

华龙一号人员闸门控制系统技术要点分析

董绪超 杜广

(中国核电工程有限公司 北京 100142)

摘要: 安全壳是核电站防止放射性物质外泄的重要屏障,人员闸门作为安全壳的一部分,其控制系统确保密封性和功能正常,对于安全壳的完整性意义重大。本文简述了华龙一号人员闸门的工作模式、控制系统功能、操作事项,同时介绍了华龙一号人员闸门新增装置及其功能。本文研究是第三代核电站堆型的安全性升级在人员闸门上的体现,并对后续优化人员闸门控制系统,提升人员闸门功能提供了借鉴意义。

关键词: 人员闸门; 控制系统; 模式; 操作; 新增装置

0 引言

人员闸门作为核电站核岛安全壳的一部分,其主要功能是供人员和小型设备在反应堆运行或热停堆时通过,而不损坏安全壳的密封功能。特殊情况下它还应具备以下功能^[1-5]:

- (1) 事故情况下,作为人员紧急撤离的出口;
- (2) 在冷停堆时,人员闸门解除联锁,两个门同时打开,可以作为人员和小型设备;
- (3) 进出内、外安全壳的通道,即“通道模式”;
- (4) 在内安全壳进行密封和强度试验时,作为增压/减压舱;
- (5) 作为第三道安全屏障的一部分,在LOCA或严重事故(SA)工况下防止放射性物质不可接受释放。

1 人员闸门的工作模式

人员闸门的工作方式主要分为手动操作模式、电动操作模式、未授权模式、在线检测密封模式、加压/减压舱模式、强度试验模式以及通道模式。

1.1 手动操作模式

手动操作具有最高操作权。无论主控室是否授权,操作人员总能通过手动操作离开安全壳。将安全壳外侧的手轮存放在带锁的“手轮存放柜”中,阻止在非授权状态下人员通过手动操作进入安全壳内,安全壳内及人员闸门舱体内分别放置手轮,不设锁,允许内部人员在失电、电控失效等情况下手动开启

人员闸门撤离^[1]。在正常情况下,操作人员应使用电动操作人员闸门。手动模式是电动操作的补充,是在电气电控设备故障以及特殊情况下操作人员闸门的方式。

1.2 电动操作模式

通过主控室授权,操作人员获得从安全壳外控制台电动操作人员闸门的权限(即电控授权);安全壳内及人员闸门舱体内的控制台无需主控室授权,可电动操作人员闸门开启或关闭。紧急情况下,通过相关部门提供的“控制柜”钥匙,打开安全壳外控制柜上的紧急就地开关,也可获得电动操作人员闸门的权限。

1.3 人员闸门未授权模式

在主控室未授权时,人员闸门不允许从安全壳外电动操作打开内、外门,但可关闭内、外门;安全壳外侧手轮存放在带锁的“手轮存放柜”中,亦不可使用。但安全壳内及人员闸门舱体内的人员无需主控室授权,可电动操作或手动操作人员闸门开启或关闭内、外门^[2]。

1.4 在线密封检测模式

在人员闸门未收到“电控授权”,且内外门均处于关闭状态时方可启动在线密封检测功能。

1.5 加压/减压舱模式

在内安全壳进行密封和强度试验时,当内安全壳内压力上升至0.1MPa(g)时,操作人员需要通过人员闸门进入安全壳进行探查。此时,人员闸门将作为加压/减压舱来使用。

1.6 强度试验模式

在内安全壳进行密封和强度试验时,当内安全壳内压力持续升高至 0.483MPa (g) 时^[2],需要打开内门以验证人员闸门的整体强度。

1.7 通道模式

在冷停堆时,先后解除机械及电气连锁,关闭“压力差判断功能”。允许内外门同时处于打开状态。

2 控制系统基本功能

2.1 授权功能

人员闸门操作授权的主要目的是使得操作人员可以在安全壳外侧开启人员闸门外门。人员闸门授权的方式分为两种:

(1) 实体授权。相关部门提供安全壳外侧“手轮存放柜”钥匙或“控制柜”钥匙。

(2) 电控授权。主控室内的控制开关授权,使人员闸门进入电动操作模式。或通过“控制柜”钥匙(需要预先“实体授权”),打开控制柜中的紧急就地控制开关获得电动操作权限。使用紧急就地控制开关时,在主控制室有紧急使用人员闸门的信号显示。

2.2 连锁功能

人员闸门应设计机械和电气双重连锁,不允许内、外门同时处于未关闭状态而破坏人员闸门的密封性(有意解除连锁除外)。

手动可以解除机械连锁。解除机械连锁后再在人员闸门舱体内控制台上按“电气连锁解除/连锁”按钮,以解除电气连锁。控制台上“连锁解除”指示灯点亮。解除连锁后,内、外门可以同时处于未关闭状态。

当需要恢复连锁功能时,应先关闭内门,再恢复人员闸门机械连锁功能,然后再次按“电气连锁解除/连锁”按钮,“连锁解除”指示灯熄灭,即可恢复连锁功能。

2.3 压力差监控功能

在安全壳内、人员闸门内和安全壳外各设置一个压力变送器,量程 50kPa (abs) -150kPa (abs),总精度 ±0.74%。

正常情况下,压力变送器测量并反馈安装位置处的压力。通过 PLC 进行运算,得到门两侧的压力差。

在操作人员按下“开门”按钮后,解锁/锁紧电动机带动传动轴转动,平衡阀开始开启,电动机转动一定圈数后,压力平衡阀完全打开,电动机停转

5s,5s 后开始监测压力差,监测频率为 1 次 /s,只有当该压力差小于等于 6kPa 时,才允许电动模式解锁人员闸门,即:

(1) 安全壳内和人员闸门内压力差大于 6kPa,内门不可继续解锁;

(2) 人员闸门内和安全壳外压力差大于 6kPa,外门不可继续解锁。

在安全壳定期整体密封性试验及强度试验期间,如果安全壳内压力上升至 150kPa (g) 以上,上述安全壳内和人员闸门舱体内的压力变送器量程无法满足要求。故需要在整体密封性试验及强度试验期间,将其更换为高量程型号,同时关闭“压力差监控功能”。

3 人员闸门控制及操作事项简述

3.1 控制柜和控制台

每个人员闸门都设有一个控制柜和三个控制台,控制柜设在安全壳外,三个控制台分别设置在安全壳内 3#、人员闸门舱内 2# 和安全壳外 1#。

控制柜内装有电源转换装置、变频器、紧急就地开关和逻辑控制单元等。控制台与控制台、控制台与控制柜之间的连接通过设在人员闸门筒节上的电气贯穿件来实现。控制台上装有操作人员闸门的按钮、必要的信号灯;安全壳外 (1#) 控制台显示安全壳内和人员闸门舱体内的压力显示和这两个区域的影像。

控制台面板的参考布置如图 1 所示。



图 1 控制台面板的参考布置图

3.2 操作模式的确定

3.2.1 反应堆在运行或热停堆的情况下

人员闸门可电动或手动操作,人员闸门必须具备密封功能和连锁功能,信号灯应保持有效。

3.2.2 在反应堆处于冷停堆条件下

由于冷停堆时不必保持安全壳密封，这时人员闸门可以解除机械和电气联锁（通道模式），取消压差大于 6kPa 人员闸门无法打开的限制，内、外门可以同时处于打开状态（电动或手动模式打开）。在外门已经打开，且安全壳内为负压时，打开人员闸门内门可能伤害人员闸门内的工作人员，因此在电动模式下，只能在安全壳外的 (1#) 控制台操作内门。

3.2.3 当失去电源时

人员闸门可手动操作，但没有信号显示，此时机械联锁仍然有效。

3.2.4 人员闸门作为加压 / 减压舱

在安全壳的强度与密封性试验中，人员闸门可用作人员通道，通过对舱室内的压力进行控制来保证进出人员的安全。门体在内、外压力平衡完成之前不能进行门的解锁。

3.2.5 紧急退出

从安全壳内或人员闸门内撤离时，操作人员具有最高控制权。即使人员闸门不在运行状态（主控未电控授权，相关部门未实体授权），操作人员依旧可以用电动或手动方式撤离安全壳。人员闸门默认处于手动操作模式，当操作人员在安全壳内按下内、外门的启闭按钮或在人员闸门舱体内按下内、外门的启闭按钮，人员闸门由手动切换至自动操作模式，并开闭对应的门体 [3]。操作手轮分别存放在安全壳内和人员闸门舱体内。安全壳外的手轮存放在带锁的储存柜内。

3.3 优先请求

安全壳内的控制台与人员闸门舱内的控制台上设置优先请求按钮，优先请求信号应保持和显示 30s，如果不重新提出这个要求自动取消。正常使用人员闸门时优先请求不是主要的运行指令。

3.4 人员闸门与主控制室

华龙一号人员闸门的正常使用授权由主控制室内的“批准进入”开关给出。主控室监控人员闸门舱显示信息状态汇总见表 1。

4 华龙一号人员闸门新增装置

4.1 在线密封检测系统

在线密封检测系统的控制台（气动回路）布置在外门 1# 控制台旁边或与 1# 控制台整合，按钮汇总表详见表 2。

表 1 主控室监控人员闸门显示信息状态汇总表

序号	监控信息	状态指示	报警
1	“批准进入”授权信息	状态指示	无
2	在线密封检测系统信息	对“密封检测运行状态”进行指示	若“在线密封检测系统测量时间低于设定值”，即人员闸门发生泄漏，报警
3	应急供气功能信息	无	“应急供气功能启动”时，报警
4	内门闭锁信息	状态指示	未授权状态下，门被打开，报警
5	外门闭锁信息	状态指示	未授权状态下，门被打开，报警
6	内、外门同时开启信息	无	报警
7	紧急进入信息	无	报警
8	电气设备状态信息	无	若“电气部件故障、失电”人员闸门故障报警。

表 2 在线密封检测系统按钮汇总表

序号	按钮	功能	指示灯
1	开启密封检测（红）	人员闸门进入“在线密封检测模式”	密封检测运行指示（红）亮
2	关闭密封检测（绿）	停止本系统所有功能，加压阀、减压阀关闭	密封检测运行指示（红）灭
3	舱体加压开/关（红）	强度试验时平衡人员闸门舱体内和安全壳内的压力。按下一次开启阀门，再次按下关闭阀门	加压阀开指示（红）闪亮
4	舱体减压开/关（红）	平衡人员闸门舱体内和安全壳外压力。按下一次开启阀门，再次按下关闭阀门	减压阀开指示（红）闪亮
5	应急供气（黄）	为受困在人员闸门舱体内的人员提供压缩空气，2#、3# 控制台上也设置此按钮	应急供气指示（黄）闪亮
6	灯试验（白）	可与控制台等试验整合，测试指示灯	所有指示灯全亮

4.2 运行模式设置

4.2.1 在线密封检测模式

当所有操作人员退出安全壳并在短时间内不再进入安全壳内，人员闸门进入“在线密封检测”模式。进入该模式的先决条件：取消人员闸门电控授权；内、外门完全关闭，行程开关反馈“门体关闭”信号，人员闸门进入闭锁状态。

上述条件满足后，按下“开启密封检测”按钮。

任何条件下,操作人员按下在三处控制台上的“关闭密封检测”按钮,在线密封检测功能解除,加压、减压阀门关闭^[4]。

4.2.2 排气模式

当人员闸门处于在线密封检测模式或加压减压舱模式时。如有人员需要通过人员闸门进入安全壳内,人员闸门需经历“排气模式”才能通过。排气模式一般在人员闸门舱体内可能处于充压状态时使用。进入该模式的先决条件:主控给予人员闸门电控授权或者通过紧急进入开关获得电控授权;内、外门处于完全关闭状态,行程开关反馈“门体关闭”信号。

4.2.3 应急供气模式

当人员被困在人员闸门舱体内,内、外门均无法打开时,为防止人员因处于密闭空间而导致窒息,可在“在线密封检测控制台”、人员闸门内2#或安全壳外3#控制台上将人员闸门设置为“应急供气”模式。事故工况下人员闸门由应急电源供电,此功能仍然可用。按下“关闭密封检测”按钮或再次按下“应急供气”按钮可关闭此功能。进入模式的先决条件:内门处于关闭状态,并反馈状态信号。

4.2.4 停止模式

无论在线密封检测处于何种阶段或操作模式,当操作人员按下“关闭密封检测”按钮后,系统动作关闭停止。

4.2.5 加压/减压舱模式

在安全壳密封和强度试验时,人员需要通过人员闸门进入安全壳内,此时人员闸门将作为加压/减压舱使用。进入模式的先决条件:主控给予人员闸门操作授权或者通过紧急进入开关获得授权;内、外门处于完全关闭状态,行程开关反馈“门体关闭”信号。

4.3 声光警示要求

人员闸门设置声光警示装置的目的:在人员闸门打开或关闭过程中,提醒人员闸门内、外的操作人员注意。声光警示由门体开启或关闭信号触发,贯穿整个开、关门过程。

4.4 区域影像系统

人员闸门的区域影像系统有两套,分别安装在舱体内靠近外门处和安全壳内靠近内门处,能够使操作人员在安全壳1#控制台观察到上述两个区域是否存在妨碍门体运动的物品和人员,以对操作行为进行判断。该装置在遥控操作人员闸门时具有重要作用^[5]。

正常情况下,系统自动对两个区域的进行判断,并向控制台给出信号并参与人员闸门控制;也可通过“区域影像系统暂停按钮(红)”切换为人工模式进行判断。人工模式下,在3#控制台操作,可通过内门窥视窗查看外门内侧情况,在1#控制台通过查看影像区域进行判断。

4.5 通道底板升降要求

华龙一号人员闸门为了满足运输小型设备的需要,增设升降底板。人员闸门小型设备的运输方案详见图2。

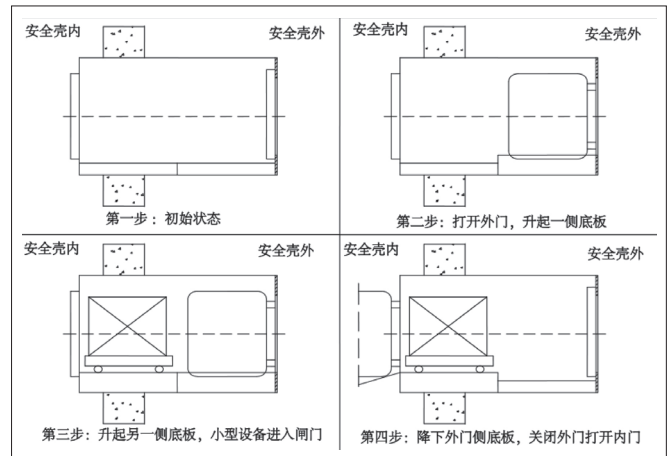


图2 人员闸门小型设备运输方案

人员闸门共设置两块可独自运动的底板,每个活动底板设置一个控制盒。控制盒布置在活动底板旁的固定底板上,位置处于每块底板的中间位置。控制盒上设置“上升”“下降”两个按钮。当操作人员按下对应按钮后,活动底板进行相应运动。当操作人员松开按钮后,电动机停转,活动底板保持在当前位置。设置明显标识指示底板的“高位”及“低位”,底板行程留有余量避免碰撞。升降底板控制开关可与安全壳内2#控制台整合,按钮设置方式允许仪控设计方调整^[6]。

在两块升降底板的上、下适当位置分别设置行程开关。当底板触碰后,升降电动机停止运转。外门侧底板的行程开关参与人员闸门的控制逻辑,避免与人员闸门门体干涉碰撞。

4.6 防回弹装置要求

防回弹装置的主要作用是防止门体关闭后的回弹。关门时,当门体关闭行程开关触发,而锁紧行程开关失效时,门板上的防回弹装置触发,电磁锁产生电磁吸力。当门体关闭行程开关触发,锁紧行程开关生效后断电。

其他情况防回弹装置不触发。开门时，电磁锁不通电。

5 结语

华龙一号是我国具有自主知识产权的第三代核电站堆型，人员闸门作为核岛核二级设备，也具备了更高的安全性以及更多的功能。本文全面简述了其工作模式，以及控制系统的要点，并逐一介绍了基于安全性、便捷性的新增功能。

随着科技进步，核电站堆型进一步升级，人员闸门作为安全壳的一部分，将承载更重要的安全功能。在此基础上，其结构形式的优化、工作模式和功能的多元化、控制系统的先进便捷将是未来的发展方向。

参考文献：

[1] 马晓荣，薛万勋. 核电站人员空气闸门“零泄漏”密封系

统应用研究 [J]. 液压气动与密封, 2021, 41 (05) :51-53.

[2] 黄金勇，周晨曦. 降低海南核电人员闸门机械故障率 [J]. 电工技术, 2021 (08) :154-155.

[3] 刘玉梅，赖斌生，倪立航，等. 福清核电人员闸门常见故障处理 [J]. 科技传播, 2016, 8 (12) :219-220.

[4] 马贤德，梁聪聪，廖亮. 人员闸门在福清核电的应用和问题分析 [J]. 科技传播, 2016, 8 (09) :187-188.

[5] 孙文，杨中伟，于光伟，等. 核电站人员闸门传动机构的方案设计 [J]. 机械设计与研究, 2016, 32 (02) :31-34+45.

[6] 施勤，徐小刚，杨林民. 双层安全壳人员闸门力学分析 [J]. 核动力工程, 2015, 36 (05) :144-147.

作者简介：董绪超（1986.06-），男，汉族，江苏徐州人，硕士研究生，工程师，研究方向：民用核电站燃料转运、工艺运输等相关设备。

(上接第 59 页)

(3) 进行 Y 轴水平方向调整时，水平管段由滚轮支撑，滚轮支架下装有万向球轴承，管道带动滚轮支架一起向左或向右移动。

4.3 R 轴旋转调整

如图 15 所示，R 轴旋转调整通过手动旋转丝杠来实现，以垂直管段轴线为转轴，水平管段在平面上做左右摆动，具体如下：

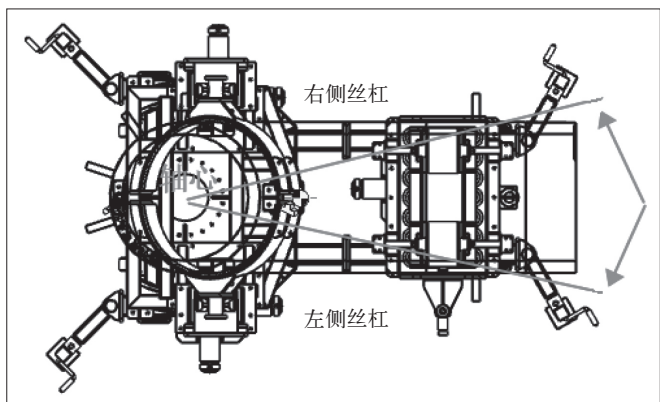


图 15 R 轴旋转调整示意

- (1) 左侧丝杠顶紧滚轮支架，水平管段向右摆动；
- (2) 右侧丝杠顶紧滚轮支架，水平管段向左摆动；
- (3) 水平管段左右摆动时，管道带动滚轮支架一起向左或向右做旋转运动。

5 结语

主管道过渡段组对调整装置实现了对三个方向位置的自动精准调节控制，使得主管道过渡段调节过程具体量化，满足自动焊对组对间隙和错边量的控制要求，保证了组对精度及后续的焊接质量。同时，该装置也降低了对成熟技能人员的过度依赖，降低了人工成本，提高了施工效率，降低了施工过程中的质量安全风险，具有针对性强、操作简单、推广价值高等特点，一定程度上实现了安装机械化、调节自动化。

参考文献：

[1] 章科，李佳斌，王东. CPR1000 核岛安装主管道自动焊精确组对技术 [J]. 核动力工程, 2013, 34 (06) :121-124.

[2] 中国核工业二三建设有限公司. 大厚壁大管道的焊接组对和水平度调整装置 :CN200920177322.8[P]. 2010-06-16.

[3] 王亚楠，郑凯. 一种多缸液压升降装置的智能控制系统设计 [J]. 机械制造与自动化, 2023, 52 (02) :189-192.

作者简介：刘琪琳（1986.07-），男，汉族，河北承德人，本科，高级工程师，研究方向：机械技术。