

DB 43

湖 南 省 地 方 标 准

DB 43/T XXXX-2026

桥梁转体施工监测技术标准

Technical standards for monitoring bridge rotation construction

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

湖南省住房和城乡建设厅
湖南省市场监督管理局

联合发布

湖南省地方标准

桥梁转体施工监测技术标准

Technical standards for monitoring bridge rotation construction

DB XX/XXXX-2026

批准部门：湖南省住房和城乡建设厅

湖南省市场监督管理局

施行日期：2026 年 XX 月 XX 日

前 言

根据湖南省住房和城乡建设厅《关于下达2024年度地方标准制修订项目增补立项计划的通知》（湘建科函〔2024〕133号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编写了本标准。

本标准主要包括：1. 总则；2. 术语、符号和参考标准；3. 基本规定；4. 测试设备与技术要求；5. 临时支撑拆除监测；6. 称重试验；7. 转动过程监测；8. 桥梁姿态调整；9. 结构锁定；10. 监测报告编制；以及附录A（桥梁转体测试设备技术要求）、附录B（报告格式）。

根据住房和城乡建设部《工程建设标准涉及专利管理办法》（建办标〔2017〕3号）文件要求，主编单位声明：本标准不涉及任何专利情况，如在使用过程中发现涉及到企业专利技术请及时与编制组联系。

本标准由湖南省住房和城乡建设厅负责管理，由长沙市规划设计院有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，烦请寄送长沙市规划设计院有限责任公司（地址：长沙市芙蓉区人民东路469号，邮政编码：410007。电子邮箱：csgghy@163.com）。

本标准主编单位：长沙市规划设计院有限责任公司

本标准参编单位：中南大学

中铁建工集团有限公司；

中交第二航务工程局有限公司；

中船双瑞（洛阳）特种装备股份有限公司；

湖南高岭建设集团股份有限公司；

中铁二院昆明勘察设计研究院有限责任公司；

湖南宏力土木工程检测有限公司

中南林业科技大学

湖南拓达结构监测技术有限公司

湖南中大设计院有限公司

本标准主要起草人员：常柱刚 王宁波 杨金龙 贾立志 李 兵 李 新 丁 磊 江群龙
左勇健 户东阳 曾献平 何平根 卢三平 侯 琦 秦红禧 成丕富
黄正明 吕 雷 周 昆 唐 东 张红显 李 洋 张 程 钱 竹
刘文明 谢海波

本标准主要审查人员：

目 次

1 总 则	1
2 术语、符号	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	4
3 基本规定	6
4 测试设备与技术要求	7
4.1 一般规定	7
4.2 结构变位测试设备	7
4.3 空间位置/姿态测试设备	8
4.4 结构动力响应测试设备	8
4.5 顶推力测试设备	8
5 临时支撑拆除监测	9
5.1 一般规定	9
5.2 临时支撑拆除过程变位监测	9
5.3 监测数据记录	9
6 称重试验	10
6.1 一般规定	10
6.2 称重试验实施	10
6.3 称重监测与记录	11
7 转动过程监测	12
7.1 一般规定	12
7.2 转角监测	12
7.3 空间位置监测	12
8 桥梁姿态调整	14
8.1 一般规定	14
8.2 桥梁实际姿态监测	14
8.3 调整量计算	14
8.4 姿态调整实施	15
9 结构锁定	16
9.1 临时锁定	16
9.2 永久固结	16
10 监测报告编制	17
10.1 一般规定	17
10.2 测试与监测报告编制	17
10.3 资料整理归档	17
附录 A 桥梁转体测试设备技术要求	18
附录 B 报告格式	20
本标准用词说明	23
引用标准名录	234
附：条文说明	26

Contents

1 General Provisions.....	1
2 Terminology, symbols.....	2
2.1 Technical Language.....	2
2.2 Symbol	4
3 Basic Provisions.....	6
4 Test equipment and technical requirements.....	7
4.1 General Provision.....	7
4.2 Structural Displacement Test Equipment.....	7
4.3 Spatial position/attitude test equipment.....	8
4.4 Structural dynamic response test equipment.....	8
4.5 Jacking Thrust Test Equipment.....	8
5 Temporary support dismantling monitoring.....	9
5.1 General Provisions.....	9
5.2 Displacement monitoring during the dismantling process of temporary supports.....	9
5.3 Monitoring data recording.....	9
6 Weighing experiment.....	10
6.1 General Provisions.....	10
6.2 Implementation of weighing test.....	10
6.3 Weighing monitoring and recording.....	11
7 Rotation process monitoring.....	12
7.1 General Provisions.....	12
7.2 Corner monitoring.....	12
7.3 Spatial position monitoring.....	12
8 Bridge attitude adjustment.....	14
8.1 General Provisions.....	14
8.2 Determination of the attitude of the turning bridge.....	14
8.3 Calculation of Adjustment Quantity.....	14
8.4 Implementation of posture adjustment.....	15
9 Structure Locking.....	16
9.1 Temporary Lockout.....	16
9.2 Permanent consolidation.....	16
10 Preparation of monitoring reports.....	17
10.1 General Provisions.....	17
10.2 Preparation of test and monitoring reports.....	17
10.3 Data collation and archiving.....	17
Appendix A Technical Requirements for Bridge Rotation Test Equipment.....	18
Appendix B Report Format.....	20
Explanation of Wording in This Standard.....	23
List of Quoted Standards.....	24
Addition: Explanation of Provisions.....	26

1 总 则

1.0.1 为规范桥梁转体施工测试与评估工作，提高转体桥梁转体过程监测与评估效率，做到技术先进、安全可靠、操作方便和经济合理，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路、铁路桥梁转体施工监测与评估。

1.0.3 在转体桥梁结构主体建成之后，针对转体施工阶段进行试验与监测。

1.0.4 转体桥梁结构开展转体施工时时，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 转体桥梁 swivel bridge

在非设计轴线位置制作（浇注或拼接）成形后，利用合理的转动结构，通过转体工序进行施工的桥梁结构。

2.1.2 转体球铰 spherical bearing hinge

由上、下球铰组成，使转体结构上下传递荷载，实现转体的核心支承装置。

2.1.3 转体 swivel process

在桥梁转体施工中，转体结构被牵引开始转动至按设计要求完成旋转并稳定于目标位置的过程。

2.1.4 称重实验 weighting test

转体前测试转体结构的不平衡力矩、偏心距、摩阻力矩及摩阻系数等参数，为桥梁的顺利转体提供数据支持的准备工序。

2.1.5 临时支撑 temporary support

在转体桥梁施工阶段，为承受上部转动结构自重及施工荷载、限制结构转动或位移而设置的临时受力构件或支承体系。

2.1.6 砂箱 sand box support

在转体施工阶段设置于临时支撑位置，用于承受上部结构荷载并可通过控制箱内砂体释放实现平稳卸载的临时支承装置。砂箱通常通过逐步放砂方式，使结构荷载缓慢转移至球铰或其他受力构件，避免瞬时卸载引起结构冲击或姿态突变。

2.1.7 楔块 wedge block

设置于临时支撑体系中，用于调整支撑高度或实现结构锁定与解除锁定的楔形构件。楔块通过敲击或顶推方式逐步退出，使结构荷载由多点支承体系向球铰单点支承体系过渡，其拆除顺序与方式直接影响转体结构初始受力状态。

2.1.8 上转盘 upper turntable

支承转动结构，并能够相对于下转盘转动的结构。一般布置有上球铰、撑脚、牵引钢绞线等。

2.1.9 下转盘 lower turntable

和基础相连，支撑上转盘并与之相匹配的结构。一般布置有下球铰、滑道、反力座、助推系统、轴线微调系统等。

2.1.10 撑脚 support feet

布设在上转盘，以承受转动结构重量的支撑形式。

2.1.11 滑道 slide

设置在下转盘，作为撑脚转动区域的圆环型通道。

2.1.12 转角 rotation angle

转体结构被牵引转动至设计位置所需要绕其主轴转动的角度。

2.1.13 实时监测 real-time monitoring

在桥梁转体施工过程中，采用测量手段实时获取结构关键转动参数的变化信息。

2.1.14 空间位置 spatial position

转体结构在三维空间中的几何状态，通常由平面位置、竖向高程及绕三个正交轴线的转角共同确定。

2.1.15 主转角 main rotation angle

转体结构绕设计转动主轴产生的旋转角度，是转体施工控制的核心参数。

2.1.16 水平转角 horizontal rotation angle

转体结构绕水平轴线产生的微小转动角度，用于反映结构姿态的倾斜变化。该角度通常包括绕纵桥轴线和绕横桥轴线的转动分量，可通过倾角传感器进行直接测量，是转体施工过程中姿态监测的重要参数之一。

2.1.17 不平衡力矩 unbalanced moment

由于结构质量分布偏心或配重不均，使转体结构绕球铰中心产生的偏心力矩。

2.1.18 偏心距 eccentricity

转体结构重心与球铰几何中心之间的水平距离。

2.1.19 摩阻力矩 frictional moment

转体过程中球铰接触面产生的摩擦力对转动中心形成的阻转力矩。

2.1.20 摩阻系数 friction coefficient

球铰接触面摩擦力与法向压力之比，用于评价球铰转动性能。

2.1.21 临界荷载 critical load

在称重试验中，通过千斤顶顶推使转体结构刚好克服球铰静摩擦并产生初始转动时的顶推力。

2.1.22 转体牵引系统 rotation traction system

由牵引钢绞线、千斤顶、反力装置及控制系统组成，用于驱动转体结构旋转的成套装置。

2.1.23 液压千斤顶 hydraulic jack

利用液压原理提供顶推或顶升力的施工设备，用于转体牵引或姿态调整。

2.1.24 位移传感器 displacement sensor

用于测量结构线位移或相对位移变化的传感装置。

2.1.25 倾角传感器 inclination sensor

用于测量结构绕某一轴线转动角度变化的传感装置。

2.1.26 转角传感器 inclination sensor

用于测量结构绕某一轴线转动角度变化的传感装置。

2.1.27 压力传感器 pressure sensor

用于测量千斤顶液压系统压力，并作为记录千斤顶顶升力的依据的传感装置。

2.1.28 全站仪 total station

集测角、测距、数据处理于一体的电子光学测量设备，用于获取转体结构关键点的三维空间坐标。

2.1.29 卫星定位设备 satellite positioning equipment

基于全球导航卫星系统（GNSS）信号进行定位的测量设备，用于获取转体结构在三维空间中的实时坐标信息。

2.1.30 视觉定位系统 vision-based positioning system

基于摄像机采集图像并结合图像识别与空间解算算法，实现结构位置与姿态自动识别与计算的监测系统。

2.1.31 结构变位 structural displacement

转体结构在施工或监测过程中产生的位移和转角变化，包括竖向沉降、水平位移及绕各坐标轴的转动量。

2.1.32 动力响应 dynamic response

转体结构在顶推或转动过程中，由外部作用引起的随时间变化的动力学响应特征，包括角速度、角加速度及振动参数等。

2.1.33 姿态调整 attitude adjustment

转体过程中或转体完成后，转体结构姿态与理论姿态差异超出允许值时，通过千斤顶顶升上转盘将结构姿态调整到误差允许范围内。

2.2 符 号

a_{mn} ——调整矩阵 X 中第 m 行第 n 列元素；

d_i ——第 i 个测点的沉降量；

d_0 ——球铰中心沉降量；

h ——在 $\theta_{\max}$ 对应顶升位置进行一次顶升的顶升量；

e ——转动体偏心距；

k ——转体过程中 k 时刻；

L ——观测距离；

M_G ——不平衡力矩；

M_Z ——摩阻力矩；

M_1 ——大里程侧承台对转动机构施加顶推力，使球铰发生微转时产生的力矩；

M_2 ——小里程侧承台对转动机构施加顶推力，使球铰发生微转时产生的力矩；

M_2 ——顶升到位后，千斤顶逐渐回落过程中球铰发生微转时产生的力矩；

N ——转体桥梁重量；

r ——上转盘旋转半径；

R ——球铰中心转盘球面半径；

R_A ——转体结构相对初始姿态变化的实际旋转矩阵；

R_C ——初转前局部坐标系至观测坐标系的旋转矩阵；

R_I ——初步转体施工后的桥梁姿态矩阵；

R_K ——转体过程中 k 时刻局部坐标系至观测坐标系的旋转矩阵；

R_T ——结构理论旋转矩阵；

r_{mn} ——实际旋转矩阵 R_A 中第 m 行第 n 列的元素；

T_C ——初转前局部坐标系至观测坐标系的平移向量；

T_K ——转体过程中 k 时刻局部坐标系至观测坐标系的平移向量；

ΔT ——理论平移向量；

X ——调整矩阵；

(x_i^0, y_i^0, z_i^0) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在转动施工开始前的初始空间坐标；

(x_i^k, y_i^k, z_i^k) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在转动施工开始前的初始空间坐标；

(ξ_i, Ψ_i, ζ_i) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在桥梁局部坐标系下的局部坐标；

α ——转体结构绕纵桥向转角；

β ——转体结构绕横桥向转角；

γ ——转体结构绕竖轴转角；

$\Delta\alpha$ ——转体结构绕纵桥向转角调整量；

$\Delta\beta$ ——转体结构绕横桥向方向转角的调整量；

$\Delta\gamma$ ——转体结构绕竖轴转角的调整量；

μ ——球铰摩阻系数；

θ_z ——转体结构绕主轴转动角度设计值；

$\theta_{\max}$ ——顶升位置对应旋转轴与局部坐标系 x 轴正向夹角。

3 基本规定

3.0.1 开展桥梁转体施工前应确保：桥梁结构主体施工完成；桥梁结构轴线、重力对称性方面不存在明显施工偏差。

3.0.2 桥梁转体施工监测应包括下列工作内容：

- 1 转体桥梁称重实验；
- 2 转体过程监测；
- 3 转体结束后桥梁姿态监测。

3.0.3 转体过程监测分为转动角度监测和桥梁空间位置监测，具体实施如下：

1 转动角度监测是指监测转体结构绕主轴转动的角度，用于反馈转动速度、和转动角度控制，为必须监测项目；

2 桥梁空间位置监测，主要监测转动过程中桥梁结构与既有建筑物或构筑物的空间位置关系，可分为离散监测和连续监测两种类型；

3 梁体转动过程无需跨越除铁路线以外的其他障碍物时，只需进行空间位置离散监测；

3.0.4 对于下列情况，需就转体桥梁空间位置进行连续监测：

- 1 桥梁转动过程中需上方跨越既有构筑物、铁路或其他重要设施；
- 2 附近存在另一转体桥梁结构进行同步转体；
- 3 其他复杂或非常规情况下的转体。

3.0.5 完成桥梁称重实验和施工监测后，应分别撰写称重实验报告和转体监测报告。

4 测试设备与技术要求

4.1 一般规定

4.1.1 测试设备应由结构变位测试设备、空间位置测试设备、结构响应测试设备、顶推力测试设备组成。

4.1.2 结构测试设备的选型应满足下列要求：

- 1 同一次测试宜选用同种类型或规格的设备；
- 2 设备的精度、量程和采样频率范围应满足转体施工检测的技术需求；
- 3 设备应具备良好的稳定性、耐久性和抗干扰性；
- 4 设备应满足桥址环境、机械环境和电磁环境的适应性要求。

4.1.3 结构测试设备的使用应符合以下规定：

- 1 测试前应由专业人员对设备进行校准；
- 2 测试时应确保设备的放置稳定可靠；
- 3 测试时应应对设备采取免受环境干扰的措施；
- 4 当设备遇到超量程、输出可疑结果或超出测试限值时，应暂停使用。

4.2 结构变位测试设备

4.2.1 结构变位测试指转体桥梁临时支撑物拆除过程以及称重实验顶推实施过程中上承台/上部结构的变位监测，变位测试设备应符合下列规定：

- 1 变位测试设备宜选用光/电/声式位移传感器，机械式或电子式百分表/千分表进行近距离量测；
- 2 变位测试设备的选型应满足本规程附录 A 中表 A. 0. 1 的技术要求。

4.2.2 数据采集设备应符合下列规定：

- 1 设备应能保证响应采集的质量要求；
- 2 设备应具有自检功能；
- 3 设备宜采用开放的数据压缩、编码与加密协议；
- 4 设备宜具有数据备份和恢复功能；
- 5 设备宜具有防水、防尘和防冲击保护。

4.2.3 数据传输设备应符合下列规定：

- 1 当采用无线传输方式时，设备应具备数据断点续传功能；
- 2 当采用有线传输方式时，设备应采用电阻值相同的数据线缆。

4.2.4 数据解调与分析设备应符合下列规定：

- 1 设备应具有分通道数据截取、数据定位处理、数据导出和导入功能；
- 2 设备应具有在线和离线显示，以及分析多通道动态数据的功能；
- 3 设备应具有断电保护功能，宜具有时钟同步功能。

4.3 空间位置/姿态测试设备

4.3.1 空间位置/姿态测试指对转体过程中转体桥梁结构相对初始坐标系的位置/姿态进行监测，包括结构转动角度，关键点空间位置等参数监测。测试设备的选型应符合下列规定：

1 主转角（即绕竖轴转动角度）为必测项，宜结合转角传感器进行直接测试，或采用视觉光标模式进行间接测量；

2 水平转角（即绕水平轴转动的微小角度）为可测项，可借助倾角传感器进行直接测量，或采用卫星定位式传感设备或视觉监测设备等进行间接测量；

3 关键点/控制点的空间位置测试，可选用卫星定位式传感设备进行连续测量或采用全站仪进行跟踪测量等；

4 空间位置/姿态测试设备的选型宜满足本规程附录 A 中表 A. 0. 2 的技术要求。

4.4 结构动力响应测试设备

4.4.1 动力响应测试含应力/应变监测和加速度响应监测，测试设备应符合下列规定：

1 应变测试设备宜选用电阻式或光栅式，可选用图像式传感设备；

2 应变测试设备的选型应满足本规程附录 A 中表 A. 0. 3 的技术要求。

4.4.2 加速度测试设备应符合下列规定：

1 加速度测试设备宜选用压电式、电容式或光栅式；

2 加速度测试设备的选型应满足本规程附录 A 中表 A. 0. 4 的技术要求。

4.5 顶推力测试设备

4.5.1 顶推力测试指称重实验实施过程中千斤顶施加至上承台的顶推作用力，顶推力测试应符合下列规定：

1 称重实验千斤顶顶推力宜采用量程合适的力传感器进行直接测试；

2 称重实验千斤顶顶推力可基于顶推系统进行间接测试。

4.5.2 顶推力测试设备应符合下列规定：

1 顶推力测试设备/传感器的选型应满足本规程附录 A 中表 A. 0. 5 的技术要求；

2 基于顶推系统油压变化进行顶推力间接测试时，需实时获取准确油压数据。

5 临时支撑拆除监测

5.1 一般规定

5.1.1 临时支撑拆除是指对撑脚楔块、砂箱、上下承台之间临时固结物的拆除，临时支撑拆除顺序应满足：

- 1 先拆除撑脚楔块和上下承台之间临时固结物，然后拆除砂箱；
- 2 临时支撑拆除实施时，拆除点位置应符合对称性；
- 3 砂箱拆除实施时，宜逐步卸除。

5.1.2 临时支撑拆除过程中应对整体结构空间变位和撑脚应力进行监测，具体规定包括下列内容：

- 1 位移监测应包括拆除过程中结构整体竖向变位，宜选取撑脚或承台作为测点布设对象；
- 2 若撑脚着地，则需对其应力进行监测。

5.1.3 临时支撑拆除监测宜按下列流程进行：

- 1 监测手段及方案确定；
- 2 监测对象与测点布设；
- 3 监测过程控制与记录。

5.2 临时支撑拆除过程变位监测

5.2.1 结构变位监测应按下列步骤进行：

- 1 结构静态位移宜选用百分表/千分表进行监测；
- 2 结构动态位移宜选用位移计进行监测；
- 3 撑脚应变监测设备宜选用电阻式或光栅式应变传感器；

5.2.2 测点布设应覆盖结构关键受力点及可能发生变形的控制位置。

5.3 监测数据记录

5.4.1 监测过程控制与记录应符合下列要求：

- 1 监测前应对天气情况、设备编号和工作状态、测试时间、桥梁位置、记录人和复核人信息做好记录；
- 2 桥梁变位测试设备和应力测试设备安装完毕后应进行调试，并进行不少于 10 min 的稳定性观察；
- 3 监测时应对桥梁空间姿态、结构变位、应力变化做好记录，测试采样时长应保证临时支撑从开始拆除到拆除完毕整个过程监测数据的完整性；
- 4 监测结束后应在现场对主要的测试数据进行检查和分析，以确保监测数据的完整性与合理性。

5.4.2 在桥梁应力监测的过程中，应及时根据监测数据采取确保结构不因局部应力过大而发生倒塌的措施。

6 称重试验

6.1 一般规定

6.1.1 称重实验目的在于对转体桥梁结构系统参数的测量，并以此制定配重方案，具体应包括下列内容：

- 1 测试转体结构的纵（横）桥向不平衡力矩；
- 2 测试转体结构的纵（横）向偏心距；
- 3 测试转体球铰的摩阻力矩及摩擦系数；
- 4 确定转体结构的配重方案；

6.1.2 称重试验宜按下列步骤进行：

- 1 称重方案确定；
- 2 称重试验设备安装；
- 3 称重参数测量与计算；

6.1.3 称重试验应满足以下条件：

- 1 称重试验宜采用外力顶推上承台迫使球铰转动的方法进行；
- 2 称重试验应在无人员流动干扰区域进行；
- 3 称重试验顶推实施宜采用多台千斤顶同时进行。

6.2 称重试验实施

6.2.1 称重试验方案应依据临时支撑拆除阶段的监测数据制定。根据拆除后结构整体空间位移及撑脚应力变化，判定转体结构的初始受力状态和偏心方向，必要时进行预配重调整结构受力情况，并据此确定顶推方向及顶推次数。

6.2.2 称重试验通过外力顶推上承台迫使球铰转动，测试确定球铰发生转动时的临界荷载。称重实验设备主要包括：千斤顶顶推实施设备、位移测量设备、顶推力测试设备等。

6.2.3 称重试验中，应测量顶推过程中施加于转动结构的顶推力，并结合顶推作用位置计算其对球铰中心产生的力矩，根据实测顶推力矩确定转体结构的不平衡力矩和球铰摩阻力矩。不平衡力矩和摩阻力矩的计算根据结构受力可能出现两种实际情况，应考虑在桥梁线路里程较大的一侧（大里程侧）和线路里程较小的一侧（小里程侧）分别施加顶推力或仅施加一侧顶推力，具体按照以下步骤进行确定：

1 临时支撑拆除后，梁体未发生绕球铰的刚体转动，即转动体球铰摩阻力矩大于转动体不平衡力矩，假设不平衡力矩偏向小里程侧。小里程侧指线路里程数值较小的一侧，其方向与桥梁顺桥向相对应。此时，不平衡力矩 M_G 和摩阻力矩 M_Z 应按下式确定：

$$M_G = \frac{M_2 - M_1}{2} \quad (6.2.3-1)$$

$$M_Z = \frac{M_2 + M_1}{2} \quad (6.2.3-2)$$

式中：
 M_1 ——在大里程侧对转动机构上承台实施顶推，当球铰发生刚体转动时对应的顶推力矩；
 M_2 ——在小里程侧对转动机构上承台实施顶推，当球铰发生刚体转动时对应的顶推力矩；

2 临时支撑拆除后，若梁体发生明显绕球铰的刚体转动，存在撑脚触地的情况。可以判定转动体球铰摩阻力矩 M_Z 小于结构不平衡力矩 M_G 。假设转动机构重心偏向大（小）里程侧，此时大（小）里程侧

支墩与滑道发生接触。不平衡力矩 M_G 和摩阻力矩 M_Z 应分别按下式确定：

$$M_G = \frac{M_2 + M_2'}{2} \quad (6.2.3-3)$$

$$M_Z = \frac{M_2 - M_2'}{2} \quad (6.2.3-4)$$

式中： M_2 ——在大（小）里程侧对转动机构上承台实施顶推，当球铰沿顶推方向发生微小转动时对应的顶推力矩；

M_2' ——顶升到位、球铰已经发生刚体转动后，逐渐卸除顶推力使千斤顶回落，该过程中当球铰沿回落方向发生刚体转动时对应的顶推力矩。

6.2.4 球铰摩阻系数 μ 应按下式进行计算：

$$\mu = \frac{M_Z}{0.98RN} \quad (6.2.4-1)$$

式中： R ——球铰中心转盘球面半径；

N ——转体桥梁重量；

M_Z ——摩阻力矩。

6.2.5 转动体偏心距 e 应按下式进行计算：

$$e = \frac{M_G}{N} \quad (6.2.5-1)$$

式中： N —— 转体桥梁重量；

M_G ——不平衡力矩。

6.3 称重监测与记录

6.3.1 测试过程控制与记录应符合下列要求：

- 1 测试前应记录天气情况、测试时间、设备编号及工作状态、桥梁初始倾斜状态，以及记录人和复核人等信息；
- 2 桥梁变位测试设备和顶推设备安装完毕后应进行调试，并进行不少于 10 min 的稳定性观察；
- 3 测试过程中应连续记录桥梁变位数据及顶推压力数据，采样时长应覆盖千斤顶起顶至卸载全过程，确保称重数据完整；
- 4 测试结束后，应对主要测试数据进行现场检查与初步分析，确认数据的完整性和合理性。

6.3.2 为准确获取结构变位信息，应对转体结构位移进行全过程监测。测点宜布设于结构边缘及与偏心距计算相关的控制位置，实时采集顶推过程中的位移数据。监测设备应经校准，测量精度应满足称重分析要求，采样应覆盖顶推全过程。

6.3.3 为准确获取实际顶升力，应在起顶千斤顶处设置压力传感器，对顶推压力进行全过程监测。所使用的千斤顶须经过标定，结合标定数据准确反算顶推力。

7 转动过程监测

7.1 一般规定

7.1.1 转动过程监测应包括转动角度监测和关键点位空间位置监测，具体包括下列内容：

- 1 转体结构绕主轴的转动角度；
- 2 转体结构的水平转角；
- 3 桥梁关键控制点在转动过程中的空间位置；
- 4 桥梁结构在转动过程中与既有建筑物或构筑物的空间位置关系。

7.1.2 转动过程宜按下列流程进行：

- 1 测量技术方案确定；
- 2 监测基准点和控制点选取与复核；
- 3 测量设备布设与安装调试；
- 4 测试过程控制与数据记录。

7.2 转角监测

7.2.1 转角监测应包括下列内容：

- 1 转体结构绕主轴的转动角度；
- 2 转体结构绕纵桥向的水平转角；
- 3 转体结构绕横桥向的水平转角；
- 4 转体就位时的最终控制角度。

转角监测应覆盖转体启动至转体结束全过程。

7.2.2 转体结构绕主轴的转角（即主转角）应进行连续监测，主转角监测应符合下列规定：

- 1 主转角应进行动态连续监测，不得采用间断式测量方式替代全过程监测；
- 2 主转角宜采用拉线式转角传感器装置进行直接测定；
- 3 监测系统应具备实时显示、数据存储等功能；
- 4 监测数据应具有足够的时间分辨率，能够反映启动阶段及制动阶段的瞬态变化特征；
- 5 监测设备安装应牢固可靠，避免因支架松动、附加振动或温度影响导致系统误差；
- 6 主转角可采用“指针-刻度盘观测法”进行主观监测；
- 7 主转角也可采用卫星定位系统或视觉测量设备进行间接测量。

7.2.3 绕纵桥向和横桥向的水平转角监测应符合下列规定：

- 1 转体过程中结构绕水平轴的转角宜采用倾角仪器进行直接测量；
- 2 可基于空间坐标测量（全站仪或卫星定位测量设备）对水平转角进行间接监测；
- 3 基于空间坐标点位置变化进行转角间接监测时，监测点数量不少于 3，三点不共线，且空间位置分布合理。

7.3 空间位置监测

7.3.1 转体结构空间位置监测可结合转体结构实际情况，采用离散监测或连续监测方法。

7.3.2 对于下列情况，应对转体桥梁空间位置进行连续监测：

- 1 桥梁转动过程中需上方跨越既有构筑物、铁路或其他重要设施；
- 2 附近存在另一转体桥梁结构进行同步转体；
- 3 其他复杂或非常规情况下的转体。

7.3.3 当梁体转动过程无需跨越除铁路线以外的其他障碍物时，可进行空间位置离散监测。

7.3.4 转体桥梁空间位置监测宜采用全站仪或卫星定位测量设备，测量精度应满足转体施工控制要求。

8 桥梁姿态调整

8.1 一般规定

8.1.1 转体桥梁结构姿态调整指在转体施工结束后、结构锁定前对桥梁结构整体姿态进行的微调，通过调整修正转动过程中整体结构不可避免发生的绕水平轴的微小转动。

8.1.2 桥梁姿态调整应按照下列流程进行：

- 1 测定转体施工结束后桥梁实际空间姿态；
- 2 计算桥梁姿态调整参数；
- 3 姿态调整方案确定；
- 4 姿态调整实施。

8.2 桥梁实际姿态监测

8.2.1 可依托转体结构临时支撑拆除前的初始位置设定局部坐标系作为参考，来标示转体结束后桥梁结构的实际空间姿态。

8.2.2 将转体结构至解除临时支撑到转动结束全过程发生的空间姿态变位分为两部分：结构整体平移（仅铅锤方向下移）、转动（绕竖轴主转、绕水平轴转动）。

1 结构整体平移，拆除临时支撑后桥梁结构在自重作用下发生的微小沉降、消除球铰间隙等因素导致，结构整体下移量微小。

可通过对临时支撑拆除过程监测获取整体下移量，针对上转盘对称位置设置 i 个变位观察点，记录临时支撑拆除前、后各监测点竖向变位量 d_i （单位：mm），则结构整体下移量 d 取其平均值：

$$d = \frac{1}{i}(d_1 + d_2 + \cdots + d_i)$$

2 结构转动，即结构相对初始坐标系的转动。

通过直接测量手段或坐标反算等间接手段获取转动结束后结构空间位置相对初始位置的转动参数：绕竖轴主转角 α 、绕水平横轴转角 β 、绕水平纵轴转角 γ 。

一般地，结构整体下移量 d 本身比较小，无法消除；主转角一般为设计的转体角度值，通过点动牵引精准实施确保主转角精度；水平转角不可避免、且存在不确定性，是姿态调整重点关注对象，需通过姿态调整予以消除。

8.3 调整量计算

8.3.1 转体桥梁姿态调整只能进行转动调整，绕竖轴发生的实际主转角如果与设计转角存在偏差，则需通过点动牵引进行精准调整，调整角度即为设计转角与实际发生主转角的差值。

8.3.2 转体结束后整体结构绕水平轴产生的微小转动并不是桥梁转体设计的动作，需进行姿态调整予以消除。因此，绕水平横轴的转动调整量，即为结构实际产生的绕水平横轴转角 β 、绕水平纵轴转角 γ ，调整方向与之相反。

8.3.3 转体结构姿态调整前应计算一步顶升调整量。一步顶升是指在上转盘边缘某一位置设置千斤顶进行一次顶升，使转体结构绕水平轴产生微小转动以修正结构姿态偏差的调整方法。一步顶升调整量应根据结构实际产生的绕水平横轴和绕水平纵轴的转角，通过位移计、倾角传感器或全站仪等测量设备获取相关参数，并结合上转盘半径及顶升位置计算确定。

8.4 姿态调整实施

8.4.1 姿态调整实施应包括绕竖轴的旋转调整和绕水平轴的旋转调整，具体应按下列步骤进行：

- 1 转体结构绕自身局部坐标系竖轴的竖向旋转调整应通过精确的牵引操作实现；
- 2 转体结构绕自身局部坐标系水平轴的平面旋转调整应通过对结构上转盘进行单向垂直顶升进行操作。

8.4.2 平面旋转调整应采用顶升法对转体结构初转施工完成后的姿态进行调整使其达到/逼近合理最终姿态，宜采用一次顶升法。

8.4.3 姿态调整一次顶升法应按下列步骤进行实施：

- 1 顶升位置应按式（8.4.3-1）进行确定：

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} \quad (8.4.3-1)$$

$\theta_{\max}$ ——顶升位置对应的旋转轴与转体结构局部坐标系 x 轴正向的夹角；

$\Delta\alpha$ ——转体结构绕纵桥向方向转角的调整量；

$\Delta\beta$ ——转体结构绕横桥向方向转角的调整量。

- 2 顶升量应按（8.4.2-1）进行确定：

$$h = \Delta\alpha \cdot r \sin \theta_{\max} + \Delta\beta \cdot r \cos \theta_{\max} \quad (8.4.3-2)$$

式中： h ——在 $\theta_{\max}$ 对应的顶升位置进行一次顶升的顶升量；

r ——上转盘的旋转半径；

9 结构锁定

结构锁定分为转体前的临时锁定和转体后的永久固结。

9.1 临时锁定

9.1.1 临时锁定包括撑脚、砂筒、型钢骨架和临时支墩组合而成的临时固结体系施工，具体应按下列步骤进行操作：

- 1 下承台第一次浇筑时对应上承台四个角点位置预埋型钢骨架，预埋深度和伸入上承台长度均应满足设计要求；
- 2 下承台第二次浇筑时应预埋临时支墩钢筋，钢筋预埋深度和伸入上承台长度均应满足设计要求；
- 3 浇筑临时支墩、下转盘混凝土并安装撑脚、砂筒及转体装置；
- 4 浇筑上转盘混凝土后形成临时固结体系。

9.2 永久固结

9.2.1 永久固结包括钢筋焊接和封盘施工，具体应按下列步骤进行操作：

- 1 桥梁转体就位并临时锁定后，应立即焊接预埋在上下转盘中的钢筋，焊缝长度应满足设计及相关规范要求；
- 2 封盘施工应分两次进行，第一次为浇筑封盘混凝土，并封盘混凝土顶部四周预埋灌浆管，待封盘混凝土凝固后第二次宜用灌浆法填补混凝土收缩产生的空隙，保证墩身与上下盘间混凝土的整体性。

10 监测报告编制

10.1 一般规定

10.1.1 测试与监测报告应包括工程概况、测试与监测目的及依据、测试设备、临时支撑拆除监测、称重实验、转动过程监测以及桥梁姿态调整。

10.1.2 资料整理应包括测试与监测方案、测试与监测报告、原始测试数据、典型测试照片以及测试相关记录，其中测试与监测方案、测试与监测报告应由项目负责人、编写人、审核人和审批人签字并加盖公章。

10.1.3 整理的各类资料应注明测试时间、委托单位与测试单位名称并存入桥梁技术档案。

10.2 测试与监测报告编制

10.2.1 测试与监测报告的格式应符合本规程附录 B 的要求。

10.2.2 工程概况应包括测试桥梁的所属工程、名称、建设或龄期、起止点或中心桩号、结构形式、跨径组合、桥跨结构横断面形式、下部结构形式、运营车道数、技术状况、病害成因、使用荷载和养护维修记录信息，并给出至少一张桥梁结构整体外貌清晰照片，以及包括主要尺寸的测试桥联（孔）结构的立面图、平面图和横断面图。

10.2.3 测试与监测目的及依据应包括工作目的，所依据的技术标准、数值模型、设计和竣工图纸。

10.2.4 测试设备应包括测试设备的名称（型号）、设备编号和主要技术参数。

10.2.5 临时支撑拆除监测应包括临时支撑拆除过程变位监测结果和应力测量结果。

10.2.6 称重实验应包括称重条件确定、称重参数计算结果，并应给出配重方案。

10.2.7 转动过程监测应包括转动牵引监测结果、空间位置监测结果和转角监测结果。

10.2.8 桥梁姿态调整应包括转体结构姿态计算结果、调整量计算结果、并应给出姿态调整方案。

10.3 资料整理归档

10.3.1 原始测试数据应包括不同监测环节采集的桥梁位移和转角数据、临时支撑的变位、转体结构的称重参数、转动参数、空间位置、姿态偏差数据，并应注记相应的测试时间和测试环境条件。

10.3.2 典型测试照片应包括桥梁全貌照片、临时支撑拆除照片、称重实验照片、转体结构转动过程照片、姿态调整前后桥梁整体照片。

10.3.3 测试相关文书应包括测试委托合同和交通管制通告，其中交通管制通告应为加盖交通部门公章的原件。

10.3.4 测试与监测方案、测试与监测报告和测试相关文书宜纸质版本一式两份妥存，所有测试相关资料宜同时以电子格式妥存。

附录 A 桥梁转体测试设备技术要求

A.0.1 桥梁变位测试设备应满足表 A.1 的技术要求。

表 A.1 变形测试设备技术要求

量测内容	仪器名称	最小分划值及精度	常用量测范围	备注
变位	激光位移计	0.01 mm	0 mm ~ 200 mm	配置安装配件
	图像位移计	0.1 mm	0 mm ~ 100 mm	
	毫米波雷达	0.01 mm	0 mm ~ 50 mm	
	卫星定位设备	坐标测量 水平: $5\text{ mm} + 10^{-6}L$; 垂直: $10\text{ mm} + 2 \times 10^{-6}L$;	—	满足桥梁形变测量需求

注: 1. 可采用符合技术要求的其他设备。

2. L 为观测距离。

A.0.2 桥梁空间位置测试设备应满足表 A.2 的技术要求。

表 A.2 空间位置测试设备技术要求

量测内容	仪器名称	最小分划值及精度	常用量测范围	备注
主转角	拉线式位移计	0.01mm~0.1mm	0-5m	
空间位置	全站仪	1" ~ 2" 角度精度; $1\text{ mm} + 1\text{ ppm} \cdot D$ 距离精度	0 m ~ 1000 m	配置安装配件
	激光扫描仪	2 mm	1 m ~ 300 m	
	卫星定位设备	坐标测量 水平: $5\text{ mm} + 10^{-6}L$; 垂直: $10\text{ mm} + 2 \times 10^{-6}L$;	—	满足桥梁大跨空间位移测量需求
	视觉定位系统	1mm	0 m ~ 50 m	宜配置高分辨率相机及标定靶标

注: 1. 可采用符合技术要求的其他设备。

2. L 为观测距离。

A.0.3 桥梁应变测试设备应满足表 A.3 的技术要求。

表 A.3 应变测试设备技术要求

测试内容	仪表名称	最小分划值 ($\mu\epsilon$)	常用量测范围 ($\mu\epsilon$)	数据采集分析系统		备注
				仪器名称	技术参数	
应变	电阻应变仪	1	± 6000	应变测试分析系统	① 测量应变范围: $\pm 6000\text{ }\mu\epsilon$; ② 分辨率: $1\text{ }\mu\epsilon$	贴电阻片
	光纤光栅应变计	2	± 6000	光纤光栅解调仪	① 可接入传感单元 > 64 个; ② 扫描频率 $> 60\text{ Hz}$; ③ 波长分辨率不大于 1 pm	表面粘贴或埋设

注: 1. 测钢构件 (或混凝土内钢筋) 应变, 宜采用标距不大于 6 mm 的小标距应变计; 测混凝土结构表面应变, 宜采用标距不小于 $80\text{ mm} \sim 100\text{ mm}$ 的大标距应变计。

2. 可采用符合技术要求的其他设备。

A.0.4 加速度测试设备宜满足表 A.4 的技术要求。

表 A.4 加速度测量设备主要技术要求

测试内容	仪表名称	最小分划值 (mg)	常用量测范围 (g)	数据采集分析系统		备注
				仪器名称	技术参数	
加速度	压电加速度计	1	≥ 5	应变测试分析系统	① 测量应变范围: $\pm 6000 \mu\epsilon$; ② 分辨率: $1 \mu\epsilon$	贴电阻片
	光纤光栅加速度计	1	≥ 2	光纤光栅解调仪	① 可接入传感单元 > 64 个; ② 扫描频率 $> 60 \text{ Hz}$; ③ 波长分辨率不大于 1 pm	表面粘贴或埋设

注: 亦可采用符合技术要求的其他设备。

A.0.5 顶推力测试设备宜满足表 A.5 的技术要求。

表 A.5 顶推力测试设备主要技术要求

测试内容	仪表名称	最小分划值 (kN)	常用量测范围 (kN)	数据采集分析系统		备注
				仪器名称	技术参数	
顶推力	电阻应变式荷载传感器	1	0~10000	力测试分析系统	① 综合精度: $0.1\%FS (\pm 10 \text{ kN})$; ② 灵敏度: $2 \sim 2.5 \text{ mV/V}$; ③ 分辨率: $\leq 1 \text{ kN}$;	千斤顶上方布置

注: 亦可采用符合技术要求的其他设备。

附录 B 报告格式

B.0.1 封面宜按图 C.1 的样式进行制作。

图 B.1 封面样例

xxx 线 XXX 桥转体施工监测报告 XXXX 年第 XX 号 共 X 页 委托单位: 测试单位: (报告日期)

B.0.2 扉页宜按图 B.2 的样式进行制作。

图 B.2 扉页样例

xxx 线 XXX 桥转体施工监测报告 XXXX 年第 XX 号 共 X 页 项目负责人：（签字） 报告编写人：（签字） 报告审核人：（签字） 报告审批人：（签字） （测试单位名称及盖章） （报告日期）
--

B.0.3 测试与监测的简表宜按表 C.3 的样式进行绘制。

表 B.3 测试与监测简表样例

工程名称			
桥梁名称		桥梁建成时间	
桥梁桩号		桥梁结构形式、跨径组成	
桥梁荷载等级		运营车道数	
测试桥联（孔）结构形式		测试桥联（孔）跨径组成	
测试和监测内容			
测点/位置			
测试设备		技术参数	
采样频率/加载时间			
数据说明/备注			
测试日期			
主要结论			
技术建议			

本标准用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 规程中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《桥梁转体技术规程》 Q/CRCC23202-2023
- 2 《公路上跨铁路桥梁水平转体施工技术规程》 DB13/T 5576-2022
- 3 《转体法桥梁施工技术规程》 T/YJB 0039-2022
- 4 《桥梁水平转体法施工技术规程》 DG/TJ08-2220-2016
- 5 《铁路桥隧守护设施设计规定》 QCR 9140-2017
- 6 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60-2015
- 7 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362-2018
- 8 《铁路工程水文勘测设计规范》 TB 10017-2021
- 9 《铁路桥涵设计规范》 TB10002-2017
- 10 《铁路桥涵混凝土结构设计规范》 TB10092-2017
- 11 《铁路混凝土结构耐久性设计规范》 TB10005-2010
- 12 《铁路桥涵地基和基础设计规范》 TB10093-2017
- 13 《铁路无缝线路设计规范》 TB10015-2012

相关法律法规

《铁路安全管理条例》

湖南省地方标准

桥梁转体施工监测技术标准

DB XXX-2026

条文说明

制订说明

《桥梁转体施工监测技术标准》XXX-2025，经湖南省市场监督管理局 2024 年 06 月 28 日以 XX 号函文批准发布。

本规程制订过程中，编制组进行了深入的调查研究，总结了我国转体桥梁施工及检测评估领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规和技术标准。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，本规程编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

3 基本规定	28
4 测试设备与技术要求	28
4.1 一般规定	28
4.2 结构变位测试设备	28
4.3 空间位置/姿态测试设备	28
4.5 顶推力测试设备	28
5 临时支撑拆除	29
5.1 一般规定	29
6 称重实验	29
6.2 称重试验实施	29
6.3 称重监测与记录	29
7 转动过程监测	30
7.2 转角监测	30
7.3 空间位置监测	30
8 桥梁姿态调整	31
8.2 转体桥梁姿态确定	31

3 基本规定

3.0.3 转动过程监测分为转角监测与空间位置监测，其划分依据来源于转体施工的风险构成。转角监测反映结构绕主轴的旋转进度与转动速度，是施工控制的核心参数；空间位置监测则用于防止转体过程中与既有结构发生碰撞或侵限。两者控制目标不同，因此单独划分。当梁体转动过程中不涉及跨越除铁路以外的障碍物时，转体风险主要集中在姿态控制与铁路限界控制范围内，此时可采用离散监测方式即可满足控制要求，避免过度配置连续监测资源。

3.0.4 本条规定在跨越既有重要设施或存在同步转体结构时必须实施连续空间位置监测。连续监测可以实时获取结构与障碍物之间的最小空间距离，通过连续计算可实时判断是否接近限界。若采用离散监测，可能遗漏中间极值状态，因此在高风险工况下必须采用连续方式。

4 测试设备与技术要求

4.1 一般规定

4.1.1 转体施工涉及结构变位、姿态、动力响应及顶推力等多类参数，单一类型设备无法满足全过程监测要求。因此本条明确测试系统由四类设备构成。结构变位监测设备应在转体桥梁临时支撑拆除及称重实验顶推实施过程中布设，用于监测上承台/上部结构的变位。空间位置与姿态监测设备应在转体全过程布设，用于监测桥梁结构相对初始坐标系的位置与姿态，包括结构转动角度及关键点空间位置。动力响应监测设备宜布设于关键受力部位，用于监测结构的应力、应变及加速度响应。顶推力加载设备应能够稳定、可控地向上承台施加顶推力。

4.1.2 设备选型统一规格的目的在于减少不同量程或精度差异带来的系统误差。同一次测试中若混用不同精度设备，将导致数据融合误差。启动阶段顶推力可能出现短时峰值，因此采样频率应满足瞬态响应捕捉要求，采样频率不足将导致峰值数据遗漏。

4.2 结构变位测试设备

4.2.1 临时支撑拆除及称重阶段结构变位通常较小，属于毫米级或亚毫米级变形。因此优选光、电、声式高精度位移计或机械式百分表。该阶段变位量小但对受力判断影响显著，故对设备精度提出明确要求。

4.3 空间位置/姿态测试设备

4.3.1 主转角之所以为必测项，是因为转体施工过程本质上是结构绕竖轴的受控旋转，其角度变化直接反映施工控制精度。水平转角反映附加倾斜状态，可通过倾角仪或卫星定位设备间接获取。

4.5 顶推力测试设备

4.5.1 顶推力可直接通过力传感器测得，也可通过油压反算。若采用油压间接法，则需根据千斤顶有效受压面积进行换算：

$$F = P \cdot A \quad (\text{附 4.5.1-1})$$

其中 P 为油压， A 为活塞有效面积。油压波动可能引入误差，因此要求实时获取准确数据。

5 临时支撑拆除

5.1 一般规定

5.1.1 拆除顺序先楔块后砂箱的技术逻辑在于避免突然释放集中荷载。砂箱具有缓冲卸载功能，逐步卸除可控制体系受力平稳过渡，防止结构瞬间产生附加弯矩。

5.1.2 临时支撑拆除阶段结构可能由多点支承转变为单点支承，若撑脚应力过大或局部沉降异常，可能诱发局部失稳。因此需同步监测竖向位移与撑脚应力，及时判断受力重分布情况。

6 称重实验

6.2 称重试验实施

6.2.1 称重方案须依据临时支撑拆除阶段监测数据制定。临时支撑拆除后，结构可能已发生微小刚体转动或受力重分布。通过分析拆除阶段的竖向位移与撑脚应力变化，可初步判断结构重心偏向方向及不平衡程度。若拆除后结构未发生转动，则说明即球铰静摩阻力矩 (M_Z) 大于结构不平衡力矩 (M_G)；若拆除后结构发生明显转动，则球铰静摩阻力矩 (M_Z) 小于结构不平衡力矩 (M_G)。因此，称重试验方案必须结合该初始状态确定顶推方向与加载顺序，避免盲目施力。

6.2.2 称重试验通过顶推外力逐步增加力矩，当体系达到克服球铰静摩擦的临界状态时，结构将发生“微小转动”。此处“微小转动”是指结构刚刚突破静摩擦状态而进入滑动状态的瞬间，其物理意义为：

$$M_F + M_G = M_{Z_{\max}} \quad (\text{附 6.2.2-1})$$

其中 M_F 为顶推力； $M_{Z_{\max}}$ 为最大静摩擦力矩。静摩擦力矩 ($M_{Z_{\text{静}}}$) 大于动摩擦力矩 ($M_{Z_{\text{动}}}$)。因此，称重试验必须捕捉结构初始滑移瞬间的临界顶推力，而不是滑移后的稳定阶段力值，否则将低估摩擦力矩。

6.3 称重监测与记录

6.3.1 称重试验属于一次性关键施工试验，测试数据不可重复获取，因此必须完整记录环境条件、设备状态及初始姿态。测试过程中顶推力与位移数据应连续记录，其原因在于识别“静摩擦临界点”须通过力-位移曲线变化判断。通常在力-位移曲线上表现为力值达到峰值后出现微小突变或位移突然增加，该点即为克服静摩擦的瞬间。若采样不连续或数据缺失，将无法准确识别该临界状态。

7 转动过程监测

7.2 转角监测

7.2.3 水面转角可采用全站仪或卫星定位测量设备进行监测，通过实测空间坐标数据计算确定转角值，具体宜按下列步骤进行：

1 初转前观测坐标系与桥梁局部坐标系的转换关系应按下列式确定：

$$\begin{pmatrix} x_1^0 & \cdots & x_i^0 \\ y_1^0 & \cdots & y_i^0 \\ z_1^0 & \cdots & z_i^0 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_C \begin{pmatrix} \xi_1 & \cdots & \xi_i \\ \psi_1 & \cdots & \psi_i \\ \zeta_1 & \cdots & \zeta_i \end{pmatrix} + \mathbf{T}_C \quad (\text{附 7.2.3-1})$$

式中：
 (ξ_i, ψ_i, ζ_i) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在桥梁局部坐标系下的局部坐标；
 (x_i^0, y_i^0, z_i^0) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在转动施工开始前的初始空间坐标；
 $\mathbf{R}_C$ ——初转前桥梁局部坐标系变换至观测坐标系的旋转矩阵；
 $\mathbf{T}_C$ ——初转前桥梁局部坐标系变换至观测坐标系的平移向量；

2 转体过程中 k 时刻观测坐标系与桥梁局部坐标系的转换关系应按下列式确定：

$$\begin{pmatrix} x_1^k & \cdots & x_i^k \\ y_1^k & \cdots & y_i^k \\ z_1^k & \cdots & z_i^k \end{pmatrix} = \mathbf{R}_K \begin{pmatrix} \xi_1 & \cdots & \xi_i \\ \psi_1 & \cdots & \psi_i \\ \zeta_1 & \cdots & \zeta_i \end{pmatrix} + \mathbf{T}_K \quad (\text{附 7.2.3-2})$$

式中：
 (ξ_i, ψ_i, ζ_i) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在桥梁局部坐标系下的局部坐标；
 (x_i^k, y_i^k, z_i^k) ——第 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在转动施工开始前的初始空间坐标；
 $\mathbf{R}_K$ ——转体过程中 k 时刻桥梁局部坐标系变换至观测坐标系的旋转矩阵；
 $\mathbf{T}_K$ ——转体过程中 k 时刻桥梁局部坐标系变换至观测坐标系的平移向量；

3 转体过程中 k 时刻转体结构相对于转体前初始姿态变化的实际旋转矩阵 $\mathbf{R}_A$ 应按下列式确定：

$$\mathbf{R}_A = \mathbf{R}_C^{-1} \mathbf{R}_K \quad (\text{附 7.2.3-3})$$

4 转体过程中 k 时刻转体结构相对于转体前初始姿态的转动角度应按下列式进行计算：

$$\begin{cases} \alpha = \text{atan} 2(r_{32}, r_{33}) \\ \beta = \text{atan} 2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\ \gamma = \text{atan} 2(r_{21}, r_{11}) \end{cases} \quad (\text{附 7.2.3-4})$$

式中：
 α ——转体结构绕纵桥向方向的转角；
 β ——转体结构绕横桥向方向的转角；
 γ ——转体结构绕竖轴转动的角度；
 r_{mn} ——实际旋转矩阵 $\mathbf{R}_A$ 中第 m 行第 n 列的元素；

7.3 空间位置监测

7.3.1 连续与离散监测方式的选择基于风险等级。跨越既有铁路或重要设施时，任一时刻空间位置超限均可能产生重大风险，因此需连续实时解算空间位置变化。

7.3.2 本条规定了转体桥梁空间位置监测宜采用的主要测量设备。转体施工过程中，需要对结构关键点的三维空间位置进行测量，以判断结构在转动过程中的平面位置及高程变化是否满足施工控制要求。

工程中常用的空间测量设备主要包括全站仪和卫星定位测量设备（如 GPS 或北斗系统），通过对布设在结构上的测点进行坐标观测，可获取测点的三维空间坐标信息。为保证空间位置监测数据的统一性和可比性，转体桥梁空间位置监测一般应按下列步骤进行确定：

- 1 转体施工前应建立统一的观测坐标系和桥梁局部坐标系；
- 2 转体施工前应根据施工条件选取并布设测点，测点数量应不少于 3 个；
- 3 测量设备的布设位置应根据测量网面积选定；
- 4 应在转动施工开始前测量 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 个测点在观测坐标系下的初始空间坐标 (x_i^0, y_i^0, z_i^0) 及在桥梁局部坐标系下的局部坐标 (ξ_i, Ψ_i, ζ_i) ；
- 5 转动过程中宜对各测点进行同步测量。

8 桥梁姿态调整

8.2 转体桥梁姿态确定

8.2.1 计算转体桥梁姿态调整参数时，根据初转完成后测量的桥梁转角 α 、 β 、 γ ，按下式对初步转体施工后的桥梁姿态进行测量和计算：

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{附 8.2.1-1})$$

8.2.2 合理最终姿态应由理论旋转矩阵 $\mathbf{R}_T$ 与理论平移向量共同确定，旋转矩阵 $\mathbf{R}_T$ 按下式进行计算：

$$\mathbf{R}_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_z & -\sin \theta_z \\ 0 & \sin \theta_z & \cos \theta_z \end{pmatrix} \quad (\text{附 8.2.2-1})$$

式中： θ_z ——转体结构绕主轴转动角度的设计值；

$\mathbf{R}_T$ ——结构理论旋转矩阵；