

无枕式钢弹簧浮置板道床所用铁垫板的优化

王丙苗 罗川萍 吴 岫 胡建滨

(武汉地铁运营有限公司, 430035, 武汉//第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对武汉轨道交通 2 号线部分无枕式钢弹簧浮置板道床地段单趾弹条扣件的竖向、水平调整量完全消耗, 且线路状态无法达到设计线型要求的情况, 从垫板异型改造应用方向, 探索其设计、铸造以及安装的可行性。从建立有限元实体模型入手, 开展不同阶的模态分析, 对改造后扣件核心部件的受力进行检算。经权威检测机构验证, 抗拉强度、金相组织等核心指标均合格。部分区间已经试验安装改良后的异型垫板。安装效果表明, 该异型垫板达到了预期轨道几何尺寸调整目的, 且服役状态稳定可靠。

关键词 城市轨道交通; 钢弹簧浮置板道床; 铁垫板; 模态分析; 零部件优化

中图分类号 U2135⁺32

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.11.031

Optimization of Iron Plate for Ballastless Steel Spring Floating Slab Track

WANG Bingmiao, LUO Chuanping, WU Shen, HU Jianbin

Abstract In view of the situation that the adjustment amount of single-toe spring bar fastener in part of the ballastless steel spring floating slab track in Wuhan Metro Line 2 is insufficient and the line state cannot meet the design requirements, the design, casting and installation of special-shaped cushion plate are explored. By establishing finite element solid model, modal analysis of different phases is carried out, and stress analysis for the core parts of the modified fastener is testified. Authoritative testing institutions approve that the core indexes such as tensile strength and microstructure meet standard. The improved special-shaped plates have been installed in certain interval for verification. The installation results show that the special-shaped plate serves the expected purpose of adjusting track geometry size, and the service status is stable and reliable.

Key words urban rail transit; steel spring floating slab track; iron plate; modal analysis; component optimization

Author's address Wuhan Metro Operation Co., Ltd., 430035, Wuhan, China

武汉轨道交通 2 号线(以下简称“2 号线”)部分无枕式钢弹簧浮置板道床现用的垫板已调整至极限, 导致线路状态指标无法满足设计要求。该问题会带来以下后果: ①线路不稳定, 轨距、方向(正矢)、高低等几何尺寸超限; ②列车运营时出现晃车啸叫, 乘坐舒适度较低; ③维保成本和难度增大。一般线路的道床垫板维保频率为 1 次/年, 而使用无枕式钢弹簧浮置板区段的道床垫板维保频率平均达 6 次/年。

通过多次实地考察和讨论, 现拟采用异型铸造垫板更换原垫板。通过扩大垫板长度和孔径、调整垫板厚度以完成水平竖向指标的调整, 从而保证整条线路的线型指标达到设计要求^[1]。

1 改造方案

1.1 水平调整

参照 2 号线一期工程施工图, 单趾弹条扣件原设计轨距为 $1\,435^{+14}_{-18}$ mm, 其中轨距块调整量为 +4 mm、-8 mm, 调距扣板调整量为 ± 10 mm^[1]。

通过扩大垫板长度和孔径(见图 1), 可扩大调距扣板调整量和轨距调整量。经测算, 在轨距块调整量为 +4 mm、-8 mm 不变的情况下, 调距扣板调整量可优化为 ± 20 mm, 从而使总轨距调整量达到 $1\,435^{+24}_{-28}$ mm, 进而使整个线型达到设计指标要求^[2]。

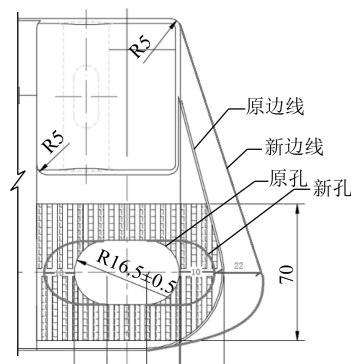


图 1 铁垫板的扩孔及增长

1.2 竖向调整

竖向调整的相关规定:单趾弹条扣件轨底不得调高;铁垫板下可以使用调高垫板调高,且调高垫板的轨面调高量不得超过 20 mm。

通过调整铁垫板厚度,可在维持铁垫板下调高垫板的调高不超过 20 mm 前提下,将竖向调整量增大 15 mm,既保证了现场轨下垫板调整片不超标,还能使线路型竖向指标满足设计要求。基于铁垫板厚度的竖向调整见图 2。

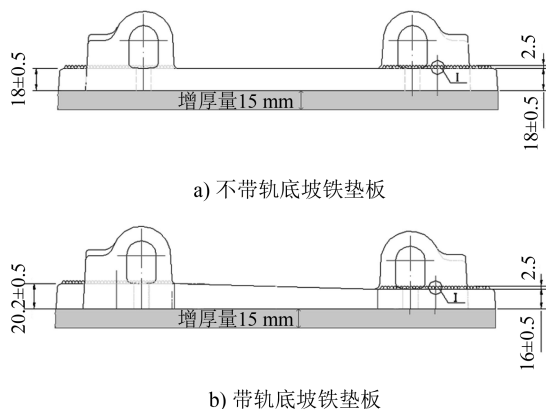


图 2 铁垫板厚度的竖向调整

2 可靠性分析

2.1 模态分析

对铁垫板 1(改造前铁垫板)、铁垫板 2(仅扩大垫板长度和孔径的改造后未加厚铁垫板)及铁垫板 3(既扩大垫板长度和孔径又加厚的改造后加厚铁垫板)建立实体模型,如图 3 所示。

采用有限元软件对比分析了改造前后 3 种铁垫板的模态^[3]。先根据改造前后铁垫板的几何尺寸,建立铁垫板的实体模型,再采用有限元软件划分网格,分析铁垫板的模态^[4]。经模态分析得到改造前后的铁垫板频率,并基于铁垫板 1 计算出改造后铁垫板的频率变化率。前 10 阶次的的数据如表 1 所示。由表 1 可见,在前 10 阶次模态分析中,改造前后铁垫板的每阶频率都基本保持一致,且改造前后频率变化率均低于 8%。其中,最小变化率为 0.28%,最大变化率为 7.58%。这说明改造前后铁垫板结构动态特性无明显变化。

2.2 结构受力分析

本改造主要为铁垫板处锚固螺栓连接孔的扩大,对于扣压钢轨的单趾弹条受力几乎不会产生影,因此不再对弹条部分进行相关检算。

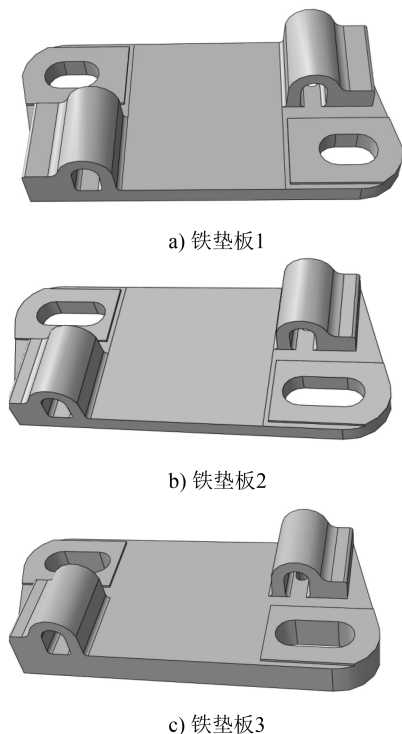


图 3 铁垫板实体模型

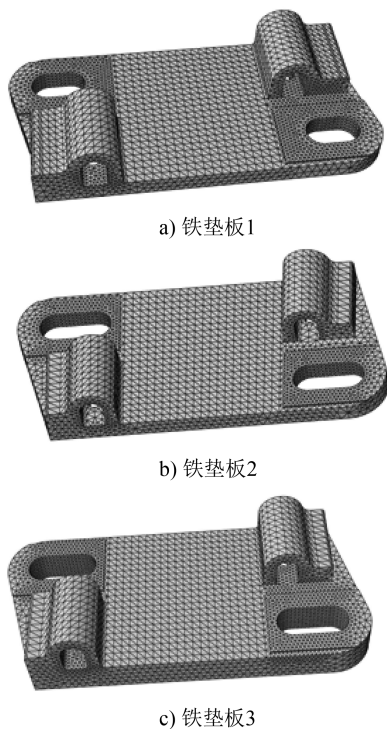


图 4 铁垫板有限元模型

2.2.1 锚固螺栓扣压力

扣件的扣压力可通过螺栓的预紧力矩控制^[5]。具体控制为:

表 1 铁垫板前 10 阶次的频率及频率变化率

阶次	铁垫板 1 的频率/ Hz	铁垫板 2 频率/ Hz	铁垫板 2 频率变化率/ %	铁垫板 3 频率/ Hz	铁垫板 3 频率变化率/ %
1	1 026.0	1 103.8	7.58	1 100.5	7.26
2	1 586.1	1 560.4	-1.62	1 521.0	-4.10
3	2 071.0	1 987.5	-4.03	1 915.4	-7.51
4	2 377.2	2 294.8	-3.47	2 207.9	-7.12
5	2 590.5	2 605.0	0.56	2 771.9	7.00
6	3 196.3	3 156.2	-1.25	3 205.1	0.28
7	4 022.8	4 111.1	2.19	4 199.9	4.40
8	4 544.8	4 635.5	2.00	4 714.3	3.73
9	5 109.8	5 210.7	1.97	5 386.8	5.42
10	5 203.9	5 367.0	3.13	5 408.3	3.93

$$Q = \frac{T}{1.25 \mu_0 d} \tag{1}$$

式中：

- Q ——螺栓抗拔力；
- T ——拧紧力矩；
- d ——螺栓的公称直径；
- μ_0 ——螺栓的扭矩系数，一般按供货商的测试报告取值，本文取 $\mu_0=0.15$ 。

由式(1)，当拧紧力矩为 200 N·m，螺栓公称直径为 30 mm 时，螺栓拧紧后， $Q=35.56$ kN。

2.2.2 扣件摩阻力

当采用橡胶垫板作为减振垫层时，螺栓扣压产生的摩擦力抵抗扣件的横向力。橡胶与铸铁的静摩擦系数为 0.80~0.90；滑动摩擦系数为 0.45~0.70，计算时，取综合摩擦系数 μ 为 0.55，则由锚固螺栓扣压提供的摩阻力^[6]为：

$$f = 2Q\mu \tag{2}$$

经计算， $f=39.12$ kN，大于扣件设计横向载荷 35 kN。正常安装条件下，扣件锚固螺栓不承受扣件横向力载荷，仅承受扣件拉力载荷。

2.2.3 最不利工况分析

最不利工况为：扣件有 2 个锚固螺栓松动，其不再提供对铁垫板的扣压力；同时，扣件处于最大调高量。

在最不利工况下，扣件受到的钢轨横向力（按设计荷载取 35 kN），会对螺栓产生弯矩作用。2 个未松动螺丝分担横向力，每个螺丝所受横向力 F_1 为 17.5 kN，螺栓的最不利受力位置位于螺栓与下部锚固套管的结合处。由扣板厚 8.0 mm、异型增厚铁垫板厚 35.2 mm、高弹垫板厚 16.0 mm、绝缘垫板厚 3.0 mm、调高垫板厚 20.0 mm 可得此时的螺栓悬臂长度 L 为 82.2 mm。

故单个螺栓承受的附加弯矩为：

$$M = F_1 L \tag{4}$$

螺栓界面所受最大正应力为：

$$\sigma = M/W \tag{5}$$

式中：

W ——螺栓的抗弯截面模量。

计算可得， $M=1\,438.5\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $\sigma=542.3\text{ MPa}$ 。锚固螺栓的强度等级为 10.9 级，螺栓的屈服极限为 900 MPa，经计算可知，安全系数为 2.11，故螺栓在最不利工况下还是安全的。

需要注意的是，通过控制扭矩来控制螺栓抗拔力时，由于润滑情况等现场条件差异，螺栓所受拉力的最大计算误差可达 25%。

2.2.4 调距扣板受力分析

扣板沿线路横断面方向的长度调整了 15 mm。这使扣板受力结构的剪切面积 A 降为 572 mm²。计算时，扣件所受横向力取 35 kN，其 2 个扣板受力相同，均为 $F_2=17.5$ kN，则每块扣板剪切面所受剪切应力为：

$$\tau = F_2/A \tag{6}$$

计算可得， $\tau=30.59\text{ MPa}$ 。对于 45#钢材质的锚固螺栓，螺栓的屈服极限为 310 MPa，经计算可知安全系数为 10.13。可见，改造后的扣板强度安全系数仍较大，可满足使用要求。

3 试样测试和现场安装效果

按铁垫板 3 的试样铸造异型垫板，并送检国家铁路产品质量监督检测中心进行检测。检测内容包括抗拉强度、断后伸长率、布氏硬度、表观质量及金相组织等，检测结果均符合标准指标（见表 2）。

表 2 铁垫板检测结果

检测项目	样品编号	标准值	检验值	判定
抗拉强度/MPa	W1002-1 [#]	≥500	535.0	合格
	W1002-2 [#]	≥500	530.5	
	W1002-3 [#]	≥500	529.5	
伸长率/%	W1002-1 [#]	≥10	12	合格
	W1002-2 [#]	≥10	11	
	W1002-3 [#]	≥10	12	
布氏硬度/ (N/mm ²)	W1002-1 [#]	170~230	205	合格
	W1002-2 [#]	170~230	198	
	W1002-3 [#]	170~230	105	
外观质量	试验结束后被检试件无损坏及严重变形		无损坏及严重变形	合格
金相组织、石墨形态及石墨大小等级	VI 型 6 级		VI 型 6 级	合格

选取 2 号线下行区间 DK19+746—DK20+261 区段的 515 m 无枕式钢弹簧道床实施了异型垫板的试验性安装。该段线路为曲线段,曲线半径为 300 m。

3.1 水平优化成效

现场最大超限轨距实测值为 1 443 mm,处于经常保养临界状态。该点位的原铁垫板已向线路中心线方向移动至极限(长圆孔与尼龙套管的外端部重合),且钢轨非作用边侧轨距块已安装了 16 mm 厚的最大规格轨距块。经综合评定,原铁垫板长圆孔及轨距块的调整量已全部消耗。

现场安装异型垫板后,将扣件恢复至原工况。维持几何尺寸不变、钢轨非作用边侧轨距块仍使用 16 mm 厚的轨距块。通过测量可以得出:尼龙套管位置由长圆孔端部改善至长圆孔中部,尼龙套管外边缘至长圆孔外端部约 10 mm(见图 5)。



图 5 安装异型铁垫板后的水平调整余量显示

由现场情况可知,采用异型垫板后,轨距调整量可以调整至标准的 1 435 mm^[2]。为保持前后轨距顺坡率,该曲线段的轨距全部维持为 1 437 mm。

3.2 竖向优化成效

原铁垫板底部最大塞入调高垫板量为 30 mm,超出设计要求调高垫板厚度 10 mm。

安装异型垫板后,撤除了 20 mm 厚调高垫板。经现场实测,水平及高低指标无变化。

4 结语

采用了优化设计的异型垫板,使现场最大轨距

偏差由 +8 mm 调整至 +2 mm,将最大圆曲线正矢由 5 mm 偏差调整至零误差。经现场检验,水平及高低数据良好无变化,满足综合维修标准,达到轨道线路几何尺寸精细化调整的预期目标。

可见,通过对铁垫板的改造和优化设计,能对铁垫板起到加固和增加调量作用,并且其对锚固螺栓等配套联接零件无特殊要求,可沿用既有配置。

参考文献

- [1] 于春华. 铁路钢轨扣件发展综述[J]. 铁道标准设计, 2006(增刊 1): 188.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 朱胜阳, 蔡成标, 尹镭, 等. 高速铁路扣件弹条动力学分析[J]. 工程力学, 2013(6): 254.
- [4] 肖飞, 王平, 陈小平. 单趾弹簧扣件的弹簧强度分析[J]. 铁道建筑, 2010(4): 81.
- [5] 齐少轩, 刘学毅. 地铁弹条 II 型分开式扣件力学特性研究[J]. 铁道标准设计, 2014(9): 40.
- [6] 计欣华. 工程实验力学[M]. 机械工业出版社, 2009.
- [7] 尚红霞, 温泽峰, 吴磊, 等. 地铁扣件 III 型弹条失效有限元分析[J]. 工程力学, 2015(9): 210.
- [8] 尚红霞, 陶功权, 沈火明, 等. 钢轨横移和轨下胶垫刚度对扣件弹条应力的影响[J]. 润滑与密封, 2014(10): 59.
- [9] VALIKHANI M, DAVOOD Y. Application of an optimal wavelet transformation for rail-fastening system identification in different preloads[J]. Measurement, 2016, 82: 161.
- [10] LING L, LI W, SHANG H X, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings [J]. Vehicle System Dynamics, 2014(9): 1211.
- [11] WU Z, NING X J, ZHAO P R. Analysis of fretting wear of type II fastener elastic bar[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(178): 1469.

(收稿日期: 2019-01-22)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umat1998.com