

# 核电厂设备冷却水系统调试研究

李 恒

中核运行公司技术一处,浙江嘉兴,314300

**摘要**:设备冷却水系统(RRI)是核电厂重要辅助系统,其用户覆盖核岛及核电厂的外围设施系统(BOP),在正常运行工况和各种事故运行工况下均必须确保运行稳定。因此,在 RRI 的调试中必须对其相关设备性能和逻辑功能逐一验证。本文对 RRI 的波动箱试验、电动泵试验、流量调整试验、自动列间切换试验过程中出现的问题进行分析判断,重点分析流量分配方法及计算扩孔数据的方法和流量孔板装反影响流量的机理,并提出解决途径。

**关键词**:分析;检查;孔板

中图分类号:TK414.2 文献标志码:A

## Study on Commission of Equipment Cooling Water System in Nuclear Power Plants

Li Heng

Technology Department of the CNNO-1, Jiaxing, Zhejiang, 314300, China

**Abstract**: Equipment Cooling Water System(RRI) is an important auxiliary system of nuclear power plants, and its users cover the fields of nuclear island and the periphery of nuclear power plant facilities systems(BOP) system. It must be ensured that the Equipment Cooling Water System can operate stably under normal operation condition and various accident conditions. Hence, equipment performance and logic functions of RRI must be verified one by one. This paper focuses on fluctuating tank test, motor pump test, flux adjustment test, and automatic switch test of different serials, analyzes and judges the problems occurred in the tests, and discusses the flux distribution method, hole-digging calculation method and the influence on the flux by the reverse installation of flow orifices, and the way to solve these problems.

**Keywords**: Analysis, Inspection, Flow orifice

### 0 引 言

设备冷却水系统(RRI)重要功能是在正常运行和事故工况下与重要厂用水系统(SEC)一起把热量从重要的安全相关的房间、系统和设备传递到最终热阱——海水;在核岛交换器和海水之间形成屏障,防止放射性流体不可控制地释放到海水中。

RRI 设计在电厂所有运行工况下进行,当海

水最高温度为 31.7℃ 时,提供的设备冷却水最高温度为 35℃。

设备冷却水系统包括 2 个独立的安全系列、公用用户和共用用户。公用用户由 2 个系列中的一个供水;共用用户由 2 个机组设备冷却水系统中的一个提供。每个用户都有一个调节阀或孔板来控制流量。每个系列有 2 台 100%容量冷却水泵和一个波动箱。

由于 RRI 是专设安全系统,对设备冷却泵性能进行验证、波动箱液位检查,同时检查用户流量能否满足要求,以及检查列间自动切换功能是非常重要的。

## 1 波动箱试验

波动箱是 RRI 的重要设备,在主控室可通过对其液位变化监视来控制整个系统运行。波动箱液位降低可能是温度降低或者系统外漏引起的,如果持续降低到正常补水来不及阻止时会触发危急水位报警,引起一系列操作。波动箱设置 3 块液位变送器、就地磁翻板液位计和 4 个浮筒式液位开关。

波动箱试验中出现指示不一致的现象。液位变送器 RRI001MN、RRI013MN、RRI015 MN 液位指示分别为 1.40 m、1.46 m、1.46 m。前者与后两者液位指示相差约 60 mm, RRI013MN、RRI015 MN 一样,后者和就地磁翻板液位指示接近。

首先检查 4 个液位计 0 点,都在同一高度,变送器正、负压腔连接完整,正压腔无空气,负压腔接回波动箱阀门都开启。初步确认 RRI001MN 指示不准。从变送器正压腔引压管处拉皮管检查,发现其液位与 RRI001MN 一样。此方法检查结果表明其他 3 个液位计指示有问题。3 个表不可能都出现同样的问题,应该存在某种共同的影响因素。

波动箱是封闭容器,内部不能目视观察,但波动箱还有 4 个液位开关;低、低低液位 2 个开关,另外高、高高液位 2 个开关。液位开关是浮桶式,水上升带动浮筒使开关闭合报警,可认为报警点液位是真实液位,因此可通过补水来判断究竟是哪个液位计出问题,试验结果显示高报警时与磁翻板一样是 1.65 m。

波动箱液位变送器是压差式,其正压腔接波动箱下部出水管,负压腔接波动箱上部空气侧。判断可能的原因是 RRI001MN 负压腔没接通波动箱,压差小从而液位偏低。因波动箱上部有一个排气管接到核辅助厂房通风系统(DVN),DNV 风机从这里抽气造成波动箱负压。为验证这一判断,将皮管对空一头插入回波动箱上部气管,结果显示和磁翻板液位一样,证实是 RRI001MN 出现问题,其负压腔堵塞或者漏气。经确认负压腔

被堵,压空吹扫通畅,重新连接后其液位正常。

从这个现象可以看出,不通大气的容器测量其液位变送器负压腔通畅非常重要,却易被忽视。

## 2 电动泵试验

电动泵是 RRI 最重要的动力设备,一旦失去将造成停机停堆。因此电动泵性能试验很重要。

### 2.1 旋液分离器出口管段发热

在进行 RRI001PO 运行试验中,出现机械密封冷却水管至旋液分离器出口管段发热问题,在设备冷却水温度 20℃ 时,出口管段的实测温度高达 36℃。此时,旋液分离器进口管和旋液分离器下部温度也为 20℃。在旋液分离器运行中,泵运行时,高压水从旋液分离器 0102 切向流入,经过旋液分离器处理后分 2 部分:高压干净水从上部流经限流孔板 RO0101 减压后进入机械密封使其冷却,从泵轴间隙回到泵叶轮入口;旋液分离器下部水回到泵入口。

分析认为:是机械密封水进入了机械密封冷却水管至旋液分离器出口管段,使该管段温度升高。依据的理由是设备冷却水温度为 20℃,设备冷却水经过旋液分离器的水不能达到 36℃,唯一的可能是热水来自携带了机械密封摩擦的热量密封水。热水从机械密封流出,说明旋液分离器上部出口压力过低,旋液分离器入口管堵塞或者旋液分离器故障。

停泵拆开检查,确认旋液分离器完好,进水管通畅。泵出水管接头带限流孔板;但按泵维护手册这里没有限流孔板,厂家也否认此部位有限流孔板,只有连接到机械密封处有一个孔板接头。将发热管段拆下检查,确认这段管子接头是同通孔(泵维护手册中为限流孔板)。

现场限流孔板所安装位置与泵维护手册不对应,为厂家装配错误。将接头互换位置,泵再次运行后管子不再发热。再对 1#机组、2#机组设备冷却台泵进行检查时,发现都存在同样的问题。

### 2.2 流量孔板方向装错

在进行 002PO 泵性能试验时,泵扬程在额定工况点(泵额定工况点是扬程  $H$  为 64.2 m 水柱,流量  $Q$  为 2838 m<sup>3</sup>/h)时流量只有 2650 m<sup>3</sup>/h,达不到设计要求。

2.2.1 原因分析 在泵没有气蚀情况下,流量和扬程在性能曲线上应该一一对应。泵扬程由泵转

速和叶轮外径决定。

由于与 002PO 的参数及性能都相同, 001PO 流量正常, 可判断出 002PO 流量偏小与测量系统有关。流量测试系统由流量孔板、引压管和压差变送器组成。这 3 部分都可能造成流量变小。

2.2.2 检查情况 流量孔板正负压腔未接反, 如接反则流量为负。检查变送器, 正负压腔连续出水, 无堵塞, 检查后流量没有变化; 再对变送器重新标定后流量也没有变化。

接下来检查流量孔板是否安装正确。设备冷却流量孔板结构是法兰取压方式的标准孔板, 安装在回水竖直管道上, 水流从下向上, 密封形式是软密封。

因流量孔板安装在管道中, 只能检查手柄。拍照显示下部没有标志(正向有孔板标识编号), 可知限流孔板装反了。

2.2.3 流量孔板装反对流量的影响分析 装反时并不是没有流量, 只是流量变小。流量孔板测流理论依据原理是伯努利方程和流体连续性方程。根据节流原理, 充满管道的流体, 当它们流经管道内的节流装置(如标准孔板、标准喷嘴、长径喷嘴、经典文丘利嘴、文丘利喷嘴等)时, 流束将在节流装置的节流件处形成局部收缩, 从而使流速增加, 静压力低, 于是在节流件前后便产生了压力降(即压差)。介质流动的流量越大, 在节流件前后产生的压差就越大。当孔板安装正确时孔板压降更大。图 1 给出了正确的流量孔板安装方向。

重新将孔板调整到正确位置时, 流量达到  $2860 \text{ m}^3/\text{h}$ , 和泵的流量特性曲线符合。从流量反过来验证, 孔板装反时压降减小, 而流量减少 10% 左右。

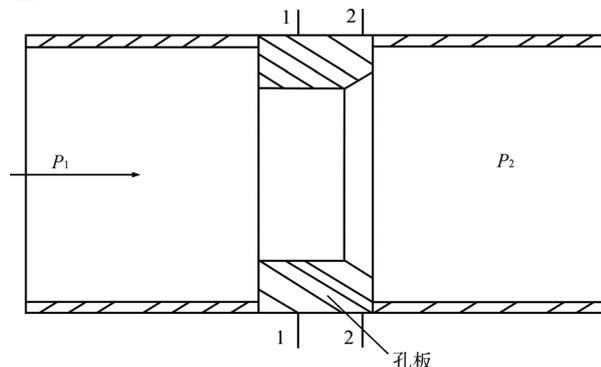


图 1 流量孔板正确安装方向示意图

Fig.1 Installation Direction for Flow Orifice

### 3 流量整定试验

设备冷却系统流量平衡遇到最大的难题是流量不足, 因设备冷却水的用户多, 几乎每个用户都有限流孔板和手动调节阀来控制控制流量。系统手册中提供的每个用户流量是在最大负荷下的最高流量, 即要求调整流量大于设计流量。

#### 3.1 流量调整方法探讨

根据系统手册, 在正常工况下有一台泵流量就足够满足所需运行用户流量  $2820 \text{ m}^3/\text{h}$  的要求。安全列中, 除安全喷淋交换器、余热排出喷淋交换器用户在正常工况下不投入外, 其他用户在正常工况下也需要运行; 公用用户中除蒸发器排污系统(APG)交换器和化学和容积控制系统(RCV)过剩泄交换器部分外, 其他的在正常工况下都需要运行; 在安全壳喷淋工况下安全列中余热排出交换器不投入外其他都需要投入运行; 在这种工况下流量需求约  $2100 \text{ m}^3/\text{h}$ , 远小于泵的额定工况点流量。2 台泵同时运行工况下, 余热排出喷淋交换器、APG 和 RCV 过剩泄部分等用户投入时的流量需求才  $3800 \text{ m}^3/\text{h}$ , 两台泵流量即可满足。

根据以上分析, 将正常工况下的用户流量调整合格后, 这些用户在其他工况下用户流量定能满足要求。

由于每列有 2 台 100% 容量的泵, 正常工况下只使用其中一台泵就可以满足流量试验要求。根据在电动泵试验中得出 A 列 1#泵和 B 列 4#泵性能曲线较低的情况, 试验中由这 2 台泵分别整定 A 列和 B 列及其他用户流量。

为防止泵超流量运行, 试验开始时将正常工况下所需运行用户依次全部投入。由于设备冷却泵泵房在 +7 m, 泵到各用户距离差不多, 先整定大流量用户, 再整定小流量用户。整定中将各个用户调节阀开度标记好。

#### 3.2 孔径调整

表 1 是在调节阀全开情况下流量不合格的用户, 其他用户流量都合格且阀门只开了 40% 左右, 如果全开流量可以提高 10%~20%。从表 1 看出孔板接管通径远大于孔板内径, 只需扩孔即可达到设计要求, 因为泵流量特性曲线足够满足系统全流量要求。但孔径也不能过大, 否则影响其他用户。

设计院设计说明限流孔板公式为:

表 1 流量整定统计表  
Fig.1 Statistics of Flow Adjustment

用户	期望值 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	测量值 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	孔板计算 说明书中 最大流量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	孔板 内径 /mm	接管 口径 /mm	扩孔 后得 内径 /mm
IRRI 001 MO	10	9.5	10	12	50	13
IRRI 003 MO	10	9.4	10	12	50	13
IRRI 002 MO	10	9.3	10	12	50	13
IRRI 004 MO	10	9.4	10	12	50	13
IDEL 002 CS	160	150	150	54.3	150	58
IDEL 001 CS	160	148	150	54.3	150	58
PTR001-002RF	542.25	500	542.25	106.3	300	112
DWL 101-104 CS	62	50	62	34.2	300	37
IRCV 021 RF	75	67	75	40.7	100	44
9TEP 004 CS	125	114.5	125	55	150	58
9TEP 003 CS	125	114.6	125	55	150	58
9TEP 001 RF	34	28.5	34	26.8	80	30
9TEP 002 RF	34	27.6	34	26.8	80	30

$$Q = 128.45 \times C \times d_0^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (1)$$

式中， $C$  为流出系数，可根据限流孔板  $C-Re-d_0/D$  关系图查出； $d_0$  为孔板内径； $\Delta p$  为孔板压差； $\gamma$  比热比； $Re = 354q_m/D\mu$ ； $q_m$  为流体质量； $D$  为管道半径； $\mu$  为水的粘度。

从式(1)可见，如内径增大 1%~10% 则孔板内径的平方增大很多。据表 1， $d_0/D$  增加较小，故  $Re$  增加较小； $C$  增加很小。扩孔后流速变小压力损失变小，即孔板压差减小程度较小。在调整孔板内径时视  $C$ 、 $\Delta p$ 、 $\gamma$  不变。由式(1)可计算得扩孔前  $d_0=56.5$  mm。以 IDEL001CS 限流孔板为例进行扩孔计算， $d_1$  为扩孔后的直径。取  $d_1$  为 58 mm（保证不第二次扩孔），因为即使流量增加一点还可以用调节阀控制。

按上表数据将不合格限流孔板进行扩孔回装，重新调整流量合格。

#### 4 自动列间切换试验

RRI、SEC 列间切换是在一列 SEC 泵或 RRI 失效时其所在列压力开关低触发自动引起备用列 RRI、SEC 泵启动。如果 A 列 SEC 泵失效时 RRI025SP 低触发，A 列 RRI、SEC 泵启动，反之亦然。

自动列间切换试验时出现重要厂用水系统 SEC 侧低压力开关 RRI025SP/026SP 不触发导致系列切换失败。RRI025SP、026SP 在贝类捕集器入口侧；SEC 系统分两列分别冷却设备冷却系统

两列，经板式换热器 RRI/SEC 流到虹吸井；SEC 系统两个虹吸井相连。水高过围堰时流出，出水管浸没在水下。当两列泵停运时由于泵出口止回阀关闭，由于虹吸原理整个 SEC 管道充满水。其流程（单列）如图 2 所示。

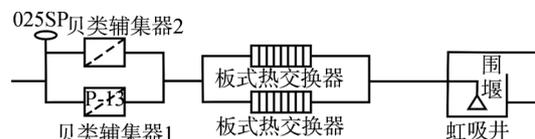


图 2 SEC 流程图

Fig. 2 Flow Chart of SEC

经初步分析，可能是压力开关出现故障或者仪空通道断路。先进行仪控回路检查，确认通道正常。接着进行压力开关定值检查，结果 RRI025SP/026SP 定值 40 kPa，和设计要求一样。最后对实际静压差进行检查，静压在 57~60 kPa 之间，大于压力开关低定值，使之无法发出启泵信号。

由于仪表正常，静压高的原因就只能出自系统上。从管道施工图上查出围堰标高 -2.2 m，压力开关标高 -7.5 m，板式换热器 RRI/SEC 标高 0 m，前两者高度差有 5.3 m，由于虹吸原因压力开关静压大于 50 kPa，至于比测得数字低可能是由于在 0 m 处管道进有空气造成的。

确定新定值：一台泵正常运行时在压力开关处测得压力为 250 kPa，为确保压力开关定值合理，最终将调至 65 kPa。定值调整后，压力开关动作正常。

出现停运海水侧压力开关定值偏小，这是由于设计原因造成的，翻版电厂定值也是如此，但与方家山核电厂现场 SEC 系统有差异。

#### 5 结束语

在 RRI 系统波动箱、电动泵、流量和压力开关的调试中，解决了在制造、设计和安装阶段出现的缺陷，使之在各个工况下都正常运行。

#### 参考文献:

- [1] 姜乃昌，泵与泵站[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.
- [2] GB/T 2624-2006，用安装在圆形截面管道中的压差装置测量满管流体流量[S].

（责任编辑：张祚豪）