

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221469

弧形闸门斜支臂空间角度分析

匡 涛,牛继业,南海龙,印术宇

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南 长沙 410008)

摘要:大型弧形闸门斜支臂空间角度易出现混淆和错误,且其微小的误差会造成结构上的很大误差,影响弧门的制造、安装及运营安全。因此,对弧门斜支臂的几个关键空间角度进行定义区分和计算,并以实际工程弧形闸门为例,分析斜支臂各关键角度对闸门制造和安装精度的影响程度,进而提出可提高制造和安装精度的措施,以供后续斜支臂弧形闸门设计、制造和安装参考。

关键词:弧形闸门;斜支臂;支臂扭转角;支臂水平偏斜角;支铰偏斜角;上下支臂夹角

中图分类号: TV651.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0186-04

1 引言

斜支臂弧形闸门为水利水电工程控制库水位和调节泄洪流量最好的门型之一,在大中型水利水电工程中应用广泛,其具有在启闭过程或局部开启泄洪时,流态平顺畅通、不产生流激振动和空蚀破坏、结构上无需高排架、坝面整体美观及操作运行安全可靠等优点。随着我国经济及水利事业发展,闸门大型化已成为新建水利水电工程的一个趋势,由于大型弧形闸门面板曲率半径大,对闸门的制造和安装精度要求高,特别是斜支臂在制造和安装过程,角度的细微误差会造成长度上的很大偏差^[1],严重的会出现支臂和门页主梁无法安装到位的情况。现阶段大多认为该情况为安装误差引起,未进行深入研究。鉴此,本文根据弧形闸门斜支臂空间角度理论计算,并结合工程实例,分析弧形闸门斜支臂空间角度对其制造和安装精度的影响,结果可供参考。

2 斜支臂空间角度分析

在斜支臂弧形闸门设计过程中,现阶段分别采用《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-2019)^[2]、《水电工程钢闸门设计规范》(NB 35055-2015)^[3]、《水电站机电设计手册 金属结构(一)》^[4]等相关资料,但仅描述了斜支臂和支臂扭转角 φ 、水平偏斜角 α 、上下支臂夹角 2θ 三个角度

的关系,并未涵盖支臂计算中的全部空间角度计算,未详细描述其中一个关键的活动支铰偏斜角 β 的计算,故在弧形闸门设计过程中,经常存在将支臂水平偏斜角 α 与支铰偏斜角 β 混淆的情况。部分工程还存在将上下支臂夹角 2θ 用弧长和弧面半径直接计算,忽略了支臂偏斜对该角度的影响,未进行修正,导致弧门现场安装过程中出现斜支臂与门页主梁安装不到位的情况,特别是孔口及水头较大的大型斜支臂弧形闸门。为此,需详细分析计算几类不同斜支臂空间角度。

2.1 各角度定义及空间几何关系

(1)斜支臂扭转角 φ 。斜支臂扭转角 φ 在《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-2019)^[2]、《水电工程钢闸门设计规范》(NB 35055-2015)^[3]中的定义为当支臂与主横梁水平连接时,在支铰处两支臂夹角平分线的垂直剖面上形成扭角 2φ ,计算公式为:

$$\tan\varphi = \frac{\tan\theta\sin\alpha}{\sqrt{\cos^2\theta - \sin^2\alpha}} \quad (1)$$

式中, θ 为上下支臂夹角的 $1/2$; α 为斜支臂水平偏斜角度^[3]。

对于该扭转角的形成原理,因大多设计人员采用CAD二维制图,故较难理解,在此对该扭转角形成进行解析,首先根据规范^[3]对弧门分类,弧形闸门的直支臂和斜支臂可定义为直支臂是指支臂轴线与闸墙平行;斜支臂是指支臂轴线与闸墙存在一个角度。因此,可理解为斜支臂是由直支臂将支臂前端朝闸门轴线方向平移或支臂活动支

收稿日期: 2022-07-17,修回日期: 2022-08-22

作者简介: 匡涛(1988-),男,硕士研究生,研究方向为水工钢闸门,E-mail:kklt4528@126.com

铰端朝闸墙侧平移形成的。为保证支臂前端与门页主梁结构连接处支臂腹板与主梁腹板平行,故在由直支臂变形为斜支臂时,上、下单支臂腹板扭转后,在其之间形成一个空间扭角 2φ ,即为斜支臂扭转角^[5]。

(2)支臂水平偏斜角 α 。支臂水平偏斜角是指上、下单支臂轴线与闸墙间的夹角,该角度度数与上、下单支臂和弧门主梁连接处切角角度相等^[4]。

(3)支铰偏斜角 β 。支铰偏斜角是指斜支臂支铰与闸墙间的夹角,也是整个支臂所在平面与闸墙间的夹角。

(4)上下支臂夹角 2θ 。为斜支臂上、下支臂中心线之间的夹角,受支臂支铰端平移的影响,与支臂水平偏斜角 α 有关。

2.2 各角度计算

图 1 为支臂空间角度计算简图。图 1 中, O 、 O_1 点分别为弧形闸门支臂的两支铰中心点; OO_4 、 OO_8 分别为闸门的上、下支臂中心线; O_6 点为闸门上、下支臂前端口连线的中点;在 OO_1 延长线上取一点 O_2 ,使 $OO_6 \perp O_2O_6$ 。

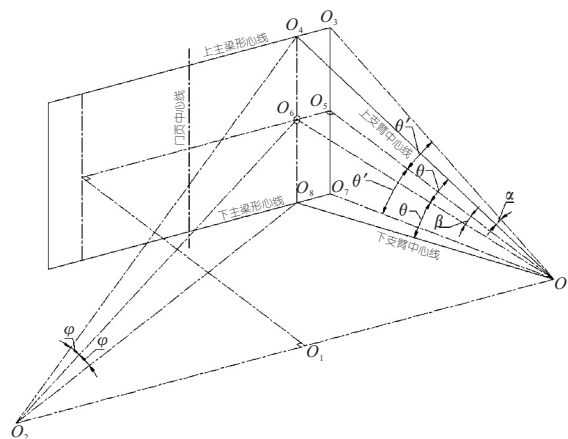


图 1 支臂空间角度计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of space angle of support arm

2.2.1 斜支臂扭转角 φ

在图 1 $RT\Delta OO_4O_6$ 中,有:

$$\tan\theta = O_4O_6 / OO_6 \quad (2)$$

在平面 $OO_2O_6O_5$ 中,因 $O_2O_6 \perp OO_6$ 、 $OO_5 \perp O_6O_5$,故有 $\angle OO_2O_6 = \angle O_6OO_5 = \beta$,则在 $RT\Delta OO_2O_6$ 中,有:

$$\tan\beta = OO_6 / O_2O_6 \quad (3)$$

在 $RT\Delta O_2O_4O_6$ 中,有:

$$\tan\varphi = O_4O_6 / O_2O_6 \quad (4)$$

联立式(2)~(4)可得:

$$\tan\varphi = \tan\theta \tan\beta \quad (5)$$

进一步推导 φ 与 α 的关系。在 $RT\Delta OO_5O_6$ 、

$RT\Delta OO_3O_4$ 中,分别有:

$$\tan\beta = O_5O_6 / OO_5 \quad (6)$$

$$\sin\alpha = O_3O_4 / OO_4 \quad (7)$$

由图 1 几何关系可知:

$$O_5O_6 = O_3O_4 \quad (8)$$

在 $RT\Delta OO_4O_6$ 、 $RT\Delta OO_5O_6$ 中,分别有:

$$\cos\theta = OO_6 / OO_4 \quad (9)$$

$$OO_6^2 = OO_5^2 + O_5O_6^2 \quad (10)$$

联立式(6)~(10)得:

$$(OO_4 \cos\theta)^2 = (OO_4 \sin\alpha / \tan\beta)^2 + (OO_4 \sin\alpha)^2 \quad (11)$$

式(11)简化后为:

$$\tan\beta = \sin\alpha / \sqrt{\cos^2\theta - \sin^2\alpha} \quad (12)$$

将式(12)代入式(5)后得:

$$\tan\varphi = \frac{\tan\theta \sin\alpha}{\sqrt{\cos^2\theta - \sin^2\alpha}} \quad (13)$$

式(13)与《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-2019)^[2]、《水电工程钢闸门设计规范》(NB 35055-2015)^[3]中斜支臂扭转角计算公式一致,故可知该规范中斜支臂扭转角计算公式中定义的斜支臂水平偏斜角是指上下支臂的水平偏斜角 α 。

2.2.2 支臂水平偏斜角 α

由图 1 中 $RT\Delta OO_3O_4$ 可知支臂水平偏斜角 α 计算公式为:

$$\sin\alpha = O_3O_4 / OO_4 \quad (14)$$

图 2 为斜支臂弧形闸门布置图。图 2 中, L_a 为支铰中心点到闸墙边线距离; L'_c 为支臂中心线与主梁边线交点到闸墙边线距离; L_c 为支臂中心线与主梁形心线交点到闸墙边线距离; L_p 为支臂中心线与主梁形心线交点间距离; L_h 为支铰中心到主梁形心线距离; L'_h 为支铰中心到主梁形心线

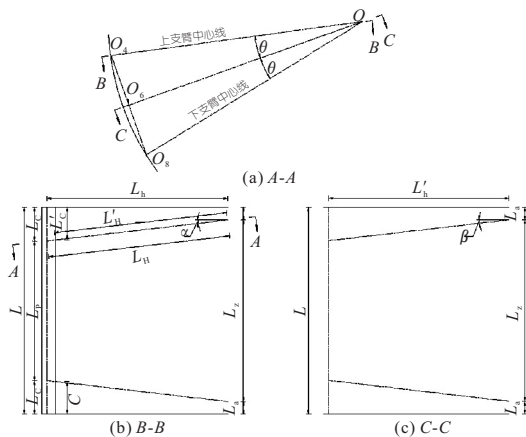


图 2 斜支臂弧形闸门布置图

Fig. 2 Layout of inclined arm radial gate

在 C-C 截面投影线距离; L_H 为支铰中心点沿支臂中心线到主梁形心线距离; L'_H 为支铰中心点沿支臂中心线到主梁边线距离; L 为孔口宽度; L_z 为支铰中心点间距离。

由图 2(b)、式(14)可得:

$$\sin\alpha = L_H / (L_C - L_a) = L'_H / (L'_C - L_a) \quad (15)$$

2.2.3 支铰偏斜角 β

由图 1 中 $RT\Delta OO_5 O_6$ 可知支铰偏斜角 β 计算公式为:

$$\sin\beta = O_5 O_6 / OO_6 \quad (16)$$

由图 2(a)、(c)及式(16)可得:

$$\sin\beta = (L_C - L_a)^{-1} L_H \sin\theta \quad (17)$$

2.2.4 上下支臂夹角 2θ

在图 1 中, $\angle O_3 O O_7$ 可由弧长及弧面半径求得:

$$2\theta' = 180S / (\pi R) \quad (18)$$

式中, S 为上下支臂间面板弧长; R 为面板曲率半径。

根据空间几何关系, 在 $RT\Delta OO_3 O_5$ 、 $RT\Delta OO_4 O_6$ 、 $RT\Delta OO_3 O_4$ 中, 分别有:

$$\sin\theta' = O_3 O_5 / OO_3 \quad (19)$$

$$\sin\theta = O_4 O_6 / OO_4 \quad (20)$$

$$\cos\alpha = OO_3 / OO_4 \quad (21)$$

由图 1 几何关系可知:

$$O_3 O_5 = O_4 O_6 \quad (22)$$

联立式(18)~(22)可得:

$$\sin\theta = \sin(180S / (2\pi R)) \cos\alpha \quad (23)$$

3 斜支臂空间角度对安装精度的影响

以贵州省清水江旁海航电枢纽弧形工作闸门实际参数为例, 分别计算将支臂水平偏斜角 α 作为支铰偏斜角 β 、未考虑偏斜对上下支臂夹角 2θ 角度的影响及两种情况同时出现对闸门支臂安装精度的影响。

根据图 2 的斜支臂弧形闸门布置图, 旁海弧形工作闸门相关参数见表 1。

表 1 旁海弧形闸门斜支臂参数

Tab. 1 Parameters of inclined supporting arm of Panghai radial gate

参数	取值	参数	取值
L_a	800	L'_H	19 524.34
L'_C	3 000	L	14 000
L_C	3 095.56	L_z	12 400
L_P	7 808.87	R	21 000
L'_h	20 242.70	S	9 800
L_H	20 237.04		

基于相关参数(表 1), 根据式(14)~(23)计

算旁海弧形闸门斜支臂相关空间角度值, 见表 2。

表 2 旁海弧形闸门斜支臂空间角度计算值

Tab. 2 Calculation value of space angle of inclined supporting arm of Panghai radial gate ($^\circ$)

φ	θ	α	β	θ'
1.576 14	13.282 31	6.469 82	6.648 44	13.369 02

3.1 α 与 β 混淆

由表 2 可知, 支臂水平偏斜角 α 比支铰偏斜角 β 小 $0.178 62^\circ$, 若在设计制造中混淆, 会导致闸门在安装过程中, 支臂前端板与主梁连接位置水平方向偏向闸墙侧, 垂直方向无偏移, 其水平偏移值 $\Delta L = L'_H \sin\beta - L'_H \sin\alpha = 58.85 \text{ mm}$ 。

3.2 忽略支臂偏斜对 2θ 的影响

由表 2 可知, 在支臂偏斜后上下支臂夹角 2θ 比以弧度计算出的上下支臂夹角 $2\theta'$ 小 $0.086 71^\circ$, 若在设计制造中混淆, 会导致闸门在安装过程中, 支臂前端板与主梁连接位置垂直方向朝外侧偏移, 水平方向无偏移, 其垂直偏移量 $\Delta H = L'_H \sin\theta' - L'_H \sin\theta = 28.75 \text{ mm}$ 。

根据式(13)、(17), 上下支臂夹角变化会影响到斜支臂扭转角 φ 及支铰偏斜角 β , 经计算斜支臂扭转角 φ 值增大 $\Delta\varphi = \arctan \frac{\tan\theta' \sin\alpha}{\sqrt{\cos^2\theta' - \sin^2\alpha}} -$

$$\arctan \frac{\tan\theta \sin\alpha}{\sqrt{\cos^2\theta - \sin^2\alpha}} = 0.010 66^\circ, \text{ 支铰偏斜角 } \beta$$

值增大 $\Delta\beta = \arcsin \frac{\sin\alpha}{\cos\theta'} - \arctan \frac{\sin\alpha}{\cos\theta} = 0.002 39^\circ$ 。

3.3 α 与 β 混淆并忽略支臂偏斜对 2θ 的影响

根据忽略支臂偏斜对 2θ 的影响结果, 当未考虑偏斜对上下支臂夹角 2θ 角度的影响时, 支铰偏斜角 β 增大 $0.002 39^\circ$, 故该情况下支臂水平偏斜角 α 比支铰偏斜角 β 小 $0.181 01^\circ$ 。若在设计制造中混淆支臂水平偏斜角 α 及支铰偏斜角 β , 会导致闸门在安装过程中, 支臂前端板与主梁连接位置水平方向有偏移, 偏向闸墙侧, 其偏移量大于 α 与 β 混淆的情况。同时, 因未对上下支臂夹角 2θ 角度进行修正, 故在垂直方向同样有偏移, 其偏移量同忽略支臂偏斜对 2θ 的影响的情况。水平偏移量 $\Delta L = L'_H \sin\beta - L'_H \sin\alpha = 59.62 \text{ mm}$; 垂直偏移量 $\Delta H = L'_H \sin\theta' - L'_H \sin\theta = 28.75 \text{ mm}$; 综合偏移量 $\Delta = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta H^2} = 66.19 \text{ mm}$ 。

由偏移计算结果来看, 三种情况下角度仅有细微差别, 但均对闸门安装精度影响很大, 对旁海航电枢纽这类尺寸较大的斜支臂弧形闸门, 其最

大误差值已达 66.19 mm, 最小误差也达 28.75 mm, 远超《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》(GB/T 14173-2008)^[6] 要求的组合处错位值 2 mm。这不仅会造成支臂和门页无法正确配合, 加大了闸门的安装难度, 强行对接还可能会使支铰的关节轴承长时间位于不利工况运行, 影响到关节轴承的寿命, 危及整个闸门的使用, 不利于枢纽工程的安全运行。

4 提高安装精度的工程实施方案

根据斜支臂弧形闸门支臂空间角度分析及现场安装流程可知, 安装误差最终主要累积在斜支臂和门页结构对接位置, 为提高安装精度, 从设计、制造到安装均需尽量减小误差, 所以在设计过程中必须从理论上做到精确无误, 才能保证在制造和安装过程中, 严格执行规范标准要求的情况下, 满足精度要求。根据旁海航电枢纽泄水闸弧形闸门现场制造和安装实际情况, 可通过采用以下制造和安装工法提高闸门斜支臂现场安装精度, 解决相关角度问题引起的误差。

(1) 通过在厂内立拼闸门实际检测是否存在偏差, 可清楚地检测出闸门存在的各种问题, 但要求生产厂家具有厂内立拼大型闸门的能力。

(2) 支臂前端板不在厂内焊接, 在现场放样定位完成后, 再进行焊接。该方法虽可解决支臂与门页对接配合问题, 但存在无法发现空间角度错误等问题, 造成支臂和关节轴承受力方向和大小与设计有偏差, 严重时可能威胁到闸门的安全运行。

(3) 支臂前端板与门页主梁间设一块调节板, 在现场通过调整该板厚保证支臂前端板与门页正确对接配合, 来确保支臂和关节轴承受力偏差在

规范允许范围内。但该方式仅可做细微调整, 否则会造成门页止水与预埋件位置偏离等问题。

综上所述, 几种工法均存在各自的优缺点, 根据实际工程经验可采用几种工法组合, 来提高弧形闸门斜支臂的现场安装精度。

5 结论

a. 结合工程实例, 研究了不同斜支臂空间角度, 并定量计算了三种易出现情况, 计算结果远超规范要求值, 表明弧门支臂空间角度对闸门安装精度影响颇大, 特别是大型斜支臂弧门。

b. 根据空间角度分析结果, 结合实际工程提出厂内立拼检测、现场焊接支臂前端板和增设调节板三种工法来解决空间角度引起的误差, 可为斜支臂弧形闸门的设计、制造和安装提供参考。

参考文献:

- [1] 李海峰, 孟庆奎, 阮同华. 弧形闸门斜支臂偏斜角的分析计算[J]. 水利水电机械, 2005(3): 21-22.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74-2019[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [3] 国家能源局. 水电工程钢闸门设计规范: NB 35055-2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册金属结构(一)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [5] 许勇刚, 廖玉海, 潘口水电站弧形闸门斜支臂空间角度问题探讨[J]. 人民长江, 2012(增刊 2): 119-121.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范: GB/T 14173-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

Space Angle Analysis of Radial Gate Inclined Arm

KUANG Tao, NIU Ji-ye, NAN Hai-long, YIN Shu-yu

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute CO., LTD., Changsha 410008, China)

Abstract: The space angles of inclined supporting arm of large radial gate are easily confused and mistaken, and its small errors may cause large structural errors, which will affect the manufacturing, installation and safe operation of the radial gate. Therefore, this paper defined, distinguished and calculated several key space angles of the radial gate inclined supporting arm. Taking an actual project radial gate as an example, the influence extent of each key angle of the inclined supporting arm on the manufacturing and installation accuracy of the gate was analyzed. Furthermore, this paper put forward several measures to improve the manufacturing and installation accuracy, which can be used as a reference for the subsequent design, manufacturing and installation of radial gate with inclined supporting arm.

Key words: radial gate; oblique-arm; torsion angle of support arm; horizontal deflection angle of support arm; deflection angle of support hinge; angle between upper and lower arms