

文章编号: 1674—8247(2019)05—0045—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.05.010

# 大跨度钢管混凝土拱桥桥上轨道平顺性检算及设计优化

魏琦琪 刘在庆 田春香 李粮余

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610331)

**摘要:**文章以成渝客运专线资阳沱江特大桥工程为研究对象,研究大跨度钢管混凝土拱结构变形对高速铁路无砟轨道静态高低平顺性的影响,研究表明:(1)大跨度钢管混凝土拱结构变形温度敏感性强,对轨道长波平顺性影响较大,对短波、中波平顺性影响较小。结构收缩徐变对轨道高低不平顺的影响初期较为明显,后期逐步减小并且具有单向不可逆性;(2)应开展桥梁-轨道一体化设计,统筹梁体合拢温度、无砟轨道施工温度等关键设计参数,减小桥梁变形对轨道平顺性的影响;(3)应执行设计-施工-维护一体化理念,优化设计参数,严控施工条件,适时开展维修养护,减小并逐步消除收缩徐变影响;(4)研究成果可为大跨度钢管混凝土拱桥桥上无砟轨道的广泛应用提供有力的技术支持。

**关键词:**大跨度;钢管混凝土拱桥;变形;无砟轨道;平顺性

**中图分类号:**U213.2 **文献标志码:**A

## Track Regularity Checking and Design Optimization on Long Span CFST Bridge

WEI Qiqi LIU Zaiqing TIAN Chunxiang LI Liangyu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610331, China)

**Abstract:** Taken the example of Ziyang Tuojiang River Bridge in the Chengdu-Chongqing Railway Project, the influence of the deformation of long span CFST arch on the high-speed railway ballastless track geometry status is studied. Research conclusions: (1) The deformation of long span CFST arch is highly temperature-sensitive and has obvious influence on track irregularity of long wave, but little influence on track regularity of short and medium wave. The shrinkage and creep of the long span CFST arch has significant effect on track irregularity in the initial stage and the effect which has unidirectional irreversibility decreases gradually in the later stage; (2) It is necessary to carry out the bridge-track integration design, coordinate the key design parameters such as the closure temperature of beam body and the construction temperature of ballastless track, so as to reduce the influence of bridge deformation on track regularity; (3) To reduce and gradually eliminate the impact of shrinkage and creep, the design concept of construction-maintenance integration should be implemented by optimizing design parameter, controlling of construction condition and timely maintenance; (4) This research result provides technical support for the wide application of ballastless track on long span CFST Bridge.

**Key words:** long span; CFST bridge; deformation; ballastless track; regularity

收稿日期:2018-10-30

作者简介:魏琦琪(1987-),女,工程师。

引文格式:魏琦琪,刘在庆,田春香,等. 大跨度钢管混凝土拱桥桥上轨道平顺性检算及设计优化[J]. 高速铁路技术,2019,10(5):45-51.

WEI Qiqi, LIU Zaiqing, TIAN Chunxiang, et al. Track Regularity Checking and Design Optimization on Long Span CFST Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 45-51.

20世纪30年代末钢管混凝土拱桥结构首次投入工程应用后发展迅速,其在受力性能、静动力响应、静动载试验及施工控制等方面已有较为丰富的研究成果<sup>[1-5]</sup>。随着高速铁路工程的发展,大跨度钢管混凝土拱桥与高速列车的相互作用得到了充分的重视<sup>[6]</sup>,但仍未有涉及车桥连接纽带—桥上轨道结构的研究。

本文结合成渝客运专线资阳沱江特大桥的工程实例,研究分析了大跨度钢管混凝土拱桥结构变形对桥上轨道结构平顺性的影响规律。

1 工程概况及检算方法

1.1 工程概况

资阳沱江特大桥主桥全长361.6 m,采用下承式钢管混凝土系杆拱形式,主跨(90+180+90) m,主拱设计矢高 $f=36.0$  m,矢跨比 $f/L=1/5$ ,设计拱轴线方程: $y=-1/225x^2+0.8x$ ,设计合拢温度17℃。主桥

布置,如图1所示。

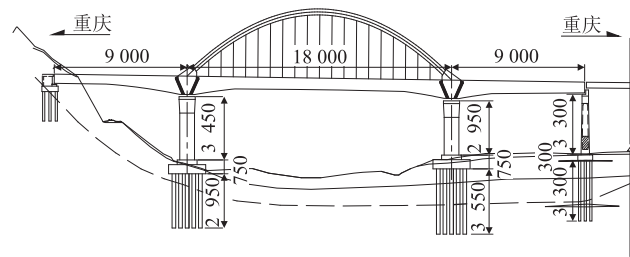


图1 资阳沱江特大桥主桥总布置图(cm)

桥上无砟轨道采用分块式结构,分块长4~7 m,结构高度为0.725 m。主桥两端铺设伸缩调节器地段采用轨枕埋入式无砟轨道结构,其余地段采用CRTS I型双块式无砟轨道。无砟轨道底座均直接浇筑在桥面上,并通过桥面预埋钢筋紧密连接。轨道主要组成如图2和图3所示。

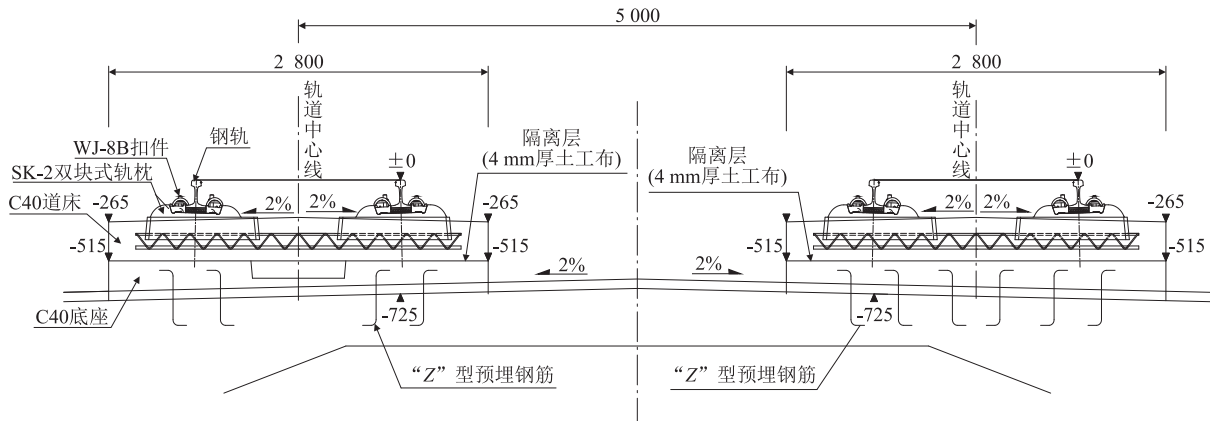


图2 CRTS I型双块式无砟轨道(mm)

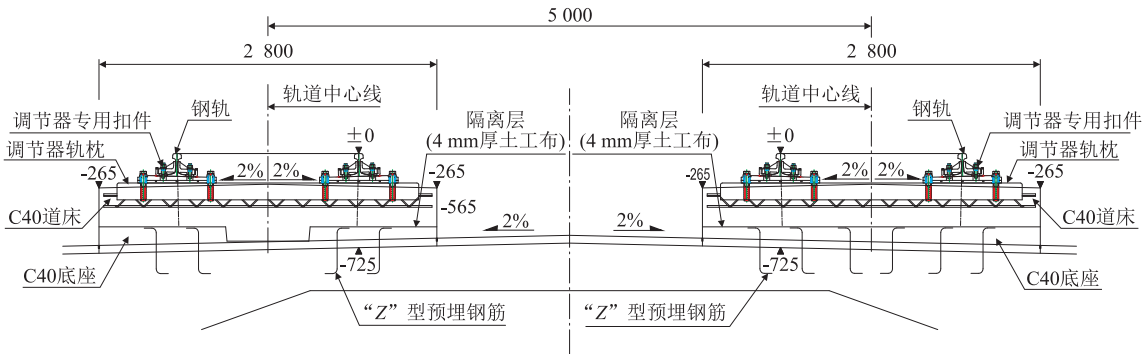


图3 伸缩调节器地段轨枕埋入式无砟轨道(mm)

1.2 检算方法

本文结合工程特点在平顺性检算中作出以下简化和基本假定:

- (1)静态检算中不考虑动态的轮轨作用。
- (2)无砟轨道结构高度小、分块短并且与梁体紧

密连接,其自身变形可忽略,轨道变形与梁体变形相协调。

(3)无砟轨道结构具备足够的竖向稳定性,桥上无缝线路应力对轨道竖向变形的影响可忽略。

基于以上简化和假定,本文提出了大跨度钢管混

凝土拱桥桥上无砟轨道静态高低平顺性检算方法,其步骤如下:

(1)建立梁体变形计算模型,开展大跨度钢管混凝土拱桥梁体理论变形计算。

(2)根据梁体理论变形计算结果,按照轨道几何状态测验方法<sup>[7]</sup>进行理论平顺性检算。

(3)开展工程测量,根据实测工程数据计入轨道初始不平顺影响。利用实测数据对理论检算数据进行修正,最终得出无砟轨道静态高低平顺性检算结果。

## 2 理论平顺性检算及结果

### 2.1 梁体理论变形计算

#### 2.1.1 计算模型

梁体变形计算模型,如图4所示。

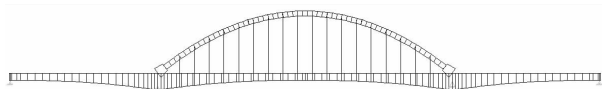


图4 梁体变形计算模型单元离散图

桥上吊杆建立为拉索单元,连续梁梁体及钢管混凝土拱结构等其余桥梁结构建立为梁单元。计算模型中考虑恒载、温度荷载组合和收缩徐变等荷载。

#### 2.1.2 计算参数

##### (1)恒载

①结构自重:容重按  $26.5 \text{ kN/m}^3$ 。

②二期恒载: $q = 118 \text{ kN/m}$ 。

③预应力及其内力。

④混凝土收缩、徐变:环境条件取野外一般条件,相对湿度取80%。

##### (2)单项温度荷载

①整体升降温:资阳地区极端最高气温  $40.3^\circ\text{C}$ ,极端最低气温  $-4^\circ\text{C}$ ,整体升温  $24^\circ\text{C}$ ,降温  $21^\circ\text{C}$ ,计入桥墩升降温影响。

②主梁日照温差:按指数为5,顶板  $10^\circ\text{C}$  考虑。

③拱肋与主梁温差:拱肋截面日照温差按梯度温度取  $8^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ ,拱肋与主梁温差效应取  $+4^\circ\text{C}$ 。拱肋日照反温差为正温差乘以  $-0.5$ 。

④吊杆与主梁温差:升温温差按  $+9^\circ\text{C}$  考虑,降温温差按  $-5^\circ\text{C}$  考虑。

##### (3)温度荷载组合

①升温组合:按整体升温、拱肋日照温差、吊杆升温及主梁日照温差进行组合。

②降温组合:按整体降温、吊杆降温、拱肋日照温差及主梁日照温差进行组合。

#### 2.1.3 梁体变形计算结果

本桥主桥采用超大跨度钢管混凝土系杆拱结构,

温度敏感性强。梁体静态变形主要考虑收缩徐变、温度荷载组合和单日极端天气影响。

##### (1)收缩徐变作用下的梁体变形

2013年5月15日主桥梁部合龙,2014年9月15日无砟轨道施工。2015年9月以后每一年收缩徐变引起的梁体变形和垂向变形极值,如图5、图6所示。

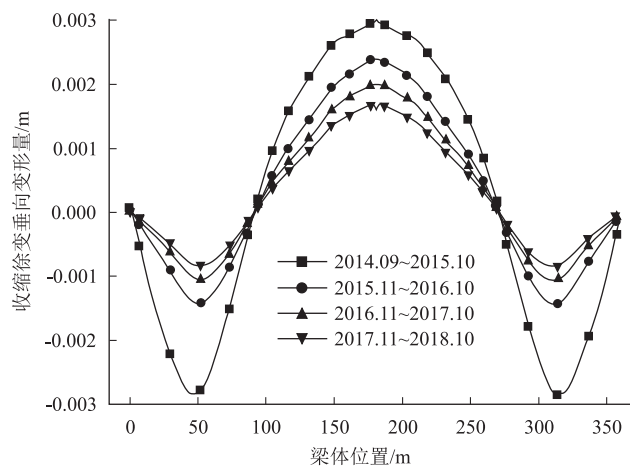


图5 各年收缩徐变引起的梁体变形图

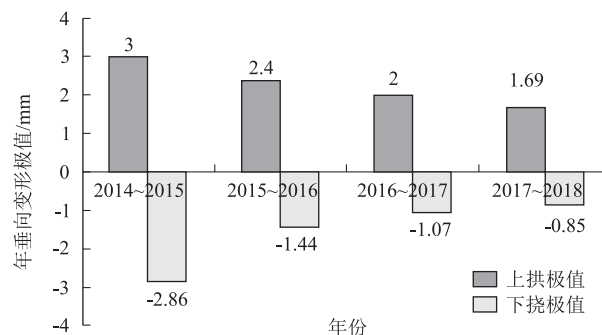


图6 收缩徐变引起的梁体年垂向变形极值图

由图5、图6可知,收缩徐变荷载初期对垂向变形影响较大,后期逐步减小,截止2018年10月,收缩徐变引起的年上拱幅度已不足  $2 \text{ mm}$ ,年下挠幅度已不足  $1 \text{ mm}$ 。

##### (2)温度荷载作用下的梁体变形

###### ①单项温度荷载引起的梁体变形

各单项温度荷载计算参数带入模型中检算所得的梁体变形情况,如表1所示。

由表1可知,拱肋升温温差对主梁垂向变形影响最大,对梁拱及吊杆整体温度变化影响最小。桥墩整体温度变化影响较大且主跨与边跨变形方向一致。

###### ②温度荷载组合引起的梁体变形

考虑以下5种实际工况的温度荷载组合:

A. 夏季白天升温(有日照):拱梁及吊杆整体升温+墩整体升温+拱肋升温温差+吊杆升温温差+主梁日照温差。

表 1  单 项 温 度 荷 载 引 起 的 桥 梁 垂 向 变 形 检 算 结 果 统 计 表

荷载项目	工况	主跨最大垂向位移/mm		边跨最大垂向位移/mm	
		位置	数值	位置	数值
拱肋温差	升温	跨中位置	11.7	跨中附近	-3.8
	降温	跨中位置	-5.9	跨中附近	1.9
主梁日照温差	-	跨中位置	-4.1	跨中附近	1.7
吊杆温差	升温	跨中位置	-2.6	跨中附近	0.79
	降温	跨中位置	1.45	跨中附近	-0.44
梁拱及吊杆整体温度变化	升温	主跨 1/4 截面	0.29	跨中附近	0.55
	降温	跨中	-0.25	跨中附近	-0.48
桥墩整体温度变化	升温	主跨近小里程侧主墩附近	7.85	边跨大里程侧边墩位置	6.70
	降温	主跨近小里程侧主墩附近	-6.87	边跨大里程侧边墩位置	-5.87

注:表中上拱位移为正,下挠位移为负

- B. 夏季夜间升温(无日照):拱梁及吊杆整体升温+墩整体升温+拱肋降温温差+吊杆降温温差。
- C. 冬季白天降温(有日照):拱梁及吊杆整体降温+墩整体降温+拱肋升温温差+吊杆升温温差+主梁日照温差。
- D. 冬季白天降温(无日照):拱梁及吊杆整体降温+墩整体降温。
- E. 冬季夜间降温(无日照):拱梁及吊杆整体降温+墩整体降温+拱肋降温温差+吊杆降温温差。
- 温度荷载组合下梁体变形计算结果如图 7 所示。

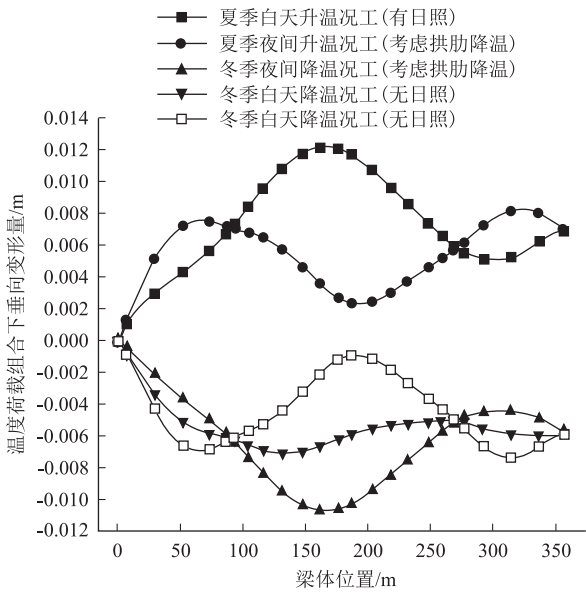


图 7  温 度 荷 载 组 合 引 起 的 梁 体 变 形 图

由计算结果可知：

夏季白天升温(有日照)工况为最不利升温组合，最大垂向位移为 12.2 mm(上拱),位于主跨跨中位置。冬季夜间降温(无日照)工况为最不利降温组合，最大垂向位移为 -10.7 mm(下挠),位于主跨跨中位置。

③单 日 极 端 天 气 引 起 的 梁 体 变 形

表 2  单 日 极 端 天 气

极端天气	最高温度	最低温度	最大温差	出现时间
日最高温	37 ℃	25 ℃	12 ℃	2014 年 7 月 23 日
日最低温	9 ℃	-1 ℃	8 ℃	2012 年 12 月 31 日
日最大温差	17 ℃	1 ℃	16 ℃	2014 年 1 月 12 日

根据表 2 中 2012 - 2015 年极端天气数据对单日最高温、最低温及最大温差 3 种温度荷载情况进行梁体变形计算,计算结果如表 3 所示。

表 3  极 端 天 气 下 梁 体 垂 向 变 形

极端天气	工况	最大上拱位移/mm	最大下挠位移/mm	最大位移差/mm
日最高温	白天升温工况(有日照)	11.0	-0.1	12.9
	夜间升温工况(无日照)	3.7	-2.1	
日最低温	白天降温工况(有日照)	2.7	-3.8	12.3
	夜间降温工况(无日照)	0.0	-2.7	
日最大温差	白天升温工况(有日照)	5.0	-1.6	14.1
	夜间降温工况(无日照)	0.0	-9.2	

(3)温 度 荷 载 与 收 缩 徐 变 共 同 作 用 下 的 梁 体 变 形

综合温度荷载与收缩徐变计算结果,截止至 2018 年 10 月,收缩徐变荷载与最不利温度荷载组合后桥梁垂向变形曲线如图 8 所示。

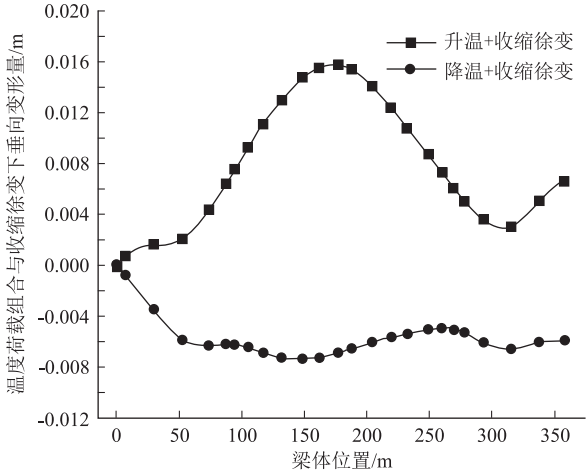


图 8  温 度 荷 载 组 合 与 收 缩 徐 变 影 响 下 梁 体 垂 向 变 形

2.2 轨道理论平顺性检算

2.2.1 轨道高低平顺性评价指标

轨道高低平顺性由轨道矢高偏差值决定,其容许偏差应符合表 4 的要求。

表 4 高低平顺性评价指标表

序号	评价项目	容许偏差	备注
1	高低偏差(弦长 10 m)	2 mm	短波不平顺指标
2	高低偏差(基线长(30 或 48 a)m)	2 mm/(5 或 8 a)m	中波不平顺指标
3	高低偏差(基线长(300 或 480 a)m)	10 mm/(150 或 240 a)m	长波不平顺指标

注:a 为无砟轨道扣件节点间距

矢高偏差值计算公式如下:  
偏差值  $\Delta h$  = 设施矢高差  $\Delta_{\text{设计}}$  - 测量矢高差  $\Delta_{\text{实测}}$   
矢高差检算点间距不等价于弦长或基线长, 10 m 弦长和基线长 30 m 标准的矢高差检算点间距均为 5 m,基线长 300 m 标准的矢高差检算点间距为 150 m。

2.2.2 轨道理论平顺性检算结果

将梁体垂向变形数据带入轨道平顺性迭代计算得到轨道理论平顺性检算结果如表 5 ~ 表 7 所示。

表 5 最不利温度荷载组合下轨道平顺性检算结果

编号	工况	平顺性评价标准	检算结果/mm	容许偏差/mm	评价
1	夏季白天升温(有日照)	10 m 弦长	0.104	2	满足
2		30 m 基线长	0.348	2	满足
3		300 m 基线长	9.349	10	满足
4	冬季夜间降温(无日照)	10 m 弦长	0.085	2	满足
5		30 m 基线长	0.127	2	满足
6		300 m 基线长	8.223	10	满足

表 6 单日极端天气下轨道平顺性检算结果

编号	工况	平顺性评价标准	检算结果/mm	容许偏差/mm	评价
1	单日最高温	10 m 弦长	0.096	2	满足
2		30 m 基线长	0.327	2	满足
3		300 m 基线长	8.552	10	满足
4	单日最低温	10 m 弦长	0.073	2	满足
5		30 m 基线长	0.190	2	满足
6		300 m 基线长	7.652	10	满足
7	单日最大温差	10 m 弦长	0.065	2	满足
8		30 m 基线长	0.223	2	满足
9		300 m 基线长	7.255	10	满足

表 7 最不利温度荷载组合与收缩徐变影响下轨道平顺性检算结果

编号	工况	平顺性评价标准	检算结果/mm	容许偏差/mm	评价
1	夏季白天升温(有日照) + 收缩徐变	10 m 弦长	0.124	2	满足
2		30 m 基线长	0.368	2	满足
3		300 m 基线长	13.400	10	不满足
4	冬季夜间降温(无日照) + 收缩徐变	10 m 弦长	0.098	2	满足
5		30 m 基线长	0.209	2	满足
6		300 m 基线长	5.095	10	满足

由表 5 ~ 表 7 可知除最不利升温温度荷载和收缩徐变共同作用下, 300 m 基线长高低不平顺值(13.4 mm)超标外,轨道理论高低不平顺评价指标均满足规范要求。

2.3 实测数据及初始不平顺

2.3.1 施工复测数据

2014 年 9 月 5 日无砟轨道施工完成, 2015 年1 月 27 - 28 日进行的施工复测中轨道高程实测偏差值,如图 9 所示。

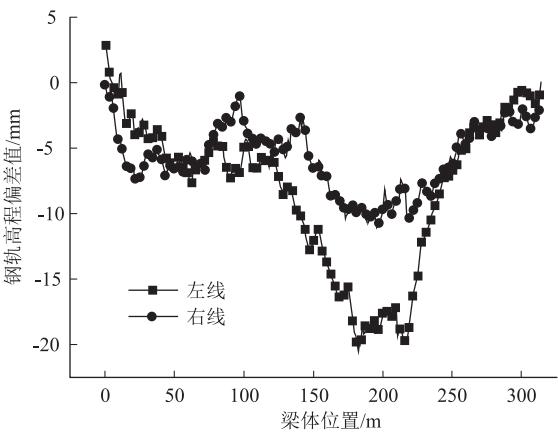


图 9 施工复测钢轨高程偏差曲线图

由图 9 可知,此时轨道高程已出现较大偏差,左线偏差最大值为 -20.51 mm,右线 -11.09 mm。

2.3.2 精调复测数据

在 2015 年 5 月 - 7 月间工务部门进行的 3 次精调期间,轨道高程偏差均有较大变化。2015 年 7 月 7 日夜间最后一次轨道精调完成,精调气温均为 22 ℃,最高整体温升为 20 ℃,最高整体温降为 26 ℃。精调后实测轨道高程偏差,如图 10 所示。

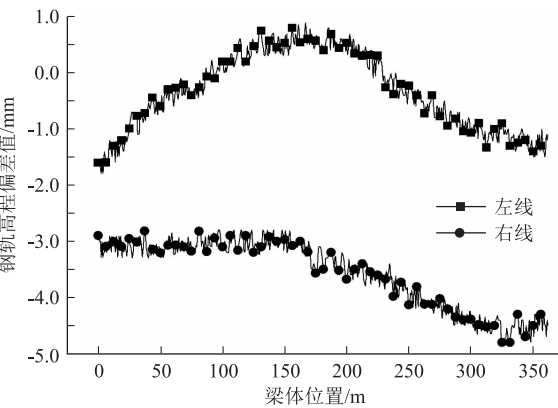


图 10 精调完成后钢轨高程偏差曲线图

2.3.3 轨道初始不平顺

施工复测及精调复测数据表明轨道平顺性受时间作用影响明显,因此轨道平顺性研究应首先明确时间



段落。在初始研究时间节点上轨道的几何形位状态即可称作轨道初始不平顺。

精调完成是轨道几何形态稳定的重要标志,而此时的轨道几何形态也是静态验收的重要标准。因此,本文选择精调完成作为研究的初始时间节点,此时轨道的几何形位状态即为轨道初始不平顺。该数据包含了结构施工误差,轨道部件制造及组装误差,轨道施工完成前的收缩徐变影响等工程因素,实测数据表明初始不平顺不可忽略,应作为理论计算结果的必要修正。

2.4 数据修正及检算结果

2.4.1 修正后温度荷载组合作用下的轨道平顺性

利用初始不平顺数据修正后最不利温度荷载作用下的钢轨变形曲线,如图 11 所示。对以上变形数据进行轨道平顺性迭代检算,计算结果如表 10 所示。

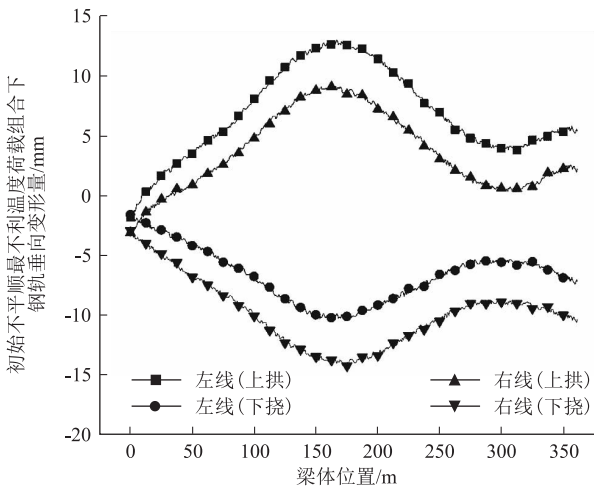


图 11 初始不平顺与最不利温度荷载组合下钢轨垂向变形

表 10 修正后温度荷载作用下轨道平顺性检算结果

编号	工况	平顺性评价标准	检算结果/mm	容许偏差/mm	评价
1	左线	10 m 弦长	0.571	2	满足
2		30 m 基线长	0.545	2	满足
3		300 m 基线长	11.286	10	不满足
4	右线	10 m 弦长	0.553	2	满足
5		30 m 基线长	0.597	2	满足
6		300 m 基线长	10.188	10	不满足

修正后资阳沱江特大桥轨道短波和中波平顺性仍满足规范,但长波不平顺超限。

2.4.2 修正后温度荷载和收缩徐变共同作用下的轨道平顺性

利用初始不平顺数据修正后,最不利温度组合和精调后一年的收缩徐变共同作用下的钢轨变形曲线如图 12 所示。对以上变形曲线数据进行轨道平顺性迭代检算,计算结果如表 11 所示。

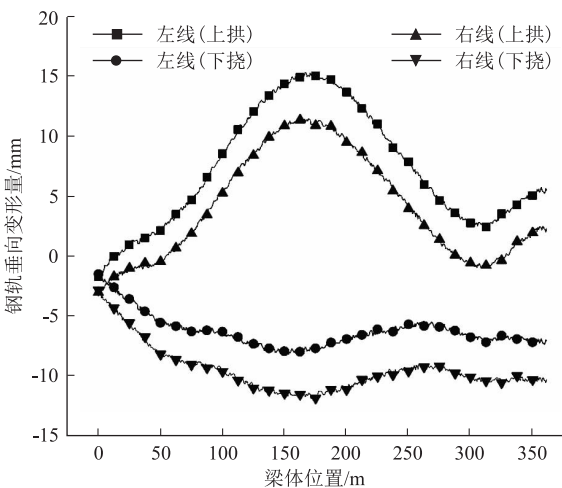


图 12 初始不平顺 + 温度荷载组合 + 收缩徐变下钢轨垂向变形图

表 11 修正后温度荷载和收缩徐变共同作用下轨道平顺性检算结果

编号	工况	平顺性评价标准	检算结果/mm	容许偏差/mm	评价
1	左线	10 m 弦长	0.575	2	满足
2		30 m 基线长	0.615	2	满足
3		300 m 基线长	13.920	10	不满足
4	右线	10 m 弦长	0.556	2	满足
5		30 m 基线长	0.672	2	满足
6		300 m 基线长	12.753	10	不满足

修正后资阳沱江特大桥轨道短波和中波平顺性仍满足规范,但长波不平顺超限。

3 检算结论

根据上述大跨度钢管混凝土拱桥桥上轨道平顺性检算数据可得出以下结论:

- (1)桥梁变形对轨道长波平顺性影响最为明显,对短波、中波平顺性影响较小。
- (2)桥梁初期收缩徐变对轨道高低不平顺的影响较为明显,后期逐步减小,且其影响具有单向不可逆性。
- (3)桥梁变形的温度敏感性强,受气温、温差、日照等条件影响大,结构的局部温差作用大于整体温度变化作用。

4 优化建议

本文通过上述研究提出以下轨道平顺性优化建议:

- (1)开展桥梁 - 轨道一体化设计,统筹设计梁体合拢温度、系杆拉伸温度、无砟轨道施工温度及无缝线路锁定温度,减小温度变形引起的轨道长波不平顺,提

高运行舒适性。

(2)执行设计－施工－维护一体化理念,通过设计中优化施工温度,施工中严控施工条件,减小收缩徐变荷载影响和轨道初始不平顺;通过选择恰当的维修养护时间,有效消除前期收缩徐变影响。

(3)设计中考考虑建立自动化监测系统进一步研究桥梁部件温差对变形的影响。

(4)运营中加强高温季节及温度突变情况下的养护维修检查工作。

参考文献:

[1] 安鹏. 跨京杭运河钢管砼拱桥施工安全技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
AN Peng. Research on Construction Safety Technology of the Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[2] 崔军. 大跨度钢管混凝土拱桥受力性能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.  
CUI Jun. Structural Characteristic Study on Large Span CFST Arch Bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[3] 涂光亚,付瑶,颜东煌. 大跨度钢管混凝土拱桥钢管初应力的释放转移[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017,14(1): 54-60.

TU Guangya, FU Yao, YAN Donghuang. Initial Stress Release and Transfer of Steel Tube on large-span CFST Arch Bridge [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 14 (1): 54-60.

[4] 陈杰. 大跨度钢管混凝土拱桥荷载试验评定[J]. 中国水运, 2015,15(3):218-219.  
CHEN Jie. Load Test Evaluation of Large Span CFST Arch Bridge [J]. China Water Transport, 2015, 15 (3): 218-219.

[5] 杨孟刚,曹志光. 初应力对大跨度钢管混凝土拱桥极限承载力的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2010,7(4):6-10.  
YANG Menggang, CAO Zhiguang. Influence of Initial Stress on the Ultimate Bearing Capacity of Long-span CFST Arch Bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7 (4):6-10.

[6] 韩兴,菜子龙,李鑫,等. 高速铁路大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动仿真分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(4):36-39.  
HAN Xing, CAI Zilong, LI Xin, et al. Coupled Vibration Analysis of Vehicle-bridge System for Long-span Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2016, 60 (4): 36-39.

[7] 魏晖,朱洪涛,殷华,等. 高铁轨道平顺性的150 m/300 m 校验及其快速测量[J]. 铁道工程学报,2015,32(1):44-48.  
WEI Hui, ZHU Hongtao, YIN Hua, et al. 150 m /300 m Check for the Irregularities of HSR and Its Rapid Survey [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 44-48.

(编辑:车晓娟 白雪)

(上接第 35 页)

[3] 冯海宁,龚晓南,徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1159-1162.  
FENG Haining, GONG Xiaonan, XU Riqing. Finite Element Analysis of Influence of Pipe-jacking Construction on Environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1159-1162.

[4] 屠毓敏. 长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降分析[J]. 中国市政工程,2001,23(1):53-55.  
TU Yumin. Surface Settlement from Long Distance Pipe Jacking Through An Embankment [J]. China Municipal Engineering, 2001, 23(1): 53-55.

[5] Sulsky D, Kaul A. Implicit Dynamics in The Material－Point Method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2004, 193(12): 1137-1170.

[6] 廉艳平,张帆,刘岩,等. 物质点法的理论和应用[J]. 力学进展,

2013,43(2):237-264.

LIAN Yanping, ZHANG Fan, LIU Yan, et al. Theory and Application of Material Point Method [J]. Advances In Mechanics, 2013, 43(2): 237-264.

[7] 史卜涛,张云,张巍. 边坡稳定性分析的物质点强度折减法[J]. 岩土工程学报,2016,38(9):1678-1684.  
SHI Butao, ZHANG Yun, ZHANG Wei. Strength Reduction Material Point Method for Slope Stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1678-1684.

[8] 孙玉进,宋二祥. 大位移滑坡形态的物质点法模拟[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1218-1225.  
SUN Yujin, SONG Erxiang. Simulation of Large-displacement Landslide by Material Point Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1218-1225.

(编辑:赵立红 张红英)