

城市轨道交通高精度装配式轨道关键技术及应用成效^{*}

吴 俊

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

摘 要 [目的]为深入贯彻国家交通强国战略与标准化、智能化和精细化等低碳装配建造理念,针对当前城市轨道交通轨道结构以现浇道床为主带来的施工精度不足、施工装备落后、维修手段欠缺及全寿命周期系统性差等问题,需对城市轨道交通高精度装配式轨道技术进行研究。[方法]按照标准化设计、工厂化制作、机械化施工、高精度控制、全寿命管理的总体研发技术路线,依托上海轨道交通二期、三期建设项目,对装配式轨道理论研究以及方案设计、效果试验和验证、轨道状态在线监测等进行了研究,并简述了高精度装配式轨道技术的应用成效。[结果及结论]形成了高精度预制装配技术、节能施工装备技术、绿色建造技术和智能监测技术等城市轨道交通装配式轨道关键技术,显著提升了轨道建设与运维品质。高精度装配式轨道技术的应用,有效提高了轨道结构的建造精度;较大幅度提高了轨道结构的优良几何形位状态以及稳定性、平顺性等指标;无轨系列施工装备节省了施工期间的大量人力、物力及时间成本;轨道状态在线监测系统及管理平台的应用,使得人工巡检工作量减少 30%~40%,维保工作效率提升 20%~30%,设备病害检出率提高 30%~40%;减少了城市轨道交通列车运行的环境影响。

关键词 城市轨道交通;高精度装配式轨道;关键技术;应用成效

中图分类号 U213.2⁺42

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.047

Key Technology and Application Effect of High Precision Prefabricated Track for Urban Rail Transit

WU Jun

(China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, 200070, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to thoroughly implement the national strategy of building China with a strong transportation network and the low-carbon assembly and construction concepts such as standardization, intelligence and refinement, and to address the problems of insufficient construction accuracy, outdated construction equipment, lack of maintenance methods,

and poor overall life cycle systematicity caused by the current cast-in-place ballast, which is presently the main track structure in urban rail transit, it is necessary to make research on high-precision prefabricated track technology for urban rail transit. [Method] In terms of the prefabricated tracks, theoretical research and scheme design, effect experiments and verification, and online monitoring of track conditions are carried out in accordance with the overall research and development technology route of "standardized design, factory production, mechanized construction, high-precision control, and full life management", and based on the Phase II and Phase III construction projects of Shanghai Metro. The application effect of the high-precision prefabricated track is briefly introduced. [Result & Conclusion] The key technologies of prefabricated track in urban rail transit, including high-precision prefabrication and assembly technology, energy saving construction facility technology, green construction technology and intelligent monitoring technology are developed, significantly improving the quality of rail construction, rail operation and maintenance. The application of high precision prefabricated track technology improves the construction precision of track structure effectively, improves the indicators like excellent geometry, stability and smoothness of the track structure significantly. Series of trackless construction equipment saves a lot of manpower, material resources and time cost during construction. The application of track condition online monitoring system and management platform reduces the workload of manual inspection by 30%~40%, increases the maintenance efficiency by 20%~30% and the disease detection rate by 30%~40%, reducing the environmental impact of urban rail transit train operation.

Key words urban rail transit; high precision prefabricated track; key technology; application effect

结合交通强国战略形势下城市轨道交通的发展需求,深入贯彻标准化、智能化及精细化等先进技术发展理念,探索实践低碳装配建造技术。针对当前城市轨道交通轨道结构存在的施工精度不足,施工装备

^{*} 上海申通地铁集团有限公司科研项目(JS-KY21R006-2)

落后,维修手段欠缺,设计、制作、施工、运维等阶段未形成系统化的体系等问题,按照标准化设计、工厂化制作、机械化施工、高精度控制、全寿命管理的总体思路,系统化开展了装配式轨道结构理论研究、方案设计和试验验证,以及轨道结构状态在线监测等关键技术的研发等工作,形成了高精度预制装配技术、节能施工装备技术、绿色建造技术及智能监测技术,提升了轨道结构建设与运维品质。

1 城市轨道交通装配式轨道关键技术

1.1 装配式轨道技术体系

1.1.1 装配式轨道设计理论体系

根据上海轨道交通全线网条件和轨道结构要求,围绕装配式轨道全寿命周期安全管理理念,面向设计、制造、施工的高精度建造,构建了城市轨道交通装配式轨道设计理论体系。

1) 轨道型式研究和仿真评估:提出了凹槽底座+隔离层+自密实混凝土及钢筋+非预应力钢筋混凝土预制平板组合的预制轨道板、预制道岔板、预制减振轨道板结构型式,建立了仿真模型,进行了预制轨道结构力学分析和安全性分析,综合评估了轨道板损伤工况下的结构性能。装配式轨道结构型式见图1。

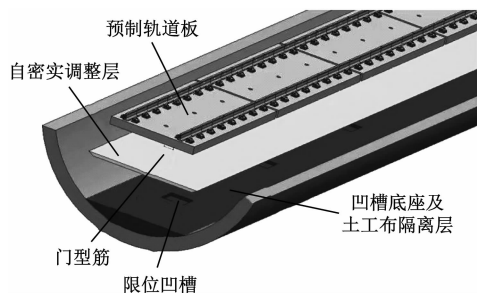


图1 装配式轨道结构型式

Fig.1 Structure type of prefabricated track

2) 综合试验和指标体系构建:在理论分析的基础上,开展了静力、动力及疲劳试验,试验结果表明轨道板强度满足要求。提出了特殊轨道板的理论-试验综合检验方法,验证了轨道板在列车荷载场-温度场等多场耦合条件下的性能特征,构建了轨道板的安全性、适用性及功能性指标体系。

3) 轨道状态协同评估:形成了装配式轨道理论分析、实验室试验和现场状态监测组合的理论-设计-施工-运维一体协同评估方法,建成了面向轨道交通运维安全管理需求的轨道状态评估体系。

1.1.2 装配式轨道结构设计技术

针对城市轨道交通不同工程条件和环境条件,形成了针对不同线下基础、减振需求、线形、钢轨扣件、专业接口的装配式轨道结构设计技术^[1]。结合盾构偏差情况,轨道板宽度分为2.1 m和2.3 m;结合不同曲线线型,轨道板长度分为3.5 m和4.7 m;结合不同减振需求,轨道板分为普通轨道板和减振型轨道板。

1.1.3 自密实混凝土制备技术^[2]

根据城市轨道交通工程特性,研制适合于城市轨道交通应用场景的高性能自密实混凝土材料。根据现场施工情况,研制商品自密实混凝土和工厂预拌干混自密实混凝土,并通过现场性能检测和揭板试验验证,解决了现场施工过程中,由于运输距离和时间所带来的性能保持难题,保证了工程施工进度和质量。

1.1.4 轨道板高精度制造技术

形成了钢筋混凝土轨道板流水机组法、矩阵单元法生产工艺^[3],首次实现了城市轨道交通装配式轨道板的规模化生产。

自主研发了高精度轨道板模板和智能化养护控制系统,制定了针对性的工艺,解决了轨道板混凝土收缩不均匀、温度分布线性等多种因素作用下的轨道板平面度控制难题,实现了毫米级制造精度。

1.2 基于高精度控制网的轨道精密测控技术

1.2.1 轨道精密测控网技术体系

为了满足装配式轨道结构的稳定性和平顺性,确保高精度施工,研发了基于高精度控制网的轨道精密测控技术^[4]。该技术体系可贯穿整个装配式轨道施工期^[5]及运营维护期,具有相邻精度高、定位准确、永久性好、控制范围长、易使用等众多优点。轨道精密测控网布设平面示意图如图2所示。

1.2.2 装配式轨道施工测控技术

1.2.2.1 轨道板基底施工测控

轨道板基底施工采用现场绑扎钢筋、模筑混凝土的施工工艺,利用轨道精密测控网^[6]放样出基底的底座中心线、底座边线、伸缩缝位置及凹槽中心线位置,消除误差以便于精确装配。

1.2.2.2 预制轨道板安装测控

1) 预制轨道板进场质量检测。通过预制板快速检测软件检查每块预制板的关键部位相对里程偏差、偏距偏差、高程偏差、螺栓孔位相对间距及高程偏差。结合预制板扣件螺栓孔的位置,按照设计

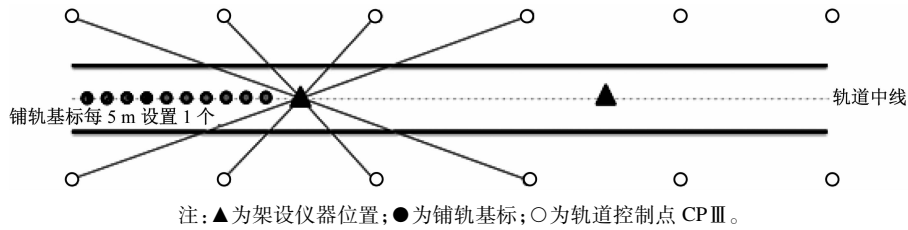


图2 轨道精密测控网布设平面示意图

Fig. 2 Layout plan of track precision monitoring network and control network

尺寸配套设计测量工装。通过工装的拟合,采集螺栓孔中心点的高程和坐标,对比理论数据,确定孔位的偏差,指导现场精调作业。

2) 轨道板布板、精调技术。通过预制板精调软件系统导入线路参数及测量点位的理论三维数据。并通过拟合线型、采集数据、分析判断等方式对预制板的位置进行精确定位,实现预制轨道板的精调。

1.2.2.3 自密实混凝土层施工监测

依托轨道精密测控网,利用检测技术对自密实混凝土充填层灌注过程中的轨道板空间状态进行监测。

1.2.2.4 轨道线路施工测控

采用轨道精密测控网,利用预制板轨道检测技术对轨道线路状态的中线、高程、水平及轨距等几何参数进行连续、全面的检测及精确调整。

1.2.3 轨道结构质量验收

在长钢轨应力放散和锁定完成后,基于轨道精密测控网采用全站仪自由设站方式配合轨道几何状态检测小车进行轨道线路竣工量测,可将轨道主要质量指标控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 。

1.2.4 轨道结构维护

将轨道精密测控网移交至运营维护部门后,可实现对轨道设备空间位置、轨道线型尺寸的检测,通过轨检小车可实现对轨道自身几何状态的检测。

1.3 自变形轮胎式成套施工装备体系

1) 高效、绿色、智能的成套装备技术。新能源无轨系列施工装备,由自变形轮胎式轨道施工车^[7]、自适应断面工程运输车^[8]、自变形轮胎式混凝土施工车和组合工装组成。成套施工装备采用轮胎式及曲面行走万向轮结构,使其可以无需借助临时轨道在非平面运行,并能保持车身平稳,达到了适应各类结构断面型式的目的;同时采用全新的能源控制系统,在工作时不产生废气,噪声小,可改善现场施工作业环境,实现绿色施工。新能源施工车在等待停止时不消耗电量,在制动过程中电动机

可自动转化为发电机,实现制动减速时能量的再利用,节约能源,降低碳排放。同时设备结构简单,运转、传动部件少,维修保养工作量小。

2) 智能化施工装备管理平台。该平台可进行在线检测车辆信息,包括监视车辆的实时位置、监视车辆是否出现故障、车辆现场施工画面的回传、车辆维修及保养检测情况、车辆月工作量统计等。通过智能化施工装备管理平台,可实现对设备的集中统一管理,对不同类型车辆进行集中监控,以及可以不分区域、时间地实现交叉作业的统一管理。该平台可支持手机 APP(应用程序)终端连接及数据存储,施工画面的存档,以及车辆剩余能源监测、远程发送指令等。

1.4 轨道状态在线监测系统及管理平台

基于自动采集-实时传输-智能评判技术的轨道状态在线监测系统,跟踪轨道重点地段,动态监测轨道状态和振动噪声敏感区段指标^[9]。该系统可构建列车运行品质与轨道结构状态数据平台,对现场信息进行多维度实时数据展示,结合大数据分析实现提示预警等功能。该平台采用分布式监测体系,根据轨道安全和振动噪声的需求,对轨道线路状态进行有效实时监测。监测数据可为技术方案的决策提供支撑,并实现安全和环保预警。

基于装配式轨道运维安全管理需求的在线监测系统,在软件端采用从端到云基于物联网技术的智能边缘系统。该系统可以深度挖掘装配式轨道结构的特点和轮轨动力学耦合模型,根据专业需求定制化地开发产品;相较于国外同类产品,该系统具有性价比高、备件供应顺畅、底层软件可定制化开发等突出优点,是符合目前国内技术和整体国情,同时满足轨道在线智能维护系统的最优监测解决方案。

基于运维安全管理需求的轨道在线智能维护系统实现了监测数据统计、当日数据展示、历史数据统计、实时大屏展示等功能,可通过电脑端和手

机端简单操作,极大地提高了业主与施工单位的工作效率,相关人员可以直观、便捷地了解项目进程与监测数据统计情况,经过一段时间的数据积累即可根据病害发展曲线,结合现场实际情况预测装配式轨道结构病害发展趋势,为装配式轨道结构养护维修方案的制定提供依据。

轨道状态在线监测系统已应用于上海轨道交通 18 号线(以下简称“18 号线”)、上海轨道交通 10 号线(以下简称“10 号线”)等多条运营线路的在线跟踪、评估及监测。经过长期的试验及测试,发现该系统可实现对轨道结构多维度动态参数的数据采集分析与病害库整理。

1.5 装配式轨道标准体系

1) 目标、范围和原则。为适应上海城市轨道交通全线网装配式轨道技术的要求,涵盖装配式轨道的设计—施工—运维全寿命周期,执行分类科学、结构合理、数量适中、覆盖全面、拓展可行的原则,构建了基于设计—施工—运维的全寿命周期装配式轨道标准体系。该体系包含城市轨道交通装配式轨道的设计、施工装备及运维养护领域专业相关的地标、行标及团标,打通了全寿命周期装配式轨道技术各环节,提高了城市轨道交通装备标准化管理水平。

2) 构建装配式轨道标准体系。装配式轨道标准体系以城市轨道交通线网轨道结构为目标,对轨道工程建设、运营管理、技术装备及资源经营等标准进行全面梳理和研究,形成符合行业建设、运营管理的标准体系,贯穿轨道系统的全寿命周期,为轨道系统设计、部件加工制造、施工验收及运营维护等各阶段提供标准的体系文件。标准体系的建立为装配式轨道的维护提供了专项标准的规定与支持。

2 装配式轨道技术的应用成效

随着上海城市轨道交通轨道预制装配化进程的不断推广,上海轨道交通 12 号线(以下简称“12 号线”)预制轨道试铺成功,后续通车运营的上海轨道交通二期建设项目包括 5 号线南延伸、9 号线三期、13 号线、17 号线、14 号线、15 号线、18 号线等,已全面应用装配式轨道技术,装配式轨道铺设长度约 187.09 km;新一轮上海轨道交通三期建设项目包括 19 号线、20 号线、21 号线、23 号线、崇明线等,预计将铺设装配式轨道约 260 km。

目前,装配式轨道技术的应用取得了以下成效:

1) 有效提高了轨道结构的建造精度,全部指标甚至包括部分原有厘米级指标均提高到毫米级,道岔尖轨及辙叉等重点部位的施工偏差均不大于 1 mm,使得轨道初始平顺状态大幅提升。同时装配式轨道几何形态(平顺性、稳定性)保持能力较好,具有良好的抵御下部结构变形及变形积累的性能,其铺设完成后,能提供更为平顺、稳定的走行轨道。因此,采用本技术后可延长轨道结构维修周期,减少 20%~30% 的养护维修工作量。

2) 通过提升轨道建设质量,可以较大幅度提高轨道结构的优良几何形位状态以及稳定性、平顺性等指标,从源头上减缓振动和噪声问题的发生和发展速率,提高列车行驶的平稳性和舒适性。上海近期通车的城市轨道交通线路的列车运行平稳性指标均达到优秀,TQI(轨道质量指数)明显低于既有线网平均水平。

3) 无轨系列施工装备可满足城市轨道交通施工的各种工况需求,减少了其他设备的投入,节约了大量的设备成本和施工时间。通过与实际测量相比,单项工作效率提高了 18%,相对人员减少了 50%。

4) 轨道状态在线监测系统及管理平台的应用,使得人工巡检工作量减少 30%~40%,维保工作效率提升 20%~30%,设备病害检出率提高 30%~40%。

5) 减少了城市轨道交通列车运行的环境影响。通过轨道结构的优良几何形位状态,提高列车行驶的平稳性和舒适性,从源头上减缓振动和噪声问题的发生和发展速率,减轻列车振动对乘客和沿线居民的影响。采用装配式轨道技术的线路运营至今,轨道结构服役状态良好,其振动源强较现浇道床降低了 4~5 dB,提升了周边居民的居住体验。

3 结语

1) 结合上海轨道交通全线网条件和轨道结构要求,研发了城市轨道交通普通钢筋混凝土系列轨道板设计技术,在保证结构安全的同时简化制造工艺,从而提高经济性。

2) 基于绿色动力技术的自变形轮胎式成套施工装备可适应于圆形及矩形断面的隧道结构;提出基于自变形轮胎式成套装备的隧道内交互作业施工方法,极大地提升了装配式轨道的施工效率。

3) 构建了适用于城市轨道交通的轨道精密测控体系,并将该体系贯穿于生产制造、施工、验收及运营各个阶段。

4) 研发了基于自动采集—实时传输—智能评判技术的轨道状态在线监测系统,构建了列车运行品质与轨道结构状态数据平台,提升了装配式轨道结构养护维修的智能化和信息化水平。

5) 形成了涵盖前期设计、工程建设、运营维护、大型施工装备及轨道产品性能评估等方面的标准化体系文件。

参考文献

- [1] 郑强. 城市轨道交通地下线预制板式轨道研究及应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 31.
ZHENG Qiang. Research and application of precast slab track in urban rail transit underground line[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 31.
- [2] 王军强. 自密实防水混凝土的配制与施工技术[J]. 混凝土, 2011(7): 104.
WANG Junqiang. Proportioning design and construction technology of self-compacting waterproof concrete[J]. Concrete, 2011(7): 104.
- [3] 贾宝红. CRTSⅢ型轨道板先张流水机组法制造技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(5): 127.
JIA Baohong. Manufacture technology of pretension flow unit method for CRTSⅢ track slab[J]. Railway Engineering, 2017, 57(5): 127.
- [4] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 轨道交通轨道精测网技术标准: DG/TJ 08-2333—2020 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-rural Development. Technical standard for precise survey of track control

network: DG/TJ 08-2333—2020 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2021.

- [5] 尹金铭. 城市轨道交通工程预制板式道床施工技术[J]. 上海建设科技, 2016(4): 27.
YIN Jinming. Construction technology of precast slab ballast in urban rail transit engineering[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2016(4): 27.
- [6] 董潇, 徐晶鑫. CPⅢ技术在城市轨道交通铺轨施工中的应用[J]. 现代交通技术, 2019, 16(3): 89.
DONG Xiao, XU Jingxin. Application of CPⅢ technology in urban rail transit construction[J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16(3): 89.
- [7] 薛恒鹤. 基于 ADAMS 的轨道板运输车平顺性分析[J]. 装备制造技术, 2019(5): 135.
XUE Henghe. The ride analysis of rail plate carrying vehicle based on ADAMS [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(5): 135.
- [8] 陆静, 单涛涛. 地铁隧道振动源强在线监测及数据统计分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(6): 151.
LU Jing, SHAN Taotao. Online monitoring and data statistical analysis of vibration source strength of subway tunnel[J]. Railway Engineering, 2020, 60(6): 151.
- [9] 李俊玺. 上海市轨道交通 12 号线轨道新技术的设计与应用[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(4): 5.
LI Junxi. Design and application of new track technology in Shanghai rail transit line 12 [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(4): 5.

· 收稿日期: 2023-02-17 修回日期: 2023-04-24 出版日期: 2024-03-10
Received: 2023-02-17 Revised: 2023-04-24 Published: 2024-03-10
· 作者: 吴俊, 高级工程师, 470699550@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 247 页)

- WANG Qingyong, LI Yushan, YAO Wenge, et al. Application research of high speed circuit for traction system of metro vehicle [J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(4): 106.
- [2] SECHERON SA. Instructions manual DC high speed circuit-breaker UR10 & UR15 [Z]. Geneva: SECHERON SA, 2016: B17.

· 收稿日期: 2022-01-02 修回日期: 2022-08-03 出版日期: 2024-03-10
Received: 2022-01-02 Revised: 2022-08-03 Published: 2024-03-10
· 通信作者: 张许, 工程师, yandazx@163.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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821