

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.04.017

温州市域铁路 S1 线减振扣件 设计及应用

曾 飞¹, 王彦飞¹, 仵 飞², 李 强¹, 张用兵¹, 张明兰¹, 徐 宁¹

(1. 洛阳双瑞橡塑科技有限公司, 洛阳 471003;

2. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司建设分公司, 温州 325014)

摘 要: 随着城市规模的不断扩大, 市域铁路作为带动区域发展的交通模式引起人们的广泛关注。相对于国外成熟的市域铁路技术和减振措施, 国内相应研究工作尚属空白。根据温州市域铁路 S1 线技术要求, 借鉴成熟的双层非线性结构, 通过关键参数的优化分析, 确定扣件刚度参数。现场在线测试结果表明, 研制的市域铁路用双层非线性减振扣件安全性能优异, 减振效果达到 4.9~5.2 dB, 可以满足市域线路的技术要求。

关键词: 市域铁路; 减振扣件; 刚度; 双层非线性扣件

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)04-0104-05

Design and Application of Damping Fasteners for Line S1 of Wenzhou Regional Railway

ZENG Fei¹, WANG Yanfei¹, WU Fei², LI Qiang¹, ZHANG Yongbing¹, ZHANG Minglan¹, XU Ning¹

(1. Luoyang Sunrui Rubber & Plastic Science and Technology Co., Ltd., Luoyang 471003;

2. Construction Branch, Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 325014)

Abstract: With the continuous expansion of urban scale, the regional railway has attracted widespread attention as a mode of transportation that promotes regional development. Compared with the more developed regional railway technology and vibration damping measures of other countries, corresponding domestic research work is still relatively sparse. According to the technical requirements of the Line S1 of Wenzhou's regional railway and the fully developed double-layer non-linear structure, the stiffness parameters of fasteners are determined via the optimization of key parameters. The on-line test results show that the safety performance of the double-layer non-linear damping fasteners developed for municipal railways is excellent; the effect of vibration reduction reaches 4.9–5.2 dB, meeting the technical requirements of municipal railways.

Keywords: regional railway; vibration damping fasteners; stiffness; double-layer non-linear fasteners

随着城市规模的不断扩大, 城郊之间的经济活动与社会活动日益紧密, 现有地铁、轻轨等城市轨道交通制式受到运行速度等方面的制约, 已无法达到城市建设中居民更快、更好的出行期望目标。而市域铁路可以更好地为城市建设和居民出行提供服务, 成为

今后轨道交通线网建设的新趋势。

在市域铁路扣件技术发展历程中^[1-2], 国外市域铁路起步早, 技术成熟, 有东京、巴黎、伦敦、纽约、莫斯科等市域铁路线路。其减振措施主要有潘德路 VIPA 分离式扣件、科隆蛋扣件、洛德扣件等扣件类及弹性套靴(LVT)、轨枕垫轨等枕类, 如潘德路公司的双层非线性减振扣件已在英国、美国、巴西、澳大利亚等 20 余个国家和地区上线使用, 福斯罗市域铁路扣件系统在德国也有小范围的应用。在国内, 相应的减振措施尚属空白。

收稿日期: 2019-04-08 修回日期: 2019-04-22

第一作者: 曾飞, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通减振产品和高分子材料制品的研制开发, zfhgg@163.com

通信作者: 徐宁, 男, 硕士, 主要从事轨道交通减振产品研制开发工作, xuning4243@163.com

在城轨交通中，弹性套靴和轨枕垫在使用过程中逐渐暴露了缺点而被淘汰。因此，以减振扣件为市域铁路减振措施的最佳切入点。首先根据《市域铁路设计规范》总结市域铁路减振扣件设计原则，其次借鉴城轨领域成熟的双层非线性减振扣件确定产品基本结构，再次多渠道确定扣件关键参数-刚度，最后通过实验室测试和线路在线测试验证分析产品的安全性和减振性能。

1 市域铁路减振扣件设计思路

相对于城市轨道交通和城际铁路，市域铁路有共同点但又有其独特性。综合比较 3 种交通方式的设计规范^[3-6]，结合市域铁路技术特性，减振扣件设计思路如下。

1.1 轨道动态特性

轨道动态特性主要包括列车运行特征频率和轨道动态几何变形两方面。

1) 列车运行特征频率。在轨道交通中，车辆高速行驶会引起车辆和轨道系统较大的动态响应，特别是在一些特征频率附近时，车体垂向、横向加速度，轮轨力，以及轨道系统振动噪声等因共振而明显增大，对轨道车辆的安全运行产生恶劣影响。因此，针对市域铁路减振扣件的设计，应使轨道共振频率避开列车运行特征频率，确保车体垂向、横向加速度及轮轨力控制在合理范围。

2) 轨道动态几何变形。钢轨变形对轨道结构有重要影响，不但在轨道静态铺设时精度要求较严格，而且在运营过程中也应保持严格的轨道变形状态。对于市域铁路而言，车速越高，其动载越大，进而加剧轨道动态几何变形。规范中关于轨道几何变形还规定减振地段与普通地段的过渡段范围的轨道刚度应按分级过渡设计，过渡段长度不宜小于一节车辆长度。

根据相关理论可知，避开列车运行特征频率的有效措施为调整扣件刚度，而动态几何变形也与刚度密切相关，同时对于减振扣件来说，刚度越低其减振性能越好，但过低的刚度又导致安全隐患，因此市域铁路减振扣件设计的关键步骤为刚度设计。

1.2 线路维护简洁及适应性

1) 安装维护简单高效。市域铁路运营时间长，列车运行间隔短，只能在夜间停运后的较短时间内进行轨道维修，且站间距相对较大，因此所设计的扣件结

构，应尽量使施工和维修工作量少且方便高效。

2) 线路适应性强。市域铁路的曲线轨距加宽值是按车辆车型自由内接条件计算的，其与地铁轨距加宽不同。市域铁路中，当采用窄体车时，正线曲线半径一般大于 250 m 无需轨距加宽；当采用宽体车时，正线曲线半径一般大于 300 m 无需轨距加宽。站线、段管线小曲线半径需进行轨距加宽和轨距加宽递减。

同时，为克服由于基础工程施工误差、桥梁徐变上拱、桥墩和路基的不均匀沉降等原因造成的轨道不平顺，要求扣件系统必须具备较大的调整钢轨高低和左右位置的能力。特别是无碴轨道，轨道的调整能力几乎完全由扣件来实现，因此扣件的调高和调距能力非常关键，增强扣件具有较高的线路适应性。

2 市域铁路减振扣件设计路径

2.1 结构设计

双层非线性减振扣件已经在城市轨道交通中得到广泛应用，市域铁路减振扣件可以借鉴其基本结构形式，该产品主要有以下特点：

1) 自锁分开式结构(见图 1)。结构之间不用螺栓锚固，也不用硫化粘接，即可有效传递纵、横向力和翻转力矩；同时在更换失效的中间橡胶垫时更加便捷高效，且不影响铁垫板的继续使用。该结构大大降低了维护费用和维修时间，可满足扣件安装维护简单高效的需求。



图 1 自锁分开式结构

Fig. 1 Self-locking split structure

2) 非线性弹性垫板结构。结构受压后，柱钉截面积增加，高度降低，垂向刚度非线性增加，表现为低荷载低刚度，高荷载高刚度(见图 2)；该非线性结构充分利用了橡胶的弹性，可以最大限度地获得低动态刚度，且不受螺栓紧固力的影响，不但满足市域铁路轨道的几何变形要求，而且也确保了市域铁路运行的安全性，同时具有良好的减振降噪效果。

3) 可调预紧力结构。上下铁垫板间预置预紧力,控制钢轨动态上移,满足线路安全要求,特别是弯道及过渡段区间的安全要求(见图3)。

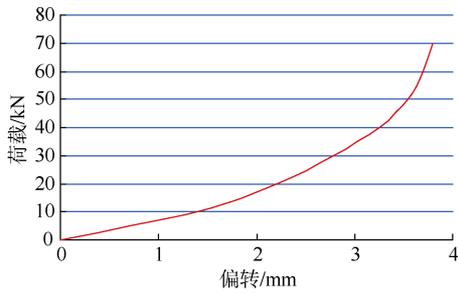


图2 非线性曲线
Fig. 2 Non-linear curve

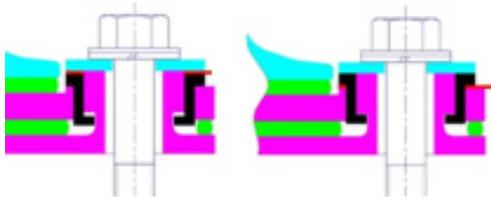


图3 可调预紧力结构
Fig. 3 Adjustable preload structure

4) 线路适应性结构:通过设计定位调距块,可对扣件系统进行最大 ± 10 mm的轨距调整量;通过在扣件下加入调高垫板,可实现达40 mm的调高量。

2.2 刚度设计

扣件刚度决定轨道的安全性能和减振性能,为合理确定扣件节点刚度,首先模拟实际钢轨在轮轨力载荷下的变形情况,采用有限元软件,建立120 m长的钢轨实体模型;然后采用梁单元模拟,将扣件简化为接地弹簧,通过调整扣件的刚度区间控制钢轨下沉量;最后通过计算确定扣件的合理范围。模型相关参数见表1,计算模型见图4。

表1 轨道有限元计算参数

Tab. 1 Track finite calculation parameter

项目	数值	项目	数值
钢轨密度/(kg/m)	60.64	扣件支撑间距/m	0.6
钢轨水平惯性矩/cm ⁴	3 217	钢轨损耗因子	0.01
钢轨垂直惯性矩/cm ⁴	524	扣件损耗因子	0.1

根据温州市域铁路S1线的技术要求,其减振扣件安装后应保证钢轨垂向位移小于或等于1.5 mm,选择不同的扣件刚度,计算对应刚度下的钢轨位移。计算可知扣件的静刚度应大于等于17 kN/mm。

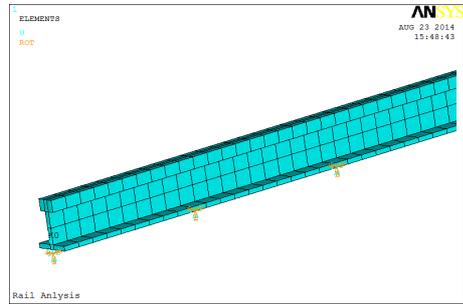


图4 钢轨有限元模型
Fig. 4 Track finite element model diagram

列车运行时导致轨道系统产生相应的特征频率,因此受载轨道的固有频率应避开其特征频率。选取市域铁路120~140 km/h的车速范围进行计算,可知受载轨道的固有频率范围应为18.6~44.4 Hz,或者77.8 Hz以上,对应的扣件刚度范围为2~25 kN/mm,或者120 kN/mm以上。

研究表明,以静刚度40 kN/mm的普通扣件为参考对象,市域铁路减振扣件取静刚度小于23 kN/mm,即可达到大于3 dB的减振量。

因此综合以上计算,为保证轨道的安全性能,扣件的刚度范围应在17~23 kN/mm内,取典型刚度20 kN/mm。

3 测试分析

3.1 实验室测试

根据以上设计原则和实施思路,在市域铁路减振产品中随机抽样,分别通过MTS试验机、落锤试验机、盐雾试验等设备进行测试分析,测试结果如表2所示^[7-8]。

表2 实验室测试结果

Tab. 2 Laboratory test results

项目	测量值	参数	
减振效果/dB	5.88	>3	
动静比	1.44	<1.5	
动态垂向位移/mm	1.46	≤1.50	
纵向阻力/kN	12	≥9	
300万次疲劳	轨距扩张/mm	4	<6
	扣压力变化/%	5.3	<20
	静刚度变化/%	9.5	<20
	纵向阻力变化/%	7.9	<20
绝缘电阻/(Ω·km)	12.96	3	
300 h盐雾试验	手工能顺利拆卸,无腐蚀生锈		

注:扣件减振效果相对于WJ-7B扣件系统的落锤测试结果。

表 2 中实验室内测试结果表明, 该扣件达到市域铁路设计要求^[5]。

3.2 线路应用测试

温州市域铁路 S1 线一期全长 34.77 km, 主要为地面高架线路, 如图 5 所示, 列车采用 4 节编组 D 型列车, 线路设计运营最高速度为 140 km/h。



图 5 温州市域铁路 S1 线路

Fig. 5 Wenzhou regional railway Line S1

为综合评价市域铁路用双层非线性减振扣件的实际效果, 对其进行在线测试^[9], 测点及测试项目等内容分别如表 3、表 4 所示, 测试示意分别如图 6、图 7 所示。

表 3 测点工况

Tab. 3 Working conditions at measuring points

工况	测点里程	类型	曲线半径
直线工况	DK1+800	普通扣件	直线
	DK4+670	减振扣件	直线
曲线工况	DK8+250	普通扣件	曲线(R700)
	DK12+805	减振扣件	曲线(R700)

表 4 测试项目

Tab. 4 Test items

项目	内容
安全性能	外轨垂向、外轨横向、内轨垂向、内轨横向
减振性能	高架桥梁基础垂向振动

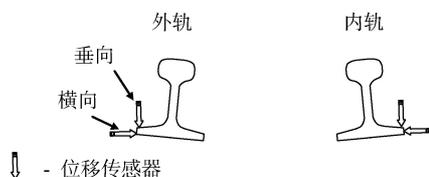


图 6 安全性能测试示意

Fig. 6 Security performance test diagram

3.3 测试结果

3.3.1 安全性能

分析测试数据可得, 在 4 种工况条件下列车通过测

点处速度如表 5 所示, 各测点钢轨变形数据如表 6 所示。

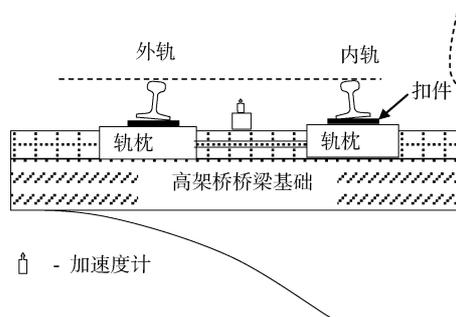


图 7 振动测试示意

Fig. 7 Vibration test schematic

表 5 列车运营速度

Tab. 5 Train operation speed km/h

	直线工况		曲线工况	
	普通扣件	减振扣件	普通扣件	减振扣件
车速	99.3	107.9	104.3	105.6

表 6 钢轨变形量

Tab. 6 Rail deformation mm

工况	类型	外轨		内轨	
		垂向	横向	垂向	横向
直线工况	普通扣件	0.45	0.2	0.5	0.3
	减振扣件	0.8	0.1	0.9	0.2
曲线工况	普通扣件	0.7	0.5	0.6	0.9
	减振扣件	0.8	1.0	1.6	0.7

注: 垂向正值向下, 横向正值向轨外变形。

由表 5 可知, 各测点处列车运行速度相差不大, 各工况条件下的数据之间可直接进行对比分析。

由表 6 可知, 采用双层非线性减振扣件, 在直线工况下, 钢轨垂向动态位移增大, 横向动态位移减小, 其中减振扣件垂向变形为 0.9 mm, 小于设计的垂向限制值 1.5 mm, 综合地铁测试数据横向对比, 这是因为直线段平顺度较好, 垂向变形量一般都远小于垂向限制值, 但远大于普通扣件; 在曲线工况下, 钢轨垂向动态位移增大, 内轨横向动态位移减小, 外轨横向位移增大, 曲线段内轨变形量变大, 主要是因为运营时速小于设计时速, 为平衡列车在曲线条件下的力学状况, 在标准超高设计情况下, 内轨受载增加, 且本次为试运营阶段的测试, 各轨道结构未紧密配合, 垂向变形增大^[10-11]。以上变形量均符合市域铁路设计要求。

3.3.2 减振性能

对列车在 8: 00—10: 00、12: 00—14: 00 和

18:00—20:00 这3个时段的数据进行分析,平均后可得各测点桥梁基础的垂向加速度振动级,如表7所示。

表7 加速度振动级
Tab.7 Acceleration vibration level dB

参数	直线工况		曲线工况	
	普通扣件	减振扣件	普通扣件	减振扣件
垂向振级	92.5	87.6	93.6	88.4
减振量	4.9		5.2	

由表7计算可知,在直线和曲线工况下,双层非线性减振扣件减振量分别为4.9 dB和5.2 dB,符合市域铁路设计要求^[5]。

4 结论

1) 分析市域铁路与城轨、城际交通之间的区别,结合市域铁路发展现状,提出以减振扣件为措施,以安全性和可靠性为主的设计原则。

2) 市域铁路减振扣件结构上借鉴成熟双层非线性结构,刚度上兼顾力学、轮轨特征频率、减振和安全等性能指标要求,确定扣件刚度为20 kN/mm。

3) 通过实验室和试运营阶段的线路在线测试结果表明,在直线和曲线工况下,市域铁路双层非线性扣件减振量分别为4.9 dB和5.2 dB,最大垂向变形分别为0.9 mm和1.6 mm,其中直线段平顺度较好,垂向变形量一般都远小于垂向限制值,但远大于普通扣件,满足市域铁路的安全和减振等方面的技术要求。

参考文献

- [1] 梁青槐,柴树山.市域快轨功能定位及规划要点[J].都市轨道交通,2018,31(4):1-5.
LIANG Qinghui, CHAI Shushan. Functional positioning and planning points of regional rapid rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(4): 1-5.
- [2] 薛新功,饶雪平.市域轨道交通关键问题探讨[J].城市轨道交通研究,2018,21(4):1-4.
XUE Xingong, RAO Xueping. Discussion on the key issues of regional rail transit[J]. Urban mass transit, 2018, 21(4): 1-4.
- [3] 孙海富.《市域铁路设计规范》主要技术标准[J].铁道工程学报,2018,35(10):93-98.
SUN Haifu. The main technical standards of code for design of regional railway[J]. Journal of railway engineering society, 2018, 35(10): 93-98.
- [4] 市域铁路设计规范:TCRSC0101—2016[S].中国铁道出版社,2017.
Code for design of regional railway: TCRSC0101—2016[S]. China Railway Publishing House, 2017.
- [5] 周诗广.我国市域铁路技术标准研制特点[J].中国铁路,2017(7):17-21.
ZHOU Shiguang. Characteristics of study and research of suburban railway technical standards of China[J]. China railway, 2017(7): 17-21.
- [6] 杜运国.温州市域铁路交通系统关键技术分析[J].铁道标准设计,2015,59(12):27-30.
DU Yunguo. Analysis of key technologies of wenzhou regional rail transit system[J]. Railway standard design, 2015, 59(12): 27-30.
- [7] 高速铁路扣件系统试验方法:TB/T 3396—2015[S].中国铁道出版社,2015.
Test methods for fastening systems of high-speed railway: TB/T 3396—2015[S]. China Railway Publishing House, 2015.
- [8] 徐宁.钢轨扣件动静刚度测试不确定度计算分析[J].材料开发与应用,2017,32(5):86-89.
XU Ning. Calculation and of the uncertainty of the static and dynamic stiffness test of rail fastening[J]. Development and application of materials, 2017, 32(5): 86-89.
- [9] 罗伟,娄会彬.市域铁路轨道减振方案研究[J].中国铁路,2018(8):53-58.
LUO Wei, LOU Huibin. Plan for track vibration reduction in suburban railway[J]. China railway, 2018(8): 53-58.
- [10] 李俊哲.市域快速轨道交通曲线超高研究[J].铁道建筑,2018,58(8):110-113.
LI Junzhe. Study on curve superelevation of urban rail rapid transit[J]. Railway engineering, 2018, 58(8): 110-113.
- [11] 汪奎.基于动力学分析的市域轨道交通曲线参数标准研究[D].成都:西南交通大学,2013:38-50.
WANG Kui. Study on the curve parameter standart of urban rail traffic based on dynamics analusis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013: 38-50.

(编辑:郝京红)