

核电机组凝结水系统调节阀振动防治

粘志宇

中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司，吉林长春，130021；

摘要：核电机组的凝结水系统除氧器水位调节阀振动是此机型的通病，以M310核电机组CEX025VL阀门为例，多个项目在80%功率平台均存在开度异常波动问题，导致CEX管道振动增大，致使阀门电动头发生损坏，严重影响了系统设备安全稳定运行，许多机组将其列入TOP10问题。田湾核电站5、6号机组工程前期充分收集各电站经验反馈，从系统和设备选型层面提出了主要优化方向和方法，针对流体扰动这一振动根源采取措施，保证凝结水管道内介质流线平顺分布；改一次节流为多级节流，去除局部节流的陡降，优化调节阀选型和结构，同时辅以必要的管道固定、支撑、限位措施。以其彻底解决核电机组CEX调节阀振动这一共性问题，并通过试验进行验证。

关键词：核电；CEX；凝结水；调节阀；管道；振动

DOI：10.64216/3080-1508.25.12.053

引言

在核电厂各个工艺系统回路中，广泛运用调节阀来调节流体的压力、温度、流量、液位等工艺参数，以满足过程控制、系统功能的需要。然而，调节阀运行的工况往往比较复杂，经常面临着设计工况和运行工况存在偏差、流量和压差变化大而开度很小等极端工况。在这些情况下，管道局部湍流、阀门内部闪蒸/气蚀等情况时有发生，介质经过阀门节流时变为汽液两相流体，能量释放和介质动静能同时在转变，阀门和出口管道经常会出现剧烈振动现象，严重时阀门本体乃至管道或支架会产生损伤，同时阀芯也极易被冲刷、吹损，降低了阀门的使用寿命。多个M310型机组凝结水抽取系统（简称CEX）凝结水流量控制站调节阀和再循环气动调节阀经常发生此类问题，源于M310技术开发的华龙一号机组，也存在类似问题及振动风险。本文根据某一核电项目运行情况反馈，针对性的分析问题所在，采取科学、有效和技术手段，完美解决此类问题。

1 问题研究背景

凝结水抽取系统主要功能是将凝汽器中冷凝水，经过加压、升温后输送至主给水除氧器，系统由凝汽器、凝结水泵、轴封加热器及相关的管线、阀门等组成。M310核电机组凝结水系统设有一个凝结水流量控制站，由1路100%全流量调节阀组CEX025VL和1路30%小流量调节阀组CEX026VL组成，调节阀采用气动驱动。除氧器水位采用三冲量控制模式，即根据汽轮机功率、凝结水量和除氧器水位控制调节阀门开度。机组在30%额定功

率及以上运行时，全流量调节阀CEX025VL投运，小流量调节阀CEX026VL关闭；机组在30%以下功率运行时，全流量调节阀CEX025VL关闭，小流量调节阀CEX026VL开启。运行中两个流量调节阀开度具有适当的重叠度。

为了保证凝结水泵在低流量运行时的安全经济性，CEX系统还设置了至凝汽器的最小流量管路，管路上配有最小流量气动调节阀CEX024VL。当一台凝泵运行而凝结水量小于450m³/h时，或当两台凝泵运行而凝结水量小于900m³/h时，CEX024VL都要配合凝泵运行。

在众多电站中，凝结水系统调节阀振动问题较为突出，尤其在国内已经投运的20多台M310类核电机组中，CEX024、025、026VL皆不同程度的发生了振动大、影响机组正常运行的情况，问题现象归类为：

CEX024VL：

- 1) 阀门开启后，阀门下游振动较大，上游振动相对较小。阀门开度较大时，管道振动及噪声都增大。
- 2) 振动过程不稳定，波动大，瞬时可达500~600mm/s。现场噪音很大，伴有类似沙石冲击管道的噪音。

CEX025VL：

- 1) 阀门实际开度与设计选型计算值差别较大。
- 2) 在汽轮机功率为700~840WM时，开度26%-33%之间，阀门振动剧烈，阀门所在管道支架处螺栓明显松脱，CEX母管靠近CEX025VL支管处支吊架直接振松脱，支架从墙上脱落到地上。

3) 阀门在其他开度下无明显振动。

CEX026VL：

- 1) 在机组功率低于30%FP的运行区间，CEX026VL

及其连接管道随着开度变大振动增强，在开启凝结水大流量调节阀 CEX025VL 之前，CEX026VL 阀门振动最剧烈，甚至将新安装的位 CEX026VL 前后端的阻尼减震器完全震坏。

2) 阀门开度在 20% 以下时振动很小，随着开度的增大，振动明显增大，在机组功率 30% 时，阀门开度最大，此时振动最大，阀门关闭 90% 后无明显振动现象^[1]；

3) 现场噪音很大，伴有类似沙石冲击管道的噪音。

2 振动产生的机理分析

通过对多个投运项目 CEX 阀门及管道振动的检测，确定振动的激励源来自阀门本身，与管道布置无关。调节阀及管道强烈的高频振动，振源来自阀门本身，与阀门前变径过急造成阀门进口流速高、阀门内部发生空化振动或湍流振动有极大关系。

2.1 空化振动

空化作用是由于液体在调节阀两端压差大于某值而产生的。阀前压力为 P_1 的液体流经调节阀阀芯、阀座节流处时，因节流口流速急剧上升，由能量守恒定律可知，速度突然增加，压力必然骤降，若此时压力降低至液体入口温度下的饱和蒸气压力 (P_v) 时，阀门流体会部分汽化，并在流体中形成汽泡。当介质经过节流口后，速度下降，压力得到恢复。若恢复后的压力 P_2 仍然低于饱和蒸气压力 (P_v) 时，则流体将继续汽化，形成汽液两相流，即闪蒸。若压力恢复到大于饱和蒸气压力 (P_v) 时，流体不能继续汽化，同时液体中的气泡会因压力回升的作用而破裂还原为液态，即空化。根据流体力学，此时气泡内的压力趋近于无穷大，即有较大的压力产生，它迫使气泡破裂，并形成强大的压力冲击波，这种现象称为汽蚀，此压力冲击波作用在阀芯、阀座金属表面上，使材料很快被破坏（开头如蜂窝），同时，引起较为强烈的振动和噪音^[1]。

调节阀开度越小，阀门前后的压差越大，流体加速并产生汽蚀的可能性也就越大。在调节阀设计时，主要通过对阀门节流部件的优化设计，来减少发生汽蚀的可能性或降低汽蚀程度，进而预防空化振动。

2.2 湍流振动

介质在阀内的节流过程也是其受摩擦、阻力和扰动的过程。当流道内的流体流速较低时，流动呈层流状态，而当流体流经节流口而流速增加过大时，会转变为湍流

状态。根据艾默生过程管理（天津）阀门有限公司对 CEX025VL 阀门的 CFD 仿真模拟分析，当流体流通过阀芯、阀座时，由于节流口流通面积突然变小，压力骤降而速度增大，形成了较为严重的湍流体，并在阀芯底部产生了明显的漩涡流^[2]。这种旋涡的形成及影响因素十分复杂，并有很大的随机性，当旋涡频率与调节阀及其附属装置的固有频率接近或一致时，就会引发结构振动响应。而事实证明，在 M310 投运电站中，CEX 系统调节阀湍流振动较为严重。

3 防治措施

调节阀振动的产生原因有很多种，且难以准确判断产生振动的主因。田湾核电站 5、6 号机组在 CEX 系统调节阀设计选型阶段，吸取了前期投运项目充分的振动情况反馈和振动机理分析，进行了有针对性的阀门合理选型和优化设计。

3.1 合理选择阀门减压级数

为防止液体流经调节阀时产生闪蒸和汽蚀现象，尤其是压差较大的调节阀，在阀门设计计算时，应进行阀门是否会发生闪蒸和汽蚀判定。当判定会发生汽蚀时，应采取防治措施。调节阀防护闪蒸与汽蚀方法主要有提高阀前压力 P_1 和多级减压方法，田湾 5、6 项目采用的是多级减压方法，通过多级节流分级降压来分担压差，使每一级的压降都不会大于本级入口压力对应的闪蒸压差，避免发生闪蒸和汽蚀。

工程设计中简化了闪蒸和汽蚀的验算，以阻塞流压差 ΔP_s 为判定准则。据判定方法，当调节阀两端压差 ΔP 大于阻塞流压差 ΔP_s 时，即 $\Delta P > \Delta P_s$ ，阀门内部发生了汽蚀，阀门处于阻塞状态。

其中 $\Delta P = P_1 - P_2$ ， P_1 ：阀前压力，MPa； P_2 ：阀后压力，MPa；

阻塞流压差 ΔP_s 计算公式：

$$\Delta P_s = F_L^2 (P_1 - F_F P_v)$$

$$\text{其中: } F_F = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{P_v}{P_c}}$$

P_c ：热力学临界压力，22.15MPa；

F_L ：液体压力恢复系数，与阀门阀芯形状、阀体结构和阀门流向有关，一般通过试验获得；

P_v ：调节阀入口液体温度下对应的饱和蒸汽压力。

根据上述公式，对 CEX 系统调节阀进行计算判定：

1) CEX024VL:

$Q: 982t/h; P_1: 2.89MPa; P_2: 0.1MPa; T: 34^\circ C;$
 $SG: 0.994Kg/dm^3$; 根据前期项目阀门设计参数, F_L 取 0.83。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2.89 - 0.1 = 2.79MPa$$

$$\Delta P_s = F_L^2 (P_1 - F_F P_v) = 0.83^2 * 0.83 (2.89 - 0.95 * 0.005) \\ = 1.97 MPa$$

$\Delta P > \Delta P_s$, 此工况阀门内部将发生汽蚀。

2) 对 CEX025VL:

$Q: 3505t/h; P_1: 2.55MPa; P_2: 1.86MPa; T: 28.6^\circ C;$
 $SG: 0.994Kg/dm^3$; $F_L=0.83$ 。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2.55 - 1.86 = 0.77MPa$$

$$\Delta P_s = F_L^2 (P_1 - F_F P_v) = 0.83^2 (2.55 - 0.95 * 0.005) \\ = 1.61 MPa$$

$\Delta P < \Delta P_s$, 所以阀门内部不会发生汽蚀。

3) 对 CEX026VL:

$Q: 1402t/h; P_1: 2.85MPa; P_2: 0.65MPa; T: 23.1^\circ C;$
 $SG: 0.994Kg/dm^3$; $F_L=0.83$ 。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2.85 - 0.65 = 2.25MPa$$

$$\Delta P_s = F_L^2 (P_1 - F_F P_v) = 0.83^2 (2.85 - 0.95 * 0.005) \\ = 1.95 MPa$$

$\Delta P > \Delta P_s$, 此工况阀门内部将发生汽蚀。

根据前面的计算判定, CEX025VL 阀门不会汽蚀, 采用一级减压即可。CEX024VL 和 CEX026VL 将发生汽蚀, 需采取多级减压方式。田湾 5、6 项目经过调节阀选型咨询工作, 确定两个阀门皆采用了 3 级减压笼式阀芯方案, 并且相较参考电站取消了阀后节流孔板。

3.2 优化节流部件、改善流体流动状态

根据计算, CEX025VL 压差较小, 不会发生汽蚀。而前期项目运行情况, 阀门及管线在特定阀门开度 (26%~33%) 下振动剧烈, 其他开度下无明显振动。分析表明流体流经阀门在节流元件后产生高流速流束以及旋涡流, 其大小及剧烈程度随着流体流量、压差、节流元件及其开度而不同。高流速流束以及旋涡流使作用在阀芯上的流体力波动变大, 产生对阀芯的扰动, 导致阀芯振动变大。即 CEX025VL 阀门开度在 26%~33% 区间, 流体作用在阀芯上的力的波动比其他区域要大, 导致此区间阀门振动较大。在特定的压差、流量和管线布置以及阀门开度下, 流体的湍流导致管线和 CEX025VL 阀门在 26%~33% 开度下振动比较剧烈。

对节流部件进行优化, 使其具有较好的稳流作用, 可有效减缓湍流, 避免引起湍流振动。田湾 5、6 项目 CEX 系统调节阀采用打孔阀笼节流件方案(多层次套筒式)。打孔阀笼可以对流体起到较好的稳流作用, 通过合理的布置阀笼打孔的大小, 间距以及排列形式, 可以有效的控制流束的大小和分布方式, 避免流束经过节流后交汇而加剧流体的湍流。试验对比同类项目, 阀门额定行程由 4.00" 提高到 8.00", 大大改善了阀门的实际开度。

3.3 增大管系刚性

在阀门合理、优化设计选型的同时, 增大管系刚性, 提高管系固定频率、避免共振也是调节阀振动防治的必要辅助措施。田湾 5、6 号机组, 通过管系合理布置, 在保证应力分布合理的条件下, 在 CEX024VL、025VL 和 026VL 调节阀附近, 皆设置了固定或径向限位支架, 以便制约管道振动。由于汽蚀一般发生在阀腔出口, 故限位支架设置在调节阀出口处。

4 调试、运行情况

田湾核电站 5 机组 CEX 系统 5 月开始调试, 机组 9 月商运。在调试及运行过程中, CEX024/025/026VL 没有发生过振动现象, 运行稳定。6 号机组情况相同。证明采取的振动防治措施起到了很好的效果。

5 结论

M310 机组 CEX024/025/026V 调节阀在运行过程中的振动问题已成为共性问题, 本文首先现场的振动特点, 确认了振动的来源, 并根据阀门前变径管计算及阀门阻塞流计算, 确认了阀门振动具体原因, 结合系统设置情况, 提出了具体的振动防治和阀门优化措施。经过田湾核电站 5、6 号机组运行实践, 证明防治措施切实、有效, 效果很好, 这对其他厂址类似缺陷整改措施的制定具有很强的参考意义。

参考文献

- [1] 张铭刻. 核电站凝结水旁路调节阀振动大的原因分析与对策 [J]. 核电设备, 2019, 12 (04) : 405-409.
- [2] 王彬, 苏福理, 梅红刚. 基于流体动力学的控制阀振动分析及方案优化 [J]. 通用机械, 2020, 02 (Z1) : 54-57.

作者简介: 粘志宇 (1980-), 吉林敦化人, 高级工程师, 从事发电厂热能与动力工程设计工作。