

市域(郊)铁路跨线运行至城际铁路信号系统方案研究

邓翔飞

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京)

摘要 [目的] 市域(郊)铁路是我国轨道交通体系四网融合发展的短板,其在功能定位、客流需求等方面尚未达成共识,这也导致了市域(郊)铁路信号系统制式的选择存在一定的困难和问题,需要对此进行深入研究。[方法] 阐述了市域(郊)铁路在多层次轨道交通的融合需求、运营需求,分析了其在运营管理、设备选型上存在的问题。并以无锡至宜兴城际轨道交通工程为案例,对比了国铁 CTCS-2(中国列车控制系统 2 级)+ATO(列车自动运行)系统、城轨 CBTC(基于通信的列车控制)系统的特点,对二者在市域(郊)铁路的适应性进行了分析。基于该线跨线运行至苏锡常城际铁路的需求,对该线的信号系统设计方案进行了研究。[结果及结论] 案例线路宜采用以 CBTC 系统为基础、兼容 CTCS-2+ATO 系统的信号系统方案。该方案既可保证市域(郊)铁路具有公交化运营的能力和高的自动化等级,同时也可满足列车跨线运行至国家铁路时信号系统的兼容需求。

关键词 市域(郊)铁路; 信号系统; 运营需求; 跨线运行; 公交化运营

中图分类号 U284

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.038

Research on Signaling System of City (Suburban) Railway Cross-line Operation to Intercity Railway

DENG Xiangfei

(Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China)

Abstract [Objective] City (suburban) railways are a weak link in the four-network integrated development of rail transit system in China. There is currently no unified understanding regarding their functional positioning and passenger flow demands. This lack of consensus leads to difficulties and issues in selecting formats for city (suburban) railway signaling system, calling for in-depth research. [Method] By elucidating the integration and operation requirements of city (suburban) railways in a multi-level rail transit system, the problems existing in operation management and equipment type selection are analyzed. Using the Wuxi-Yixing Intercity Rail Transit project as a study case, the characteristics of China Railway CTCS-2 (China Train Control System level 2)+ATO (automatic train

operation) system and the urban rail CBTC (communication-based train control) system are compared. The adaptability of these systems in city (suburban) railways is analyzed. Based on the demand for cross-line operation with Suzhou-Wuxi-Changzhou intercity railways, the signaling system design scheme for Wuxi-Yixing Intercity Rail Transit is investigated. [Result & Conclusion] The signaling system scheme based on CBTC system, with compatibility for CTCS-2+ATO system is suitable for the case line. This scheme ensures the city (suburban) railways capabilities for mass-transit type operation and a high level of automation, but also meeting the compatibility requirements for the signaling system when trains operating across lines to national railways.

Key words city (suburban) railway; signaling system; operation requirement; cross-line operation; mass-transit type operation

1 研究背景

我国的轨道交通体系主要分为国家干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路及城市轨道交通(以下简称“城轨”)四个层次,各层次轨道交通有着不同的定位和功能。随着基础设施投资、建设步伐的不断加快,我国已经形成了全球规模最大的高速铁路网,主要城市内部的轨道交通网络也基本成型,而连接都市圈中心城市和周边城镇组团的市域(郊)铁路却成为了我国轨道交通体系发展中的短板^[1]。

近些年,随着城市范围的不断扩大,市域(郊)铁路发展逐渐受到重视。国家层面开始大力支持以都市圈为中心的市域(郊)铁路建设,国务院办公厅发文并协调多部门共同推动市域(郊)铁路的发展。目前,长江三角洲(以下简称“长三角”)地区已经开通运营的市域(郊)线路主要有温州市域铁路 S1 线和上海金山铁路支线等。其中:温州市域铁路 S1 线为新建线路(独立路权),采用 DC 25 kV 供电,信号系统采用点式 ATP(列车自动防护)系统;上海金

山铁路支线利用既有国家铁路(以下简称“国铁”)线,其系统制式基本参照国铁标准,采用 AC 25 kV 供电,信号系统采用 CTCS-0 级(中国列车运行控制系统 0 级)。

市域(郊)铁路作为轨道交通建设的一个较新的领域,在功能定位、客流需求等方面尚未达成共识,这也导致了市域(郊)铁路信号系统制式的选择存在一定的困难和问题。本文将从市域(郊)铁路的基本需求出发,重点对市域(郊)铁路跨线运行至城际铁路的信号系统制式选型进行分析。

2 市域(郊)铁路需求及相关问题

2.1 市域(郊)铁路需求分析

2.1.1 多层次轨道交通融合需求

都市圈轨道交通一体化规划提出:应根据不同客流需求,构筑多层次的轨道交通体系,实现国家干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城轨网络融合,做到功能互补,最终实现线路间资源共享^[2]。但是,由于轨道交通项目前期规划或系统制式原因,国铁线路与市域(郊)铁路、城轨线路之间均不能互通,乘客在不同轨道交通制式间的换乘过程复杂,无法满足乘客多样化、高效出行的需求。因此,实现多层次轨道交通的融合及网络化运营,首先需做好顶层规划及合理的制式选型。

2.1.2 运营需求

建设市域(郊)铁路的目的是加强大城市中心城区与郊区城镇的交通联系,但由于各地经济发展程度、人口密集度及城镇分布的不同,导致不同城市市域(郊)铁路的运营需求存在差异。例如,长三角或珠江三角洲(以下简称“珠三角”)地区经济发达且人口密集,区域内的市域(郊)铁路大多有最小运行间隔 180 s 的公交化运行需求;且随着轨道交通进入高质量发展阶段,要求市域(郊)铁路具有较高的自动化等级,具备列车自动驾驶、车门与站台门联动、列车自动折返等功能。另外,从我国主要都市圈空间尺度看,市域(郊)铁路的长度往往在 50~100 km 之内,按照 1 h 通勤圈的要求,结合市域(郊)铁路车站间距的估算情况,市域(郊)铁路的设计速度一般在 120~200 km/h 范围内^[3]。

2.2 相关问题

根据市域(郊)铁路同其他层次轨道交通的融合要求及运营需求,除了做好线路层面的顶层规划外,还需重点考虑以下问题:

2.2.1 运营管理

不同层次轨道交通间互通,因其建设、运营主体的不一致,易出现运营管理混乱的局面,如不同线路运营主体的列车混行时各类故障的责任方常常难以界定。此外,在设备及司机的准入等方面也存在问题,如城轨与国铁部分设备因采用不同的认证体系,城轨设备在国铁线路上使用时不受认可,以及设备的上线准入问题。

2.2.2 设备选型

基于市域(郊)铁路公交化运营、网络化运营、较高的自动化等级等需求,设备选型时应重点考虑车辆、供电及信号系统等专业。

信号系统选型应首先考虑系统是否具备满足线路公交化运行的能力;对于网络化运营需求,主要考虑市域(郊)铁路信号系统与国铁/城轨信号系统的兼容性;而对于不同自动化等级的信号系统,因线路的行车方式不同,还应考虑不同自动化等级对运营的影响。例如,与城轨线路信号系统以车载信号为主、自动化等级较高相比,很多国铁线路的自动化等级较低,这些国铁线路以地面信号为列车运行的主体信号,且对于不同的闭塞方式,同一种行车主体信号显示的含义也有较大差别;此外,在信号机布置上,国铁的信号机常规设置在行车方向左侧,而城轨的信号机常规设置在行车方向右侧。

3 国铁与城轨信号系统在市域(郊)铁路上的适应性

市域(郊)铁路作为功能定位介于国铁与城轨之间的轨道交通制式,其信号系统选型也应从国铁和城轨的信号系统着手。国铁和城轨信号系统采用的控制理念和控制原理趋同,均遵循“故障导向安全”原则,但由于二者服务对象及所应对的客流需求不同,二者在信号系统的设计上存在差异。本文以无锡至宜兴城际轨道交通工程(以下简称“无锡市域 S2 线”)为例,对国铁、城轨目前采用的信号系统在市域(郊)铁路的适应性进行分析。

3.1 无锡市域 S2 线概况

无锡市域 S2 线始于宜兴市境内,止于无锡市太湖新城。该线全长约 58.44 km,平均站间距为 7.37 km,共设车站 9 座。该工程在运营初期(2031 年)、近期(2038 年),与苏锡常城际铁路共用三站两区间(太湖新城站—硕放机场站),在远期(2053 年)与无锡市域 S3 线、无锡市域 S4 线贯

通运营。苏锡常城际铁路的信号系统拟采用 CTCS-2(中国列车控制系统 2 级)+ATO(列车自动运行)系统。

无锡市域 S2 线的供电制式为 AC 25 kV 架空

接触网,设计速度为 160 km/h,最小行车间隔为 150 s,具有公交化运行、开行大站快车的运营需求。

无锡市域 S2 线运营初期、近期的行车交路方案如图 1 所示。

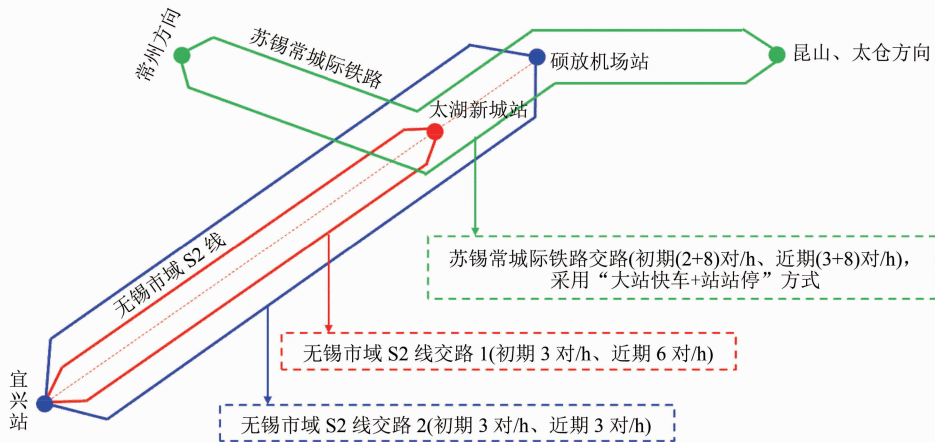


图 1 无锡市域 S2 线运营初期、近期的行车交路

Fig. 1 Wuxi City Railway S2 Line traffic routing in initial and recent operation stages

3.2 国铁与城轨信号系统适应性分析

3.2.1 信号系统简介

目前应用较多的国铁列车控制系统是 CTCS-2、CTCS-3(中国列车运行控制系统 3 级)。从列车运行速度、系统制式的自动化等级及系统功能的匹配等方面对 CTCS(中国列车运行控制系统)在市域(郊)铁路上的适应性进行分析后认为,较适应无锡市域 S2 线运营需求的国铁列车控制系统为 CTCS-2+ATO 系统。CTCS-2+ATO 系统是在 CTCS-2 体系的扩充,即在原 ATP 功能基础上增加了 ATO 功能。CTCS-2+ATO 系统采用 GSM-R(国际铁路无线通信标准)通信技术实现车地双向通信。CTCS-2+ATO 系统在珠三角地区城际线路中得以推广应用,使用该系统的莞惠城际铁路已通车运营。

城轨信号系统主要为 CBTC(基于通信的列车控制)系统,个别城轨线路采用点式 ATP 系统。

本文主要对国铁 CTCS-2+ATO 系统和城轨 CBTC 系统在市域(郊)铁路上的适应性进行对比分析。

3.2.2 CTCS-2+ATO 系统和 CBTC 系统对比分析

3.2.2.1 从技术先进性角度分析

CTCS-2 系统是国铁、城际铁路中主要采用的列车控制系统,该系统成熟可靠、安全实用,可实现理论 180 s 的列车追踪间隔。CTCS-2+ATO 在 CTCS-2 的基础上增加了 ATO 功能,实现了站间自动运行、车站定点停车、列车运行自动调整、车门与站台门防护联

动控制等功能,可满足公交化运行的需求。

CBTC 系统是城轨线路的主流信号系统,自动化等级高,采用了多种冗余和安全保障措施,具有高安全性、可靠性及可用性,可实现理论 90 s 的行车间隔。

3.2.2.2 从行车速度适应性角度分析

根据国家铁路局印发的 TB/T 3516—2018《CTCS-2 级列控系统总体技术要求》,若采用 CTCS-2 级列车控制系统作为市域(郊)铁路的主控系统,其设计速度可达 250 km/h。采用 CTCS-2+ATO 系统的莞惠城际铁路的设计速度为 200 km/h。

对于 CBTC 系统,目前已经开通的城轨线路中,北京地铁大兴机场线的设计速度为 160 km/h。部分城轨信号系统设备厂商目前已获得最高行车速度 200 km/h 的 CBTC 系统安全认证。

3.2.2.3 从互联互通角度分析

由于国铁针对 CTCS 系统制定了统一的技术条件及标准,明确了设备间的接口,故不同厂商的不同信号设备可相互兼容,可实现不同国铁线路间的互联互通。

而我国早期的 CBTC 信号系统由国外引进,各设备厂家采用的技术标准不统一,不同厂家信号设备不兼容,不能相互传递命令,因此,不同城轨线路间无法互联互通。但随着近年来我国城轨信号系统厂家的崛起,以及中国城市轨道交通协会和各地城

市轨道交通建设单位的积极推进,目前已制定了一系列 CBTC 系统互联互通的技术标准。CBTC 信号系统互联互通已基本解决了技术难题,采用互联互通技术标准的新建城轨线路间可实现跨线运行。

3.2.2.4 其他角度的对比分析

CTCS-2 系统与 CBTC 系统适应性对比如表 1 所示。CTCS-2 系统与 CBTC 系统架构差异对比如表 2 所示。

表 1 CTCS-2 与 CBTC 系统适应性对比
Tab.1 Comparison of CTCS-2 and CBTC system adaptabilities

项目	CTCS-2 系统适应性	CBTC 系统适应性
应用范围	铁路客运专线、城际铁路、市域(郊)铁路	城轨线路、市域(郊)线路
遵照的标准规范	国家铁路局的相关标准	国家标准、行业及协会标准、地方标准
最小行车间隔/s	180(理论值),300(实际值)	90(理论值),120(实际值)
线路设计速度/(km/h)	160~250	80~160
土建规模	到发线长度较长,用房面积需求较大	到发线长度较短,用房面积需求较小
技术先进性	准移动闭塞制式,系统及整条线路的自动化水平较低	移动闭塞制式,系统及整条线路的自动化水平较高
经济性	车站及区间设备较多,工程建设及运营维护成本较高	车站及区间设备较少,工程建设及运营维护成本较低

表 2 CTCS-2 与 CBTC 系统架构差异对比
Tab.2 Comparison of CTCS-2 and CBTC system architecture differences

项目	CTCS-2 系统适应性	CBTC 系统适应性
行车调度	CTC(调度集中)	ATS(列车自动监控)
闭塞方式	准移动闭塞	移动闭塞
列车控制	轨道电路+应答器+TCC(列车控制中心)+TSRS(临时限速服务器)+车载 ATP	ZC(区域控制器)+无线设备+应答器+车载 ATP
自动化等级	GOA2(半自动列车运行)	GOA4(无人值守下的列车自动运行)
联锁	各站独立联锁	仅设备集中站设联锁设备
监测	对各子系统进行监测报警	对各子系统进行监测报警

3.2.2.5 推荐方案

由上文可知:①在公交化运营方面,CTCS-2+ATO 系统难以满足高密度、公交化、通勤化的行车需求,且是否具备列车自动折返功能尚在验证中。②在运营管理方面,无锡市域 S2 线的建设、运营主体为无锡地铁集团,如线路的信号系统采用 CTCS-2+ATO 系统,需接入国铁进行统一调度,建设和运营的协调难度均较大;此外,CTCS-2+ATO 系统与 CBTC 系统的差异较大,需重新调整运营组织和培养技术人员。③在工程造价方面,CTCS-2+ATO 系统要求车站到发线长且对设备用房面积需求大,从而对线路的土建规模影响较大;CTCS-2+ATO 系统下车站及区间设备较多,其运营维护成本也较高。④CBTC 系统具有自动化等级高、系统结构简单、运营维护方便等优点,各项功能基本满足无锡市域 S2 线需求,但无法直接跨线运行至苏锡常城际铁路。

因此,CTCS-2+ATO 系统及 CBTC 系统对于无

锡市域 S2 线均有一定的适应性,但均不能完全满足该线所有的需求。另外,还应考虑远期无锡市域 S2 线要与无锡市域 S3 线、无锡市域 S4 线贯通运营,其信号系统宜选择自动化等级高的系统,便于向下兼容,实现互联互通。综上所述,以城轨 CBTC 系统为基础、兼容 CTCS-2+ATO 系统的信号系统方案较适合无锡市域 S2 线,该方案既能保证线路具有高的自动化等级,满足运营各项需求,也可跨线运行至国铁线路,实现同城轨和国铁信号系统间的互通兼容。

4 无锡市域 S2 线信号系统方案

CBTC 系统与 CTCS-2+ATO 系统的互通兼容方案,主要分为轨旁设备兼容方案、车载兼容方案两类方案。

4.1 轨旁设备兼容方案

在苏锡常城际铁路的地面增加 CBTC 系统的 ZC 及无线设备,使之同国铁联锁系统和 CTC 系统

建立接口,进而构建 CTCS-2+ATO 系统与 CBTC 系统的联合控制方案,以支持 CBTC 列车与 CTCS-2+ATO 列车的混跑运行。无锡市域 S2 线列车跨线运行至苏锡常城际铁路时,CBTC 列车仍使用 ZC 发送的移动授权行车。

此方案只需在苏锡常城际铁路段新增 CBTC 系统的轨旁设备及接口,不需要对苏锡常城际铁路列车进行改动。但 CTCS 系统作为国铁的标准产品,其设备(尤其是联锁设备)与城轨系统设备间接口的开发难度较大。另外,苏锡常城际铁路的地面采用双套设备,所需的车站设备用房面积较大,且运营维护量大,地面系统升级改造时调试、测试工作量大。新增设备在 CTCS 线路上的准入问题也不利于此方案的实施。

4.2 车载兼容方案

无锡市域 S2 线列车同时装配 CBTC 系统和 CTCS-2+ATO 系统的车载设备,列车跨线运行至苏锡常城际铁路时,列车能够读取 CTCS-2+ATO 系统轨旁设备发送的信息,并进行译码。在无锡市域 S2 线线路上设置 CBTC 系统与 CTCS-2+ATO 系统控制权转换重叠区及转换预告点,提示列车即将进入该控制权转换重叠区,并在进入该区域后进行列车控制权自动切换。当列车从无锡市域 S2 线进入苏锡常城际铁路时,在重叠区列车控制系统从 CBTC 系统切换为 CTCS-2+ATO 系统,并接收 CTCS-2+ATO 系统轨旁设备发送的行车许可;当列车从苏锡常城际铁路运行至无锡市域 S2 线时,在重叠区列车控制系统从 CTCS-2+ATO 系统切换为 CBTC 系统,并接收 CBTC 系统轨旁设备发送的行车许可。

4.2.1 双套车载方案

在无锡市域 S2 线列车上装配 CBTC 系统和 CTCS-2+ATO 系统双套车载(含列车内部设备及外围设备)。双套车载并存,通过倒切与其他共用设备(车载显示器、部分操作按钮、外设测速设备等)相连。该方案对设备安装空间需求较大,可实施性较强。

4.2.2 一体化车载兼容方案

在无锡市域 S2 线列车上装设 CBTC 系统及 CTCS-2+ATO 系统一体化车载设备,将列车内部设备集成一套设备,两个信号系统在控制区交界处实现无缝衔接过渡。一体化兼容车载设备接口示意图如图 2 所示。

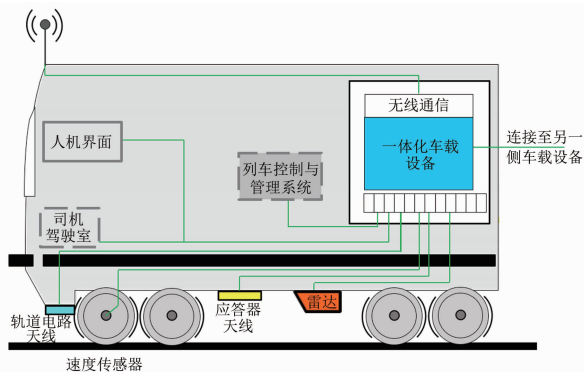


图 2 一体化兼容车载设备接口示意图

Fig. 2 Diagram of all-in-one compatible on-board device interface

一体化兼容车载是一种全新的列车运行控制系统,可支持城轨 CBTC 列车及国铁 CTCS-2+ATO 列车混行,统一运营操作方式,便于运营控制中心对司机进行统一调度指挥;在跨线运行信号制式切换点处可实现两种信号制式的自动无缝切换,自动化程度高。但是,该方案仍缺少建设经验,也尚无验收标准及相关规范的支持,车载设备在 CTCS 线路的上线准入仍存在问题。

4.3 兼容方案类似工程案例

长春轨道交通 3 号线既有工程的信号系统采用准移动闭塞制式,轨旁采用数字轨道电路。其新建东延伸段工程确定采用 CBTC 系统。在不对数字轨道电路进行改造的前提下,既有工程和新建工程两段线路的贯通运营需按兼容要求设计。即:东延伸段的信号系统采用 CBTC 方案,既有线路区段继续采用基于数字轨道电路的准移动闭塞信号系统;同一列车既可在东延伸段上运营,也可在既有线路区段上运营。列车在东延伸段与既有线路区段的接轨站进行信号制式转换,列车车载设备为兼容 CBTC 制式和准移动闭塞制式的双套车载设备。

上海轨道交通 2 号线既有信号系统为 Ansaldo(原美国 USS 公司)的基于数字轨道电路准移动闭塞信号系统,简称“TBTC(基于轨道电路的列车控制)”系统。2019 年,因设备老化原因,运营管理方启动该线 CBTC 系统的升级改造工作,其原则是最大限度复用既有系统。因此,改造后的新系统需与现有轨旁系统兼容,新车载设备增设了轨道电路接收线圈,使其同时具备 CBTC 系统和 TBTC 系统下对列车的控制功能。

5 结语

本文以市域(郊)铁路的基本需求为出发点,针

对其信号制式选型,分析了国铁与城轨两种轨道交通制式信号系统的架构及能力,并对二者在市域(郊)铁路上的适应性进行了分析。以无锡市域 S2 线为例,为满足其线路运营需求,提出该线采用以城轨 CBTC 系统为基础、兼容 CTCS 系统的信号系统方案。

对兼容方案进行分析后认为,一体化车载方案在技术上是完全可行的,该方案的自动化程度高,网络化运营适应性强,但还需考虑一体化车载设备在国铁线路上的准入许可问题,目前该方案也尚无成熟的应用案例。从技术发展趋势和轨道交通高质量发展角度看,为应对不同场景下的市域(郊)铁路需求,采用一体化车载兼容或双套车载方案,对于提升市域(郊)铁路高密度下的安全性、高效性及互联互通能力而言,是一个较优的选择。

参考文献

[1] 王伟立. 市域铁路与国铁互联互通的技术条件研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(6): 92.

WANG Weili. Analysis of technical condition of interconnection and interoperability between city regional railway and national railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(6): 92.

[2] 王跃辉,黄晓宇,梁青槐,等. 城际铁路与市域铁路过轨运行适应性分析[J]. 建设科技, 2020(7): 82.

WANG Yuehui, HUANG Xiaoyu, LIANG Qinghuai, et al. Adaptability analysis of through operation of inter-city railway and suburban railway[J]. Construction Science and Technology, 2020(7): 82.

[3] 李乾社. 市域铁路信号列控制式的研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(2): 10.

LI Qianshe. Research on signal train control system for regional railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 10.

• 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10

• 作者:邓翔飞,工程师,guanghere@qq.com

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 199 页)

表 5 钢轨设备状态评定标准
Tab.5 Evaluation standard of rail equipment status

扣分项目	计算单位	扣分值	说明
1 年内新生轻伤钢轨(不含曲线磨耗)	根	2	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
现存曲线磨耗轻伤钢轨	根	4	按单股计算,每延长 100 m 计为 1 根
1 年内新生重伤钢轨(不含焊接接头)	根	20	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
无缝线路现存重伤钢轨(不含焊接接头)	根	20	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
无缝线路现存重伤焊接接头	个	20	
$R_w \leq 90$		10	R_w 值每降低 10%,加扣 10 分

参考文献

[1] 邓小军,曹源,张玉琢,等. 改进希尔伯特-黄变换分析波磨对列车时频特征的影响[J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2294.

DENG Xiaojun, CAO Yuan, ZHANG Yuzhuo, et al. Influence of corrugation on time-frequency characteristics of a train based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(10): 2294.

[2] 牛留斌,刘今朝,孙善超,等. 钢轨打磨指数与轨道短波不平顺关系研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 46.

NIU Liubin, LIU Jinzhao, SUN Shanchao, et al. Relationship between rail corrugation index and track short wave irregularity [J]. China Railway Science, 2020, 41(5): 46.

[3] 翟婉明,涂贵军,高建敏. 地铁线路钢轨焊接区轮轨动力学问题[J]. 振动. 测试与诊断, 2012, 32(5): 701.

ZHAI Wanming, TU Guijun, GAO Jianmin. Investigation into wheel-rail dynamics in rail weld joint zone of metro line[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 701.

[4] 石彤,杨光,王宗新,等. 高速铁路钢轨平顺性现状及控制参数[J]. 铁道建筑, 2022, 62(5): 47.

SHI Tong, YANG Guang, WANG Zongxin, et al. Current situation and control parameters of rail regularity of high-speed railway [J]. Railway Engineering, 2022, 62(5): 47.

• 收稿日期:2023-02-21 修回日期:2023-04-15 出版日期:2024-04-10
Received:2023-02-21 Revised:2023-04-15 Published:2024-04-10

• 作者:马国祥,工程师,470514078@qq.com

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license