

文章编号:1005-0523(2021)06-0054-07



跨线铁路转体桥施工技术发展综述

徐春东¹, 胡洲¹, 关俊锋², 潘祥峰², 刘美豪³

(1. 南昌铁路天河建设有限责任公司, 江西 南昌 330002; 2. 南昌铁路勘测设计院有限责任公司, 江西 南昌 330001;
3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:转体施工作为一种运用广泛的桥梁施工工艺,可以跨越山川河流和既有线路。随着中国经济的快速发展,转体施工在桥梁建设领域发挥越来越重要的作用。对跨线铁路转体桥施工技术发展展开分析和研究,着重介绍了连续梁桥转体、T型刚构桥转体和斜拉桥转体的施工技术的基本设计工作要点,同时对其施工技术的发展展开分析和研究。并论述了铁路桥梁转体施工技术和转体桥的技术发展,详细总结了施工过程中的技术控制重难点。最后对整个铁路转体桥施工技术发展进行了总结,为跨线铁路转体桥的施工提供参考。

关键词:转体施工技术;连续梁;T型刚构桥;平转法;竖转法

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

本文引用格式:徐春东,胡洲,关俊锋,等.跨线铁路转体桥施工技术发展综述[J].华东交通大学学报,2021,38(6):54-60.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20211210.009

Review on Construction Technology Development of Cross-Line Railway Swivel Bridge

Xu Chundong¹, Hu Zhou¹, Guan Junfeng², Pan Xiangfeng², Liu Meihao³

(1. Nanchang Railway Tianhe Construction Co., Ltd., Nanchang 330002, China; 2. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330001, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract:As a widely used bridge construction technology, swivel construction can cross mountains, rivers and existing lines. With the rapid development of China's economy, swivel construction plays a more and more important role in the field of bridge construction. This paper analyzes and studies the development of construction technology of cross-line railway swivel bridge, and focuses on the basic design points of construction technology of continuous beam bridge swivel, T-shaped rigid frame bridge swivel and cable-stayed bridge swivel. At the same time, it analyzes and studies the development of construction technology. It also discusses the railway bridge swivel construction technology and the technical development of swivel bridge, summarizes the key and difficult points of technical control in the construction process in details, and finally summarizes the construction technology development of the whole railway swivel bridge, so as to provide reference for the construction of cross line railway swivel bridge.

Key words: swivel construction technology; continuous beam; T-shaped rigid frame bridge; horizontal rotation method; vertical rotation method

Citation format: XU C D, HU Z, GUAN J F, et al. Review on construction technology development of cross-line railway swivel bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 54-60.

收稿日期:2021-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51868022);江西省教育厅科技项目(GJJ180300)

桥梁转体法施工始于20世纪40年代的法国,最初是从竖转法发展起来的,直至1976年,平转法施工才首次应用。随后,国外在斜拉桥、T型刚构桥、连续梁桥和拱桥等桥型上得到应用,平转法的使用越来越广泛,技术也越来越成熟^[1-2]。根据桥梁结构的转动方向,可将转体施工分为竖转法、平转法以及平转与竖转相结合的方法,其中平转法的应用最多^[3-4]。我国的桥梁施工技术经过近七十年发展取得了一定的成就,为我国经济的发展做出了巨大的贡献,跨越铁路转体桥的设计与施工,以及未来的发展越来越受到重视^[5]。现行主要以连续梁桥、T型刚构桥和斜拉桥为主的转体桥施工,主要的特点是可使用简单支撑提前制作半桥,转体过程中以桥的结构本身为转动体,应用各种机械实现桥的转动,并实现完美的梁体对接^[6]。

随着我国桥梁工程的建设需求日益增加,桥梁工程的转体施工技术应用逐渐增多。张敏等^[7]以重庆铁路枢纽东环线珞璜南右线特大桥连续梁跨越既有渝贵线铁路工程为依托,研究了转体桥施工力学特性及监控技术。胡拔香等^[8]以枣菏高速公路上跨京九铁路(60+60)m预应力混凝土T型刚构桥的转体施工为背景,根据转体桥主梁平衡称重的原理和方法以及桥梁转体前的准备工作,总结了转体桥施工技术要点。韩琼^[9]以杨凌大道上跨陇海铁路转体T型刚构桥施工为依托,对转体桥施工过程中遇到的难点、解决方式及转体桥的施工流程进行了详细的总结。张汉涛^[10]通过分析公路上跨铁路转体桥梁施工技术要点,研究了提高转体施工技术在桥梁工程中应用水平的方法。梁羽^[11]以葫芦岛经济开发区特大桥工程项目为例,对该施工技术的应用进行分析,文章主要分析了转体系统的组成、转体桥主要的施工工艺、技术要点和各项影响因素的控制措施。张恒^[12]以兴延高速公路上跨京包铁路立交桥工程为依托工程,对转体施工过程的技术要点进行研究,并对施工流程控制,转体前准备工作,转体过程用时控制等环节进行了优化设计。赵琳等^[13]以珞璜南右线特大桥上跨既有渝贵线为背景,通过不平衡称重试验,对转体桥的不平衡力矩和偏心距等参数进行了研究,探索了转体桥不平衡称重施工控制要点。方兵^[14]以成昆铁路大树村龙川江三线大桥转体施工实践为背景,介绍了墩中转体施工中的关键技术,主要阐述了墩中转体系统设计与构造,墩中转

体的施工关键技术及施工控制要点。彭志新^[15]通过应用BIM技术,以新建京雄铁路为工程背景,对施工过程中的重点工艺及人员的可操作性作了进一步优化,提高了工程精细化管理效率。

转体桥在跨越式铁路以及公路工程施工项目当中应用非常广泛,不但给工程施工单位节省了大量的工程施工成本,同时还降低了对周围环境所产生的不良影响,所取得的工程施工效果非常明显,具有很可观的发展前景^[16]。本文在阅读大量文献的基础上综述了跨线转体桥的施工关键技术,总结了3种常见跨线铁路转体桥施工关键技术,重点介绍了各型桥梁的转体施工方法和施工技术难点,论述了其运用和研究现状。并对桥梁转体施工的安全风险管理和BIM技术在跨线铁路转体桥施工中的应用进行了讨论,最后展望了桥梁转体施工法的技术发展前景。

1 跨线连续梁桥转体施工关键技术

跨线连续梁桥大量采用平转法施工,可极大减少对下行交通运输的影响。连续梁桥墩底转体较为常见,墩中转体较少,墩顶转体施工工艺国内也已有多座桥梁采用,特别是近些年出现了一大批墩顶转体桥。使用平转法对连续梁桥进行施工时,转体段的施工一般使用支架现浇的方法^[17]。

转体系统施工是连续梁桥转体施工的关键工序和技术难点,转体系统由转体下转盘、上转盘、撑脚、砂箱、墩柱、梁体、转体牵引系统等组成,转动牵引系统在施工时设置,沿着逆时针方向将上转盘转动到一定角度与桥梁轴线位置重合。转动系统中的球铰由上下球铰,球铰间聚四氟乙烯板,对球铰起固定作用的钢销,下球铰定位钢骨架等部件组成。转动球铰是转动体系的关键工序,制作与安装精度要求高,需要选择具有资质的生产厂家加工,并请专业的安装技术指导。

上、下转盘均分两次浇筑混凝土。对于下转盘,第一次浇筑于安装底层、侧面及竖向钢筋后,第二次浇筑于下球铰和环形滑道安装,精调固定后^[18];对于上转盘,首先进行上球铰、钢撑脚及砂箱安装,而后进行混凝土的浇筑,第二次浇筑于安装钢筋及预应力束后^[17-19]。

2 跨线T型刚构桥转体施工关键技术

T型刚构桥因其具有悬臂受力特点,墩顶位置

处存在较大负弯矩,易产生裂缝,对其跨越能力有较大制约^[20]。T型刚构桥转体施工关键技术有:

1) 转体角速度控制^[21]。对转体角速度的要求,视所应用的转体设备区别对待。转体设备若选用卷扬机组,由于其控制精度低,且牵引索为钢丝绳滑轮组,承力索长,受力弹性伸长量大。停机后,由于弹性力释放,易发生超转,对转体角速度的要求严格;而液压转体系统运行匀速平稳,千斤顶就近安装,承力索短,超转不易发生^[22]。还应视转体上部结构的悬臂长度及刚度有所区别。总之,转体角速度的确定应使转体上部结构惯性力矩小于转盘动摩擦力矩,否则可能会出现没有牵引的情况下,转体结构在惯性力的作用下继续转动,当没有附加的限位设备时,非常危险。

2) 转体力偶均衡控制^[23]。尽量采用同步性和连续性比较好的转体动力系统,保证转体稳定性和转体效果。在一些项目中,连续梁的前后跨长度不一致,导致纵向倾覆力矩的出现,为保证转体时的纵向稳定性,避免出现横向倾覆的可能,可采用水箱进行横向配重。

3) 转体位置控制^[24]。① 转体过程中,监控测量人员每间隔一定时间向指挥部汇报一次测量结果,如双方转速不一致时应暂停予以调整,待调整后再继续转体。当最大悬臂端转体即将到达设计位置前100 cm左右时就暂停转体,后面再采用点动操作,与测量人员相互配合,完成精调,确保桥梁轴线精确定位。② 两侧分别设置全站仪等测量设备和配备专职测量人员,对转体全过程进行监测,不断提供桥梁轴线数据。精确定位时,两套测量装置对同一定位数据进行检测校核,以利于提高数据测量精度和定位精度。③ 在桥墩的合适位置设置限位装置,以防超转。

3 跨线斜拉桥转体施工关键技术

转体斜拉桥由于充分利用斜拉桥的结构优势,比梁式转体桥具有更好的跨越能力,结构形式更优美^[25-26]。转体施工时,在转动系统结构施工完成后,通过需要转体的桥墩下面的转动体系将桥面转动到设计位置。使用转体施工方法能够有效地克服跨越不能截停的河流、线路或是使用传统方法难以跨越的山谷的桥梁,并且施工材料设备简单,施工容易,施工快速高效,容易计算结构受力状态,工程花

费低等优点^[27]。

我国已建的转体斜拉桥大部分为对称结构独塔单索面混凝土桥,且桥跨比较大,主梁材质相同。因转体桥在转体时,需要提前拆除支架,并解除砂箱等临时固定措施,使主梁处于悬空状态。此时,整个结构将由转体主墩保持平衡。此类设计可以减少转体主梁不平衡的现象,通过自平衡就能保证转体结构的稳定。但是,预应力混凝土结构因其自重大的缺陷,限制了转体斜拉桥跨越能力。而混合梁转体斜拉桥相比于一一般的转体斜拉桥具有更好的力学性能和跨越能力,社会效益高,成为转体桥重要的发展方向之一。如东丰路跨铁立交桥转体最大悬臂长度达145 m,且为非对称结构,主梁若都采用预应力混凝土结构,转体重量过于庞大,势必导致主梁的不平衡,需增大配重,对转动系统要求更高,施工难度将会大大提升。如若采用混合梁,边跨使用良好的抗压性能混凝土材料,可以增大边跨的重量和刚度,同时减少了主跨的内力和变形;主跨使用良好的抗拉性能钢箱梁,不仅可以降低转体重量,而且能减少边跨支座反力以及避免了负反力的产生^[28],从而有更好的结构性能,能够满足工程建设的要求。

3.1 转体施工方式

转体斜拉桥主要采用水平转动施工,主要分为墩顶水平转体和墩底水平转体施工。当转体斜拉桥桥墩较高或桥墩体积较大时,采用墩顶转体相比墩底转体,转体重量明显减小,转体重心较低,降低了球铰、转体结构的设计难度,有效地提高了转体结构可靠性^[28]。但是,墩顶转体施工平台小,高空安装转体系统导致施工控制难度大。目前已建的转体斜拉桥除北京六环跨丰沙铁路斜拉桥、衡水市上跨京九、石德立交桥和石家庄市和平路跨铁路高架桥采用墩顶转体以外,均采用墩底转体方式。

转体斜拉桥转体系统主要分为球铰转体、平铰转体和转体支座转体,目前已建和在建的转体斜拉桥除了绥芬河转体斜拉桥采用平铰转体,紫气大路跨铁路立交桥,东丰路上跨铁路立交桥采用转体支座转体外,其余均采用球铰转体^[29]。

3.2 主要技术重难点

转体斜拉桥的转动体系统主要包括转体上盘、转体下盘、转动钢球铰、撑脚及滑道和转动牵引系统6个部分,在转体斜拉桥建设过程中,实现其转

体施工的关键主要有转动钢球铰、转动系统以及转体稳定性控制^[30]。

1) 球铰的设计与安装。随着转体斜拉桥转体重量的增加,球铰也由混凝土球铰转为性能更加优越的钢球铰。在转体斜拉桥的转体系统中,钢球铰分为上、下两个转盘球铰,同时在上下球铰之间安装聚四氟乙烯滑片并涂上黄油来减小转动摩阻力^[31]。钢球铰是整个转动体系的核心部分,它支撑着上部结构的全部重量,在平衡转体过程中维持着整个转体系统的平衡^[32]。需要将钢球铰的制作和安装精度放在首位。

2) 转动系统的设置。转动系统主要由牵引动力系统、防超转及微调系统和测量系统等组成,牵引动力系统一般包括牵引动力设备、牵引反力支座和牵引索,在斜拉桥转体的各个阶段提供牵引力^[33]。在制动阶段,如果未能转动至设计位置,可通过微调至设计位置。此外,可以设置限位装置防止超转。测量系统主要包括不平衡力矩、转体牵引力和转体速度等测试。通过测量转体过程中的相关数据,确保转体顺利完成。

3) 转体稳定性控制。平衡是转体过程中的关键问题,由于球铰系统的制作,安装偏差和桥体质量分布不均匀,转动时会产生不平衡力矩,为避免转体过程中转动体发生较大的摇晃或倾覆,必须要对脱离临时支架后的转动体进行不平衡称重测试,以完成平衡配重,保障转体过程的安全与稳定^[34]。同时,也有必要对转体斜拉桥的抗风稳定性进行测试,避免转体过程受风荷载的影响。

4 跨线转体桥施工安全风险管理的

为了提升转体施工安全与质量,保证转体施工的安全性及准确性,需要加强转体工程施工控制,提升配套技术的发展。

跨线铁路转体桥的施工一般在较复杂的环境中进行,且作业难度高于普通桥梁施工方法,对施工企业规避安全风险提出了更高的要求。施工企业应尽可能收集施工风险来源,多方位,多角度,多标准对可能存在的安全风险进行识别、评价和预案。

1) 安全风险识别。跨线铁路转体桥施工安全风险主要来源于4个方面:主梁施工风险、转体部分施工风险、现浇支架施工风险以及自然风险。跨线铁路转体桥施工安全风险识别可分为风险指标的

解析,风险清单的建立和桥梁转体施工安全风险识别报告3步进行^[35]。

2) 安全风险评价。对跨线铁路转体桥施工安全风险识别后,需要对可能发生风险的后果根据相关的标准进行评价。以确定风险的影响程度,以此对跨线铁路转体桥施工安全风险做出准确判断,确定风险处理的紧急程度,采取准确的、合理的风险控制措施。

3) 安全风险控制。安全风险管理的最终目标是进行风险控制,风险控制是对风险进行评价后,针对风险影响等级进行可行的处理预案^[35]。针对转体桥施工安全风险的控制措施主要包括风险减轻,风险转移,风险自留和风险利用等。

① 风险减轻:指承包方通过使用合适的施工方法和先进的施工技术,以降低发生风险的可能或降低发生风险造成的损失。

② 风险转移:指承包方面对无法承担且又无法规避的风险时,通常采用特定的举措将可能遇到的风险因素转移至其他单位或部门,达到减少自身承担施工风险造成的后果。

③ 风险自留:风险自留是指项目管理主体自身承担风险发生后的全部后果。该方案是没有减少或消除风险,也没能够转移风险。

④ 风险利用:应用有效的处理方法或者先进的工程技术,通过使风险因素转变为可以利用的条件,以达到提高经济价值的目的。

针对跨线铁路转体桥施工,应重点考虑转体过程中可能出现的风险,如转体中力矩不平衡、转体角度偏差等。此外,应加强对近距离施工机械的保养和管理,转体过程中,施工管理人员应时刻保持警惕,以规避安全隐患。

5 BIM技术在跨线铁路转体桥施工中的应用

基于三维数字的BIM技术最初应用于建筑行业,随后逐渐扩展到整个工程领域。在跨线铁路转体桥施工中,BIM技术还在起步阶段,应用相对较少。

京雄铁路连续梁桥跨越现有高速公路施工中应用了BIM技术,通过BIM技术进行施工全过程的模拟,优化了施工方案和资源配置,明确了质量控制的要点,实现了对施工过程的实时监管,促进

了项目的管控水平^[15]。采用 BIM 技术,国内高速铁路施工首次采用不平衡转体方法转体连续梁,并取得了转体成功。

在银西铁路跨定武高速转体桥施工中,采用 BIM 技术按照图纸建立了精细化模型,并结合 Revit 的标高测量功能直接对转动体型进行定位,不仅提高了定位精准度,还大大减轻了技术人员的复核工作量。

采用 BIM 技术还可以对施工现场、人员进行管理。施工现场情况复杂,BIM 技术应用成员可将发现的问题及时通过管理平台程序推送短信或邮件提请审批,决策者不需要在现场也可以实时发现现场的各种问题,并通过平台将回复意见推送至 BIM 技术人员,使施工现场的问题及时得到解决。为对现场工人进行安全管控和保障施工,可使用 BIM 施工管理平台制作包含施工人员个人相关数据的管理二维码,通过电脑端关联施工人员二维码,并使用 BIM 管理平台在模型指定位置关联监控摄像头,以实现对施工现场工作人员的动态管理,既方便施工人员的定位,确保其安全性,又便于监控工程进度与工作效率^[30]。

6 结束语

桥梁转体施工技术因其具有经济、高效的优势在桥梁施工领域发展迅猛。随着我国桥梁工程的建设需求逐渐增多,在建设难度上也会出现新的挑战。由此,对桥梁转体施工的发展提出以下建议:

1) 不断改进,总结和探索好的施工工艺,进一步完善转体施工理论体系;

2) 施工企业应加强实际工程与理论相结合,使实践与理论形成相互促进作用,不断提高施工人员的施工技能和施工经验;

3) 对桥梁转体施工过程中的细节进行合理的控制,充分发挥出工程整体的施工有效性,对提高我国交通领域的发展质量,以及实现施工方良好的经济效益有着重要的保障。

参考文献:

- [1] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景[J].铁道标准设计,2011(6):67-71.
CHENG F,ZHANG Q F,WANG J Q. Development status

and prospect of bridge swivel construction technology in China[J]. Railway Standard Design,2011(6):67-71.

- [2] 张琪峰.大吨位平转施工拱桥的转体系统构造设计与施工技术研究[D].南京:东南大学,2012.

ZHANG Q F. Structural design and construction technology research on swivel system of large tonnage horizontal swivel arch bridge[D]. Nanjing:Southeast University,2012.

- [3] 张健峰,钟启突.桥梁水平转体法施工的成就及发展[J].铁道标准设计,1992(6):19-28.

ZHANG J F,ZHONG Q T. Achievements and development of bridge horizontal swivel construction[J]. Railway Standard Design,1992(6):19-28.

- [4] 张联燕.拱桥转体施工方法的发展[C]//北京:国际公路运输技术交流会与展览会学术会议,1989.

ZHANG L Y. Development of arch bridge swivel construction method[C]//Beijing:International Highway Transportation Technology Exchange Conference and Exhibition,1989.

- [5] 王强.铁路转体桥施工控制技术研究[J].居舍,2020(4):64-65.

WANG Q. Research on construction control technology of railway swivel bridge[J]. Jushe,2020(4):64-65.

- [6] 张波.桥梁转体施工监理技术控制要点[J].建筑,2021(7):72-74.

ZHANG B. Technical control points of bridge swivel construction supervision[J]. Architecture,2021(7):72-74.

- [7] 张敏,李梦微,李盼,等.重庆铁路转体桥施工力学特性分析及监控[J].安阳工学院学报,2021,20(2):52-58.

ZHANG M,LI M W,LI P,et al. Analysis and monitoring of construction mechanical properties of Chongqing Railway swivel bridge[J]. Journal of Anyang Institute of Technology,2021,20(2):52-58.

- [8] 胡拔香,苏琨林,李东斌.枣菏高速跨京九铁路转体桥施工控制要点分析[J].四川水泥,2021(3):208-209.

HU B X,SU K L,LI D B. Analysis on construction control points of swivel bridge of Zaohe Expressway crossing Beijing Kowloon Railway[J]. Sichuan Cement,2021(3):208-209.

- [9] 韩琼.杨凌大道上跨陇海铁路转体T构桥施工工艺研究[J].工程技术研究,2020,5(23):68-69.

HAN Q. Study on construction technology of swivel T-frame bridge across Longhai Railway on Yangling Avenue[J]. Engineering Technology Research,2020,5(23):68-69.

- [10] 张汉涛.公路跨铁路转体桥施工关键技术分析[J].工程建设与设计,2020(22):86-87.

ZHANG H T. Key technology analysis of highway railway swivel bridge construction[J]. Engineering Construction and Design,2020(22):86-87.

- [11] 梁羽. 跨铁路既有转体桥施工技术[J]. 建筑技术开发, 2020,47(22):44-46.
LIANG Y. Construction technology of swivel bridge across existing railway line[J]. Architectural Technology Development, 2020, 47(22):44-46.
- [12] 张恒. 兴延高速上跨京包铁路钢箱梁转体施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(10):100-105.
ZHANG H. Research on swivel construction technology of steel box girder of Xingyan Expressway crossing Jingbao Railway[J]. Railway Construction Technology, 2020(10):100-105.
- [13] 赵琳, 李梦微, 刘晓亮, 等. 重庆铁路转体桥不平衡重称与配重试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020,29(4):8-14.
ZHAO L, LI M W, LIU X L, et al. Experimental study on unbalanced weight weighing and counterweight of Chongqing Railway swivel bridge[J]. Journal of Henan Institute of Urban Construction, 2020, 29(4):8-14.
- [14] 方兵. 首座连续梁桥高墩墩中转体施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(7):55-59.
FANG B. Research on the construction technology of the first continuous beam bridge with high pier and middle rotation[J]. Railway Construction Technology, 2020(7):55-59.
- [15] 彭志新. BIM 技术在京雄铁路转体连续梁桥施工中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2020(7):67-70.
PENG Z X. Application of BIM technology in construction of swivel continuous beam bridge on Beijing-Xiong' an Intercity Railway[J]. Railway Construction Technology, 2020(7):67-70.
- [16] 沈显才. 铁路转体桥施工控制技术[J]. 交通世界, 2019, 515(29):108-109.
SHEN X C. Construction control technology of railway swivel bridge[J]. Traffic World, 2019, 515(29):108-109.
- [17] 刘晋权. 铁路连续梁转体施工过程控制及技术要点[J]. 建材与装饰, 2019(1):275-277.
LIU J Q. Process control and technical points of railway continuous beam swivel construction[J]. Building Materials and Decoration, 2019(1):275-277.
- [18] 刘强. 连续梁桥墩底转体施工技术研究[J]. 交通世界, 2020(33):98-99.
LIU Q. Research on swivel construction technology of continuous beam pier bottom[J]. Traffic World, 2020(33):98-99.
- [19] 郑莹子. 大温差地区连续梁转体施工综合技术研究及应用[J]. 城市建设理论研究, 2016(35):109-110.
ZHENG Y Z. Research and application of continuous beam swivel construction technology in large temperature difference area[J]. Theoretical Research on Urban Construction, 2016(35):109-110.
- [20] 王伟. T型刚构桥转体施工监测与控制技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018.
WANG W. Research on monitoring and control technology of T-shaped rigid frame bridge swivel construction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2018.
- [21] 袁竹, 钟伟. 单箱多室连续梁桥不平衡重称试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2019, 27(3):35-42.
YUAN Z, ZHONG W. Experimental study on unbalanced weight of single box multi room continuous girder bridge[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2019, 27(3):35-42.
- [22] 赵翔. 温州特大桥 T型刚构桥转体施工控制技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016.
ZHAO X. Research on swivel construction control technology of Wenzhou T-shaped rigid frame bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [23] 秦爱红, 李克建, 薛晓辉. 基于有限元模型的和平路高架桥转体施工配重选择[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2019, 18(4):80-83.
QIN A H, LI K J, XUE X H. Counterweight selection for swivel construction of Heping Road viaduct based on finite element model[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Vocational and Technical College, 2019, 18(4):80-83.
- [24] 王秋环, 胡光虎. T型刚构桥转体施工的研究与应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(18):121.
WANG Q H, HU G H. Research and application of T-shaped rigid frame bridge swivel construction[J]. China New Technology and New Products, 2010(18):121.
- [25] QUARANTA G, MARANO G C, TRENTADUE F, et al. Numerical study on the optimal sensor placement for Historic Swing Bridge dynamic monitoring[J]. Structure Infrastructure Engineering, 2014, 10(1):57-68.
- [26] 彭晶蓉. 混凝土部分斜拉桥结构体系与模型试验研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
PENG J R. Structural system and model test of concrete partial cable stayed bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [27] 胡素敏. 桥梁转体施工方法及发展应用[J]. 交通世界, 2008(1):129-131.
HU S M. Bridge swivel construction method and its development and application[J]. Traffic World, 2008(1):129-131.
- [28] 杨海鹏, 徐松, 朱利明, 等. 我国转体斜拉桥发展综述[J].

- 现代交通技术,2017,14(6):38-43.
- YANG H P,XU S,ZHU L M,et al. Overview of development of swivel cable stayed bridges in China[J]. Modern Transportation Technology,2017,14(6):38-43.
- [29] 刘建奇. 浅谈斜拉桥转体施工工艺[J]. 公路交通科技,2012(4):167-170.
- LIU J Q. Discussion on swivel construction technology of cable stayed bridge[J]. Highway Traffic Science and Technology,2012(4):167-170.
- [30] 成敏超. 转体斜拉桥转体施工关键技术控制[J]. 北方交通,2008(9):59-61.
- CHENG M C. Key technology control of swivel construction of swivel cable-stayed bridge[J]. Northern Communications,2008(9):59-61.
- [31] 胡叶江. 连续梁墩顶转体可拆卸球铰结构分析及试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- HU Y J. Analysis and experimental study on swivel detachable spherical hinge structure of continuous beam pier top[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.
- [32] 师建军. 某跨线斜拉桥转体施工关键技术[J]. 施工技术,2017,46(5):85-87.
- SHI J J. Key technologies for swivel construction of across line cable-stayed bridge[J]. Construction Technology,2017,46(5):85-87.
- [33] 徐孟. 跨既有铁路线连续箱梁桥转体施工技术分析[J]. 门窗,2019(18):110-111.
- XU M. Analysis on swivel construction technology of continuous box girder bridge across existing railway line[J]. Doors and Windows,2019(18):110-111.
- [34] 孙健. 连续梁桥墩底转体施工技术[J]. 资源信息与工程,2020,35(1):97-99.
- SUN J. Construction technology of continuous beam pier bottom rotation[J]. Resource Information and Engineering,2020,35(1):97-99.
- [35] 杨海贝. T构转体桥施工安全风险研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2020.
- YANG H B. Research on construction safety risk management of T-frame swivel bridge[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2020.
- [36] 张裕超,张学钢,李立功. BIM技术在转体桥施工中的应用——以银西铁路跨定武高速公路转体桥为例[J]. 河北工业科技,2018,35(5):341-347.
- ZHANG Y C,ZHANG X G,LI L G. Application of BIM technology in swivel bridge construction-taking the swivel bridge of Yin Xi Railway crossing Ding Wu Expressway as an example[J]. Hebei Industrial Science and Technology,2018,35(5):341-347.



第一作者:徐春东(1982—),男,高级工程师,硕士,毕业于华东交通大学。研究方向为桥梁工程施工。E-mail:467893078@qq.com。



通信作者:刘美豪(1995—),男,硕士研究生,研究方向为铁路环境振动。2018年本科毕业于武汉生物工程学院。E-mail:1215876725@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)