

悬挂式单轨单肋式拱桥设计参数敏感性分析<sup>\*</sup>

宋广林

(中铁上海设计院集团有限公司, 200040, 上海)

**摘要** [目的] 鉴于目前针对悬挂式单轨单肋式拱桥的研究案例较少,为了更好地指导悬挂式单轨拱桥的设计和施工,需要对其不同设计参数的敏感性进行分析。[方法] 以湖南某旅游空中列车项目为背景,通过 Midas 空间杆系整体模型和 ANSYS 板壳单元细部模型,对跨度为 60 m,采用刚性吊杆钢箱拱,拱、梁、墩刚接的单肋式双线拱桥进行计算分析。研究了不同设计参数对轨道梁刚度、主梁应力、主梁翘曲畸变的敏感性影响;提出了设计参数敏感性评价指标,将其按敏感因子 10% 和 5% 划分为大、中、小 3 个等级,得到了主要设计参数的敏感性差异。[结果及结论] 拱桥矢跨比、中横梁尺寸及桥墩尺寸依次对于主梁竖向挠度、主梁水平位移和梁端转角是敏感性参数,主梁的加劲肋间距对主梁应力和跨中畸变是敏感性参数,主梁腹板厚度对梁端翘曲是敏感性参数。对于悬挂式单轨单肋式拱桥,其刚度要求相对应力要求更加控制拱桥设计,设计中宜采用合理的设计参数。

**关键词** 悬挂式单轨;单肋式拱桥;设计参数;敏感性

**中图分类号** U442.5;U232

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.03.004

index of design parameters is put forward, which is divided into three grades according to the sensitivity factors 10% and 5%, and the sensitivity difference of the main design parameters is obtained. [Result & Conclusion] The sagittal span ratio of arch bridge, the dimensions of middle beam and pier are sensitive parameters in sequence to the vertical deflection of main beam, the horizontal and transverse displacement of main beam and the turning angle of beam end. The spacing between stiffeners of the main beam is a sensitive parameter to the stress of the main beam and the distortion in the midspan, and the thickness of main beam web plate is a sensitive parameter to the warpage of beam end. For suspended monorail single-ribbed arch bridge, the stiffness index overweighs the stress index in the bridge design, and reasonable design parameters should be adopted in the design.

**Key words** suspended monorail; single-ribbed arch bridge; design parameter; sensitivity

## Sensitivity Analysis of Design Parameters for Suspended Monorail Single-ribbed Arch Bridge

SONG Guanglin

(China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, 200040, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] As there are few case studies on suspended monorail single-ribbed arch bridge, it is necessary to analyze the sensitivity of different design parameters to better instruct the design and construction of the bridge. [Method] With a tourism air train project in Hunan Province as the background, the Midas-Civil space rod system model and ANSYS plate-shell element model are used to calculate and analyze the single-ribbed double-line arch bridge, which is of 60m span and uses steel box arch with rigid boom, and rigidly connected arch, beam and pier. The influence of different design parameters on the sensitivity of track beam stiffness, main beam stress and main beam distortion is studied. The sensitivity evaluation

悬挂式单轨作为一种建设成本低、周期短、占地少的中低运量城市轨道交通(以下简称“城轨”),受到国内外建设方的青睐。目前,其在德国、日本已有一定的建设规模,在国内也建成了一些示范线<sup>[1]</sup>。依据目前的建设规模,常规跨径为 20~30 m 的轨道梁是常见的结构形式。文献[2]利用 MATLAB 软件研究了不同加劲肋间距及不同板厚对 30 m 跨度轨道梁挠度的影响,得到了经济合理的轨道梁构造。文献[3]研究了城轨线路曲线半径为 60 m 时,横梁结构对不同跨径梁安全性和经济性的影响。文献[4]分析了不同跨度下轨道梁的结构形式,确定了长度为 30 m 梁是悬挂式单轨的合理构造。文献[5]介绍了常规悬挂式单轨梁的构造特点,并简述了其制造工艺。然而随着悬挂式单轨建设规模的扩大,以及对景观、环保要求的提高,不可避免地出现跨越河道与古建筑景区的结构,传统的小跨径梁不再适用。文献[6]对铁路刚架拱桥进行

<sup>\*</sup> 中铁上海设计院集团有限公司科研课题(集 21-C18、集 22-61)

了设计和总体分析,文献[7]对铁路提篮拱桥的设计参数和结构敏感性进行了研究。综上,目前业内对于悬挂式单轨拱桥的相关研究较少。

本文以湖南某景区旅游空中列车项目为研究背景,设计了计算跨度为60 m的单肋式钢箱拱刚性吊杆双线轨道梁结构,建立了杆系和板壳单元三维模型。选取主梁底板、腹板及顶板的厚度以及加劲肋间距等不同数据为设计变量参数,对其进行刚度、应力及翘曲畸变敏感性评价,研究结果可为相关设计提供借鉴。

## 1 技术标准

现阶段国内对悬挂式单轨尚无统一标准<sup>[8]</sup>,四川、河南、江苏、湖北、黑龙江等省份编写的一些地方标准和征求意见稿等,大都以国内铁路、地铁标准为蓝本。本文综合各方因素,采用的技术标准如表1所示。

表1 技术标准

Tab.1 Technical standards

参数	取值或说明
设计速度/(km/h)	40
限制坡度/%	6.0
列车活载/kN	2节编组,每节车辆4个轴,轴重均为50 kN
冲击系数	$1+20\text{ m}/(45\text{ m}+L)$
制动力或牵引力	列车静活载的15%
列车横向摇摆力	列车静活载的25%
横向风荷载/Pa	600
列车静活载挠度/m	$L/1\ 000$
梁端转角/°	0.3
横向水平位移/m	$L/4\ 000$
墩顶横向位移/mm	$4\sqrt{L}$
墩顶纵向位移/mm	$5\sqrt{L}$

注:L为桥梁计算跨度,单位m。

## 2 拱桥设计

### 2.1 设计思路

观光空中列车的设计速度不大于40 km/h,为游客提供了更好的游览环境,使游客可以近距离观赏美景。桥梁跨越景区湖泊,采用跨度为60 m的拱桥,避免了湖中设墩;采用富有形态美、协调美及人文美的拱桥结构,桥上观湖、湖中映桥,使整个系统融入景区,成为景区一道美丽的风景线。

### 2.2 结构构造

单肋式拱桥立面图、侧视图分别如图1、图2所

示。计算跨度为60 m,拱桥为双线桥,线间距为5.6 m,主拱采用钢箱拱;共布置11对H型钢刚性吊杆,吊杆纵向间距为5 m,吊杆设置为斜倾;主梁采用等截面U型截面,中横梁和平联采用工字梁,端横梁采用钢箱梁。其中:吊杆和中横梁形成稳定的空间三角体系,增强了单肋式主拱的侧向稳定;采用拱、梁、墩刚接形式,端横梁与桥墩共用盖梁,这相对传统的采用轴销和支座的形式,具有刚度大、简洁美观、施工方便的特点;桥墩采用上部钢结构、下部混凝土的组合结构,增强了桥墩的防撞性及耐久性,使其具有更好的环境适应能力。

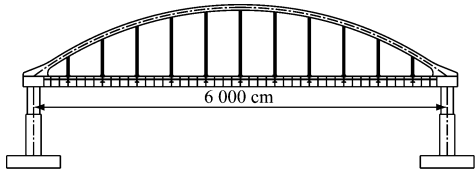


图1 拱桥立面图

Fig.1 Bridge elevation drawing

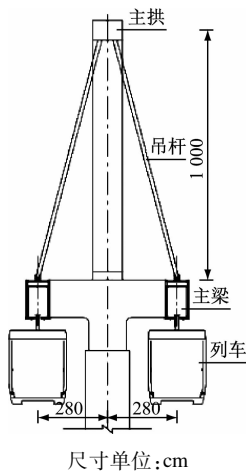


图2 拱桥侧视图

Fig.2 Side view of the bridge

### 2.3 敏感因子定义

刚度是城市轨道交通桥梁设计的重要指标<sup>[9]</sup>。大跨度单肋式钢箱拱桥,其矢跨比,主梁高度,主拱、吊杆、横梁及桥墩的宽度和高度等参数对刚度设计均有影响。主梁的钢板厚度以及加劲肋间距等参数对于主梁的应力亦有影响。为定量分析各个参数对拱桥刚度和强度的影响程度,本文提出敏感因子计算式(见式(1))。各参数的敏感性评价见表2。

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (1)$$

式中：

$\delta$ ——敏感因子；

$\Delta A$ ——对应参数计算结果的变化值；

$A_0$ ——对应参数计算结果的初始值。

表2 单肋式拱桥各参数的敏感性评价

Tab.2 Sensitivity evaluation of parameters single-ribbed arch bridge

$\delta/\%$	敏感性评价
$\geq 10$	高
$5 \sim < 10$	中等
$< 5$	低

3 主桥刚度敏感性评价

3.1 参数选取

采用 Midas 软件建立主桥杆系模型,如图 3 所示。其中梁单元为 282 个,全桥钢材均采用 Q355,主拱采用圆曲线拱。为分析不同设计参数对主桥刚度的影响,对该模型的主要参数从小到大进行取值,见表 3。

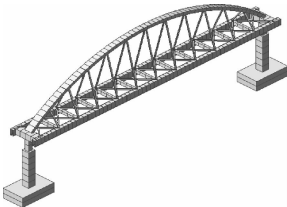


图3 主桥杆系模型

Fig.3 Model of main bridge rod system

表3 主桥杆系模型主要参数取值

Tab.3 Main parameters of main bridge rod system model

参数	取值
矢跨比	1.0:7.5、1.0:6.0、1.0:5.0
主拱尺寸/m	0.8×1.2、1.0×1.2、1.2×1.2
吊杆尺寸/m	0.25×0.15、0.30×0.15、0.35×0.15
中横梁尺寸/m	0.5×0.6、0.6×0.7、0.7×0.8
端横梁尺寸/m	1.2×1.6、1.3×1.6、1.4×1.6
桥墩尺寸/m	1.2×1.2、1.4×1.4、1.6×1.6
主梁高度/m	1.1、1.2、1.3
平联尺寸/m	0.25×0.30、0.30×0.35、0.35×0.40

注:主拱、端横梁的尺寸为高度×宽度;吊杆、中横梁、桥墩、平联的尺寸为宽度×高度。

3.2 主桥刚度敏感性分析

主桥在静活载作用下的竖向挠度限值为 60 mm,在摇摆力及风力作用下的水平位移限值为 15

mm,梁端转角要求不大于 3‰。各参数的计算结果均满足主桥刚度限值要求,只是  $\delta$  各有不同。依据本文评价指标,对于竖向挠度,矢跨比的  $\delta$  为 15.8%,主拱尺寸的  $\delta$  为 7.2%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%;对于水平位移,中横梁尺寸的  $\delta$  为 31.9%,矢跨比的  $\delta$  为 8.9%,主梁高度的  $\delta$  为 10.1%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%;对于梁端转角,桥墩尺寸的  $\delta$  为 9.5%,主梁高度的  $\delta$  为 6.3%,主拱的  $\delta$  为 5.6%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%。主桥刚度主要影响参数敏感性评价见表 4。

表4 主桥刚度主要影响参数敏感性评价

Tab.4 Sensitivity evaluation of main bridge stiffness

项目	计算结果	敏感性参数	$\delta/\%$	敏感性评价
竖向挠度/mm	48.50、39.70、34.30	矢跨比	15.8	高
水平位移/mm	14.70、10.40、6.80	中横梁尺寸	31.9	高
梁端转角/‰	1.38、1.23、1.13	桥墩尺寸	9.5	中等

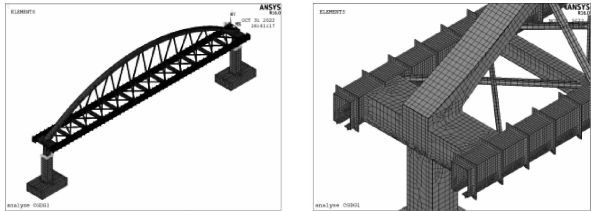
注:项目计算结果依次对应表 3 中相应参数由小到大的取值。

针对刚接的单肋式拱桥,主梁的竖向挠度,矢跨比是敏感性参数,主梁高度对其影响次之,其余参数对其影响不大;对于主梁的水平位移,中横梁尺寸是敏感性参数,矢跨比和主梁高度对其略有影响,其余参数对其影响不大;对于梁端转角,桥墩尺寸是敏感性参数,其余参数对其影响不大。因此,采用等截面梁高 1.1 m,主拱尺寸 0.8 m(高度)×1.2 m(宽度),矢跨比 1:6 等参数较小的取值即可满足主桥设计要求。

4 主桥应力敏感性评价

4.1 参数选取

采用 ANSYS 软件建立主桥板壳单元三维模型,见图 4。其中:主拱、主梁和横梁采用 shell63 单元,吊杆和平联采用 beam189 单元。主桥应力敏感性分析中的主要参数由小到大取值,见表 5。



a) 整体图                      b) 梁端局部模型

图4 主桥板壳单元三维模型

Fig.4 3D model of main bridge plate-shell unit

表 5 主桥应力敏感性分析中的主要参数取值

Tab.5 Main parameters' value in sensitivity analysis of the main bridge stress

参数	取值
底板厚度/mm	18、24、30
腹板厚度/mm	14、18、22
顶板厚度/mm	14、18、22
加劲肋厚度/mm	14、18、22
加劲肋间距/m	1.25、2.50、5.00

4.2 主桥应力敏感性分析

对主桥结构施加作用于跨中的双线活载和自重。对于底板应力,加劲肋间距的  $\delta$  为 31.1%,底板厚度的  $\delta$  为 9.5%,腹板厚度的  $\delta$  为 5.4%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%;对于顶板应力,顶板厚度的  $\delta$  为 16.1%,腹板厚度的  $\delta$  为 11.4%,底板厚度的  $\delta$  为 9.3%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%;对于腹板应力,加劲肋间距的  $\delta$  为 35.1%,腹板厚度的  $\delta$  为 18.1%,底板厚度的  $\delta$  为 9.5%,其余参数的  $\delta$  均小于 5.0%。主桥应力主要影响参数敏感性评价见表 6。

表 6 主桥应力主要影响参数敏感性评价

Tab.6 Sensitivity evaluation of main parameters that affect bridge stress

结构名称	应力/MPa	敏感性参数	$\delta$ /%	敏感性评价
底板	58.9、91.6、97.7	加劲肋间距	31.1	高
顶板	14.2、11.8、10.0	顶板厚度	16.1	高
腹板	4.4、7.3、7.6	加劲肋间距	35.1	高

注:应力结果依次对应表 5 中相应参数由小到大的取值。

加劲肋间距是底板和腹板应力计算中的敏感性参数。顶板的平均应力约 16 MPa,应力较小,且应力集中出现在锚固点位置,可采用合理的局部构造进行处理。主桥加劲肋间距取 1.25 m,钢板厚度以 14 mm 为主即可。

4.3 主桥温度应力计算

主桥为刚架拱桥<sup>[6]</sup>,其中拱、梁、墩均采用刚接,因此其温度应力是不可忽略的。拱桥主要部位的最大温度应力计算结果见表 7。结合自重和活载应力计算结果,验证了拱桥结构应力满足钢材容许应力要求。

5 主梁翘曲畸变敏感性评价

主梁为开口的薄壁 U 型截面,存在翘曲畸变的

表 7 拱桥主要部位的最大温度应力

Tab.7 Maximum temperature stress in the main parts of the arch bridge

项目	最大温度应力/MPa			
	主拱	主梁	端横梁	吊杆
整体升温	11.9	18.6	36.1	6.8
梯度升温	54.2	56.1	31.3	19.3

特点<sup>[10]</sup>。主梁跨中截面横向畸变位移云图,如图 5 所示。由图 5 可见:在局部车轮压力作用下,外侧腹板有向内的侧向位移,且越靠近底板侧向位移越大;主梁跨中截面横向畸变效应突出,端部截面纵向翘曲效应突出。对于主梁跨中截面的畸变,加劲肋间距的  $\delta$  为 95.9%,加劲肋厚度的  $\delta$  为 8.1%,腹板厚度的  $\delta$  为 7.8%,底板厚度的  $\delta$  为 5.5%,可见加劲肋间距对于主梁截面的横向稳定性影响很大;对于主梁端部截面的翘曲,腹板厚度的  $\delta$  为 7.2%,其余参数的  $\delta$  均小于 5%。主梁翘曲畸变  $\delta$  的计算结果见表 8。

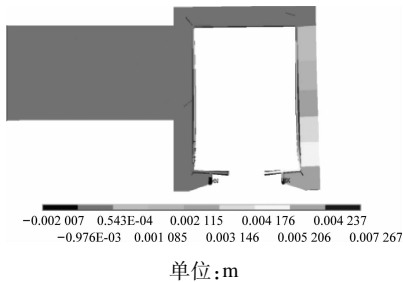


图 5 主梁跨中截面横向畸变位移云图  
Fig.5 Transverse distortion displacement cloud image of the mid-span section of main beam

轨道梁结构为开口的 U 型截面,其抗扭承载力较差,通过布置在 U 型截面外侧的板式加劲肋提高其抗扭承载力。轨道梁结构内侧横梁和平联的连接,提高了内侧腹板的稳定特征,U 型截面的受力特征类似于一边固结后的 L 型截面的受力特征。

表 8 主梁翘曲畸变  $\delta$  计算结果

Tab.8 Calculation results of main beam warpage distortion

项目	位移/mm	敏感性参数	$\delta$ /%	敏感性评价
端部截面纵向翘曲	0.51、0.47、0.44	腹板厚度	7.2	中等
跨中截面横向畸变	1.91、4.12、7.27	加劲肋间距	95.9	高

注:位移结果依次对应表 5 中相应参数由小到大的取值。



6 结论

- 1) 对于悬挂式单轨单肋式拱桥,其刚度要求相对应力要求更加控制拱桥设计。
- 2) 依据 10% 和 5% 分级划分敏感因子来评价主要参数敏感性,矢跨比对主梁的竖向挠度敏感性高,横梁尺寸对主梁水平位移的敏感性高,桥墩尺寸对梁端转角的敏感性中等,加劲肋间距对主梁的应力和横向畸变的敏感性高,腹板厚度对梁端翘曲的敏感性中等。
- 3) 薄壁结构主梁跨中存在横向畸变,端部存在纵向翘曲。在中横梁和平联的作用下,U 型截面主梁趋近于 L 型截面主梁的变形特点。
- 4) 主桥采用等截面且净高为 1.1 m 的主梁,钢板厚度以 14 mm 为主,加劲肋间距取 1.25 m,矢跨比取 1/6,拱桥刚度和强度均满足要求。设计中拱桥不同部位宜选用合理的设计参数,避免过大的设计富余。

参考文献

[1] 何鑫. 悬挂式空轨道梁分析与设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.

HE Xin. Analysis & design of steel track beams in suspended monorail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[2] 谢倩, 王月明, 蒋咏志, 等. 考虑加劲肋的悬挂式单轨轨道梁挠度研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 11.

XIE Qian, WANG Yueming, JIANG Yongzhi, et al. Deflection of suspended monorail track beam with stiffeners[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 11.

[3] 赵晓梅, 吴琰, 马磊. 悬挂式单轨双曲线轨道梁的设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 65.

ZHAO Xiaomei, WU Yan, MA Biao. Research on the design of suspended monorail double curved track beams[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(1): 65.

[4] 杨平, 鲍玉龙, 曾永平, 等. 悬挂式单轨交通系统桥梁结构的选型设计[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 30.

YANG Ping, BAO Yulong, ZENG Yongping, et al. Type selec-

tion design for bridge structure of suspended monorail transit system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 30.

[5] 杨翠屏, 张津, 邢扬. 悬挂式单轨轨道梁制造工艺研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(4): 48.

YANG Cuiping, ZHANG Jin, XING Yang. Research on the manufacturing process of suspended monorail beam[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(4): 48.

[6] 桂焯, 王新国, 严爱国, 等. 铁路大跨度刚架拱桥结构设计与分析[J]. 桥梁建设, 2006, 36(增刊2): 119.

GUI Xing, WANG Xinguo, YAN Aiguo, et al. Structural design and analysis of long span railway rigid-frame arch bridge[J]. Bridge Construction, 2006, 36(S2): 119.

[7] 杨勇. 铁路提篮拱桥设计参数及构造敏感性分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

YANG Yong. Analysis of railway basket-type arch bridge design parameter and construction structure sensitivity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[8] 郭臣. 悬挂式单轨交通线路技术标准研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 67.

GUO Chen. Research on technical standards for suspended monorail line[J]. Railway Engineering, 2018, 58(3): 67.

[9] 卫军, 陈涛, 黄敦文, 等. 悬挂式单轨交通系统墩-梁整体分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 36.

WEI Jun, CHEN Tao, HUANG Dunwen, et al. Pier-beam integral analysis of suspended monorail traffic system[J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 36.

[10] 颜维毅, 蔺鹏臻. 铁路 40 m 跨度混凝土简支箱梁的畸变效应[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 37.

YAN Weiyi, LIN Pengzhen. Distortion effect of railway 40 m span concrete simply supported box girder[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 37.

· 收稿日期:2022-11-27 修回日期:2023-01-16 出版日期:2024-03-10  
Received:2022-11-27 Revised:2023-01-16 Published:2024-03-10

· 作者:宋广林,高级工程师,sgl@sty.sh.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》  
投稿网址:tougao. umt1998. com