

核电站电磁驱动型稳压器喷淋阀设计综述

曹月秋, 曹晓宁, 蒋晓红, 吴松

引用本文:

曹月秋, 曹晓宁, 蒋晓红, 吴松. 核电站电磁驱动型稳压器喷淋阀设计综述[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 71-75.

CAO Yueqiu, CAO Xiaoning, JIANG Xiaohong, WU Song. Review on Design of Solenoid Pressurizer Spray Valve for Nuclear Power Plants[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(1): 71-75.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[先进压水堆核电站电磁动截止阀端部加载鉴定试验研究](#)

Research on End-loading Test for Solenoid Globe Valve of Advanced PWR

南方能源建设. 2017, 4(2): 137-140 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.025>

[柔性直流阀冷喷淋水反渗透处理优化研究](#)

Optimization Research on Reverse Osmosis Treatment Technology for Flexible DC Valve Cooling Spray Water

南方能源建设. 2018, 5(3): 111-114 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.018>

[核电厂汽轮机主汽阀检修用锁定装置设计研究](#)

Research on Maintenance Locking Device of Main Steam Valve of NPP

南方能源建设. 2016, 3(3): 54-56 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.011>

[某核电堆型主蒸汽系统汽锤研究](#)

Research on Steam Hammer of Main Steam System in a Nuclear Reactor Type

南方能源建设. 2015, 2(4): 62-65,87 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.010>

[百万千瓦级核电厂消防稳压装置研究](#)

Research on Fire Protection Stabilized Pressure System of a Gigawatt-scale Nuclear Power Plant

南方能源建设. 2015, 2(4): 93-95 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.016>

核电站电磁驱动型稳压器喷淋阀设计综述

曹月秋¹, 曹晓宁^{2,✉}, 蒋晓红², 吴松¹

(1. 鞍山电磁阀有限责任公司, 辽宁鞍山 114300; 2. 中广核工程有限公司, 广东深圳 518124)

摘要: [目的] 电磁驱动型稳压器喷淋阀是压水堆核电机组的关键阀门之一, 实现该阀门的自主化研发对于核电建设具有重要意义。[方法] 文章从电磁驱动型稳压器喷淋阀的系统功能需求和技术参数要求出发, 简要介绍了自主研发的电磁驱动型稳压器喷淋阀的整机结构、比例电磁铁、中置热防护装置、阀位信号检测与输出装置及先导式阀芯调节系统的结构设计等。[结果] 通过本次自主化研发, 掌握了电磁驱动型稳压器喷淋阀设计技术, 解决了电磁驱动结构的技术难点和阀门高温高压介质的工况适应性问题, 实现了电磁驱动型稳压器喷淋阀的系统功能。[结论] 自主研发的电磁驱动型稳压器喷淋阀满足三代核电稳压器喷淋阀的发展需求, 可推广应用。

关键词: 电磁驱动型稳压器喷淋阀; 比例电磁铁; 中置热防护装置; 阀位信号检测与输出装置; 先导式阀芯调节系统

中图分类号: TL4; TH134

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)01-0071-05

开放科学(资源服务)二维码:



Review on Design of Solenoid Pressurizer Spray Valve for Nuclear Power Plants

CAO Yueqiu¹, CAO Xiaoning^{2,✉}, JIANG Xiaohong², WU Song¹

(1. Anshan Solenoid Valve Co., Ltd., Anshan 114300, Liaoning, China;

2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The solenoid pressurizer spray valve is one of the key valves for PWR nuclear power plant, and it is of great significance for nuclear power construction to realize the independent research and development of the valve. [Method] In this paper, Starting from the system functional requirements and technical parameter requirements of the solenoid pressurizer spray valve, the overall structure, proportional solenoid, middle thermal protection device, valve position detect and output device, control system with pilot disc of the independently-developed solenoid pressurizer spray valve were briefly introduced in this paper. [Result] Through this independent research and development, the design technology of the solenoid pressurizer spray valve is mastered, the technical difficulties of the electromagnetic drive structure and the adaptability of the valve working under high temperature and high pressure medium conditions are solved, the system functional requirement for pressurizer spray valve is realized. [Conclusion] The independently-developed solenoid pressurizer spray valve meets the development needs for third generation nuclear power plant, and can be popularized and applied.

Key words: solenoid pressurizer spray valve; proportional solenoid; middle thermal protection device; valve position detect and output device; control system with pilot disc

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

电磁驱动型稳压器喷淋阀是三代压水堆核电

组的重要设备之一, 是核电站唯一的一台核安全一级的控制阀。该阀门位于稳压器系统主喷淋管线上, 主要功能是参与一回路的压力控制。在 DBC-1

收稿日期: 2021-11-08 修回日期: 2021-12-08

基金项目: 国家科技重大专项项目“高温高调节性能电磁驱动角式控制阀”(2019ZX06004014)

类工况（包括电厂启动和停运工况）时，稳压器通过喷淋阀和电加热器实现将一回路压力控制在允许的变化范围内，避免反应堆紧急停堆和稳压器安全阀动作；在DBC-2类工况（例如二次侧排热减少事故）中，操纵员手动开关稳压器喷淋阀对一回路进行降压，以便达到安全注入系统余热排出模式（RIS/RHR）接入的安全停堆状态^[1]。

1 主要技术参数

三代核电华龙一号技术路线引入了全新设计理念，安全壳内减少气源，稳压器比例喷雾阀由二代机组的气动控制阀改为电磁驱动型控制阀。

电磁驱动型稳压器喷淋阀的主要设计参数指标如表1所示。阀门在满足RCC-M^[2]机械规范1级要求的同时，还需满足RCC-E^[3]电气设备鉴定等级K2的要求，并确保阀门整机满足一定地震工况下的可运行性和60年内12万次的循环寿命要求。阀门控制部分由外接在安全壳外的控制柜完成，控制柜和阀门本体之间应能保证至少150 m的信号传输与控制能力。阀门电磁驱动执行器需满足RCC-E等级K2的鉴定要求，控制柜需满足RCC-E电气设备鉴定等级K3的要求。

表1 电磁驱动稳压器喷淋阀主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of solenoid pressurizer spray valve

技术参数	电磁驱动型稳压器喷淋阀
驱动机构型式	电磁驱动
核安全等级	1级
RCC-M等级	1级
RCC-E等级	喷淋阀K2/控制柜K3
抗震等级	SSE1(可运行性)
设计压力/(MPa·g·°C ⁻¹)	17.13/360
公称直径/DN	100
最大压差/MPa	0.5
开启/关闭时间	≤2 s/5 s
调节特性	线性
允许阀座泄漏率	IV级 ANSI FCI 70—2 ^[4]
循环寿命次数	120 000

2 结构设计

2.1 整机结构设计

电磁驱动型控制阀的核心原理是以电磁线圈带

电并产生电磁力来带动阀门阀芯的运动，这是电磁驱动型控制阀与传统气动控制阀^[5-7]或电动控制阀的最大区别所在。

综合考虑喷淋阀的工作条件和环境条件等要求，确定整机结构采用单向位置调节型高温高压比例电磁铁驱动机构，阀门流量调节系统采用先导式具有压力平衡功能的阀芯结构，整机采用无外漏的屏蔽套结构，控制系统采用分立式控制。阀门整体结构如图1所示。其中，阀门本体采用整体锻造的角式结构，承压能力可达CL2500磅级。电磁驱动执行器采用大功率比例电磁铁，直动型调节方式，电磁铁的外部防护采用整体锻造的高强度屏蔽套，同时确保导磁性能的同时满足高温、辐照等环境条件要求。阀位信号的检测与输出采用模拟量的输出方式，其位移传感器内置于电磁驱动执行器的上部。电磁驱动执行器与阀门本体通过中法兰螺栓连接，阀门中部设置热防护装置以减小介质热传导对阀门上部电磁驱动执行器的影响。

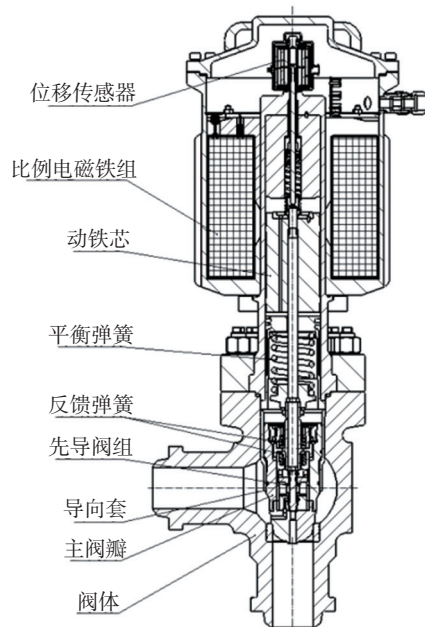


图1 电磁驱动型稳压器喷淋阀结构示意图

Fig. 1 Structural representation of solenoid pressurizer spray valve

阀门工作过程中通过电磁线圈接收比例电流信号后产生磁场，比例电磁铁的静铁芯和动铁芯组件之间产生电磁吸力，动铁芯组件带动阀芯组件运动并压缩平衡弹簧，实现阀门的开启、关闭及调节功

能。同时,连接在动铁芯组件和阀芯组件上的信号发生器伴随阀芯组件运动并向阀位信号检测输出装置输出阀位信号,阀位信号检测输出装置再将检测到的位移信号以模拟量的形式输出至控制柜,控制柜再根据接收到的阀位信号判断阀门开度并根据需求进行调节,由此实现阀门的闭环控制。

2.2 比例电磁铁结构设计

电磁驱动型稳压器喷淋阀的动力源是电磁驱动执行器,其核心构成部分是比例电磁铁。

目前市场可见的传统比例电磁铁的极靴为不可调节的固定式极靴,即在比例电磁铁制造完成后极靴位置就完全固定。固定式极靴使得输出特性固化,无法针对配套设备和现场使用工况进行调整,因此其与配套设备和使用工况的匹配被限制,使用范围被限定。

在电磁驱动型稳压器喷淋阀的自主研发过程中,采用了极靴可调型比例电磁铁结构,通过在比例电磁铁的结构中设置调节件,改变极靴的形状,从而改变其输出特性。比例电磁铁的输出特性可以适度调节,因此其能够与配套阀门及其工况条件更好地匹配,使电磁驱动执行器的输出特性和使用更加灵活便捷。

2.3 热防护装置结构设计

电磁驱动型稳压器喷淋阀的最高运行温度要求为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当高温介质流经阀门时,其热量会通过对流、辐射和传导三种方式传向比例电磁铁。由于电磁驱动执行器的比例电磁铁内部配置有电磁线圈、电器元件和电子元件,其耐热性能远远低于阀门的其他金属材料机械部分,加之比例电磁铁在电流通过时本身会产生一定的热量,再叠加介质热传导的影响,电磁驱动执行器整体处于较高的工作温度。这种工况将会加速电磁驱动执行器的热老化从而影响整机寿命,甚至导致绝缘破坏而致功能丧失。

为减轻下部阀体中流通介质的热传导对电磁驱动执行器的影响,在进行电磁驱动型稳压器喷淋阀结构设计时,在下部阀门本体与上部电磁驱动执行器之间设计了散热盘片,同时将电磁驱动执行器的屏蔽套外壳也加工成能够增大散热面积的盘片式结构,以最大程度地将电磁线圈通电产生的热量散发至周围环境中,并减轻介质的热量通过对流、传导

和辐射对比例电磁铁的影响。

通过上述散热结构设计,在不影响高温电磁比例调节阀内部件运动功能的前提下,可实现对比例电磁铁的热防护功能。

2.4 阀位信号检测与输出装置设计

传统的气动或电动控制阀一般通过定位器或模拟量的阀位指示器进行阀位信号反馈。目前在役及在建机组使用的定位器或模拟量阀位指示器均为进口产品。国内市场正在进行自主化研发,但尚未实现落地应用。

在本项目电磁驱动型稳压器喷淋阀研发过程中,结合电磁驱动执行器的特殊结构,将阀位信号检测与输出功能设计与电磁驱动执行器结构设计结合,设计了内置于电磁驱动执行器屏蔽套中的信号检测与信号输出装置,可根据电磁驱动执行器内动铁芯和静铁芯的运动情况实时向控制柜反馈阀位状态。

2.5 先导式阀芯结构设计

考虑稳压器喷淋阀最大压差 0.5 MPa 的调节阀范围要求,为提升调节精度并使得阀门整机结构设计更加紧凑,电磁驱动型稳压器喷淋阀的阀芯调节阀系统设计为先导式的阀芯结构^[8-12]。通过先导阀芯平衡主阀座上下腔压力,在电磁驱动力、弹簧力等的作用下,实现了阀门在 $2\sim 5\text{ s}$ 内的快速开启动作,实现了阀门的精密调节功能,实现了耐高温、高精度、具有补偿功能的平衡弹簧阀芯系统设计。

3 试验验证

稳压器喷淋阀是核电站一回路系统的重要设备,为确保研制产品满足电厂的设计要求并成功落地应用,根据阀门在电厂中的安装位置及所在环境条件、运行老化等要求,确定了样机的鉴定试验项目^[13-15]如表2所示。其中阀门本体承压机械组件的鉴定参照ASME QME-1^[16]确定,阀门电磁驱动执行器按照RCC-E K2级的要求确定,阀门配套控制器按照RCC-E K3级的要求确定。

样机成功通过了表2所列的全套鉴定试验,证明本次研发的稳压器喷淋阀样机可满足机组一回路稳压器喷淋阀的正常运行老化及事故环境条件要求。

表2 电磁驱动型稳压器喷淋阀鉴定试验项目
Tab. 2 qualification test item for solenoid pressurizer spray valve

基准试验	型式试验	极限条件下的可运行性试验	设备性能随时间变化试验	事故模拟试验
承压性能试验	流量系数及固有流量特性试验	过电流试验	循环老化试验	阀门抗震试验
密封性能试验	开孔流量试验	加压循环试验	低温试验	控制器抗震试验
绝缘电阻试验	噪声试验	冷态可运行性试验	交变湿热试验	DBA 辐照老化试验
绝缘强度试验	线圈允许温度试验	热态可运行性试验	热老化试验	LOCA 试验
控制优先级试验		电磁兼容试验	辐照老化试验	/
动作性能试验	/	端部加载试验	振动老化试验	/
调节性能试验	/	/	循环老化试验	/
控制优先级试验	/	/	低温试验	/

4 结 论

通过本次自主化研发,掌握了电磁驱动型稳压器喷淋阀设计技术,解决了电磁驱动结构的技术难点和阀门在高温高压介质的工况适应性问题,实现了电磁驱动型稳压器喷淋阀的系统功能,满足三代核电稳压器喷淋阀的发展需求。同时,采用电磁驱动型控制阀,可减少核岛内气源的布置并实现阀门的快速响应与调节控制,拥有传统气动及电动型控制阀不可替代的技术优势,具有可观的市场前景,可在后续核电项目及类似民用市场中推广应用。

参考文献:

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备(上、下册) [M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
Guangdong Nuclear Power Training Center. 900 MW PWR nuclear power plant system and equipment (part I and part II) [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005.
- [2] 法国核岛设备设计、建造及在役检查规则协会. 压水堆核岛机械设备设计和建造规则: RCC-M-2007 [M]. 北京: 中国核电工程有限公司, 2007.
AFCEN. Design and conception rules for mechanical components of PWR nuclear islands: RCC-M-2007 [M]. Beijing: China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., 2007.
- [3] 法国核岛设备设计、建造及在役检查规则协会. 压水堆核电站核岛电气设备设计和建造规则: RCC-E-2005 [M]. 深圳: 深圳中广核工程设计有限公司, 2005.
AFCEN. Rules for design and construction of electrical equipment for PWR nuclear island: RCC-E-2005 [M]. Shenzhen: China Nuclear Power Design Co., Ltd., 2005.
- [4] Fluid Controls Institute, Inc. Control valve seat leakage: ANSI FCI 70-2-2006 [S]. Ohio: Fluid Controls Institute, Inc., 2006.
- [5] 陈刚, 王志敏, 张宗列. 比例喷雾阀的研制 [J]. 阀门, 2011 (4): 14-15+24. DOI: 10.16630/j.cnki.1002-5855.2011.04.014.

- CHEN G, WANG Z M, ZHANG Z L. Development of pressurizer spray control valve [J]. Valves, 2011(4): 14-15+24. DOI: 10.16630/j.cnki.1002-5855.2011.04.014.
- [6] 祁崇可. 核电厂稳压器喷雾阀阀芯结构和等百分比流量特性补偿研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
QI C K. The disc structure and equal percentage flow characteristic analysis of pressurize spray valve of nuclear power plants [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [7] 施宝新. 核一级稳压器喷雾阀特性分析与结构设计 [J]. 阀门, 2019(6): 10-12+15. DOI: 10.16630/j.cnki.1002-5855.2019.06.003.
SHI B X. Characteristic analysis and structure design of nuclear class1 pressure regulator spray valve [J]. Valves, 2019(6): 10-12+15. DOI:10.16630/j.cnki.1002-5855.2019.06.003.
- [8] 陆培文. 控制阀实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
LU P W. Practical valve design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [9] 杨源泉. 阀门设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
YANG Y Q. Valve design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [10] 杨化飏. 稳压器喷雾阀流动规律与安全分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
YANG H B. Flow law and safety analysis of spray valve of pressurizer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] 薛阳, 林静, 李媛, 等. 基于自抗扰的核电站稳压器压力控制研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 1(1): 127-131. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2014.01.029.
XUE Y, LIN J, LI Y, et al. Research on pressure control of pressurizer at nuclear power plant based on active disturbances rejection controller [J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 127-131. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2014.01.029.
- [12] 张国铨, 杨旭红, 卢栋青, 等. 核反应堆稳压器水位和压力控制系统研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(1): 35-38+42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3932.2013.01.011.
ZHANG G D, YANG X H, LU D Q, et al. Research on water level and pressure control system of nuclear reactor regulator

- [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(1): 35-38+42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3932.2013.01.011.
- [13] 上海发电设备成套设计研究院. 核电厂用能动机械设备的鉴定 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2007.
Shanghai Power Equipment Research Institute. Qualification of active mechanical equipment used in nuclear power plants [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Literature Press, 2007.
- [14] IEEE Standard for Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities: IEEE 382-2019 [S]. New York: IEEE, 2019.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业过程控制系统用电动控制阀: JB/T 7387—2014 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Ministry of Industry Information Technology of the People's Republic of China. Electrical control valves for industrial-process control systems: JB/T 7387—2014 [S]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [16] ASME. Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Facilities: QME-1-2017 [S]. New York: ASME, 2017.

作者简介:



曹月秋

1971-, 男, 鞍山岫岩人, 鞍山电磁阀有限责任公司高级工程师, 主要从事阀门自主化研发和阀门设计制造等工作 (e-mail) dcf_cyq@163.com。

曹月秋

曹晓宁 (通信作者)

1986-, 女, 陕西商洛人, 中广核工程有限公司高级工程师, 西北工业大学材料科学与工程学士学位, 主要从事阀门自主化研发和阀门合同管理等工作 (e-mail) caoxiaoning@cgnpc.com.cn。

蒋晓红

1971-, 四川绵阳人, 正高级工程师, 学士, 主要从事阀门设备成套工作 (e-mail) jiangxiaohong@cgnpc.com.cn。

项目简介:

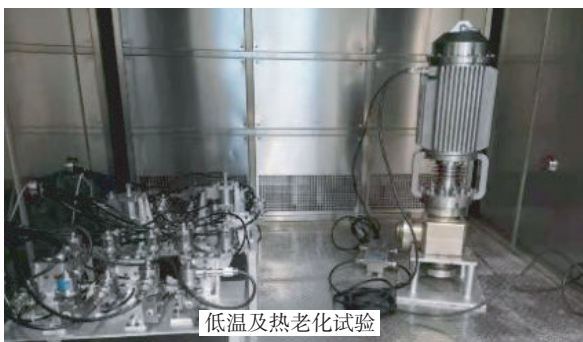
项目名称 高温高调节性能电磁驱动角式控制阀 (2019ZX06004014)

承担单位 中广核工程有限公司、鞍山电磁阀有限责任公司

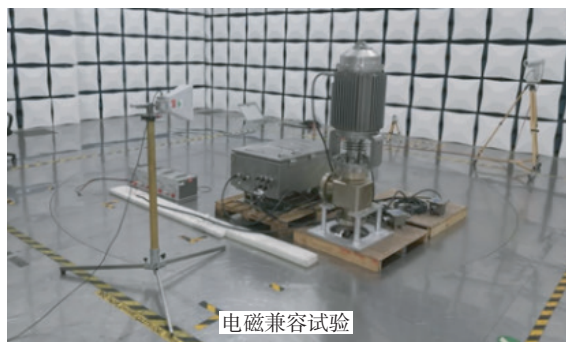
项目概述 高温高调节性能电磁驱动角式控制阀项目结合当前三代先进压水堆核电机组对稳压器喷雾阀的技术要求及稳压器喷雾阀在系统中所执行功能要求, 开展高温高调节性能电磁驱动角式控制阀的研制技术要求及鉴定要求研究和高温高调节性能电磁驱动角式控制阀的详细设计、制造、鉴定技术研究工作, 完成高温高调节性能电磁驱动角式控制阀的样机制造以及样机的全部鉴定工作, 实现高温高调节性能电磁驱动角式控制阀的自主化、国产化和产业化。

主要创新点 (1) 耐高温、高精度、具有补偿功能的平衡弹簧阀芯系统设计; (2) 核安全 1 级无外漏整体式高强度屏蔽套制造技术; (3) 耐高温、耐高辐照环境的电磁驱动设计。

(责任编辑 叶筠英)



低温及热老化试验



电磁兼容试验



端部加载试验



振动老化试验