

核电厂设备液压阻尼器闭锁速度研究分析

贺枫

(常州格林电力机械制造有限公司 江苏 常州 213119)

摘要: 本文对核电厂主设备支承用大型液压阻尼器工作时内部关键结构进行分析,为实现要求的性能,采用液压流体力学计算公式,设计阻尼阀的相关参数。本文描述的理论计算方法可用于工程项目中大型液压阻尼器性能的初步设计。

关键词: 液压阻尼器; 液压流体力学; 性能设计; 阻尼阀参数

1 概述

核电厂主设备支承用大型液压阻尼器是压水堆核电厂反应堆冷却剂系统主设备蒸汽发生器和主泵支承中的关键部件,用来连接蒸汽发生器或反应堆冷却泵和混凝土墙体。

目前,国内在役压水堆核电机组蒸汽发生器和主泵支承用大型液压阻尼器均为进口,严重依赖国外厂商。对于“华龙一号”核电机组,设计制造具有自主知识产权的国产主设备支承用大型液压阻尼器,可解决该设备国产化和设备出口受限问题,对我国提高核电装备自主设计制造核心能力和“核电走出去”战略的实现具有重要意义。

以某工程项目上游设计院编写的《核岛主设备支承用液压阻尼器设备规格书》(以下简称“规格书”)为设计依据,设计制造国产主设备支承用大型液压阻尼器(以下简称“液压阻尼器”)。本文对液压阻尼器工作过程中内部关键结构的运动状态进行分析,采用液压流体力学计算公式,进行液压阻尼器内部结构工作时的性能分析计算。

2 液压阻尼器功能、结构和工作过程

2.1 液压阻尼器功能

在核电厂正常运行工况时,液压阻尼器允许蒸汽发生器和主泵缓慢运动且产生的阻力很小,以适应反应堆冷却剂系统因温度变化而产生的膨胀和收缩。在地震或事故工况(管道破裂)时,液压阻尼器可提供满足要求的刚度并承受相应的动态拉、压载荷,以约束蒸汽发生器和主泵的运动,保证蒸汽发生器和主泵的结构完整性。在外加载荷消失后,液压阻尼器缸体内不应保持加压状态,阻尼阀闭锁应解除。

2.2 液压阻尼器结构

规格书要求液压阻尼器由双向作用缸体组成,缸体

用内置的活塞隔开,被隔开的两个工作腔体通过流量控制阀连接。正常运行工况下,随着液压阻尼器活塞杆的拉伸或压缩,两个工作腔体内的液压油通过流量控制阀进行流动,此工况下两个工作腔体间流体流动的速度要小于事故工况下液压阻尼器两个工作腔体间流体流动的速度。

本文设计的液压阻尼器采用液压控制原理实现支撑作用,其结构特点可简化为由一个单活塞杆系统的液压装置,分别在有杆腔和无杆腔布置了一组特殊结构的阻尼阀,见图1。在活塞运动时,液压介质通过阻尼阀在液压缸和储油箱之间流动,液压介质流动形成的压差 ΔP 决定了阻尼阀的开启、关闭,从而控制活塞的自由位移与锁定。

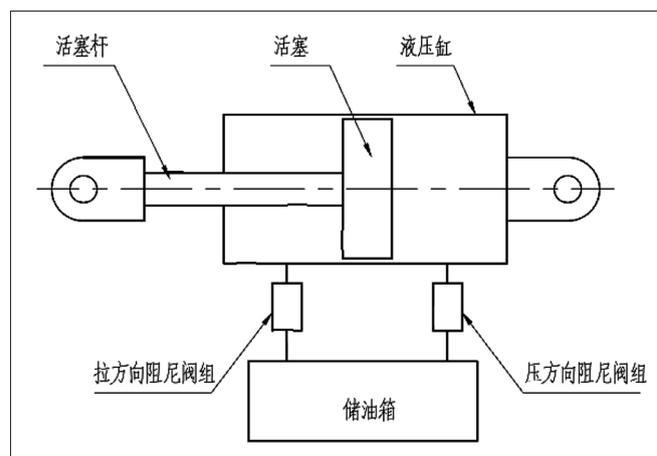


图1 液压阻尼器结构简图

2.3 液压阻尼器工作过程

根据液压阻尼器功能要求,当被支撑设备处于正常工况时,活塞仅因设备的热胀冷缩影响而缓慢运动,运动速度极小,活塞两边的压差 ΔP 很小。此时阀芯在阀芯弹簧的作用下阻尼阀处于“开口”状态,液压缸两个工作腔体内的液压介质可以从阀芯周边的小孔和阀芯中间阻尼小孔同时从左向右流过,如图2所示,不会产生

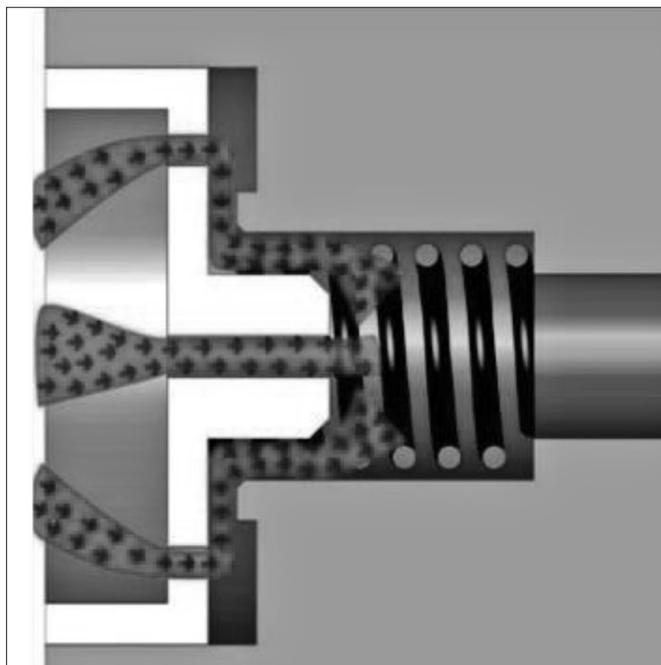


图2 阻尼阀开启状态

阻尼力。此时液压阻尼器对设备的反作用力，仅为运动部件因自重产生的摩擦力和密封件作用下的摩擦力，这两个作用力的总和被称为低速摩擦阻力，该阻力很小，不会影响设备的缓慢运动。

当被支撑设备受到偶发冲击载荷作用（激振频率1~33Hz），使活塞速度 v 提升，液压缸内活塞两侧工作腔的压差 ΔP 迅速增大。当活塞速度形成的压差 ΔP 足以克服阀芯弹簧力使阀芯关闭时（此时活塞移动速度被称为闭锁速度），液压缸内活塞两侧工作腔的通道也几乎被阻断，液压介质仅能从阀芯上的阻尼小孔从左向右流过，如图3所示。由于液压油的粘性导致流动不畅，产生粘滞阻力，活塞移动速度降为闭锁后速度，液压阻尼器外在表现为等效刚性支承，可以提供事故载荷的阻尼力，从而实现限制振幅或位移，达到保护被支撑设备的目的。

3 液压阻尼器性能设计

液压阻尼器实现其性能的关键运动部件为阻尼阀，液压阻尼器性能设计即为阻尼阀参数的设计。根据上文液压阻尼器工作过程的分析，阻尼阀的状态变化为：阻尼阀常开→阻尼阀芯开始移动→阻尼阀关闭→阻尼阀持续闭合→阻尼阀芯开始反向移动→阻尼阀打开。

规格书要求液压阻尼器的性能参数指标为：活塞处于中间行程位置时，分别在拉伸和压缩两个方向下移动活塞，液压阻尼器发生闭锁，闭锁速度应在6~60mm/min范围内；在承受最大载荷8500kN下，液压阻尼器的闭锁后速度应 ≤ 10 mm/min。由图1可知，液压阻尼器拉、压方向阻尼阀组结构一致，工作原理一致，本文以压方

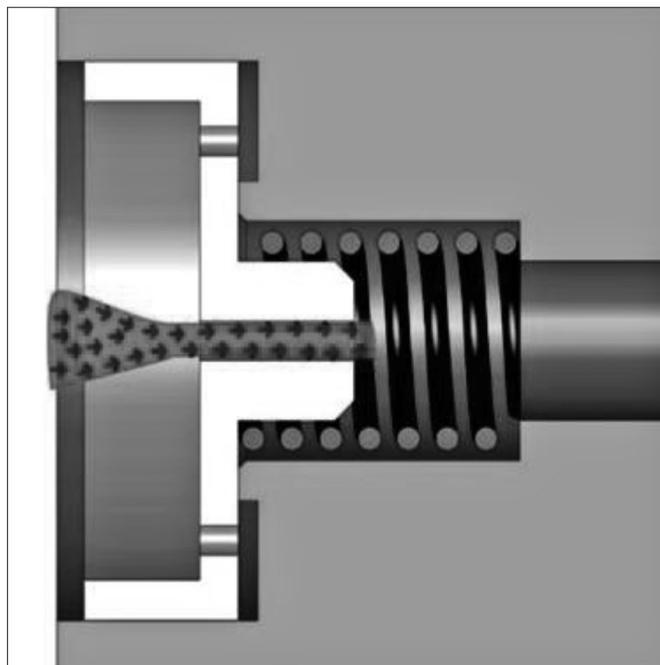


图3 阻尼阀关闭状态

向为例，对阻尼阀芯开始移动、阻尼阀持续闭合过程进行分析，设计阻尼阀的相关参数。

3.1 阻尼阀芯开始移动状态

3.1.1 分析与计算

3.1.1.1 阻尼阀常开状态

根据液压油在流经孔口时的流量公式^[1]，流经阻尼阀芯孔的流量为：

$$Q = C_d \times A_0 \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中： C_d —流量系数，取 $C_d=0.6$ ；

A_0 —孔口面积；

ΔP —液压油流经阻尼阀的阀压降；

ρ —液压油密度；

Q —流量。

根据流体作定常流动时的连续性方程有：

$$Q = Av = C_d \times A_0 \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

式中： A —活塞截面积；

v —液压阻尼器闭锁速度。

3.1.1.2 阻尼阀芯移动状态

阻尼阀芯的移动需要克服阀芯弹簧预紧力，即阀芯左侧作用的压差力 \geq 阀芯右侧阀芯弹簧预紧力。阻尼阀关闭瞬间的受力情况近似可以用如下方程来描述：

$$\Delta P A_1 = kx \quad (3)$$

式中： ΔP —液压油流经阻尼阀的阀压降；

A_1 —阀芯受力面积；

k —阀芯弹簧刚度；

x - 阀芯弹簧被压缩长度, 取 $x=11\text{mm}$ 设计。
由公式 (1)、(2)、(3) 可得:

$$v = \sqrt{k \frac{0.72xA_0^2}{A^2\rho A_1}} \quad (4)$$

3.1.2 计算结果

液压阻尼器参数见表 1。

表 1 液压阻尼器参数表

规格	A/mm^2	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	A_1/mm^2
SG 液压阻尼器	212371.66	1072.4	706.86

规格书要求液压阻尼器的闭锁速度为 $6 \sim 60\text{mm}/\text{min}$, 将该要求和表 1 中数值代入公式 (4) 计算可得出阀芯弹簧刚度 k 、阀芯上开孔面积 A_0 需要满足的要求, 见表 2。

表 2 液压阻尼器闭锁速度设计要求

规格	阀芯弹簧刚度 k 、阀芯上开孔面积 A_0 应满足以下要求
SG 液压阻尼器	$4.32 \times 10^{-11}\text{N} \cdot \text{m}^3 \leq kA^2 \leq 4.32 \times 10^{-9}\text{N} \cdot \text{m}^3$

当阀芯弹簧刚度和阀芯开孔面积参数满足表 2 的要求时, 能够实现液压阻尼器的闭锁速度在 $6 \sim 60\text{mm}/\text{min}$ 。

3.2 阻尼阀持续关闭状态

3.2.1 分析与计算

流体流经细长孔, 一般都是层流状态, 流量公式与圆管层流的相同。不考虑局部损失的影响, 由流体力学可知细长小孔的流量公式^[2]有:

$$Q = \frac{\pi d_0^4}{128\mu l} \Delta P' \quad (5)$$

式中: μ - 液压油动力黏度;

d_0 - 阻尼小孔直径;

l - 阻尼小孔长度;

$\Delta P'$ - 阻尼小孔两端压差。

阻尼小孔两端压差 $\Delta P'$ 公式:

$$\Delta P' = \frac{F}{A} \quad (6)$$

式中: F - 液压阻尼器承受的最大极限载荷;

A - 活塞截面积。

根据流体作定常流动时的连续性方程有:

$$Q = Av_1 = \frac{\pi d_0^4}{128\mu l} \Delta P' \quad (7)$$

式中: A - 活塞截面积;

v_1 - 液压阻尼器闭锁速度。

由公式 (5)、(6)、(7) 可得:

$$v_1 = \frac{\pi d_0^4 \times F}{128\mu l \times A^2} \quad (8)$$

3.2.2 计算结果

液压阻尼器参数见表 3。

表 3 液压阻尼器参数表

规格	F/N	A/mm^2	$\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
SG 液压阻尼器	8500000	212371.66	0.21448

规格书要求液压阻尼器在承受最大载荷下的闭锁后速度 $\leq 10\text{mm}/\text{min}$, 将该要求和表 3 中参数代入公式 (8) 计算可得出阻尼小孔孔径 d_0 、长度 l 应满足的要求, 见表 4。

表 4 液压阻尼器闭锁后速度设计要求

规格	d_0 、 l 应满足的要求
SG 液压阻尼器	$\frac{d_0^4}{l} \leq 7.73 \times 10^{-12}\text{m}^3$

当阻尼小孔孔径和长度参数满足表 4 的要求时, 能够实现液压阻尼器的闭锁后速度 $\leq 10\text{mm}/\text{min}$ 的要求。

4 结语

本文对核电厂主设备支承用液压阻尼器工作时内部关键结构进行分析, 为实现规格书要求的性能, 采用液压流体力学计算公式, 设计计算阻尼阀的相关参数。本文描述的理论计算方法可用于工程项目中液压阻尼器性能的初步设计。但上述计算未考虑流体的沿程压力损失、液压油的压缩性、阀芯周围的泄漏、零件制造精度等因素的影响, 按理论计算值设计的液压阻尼器性能与试验台实测值必定会存在误差, 需通过试验台实测值进行阻尼阀参数的修正。

参考文献:

- [1] 王益群, 高殿荣. 液压工程师技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 苏欣平, 刘士通. 工程机械液压与液力传动: 第 2 版 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.