

# 有长连接管调压室水头损失系数计算方法研究

蔡付林, 宋长福, 周建旭

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 研究具有长连接管的阻抗式调压室水头损失系数的计算方法, 给出基于 Gardel 三通水头损失系数经验公式、焊接三通水头损失实验资料以及截面突变管道水头损失资料; 得出这种调压室不同流态下水头损失系数的计算方法, 并将不同算法得到的调压室水头损失系数分别与水力模型试验结果进行了比较和分析. 研究表明, 基于 Gardel 三通水头损失系数经验公式及截面突变管道水头损失系数计算的调压室水头损失系数与试验结果具有较好的一致性.

**关键词:** 调压室; 水头损失系数; Gardel 公式; 焊接三通

**中图分类号:** TV932.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2003)06-0027-03

常见的阻抗式调压室结构形式有两种: 第一种是调压室大井底部与输水隧洞顶部的距离很近, 两者之间由隔板分开, 其水头损失系数取决于隔板上阻抗孔口的形状及大小, 其水头损失系数目前已有比较系统的研究成果<sup>[1~3]</sup>, 可以引用的资料较丰富; 第二种是大井与输水隧洞之间由连接管连接, 见图 1, 它适合于调压室最低涌浪水位到输水隧洞顶部之间距离较大的情形, 如加拿大的帕斯瀑布 (Chute-Des-Passes) 水电站<sup>[4]</sup> 的上游调压室, 其大井内径为 39.65 m, 大井底板高程为 321.5 m, 引水隧洞顶部高程为 210.5 m, 二者垂直距离达 111 m, 采用直径为 9.15 m 的竖井连接调压室大井和引水隧洞, 大大减少了调压室的工程量.

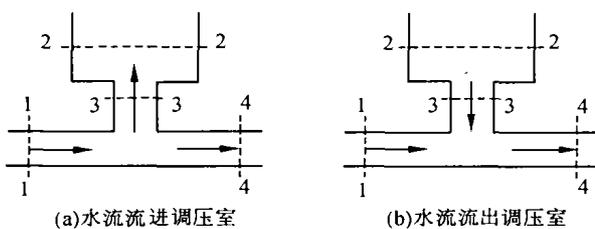


图 1 调压室典型流态示意图

目前, 关于带连接管调压室水头损失系数的研究成果较少, 缺少系统性. 在过渡过程中, 这种调压室的流态可以概括为图 1 所示水流在 T 形三通管和截面积突变管道中的流动. 鉴于各电站对调压室水头损失系数的要求不同, 在方案比选阶段, 其大井和连接管可以分别有几种待选直径, 使调压室有不同的阻抗特性. 如果通过水力模型试验测试各方案的

阻抗特性来确定连接管和大井直径的合理匹配方案, 则研究周期长、代价大, 而对于 T 形三通管和截面突变管道的局部水头损失系数已经有丰富的研究成果, 如能利用这些资料, 通过适当的计算方法来初步确定调压室的水头损失特性, 则可以大大加快设计方案的论证进度, 提高成果的可靠性.

## 1 基于 Gardel 公式计算水头损失系数

### 1.1 T 形三通管和截面突变管道水头损失系数

为了便于叙述, 将有长连接管阻抗式调压室中的流态分为两种: 一种是将隧洞中水流分成两股, 其中一部分进入调压室, 另一部分继续沿原方向流动, 这种流态简称为分流, 如图 1(a) 中所示水流流入调压室的情形; 另一种是从调压室流出的水流汇入隧洞, 与隧洞中的水流合二为一, 这种流态简称为合流, 如图 1(b) 中所示水流流出调压室时的流态.

关于 T 形三通管在分流与合流时的水头损失特性, 早在 1926 ~ 1931 年, Vogel<sup>[5]</sup> 等学者已经进行了系统的水力学模型实验. 由于这种流动形式在实际工程中广泛存在, 20 世纪 50 年代 McNown<sup>[6]</sup> 和 Gardel<sup>[7]</sup> 又分别独立地对它进行了系统的试验. Gardel 在此基础上提出了一个经验公式, 称为 Gardel 公式. 60 年代初期, Blaisdell 和 Manson<sup>[8]</sup> 在研究输水系统能量损失特性时也进行了这方面的试验. 70 年代 Miller<sup>[9]</sup> 又进行了相关试验, 并且对自 30 年代以来各家同类试验成果和他自己的试验成果进行了综合对比分析, 其研究结果表明, 除了 Vogel 的成果,

其余各研究者的成果之间具有很好的一致性. 他还将 Gardel 公式预测的水头损失系数与试验结果进行比较, 表明它有令人满意的精度.

定义分流时断面 1 至断面 3 的水头损失  $\Delta h_{13} = K_{13} v_1^2 / (2g)$ , 合流时 3, 4 断面间水头损失  $\Delta h_{34} = K_{34} v_4^2 / (2g)$ , 用本文的变量符号重新描述 Gardel 三通水头损失系数公式<sup>[7]</sup>, 则

$$K_{13} = 0.95(1 - q_{31})^2 + q_{31}^2 \left[ 1.3 \cot \frac{180^\circ - \theta}{2} - 0.3 + \frac{0.4 - 0.1A_r}{A_r^2} \left( 1 - 0.9 \sqrt{\frac{r}{A_r}} \right) \right] + 0.4 q_{31} (1 - q_{31}) \left( 1 + \frac{1}{A_r} \right) \cot \frac{180^\circ - \theta}{2} \quad (1)$$

$$K_{34} = -0.92(1 - q_{34})^2 - q_{34}^2 \left[ (1.2 - \sqrt{r}) \left( \frac{\cos \theta}{A_r} - 1 \right) + 0.8 \left( 1 - \frac{1}{A_r^2} \right) - \frac{(1 - A_r) \cos \theta}{A_r} \right] + (2 - A_r) q_{34} (1 - q_{34}) \quad (2)$$

式中:  $K_{13}$  为分流时断面 1 至断面 3 的局部水头损失系数;  $K_{34}$  为合流时断面 3 至断面 4 的水头损失系数;  $q_{31} = Q_3 / Q_1$  为分流时的流量比;  $q_{34} = Q_3 / Q_4$  为合流时的流量比;  $Q_1, Q_3$  和  $Q_4$  分别为断面 1, 3, 4 的流量;  $\theta$  为两分流支管(连接管与调压室下游隧洞)轴线之间的夹角, 对于本文  $\theta = 90^\circ$ ;  $A_r = A_3 / A_1$  为连接管与输水隧洞的面积比,  $A_1, A_3$  分别为断面 1, 3 的面积;  $r$  为连接管与隧洞交接处的圆角半径与连接管直径  $D_3$  之比, 故取  $r = 0$ ;  $v_1, v_4$  分别为断面 1 和断面 4 中的平均流速;  $g$  为重力加速度.

分流时, 断面 3 至断面 2 的局部水头损失由波达公式<sup>[10]</sup>给出:

$$\Delta h_{32} = \left[ 1 - \left( \frac{D_3}{D_2} \right)^2 \right]^2 \frac{v_3^2}{2g} = K_{32} \frac{v_3^2}{2g} \quad (3)$$

式中:  $D_2, D_3$  分别为调压室大井及连接管直径;  $v_3$  为连接管中平均流速;  $K_{32}$  为断面 3 至断面 2 管道突然扩大的局部水头损失系数.

合流时, 断面 2 至断面 3 的局部水头损失按下式计算:

$$\Delta h_{23} = K_{23} \frac{v_3^2}{2g} \quad (4)$$

式中:  $K_{23}$  为管道突然缩小时的局部水头损失系数, 根据  $A_3$  与  $A_2$  的面积比, 由图 2 所示试验曲线<sup>[9]</sup>得到, 图中的  $K$  均针对面积较小的管道  $A_3$  中流速水头给出.

### 1.2 调压室水头损失系数的计算

以上游调压室为例, 分流时从断面 1 到调压室大井断面 2 的水头损失为

$$\Delta h_{12} = \Delta h_{13} + \Delta h_{32} \quad (5)$$

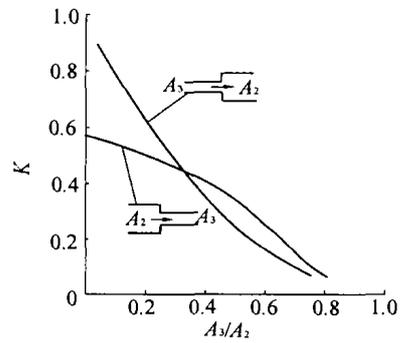


图 2 管道突然扩大和缩小时局部水头损失系数

考虑到  $v_3 = Q_3 / A_3 = q_{31} A_1 v_1 / A_3$ , 综合式(1)(3)(5), 可以得到分流时水流流入调压室的水头损失为

$$\Delta h_{12} = K_{12} \frac{v_1^2}{2g} = \left[ K_{13} + K_{32} q_{31}^2 \left( \frac{A_1}{A_3} \right)^2 \right] \frac{v_1^2}{2g} \quad (6)$$

因此, 分流时水流进入调压室的水头损失系数为

$$K_{12} = K_{13} + K_{32} q_{31}^2 \left( \frac{A_1}{A_3} \right)^2 \quad (7)$$

同理, 可以得出合流时水流流出调压室的水头损失系数为

$$K_{24} = K_{23} q_{34}^2 \left( \frac{A_4}{A_3} \right)^2 + K_{34} \quad (8)$$

文献[11]对国内某抽水蓄能电站调压室进行了水力模型试验, 该抽水蓄能电站输水隧洞直径为  $D_1 = D_4 = 7.2$  m, 调压室大井直径  $D_2 = 10.0$  m, 保持连接管长度  $L_3 = 30.0$  m 不变, 改变其直径  $D_3$  进行水力模型试验, 调压室结构参数见表 1.

表 1 调压室结构参数

方案	$D_3/m$	$A_3/A_1$	$A_3/A_2$	$L_3/D_3$	$K_{32}$	$K_{23}$
方案一	4.3	0.357	0.185	7.05	0.66	0.51
方案二	6.0	0.694	0.360	5.05	0.41	0.42
方案三	7.2	1.000	0.518	4.21	0.23	0.32

图 3 和图 4 为根据表 1 中的流道结构参数和上述方法计算得到的调压室水头损失系数与流量比关系曲线. 可以看出在分流与合流两种流态下, 流量比在 0.0~0.5 范围内, 计算值与试验结果很接近; 流量比在 0.5~1.0 范围内, 计算值与试验值之间的差别随流量比的增加而增大. 计算值与试验值之间的

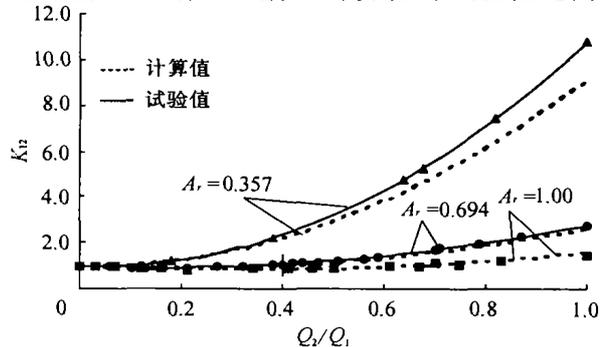


图 3 分流时调压室水头损失系数

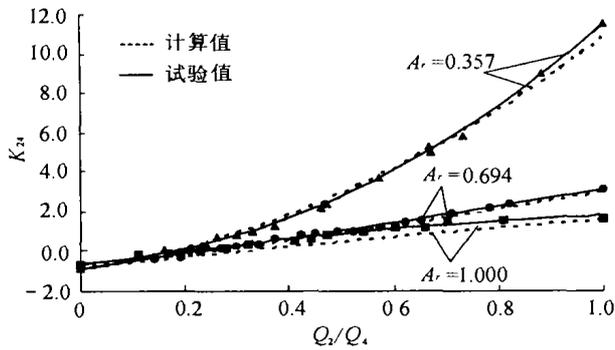


图4 合流时调压室水头损失系数

差别随着连接管与隧洞的面积之比  $A_r$  的增大而减小. 当  $A_r$  大于或等于 0.694 时, 两者之间具有很好的一致性, 差值在 6% 以内.

有关研究表明<sup>[9]</sup>, 当两个局部水头损失单元之间的连接管道长度小于 30 倍连接管直径时, 这两个单元的流态会相互影响. 工程中采用的三通管分流与合流以及管道突然扩大或收缩等局部水头损失系数, 均为在相应单元进口之前和出口之后有足够长的等截面直管条件下, 分别通过试验得到的. 由表 1 可以看出, 本文讨论的带连接管的阻抗式调压室的 T 形三通通道与调压室大井之间相对距离  $L_3/D_3$  均在上述影响范围之内, 因此, 水流进、出调压室时, 二者流态互相影响是不可避免的. 由于在用上述方法计算调压室水头损失系数时, 无法定量地考虑此影响, 故计算结果和试验数据之间存在区别, 但从图 3 和图 4 中可以看出, 此差别是可以接受的.

当三通支管与其相邻的局部水头损失单元之间距离大于 3 倍支管直径时, Gardel 公式才能较好地估算三通的水头损失系数. 因此, 当调压室大井底部到引水隧洞顶部之间距离小于 3 倍支管直径时, 宜慎用上述公式.

图 4 中合流情况, 当流量比  $Q_2/Q_4 = 0$  时, 从调压室流出的流量为零, 调压室相当于隧洞的测压管. 只要调压室中的压力略微上升, 大于隧洞壁面静压, 就会有一小部分水流从调压室流出, 然后加速到与隧洞中流速相等. 在这一过程中, 调压室中的水体从连接点上游隧洞的流动水体中获得能量, 所以, 此时水头损失系数  $K_{24}$  为负数. 流量比接近为零时, 断面 2 到断面 4 之间水头损失大约为断面 4 流速水头的 1.0 倍, 从而使  $K_{24}$  接近 -1.0.

## 2 基于焊接三通管试验资料计算水头损失系数

文献[12]提供了焊接 T 形三通分流与合流时局部水头损失系数, 它们都以支管中(相当于图 1 中连接管上断面 3)流速水头为基准. 这种表达方式存在两点不足: 其一, 分流与合流的水头损失系数  $K_{13}$ ,  $K_{34}$  仍然随流量比变化, 但支管与主管之间流量比小于 0.2

时, 水头损失系数迅速增大, 不便于直观表达; 其二, 无法用图表或拟合公式描述流量比在 0~1.0 变化范围内的水头损失系数. 为了便于比较, 下面将焊接 T 形三通分流与合流的水头损失系数也按 1 中的基准流速分别进行换算. 其中, 分流时水头损失为

$$\Delta h_{12} = K_{12} \frac{v_1^2}{2g} = (K_{13} + K_{32}) q_{31}^2 \left( \frac{A_1}{A_3} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} \quad (9)$$

合流时水头损失为

$$\Delta h_{24} = K_{24} \frac{v_4^2}{2g} = (K_{23} + K_{34}) q_{34}^2 \left( \frac{A_4}{A_3} \right)^2 \frac{v_4^2}{2g} \quad (10)$$

式中:  $K_{13}$  为三通分流时水头损失系数, 可根据  $D_3/D_1$  和流量比  $Q_3/Q_1$  从文献[12]中查取;  $K_{34}$  为三通合流时水头损失系数, 可根据  $D_3/D_1$  和流量比  $Q_3/Q_4$  从文献[12]中查取; 其余各项含义同前.

根据式(9)(10)计算的调压室水头损失系数分别如图 5 和图 6 虚线所示. 分别比较图 5、图 3 以及图 6、图 4, 可以看出, 两种计算方法所反映的调压室水头损失系数随流量比变化的总趋势, 均与水力模型试验成果一致. 使用 Gardel 公式和截面突变管道水头损失资料计算得到的调压室水头损失系数偏小; 而基于焊接 T 形三通管和截面突变管道局部水头损失系数计算所得的调压室水头损失系数偏大. 从精度上看, 当  $A_r$  很小时, 该两种计算方法前者优于后者;  $A_r = 0.357$ , 分流情况下, 后者与试验值之间的最大相对误差达 21.2%; 在  $A_r$  较大时, 两种方法都能很好地计算调压室的水头损失系数.

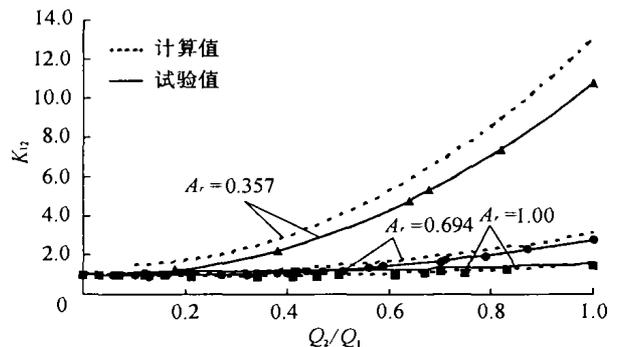


图5 基于焊接三通分流时调压室水头损失系数

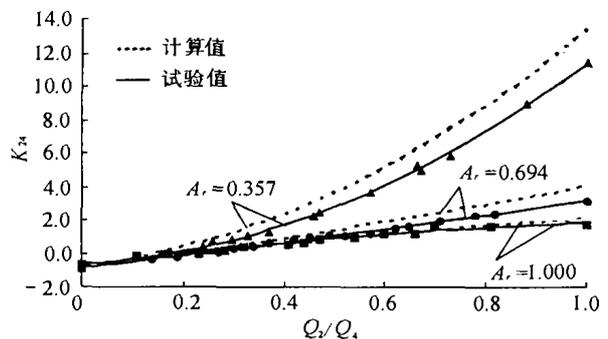


图6 基于焊接三通合流时调压室水头损失系数

(下转第 48 页)

自调节,使运行更可靠,轴瓦许用压强可达 11 MPa.弹性金属塑料瓦多在稀油润滑的条件下工作,也可在轴瓦中填加润滑剂用在闸门或启闭机轴承上自润滑.弹性金属塑料瓦启动与停机间隔 0.1 h,灵活、方便,且安装维修后运行前,不需刮瓦,正常运行时允许冷却水中断 45 min,其许用温度可达 75~110℃.

表 1 弹性金属塑料瓦的摩擦磨损性能

润滑状态	摩擦系数	摩擦宽度/mm
干摩擦	0.07~0.12	15
边界摩擦	0.03~0.05	5
油膜摩擦	0.003~0.005	—

## 2.2 水润滑轴承

用在斜泵上的水润滑轴承材料主要有 P23 酚醛塑料和 F102 复合材料,其中 P23 酚醛塑料在 20 世纪 80 年代由于其良好的润滑性能、大抗压强度和弯曲强度以及较小的摩擦系数等优点得到广泛应用.P23 酚醛塑料水润滑摩擦系数 0.13,抗压强度 147 MPa,弯曲强度 63.7 MPa;吸水性小,饱和吸水率为 0.5%;但材料较脆,耐冲击性能不够,其冲击强度为 4 kJ/m<sup>2</sup>.

F102 是混杂纤维增强树脂的复合材料,其中填加适量的固体润滑剂和抗磨剂等,具有良好的摩擦磨损特性,承载力高,能承受较大的冲击荷载,抗压强度 220 MPa,弯曲强度 88 MPa,抗拉强度 53 MPa,冲击强度 12 kJ/m<sup>2</sup>,球压痕硬度可达 236 MPa.与青铜和

巴氏合金相比,F102 复合材料具有良好的抗咬合性、耐磨性和低摩擦系数,干摩擦系数 0.15,水摩擦系数 0.12;具有较低的弹性模量,有自动调位作用,对安装要求较低;能在 170℃ 高温下长期工作,热变形温度 200℃;可在干摩擦下或油、水、乳化液等润滑剂中工作.F102 复合材料吸水性小,只有 0.21 mg/cm<sup>2</sup>,具有良好的自润滑特性.

## 3 结 语

对大型斜轴伸水泵的导轴承,应针对导轴承的各种运行工况,应用动态分析理论进行计算,需慎重采用金属轴承或非金属轴承,对轴承材料应进行强度复核,润滑剂的选用应满足其技术要求.由于是滑动轴承,对轴瓦与轴颈等部位的配合,以及间隙、水平度、硬度和表面光洁度等应按技术规范严格掌握,这对提供轴承耐磨性和承载能力至关重要.在选择具体生产厂家时,应选用具有一定生产技术条件、取得成功的生产厂家的产品,并加强设备制造、安装等过程的质量监督和检查工作.总之,随着科技水平的提高,更多的轴承材料也将在发展中不断更新和完善.

### 参考文献:

[1] 林焕森.弹性金属塑料推力轴瓦在我国大型水电机组上的应用[J].水力机械技术,1992(6):4~9.

(收稿日期:2003-02-18 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

## 3 结 论

a. 基于 Gardel 公式、焊接三通水头损失系数计算带连接管调压室水头损失系数的两种计算方法,均能够很好地反映水头损失系数随调压室流道几何参数、流量比改变而变化的规律.

b. 在连接管面积与隧洞面积之比  $A_r$  不小于 0.69 时,两种方法得到的调压室水头损失系数与水力模型试验结果均具有较好的一致性,计算值与试验结果之间的差值随着面积比  $A_r$  减小而增大.

c. 与调压室水力模型试验结果相比,基于焊接三通和截面突变管道局部水头损失资料算法的精度低于 Gardel 经验公式和截面突变管道局部水头损失资料的算法.

d. 基于 Gardel 三通管水头损失系数经验公式计算带阻抗管调压室水头损失系数的算法,便于定量地反映所有流道几何参数的影响,使用方便,精度较好.

### 参考文献:

[1] 华东水利学院.水工手册[M].第七卷.北京:水利电力出版社,1983.134~143.

[2] Li Yu Tek. Orifice head loss in the T-section of a throttled surge tank[J]. Water Power, 1972, 24(9): 326~334.

[3] 胡明,蔡付林,曹青.矩形调压室连接型式的研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):92~95.

[4] Chaudhry M H. Applied hydraulic transient[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc, 1987. 368~372.

[5] Vogel G. Investigation of loss in right-angled pipe branches[J]. Hydraulic Institute Tech Hochschule-Munchen, 1926(1): 75~90.

[6] McNowen J S. Mechanics of manifold flow[J]. Transaction of American Society of Civil Engineers, 1954, 27(14): 1103~1142.

[7] Gardel A. Pressure drops in flows through T-shaped fittings[J]. Bulletin Technique De La Suisse Romande, 1957, 83(9): 123~130.

[8] Blaisdell F W, Manson P W. Loss of energy at sharp-edged pipe junction in water conveyance systems[J]. U S Department of Agriculture, Tech Bulletin, 1963, 1283: 47~58.

[9] Miller D S. Internal flow a guide to losses in pipe and duct system [M]. England: The British Hydromechanics Research Association, 1971. 30~59, 197~253.

[10] 李炜,徐孝平.水力学[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.156~168.

[11] 蔡付林,胡明,曹青.有长连接管的阻抗式调压室阻抗系数研究[J].水电能源科学,2001,19(4):40~42.

[12] 华东水利学院.水工手册[M].第一卷.北京:水利电力出版社,1983.384~387.

(收稿日期:2003-07-08 编辑:张志琴)