文章编号：1671－8496－(2025)－03－0026－06

跨越既有铁路混凝土桥梁转体系统设计与应用

路文超
（中铁十八局集团第三工程有限公司，河北 涿州 072750）

摘　要：在长（治）襄（垣）城际连接线跨安居铁路立交桥项目中，针对结构稳定性与精准性的提升问题，对T形预应力混凝土连续箱梁转体技术开展了实践研究。为了安全高效地跨越既有铁路线路，考虑到结构摩擦系数和抗倾覆力矩等关键参数对转体系统性能的显著影响，开发了一种新型转体系统。该系统融合了球铰、撑脚、滑道等关键构件，以及转盘、牵引设备、助推和微调机制，形成一套复杂的动态转体架构。在此基础上，对桥梁下部结构的承载特性进行了数值分析与优化，进一步制定了桥梁转体前后的控制策略。经验证，该转体系统在应力分布、侧应力变化以及桥体实测标高等关键指标上展现出卓越的稳定性与精准性，转体过程中的梁端振动与加速度变化均维持在较低水平，确保了系统转体前后位置的精确对齐，证明了其在工程实践中的高效性与可靠性。

关键词：既有铁路；混凝土桥梁；转体系统设计
中图分类号：U445.4　　**文献标识码**：A

Design and Research on the Rotating System of Concrete Bridge Spanning the Existing Railway

LU Wenchao
（China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou 072750, Hebei, China）

Abstract: In the research and practice of the swivel technology for the T-shaped prestressed concrete continuous box girder of the Changzhi-Xiangyuan Intercity Connector Bridge spanning the Anju Railway, special attention was paid to improving structural stability and precision. Considering the significant impact of key parameters such as structural friction coefficient and anti-overturning moment on the performance of the swivel system, efforts were dedicated to developing a novel swivel system aimed at safely and efficiently crossing existing railway lines. This system integrates crucial components such as spherical hinges, supporting feet, slideways, as well as turntables, traction equipment, boosters, and fine-tuning mechanisms, forming a complex dynamic swivel framework. On this basis, numerical analysis and optimization were conducted on the bearing characteristics of the bridge substructure, and control strategies before and after the bridge swivel were further formulated. Verified through case studies, the swivel system demonstrated exceptional stability and precision in key indicators such as stress distribution, lateral stress changes, and actual bridge elevation measurements. The vibration and acceleration changes at the beam end during the swivel process were maintained at low levels, ensuring precise alignment of the system's position before and after the swivel, which fully demonstrates the efficiency and reliability of the system design in engineering practice.

Key words: existing railway; concrete bridge; rotating system design

交通基础设施建设在国家发展与民生福祉中占据举足轻重的地位，大量城市正积极增加对铁路、公路以及桥梁等基础设施的投资。在此背景下，土地资源的稀缺性使得道路网络交叠问题日渐成为桥梁建设的关键限制因素，众多项目采纳了创新的平转法施工技术。该技术又称转体技

收稿日期：2024-09-26
作者简介：路文超，助理工程师，本科，研究方向为铁路隧道及桥梁施工领域

术，其核心在于异地制造桥梁结构，并通过精密的转动系统及千斤顶等机械设备，实现桥梁组件的精确就位[1]。

在深入研究转动系统的动力学机制时，明显观察到其运动特性和动力参数之间存在高度的复杂性。这种复杂性的根本原因在于，当前对于此类系统的结构设计与计算方法尚缺乏统一且严苛的标准。为确保铁路混凝土桥梁转体施工的安全与高效，需深入进行理论分析与精确计算，构建专门的设计方法，为铁路桥梁转体工程提供理论与技术支撑，确保施工安全顺畅。

1 跨越既有铁路混凝土桥梁转体系统

1.1 转体系统结构设计

本研究对现有的铁路混凝土桥梁转体技术进行了深入探讨，桥梁转体系统结构如图 1 所示。对于曲线半径小、转体跨度大、桥梁宽度小、与铁路斜交的桥梁，横桥向结构重心与桥墩中心偏离较大，一旦出现不平衡则不易配重。为了解决这一问题，通过球铰预设偏心的方法，即在球铰的制造和安装过程中，根据结构重心的偏离量预设一定的偏心距，使得转体时球铰的中心与结构重心重合，从而保持转体结构的平衡。

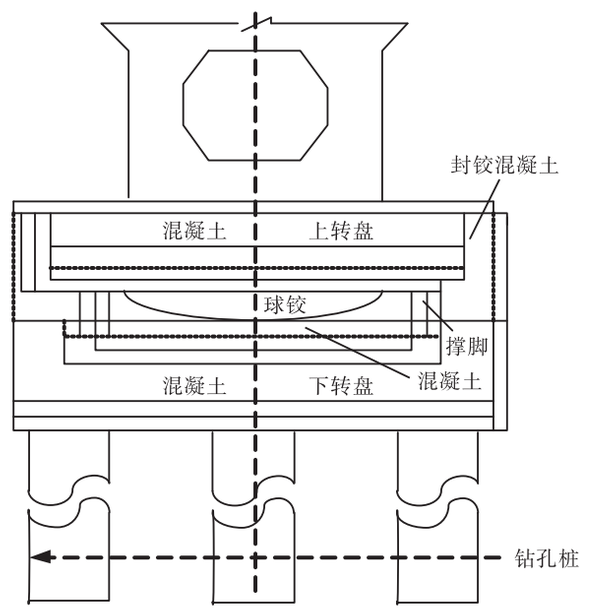

图 1　转体系统结构

转动体系的工作原理主要基于下转盘、球铰、上转盘和转动牵引系统的协同作用。下转盘作为支撑转体结构的基础，在转体过程中保持固定不动，为整个转体系统提供支撑。球铰是平转体系的核心，通过其内部的球面接触和滑动摩擦，实现上转盘相对于下转盘的平稳转动。上转盘则与桥梁主体结构相连，通过球铰与下转盘连接，实现整个桥梁结构的转体。在转体过程中，转动牵引系统提供必要的牵引力，通过牵引索或牵引杆与上转盘相连，驱动上转盘相对于下转盘转动。牵引力的大小和方向需要根据转体过程中的力学分析和计算来确定，以确保转体过程的平稳和安全。此外，撑脚和滑道的设计也是转动体系工作原理的重要组成部分。撑脚作为转体时支撑结构平稳的保险腿，在转体过程中起到稳定结构的作用。滑道则为撑脚提供滑动轨道，使得撑脚能够在转体过程中平稳地滑动，避免对转体系统造成额外的摩擦和阻力。撑脚与滑道的设计须充分考虑转体时的受力情况和稳定性要求，以确保转体系统的可靠性和安全性。

综上所述，通过一系列的设计、高质量的材料选择与质量控制以及施工监测与调整等措施，结合转动体系的工作原理，可以确保转体系统的平稳、安全运行。

1）球铰。球铰的特征在于采用凹面与凸面相结合的构造，由高性能的钢球面板加工而成，如图 2 所示。这种设计的核心宗旨在于优化中心转盘与整体系统的契合度，以提高结构的运动稳定性和操作效率。为确保球铰结构的稳定性与准确性，通过使用高性能混凝土进行固定连接，强化球铰的稳定性；同时在球铰背部增设肋条结构，以增强其抗变形能力，保障在长途运输过程中的结构完整性与安全性。具体材料参数如表 1 所示。球铰安装作业时，必须确保下层混凝土的强度已达到设计规定的 25%[2]，以此为基础保障安装质量。此外，安装完成后，骨架顶面的相对高度应严格控制在 5 mm 以内，以确保结构的一致性和预定的精准度。

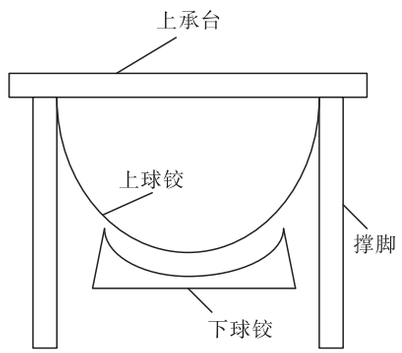

图 2　球铰示意图

2）撑脚、滑道设计。采用六撑脚布局方案，并在相应位置规划安装滑道系统，如图 3 所示。

表1 球铰体系的材料参数

材料	参数	取值
C40	弹性模量/MPa	35 000
	泊松比	0.2
	密度/(kN/m^3)	2 600
	线性膨胀系数	0.000 01
Contal174	摩擦系数	0.1/0.06
C50	弹性模量/MPa	35 500
	泊松比	0.2
	密度/(kN/m^3)	2 600
	线性膨胀系数	0.000 01
Q345	弹性模量/MPa	21 000
	泊松比	0.3
	密度/(kN/m^3)	7 800
	线性膨胀系数	0.000 012

考虑到转体系统稳定性的核心要求，采纳了双圆柱形撑脚设计，并在其内部填充混凝土以增强结构稳定性。此外，为了进一步提升系统的稳固性，滑道被精心设计并安装于同一水平面内，确保其偏差在0.5 mm的严格标准内[3]。所有撑脚与滑道单元均在场外进行精确的设计与制造，并在生产过程完成后，安全运输至施工现场。在安装阶段，为促进滑道与撑脚间的顺畅滑动，采取了20 mm厚的钢板进行支撑，确保转体过程的流畅性与安全性[4]。

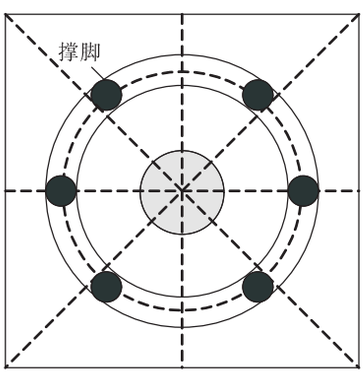

图3 滑道及撑脚布置

3）转盘设计。上转盘为正方形，边长尺寸设计为13 m，高度为2.5 m。下转盘采用钢绞线布局结合分层混凝土浇筑的方法。同时注重养护管理的加强，精确控制温度变化所导致的形变，并显著减少潜在的裂缝问题[5-6]。为确保该转盘系统的结构稳定性[7]，施工过程被严格划分为4个阶段：①上转盘施工，这一环节的完成为首次预应力筋拉伸作业的顺利开展创造了必要条件，是项目推进的关键节点；②在首次预应力筋拉伸作业圆满结束后、解除支架支撑前，须及时开展新一轮的预应力张拉工作，以保障结构的稳定性；③第二批预应力钢筋张拉操作经确认有效实施后，方可对支撑结构进行有序拆卸，这一步骤对整体施工安全至关重要；④转体结构的上下转盘接合部位在使用过程中主要承受压力性负荷。因此，在设计时必须严格把控，确保该区域的最大压应力值始终处于7 MPa的安全界限内，为整个结构在后续长期使用中的安全性与可靠性奠定坚实基础[8]。

4）牵引力设备。实施牵引相关设备[9]如表2所示。在牵引操作中，关键步骤之一为预埋钢绞线，使钢绞线通过千斤顶后精确地平行缠绕两次以确保紧密度。此过程的核心在于通过拽引机制，钢绞线能有效驱动转体结构的旋转运动。此外，必须对其表面进行去锈和清洁处理，以规避潜在的安全风险。

表2 牵引设备组成表

设备名称	数量	备注
液压泵台	5	供油系统
千斤顶	1	预紧牵引索
主控台	2	配备远程笔记本电脑
连续千斤顶	1	动力系统
液压油泵	2	预紧、助推供油设备

5）助推结构设计。当牵引系统面临功能失效的紧急状况时，实施基于力学原理的应急策略，即在转体系统的顶端部署12根承载能力高达2 000 kN的高强度钢绞线[10-11]。

1.2 转体系统模块设计

转体系统模块具体内容如图4所示。转体模块详细设计如下。

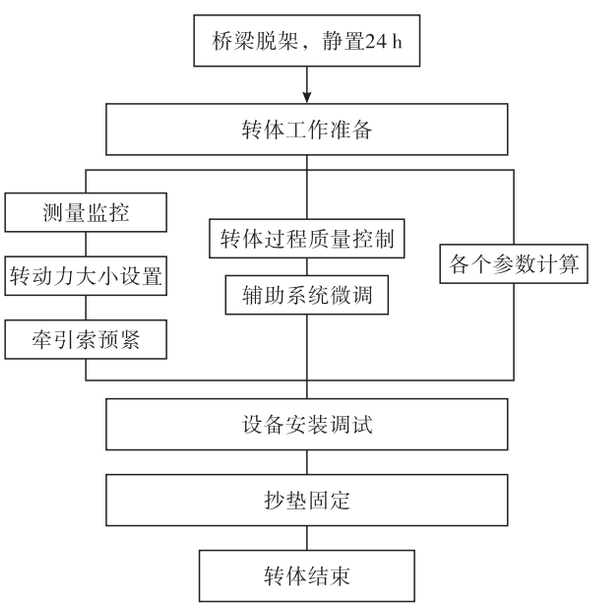

图4 转体模块设计内容

1.2.1 转体下承台受力参数详细计算

在结构工程领域，提升封铰区域承台的刚性，能够显著促进在后续荷载影响下桩基反力分布的均衡化过程。这种策略实质上促成了一种渐进式的桩反力均匀分配机制[12]。因此基于承台与桩之间的相对刚度系数β，可以准确推导出最佳承台厚度的计算公式：

$$\beta = (\sqrt{B/L}E_R HaD_P)/(\sqrt[3]{K_P}Ds_a) \tag{1}$$

式中：L、B 分别代表承台参数；E_R 代表承台混凝土弹性模量；H 代表承台厚度值；a 代表经验系数；D_P 代表桩径；K_P 代表桩竖向支撑刚度值；D 代表荷载作用下周边到桩中心最近距离；s_a 代表规则参数。

转体下承台最小刚度系数[13]依据公式（2）计算：

$$H = \frac{(\sqrt[3]{K_P}Ds_a)(1+3\eta)}{(\sqrt{B/L}E_R aD_P)} \tag{2}$$

式中：η 代表转体总重占结构总重比例。

通过对关键性能指标的计算，可确保所设计的承台厚度完全满足初始设计规范中所预定的性能标准。

1.2.2 平转施工抗倾覆计算

抗倾覆性计算是通过对环形轨道及支撑结构的尺寸进行细致的量化评估[14]，从而确保支撑系统的承载能力以及球铰接中心的抗剪性能达到设计要求。

1）撑脚和环道计算：

$$T = R' \times F \tag{3}$$

式中：R'代表球铰体系环道半径值。

支撑构件所承受的上部结构荷载通常表现为分布式荷载形式。须对撑脚的受力情况进行精确计算：

$$N_C = G \times (e + e_1)/(R' + e_1) \tag{4}$$

式中：G 代表上部结构荷载等效集中力；e 代表偏心力；e_1 代表轴心力。

2）撑脚和环道间隙计算：若撑脚与环道间的间隙尺寸取值过大，将不可避免地引起转动提杆的剧烈振动，进而削弱整体的稳定性；反之，若间隙尺寸偏小，则可能导致撑脚与环道间的相互干涉，引发机构转动的阻滞。其具体关系如下式：

$$\sin\frac{\theta}{2} = \sqrt{(R' - b/2 - \sqrt{R^2 - (R+h)^2})^2 + \delta^2} \tag{5}$$

式中：h 代表高度值；δ 代表间隙值。

为确保球铰接面的紧密闭合。依据弹性力学的相关理论，可以对半平面体边界上的作用力进行集中效应的明确解析。其具体公式如下：

$$\sigma_\rho = -\frac{2F}{\pi}\frac{\cos\theta}{\rho} \tag{6}$$

式中：F 代表集中力大小；θ 代表球面径向角；ρ 代表球的半径。

3）牵引力计算：

$$M = (2\pi R^2 \mu\sigma)/3 = 2\mu RW/3 \tag{7}$$

式中：R 代表球体半径；W 代表球体重量值；μ 代表球铰转动摩擦系数。

球铰下转盘混凝土应力：

$$\sigma = Kd/(\pi D^2/4) \tag{8}$$

式中：D 代表下盘与球铰接面的直径；K 代表偏移效应增大系数；d 代表转体的重量。

4）不同受力情况下拉杆模型构建[15]：鉴于基础承台在承受动态荷载过程中所面临的复杂条件，其对应的拉压杆配置形态亦呈现出一种适应性变化。这种变化可用下式表示：

$$T_s = F(a+x)/(h_0 - c) \tag{9}$$

式中：F 代表等效集中力；x 代表桩中心到墩身边缘距离；h_0 代表混凝土强度；c 代表底部拉杆内力值。

如上式所示，通过对特定参数的精确调整，可以显著提高系统的整体稳定性。基于以上步骤完成跨越既有铁路混凝土桥梁转体体系的构建，具体流程图如图 5 所示。

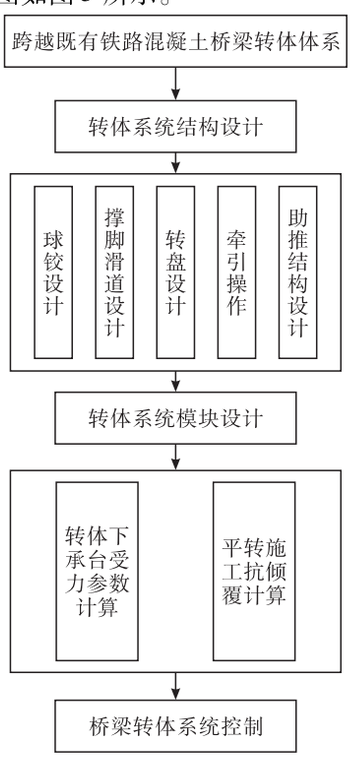

图 5　跨越既有铁路混凝土桥梁转体体系流程图

1.2.3 桥梁转体系统控制

桥梁转体施工的技术流程关键在于精确定位与施工安全。以下为关键控制流程及步骤：

1）转体工作工序：对现行支撑体系的拆卸、砂箱的移除、滑道的全面清洁及润滑处理、箱梁平衡配重进行复验，以及对转体牵引设备的安全性进行复核。此外，还须确保电力供应与主控系统的正确配置，以保证在主电源断绝情况下，发电设备能自动介入工作。

2）转体控制工序：在正式开展转体施工前，组织实验性的转体动作，将试验的反馈数据整合进入监测方案，进而形成一组参数集，该参数集将作为实施正式转体操作过程中的关键参考依据。在设备完全检测无误后，与地方气象部门进行交流，以获取施工当日的具体天气状况，确保排除恶劣气候条件对转体工程造成的不利影响。在转体结构的操作过程中，一个高度集成的监控系统必须确保所有关键数据能够即时反馈至控制枢纽，以便为操作决策提供数据支持。在转体操作阶段，还须确立相应的转体平移技术指标，具体见表3。

表3 转体平移技术指标

序号	指标	详细参数
1	主梁端部水平线速度	小于等于1.5 m/min
2	结构重心	偏心值小于等于0.1 m
3	平转速度	小于等于0.02 rad/min
4	平转角度	79.5°

3）对转体施工的精确定位控制工序：转体梁端部转至预定点位相距100 cm处，必须采取一系列高精度的测量与调整措施，确保精确定位。转体过程必须安装并调整限位装置，以防发生过转现象。此外，通过在梁端部署先进的水平微调系统，实现对梁体横向及纵向标高的精确调控。在转体施工的安全保障方面，须对撑脚、球铰等重要构件的应力状态进行连续的计算与实时跟踪，以确保任何潜在的风险都能得到及时识别与有效调整。

4）限位控制和球铰约束固定：在点动梁体中心线逼近预定点时，采取惯性定位技术中止牵引动作，确保转体系统的精确定位。转体至设计角度后，系统进入暂停状态，以便进行后续的点动微调，确保结构的精准对接。转体装置定位后，还须对桥梁的高度及平面位置进行严格检测，以验证其是否符合设计规范。

2 工程案例应用

长（治）襄（垣）城际连接线跨安居铁路立交桥设计为T形预应力混凝土连续箱梁，转体角度为90°。距既有潞安铁路最近距离只有5 m，现场施工工作面十分狭窄。主桥部分采用2×10^5 m的转体T构，9条铁路线从该转体桥下穿，高峰时每天至少20趟火车通行，施工风险高，科技含量高，施工难度大。跨度为225 m，宽度为31 m，转体部分总重17 100 t。梁体构造采取了T构设计理念。采用单箱三室斜腹板箱形截面，在中央支点区域，梁高达到6.8 m，以增强承载能力；而在端部，梁高适度降低至2.8 m，以优化结构重量及成本。下转盘、转体支座、上转盘及转体牵引系统构成了核心的转体系统。该系统的转盘结构采用了环道与中心支撑相结合的独特旋转机制，实景图如图6所示，转体系统示意图详见图1。通过对该案例的详尽分析，揭示在现实操作环境中，此类转体系统设计参数的优化对整体工程效率和结构安全性的重要影响。

图6 转体系统实景图

在案例分析中，首先，对桥面设备、机具及材料进行彻底清空，以确保实验的初始状态不受干扰；其次，对上转盘的撑脚间隙开展深入探查，并同步对转体梁结构进行高精度高程测定；在移除砂箱及支撑架构的过程中，严格避免对位移监测设备产生干扰；直至结构体达到预定的稳定性状态，再对转体梁的多个性能参数进行全方位的测试分析。

倾覆风险的存在对工程安全提出了严峻挑战。在转体阶段，侧应力、振幅及加速度的波动显著，反映出该阶段操作的平稳性不足，大幅增加了抖动现象的发生概率。此外，全桥实测标高与转动标高的较大偏差揭示了转体幅度的广泛波动，因此偏差的控制相对困难。本案例施工方案聚焦于转体施工技术的关键参数优化，通过对下转盘应力、侧向应力、振动幅度、加速度、转动

标高等核心指标的严格监控与调整，确保结构安全与稳定性。

1）下转盘应力值分析：对铁路混凝土桥梁转体系统的下转盘应力进行分析，如表 4 所示。转体动作实施前后的压力差值维持在较低水平，表明在整个转体过程中，下部结构的应力状态相对保持稳定。

表 4　下转盘应力值分析

测点	转体后压力/MPa	转体前（配重后）压力/MPa
1	16. 88	16. 23
2	13. 69	13. 26
3	14. 99	14. 56
4	15. 22	14. 22
5	15. 59	15. 24
6	16. 02	15. 37
7	16. 03	15. 64
8	16. 69	16. 33
9	12. 86	12. 33
10	15. 23	14. 24

2）转体过程中的侧应力变化分析：转体过程中的应力变化具体如图 7 所示。在旋转体实验过程中，侧向应力变化的幅度相对较低，这一现象进一步验证了转体运动阶段的稳定性。

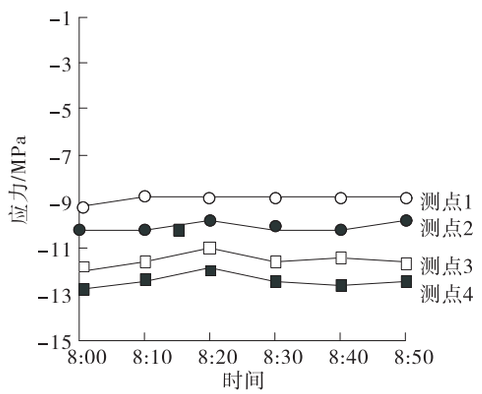

图 7　转体过程中侧应力变化分析

3）转体过程中运动参数变化情况分析：通过精确地测量与记录，得出了转体在旋转过程中的关键运动参数变化数据。具体如表 5 所示。在转体操作期间，系统所展现的最大竖向振动幅度严格控制在 1 mm 以下。同时，竖直方向上的全程控制以及横向加速度的最小标准均符合既定规范要求。因此该系统能够有效地确保转体运动的平稳性，显著降低大幅度振动发生的可能性。

4）全桥实测标高与转动标高对比：转体桥梁转体系统转动高度和桥梁实际结构高度之间的精准比对情况如图 8 所示。对图 8 进行分析，两

表 5　振幅、加速度统计表

测点位置	最大值
梁端横向振幅/mm	0. 03
梁端竖向加速度/（m · s^{-2}）	0. 003
梁端竖向振幅/mm	0. 16
梁端横向加速度/（m · s^{-2}）	0. 004

者之间存在的差异处于可控范围之内，充分验证了该转体系统的设计精确性和实用效能。

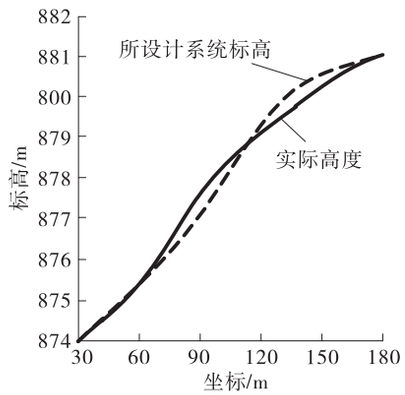

图 8　转体桥梁转体系统转动高度和桥梁实际结构高度对比情况

5）转体偏差分析：转体偏差情况如图 9 所示。在多轮实验中，该系统的转体偏差均维持在较低水平。这一发现揭示了该系统在定位精度方面的显著优势，即其具备将运动体精确导向预定位置的能力，有效缩减了旋转过程中的误差幅度，从而显著增强了整个系统的操作效能。

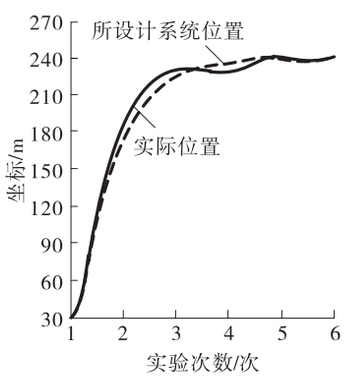

图 9　转体偏差

3 结语

本文针对现有铁路混凝土桥梁的转体技术进行了深入研究，并提出了一种创新的转体系统。该系统融合了球铰、撑脚、滑道、转盘及牵引力设备等多个关键技术组件。通过对关键参数如抗

（下转第 54 页）

4 结论

本文计算推导了小型无人船直流推进电动机的固有机械特性表达式，在此基础上得到电枢回路串电阻、降低电枢电源电压、减弱磁通的人为机械特性表达式，在理论分析各机械特性的基础上，利用MATLAB软件对一台他励直流电动机的机械特性进行仿真，得到以下结论：

（1）固有机械特性为一条下倾的直线，其与纵轴交点的纵坐标即为理想空载转速 n_0。

（2）对于电枢回路串电阻的人为机械特性，理想空载转速不变，而直线下倾的斜率变大，电枢回路所串电阻越大，直线下倾的斜率就越大。

（3）对于降低电枢电源电压的人为机械特性，直线下倾的斜率不变，理想空载转速降低，电枢电源电压越低，则理想空载转速也越低。

（4）对于减弱磁通的人为机械特性，理想空载转速增大，直线下倾的斜率也变大。在电动机实际工作中应避免磁通 Φ 减小幅度过大，否则会产生电动机理想空载转速过高、负载变化时速度变化幅度过大等问题。

参考文献：

[1]盛肖炜,殷小莉,陈俊,等. 小型水环境监测无人船的研究[J]. 广州城市职业学院学报,2024,18(2):78-83.

[2]王楠. 水质监测用无人船的自主导航研究及其系统开发[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.

[3]朱宝星,于复生,梁为,等. 无人式水面航行器的国内外发展趋势[J]. 船舶工程,2020,42(2):20-23.

[4]张树凯,刘正江,张显库,等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运,2015,38(9):29-36.

[5]陈永泽,舒军勇,王真亮,等. 基于GPS定位的无人艇自主导航[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(8):117-121.

[6]及轶嵘. 云洲智能:“万能”无人船[J]. 创业邦,2014(8):40－41.

[7]张文杰. 基于深度学习的无人艇运动姿态预报[D]. 上海:上海大学,2020.

[8]宋云鹏. 智能型多参数水质监测采样无人船系统设计[J]. 科技与创新, 2019(19): 51-55.

（上接第31页）

倾覆力矩、撑脚与环道间隙的精准计算，制定了转体前后的一系列控制策略。这一策略的实施显著提升了混凝土桥梁转体系统的操作性能和效率。实验数据表明，该系统展现出卓越的稳定性和转体精度，确保了结构能够准确到达既定位置，体现了技术上的创新和领先。同时，该系统能够简化工艺流程、缩短建造周期、提高施工安全性、降低干扰与风险，有效优化了成本控制并提升了施工品质。但是受制于研究时间，该系统仍存在某些局限，未来的研究工作将进一步优化，以期在跨河及跨深沟等桥梁工程中推广该技术，拓展其在更广泛的工程领域的应用潜力。

参考文献：

[1]杜明康. 考虑滑道不平顺条件下大跨度箱梁桥转体安全性能研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2023.

[2]陶然,陈晓辉. 铁路桥梁钢门式墩设计研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(S1):163-167.

[3]王琦,靳文强. 日本大跨高速铁路桥:三内丸山跨线桥设计与施工[J]. 世界桥梁,2019,47(6):1-5.

[4]高玉祥,董晓峰,韩峰. 基于多维空间相似理论的铁路桥梁智能设计方法[J]. 铁道标准设计,2020,64(12):71-75.

[5]姚南. 时速400 km高速铁路50 m跨钢－混凝土结合梁设计[J]. 铁道标准设计,2020,64(S1):172-176.

[6]王淑桃. 铁路桥梁混凝土工程造价大数据计算模型优化设计[J]. 混凝土,2020(2):175-178.

[7]刘尊稳. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁抗震性能及设计方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(5):1080.

[8]肖冲. 架桥机更换既有铁路桥梁施工技术[J]. 施工技术,2019,48(9):114-116.

[9]王崇淦,蒋志琳,朱禹,等. 大面积堆土荷载对既有高铁桥梁桩基承载性能影响分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(5):1090-1096.

[10]肖宇松,陈银伟. 极不平衡桥梁转体球铰设计方法[J]. 铁道建筑,2019,59(11):26-28.

[11]李辉,邹永伟,徐升桥,等. 永临结合的墩顶转体法在铁路连续梁桥施工中的应用研究[J]. 铁道标准设计,2019,63(2):66-70.

[12]丁仕洪. 96 m钢－混组合桁架梁桥异位成型及转体施工技术[J]. 桥梁建设,2020,50(1):116-120.

[13]张文斌,文功启. 某中低速磁浮试验线桥梁总体设计[J]. 铁道标准设计,2019,63(6):93-97.

[14]李俞凛,崔凤坤,苗雷,等. 基于新式撑脚的宽幅超重桥梁转体施工工艺及力学性能研究[J]. 公路,2020,65(11):220-223.

[15]占有志. 超大吨位非对称曲线梁斜拉桥转体施工技术[J]. 施工技术,2019,48(11):54-58.