

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.036

# 花瓶墩钢模板放样设计研究

吴延忠<sup>1,2</sup>, 陈国<sup>2</sup>, 吴新涛<sup>2</sup>, 谈闯<sup>2</sup>, 窦晗<sup>1</sup>

(1. 中铁一局集团有限公司第三工程分公司, 陕西 宝鸡 721006; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 花瓶墩外观造型新颖, 经济性好, 因而在桥梁建设中获得了广泛应用。传统的定型钢模板设计误差大所致的模板拼缝漏浆事故屡见不鲜, 使得墩身混凝土表面出现蜂窝麻面的现象。以郑阜高铁沈界1号特大桥花瓶墩为工程背景, 运用 AutoCAD 和 Revit 软件建立墩身的三维模型, 采用投影法和钣金展开法解决了复杂空间曲面的放样难题。研究成果可为今后类似工程提供技术参考。

**关键词:** 花瓶墩; 钢模板; 异形构件; 放样

中图分类号: TU755.2+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)04-0135-03

## 0 引言

随着社会经济的快速发展, 桥梁建设已不单单是为了满足人们的日常的通行需求, 桥梁景观设计越来越受到重视。大量造型美观的桥墩造型应运而生, 包括悬臂墩、T型墩、Y型墩、门形墩和花瓶墩等<sup>[1-3]</sup>。其中, 花瓶墩兼具优异的受力性能、优美流畅的线形以及良好的经济性等优点, 从而备受推崇<sup>[4]</sup>。

模板是钢筋混凝土构件成型的模具, 为现浇后的混凝土在养护、硬化和增长强度的过程中提供支撑<sup>[4]</sup>。花瓶墩是一种典型的异形构件, 在定型钢质模板的安装过程中, 由于模板尺寸偏差较大使得接缝不严, 容易导致接缝处漏浆, 使得脱模后的混凝土表面产生蜂窝麻面, 严重影响了桥墩的受力性能和美观性。

以郑阜高铁沈界1号特大桥为工程背景, 研究花瓶墩身钢模板的设计放样方法, 最终为此类异形模板的应用提供理论依据和参考。

## 1 工程概况

沈界1号特大桥跨宁洛高速曲弦钢桁连续梁墩身设计为空间曲面花瓶式墩身, 由墩底 18.8 m × 16.1 m 渐变为墩顶 14.8 m × 7.6 m 斜坡实心墩, 墩高 5.5 m, 如图 1 所示。空间曲面花瓶式墩身断面是流线型, 正面流线型由 15:1 (100 cm) + 弧线 R549.4 (220 cm) + 1.73:1 (230 cm) 组成; 侧面流线型由 3:1 (100 cm) + 弧线 R540.2 (220 cm) + 1:1.11

(230 cm) 组成。为便于加工制作及运输, 花瓶式墩身模板划分为①、②和③部分, 沿墩身高度分别为 90 cm、220 cm 和 230 mm。①和③部分为斜平面, ②曲面为①直线段和③直线段的过渡区域, 墩身空间曲面过渡距离短、变化速率大, 线形控制难, 给墩身模板设计和加工质量控制带来挑战。

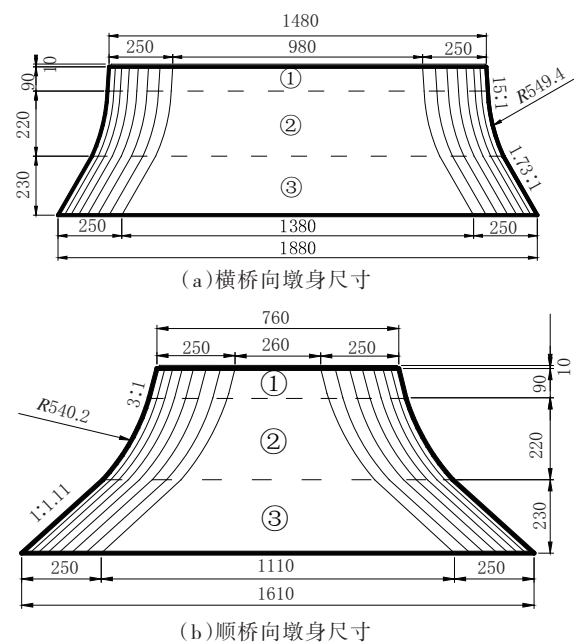


图 1 墩身尺寸(单位: cm)

## 2 曲面 A 和 B

### 2.1 曲面划分

将墩身②部分可划分为曲面 A、曲面 A1、曲面 B、曲面 B1 和 4 个倒角曲面(见图 2)。墩身为双向对称结构, 曲面 A 与曲面 A1、曲面 B 和曲面 B1 的尺寸相同, 4 个倒角面的尺寸和弯曲度亦完全相同。因此, 仅需考虑曲面 A、曲面 B 和倒角面 1。

收稿日期: 2022-05-01

作者简介: 吴延忠(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 从事道桥施工管理工作。

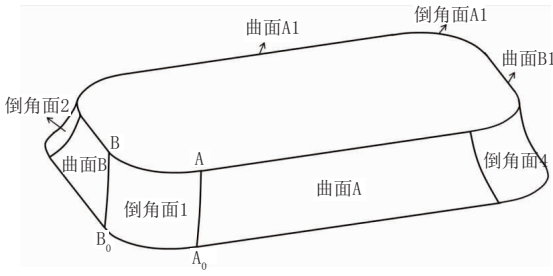


图2 ②部分曲面划分

圆弧线  $AA_0$  和  $BB_0$  分别为曲面 A、曲面 B 和倒角面 1 的交叉界线。圆弧 AB 和圆弧  $A_0B_0$  相互平行,且弧度和半径相同,因此圆弧线  $AA_0$  和  $BB_0$  的形状相同。如图 3 所示,以  $A_0(B_0)$  为坐标原点建立三维坐标系,以横桥向为 X 轴,顺桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴。

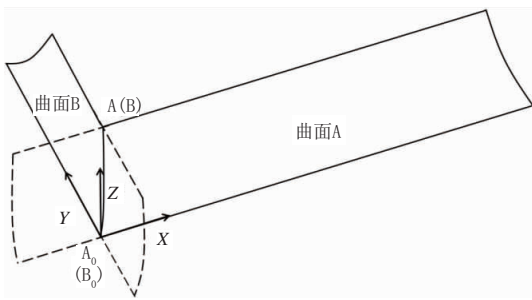


图3 建立三维坐标系

2.2 投影法

曲面 A 和曲面 B 的边界弧线可视为按一定规律排列的点的集合,找出曲线上各点的坐标,即可反映线、面、体。由于墩身具有对称性,取一半进行分析计算。作 10 条水平分割虚线,将②部分沿桥墩高度方向(Z 轴)等分为 11 个部分。每个部分的高度均为 200 mm,以墩底为 0-0 截面,自下而上依次定义每条虚线所在的截面为 1-1 截面、2-2 截面……10-10 截面,如图 4 所示。从 A 点作一条竖向向下的直线,与墩身底面交于  $A_1$  点。

通过计算各截面与  $AA_0$  的交点至  $AA_1$  的相对位置  $X_{an}$ ,各截面与  $BB_0$  的交点至  $BB_1$  的相对位置  $X_{bn}$ ,可获得  $AA_0$  与  $BB_0$  在 X 向投影的变化曲率,从而计算出曲面 A 和曲面 B 横桥向的下料长度。曲线  $AA_0$  在 XOZ 面上的投影点到直线 AC 的垂直距离记为  $X_{an}$ ,曲面 A 横桥向分割线的长度等于墩顶横桥向长度与  $2X_{an}$  之和,如图 4(a)所示。由于弧线  $AA_0$  和  $BB_0$  可以重合,所以弧线  $AA_0$  在 X 方向上的投影长度  $X_{an}$  等于弧线  $BB_0$  在 X 方向上的投影长度  $X_{bn}$ 。同样的道理,通过求解曲线  $AA_0$  在 YOZ 面上的各个投影点到直线 AC 的垂直距离  $Y_{an}$ ,曲面 A 顺桥向分割线的长度等于墩顶顺桥向长度与  $2Y_{an}$  之和,并且  $Y_{bn}$

等于  $Y_{an}$ ,如图 4(b)所示。

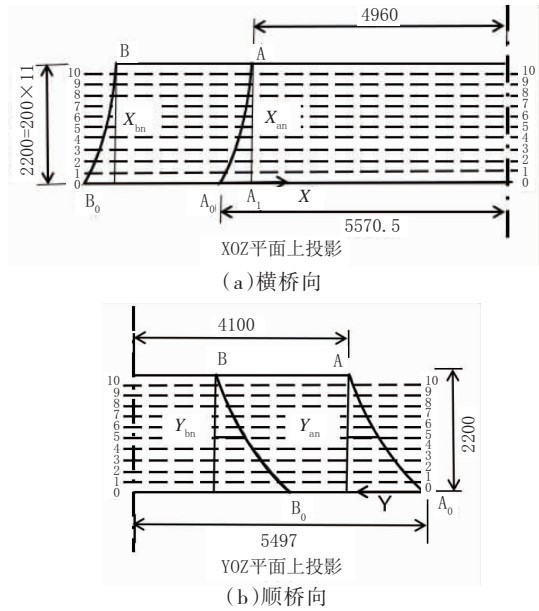


图4 弧线  $AA_0(BB_0)$  在 XOY 面内的投影长度(单位:mm)

如图 5 所示,弧线  $BB_0$  上的 B 点和  $B_0$  点的内法线相交于 O 点,即弧线  $BB_0$  的圆心。B 点和  $B_0$  点处切线的斜率分别为 15 : 1 和 1.73 : 1,弧线  $BB_0$  的曲率半径为 5 494 mm,竖直高度为 2 200 mm。 $BB_0$  弧线上的一个任一点  $B_n$ ,从  $B_n$  点和 B 点作一条垂直于水平线的直线,分别与水平线交于  $B'$  点和  $B''$  点, $OB_n$  与水平线的夹角为  $\beta_n$ , $OB$  与水平线的夹角为  $\beta_B$ 。 $B_n$  到  $BB_1$  的水平距离为  $X_{bn}$ ,

$$OB'' = R \cdot \cos \beta_B = 5\,481.83 \text{ mm}$$

$$X_{bn} = X_{an} = OB'' - R \cdot \cos \beta_n$$

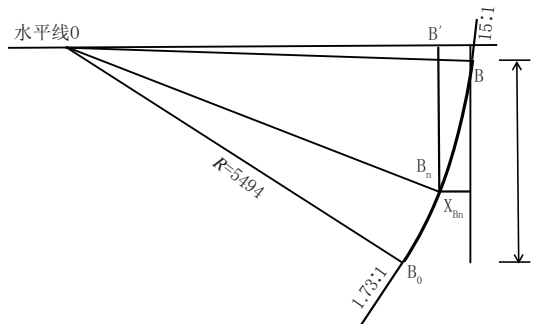


图5 弧线  $BB_0$  计算(单位:mm)

曲面 A 的横向放样长度  $L_{An}=9\,920+2X_{an}$ , $AA_n$  的弧长  $S_{an}=(2\pi R/360)\angle AOA_0=26\,31.24 \text{ mm}$ ,即曲面 A 的展开高度为 2 631.24 mm。同理,曲面 B 的横向长度放样长度  $L_{Bn}=3\,200+2Y_{bn}$ , $BB_n$  的弧长  $S_{bn}=(2\pi R/360)\angle BOB_0=2\,303.51 \text{ mm}$ ,即曲面 B 的展开高度为 2 303.51 mm。

曲面 A 是由两条对称弧线  $AA_0$  和上下两条直线四条线围成的 L 曲面。展开图的总高度  $S_{an}=2\,631.24 \text{ mm}$ ,各层高度为  $\Delta S_{an}$  为 200 mm,各结点横向长度为

$L_{An}=9\ 920+2X_{an}$ 。根据计算结果,经投影变换并展开,就可以对曲面 A 面板进行放样下料,曲面 A 的下料尺寸见表 1。

表 1 曲面 A 相关计算数值 单位:mm

层号	$\beta_n$	$X_{an}$	$L_{An}$	$S_{an}$	$\Delta S_{an}$
1	25.50	523.13	10 966.3	2 349.1	282.1
2	23.21	432.59	10 785.2	2 080.3	268.8
3	20.96	351.42	10 622.9	1 822.4	257.9
4	18.74	279.21	10 478.4	1 573.8	248.8
5	16.56	215.58	10 351.2	1 332.9	240.8
6	14.39	160.22	10 240.4	1 098.8	234.2
7	12.25	112.87	10 145.7	870.4	228.4
8	10.12	73.33	10 066.7	646.9	223.5
9	8.01	41.42	10 002.8	427.7	219.2
10	5.91	17.01	9 954.0	212.3	215.5

曲面 B 的展开下料方法同曲面 A,曲面 B 展开的总高度  $S_B$  为 2 303.51 mm,各层高度为  $\Delta S_{bn}$ ,各结点横向长度为  $L_{Bn}=3\ 200+2Y_{bn}$ 。曲面 B 的展开步骤同曲面 A,计算结果见表 2。

表 2 曲面 B 相关计算数值 单位:mm

层号 n	$\alpha_n$	$Y_{bn}$	$L_{Bn}$	$S_{bn}$	$\Delta S_{bn}$
1	43.35	1 196.63	5 593.3	2 079.7	223.9
2	40.50	1 017.02	5 234.1	1 860.1	219.6
3	37.76	854.31	4 908.6	1 644.3	215.9
4	35.13	706.61	4 613.2	1 431.6	212.7
5	32.57	572.47	4 344.9	1 221.7	209.9
6	30.09	450.72	4 101.4	1 014.2	207.5
7	27.67	340.41	3 880.8	808.7	205.5
8	25.30	240.78	3 681.6	604.8	203.9
9	22.97	151.17	3 502.3	402.2	202.5
10	20.69	71.06	3 342.1	200.7	201.5

### 3 倒角曲面

①与③部分的上下边线半径为 250 mm 的 1/4 圆弧线(AB 和  $A_0B_0$ ),左右边线(BB<sub>0</sub> 和 AA<sub>0</sub>)为直线,如图 6 所示。①部分圆弧倒角面具体的计算步骤如下:

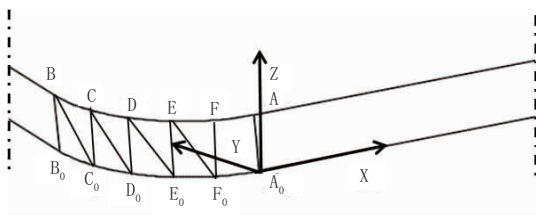


图 6 ①部分倒角面的辅助线

(1)圆弧 AB 和  $A_0B_0$  相互平行,弧长均为 392.5 cm;将圆弧 AB 和  $A_0B_0$  五等分,每等分长度为

78.5 mm,各点记为 C、D、E、F、C<sub>0</sub>、D<sub>0</sub>、E<sub>0</sub> 和 F<sub>0</sub>,并按图所示连接各点,如图 9 所示。

(2)根据墩身的已知条件可以求出 B 点、A 点、B<sub>0</sub> 点和 A<sub>0</sub> 点的坐标,继而根据圆弧的角度,利用三角函数求出其他点的坐标。记点 1、2、…、6 点坐标为  $(x_n, y_n, z_n)$  以及 1'、2'、…、6' 点的坐标  $(x'_n, y'_n, z'_n)$ ,继而通过公式  $\sqrt{(x_n-x'_n)^2+(y_n-y'_n)^2+(z_n-z'_n)^2}$  求出每条辅助线的实际长度。

(3)如图 7 所示,以 1 点为圆心,BC<sub>0</sub> 的长度为半径画圆,以 B<sub>0</sub> 为圆心且半径为 78.5 mm 画圆,这两个圆的交点为 C<sub>0</sub>;以 C<sub>0</sub> 为圆心,CC<sub>0</sub> 的长度为半径画圆,以 B 为圆心且半径为 78.5mm 画圆,这两个圆的交点为 C,同理可依次确定 D、E、F、D<sub>0</sub>、E<sub>0</sub> 和 F<sub>0</sub>,将各点以光滑曲线连接,即得倒角面 1 的展开下料图。

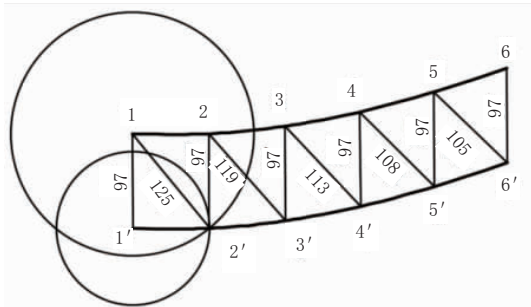


图 7 ①部分倒角面面板放样图

通过钣金展开的原理进行面板放样,①部分的圆弧倒角面的放样精度受到上下圆弧边线等分数量的影响,等分数量越多,辅助线的长度与实际长越接近,面板放样误差越小。

### 4 结 语

(1)基于 AutoCAD 和 Revit 建立的三维模型,采用投影法提出的花瓶墩的钢模板的设计公式,误差小,满足施工需求。

(2)钣金展开采用化曲为直的原理进行,计算结果精度受到划分层数的影响,划分层数越多,面板放样精度越准确。

(3)采用投影法和钣金展开法适合于复杂空间曲面钢模板的设计放样。

#### 参考文献:

[1] 冯宝成.花瓶墩模板设计的有限元分析技术研究[J].中国高科技,2020(6):68-69.  
 [2] 明晓丹,岳中文,牛学超,等.高大模板盘扣式钢管支撑体系受力与变形实测分析研究[J].工业建筑,2019,49(11):125-130.  
 [3] 田庆,马少雄,赵钦,等.高铁桥梁墩柱模板结构体系自动化设计研究[J].铁道标准设计,2021,65(9):105-110.

(下转第 141 页)

精确的计算结果可高效地指导精细化设计。

#### 4 结 语

(1)本文引入辅助参数切线长度  $T_L$  和切线角  $\theta$ , 两个参数计算式可根据波纹钢板波形基本尺寸结合解析几何推导得出。

(2)波纹钢板截面几何性质截面面积,为波形截面中线长度与板厚乘积, 中线长度可通过辅助参数切线长度和切线角计算。

(3)波纹钢板截面几何性质惯性矩,可将一个波长范围波形分解为圆弧段和直线段, 严格按照惯性矩定义对圆弧段和直线段惯性矩公式进行推导,两者加和与波长之比值即为单位长度惯性矩精确计算公式。

(4)波纹钢板截面几何性质截面模量和回转半径,按定义可知均与惯性矩相关, 其精确计算公式均可由惯性矩推导得出。

(5)将本文所推导波纹钢板截面几何性质精确计算公式编写为计算程序“波纹钢板截面几何性质计算器”。通过两个算例与现有方法计算结果对比可知, 利用本文编写的程序计算波纹钢板截面几何性质是可靠的, 本文所推导的波纹钢板截面几何性质

计算公式是精确的。

(6)本文通过推导波纹钢板截面几何性质精确计算公式并编写程序,使该项计算快捷、精确,为波纹钢板的受力分析提供精确基础数据,为波纹钢结构研究及应用提供有力支撑。

#### 参考文献:

[1] 刘保东,李鹏,高锰,等.大跨径覆土波纹钢管圆管涵稳定性分析[J].北京交通大学学报,2016,40(6):14-18.

[2] DB15/T 654-2013,公路波纹钢管(板)桥涵设计与施工规范[S].

[3] 孙海波,刘鹏飞,刘保东,等.不同断面线形波纹钢管涵结构力学性能研究[J].公路交通科技,2015,32(10):75-81.

[4] 张敏,李百建.波纹钢板截面几何性质计算[J].科学技术与工程,2012,12(10):2400-2403.

[5] 李百建.波纹钢板结构荷载作用下轴力与弯矩计算[D].广州:华南理工大学,2012.

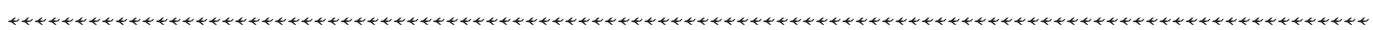
[6] 宋子康,蔡文安.材料力学[M].上海:同济大学出版社,2006:543-556.

[7] 孙海波,等.波纹钢管涵设计与施工指南[M].北京:人民交通出版社,2016.

[8] JT/T 791—2010,公路涵洞通道用波纹钢管(板)[S].

[9] 李祝龙.公路钢波纹涵洞设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社,2007.

[10] Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2nd ed)[M].Ontario:Corrugated Steel Pipe Institute,2007.



(上接第 137 页)

[4] 康清义.矮塔斜拉桥主墩墩柱模板设计与施工技术分析[J].工程技术研究,2021,6(10):100-101.

[5] 王兵.多曲面混凝土桥塔钢模板设计方法探究[J].城市道桥与防洪,2021(5):119-122,17.

[6] 许必强,汪焱卫,吴文奎,等.空间多曲面清水混凝土全木模板施工

工艺研究[J].施工技术,2017,46(14):54-57,78.

[7] 钱军,郭正兴,刘如兵.曲面模板放样设计研究[J].施工技术,2015,44(17):64-66,90.

[8] 韩阳,吕小龙,齐玉顺,等.可调弧度模板在多曲面钢筋混凝土拱体结构施工中的应用[J].施工技术,2019,48(8):31-35.