

核电厂应急柴油发电机先导电磁阀改进研究

符江, 张兰岐, 陶国良, 向方成, 刘胜智, 初向南, 王小军, 殷玉龙

Research on Improvement of Pilot Solenoid Valve for Emergency Diesel Generator in Nuclear Power Plant

Fu Jiang, Zhang Lanqi, Tao Guoliang, Xiang Fangcheng, Liu Shengzhi, Chu Xiangnan, Wang Xiaojun, and Yin Yulong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.06.0226>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂MSIV电磁阀性能检测系统开发

Development of Performance Test System for MSIV Solenoid Valves in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2018, 39(3): 119–121

风险指引的核电厂应急柴油发电机返厂大修分析

Risk-Informed Analysis of Nuclear Power Plant Emergency Diesel Generator Returning to Factory for Overhaul

核动力工程. 2021, 42(6): 225–229

核电厂松脱事件报警及应急响应研究

Research on Event Alarm and Emergency Response of Loose Parts for Nuclear Power Plants

核动力工程. 2018, 39(5): 181–182

福清核电厂汽轮发电机组非核蒸汽冲转可行性研究分析及优化

Feasibility Analysis and Optimization for Turbo-Generator Rushing with Non-Nuclear Steam in Fuqing Nuclear Power Plant

核动力工程. 2018, 39(3): 122–127

核电厂主给水系统再循环阀设计布置试验研究

Experimental Study on Design and Layout of Recirculation Valve for Main Feedwater System of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(6): 155–158

核电厂主蒸汽隔离阀控制系统故障分析及可靠性提升

Failure Analysis and Reliability Improvement of Control System of Main Steam Isolation Valve in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2021, 42(1): 138–142



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)06-0226-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.06.0226

核电厂应急柴油发电机先导电磁阀改进研究

符江¹, 张兰岐², 陶国良³, 向方成¹, 刘胜智¹,
初向南⁴, 王小军⁴, 殷玉龙²

1. 苏州热工研究院有限公司, 广东深圳, 518000; 2. 中广核核电运营有限公司, 广东深圳, 518000;
3. 浙江桃园智能科技有限公司, 浙江湖州, 313000; 4. 阳江核电有限公司, 广东阳江, 529500

摘要: 核电厂内应急柴油发电机的压缩空气启动系统采用的先导电磁阀频繁故障, 主要表现为无法正常开关和卡涩漏气, 此故障将影响柴油发电机的压缩空气启动系统的可靠性和可用性, 直接导致柴油发电机不可启动。针对该问题, 通过功能测试和拆解发现了先导电磁阀结构设计上的缺陷, 明确了故障发生的根本原因因为先导电磁阀复位结构不合理。改进措施主要包括主阀体结构改进、阀芯装配干涉结构改进、主阀芯导向结构改进、主阀芯复位弹簧改进以及先导电磁阀中的动铁芯压接喷嘴通径及线圈功率改进。改进后的先导电磁阀顺利完成了全部鉴定试验测试。测试结果表明, 改进后的先导电磁阀解决了无法正常开关及卡涩漏气的故障, 提升了应急柴油发电机空气启动回路的可靠性。

关键词: 核电厂; 先导电磁阀; 卡涩漏气; 拒动

中图分类号: TL353⁺.11 **文献标志码:** A

Research on Improvement of Pilot Solenoid Valve for Emergency Diesel Generator in Nuclear Power Plant

Fu Jiang¹, Zhang Lanqi², Tao Guoliang³, Xiang Fangcheng¹, Liu Shengzhi¹,
Chu Xiangnan⁴, Wang Xiaojun⁴, Yin Yulong²

1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China;
2. China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China;
3. Zhejiang Taoyuan Intelligent Technology Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang, 313000, China;
4. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong, 529500, China

Abstract: The pilot solenoid valve used in the compressed air start-up system of emergency diesel generator in nuclear power plant fails frequently, and the failure modes are mainly manifested as inability to switch normally and jamming and air leakage. This failure will affect the reliability and availability of the compressed air start-up system of diesel generator and directly lead to the failure of diesel generator to start. In order to solve this problem, the defects in the structural design of the pilot solenoid valve were found through functional testing and disassembly, and it was clear that the root cause of the failure was the unreasonable reset structure of the pilot solenoid valve. The improvement measures mainly include the improvements of the main valve body structure, spool assembly interference structure, main spool guide structure, main spool return spring, diameter of the moving iron core crimping nozzle and the coil power of the pilot solenoid valve. The improved solenoid valve successfully completed all qualification tests. The test results show that the improved solenoid valve solves the failure of normal switching and jamming and air leakage, and improves the reliability of the air starting circuit of the emergency diesel generator.

Key words: Nuclear power plant, Pilot solenoid valve, Jamming and air leakage, Not working

收稿日期: 2022-12-22; 修回日期: 2023-03-03

作者简介: 符江(1985—), 男, 高级工程师, 现主要从事在役核电厂技术改造、设备鉴定研究及相关管理工作, E-mail: fujiang2@cgnpc.com.cn

0 引言

应急柴油发电机组作为核电厂应急安全电源与核安全直接相关，目的是在核电厂的厂用工作电源和辅助电源都发生故障时，确保机组安全停堆和防止关键设备损坏。应急柴油发电机本身没有自行启动能力，要使静止的柴油发电机转动起来，必须借助于外力，而压缩空气系统可以创造柴油发电机获得第一个工作行程的条件，即在压缩空气的作用下进行进气、压缩、喷油，直至燃油燃烧膨胀做功才能推动活塞自行转动达到额定转速，获得满足要求的频率和电压^[1]。压缩空气启动系统中的启动先导电磁阀是重要的安全级设备，如果先导电磁阀出现故障，将直接影响应急柴油发电机的正常启动，不利于保障核电厂系统设备的应急安全供电。从目前的统计数据发现，应急柴油发电机使用的先导电磁阀出现拒动、卡涩漏气的故障非常频繁，但由于压缩空气启动系统的前导电磁阀是冗余配置，发生共模故障的风险概率较低，尽管如此当前先导电磁阀频繁故障的现状依然不可接受，急需进行改进。

本文根据 16 项功能测试的试验结果和对先导电磁阀的彻底拆解，仔细查找并分析故障原因，综合考虑对先导电磁阀进行了改进。

1 先导电磁阀工作原理

先导电磁阀主要由先导电磁机构和阀体两大部分组成，其主要组成部件见图 1。

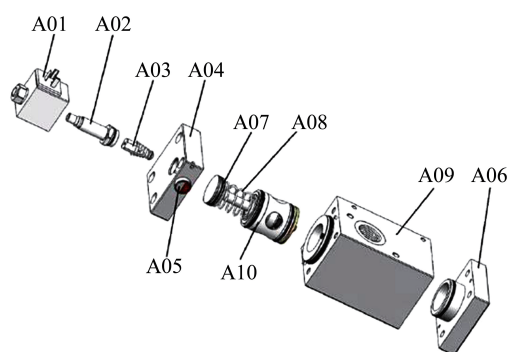


图 1 先导电磁阀组成部件示意图
Fig. 1 Components of Solenoid Valve

A01—先导电磁阀线圈；A02—先导电磁阀磁性管；A03—动铁芯；A04—阀体上端盖；A05—手动开关；A06—阀体下端盖；A07—主阀芯；A08—复位弹簧；A09—主阀体；A10—上下阀口环

先导电磁阀为先导气控 2 位 3 通结构，工作原理示意图如图 2 所示。

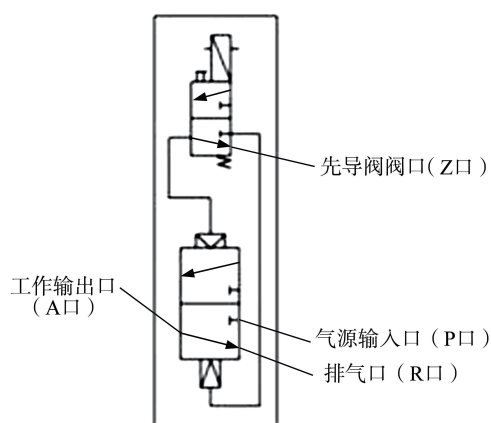


图 2 先导电磁阀工作原理示意图
Fig. 2 Schematic Diagram of Working Principle of Solenoid Valve

P 口为一直带工作气压状态，当先导电磁阀中的先导电磁阀线圈不通电时，A 口与 R 口导通，A 口无气压输出；先导电磁阀动铁芯在弹簧的作用下压紧 A04 内喷嘴（该喷嘴与动铁芯紧密压接，所以在文中统称为动铁芯压接喷嘴），动铁芯压接喷嘴被压紧使得主阀体气腔室内无气压；当电磁铁通电后，先导电磁阀线圈工作，动铁芯在电磁力的作用下动作，不再压紧动铁芯压接喷嘴，使得 P 口与主阀体内的气腔室导通，驱动先导电磁阀主阀芯工作，使 P 口与 A 口导通，A 口输出气压；当电磁铁失电后，先导电磁阀动铁芯在复位弹簧的作用下再次压紧动铁芯压接喷嘴，主阀体内的气腔室失去气压，主阀芯复归原位，使得 A 口与 R 口导通，A 口无气压输出。应急状况下，可以手动旋转应急手控旋钮，手动推动动铁芯动作，将 Z 口打开，气源可从 P 口直接进入主阀体气腔室。

2 先导电磁阀的故障原因分析

电磁阀通过电磁线圈通电产生电磁驱动力驱动先导电磁阀动铁芯，气压进入主阀体气腔室驱动主阀芯使得 P 口与 A 口连通，气压进入下游；关闭时，通过切断电磁线圈，电磁驱动力消失，动铁芯在复位弹簧的作用下复归初始位置，使得 A 口和 R 口连通，主阀体内的气体排空，先导电磁阀复归初始位置。

按照表 1 的 16 项功能测试进行测试试验，并进行原因分析^[2]，确定导致先导电磁阀漏气及

表1 先导电磁阀功能测试项目表

Tab. 1 Item List for Solenoid Valve Function Test

序号	测试类别	测试对象与目的
1	性能测试	最小启动电压测试
2	性能测试	工作压差测试
3	性能测试	湿热环境影响试验
4	性能测试	电磁阀线圈温升测试
5	性能测试	绝缘电阻测试
6	性能测试	绝缘强度测试
7	性能测试	泄漏量测试
8	性能测试	密封性测试
9	性能测试	耐压强度测试
10	性能测试	额定流量系数测试
11	性能测试	响应时间测试
12	电磁铁静态特性测试	测试电磁阀的静态特性曲线: ①位移—力特性曲线(任意设定一个电流不变); ②电流—力特性曲线(任意设定一个位移不变); ③通过改变电磁铁环境温度测试静态特性曲线
13	电磁铁动态响应测试	可通过系统调节电磁铁的负载大小, 通过激光传感器测试电磁铁的位移响应特性, 可通过改变电磁铁环境温度测试动态特性曲线
14	机械振动影响测试	识别振动影响
15	动作可靠性寿命测试	记录20000次循环过程中的开关波形判断, 发现开关波形异常时系统自动发送报警信息, 实时记录20000次循环过程中每个开关过程的响应时间、电参数值
16	异物卡涩测试	改进先导电磁阀动铁芯压接喷嘴设计

卡涩故障与这些部件相关: ①电磁线圈、电磁铁静铁芯、动铁芯及密封垫; ②手动开关及密封圈; ③驱动阀芯及密封圈; ④主阀体、密封圈、油脂及主阀芯; ⑤气控复位。

经分析, 发现异物和结构设计缺陷是造成先导电磁阀漏气及卡涩故障的原因。

2.1 异物

(1) 异物导致先导电磁阀动铁芯压接喷嘴堵塞, 造成先导电磁阀无法打开或关闭。

(2) 异物导致先导电磁阀动铁芯卡死, 造成先导电磁阀无法打开或关闭。

(3) 异物导致动铁芯上下两端的密封垫关闭不严, 造成先导电磁阀漏气。

(4) 异物造成主阀芯与主阀体摩擦力变大, 打开、关闭时出现漏气及卡涩故障。

2.2 结构设计缺陷

(1) 先导电磁阀中动铁芯压接喷嘴, 容易出现堵塞。

(2) 主阀芯没有导向环, 摩擦力大。

(3) 主阀芯只有单边导向, 容易卡死。

(4) 气控复位结构容易造成主阀芯在运动过程中出现大量漏气而失去驱动力, 从而无法复位。

2.3 改进措施

综上所述问题, 针对性地制定改进措施如下:

(1) 将主阀芯单边导向改为双边导向, 可减小主阀芯摩擦力。

(2) 增加主阀芯复位弹簧, 在气控复位驱动力不足时, 通过复位弹簧驱动主阀芯复位。

(3) 加大先导电磁阀动铁芯压接喷嘴通径(电磁铁动铁芯、静铁芯和线圈功率同时加大), 可使主阀芯的运动速度明显加快, 不容易出现卡涩漏气现象。

3 先导电磁阀改进方案

本研究基于定位功能测试实验结果和拆解后的故障原因分析基础之上, 结合2.3节的改进措施, 针对性地执行一系列具体的改进方案。

3.1 主阀体改进

改进后大大降低了主阀体的加工装配工艺难度, 提升了加工装配精度, 零部件可独立更换。

3.2 阀芯装配干涉结构改进

改进前, 先导电磁阀A口与主阀芯相交, 在主阀芯安装过程中会导致主阀芯密封圈被切割而损坏, 直接导致密封失效产生漏气现象。改进后,

将先导电磁阀 A 口向主阀体下部移动 9 mm，改进了 A 口与主阀芯的相交结构，增设了倒角弧度设计，避免了主阀芯密封圈的损坏。

3.3 主阀芯导向结构改进

改进前，先导电磁阀主阀芯密封结构存在设计缺陷，会偶发性出现卡涩问题以及 A 口与 R 口的串气问题长期存在。改进后，将主阀芯密封结构导向长度加长并采取倒角弧度设计，消除了先导电磁阀主阀芯单边导向和卡涩以及 A 口与 R 口的串气问题。

3.4 主阀芯复位弹簧改进

改进前，主阀芯未设计复位弹簧，在气控复位驱动力不足时易出现卡涩，为改进设计缺陷，增加主阀芯复位弹簧，在气控复位驱动力不足时，通过复位弹簧驱动主阀芯复位，消除了原设计缺陷。

3.5 先导电磁阀动铁芯压接喷嘴通径与线圈功率改进

改进前，先导电磁阀动铁芯压接喷嘴通径为 0.75 mm，线圈功率为 6.1 W，原设计先导电磁阀动铁芯压接喷嘴通径较小并且线圈设计功率较低，易卡涩，导致漏气故障发生。改进后增大动铁芯压接喷嘴通径，通径从 0.75 mm 增加到 1.00 mm，线圈功率从 6.1 W 增加到 17 W，则不容易出现卡涩漏气现象。

改进后先导电磁阀线圈功率相比较改进前有所升高，但是经核查上游配电盘容量裕度较大，所以不会对上游设备造成影响，电缆依旧可以继续使用。

3.6 密封材料改进

先导电磁阀动铁芯压接喷嘴的密封材料要求密封性好、不变形、耐磨性好，所以对密封材料的弹性、耐磨性、耐温性有极高的要求，先后对氟橡胶、聚四氟乙烯（PTFE）、沙林、聚氨酯（PU）、聚醚醚酮（PEEK）等材料进行了大量的试验，其中氟橡胶硬度最大，但只能在极限环境温度 92℃ 下使用，在高压下会泄漏；PTFE 密封性能好，但是由于太软，随着工作次数的增加变形严重；沙林的弹性好，硬度符合要求，密封性好，但是在环境温度 90℃ 以上时材料变软；PEEK 硬度高、密封性好、耐高温性能好，但是在长时间冲击情况下，会出现表面破损和微漏；

PU 硬度高、耐高温性能好、弹性好、密封性好，在长时间工作情况下，性能稳定，经反复测试选择 PU 作为密封材料。

经过上述改进后的先导电磁阀已经制造出来，其全部零部件实物如图 3 所示。每一个零部件都可以单独更换，很好地契合了运行与维护人员的需求，更符合现场实际的应用需要。



图 3 先导电磁阀全部零部件实物图
Fig. 3 All Parts Of Solenoid Valve

4 质量鉴定与试验验证

根据法国《核岛电气设备设计和建造规则》（RCC-E）的分类，质量鉴定等级包含 K1、K2 和 K3 级。K3 级为保证安装在安全壳外，验证设备在正常环境条件下和地震载荷下能够执行其规定功能的鉴定等级^[3-4]。

根据设计基准文件和《核电厂应急柴油发电机压缩空气启动系统设计准则》（NB/T 20473-2017）的要求，本研究对象先导电磁阀为安全级阀门，质量鉴定等级为 RCC-E K3 级，必须进行质量鉴定试验。

根据《应急柴油发电机空气启动先导电磁阀鉴定试验大纲》和《核电厂安全级阀门驱动装置用电磁阀鉴定规程》（NB/T20206—2013）^[5]的要求完成了 32 项鉴定试验，试验结果符合鉴定大纲要求和相关规范要求，达成改进设计的预期目的。同时也证明改进后的先导电磁阀能较好地

解决原先导电磁阀的设计缺陷引发的故障问题。

5 结束语

针对原先导电磁阀结构设计缺陷引发的频繁拒动、卡涩漏气的故障问题，针对性地制定了改进方案，国产化研发改进后先导电磁阀创新性地采用了自复位、双边导向、分体式组合方式等改进措施，成功完成了《应急柴油发电机空气启动先导电磁阀鉴定试验大纲》要求的全部试验。根据改进方案并加工制造完成的先导电磁阀已在国内某核电厂应急柴油发电机压缩空气启动系统上安装使用，符合预期设计要求，保障了核电厂的安全稳定运行。

改进后先导电磁阀已申请发明专利《先导式电磁阀》（编号 202211337699.1），未来还可广泛应用于能源、工业、民用领域的应急柴油发电

机压缩空气启动系统。

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 [M]. 北京：中国原子能出版社，2007：544-559.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业过程控制系统用电磁阀：JB/T 7352—2010[S]. 北京：机械工业出版社，2010：2-11.
- [3] 黄伟杰，张宓，张云波，等. 核电厂数字化仪表控制系统设备鉴定方法研究 [J]. 核动力工程，2014，35(6)：111-114.
- [4] AFCEN. Design and construction rules for electrical equipment of nuclear island: RCC-E[S]. France: AFCEN, 2005.
- [5] 国家能源局. 核电厂安全级阀门驱动装置用电磁阀鉴定规程：NB/T 20206—2013[S]. 北京：核工业标准化研究所，2013：19.

（责任编辑：刘 君）