

有轨电车槽型轨的型面选择方法

强 锋 韩俊臣 杨 爽

(中车长春轨道客车股份有限公司,130062,长春//第一作者,工程师)

摘 要 阐述了有轨电车线路采用槽型轨道的原因。通过与 T 型轨嵌入混凝土道床形成的槽型轨道对比,介绍了整体式槽型轨的优点。通过对 60R2、59R2、55G1 和 55G2 典型槽型轨轨道的承载能力、轨头形状、轮缘槽宽、轮缘槽深、采购成本的综合分析,阐述了合理选择槽型轨型面的方法。通过引用 2013 年国际公共运输联盟发布的《轻轨车辆轮轨关系及车轮磨损研究》的数据,介绍了国际主流槽型轨应用情况,并结合国情,对槽型轨线路与干线铁路共轨问题进行了探讨。提出了选择有轨电车系统钢轨型面的合理建议。

关键词 有轨电车;槽型轨;型面选择

中图分类号 U213.2*1;U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.020

Selection of Groove Rail Profiles for Tram System

QIANG Feng, HAN Junchen, YANG Shuang

Abstract Reasons of selecting the groove rail for tram system are explained. After a comparison with the T-type rail embedded concrete ballast bed, the advantages of the integral groove rail are introduced. Through comprehensive analysis of the classic groove rails, such as 60R2, 59R2, 55G1 and 55G2, their bearing capacity, rail profile, groove width, groove depth and purchasing cost, some reasonable selection methods of the groove rail profile are proposed. At the same time, according to the mainstream groove rail applications in the world quoted from the database of "Comparative study on wheel/rail interface and wheel wear in light rail 2013" published by UITP, and in line with the national conditions of China, the connection probability between grooved rail line and the main railway line is discussed, rational suggestions for the selection of groove rail profile are proposed.

Key words tram; groove rail; rail profile selection

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd. 130062, Changchun, China

1 选择槽型轨的原因

为了提高路面利用率,有轨电车交通系统通常

采用与公路交通工具共享路权的工程设计。为了解决钢轨与路面平交问题,同时从绿化和美观方面考虑,嵌入地面式轨道线路在有轨电车交通系统中得到了广泛的应用。嵌入式轨道线路主要分为两种:一种是将 T 型轨埋入整体无砟混凝土道床,轮缘槽由混凝土道床和 T 形轨的侧面形成(见图 1);另一种是采用整体式槽型轨(见图 2)。

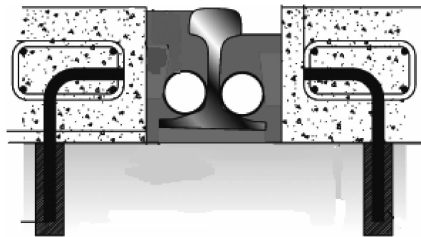


图 1 T 型轨嵌入式轨道

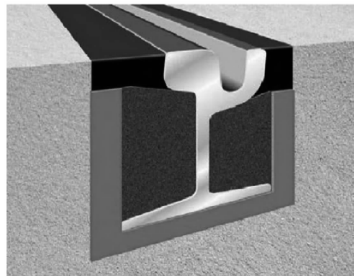


图 2 整体式槽型轨嵌入式轨道

混凝土道床形成的轮缘槽不但成本高,而且在长期承受道路交通工具碾压后,轮缘槽结构极易遭到破坏,槽宽精度无法保证,所以,整体式槽型钢轨更受使用者的青睐。整体式槽型钢轨将轨头与护轮轨集成一体,其优点如下:①在车辆通过曲线时,集成的护轮轨起到了防脱限的作用;②与混凝土道床形成的轮缘槽宽相比,整体式槽型轨尺寸精度高,可实现更窄的轮缘槽宽,最大程度降低了轨道凹槽对路面平顺度的影响;③更易填充完全包裹钢轨的减振、绝缘材料,保障钢轨良好的减振、接地能力。

2 槽型轨的型面选择方法

槽型轨种类繁多,在欧美很多国家有着悠久的历史。虽然近些年国内开始大量建设有轨电车槽型轨线路,但依旧困扰于如何正确选择钢轨型面。

通过系统分析,影响槽型轨型面选择的因素很多。这主要包括钢轨的承载能力、轨头形状、轮缘槽宽、槽深、采购成本等。下面通过对比 EN14811^[1] 标准中 60R2 (旧牌号为 Ri60N)、59R2 (旧牌号为 Ri59N)、55G2 (旧牌号为 41GP)、55G1 (旧牌号为 35GP)4 种应用较为广泛的槽型轨,来介绍合理选择槽型轨型面的方法。

2.1 轨道承载能力

抗弯截面系数主要反映钢轨的承载能力。在载荷相同的前提下,抗弯截面系数越大,钢轨所受应力越小,钢轨承载能力越强。

从表 1 可以看出,除 60R2 绕轨道走向轴线的抗弯截面系数 W_{zh} 和 W_{zf} 未知外,60R2 和 59R2 绕其他各轴线的抗弯截面系数基本相当。虽然 60R2 与 59R2 仅槽宽不同,但其他型面尺寸均相同,所以两种轨道绕轨道走向轴线的抗弯截面系数 W_{zh} 和 W_{zf} 应该差异不大。55G1 和 55G2 绕各轴的抗弯截面系数也存在同样的规律。

从绕水平轴抗弯截面系数 W_{xh} 和 W_{xf} 数值看,60R2 和 59R2 的竖直方向承载能力要强于 55G1 和 55G2 钢轨,横向承载能力稍弱。

表 1 不同型面槽型轨抗弯截面系数 cm³						
槽型轨型号	W_{xf}	W_{xh}	W_{yh}	W_{ygh}	W_{zf}	W_{zh}
60R2	353.3	380.6	95.1	110.5		
59R2	363.7	350.7	91.9	103.9	14.1	14.6
55G1	260.5	285	87.5	107.1	15.8	17.3
55G2	260.3	287	93.8	118.3		

注: W_{xf} ——轨脚绕水平轴的抗弯截面系数; W_{xh} ——轨头绕水平轴的抗弯截面系数; W_{yh} ——轨头侧让竖直轴的抗弯截面系数; W_{ygh} ——护轮轨侧绕竖直轴的抗弯截面系数; W_{zf} ——轨脚绕轨道走向轴线的抗弯截面系数; W_{zh} ——轨头绕轨道走向轴线的抗弯截面系数

在参考文献[2]中,首先建立了有轨电车和不同轨道(包括不同扣件、轨枕、钢轨、道床)的数学模型,然后对比分析了车辆通过小曲线和直线线路时的钢轨的应力情况,其结果与上述对各种钢轨承载能力的定性分析结论相吻合。

根据这 4 种钢轨在国际上的应用情况及参考文献[2]的分析结果,这些钢轨的综合承载能力均满

足有轨电车的使用要求,轨道承载能力对于槽型轨型面的选择影响不大。

2.2 轨头形状

从轨头圆角方面看,当车辆通过小曲线时,圆角半径越大,轨头圆角与轮缘根部接触面积越大,则轮轨接触应力相对降低,减缓了轮缘根部和轨头圆角的磨耗速度,提高了车轮和钢轨的使用寿命。

60R2 和 59R2 轨角为 R13,55G1 和 55G2 轨角为 R10。4 种钢轨相比,应优先选用 60R2 和 59R2 槽型轨。

从轨头中部圆弧方面看,无论圆弧的半径大小还是圆弧的数量,均可根据其轮廓曲线重新设计出匹配轨头形状的车轮踏面。所以,这 4 种钢轨的轨头中部圆弧无利弊而言。

值得说明的是,59R2 和 60R2 将轨底坡设在轨顶,极大地方便了轨道的铺设和调整,降低了线路施工成本。

2.3 轮缘槽宽

对于槽型轨型面选型而言,车轮踏面可根据不同钢轨轨头形状进行合理设计,但轮缘及轮背内侧距尺寸设计的合理性往往受制于轨距和钢轨的轮缘槽宽。

在选择钢轨的轮缘槽宽尺寸时,一方面需要轮缘槽尽可能窄,以降低轨道凹槽对路面平顺度的影响;另一方面,又需要轮缘槽足够宽,以避免因钢轨轮缘槽窄而导致轮缘被挤压,进而出现轮轨异常磨耗和钢轨维护成本增加的情况。下面以表 2 中的轮

表 2 某有轨电车轮轨参数表	
参数	数值
轨距 S_t /mm	1 435
新造轨距公差 S_{t_n} /mm	± 2
磨耗轨距公差 S_{t_w} /mm	(-4, +4)
轨道弹性导致轨距扩张量 ΔS_t /mm	2
轮背内侧距 k_w /mm	1 380
空车轮背内侧距公差 k_{w_1} /mm	± 1
轮缘背部斜度 β_w	1/6
轮轨接触点距轨顶距离 A_t /mm	14
新造轮缘厚度 d_w /mm	21.3
轮缘端面最大磨耗量 d_{w_e} /mm	5
轮缘背部最大磨耗量 d_{w_b} /mm	1
59R2/60R2 槽型轨轮缘槽宽 H_t /mm	42/36
槽型轨轮缘槽宽度公差 H_{t_1} /mm	± 1
弹性车轮轴向最大变形 C_w /mm	2
空重车轮背内侧距变化量 Δk_w /mm	2
车轮直径 ϕ_w /mm	580
轴距 b_w	1 800

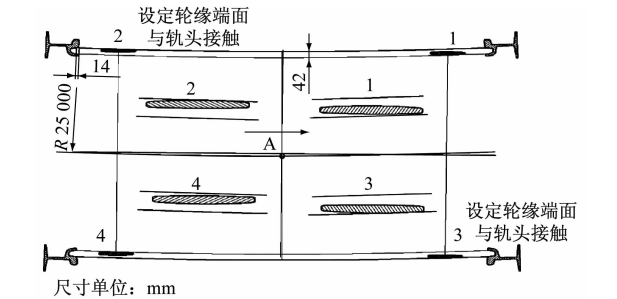


图 6 转向架通过 59R2 槽型轨曲线半径为 25 m 时的情况
允许车轮轮缘顶部与轮缘槽底部接触,但这样会影响车辆的制动能力,还是要尽量避免轮缘顶与轮缘槽底部接触。

上述 4 种钢轨的轮缘槽深基本相同,约 46 mm。所以,从轮缘槽深角度看,这 4 种钢轨并无差异。

2.5 采购成本

工艺水平相当的前提下,通常钢轨的成本与其质量有关。根据表 4,可知钢轨成本从高至低依次为:60R2、59R2、55G2、55G1。但根据目前的市场情况,这几种钢轨质量的差距不足以影响到钢轨型面的选择。

表 4 不同型面钢轨单位质量	
槽型轨型号	单位质量/(kg/m)
60R2	60.59
59R2	58.20
55G1	54.77
55G2	55.37

3 主流槽型轨的应用

槽型轨在欧洲和美国的应用较早,因欧洲有轨电车线路早期大量采用了 S49 型 T 型轨、美国有轨电车线路采用了 115RE 型 T 型轨,为了实现与 S49、115RE 轨头型面匹配,以保证车辆的运行品质不发生改变,钢轨嵌入地面式有轨电车线路主要选择了 59R2 和 60R2 槽型轨。这两种钢轨型面除轮缘槽宽外,轨头形状完全相同。

根据国际公共运输联盟(UITP)2013 年公布的《轻轨车辆轮轨关系及车轮磨耗研究》^[6]资料显示,轮缘槽宽为 42 mm 的 59R2 槽型轨应用较多,槽宽(36 mm)较窄的 60R2 相对于 59R2 槽型轨而言应用较少,具体见表 5。

目前,我国槽型轨线路最长且车辆运营里程最长的沈阳浑南低地板有轨电车系统,线路正线全部采用了 59R2 槽型轨,现已运营了 4 年,轮轨间从未出现过异常磨耗。

表 5 2013 年 UITP 有轨电车系统轮轨参数统计表				
国家	城市	有轨电车	钢轨型面	
西班牙	特内里费岛	阿尔斯通 Citadis	35GP13	
伊朗	马莎德	长客股份 CNR	59R2/49E1	
比利时	奥斯坦德	庞巴迪 6000 型	EB50T/NP4as	
法国	尼斯	阿尔斯通 Citadis	35GPU	
法国	米卢斯	阿尔斯通 Citadis	41GPI	
美国	犹他州	西门子 SD 70/ SD100	115 (Vignole)	
法国	格勒诺布尔	阿尔斯通 Citadis/TFS	35GP/41GP	
法国	兰斯	阿尔斯通 Citadis	41GPU/U50	
西班牙	巴塞罗那	阿尔斯通 Citadis302	Ri55N	
德国	杜塞尔多夫	西门子 Combino	59R2/49E1	
德国	科隆	庞巴迪 Flexity-Swift	59R2	
土耳其	伊斯坦布尔	ABB/Rotem/ Bombardier/ Siemens	Ri59/S49	
德国	柏林	Tatra/GT/Flexity	59R2/49E1	
德国	斯图加特	DT8 (Siemens/Stadler)	60R2/49E1	
西班牙	马德里	阿尔斯通 Citadis	60R2	

4 与铁路干线共轨问题的探讨

若使有轨电车在槽型轨线路和铁路干线线路上共轨运行,则面临轨头型面匹配问题,以及道岔与车辆的接口匹配问题。

在欧洲标准中,与 59R2、60R2 两种槽型轨轨头形状完全匹配的 T 形轨型号为 49E1。目前,我国没有自己的槽型轨型面,大多采用欧洲的 59R2 或 60R2 型槽型轨。这两种轨头型面无法与国内常用的 T 型 50 kg/m 或 60 kg/m 钢轨匹配。如果想实现有轨电车在槽型轨线路和铁路干线线路上共轨运行,则需开发出与 50 kg/m 或 60 kg/m 完全匹配的槽型轨型面。

由于槽型轨轮缘槽宽的限制,有轨电车轮背内侧距大多为 1 380 mm 左右,而铁路干线车辆轮背内侧距通常为 1 353 mm(或 1 360 mm)。两种轨道车辆系统轮背内侧距的巨大差异,导致两种线路系统道岔接口不可能保持一致,所以无法从轨道角度实现有轨电车在两种线路系统中的共轨运行。不过,可以设计一种新的踏面形状,使轮对具备双轮背内侧距的特点,以同时满足槽型轨线路和铁路干线线路道岔的通过。

5 结语

综上所述,几种钢轨的承载能力、轨道质量及轮缘槽深的微小差异对钢轨的选型影响不大,但轨头形状和轮缘槽宽差异很大。从降低线路的铺设成本、轮轨磨耗的维护成本及小曲线轮轨啸叫等角

(下转第 105 页)

参考文献

- [1] 张凯, 杜凯, 巨永锋. 基于BP神经网络的提速道岔故障诊断算法[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(11):77.
- [2] 米根锁, 张凤霞, 魏蕾. 基于剩余寿命的铁路轨道电路调整型维修方法研究[J]. 铁道学报, 2015(4):69.
- [3] 张凤霞, 米根锁. 基于健康指数的轨道电路设备寿命预测方法的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12):61.
- [4] 饶永波, 常治元, 杨宗霄, 等. 高速公路机电设备使用寿命预测模型[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(2):12.
- [5] 李章杨, 陆国政, 虞翊, 等. 高铁信号关键设备使用寿命评估方法[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(10):1.
- [6] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研

究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008:8.

- [7] WU X H, WEN D, LI R G, et al. A model to predict the residual life of aero-engine based upon Support Vector Machine [C]//International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. New York: IEEE, 2013.
- [8] HESS A, FILA L. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [C]//IEEE. Aerospace Conference Proceedings. New York: IEEE, 2003.
- [9] 野中保雄. 可靠性数据的收集与分析方法[M]. 高金钟, 译. 北京:机械工业出版社, 1988:11-17.
- [10] 尤明懿. 基于状态监测数据的产品寿命预测与预测维护规划方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.

(收稿日期:2018-03-19)

(上接第95页)

度考虑,采用轮缘槽宽较宽、轮缘顶部集成轨顶坡的59R2槽型轨是最佳的选择。若考虑为提高路面的平顺度而选择了槽窄的60R2槽型轨,则转向架需要采用薄轮缘踏面。这样将大大降低了轮缘的使用寿命,增加了车辆维护成本。此外,为实现有轨电车在槽型轨线路和铁路干线线路上的共轨运行,建议尽快设计出匹配国内常用T型轨的槽型轨型面。

参考文献

- [1] European Committee Standardization. Railway applications track special purpose rail grooved and associated construction.: EN 14811—2009[S]. Brussels: European Committee, 2009:29.
- [2] SAMYN F. Functional Specification for Track infrastructure [R]. Brussels: European Commission, 2010.

- [3] Länder-fachausschusses für Stadtbahnen und andere spurgebundene Ortsverkehrssysteme (LSO). Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab): TR Sp-2004 [S]. Cologne: Association of German Transport Companies, 2004:43.
- [4] Transportation Research Board. TCRP REPORT 155-2012[R]. Washington D C: The Federal Transit Administration in cooperation with the Transit Development Corporation, 2012.
- [5] DIN. Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge Radreifen-Profil Breite 95 und 110mm.: DIN 25112-1980, [S]. Berlin: Deutsches Institut, 1983.
- [6] Andrés Muñoz de Dios Rodríguez, Pablo Oromí Frago. Comparative study on wheel-rail interface and wheel wear in light rail [R]. Brussels: The International Association of Public Transport, 2013.

(收稿日期:2017-03-09)

(上接第99页)

- [4] 张菊, 王若昆. 基于FMECA和FTA的轨道电路系统安全性分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(6):23.
- [5] 杨洋, 谢开贵, 孙鑫. 基于FTA法的宁夏电网运行元件故障率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009(18):134.
- [6] 王洪飞, 施绮. 基于故障树(FTA)方法的二次系统项目评估方法研究[J]. 华东电力, 2014(12):2747.
- [7] 朱云飞, 周凤舞, 凌明胜. FTA在多输出通信网络系统中的应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(3):68.
- [8] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1):56.
- [9] 陆锦军, 王执铨. 基于故障树的校园网通信系统的可靠性分析[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(11):14.
- [10] 丁坚勇, 张华志, 吴新民, 等. 城轨供电系统接触网可靠性的故障树分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009(9):38.

- [11] 曾德容, 何正友, 于敏. 地铁牵引变电所可靠性分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(4):22.
- [12] MÁRQUEZ F P G, PÉREZ J M P, MARUGÁN A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time[J]. Renewable Energy, 2016, 87:869.
- [13] MIRZA S, OMIDVARI M, LAVASANI S M R M. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis[J]. Safety promotion and injury prevention (Tehran), 2014, 2(2):113.
- [14] AKSU S, TURAN O. Reliability and availability of pod propulsion systems[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2006, 22(1):41.
- [15] 魏春荣, 张建华, 张锦鹏. 事故树定性分析法及其在矿井安全评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(9):39.

(收稿日期:2017-04-05)