

Study on the method of improving the safety integrity of safety valve

Ligeng Mo¹ Jing Ma¹ Dianjing Chen²

1. Beijing Aerospace Petrochemical Technology And Equipment Engineering Corporation Limited, Beijing, 100036, China

2. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing, 100076, China

Abstract

This paper systematically elaborates on the core concept of safety integrity and its significance in industrial safety protection systems, with a focus on analyzing the functional characteristics and reliability requirements of safety valves as critical safety equipment. The study particularly examines the failure modes of safety valves and their potential impact on system safety, highlighting the necessity of conducting research to enhance the reliability of safety valves. Using the evaluation method of safety integrity level and FMEDA method, two technically feasible approaches to improve the safety integrity level of safety valve are put forward: (1) online real-time monitoring technology is adopted to reduce the probability of the undetected and dangerous failure; (2) Online calibration technology is adopted to shorten the verification cycle of safety valves. These measures can effectively enhance the SIL rating of safety valves, providing crucial technical support for improving the reliability of safety protection systems in industrial applications.

Keywords

safety valve; safety integrity; online real-time monitoring; on line verification

提高安全阀安全完整性的方法研究

莫力根¹ 马静¹ 陈殿京²

1. 北京航天石化技术装备工程有限公司, 中国·北京 100036

2. 北京航天动力研究所, 中国·北京 100076

摘要

本文系统阐述了安全完整性的核心概念及其在工业安全防护系统中的重要性, 分析了安全阀作为关键安全设备的功能特性和可靠性要求。研究特别关注安全阀的失效模式及其对系统安全的潜在影响, 阐明了开展安全阀可靠性提升研究的必要性。采用安全完整性等级评估方法和FMEDA分析方法, 提出了两个提高安全阀安全完整性等级的具有工程实践价值的技术途径: (1) 采用在线实时监测技术, 以减小安全阀危险不可测失效概率; (2) 采用在线校验技术, 以缩短安全阀检测周期。这些措施可有效提升安全阀的SIL等级, 为工业安全防护系统可靠性建设提供了重要技术支撑。

关键词

安全阀; 安全完整性; 在线实时监测; 在线校验

1 引言

安全完整性是功能安全技术一个概念, 是指“在规定的条件下, 规定的时间内, 安全相关系统成功实现所要求的安全功能的概率”【[1]】。功能安全起源于上世纪 70 年代的欧洲, 其目的是为了控制、避免和减轻受控设备和受控设备控制系统 (EUC) 中存在的潜在风险发生, 将风险降低到可接受的范围内, 保证人员、财产和环境的安全。2006 年, 国家标准 GB/T 20438《电气、电子、可编程电子安全相关系统的功能安全》颁布执行, 标志着功能安全技术在中国安

全工程领域加以应用。

安全阀是承压类特种设备 (即锅炉、压力容器和压力管道) 安全防护系统的重要组成部分, 是超压保护的最后一道屏障。但是, 针对安全阀, 无论是设计环节, 还是制造和运行环节, 国内外还均未开展功能安全相关技术研究工作。本文将运用功能安全的研究方法, 分析提高安全阀完整性的必要性及其技术途径。

2 提高安全阀安全完整性的必要性分析

2.1 安全阀是安全防护系统的组成部分

安全功能是指针对特定的危险事件, 为达到或保持 EUC 的安全状态, 由 E/E/PE 安全相关系统、其它技术安全相关系统和外部风险降低设施实现的功能。其中, 安全阀就

【作者简介】莫力根 (1983-), 男, 蒙古族, 中国内蒙古赤峰人, 硕士, 高级工程师, 从事超压保护装置技术研究。

是一种其它技术安全相关系统。【[1]】

功能安全的作用机理通常是通过建立保护层来维持受保护对象的安全【[2]】。图1为承压类特种设备超压风险的典型安全保护层【[3]】。安全阀位于第五层——物理防护层。

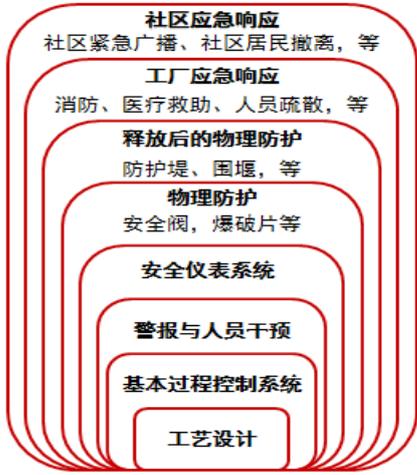


图1 承压装置的典型安全保护层示意图

安全阀与安全仪表系统一样，同为安全防护系统的组成部分，因此，也都属于功能安全技术的应用范畴。

2.2 对安全阀也有安全完整性要求

要将受控设备和受控设备控制系统中存在的潜在风险（EUC风险）降低到可接受的范围内，取决于三个分系统功能的正确行使，如图2所示。既然是三个分系统共同承担降低风险的职责，就存在任务分配的问题，即安全完整性要求的分配。

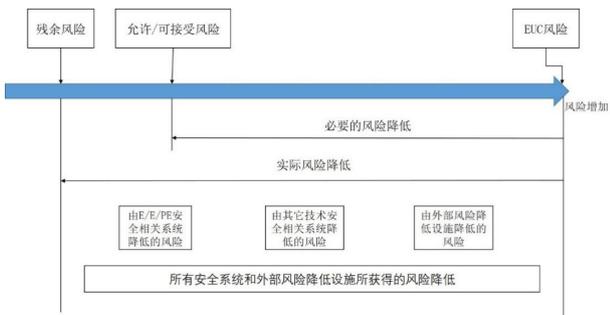


图2 风险降低过程图【1】

对于安全保护层来说，预防事故和降低风险等全部功能也不是集中于某一保护层，而是在重大危险源或事故（伤害）高发区域布置多个保护层，运用技术方法将安全功能分配给不同的保护层，系统在检测到会引发系统不可接受风险的事件时，安全相关系统指挥1个或多个保护层执行事件阻止功能或后果减轻功能，层层降低风险量或减弱触发事故的能量【[2]】。

安全功能要求的分配，体现为对各个分系统、分系统中各个设备设施的安全完整性等级要求。安全完整性等级（Safety

Integrity Level，以下简称 SIL）是表征系统和设备设施正确执行安全功能、降低风险能力的性能指标。分为4个等级，等级4是最高的，等级1是最低的。安全完整性等级对应两个含义：（1）风险降低能力，例如 SIL1 指标表示风险降低1个数量级；（2）风险降低系统功能失效的概率，例如某功能为 SIL1 表示这个功能几十年只能失效一次【[4]】【[5]】。

如要某个分系统或分系统中的设备承担更多的风险降低职责，其必须具备较高的安全完整性等级。换言之，一个设备，如果具备较高的安全完整性等级，就可以承担更多的降低风险的职责。

具体到承压装置安全保护层，安全功能主要是分配给了安全仪表系统，并没有给物理防护层的设备分配很多的职责，国家相关法规、规章中也没有对其提出功能安全要求。但是另一方面，目前安全阀产品的安全完整性等级很低，也不具备承担较高安全功能的能力。根据相关文献和工业数据，安全阀的平均失效概率 PFDavg 为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1}$ 【[3]】。这是很宽泛的范围，在实际应用中通常保守取值为 1×10^{-2} ，对应的是 SIL2。这是一个比较低的等级。但是，在某些特殊工况下，需要安全阀承担更多的安全功能，经调研，国外就有等级高于 SIL2 的超压泄放设备，最高可达到 SIL4。

总之，安全阀是安全防护系统的必不可少的组成部分，对其也是有安全完整性的要求，因此有必要将功能安全技术引入安全阀领域，重点研究两个方面的问题：（1）基于量化风险评估及系统化分析的安全阀产品安全完整性等级评估方法，以实现针对不同类型、不同制造厂家安全阀产品 SIL 能力的精准评价；（2）提高安全阀安全完整性等级的技术途径，为设计制造较高等级的产品提供研发方向。

3 影响硬件安全完整性的因素分析

根据 GB/T 20438 及相关标准，产品安全完整性包括硬件安全完整性和系统性安全完整性两个方面^[1]。本文仅研究安全阀的硬件安全完整性。硬件安全完整性包括两个要素——结构约束和随机失效。

3.1 影响结构约束的因素分析

硬件安全完整性的安全功能所声明的最高安全完整性等级，受限于硬件故障裕度和执行该安全功能的子系统的安全失效分数（SFF）。

$$SFF = (\lambda_{SD} + \lambda_{SU} + \lambda_{DD}) / \lambda \quad (1)$$

式中 λ ——子系统中一个通道的失效率（每小时）；

λ_{DD} ——检测到的子系统中通道每小时的危险失效率；

λ_{DU} ——未检测到的子系统中通道每小时的危险失效率；

λ_{SD} ——子系统中被检测到的通道每小时的安全失效率；

λ_{SU} ——子系统中未被检测到的通道每小时的安全失效率。

从公式（1）可以发现，若要增大安全失效分数，提高产品的安全完整性等级，必须降低 λ_{DU} 或降低其在总失效率中的占比。

3.2 影响随机失效的因素分析

每个 SIL 等级对应着一个随机失效的指标，称为目标失效量。针对两种不同的操作模式（低要求模式和高要求或连续操作模式），目标失效量分别规定为平均失效概率（PFD_{avg}）和每小时危险失效概率（PFH）。

安全阀位于承压装置安全保护层中的第五层，只有前面的安全措施没有抑制压力升高时才需要发挥作用，所以属于低要求操作模式，其平均失效概率决定了其安全完整性等级。

安全阀属于 1oo1 结构，其平均失效概率为：

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda_{DU} T_1}{2} \quad (2)$$

式中 T_1 ——检测测试时间间隔（h）；

λ_{DU} ——未检测到的子系统中通道每小时的危险失效率。

从公式（2）中可以发现，减小 λ_{DU} 和 T_1 可以减小平均失效概率，从而提高安全阀的产品安全完整性。

4 安全阀失效模式及其影响分析

通过上述的分析研究，发现减小 λ_{DU} 可以提高安全阀的产品安全完整性。为了研究减少的技术途径，采用 FMEDA 方法^[6]研究安全阀的主要失效模式及其影响，以确定那些失效为不可预测的危险失效。

FMEDA（失效模式、影响和诊断分析）是一种系统化的可靠性分析程序，用于研究安全阀各设计要素对产品安全完整性的影响。

安全阀是纯机械结构，由阀座、阀体、阀瓣、反冲盘、波纹管、导套、阀杆、弹簧、阀盖、调整螺钉等零件组成，图 3 为安全阀中各组成零件的功能框图。当安全阀处于关闭状态时，其可能发生失效包括介质轻微内漏、介质严重内漏和介质外漏；当安全阀开启时，其可能发生失效包括提前起跳、延迟起跳和整定压力不稳定；当安全阀排放时，其可能发生失效包括开启高度不够；当安全阀回座时，其可能发生失效包括延迟回座和回座或回座泄漏。经过统计，最常见的失效为介质内漏。

经过 FMEDA 分析，除了介质轻微内漏以外，其余失效均是危险不可测失效。而且，介质轻微内漏如果不处理，会发展为严重内漏，即由安全失效演变为危险失效。由此可以得出结论，安全阀的失效基本上都是危险不可测失效。

5 提高安全阀安全完整性的技术途径

通过上述研究发现，提高安全阀的产品安全完整性有两个技术方向——降低安全阀危险不可测失效（ λ_{DU} ）和缩短检测时间间隔（ T_1 ）。

5.1 降低安全阀不可预测危险失效的技术途径

降低安全阀危险不可测失效的最常用办法，就是通过开展设计优化，提高各组成零件的本征安全，减少失效的发生概率。

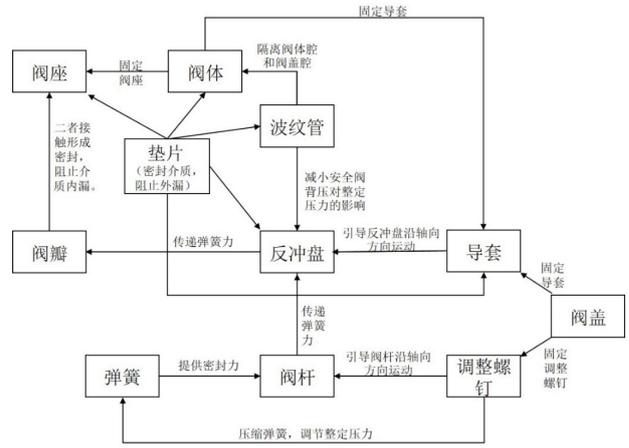


图 3 安全阀功能框图

除此之外，还有另外一个途径——在线实时监测安全阀的失效情况，将安全阀的危险不可测失效（ λ_{DU} ）转化为危险可测失效（ λ_{DU} ），同样可以达到降低在总失效率中比例的目的。

安全阀在线泄漏监测系统的技术方案如图 4 所示。在需要监测的安全阀上布置声发射传感器，安全栅与声发射传感器通过线缆连接，安全栅可以放大声发射传感器信号。数据采集仪与安全栅通过线缆连接，数据采集仪通过 4G 传输数据到用户端，用户端的监测软件进行数据处理，实现对安全阀泄漏失效的监测。

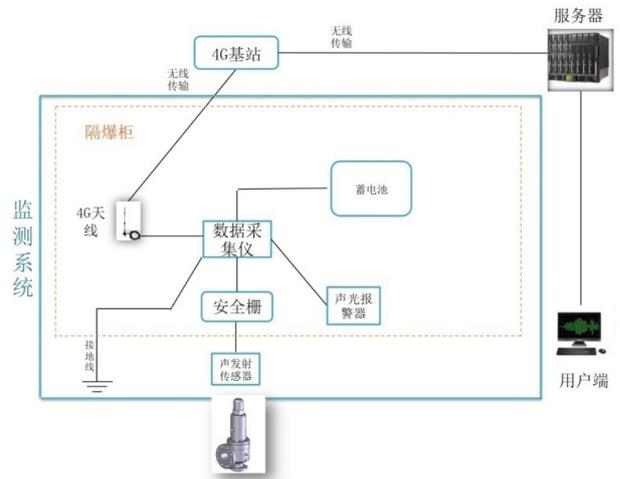


图 4 安全阀泄漏在线监测系统技术方案

5.2 缩短安全阀校验时间间隔的技术途径

安全阀属于特种设备，在国家颁布的技术法规中，规定了明确的定期校验制度。如：在《安全阀安全技术监察规程》[8]附录 B6.3 中规定，“安全阀应当定期进行校验，一般每年至少校验一次”。如果要提高安全阀的安全完整性等级，就需要进一步缩短校验周期。但是，工业装置长周期运行是当前的趋势，不可能仅是为了满足安全阀的校验周期而缩短装置的运行周期。

要解决这个矛盾,可以采用在线校验的方法。在线校验是指在线状态下(安全阀安装在设备上受压或不受压状态下)对安全阀进行的检查和检测。安全阀在线校验技术比较成熟,但目前通常用于无法离线校验的场合,比如焊接在承压设备上的安全阀。对于有较高安全功能要求的场合,可以通过这个办法,缩短校验周期,降低平均失效概率,获得更高的安全完整性等级。

安全阀在线校验有三种方法。第一种是以系统压力进行试验,是指承压设备在运行状态下,人为控制设备工作压力来进行安全阀的校验。这种方法的优点是检验结果最接近实际工况,可以对安全阀的动作性能进行全面的评估。但其不足是此方法不适合易燃、易爆、有毒和昂贵的工作介质,受工作介质限制。而且校验过程中全系统达到短时的超压,带有一定的风险,对承压设备的使用寿命也会有影响。

第二种方法是用其它压力源进行试验,是指承压设备在运行状态下,不是利用设备的工作介质,而是利用其它压力源来进行安全阀的校验。采用这种方法必须具备一定的条件,比如对于先导式安全阀,需配备有在线检测接头(如图5所示)。在通常情况下,在线检测接头是关闭的,需要进行在线检测时,外部气源通过这个接头将检测介质引入到导阀中。



图5 配备有在线检测接头的先导式安全阀

第三种办法是使用在线校验仪。该方法是系统压力在没有达到安全阀的整定压力时,依靠在线校验仪从外部提供一个向上的附加力,使安全阀强制开启。记录安全阀开启时的附加拉力、安全阀入口压力,同时获知介质作用在阀瓣上的有效面积,根据上述数据计算出安全阀的开启压力。在线校验仪由机械连接装置、液压系统、数据采集处理系统组成,如图6。这个方法在电站装置中被广泛应用。在相关标准中明确规定,电力锅炉用安全阀应使用在线定压仪进行校验调整[9][10]。

使用在线校验仪进行在线检测的优点是:适用范围广,经济方便;同时是在系统压力低于安全阀开启压力下进行校验,这样就避免了压力系统超压的风险。其不足在于安装较为复杂,有时需要搭建脚手架才能完成在线检测仪的安装。最主要的不足是影响检测精度的因素多,测试误差相对于上面的两个方法而言比较大。

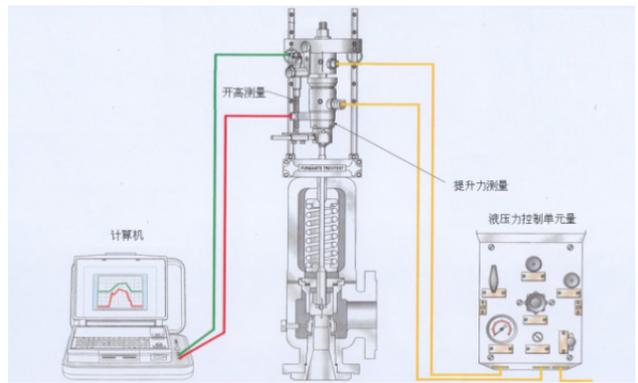


图6 在线检测仪安装示意图

6 结论

(1) 安全阀是安全防护系统的一个重要组成部分,有必要采用功能安全技术方法,研究提高其安全完整性的技术途径,为设计制造较高 SIL 等级的产品打下基础。(2) 降低安全阀危险不可测失效率在总失效率中的占比可以提高其安全完整性等级,为达到这个目的,针对失效采取在线监测措施,将不可测失效变为可测失效,也是一个有效的技术途径。(3) 缩短安全阀校验周期,可以提高其安全完整性等级。为了解决缩短校验周期与保证设备长期运行的矛盾,可以采取在线校验技术。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全:GB/T 20438.1~20438.7-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [2] 吴超,华佳敏.功能安全研发的方法论研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(8):23-28.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.保护层分析(LOPA)应用指南:GB/T 32857-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [4] 史学玲,冯晓升.功能安全与安全完整性等级综述[J].自动化博览,2013,(3):24-27.
- [5] 史学玲,冯晓升.功能安全解析及其标准建设探讨[J].自动化博览,2016,(2):26-28.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.系统可靠性分析技术、失效模式和影响分析(FMEA)程序:GB/T 7826-2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [7] 陈祖志,艾景奇,刘德宇,等.特种设备安全防护及其功能安全保障关键技术研究[J].中国特种设备安全,2020,36(11):1-7.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.安全阀安全技术监察规程:TSG ZF001—2006[S].北京:中国计量出版社,2006.
- [9] 国家能源局.电力行业锅炉压力容器安全监督规程:DLT 612-2017[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [10] 国家能源局.电站锅炉安全阀技术规程:DL/T 959-2014[S].北京:中国电力出版社,2015.