

# 浅谈核电厂用电磁阀

Preliminary Discussion on the Solenoid Valves Used in Nuclear Power Plant

纪永武<sup>1</sup> 熊冬庆<sup>2</sup>

(鞍山电磁阀有限公司<sup>1</sup>, 辽宁 鞍山 114300; 环境保护部核与辐射安全中心<sup>2</sup>, 北京 100082)

**摘要:** 安全是核电发展的关键。核电仪表和控制系统是核电站的“神经系统”,对核电站整体工艺流程能够正常、高效、安全地运行起着不可替代的重要作用。电磁阀在核电厂应用广泛,根据服务场合、控制介质和电气安全等级,对核电厂用电磁阀进行了分类,并介绍了核电厂用电磁阀设计制造的要求。以安全 1 级工艺管路用电磁阀为例,详细阐述了核电厂用电磁阀的设计制造要求和鉴定试验要求。核电厂用电磁阀有其特殊的要求,应严格按照其特殊要求进行设计制造,保证核电厂安全运营。

**关键词:** 安全 仪控系统 核电厂 电磁阀 标准规范 设计制造 安全等级

中图分类号: TH89 文献标志码: A

**Abstract:** Security is the key to the development of nuclear power, while the instrument and control system of nuclear power is the “nervous system” of nuclear power station, it is important and irreplaceable for ensuring normal, safety and efficient operation of the whole technological process of nuclear power station. Solenoid valves are widely used in nuclear power plant, they are classified in accordance with the services occasions, control media, and electrical safety levels. The requirements for designing and manufacturing the solenoid valves used in nuclear power plant are introduced. With the solenoids used in SC1 process pipelines as example, the requirements for designing and manufacturing and qualification testing are described in detail. The solenoids used in nuclear power plant are designed with special requirements; and in practical application, proper operation is also critical to guarantee safety of the nuclear power plant.

**Keywords:** Security Instrument and control system Nuclear power plant Solenoid valves Standard specification Design and manufacturing Security level

## 0 引言

电磁阀隶属于工业自动化仪表的执行器单元,用于实现对管路中的介质进行通断、切换、分配等过程的自动控制。电磁阀具有体积小、质量小、反应灵活、安全可靠等优点,因此被广泛应用于包括核电厂在内的各类自动控制系统之中。

由于安全控制的特殊性要求,民用核电厂中所选用的电磁阀较一般工业控制领域用的电磁阀应满足更严格的标准、规范要求。

## 1 核电厂用电磁阀的分类

电磁阀在核电厂中应用范围很广。因控制要求和 使用环境条件的不同,对电磁阀的要求也各有不同。根据核电厂实际工况的特点及要求,可从服务场合、控制介质及电气安全等级等方面,对电磁阀进行以下分类。

### 1.1 按服务场合分类

核电厂一般分为两部分,一是利用原子核裂变生

产蒸汽的核岛,包括反应堆装置和一回路系统;二是利用蒸汽发电的常规岛,包括汽轮发电机系统。依据产品应用服务场合,核电厂用电磁阀可以分为安全级和非安全级两类。

安全级电磁阀是指对核电厂的安全运行至关重要的电磁阀,一般位于核电厂的核岛中。按其重要程度,安全级电磁阀又细分为安全 1 级、安全 2 级和安全 3 级三种(SC1、SC2、SC3)。安全 1 级电磁阀一般用于核电厂的一回路,作为首级保护或控制单元;安全 2 级电磁阀一般用于核电厂的二回路或一回路安全 1 级安保设备的次级安保部位;安全 3 级电磁阀一般用于核岛内的附属系统或安全 2 级安保控制设备的次级安保控制部位<sup>[1-3]</sup>。

非安全级电磁阀一般只用于核电厂常规岛系统中。

### 1.2 按控制介质分类

核电厂用电磁阀按控制介质分,可以分为工艺管路用电磁阀和仪表电磁阀两类。

工艺管路用电磁阀是指所控制的介质为系统工艺介质的电磁阀。如稳压器排汽电磁阀,其控制介质为蒸汽。此类电磁阀又称为电磁动截止阀。

仪表电磁阀是指所控制的介质为系统控制介质的

修改稿收到日期: 2013-01-25。

第一作者纪永武(1959-),男,1982年大学本科毕业,高级工程师;长期从事电磁阀的研究、设计和应用方面工作。

电磁阀。该电磁阀的主要作用是通过控制介质控制次级设备的动作,介质一般为压缩空气或液压油,控制对象多为气动切断阀门或液动切断阀门。

核电厂用安全级工艺电磁阀如图1所示。该电磁阀为二位二通高温高压电磁阀,是一种常闭型工艺电磁阀。电磁铁通电时,电磁阀开启;反之关闭。电磁阀工作压力在20 MPa左右,温度达360℃,公称口径一般为DN10~DN80,结构为强制先导型。

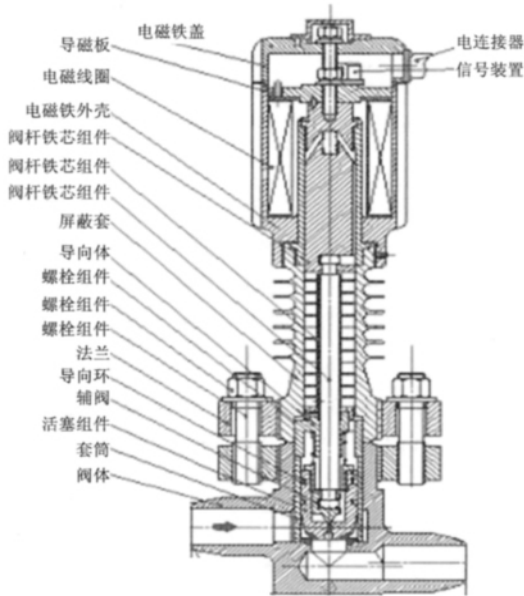


图1 核电厂用安全级工艺电磁阀结构图

Fig.1 Structure of the solenoid valve used in safety technological process of nuclear power plant

核电厂用安全级仪表电磁阀如图2所示。

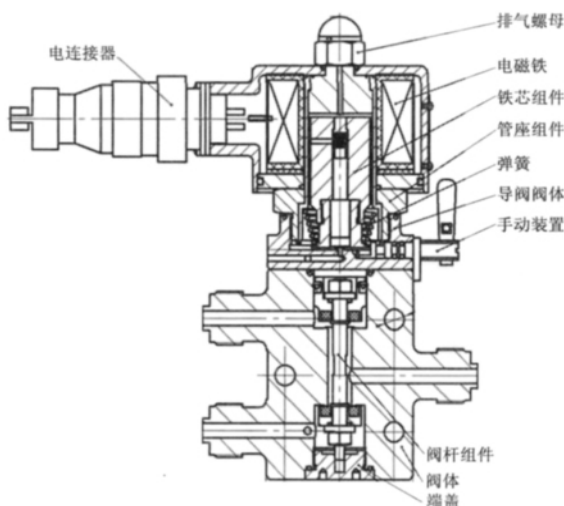


图2 核电厂用安全级仪表电磁阀结构图

Fig.2 Structure of the solenoid valve used for safety instrumentation

该电磁阀为二位三通电磁阀,是一种先导式结构的仪表电磁阀。电磁铁通电时,压力源经P口与工作口A导通,排空口O截止;电磁铁断电时,工作口A和排空口O导通,压力源口P截止。工作压力在0.8~4 MPa,温度可达120℃,公称口径一般为DN3~DN15。

核电厂用安全级仪表电磁阀主要零部件包括端盖、阀体、阀杆组件、手动装置、导阀阀体、弹簧、管座组件、铁芯组件、电磁铁、排气螺母、电连接器。

### 1.3 按电气安全等级分类

核电厂用电磁阀按电气安全等级分类,可以分为安全级(1E级)和非安全级两大类。根据环境条件要求,安全级(1E级)又可以分为1E/K1、1E/K2和1E/K3三类。K1、K2、K3为依据电气部分工作环境条件确定的鉴定级别,K1级通常用于核电厂的一回路。

## 2 核电厂用电磁阀设计制造的要求

核电所使用的燃料是时刻裂变的核素,具有很强的放射性,其裂变产物如果意外向环境释放,所产生的后果将非常可怕。因此,确保核电系统的安全运行是核电项目建设的首要问题。近年来,我国进一步明确了“安全高效发展核电”的发展战略,对核电厂的选址、设计、施工、设备设计、设备制造、调试、运行、维修和检验试验严格按照规定实施。

核电仪表和控制系统是核电站的“神经系统”,是核电站正常、高效、安全运行的关键。据相关统计,目前我国在役核电站的绝大部分仪表和控制系统采用的都是进口产品,其中包括电磁阀在内的关键的核安全级仪控系统几乎完全被外国厂商所垄断。这样的局面,不仅使我国核电厂的安全运营受制于人,同时也制约了我国民族企业在核电领域的发展,大大增加了我国核电站的建造成本<sup>[4-5]</sup>。

为改变这样的局面,国家近些年来一直在着力进行核电厂配套产品的国产化工作,包括电磁阀在内的一批产品的研发和生产取得了较大的进展。为保证核电厂配套产品的质量,国家能源局、国家核安全局等部门规定了对核电厂用安全级设备的要求,对企业基本条件、设计制造过程、检验过程、交付过程和维修过程都有明确、严格的要求。

### 2.1 企业基本条件要求

从事核级电磁阀设计制造的企业须满足以下要求:应有良好的业绩,具有类似产品的时机制造经验和质量保证条件;应建立符合《HAF003 核电厂质量保证安全规定》、《HAF601 民用核安全设备设计、制造、安

装和无损检验监督管理规定》、《HAF602 民用核安全设备无损检验人员资格管理规定》、《HAF603 民用核安全设备焊工焊接操作工资格管理规定》、《HAF604 进口民用核安全设备监督管理规定》、《ASME NQA - 1 核设施质量保证大纲要求》等规定的质量保证体系;应获得国家核安全局颁发的相应级别的《民用核安全设备设计资格许可证》和《民用核安全设备制造资格许可证》。

从事核级电磁阀设计制造的企业应具有能够满足活动要求的设计人员、工艺人员、质量保证人员、焊工和无损检测人员应取得相应的上岗资质。设计、工艺及检测人员应较好地理解、领会 ASME(美国工程师学会标准)、RCC - M(法国压水堆核岛机械设备设计建造规则)、RCC - E(法国压水堆核岛电气设备设计建造规则)等相关标准规范。

### 2.2 产品设计、制造的过程要求

在核电厂用电磁阀设计制造过程中,坚持“四个凡事”的基本要求,即“凡事有人负责,凡事有人监督,凡事有章可循,凡事有据可查”。在整个过程中,严格按标准规范操作,按质量保证体系运行,有严格的文件要求,强调过程管理和可追溯性。

在核电产品设计过程中,严格按照标准执行。我国目前的核电标准体系尚不健全,在运行和在在建核电厂选用技术及其采纳标准多有不同。核电仪表所涉及的标准繁多,常常需要参考多个(甚至几十个)标准做配套支撑,才能生产出合格的产品。我国大陆在运行和在在建核电厂采用的标准情况如表 1 所示。

表 1 在役和在在建核电厂采用标准情况

Tab.1 The standards adopted in nuclear power plants (in service and in construction)

核 电 厂	采用标准
秦山一期、中国快中子实验堆、三门、海阳	ASME
大亚湾、秦山二期、岭澳、秦山一扩、秦山二期 3/4 号机组、红岩河	RCC-M
秦山三期	ASME + 加拿大标准
田湾、中国快中子实验堆	ГОСТ
中国快中子实验堆	RCC-MR

核电站用电磁阀设计采用的主要标准规范有:《HAF003 核电厂质量保证安全规定》;《HAF601 民用核承压设备安全监督管理规定》;《HAF J0053 核设备抗震鉴定试验指南》;《HAD003/08 核电厂物项制造中的质量保证》;《ASME BPV 规范 III》;《ASME BPV 规范 II 材料技术条件》;《ASME BPV 规范 V 无损检验》;《ASME BPV 规范 IX 焊接及钎焊评定》;《SME B16.10

阀门结构长度》;《ANSI B16.41 核电厂动力操作能阀门功能鉴定要求》;《ASME B16.34 法兰连接和对焊阀门》;《EJ/T 531 核电厂安全及阀门驱动装置的鉴定》;《GB/T 13625 核电厂安全系统电器设备抗震鉴定》;《GB/T 4334.5 不锈钢硫酸、硫酸铜腐蚀试验方法》;《GB/T 15188.1 阀门的结构长度对焊连接阀门》;《EJ/T1022.18 压水堆核电厂阀门产品清洗规则》;《IEEE 阀门电动装置 JB/T7352 工业过程控制系统用电磁阀》。

### 3 核电厂用电磁阀的特殊要求

本质上说,核电厂用电磁阀和常规电磁阀没有区别,都是其自控系统中的执行单元或控制单元,对其基本的技术指标和性能指标的要求是一致的。比如,核电厂对电磁阀的密封性、泄漏量、电源变化、工作压力差、防护等级、防爆要求、工作寿命等的要求与常规电磁阀基本相同。其特殊之处在于,由于安全的重要程度要求和事故后果的严酷性要求,核电厂在设计过程中必须对配套设备在正常工况、停堆工况、事故工况和退役工况的功能、性能进行严格的规定和要求。

本文主要以安全 1 级工艺管路用电磁阀为例,介绍核电厂用电磁阀的特殊要求。

#### 3.1 设计要求

设计过程中,核电厂用电磁阀除满足常规要求外,还需要满足以下特殊要求。

① 寿命要求:满足 40 a(二代改进型机组)或 60 a(三代机组)的工作时间。

② 环境条件:适应正常、异常、设计基准事故(DBA)、PDBA(DBA 之后持续一段时间内)的环境条件。

③ 固有频率:一般应不小于 33 Hz。

④ 失效模式:规定了电磁阀丧失电源时的失效位置。

⑤ 设计瞬态:规定了设计瞬态要求。

⑥ 载荷要求:规定了地震载荷和管道接管载荷。

⑦ 能动阀门要求:能够在规定级别的载荷工况下实施功能,在规定级别的载荷加载期间和卸载之后不丧失功能,执行安全相关任务。

⑧ 重量和重心:满足电磁阀的重量和重心的制造偏差规定。

⑨ 阀位指示器及电气接插件:对阀位指示器及电气接插件提出了要求,要求电磁阀有阀位状态信号输出,显示电磁阀的开关状态,以便远程观察控制;电气

接插件和整个电气系统一样,要能够经受相应级别的电气鉴定试验,如 K1 级产品要求的辐照老化、热老化、震动、地震、反应堆失水事故等。

⑩ 裕度设计:对电磁阀的设计裕度提出了要求,

$$\text{输出裕度} = \frac{\text{电磁驱动系统有效推(拉)力} - \text{计算要求推力}}{\text{计算要求推力}} \times 100\%$$

第二 电磁驱动装置线圈裕度。由于多数电磁驱动装置与阀门部分为整体性结构,其推(拉)力的直接测量较为困难,因此电磁驱动装置输出裕度可以采用易于测量的启动电压计算线圈裕度。

$$\text{线圈裕度} = \frac{\text{最小电源电压} - \text{最小启动电压}}{\text{最小启动电压}} \times 100\%$$

式中:最小启动电压是指使电磁阀开始动作的最低电压。

第三 复位弹簧裕度。其计算公式如下:

$$\text{复位弹簧裕度} = \frac{\text{最小电源电压} - \text{最大释放电压}}{\text{最大释放电压}} \times 100\%$$

式中:最大释放电压是指电磁铁铁芯吸合部分在复位弹簧以及重力等因素作用下脱离吸合时所产生的最大电压。

第四 其他设计裕度 指为保证电磁阀安全功能和工作性能而增加的裕度。

### 3.2 鉴定试验要求

针对核电厂的特殊要求,规定了以下鉴定和样机试验的特殊要求。

① EMC(电磁兼容)试验:验证电磁阀的电磁兼容能力,包括发射和抗扰度试验。

② 冷热交变影响试验:验证对电磁阀的结构和运行可靠性的影响。

③ 热老化和工作循环试验:模拟电磁阀在最高正常环境温度下的鉴定寿命。

④ 机械老化试验:模拟进行预期的机械和电器磨损试验。

⑤ 辐照老化试验:模拟验证电磁阀在辐照状态下的预期状态。

⑥ 振动老化试验:验证电磁阀的抗振能力。

⑦ 端部加载试验:验证电磁阀连接端抗载荷能力。

⑧ 地震试验:验证电磁阀承受规定的地震载荷条件的能力。

⑨ LOCA(反应堆失水)试验:验证电磁阀在 LOCA 事故期间和之后的功能保持能力。

### 3.3 基准试验项目

基准试验是指依据电磁阀标准确定的验证电磁阀

主要分为四方面:

第一 电磁驱动装置推(拉)力输出裕度。它指电磁驱动系统有效推(拉)力与计算要求推(拉)力之差,除以计算要求推力。

功能的试验,在每项鉴定试验前、后均应进行此项试验,以验证该鉴定试验对电磁阀性能的影响。我国目前电磁阀的标准为《JB/T 7352 工业过程控制系统用电磁阀》,规定的试验/检验项目如下:工作压差、绝缘电阻、绝缘强度、泄漏量、密封性、耐压强度、湿热环境影响、线圈允许温度、额定流量系数、动作寿命、响应时间、机械振动影响、运输环境温度影响、运输碰撞影响、外观、防护性。

实际应用中,一般是把产品标准的要求和核电厂的要求结合到一起,针对具体产品制定技术规格书,并在技术规格书的指导下运作。

### 3.4 制造要求

核电厂用电磁阀制造要求如下。

① 工艺评定:焊接、热处理、锻造等特殊工艺应进行工艺评定。

② 污染防治:与回路流体介质接触的部件应避免氯、氟、铅、汞、硫、砷等元素的污染;不能使用润滑剂,并应避免氮化和镀层;不锈钢零件禁止与碳钢零部件直接接触;禁止使用二硫化钼作为润滑剂。

③ 无损检验:规定了承压件及受力元件的无损检验要求,包括适用于不同检验项目的 PT(液体渗透检验)、UT(超声波检验)、VT(目视检验)、RT(射线检验)、MT(磁粉检验)。

### 3.5 文件要求

核电厂用电磁阀的另外一个特点是要求的文件多,包括指导性文件和记录性文件。设计、制造、检验试验、交付等整个产品实现过程都要求有相关文件支持,包括设计证明文件、图纸、工艺文件、制造、检验和试验规程、质量保证文件等。

以上是核电厂安全 1 级工艺管路用电磁阀的部分特殊要求,包括对电磁阀机械部分和电气部分的要求。用于上述环境的安全级仪表电磁阀(1E/K1 级)的要求与之相近。

## 4 结束语

由于核电厂的特定应用环境条件以及对安全性、可靠性的严格要求,核电厂用电磁阀除满足常规产品

(下转第 73 页)

$$P = \begin{bmatrix} 0.999\ 998 & 0.000\ 001\ 835 & 0.000\ 000\ 024 \\ 0.041\ 667 & 0.958\ 333 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

初始时变送器正常工作,用数字 1 表示,因此初始状态  $S = [1\ 0\ 0]$ ,则极限状态转移和初始矩阵满足:

$$S_L = S \times P^n \quad (3)$$

式中:  $S_L$  为极限状态矩阵;  $S$  为初始状态矩阵。由式(3)可得  $n$  个时间间隔后各状态的概率情况。本文取 10 个功能测试周期即  $n$  为 876 00 h 后的结果如表 3 所示。

表 3 功能测试后的状态概率

Tab.3 State probability after functional test

时间/h	状态 0	状态 1	状态 2
1	0.999 998 00	1.835 000 00e-06	2.400 000 00e-08
2	0.999 996 08	3.593 537 38e-06	4.799 995 20e-08
3	0.999 994 23	5.278 798 26e-06	7.199 985 78e-08
4	0.999 992 45	6.893 835 98e-06	9.599 971 92e-08
...	...	...	...
87 597	0.985 607 66	4.340 598 62e-05	0.002 087 12
87 598	0.985 607 50	4.340 597 91e-05	0.002 087 14
87 599	0.985 607 34	4.340 597 19e-05	0.002 087 16
87 600	0.985 607 18	4.340 596 47e-05	0.002 087 19

由表 3 可知,最后状态的值随时间的增长不断增加。对状态 2 的值取平均值,可得  $PF_{D_{avg}}$  为 0.001 04。低要求操作模式的安全完整性等级表如表 4 所示。

表 4 低要求操作模式的 SIL

Tab.4 SIL in low demand operation mode

SIL	$PF_{D_{avg}}$	风险降低因子
4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	100 00 ~ 100 000
3	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	10 00 ~ 10 000
2	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	100 ~ 1 000
1	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	10 ~ 100

对照低要求操作模式的安全完整性等级表,由于  $10^{-3} < 0.001\ 04 < 10^{-2}$ ,因此,可知此时变送器的

安全完整性等级是 SIL2。1oo1D 体系结构的硬件故障裕度为 0,安全完整性等级达 SIL2,需满足  $90\% < SFF < 99\%$ ,而  $SFF$  为 98.7%。因此,应用上述诊断方法的安全变送器总体设计方案满足安全完整性要求。

#### 4 结束语

安全温度变送器采用 1oo1D 体系结构,结合变送器两个微控制器的结构特点,将冗余结构的对比方法引入安全温度变送器之中;对模拟量采集模块、数据处理模块和模拟信号输出模块进行诊断,实现了切实可行的诊断方法,有效控制了系统失效和随机失效;应用 FMEDA 分析失效模式和各模式对变送器的影响,使建立马尔可夫模型的结果可靠精确。

#### 参考文献

[1] 方来华,吴宗之.安全仪表系统的开发与要求[J].中国安全科学学报,2009,19(4):159-168.

[2] 阳宪惠,郭海涛.安全仪表系统的功能安全[M].北京:清华大学出版社,2007:36-59,68-95.

[3] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 20438.1-2006 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第 1 部分:一般要求[S].北京:中国标准出版社,2006:1-39.

[4] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 20438.2-2006 电气/电子/可编程电子安全相关系统功能安全 第 2 部分:电气/电子/可编程电子安全相关系统的要求[S].北京:中国标准出版社,2006:28-51.

[5] Shishiba R. Implementation of a safety instrumented system[C]//SICE Annual Conference 2007 Society of Instrument and Control Engineers, 2007:2493-2496.

[6] Goble W M,Cheddie H. Safety instrumented systems verification: practical probabilistic calculations[M]. ISA, 2005:28-343.

[7] Borcsok J,Schaefer P S,Ugljesa E. Estimation and evaluation of common cause failures[C]//Second International Conference on Systems, Proceedings of the Second International Conference 2007:1-41.

[8] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T20438.6-2006 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全第 6 部分:GB/T 20438.2 和 GB/T 20438.3 的应用指南[S].北京:中国标准出版社,2006:44-46.

(上接第 69 页)

性能要求外,还要满足在设计、制造、试验、鉴定等过程中的核电产品的特殊规范要求,并用一套科学的体系来保证这些特殊要求的实现,实现产品生命周期全过程的可控管理和可追溯,确保电磁阀对核电站正常、高效、安全地运行发挥保驾护航的作用。

#### 参考文献

[1] ASME. BPVC - III 核设施部件建造规则[S].上海:上海科技

术文献出版社,2007.

[2] JB/T 7352-2010 工业过程控制系统用电磁阀[S].北京:机械工业出版社,2010.

[3] 林诚格.非能动安全先进核电厂 AP1000[M].北京:原子能出版社,2008.

[4] AFCEN. RCC - M 法国压水堆核岛机械设备设计建造规则[S].上海:上海科学技术文献出版社,2010.

[5] AFCEN. RCC - E 法国压水堆核岛电气设备设计建造规则[S].上海:上海科学技术文献出版社,2012.