

文章编号: 1674—8247(2024)05—0119—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.020

高速铁路无砟轨道扣件自动化安装车研究

陈志远 华正兴

(中铁四局集团有限公司第八工程分公司, 合肥 230041)

摘 要:无砟高速铁路铺轨施工仅在长钢轨运输、铺设等方面实现了大型机械化,但铺轨后的扣件安装工作仍需依靠大量人工辅以小型机具进行,存在劳动强度大、施工效率低、质量不可控等问题。本文以 WJ-8 型扣件为研究对象,通过视觉/激光测量系统和多机械手协同作业等技术,对扣件自动化安装车进行研究,提出高速铁路轨道工程施工设备的智能建造思路,推进高速铁路智能建造技术科技化、信息化、自动化水平。研究成果可为轨道工程施工设备自动化领域提供有益指导。

关键词:高速铁路;智能安装;扣件;无砟轨道;机械手

中图分类号:U213.5;U215.6 **文献标志码:**A

Study on Automated Installation Vehicle for Fastener Systems in Ballastless High-speed Railway Tracks

CHEN Zhiyuan HUA Zhengxing

(The Eighth Engineering Co., Ltd. of China Railway Fourth Bureau Group Co., Ltd., Hefei 230041, China)

Abstract: While the construction of ballastless high-speed railway track has achieved large-scale mechanization in aspects such as long rail transportation and laying, the subsequent installation of fasteners still heavily relies on manual labor assisted by small tools. This approach is characterized by high labor intensity, low construction efficiency, and potential quality inconsistencies. This study focused on the WJ-8 fastener system, leveraging technologies such as visual/laser measurement systems and multi-manipulator cooperative operations to investigate an automated fastener installation vehicle, and a concept for intelligent construction of track engineering equipment was proposed to enhance the technological, informational, and automated capabilities in high-speed railway intelligent construction. The study results provide guidance for automation in track construction machinery.

Key words: high-speed railway; intelligent installation; fastener; ballastless track; manipulator

轨道工程施工质量直接影响行车速度、旅客舒适度和列车安全,我国运营的高速铁路大多铺设无砟轨道,且轨道结构型式较多^[1]如何提高轨道工程施工质量,确保施工作业安全,提升施工自动化水平,研发智能装备成为当前轨道施工的发展方向^[2-3]。

作为钢轨与结构连接的纽带,高速铁路扣件起到固定钢轨、阻止钢轨的横移或倾斜的作用。扣件施工质量对于高速铁路安全运行至关重要,然而,现有高速铁路扣件施工工作量大、施工作业不规范、施工效率低等问题,已严重制约我国高速铁路的性能提升。开展

收稿日期:2023-03-29

作者简介:陈志远(1979-),男,教授级高级工程师。

引文格式:陈志远,华正兴. 高速铁路无砟轨道扣件自动化安装车研究[J]. 高速铁路技术,2024,15(5):119-124.

CHEN Zhiyuan, HUA Zhengxing. Study on Automated Installation Vehicle for Fastener Systems in Ballastless High-speed Railway Tracks[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):119-124.

高速铁路无砟轨道智能扣件的机械化、自动化研究,将信息化技术应用于高速铁路铺轨施工,推进高速铁路智能化铺轨应用是实现高速铁路施工装备现代化的必然趋势。

1 研究现状

目前,国内外高速铁路无缝线路施工方式为:定尺钢轨在厂内焊接成 500 m 长钢轨,利用长钢轨运输车运输至现场进行长钢轨铺设,在现场焊接形成无缝线路,施工工序如图 1 所示。

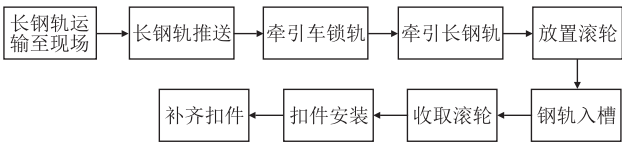


图 1 高速铁路无缝线路施工工序图

由图 1 可知,现有施工方法仅在长钢轨运输、推送、牵引作业实现了机械化施工,而对于抓取和锁紧长钢轨、放置和回收地面滚筒、安装扣件等工序,均依靠大量人工作业完成,劳动强度大、安全风险高、施工工效低。文献[4]实现了高速铁路铺轨施工各工序的机械化、信息化、自动化,达到了现场减少辅助作业人员及安全质量作业目标。文献[5]指出扣件系统是连接轨道与钢轨的主要部件,在保证钢轨稳定性、可靠性方面起着重要作用。文献[6]将无砟轨道施工工艺流程及高速铁路扣件组成进行分解,根据各工序对应使用的机械设备单独分析研究,确定了扣件自动化安装车的功能。文献[7]采用车辆-轨道耦合系统动力学模型研究了不同轴重下扣件弹条的折断概率。然而,针对无砟轨道扣件安装的自动化施工设备有待进一步研究。

本文以 WJ-8 型为例,将高速铁路无砟轨道施工扣件安装难点作为研究方向,按照扣件安装一体化、自动化的基本思路,研发一套满足高速铁路无砟轨道扣件安装的扣件自动化安装车。引用人工智能技术与计算机视觉技术,保证了扣件安装的准确性、时效性和稳定性,确保了高速铁路施工的安全质量和效率。

2 总体技术方案

2.1 扣件安装作业

当前,我国高速铁路扣件安装具体施工流程为:(1)扣件安装前需进行准备工作,清除预埋铁座间轨枕承轨面的泥污与预埋铁座孔内的砂浆;(2)铺设橡胶垫;(3)安装轨距块;(4)安装弹条;(5)安装调整与轨距微调;(6)安装完毕。现有施工方法信息化水平

不高、自动化水平低、施工效率与施工工艺亟待提升。

2.2 设计思路

首先,对扣件安装作业中最耗时的流程实现机械化施工进行研究,在现有的施工方法上,降低劳动强度和提高施工效率及质量。另外,从长远来看,面对现今劳动人员越来越短缺的基本情况,对扣件安装作业中最耗时的流程实现自动化施工进行研究,在降低劳动强度和提高施工效率及质量基础上,进一步减少施工作业人数。

通过研究分析,初步确定扣件自动化安装车主要由车架总成、铁路走行机构、放绝缘块机械手组、绝缘块排料机构,绝缘块存料仓、安装弹条机械手组、车体对中机构、推/拉钢轨机构、车辆让道机构等组成,如图 2 所示。自动化安装车采用柴油发电机组作动力源,采用电机驱动。底盘升降机构采用液压油缸控制升降。通过横向辅助走行机构实现双线上换道(在进行换道操作时,需要预先铺设工具轨进行换道作业)。

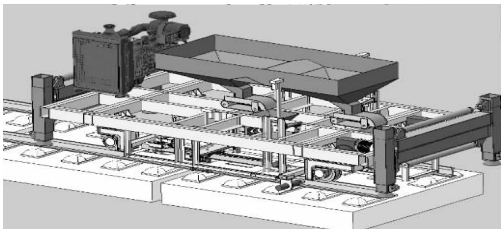


图 2 扣件自动化安装车示意图

施工作业时,设备上的绝缘块存料仓用于运输安装弹条所需的绝缘块。进行自动安装弹条时,设备上的智能控制系统先对无砟道床上的轨枕和扣件进行智能识别,并控制车辆定点停在需要安装弹条位置的轨枕位置。

车辆停车后,设备上的绝缘块排料机构把绝缘块从存料仓中自动有序地规整分拣出来,同时车体对中机构和推/拉钢轨机构进行车辆与钢轨的对中操作,把钢轨放置绝缘块侧的间隙进行顶开,然后放绝缘块机械手组把分拣出来的规整的绝缘块抓取并放置到钢轨的一侧。完成一侧钢轨绝缘块放置后,车体对中机构和推/拉钢轨机构与放绝缘块机械手组配合再把钢轨另一侧的绝缘块放置到位。

为保证扣件安装精度和扣压力的要求,在绝缘块放置到位后,设备上的螺旋道钉松/紧机构同步对安放好绝缘块的轨枕处两侧的螺旋道钉进行拧松操作,然后安装弹条机械手同步把两侧预先放置的弹条安装到位,再由螺旋道钉进行拧紧螺旋道钉操作,确保弹条可以自动智能安装。

2.3 车体结构组成及工作原理

2.3.1 推/拉钢轨机构

推/拉钢轨机构的主要作用是在扣件智能安装车进行放绝缘块作业时,通过偏摆钢轨调整绝缘块安装间隙。推/拉钢轨机构动作由液压油缸控制实现,如图3所示。

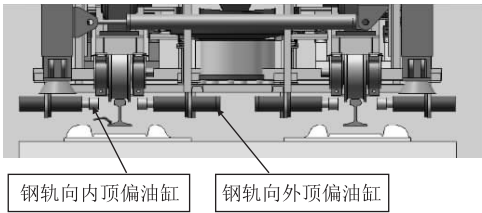


图3 推/拉钢轨机构作业图

设备放置钢轨内侧绝缘块时,先控制钢轨向外顶偏油缸顶偏钢轨,然后进行钢轨内侧放绝缘块作业。此时油缸顶偏钢轨的微小位移能够促进绝缘块放置的顺畅性。同样,在进行放置钢轨外侧绝缘块时,通过控制钢轨向内顶偏油缸实现。

2.3.2 放绝缘块机械手

放绝缘块机械手主要是安装扣件中的绝缘块。放绝缘块机械手能进行上下升降,纵向、横向移动。车辆停车后,升降电缸和抓手气缸控制机械手抓取绝缘块;横向移动电机和纵向移动电机控制机械手定位铁垫板,如图4所示。

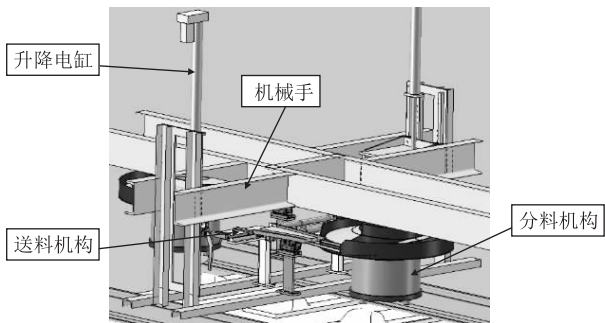


图4 放绝缘块机械手结构图

2.3.3 螺旋道钉松/紧机构

螺旋道钉松/紧机构主要是预先松开拧紧的螺旋道钉,以便进行弹条安装;弹条安装到位再拧紧螺旋道钉,如图5所示。

螺旋道钉松/紧机构扳手能进行上下升降,由气缸控制扳手套上道钉帽。螺旋道钉松/紧机构能纵向移动2个轨枕间距的距离,使其完成松道钉作业后继续进行另一个轨枕紧道钉作业,如图6所示。

2.3.4 安装弹条机械手

安装弹条机械手主要是进行安装弹条到位。安装弹条机械手的上下升降用电缸控制。横向移动和纵向

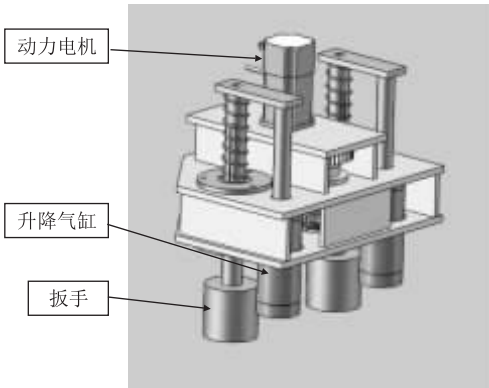


图5 螺旋道钉松/紧机构示意图

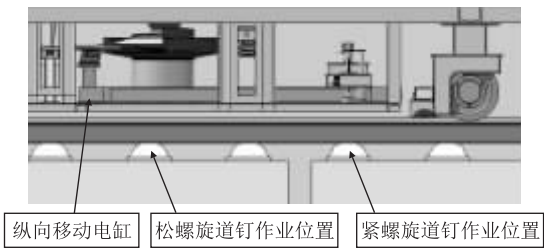


图6 螺旋道钉松/紧作业示意图

微调定位用电机控制。机械手通过夹手气缸夹取弹条两侧,如图7所示。

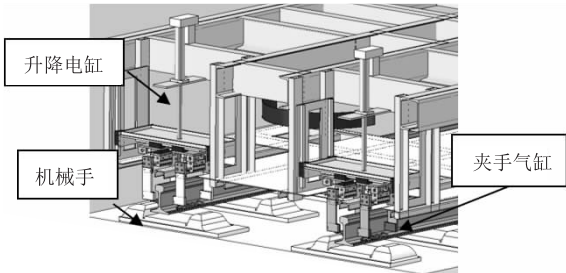


图7 安装弹条机械手示意图

2.3.5 绝缘块排料盘及料仓

绝缘块排料盘主要是把堆放的绝缘块按对称方向成对整理分列出来,以便放绝缘块机械手拾取绝缘块,如图8所示。

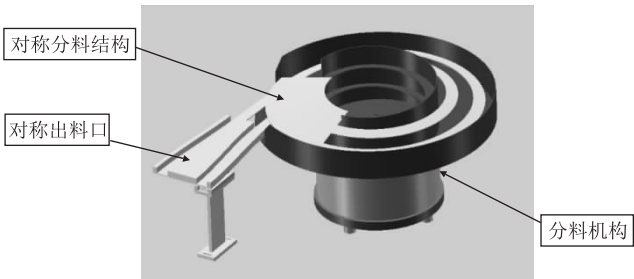


图8 绝缘块排料盘示意图

2.3.6 绝缘块料仓

绝缘块存料仓主要是存放绝缘块,并为绝缘块排料盘补充绝缘块。车上2套绝缘块排料盘为不影响正常分料,每个存放绝缘块数量约为300个。为满足每次补料完成500 m钢轨作业,绝缘块存料仓存放绝缘块约10 000个。

3 装置行驶特性与现场适应性分析

扣件安装车液压系统由一个开式系统组成,用于该车中液压油缸的驱动;电气控制系统中,车辆定位和各个机械手机构定位均采用视觉技术。每套放绝缘块机械手由1个横向移动轨道和1条垂向移动轨道组成,均由伺服电机精准控制,绝缘块夹手采用标准型夹持气缸控制,使机械手定位准确,动作迅速,提高施工速度和质量,其主要参数如表1所示。

表1 扣件安装车主要参数表

序号	主要参数	数值
1	作业走行电机组功率/kw	5.5×2
2	作业速度/空载运行最大速度/(km/h)	1.8/3
3	车轮直径/mm	340
4	横向走行电机组功率/km	5.5×2
5	横向走行速率/(km/h)	0~0.36
6	10 000个绝缘块重量/kg	600
7	爬坡能力(纵向坡度)/‰	30
8	通过最小弯曲半径/m	600
9	曲线上钢轨高低差/mm	150
10	自重/kg	6 800
11	单个绝缘块重量/kg	0.06
12	装载绝缘块数量/个	10 000
13	作业走行轮/驱动轮数量	4/2 驱
14	换道走行轮/驱动轮数量	4/4 驱
15	最大轮载荷/t	1.85

3.1 作业走行动力计算

3.1.1 运行阻力计算

按照车辆满载状况,坡度达到最大坡度(纵向坡度30‰下)计算车辆运行遇到的最大阻力;钢轨与火车轮的滚动摩擦系数取0.08;将各参数带入式(1)、式(2),可以求得:

$$F_{\text{坡阻1}} = Mg \times u_1 \tag{1}$$

$$F_{\text{滚动}} = Mg \times f \tag{2}$$

式中: Mg ——扣件车总重量(N);

u_1 ——坡度(‰);

f ——摩擦系数(0.08);

$F_{\text{坡阻1}}$ ——纵向坡度阻力,取2 175.6 N;

$F_{\text{滚动}}$ ——车轮滚动摩擦力,取580.16 N。

根据 $F_{\text{运行1}} = F_{\text{坡阻1}} + F_{\text{滚动}}$,两者求和得出 $F_{\text{运行1}}$ 为6 019.16 N。

路面干燥及一般潮湿状态下,车轮实际粘着牵引

力计算公式为^[8]:

$$F_{\text{粘}} = 2F_{\text{主动}} \times \mu \tag{3}$$

式中: $F_{\text{粘}}$ ——粘着力,本文取9 620 N;

μ ——粘着系数,取0.26;

$F_{\text{主动}}$ ——驱动轮承受载荷(N)。

可见,满载工况下牵引车粘着牵引力 $F_{\text{粘}}$ 车轮不会出现打滑现象。

3.1.2 走行电机的核算

当走行电机采用2个变频电机,其额定转速为1 450 转/min,其减速比 i_1 为:

$$i_1 = 60\pi D \times \frac{w}{v_1 \times 1\,000\,000} \tag{4}$$

式中: D ——车轮直径,取340 mm;

w ——电机转速,取1 450 转/min;

v_1 ——设备设计最大速度,取3 km/h;

i_1 ——电机减速机的减速比,本文取30.97。

进行单个电机计算时,单个电机额定功率为:

$$P = F_{\text{运行1}} \times \frac{v_1}{0.75 \times 2} \tag{5}$$

式中: P ——单个电机额定功率,本文取4.01 kw(转动效率系数按0.75计算)。

单个电机减速机输出扭矩为:

$$T_{\text{扭1}} = F_{\text{驱动1}} \times \frac{D}{2 \times 2} \tag{6}$$

$$F_{\text{驱动1}} = F_{\text{运行1}} + F_{\text{加}} \tag{7}$$

$$F_{\text{加}} = M_a \tag{8}$$

$$a = \frac{v_1}{3.6 \times 10} \tag{9}$$

式中: $T_{\text{扭1}}$ ——单个电机减速机额定输出扭矩,本文取72.8 N·m;

$F_{\text{驱动1}}$ ——设备运行驱动力,本文取6 611.16 N;

$F_{\text{加}}$ ——设备运行加速阻力,本文取592 N;

a ——设备10 s内从0加速至3 km/h的加速度,取0.08 m/s²。

3.2 换道横向走行动力计算

3.2.1 运行阻力计算

当进行换道横向走行作业时,坡度按照超高时的爬坡情况考虑,满载状态与正常走行作业相同, u_2 取超高斜度0.1。将各参数带入,可以求得横向运行阻力:

$$F_{\text{坡阻2}} = Mg \times u_2 \tag{10}$$

$$F_{\text{运行2}} = F_{\text{坡阻2}} + F_{\text{滚动}} \tag{11}$$

式中: $F_{\text{坡阻2}}$ ——横向坡度阻力,本文取7 252 N;

$F_{\text{运行2}}$ ——横向运行阻力,本文取13 053.6 N;

u_2 ——超高斜度,取0.1。

车轮实际粘着牵引力计算与正常走行作业类似,主动轮由正常走行作业的2个增加为4个,计算公式为:

$$F_{粘2} = 4F_{主动} \times \mu \quad (12)$$

式中: $F_{粘2}$ ——粘着力,本文取19 240 N;

μ ——粘着系数,取0.26;

$F_{主动}$ ——驱动轮承受载荷(N)。

最终可得 $F_{粘2} > F_{运行2}$,可见,换道横向走行作业时,不会出现打滑现象。

3.2.2 走行电机的核算

当走行电机采用4个变频电机,其额定转速为1 450 转/min,其减速比 i_2 的计算公式为:

$$i_2 = 60 \times \pi D \times \frac{w}{v_2 \times 1\,000\,000} \quad (13)$$

式中: i_2 ——电机减速机的减速比,本文取258.13;

D ——车轮直径,取340 mm;

w ——电机转速,取1 450 转/min;

v_2 ——设备设计最大速度,取0.36 km/h。

进行单个电机的计算时,单个电机额定功率为:

$$P = F_{运行2} \times \frac{v_2}{0.75 \times 4} \quad (14)$$

式中: P ——单个电机额定功率,本文取0.44 kw(传动效率系数按0.75计算)。

单个电机减速机输出扭矩 $T_{扭2}$ 为:

$$T_{扭2} = F_{驱动2} \times \frac{D}{2 \times 4} \quad (15)$$

$$F_{驱动2} = F_{运行2} + F_{加2} \quad (16)$$

$$F_{加2} = M_{a2} \quad (17)$$

$$a_2 = \frac{v_2}{3.6 \times 10} \quad (18)$$

式中: $T_{扭2}$ ——单个电机减速机额定输出扭矩,本文取558 N·m;

$F_{驱动2}$ ——设备运行驱动力,取13 127 N·m;

$F_{加2}$ ——设备运行加速阻力,本文取74 N;

a_2 ——设备10 s内从0加速至0.36 km/h的加速度,本文取0.01 m/s²。

3.3 技术难点

扣件^[9]是轨道结构的重要组成部分,由于轨道结构的扣件系统体积小,组装工序较为繁琐,根据铺轨前的扣件状态,传统施工人工操作时,需先拨动钢轨,将绝缘块分类安装到位,再将弹条摆放到位后,利用小型电动扳手人工紧固。人工进行扣件安装时,系列动作非常简单,但如利用机械手实现自动化操作,涉及方面广,结构复杂,组合难度大。首先在拾取与抓取方面较难操作,后续进行绝缘块放置时,钢轨与铁垫板的间隙

难以控制。

此外,我国高速铁路使用的扣件种类繁多,主要有WJ-7型、WJ-8型和300-1型等多种类扣件,该扣件自动化安装车可适用于WJ-7型、WJ-8型扣件自动化安装,但对于其他类型的无砟轨道扣件尚未实现,因此在针对扣件自动化安装车的研发方面难度很大。

该扣件自动化安装车的设计研究是在现场预安装扣件的基础上进行(主要针对长钢轨铺设前),利用安装车安装扣件时需达到以下要求:

(1)扣件预安装要求:铺轨施工前,弹性垫板、铁垫板、轨距挡板、橡胶垫板已初步安装到轨枕槽内;按要求预安装弹条、螺栓道钉,但不安装到位;绝缘块未装。

(2)此设计中,扣件安装时,车辆要停车施工,每次停车进行2根轨枕扣件安装作业,其施工效率预计0.16 km/h,施工速度较慢。

4 结束语

目前,我国正在积极推进智能建造、全生命周期管理等技术在无砟轨道中的应用,针对高速铁路无砟轨道扣件安装劳动强度大、施工效率低的难题,本文设计研制出适用于高速铁路无砟轨道施工的扣件安装自动化设备,实现了车组铺轨作业中走行的自动控制,可实现扣件自动化安装,对工程技术与项目质量管理的引领带动至关重要。该设备的研发有助于实现“机械化换人、自动化减人、智能化无人”的智慧铁路建设目标,对提高我国高速铁路施工建造技术设备自动化,具有重要的经济、社会意义。

参考文献:

- [1] 邴晔. 高速铁路到发线无砟轨道接轨技术应用研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 31-36.
- [2] LI Ye. Study on Application of Ballastless Track Connection Technology to Arrival and Departure Tracks of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 31-36.
- [3] 王继军, 姚力, 王梦. 中国高速铁路无砟轨道的发展及应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 33-35.
- [4] WANG Jijun, YAO Li, WANG Meng. Development and Application of Ballastless Track of High-speed Railway in China[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 33-35.
- [5] 郭静, 马成贤. 高速铁路工程数字化质量管理现状、挑战及架构[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 25-29.
- [6] GUO Jing, MA Chengxian. Current Status Challenges and Architecture of Digital Quality Management for High-speed Railway Engineering [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 25-29.
- [7] 管新权, 段启楠. WPZ-500型无砟智能铺轨机组滚筒回收车设计[J]. 装备制造技术, 2022(6): 30-33.
- [8] GUAN Xinquan, DUAN Qinan. Design of Drum Recovery Vehicle for

WPZ-500 Ballastless Intelligent Track Laying Unit [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(6): 30-33.

[5] 景璞. 铁路扣件使用问题分析与建议[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(5): 11-14.

JING Pu. Analysis and Suggestion on the Use of Railway Fastener [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(5): 11-14.

[6] 黄旭升, 王时越, 伍曾, 等. WJ-7 型无砟轨道扣件弹条强度分析 [J]. 铁道建筑, 2018, 58(9): 127-129.

HUANG Xusheng, WANG Shiyue, WU Zeng, et al. Strength Analysis of WJ-7-Type Ballastless Track Fastening Elastic Rod [J]. Railway Engineering, 2018, 58(9): 127-129.

[7] 刘玉涛, 段玉振, 王豪, 等. 高速铁路无砟轨道扣件弹条疲劳损伤统计分[析]. 铁道标准设计, 2021, 65(2): 42-46, 53.

LIU Yutao, DUAN Yuzhen, WANG Hao, et al. Statistical Analysis of Fatigue Damage to Elastic Clips of Ballastless Track Fastenings for High-speed Railways [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 42-46, 53.

[8] 邓建华. WZ500E 无砟智能铺轨机组长钢轨牵引车设计[J]. 装备制造技术, 2021(6): 34-36.

DENG Jianhua. Design of Long Rail Tractor for WZ500E Ballastless Intelligent Track Laying Machine [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(6): 34-36.

[9] 陈宗平, 成功, 刘清源, 等. 高速铁路扣件动刚度频变和温变特性研究[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(3): 495-502, 616-617.

CHEN Zongping, CHENG Gong, LIU Qingyuan, et al. A Study on the Frequency and Temperature-dependence of the Dynamic Stiffness of Fasteners Used on High-speed Railways[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 495-502, 616-617.

(上接第 118 页)

[12] 任高峰, 杨旭春, 张聪瑞, 等. 新管幕法下穿铁路既有有线施工地表沉降监测[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 163-171.

REN Gaofeng, YANG Xuchun, ZHANG Congrui, et al. On the Ground Subsidence Monitoring in the Construction of the Currently Existing Rail-lines under the New Tube Curtain Method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 163-171.

[13] LI Xiaoxue, TAN Zhongsheng, WANG Xiuying, et al. Comparative Study on the Influence of Different Forms of New Tubular Roof Method Construction on Railway Tracks [J]. Symmetry, 2022, 14(7): 1361.

[14] YANG Songsong, ZHANG Dingwen, WANG Mei, et al. Ground and Tunnel Deformation Induced by Excavation in Pipe-roof Pre-construction Tunnel: a Case Study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104832.

[15] 丁维利, 赵永明, 初厚永, 等. 浅埋大断面黄土隧道下穿既有铁路施工技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 76-81.

DING Weili, ZHAO Yongming, CHU Houyong, et al. Technology for a Shallow Large Profile Loess Tunnel to Underpass Existing Railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(6): 76-81.

[16] 秦虎, 马亢, 贾剑青. 隧道下穿对上覆铁路线的影响及风险管控研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 871-877.

QIN Hu, MA Kang, JIA Jianqing. Study on the Influence of Tunnel Underpass on Overlying Railway Line and Its Risk Management and Control [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 871-877.

[17] 张军, 麻建飞, 刘夏冰, 等. 浅埋超大跨隧道洞口段围岩稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 7-12, 18.

ZHANG Jun, MA Jianfei, LIU Xiabing, et al. A Study on Rock Stability in Portal Section of Shallow Extra-large-span Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 7-12, 18.

[18] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范 [S].

TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].