

西郊大桥悬臂浇筑施工挂篮优化设计

刘伟¹, 宋新新¹, 吴雨航², 王斌¹, 吕盟¹

(1. 中建铁投路桥有限公司, 湖北 武汉 460014; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为提高挂篮调坡效率 and 安全性, 减小宽幅桥梁后托梁在行走过程中变形过大的问题, 以西郊大桥为工程背景, 对挂篮主桁结构和后托梁进行优化设计, 提出一种自锁式液压顶升装置和在箱梁底模下增加行走导梁及连接翼缘模板下导梁与后托梁等措施, 在此基础上, 利用 Midas/Civil 建立优化后的挂篮模型, 从挂篮主桁、前上横梁、底托梁和挂篮行走 4 个方面对挂篮进行有限元分析, 得出其在最不利浇筑工况和行走工况下的最大应力和变形, 并对自锁式液压顶升装置可调高度菱形架结构连接节点进行检算。结果表明, 改进后挂篮调坡快速且安全性较高, 强度、刚度和连接节点均能满足施工要求, 所提挂篮改进方案可为类似工程提供参考。

关键词:桥梁工程; 悬臂浇筑; 挂篮; 优化设计

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0015-07

悬臂浇筑施工具有结构整体性较好、不中断桥下交通、造价低等特点, 是连续刚构桥、连续梁桥及斜拉桥中普通施工方法之一^[1-3]。挂篮作为悬臂浇筑常用设备, 其结构技术已较为成熟^[4-5], 但当桥面宽度和横坡较大时, 挂篮浇筑过程受力较大、行走难度增加、调坡过程繁琐, 对挂篮结构设计提出了更高的要求。许多学者结合具体工程对宽幅桥梁挂篮结构优化设计展开了研究。

张洪斌等^[6]通过对某铁路桥挂篮进行理论与试验测试得出结论, 挂篮强度设计相对保守, 仍有较大优化空间; 靳会武等^[7]对镇山大桥 44 m 超宽桥面挂篮施工进行仿真分析, 并根据计算结果对挂篮进行了优化; 李长坤等^[8]提出使用密布吊杆解决某城市宽幅桥梁挂篮前托梁变形较大的问题; 吴月星等^[9]通过改变挂篮锚吊杆数目和位置, 使拱圈节段受力更加合理。以上研究通过建立挂篮有限元模型, 对挂篮进行受力分析, 并对悬臂浇筑施工方法进行了技术总结, 可为宽幅桥梁挂篮设计提供参考, 不过仍缺乏对横坡较大的桥梁挂篮施工技术的研究。

目前, 挂篮主要依靠支垫钢板的方式进行调坡, 该过程材料消耗大、调坡过程繁琐且安全性不高。以西郊大桥为工程背景, 提出一种简易的挂篮调坡装置, 并对该装置使用方法进行介绍。

1 工程概况

西郊大桥 14[#]~17[#]墩跨径为 47 m+88 m+47 m, 如图 1 所示。上部结构采用直腹板预应力混凝土箱梁, 箱梁为单箱三室断面, 箱梁顶宽 24.5 m, 底宽 21.5 m, 悬臂长 1.5 m。合龙段处箱梁中心高度为 2.5 m, 顶板厚 0.3 m, 底板厚 0.3 m; 0[#]块中心高度为 5.5 m, 顶板厚 0.5 m, 底板厚 0.8 m。箱梁悬浇段长度 3~4 m, 中跨合龙段 2 m, 最重悬浇段为 1[#]块, 重约 302.12 t, 14[#]~17[#]墩处于半径为 800 m 的圆曲线上, 横坡较大, 达到 4%, 左右两侧挂篮主构架高差为 810 mm。

收稿日期: 2021-08-12 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210176

基金项目: 中建铁路投资建设集团有限公司专项研究计划

作者简介: 刘伟(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为桥梁施工。E-mail: 342747709@qq.com

刘伟, 宋新新, 吴雨航, 等. 西郊大桥悬臂浇筑施工挂篮优化设计[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 15-20, 65.

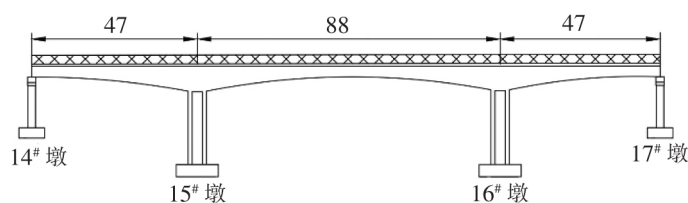


图 1 桥梁立面图(单位:m)

2 菱形挂篮优化设计

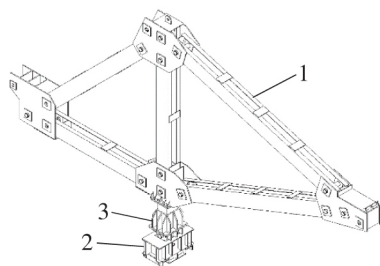
西郊大桥横坡较大、桥面较宽且位于曲线上,传统的挂篮较难满足施工要求,具体为:

(1) 桥面横坡渐变,由 2% 逐渐变到 4%,挂篮 4 片主桁始终不在同一高度,施工时,每一节段均需对挂篮主桁进行调坡,调坡过程繁琐。

(2) 桥面较宽,采用全幅整体式施工方法,挂篮后托梁长度达到 30 m,挂篮在行走工况下自身变形较大。

2.1 挂篮调坡改进设计

采用全液压调节方案,坡度可以随意调整,且安全系数高,不可调节高度的菱形架为基本形式,其位于连续梁梁体高侧,采用轨道、浇筑制作直接支撑即可满足要求;图 2 为可调节高度菱形架架构,其位于连续梁梁体低侧,通过调节菱形架与滑移支座之间的支座来调节菱形架高度,使菱形架无论梁体坡度如何变化,均可调整为与其他 3 组菱形架平行,保证受力安全。可调支座分为上支座、下支座和中间集成的自锁式液压千斤顶,如图 3 所示。液压千斤顶用于调节菱形架的准确高度并自锁,上下支座用于保持调节和浇筑时的稳定性。



1.主桁架; 2.滑移支座; 3.可调支座。

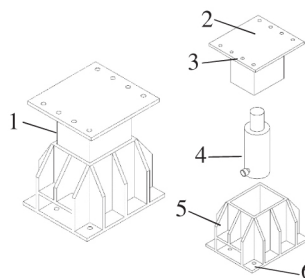
1.可调支座; 2. 上支座; 3. 上支座螺栓孔;
4. 自锁式液压千斤顶; 5. 下支座; 6. 下支座螺栓孔。

图 2 自锁式液压顶升装置可调高度菱形架结构

图 3 自锁式液压顶升装置示意图

2.2 使用方法

因本桥梁体为单箱三室结构,因此单支挂篮(半套)共设置 4 片菱形架,其中最高侧 2 片菱形架采用轨道+高低垫梁+垫片形式调节,低侧 2 片菱形架采用套筒调节高度。具体包括以下 4 个步骤:

(1) 当挂篮安装到位后,测量 0# 块或已浇筑混凝土块段的坡度及相应菱形架下梁体标高,计算出最高侧菱形架与其他 3 片菱形架之间高差。

(2) 根据所测数据,采用液压油缸对液压千斤顶进行顶升,顶升到位后即刻停止,泄压后自锁完成。

(3) 采用相同方法调节最低侧菱形架高度至指定位置,并完成自锁。

(4) 按正常挂篮操作流程调节其他位置标高,准备浇筑。

另外水平稳定器、手动式锁死装置、后部可调伸缩反扣装置,因每片主构架高度均不相同,可采用这种顶升装置,在浇筑混凝土时将主构架调平,达到水平效果。

2.3 挂篮后托梁改进设计

挂篮行走工况下,后托梁锚固全部松开,后托梁变形过大。为减小挂篮行走过程中后托梁变形,采取

以下 2 个措施,如图 4 所示。

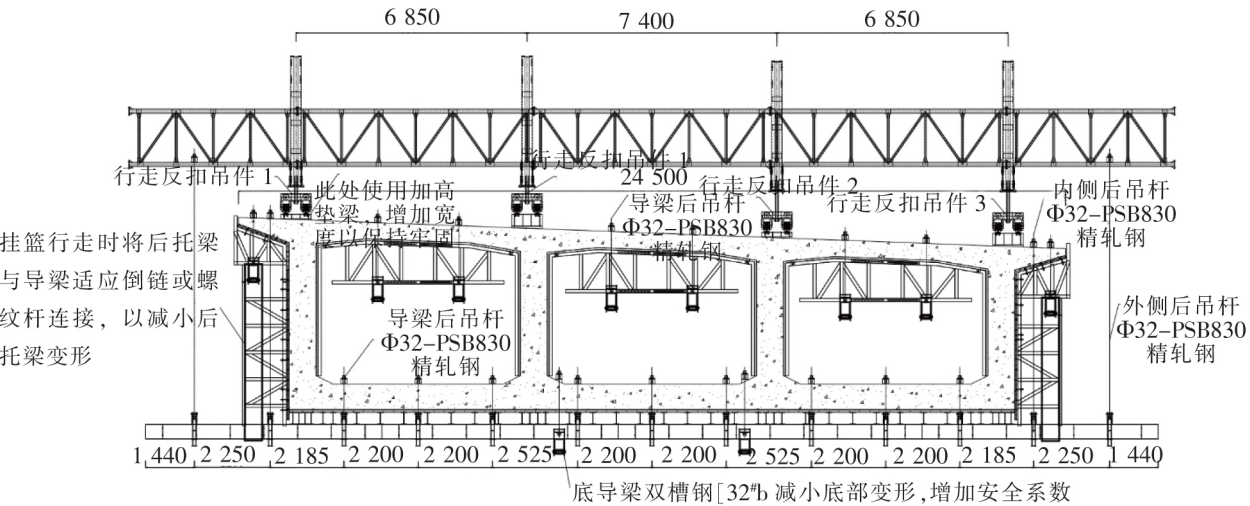


图 4 挂篮后视图(单位:cm)

- (1)在后托梁底侧增设 2 道双拼[32[#]b 槽钢,底导梁前端锚固在前托梁上,后端锚固在箱梁底板上。
- (2)挂篮行走时将后托梁与导梁使用倒链或螺纹杆连接,减小后托梁变形。

3 挂篮有限元模型

3.1 挂篮构造

考虑西郊大桥第 2 联小半径($R=800$)和大横坡(4%)的特点,在传统菱形挂篮的基础上,降低前吊点高度,采用变异菱形挂篮施工。该挂篮结合菱形挂篮和三角形挂篮优点,加强受力稳定和平衡的同时方便工人操作。挂篮主要构件规格见表 1。挂篮整体模型如图 5 所示。

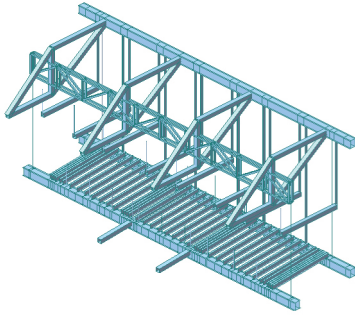


图 5 挂篮三维图

表 1 挂篮主要构件规格

序号	名称	截面规格	材质	序号	名称	截面规格	材质
1	主桁架	2[32 [#] b	Q235	6	吊带	25×180	Q345B
2	前上横梁	H400×200×5×14	Q235	7	内、外导梁	[32 [#] b	Q235
3	中门架上下弦杆	120×120	Q235	8	前、后托梁	H400×200×5×14	Q235
4	中门架腹杆竖杆	120×60	Q235	9	纵梁	H360×138×12×16	Q235
5	吊杆	Φ32	PSB830	10	行走导梁	2[32 [#] b	Q235

3.2 基本设计参数

挂篮主要构件采用 Q235 和 Q345 钢材,钢材抗压强度和抗剪强度见表 2。计算时,混凝土容重取 26 kN/m³,混凝土胀膜等超载系数取 1.05;挂篮行走冲击系数取 1.3,挂篮抗倾覆系数取 2。

表 2 材料用表

材料	板厚 d/mm	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa
Q235	≤ 16	2.06×10^5	215	125
Q345B	$> 16 \sim 40$	2.06×10^5	295	170
PSB830	—	2×10^5	830	—

3.3 荷载工况

分混凝土浇筑和挂篮行走 2 种对该挂篮进行分析。西郊大桥悬臂浇筑 12 个节段,其中 1[#]块混凝土体积 116.2 m³,梁重为 3 021.2 kN,为最重节段,因此选择该节段为最不利浇筑工况。考虑荷载: a 为混凝土荷载; b 为挂篮自重; c 为模板荷载; d 为人群及机具荷载; e 为振捣和倾倒混凝土荷载; f 为护栏荷载; g 为挂篮冲击荷载,0.3 倍挂篮自重。2 种工况下作用在挂篮上的荷载组合如表 3 所示。

表 3 荷载组合

检算工况	荷载组成
浇筑 1 [#] 块强度检算	$1.3(a+b+c)+1.5(d+e)+f$
浇筑 1 [#] 块刚度检算	$a+b+c+d+f$
行走工况检算	$b+c+g$

3.4 浇筑工况挂篮检算

采用 Midas/Civil 建立挂篮有限元模型。模型采用梁单元进行模拟,挂篮主桁前支点约束所有自由度,后支点约束 3 个线自由度,中门架与主桁之间、底纵梁与前后托梁之间、行走导梁与前后托梁之间均采用刚性连接。计算时荷载以线荷载的形式施加在挂篮内外导梁及底纵梁上。挂篮主桁架、前上横梁及前后托梁为挂篮承重构件,主要对其进行受力分析。

3.4.1 挂篮主桁检算

挂篮主桁主要承受由前上横梁传递的导梁及底纵荷载。挂篮主桁计算结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,挂篮最大应力值为 158.2 MPa<215 MPa;由图 7 可知,主桁架最大位移为 11 mm,满足文献[10]规定的 20 mm 限值。

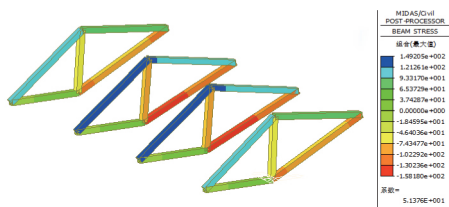


图 6 主构架应力云图(单位:MPa)

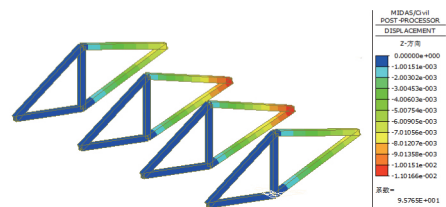


图 7 主构架位移云图(单位:mm)

3.4.2 前上横梁检算

前上横梁主要承受导梁及底纵前吊点传递的荷载。前上横梁计算结果及轴力计算结果如图 8~图 10 所示。由图 8 可知,前上横梁最大弯曲应力 91.8 MPa<215 MPa。由图 9 可知,前上横梁最大剪应力 46.8 MPa<125 MPa。由图 10 可知,前上横梁跨中最大变形值 122.1 mm-110.2 mm=11.9 mm<L/400 (L/400=7 400/400=18.9 mm),L 为中间 2 片主桁之间的距离。前上横梁弯曲应力、剪应力、刚度均满足规范要求。

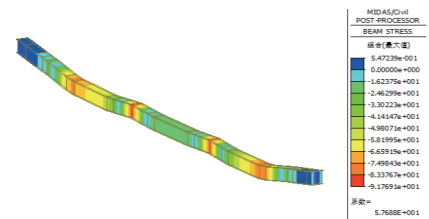


图 8 前上横梁应力云图(单位:MPa)

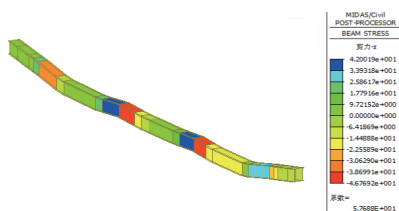


图 9 前上横梁剪力云图(单位:MPa)

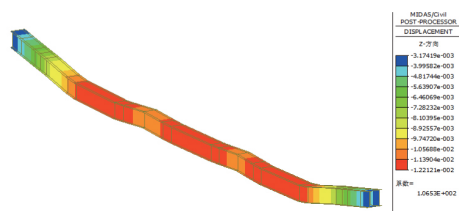


图 10 前上横梁位移云图(单位:mm)

3.4.3 前后托梁检算

前后托梁主要承受底纵梁前后支点传递的荷载。计算结果如图11~图13所示。由图11可知,前上横梁最大弯曲应力 $67.5 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$,由图12可知,前上横梁最大剪应力 $24.1 \text{ MPa} < 125 \text{ MPa}$,由图13可知,前上横梁最大变形值为 $14.6 - 13.38 = 1.22 \text{ mm} < L/400$ ($L/400 = 4\,100/400 = 10.25 \text{ mm}$),其中, 13.38 mm 为吊带变形值, L 为2根吊带之间的距离。前后托梁弯曲应力、剪应力、刚度均满足规范要求。

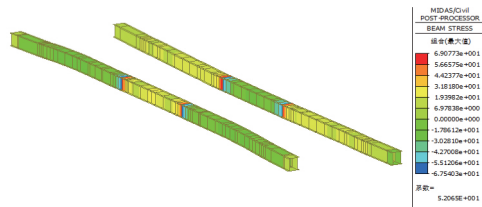


图11 前后托梁应力云图(单位:MPa)

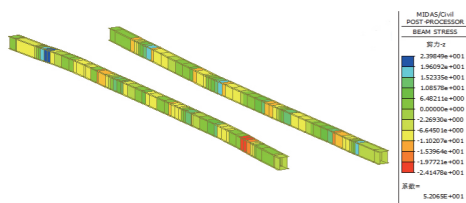


图12 前后托梁剪力云图(单位:MPa)

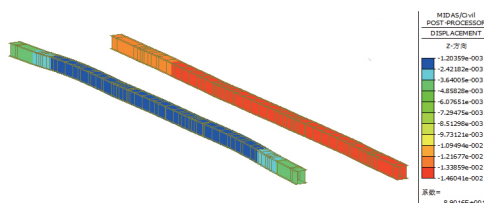


图13 前后托梁位移云图(单位:mm)

3.5 行走工况挂篮检算

挂篮行走时,后托梁锚固在梁底板的精轧螺纹钢全部拆除。挂篮在浇筑工况受力均小于容许应力,在行走工况下,挂篮受力更小,因此重点关注挂篮在此工况下的变形分析。行走工况下挂篮优化前和优化后变形如图14和图15所示。由图14可知,优化前挂篮最大变形值为 56.3 mm ;由图15可知,优化后挂篮变形值仅为 1.9 mm 。可见,优化后挂篮可显著减小挂篮变形。

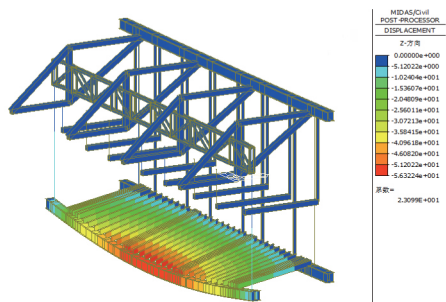


图14 优化前位移云图(单位:mm)

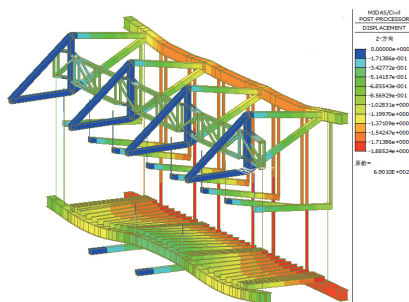


图15 优化后位移云图(单位:mm)

3.6 千斤顶型号选定与连接节点检算

浇筑1#块工况下,挂篮主构架下方支座反力最大,其值为 $F_z = 2\,034.1 \text{ kN}$, $F_x = 1\,301.3 \text{ kN}$, F_y 值为0,如图16和图17所示。为使自锁式液压千斤顶与现场匹配,未选用市场上已有的千斤顶型号,千斤顶为专业厂家订做,推力设计为 260 t ,能够承受竖向最大 203.41 t 的压力,千斤顶本体高度设计为 450 mm ,满足最小横坡为 2% 时的调坡高度,千斤顶行程设计为 400 mm ,能够满足最大横坡为 4% 时的调坡高度,外径和杆径分别为 350 mm 和 160 mm 。

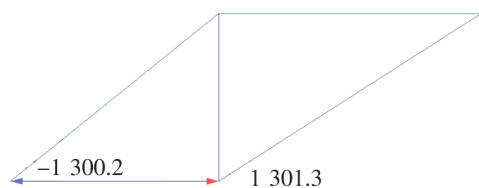


图16 竖直方向支座反力(单位:kN)

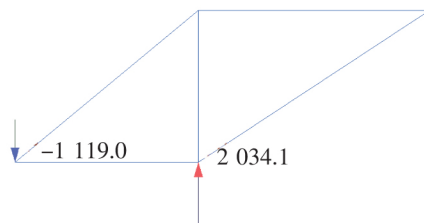


图17 水平方向支座反力(单位:kN)

现对自锁式液压顶升装置可调高度菱形架结构连接节点进行检算,该支座处 $F_x=1\,301.3\text{ kN}$, $M_x=2\text{ kN}\cdot\text{m}$,弯矩较小,计算时可忽略不计。上调支座钢板和主构架下方钢板材料为 Q235,钢板厚 $t=2.5\text{ cm}$,边长 $45\text{ cm}\times 45\text{ cm}$,抗压强度设计值取 205 MPa 。螺栓选用 10.9 级 M27 螺栓,共 8 个,其抗剪强度设计值 f_v^b 取 310 MPa ,螺栓边距和中距分别为 7.5 cm 和 10 cm ,受力简图如图 18 所示。

螺栓的承载力取决于螺栓杆受剪和孔壁承压 2 种情况。

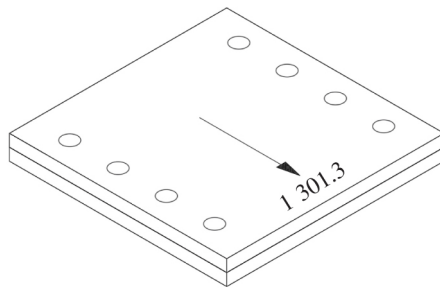


图 18 螺栓抗剪受力简图(单位:kN)

(1) 单栓抗剪承载力计算: $N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b = 1 \times \frac{\pi \times 27^2}{4} \times 310 = 177.5\text{ kN}$ 。

(2) 钢板抗压承载力计算: $N_c^b = d \sum t f_c^b = 27 \times 2 \times 25 \times 205 = 276.75\text{ kN}$ 。

取 $N_{\min}^b = \min\{N_v^b, N_c^b\} = 177.5\text{ kN}$, 单个螺栓承受剪力为 $1\,301.3 \div 8 = 162.7\text{ kN} < 177.5\text{ kN}$, 故螺栓抗剪强度符合要求。

4 结论

(1) 提出一种简易的挂篮调坡装置,该装置采用自锁式液压千斤顶调节挂篮主桁高度,操作简单,安全系数高,解决了桥面横坡较大,调坡过程繁琐的问题,可为类似工程提供参考。

(2) 在挂篮后托梁底侧增设 2 道双拼 $[32^\# \text{ b}]$ 槽钢,同时将后托梁与导梁使用倒链或螺纹杆连接,使得挂篮在行走工况下后托梁变形由 56.3 mm 减小为 1.9 mm ,远小于规范要求的 20 mm ,该方法易于实现且效果显著,可在工程实际中推广使用。

(3) 基于 Midas/Civil 软件对优化后的挂篮进行有限元分析,结果表明,挂篮各主要受力杆件及可调高度菱形架结构连接节点强度均小于材料容许应力值且结构变形较小,满足西郊大桥悬臂浇筑施工要求。

参 考 文 献

- [1] 凌明磊. 预应力混凝土连续梁悬臂施工临时固结锚固措施[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(S2): 181-184.
- [2] 周功建. 汉十高铁崔家营汉江特大桥主桥上部结构施工技术[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 1-6.
- [3] 曹支才, 任万鹏, 赵伟博. 某大桥挂篮悬臂法施工方案设计及有限元仿真研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 112-116, 134.
- [4] 赵煜, 刘勇, 孙楠楠. 挂篮底模纵梁受力简化计算方法及承重分配系数[J]. 铁道建筑, 2020, 60(5): 34-37.
- [5] 刘增武, 周建庭, 马虎, 等. 夜郎湖特大桥挂篮悬浇施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(5): 22-26.
- [6] 张洪斌, 雷赞, 马敏, 等. 三榀菱形挂篮在宽幅箱梁悬浇过程中力学特性研究[J]. 施工技术, 2017, 46(17): 37-40.
- [7] 靳会武, 周春华, 陈占明. 镇山大桥 44 m 宽桥面挂篮施工技术[J]. 公路, 2019, 64(11): 147-152.
- [8] 李长坤, 魏玲利. 大跨度宽幅连续刚构桥挂篮设计与优化[J]. 内蒙古公路与运输, 2019(6): 31-34.
- [9] 吴月星, 严仁章, 刘增武, 等. 夜郎湖大桥主拱圈悬臂浇筑施工挂篮优化分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 102-107.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3650—2020 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

(下转第 65 页)

Influence of Wheel Wear Evolution on Wheel-Rail Contact Relationship of Heavy-Haul Locomotive

Hao Kai¹, Liu Pengfei², Wang Chen¹, Liu Xiaodong¹, Wang Chenlong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to understand the evolution of heavy-haul wheel profile and the characteristics of wheel-rail matching in China, a six axles heavy-haul locomotive was run on the south Tong-Pu Line, and the wheel profile tracking test was carried out. The heavy-haul locomotive dynamics model was established in UM, and the wheel wear evolution of the line was simulated based on Kik-Piotrowsk algorithm and Archard wear model. Firstly, the accuracy of the model was verified, and the evolution of wheel profile in one rotation period was predicted, and the equivalent conicity of wheel/rail matching was analyzed. The results show that the simulation results are close to the measured ones, and the difference of average wear rate is small. The equivalent conicity curve and contact point distribution of the 1~3 wheelsets changed significantly from 0 to 20 000 km, and the equivalent conicity curve and contact point distribution were similar after 80 000~100 000 km. At the later stage of wear, the flange of the first wheelset was serious, but the equivalent taper is close to the initial value, about 0.121; the flange wear of the second wheelset was light and the equivalent conicity was low, about 0.014.

Key words: heavy-haul locomotive; vehicle-track coupled; wear prediction; wheel-rail contact relationship; equivalent conicity

(上接第 20 页)

Optimum Design of Hanging Basket for Cantilever Pouring Construction of Xijiao Bridge

Liu Wei¹, Song Xinxin¹, Wu Yuhang², Wang Bin¹, Lv Meng¹

(1. China Construction Railway Investment Road and Bridge Co. Ltd., Wuhan 460014, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and safety of the hanging basket slope adjustment, and reduce the problem of excessive deformation of the rear joist of the wide bridge during the traveling process, with the Xijiao Bridge as the engineering background, the main truss structure and the rear joist of the hanging basket were optimized. A self-locking hydraulic jacking device and measures such as adding a walking guide beam under the bottom form of the box beam and connecting the lower guide beam and the rear joist of the flange formwork were proposed. On this basis, using Midas/Civil to establish the optimized model of the hanging basket, the finite element analysis of the hanging basket from four aspects: the main truss, the front upper beam, the bottom joist, and the walking. The maximum stress and deformation under running conditions, and the self-locking hydraulic jacking device's adjustable height diamond frame structure connection nodes are checked. The results show that the improved hanging basket has fast slope adjustment and higher safety, strength and rigidity. Both the connecting nodes and the connecting nodes can meet the construction requirements, and the improvement plan of the hanging basket proposed can provide a reference for similar projects.

Key words: bridge engineering; cantilever pouring; hanging basket; optimum design