

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.012

MSIV 先导阀无法开启故障分析及改进研究*

胡银龙

(中国核能电力股份有限公司 江苏核电有限公司,江苏 连云港 222000)

摘要:针对田湾核电站主蒸汽快速隔离阀的电磁先导阀无法开启的故障问题,对电磁先导阀的弹簧力、电磁执行机构的电磁力等方面因素进行了全面的分析。通过直动式电磁铁静态特性试验获取了电磁执行机构的电磁力与工作气隙的关系,结合电磁先导阀机械行程与电磁执行机构行程匹配设定方法、电磁执行机构的温升特性以及环境温度,对电磁执行机构工作性能影响进行了多方面的改进试验,并进行了改进后的温升试验及额定工况的运行试验验证。研究结果表明:通过减小电磁执行机构工作气隙和降低电磁执行机构工作温度,电磁先导阀的开启可靠性得到了大幅提高,改进后的电磁先导阀未再出现无法开启或开启一段时间后意外关闭故障。

关键词:主蒸汽快速隔离阀;电磁先导阀;弹簧力;电磁力

中图分类号:TH138.52;TP277

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0174-05

Defect analysis and improvement of the MSIV pilot valve

HU Yin-long

(Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., China National Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Aiming at the fail to open problem of the solenoid operated pilot valve of the MSIV in TNPS, the spring force of the pilot valve, the electromagnetic force of the electromagnetic actuator and other factors were researched. The relationship between the electromagnetic force and the working air gap of the electromagnetic actuator was obtained through the static characteristics of direct-acting electromagnet test, and some improvement work performance impact tests were done, combined with the mechanical stroke of the pilot valve and the adjust method of the working air gap of electromagnetic actuator, the temperature rise characteristics and the ambient temperature affect to the performance of the electromagnetic actuator, the temperature rise test and operation test under rated condition were done after the improvement. The results indicate that the opening reliability of the electromagnetic pilot valve can be greatly improved by reducing the air gap of electromagnetic actuator and the operating temperature of electromagnetic actuator, the improved electromagnetic pilot valve has not been unable to open or accidentally shut down after a period of time.

Key words: main steam isolation valve; solenoid operated pilot valve; spring force; electromagnetic force

0 引言

田湾核电站主蒸汽快速隔离阀为介质自驱动阀门,由3台电磁先导阀保证其快速、可靠地动作,事故工况下保护蒸汽发生器及主蒸汽管道的安全。同时,在机组处于停机冷却阶段,当主蒸汽系统压力低于0.6 MPa时,打开先导阀MV3,将压缩空气供入主蒸汽快速隔离阀活塞缸下腔,维持主蒸汽快速隔离阀处于

开启状态,保证蒸汽发生器的冷却。在近10年的运行过程中,多次出现先导阀MV3通电后无法开启故障,导致主蒸汽快速隔离阀关闭。

EPRI将电磁阀无法开启故障的主要原因总结为电力故障、部件粘滞、压差作用,但对于不同结构类型和运行工况的电磁先导阀,其原因不尽相同^[1]。电磁执行机构为电磁阀提供开启的动力,贾玥等^[2]利用Maxwell仿真分析,指出了直动式电磁阀的电磁力随线

收稿日期:2018-07-04

作者简介:胡银龙(1989-),男,河南南阳人,大学本科,工程师,主要从事核电厂阀门维修方面的研究。E-mail:huyil01@cnnp.com.cn

圈电阻、衔铁运动行程的减小而增大;王露等^[3]则通过仿真和实验研究了电磁执线圈的温升特性,通过研究可以看到电磁线圈的温度在带电后温升较快,但最终会达到热平衡状态,这也说明电磁线圈的电阻及电磁力最终会达到稳定状态。

本研究以阀芯受力分析为基础,结合计算和试验,确定导致电磁先导阀无法开启的原因,制定改进措施,并进行试验验证。

1 阀门开启影响因素分析

先导阀为电磁驱动式截止阀,阀门结构图如图1所示。

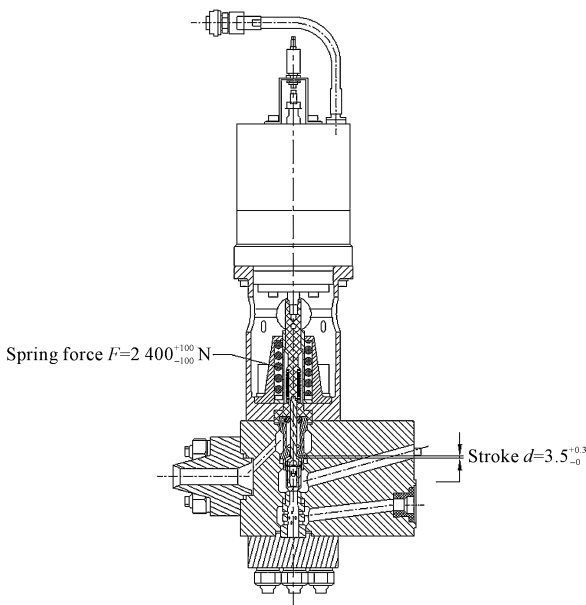


图1 先导阀结构图

阀芯在弹簧力的作用下处于关闭状态,并保证可靠的密封;当先导阀通电时,电磁执行机构线圈带电(198 VDC),衔铁在电磁力的作用下克服弹簧力、摩擦力及运动部件的重力带动推杆将阀芯提升至全开状态。由于先导阀的行程短,而弹簧力很大,对阀芯的受力分析可忽略阀杆摩擦力及运动部件的重力;系统作用力不超过 87.2 N,相对较小。因此,先导阀阀芯受力主要为电磁力 F_m 和弹簧力 F_s 。

1.1 弹簧力分析

弹簧力可根据阀门行程的变化进行调整,20 °C 室温下设定初始弹簧力 $F_{s0} = 2\ 400\ \text{N}$,阀门开启后弹簧被压缩 3.5 mm,弹簧力最大为 3 275 N^[4]。

在阀门处于关闭位置时,弹簧力为先导阀阀芯提供可靠的密封力,使密封副之间形成足够的密封比压;通过计算密封比压,验证弹簧力的设定是否合理,并确

定是否可以适当减小弹簧力。

根据文献[5-6],在设计温度下阀芯密封面材料的许用比压为:

$$[q] = \min\left\{\frac{R_m}{2.4}, \frac{R_{p0.2\%}}{1.5}\right\} \approx 312.5\ \text{MPa} \quad (1)$$

根据文献[7],先导阀密封面所需要的密封比压为:

$$Q_{MF} = 1.4 \times \frac{(3.5 + PN)}{\sqrt{\frac{b_M}{10}}} \approx 84.9\ \text{MPa} < [q] \quad (2)$$

式中: b_M —密封面宽度。

根据文献[8],密封面的计算比压为:

$$q_{MZ} = \frac{Q_{MZ}}{\pi(D_{MN} + b_M)} \approx 107.9\ \text{MPa} < q_{MZ} < [q] \quad (3)$$

先导阀电磁弹簧材质为 Inconel X-750,以 100 °C 作为弹簧的上限温度,此时弹簧的弹性系数受温度影响的系数为 0.978,而弹簧力 $F_{S100\text{ °C}} = 2\ 347\ \text{N}$, $q_{MZ100\text{ °C}} = 103.8\ \text{MPa}$,此时密封面的计算比压必须比压高 22%。

先导阀密封面研磨的光洁度很高(达 N1),但是由于阀芯的导向作用较差,阀芯与阀座密封面的接触情况不是很好,先导阀需要较高的密封比压才能实现较好的密封^[9]。通过计算,弹簧的大小符合设计要求,在运行状态下密封面的计算比压必须比压高 22%,而在实际运行过程中,先导阀存在较普遍的内漏问题,因此不能通过减小弹簧力的方法来提高阀门开启的可靠性。

1.2 电磁力分析

先导阀的电磁驱动机构的铭牌行程为 4.5 mm。根据文献[10-11]中有关直动式电磁铁电磁力的工程计算方法,推导出电磁铁的电磁吸力公式为:

$$F_m = \frac{\mu_0 \pi d_0^4 U^2 (d_1^2 - d_2^2)}{32 \rho^2 K_f^2 (D_1 + D_2)^2 \delta^2} \times 10^6\ \text{N} \quad (4)$$

式中: F_m —电磁力; μ_0 —磁导率; d_0 —绕线铜芯直径; d_1 —衔铁外径; d_2 —衔铁内径; D_1 —绕线外径; D_2 —绕线内径; ρ —电阻率; δ —衔铁工作气隙; K_f —漏磁系数; U —驱动电压。

通过计算公式可知,电磁力 F_m 主要受 $1/(\rho^2 \delta^2)$ 大小的影响。

1.2.1 先导阀动态特性分析

先导阀动作过程中的动态电流可以反映衔铁的运动情况^[12]。通过文献[13]中先导阀的动态特性曲线可知,先导阀的吸合电流约为 0.65 A,而稳态电流约

为 0.81 A,吸合电流比高达约 80%,说明在按照维修手册规定的条件下,先导阀的电磁力冗余不高。

1.2.2 电阻率的分析

先导阀所处的局部环境温度及电磁线圈自身的温升都会影响电阻率的大小,进而影响电磁力,而电磁率与线圈直阻相对应。

本研究选用一台按照维修手册规定完成装配的先导阀,并参考文献[14]中的试验方法进行温升试验,温升试验初始参数如表 1 所示。

表 1 温升试验初始参数

名称	数值	单位
环境温度	20	℃
电压	198	V(DC)
线圈直阻	237.5	Ω
弹簧力	2 374	N
阀门行程	3.6	mm

试验结果表明:电磁线圈在带电后温升较快,电磁线圈的温升导致电磁力快速下降。当完成 47 次直阻测量后,电磁执行机构的直阻为 303.2 Ω,计算出电磁线圈的温度约为 90 ℃,电磁线圈平均温升约 70 ℃,电磁先导阀已无法开启,说明此时电磁吸力小于 2 374 N。

主蒸汽快速隔离阀保温设计厚度为 260 mm,保温材料在 25 ℃ 温度下导热系数为 0.031 W/(m·K)。由于安装空间受限,导致保温施工困难,且电磁执行机构周围区域的保温厚度被削减为 80 mm 左右,导致电磁执行机构靠近主蒸汽快速隔离阀一侧处于保温的局部包围中。红外热成像显示,电磁执行机构区域的最高温度超过 100 ℃,从而使线圈直阻升高。

1.2.3 电磁力与气隙

为了使电磁执行机构与阀门行程进行匹配,保证阀门在完成装配后能够达到全开、全关,需对电磁执行机构与阀门行程进行匹配性调整,调整过程中本研究改变了电磁执行机构的工作气隙,从而改变了电磁力的大小。

维修手册规定通过调整波纹管与电磁执行机构推杆之间的垫片厚度来进行匹配性调整。调整垫片厚度计算方法为:

$$g = \frac{e - s}{2} \tag{5}$$

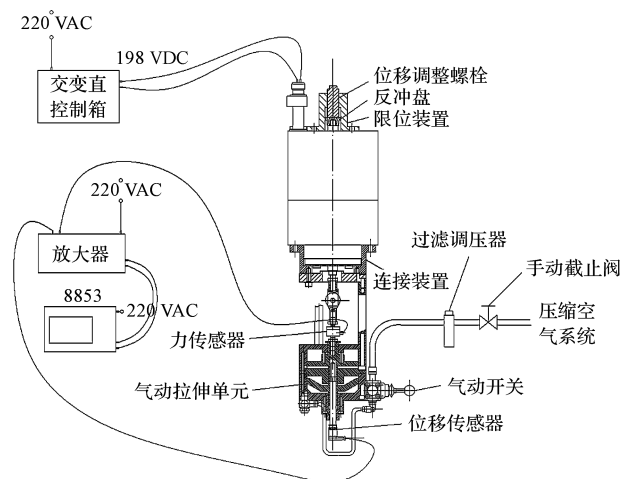
$$h = f + g - b \tag{6}$$

式中:g—衔铁调整高度;e—电磁执行机构行程;s—阀门行程;f—轭架顶端到波纹管的距离;b—电磁执行机构推杆到法兰的距离。

为了方便计算,维修程序中增加了简化计算公式 $h = f - b + 0.5$,在维修手册规定条件下,两种计算方法的结果基本一致。

电磁铁较小的结构及尺寸差异都会引起电磁力较大的改变^[15]。由于无法获取电磁执行机构各零部件的详细尺寸,从而无法通过数值仿真或工程计算的方法得到电磁执行机构较准确的电磁力大小。

在实际的测量中发现,衔铁的行程超过 5.8 mm,较铭牌标示的行程大至少 1.3 mm。为了较准确地得到电磁执行机构的电磁力与工作气隙的关系,并确认电磁执行机构是否能在超出的 1.3 mm 气隙内正常工作,进行了电磁执行机构的静态特性试验,电磁力测量系统如图 2 所示。



(a) 电磁力测量系统示意图



(b) 电磁力测量系统实物图

图 2 电磁力测量系统图

试验表明:电磁执行机构在 5.8 mm 的工作气隙中均能产生不同大小的电磁力,且电磁力与气隙基本呈线性关系,这说明电磁执行机构实际的可用工作气隙为 5.8 mm,其中 $F_{mMax} \approx 5\ 660\ N$, $F_{mMin} \approx 2\ 240\ N$ 。

通过对电磁力曲线进行线性简化,结合气隙的调整方法,对电磁力和弹簧力曲线进行拟合,拟合后的电磁力、弹簧力与工作位置的关系曲线如图 3 所示。

通过拟合曲线,执行机构通电后在阀门关闭位置时电磁力约为 2 594 N,先导阀弹簧力为 2 400 N,电磁

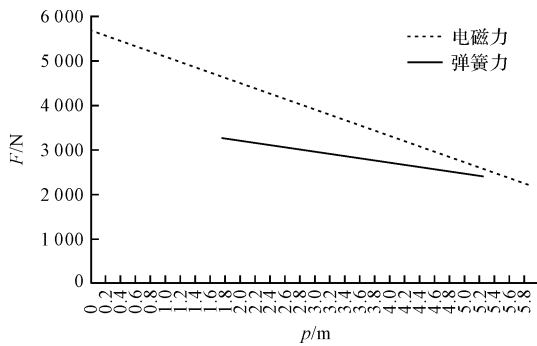


图3 电磁力、弹簧力与工作位置的关系曲线

力的冗余仅为 8.1% ;当先导阀处于开启状态时,电磁力约为 4 717 N,弹簧力约为 3 275 N,电磁力冗余为 44%。同时,通过拟合曲线可知,电磁执行机构的有效工作气隙未得到很好的利用。

2 改进措施

通过以上分析,解决先导阀无法开启的故障,可从降低电磁执行机构工作环境温度和优化电磁执行机构工作气隙两方面着手。

2.1 保温优化

为了降低电磁执行机构周围的环境温度,本研究在电磁执行机构区域的阀体保温基础上增加一层导热系数更低的纳米气凝胶毡保温棉。新增加的保温棉厚度为 10 mm, 25 ℃ 温度下的导热系数为 0.015 W/(m·K)。在保温施工方面,控制保温的搭接质量,在先导阀阀体之间用保温棉填充,并保证先导阀轭架有约 2/3 高度的裸露。

2.2 电磁执行机构工作气隙优化

为了更好地利用电磁执行机构的有效气隙,本研究综合考虑测量误差及部件的热膨胀对阀门开关动作的影响,并进行试验验证,本研究将衔铁的工作气隙调整为 $e' = s + 0.65$ mm。优化后电磁力、弹簧力与工作位置的关系曲线如图 4 所示。

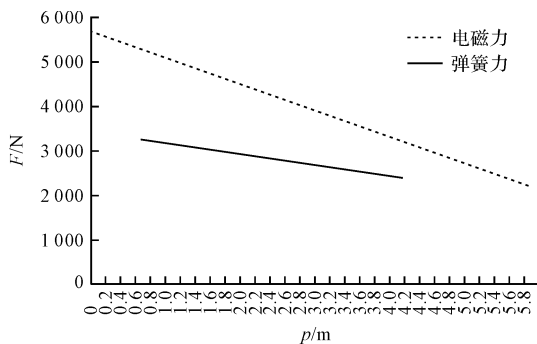


图4 优化后电磁力、弹簧力与工作位置的关系

通过拟合曲线可以得出,当阀门处于关闭状态时,优化后的电磁力约为 3 242 N,较优化前增加了约 648 N,电磁力冗余提高到了 35%。

通过分析并经验证,对调整垫片的计算公式优化为:

$$h = f - b + e - s - 0.65 \quad (7)$$

3 改进效果验证

根据分析,采取优化措施后电磁执行机构的工作环境温度会有所减低,而随着电磁执行机构的电磁力的提升,其耐温性能也将得到提高。

3.1 保温效果验证

通过对保温工艺的改进,一方面降低了阀体与电磁执行机构之间的热量传递,另一方面也保证了电磁执行机构拥有足够的散热空间。优化后电磁执行机构的平均温度降低至约 30 ℃,最高温度不超过 35 ℃。

3.2 耐温性能验证

为了验证气隙调整方法改进电磁执行机构的耐温性能,本研究进行了改进后的温升试验。改进后温升试验初始参数如表 2 所示。

表2 改进后温升试验初始参数

名称	数值	单位
环境温度	30	℃
电压	198	V(DC)
线圈直阻	243.6	Ω
弹簧力	2 468	N
阀门行程	3.85	mm

改进后线圈直阻随带电时间变化曲线如图 5 所示。

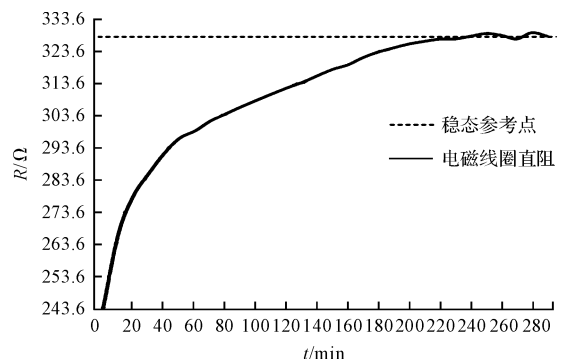


图5 改进后线圈直阻随带电时间变化曲线

试验中电磁先导阀共带电 280 min。通过试验可知,在带电约 220 min 后电磁线圈的直阻处于动态稳定状态。根据文献[16]中的温升确定方法,带电 220 min 后电磁执行机构已基本处于热平衡状态,电磁线圈在热平衡状态的直阻约为 329 Ω,平均温升 $\Delta t \approx$

92.6 °C, 平均温度 $t_2 \approx 122.6$ °C, 而对温度的适应能力 (约 90 °C) 提高了约 32.6 °C。

4 结束语

经过对主蒸汽快速隔离阀保温设计及施工工艺进行优化, 本研究有效地降低了电磁先导阀周围的环境温度; 同时, 通过减小电磁执行机构的工作气隙, 显著提高了电磁执行机构的电磁力。优化后, 电磁执行机构的耐温性能得到了提高, 电磁阀开启的可靠性也得到提高。

通过实际运行工况的在线验证, 改进后的电磁先导阀在随后 4 次换料大修停机冷却期间均能够正常开启, 未出现无法开启或开启一段时间后意外关闭故障, 圆满的解决电磁先导阀无法开启故障; 同时, 本文中所提出的保温工艺改进和电磁执行机构工作气隙的优化调整方法也为提高同类型先导阀开启可靠性提供了参考。

参考文献 (References) :

[1] EPRI. Solenoid valve maintenance guide [M]. Palo Alto: EPRI, 2003.

[2] 贾 玥, 李宝盛. 直动型电磁阀吸力可靠性分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (4) : 18-22

[3] 王 露, 刘潜峰, 薄涵亮. 直动电磁阀线圈温升实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (z1) : 479-482

[4] CCI A G. Main steam valve unit and components operating and maintenance manual [M]. Winterthur: CCI AG, 2002.

[5] BS EN 10088-3. Technical delivery conditions forsemi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosionresisting steels for general purposes [S]. British: BSI Standards Limited, 2014.

[6] CCI AG. Design calculations and stress analysis [M]. Winterthur: CCI AG, 2000.

[7] 王匡时译. 阀门设计与计算 [M]. 合肥: 通用机械研究所, 1974.

[8] 陆培文. 实用阀门设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[9] 古列维奇. 核动力装置用的阀门 [M]. 北京: 原子能出版社, 1988.

[10] 蔡国廉. 电磁铁 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.

[11] 张正原, 胡 妮. 电磁阀设计中电磁力自动计算方法 [J]. 现代机械, 2001 (3) : 20-23.

[12] 黄红耀, 何 斌. 电磁阀释放电流出现双波峰的机理分析 [J]. 火箭推进, 2007, 33 (5) : 50-54.

[13] CCI AG. LYGNPP 2 solenoid pilot valve to QICV MV3 to DAS560EB [M]. Winterthur: CCI AG, 2002.

[14] 许 建. 高压电磁阀用电磁铁关键技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2013.

[15] KALLENBACH E, EICK R, QUENDTP, et al. Elektromagnete grundlagen, berechnung, entwurfund and anwendung [M]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017.

[16] ELEKTROTECHNIK V. DIN-VDE-0580. Appareils électromagnétiquesetcomposantes-règlesgénérales [S]. Berlin: VDEV-erlag GmbH, 2000.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

胡银龙. MSIV 先导阀无法开启故障分析及改进研究 [J]. 机电工程, 2019, 36 (2) : 174 - 178.

HU Yin-long. Defect analysis and improvement of the MSIV pilot valve [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36 (2) : 174 - 178.