

曲线连续梁转体施工中不平衡力矩与配重技术研究

周斌斌

(中铁建大桥工程局集团西北工程有限公司, 宁夏回族自治区 银川 750000)

摘要: 为解决曲线连续梁转体施工中不平衡力矩控制难题,以跨包兰铁路特大桥“40 m+56 m+40 m”的预应力混凝土连续梁为研究对象,采用球铰转动测试法,实测22#墩和23#墩的不平衡力矩、摩阻力矩及偏心距等关键参数。结果表明,2墩转体梁的球铰摩阻力矩均小于不平衡力矩,重心均偏向大里程侧,初始偏心距分别为9.9 cm和6.7 cm。经方案比选,采用梁体纵向倾斜配重方案,在22#墩小里程侧布设2.5 t配重,将偏心距优化至6.5 cm,23#墩无需配重。最终提炼出大跨度曲线转体梁桥“偏心距超阈值时需有针对性地配重,达标则免配”的配重调控规律,可为同类工程的施工提供技术参考。

关键词: 连续梁;转体施工;不平衡称重;配重方案;桥梁工程

中图分类号: U445

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0370-06

Research on Unbalanced Moment and Counterweight Technology in Rotating Construction of Curved Continuous Beams

ZHOU Binbin

(China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Northwest Engineering Co., Ltd., Yinchuan 750000, China)

Abstract: To address the challenge of unbalanced moment control in the rotating construction of curved continuous beams, and taking the 40 m+56 m+40 m prestressed concrete continuous beam of the super-large bridge spanning the Baotou-Lanzhou Railway as the research object, the spherical hinge rotation test method is used to measure the key parameters such as unbalanced moment, friction resistance moment and eccentric distance of Piers 22# and 23#. The results show that the spherical hinge friction resistance moments of the two pier rotating beams are all less than the unbalanced moment. The center of gravity is all inclined towards the long mileage side. The initial eccentric distances are 9.9 cm and 6.7 cm respectively. After scheme comparison, the longitudinal tilting counterweight scheme for the beam body is adopted. A 2.5-t counterweight is arranged on the short-distance side of Pier 22, and the eccentric distance is optimized to 6.5 cm. No counterweight is needed for Pier 23. Finally, a counterweight control rule is extracted for long-span curved rotating beam bridges. When the eccentric distance exceeds the threshold, the targeted counterweights should be added. If meeting the standard, no counterweight is required, which provides the technical reference for the construction of similar projects.

Keywords: continuous beam; rotating construction; unbalanced weighing; counterweight scheme; bridge engineering

0 引言

国外关于转体施工技术的研究较早,20世纪80年代,德国在莱茵河大桥施工中采用了球铰转体技术,实现大吨位桥梁的安全转体,为该技术的工程应用奠定基础。但彼时的研究多聚焦于直线梁结构,对曲线梁体转体的专项技术探索较少^[1-2]。近年来国内在转体施工技术研究方面也取得了长足发展。例如,曾华等^[3-5]针对直线连续梁施工,提出基于千

斤顶集群的牵引控制方法,精度可控制在5 cm以内;尚武高等^[6-7]研究了大跨度连续梁转体的称重配重技术,但未涉及曲线梁体的预偏心设置问题。现有研究普遍存在对曲线梁体不平衡力矩控制不足、转体过程中动态监测体系不完善等问题。因此,虽然本工程采用的曲线梁体转体施工技术无法直接应用于其他同类工程,但其研究成果可为同类桥梁转体施工提供技术依据,有效提升后续工程施工的安全性与稳定性。

1 工程概况

跨包兰铁路特大桥为单线桥,线路全长1 576.23 m,

收稿日期: 2026-01-05

作者简介: 周斌斌(1994—),男,学士,工程师,从事建筑工程施工和设计工作。

里程范围为“DIK4+800~DIK36+050”。由于线路在“DIK11+800”附近跨越包兰铁路,因此,该桥采用“40 m+56 m+40 m”预应力混凝土连续梁转体施工方案,转体梁段平曲线半径 $R=800\text{ m}$,曲线超高值为 30 mm 。

施工采用“先平行于既有铁路悬臂浇筑,再转体合拢”的方案,涉及 22#和 23#2 个主墩:22#墩邻近定银线“K1641+300~K1641+400”,23#墩邻近包兰线“K539+950~K540+050”。2 个主墩上部的悬灌结构设计一致,且均设置 8 m 长 0#块,每侧单悬臂分为 7 节段(段长为 $3.5\sim4.0\text{ m}$,编号为 1#~7#),合拢段为 7#块。其中,22#墩的转体角度为 53° 、转体质量约为 $1\,710\text{ t}$;23#墩的转体角度为 55° 、转体质量约为 $1\,732\text{ t}$ (见图 1)。

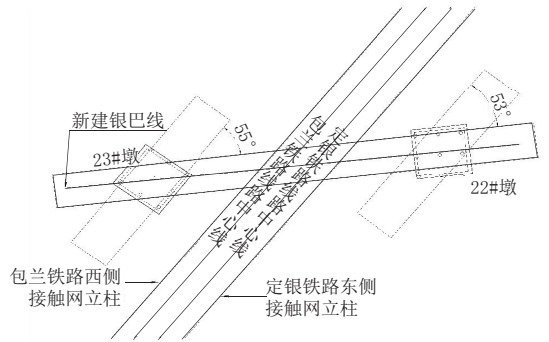


图 1 连续梁与包兰定银铁路总平面位置

转体前,22#墩的梁体平行于定银铁路悬浇,其翼缘板距离既有防护栅栏 8.82 m ,距离铁路安全限界 8.89 m ,距离回流线 10.89 m ,距离接触网立柱 11.87 m ,与防护栅栏、回流线、接触网立柱、接触网的高度差分别为 $12.86、5.11、4.34、5.10\text{ m}$;23#墩的梁体平行于包兰铁路悬浇,其翼缘板距离改移后的防护栅栏 5.05 m ,距离铁路安全限界 10.96 m ,距离回流线 12.94 m ,距离接触网立柱 14.25 m ,与改移后防护栅栏、回流线、接触网立柱、接触网的高度差分别为 $13.01、7.06、5.89、6.25\text{ m}$ (见图 2 和图 3)。

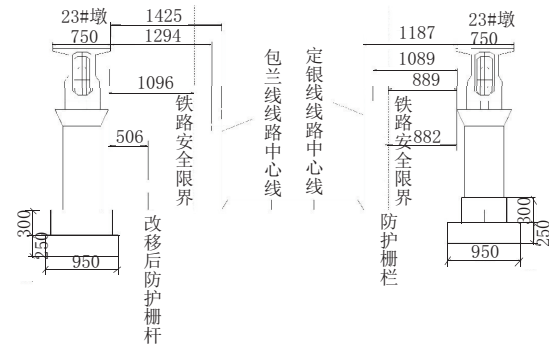


图 2 连续梁与包兰定银铁路位置关系立面图(单位:cm)

转体完成后,22#墩侧现浇梁底与回流线、接触网立柱、接触网、下行线侧轨道中心的高度差分别为 $2.15、1.45、2.41、11.02\text{ m}$;23#墩侧现浇梁底与回流

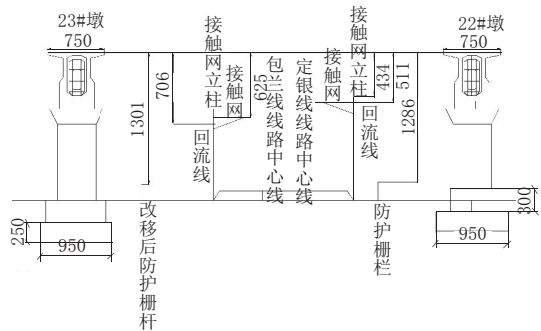


图 3 22#墩和 23#墩连续梁转体施工前与包兰、定银铁路立面位置关系图(单位:cm)

线、接触网立柱、接触网、下行线侧轨道中心的高度差分别为 $4.13、3.02、3.50、11.12\text{ m}$ (见图 4)。

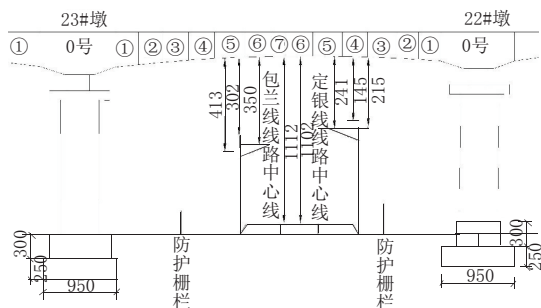


图 4 22#墩和 23#墩连续梁转体施工后与包兰、定银铁路立面位置关系图(单位:cm)

2 试验方案

2.1 不平衡力矩测试方法及分析

该工程采用球铰转动方法测试不平衡力矩,通过定量测定结构转动的刚体运动效应,规避挠度等易受外界干扰的参数,提升测试的精准度。脱架后,22#墩和 23#墩的梁体重心均偏向大里程侧。当球铰摩阻力矩(M_z)低于转动体不平衡力矩(M_c)时,梁体绕球铰中心作刚体转动。当撑脚接触承力面后,体系的平衡状态由不平衡力矩、撑脚对球心反作用力和球铰摩阻力矩协同维持^[8-9],其示意图如图 5 所示。

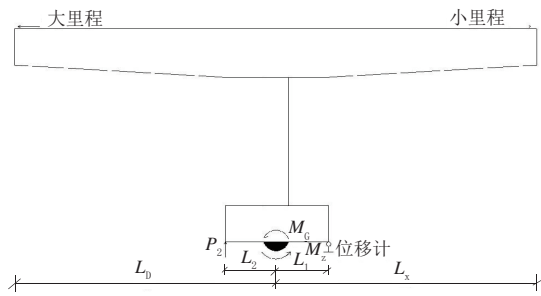


图 5 示意图

2.2 转动体球铰摩阻力矩小于转动体不平衡力矩

结合梁体重心偏向大里程侧的工况,本工程将顶推力 P_2 的施力点设置于撑脚落地侧的承台上。

(6)根据试验数据,可计算得不平衡力矩、摩擦阻力系数和偏心距等关键参数。

(7)为调整转体结构的平衡状态,需设计配重方案,具体包括确定荷载大小与布设位置,并据此计算更新后的偏心距。

3 试验结果及分析

22#桥墩加载时出现的“荷载—位移”变化表明(见表1、表2和图8),当荷载加载至8.0 MPa(对应的作用力为560.0 kN)时,位移出现突变。基于试验结果判定:当作用力 $F=560.0\text{ kN}$ 时,球铰达到克服静摩擦阻力的临界状态。当卸载至3.0 MPa(对应的作用力为210.0 kN),位移量呈急剧减小态势,据此判定:当 $F=210.0\text{ kN}$ 时,球铰恰好达到静摩阻力临界状态。

表1 22#桥墩的“荷载—位移”变化数据表

编号	千斤顶/MPa	应变计 1/ $\mu\epsilon$	应变计 2/ $\mu\epsilon$
1	0.5	0	0
2	1.0	0	0
3	1.5	1	-2
4	2.0	4	-5
5	2.5	8	-10
6	3.0	12	-14
7	3.5	18	-20
8	4.0	22	-25
9	4.5	24	-26
10	5.0	28	-30
11	5.5	32	-34
12	6.0	40	-40
13	7.0	48	-52
14	8.0	98	-102
15	9.0	161	-180
16	8.0	160	-179
17	7.0	157	-172
18	6.0	152	-166
19	5.0	147	-157
20	4.0	140	-148
21	3.0	88	-92
22	2.0	44	-47
23	1.0	18	-22
24	0.0	3	-2

23#桥墩加载时出现的“荷载—位移”变化表明(见表3、表4和图9),当荷载加载至5.5 MPa(对应的作用力为385.0 kN)时,位移出现突变。基于上述分析判定: $F=385.0\text{ kN}$ 时,球铰恰好突破静摩阻力进入临界工况。当卸载至2.0 MPa(对应的作用力为140.0 kN),位移迅速减少。由试验数据可判定:当 $F=140.0\text{ kN}$ 时,球铰达到静摩阻力临界状态。

表2 偏心距计算

项目	数值	物理含义
N	1 710	转体质量/t
L_2	2.158	千斤顶与球铰中心的距离/m
P_2	1 120.00	加压突变顶力/kN
P'_2	420.00	回油突变顶力/kN
M_G	1 661.45	转动不平衡力矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
M_Z	755.20	球铰摩擦力矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
e	0.099	结构偏心距/m
μ_0	0.023	最大静摩擦因数

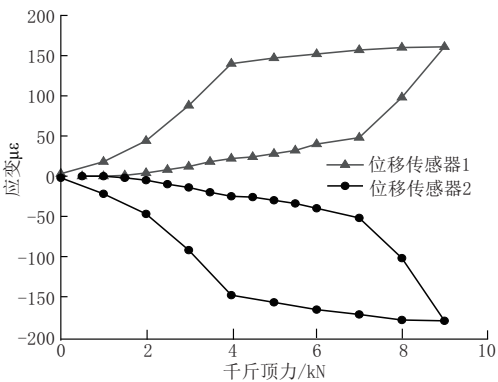


图8 22#桥墩的“荷载—位移”变化图

表3 23#桥墩的“荷载—位移”变化数据表

编号	千斤顶/MPa	应变计 1/ $\mu\epsilon$	应变计 2/ $\mu\epsilon$
1	0.5	0	0
2	1.0	2	-2
3	1.5	5	-6
4	2.0	8	-9
5	2.5	11	-13
6	3.0	20	-21
7	3.5	28	-29
8	4.0	50	-50
9	4.5	69	-70
10	5.0	81	-84
11	5.5	289	-308
12	5.0	288	-300
13	4.5	275	-289
14	4.0	266	-273
15	3.5	250	-252
16	3.0	232	-234
17	2.5	221	-220
18	2.0	154	-169
19	1.5	88	-85
20	1.0	30	-29
21	0.5	2	-1
22	0.0	0	-1

4 配重建议

4.1 质量平衡转体配重方案(单球铰支承)

该方案的核心思路为:在梁体重心偏移的对侧

表4 偏心距计算

项目	数值	物理含义
N	1 732	转体质量/t
L_2	2.158	千斤顶与球铰中心的距离/m
P_2	770.00	加压突变顶力/kN
P'_2	280.00	回油突变顶力/kN
M_G	1 132.81	转动不平衡力矩/(kN·m)
M_Z	528.64	球铰摩擦力矩/(kN·m)
e	0.067	结构偏心距/m
μ_0	0.016	最大静摩擦因数

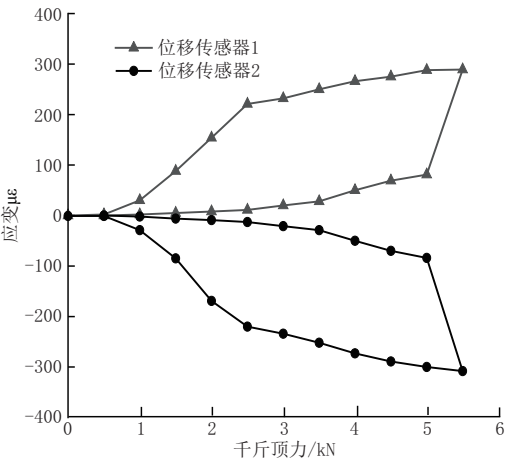


图9 23#桥墩的“荷载—位移”变化图

布设配重。当转体梁重心线与球铰竖向轴线对中时,配重荷载的大小可根据以下计算公式确定^[12]:

$$W' = \frac{Ne_0}{L'}$$

(12)

式中: W' 为所需配重荷载; e_0 为转体体系在施加配重荷载前具有的重心偏心距; L' 为配重力臂,即平衡配重与球铰中心的水平距离。

需要指出的是,在实际工程中,即使完成了配重施工,转体体系通常仍无法实现理论上的完全平衡,梁体重心仍存在一定程度的偏心,只是偏心距会维持在较小的值域内。在此工况下,配重后转体体系的新重心偏移量可根据公式(13)确定^[12]:

$$e' = (W'L' - Ne_0)/(N + W')$$

(13)

式中: e' 为转体体系配重后的重心偏心距,即体系配重与球铰中心的距离,也即配重的具体布置位置。

此方案的核心优势在于转体启动所需的牵引力相对较小。不过,应当注意的是,该方案为单点支承构造,在转体过程中,梁体易产生竖向平面内的晃动。为抑制此不利影响,需严格控制撑脚与滑道间的间隙。具体措施为,在两者之间嵌设特定厚度的四氟滑板,以满足限位要求^[13]。

4.2 梁体纵向倾斜配重方案(球铰及撑脚共同支承)

此方案的设计思路为:在转体施工过程中,需控

制转体梁体保持轻微的倾斜姿态。具体特征表现为纵向单侧撑脚下落并贴合滑道,另一侧撑脚抬起并完全脱离滑道。该方案旨在通过球铰与撑脚的协同工作,为转动体构建一个2点或3点的竖向支承受力体系,从而切实保障转动体在转体作业中保持竖向稳定和平面平衡。

该方案采用单侧梁端配重布设形式,配重质量需确保调整后的体系重心偏移量控制在 $5\text{ cm} \leq e \leq 10\text{ cm}$,满足设计规范及工程要求。其中,设定偏心距下限值是为确保转体过程中转体体系维持在单侧微倾状态,即维持球铰与撑脚协同承载的受力模式;若偏心距偏小,转体体系易受外界各类偶然干扰因素的影响,出现竖平面内的摆动失稳问题。而控制偏心距上限值是为防止单侧撑脚出现局部过载的情况,避免大幅增加转体启动所需的牵引力。因此,需对撑脚荷载进行严格控制^[11]。

配重与重心偏移量可按以下公式求解:

$$W' = \frac{(M_z - Ne_0)}{l'}$$

(14)

施加配重后,转体体系的重心偏移量可表示为

$$e' = (W'l' + Ne_0)/(N + w')$$

(15)

结合本项目中桥梁平面曲线的特性(曲线半径 $R=800\text{ m}$)及转体施工实际参数,可核算径向分力附加力矩。计算过程如下:首先,明确转体梁体的关键参数,以22#墩和23#墩转体梁为核算对象,转体质量分别为1 710 t、1 732 t,提取梁体重心标高、曲线超高(30 mm)等核心参数;其次,根据平面曲线计算径向分力:

$$F_r = \frac{G \cdot h}{R}$$

(16)

式中: F_r 为径向分力; G 为转体梁体的重力; h 为曲线超高值; R 为平面曲线半径。

结合梁体质量、曲线半径和超高值,计算得出转体过程中径向分力的大小。然后以主墩转体球铰中心为力矩计算原点,按力矩公式计算:

$$M_r = F_r \cdot L$$

(17)

式中: M_r 为径向分力附加不平衡力矩; L 为径向分力对转体球铰中心的力臂。

最后,结合转体体系总不平衡力矩 $M_{\text{总}}$ (含梁体自重偏差、悬灌施工偏差等产生的力矩),按比例公式计算:

$$\eta = \frac{M_r}{M_{\text{总}}} \times 100\%$$

(18)

式中: η 为附加力矩占比。

计算附加力矩在总不平衡力矩中的比例。经核算,该比例约为7.7%~11.5%,整体占比偏低、附加影响程度有限。从工程控制角度来看,该附加力矩既不会改变转体体系重心偏心距的合理控制范围,也不会对配重设计、转体牵引力计算和转体稳定性产生控制性影响,可通过常规配重的安全储备予以覆盖。因此,在本次配重方案设计中,无需单独针对该附加力矩进行专项配重调整。

本项目经过多次商讨,遵循项目部意见,按照梁体纵向倾斜配重方案的思想,配重需确保:

$$e' = [\text{配重} \times (\text{悬臂长度} - \text{配重距梁端距离}) - N \times e] / N$$

根据规范 and 设计要求,按偏心安装 $e' = 5 \sim 10$ cm 考虑,重心偏向大里程侧,则22#桥墩配重计算公式(按照25 t,位置23 m)如下:

$$e' = \frac{16\,762 \times 0.099 - 25 \times 23}{16\,762} = 0.065 \text{ m} \quad (19)$$

可以看出,计算后的22#墩配重后的偏心距为6.5 cm左右,配重后的偏心距偏向大里程侧,可满足转体的要求^[14-15]。

23#墩称重后的偏心距为6.7 cm左右,不需进行配重,满足转体的要求。

5 结 论

本文以跨包兰铁路特大桥曲线连续梁转体工程为研究对象,通过球铰转动测试法实测工程的关键力学参数,结合理论分析与方案比选,提出适配曲线连续梁转体施工的配重调控方法与普适性规律,主要结论如下。

在曲线连续梁转体施工中,采用球铰转动测试法,可精准测定不平衡力矩、摩阻力矩、偏心距和静摩擦系数等参数。测试结果规避了挠度等易受干扰参数的影响,可为配重方案设计提供可靠数据支撑。

针对球铰摩阻力矩小于梁体不平衡力矩、梁体重心单向偏移的曲线转体梁桥典型工况,优先采用梁体纵向倾斜配重方案。通过球铰与撑脚协同支承,形成稳定的受力体系,配重后的偏心距宜控制在5~10 cm,这样既可避免梁体竖向摆动失稳,又可防止撑脚局部过载与转体牵引力过大。

曲线转体梁桥的径向分力会产生附加不平衡力矩,但其占比通常较低,可通过常规配重的安全储备予以覆盖,无需单独进行专项配重调整。配重设计的核心是精准调控偏心距。当初始偏心距超出合理阈值时,需在重心偏移对侧定点布设配重,将偏心距优化至控制区间;当初始偏心距达标时,无需增设额外的配重。

本工程提出的配重调控方法,实现了摩阻力矩、不平衡力矩、配重力矩的动态平衡,规避了因盲目配重可能造成的资源浪费与施工风险,完善了大跨度曲线转体梁桥偏心调控的工程技术体系。其核心思路可广泛应用于同类曲线连续梁转体施工,尤其适用于单一方向重心偏移、球铰摩阻力矩不足的工况。

参考文献:

- [1] 李林翰,李瑞.桥梁转体施工工艺与关键技术研究[J].工程技术研究,2021,6(24):76-78.
- [2] 杨玉龙.跨铁路悬灌预应力混凝土T构转体关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [3] 曾华.跨越高速公路的大跨度连续梁桥转体法施工关键技术[J].建筑施工,2016,38(8):1118-1120.
- [4] 赵勇.转体施工中连续刚构梁桥力学特性分析[D].兰州:兰州交通大学,2013.
- [5] 苏巨峰,李磊,黄健,等.连续梁桥平转施工称重试验方法优化研究[J].铁道建筑,2016(8):14-18.
- [6] 尚高科.连续梁桥平转施工称重试验研究[J].国防交通工程与技术,2013(增刊1):30-31.
- [7] 郭子仪,陈小佳,郑舒月,等.转体施工转动体系不平衡力矩测试方法研究[J].公路工程,2014,39(3):73-76.
- [8] 兰州局集团有限公司.兰州局集团公司铁路营业线施工管理实施细则[S].兰州:兰州局集团有限公司,2024.
- [9] 兰州局集团有限公司.兰州局集团公司铁路营业线施工管理实施细则[S].兰州:兰州局集团有限公司,2021.
- [10] 高涛.转体桥施工监控及安全性分析[D].北京:北京交通大学,2012.
- [11] 李建存.中宁县石碱公路上跨包兰铁路立交桥转体桥结构转体称重实验[J].民营科技,2014(9):179-180.
- [12] 李秀东.荣乌高速公路孤庄营跨线桥转体不平衡称重试验研究[J].铁道建筑技术,2012(4):25-29.
- [13] 彭洪顺.转体桥施工监控及大悬臂状态安全性研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [14] TG/QT 102—2021 国铁集团铁路营业线施工管理办法[S].
- [15] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].