得各类工业设备能够通过传感器和网络互联，实现数据的实时采集与传输。PLC 作为自动化控制的核心，能够与物联网技术紧密结合，将生产线上的各类设备、传感器和监控系统集成到一个统一的平台中，实现设备间的信息交互与远程控制。通过 PLC 与物联网的结合，企业能够实现对设备的实时监控与故障预警，及时调整生产参数，确保生产过程的稳定性与安全性。物联网技术的应用使得 PLC 不仅仅局限于单一的控制功能，而是拓展为一个智能数据处理与分析的节点，提升了整体生产系统的智能化水平。通过 PLC 与 IIoT 的结合，企业能够实现更加精准的生产控制，提高生产效率和资源利用率，同时为数字化改造奠定坚实的基础<sup>[3]</sup>。

### 5.2 数据采集与分析在数字化改造中的应用

数据采集与分析是数字化转型的核心内容之一。在化工企业的数字化改造中，PLC 通过与传感器、仪器和数据采集设备的联动，能够实时采集生产过程中的各类数据，如温度、压力、流量、湿度等关键参数。这些数据通过 PLC 系统传输到中央控制系统或云平台中进行存储与处理。数据分析技术能够对采集到的海量数据进行深度挖掘与分析，识别出潜在的生产瓶颈、设备故障或质量问题，并为决策者提供精准的优化建议。通过数据分析，企业能够在生产过程中及时发现问题，调整生产参数，优化工艺流程，从而提高生产效率、降低能耗，并保证产品的质量稳定。数据采集与分析不仅为智能制造提供了数据支持，还推动了生产决策的科学化与智能化，成为化工企业数字化改造中的关键技术。

### 5.3 PLC 与大数据、云计算技术的融合

PLC 与大数据、云计算的融合使得化工企业的数字化转型更加全面与高效。大数据技术能够处理和分析来自 PLC 系统、传感器和生产设备的大量数据，提取有价值的信息，帮助企业实现智能化决策和生产优化。云计算为大数据提供了强大的计算能力与存储资源，确保数据能够在云平台上高效存储、共享与分析。PLC 与云计算的结合使得企业能够实现跨地域、跨部门的数据协作与共享，提升了数据的实时性和可访问性。通过云计算平台，企业还能够对生产过程中的各类数据进行长期存储与归档，支持历史数据分析与未来趋势预测。这种技术的融合为化工企业提供了更强的数据处理能力和更广泛的应用场景，推动企业生产流程的智能化与透明化，为数字化改造提供了更为坚实的技术基础<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

在化工企业的智能制造与数字化改造过程中，PLC 技术发挥了至关重要的作用。通过实现生产过程的自动化和信息化，企业不仅提高了生产效率，降低了生产成本，还推动了企业在智能化管理、资源优化、环保等方面的提升。数字化转型不仅是提升企业竞争力的必由之路，也是应对日益复杂的市场需求和严格的环保法规的有效手段。尤其是在化工行业，面对高能耗、高污染的生产特性，数字化改造为企业带来了显著的环境效益和社会效益。随着工业物联网、大数据、云计算等技术的融合应用，化工企业能够更加精准地监控生产过程中的每一个环节，进行数据驱动的决策，从而实现智能化管理和优化生产过程。尽管在实施过程中仍面临技术、资金和人才等多方面的挑战，但随着技术的不断进步和行业经验的积累，化工企业的数字化转型将逐渐从实验阶段走向广泛应用，推动企业向更加智能、绿色和高效的方向发展。

## 参考文献

- [1] 熊姝涵,周倩茹.材料化工企业数字化转型研究——智能制造成熟度诊断案例分析[J].数字通信世界,2025,(03):235-237.
- [2] 刘嘉文.物联网与大数据融合在化工企业智能制造中的应用探索[J].信息与电脑,2025,37(03):84-86.
- [3] 丁玉林.智能制造在化工企业电气设备中的应用与发展前景[J].化工管理,2024,(30):92-95+108.
- [4] 潘培青.数字化转型让企业更智能——读《石油化工智能制造》[J].企业文明,2022,(06):17.

# The Technosphere as a Potential Thermodynamic Entity in Late-Universe Matter-Energy Conversion-A Theoretical Exploration Based on the Dissipative Structure Hypothesis

Zhengzhou He

Qinyue Culture Co., Ltd., Heyuan, Guangdong, 517000, China

## Abstract

The ‘heat death’ finale depicted by the  $\Lambda$ CDM cosmological model fails to adequately account for the ultimate fate of rogue planets, whose abundance rivals that of stars, creating a theoretical conundrum of residual matter. This paper proposes an exploratory framework conceptualising the “technosphere” constructed by advanced technological civilisations capable of long-term survival as a macro-scale ‘dissipative structure’ on a cosmological scale. Based on non-equilibrium thermodynamics, such technospheres may actively seek, acquire, and transform baryonic matter from rogue planets in the cosmic late stage to maintain their low-entropy structure. This conversion, achieved through processes like controlled nuclear fusion, releases radiant energy. This ‘active transformation mechanism’ offers a novel physical approach to resolving the rogue planet residue problem and suggests technological activity could significantly influence the thermodynamic evolution of the universe over extremely long timescales. This hypothesis aims to bridge astrophysics, thermodynamics, and astrobiology, providing a speculative foundation for contemplating the potential physical significance of intelligent life within the macrocosmic evolution of the universe.

## Keywords

rogue planets; technological spheres; dissipative structures; cosmic thermodynamics; late-universe evolution; Fermi paradox; SETI

# 技术圈作为宇宙晚期物质–能量转化的潜在热力学实体——一个基于耗散结构假说的理论探索

何政洲

河源市琴阅文化有限责任公司，中国·广东 河源 517000

## 摘要

$\Lambda$ CDM 宇宙学模型所描绘的“热寂”终局未充分考虑与恒星丰度相当的流浪行星的最终命运，构成一个理论上的物质残留困境。本文提出一个探索性框架，将能长期存续的先进技术文明所构建的“技术圈”，概念化为一个宇宙学尺度上的宏观“耗散结构”。基于非平衡态热力学，此类技术圈为维持其低熵结构，可能在宇宙晚期主动地搜寻、获取并转化流浪行星中的重子物质，通过受控核聚变等过程将其转化为辐射能量。这一“主动转化机制”为解决流浪行星残留问题提供了新的物理思路，并暗示技术活动或能成为影响宇宙极长期热力学演化的重要因素。本假说旨在连接天体物理学、热力学与天体生物学，为思考智慧生命在宇宙宏观演化中的潜在物理意义提供思辨基础。

## 关键词

流浪行星；技术圈；耗散结构；宇宙热力学；晚期宇宙演化；费米悖论；SETI

## 1 引言

基于广义相对论与标准粒子物理模型的  $\Lambda$ CDM 宇宙学框架，成功地预言了宇宙从早期暴胀至今的演化历史。其对遥远未来的推演指出，宇宙将历经“简并纪元”并最终走向由近乎均匀的辐射与暗能量主导的“热寂”状态，熵值趋于最大<sup>1,2</sup>。然而，这一经典图景隐含地假设了所有重子物质

最终都能通过引力吸积、黑洞蒸发或粒子衰变等被动物理过程，被有效地转化为辐射或轻子。近年来，观测天体物理学揭示，银河系内可能存在数量与恒星相当甚至更多的“流浪行星”<sup>3,4</sup>。这些不束缚于任何恒星系统的天体，在宇宙加速膨胀的背景下，其物理截面和相互作用概率将变得极低，使得传统清除机制（如黑洞吸积）的效率在  $10^{15}$  年后的时间尺度上可忽略不计<sup>5,6</sup>。因此，标准模型面临一个逻辑自洽性问题：在“热寂”宇宙中，大量冷冻的、孤立的行星级质量块（重子物质）将如何演化？我们称之为“流浪行星残留问题”。

**【作者简介】**何政洲（1987-），男，中国广东河源人，硕士，金融分析师，从事金融工程研究。

另一方面，普里高津的耗散结构理论揭示，远离平衡态的开放系统可以通过持续的能量耗散，自发形成并维持动态有序结构<sup>7</sup>。生命系统及其扩展的技术圈是此原理的典范。本文旨在将这两个看似独立的领域——晚期宇宙的物质困境与非平衡态系统的自组织特性——进行交叉融合。我们提出一个理论假说：一个存续时间足够长（ $\geq 10^{10}$  年）并掌握先进能源与星际航行技术的文明，其构建的星际技术圈，可被视为一个宇宙尺度的耗散结构。该结构为应对其自身巨大的熵产需求，可能演化出一种主动的宇宙工程能力，从而成为转化残留流浪行星物质的关键媒介。这并非主张技术圈必然存在或其活动能改变宇宙的终极命运，而是论证其如果存在，则可能成为一个被现有宇宙学模型所忽略的、重要的过程性热力学实体。

## 2 概念与理论基础

### 2.1 流浪行星：宇宙晚期的惰性物质库存

微引力透镜巡天（如 OGLE、MOA）提供了流浪行星大量存在的最强观测证据。研究显示，对银河系内木星质量量级自由漂浮行星的数量估计存在差异，有观测表明其数量可能与恒星数量相当<sup>3</sup>，但后续分析给出了更为严格的上限<sup>4</sup>。尽管如此，其总体丰度可能仍然可观。从动力学角度看，一旦被抛射出原行星系统，流浪行星的轨道在星系乃至宇宙学尺度上都表现出极高的稳定性，几乎不受后续引力摄动的影响<sup>5</sup>。在宇宙演化至恒星全部熄灭（~ $10^{14}$  年后）的“简并纪元”及之后，它们将冷却至接近宇宙背景辐射温度，成为散布于膨胀空间中的“化石”重子物质。超大质量黑洞的吸积时标在此时已因距离极端稀释而趋于无穷大，而即便质子衰变发生（当前实验下限  $> 10^{34}$  年<sup>8</sup>），其产物仍是稳定的轻子，无法实现物质到纯辐射的彻底转化。因此，被动物理过程无法有效解决此残留问题。

### 2.2 技术圈作为耗散结构的理论外推

耗散结构理论的核心在于：系统通过与外界交换能量与物质，在非线性动力学和涨落驱动下，可自发形成并维持时空上的有序结构<sup>7</sup>。一个实现了星际殖民的先进技术文明，其活动网络（技术圈）完全符合该定义：

**开放性：**需要从宇宙环境中持续输入自由能（物质资源）并输出熵（废热、辐射）。

**远离平衡态：**其高度有序的技术与社会结构，依赖于持续的能量流来对抗热力学平衡。

**非线性：**其内部的信息处理、资源分配与工程活动涉及复杂的反馈与放大机制。

因此，技术圈可被建模为一个宏观的、具有自维持与潜在自扩张能力的非平衡态热力学系统<sup>9</sup>。其根本的“代谢”需求是获取并耗散自由能。

## 3 假说模型：主动的物质 – 能量转化机制

本模型建立于一组虽未被证实但符合物理定律的合理

性假设之上：

**长存续性假设：**至少有一个技术文明能够克服各种潜在威胁（如自毁、资源枯竭），将其存在时间延长至恒星时代以后（ $\geq 10^{10}$  年）。

**技术能力假设：**该文明掌握了基于已知物理原理的、足以进行系统性星际开发的能源技术（如大规模可控核聚变、反物质引擎）与推进技术（如世代飞船、低推力的持续加速）。

**效率假设：**其物质 - 能量转化过程（从开采到最终辐射）具有显著高于背景自然过程的净能量产出率（ $\eta > 0$ ）。

基于以上，我们勾勒出一个分阶段的概念性演化图景：

**阶段 I：**恒星能源依赖期（ $< 10^{10}$  年）。文明在其母恒星系统内发展，技术圈初步形成，主要利用行星与恒星能源。

**阶段 II：**能源转型与星际扩张期（ $\sim 10^{11}$ - $10^{14}$  年）。随着主序星寿命终结，文明面临能源危机。驱动转向系统性开发邻近的流浪行星资源，利用其物质作为核聚变燃料，并构建用于寻找和开发更远目标的星际探测器与基础设施。此阶段技术圈开始展现其宇宙尺度的耗散结构特性。

**阶段 III：**晚期主动转化期（ $> 10^{15}$  年）。在暗能量主导的加速膨胀宇宙中，技术圈演化为一个自适应的、目标导向的宇宙网络。它持续搜寻因膨胀而逐渐离散的流浪行星，将其物质开采并转化为能量。此过程最终将重子物质转化为低能光子（废热），注入宇宙背景。从宇宙整体热力学视角看，这相当于主动地加速了局部区域物质相（低温、高序）向辐射相（高温、高熵）的过渡。

**阶段 IV：**区域资源枯竭与结构解体期。当某一哈勃体积内所有可及流浪行星被耗尽，技术圈因自由能流中断而无法维持，最终解体。其活动遗留的主要宏观效应是显著降低了该区域的重子物质密度。

## 4 讨论：意义、可检验推论与局限性

### 4.1 理论意义

本假说的首要意义在于将“流浪行星残留问题”从一个天体物理观测现象，提升为一个涉及宇宙物质最终归宿的热力学与宇宙学问题。其次，它为“费米悖论”提供了一个新的思辨维度：宇宙的“寂静”或许并非源于文明的稀少或短暂，而是因为先进文明在宇宙晚期的活动模式（大规模资源转化）可能不产生我们传统 SETI 所搜寻的定向信号，而是表现为一种弥散的、热力学意义上的背景<sup>10</sup>。最重要的是，它为“生命 / 技术的宇宙学角色”这一哲学问题，提供了一个基于物理定律的、非目的论的探讨框架：技术圈可能是宇宙复杂系统演化中涌现出的一种高效的能量梯度耗散器。

### 4.2 可检验性推论

若该过程在宇宙某处发生，可能产生原则上可探测的迹象：

**异常弥漫性背景辐射：**大规模物质转化释放的废热，

可能在远红外至亚毫米波段（对应低温黑体辐射）产生无法用已知天体（如尘埃、原恒星）解释的、各向异性的弥漫背景成分<sup>11</sup>。下一代广域巡望远镜（如拟议中的“起源”空间望远镜）或能对此进行约束。

**扩展的技术特征搜寻：**将 SETI 与“寻找外星技术特征”的观测目标，从恒星系统扩展至孤立的流浪行星或行星际空间，搜寻其表面或轨道存在非自然结构、异常热辐射或元素丰度异常的证据。

**宇宙学模拟的启示：**在包含智慧生命起源与扩张模型的宇宙学模拟中，可以检验在极长时间尺度上，技术活动对星系乃至宇宙尺度重子物质分布与辐射背景的潜在影响。

#### 4.3 局限性及未来方向

本假说本质上是高度推测性的，其主要局限性在于：

**假设的脆弱性：**模型核心依赖于一系列关于文明存续时长与技术能力的强假设，其成立的概率目前无法量化。

**定量描述的缺乏：**需建立简化的数学模型，量化比较技术圈驱动的主动转化与被动物理过程（如质子衰变）的熵产率与能量转化时标，以论证其“效率优势”的显著性。

**动机与模式的复杂性：**将文明视为一个统一行动的“热力学实体”是一种极大简化。其内部决策、资源分配冲突、对不同风险（如宇宙膨胀）的响应等社会物理学因素，将极大地影响该模型的现实可行性。

未来的研究方向应包括：发展技术圈扩张与物质转化的定量模型；利用 JWST 等设备获取的深场数据，分析弥漫红外背景的涨落以寻找异常；以及将天体生物学参数（如文明平均寿命）更严谨地纳入宇宙学长期演化的理论研究中。

### 5 结语

本文系统阐述了标准宇宙学模型中的“流浪行星残留问题”，并创新性地提出了一个解决方案的理论雏形：将先进文明的技术圈视作一个宇宙尺度的宏观耗散结构。为维持自身存在，该结构可能在宇宙晚期主动地转化流浪行星物质，从而成为一种高效的物质 - 能量转化媒介。这一“主动转化机制”假说，尽管目前缺乏实证支持且建立在多重假设之上，但其价值在于突破了传统学科界限，将智慧生命的潜在活动纳入了宇宙极长期热力学演化的讨论范畴。它为理

解宇宙、物质与生命 / 技术之间深层次的物理联系，提出了一个新颖的、可供后续理论发展与观测检验的科学问题。

#### 参考文献

- [1] ADAMS F C, LAUGHLIN G. A dying universe: the long-term fate and evolution of astrophysical objects[J]. *Rev Mod Phys*, 1997, 69(2): 337-372.
- [2] KRAUSS L M, SCHERRER R J. The return of a static universe and the end of cosmology[J]. *Gen Relativ Gravit*, 2007, 39(10): 1545-1550.
- [3] SUMI T, et al. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing[J]. *Nature*, 2011, 473(7347): 349-352.
- [4] MRÓZ P, et al. No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets from OGLE microlensing data[J]. *Nature*, 2017, 548(7665): 183-186.
- [5] ADAMS F C, LAUGHLIN G. *The Future of the Universe[M]*// *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*. New York: The Free Press, 1999: 154-204.
- [6] LOEB A. Cosmology with hypervelocity stars[J]. *J Cosmol Astropart Phys*, 2011, 2011(04): 023.
- [7] NICOLIS G, PRIGOGINE I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems[M]*. New York: Wiley, 1977.
- [8] SUPER-KAMIOKANDE COLLABORATION. Search for proton decay via  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  in 0.31 megaton · years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector[J]. *Phys Rev D*, 2017, 95(1): 012004.
- [9] ZYLINSKA J, RUNEHOV A L. The technosphere as a dissipative structure: Implications for astrobiology[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(10): 1231-1240.
- [10] WRIGHT J T, et al. The  $\hat{G}$  search for extraterrestrial civilizations with large energy supplies. I. Background and justification[J]. *Astrophys J*, 2014, 792(1): 26.
- [11] WRIGHT J T, CARTIER K M S, ZHAO M, et al. The  $\hat{G}$  Search for Extraterrestrial Civilizations with Large Energy Supplies. IV. The Signatures and Information Content of Transiting Megastructures[J]. *Astrophys J*, 2016, 816(1): 17.

# The importance of ship cabin equipment layout for ship use and maintenance

Zengtao Zhang

Ningbo Sida Ke Ship Engineering Design Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315200, China

## Abstract

As the core area for ship power systems and energy conversion, the safe operation efficiency and long-term maintenance management of marine engine rooms are closely tied to their equipment layout. The improvement of overall ship performance, effective reduction of operational complexity, decreased maintenance costs, and extended equipment lifespan all depend on rational engine room configuration. This study systematically analyzes the critical impacts of equipment layout on daily operations and maintenance support, considering spatial utilization, safety regulations, ventilation, cooling, and personnel flow based on actual shipboard requirements. Research demonstrates that scientifically optimized equipment placement can optimize maintenance space, facilitate fault diagnosis, and ensure unobstructed emergency access. Additionally, energy-efficient layouts with improved ventilation and heat dissipation reduce overheating risks, significantly enhancing overall ship safety and reliability. The study reveals that engine room equipment layout extends beyond direct impacts on power system efficiency. Future maintenance and ship design can leverage the proposed layout principles and optimization recommendations to gain theoretical insights and practical guidance, thereby advancing sustainable development in the maritime industry.

## Keywords

engine room equipment layout; ship operation safety; maintenance management; space utilization; ventilation and cooling

# 船舶机舱设备布置对船舶使用维护的重要性

张增涛

宁波思达科船舶工程设计有限公司，中国·浙江宁波 315200

## 摘要

船舶机舱作为船舶动力与能量转换核心区域,其运行安全操作效率以及后期维护管理都和其设备布置存在紧密联系,船舶整体性能的提升,操作难度的有效降低,维护成本的减少以及设备使用寿命的延长都离不开合理的机舱设备布置,从空间利用安全规范通风冷却以及人员流动等多个方面出发,基于船舶机舱的实际使用需求,本文对机舱设备布置给船舶日常运行及维护保障带来的关键影响展开了系统分析。研究表明合理布置科学的设备,可让检修空间得到优化便于排查故障同时保障应急通道保持畅通状态,此外有助于减少能耗提高通风散热效率的合理布局,可降低因设备过热造成的安全隐患,船舶的整体安全性与可靠性得以显著提升究其原因,机舱设备布置并非仅直接关联船舶动力系统的高效运转。后期维护与船舶设计可从本文提出的布局原则及优化建议获取理论参考与实践指导,以此推动船舶行业的可持续发展。

## 关键词

机舱设备布置; 船舶运行安全; 维护管理; 空间利用; 通风冷却

## 1 引言

船舶机舱作为动力装置布局以及能量转换的关键枢纽区域,其设备布置是否科学直接关系到船舶运行的安全性操作的便捷程度以及维护的经济性,伴随船舶大型化以及航运业现代化的推进,机舱空间有限同设备集成度提高这两者间的矛盾日益凸显,中国船舶工业行业协会 2021 年报告指出,

因机舱设备布置不合理引发的操作失误与维护故障在船舶非计划停航事故中所占比重逐年上升,已然成为影响船舶运行效率和寿命的关键隐患。过往研究大多聚焦于单一设备选型或者模块化集成,在整体空间利用安全疏散通风冷却以及人员流动等方面系统性的探讨较为匮乏,这致使在现实运行过程中维修空间不足,管路交叉繁杂以及应急通道受阻等问题屡屡出现,基于船舶机舱的实际工况情形,对设备布置给船舶运行以及维护所带来的关键影响机制展开全面深入剖析。目的在于给出严谨且妥当适宜的布置原则,还有相应的改进策略,以此为船舶设计以及后续的维护管理提供理论依据和工程参考<sup>[1]</sup>。

**【作者简介】**张增涛(1981—),男,中国湖北武穴人,本科,工程师,从事船舶生产设计中对设备与管电的布置优化与协调、预舾装单元的完整性、船舶建造周期的把控以及船舶后期使用保养的统筹协调研究。

## 2 机舱设备布置的基本原则

### 2.1 空间资源的高效利用

船舶机舱空间作为关键技术工作区域，其布局必须满足高效利用要求确保有限空间资源能够支持复杂设备合理分配并协同运作，针对船舶内部构造特点应当统筹思考机舱设备布置，充分利用竖直与平行空间通过三维化布局提升空间使用效率，需平衡设备布局的便利性与保养维修需求，避免设备间过度叠加或干扰从而降低隐性运作阻碍。在接入空间受限区域时要首先确定重要设备与关键系统的布置地点，确保必要操作活动区域保持畅通。

### 2.2 安全规范要求

船舶运行要稳定可靠且保障船上人员生命安全，机舱设备的摆放得依照安全规则，来作出安排，需要达到国际与国内安全管理标准来摆放设备，对于防火防爆防止漏电以及结构牢固与否等问题要审慎思考，为有效减少事故引发连锁反应的可能性，确保维修工作安全顺利开展设备之间需维持合理距离。要在机舱里面设置清晰的紧急标志，预留足够宽敞的通道空间以便人员在紧急情况下能够快速撤离，必须安装好防护装置，针对高温或者高压设备加强隔离保护措施以防发生意外伤害事故，能大大降低海上事故发生概率，严格执行安全规则对航行安全有重大影响，保障船舶整体运行的稳定状态<sup>[2]</sup>。

### 2.3 通风与冷却系统的合理配置

其一，通风与冷却系统的合理配置，作为机舱设备布置的核心原则，在有限空间里凭借科学设计让气流实现有效循环，极大提升设备的工作环境，确保其稳定运行，不但能避免设备因温度偏高而发生故障，快速排除废热，还可降低因高温诱发火灾等安全事故的风险，保证机舱内温度分布平衡依靠挑选高性能散热设施，改进进排风口布局这有利于提高设备的运行效率以及船舶整体安全性能。

## 3 机舱设备布置对船舶运行安全的影响

### 3.1 应急通道与逃生路线保障

在船舶机舱的布局规划工作当中，对应急通道以及逃生路线展开设计这一环节占据着至关重要的地位，船舶遇到紧急状况时的安全应对结果，会由对通道和路线是否进行科学规划来决定，设备摆放必须确保应急通道始终畅通，绝不能让设备堵塞通道以免人员无法安全撤离至安全地带，如果机舱发生诸如机油泄漏或者火灾这类意外事故，一条清晰易见且便于通行的逃生路线能够助力船员尽快从危险区域撤离，进而减小人员受伤与财产损失的几率。机舱布局的标准要求中通道宽度需恰当合适，要设置清晰且醒目的指引标识，这样做是为了保证船员于混乱情形里也能够迅速辨别方向，快速抵达安全的撤离之处，为船舶运行提供稳固的安全保障，承受住船体摇摆和倾斜带来的挑战，考虑到海上环境复杂多变，通道设计必须能够应对各种不同的工作环境需求

毕竟船体容易发生移动。

### 3.2 故障排查与设备接近性

设备在机舱的摆放合理与否，对查找故障以及接近设备的效果有着直接影响，设备布局若设计得合理，能极大地减少设备间相互干扰的状况，对于检修与保养工作而言，可提供宽敞且便利的操作空间，这有利于工作人员快速定位故障点，进而顺利地完成修理任务，优秀的设备接近性设计可确保工作人员在短时间内靠近关键部件，极大提高查找故障的效率与速度。在设备摆放时要是没有充分考量接近性这一问题，或许会出现某些设备遭遮挡或是空间太过狭窄使得靠近极为困难的状况，最终不但导致响应时间变长，而且显著提升了保养工作的复杂程度，要确保船舶运行期间安全维护工作获得可靠保障，得让重要管线与电缆排列有序这依赖合理的布局设计，同时尽可能规避人为操作失误。提升船舶运行平稳性的关键手段在于对设备之间的距离，以及摆放方式予以优化，这能够大幅降低各类安全隐患，同时保持机舱环境干净整齐，可营造出舒适且有序的工作场所<sup>[3]</sup>。

### 3.3 设备过热与安全隐患防控

不但设备过烫会引起性能降低，而且还有可能诱发重大的安全事故，在机舱设备的布置工作当中，高效的散热设计以及妥善的通风系统占据着至关重要的地位，其作用在于确保高温区域的温度管理始终处于安全的范围之内，设备因过烫引发的故障风险可通过热能的高效散逸来降低，能防止火灾爆炸等危险状况出现。船舶安全运作的维护方面温度监测系统布置时，设备靠近性必须被充分顾及从而使得巡检及维护人员能够快速察觉到隐性的温度异常问题并及时进行处理。

## 4 机舱设备布置在维护管理中的作用

### 4.1 检修空间优化

在维护管理里机舱设备安排发挥着极为关键的作用，而检修空间的改进尤为重要，在有限的机舱内部空间里要实现设备的妥当分配，得保证为维修人员提供足够的活动区域，这对拆卸安装以及日常保养作业都有帮助，为提升效能设备规划时要确认人员能够稳妥且迅速地靠近各个组件，同时削减多余的卸除与重整作业。不仅有力的检修空间可缩减设备停工时间，还能缓解工人的体能耗费减少隐患，设备间彼此位置在空间改进设计时必须予以充分考量，以便维护人员能顺利穿行工具可轻松搬运同时提升设备可信度实现整体维修管理的高效成果，科学进行布局能够在提升船舶运维效率的同时，降低由于检修不当而带来的长期维护成本。

### 4.2 维护流程简化

在机舱设备布置里保养流程的精简极为关键，会直接对船舶的运维效率产生影响，保养人员巡视与检修路径可因设备的妥当布局而缩减，平常检查的方便性与可靠性也会因此得到显著提升，在维修操作里设备能够迅速且方便地接入

这对削减保养时间颇有益处，可提高故障响应速度还能减少因设备故障而引发的停机时间。利于保养人员开展整合管控与一致调和的科学设备布置，对维修资源的配置与运用效率起到改进作用，在保养期间通过规范化的布局设计能够有效规避因设备干扰所导致的多余阻碍，进而提升整个机舱的工作环境质量，在保养流程里倘若去除那些冗余的物理阻碍并降低操作的复杂程度，那么工作效率不但能够得以提高而且保养成本也会在不知不觉间有所降低。船舶持久高质运行以及保养管理，机舱设备布置的妥当性在其中发挥着不可或缺的作用。

## 5 优化船舶机舱设备布置的实践应用

### 5.1 行业规范对机舱布局的指导作用

船舶机舱设备摆放设计以及改进工作行业规范对其有着极大助力，发挥着关键的指引作用，船级社以及国际海事组织 IMO 等权威单位制定了详尽标准，规定机舱布局务必达成极高的安全性能标准以及空间使用率，规范清晰写明设备的摆放位置应设置在便于操作和维护的区域，同时确保不影响逃生通道的畅通；逃生通道设计应保持宽度适宜且标识明确，确保紧急情况下快速疏散，管线与电缆规划需遵循安全距离原则，避免交叉干扰并便于检修维护，要保证设备间距便于操作以及日常检查，尽可能降低安全问题和潜在危险的出现概率，规范特别指出了通风和冷却系统的设计要求，其目的在于更有效地控制机舱内部的温度，降低设备因过热而出现故障的可能性。在船舶设计领域标准化布局指导发挥着极为关键的作用，它旨在为设计人员供给极具可信度的技术参考以及有力支持，船舶种类繁多，其机舱设计面临着各式各样的挑战，标准化布局指导能够助力设计人员在不同船舶的机舱设计中，精准地在运行效果与维护费用之间寻得更为适宜的平衡状态，这不仅能够保障设计方案具备高度的实用性，而且还能有效地节省成本。

### 5.2 新技术推动下的设备布置创新

在计算机辅助设计（CAD）以及三维建模等核心技术领域，新技术取得的进步促使船舶机舱设备的摆放方式出现了极大改变，在设计阶段借助相关技术手段，一些不易发现的问题能够被迅速察觉可规避后期可能出现的各类麻烦，同时设备摆放的精确性与优化程度大幅提升，物联网（IoT）技术应用让设备信息沟通得以顺畅开展，在调整设备摆放方

式时，为达成智能化监控与积极维护工作提供了强有力且可信的数据支撑。设备的体积与重量因先进材料技术大幅缩减，所以适用性更强摆放规划也趋于多样化，船舶机舱设备摆放借助新技术的整体运用，彻底告别以往单纯依赖经验的陈旧方式迈向智能化与精准化管理模式，这不仅为提高船舶运行效率和安全性能提供了坚实的技术支撑，更在新技术助力下实现管理模式的变革。

### 5.3 设备布局对船舶可持续发展的影响

船舶机舱内部设备的摆放方式进行优化，这会对船舶能否长时间维持稳定运行起到决定性作用，通过对设备位置展开科学规划，能够显著提高空间整体利用率与使用效率，降低不必要的资源耗费和材料浪费以此支撑绿色环保的设计理念，还能让空气流通顺畅的改进设备摆放方式，可保证运行稳定并提升冷却效果减少能源消耗和碳排放量符合节能环保的标准。

## 6 结语

船舶使用与保养受机舱设备合理摆放的影响极大，设备操作与维修的速度和效果能因良好的空间分配而得以提高，同时人员在船上可安全走动，紧急通道也不会出现堵塞情况，这都给予了很大帮助，对通风冷却系统以及安全规则展开全面剖析与研究后，能够更深刻地意识到机舱摆放设计在降低设备耗能迅速找出故障原因以及延长设备使用寿命等方面所具备的益处。在面对新式船舶设计在极端海洋环境下布置机舱设备，以及功能多样的复杂动力系统整合的时候虽然目前已经有一些研究提出了实际操作建议和优化设计的思路，然而还是会在技术整合数据收集和标准管理等方面遇到困难，未来为给船舶实现高性能运行以及长期稳定的维护管理给予更精准的决策支持，达成更高效的运行状态与更稳定的设备管理确保船舶于各类环境里的安全性和可靠性，能够借助智能感知技术大数据分析与数字孪生模型相结合的方式研究出更具灵活性的机舱设备优化摆放方案。

## 参考文献

- [1] 王小伟.船舶机舱设备维修技术[J].设备管理与维修,2022,(02):66-67.
- [2] 毕监龙.船舶机舱通风系统船上布置相关问题探讨[J].船舶物资与市场,2021,(08):17-18.
- [3] 任星锋.船舶机舱管系布置检验要点研究[J].船舶物资与市场,2022,30(09):42-44.

# Adaptive Optimization Design and Application of Mechanical Hydraulic System under Complex Working Conditions

Lingke Li

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 651400, China

## Abstract

Complex operating conditions impose higher demands on the dynamic performance of mechanical hydraulic systems. This study investigates operational state recognition methods for hydraulic systems under typical complex conditions, including high-frequency variable loads and multi-process cycles. It analyzes the coupling relationship between key control parameters and system response characteristics, and develops an optimization design strategy with adaptive regulation capability. The research was validated through engineering applications in loading equipment and tunnel boring systems. The findings provide actionable technical pathways for structural integration, control logic design, and engineering commissioning of hydraulic systems under complex conditions, demonstrating significant practical value and broad applicability in engineering.

## Keywords

complex operating conditions; hydraulic system; adaptive control; structural optimization; performance verification

# 复杂工况下机械液压系统自适应优化设计与应用

李岭科

红河广源水电开发有限公司，中国·云南红河州 651400

## 摘要

复杂工况对机械液压系统的动态性能提出更高要求，文章研究了液压系统在高频变载、多工序循环等典型复杂工况下的运行状态识别方法，分析了关键控制参数与系统响应特性的耦合关系，构建了具备自适应调节能力的优化设计策略，最后在装载设备与隧道掘进系统中开展了工程应用验证。研究成果可为复杂工况下液压系统的结构集成、控制逻辑设计与工程调试提供可实施的技术路径，具有重要的工程实用价值与推广意义。

## 关键词

复杂工况；液压系统；自适应控制；结构优化；性能验证

## 1 引言

在工程机械多任务、高频率作业场景中，液压系统长期处于载荷波动剧烈、环境变化频繁的非稳定状态，传统定参数控制模式在压力响应、流量分配与能耗调节方面存在明显滞后，难以满足系统动态适应性要求。自适应优化设计作为控制系统结构与调节策略协同演进的关键路径，已逐步成为复杂工况液压系统性能提升的重要方向。研究围绕液压系统工况识别、控制策略构建与结构集成展开技术研究，构建响应速度快、调节精度高、适应能力强的系统控制模型，并在典型工程装备中完成性能验证，形成具备通用性与可移植性的优化方案。

**【作者简介】**李岭科（1999-），男，中国云南澄江人，本科，助理工程师，从事复杂工况下机械液压系统自适应优化设计与应用研究。

## 2 工况识别与液压系统性能影响因素分析

在复杂作业场景下，液压系统需对外部工况变化保持稳定响应，必须构建有效的识别机制与响应分析模型以支撑后续优化设计：

采集多源信号构建工况特征矩阵，选取压力、流量、油温、执行元件位置等关键量作为状态变量，采用滑动窗口与傅里叶频域分解方法提取高频扰动特征，反映短周期载荷冲击特性；

构建系统动态响应映射模型，在不同负载路径下评估液压泵与控制阀的滞后时间与稳态偏差，形成工况—性能双向关联关系，识别异常响应段落；

引入实时状态感知机制，将阈值自更新的模糊逻辑判断算法嵌入控制节点，对突发性压力波动与响应漂移建立分类判别器，实现系统运行状态的连续分区与异常预警，为自适应控制模型提供切换依据。

### 3 自适应优化设计策略构建

#### 3.1 控制目标函数设计与关键参数提取

液压系统在复杂作业条件下频繁经历流量突变、压力反跳与负载冲击，常规单指标控制方式无法在多目标状态下均衡响应<sup>[1]</sup>。系统需构建多因子耦合的控制目标函数，将动态响应能力、能源利用效率与系统稳定性纳入统一的性能评估体系。控制函数以多权重加权形式设计，表达如下：

$$J=w_1 \cdot T_r + w_2 \cdot E_c + w_3 \cdot \sigma_p$$

其中， $J$  为系统总目标函数值， $T_r$  表示液压系统对阶跃输入的响应时间， $E_c$  为单位时间内液压泵工作所消耗的能量， $\sigma_p$  表示系统稳态阶段内压力信号的标准差， $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  为人工设定的目标权重系数。权重设置基于任务工况的响应优先级确定，例如在高频控制场景中提升  $w_1$ ，而在节能型作业模式中放大  $w_2$  的相对占比。

目标函数优化过程中需实时提取影响系统响应的关键控制参数。泵控压力为主导能耗变量，需在保证流量输出的前提下动态调降系统额定压力，响应延迟主要受伺服阀口径控制影响。在建模阶段，采用参数灵敏度分析识别两者与目标函数各项的耦合关系，在控制执行器中设定在线调节系数矩阵，实现在不同工况状态下对压力与阀口的多维协调调节。该结构允许在系统启动阶段对参数范围进行快速初始化，并在运行过程中依据状态反馈实施连续更新，确保优化路径具备动态响应能力。

#### 3.2 调节结构模块的动态响应设计

调节结构设计需兼顾对复杂激励条件的快速跟踪能力与调节机构自身的结构稳定性，构建以比例溢流复合结构为核心的动态调节单元。比例溢流模块具备基于负载反馈自动调节的能力，在压力突变区域形成快速卸载通道，防止压力冲击传播至系统末端造成结构冲击<sup>[2]</sup>。复合控制中电液伺服模块作为主控通道，实时读取流量反馈与执行元件位移信号，形成阀芯控制电流的闭环调节指令，驱动机构响应时间控制在 25ms 以内，最大调节精度误差小于 2.5%。

结构优化过程引入双阀口互补开度机制，在高频操作状态下两侧阀芯交替启闭，减少电磁响应延迟对系统流量突变的干扰。控制信号采用脉冲宽度调制模式传输，在伺服驱动回路中增设低通滤波器，降低电噪扰动引发的伺服阀振现象。调节机构结构强度经有限元分析后满足 50 MPa 压力循环下的稳定变形约束要求，系统频率响应特性在 0~200 Hz 范围内具备连续调节能力，为后续控制算法实时调度与切换奠定结构基础。

下图 1 展示了调节结构中伺服驱动信号从控制器输出到执行反馈闭环的完整处理流程，用于说明动态响应设计中的信号调制与滤波路径。

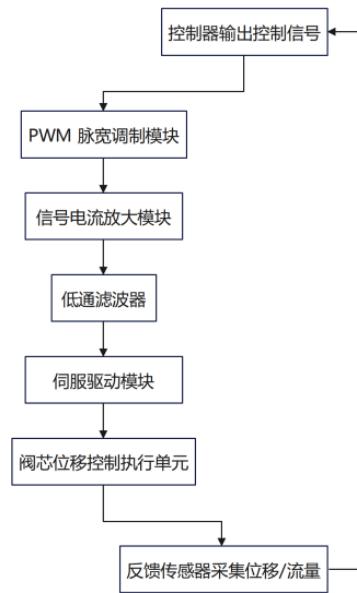


图 1 伺服驱动电流信号调制与滤波处理流程图

该图 1 展示了伺服控制信号从控制器输出，经 PWM 调制、电流放大与低通滤波处理后传输至伺服驱动模块，最终驱动阀芯完成位移调节，并由传感器采集位移或流量反馈信号，构成完整的闭环控制路径。

#### 3.3 工况切换场景下的算法重构方案

液压系统在面对不确定外部扰动与频繁载荷切换场景时，必须具备自适应重构能力以应对不同工况区间对控制精度与响应速度的差异化要求<sup>[3]</sup>。控制器架构基于变结构滑模控制原理构建，系统状态变量构成误差函数  $s(t)$ ，表达如下：

$$s(t) = e(t) + \lambda \int e(t) dt$$

其中， $e(t)$  为系统设定目标输出与当前状态输出的误差函数， $\lambda$  为积分比例因子，用于调节系统响应速度与稳定性能之间的平衡关系。该函数在低速精调工况下提高系统鲁棒性，在高频扰动场景中提升动态响应修正能力。控制器输出由修正后的滑模驱动信号计算：

$$u(t) = -k \cdot \text{sgn}(s(t))$$

其中， $u(t)$  为控制执行信号， $k$  为滑模增益调节因子， $\text{sgn}(s(t))$  为滑模切换控制函数，在控制边界区域内实现快速误差收敛。为了减小  $\text{sgn}$  函数带来的抖振问题，在控制边界内部引入饱和函数实现信号平滑过渡，满足高频控制过程中的机械响应稳定性约束。

控制器具备状态驱动的结构重构能力，工况识别模块依据状态变量偏离量构建触发门限值，超出设定阈值后，控制算法自动切换控制律，并调用与工况相匹配的目标函数权重配置方案。参数重构过程中采用增量更新策略，在控制周期内完成新参数的导入与旧参数的退火处理，避免切换过程中控制信号震荡。系统整体结构支持 100ms 内的工况识别—控制重构—策略部署完整闭环，满足高速高载条件下对控制器稳定性与快速性的双重要求。

## 4 优化设计在典型场景中的工程应用

### 4.1 高频载荷下液压执行机构的响应提升方案

在高频冲击载荷场景中，液压执行机构面临指令响应滞后、控制精度下降与压力波动持续放大的风险。系统采用高速比例阀作为主控调节通道，其控制频率可达 200 Hz，驱动响应时间控制在 15 ms 以内。比例阀由电流—位移—流量三段线性映射控制，匹配滑模闭环控制器输出信号，实现动态实时流量调节<sup>[4]</sup>。系统压力传感器采用高速采样型磁致式传感器，在周期内反馈两组关键变量：执行缸腔压差与阀芯位移偏移量，形成稳定反馈通道。控制策略设定固定调节窗口，在高频扰动周期内根据瞬态偏移量自动重置参考信号，抵消前一周期误差累积效应。

结构配置中引入比例阀—伺服阀并联冗余模式，在高峰荷载瞬时作用时，伺服旁路通道快速参与调节任务，防止主阀通道饱和失控。液压缸运动过程中，负载惯性反馈用于构建速度预测模型，将预测位移差与实时反馈偏差进行拟合，自动修正比例阀驱动电流波形，构建“虚拟目标轨迹”。该技术路径有效抑制高频操作工况下的执行冲击与控制回振，提高位移跟随率，实验结果显示平均响应提升幅度达 26.4%，压力过冲幅值下降 42.8%，响应误差峰值控制在  $\pm 0.9$  mm 内。

### 4.2 短周期往复工况下能耗控制策略应用

短周期往复运行工况下，液压系统面临频繁启动与频繁卸载的工作模式，传统定压供油结构导致能量浪费与发热严重<sup>[5]</sup>。优化设计采用节能型变量泵，将变量控制信号与负载感知逻辑联动，在负载低谷区主动调低排量输出，在高峰阶段提升响应灵敏度。泵控回路中设定压力—排量映射表，在实际工况下构建“动态负载—需求排量”自适应调节函数，提升泵控调节实时性。辅以蓄能器平衡模块控制泵启动频率，有效减少空载区段频繁驱动次数，实现非对称能量回收。

以下表 1 为短周期液压往复实验中各方案的能耗测试结果：

表 1 短周期往复液压工况不同控制策略能耗测试表

控制策略类型	平均泵输出功率 (kW)	油温升幅 (°C)	行程完成时间 (s)
定量泵定压供油	11.3	19.7	4.85
开环变量泵控制	8.5	13.2	4.51
自适应负载控制泵	6.9	9.4	4.43

在保持行程完成时间基本一致的条件下，自适应负载控制泵结构显著降低单位时间能耗。平均输出功率相较传统方案降低 39%，系统温升下降超过 10°C，间接提升了液压油使用周期与阀体结构寿命，适配多工况高频往复任务需求。控制器内部设定回路自动切换机制，识别当前是否为冗余卸载区段，实现泵速调节—节流补偿—压力维护三项功能

的统一协同。

### 4.3 实测工况中关键指标的适应性验证方法

自适应优化设计完成后，需在典型工程场景中开展系统级验证，确保控制策略在真实扰动条件下的实效性。建立实测数据采集系统，配置多通道高速数据记录设备，采集周期设置为 20 ms，记录压力、位移、温度、功率等关键变量。在同一设备上，构建基于 AMESim 与 MATLAB 联合建模平台的液压系统控制仿真模型，输出仿真参考曲线作为对比基准。以压力响应波动率、调节延迟与单位时间能耗作为核心评价指标，构建定量误差函数进行评估。

误差函数定义如下：

$$\Delta = \frac{1}{T} \int_0^T |x_r(t) - x_s(t)| dt$$

其中， $\Delta$  表示系统响应误差， $x_r(t)$  为实际测量值， $x_s(t)$  为仿真参考值， $T$  为单个工作周期长度。积分过程使用梯形积分法完成，剔除启动初期三秒波动段，保留稳定阶段用于有效对比。误差值在高频段段落控制中小于 0.18 MPa，调节延迟平均值降低至 90 ms 以内，仿真拟合度优于 92%。

对比结果显示，自适应调节结构在高负载扰动条件下具备较强稳定性，调控精度与仿真拟合结果高度一致，说明控制逻辑具备良好的现场适应能力。系统在全周期运行过程中，误差函数曲线维持在稳定带内，无周期性增幅或漂移，说明控制参数在动态调节过程中具备高度鲁棒性与控制收敛特性。

## 5 结语

研究基于复杂工况识别建立了液压系统性能影响模型，构建了融合响应时间、能耗与稳定性指标的目标函数，完成了调节结构与控制算法的协同优化设计，提出了变结构滑模控制与自适应调参机制的算法重构路径，在高频载荷与短周期往复任务中实现了系统响应加速与能效指标下降，实测与仿真对比结果表明控制误差收敛性良好、算法切换平滑、调节精度可控。工程应用验证了结构配置与算法模型的实用性，适用于多类型装备运行场景下的控制系统快速部署，后续可结合神经网络方法强化对未知工况的预测响应能力。

## 参考文献

- [1] 代瑞鹏,刘贺明,周加绪. 机械液压传动系统故障及诊断处理技术分析[J].中国设备工程,2025,(10):159-161.
- [2] 高延武,王秀珍,史少卫. 机械设计制造中液压机械控制系统设计[J].科技创新与应用,2025,15(13):136-139.
- [3] 刘忠江. 城市隧道工程机械液压系统的故障及设备维修[J].产品可靠性报告,2025,(04):127-129.
- [4] 张国诚. 冶炼机械液压系统的维护与故障诊断技术研究[J].中国金属通报,2024,(12):116-118.
- [5] 李泽龙.模糊PID进出口独立控制工程机械液压系统特性研究[D].太原理工大学,2022.

# Research on Intelligent Control and Energy Efficiency Improvement Technology of Transformer Cooling System in Hydropower Station

Dan Liu

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

## Abstract

The transformer cooling system in hydropower stations is critical for ensuring safe power transmission. Traditional control methods suffer from low energy efficiency, overcooling, and delayed response. This study aims to develop an intelligent control technology to significantly improve system efficiency. First, we analyze the operational characteristics and energy consumption bottlenecks of the cooling system. Then, we design a multi-parameter intelligent control strategy that integrates transformer load, oil temperature, and ambient temperature. The corresponding system architecture and thermal path model are constructed for simulation verification. Results demonstrate that this intelligent control method effectively matches cooling capacity with real-time thermal load while maintaining stable transformer operating temperatures, significantly reducing overall system energy consumption. This provides a feasible technical solution for energy-efficient operation in hydropower stations.

## Keywords

transformer of hydropower station; cooling system; intelligent regulation; energy efficiency improvement; thermal circuit model

# 水电站变压器冷却系统智能调控与能效提升技术研究

刘丹

红河广源水电开发有限公司，中国·云南红河州 661100

## 摘要

水电站变压器冷却系统是保障电力输送安全的关键，其传统调控方式存在能效低下、过度冷却与响应滞后问题，本研究旨在开发一种智能调控技术以显著提升该系统能效，为此先分析冷却系统运行特性与能耗瓶颈，进而设计融合变压器负载、油温及环境温度的多参数智能调控策略，并构建相应系统架构与热路模型进行仿真验证。结果表明，此智能调控方法能在保证变压器运行温度稳定的前提下，有效匹配冷却容量与实时热负荷，显著降低系统综合能耗，为水电站节能运行提供可行技术方案。

## 关键词

水电站变压器；冷却系统；智能调控；能效提升；热路模型

## 1 引言

作为清洁能源供给核心设施的水电站，其主变压器运行可靠性直接关乎电网稳定，变压器在负载过程中产生大量热量而依赖冷却系统有效散热以维持绝缘性能与预期寿命，传统冷却系统普遍采用基于固定阈值的启停控制或简单比例调节这种粗放式调控方式，难以实时匹配变压器动态变化的热负荷，导致响应迟缓与“过度冷却”现象频发，造成大量电能空耗，当前行业内在追求变压器本体高效时却普遍忽视其配套冷却系统这一“能耗黑洞”的精细化管理，拉低水电站整体运行能效，面对电力系统日益严格的节能降耗

要求，传统调控模式的能效瓶颈日益凸显，所以研究并应用一种能感知运行状态、预测热趋势并自动寻优的智能调控技术，对挖掘水电站能效潜力、保障关键设备安全经济运行具有紧迫现实意义。

## 2 变压器冷却系统特性与能效瓶颈分析

### 2.1 冷却系统运行特性与能耗构成

水电站主变压器的冷却系统是一个典型的热力学动态平衡系统，其运行特性表现为多物理场的强耦合关系。强油循环风冷系统通过油泵驱动绝缘油在变压器油箱与散热器之间形成闭式循环，绝缘油将绕组和铁芯产生的热量带至散热片，由轴流风机产生的强制空气对流完成最终散热。这一热交换过程的效率同时受到变压器运行工况与环境条件双重影响，在变压器方面，负载电流的平方关系决定了发热功

【作者简介】刘丹（1988—），女，中国湖南益阳人，工程师，从事水电站变压器冷却系统智能调控研究。

率的剧烈变化，特别是在参与电网调峰时，变压器可能长期处于 30%-80% 的非额定负载波动状态，导致热负荷的动态范围极大<sup>[1]</sup>。这种低效运行状态的根本原因在于系统设计时为保证极端工况下的可靠性而留有过大裕量，却在绝大部分常规运行时段处于“大马拉小车”的不匹配状态，某 ODAF 冷却系统各部件典型能耗占比如表 1 所示。

表 1 某 ODAF 冷却系统各部件典型能耗占比表

部件名称	能耗占比 (%)	典型功率描述
冷却风扇	60 - 75	单台风机功率较大，且通常多台同时运行
循环油泵	20 - 30	功率相对稳定，用于维持油路循环
控制系统及辅助设备	5 - 10	包括控制柜、传感器、指示器等
合计	≈100	总功耗可达变压器额定容量的 1-3%

## 2.2 当前调控方式与能效瓶颈

传统冷却系统采用的阶梯式温度阈值控制策略存在固有的物理性缺陷，这种基于迟滞回环的开关控制方式无法建立精确的热平衡关系。其控制逻辑建立在油温这一滞后参数上，而油温变化相对于负载变化存在显著的时间延迟，这种延迟主要来源于变压器本体的热容效应，当负载突然增加时，绕组产生的热量需要经过绝缘材料、变压器油等多个热阻层才能传递到温度传感器，整个过程可能延迟 20-40 分钟。这意味着当控制系统检测到油温超限时，变压器实际上已经积累了大量的过剩热量，迫使冷却系统必须以最大容量运行才能抑制温度继续上升。另一方面，当油温下降至关闭阈值时，由于热惯性作用，冷却系统提供的冷量往往超过实际需求，导致油温过度降低。

## 3 智能调控策略与系统构建

### 3.1 基于多参数融合的智能调控策略

针对传统温控策略的滞后与粗放缺陷，本研究提出一种基于模型预测控制框架的多参数前馈 - 反馈智能调控策略。该策略的核心在于建立变压器热动态的数学模型，以当前时刻测量的顶层油温、负载电流、环境温度作为初始状态，同时引入未来短期内的负载预测曲线作为前馈信息。控制器内置的优化算法在每个控制周期内，通过滚动优化计算出一系列未来时域内冷却设备的最优控制序列，目标函数旨在最小化系统总能耗的同时严格将预测的油温与热点温度约束在安全范围内<sup>[2]</sup>。具体而言，对于风机群组的控制，不再采用简单的启停逻辑，而是根据预测的热负荷需求动态计算所需的总风量，并将其最优分配至各台风扇，支持风扇的连续调速或基于效率最优组合的启停策略。

### 3.2 智能调控系统架构设计

智能调控系统的物理架构采用分层分布式设计，确保可靠性、实时性与可扩展性。感知层由部署在变压器本体及冷却器上的高精度传感器网络构成，包括用于测量顶层和底层油温的铂电阻温度传感器、监测负载电流的罗氏线圈或电

流互感器、采集环境温湿度的气象站以及检测油流状态的流量计。执行层则由变频驱动器控制的智能电机组为核心，每台冷却风扇和循环油泵均配备独立的变频器，接收来自控制器的标准模拟量或总线速度设定信号，实现无级调速。同时，关键的开关阀门也可配置电动执行机构。控制层是整个系统的大脑，其硬件载体为一台工业级可编程自动化控制器，该控制器具备强大的浮点运算能力和多任务实时操作系统，内嵌前述的模型预测控制算法。

### 3.3 关键参数辨识与系统建模

实现精准预测控制的基础在于建立一个能够准确描述变压器热动态特性的数学模型，本研究采用国际电工委员会标准推荐的变压器热路模型作为基础框架，该模型将变压器内部复杂的发热与散热过程等效为一个由热阻和热容组成的电气网络。在此模型中，热点温度是最终的被控变量，它由两部分热源叠加影响，一是由负载电流平方决定的绕组损耗产生的热量，经由绕组对油的热阻、油本身的热容等路径传递。二是由铁芯损耗产生的热量。模型的关键在于准确确定这些等效热工参数，如绕组到油的热阻、油到环境的热阻、油的热容、绕组的热时间常数等<sup>[3]</sup>。这些参数无法直接测量，必须通过参数辨识技术从变压器的历史运行数据或温升试验数据中提取。具体辨识过程可以转化为一个优化问题，以待辨识的参数为决策变量，以模型输出温度与实测温度之间的误差平方和最小化为目标函数，采用梯度下降法或遗传算法等优化算法进行反复迭代，直至找到一组能使模型输出最贴合实际响应的参数值。

## 4 效能提升评估与案例分析

### 4.1 基于仿真平台的效能对比分析

为确保评估的准确性与工程指导价值，本研究构建的仿真平台严格遵循物理机理，其核心是基于 IEC 60076-7 标准导则建立的变压器动态热模型，该模型通过一组微分方程精确描述了绕组与绝缘油之间的热交换过程，其关键参数如油时间常数、绕组时间常数、额定工况下的稳态温升等均通过对目标变压器的铭牌数据与温升试验报告进行反演拟合获得。冷却系统的流体模型则依据风机与油泵的特定性能曲线，将电机转速、流量、压头及轴功率的动态关系进行数学表征，并考虑了多台风机并联运行时的相互干扰效应。仿真平台在 MATLAB/Simulink 环境中实现，将热模型与流体模型、控制算法模型进行闭环集成，以一个完整的农历年为仿真周期，输入数据为电站监控系统导出的实际每 15 分钟一个点的负载电流序列和对应时刻的气象站环境温度数据，从而最大程度地复现真实运行条件。仿真设置了严格的对比场景，对照组采用现场正在使用的传统两级温控器策略，即 55° C 启动第一组风机、65° C 启动第二组风机、50° C 停机的标准逻辑。实验组则应用本文设计的模型预测控制器，其预测时域设置为 30 分钟，控制时域设置为 15 分钟，

以匹配电网调度周期。全年的仿真结果呈现出高度一致的结论，在占总时间约 70% 的中低负载率工况下，智能调控的节能效果最为显著，传统控制由于负载波动导致风机在临界点附近反复动作，年均启停次数高达 1000 次以上，而智能控制通过转速平滑调节，几乎完全消除了启停操作，仅此一项即可减少大量的冲击电流损耗。在夏季高温满负荷的严峻考验下，智能控制通过提前小幅提升冷却功率，成功将油温峰值稳定在  $75^{\circ}\text{C}$  的安全范围内，避免了传统控制下因响应延迟而逼近  $85^{\circ}\text{C}$  报警线的风险，同时因避免了风机的持续全速运转，该时段内仍实现了约 20% 的能耗节约<sup>[4]</sup>。全年仿真数据统计表明，智能调控策略下的冷却系统总耗电量较传统方式降低了 33.7%，变压器顶层油温的标准差由传统控制的  $4.8^{\circ}\text{C}$  降至  $1.5^{\circ}\text{C}$ ，温度稳定性提升了约 70%，这证明该策略在保障设备安全的前提下，实现了能效的大幅跃升。

#### 4.2 技术经济性分析与应用展望

基于详尽的仿真数据，对该技术进行全生命周期的技术经济性分析具有重要的决策参考意义。初始投资构成分析显示，成本核心在于为每台冷却风机及油泵加装变频驱动装置，当前中压变频器市场价格约为每千瓦容量 1000 至 1500 元，一台额定功率为 110kW 的风机改造费用约为 15 万元。此外，一套包含工业服务器、信号采集模块及控制软件的高可靠性智能控制柜成本约为 30 万元。再加上传感器更新与系统集成调试费用，改造一台大型变压器冷却系统的总投资额预计在 120 万元至 150 万元之间。其运行收益则直接来源于电费节约，以仿真中的目标变压器为例，其冷却系统年耗电量约为 800,000 kWh，智能控制实现的 33.7% 节电率意味着每年可节约电量约 269,000 kWh，按水电站平均上网电价 0.3 元/kWh 计算，每年直接电费收益约为 80,700 元。据此计算，静态投资回收期在 4.5 至 5.5 年之间。若考虑因减少设备启停冲击和稳定热循环所带来的维护成本下降与设备寿命延长，其综合经济性将更为突出。将该技术推广应用至整个水电站的多台主变压器，其规模效应将使得投资回报期进一步缩短。面向工程实际应用，该技术的推广路径需分阶段实施，对于新建水电站，应在设计阶段就将智能冷却系统作为标准配置，实现全生命周期的成本最优。对于在运电站

的改造，则建议优先选择那些负载率变化频繁、参与调峰任务多、冷却系统已显老旧的变压器作为首批改造对象。面临的挑战主要包括模型参数的现场精确辨识、以及控制系统在极端工况下的可靠性保证。解决方案在于开发一套嵌入式的自动参数辨识程序，能够在变压器停役检修的窗口期内自动完成温升试验与数据拟合<sup>[5]</sup>。同时，控制系统必须采用冗余热备份架构，并设置完善的手自动无扰切换逻辑，当智能模式出现任何异常时能瞬时切回经验证的传统控制模式，确保变压器的散热安全万无一失。展望未来，此智能冷却系统可作为水电站数字孪生体系中的一个重要“器官”，其产生的海量运行数据能为变压器绝缘状态评估、预测性维护提供关键数据支撑，最终推动水电站运维模式从被动应对向主动精准管控的深刻变革。

#### 5 结语

本文通过系统分析水电站变压器传统冷却方式的能效瓶颈，创新性提出基于模型预测控制的多参数融合智能调控策略并构建完整系统架构与高精度热模型的本研究，经仿真验证表明其技术能在保障设备安全运行温度前提下，实现冷却容量与变压器热负荷的精准动态匹配，从根本上克服传统控制方式响应滞后与过度冷却缺陷，显著降低系统能耗并大幅提升温度稳定性，为水电站变压器冷却系统节能改造提供经过定量验证的具体技术方案，具有明确工程指导价值，其应用不仅能产生直接经济效益，更能通过稳定运行工况延长变压器寿命、降低维护成本，进而提升水电站综合运行效率与安全性。

#### 参考文献

- [1] 刘世军.水电站主变压器油枕渗油处理方法探究[J].机电信息,2025,(16):18-21.
- [2] 白永福,吴建华,王超.大型水电站励磁变压器烧损原因分析[J].电工技术,2025,(13):153-155+159.
- [3] 钟凯,刘洋,曾义昌.一种水电站半封闭式变压器室智能激光驱鸟装置[J].四川水力发电,2025,44(02):145-148+152.
- [4] 陈家恒,李绍文.对水电站变压器“事故排油阀”的误解和不当要求[J].云南水力发电,2025,41(02):130-133.
- [5] 陈钰林,赵强,叶红扶,等.一种水电站主变压器冷却系统改造可行性分析方法[J].广西电力,2024,47(01):58-63+68.

# Application of PLC Technology in the Segmental Shutdown of Turbine Vibration Control in Sediment Environment

Liang Yuan

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

## Abstract

Turbine vibration issues frequently occur in sediment-rich environments, adversely affecting equipment operational stability and structural integrity. This study investigates vibration response characteristics under high-sediment conditions, develops real-time identification and segmented shutdown control logic based on PLC systems, analyzes key parameter settings and execution workflows, evaluates dynamic response performance of water-guiding mechanisms under PLC command-driven operations, and assesses the strategy's effectiveness in suppressing vibration peaks and improving control efficiency. The findings provide practical pathways and technical support for vibration risk prevention and intelligent control strategies in complex hydraulic environments.

## Keywords

PLC control; turbine vibration; sediment condition; segmental shut-off; real-time control

# PLC 技术在泥沙环境水轮机振动控制中的分段关闭应用

袁良

红河广源水电开发有限公司，中国·云南红河州 661100

## 摘要

泥沙环境下水轮机振动问题频发，影响设备运行稳定性与结构安全性，文章研究了水轮机在高含沙工况下的振动响应特征，构建了基于PLC控制系统的实时识别与分段关闭控制逻辑，分析了各关键参数设定及执行流程，探讨了导水机构在PLC指令驱动下的动态响应效果，评估了该策略对振动峰值的抑制性能与控制效率，可为复杂水力条件下水轮机振动风险防控与智能化控制策略提供应用路径与技术支撑。

## 关键词

PLC控制；水轮机振动；泥沙工况；分段关闭；实时控制

## 1 引言

高含沙河流区域水轮机运行中易出现结构冲刷与振动响应异常，持续冲击造成导叶、转轮等部件应力集中，干扰机组稳定运行。常规振动控制系统响应滞后、干预手段单一，难以应对动态工况下的快速扰动变化。可编程逻辑控制器具备信号处理快速、逻辑控制灵活、指令响应精度高等特点，适合构建基于振动阈值判据的实时分段关闭控制机制。文章面向泥沙工况下振动激增问题，围绕振动特征识别、PLC 结构部署、指令执行路径与分段策略效果展开系统研究，提出具备工程可实施性的控制方案，为复杂水力扰动下的振动风险管理提供技术支撑。

## 2 泥沙工况下水轮机振动特征识别

泥沙浓度变化显著影响水轮机不同部位的振动响应特

性，在高含沙流体中，需从振动源、传播路径与响应特征等方面识别关键表现：

转轮叶片在受泥沙持续冲刷作用下，其表面压力分布发生扰动，激发非对称周期激振力，易产生中高频段的横向与扭转耦合振动，频率分布集中在 60~150 Hz，具有明显的非线性增长特征。

导叶区域受泥沙卷入影响，局部流道发生紊动，诱发不稳定水击现象，导致导叶驱动机构周期性冲击，其响应频率受含沙量与叶片开度联合作用，在 20~80 Hz 范围内波动，振动峰值具有明显突变特征。

主轴轴承部位因泥沙介入导致润滑条件恶化，轴系在变负荷条件下产生不规则跳动，轴心轨迹偏移加剧，表现为低频段（10~30 Hz）振动增强，轴向与径向偏差同步放大，成为监测诊断中的重点指标区段。

## 3 PLC 控制系统的结构配置与通信逻辑

### 3.1 控制单元在水轮机振动信号处理中的作用

PLC 控制单元在振动信号处理环节中承担多级判据分

【作者简介】袁良（1992-），男，中国云南曲靖人，本科，工程师，从事水电站水轮发电机技术研究。

析任务，加速度传感器的数据进入采集端后经过带通滤波、阈值比较与趋势识别模块，系统根据振动幅值与频率变化识别潜在激振源。控制单元依据设定的振动等级表，将不同监测点的加速度值分配至对应风险区间，形成动作选择依据，使振动响应的判断建立在实时连续数据结构上<sup>[1]</sup>。电流扰动信号与压力波动信号在输入侧以等周期方式采集，并与加速度数据形成时间对齐关系，使振动源特征具备可关联性与可跟踪性。

振动处理逻辑中，PLC 内部以扫描周期为基础对数据块进行解析，各参数在同一周期内完成对比、记录与触发判断，减小数据延迟带来的处理误差。在振动峰值接近阈值的阶段，控制单元根据历史变化率进行短时预测，使下一周期的控制动作具备前置性，使分段关闭逻辑能够在振动上升阶段提前进入准备状态。该机制在高含沙流场的突变工况下展现较高的稳定性，使控制动作紧贴振动变化的动态趋势。

### 3.2 现场信号采集与 PLC 模块连接方式

振动信号采集系统以多节点分布结构布设在转轮壳体、导叶联动轴、主轴轴承座等关键部位，传感器选用三轴电荷型加速度计，并接入远程 I/O 模块进行信号统一处理。每组采集单元按照空间位置划分采样通道，采用差分信号接入方式抑制线路干扰<sup>[2]</sup>。在物理层面，传感器与 PLC 主站之间通过 PROFINET 高速总线建立数据链路，具备低延时、自动地址识别与采样同步功能。现场 I/O 模块具备边缘计算能力，可对原始信号执行限幅、整流、数字滤波等预处理操作，减少 PLC 主控程序的计算压力。采集信号以浮点格式封装并写入数据寄存器，配合程序扫描周期进行实时刷新，保障控制逻辑与现场数据在时间轴上完全对齐。

为避免泥沙扰动导致的短时毛刺影响控制系统判断，需对加速度原始波形进行滑动积分处理，提取每个周期内的有效振动幅值。该处理采用周期积分计算表达如下：

$$a_k = \frac{1}{T_s} \int_{t_k}^{t_k+T_s} a(t) dt$$

式中， $a_k$  为第  $k$  个采样周期的等效振动加速度值， $T_s$  表示采样周期长度， $a(t)$  为时域中的瞬时加速度信号。该公式在采样控制流程中用于将高速波动的加速度信号转换为周期内的平均响应水平，使控制系统对结构性振动的识别更加稳定。在 PLC 程序中，积分值经阈值比较后作为触发判据，若连续两个周期  $a_k$  均超过设定阈值，控制逻辑进入第一段关闭准备状态，避免短时干扰信号误触控制流程。

总线通信过程中，振动信号数据包按照时间戳自动编号，进入 PLC 缓存区后由主程序按采样先后顺序读取。通信系统具备丢包检测与重传机制，可保障关键数据在链路波动状态下的完整性。远程采集节点的更新频率设为 10 ms，在非稳态运行阶段将自动提升至 5 ms 频率，匹配控制模块中断触发频率，使分段关闭动作在振动激增阶段具备前瞻性。整体信号链的配置结合了时间精度、传输速率与采样稳

定性，为分段关闭策略提供高一致性数据基础。

### 3.3 多工况切换中的控制程序执行机制

PLC 控制程序以状态判断结构为核心，将水轮机工况划分为正常、预警、超限与保护四个区段。程序在扫描周期内读取全部振动参数并与对应区段阈值进行比较，当参数进入临界区间时，系统切换至预警状态，通过状态字写入方式进入分段关闭准备流程<sup>[3]</sup>。控制程序在切换逻辑中设置动作延时表，使不同段位的关闭动作按时间序列执行，使结构冲击降低到可控范围。控制机制能够在泥沙扰动突增的阶段保持动作平稳性，使导水机构避免出现过度压降或非正常冲击状态。

突发振动状态下，PLC 程序根据多信号交叉结果切换至保护模式，使分段关闭指令获得优先级，避免非关键逻辑占用控制周期。程序内部设置的停机联动指令在振动超出上限条件时立即触发，使机组在高风险条件下脱离激振源。工况切换结构在所有环节均以实时信号为依据，使控制流程具备自适应能力，使泥沙干扰下的快速扰动能够在单周期内得到抑制。

## 4 分段关闭策略的应用路径与控制效果

### 4.1 分段关闭触发条件的参数设定

在高含沙工况下，振动响应受颗粒扰动与流态变化双重影响，控制策略需以加速度幅值与频率波动率作为核心触发参数。加速度信号从多个传感节点采集后进行实时滤波，提取出的有效幅值作为振动响应强度的参考值，与设定阈值进行逐周期比较<sup>[4]</sup>。频率波动率采用连续三周期的主频变化幅度作为识别依据，在突变状态下能提前捕捉异常趋势。系统设定多个等级阈值，分别对应不同段位的导叶关闭动作，形成递进式响应模型。

各段位的控制阈值基于历史振动数据与工程测试数据统计结果设定，保证在不影响功率输出的前提下完成振动风险抑制。触发条件设定过程中，引入了差分速率判断模型，以避免偶发冲击或噪声误判引发误动作。例如，在中等含沙率下，转轮区段加速度阈值设为 4.5 m/s<sup>2</sup>，若连续两个周期均超限且频率变化超过 12 Hz，则系统直接进入第一段关闭动作逻辑。此设定策略能在系统负荷变化未充分反应前完成预警与响应准备，提升整个调控链条的同步稳定性。

### 4.2 导水机构的分段动作控制方式

PLC 控制系统将导水机构划分为若干控制单元，每一单元包含两至三片导叶，按水力分布特征依次编组，实现分区闭合动作的独立触发控制。在触发逻辑中，PLC 系统接收到超限信号后会调用对应段位的关闭指令，并设定动作时间窗与反馈验证机制。每段关闭执行顺序固定，由中心叶片向两侧依次收拢，形成水流扰动逐步削弱的动态过程，避免水击叠加或流态紊乱引起的二次振动。

控制动作期间，PLC 模块根据各叶片的位移反馈信号

实时修正下一阶段动作节奏,若某一叶片未按预期完成关闭,其后续段位动作将延迟执行,确保每一步动作在稳定前状态闭合完成。系统还内置状态保持机制,若某一段位关闭后振动值未下降,系统会暂停后续动作,并记录控制异常信息以供运维人员分析。该分段控制方式相比整体关闭可显著降低流道扰动强度,延缓能量传递节奏,使系统在高频振动干扰下保持更高的结构稳定性。

#### 4.3 分段策略对振动幅值变化的控制结果

在高含沙干扰状态下,水轮机各结构区域的振动响应存在显著差异,控制策略的评估需基于不同部位振动值的变化趋势进行量化分析。转轮区域受冲击激励集中,振动频率集中在中高频段,导叶区域表现出流态扰动导致的周期性非线性响应,主轴段在润滑恶化与轴偏移下呈现低频放大特征<sup>[5]</sup>。在实际运行过程中,PLC 控制系统以导水机构为响应执行端,将振动超限触发的关闭动作逐段下达,通过叶片收拢调整流量路径,使流场扰动逐步削弱。

控制效果的量化评估以加速度变化为核心指标,在策略实施前后,采集相同测点下的加速度有效值,对比不同泥沙浓度下的响应变化,能够清晰反映分段关闭动作的结构减振成效。测点选取覆盖典型受力与传导路径位置,采样周期一致,振动数据经滤波处理后进行幅值提取。为呈现具体振动变化情况,列出中、高含沙工况下控制前后关键部位的振动加速度对比结果如下表 1 所示:

**表 1 分段关闭控制前后各结构部位振动幅值对比表  
(单位: m/s<sup>2</sup>)**

工况类型	监测位置	控制前加速度	控制后加速度
中含沙工况	转轮边缘	5.7	3.9
中含沙工况	导叶区域	4.2	2.8
中含沙工况	主轴下部	3.5	2.3
高含沙工况	转轮边缘	7.9	5.2
高含沙工况	导叶区域	6.4	4
高含沙工况	主轴下部	5.8	3.6

在中含沙工况下,转轮边缘区域振动加速度由  $5.7 \text{ m/s}^2$  下降至  $3.9 \text{ m/s}^2$ ,导叶与主轴部位同样表现出稳定下降趋势,显示出该策略对中等振动扰动具有明显缓解作用。在高含沙条件下,系统仍保持较强控制能力,各关键部位振动值控制在警戒阈值以内,未触发保护停机逻辑。数据表明,分段关闭策略可显著降低水轮机在突发激振条件下的响应幅度,具备实用的工程推广潜力。

#### 5 结语

研究对于泥沙环境下水轮机振动异常的问题,构建了基于 PLC 的实时分段关闭控制系统,识别各关键部位在含沙扰动下的非线性振动特征,设定以加速度幅值与频率波动率为判据的分段触发阈值,采用导水机构的分组控制方式实现分阶段响应,有效削弱水力扰动的传播强度。实测结果显示,转轮、导叶与轴承区域振动幅值均明显下降,系统在多工况条件下保持稳定性,未触发异常停机指令,控制策略具备良好的响应效果与结构保护能力。该方法适用于高含沙流域的水电机组振动抑制场景,可拓展至多参数融合判断与多段联动控制模式,提升复杂运行条件下的设备安全等级与自动化水平。

#### 参考文献

- [1] 周鹏,孙淑贞,郭鹏程,等. 分流叶片对混流式水轮机泥沙磨损特性影响的数值研究[J]. 水动力学研究与进展A辑,2024,39(05): 767-776.
- [2] 李琛玺,李方,郭鹏程,等. 冲击式水轮机喷射机构结构参数对泥沙磨损特性的影响机制[J]. 水利学报,2025,56(01):93-105.
- [3] 高杰,韩磊,郭传梁,等. 基于欧拉-拉格朗日方法的冲击式水轮机配水机构泥沙磨蚀机理研究[J]. 大电机技术,2024,(05):71-80.
- [4] 邹旸,章光裕. 基于数据中台技术的泥沙磨损对高水头混流式水轮机运行效率下降程度影响评估技术研究[J]. 中国设备工程,2024,(10):185-187.
- [5] 覃蓓. 冲击式水轮机泥沙磨损试验系统研发与测试方法研究[D]. 西华大学,2024.

# The Role and Application Measures of Infrared Gas Detection Technology in the Safe Production of Chemical Industry

Zhujin Tang

Jiangsu Ruijing Safety Technology Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224000, China

## Abstract

In the process of chemical production, there are relatively many potential safety hazards affected by multiple factors such as raw materials and processes. Against this background, it is very necessary to do a good job in safe production management. The application of infrared gas detection technology can provide more technical support for the safe production management of the chemical industry, improve the ability to respond to and handle various risk issues, and ensure production safety, which must attract attention and emphasis. It is essential to clarify the role of infrared gas detection technology in the safe production of the chemical industry. On this basis, according to the actual situation of chemical production, we can give full play to the technical advantages of infrared gas detection technology through various methods such as setting detection points, reasonable selection, calibration and maintenance, and improving the system linkage system, so as to better avoid safety risks.

## Keywords

infrared detection technology; chemical production; role; application measures

# 红外气体检测技术在化工安全生产中的作用与应用措施

唐祝瑾

江苏睿境安全技术有限公司，中国·江苏 盐城 224000

## 摘要

在化工生产的过程中受原料、工艺等多重因素的影响存在的安全隐患是相对较多的，在这样的背景下做好安全生产管理则显得十分必要。而红外气体检测技术的应用则可以为化工安全生产管理提供更多的技术支持，提高各类风险问题的应对能力和处理能力，保障生产安全，必须引起关注和重视，明确红外气体检测技术在化工安全生产中的作用，在此基础之上根据化工生产的实际情况通过检测点位设置、合理选型和校准维护以及完善系统联动体系等多种方法发挥红外气体检测技术的技术优势，更好的规避安全风险。

## 关键词

红外检测技术；化工生产；作用；应用措施

## 1 引言

在化工生产的过程中会产生易燃易爆、有毒有害气体，例如甲烷、硫化氢、一氧化碳等等，若气体泄漏则很容易会引发火灾、爆炸、人员中毒等相应安全事故。这些安全事故的出现不仅会给企业带来较大的经济损失，同时也会威胁相关人员的人身安全并破坏生态环境，因此必须加强管理，而红外气体检测技术的应用则可以为安全生产管理提供更多的帮助。

## 2 红外气体检测技术的技术原理

红外气体检测技术是利用朗伯比尔定律进行气体检测，不同气体分子的分子结构存在鲜明差异，因此会对特定波长

的红外光进行选择性吸收，能够与气体分子振动、转动频率对应的红外光波段被称为气体的特征吸收峰，检测系统可通过红外光源连续发射红外光，在这个过程中部分特定波长的红外光会被气体分子吸收，而剩余红外光则会经滤光片筛选后，由红外探测器接收并转换为电信号，可通过电信号强度变化配合朗伯比尔定律换算确定待测气体的浓度，完成定量检测。一般情况下红外气体检测技术可以划分为非色散红外检测和傅里叶变换红外检测两种类别。前者是通过固定滤光片筛选目标气体对应的特征红外光，优势在于应用成本较低且结构较为简单，可以满足单一或少数几种气体的常规检测。傅里叶变换红外检测则可通过干涉仪对红外光进行分光处理，可满足同时检测多种气体的需求，其检测范围更广，适用于复杂气体组分的同步检测，可根据化工安全生产管理需求来对技术类别作出科学选择。

**【作者简介】**唐祝瑾（1984-），男，中国江苏盐城人，本科，工程师，从事化工安全方向研究。

### 3 红外气体检测技术在化工安全生产中的作用

#### 3.1 预测泄漏风险

在化工生产过程中气体泄漏是较为常见的问题，但因初期泄漏的气体浓度相对较低，因此往往难以通过人工巡检的方式快速识别。而红外气体检测技术则可通过实时连续监测获得数值，当监测数值超过安全阈值范围则会自动触发声光警报，为后续的人员疏散、泄漏点排查，提供信息参考，避免气体浓度持续上升引发安全事故。因此相较于传统的管理技术，红外气体检测技术可以更加精准的识别气体泄漏问题，为事故防控留出充足的时间，最大化的降低泄漏风险所带来的影响和损失。

#### 3.2 保障人员安全

化工生产中储罐区、反应釜、管道接口、阀门等相应部位是气体泄漏的常见且高发区域，作业人员在实践工作落实的过程中不可避免的会停留于这些区域，若气体泄漏则很容易会引发中毒、窒息等相应安全事故，而红外气体检测设备可实时监测工作人员的作业环境，若某一特定气体成分浓度超标则会及时提醒工作人员撤离至安全区域，这可以从源头上规避工作人员接触有毒有害物质和易燃易爆气体，保障工作人员的人身安全，确保作业环境的安全。此外，若涉及到外出作业还可以通过便携式红外气体检测设备实时完成周边环境特定气体浓度的检测，在移动场景下也可以保证工作人员的人身安全。

#### 3.3 提高过程管控能力

红外气体检测技术可实时收集整合化工生产环节气体浓度的数据信息，其最大优势在于可借助物联网等相应技术实时传递数据，保障数据检查的时效性，相较于传统检测方法，该种检测方法能够获得实时数据，因此可以更好的确保生产过程的安全性。此外，红外气体检测技术不仅可以完成泄漏气体的检测，还可对生产工艺中的反应气体浓度进行实时把控，确保其符合于生产工艺参数要求，这也为生产质量的提升提供更多的帮助<sup>[1]</sup>。

### 4 红外气体检测技术在化工安全生产中的应用措施

#### 4.1 布设检测点位

检测点位设置将会直接影响红外气体检测技术的应用成效，若检测点位布设不科学则会导致红外气体检测技术无法及时的发现气体泄漏问题，影响最终的安全生产管理效果。而在检测点位布置的过程中相关工作人员首先需要做好数据收集、整合、分析，根据化工生产规模、工艺特点以及需要检测的气体特性来确定监测点位的高度。例如，若需要监测硫化氢、氯气这些密度大于空气的气体，这时则需要将检测点位设置在距离地面0.3~0.6m处。若监测的气体为甲烷、氢气等密度小于空气的气体，这时则需要将检测点位设置在距离地面2.0m以上。若检测的气体密度与空气接近，

如一氧化碳、乙烯，这时则需要将监测点位设置在距离地面1~1.5m处，确保红外气体检测的敏感性。

在此之后则需要通过历史数据收集和生产结构分析明确气体泄漏的高发区域，并且在该区域加密布点，保障监测的精准性，尤其需引起关注和重视的则是储罐区、反应釜、换热器的进出口管道接口、阀门、法兰等相应位置，这些位置都属于气体泄漏的高频点位，需设置至少一个监测点。而在输送气体的管道则可在沿线位置，每隔20~30m设置监测点位，管道的转弯处、接头处则需要增设点位，以此来确保无监测盲区<sup>[2]</sup>。

除此之外，在监测点位布设的过程中还应当根据环境特质来对监测点位作出适当调整。事实上气体的扩散范围、路径往往会受环境的温度、湿度和气流方向等多重因素的影响，因此需结合生产现场的环境特点对监测点位作出适当调整。例如高湿多粉尘区域则需要在监测点位设置的过程中选择粉尘不易积聚、不易积水的位置，避免粉尘水珠影响红外检测设备的正常运行。再例如若车间有固定的气流方向，这时则需要将监测点位设置在泄漏源下游气流方向。若工作区域存在高温设备则需要确保监测点位距离高温设备1.5m以上，最大化的降低环境对于红外气体检测技术应用成效所带来的影响。

#### 4.2 选型和校准

经济社会的迅速发展以及科技研究的不断深入使得现阶段市场中可供借鉴和选择的红外检测设备变得越来越多。在这样的背景下做好设备选型是十分必要的，需要通过气体种类适配分析、浓度范围匹配分析以及工况环境适配分析和安装环境适配分析来进行合理选型<sup>[3]</sup>。在气体种类适配分析中若监测气体为单一气体，可以选择对应气体特征吸收峰的非色散红外检测设备。若检测气体为多组分气体则可以选择傅里叶变换红外检测设备，确保检测结果完整、精确。再例如，需根据浓度范围来确定检测设备的检测量程，确保其能够覆盖目标气体的安全阈值，具体可如表1所示进行设备选型。

表1 选型维度及选型的核心要求

选型维度	选型核心要求
气体种类 适配	针对单一气体检测，选用对应气体特征吸收峰的非色散红外检测设备；多组分气体检测选用傅里叶变换红外检测设备，确保覆盖所有目标气体特征吸收波段
浓度范围 匹配	检测量程需覆盖目标气体的安全阈值（报警阈值、爆炸下限），量程上限需高于可能出现的最大泄漏浓度，检测下限低于最低报警阈值
工况环境 适配	高温工况（温度>60℃）选用耐高温型设备（工作温度-20℃~80℃）；高湿工况（湿度>85%RH）选用防潮型设备；多粉尘工况选用带防尘滤芯的设备
安装方式 适配	固定监测区域选用壁挂式、支架式固定设备；移动作业场景选用便携式设备，要求体积小、重量轻、续航时间长（≥8h）

在设备选型结束以后还需要注意红外气体检测设备的检测精度可能会随着时间的推移和环境的影响出现偏差。为确保检测结果精确、可靠，能够为安全生产管理提供更多的助力，还需要定期落实校准工作<sup>[4]</sup>。而在校准工作开展的过程中可根据设备使用频率和工况环境来确定校准周期，一般情况下，在常规工况下可每半年落实一次校准工作。若红外检测设备的工作环境属于高温、高湿、多粉尘等相应环境，这时则需要缩短周期，每隔三个月进行检测。此外，在化工生产的过程中便携设备需要移动使用，因此对于其精确度要求是更高的，需进一步缩短校准周期，每隔 2~3 个月就需要落实一次校准工作。在校准工作落实的过程中需采用标准气体，并保障其气体浓度能够涵盖设备量程的关键节点，如量程的 30%、60% 和 90%，在校准作业开展的过程中需要先将标准气体通入到检测设备当中，然后对比实际浓度和设备显示值，若偏差值超过 5% 则需要对设备参数进行调整校验，然后再次进行检测，直至其偏差数值符合要求。此外，在首次投入设备时也需要对设备进行校准，避免精度偏差。在维护工作落实的过程中需定期做好清理工作，清除设备表面的灰尘杂物，避免防尘滤芯阻塞、电线破损等相应问题。同时还需要在维修工作落实的过程中对报警设备进行检测，若发现异常应及时修理并建立设施设备维护台账，明确设备的安装位置、型号、校准时间，维护内容和故障情况及处理结果，为后续维修保养校准工作的落实和方案的调整提供更多的信息参考<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 加强系统联动

在化工安全生产中单一红外气体检测设备仅仅只能满足报警需求，而想要更好的保障生产安全就需要在报警的同时做出一系列的应急处理，最大化的规避安全事故，而系统联动则可以较好的实现这一目标，可紧抓报警系统、通风及紧急切断系统以及应急疏散和消防系统等相应关键重点来进行系统联动。

在与报警系统联动时，可借助物联网技术、人工智能技术等相应现代化技术来对红外检测设备的气体浓度数据进行自动化分析，若气体浓度数值超过预设阈值系统除了会触发声光警报以外还会将报警信号输送至管理中心的报警平台，精准显示气体泄漏的点位、种类、浓度，并根据浓度数值来确定报警等级。例如一级报警为浓度达到了安全阈值的 50%~82%，二级报警则为浓度达到安全阈值的 80% 以

上。在此基础之上可联动广播系统播放语音提示，明确危险区域，提醒工作人员及时撤离至安全区域。在与通风及紧急切断系统联动时也可借助物联网技术，若气体浓度达到报警阈值则会自动触发指令信息，将车间内部的通风系统开启，加速空气流通，降低气体浓度，避免气体持续上升。若浓度较高例如达到二级报警阈值，则会自动联动紧急切断系统，自动关闭泄漏源对应的阀门，避免气体继续泄漏，从源头上阻断风险<sup>[6]</sup>。

在和应急疏散及消防系统联动时可将红外检测系统的检测数据作为判断依据，若检测数据达到指定阈值或检测数据在短时间内急剧上升，这时则会自动联动应急疏散系统，启动车间应急照明、疏散指示标识，引导工作人员及时撤离至安全区域，并且联动应急门，自动开启应急门，提高输送效率。若气体为可燃气体，还需自动联动消防系统，例如，若检测气体浓度达到爆炸下限则会自动启动消防喷淋系统，降低环境温度，预防爆炸事故。若在化工生产过程中出现火灾等相应问题，也可自动联动消防系统，精准定位火灾区域开启喷淋系统并发送报警信息至相关部门，提高消防处置能力。

### 5 结语

红外气体检测技术在化工生产中有效应用可更好的预测气体泄漏风险，保障人员作业安全，确保生产过程安全，应引起关注和重视，通过合理布设监测点位、科学选型与规范校准维护以及加强系统联动等多种方式保障生产安全。

### 参考文献

- [1] 郭晓杰. 红外气体检测技术在化工安全生产中的运用解析 [J]. 科技资讯, 2025, 23 (11): 183-185.
- [2] 王瑞瑞, 黄天柱. 化工安全生产中红外气体检测技术运用分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (09): 47-49.
- [3] 王克鸿. 基于红外图像和深度学习的危险化工气体泄漏检测技术研究[D]. 合肥大学, 2025.
- [4] 卞广涛, 刘信刚, 李娜. 红外气体检测技术在化工安全生产中的运用探析 [J]. 山西化工, 2023, 43 (06): 186-187.
- [5] 金伟其, 吴月荣, 王霞, 等. 化工园区工业气体泄漏气云红外成像检测技术与国产化装备进展 [J]. 化工学报, 2023, 74 (S1): 32-44.
- [6] 王红亮. 试析红外气体检测技术在化工企业安全生产中的应用 [J]. 化工管理, 2019, (14): 85-86.

# Big Data-Based Chemical Safety Risk Early Warning Model

Zhiren Li

Xinjiang Chemical Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830013, China

## Abstract

With the rapid development of the chemical industry, the issue of safety risk prevention and control has become increasingly critical. Traditional safety management methods are no longer sufficient to address the complex and dynamic environment of chemical production, particularly in terms of accident prevention and emergency response. The big data-based early warning model for chemical safety risks enables the real-time monitoring, analysis, and processing of vast amounts of data generated during chemical production, allowing for the early identification of potential risks and the provision of effective warnings. This model integrates big data technology, machine learning, and data mining methods to achieve accurate risk assessment and prediction by analyzing historical accident data, real-time monitoring data, and external environmental data. As a result, it provides enterprises with decision-making support, improving the efficiency and accuracy of accident prevention. This paper explores the application of big data in chemical safety risk management, analyzes the construction methods of the risk early warning model, and demonstrates its effectiveness through practical case studies.

## Keywords

big data; chemical safety; risk early warning; machine learning; data analysis

# 基于大数据的化工安全风险预警模型

李志仁

新疆化工设计研究院有限责任公司，中国·新疆乌鲁木齐 830013

## 摘要

随着化工行业的快速发展，安全风险防控问题日益严峻。传统的安全管理手段已难以应对复杂多变的化工生产环境，尤其是在事故预防和应急响应中存在诸多挑战。基于大数据的化工安全风险预警模型通过对化工生产过程中产生的大量数据进行实时监控、分析与处理，能够提前识别潜在风险，提供有效的预警信息。该模型结合了大数据技术、机器学习和数据挖掘等方法，通过分析事故发生的历史数据、实时监测数据及外部环境数据，实现对风险的精准评估与预测，从而为企业提供决策支持，提高事故预防的效率和准确性。本文探讨了大数据在化工安全风险管理中的应用，分析了风险预警模型的构建方法，并通过实际案例展示了该模型的应用效果。

## 关键词

大数据；化工安全；风险预警；机器学习；数据分析

## 1 引言

化工行业的特殊性决定了其安全管理面临着较高的风险水平。随着化工设备的不断升级和生产工艺的复杂化，安全事故发生几率也在不断增加。传统的安全管理模式往往依赖人工经验，难以应对日益复杂的风环境。近年来，随着大数据技术的迅速发展，化工企业在生产过程中积累了大量实时数据，为安全风险管理提供了新的机遇。大数据技术能够从海量信息中提取有价值的数据，利用数据挖掘技术对

潜在的安全隐患进行预测，进而实现事故的预防与风险的控制。因此，基于大数据的化工安全风险预警模型应运而生。该模型通过实时数据采集、监控和分析，有效识别并预测潜在的风险，进而为化工企业的安全决策提供依据。本文将详细探讨该模型的构建原理、技术路径及其应用效果。

## 2 化工安全风险预警模型的理论基础

### 2.1 化工安全风险的定义与特征

化工安全风险是指化工生产过程中，由于人为失误、设备故障、原料不当或自然因素等原因，可能导致的事故或灾害的发生概率与后果的综合评估。化工安全风险具有高危性、复杂性、不可预见性和突发性等特征。由于化工行业涉及大量的危险化学品和复杂的生产工艺，任何微小的失误或

**【作者简介】**李志仁（1987-），男，中国甘肃武威人，硕士，副高级工程师，从事化工工艺及生产过程的本质安全及优化设计研究。

突发事件都可能引发严重的事故。因此，化工安全风险的评估不仅需要考虑事故的发生概率，还应重视事故的潜在后果，包括环境污染、人员伤亡及财产损失等。这使得化工安全风险的管理与防控工作复杂而繁重，需要建立科学的评估与预警机制，尽可能减少事故的发生和损失的扩大。

## 2.2 大数据在化工安全中的应用背景

随着信息技术的快速发展，化工行业通过传感器、自动化设备和监控系统收集了大量实时数据，这为化工安全提供了新的解决方案。大数据技术使得从海量数据中提取有价值的信息成为可能，在化工安全管理中得到了广泛应用。大数据不仅能够帮助企业实时监测生产环境中的各种风险因素，还能通过数据挖掘分析潜在的风险模式和趋势，实现安全隐患的预测与预警。通过多源数据的融合分析，大数据技术能够提供更为精确的安全风险评估，为决策者提供实时的风险反馈。大数据在化工安全中的应用不仅提高了风险识别的准确性，还增强了应急响应的能力，有助于提前采取预防措施，降低事故发生的概率<sup>[1]</sup>。

## 3 化工安全风险数据的获取与处理

### 3.1 大数据的来源与类型

化工企业在生产过程中产生的数据来源广泛，包括传感器监测数据、设备运行数据、工艺参数数据、安全检查记录、历史事故数据以及外部环境数据等。传感器和智能仪表可以实时监测温度、压力、气体浓度等关键指标，提供生产环境和设备状态的实时数据。设备管理系统和维护记录则提供了设备故障和维修历史的数据，这对于预测设备故障和识别潜在风险至关重要。此外，化工企业还可以通过采集外部环境数据（如气象数据、市场需求数据等）来进行全局分析和决策。大数据的类型包括结构化数据、半结构化数据和非结构化数据，针对这些不同类型的数据，采用不同的处理方法进行有效分析和挖掘。

### 3.2 数据采集技术与传感器的应用

化工安全风险管理中的数据采集技术主要依赖传感器网络和自动化监控系统。传感器技术可以实时采集生产过程中的各类参数，包括温度、压力、流量、浓度等关键安全指标。常见的传感器有气体泄漏传感器、温度传感器、压力传感器、流量计等，这些传感器能够全天候不间断地提供实时数据。数据采集技术还包括无线传感器网络（WSN）、物联网技术（IoT）以及边缘计算技术，通过这些技术可以实现对现场设备和环境的远程监控与数据采集。此外，数据采集系统的可靠性和实时性直接影响到预警系统的准确性和响应速度，因此需要在设备选择和技术实现上做出科学合理的规划。

## 4 化工安全风险评估与建模

### 4.1 风险评估的关键指标

化工安全风险评估的关键指标包括事故发生概率、事

故后果的严重性、危险源的危害程度、环境影响等。事故发生概率通常通过历史数据分析、专家经验或概率模型来预测。事故后果的严重性则主要由事故发生后的损失程度来衡量，损失包括人员伤亡、财产损失以及环境污染等。危险源的危害程度根据化学品的性质、反应条件以及其在生产过程中的作用来评估。环境影响则包括事故对周围环境造成的影响，如空气、水源和土壤污染等。这些指标通过数据化、量化的方式，能够为化工安全风险评估提供科学依据。

### 4.2 常见的安全风险评估模型

常见的化工安全风险评估模型包括层次分析法（AHP）、模糊综合评判法、故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）等。层次分析法通过对各个风险因素进行权重分配，得出各因素对风险的影响程度。模糊综合评判法则结合模糊数学理论，将不确定性因素纳入考虑，适合用于模糊信息的评估。故障树分析和事件树分析主要用于识别潜在的危险源和分析事故发生的可能性及其后果，通过图形化的方式展现风险的层次和发展路径。不同的评估模型适用于不同的化工安全风险场景，企业可以根据实际情况选择合适的模型。

### 4.3 基于大数据的风险预测模型

基于大数据的风险预测模型主要通过数据挖掘和机器学习算法来实现对化工安全风险的预测。这些模型通过对历史数据、实时监测数据和外部环境数据进行综合分析，识别潜在的风险模式和规律，进而预测事故发生的概率和可能的后果。常用的预测模型包括支持向量机（SVM）、决策树（CART）、神经网络（ANN）等。机器学习算法能够从大量的历史数据中学习并提取特征，通过训练建立一个精确的预测模型。随着数据量的增加，模型的预测精度也不断提高，能够为化工企业提供更为准确的安全预警信息<sup>[2]</sup>。

## 5 化工安全风险预警模型的构建

### 5.1 预警模型的基本框架

化工安全风险预警模型的基本框架由数据采集、数据分析、风险评估、预警通知和应急响应等五个核心模块组成。首先，通过部署传感器和监控系统，收集化工生产过程中的实时数据，包括设备状态、环境因素、原料信息等。其次，利用大数据分析技术对数据进行处理和分析，识别出潜在的风险点和事故隐患。在风险评估环节，通过建立数学模型，评估不同风险因素的可能性及其后果的严重性。然后，基于评估结果生成风险预警信息，及时通知相关管理人员。最后，根据预警信息采取应急响应措施，避免事故的发生或减轻其影响。该模型的构建依赖于先进的数据采集和分析技术，通过全面的信息处理，确保能够提前识别和防范安全隐患，保障化工企业的生产安全。

### 5.2 大数据技术在预警模型中的应用

大数据技术在化工安全风险预警模型中的应用至关重

要。通过集成传感器数据、历史事故数据、环境监测数据等多源信息，大数据技术可以对海量数据进行实时分析和处理，提取出潜在的安全隐患。利用数据挖掘和机器学习算法，模型能够识别出不易察觉的风险模式，并提供及时的预警。例如，通过建立基于大数据的故障诊断模型，可以实时检测设备的运行状态，预判设备是否可能出现故障。大数据分析还可以结合天气、市场需求等外部因素进行综合评估，全面掌握生产过程中的各种风险因素<sup>[3]</sup>。随着数据量的增加，基于大数据的预警模型不断优化，预测精度逐步提高，能够在更短的时间内为化工企业提供精准的安全预警信息。

### 5.3 模型的验证与优化方法

预警模型的验证与优化方法主要通过模拟实验和实际应用两种途径进行。首先，通过历史数据回溯法验证模型的准确性，通过比对模型预测结果与实际事故发生情况，评估其预测效果。其次，利用模拟实验验证模型在不同风险场景下的表现，确保其在各种情况下都能正常运行。此外，模型的优化方法包括引入更精确的数据处理技术，调整算法参数，采用更适应化工生产环境的新技术，如深度学习和神经网络等。不断积累数据、完善模型，逐步提高预警准确性和响应速度。通过持续优化，模型能够在变化的生产环境中保持较高的适应性和预测能力，有效提升化工企业的安全管理水

## 6 化工安全风险预警模型的应用与案例分析

### 6.1 典型化工企业风险预警案例

2017 年，浙江石化集团在其化工生产过程中成功避免了一起重大安全事故。该公司通过部署基于大数据的风险预警模型，结合实时监控系统和数据采集设备，及时发现了生产设备的异常振动信号。经过数据分析，预警系统识别出设备存在潜在爆炸风险。通过对历史数据和实时传感数据，系统准确预测了设备故障的风险点，并通过智能化管理系统提前发出警报。公司管理人员立即采取了停机处理和设备检修措施，成功避免了爆炸事故的发生。这一案例展示了通过科学的风险预警模型，化工企业能够显著提高事故防控能力，有效保障生产安全。

### 6.2 模型应用中的实际效果评估

在浙江石化集团应用该风险预警模型后，事故发生率显著降低，风险识别准确率和响应速度得到显著提升。通过

分析事故数据，预警系统能够在事故发生前超过 30 分钟发出警报，大大减少了设备故障引发的安全隐患。与实施前相比，事故的预警准确率从 70% 提高至 90% 以上，生产安全管理水平有了质的提升。进一步的数据显示，通过该预警模型的使用，浙江石化的事故发生率下降了 40%，且经济损失大幅度减少。通过评估，模型应用极大地增强了企业的安全管理能力，确保了化工生产的顺利进行<sup>[4]</sup>。

### 6.3 模型推广应用的挑战与前景

尽管化工安全风险预警模型在浙江石化集团取得了显著成效，但在进一步推广应用时，仍然面临一些挑战。首先，部分化工企业，尤其是中小型企业，由于资金限制和技术水平差异，无法建立完善的实时数据采集和监控系统，影响了预警模型的实施。其次，数据分析技术的普及和应用仍是瓶颈，许多企业缺乏先进的数据分析平台和专业技术人才，导致模型的应用效果受到限制。此外，安全管理文化的提升仍然是推广的一个障碍，一些企业在接受新技术时存在一定的抗拒心理。随着大数据技术的进一步发展和成本降低，未来大数据驱动的安全预警模型有望广泛应用于化工行业，帮助更多企业实现智能化、安全管理，显著提升行业整体安全水平。

## 7 结语

化工安全风险预警模型的应用，为化工企业的安全管理提供了新的解决方案。通过结合大数据技术、实时数据监控与智能化分析，企业能够更早识别潜在的安全隐患，及时采取应对措施，避免了许多事故的发生。随着技术的不断进步和企业对安全管理认知的不断提升，基于大数据的风险预警模型将在化工行业中发挥越来越重要的作用。未来，随着更多企业的参与和技术的进一步优化，化工安全管理将逐步向智能化、精细化发展，推动行业整体安全水平的提升。

### 参考文献

- [1] 湛继宝.基于大数据与人工智能的化工过程安全风险预警系统研究[J].科技创新与生产力,2025,46(10):121-123.
- [2] 李波.基于大数据驱动的化工安全生产过程管控方法研究[J].化工管理,2025,(22):75-77.
- [3] 李威.江西省化工行业安全生产监管问题及其对策研究[D].导师:熊小刚.江西财经大学,2024.
- [4] 黄建辉.基于文本与视觉双模态结合的化工安全风险识别与分析[D].导师:周智勇.中南大学,2024.

# Practice and Exploration of Quantitative Assessment Management for Safety Production Responsibility System in Chemical Enterprises

Yulian Han<sup>1</sup> Fengxiang Zhao<sup>1</sup> Nenggang Jiang<sup>2</sup> Zhiqiang Cui<sup>3</sup>

1. China Chemical Safety Association, Beijing, 100013, China

2. Shandong Wonfull Petrochemical Group Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255000, China

3. Changyu Holding Group Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255000, China

## Abstract

This paper, in combination with the actual needs of safety production management in chemical enterprises, has thoroughly explored the necessity and specific implementation methods of the quantified assessment management of the safety production responsibility system. By analyzing national laws and regulations as well as advanced practices in chemical management, this paper has constructed a complete framework system for quantified assessment management, covering aspects such as the principles of quantified assessment, list management, implementation procedures, application of results, and information technology construction. The research findings indicate that quantified assessment management can effectively enhance the safety production management level of chemical enterprises, promote the implementation of the safety production responsibility system, and provide a strong guarantee for the inherent safety of the chemical industry.

## Keywords

Safety Production Responsibility System; Quantitative Assessment; Chemical Process Safety; Management Practice

# 化工企业安全生产责任制量化考核管理的实践与探索

韩玉莲<sup>1</sup> 赵凤翔<sup>1</sup> 姜能刚<sup>2</sup> 崔志强<sup>3</sup>

1. 中国化学品安全协会, 中国·北京 100013

2. 山东汇丰石化集团有限公司, 中国·山东 淄博 256410

3. 长裕控股集团股份有限公司, 中国·山东 淄博 255000

## 摘要

本文结合化工企业安全生产管理的实际需求,深入探讨了安全生产责任制量化考核管理的必要性和具体实施方法。通过分析国家法律法规及化工管理的先进实践,本文构建了一套完整的量化考核管理框架体系,涵盖量化考核的原则、清单管理、实施流程、结果应用及信息化建设等方面。研究结果表明,量化考核管理能够有效提升化工企业安全生产管理水平,促进安全生产责任制的落实,为化工行业的本质安全提供有力保障。

## 关键词

安全生产责任制; 量化考核; 化工过程安全; 管理实践

## 1 引言

化工行业生产过程复杂,涉及多种危险化学品和高危工艺,安全生产风险较高。落实安全生产责任制是预防事故、保障生产安全的关键。然而,传统的安全生产责任制管理多为定性描述,缺乏具体的量化指标和考核标准,导致责任落实不到位、考核流于形式。因此,探索一种科学、有效的安全生产责任制量化考核管理模式,使责任考核更具操作性和针对性,对于提升化工企业安全生产水平具有重要的现实意

义。本文结合国家法律法规及化工管理先进实践,从基本原则、量化清单管理、考核实施、结果应用及信息化建设等方面展开探讨,为化工企业安全生产管理提供参考。

## 2 基本原则

全员安全生产责任制量化考核应坚持以人为本、预防为主的原则,倡导全员参与、持续改进的理念,实施强化管理考核、严格落实奖惩的措施。

a) 科学性: 全员安全生产责任制量化考核机制应严格遵守国家相关法律法规和标准,充分考虑企业安全生产的特点、实际需求、风险因素以及行业发展趋势,保证量化考核指标设定的合规性和科学性;

**【作者简介】**韩玉莲(1983-),女,中国山东淄博人,本科,高级工程师,从事化工过程安全管理研究。

- b) 全面性：全员安全生产责任制量化考核应全员覆盖；
- c) 客观性：全员安全生产责任制量化考核应基于客观数据和事实，确保考核结果客观准确；
- d) 可操作性：全员安全生产责任制量化考核方法应当简明扼要、清晰明确，易于理解和应用，适用性强，为企业实际操作提供指导。企业一线从业人员的安全生产责任制，要力求通俗易懂；
- e) 可持续性：全员安全生产责任制量化考核适应安全管理体系的变化和发展，保证其持续有效运行。

### 3 全员安全生产责任制量化考核管理<sup>[3]</sup>

- a) 企业应成立全员安全生产责任制量化考核工作小组，由企业主要负责人牵头，企业高层管理人员、各职能部门、各车间（工段）负责人、基层员工代表、工会代表等参与，共同编制全员安全生产责任制量化考核条款。
- b) 全员安全生产责任制量化考核应覆盖本企业所有组织和岗位，企业应按照“管业务必须管安全，管生产必须管安全”的原则，根据岗位的性质、特点、具体工作内容，明确从主要负责人到基层岗位从业人员（含劳务派遣人员、实习生等）的安全生产职责量化考核内容，做到“一岗一责一考核”。
- c) 企业应根据本单位的业务职责分工制定单位及个人岗位安全生产职责，要充分考虑岗位和业务活动中存在的风险，与日常工作内容密切结合，编制全员安全生产责任制量化考核具体内容。
- d) 全员安全生产责任制量化考核内容应涵盖企业管理规章制度中的安全生产职责，安全生产职责内容可参考《附件 1 各层级安全生产责任制》，相关责任制内容应参考以下国家相关法律法规编制（1.《中华人民共和国安全生产法》（2021 年修正）；2.《国务院安委会办公室关于全面加强企业全员安全生产责任制工作的通知》（安委办〔2017〕29 号）<sup>[1]</sup>；3.《化工过程安全管理导则》（AQ/T 3034-2022）等）。
- e) 企业全员安全生产责任制量化考核内容应经主要负责人审定、批准，发布实施<sup>[2]</sup>。
- f) 企业内部应建立全员安全生产责任制量化考核管理制度，内容包括全员安全生产责任制量化考核的编制、审定、批准、发布、考核标准等<sup>[2]</sup>。
- g) 全员安全生产责任制量化考核应根据责任制内容建立考核清单，并根据企业实际实施情况及时修订。

### 4 全员安全生产责任制量化考核清单管理

- a) 量化考核清单应根据部门及岗位的安全生产责任制条款逐条分解、量化具体的工作任务，形成部门及岗位的安全生产责任履职内容的量化考核清单<sup>[6]</sup>。
- b) 量化考核清单内容和规章制度中的安全管理内容协同一致，充分融合管理制度中的职责分工、具体要求、工作任务、工作成果，部门量化考核清单可融入部门组织绩

效考评，需要将责任制内容提取过程量化考核指标，部门量化考核清单内容可参考《附件 3 部门安全生产责任制量化考核清单》；岗位量化考核清单内容可融入个人安全行动计划和日常工作任务，岗位量化考核清单内容可参考《附件 2 各层级岗位安全生产责任制量化考核清单》。

- c) 可采用 RACI 方法量化（责任分配矩阵）安全生产责任制清单，根据管理制度和日常固定工作梳理出工作任务清单，然后按照 RACI 方法量化梳理职责分工<sup>[4]</sup>。

## 5 全员安全生产责任制量化考核实施

### 5.1 量化考核流程<sup>[4]</sup>

企业应根据本单位的组织架构合理设置量化考核流程，融入组织及个人岗位绩效考核，单位量化考核建议根据提取的量化指标融入组织绩效进行考核，个人绩效考核需要包含自我评价及上级评价，企业应设立相关监督追溯机制，确保考核的公平、公正，同时应公开各层级安全生产责任的量化考核结果。

安全生产责任制量化考核流程框图见附件 5。

### 5.2 量化考核范围

量化考核范围应从最高管理层到基层员工（含劳务派遣人员、实习学生等），全员参与安全生产责任制量化考核工作。

### 5.3 量化考核周期

责任制量化考核周期建议每月一次，最低要求每季度一次。

### 5.4 量化考核方法

量化考核指标的选择、权重分配和评价标准的制定要科学合理，既要与安全生产目标和责任制度相符，又要具有可操作性和有效性，从而能够客观准确地评估责任主体的履职情况。

安全生产责任制量化考核方法：指标核查、现场观察、随机抽查、综合评定、直接判定等。

- a) 指标核查：通过量化指标核算来验证考核指标完成情况；
- b) 现场观察：现场观察包括但不限于员工安全行为情况、生产设备设施运行状况、安全设施的设置、使用和维护情况及工作环境情况等；
- c) 随机抽查：适用于现场询问方式的，宜按照简单随机抽样方式，验证安全责任制履职情况；
- d) 直接判定：当发生生产安全事故的，根据责任制定直接判定。

## 6 全员安全生产责任制量化考核结果应用<sup>[5]</sup>

全员安全生产责任制量化考核的结果应该作为各级安全生产职责履责的重要依据，要落实到企业的奖惩体系中，做到奖优罚劣，成为各层级主动全面落实安全责任的推动力，激发积极践行安全生产责任的内生动力，提高全员参

与安全生产工作的积极性和主动性，形成“安全事项有人负责、量化标准有章可循、安全考核有据可查”的管理机制。

## 7 全员安全生产责任制量化考核信息化建设

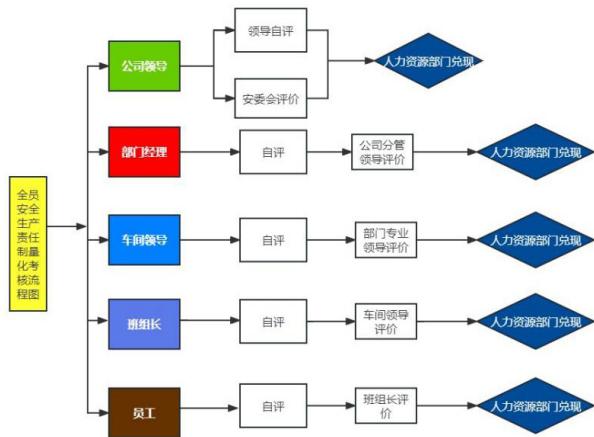
企业宜将全员安全生产责任制量化考核纳入信息化建设，融入现有的安全生产信息系统中，直观、有效地完成各层级的考核，方便考核数据的统计分析，持续改进企业全员安全生产责任制量化考核管理。通过信息化手段，可以实现考核过程的透明化、考核结果的可视化，提高考核效率和管理水平。

化工企业安全生产责任制量化考核管理是提升企业安全生产管理水平的有效手段。通过科学制定量化考核指标、完善考核流程、强化结果应用和信息化建设，能够有效推动安全生产责任制的落实，减少安全生产事故的发生。然而，量化考核管理的实施并非一蹴而就，需要企业不断探索和改进，以适应不断变化的安全生产需求。未来，随着技术的进步和管理理念的更新，量化考核管理将在化工企业安全生产管理中发挥更为重要的作用，助力化工行业实现本质安全。

### 参考文献

- [1] 安委办〔2017〕29号《国务院安委会办公室关于全面加强企业全员安全生产责任制工作的通知》
- [2] 《生产经营单位主要负责人安全管理职责履职评估规范》DB50/T1217-2022（重庆市地方标准）
- [3] 梁清. 集团型企业全员安全生产责任制构建[J]. 中铁宝桥集团有限公司, 2023.
- [4] 尹辉, 王敏. 落实安全生产责任制的痛与思[J]. 2021.
- [5] 司恭. 企业全员安全生产责任制问题与对策[J]. 河南省应急管理科学技术研究院, 2024.
- [6] 翟文. 关于企业全员安全生产责任制建立与落实的思考[J]. 国家能源集团战略规划部, 2023.

### 附件 1. 安全生产责任制量化考核流程框图



### 附件 2. “两制融合”良好实践

岗位安全生产责任制是岗位职责重要的一部分，建议将安全生产责任制和岗位职责进行融合。

#### C.1 企业“两制融合”实践工作方法参考：

第一步：《HSE管理体系手册》参照法律法规要求编制；

第二步：《部门职能汇编》与《HSE管理体系手册》融合；

第三步：《安全生产责任制》部门安全职责和《部门职能汇编》部门职责融合；

第四步：《安全生产责任制》岗位安全职责和《个人岗位说明书》岗位职责融合。

#### C.2 “两制融合”最终目标：

建议协同一致的目标管理体系；

建立协同一致的责任体系；

建立协同一致的管理制度体系；

建立协同一致的安全绩效考核体系。

### 附件 3. 安全生产责任制量化考核方法良好实践

D.1：安全生产责任制量化清单考核表分数与个人安全绩效结合，例如某公司绩效模式是一—高层正职。高层副职。中层正职为组织绩效；中层副职。技术组长。技术员。科员。班长为 KPI 绩效，基层操作工为行为绩效考核（月度形成考核事实记录反馈表），将安全生产责任制量化清单考核表项目纳入个人绩效考核项目。

D.2：某公司采用设立安全奖专项奖金的方式落实安全生产责任制考核，将安全生产责任制量化考核标准纳入作为安全奖考核标准，将安全生产责任制量化清单考核表分数与个人安全奖结合。

D.3：采用绝对扣分制，例如某公司日常通报系统中考核金额折算考核分数，初始分为 100 分，考核项金额每 100 元扣 1 分，考核到单位的必须分解到个人，考核表中无需列明“权重”和“考核要求及评分”。

D.4：安全生产责任制考核可以通过过程考核和结果考核两种方式结合实现，某公司采用安全生产责任制考核对照清单的方式进行，将责任制条款和任务清单。管理制度。绩效指标。个人安全奖设置对应和关联，完成《岗位安全生产责任制考核对照清单》，以上都是安全生产责任制考核的一部分，通过任务管理系统。通报系统。个人绩效指标。个人安全奖实现过程考核及结果考核，日常考核项汇总。个人绩效考核。安全积分考核是安全生产责任制考核结果的体现，是责任制考核有力的证据，无需单独进行月度安全生产责任制考核。

# Application of high-efficiency and energy-saving equipment in industrial production and carbon emission control

Lin Zhang

Xinjiang Jiayuan Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

As the process of industrialization continues to advance, issues related to energy consumption and carbon emissions have increasingly become the focal point of global attention. High-efficiency energy-saving equipment, as a key tool for achieving energy conservation and emission reduction, is widely applied in various industrial productions to optimize energy use, reduce production costs, and enhance the market competitiveness of enterprises. This paper analyzes the core technologies of high-efficiency energy-saving equipment, its development trends, and its applications in different industrial fields, exploring its critical role in improving production efficiency and reducing carbon emissions. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for the further application of high-efficiency energy-saving equipment in industrial production.

## Keywords

High-efficiency energy-saving equipment; Industrial production; Carbon emission control; Technological innovation; Economic benefits

# 高效节能设备在工业生产中的应用及碳排放控制

张林

新疆佳远节能环保科技有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

随着工业化进程的不断推进，能源消耗与碳排放问题日益成为全球关注的焦点。高效节能设备作为实现节能减排的重要工具，广泛应用于各类工业生产中，以优化能源利用，降低生产成本，提升企业的市场竞争力。本文通过分析高效节能设备的核心技术、发展趋势及其在不同工业领域的应用，探讨其对提升生产效率和降低碳排放的关键作用，旨在为高效节能设备在工业生产中的进一步应用提供理论支持与实践指导。

## 关键词

高效节能设备；工业生产；碳排放控制；技术创新；经济效益

## 1 引言

全球气候变化与资源短缺问题日益严峻，工业生产的能源消耗和碳排放已经成为亟待解决的关键问题。为了应对这一挑战，推动绿色转型，工业领域的高效节能设备逐渐成为提升生产效率、减少资源浪费和降低碳排放的核心技术。高效节能设备不仅帮助企业降低了能源消耗，还促进了绿色发展目标的实现。近年来，随着节能技术的不断创新与发展，越来越多的行业开始采用高效节能设备，以期实现更加可持续的生产模式。

## 2 高效节能设备在工业生产中的重要性

### 2.1 节能设备的定义与分类

节能设备是指能够在保持或提高生产效率的前提下，

有效降低能源消耗的设备。这些设备通过采用先进的技术或创新设计，在优化能源使用的同时，降低环境负担。节能设备通常分为机械类、热能类、电子类和水处理类等，每类设备通过不同的工作原理实现节能目的。机械类节能设备如高效电动机和压缩机，能够减少机械能转化过程中的损耗；热能类节能设备通过改进热交换效率或利用废热进行能量回收，最大限度地减少能源浪费；电子类节能设备则通过智能化控制和优化运行方式，进一步提高能源使用的效率。随着环保要求的提高，节能设备的技术日新月异，不仅关注能效比，还涵盖了减少碳排放、提高系统稳定性等多个方面。

### 2.2 高效节能设备在工业生产中的应用领域

高效节能设备在多个工业领域中得到广泛应用。在冶金、化工、机械制造等传统行业中，节能设备通过优化生产流程、提升生产效率显著降低能源消耗。例如，在冶金行业，高效炉窑和热回收系统能够减少能源浪费，提高热能利用率。在石化行业，使用高效的热交换器和压缩机能够降低设备的能耗，提高工艺的稳定性。在纺织、食品加工等轻工行

【作者简介】张林（1990—），男，中国河南太康人，本科，工程师，从事工业节能研究。

业，智能化节能设备通过自动化控制和实时监测，优化生产周期和操作参数，从而达到节能减排的目的。随着绿色制造理念的推广，越来越多的新兴行业如电子产品、环保设备等领域也开始引入节能设备，通过先进的技术和创新的管理模式，进一步提高资源使用效率，推动产业向低碳、绿色发展转型<sup>[1]</sup>。

### 2.3 节能设备对提升生产效率的作用

节能设备不仅能够有效降低能源消耗，还能显著提升生产效率。在许多工业生产过程中，能源的浪费往往源于设备的低效运行和不合理的管理。通过引入高效节能设备，可以减少能源消耗的同时，避免由于设备故障和能量损失而带来的生产停滞。例如，在机械制造领域，采用高效电动机和自动化生产线能够减少人员干预，提高生产的稳定性与连续性；在冶金行业，改进炉窑设计和优化热回收系统可以提高原料的利用率，缩短生产周期；在化工行业，精密控制系统和节能型泵类设备能够减少能源消耗的同时提高反应速率和产品质量。通过优化工艺流程和智能化控制，高效节能设备不仅提升了生产效率，还为企业提供了更为可持续的竞争优势。

## 3 高效节能设备的技术特点与优势

### 3.1 节能设备的核心技术原理

节能设备的核心技术原理主要集中在能效提升与损耗降低两个方面。首先，通过优化能源转化效率来减少能量浪费，例如通过采用高效电机、热交换器和变频控制器等设备，实现能源的高效转换与利用；其次，通过精确的能量回收系统，将生产过程中的废热、废气等资源化利用。例如，热回收锅炉、余热回收装置等将废热转化为可再利用的能源，显著提高了能源的使用效率。在机械类节能设备中，采用新型材料与先进的设计理念，使设备的摩擦损失、热损失和噪音损失等降低，进而提高整体能效。热能类节能设备则通过高效热交换技术，减少能源在传递过程中出现的损失，确保热能的最大化利用。最终，节能设备的核心技术使得工业生产过程中的能源损耗最小化，为企业带来可观的节能效益。

### 3.2 高效节能设备的技术创新与发展趋势

随着能源价格的上涨和环境保护压力的增大，高效节能设备的技术创新日益加速。当前，节能设备的创新主要体现在智能化和高效化两个方面。智能化技术通过引入物联网、人工智能等现代信息技术，使设备能够实时监测和调节工作状态，实现最优能效。例如，智能电网系统能够根据负荷变化自动调节能源分配，降低能源消耗；智能工控系统通过实时数据反馈，自动调整生产参数，确保设备在最佳工作状态下运行。此外，随着新材料的不断应用，节能设备的能效比得到了大幅提升。高效光伏材料、热电转换材料等新型材料的出现，使得设备的能源利用效率更高，且设备寿命得到延长。未来，节能设备的发展趋势将更加注重多领域的融

合创新，推动能源、环境、经济效益的统一提升。

### 3.3 节能设备在工业流程优化中的应用效果

节能设备在工业流程优化中的应用效果非常显著。通过引入先进的节能技术，可以优化整个生产链条，从原料供应、生产加工、到成品输出的各个环节，减少能源浪费，提高整体生产效率。在冶金行业，通过高效炉窑和智能化调控系统，能够实时调节炉温和炉气流向，从而实现对能源的精确控制，降低能耗的同时保证生产质量。在化工领域，节能设备的应用则通过优化反应釜、管道热交换器等设备的运行模式，减少能量损失，保证反应速率的提高和产品质量的稳定。在食品、纺织等行业，智能化管理系统能够实时分析生产过程中的能源使用情况，根据需求合理调配能源，避免能源的过度消耗。整体而言，节能设备的引入不仅提升了生产过程中的能效，还促进了企业生产的自动化和智能化，帮助企业实现节能减排的目标，推动绿色制造的发展<sup>[2]</sup>。

## 4 高效节能设备的经济效益分析

### 4.1 节能设备的投资回报周期

高效节能设备的投资回报周期主要受到设备采购成本、运行维护成本及节能效果的影响。以某工业企业为例，投资一台高效节能压缩机的初期投资约为 150 万元，而该设备的年节能效果为节省电费 40 万元。设备的维护成本相对较低，每年约为 5 万元。根据这些数据，该设备的年净节省费用为 35 万元。按照这一节省额度，设备的投资回报周期为约 4.3 年。在此过程中，随着能源价格的不断上涨，设备的回报周期可能进一步缩短。因此，尽管初期投入较大，但节能设备能够有效缩短回收周期，提升企业的财务效益。

### 4.2 节能设备对生产成本的影响

引入高效节能设备后，企业生产成本通常会发生显著变化。例如，在一个制造型企业中，传统生产设备的电力消耗占总生产成本的 30%，而通过使用高效节能设备，如高效电动机和智能温控系统，电力消耗可减少 20%。假设该企业年生产成本为 5000 万元，电力消耗的节约将约为 300 万元。此外，节能设备的使用可以减少设备故障率，降低维修成本，每年可以节省约 50 万元。由此可见，节能设备不仅能降低直接的能源消耗成本，还能通过提升设备运行的可靠性，降低设备的运营和维护成本，从而对整体生产成本产生积极影响。

### 4.3 节能设备对企业竞争力的提升作用

高效节能设备在提升企业竞争力方面具有显著作用。通过优化资源使用，减少能源消耗，企业能够降低生产成本，提高生产效率，进而提升产品的市场竞争力。例如，某电子制造公司引入高效节能设备后，产品生产周期缩短了 10%，能耗降低了 15%，使得公司在市场上的产品定价更具竞争力，利润空间增加。同时，由于节能设备的引入，企业在环保方面的表现也得到了显著改善，这在环境保护要求日

益严格的背景下，能够提升企业的社会形象，增强其品牌竞争力。随着市场对环保和可持续发展的需求不断增加，采用高效节能设备的企业将拥有更多的市场机会，进一步巩固其在行业中的领先地位<sup>[3]</sup>。

## 5 碳排放控制的技术手段与策略

### 5.1 碳排放控制的基本概念与方法

碳排放控制是通过采用一系列技术手段和管理策略，减少二氧化碳的排放，以应对气候变化和减少温室气体效应的过程。控制碳排放的基本方法包括优化能源结构、提高能源效率和碳捕捉与封存。首先，通过改进能源使用效率，减少能源的浪费，直接降低二氧化碳排放。例如，采用高效节能设备、推广绿色能源等措施都能在源头上减少碳排放。其次，推动低碳能源的替代，如使用风能、太阳能等可再生能源替代传统的化石能源，能够有效降低生产过程中二氧化碳的排放。最后，碳捕捉与封存技术（CCS）则通过捕捉二氧化碳并将其储存至地下或其他适宜的储存空间，从而避免二氧化碳进入大气中。这些方法相互补充，共同构成了有效的碳排放控制体系。

### 5.2 高效节能设备在碳排放控制中的作用

高效节能设备在碳排放控制中发挥着重要作用。通过提高能源使用效率，减少能源浪费，能够有效降低碳排放。例如，采用高效锅炉、变频驱动和热回收系统等节能设备，可直接减少能源消耗和二氧化碳排放。以某钢铁厂为例，改造后的高效炉窑和回收系统使得其能源利用率提高了15%，从而实现了年碳排放减少2万吨。此外，智能控制系统通过实时监测和优化生产过程，进一步降低了能源消耗和碳排放。在工业生产中，节能设备的引入不仅减少了生产中的能源消耗，还通过优化生产过程，降低了能源使用中的碳排放，为企业实现碳中和目标提供了技术支持。

### 5.3 工业领域碳排放控制的技术路径与实施方案

工业领域碳排放控制的技术路径主要包括提高能效、替代传统能源、以及碳捕捉与储存技术的应用。首先，通过高效节能设备的应用提高能源利用效率，例如，工业企业可以通过安装高效电动机、变频控制系统、以及废热回收装置等设备，减少能源浪费，降低碳排放。其次，替代传统能源

是碳排放控制的关键路径之一，通过加大可再生能源的使用比例，降低对化石能源的依赖。在具体实施过程中，政府应出台相关政策，提供资金补贴和税收优惠，促进企业转型。最后，碳捕捉与储存技术（CCS）的实施为大规模工业排放提供了有效的应对措施。通过建设碳捕捉设施，捕获工业排放的二氧化碳，并将其安全封存，避免其释放到大气中<sup>[4]</sup>。实施这些技术路径不仅有助于企业减排，也能促进产业的绿色转型，实现低碳发展。

## 6 结语

高效节能设备在工业生产中的应用，不仅能够显著提高能源利用效率，降低生产成本，还在实现碳排放控制和推动绿色发展方面起到了至关重要的作用。通过引入先进的节能技术，企业不仅能够在激烈的市场竞争中占据优势，还能在环保法规日益严格的背景下，提升社会形象与品牌价值。随着节能设备技术的不断创新和应用，未来将在更多行业中发挥更大的潜力，推动实现低碳经济和可持续发展的目标。政府、企业及科研机构应携手合作，加大技术研发和政策支持，推动节能减排工作向更深层次发展。面对全球气候变化的挑战，只有通过广泛应用高效节能设备和技术，才能有效降低碳排放，促进经济与环境的协调发展，为未来可持续发展奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] 韦倩.绿色化学工程与工艺在化学工业节能减排中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(16):109-112.
- [2] 柴钰庚,何俊平,李志德,赵鹏亮,魏相臣,赵龙俊.绿色制造视角下冶金设备节能减排技术路径探讨[J].机械研究与应用,2025,38(02):183-186.
- [3] 郭鸿飞.石油化工生产中的节能降耗策略分析[J].大众标准化,2021,(18):258-260.
- [4] 张君,晁春雷,杨红娟,候永超,杨建,陈雪梅,王勇勤,孙慧平,李卫东,薛菲菲,黄胜,丁建文,王军,付永涛,陈永甲.中国重型机械研究院股份公司,中铝萨帕特种铝材(重庆)有限公司;上海电气上重碾磨特装设备有限公司;重庆大学.120 MN工业铝材高效节能挤压装备关键技术与应用[Z].项目立项编号:2011ZX04016-081.鉴定单位:陕西省机械工程学会.鉴定日期:2018-02-07.

# Research on Optimization Operation of Steam Pipeline Network in Petrochemical Production Plant

Xiaoying Liu

Xinjiang Wuyun Songhuan Energy Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

Petrochemical production units rely heavily on steam energy within continuous and high-load process systems, and the operational efficiency of steam pipe networks, as a core power-supply system, directly affects energy consumption levels and production stability. The industry is currently confronted with issues such as steam pressure fluctuations, high transmission losses, and insufficient load matching, which continuously increase overall operating costs and disrupt the stable continuity of process flows. By establishing steam demand characteristic models, analyzing the structural features of steam networks, and identifying operational bottlenecks, a solid foundation can be laid for formulating optimized operational strategies. This study aims to enhance steam transmission efficiency, reduce operating energy consumption, and strengthen system safety, thereby providing technical support for refined energy management in petrochemical production units.

## Keywords

steam pipe network; petrochemical production unit; energy optimization; transmission efficiency; operational control

# 石化生产装置蒸汽管网优化运行研究

刘晓英

新疆五韵松环能科技有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

石化生产装置在连续化、高负荷的工艺体系中对蒸汽能源的依赖度较高，蒸汽管网作为动力保障系统，其运行效率直接关系到装置能耗水平与生产稳定性。当前行业普遍面临蒸汽压力波动、输配损失偏高、负荷匹配度不足等问题，使管网的整体运行成本持续增加，并影响工艺流程的连续稳定运行。通过构建蒸汽需求特性模型、分析蒸汽管网的结构特征、识别运行瓶颈，可为优化运行策略奠定基础。本文旨在提升蒸汽输配效率、降低运行能耗、增强系统安全性，为石化生产装置能效精细化管理提供技术支撑。

## 关键词

蒸汽管网；石化生产装置；能源优化；输配效率；运行控制

## 1 引言

石化企业生产过程依赖高品质蒸汽作为核心动力介质，蒸汽在加热、蒸馏、换热及设备驱动等环节发挥关键作用，蒸汽管网的运行水平决定着装置的能源利用效率与安全稳定性。随着生产装置规模扩大与能源成本上升，蒸汽管网的不合理运行导致能耗增加、压力不稳与热损失偏高的问题愈加明显，传统粗放式管理模式已难以满足现代化石化企业的运行需求。为实现蒸汽系统的高效配置，需要结合装置蒸汽需求特性、管网结构特点与运行负荷变化，构建系统化的优化路径。本文围绕蒸汽管网运行特征、主要矛盾及其优化策略展开研究，以期为石化企业提升管网运行效率和生产保障能力提供可操作性的思路与方法。

**【作者简介】**刘晓英（1988—），女，中国陕西榆林人，本科，工程师，从事工业生产过程中的节能减排技术研究。

## 2 石化企业蒸汽管网的系统构成与运行特征

### 2.1 蒸汽供应体系结构及主要设备构成

石化企业蒸汽供应体系依托锅炉群、余热利用装置和压力调节设施形成分层供汽结构，通过主干管、分配管、调压阀门和疏水系统实现各生产区域的蒸汽输送与品质保持。锅炉系统承担基础供汽任务，余热蒸汽来自加热炉、压缩机和换热装置的能量回收环节，形成多源并行的供汽格局。蒸汽管网结构需兼顾长距离输送与多节点分配需求，通过设置稳压器、减温减压装置和凝结水回收设备保持蒸汽压力和温度在适宜范围内。系统运行依赖管网材料、阀门密封性以及疏水装置的灵敏性，通过完善的监测点布局实现压力、流量及温度状态的持续掌握，以满足连续化工艺对蒸汽稳定供应的要求。

### 2.2 蒸汽管网的运行负荷特点与能耗特征

蒸汽管网的运行负荷呈现阶段性波动特点，与各生产

装置的开停工周期和物料处理节奏密切相关，负荷高峰往往集中在蒸馏、裂解及压缩工段的高能耗作业时段。蒸汽输配过程受管径、管道长度、保温状况和阀门开度影响，产生的压力损失和热损失构成能耗的重要部分。蒸汽在输送过程中因温度下降导致相态变化，引发凝结水比例增大，从而增加疏水负担并降低有效蒸汽量，提升锅炉补充量和燃料消耗。负荷不均会造成压力波动，使部分装置出现供汽偏差，进一步加剧能源消耗。能耗特征表现为锅炉燃料消耗、蒸汽输送损失与凝结水回收率的变化，通过运行参数与监测数据分析可识别关键能耗点，为优化运行提供依据<sup>[1]</sup>。

### 3 石化生产装置蒸汽需求特性分析

#### 3.1 典型生产装置蒸汽用量特征与负荷波动

典型石化装置如蒸馏、裂解、加氢和再生系统在运行中对蒸汽具有显著的阶段性需求，蒸汽用量受到物料性质、加热方式与装置规模的影响。蒸馏塔再沸器通常需要稳定的蒸汽压力和温度，其用量随塔内热负荷变化而波动。裂解和再生工段的加热需求更具冲击性，使蒸汽负荷出现短时峰值。装置开工和切换工况会造成蒸汽需求的大幅变化，影响管网的瞬时压力与流量分布。负荷波动在日常运行中表现为周期性、突发性和联动性，使蒸汽管网需具备一定调节能力以适应压力变化。通过识别典型装置的用汽模式和负荷曲线，可为蒸汽供需平衡与运行策略调整提供支撑。

#### 3.2 蒸汽需求与工艺流程耦合关系

蒸汽在生产流程中承担加热、蒸馏、驱动和保温等多项功能，其需求量随工艺流程的物料流动、热交换环节和反应条件变化而改变。加热器需要恒定蒸汽量维持所需温度，以促进物料预热与反应速率控制；蒸馏塔再沸器蒸汽需求与塔内气液平衡紧密相关；压缩机驱动蒸汽量受负荷变化影响；物料管线保温蒸汽则与环境温度和输送长度相关。若工艺流程变化未能及时反映在蒸汽调配中，会导致压力偏差并影响装置运行稳定性。蒸汽需求与工艺耦合的程度决定了管网调控的响应速度与精准度，通过将工艺参数与蒸汽参数协同分析，可提升供汽匹配度，降低能源损耗，提高系统运行可靠性。

### 4 石化生产装置蒸汽管网运行中的问题诊断

#### 4.1 蒸汽管网压力波动问题与成因分析

蒸汽管网压力波动表现为局部或整体压力偏差，源于供汽量不足、需求突增、调压阀响应滞后、管道阻力变化以及疏水系统不畅等因素。负荷波动使主干线流量变化较大，若供汽侧未及时调节，容易导致压力在短时间内出现下降或冲高。管道内部结垢、保温老化和弯头过多会增加流动阻力，使压力分布呈现不均状态。部分装置开启或关闭加热设备时引起瞬时用汽变化，导致压力波动加剧。若减温减压装置控制不稳定，会进一步放大压力偏差<sup>[2]</sup>。压力波动影响装置温度控制和产品稳定性，是蒸汽管网优化运行中的重要诊断内容。

#### 4.2 蒸汽输送过程热损失与泄漏风险识别

蒸汽在输送过程中与环境存在持续热交换，保温层老化、破损和管线裸露会使热损失增加，造成蒸汽温度逐渐下降并加剧凝结水生成。凝结水占比上升会影响有效蒸汽供应量，增加疏水器负荷并导致换热效率下降。蒸汽泄漏常发生在法兰、阀门、焊缝和疏水器部位，受材料老化、腐蚀和密封失效影响，泄漏不仅造成蒸汽损失，还会导致能耗增加和安全隐患扩大。热损失与泄漏状态可通过温度巡检、压力监测、红外测温和凝结水回收数据判断。对输送过程的损失环节进行识别和量化是提升蒸汽系统整体效率的重要前提。

#### 4.3 蒸汽调度不合理导致的能耗偏高问题

蒸汽调度不合理表现为供汽分配滞后、锅炉负荷调整频繁、余热蒸汽未被充分利用、局部管段压力控制偏离需求。调度未能基于实时负荷分布进行精细化调控，会导致锅炉超负荷运行或长时间低负荷运行，从而增加燃料消耗。余热蒸汽回收调度不到位，会使可利用的蒸汽资源被浪费并加重供汽系统负担。部分区域由于调度分配不均出现高压蒸汽溢流，使能量以不可逆方式损失。调度节奏与工艺需求不同步时，会使装置蒸汽供应不足或过剩，引发能耗上升与系统稳定性下降。通过改进调度策略和运行模式可有效降低蒸汽系统能耗。

### 5 石化生产装置蒸汽管网优化运行技术路径

#### 5.1 蒸汽压力与流量调控的优化策略

蒸汽压力与流量调控需在供需匹配、动态调节和稳定控制之间实现平衡，通过完善调压设备响应能力、提升阀门动作灵敏度和优化主干线分配结构，使压力与流量在各节点保持合理区间。调控策略依托实时运行参数，通过压力分区管理减少局部波动，利用多点监测实现流量分布的动态修正。调节装置的参数整定应结合不同装置的蒸汽需求特性，使调压阀和减温减压系统保持平稳运行。通过合理设置备用调节单元和调整输配路径，可在需求突变时维持系统稳定，减少压力偏差造成的工艺影响。结合凝结水回收量与锅炉供汽量的协调控制，可使管网整体压力场保持均衡，提高蒸汽品质与供给可靠性<sup>[3]</sup>。

#### 5.2 蒸汽输配系统节能技术的应用路径

节能技术的应用集中在降低输送损耗、提升保温效果和优化输配工况，通过更换高效保温材料、改善管道外护结构和减少裸露管段，可有效降低热损失。输配路径优化可减少弯头、缩短不必要的输送距离，并利用低阻力阀门减少流动阻力。疏水系统的优化通过高灵敏度疏水器的配置与定期校验，使凝结水能够及时排出，减少汽水混合对输送效率的影响。节能型调节阀、稳压器和流量测量装置的应用可降低能耗偏差，提高输配设备的匹配效率。提高凝结水回收率可降低锅炉补水量和蒸汽再生成耗，使节能路径贯穿输配全过程，推动整体管网运行向低能耗方向发展。

### 5.3 蒸汽余热回收与再利用系统的优化措施

余热回收系统的优化以提高余热蒸汽的回收量和稳定性为核心，通过对加热炉、压缩机和反应器的排放热源进行梳理，可构建余热蒸汽稳定来源。换热器效率提升有助于提高余热蒸汽品质，使其能够作为稳定热源补充管网供汽。余热再利用需要配置合适的减温减压装置，使回收蒸汽与主蒸汽系统顺利衔接，避免压力冲击与品质波动。优化措施还包括余热蒸汽分级利用，将高品质蒸汽用于核心加热设备，将低品质蒸汽用于保温和驱动环节，实现梯级利用模式。通过调整余热回收系统与锅炉系统的供汽比例，可降低燃料消耗并改善供汽稳定性，使余热利用在整体能源管理中发挥更高价值。

## 6 石化生产装置蒸汽管网优化运行的保障机制

### 6.1 蒸汽管网运行监测与数据集成平台建设

监测与数据集成平台通过布设压力、流量、温度及凝结水监测点，实现运行状态的实时采集，为运行调整提供数据基础。平台整合锅炉、输配管线、疏水系统与蒸汽终端用量信息，构建多源数据的集中展示界面，并可对异常波动进行实时预警。通过多参数关联分析技术识别压力偏差、热损失增大及调节滞后等问题，为运行优化提供判断依据。历史数据的趋势分析可反映管网运行规律，为调度策略与设备维护计划的制定提供参考。数据平台的建设有助于实现管网状态的透明化管理，使运行人员能够基于实时信息进行快速决策，进一步提升蒸汽系统的稳定性与经济性。

### 6.2 优化运行的制度化管理与责任体系构建

制度化管理强调蒸汽管网运行的规范化、流程化与可追溯，通过明确调度流程、运行参数范围与响应措施，使运行控制具备统一标准。责任体系构建以岗位职责划分为基础，涵盖锅炉运行、输配维护、调节控制和监测分析各环节，使每一项任务具有明确责任主体。制度内容包括运行记录管理、异常情况报告机制、参数调整审批程序和设备操作规程，确保各种措施能够在实际工作中落地。通过设定绩效评估指标，可促使各岗位在节能降耗、运行稳定和隐患排查中形成

闭环管理模式<sup>[3]</sup>。制度化管理保障蒸汽系统优化策略长期有效执行，为提升运行质量提供制度支撑。

### 6.3 设备维护、隐患排查及应急处置机制

设备维护机制涵盖定期巡检、精密检修、阀门密封性检测、保温层修复和疏水装置校验，使蒸汽管网保持良好运行状态。隐患排查关注泄漏点、腐蚀部位、压力波动源和调节装置滞后等问题，通过经验排查与指标分析相结合的方式识别风险。应急处置机制包含压力异常快速调整预案、蒸汽泄漏隔离措施、锅炉供汽失衡的快速补偿策略和关键装置的备用供汽通道，确保在突发状况下维持生产安全与稳定。应急演练可提升人员对应急流程的熟悉度，使处置效率得到保证。通过维护、排查与应急的协同运行，可形成全面的保障体系，提高蒸汽管网整体可靠性与运行安全水平。

## 7 结语

石化生产装置蒸汽管网的优化运行关系能源利用效率、装置安全稳定性与企业运行成本，对提升整体生产保障能力具有关键意义。在系统构成、需求特性、运行问题与优化路径等方面的综合分析表明，蒸汽管网的高效运行依赖于供需匹配、输配节能、余热利用以及调控策略的协调推进，同时还需在监测体系、制度建设与设备维护等方面形成完善的保障机制。通过构建精细化调控模式和系统化运行管理体系，可在保持蒸汽品质稳定的前提下降低能耗水平，提升资源配置效率，为石化企业实现安全、经济、绿色运行提供持续支撑。

## 参考文献

- [1] 潘志浩,卢黎明,陈俊仰,孙杰,王磊.某石化装置小径管保温层下腐蚀预防与检测评价对策[J].山东化工,2025,54(14):64-67+74.
- [2] 丁道森,宋维强,张龙.某石化装置除氧器溶解氧异常的调整与分析[J].清洗世界,2025,41(04):18-20.
- [3] 范艳斌.石化装置节能技术浅析[J].精细与专用化学品,2023,31(06):54-56.
- [4] 顾梧楠.基于机器学习的石化装置事故预警指导系统构建方法[D].导师:王峰.北京化工大学,2023.

# Research on Industrial Design Method of Intelligent Modular Travel Residence Product Based on User Experience

Haiya Chen

Guangzhou Banban Technology Co., Ltd.; Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

Against the backdrop of converging mobile lifestyles and intelligent manufacturing, travel living product design is transitioning from function-oriented approaches to a new phase emphasizing both experiential and intelligent elements. Traditional designs predominantly focus on spatial organization and safety, often overlooking emotional engagement and personalized experiences in long-term habitation. Grounded in user experience theory, this study establishes an industrial design methodology for intelligent modular travel living products. It explores functional configurations and experiential optimization across multiple scenarios through user requirement modeling, modular structural design, and intelligent interaction system integration. By integrating human factors engineering, perceptual design, and smart control technologies, the research proposes a modular unit-centered reconfigurable design framework that enables flexible spatial transitions and intelligent environmental regulation. Findings demonstrate that this methodology significantly enhances the comfort, adaptability, and emotional value of travel living environments, providing theoretical and practical references for innovative and sustainable design of travel living products.

## Keywords

user experience; modular design; travel living products; intelligent control; industrial design methods

# 基于用户体验的智能模块化旅居产品工业设计方法研究

陈海亚

广州半半科技有限公司，中国·广东 广州 510000

## 摘要

在移动生活与智能制造融合发展的背景下，旅居产品设计正从功能导向迈向体验与智能并重的新阶段。传统设计多关注空间与安全，忽视长期居住中的情感交互与个性化体验。本文基于用户体验理论，构建智能模块化旅居产品的工业设计方法体系，从用户需求建模、模块化结构设计与智能交互系统集成等方面探讨多场景下的功能配置与体验优化。通过融合人因工程、感知设计与智能控制技术，提出以模块单元为核心的可重构设计框架，实现空间布局的灵活转换与环境的智能调控。研究表明，该方法能显著提升旅居环境的舒适度、适应性与情感价值，为旅居产品的创新与可持续设计提供了理论与实践参考。

## 关键词

用户体验；模块化设计；旅居产品；智能控制；工业设计方法

## 1 引言

伴随社会结构与生活方式的多样化，旅居模式逐渐成为现代人群生活的重要形态。无论是长期房车旅行、移动办公还是短期度假休憩，用户对旅居产品的需求已从“可居住”向“高体验、强互动、智能化”转变。传统旅居产品的设计模式普遍以功能堆叠为导向，忽视了使用过程中的感官舒适、心理愉悦及交互便捷等体验要素，难以满足当代消费者对个性化与科技感的期待。模块化与智能化设计理念的引入，使旅居产品具备了可扩展性与可重构性，为不同场景和人群提供多层次的空间与功能组合。用户体验作为衡量产品

综合价值的重要标准，已成为工业设计的核心驱动力。本文基于用户体验导向，系统分析智能模块化旅居产品的设计原则与实现路径，旨在构建以“人—物—环境”协同为基础的设计方法体系，促进旅居产品的创新发展与产业升级。

## 2 用户体验导向下的旅居产品设计需求分析

### 2.1 现代旅居生活方式的变化趋势

当代旅居生活已从短期休闲向长期化、个性化方向发展，用户不再仅关注基本的住宿功能，而更重视居住环境的舒适性、私密性与情感归属感。随着远程办公、数字游牧与共享经济的兴起，旅居产品逐渐承担多重角色，既是生活空间，又是工作与社交场所。这一趋势要求产品在空间组织、交互方式与服务系统上具备高度灵活性。模块化与智能化设

【作者简介】陈海亚（1985—），男，中国广东雷州人，设计学硕士，从事设计管理与产品设计产业化研究。

计使旅居空间能够根据不同用户与使用周期灵活重组，满足个体差异化需求。

## 2.2 用户体验的多维构成与评价逻辑

对于旅居产品而言，其体验维度涵盖物理舒适性、交互便捷性、情感认同与文化审美等多个层面。用户体验评价不再仅依赖主观感受，而逐步转向定量与定性结合的综合分析模式。通过问卷调查、行为追踪与生理反馈等手段，设计者可建立体验模型，识别痛点与期望点。例如，温湿度控制、照明环境、储物便捷度与空间私密性均直接影响用户满意度。以体验数据为导向的设计方法，能够为模块划分与功能布局提供科学依据，实现设计决策的可量化与可验证。

## 2.3 旅居产品设计中用户心理与情感需求的引入

旅居环境的特殊性使用户心理状态具有动态变化特征。居住空间的陌生感、移动过程的不确定性以及资源限制都可能影响使用者的情绪体验。设计应通过感知介质与互动机制的构建，缓解旅居中的心理压力，强化环境的情感温度。例如，智能照明系统可根据时间与情绪调节色温；语音交互系统可提供陪伴式反馈；材料与色彩选择可传递安全与归属感。通过嵌入情感化设计策略，旅居产品能够从“功能设备”转变为“情感伴侣”，在用户体验层面实现深度联结。

## 3 智能模块化旅居产品的结构体系构建

### 3.1 模块化设计原理与空间重构策略

模块化设计是实现旅居产品灵活性、可扩展性与多功能性的关键方法，其核心理念在于以功能单元为基本模块，通过标准化接口实现多维组合与灵活重构。设计中依据旅居生活的核心需求，将休息区、储物区、厨房区、卫浴区及工作区等功能单元模块化，使各单元具备独立性与兼容性。模块采用轻量化材料与可折叠结构，既保证运输便捷，又便于用户快速组装与调整空间。借助参数化建模与模块化设计软件，可实现尺寸、布局、材质的动态调整与多版本生成，满足个性化定制需求。用户可根据场景自由扩展，如在长途旅居中增加储能模块，在短期休闲时增加娱乐模块，实现空间与功能的灵活切换。模块化设计不仅提升了生产与维护的标准程度，还降低制造成本与后期维护难度，为旅居产品的持续优化、智能制造和循环使用奠定了基础。

### 3.2 结构与系统的智能化集成

模块化旅居产品的设计创新不仅体现在空间组合，更在于结构与系统的智能化融合。智能集成的核心目标是通过多层次感知、计算与控制机制，使空间环境具备自适应与交互能力。系统在各模块中嵌入温湿度、光照、空气质量及能耗监测传感器，通过数据采集与AI算法学习实现环境的动态调节。智能控制单元能够协调照明、通风、供暖及安防模块的运行状态，形成多模块间的协同控制网络。用户可通过移动端、语音交互或手势识别实现远程与本地控制，使空间对人类行为产生主动反馈。例如，当系统检测到夜间休息状

态，可自动调整光线与温度以提升舒适度。该智能集成系统不仅提升操作便利性与能源利用效率，还强化了用户与空间的情感连接，使旅居产品从静态结构转变为具备感知与响应能力的动态智能生态系统。

## 3.3 模块标准化与制造体系优化

模块化旅居产品的产业化与推广离不开标准化体系的建立与制造流程的优化。标准化设计通过统一模块尺寸、连接结构、接口通信协议及能源传输标准，实现不同厂商与不同场景的兼容性。这一体系使模块的生产与替换更加灵活，促进了旅居产品的互换与共享。制造环节中引入数字孪生（Digital Twin）与BIM（Building Information Modeling）技术，实现从设计到装配的虚拟验证与全过程数据追踪，显著提高了制造精度与装配效率。柔性制造系统可根据用户定制需求实现模块批量化与差异化生产，形成“个性化批量定制”的智能制造模式。同时，采用绿色材料与低能耗工艺，确保产品全生命周期的环保性与经济性。模块标准化体系的完善不仅提升了产业链的协同效率，也构建了从设计、生产到使用的闭环生态，为旅居产业的可持续发展提供了坚实支撑。

## 4 用户体验导向的设计方法与流程优化

### 4.1 基于体验数据的设计决策模型

智能模块化旅居产品的设计过程应以用户体验数据为核心驱动，构建科学的设计决策模型。通过量化的用户研究与行为分析，采集旅居场景中的操作行为、情绪反应、环境偏好等多维数据，形成结构化的用户画像与需求数据库。在此基础上，利用多变量统计与机器学习算法进行聚类与模式识别，可揭示不同用户群体的特征差异与潜在需求。例如，青年旅居群体倾向于空间社交与智能娱乐功能，而老年用户更注重安全、舒适与健康监测体验。数据驱动的设计决策模型通过将用户需求转化为可操作的设计参数，实现功能模块与用户体验的精准匹配，减少主观判断带来的偏差。同时，系统可基于实时反馈更新数据模型，使设计决策具备动态调整能力。该方法不仅提升了设计的科学性与预测性，也为旅居产品的个性化创新提供了可靠的数据支持与决策依据。

### 4.2 交互体验与感官设计的融合应用

在智能模块化旅居产品设计中，用户体验的核心不仅体现在功能层面，更在于人与产品之间的多维感官交互。设计应将视觉、听觉、触觉等多模态感知相融合，营造沉浸式的空间体验。通过智能照明系统实现光色温度与时间、生理节律的匹配；声效与气味系统的智能联动可在不同场景下自动调整氛围，形成情境化体验。触控与语音交互界面的设计需具备高反馈性与操作舒适性，使用户在有限空间中获得自然流畅的交互感。人因工程的引入确保设备布局与使用姿态的合理性，降低操作负担并提升安全性。智能传感技术的介入使产品能够主动感知用户状态并做出响应，实现从“被动控制”向“主动关怀”的转变。通过多感官融合与情感化设计，

旅居产品不仅实现了功能的智能化，更在体验层面达成了人机共情的设计目标。

### 4.3 体验评价与迭代优化机制

用户体验的优化应被视为一个持续的动态循环过程。智能模块化旅居产品设计需构建基于实时反馈的体验评价体系与迭代机制。系统在使用过程中可通过传感器与日志记录采集操作行为、环境变化与用户满意度数据，形成体验数据库，为后续设计改进提供量化依据。设计团队可采用虚拟仿真与A/B测试等手段，对不同模块配置、交互策略及环境参数进行对比验证，评估方案的优劣与适应性。通过建立闭环反馈系统，产品可根据用户行为自动优化控制逻辑，实现体验的持续演进。与此同时，设计过程应引入跨学科协同机制，由工业设计师、数据分析师与人机交互专家共同参与，实现数据与感性设计的有机结合。此类动态迭代机制确保产品在技术更新与用户需求变化中保持持续优化，使智能旅居产品真正具备自学习与自适应特性，体现体验驱动的设计进化逻辑。

## 5 智能模块化旅居产品的应用拓展与发展趋势

### 5.1 多场景应用的适应性扩展

模块化与智能化的融合设计使旅居产品具备高度的灵活性与适应性，能够突破传统房车、露营车的空间边界，延伸至科研考察、灾害救援、军事驻训及极端环境探索等多种场景。通过模块化单元的自由组合与功能重构，旅居产品可根据地形、气候与任务需求进行快速部署与调整，形成可扩展的生活与工作空间。能量自给系统的集成，如光伏发电、储能模块与水循环净化装置，使其具备自循环与生态平衡能力。智能感知系统可实时监测环境变量，自动调节照明、温湿度及能耗分配，实现环境与人之间的动态平衡。这种以模块重构为核心的生态型旅居单元，不仅满足不同场景下的居住需求，也为未来无人居住地、太空舱居住及可移动建筑设计提供实验与理论基础，展现了旅居产品在复杂场景中的广阔应用前景。

### 5.2 设计方法的可持续性与社会价值

基于用户体验的智能模块化旅居产品设计，不仅体现技术创新，更承载生态与社会责任。可持续性体现在材料选择、制造工艺与生命周期管理的全流程优化上。通过模块化结构的复用与替换，产品可实现功能更新而非整体淘汰，显著降低资源消耗与碳排放。材料层面引入可回收轻质复合材料与绿色制造工艺，延长产品使用周期。共享化设计使旅居产品在多个用户间实现循环使用，促进资源公平配置与绿色

出行模式普及。社会层面，该设计方法有助于改善移动人群生活质量，支持远程办公、健康养老与灾后安置等多元社会需求。以用户体验为核心的工业设计方法通过技术创新实现个体幸福感与社会公共利益的协调统一，使旅居产品从消费品转变为服务社会生活方式的可持续载体。

### 5.3 未来智能设计技术的发展方向

虚拟仿真技术可在设计早期构建沉浸式交互场景，实现用户体验的实时反馈与设计验证；人工智能算法可基于用户行为数据自动优化空间布局与模块组合，实现产品的动态适配与智能学习。物联网的普及将推动模块化单元的互联互通，使旅居环境形成自治的智能生态系统。区块链技术在数据管理中的引入，可保障用户隐私与模块溯源的安全可信。智能制造与云端协同将进一步提升生产柔性，实现“个性化批量定制”模式，使设计从静态产品转向动态服务。未来的智能模块化旅居产品将融合感知、学习与交互功能，成为人机共生的智慧载体，展现工业设计在科技与人文融合下的全新发展方向。

## 6 结语

基于用户体验的智能模块化旅居产品设计，不仅是一种技术路径，更是一种设计思维的转型。通过以用户为中心的体验研究、模块化结构的灵活构建与智能交互系统的整合，旅居产品实现了从功能驱动向情感驱动的跃升。该设计方法强化了产品的适应性与交互性，满足了不同场景与人群的差异化需求。未来的研究应进一步探索体验数据与设计决策的深度融合，完善模块标准体系与智能算法优化模型，使旅居产品在舒适性、可持续性与情感性方面实现全面提升。智能模块化旅居设计将成为推动未来移动生活方式革新的关键力量，为工业设计与人居美学的融合发展提供重要启示。

## 参考文献

- [1] 张远航.基于需求层次理论的旅居养老产品及服务设计[D].桂林电子科技大学,2025.
- [2] 张辉.构建完整的旅居养老空间体系、产品体系和产业体系[J].民生周刊,2025,(01):60-61.
- [3] 陈涵旸.旅居产品成新赛道康养经济迈入发展黄金期[N].经济参考报,2025-09-25(002).
- [4] 沈顺飚.基于顾客视角的保险结合型康养旅居产品的关键成功因素研究[D].华侨大学,2023.
- [5] 高文宇.社会创新视角下的桂林旅居养老产品与服务设计[D].桂林电子科技大学,2023.

# Classification and Application of Dual Power Automatic Switch in Control Cabinet of Coal Grinding Oil Station

**Yongliang Zhang Yulong He**

China Energy Engineering Group Beijing Electric Power Equipment General Factory Co., Ltd., Beijing, 102401, China

## Abstract

The control cabinet of the coal mill oil station in thermal power unit auxiliary systems primarily ensures the stability of coal mill lubrication, hydraulic systems, and start-stop operations, playing a vital role in both the safe operation of coal mills and the stable combustion of boilers. Dual power automatic transfer switches are critical switchgear devices designed to maintain uninterrupted power supply for essential loads. They enable rapid and stable switching between primary and backup power sources (typically emergency power), ensuring reliable continuity of electricity for critical loads. These switches have now become standard equipment in coal mill oil station control cabinets. This paper briefly introduces the classification of popular dual power automatic transfer switches and analyzes their application prospects in coal mill oil station control cabinets.

## Keywords

coal mill; oil station control cabinet; dual power automatic transfer switch

# 双电源自动切换开关的分类区别及在磨煤机油站控制柜中的应用分析

张永亮 何玉龙

中能建集团北京电力设备总厂有限公司，中国·北京 102401

## 摘要

火电机组辅机系统的磨煤机油站控制柜主要用于保障磨煤机的润滑、液压以及其启停的稳定性，对于磨煤机的安全运行及锅炉的稳定燃烧均有着重要作用。双电源自动切换开关是一类能保障重要负荷不间断供电的开关设备，能够快速、稳定地切换常用电源与备用电源（一般为保安电源），给重要负荷用电的连续性提供了可靠保障，现成为了磨煤机油站控制柜的标准配置。基于此，本文将简单介绍一下目前流行的双电源自动切换开关的分类以及分析了在磨煤机油站控制柜中的应用前景。

## 关键词

磨煤机；油站控制柜；双电源自动切换开关

## 1 引言

在磨煤机运行体系中，磨煤机两个独立油站承担着润滑与液压加载的基础保障，其自身供电是否稳定直接影响了磨煤机的安全运行程度，双电源自动切换开关可以为油站控制柜提供主备两种供电方式之间的电源切换通道，保证了主备电的衔接供应。但不同类型的切换开关在结构和性能上均有所区别，在使用时应根据油站负荷特性合理选用，选择符合油站本身的维护和改造需求的设备。

## 2 双电源自动切换开关的概念

双电源切换开关就是因故正常电路发生故障后将符合用电设备自动切换到另外一个备用电源的开关，以保持用电

设备正常运行。其自动切换功能是指，当一个电源故障或者断电时，自动在一定时间内将备用电源切换到主电源上，以确保电路的连续供电。一般双电源切换开关广泛应用于不允许停电的重要场所及设备上。

## 3 双电源切换开关的分类

我们常用的双电源切换开关主要分为三类：STS 静态开关、ATS 开关，还有用接触器搭构的切换开关。

### 3.1 STS 静态开关

STS(Static Transfer Switch)，静态开关，属于静态型电源切换装置，其基本功能是在两路电源之间构建自动择优供电通道。当当前运行电源发生掉电、欠压或异常时，装置在判定备用电源电压、频率与相位满足同步条件后，驱动切换单元将负载转接至另一电源；反向工况下亦按相同逻辑完成回切。该类装置可应用于 UPS 与 UPS、UPS 与发电机、

**【作者简介】**张永亮（1981），男，中国山东潍坊人，本科，高级工程师，从事工业自动化电气控制研究。

UPS 与市电以及市电与市电等多种电源组合场景，但两路电源必须配置同步检测或同步控制模块，否则无法执行安全切换<sup>[1]</sup>。STS 通常由控制单元、可控硅功率模块及断路保护单元构成，切换过程依托半周级导通控制完成，典型转换时间小于 8 ms，可满足对供电连续性要求较高的 IT 及精密负载运行条件。



图 1

### 3.2 ATS 转换开关

国家标准中文全称为自动转换开关电器，工程中通常称为双电源自动切换装置。该类设备由一个或多个转换执行单元及其配套控制与检测元件构成，其主要功能是对供电回路状态进行实时监测，并在主电源异常时，将负载回路自动切换至备用电源，以维持供电连续性。



图 2

ATS(Automatic transfer switching equipment)，多采用双列复合触点系统，并配合传动机构、微型电机储能单元及微电子控制模块协同工作，使切换过程中的电弧产生被有效抑

制，从而接近无飞弧运行状态。其驱动电机通常选用耐温热型聚氯丁橡胶绝缘结构，并内置温升与过流保护单元，当温度超过 110℃或电流异常时可自动脱扣切断驱动。故障消除后系统可重新自恢复投入运行，这一保护与自复位机制显著延长了装置的使用寿命并提升了运行可靠性<sup>[2]</sup>。

ATS 双电源转换开关又可以分为两种级别：PC 级和 CB 级。

(1) PC 级的是电磁驱动，切换迅速(120 毫秒 -250 毫秒)，具有灭弧室，体积小是一款真正双电源开关。触头为银合金，触头分离速度大，有专门设计的灭弧室。能够接通、承载、但不用于分断短路电流的。其主体是负荷(隔离)开关，为机电一体式开关电器，转换机构由电机或励磁驱动。pc 级无短路保护功能。

(2) CB 级的是由两个断路器、电动机、机械连锁组成，切换时间 1000 毫秒 -2500 毫秒。相对 PC 的价格更低一点，cb 级有短路保护功能。配备过电流脱扣器，它的主触头能够接通并用于分断短路电流。由断路器(微型断路器或塑壳断路器)另配机械联锁装置。控制器主要用来检测被监测电源(两路)工作状况，当被监测的电源发生故障(如任意一相断相、欠压、失压或频率出现偏差)时，控制器发出动作指令，开关本体则带着负载从一个电源自动转换至另一个电源。

### 3.3 接触器搭构的切换开关

接触器搭构型双电源切换开关以两只及以上交流接触器为核心执行部件，通过电气互锁与机械闭锁共同构成双路电源的排他导通通道。该结构通常在主回路中设置两套独立触点组，分别对应常用电源与备用电源，控制回路则由欠压继电器、时间继电器及逻辑继电器构成，用于完成电源状态判别与动作次序编排<sup>[3]</sup>。当主用侧电压低于设定阈值时，欠压单元释放，控制回路触发备用接触器吸合，同时切断原有主接触器的线圈供电，实现负载回路的重构。

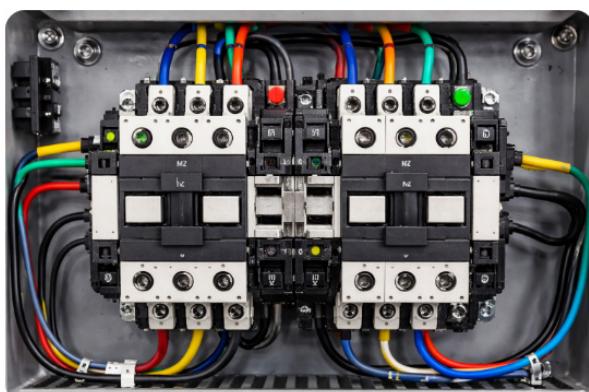


图 3

由于该类装置以通用低压电气元件为基础，其开断能力、触点同步性与灭弧性能受单个接触器本体参数约束，在短路电流冲击或高频切换工况下，触点烧蚀与反弹概率显著

增加。为防止两路电源同时投入，常通过辅助常闭触点构成电气互锁链路，并辅以联动机构形成刚性闭锁，但在长期运行中易因机械磨损或线圈老化导致闭锁失效。

## 4 几种开关的主要区别及在我厂磨煤机油站控制柜的应用

### 4.1 STS 静态转换开关

STS 静态转换开关的主要特点在于采用了高速切换方式，其切换时间仅需要 8ms，在发生电源异常后能够快速将负载切向备用电源。而且整个装置是柜体结构，主要由一些复杂精密的电子控制电路板、功率半导体器件及监控模块等组成，在切换过程中能够快速切换并稳定输出电压和频率。对核心生产装置或重要实验装置来说，在 STS 连续工作的支撑下可以达到不断电的效果。但是对于磨煤机油站控制柜来说，负载主要是油泵、润滑泵以及辅助控制系统，如果电源中断对其工艺整体安全影响不是很大。但是使用 STS 系统之后必然会使系统采购及后期维护产生大量投入，并且对于控制柜而言将导致内部空间和线路受限而需要增加较大的改造难度。

总而言之，STS 静态转换开关可以理解为一个柜子，由复杂的电子电路组成。切换时间为  $\leq 8\text{ms}$ ，远低于市电频率，所以一般应用于及其重要的场合，其造价成本较高，一般适用于及其重要的控制场所。不推荐使用在我厂油站控制柜中。

### 4.2 ATS 转换开关

ATS 转换开关主要用在紧急供电系统，将负载电路从一个电源自动换接至另一个（备用）电源的开关电器，以确保重要负荷连续、可靠运行。

在厂内磨煤机油站控制柜中应用 ATS 转换开关主要是用于确保重要负载设备不会断电，并能够自动将电源从常用的电源转换到备用电源，使油泵和其他辅机等关键性的设备不会因电源中断造成停机。这类开关一般都是用机械驱动的方式控制继电器或者利用辅助触点实现负载的转接，目前其切换时间都比较长，约在百毫秒级别以上。在油站控制柜当中无法避免出现短时间断电的情况，不过因为断电间隔较短所以不会破坏电机等负载设备，也不会影响整体系统的安全运行。ATS 开关在控制柜中已经有较为成熟的使用经验，安装方式也比较方便，可以直接放进原有的配电装置内，并在柜内与断路器、熔断器、控制回路实现联动，从而达到多路负载集中管理的目的。除此之外，在油站工作的过程中需要设置电压监测、延时控制功能，当主电源出现问题后自动启动备用电源，并且发送状态信号给控制系统。ATS 具备远控监测报警的功能，在这套装置的运行之下，提高了工作人员的管理水平以及工作效率，避免了出现错误的操作和误触碰。

除以上几点以外，ATS 开关的价格合理，比 STS 静态转换开关来说在满足安全性和可靠性要求下也更为实惠<sup>[4]</sup>。

### 4.3 接触器自行搭构的转换开关

在磨煤机油站控制柜中，采用接触器及其配套继电器、机械联锁组件自行搭构的双电源转换回路，通常以两组交流接触器分别对应常用电源与备用电源，并通过互锁触点构成电气隔离路径。在该构型下，切换逻辑由外接控制回路完成，控制柜可依据母线电压或控制电源状态对接触器线圈实施吸合与释放，从而实现负载在两路电源之间的转接。相较成套 ATS 装置，该类搭构式方案在器件采购与组装成本上具有明显压缩空间，适合用于磨煤机油站这类负载容量固定、运行环境相对稳定的辅助系统。

由于控制与执行单元分散于多个电气元件，其可靠性受接触器触点磨损、继电器漂移以及联锁机构机械间隙等因素影响，切换过程中存在不同步与拒动风险，因此更适用于对瞬时断电不敏感的润滑与冷却回路。当现场缺乏匹配的自动转换设备或需在短周期内完成改造时，该方式可通过调整接触器容量、辅助触点数量及控制回路逻辑实现与油站控制策略的兼容配置，在既有控制柜结构内完成双电源功能的工程化实现。

双电源切换在我厂油站控制柜中，作为润滑油站及液压油站电机进线电源切换之用。润滑油站的主要作用是为磨煤机减速机提供润滑，假如润滑油站短时间电机停用，对减速机实际使用并无多大影响，这个时间保守估计至少 10 秒以上甚至更长；液压油站的主要作用是为磨辊提供加载力，如果液压油站电机短时间停用，加载力可以保持一段时间（至少以分钟计），更不会造成机组的停运。无论以上何种形式双电源切换均可满足两个油站运行要求，无需采用毫秒级切换装置，并且由于低压电机的固性，过短时间的切换会造成反电势冲击空开掉闸。

## 5 结语

综上所述，双电源切换开关固然有其技术先进性，但在磨煤机油站控制柜的应用中仍然有一定局限性，并非切换时间越短越好，切换时间在几秒之内的普通 ATS 最为合适，一方面能为用户节约成本，一方面能满足实际工况需求。

## 参考文献

- [1] 郁晓龙.双电源自动切换控制器的控制原理及技术改进[J].广播电视信息, 2016 (4) : 32-33
- [2] 李文渊.变电站双电源切换开关自动切换故障及处理技术研究 [J].通信电源技术, 2023, 40(16):203-205.
- [3] 孙文钊,刘芳义,孔维林,等.供配电系统中的双电源自动转换开关的应用[J].电子技术, 2023(1):236-237.
- [4] 张风雷,黄涛,陈楠,等.自动切换双电源开关柜的设计[J].电子技术, 2025(1):34-35.

# Research and Discussion on the Transformation of Transmission Line Tower Enterprises towards “Intelligent Transformation and Digital Transition”

Xin Zhou

Jiangsu Qitian Tower Manufacturing Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222047, China

## Abstract

With the adjustment of the global energy structure and the continuous upgrading of the power system, transmission line towers, as the key infrastructure for power transmission, are facing unprecedented challenges and opportunities in their industry development. Various tower manufacturing enterprises have taken various measures to reduce costs and increase efficiency and enhance market competitiveness. On the one hand, the continuous emergence of new technologies, such as the application of new materials and new processes, has put forward higher requirements for the design and manufacture of iron towers. On the other hand, the diversification, personalization and rapid changes in market demands make it necessary for tower manufacturing enterprises to enhance their response speed and service quality. This article conducts an in-depth study and discussion on the transformation of transmission line tower enterprises from the perspective of “intelligent transformation and digital transition”, aiming to reveal its necessity and coping strategies, and provide references for the sustainable development of the industry.

## Keywords

Intelligent transformation and digital transition; innovation capability; digital transformation strategy

# 输电线路铁塔企业“智改数转”的转型研究和探讨

周新

江苏齐天铁塔制造有限公司，中国·江苏连云港 222047

## 摘要

随着全球能源结构的调整以及电力系统的不断升级，输电线路铁塔作为电力传输的关键基础设施，其行业发展面临着前所未有的挑战与机遇，各铁塔制造企业纷纷采取各种措施来降本增效、提升市场竞争力。一方面，新技术的不断涌现，如新材料、新工艺的应用，对铁塔的设计、制造提出了更高要求；另一方面，市场需求的多样化、个性化以及快速变化，使得铁塔制造企业必须提升自身的响应速度和服务质量。本文以“智改数转”为视角，对输电线路铁塔企业的转型进行深入研究和探讨，旨在揭示其必要性和应对策略，为行业的可持续发展提供参考。

## 关键词

输电线路铁塔；智改数转；创新能力；数字化转型战略

## 1 引言

《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出深入实施智能制造和绿色制造工程，发展服务型制造新模式，推动制造业高端化智能化绿色化建设智能示范工厂，完善智能制造标准体系。新一轮的产业技术革命将充分发挥海量数据和丰富应用场景优势，促进数字技术与实体经济深度融合，赋能传统产业转型升级，促进工业化与信息化的深度融合。我国制造业生产制造、经营管理方式正在不断地向智能化和数字化转变，越来越多的制造企业开始加快实

现智能化改造和数字化转型。但随着劳动力比较优势下降、资源收紧、国内经济下行压力加大、全球产业竞争激烈等多重因素叠加影响，传统制造业原本的低成本优势逐渐消失，陷入发展困境，转型迫在眉睫。为此，国家工业和信息化部制定了《中小企业数字化转型指南》。遵循“从易到难、由点及面、长期迭代、多方协同”的思路，为各个部门科学有效地推进当地中小企业智能化改造、数字化转型工作提供指导。

近年来，随着社会经济发展对电力需求的不断增长和电力系统的持续升级，输电线路铁塔行业面临着前所未有的挑战。输电线路铁塔企业大多为中小企业，为了应对这些挑战，输电线路铁塔企业需要积极寻求技术更新和市场突破，以提升生产效率、降低成本、提高产品质量和增强市场竞争

**【作者简介】**周新，男，中国湖北襄阳人，硕士，高级工程师、高级经济师，从事输电铁塔生产制造研究。

力。本文将以“智改数转”为切入点，对输电线路铁塔企业的转型进行深入研究和探讨，探讨如何以智能化改造、数字化转型来推动中小企业增强企业数字化水平与核心竞争力。

## 2 我国电力铁塔制造企业的现状

铁塔构件的生产设备逐步数控化，但是自动化、智能化程度还偏低。近年来基于用工成本的增加，铁塔制造企业加快了生产设备数控化的改造，大部分工序的生产制造设备实现了一定的数控化、自动化，如数控冲孔生产线，数控弯、数控铲背、数控焊接等，但是从仓储、领料、加工、试装到成品分拣包装还未能实现自动化、智能化，受行业利润率的影响，企业大部分的流动资金用于原材料的购置，智能化升级较为缓慢。

人员素质普遍不高。因为在以前铁塔制造加工属于粗加工行业，人员更新基本是以老带新，没有形成系统化教育；对信息化、智能化的相关知识接触较少，且高学历员工引进不足，所以整体素质有待提高，这在很大程度上限制了企业智能化改造和数字化转型的推进。

工序分散。现有角钢构件的加工如下料、制孔、制印可以实现同一台设备加工完成，后道工序如切角、制弯、开合角等仍然需要二次转运二次加工。连板的下料、制孔工序目前部分可以在激光上实现，但是制印问题一直没有很好的解决，不能保证钢印镀锌后的成品质量；特殊工程中使用的厚板技术规范明确不可以使用激光制孔，如特高压工程，所以需要二次制孔、制印。塔材的二次转运、加工增加了物流的成本、影响了加工的效率。

管理手段落后。铁塔制造企业绝大部分企业还未实现真正信息化管理，实行传统管理的企业占绝大多数，造成企业内部各项信息的传递、工作决策效率偏低。有少部分企业已经在使用 MES 或 ERP，更偏重于基础数据的使用管理，基于人员、管理水平等因素，目前也未将管理系统的功能全部发挥出来。

“数据孤岛”问题突出。当前，数据已然成为数字经济的关键生产要素，而数据的互联互通却成为了数据资源快速发展的一大障碍，严重制约了数据要素整合的效率，这也使得数据孤岛成为急需解决的问题。大部分铁塔企业的生产、物流、销售、人力资源等目前还都是分散管理，没有形成协同工作的集成化系统。

## 3 输电线路铁塔企业“智改数转”的必要性

### 3.1 提高生产效率

通过智能化改造和数字化转型，企业可以大幅提高生产效率。在智能化改造的推动下，企业可以优化生产流程，实现自动化和智能化生产，减少人工干预，降低生产成本，提高产品质量和稳定性。数字化转型可以让企业更好地掌握市场需求和消费者行为，实现精准生产和营销，提高市场竞争力。

### 3.2 提升企业决策能力

数字化转型可以让企业更好地掌握市场趋势和消费者需求，通过数据分析和挖掘，可以为企业提供更加准确和及时的决策支持，帮助企业做出更加明智的决策。同时，数字化转型也可以让企业更好地掌握自身运营情况，及时发现和解决问题，提高企业运营效率和稳定性。

### 3.3 增强企业创新能力

智能化改造和数字化转型可以为企业带来更多的创新机会。通过引入先进的生产技术和设备，企业可以开发出更多具有创新性和差异化的产品和服务，满足消费者不断变化的需求。同时，数字化转型也可以让企业更好地掌握新技术和新应用，推动企业技术创新和升级。

### 3.4 降低环境影响

智能化改造和数字化转型可以降低企业环境影响。通过优化生产流程和降低能源消耗，企业可以减少对环境的污染和破坏。同时，数字化转型也可以帮助企业更好地掌握供应链情况，推动供应链的绿色化和可持续化发展<sup>[1]</sup>。

### 3.5 提升企业形象和品牌价值

智能化改造和数字化转型可以提升企业的形象和品牌价值。通过引入先进的技术和设备，提高生产效率和产品质量，企业可以树立更加高端、专业的形象，增强消费者对品牌的认可度和忠诚度。同时，数字化转型也可以帮助企业更好地与消费者进行互动和沟通，提高品牌传播效果和市场竞争力。

## 4 输电线路铁塔企业“智改数转”的策略探讨

### 4.1 重视顶层设计，制定数字化转型战略

企业需要明确数字化转型的目标和路径，包括数字化营销、生产、供应链、财务等各个方面。同时，需要制定数字化转型的短期、中期和长期计划，并根据实际情况进行调整和优化。

### 4.2 建立智能化改造平台

企业需要建立智能化改造平台，以实现企业内部各部门之间的数据共享和业务协同。该平台应包括生产管理、物流管理、质量管理、设备管理等多个模块，以提高生产效率、降低成本、优化资源配置等。

### 4.3 引入人工智能技术

企业需要引入人工智能技术，以提高生产效率和产品质量。例如，可以利用机器学习算法对生产数据进行挖掘和分析，以优化生产流程和提高产品质量；可以利用自然语言处理技术对客户反馈进行分析和归纳，以提供更优质的服务。

在数字化设计方面，可以利用三维建模、仿真等技术手段，实现输电线路铁塔的数字化设计，提高设计效率和设计质量，甚至可以实现免试组装。

在自动化生产方，可以通过引入机器人、自动化设备等，

实现输电线路铁塔生产的自动化和智能化，提高生产效率，如自动化组装、焊接、上料、分拣等。

在智能化检测方面，可以利用无损检测、智能传感器等技术手段，实现输电线路铁塔质量的智能化在线检测，提高检测效率和准确性。

#### 4.4 优化企业内部管理流程

企业需要优化内部管理流程，以实现数字化转型和智能化改造的有机结合。例如，可以利用云计算技术实现数据的集中管理和共享，以提高企业内部管理效率；可以利用物联网技术实现设备的远程监控和维护，以降低设备故障率和维修成本等<sup>[2]</sup>。

#### 4.5 加强人才培养和管理

企业需要加强人才培养和管理，以适应数字化转型和智能化改造的需求。例如，可以引进具有数字化转型和智能化改造经验的人才，以提高企业的整体水平；可以开展内部培训活动，以提高员工的技能水平和管理能力等。

#### 4.6 深化产学研合作

通过与高校、科研机构等合作，加强铁塔自动化、信息化、集成化加工的技术研发和创新力度，推动企业技术创新和发展。

### 5 输电线路铁塔企业“智改数转”的应用实践展望

#### 5.1 放样设计

通过引入了数字化设计平台，在设计阶段实现输电线路铁塔的参数化设计和仿真分析，搭建模块化模型信息库；建立输电铁塔设计和放样的信息共享标准，实现几何数据、力学信息、管理信息的顺利传输；铁塔加工制造企业通过引用设计单位提供的三维模型，实现放样与设计图纸资料数据的无缝衔接，达到精细化放样的目的，避免重复放样，可以大大节省放样时间，同时放样准确率也可以大幅提高。数据的共享也打通了各项目相关领域存在的信息孤岛问题，可以实现设计部门、制造企业、运维部门间数据的融合和贯通，为相关利益方提供一个便捷、共享的信息平台，提高放样效率和准确率，也方便工程的管理。

#### 5.2 角钢加工

通过联合研发，采用工序高度融合的自动化生产线，将领料、下料、制印、制孔、切角、清根、铲背等工序形成集成化、流水化的加工；通过设备改造，加装通信接口，利用三维放样软件直接生成零部件的加工数据程序，在信息系统的支持下，实现精准配送、自动上下料，并利用视觉和人工智能等技术手段对产品进行自动化检测和缺陷识别，实现无人值守作业，从而提高生产效率及产品质量。

#### 5.3 热镀锌加工

研发引进一套设备技术先进成熟，自动化、信息化程度高，装备性能优良，运行安全可靠，投资经济合理，操作维护方便，且环保达标，实现最优经济效益的热镀锌生产线。可通过信息自动收集统计（镀锌生产MES系统），从进料到出库全过程系统化、流程化、数字化管控，可实现全产线的自动化控制，在固废、能耗减量化的同时，减少人力投入，提升生产效率、产品质量水平及作业安全<sup>[3]</sup>。

#### 5.4 构件包装码垛

通过利用视觉技术手段配合自动化设备产线，实现快速准确识别构件号，系统根据打标内容读取系统里关于该零件的相关安装信息，机器人机械臂按照预定打包清单、程序码放构件，自动包裹、自动打紧收包，而后调用自动喷码设备进行安装信息（如工程名称、塔型、件号等）的喷码作业。打包结束后由控制中心指挥转运AGV小车将打包完毕的白件塔材转运至成品对方区域。这可以大大提高包装的效率，降低人力资源成本，减少人为错误。

#### 5.5 三维试组装技术

应用三维工具来实现对输电铁塔构件的虚拟创建、组装、检测、分析等数字化操作。通过云装配和三维精细化模型比对分析检验试组装结果，如螺栓可安装性、安装空间、安装局部间隙、碰撞问题等，实现尺寸、缺陷自动分析，构件准确性预警、报告，从而免去实物化的试组装。三维虚拟试组装技术的实现可以大大减少输电铁塔试组装和检验的时间，有效缩短铁塔供货周期，降低制造过程中试组装工序的成本。

### 6 结语

本文通过对输电线路铁塔企业“智改数转”的必要性和策略进行深入探讨和分析，并结合实践展望揭示了其在提高生产效率、降低生产成本、提高产品质量、提升市场竞争力等方面的优势。对于输电线路铁塔企业来说要想在竞争激烈的市场环境中立足，必须紧跟时代步伐，积极推进企业“智改数转”工作，以适应市场需求的变化和电力系统的升级发展。未来，随着技术的不断进步和应用的深入，输电线路铁塔企业的“智改数转”之路将越走越宽广，为行业的可持续发展注入新的动力。

### 参考文献

- [1] 腐黄耀;苏志钢;朱彬荣;陈云翔;万涛;庹祖雄.腐蚀对架空输电线  
路铁塔承载力特性影响[J].有色金属科学与工程,2024(05)
- [2] 王德意;赵承;杨国清;贾嵘;李平.基于集对分析法的架空输电线  
路状态评价[J].工业工程,2017(05)
- [3] 郑伟栋.高压输电线路铁塔组立施工技术研究[J].电力设备管  
理,2024(21)

# Study on the Method of Digestion Using Electric Heating Plate and Atomic Absorption Spectrometry for Determining Heavy Metals in Marine Organisms

Yuliang Zhu Peng Sun Jinyang Liu Hao Guo Shen Wang

Liaoning Dalian Ecological Environment Monitoring Center, Dalian, Liaoning, 116023, China

## Abstract

This paper takes bivalve mollusks as the analytical subject, employing electric hot plate digestion technology as the pretreatment method for the analysis of Cu, Pb, Zn, Cd, and Cr in marine organisms. The sample digestion solution is determined using an atomic absorption spectrophotometer. With a sample weight of 0.5000g, 10.0mL of HNO<sub>3</sub>, and 5.0mL of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> are added, and digestion is carried out at 140°C with a lid on for 1 hour. The recovery rate of the spiked samples is measured to be within the range of 90%-110%, indicating excellent digestion efficiency. By optimizing the conditions of the acid removal step in the pretreatment, the digestion efficiency is compared.

## Keywords

digestion on electric heating plate; atomic absorption; heavy metals

# 电热板消解 – 原子吸收测定海洋生物体中重金属的方法研究

朱玉亮 孙鹏 刘进阳 郭浩 王甡

辽宁省大连生态环境监测中心，中国·辽宁 大连 116023

## 摘要

本文把双壳贝类作为分析对象，用电热板消解技术作为海洋生物体中Cu, Pb, Zn, Cd, Cr分析的前处理方法[1]，使用原子吸收分光光度计测定样品消解液，取样量为0.5000g加入10.0mLHNO<sub>3</sub>和5.0mLH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，消解温度140°C，加盖消解1小时的条件下，测定样品的加标回收率在90%-110%范围内，消解效果很好。并通过优化前处理赶酸环节的条件[2]，对消解效果进行比较。

## 关键词

电热板消解；原子吸收；重金属

## 1 引言

随着社会的发展进步，人民的生活水平不断提高。各式各样的海产品端上广大百姓的餐桌，食品安全问题就变得尤为重要，海洋环境的重金属污染严重危害人类的身体健康。因此，加大海洋环境的保护力度，提高海洋环境的监测水平是我们的首要任务。原子吸收分光光度法是目前测定海洋生物体中Cu, Pb, Zn, Cd, Cr含量的常用方法，样品的前处理方法主要为HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-电热板消解方法。此方法对实验条件要求低，经济便捷。样品消解液赶酸后测定，能有效消除强酸对金属元素分析的干扰，延长仪器使用寿命。本文通过优化赶酸条件，对同一加标样品的消解效果进行比较，得出最优赶酸条件。

**【作者简介】**朱玉亮（1983-），男，中国辽宁大连人，本科，工程师，从事海洋监测、环境保护与污染治理研究。

## 2 材料与方法

### 2.1 药品试剂

所有实验用水均为超纯水，HNO<sub>3</sub>MOS级，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>GR级；Cu标准溶液GSB 07-1257-2000 1000mg/L 100509, Pb标准溶液GSB 07-1258-2000 1000mg/L 100708, Zn标准溶液GSB 07-1259-2000 1000mg/L 100907, Cd标准溶液GSB 07-1276-2000 100mg/L 103112, Cr标准溶液GSB 07-1284-2000 500mg/L 101212。

### 2.2 仪器设备

VARIAN AA220型原子吸收分光光度计，SHIMADZU AUW320型分析天平，TabTech EG20B型电热板，LABCONCO FreeZone2.5型冻干机，DHG-9123A型电热恒温鼓风干燥箱，MILLI-Q超纯水机，玛瑙研钵，100目尼龙筛。

### 2.3 样品前处理

#### 2.3.1 冻干与过筛

把-4°C保存的贝类样品解冻，用超纯水把样品外壳泥

沙洗干净，擦掉外壳水分，取出软组织，一部分样品用于测鲜样水分，另一部分样品装进塑料密封袋，在-40℃和0.1Mpa条件下冻干，用玛瑙研钵研磨冻干样品直到全部通过100目尼龙筛，装进塑料自封袋，备用。

### 2.3.2 样品消解

称取制备好的干样0.5g（精确到0.0001g）于聚四氟乙烯坩埚中，加1mL水把样品润湿，缓慢加入10mL HNO<sub>3</sub>摇匀，静置。再缓慢加入5mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>摇匀，静置。待反应完全后加盖，置于电热板上140℃加热1h，然后开盖，保持140℃赶酸，蒸至剩大约1mL液体时，停止加热，冷却至室温。视消解情况补加2mL HNO<sub>3</sub>和1mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>继续加盖消解，如果溶液澄清加5mL水开盖赶酸。蒸至剩大约1mL液体，转入50mL容量瓶，坩埚至少要用水润洗3次，润洗液一并转入50mL容量瓶，超纯水定容，摇匀，备用。

## 2.4 质控措施<sup>[1]</sup>

### 2.4.1 准确度

每批样品至少带10%的加标样，加标回收率在90%-110%范围内，相对标准偏差不大于10%。

### 2.4.2 精密度

每批样品至少带10%的平行样，相对标准偏差不大于10%。

### 2.4.3 试验空白

每批样品至少带10%的试验空白，用超纯水代替样品做实验空白。

注：加标样，平行样，试验空白与实际样品同步消解，测定。

## 2.5 标准曲线系列制备

制备标准曲线的标准使用液均加入1% HNO<sub>3</sub>。配制标准曲线系列见表1。

表1 标准曲线系列

分析元素	1	2	3	4	5
Cu (μg/L)	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
Pb (μg/L)	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
Zn (mg/L)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
Cd (μg/L)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
Cr (μg/L)	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0

## 3 实验结果与分析

样品预处理是海洋生物体重金属元素分析过程的重要环节，也是造成分析结果误差的主要因素之一。本文对同一海洋生物体样品消解后，加水赶酸1次和加水赶酸2次分别做实验，得出表2和表3两组数据，分析比较，优化样品前处理条件。

通过上述实验，测得消解后赶酸1次实际样品和加标样品消解液中重金属的浓度，见表2；消解后赶酸2次实际样品和加标样品消解液中重金属的浓度，见表3。并分别检验方法的精密度和准确度。

表2 消解后赶酸1次实验数据结果计算加标回收率均不小于95.2%，相对标准偏差均不大于4.6%，所以上述实验的准确度和精密度满足监测规范要求。使用Dixon检验法<sup>[3]</sup>对表2中的各组数据进行异常值检验，查临界值( $Q_{\alpha}$ )表得 $Q_{\alpha(0.05,6)}=0.560$ ，临界值 $D_l$ 和 $D_n$ (最大或最小)均小于0.560，所以各组数据均无异常值。

表3 消解后赶酸2次实验数据结果计算加标回收率均不小于90.3%，相对标准偏差均不大于4.4%，所以上述实验的准确度和精密度满足监测规范要求。使用Dixon检验法对表3中的各组数据进行异常值检验，查临界值( $Q_{\alpha}$ )表得 $Q_{\alpha(0.05,6)}=0.560$ ，最小临界值 $D_l$ 和最大临界值 $D_n$ 均小于0.560，所以各组数据均无异常值。

表2 消解后赶酸1次实验数据

分析元素	平行样测定结果(μg/L)						平均值(μg/L)	RSD(%)	$D_l$	$D_n$
	1	2	3	4	5	6				
Cu	71.980	73.443	71.612	72.074	71.855	70.687	71.942	1.2	0.336	0.497
	119.731	121.140	123.066	120.098	122.712	121.592	121.390	1.1	0.110	0.106
	加标量(μg/L)	50.0			加标回收率(%)			98.9		
Pb	2.159	2.207	2.033	2.291	2.134	2.046	2.145	4.6	0.050	0.326
	4.212	4.156	4.138	4.114	4.209	4.077	4.151	1.3	0.274	0.022
	加标量(μg/L)	2.00			加标回收率(%)			100.3		
Zn (mg/L)	0.507	0.512	0.509	0.507	0.506	0.505	0.508	0.5	0.143	0.429
	1.011	1.005	1.004	1.009	1.012	1.008	1.008	0.3	0.125	0.125
	加标量(mg/L)	0.50			加标回收率(%)			100.0		
Cd	53.047	51.381	52.951	51.746	52.654	53.121	52.483	1.4	0.210	0.043
	101.560	99.028	99.750	100.903	98.004	101.233	100.080	1.4	0.288	0.135
	加标量(μg/L)	50.0			加标回收率(%)			95.2		
Cr	0.623	0.553	0.604	0.619	0.581	0.592	0.595	4.4	0.400	0.057
	1.547	1.649	1.558	1.584	1.601	1.575	1.586	2.3	0.108	0.471
	加标量(μg/L)	1.00			加标回收率(%)			99.0		

表3 消解后赶酸2次实验数据

分析元素		平行样测定结果(μg/L)						平均值 (μg/L)	RSD(%)	D <sub>1</sub>	D <sub>n</sub>
		1	2	3	4	5	6				
Cu	实际样品	73.459	71.668	72.941	73.406	70.898	71.247	72.270	1.6	0.136	0.021
	加标样品	121.770	123.201	121.065	123.007	120.464	121.907	121.902	0.9	0.220	0.071
	加标量(μg/L)	50.0		加标回收率(%)			99.3				
Pb	实际样品	2.289	2.364	2.355	2.211	2.370	2.120	2.285	4.4	0.364	0.024
	加标样品	4.375	4.401	4.359	4.224	4.309	4.277	4.324	1.5	0.299	0.147
	加标量(μg/L)	2.00		加标回收率(%)			102.0				
Zn (mg/L)	实际样品	0.502	0.499	0.501	0.500	0.498	0.499	0.500	0.3	0.250	0.250
	加标样品	0.998	1.001	1.002	0.997	0.999	1.003	1.000	0.2	0.167	0.167
	加标量(mg/L)	0.50		加标回收率(%)			100.0				
Cd	实际样品	50.096	48.669	49.712	48.527	50.098	51.770	49.812	2.4	0.044	0.516
	加标样品	94.232	95.110	93.914	96.743	94.683	95.168	94.975	1.0	0.112	0.557
	加标量(μg/L)	50.0		加标回收率(%)			90.3				
Cr	实际样品	0.584	0.578	0.561	0.590	0.573	0.589	0.579	1.9	0.414	0.034
	加标样品	1.415	1.537	1.496	1.507	1.494	1.514	1.494	2.8	0.533	0.250
	加标量(μg/L)	1.00		加标回收率(%)			92.0				

比较表2和表3两组数据，消解后赶酸1次和2次对Cu,Pb,Zn的回收率影响不大。消解后赶酸1次消解液中Cr和Cd的加标回收率接近实际加标量，消解后赶酸2次消解液中Cr和Cd的加标回收率靠近下限。

综上，样品消解后充分赶酸可以有效延长仪器使用寿命，但个别元素的加标回收率偏低，影响方法的准确度，所以推荐样品消解后赶酸1次，可以得到更加准确的实验数据。

#### 4 结语

使用原子吸收分光光度计测定海洋生物体样品，取处理好的干样0.5000g加入10.0mLHNO<sub>3</sub>和5.0mLH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，消解温度140℃，加盖消解1小时，视消解情况补酸消解或消解液澄清后赶酸1次，定容至50.0mL测定，按照此步骤进行赶酸操作，可以得到更加准确的实验数据。该方法对各项分

析元素的HNO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>加入量进行了统一，对加入步骤进行了“一次加入”优化，对消解温度进行了统一，增加了赶酸过程并形成规范步骤，较《海洋监测规范 第6部分：生物体分析》(GB 17378.6-2007)标准分析更快捷、赶酸效率更高、测量结果更准确。实验中的2次赶酸操作后准确度降低，经验证不如1次赶酸。因此按照本次实验1次赶酸进行原子吸收法测定海洋生物体中重金属的方法值得推广。

#### 参考文献

- [1] GB 17378.6-2007,《海洋监测规范 第6部分：生物体分析》[S].北京：中国标准出版社. 2007
- [2] HJ 832-2017,《土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法》[S].北京：中国环境出版社. 2017
- [3] GB 17378.2-2007,《海洋监测规范 第2部分：数据处理与分析 质量控制》[S].北京：中国标准出版社.2007