

桥梁水平转体技术规程

Technical specifications for horizontal swivel bridges

(送审稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

目次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 水平转体桥梁设计	4
5 转体系统设计	7
6 水平转体桥梁施工与控制	13
7 质量检查与验收	18
8 安全与环境保护	19
附 录 A （规范性） 平衡称重试验.....	21
附 录 B （资料性） 称重试验记录.....	24
附 录 C （资料性） 质量检查验收记录.....	25
参 考 文 献	26
条 文 说 明	27

前 言

为了规范水平转体桥梁的设计、施工流程，实现广东省桥梁水平转体技术高效智能化整体提升，根据《广东省交通运输厅关于标准化工作管理的办法》（粤交〔2023〕10号），省交通运输厅组织编制了本文件。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告××××（地址：×××××；联系人：×××，电话×××；邮箱：××××），以便下次修订时参考。

本文件由广东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由广东省交通运输标准化技术委员会铁路工程分技术委员会归口。

本文件参照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

主编单位：广东省铁路建设投资集团有限公司

参编单位：中国铁路广州局集团有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中铁武汉勘察设计院有限公司、广东揭惠铁路有限责任公司、广东省铁路规划设计研究院有限公司、广东省南粤交通投资建设有限公司

主 编：庄碧涛

参编人员：卢斌 张培辉 陈伟庚 肖宇松 伍强 马行川 李前名 李孝平 杨忠良 刘应才 潘金金 巫环 刘烜 陈发强 李斌

主 审：孙向东

参与审查人员：××× ××× ××× ××× ××× ×××

桥梁水平转体技术规程

1 范围

本文件规定了水平转体桥梁的总体布置与构造要求、转体系统的主要设计计算参数、转体桥梁的施工与控制要求、安全与环境保护要求。

本文件适用于广东省行政区域内公路、地方铁路工程中采用水平转体法施工的连续梁、T型刚构、连续刚构、斜拉桥等的设计、施工和验收，其他结构类型的水平转体桥梁可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 146.2 标准轨距铁路限界 第2部分：建筑限界
- GB 12523 建筑施工场界环境噪声排放标准
- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋
- GB 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50936 钢管混凝土结构技术规范
- GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 706 热轧型钢
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 11352 一般工程用铸造碳钢件
- GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- TB 10002 铁路桥涵设计规范
- TB 10092 铁路桥涵混凝土结构设计规范
- TB 10303 铁路桥涵工程施工安全技术规程
- TB 10314 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程
- TB 10415 铁路桥涵工程施工质量验收标准
- TB 10752 高速铁路桥涵工程施工质量验收标准
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JT/T 329 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器
- JT/T 901 桥梁支座用高分子材料滑板
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

转体施工法 swivel construction method

预先浇筑或安装桥跨结构，通过旋转的方式使桥梁到达设计位置的施工方法。

3.2

水平转体施工法 horizontal swivel construction method

桥梁结构仅在水平面内进行旋转的转体施工法。

3.3

平转桥梁 horizontal swivelling bridge

采用水平转体施工法建造的桥梁结构。

3.4

转体系统 swivel system

为实现转体施工而设置的包含支撑、平衡和驱动装置等的集成系统。

3.5

转体支撑系统 swivel bearing system

转体施工时承受转体结构重量并能实现转动的装置。

3.6

中心支撑 centre bearing

由中心转铰装置承受转体结构全部重量的支撑形式。

3.7

环道支撑 loop bearing

由环向分布的支撑装置承受转体结构全部重量的支撑形式。

3.8

中心+环道支撑 centre and loop combined bearing

由中心转铰装置和环向分布支撑装置共同承受转体结构全部重量的支撑形式。

3.9

多点支撑 multi-point bearing

环道支撑和中心+环道支撑两种转体支撑形式的统称。

3.10

转体平衡系统 balanced system

为防止转体结构倾覆而设置的临时支撑或配重等设备和措施。

3.11

动力系统 power system

为转体施工提供驱动力的机械、设备及装置总称。

3.12

球铰 spherical hinge bearing

承受转体结构竖向荷载，并能在一定范围内旋转的铰结构。

3.13

定位转轴 positioning shaft

设置于转动中心位置，对上下转铰或转盘起到部分限位作用的装置。

3.14

撑脚 bearing leg

为防止转体结构发生倾覆而设置的临时安全装置。

3.15

支腿 ancillary shoring

环道支撑体系中，转体时承受竖向力的支撑装置。

3.16

辅助支撑 ancillary shoring

中心+环道支撑体系中，为保证转体结构稳定性而设置的，转体时承受一定竖向力的装置。

3.17

滑道 slide way

采用滑动或滚动接触方式与撑脚或辅助支撑接触，为其提供支承作用的结构或装置。

3.18

上转盘 upper turnplate

与转体结构连接，并将转体荷载传递至转铰的结构或装置。

3.19

转台 turntable

设置于转铰与上转盘之间的，适用于连续千斤顶牵引方式的圆柱体传力结构或装置。

3.20

下转盘 lower turnplate

与转铰连接，并向下传递荷载的结构或装置。

3.21

微调系统 fine control system

转体过程中或转体完成后，转体结构状态与理论状态差异超过允许值时，将结构调整到误差允许范围内的装置。

3.22

测量系统 measure system

对转体过程进行实时监控测量的装置。

3.23

称重 weighing test

转体前测试转体结构的不平衡力矩，推算偏心距及摩擦系数，为正式转体提供数据支持的准备工作。

3.24

试转体 test swiveling

正式转体前，进行小角度转动，以检查转体结构和设备是否处于正常状态，并取得试验数据为正式转体做准备的工作。

3.25

正式转体 formal swiveling

试转体完成后，利用转体法将桥梁结构转动到预定位置的工序。

3.26

姿态调整 attitude adjustment

正式转体完成后，对转体桥轴线及高程进行微调以达到最优状态的工序。

3.27

转盘封固 turnplate sealing

姿态调整完成后，将上、下转盘预留钢筋进行连接，并用混凝土将上、下转盘之间的空隙浇筑密实，使上、下转盘连成整体的工序。

3.28

后浇段 post-pouring

姿态调整完成后，边跨混凝土梁不设合龙段，从转体梁端直接浇筑到过渡桥墩或桥台的梁段部分。

4 水平转体桥梁设计

4.1 一般规定

4.1.1 设计单位应根据现场的工程建设条件，综合考虑场地布置、安全性、耐久性和经济性，选择合适的桥型和转体方案，并对转体系统进行专项设计。

4.1.2 水平转体桥梁的孔跨布置应根据所跨越铁路、公（道）路、河道、峡谷等设施或障碍物的现状及规划情况，通行（航）与净空要求，地形、地质条件，运输及施工条件等因素综合确定。

4.1.3 水平转体桥梁设计时，应根据现场实际情况合理确定转体结构长度、合龙段位置、转体方向和转体角度。

4.1.4 水平转体桥梁的转体段宜一次跨越铁路、公路等构筑物，后续合龙段或后浇段的施工不应再对桥下交通造成影响。

4.1.5 水平转体桥梁的桥下净空高度应考虑结构变形和施工误差的影响。

4.1.6 跨越铁路、公路的平转桥梁的墩台布置宜遵循以下原则：

- 所跨线路为路堑时，桥墩（台）宜设置在路堑坡顶以外，支架及基坑支护结构不宜侵入既有线栅栏等设备设施；
- 所跨线路为路堤时，预制支架及桥墩基础不宜进入既有线路路基边坡；
- 跨越河道的水平转体桥梁的孔径布置应满足航运管理部门对河流通航等级的相关要求。

4.1.7 本章节主要规定水平转体桥梁的总体布置、构造设计及转体系统相关计算，梁体、墩台及桥梁附属结构的设计按现行国家、行业标准执行。

4.2 转体方案设计

4.2.1 水平转体桥梁应结合桥梁结构形式、场地条件、周边环境、施工的安全性、适用性和经济性等，综合确定转体系统的类型和布置位置。

4.2.2 转体系统的布置位置应结合桥梁结构形式、场地条件、周边环境、对跨越交通的影响等因素综合考虑确定，宜设置在墩顶或墩底，特殊条件下也可设置在墩中或其它位置。

4.2.3 水平转体桥梁边跨宜设置合龙段，不设合龙段时，应综合考虑成桥线形调整、边支座受力等因

素，提前准备顶升、落梁及纠偏措施。

4.2.4 水平转体桥梁设计时，应根据现场实际情况，合理确定转体结构长度、合龙段位置、转体方向和转体角度。

4.2.5 合龙段长度由桥宽、转体长度及施工方式等因素确定，一般取 2.0~4.0m，转体施工过程中合龙段两侧梁体最小水平距离不宜小于 50cm，并应考虑梁端施工机械、设备及混凝土转体梁端预留钢筋的影响。

4.2.6 上跨铁路的水平转体桥梁，中跨合龙段应设置在铁路建筑限界平面投影范围外，并应满足铁路运营安全距离要求。

4.2.7 水平转体施工斜拉桥宜通过调整结构自重或临时压重的方式使其重心位置与转动中心基本重合；采用临时压重方式时，应进行压重状态下结构的整体与局部计算，并验算运营状态下边跨梁端支座是否脱空。

4.2.8 转体结构高度大于 50m 或转体悬臂长度大于 100m 的高耸、大跨水平转体桥梁，转动中心两侧结构相差较为悬殊的不对称转体桥梁及平面半径小于 800m 的曲线转体桥梁，宜采用中心+环道支撑体系来提高转体结构的稳定性；宽幅桥必要时也可采用中心+环道支撑体系。

4.2.9 设计时，宜适当控制转体墩两侧梁体自重对转动中心的力矩差，并通过临时配重等方式使转体结构的重心略微偏向于非跨铁路（公路）侧。

4.2.10 水平转体桥梁结构的重心位置可通过以下方式调整：

a) 采用中心支撑转体系统，设置临时配重方式调整转体系统重心时，配重重量按下式计算：

$$W_0 = \frac{W_2 L_2 - W_1 L_1}{L_0} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

W_0 ——配重总重量（kN）；

W_1 、 W_2 ——配重端和非配重端梁体重量（kN）；

L_1 、 L_2 ——配重端和非配重端梁体重心至转铰轴心的距离（m）；

L_0 ——配重中心至转铰轴心的距离（m）。

b) 中心+环道支撑转体系统，采用平衡转体时，配重重量按下式计算：

$$W_0 = \frac{W_2 L_2 - W_1 L_1 - F_t L_t}{L_0} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

F_t ——环道支腿的反力（kN）；

L_t ——环道支腿到转铰中心的水平距离（m），当配重与支腿在同侧时， L_t 取负值；当配重与支腿在不同侧时， L_t 取正值。

c) 通过设置转铰预偏心调整转体系统重心时，转铰的预偏心值按下式计算：

$$e_s = \frac{M_G}{G} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

e_s ——转铰预偏心值 (m) ;
 M_G ——转体结构不平衡力矩 (kN·m) ;
 G ——转体结构重量 (kN) 。

4.2.11 设计文件应包含转体施工的指导性方案。

4.3 结构计算

4.3.1 水平转体桥梁应按照其在施工状态下可能存在的荷载组合, 对转体桥梁结构及转体系统进行检算。

4.3.2 水平转体桥梁施工状态下的风荷载宜按当地 10 年一遇风速确定。

4.3.3 采用墩底转体时, 宜采用实体有限元对转体墩承台及桩基础在转体工况下的结构效应进行分析计算。

4.3.4 可通过调整转体墩下承台厚度或设置预应力的方式, 调整群桩竖向力的分布; 中心桩的竖向承载力应满足转体及成桥运营工况下的荷载要求。

4.3.5 采用墩底转体的连续梁应设置临时固结措施, 并对临时固结的强度和稳定性进行检算。

4.3.6 转体结构的整体抗倾覆稳定系数应按式(4)计算:

$$\frac{M_{bk,i}}{\sum M_{sk,i}} \geq k_{qf} \quad (4)$$

式中:

k_{qf} ——转体结构抗倾覆稳定系数, 静止状态下 k_{qf} 取 1.5, 转动状态下 k_{qf} 取 1.3;

$M_{bk,i}$ ——结构抗倾覆力矩 (kN·m) ;

$\sum M_{sk,i}$ ——荷载效应对转动中心的不平衡力矩 (kN·m) 。

4.3.7 采用中心转铰支撑转体系统时, 转体结构的抗倾覆力矩按以下公式计算:

$$M_{bk1} = \mu_0 G R_0 \quad (5)$$

式中:

M_{bk1} ——转铰竖向转动摩阻力矩 (kN·m) ;

μ_0 ——转铰摩擦系数;

G ——转体结构重量 (kN) ;

R_0 ——球铰球面半径 (m) 。

4.3.8 采用中心+环道支撑转体系统时, 转体结构的抗倾覆力矩按以下公式计算:

$$M_{bk2} = \mu_0 G_c R_0 + N_s \times L_c \quad (6)$$

式中:

M_{bk2} ——转铰与环道共同支撑临界稳定状态下的抗倾覆力矩 (kN·m) ;

G_c ——转铰承担的转体重量 (kN) ;

L_c ——转铰中心到环道支腿的水平距离 (m), 当受力支腿个数为 2 个时, $L_c = R_3 \cos (\theta/2)$;

R_3 ——环道支腿分布半径 (m) ;

θ ——两个受力支腿对应的圆心角;

N_s ——支腿的设计反力 (kN), 支腿内设置自适应装置时可认为 N_s 基本不变。

4.3.9 采用环道支撑转体系统时，转体结构的抗倾覆力矩按以下公式计算：

$$M_{bk3} = \min(GL_c, N_c L_c) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

M_{bk3} ——环道支撑临界稳定状态下的抗倾覆力矩(kN·m)；

L_c ——转动中心到环道支腿的水平距离(m)，当受力支腿个数大于1个时， $L_c = R_3 \cos(\theta/2)$ ；

R_3 ——环道支腿的分布半径(m)；

θ ——两个受力支腿对应的圆心角；

N_c ——环道支腿的极限抗压强度(kN)，当受力支腿个数为2个时，应取两个支腿的强度之和。

5 转体系统设计

5.1 一般规定

5.1.1 水平转体桥梁的转动支撑系统可分为中心转铰支撑、环道支撑和中心+环道支撑三种类型。

a) 如图1所示，中心支撑转体系统由上转盘、转台、下转盘、转铰、定位转轴、撑脚、滑道及牵引钢绞线、反力座等部件组成。

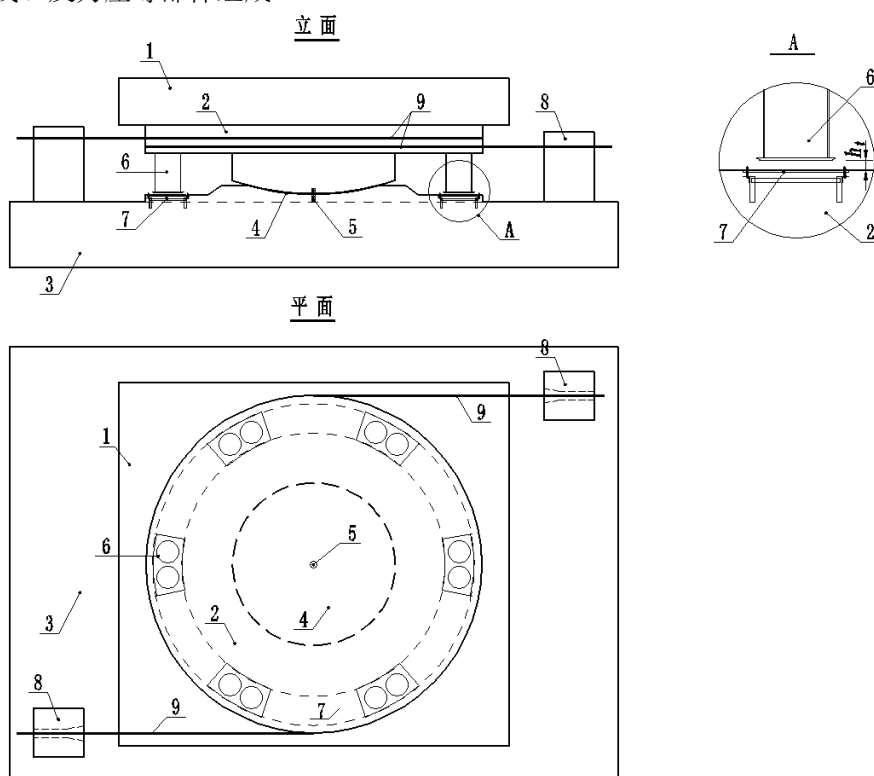


图1 中心支撑转动系统

^a 标引序号说明：1—上转盘；2—转台；3—下转盘；4—转铰；5—中心销轴；6—撑脚；7—滑道；8—反力座；9—钢绞线。

^b 注： h_t 为撑脚底面与滑道顶面的垂直距离。

b) 如图2所示，环道支撑转体系统由上转盘、转台、下转盘、环道支撑、定位转轴、滑道及动力系统等部件组成，动力系统不采用连续千斤顶张拉钢绞线方式时，可不设转台和牵引反力座。

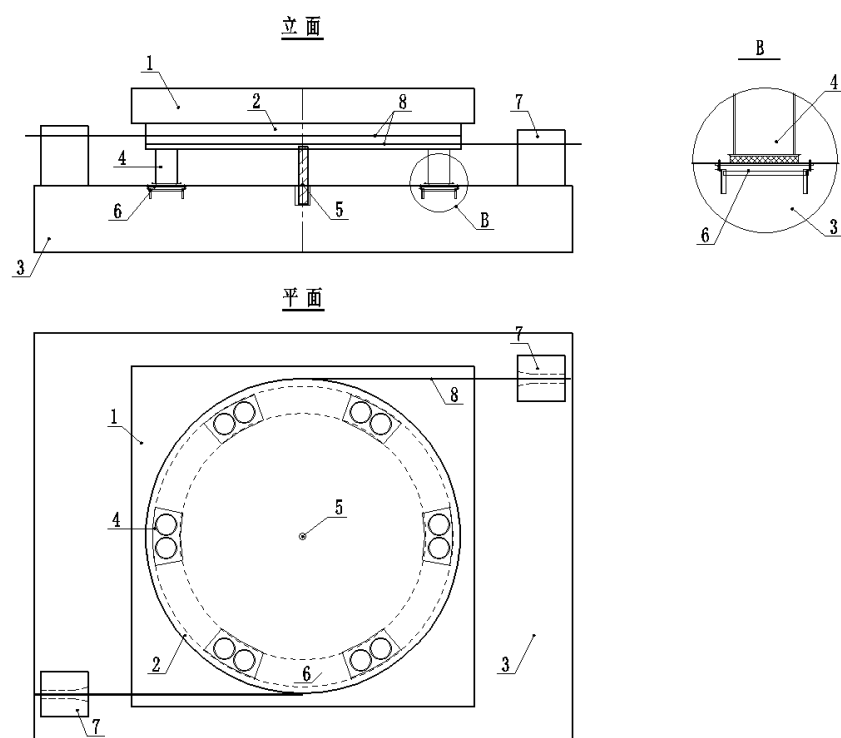


图2 环道支撑转动系统

- ^a 标引序号说明：1—上转盘；2—转台；3—下转盘；4—支腿；5—定位轴；6—滑道；7—反力座；8—牵引钢绞线。
- c) 中心+环道支撑转体系统由上转盘、下转盘、转台、辅助支撑、转铰、定位转轴、滑道等部件组成，可分为中心+周边环道和中心+单侧环道两种形式，分别如图 3、图 4 所示。动力系统不采用连续千斤顶张拉钢绞线方式时，可不设转台；环道支撑与滑道之间应形成稳定支撑。

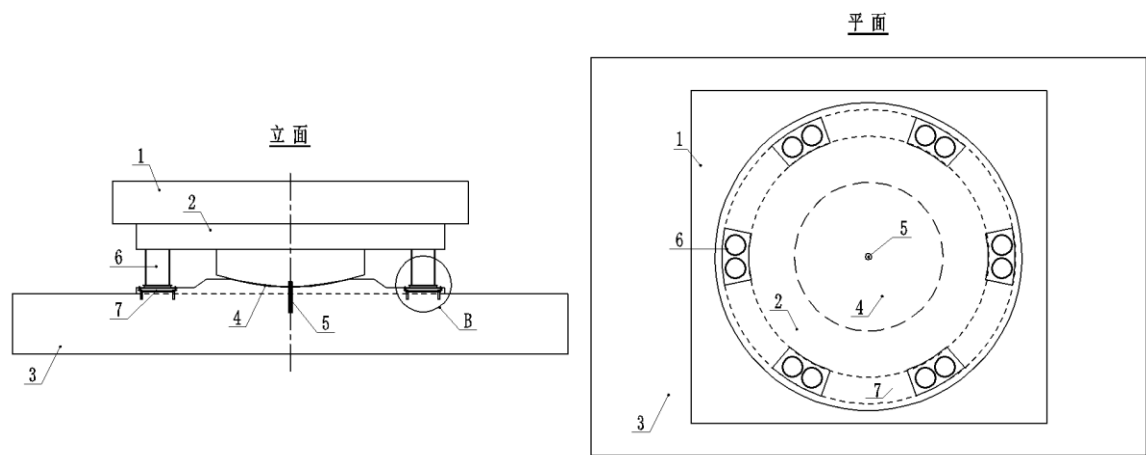


图3 中心+周边环道支撑转动系统

- ^a 标引序号说明：1-上转盘；2-转台；3-下转盘；4-转铰；5-中心销轴；6-辅助支撑；7-滑道；
- ^b 注：B 大样与图 2 相同，中心+环道支撑系统一般将驱动装置设在支撑腿处，故未示出牵引反力座与钢绞线。

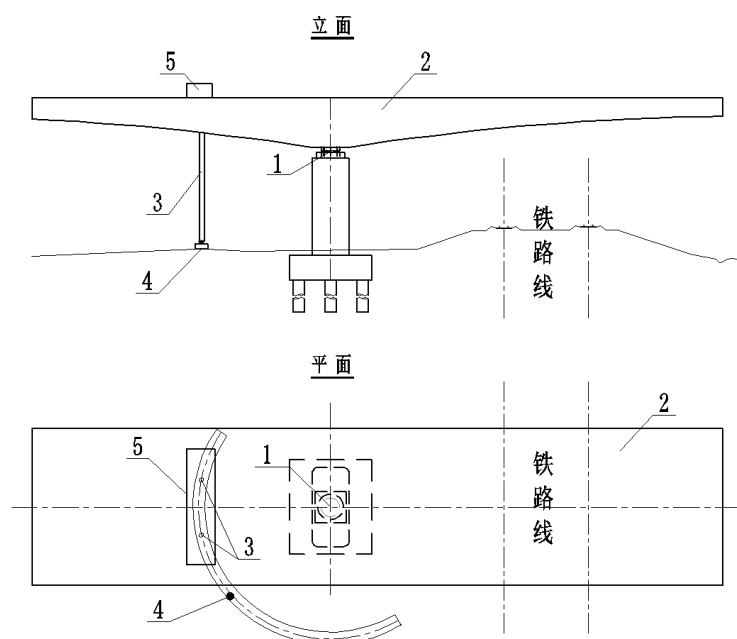


图4 中心+单侧环道支撑转动系统

^a 标引序号说明：1-转铰系统；2-转体结构；3-辅助支撑；4-环形滑道；5-配重。

5.1.2 应根据工程现状，综合考虑施工的难易程度、安全性和经济效益，选择合适的支撑体系。

5.2 转铰系统设计

5.2.1 平转桥梁应结合转体重量、转体系统布置形式和场地条件选择相适应的转铰结构。

5.2.2 常用转铰结构包括：钢球铰、钢平铰、支座式球铰和超高性能混凝土球铰，宜优先采用钢球铰或支座式球铰。

5.2.3 混凝土球铰设计应符合下列规定：

- 混凝土球铰可采用干磨法或水磨法磨合而成。
- 磨心和磨盖的混凝土强度等级不应低于 C50。
- 磨心和磨盖的钢筋配置应包括 45° 刚性角扩散的范围。
- 磨合时，应控制磨心和磨盖的接触面积不小于磨心总面积的 70%，并按下式计算混凝土球铰应力：

$$\sigma = \frac{G}{kA} \leq [\sigma_c] \quad (8)$$

式中：

G ——转体结构总重量 (N)；

A ——磨心表面积 (mm^2)；

k ——磨盖与磨心面积接触系数，一般取 0.7；

$[\sigma_c]$ ——磨心（磨盖）混凝土的中心受压强度允许值，可按表 1 取值。

表1 磨心（磨盖）混凝土的中心受压强度允许值

磨心（磨盖）混凝土强度等级	C50	C55	C60
$[\sigma_c]$ (Mpa)	13.4	14.8	16.0

5.2.4 转铰下方宜设置凸台或转铰垫石，并满足以下要求：

- 凸台或转铰垫石的高度不宜小于 50cm；
- 凸台或转铰垫石应按局部承压构件进行设计。

5.2.5 钢球铰的竖向平均压应力可按式计算：

$$\sigma = \frac{G}{\pi R_1^2} \leq [\sigma_0] \quad (9)$$

式中：

R_1 ——转铰平面半径。

$[\sigma_0]$ ——球铰竖向平均压应力控制值，可按表 2 确定。

表2 钢球铰平均压应力控制值

上、下转盘混凝土强度等级	C40	C45	C50	C55	C60
$[\sigma_0]$ (MPa)	12.3	13.6	15.2	16.8	18.2

5.2.6 钢球铰的球面半径 R_0 和接触面平面投影半径 R_1 宜满足下式要求：

$$3.24R_1 \leq R_0 \leq 5.76R_1 \quad (10)$$

5.2.7 转体结构应在转动中心设置定位转轴，转轴应按式进行抗剪承载力验算：

$$k \times \tau = k \times \frac{Q}{A} \leq [\tau] \quad (11)$$

式中：

τ ——中心定位转轴或销轴的计算剪应力 (MPa)；

k ——安全储备系数，取 1.5~2；

Q ——中心定位转轴或销轴的剪力设计值 (N)；

A ——中心定位转轴或销轴的有效横截面积 (mm²)；

$[\tau]$ ——中心定位转轴或销轴的容许剪应力 (MPa)。

5.2.8 定位转轴或销轴的剪力设计值 Q 可按下列方式确定：

- 中心支撑转体系统

$$Q = (M_G - M_Z)/R_0 \quad (12)$$

式中：

M_G ——转体结构不平衡力矩 (kN·m)；

M_Z ——转铰摩擦力矩 (kN·m)；

R_0 ——转铰球面半径 (m)；

- 环道支撑和中心+环道支撑转体系统

$$Q = \sum \vec{V} - \sum \mu_t \vec{F}_t \quad (13)$$

式中：

μ_t ——支腿与滑道间的摩阻系数，可按表 3 取值；

$\vec{V}$ ——转体驱动力（kN）；
 $\vec{F}_t$ ——各支腿的反力（kN），其产生的摩阻力为向量。

表3 摩阻系数建议值

摩擦类型	滑动摩擦	滚动摩擦
静摩阻系数	0.06~0.08	0.02~0.04
动摩阻系数	0.02~0.04	0.01~0.02

5.3 平衡系统设计

- 5.3.1 平衡系统包含撑脚、辅助支撑和滑道，平衡系统的结构设计应满足转体施工的强度、刚度及稳定性要求。
- 5.3.2 撑脚可采用钢管结构或钢管混凝土结构。
- 5.3.3 撑脚的布置应符合以下规定：
- a) 撑脚应以转铰为中心沿圆周对称均匀布置，撑脚底面高程误差应满足 7.2.7 条的要求；
 - b) 撑脚数量应根据转盘直径和施工操作空间确定，撑脚间的切向距离可控制在 5~8m 之间，且不应少于 4 个；
 - c) 撑脚外侧至上转盘边缘的最小距离，撑脚直径 d_c 小于或等于 1m 时，不宜小于 0.4 d_c 且不宜小于 250mm；撑脚直径 d_c 大于 1m 时，不宜小于 0.3 d_c 且不宜小于 400mm；
 - d) 采用中心支撑转体系统时，撑脚与滑道的间隙宜控制在 20~30mm 之间。
- 5.3.4 滑道应采用圆环形布置，并应与撑脚位置对应，滑道中心应与转铰转动中心重合。
- 5.3.5 辅助支撑与中心转铰形成超静定支撑体系时，设计中应考虑转体过程中因滑道不平顺引起的辅助支撑结构内力的变化。辅助支撑应有可靠的加载及适应滑道表面不平顺的设备与措施。
- 5.3.6 滑道应有足够的刚度、表面硬度及平顺度，宜采用 Q355C 以上等级的钢板加工而成，钢板厚度不宜小于 12mm。
- 5.3.7 辅助支撑与滑道的接触方式可分为滑动摩擦接触和滚动摩擦接触。采用滚动摩擦接触时，滚轮应根据转动平面半径设置相应的锥度。

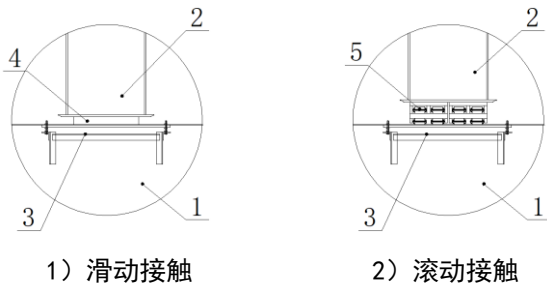


图1 环道支撑大样

° 标引序号说明：1-下转盘；2-环道支撑柱；3-环形滑道；4-滑块；5-滚轮小车。

- 5.3.8 辅助支撑可采用主动承力支撑或被动承力支撑两种方式：
- a) 采用主动承力支撑时，应设置千斤顶等施力装置，调节各支撑结构所承担的竖向力；

- b) 采用被动承力支撑时,宜根据转体结构的受力体系和施工方法,计算确定各支撑结构所承担的竖向力。

5.3.9 撑脚或支腿的平面分布半径 R_3 不宜小于转铰平面半径 R_1 的2倍。

5.4 动力系统设计

5.4.1 中心支撑转体的动力系统可采用千斤顶顶推和张拉牵引索方式,二者可相结合使用。反力座的设计应能保证转体动力的需要。

5.4.2 多点支撑转体的动力系统可采用千斤顶顶推、连续千斤顶张拉牵引索或者电机齿轮齿条形式;转体角度大于 45° 时,宜采用电机齿轮齿条形式。

5.4.3 动力系统采用千斤顶张拉牵引索方式时,应设置圆形转台,牵引索应以转动中心成对设置。

5.4.4 动力系统采用千斤顶顶推、连续千斤顶张拉牵引索方式时,为防止转体过程中出现倾斜、过转,宜设置微调系统。

5.4.5 中心支撑转体系统的转体驱动力可按下式计算:

$$T = \frac{2\mu_0 G R_1}{3R_2} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

T ——转体总驱动力设计值(kN);

G ——转体重量(kN);

R_1 ——转铰平面半径(m);

R_2 ——转体驱动半径(m),当采用张拉牵引索方式时, R_2 为转台半径;当采用千斤顶顶推方式时, R_2 为单个顶推点处千斤顶合力点到转动中心的距离;

μ_0 ——转铰摩擦系数,应通过试验确定,无试验数据时,可按表3选取。

5.4.6 多点支撑转体系统的转体驱动力可按下式计算:

a) 中心+环道支撑转体系统的驱动力计算公式为:

$$T = \frac{2\mu_0 G_c R_1}{3R_2} + \frac{\sum \mu_t F_{ti} R_i}{R_2} \dots\dots\dots (15)$$

b) 无球铰的环道支撑转体系统,驱动力计算公式为:

$$T = \frac{\sum \mu_t F_{ti} R_i}{R_2} \dots\dots\dots (16)$$

上述两式中:

μ_t ——承力支撑腿与滑道间摩擦系数,应通过试验确定,无试验数据时,可参考表3取值;

G_c ——中心球铰承担的转体重量(kN);

G_t ——承力支撑腿承担的转体重量(kN);

R_1 ——球铰平面半径(m);

R_i ——各支腿的转动半径(m);

R_2 ——转体驱动半径（m），采用千斤顶顶推方式时， R_2 为千斤顶合力点到转动中心的距离；采用连续千斤顶张拉牵引索方式时， R_2 为转台的平面半径；采用电机齿轮齿条驱动方式时， R_2 为齿条的平面半径；

T ——转体总驱动力设计值（kN）。

5.4.7 转动动力系统应保证不小于 2 倍的动力储备。

5.4.8 采用多点支撑转体时，多支撑点转体动力应具有同步作业控制系统。

5.5 上、下转盘设计

5.5.1 转盘结构尺寸应满足转铰、撑脚、环道等布置要求。

5.5.2 转体系统设计时，应对转盘、转铰、销轴、撑脚、滑道等关键部位的强度和刚度进行检算，并宜对转铰的应力状态进行分析。

5.5.3 转体系统所使用的混凝土材料强度等级不宜低于 C50。

5.5.4 上转盘平面形状宜采用矩形，场地条件受限时，也可采用多边形或圆形。

5.5.5 墩底转体桥梁的下转盘（承台）最小厚度宜满足下列要求：

$$t_c \geq \frac{G_c}{100000} + 2 \dots\dots\dots (17)$$

式中：

G_c ——中心转铰承担的转体重量（kN），小于 10^5 kN 时，取 $G_c=10^5$ kN；

t_c ——转体承台厚度（m）。

5.5.6 上转盘和下转盘（承台）之间应预留足够的转体施工操作空间，竖向净距不宜小于 1.5m。

5.5.7 转体系统受力复杂，宜采用有限元实体模型对关键部位进行应力状态分析。

6 水平转体桥梁施工与控制

6.1 一般规定

6.1.1 转体施工前应做好各项施工准备，落实施工协议。

6.1.2 施工单位应根据设计文件结合现场实际情况编制转体施工专项方案，并进行专项施工方案评审。

6.1.3 转体施工应进行转体前、试转及正式转体、转体后等三个阶段的全过程监控。

6.1.4 施工前，施工单位应做好桥下设施的防护工作，并对施工现场可能发生的危害、灾害与突发事件制定应急预案。

6.1.5 转体施工所采用的材料与设备均应符合现行国家、行业标准的要求。

6.2 转体系统安装

6.2.1 转体系统各构件的材料及制造、安装、施工精度应符合相关规范及设计的要求，并应进行质量检查和验收。

- 6.2.2 中心+环道支撑转体系统各构件出厂前宜进行试拼装。
- 6.2.3 转铰和滑道的定位设施应有足够的强度和刚度，以保证转铰与滑道在安装过程中的位置精度。
- 6.2.4 转铰、滑道预埋定位骨架安装时，下转盘混凝土宜根据定位骨架的高度分两次浇筑，并采取预留压浆孔及排气孔等措施保证其下方混凝土的密实度。
- 6.2.5 转铰、滑道及定位骨架吊装过程中应合理布置吊点，采取措施防止构件在吊装过程中出现变形。
- 6.2.6 转铰和滑道安装对下转盘顶面面层钢筋产生截断破坏时，应采取补强措施。
- 6.2.7 滑道下混凝土宜采用自流平混凝土。
- 6.2.8 采用部分撑脚着地转体方式时，滑道钢板顶面不宜粘贴不锈钢板，以免不锈钢板出现鼓包现象，造成转体被迫停止。
- 6.2.9 撑脚安装时，撑脚走板与滑道之间的预留空间应考虑沙箱等临时支撑结构拆除时结构的下沉量，保证下沉稳定后，撑脚与滑道之间的间隙宜控制在 15mm~25mm。
- 6.2.10 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，牵引索的施工应符合下列规定：
- a) 牵引索安装前应进行全面的检查，清理表面灰尘及浮锈；
 - b) 应对外露的牵引索进行有效的防护，避免牵引索锈蚀或损伤；
 - c) 应根据称重结果复核牵引索的数量、规格、锚固长度是否满足转体牵引力的要求。
- 6.2.11 下转盘、上转盘、转台及后封固区混凝土浇筑施工应满足大体积混凝土施工的要求。
- 6.2.12 下转盘设置预应力筋时，预应力施工应满足以下要求：
- a) 预应力波纹管宜准确定位，当其位置与转铰、滑道定位骨架冲突时，应优先保证定位骨架的位置；
 - b) 预应力张拉时机与方式，设计无明确规定时，应综合考虑基坑回填及上、下部结构的施工工序等因素，根据计算确定。
- 6.2.13 上、下转盘间设置的临时支撑应满足施工过程中最大竖向力和最大不平衡弯矩的受力要求，采用悬臂浇筑（拼装）方式时，宜设置抗拉装置。
- 6.3 转体准备工作
- 6.3.1 转体前应成立转体施工组织机构，对人员进行详细的分工，并与所跨越设备各产权单位紧密联系，提前掌握各单位的相关要求。
- 6.3.2 转体前应应对各项准备工作及转体设备进行检查、试验，保证整个转体平稳、顺利进行。
- 6.3.3 控制系统在运行前必须经过空载联试，确认无误后再投入使用。
- 6.3.4 齿轮齿条驱动系统在施工安装前，宜进行预拼装和试转。
- 6.3.5 试转前应认真清理滑道、撑脚，检查梁端预留钢筋长度，防止转体过程中互相干扰。
- 6.3.6 转体前，应根据所采用的转体支撑类型确定是否进行平衡称重试验：
- a) 采用中心支撑转体时，应进行平衡称重试验，测定结构的偏心量，并进行必要的配重；
 - b) 采用中心+环道支撑或环道支撑转体时，应根据支腿布置情况，综合判断是否进行平衡称重试验；

- c) 不进行称重试验时, 应计算转体结构的抗倾覆稳定系数, 并满足 4.3.6 条的要求;
- d) 称重试验可参照附录 A 执行, 试验结果可采用附录 B 的表格形式。

6.3.7 对于转体重量大、球铰半径大的结构, 采用常规称重方法在墩底布置千斤顶有困难时, 可在梁端布置千斤顶, 与墩底千斤顶进行协同称重; 采用多点协同称重方式时, 应对主梁结构进行检算。

6.3.8 转体动力设备应保证不小于 2 倍的动力安全储备系数, 转体设备进场前应进行维修保养。连续千斤顶每次转体前应更换连续千斤顶夹片, 设备进场后监理单位应组织施工单位、设备单位进行质量检验。

6.3.9 中心支撑转体称配重时, 其重心偏移值应控制在 $0 \sim \delta$ 范围内。

$$\delta = 0.6R_0\mu \cdots \cdots (18)$$

式中:

δ ——结构重心偏心值 (mm);

R_0 ——球铰球面半径 (mm);

μ ——转铰滑动摩擦系数。

6.3.10 应对外漏的牵引索进行有效的保护, 保护材料应防水、防火、防锈蚀。牵引索安装前应进行全面的检查, 清理表面灰尘及浮锈。

6.3.11 电机齿轮齿条动力系统应设置径向限位装置, 保证驱动齿轮与齿条的啮合。

6.3.12 转体梁段转体前, 应拆除上、下转盘间临时支撑, 完成临时支撑到球铰支撑的体系转换。

6.4 试转体

6.4.1 正式转体施工前应进行试转体, 测定转铰的摩擦系数、转体动力大小和结构的转体稳定性等关键数据。

6.4.2 应合理确定试转角度, 不宜小于 3° , 以保证试转数据有效采集; 也不宜大于 8° , 以免影响桥下交通。

6.4.3 试转体前应进行下列准备工作:

- a) 拆除支架并静置观察结构情况, 如遇异常及时处理;
- b) 转台上设置弧长及角度观测标尺;
- c) 清理环道, 并检查环道与撑脚间的空隙;
- d) 按正式转体要求安装动力设备、监控设备并应进行调试;
- e) 对千斤顶等设备进行标定和现场试验, 并配置备用设备;
- f) 对牵引索钢绞线提前预紧, 不得交叉、打绞和扭转;
- g) 前后顶的行程开关位置应调整到位;
- h) 油管和千斤顶油嘴接口部位清洗、擦拭干净;
- i) 清除所有阻挡测量观测视线的障碍物。

6.4.4 试转体时应进行下列工作:

- a) 测量观测转体结构的位置信息并记录原始数据;
- b) 牵引设备分级加载至结构开始转动, 记录启动牵引力及转动牵引力;
- c) 对转体系统各部件的工作情况进行监测, 如遇异常及时处理。

6.4.5 试转体时应应对以下内容进行测试记录，作为正式转体的依据：

- a) 正常转动的速度和时间；
- b) 点动一次悬臂端所转动水平弧线距离的数据；
- c) 采用多点支撑转体时，支腿或辅助支撑的内力值。

6.4.6 转体驱动宜采用计算机同步控制技术，各动力点的行程误差不应大于 2mm。

6.5 正式转体

6.5.1 转体结构的平转角速度宜根据主梁悬臂长度进行确定：

- a) 悬臂长度不大于 40m 时，角速度宜控制在 0.05rad/min 以下；
- b) 悬臂长度大于 80m 时，角速度宜控制在 0.025rad/min 以下；
- c) 悬臂长度在 40m~80m 之间时，转体角速度的上限值可内插取值。

6.5.2 转体角加速度的选取除应满足结构受力要求外，还应便于监测，其范围宜控制在 $2.2 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2 \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$ 之间。

6.5.3 常规梁式桥采用中心支撑转体系统时，宜选择 5 级风速以下进行转体。

6.5.4 斜拉桥等高耸结构采用中心支撑转体系统时，宜选择在 3 级风速以下转体；采用中心+环道支撑转体系统时，倾覆稳定性及支腿承载力经验算通过后，可在 5 级风速以下转体。

6.5.5 动力系统在达到转体设计速度后应能保持匀速转动，转体过程中应对梁体、墩柱进行实时监测，并应根据观测数据指导转体施工。

6.5.6 采用连续千斤顶张拉牵引索驱动方式时，上、下转盘刻度线距梁体就位 1m 前，牵引千斤顶应由连续作业改为点动操作，使梁体逐步缓慢就位。

6.5.7 采用齿轮齿条驱动方式时，距转体就位相差 5° 前，开始分级减速，依次下调到正常转速的 1/2、1/4、1/8，停止。

6.5.8 采用连续千斤顶张拉牵引索方式驱动时，转体到位后应锁定连续平转油缸下锚（机械锁定），并应完成油缸安全行程。

6.6 姿态调整

6.6.1 转体就位后，应对转体梁段进行全面测量检查，并计算出轴线及高程偏差值。

6.6.2 姿态调整应按照先轴线后高程的顺序进行。

6.6.3 轴线偏差宜采用千斤顶顶推、牵引，或齿轮齿条动力系统点动控制进行调整。

6.6.4 高程偏差宜通过上、下转盘间设置的微调千斤顶进行调整。

6.6.5 姿态调整应以调整梁体线形为主，所有观测数据均应考虑温度的影响。

6.6.6 结构精调完成后，应采用双向止动块将转体系统锁死。

6.7 转体系统封固及体系转换

6.7.1 转铰封固、梁体合龙的施工顺序应按设计文件要求执行，设计无要求时宜先封固后合龙。

6.7.2 转体系统上、下转盘之间的空间狭窄，为保证施工质量，封固混凝土宜采用自流平混凝土。

6.7.3 上、下转盘封固时，应对混凝土密实度进行监测。

6.7.4 合龙施工顺序应按设计要求进行，设计无要求时宜先边跨，后中跨；多跨一次合龙时，宜均衡对称合龙。

6.7.5 合龙施工前应对主梁轴线、高程和梁长受温度影响的变化值进行观测，根据观测值进行合龙施工计算，确定合龙方案。

6.7.6 合龙段两侧梁体采用施加水平顶力的方式调整应力时，千斤顶的施力应对称、均衡。

6.7.7 转体合龙段宜设置劲性骨架，合龙段混凝土应在设计要求的气温范围内浇筑。

6.7.8 合龙时桥面上的临时施工荷载应符合施工监控计算的要求，墩梁临时固结装置的解除应按设计要求操作。

6.7.9 采用墩顶转体法施工的桥梁，梁段转体就位并完成边跨合龙后，应安装永久支座，拆除转体系统，完成从球铰支撑到支座支撑的体系转换。

6.7.10 体系转换过程中，应验算各施工阶段主体和临时结构的强度和刚度，保证转体桥梁处于整体平衡状态。

6.8 转体监控

6.8.1 水平转体桥梁应进行施工监控，编制监控方案，并根据施工进度分阶段实施。

6.8.2 水平转体桥梁的施工监控包括梁体施工监控与转体监控。

6.8.3 梁体施工监控一般应包含梁体应力、梁体线形和墩台沉降等的监测与监控。

6.8.4 转体监控一般应包含以下内容：

- a) 称配重试验过程监控；
- b) 转体系统关键部位的变形、应力监控；
- c) 采用中心支撑时，对撑脚与滑道间隙的监控；采用环道支撑或中心+环道支撑时，对支腿竖向力或竖向力变化值的监控；
- d) 转体阶段，动力设备工作状态、输出功率或驱动力监控；
- e) 转体结构的位移、倾角、扭转角及转动速度、加速度监控；
- f) 姿态调整阶段线形及桥梁关键部位应力监控；
- g) 风速、风向、温度、湿度等环境因素监测；
- h) 其他影响转体施工及转体结构安全的因素监测与监控。

6.8.5 称配重试验过程监控包含桥梁及转体系统关键部位的变形、应力监控，撑脚与滑道间隙的监控。

6.8.6 转体监控测点的布设应与桥梁的结构特点、施工方法及所处环境相适应，且应固定牢靠并便于观测。

6.8.7 应根据监测目的和转体施工要求、环境特征选择适应的监控系统，监控设备、传感器及作业环境应符合《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982)的相关要求。

6.8.8 转体监控设备应具备数据自动采集功能。

6.8.9 转体监控单位的资质、人员和设备配置应满足监控要求。

7 质量检查与验收

7.1 一般规定

7.1.1 材料进场应具备相应的产品合格证、出厂检测报告，并应进行各项原材料的复检。复检不合格不得投入使用。

7.1.2 转铰出厂时应具备相应的产品合格证书及详细的产品检测报告，包含：转铰直径、曲率半径、球面贴合度、表面质量等各项指标。

7.1.3 高耸、大跨转体结构，宜在经验值的基础上，根据振动分析结果提出球铰加工和安装精度要求。

7.2 检查与验收标准

7.2.1 滑（轨）道板宜设置调平功能，确保滑道表面平顺。其整体平整度误差不宜大于 2mm，局部高差不宜大于 0.5mm/m。

7.2.2 混凝土球铰加工、安装精度应满足表 4 的要求：

表4 混凝土球铰加工、安装允许误差

序号	项目		精度要求
1	磨心同心圆上个点高程差		≤5mm
2	磨心磨盖边缘间隙宽度误差		≤2mm
3	磨心磨盖接触面占比		≥70%
4	打磨环形滑道平整度高差		≤2mm
5	球铰转动中心误差	横桥向	≤1.5mm
		顺桥向	≤1mm

7.2.3 转铰成品出厂前、运至施工现场安装前均应进行质量验收。

7.2.4 钢制转铰加工精度应满足表 5 的要求。

表5 钢制转铰加工、安装允许误差

序号	项目	精度要求	
		球铰	平铰
1	转铰边缘相对高差	≤1mm	
2	定位销轴套管中心轴与转铰中心轴重合	≤1mm	≤5mm
3	定位中心轴垂直度	≤2‰	≤5‰
4	同心圆四氟板顶高差	≤1mm	
5	环道钢板顶面标高误差	≤2mm	
6	相邻环道钢板拼接边缘高差	≤0.5mm	
7	钢转铰转动中心误差	横桥向	≤1.5mm
		顺桥向	≤1mm

7.2.5 上球铰与下球铰连接后，球铰转动中心误差顺桥向不应大于±1mm，横桥向不应大于±1.5mm。

7.2.6 转体支座安装的允许偏差应符合表 6 的规定。

表6 转体支座的安装允许误差

序号	项目	精度要求
1	垫石顶面高程	±2mm
2	垫石预留锚棒孔中心及对角线位置	±10mm
3	转体支座中心位置	≤2mm
4	转体支座水平度	±2mm

- 7.2.7 各撑脚之间的安装高度误差应控制在±1mm 以内。
- 7.2.8 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，千斤顶反力座施工的轴线允许误差为±10mm，反力座顶面标高允许误差为±20mm。
- 7.2.9 采用齿轮齿条驱动方式时，齿轮、齿轨宜在临时支撑拆除前安装，齿轮、齿轨同心半径安装允许误差为±5mm。
- 7.2.10 转体就位后应对梁体高程及轴线进行测量，并对梁体轴线、横向倾斜及高程的偏差进行调整，调整后的偏差值应符合桥涵工程施工质量验收相关规范、规程的规定。
- 7.2.11 完成姿态调整后，公路桥梁的轴线与高程偏差应满足表 7 的要求，铁路桥梁的轴线与高程偏差应满足表 8 的要求。

表7 转体完成时公路桥梁的轴线与高程偏差允许值

序号	项 目		规定值或允许偏差（mm）
1	轴线偏差	$L \leq 100\text{m}$	10
		$L > 100\text{m}$	$L/10000$
2	顶面高程	$L \leq 100\text{m}$	±20
		$L > 100\text{m}$	$L/5000$
		相邻节段高差	10
3	同跨对称点高程差	$L \leq 100\text{m}$	20
		$L > 100\text{m}$	$L/5000$

注：L 为桥梁跨径，计算规定值或允许偏差时以 mm 计。

表8 转体完成时铁路桥梁的轴线与高程偏差允许值

序号	项目	允许偏差（mm）
1	轴线偏差	不大于10
2	合龙前两悬臂端相对高差	合龙段长的1/100 且不大于15
3	顶面高程	±20

8 安全与环境保护

8.1 一般规定

- 8.1.1 桥梁水平转体施工应根据现场及桥梁结构的具体情况制定相应的安全与环保措施。
- 8.1.2 桥梁水平转体施工过程中的安全与环境保护除应符合本文件的要求外，尚应符合相关法律法规、

安全生产管理条例及行业标准的有关规定。

8.2 安全管理要求

8.2.1 采用水平转体法施工的桥梁，设计单位应列出施工风险源及安全施工注意事项，施工单位应开展施工安全风险评估，根据风险评估结论制定相应的安全技术措施和应急预案，配备相应的应急设备，经监理审核后向建设单位报备。施工前，应进行安全技术交底。

8.2.2 转体施工作业须提前向所跨越的道路、铁路、航道等相关管理部门申请作业时间，经批准后方可实施，作业时应通知相关管理部门参与。

8.2.3 转体施工临时占用道路的，施工单位应编制施工占路方案、交通导行方案，并应报相关部门审批通过。施工现场交通导行标记应清晰、明确。

8.2.4 转体施工前应联系气象部门，选择适宜的时间段进行转体。

8.2.5 转体过程中应实时分析监控数据，遇异常情况时，应立即通知指挥人员，采取应急措施。

8.2.6 若转体施工过程中突遇暴雨、大风等恶劣天气，经现场指挥部决策，认为风险不可控时应立即停止施工，并进行临时锁定；相关情况及时通知所跨越铁路（公路）的运营管理部门。

8.2.7 当险情发生后，施工单位应立即采取应急处置措施，并第一时间报告当地建设主管部门。建设、勘察、设计、监理等单位应配合施工单位开展应急抢险工作。

8.2.8 正式转体完成后，转体中心区域应封闭管理；姿态调整完成并对转体系统永久锁定后，各设备断电，现场派专人值守。

8.3 环境保护要求

8.3.1 转体桥梁施工前，施工单位应制订详细的环境保护措施。

8.3.2 转体桥梁施工需要占用、破坏、移除绿化时，应编制专项方案，明确范围、时间，并应报相关部门审批通过。

8.3.3 施工过程中应重点控制作业区扬尘。对施工现场的主要道路，宜采取硬化处理、覆盖、洒水等控制措施；对可能造成扬尘的露天堆储材料，宜采取覆盖措施。

8.3.4 施工过程中应采取可靠的降低噪声措施，并应符合现行国家标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523）的规定。钢筋加工、混凝土拌制、振捣等施工作业在施工现场的允许噪声级昼间不应大于 70dB，夜间不应大于 55dB。

8.3.5 施工过程中应采取光污染控制措施。对电焊等可能产生强光的施工作业，应采取避免弧光外泄的遮挡措施，并应避免在夜间进行电焊作业。对夜间室外照明应加设灯罩，将透光方向集中在施工范围内。对于离居民区较近的施工地段，夜间施工时可设密目网遮挡光线。

8.3.6 不可循环使用的建筑垃圾应收集到现场封闭式垃圾站，并清运至有关部门指定的地点。可循环使用的建筑垃圾应回收利用，并进行记录。

附录 A

(规范性)

平衡称重试验

A.1.1 平衡称重试验一般应包括下列内容：

- a) 转体结构的纵桥向、横桥向不平衡力矩及偏心距；
- b) 球铰的摩擦力矩及摩擦系数；
- c) 完成转体结构的配重方案。

A.1.2 平衡称重试验前应进行以下准备工作：

- a) 称重前应在上、下转盘之间布置千斤顶、位移计、压力传感器及配套的抄垫等；
- b) 千斤顶、位移计应沿梁体纵轴线对称布置，千斤顶宜布置于滑道上，位移计宜布置于转盘边缘。

A.1.3 平衡称重试验步骤应符合下列要求：

- a) 称重前，用千斤顶顶紧上转盘，降低砂箱高度 20~30mm，记录各位移计的初始值，对四周撑脚位置进行标记，测量撑脚底缘线距离滑道面的初始距离；
- b) 根据监控指令实施分级加载，可根据理论起顶力的 20%开始，按照 10%的级差加载，直至转体结构发生转动为止，每一级加载完成后，记录各位移计读数，同时测量各撑脚标记点至滑道面的距离；
- c) 根据监控指令实施分级卸载，每一级卸载完成后，记录各位移计读数，同时测量各撑脚标记点至滑道面的距离；
- d) 称重完成后，根据测量数据计算转体所需配重及位置；
- e) 根据监控指令进行配重。

A.1.4 采用中心支撑转体方案，施工支架拆除后，转体结构的平衡状态应符合下列规定：

- a) 球铰摩擦力矩大于转体结构不平衡力矩，此时梁体不发生绕球铰的刚体转动，体系的平衡由球铰摩擦力矩和转体结构不平衡力矩所保持；
- b) 球铰摩擦力矩小于转体结构不平衡力矩的情况，此时梁体发生绕中心球铰的刚体运动，直至撑脚参与工作，体系的平衡由球铰摩擦力矩、转体结构不平衡力矩和撑脚对球铰球心的力矩所保持。

A.1.5 球铰静摩擦力矩和转体结构不平衡力矩的确定：

- a) 球铰摩擦力矩大于转体结构不平衡力矩时
支架拆除后，转体结构在自身的不平衡力矩作用下不能发生转动。此时进行不平衡称重试验，采用千斤顶分别从纵向两侧支顶转体结构，使转体结构在沿梁轴线的竖直面内发生逆时针、顺时针方向微小转动，记录转动过程中荷重传感器示值和百分表读数。转体结构不平衡力矩和转铰摩擦力矩按公式 (A.1)、(A.2) 计算：

$$M_G = \frac{P_{2顶} \times L_2 - P_{1顶} \times L_1}{2} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$M_Z = \frac{P_{2顶} \times L_2 + P_{1顶} \times L_1}{2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

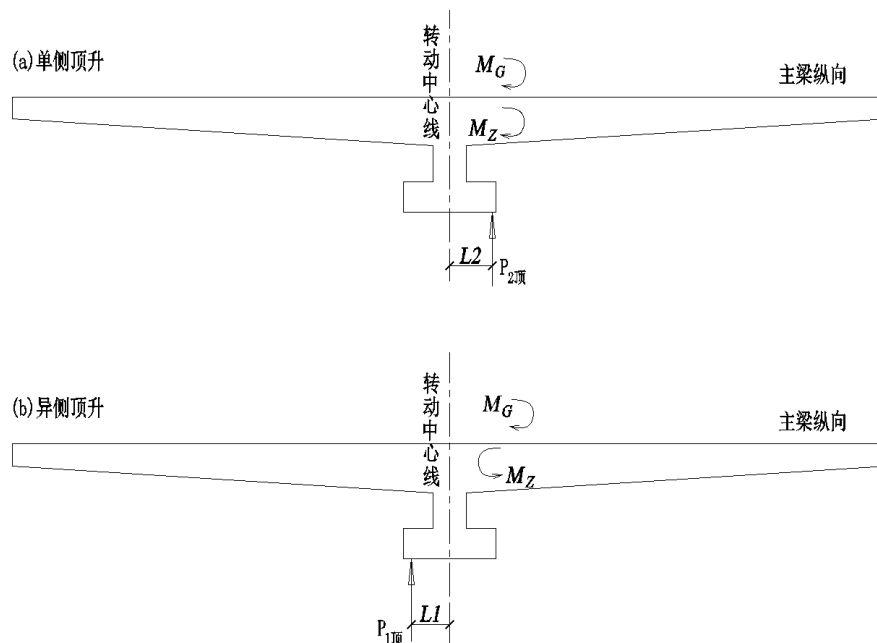
M_G ——转体结构不平衡力矩 (kN·m);

M_Z ——球铰摩擦力矩 (kN·m);

$P_{1\text{顶}}$ ——使梁体顺时针转动时千斤顶顶力 (kN);

$P_{2\text{顶}}$ ——使梁体逆时针转动时的千斤顶顶力 (kN);

L_1 、 L_2 ——千斤顶顶力点距转铰几何中心的距离 (m)。



图A.1 转动球铰摩擦力矩较大时的顶升试验

b) 球铰摩擦力矩小于转体结构不平衡力矩

支架拆除后,转体结构在自身的不平衡力矩作用下即发生转动。此时进行不平衡称重试验,转体结构偏重侧千斤顶落顶,使转体结构在沿梁轴线的竖直面内发生顺时针方向轻微转动,同时偏轻侧千斤顶读数为零。然后偏重侧支顶转体结构,发生逆时针方向轻微转动,同时偏轻侧千斤顶读数为零。记录转动过程中荷重传感器示值和百分表读数。其转体结构部分不平衡力矩和球铰摩擦力矩按式(A.3)、(A.4)计算:

$$M_G = \frac{(P_{2\text{顶}} + P_{2\text{放}}) \times L_2}{2} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$M_Z = \frac{(P_{2\text{顶}} - P_{2\text{放}}) \times L_2}{2} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

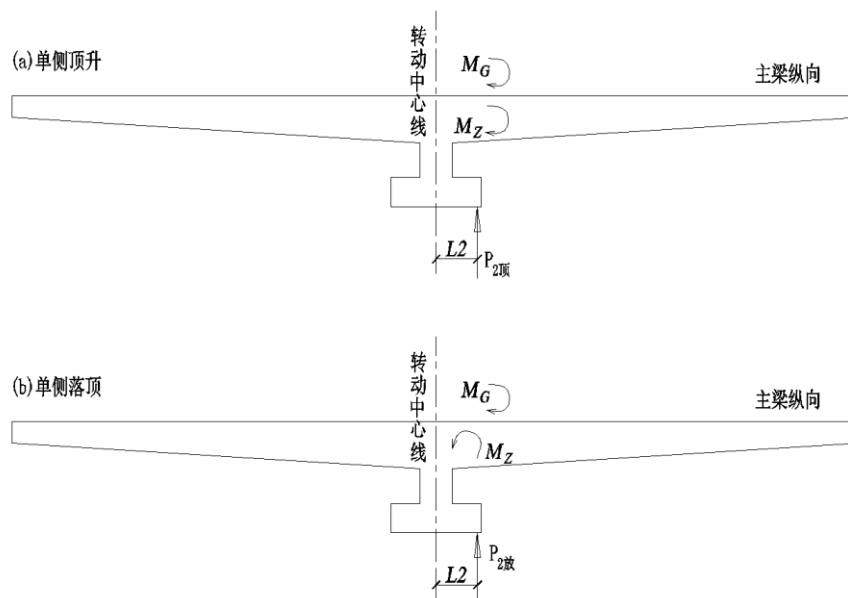
M_G ——转体结构不平衡力矩 (kN·m);

M_Z ——转动球铰摩擦力矩 (kN·m);

$P_{2\text{顶}}$ ——使梁体逆时针转动时千斤顶顶力 (kN);

$P_{2放}$ ——使梁体顺时针转动时千斤顶顶力 (kN);

L_2 ——千斤顶顶落点距转动球铰几何中心的距离 (m)。



图A.2 转铰摩擦力矩较小时的顶升及落顶试验

- c) 横向平衡称重试验方法参照纵向平衡称重试验进行, 宽幅、曲线、高耸大跨结构桥梁必须进行横向平衡称重试验;
- d) 转体重量较大时, 也可考虑采用多点协同称重方式。

A.1.6 球铰静摩擦系数和重心偏心距的分析计算

称重试验时, 球铰在竖直面内发生逆时针、顺时针方向微小转动, 即微小角度的竖转。摩擦力矩为摩擦面每个微面积上的摩擦力对球铰中心竖转法线的力矩之和。

球铰静摩擦系数 μ_0 可按式计算:

$$\mu_0 = \frac{M_Z}{R_0 G} \dots\dots\dots (A.5)$$

转体结构偏心距 e_0 应按式计算:

$$e_0 = \frac{M_G}{G} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

R_0 ——球铰的球面半径 (m);

G ——转体结构的总重量 (kN);

其余符号同(A.1)~(A.2)式。

附录 B

(资料性)

平衡称重试验记录

B.1.1 称重试验结果可按表B.1进行记录。

表B.1 称重试验及计算结果记录

项目（工点）名称				
转体墩号			转体重量（kN）	
支撑形式			转铰类型	
转铰平面半径（m）			转铰球面半径（m）	
称重试验方向（纵桥向/横桥向）				
摩阻力矩 大于不平 衡力矩	左侧千斤顶顶升 临界值（kN）		右侧千斤顶顶升 临界值（kN）	
	左侧支点力臂(m)		右侧支点力臂(m)	
	静摩阻力矩 M_Z （kN·m）			
	不平衡力矩 M_G （kN·m）			
	静摩阻系数 μ_0			
	偏心距 e_0 （m）			
摩阻力矩 大于不平 衡力矩	千斤顶顶升临界值 （kN）		千斤顶落顶 临界值（kN）	
	左侧支点力臂(m)		右侧支点力臂(m)	
	静摩阻力矩 M_Z （kN·m）			
	不平衡力矩 M_G （kN·m）			
	静摩阻系数 μ_0			
	偏心距 e_0 （m）			
注：1. 支撑形式包括中心支撑、中心与周边环道共同支撑、中心与单侧环道共同支撑； 2. 转铰类型包括钢球铰、支座式球铰、RPC球铰等。				

附录 C

(资料性)

质量检查验收记录

C.1.1 水平转体分项工程相关质量检查及验收记录宜采用表C.1。

表C.1 桥梁水平转体分项工程质量检查及验收记录

工程名称				转体墩号	
施工单位		项目经理		项目技术负责人	
分包单位		分包单位负责人		分包项目经理	
序号	检验项目 (实际检验项目后打“√”)	施工单位检查评定结果		监理单位验收结果	
1	钢转铰边缘相对高差 ()				
2	钢转铰定位销轴套管中心轴与球铰中心轴重合度 ()				
3	钢转铰定位中心轴垂直度 ()				
4	钢转铰同心圆四氟板顶高差 ()				
5	环道钢板顶面标高误差 ()				
6	相邻环道钢板拼接边缘高差 ()				
7	钢转铰转动中心误差 ()				
8	转体支座垫石顶高差 ()				
9	转体支座中心位置 ()				
10	转体支座水平度 ()				
11	牵引反力座的轴线和高差 ()				
12	撑脚与滑道的垂直距离 ()				
13	齿轮齿条同心半径 ()				
14	转体梁轴线偏差 ()				
15	转体梁顶面高差 ()				
16	转体梁同跨对称点高差 ()				
检 查 结 论	项目专业 技术负责人 年 月 日		验 收 结 论	监理工程师 年 月 日	

参 考 文 献

- [1] DG/TJ 08-2220-2016 桥梁水平转体法施工技术规程
- [2] DB42/T 2249-2024 桥梁水平转体技术规程
- [3] TG/01-2014 铁路技术管理规程
- [4] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范
- [5] Q/CR 830-2021 铁路桥梁施工用转体球铰
- [6] Q/CRCC 23202-2023 桥梁转体技术规程

广东省交通运输指导性技术文件

GDJT 008-02-2024

桥梁水平转体技术规程

Technical specification for Horizontal Swivel Bridges

条 文 说 明

4 水平转体桥梁设计

4.1 一般规定

4.1.5 为了尽量减小水平转体桥梁施工对既有铁（公）路的影响，所跨线路为路堑时，一般将桥墩（台）设置在路堑坡顶以外。若路堑较深，需在边坡上设置桥墩（台）时，宜采用改变边坡地形，将基础及支架范围内边坡削方成平坡方式保护边坡，以保持路基边坡稳定，并验算路堑边坡稳定性；

所跨线路为路堤时，预制支架及桥墩基础支架基础一般不进入既有线路路基边坡。困难条件下，需采取可靠防护措施，确保既有路基的稳定。

4.2 转体方案设计

4.2.3 设置合龙段的优势在于：①可以通过合龙段调整转体后的梁端高程及成桥线形；②合龙段能增加边跨支座的压力储备；③相比于顶升、落梁，设置合龙段时支座受力大小可以精确计算。

不设合龙段的优势在于：①能节约部分工期；②无需再次邻近既有铁路（公路）进行梁体浇筑施工。

当不设合龙段时，设计应分析计算顶梁工况下梁体整体及局部受力，给出合理的顶升力。

4.2.5 设计在确定合龙段长度时，容易忽略梁端预留钢筋的影响。实际转体前，会对伸出的纵向预留连接钢筋进行适当弯折处理，但直径较大的纵向主筋不宜 90° 起弯，容易造成钢筋断裂且损伤主梁混凝土。也有对角点处部分钢筋进行截短，转体完成后再焊接接长的处理方式，钢筋的搭接长度应符合相关规范要求。

设计宜综合考虑以上因素，确定混凝土梁合龙段长度及梁端预留钢筋的长度。

主梁为钢梁时，转体过程中合龙段两侧梁体的最小水平距离控制值可以适当减小，但应考虑一些特殊施工措施的影响因素，例如为了保证钢梁顶、底、腹板焊缝不在同一个断面上而设置的榫口。

4.2.6 水平转体桥梁跨越多股铁路、采用整幅桥两侧转体时，存在中跨合龙段。中跨合龙段的施工对铁路运营来说，是一个较大的风险源，存在异物坠落损害铁路设施或运行列车风险。根据国铁集团工电部《关于加强穿（跨）越铁路营业线和邻近营业线工程方案等审查和施工安全管理的通知》（工电桥房函[2020]48号）的相关要求，应选择下方两条铁路线间距较大，且有拆除吊架、模板的空间与通道的位置设置中跨合龙段。中跨合龙方案可采用“钢壳法”等永临结合的构造措施，减少施工对桥下铁路运营的影响。

4.2.8 高耸、大悬臂、曲线转体桥受偏心荷载的影响较大，转体阶段稳定性差。理论分析表明：与中心支撑转体系统相比，中心+环道支撑转体系统能大幅提高结构的抗倾覆稳定性。该系统在武汉常青路跨铁路桥、襄阳北编组站大桥及深南高铁跨广茂铁路转体桥等工程上成功应用，转体状态平稳，合龙精度高。

宽幅桥在受力方面具有明显的横向效应，转体施工阶段的支承宽度近似等于球铰的直径，转体桥越宽，横向悬臂就越大，稳定性越差，且横向通过配重达到平衡的难度远大于纵向配重。参考相关资料，本文件将宽度大于 35m 的转体桥定义为“宽幅桥”，并建议采用中心+环道支撑转体系统。悬臂长度较大的曲线桥，横向偏心较大，难以通过设置预偏心及配重实现平衡转体时，也可采用中心+环道支撑转体系统。

4.2.9 将转体结构的重心控制在略微偏向于所跨越铁路（公路）的边跨侧，可以降低转体过程中不可控因素（如阵风）所带来的安全风险，减少偶然荷载引起的不平衡力矩致使转铰向铁路（公路）侧发生竖转的几率，避免上部梁体向铁路（公路）侧出现突然“栽头”的现象发生。尤其对于电气化铁路，可保证转体期间桥下铁路净空及梁体与电气化设备的安全距离。临时配重设置在边跨，也便于转体就位后拆

除配重,安全性更高。转体施工斜拉桥转体段一般设计为桥塔两侧跨度基本相等的形式,以利于实现平衡转体。桥塔两侧跨度长度相差较大的斜拉桥,可考虑大跨侧梁体采用箱型截面,小跨侧梁体加厚顶、底、腹板或者直接做成实心截面,使得桥塔两侧梁体自重对转动中心的力矩相等或接近。

4.2.10 球铰预偏心多指设置横向预偏心,主要适用于曲线桥重心横向位置与转动中心不重合的情况。纵向不对称转体桥也存在设置预偏心的情况,但多数是通过配重方式实现平衡转体。球铰预偏心的可调范围有限,横向预偏心一般应控制撑脚外边缘不超过桥墩横向外边缘,超过此范围或纵向配重不能平衡时,宜采用中心+环道支撑体系。

通过设置转铰预偏心调整转体系统重心时,应考虑转体前后,转铰预偏心所造成的转体结构纵、横向偏位并提前设置预偏量。

4.3 结构计算

4.3.2 转体施工可以选择在5级或更低风速以下进行,但拆除砂桶、解除临时锁定之前的阶段可能承受更大的风荷载,本条提出按十年一遇风速确定施工阶段的风荷载,以计算永久结构、临时支撑的强度和稳定性。查《公路桥梁抗风设计规范》表A.3可知:广东省行政区域内,阳江、汕尾十年一遇风速最大,达到39.9~40.0m/s,相当于13级风;连县十年一遇风速最小,达到19.2m/s,相当于8级风。由此可见,广东省内十年一遇风速至少相当于8级风。解除临时约束后,转体过程中的抗倾覆稳定性可按5级风速的上限值10.7m/s进行计算。

4.3.6 部分现有文献和标准提出了三道失稳防线的概念,即:转铰竖向转动失稳、转铰整体绕角点转动失稳和撑脚失稳,但未明确转体结构的抗倾覆稳定系数按哪一道失稳防线来计算。很显然,这三道失稳防线下的结构抗倾覆力矩是不同的,计算出来的稳定系数相差较大。本文件在计算抗倾覆稳定系数时,不采用“失稳防线”的说法,引入“临界稳定状态”的力学术语,分为“中心支撑球铰竖向转动临界稳定状态”、“中心+环道支撑临界稳定状态”和“环道支撑临界稳定状态”。

球铰的静摩阻系数大于动摩阻系数,静止与转动状态下的抗倾覆力矩是不同的。本条参考《公路桥涵施工技术规范》中关于架桥机安装及过孔作业时抗倾覆稳定系数的相关规定,抗倾覆稳定系数限值在静止状态下取1.5,转动状态下取1.3。

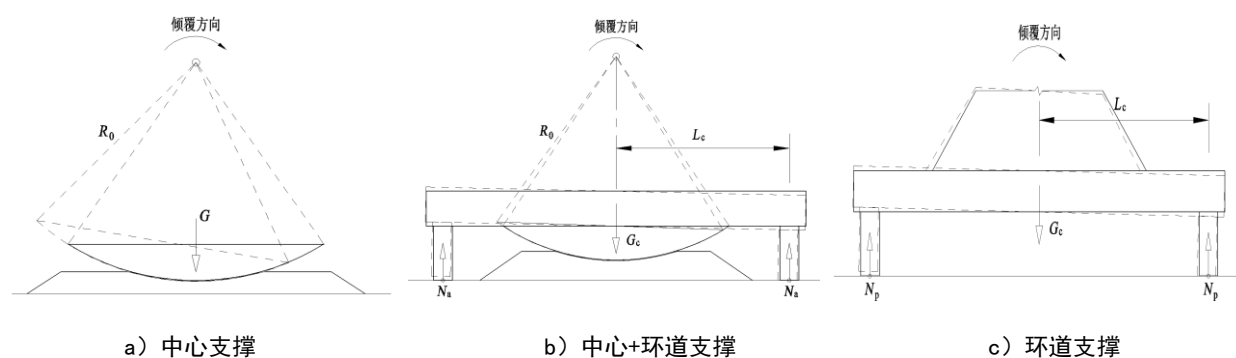


图 S.1 三种支撑形式临界稳定状态

4.3.7 转铰的抗倾覆力矩与转体重量、摩阻系数及球面半径成正比,对于小吨位的转体桥,为了保证转体时的稳定性,转铰的摩阻系数不宜过小。设计可根据抗倾覆稳定系数的计算情况,对转铰摩阻系数的最小值做出相应要求。

4.3.8 采用中心+环道支撑转体系统时,临界稳定状态下,结构抗倾覆力矩的理论计算公式为:

$$M_{bk2} = \mu_0 G_c R_0 + \sum N_{\Delta 1i} L_{ci} \dots \dots \dots (S.1)$$

式中： L_{ci} 为第*i*个支腿至转动中心的水平距离沿倾覆方向的投影长度， $N_{\Delta 1i}$ 为第*i*个支腿竖向承载力 N_{si} 与初始加载反力 N_{ai} 的差值，其余符号含义同正文公式（5）。支腿竖向承载力为根据支腿的各项结构参数计算得到的承载能力值，初始反力为转体前施加的支腿竖向反力，例如某支腿的竖向承载能力为20000kN，初始反力为10000kN，则 $N_{\Delta 1}=10000$ kN。

倾覆轴线指的是垂直于倾覆力矩方向，结构绕其发生竖向转动的轴线。根据支腿的布置情况，倾覆轴线上可能有1个或2个支腿。

式（S.1）可简化为 $M_{bk2} = \mu_0 G_c R_0 + n N_{\Delta 1} L_c$ ，采用单侧环道支撑时， $n=1.0$ ；采用周边环道支撑时， n 值在1.0~2.0之间。为计算方便，本条正文中的公式（6）偏于安全地将 n 值统一取为1.0。

采用中心支撑转体系统，撑脚与滑道接触的情况，可参照本条计算，且倾覆力矩应考虑重心偏移的影响。

4.3.9 采用环道支撑转体系统时，临界稳定状态下，结构抗倾覆力矩的理论计算公式为：

$$M_{bk3} = \min(GL_c, \sum N_{\Delta 2i} L_{ci}) \cdots \cdots (S.2)$$

式中： L_{ci} 为第*i*个支腿至转动中心的水平距离沿倾覆方向的投影长度， $N_{\Delta 2i}$ 为第*i*个支腿竖向承载力 N_{si} 与转体重量作用下初始反力 N_{pi} 的差值，其余符号含义同正文公式（5）。

一般情况下，环道支撑转体系统的支腿为对称布置，以单侧支腿为倾覆轴线、对向支腿的反力为零作为临界状态，式（S.2）可简化为正文公式（7）。

竖向承载力为根据支腿的各项结构参数计算得到的竖向承载能力值，初始反力为转体重量作用下单个支腿的竖向反力，例如，转体重量80000kN，采用8支腿均匀分布的环道支撑转体系统时，单个支腿初始反力为10000kN，若单支腿的竖向承载能力为15000kN，则 $N_{\Delta 2}=5000$ kN。

5 转体系统设计

5.2 转铰系统设计

5.2.4 以往的一些水平转体桥梁在转铰与下转盘之间未设置凸台，结果导致转铰与下转盘顶面钢筋冲突，需对下转盘顶面钢筋进行大范围截断处理。转铰作用区域应力状态复杂，存在较为明显的应力集中现象，大范围截断钢筋对结构受力不利。设置凸台或垫石，使转铰高于下转盘顶面，可避免截断钢筋，保证混凝土的密实度，改善下转盘受力。

参考已实施工程的经验数据，推荐凸台或转铰垫石高度不小于50cm，以便于施工人员进行施工操作、检查、测量等作业。凸台或转铰垫石高度太小，不能解决钢筋截断问题，也不利于施工人员进行操作。以转体重量300000kN的球铰为例，平面投影半径 $R_1=250$ cm，球面半径 $R_0=1000$ cm，矢高 $f=32$ cm，凸台高度为50cm时，球铰底面至下转盘（承台）顶面混凝土厚度为18cm，可布置3层钢筋网。转体重量超过300000kN时，凸台高度应适当加大。

凸台、转铰垫石的受力符合局部承压的受力特点，可按局部承压构件进行设计和配筋。凸台或球铰垫石边缘距下球铰或下座板边缘的距离不宜小于50cm。

5.2.5 上、下转铰间的接触应力分布较为复杂。采用实体有限元方法对转铰进行接触分析发现：在理想接触状态下，接触应力呈现从球铰中心向边缘逐渐增大的趋势，在上、下转铰接触面边缘，由于几何边界的变化，会存在应力集中现象，接触应力较大。

一般而言，在距转动中心 $0.8R_1$ 范围内的接触应力略小于平均压应力，分布相对均匀。平均压应力能够在一定程度上反映转铰的应力水平，且计算方便。因此，本文件将其作为指导设计的参数指标。

转铰一般与上、下混凝土转盘相连，其尺寸大小将影响上、下转盘的局部承压。本文件根据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》（TB 10092-2017）中混凝土容许应力及局部承压计算公式，确定了相应的钢

制转铰竖向平均压应力限值。

根据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》第 3.1.4、3.1.5 条：

$$\text{混凝土局部承压应力} [\sigma_{c-1}] = \beta [\sigma_c] \quad \dots\dots\dots (\text{S.3})$$

其中， $[\sigma_c]$ 为混凝土的轴心抗压容许应力；

$$\text{局部承压应力提高系数 } \beta = \sqrt{\frac{A}{A_c}} \quad \dots\dots\dots (\text{S.4})$$

式中： A_c —局部承压面积； A —计算底面积，该部分的混凝土厚度应大于底面积 A 的短边尺寸。

由上式可知，下转盘面积与转铰投影面积的比值越大， β 值越大。下承台除了要布置转铰，还要布置滑道，且预留封固钢筋，其短边尺寸均大于其厚度，因此按下承台的厚度计算局部承压面积。结合本文件第 5.5.5 条：

转铰的平面投影半径 $R_1=1.0\text{m}$ 时，下承台厚度不小于 2.5m ，计算得到 $\beta=1.41$ ；

转铰的平面投影半径 $R_1=2.5\text{m}$ 时，下承台厚度不小于 5.0m ，计算得到 $\beta=1.13$ ；

转铰的平面投影半径 $R_1=3.0\text{m}$ 时，下承台厚度不小于 6.0m ，计算得到 $\beta=1.13$ 。

为便于设计者取值，本文件将局部承压应力提高系数 β 统一为 1.13 ，由此换算出正文表 2 所列出的转铰竖向平均压应力限值。设计者也可根据转铰和承台的实际尺寸，参考上述方法，对竖向平均压应力限值进行适当调整。

另外，根据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》，如按临时荷载计算，局部承压应力可以提高 30%，但考虑到实际转铰底面压应力不可避免地存在一定程度的不均匀性，故不考虑提高，仅将其作为安全储备。

5.2.6 通过转铰接触应力分析可以发现：在接触面平面投影半径 R_1 不变的情况下，随着转铰球面半径 R_0 的增大，转铰圆心角 α 变小，上、下转铰面间的接触应力将趋于均匀，各点应力也更加接近于平均压应力 σ_0 。本文件第 5.4.6 条公式(14)进行转体驱动力计算，也是基于压应力平均分布得到的近似公式。为了保证上述公式的精度，应限制转铰接触面对应圆心角 α 的最大值，一般认为不大于 18° 。

当转铰圆心角 α 过小时，转铰的球面半径过大，趋近于平铰，转体称重较为困难。

参照东南大学张琪峰硕士论文《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》的相关研究成果，转铰接触面对应的圆心角宜介于 $10^\circ \sim 18^\circ$ 之间。则有：

$$\frac{R_1}{\sin 18^\circ} \leq R_0 \leq \frac{R_1}{\sin 10^\circ} \quad \dots\dots\dots (\text{S.5})$$

即：

$$3.24R_1 \leq R_0 \leq 5.76R_1 \quad \dots\dots\dots (\text{S.6})$$

5.2.7 球铰的定位转轴一般采用高强度的合金结构钢，以常用的 40Cr 为例，查询《合金结构钢》(GB/T 3077)可知，40Cr 的抗拉屈服强度 $\sigma_s=785\text{Mpa}$ ，参考《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)条文说明 3.2.1，抗剪强度 $\tau_s = \sigma_s/\sqrt{3} = 453\text{Mpa}$ ，考虑 2 倍安全系数，取 $[\tau]=453/2=226\text{Mpa}$ 。

转体动力设备对称布置时，球铰不承受水平力， k 可取小值；采用正文图 4 所示的中心+单侧环道支撑转体系统，且动力设备布置在环道支撑腿处时，球铰承受水平力， k 宜取大值。

5.2.8 关于定位转轴的剪力设计值 Q 的计算：

1) 对于中心支撑转体系统，当撑脚未与滑道接触时，可认为中心定位转轴与球铰竖向摩阻力矩共同抵抗转体结构的不平衡力矩。以球铰球心建立力矩平衡公式，中心定位转轴承担的不平衡力矩为：

$$QR_0 = M_G - M_z \quad \dots\dots\dots (\text{S.7})$$

当撑脚与滑道接触时，中心转轴承受的剪力值较小，可偏于安全按上式计算。

2) 对于环道支撑和中心+环道支撑转体系统，由于环道支腿的存在，中心定位转轴不必抵抗转体结

构的不平衡力矩。在转体过程中，驱动力与各支腿摩阻力及球铰内摩阻力的差值由中心定位转轴承担，本条偏于安全地不考虑球铰内摩阻力。

表 3 中的滚动摩阻系数为按滑动摩擦方式简化计算后的取值。

5.3 平衡系统设计

5.3.3 采用中心支撑转体时，撑脚是最后一道抗倾覆防线，撑脚应能承受纵、横向的不平衡力矩。撑脚至少 4 组，平均分布于纵、横向两侧。撑脚个数随转体吨位及转盘半径的增大而增多，一般为 4、6、8、10、12 组。布置撑脚时，应优先保证横向（与桥梁轴线垂直的方向）有一对撑脚。撑脚布置得太密，影响上、下转盘之间的施工空间，人员、设备进出不方便；撑脚布置得太稀疏，则各个方向的抗倾覆能力不均匀。

通过大量转体桥实例工程的数据统计，归纳总结出撑脚的合理布置如下：转体重量 20000kN 以下设 4 组撑脚，100000kN 以下设 6 组，200000kN 以下设 8 组，250000kN 以下设 10 组，300000kN 以下设 12 组。根据转铰直径及构造要求反算出各撑脚间的切向距离在 5m~8m 之间。

5.3.5 超静定支撑体系各支点反力会随边界条件的变化而变化。环道支腿一般刚度较大，滑道表面微小的凸起或下凹也会导致支腿内力产生较大的变化，设置支腿反力时，应考虑支腿因滑道不平顺而产生的最大和最小反力。同时，支腿内应设置调节装置以适应滑道的不平顺，避免转体过程中出现较大的冲击与振动，保证支腿的内力不会发生过大的变化。

5.3.7 环道支撑和中心+环道支撑转体系统采用滚动摩擦接触时，由于支腿需绕转动中心做圆弧运动，相同转体角度下，滚轮各点沿圆弧运动的环向距离与其到转动中心的水平距离呈正比。因此，为避免滚轮与滑道支撑产生相对滑动，应将滚轮设置一定的锥度。滚轮锥度可按式确定：

$$\Delta = D/R \dots\dots\dots (S.8)$$

式中：

Δ ——滚轮锥度；

D ——滚轮中心处的直径；

R ——滚轮中心到转动中心的水平距离。

5.4 动力系统设计

5.4.2 中心+单侧环道支撑转体系统采用连续千斤顶张拉牵引索驱动时，需设置转向装置，驱动力不匀顺，驱动效率低、转动速度慢；当转体角度较大时，驱动力对中心转铰所产生的水平分力也较大。齿轮齿条驱动系统可实现连续驱动，驱动效率高、转动速度快，中心转铰承受的水平力小。

5.4.5 采用千斤顶顶推或连续千斤顶张拉牵引索驱动方式时，一旦发生过转现象，对转体结构实施回转操作较为困难，故应设置限位装置防止发生过转，限位装置包括电气限位和机械限位。现在的转体牵引设备均带有电气限位装置，可一定程度防止过转操作；机械限位可通过在下转盘的固定位置设置挡块来实现强制限位。齿轮齿条驱动方式具备正反方向转动功能，故可不设限位装置。

5.5 上、下转盘设计

5.5.5 墩底转体桥梁的下转盘（承台）厚度过小，将不利于转铰处集中荷载向桩基础的有效传递，会增加下转盘在转体阶段发生冲切破坏的风险。因此，本文件对墩底转体桥梁下转盘（承台）的最小厚度提出了要求。

对已成功实施平面转体的 67 座墩底转体桥梁的承台厚度尺寸进行统计，如图 S.2 所示。

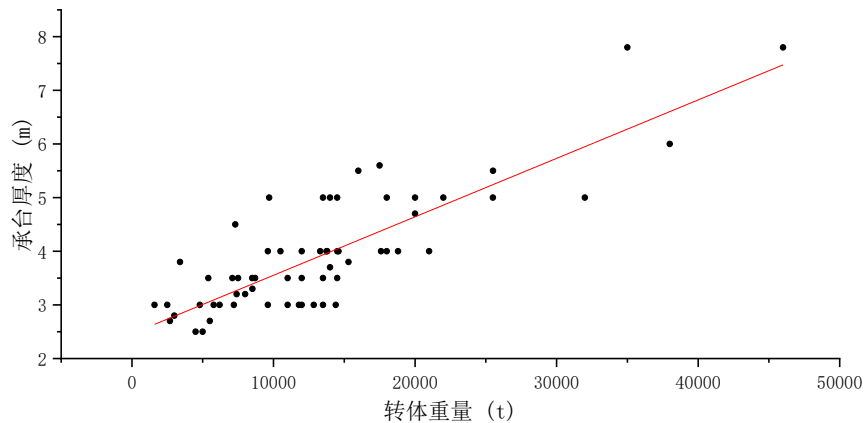


图 S.2 承台厚度与转体重量关系图

可以发现,实际工程中承台厚度 t_c 与中心转铰承担的转体重量 G_c 呈近似的线性关系。对数据进行线性拟合,得到拟合线性方程如下:

$$t_c = 1.08952 \times 10^{-4} G_c + 2.4632 \dots \dots \dots (S.9)$$

经简化整理,并考虑设计操作的方便性,最终得出正文中下转盘最小厚度的计算公式。

5.5.6 转体前,需进行上转盘模板拆除,移除砂桶、清理杂物等操作;转体施工过程中,施工人员需在上、下转盘间进行观察、测量;转体封固时,需在上、下转盘间对预留钢筋进行焊接。早期设计的转体桥,上、下转盘间竖向净距多在 1.0m 以下,现场普遍反应空间过于狭窄,施工操作困难。为了便于施工人员操作,保证施工质量,经广泛征求意见,将上、下转盘竖向净距设定为不小于 1.5m。

6 水平转体桥梁施工与控制

6.2 转体系统安装

6.2.5 根据多个转体桥工程现场实测数据统计,拆除临时支撑后,转体结构的下沉量在 3mm~5mm 左右,本文件第 5.3.3 条提出撑脚与滑道的安装间隙宜控制在 20mm~30mm 之间,则下沉稳定后撑脚与滑道顶面之间的垂直距离在 15mm~25mm 范围内。对于小吨位的转体,撑脚与滑道间隙值宜取较小值。

6.2.8 上部梁体采用支架施工的,梁体浇筑(拼装)过程中传递到墩底的不平衡力矩相对较小,上、下转盘之间的临时固结一般采用砂桶即可。采用悬臂浇筑(拼装)方式的,完全对称同步施工不易做到,故墩底不平衡力矩相对较大。为保证转体结构的抗倾覆稳定性,除安装砂桶外,还宜在上、下转盘间设置抗拉装置,抗拉装置一般采用型钢,规格尺寸通过计算确定。

6.3 转体准备工作

6.3.6 一般来说,采用中心支撑转体系统时,平衡称重试验是必要的,可通过试验测定转铰摩阻系数及偏心量,并进行适当配重,以控制转体施工的稳定性,还可验证驱动力是否满足设计要求。

采用本标准正文图 6 所示的中心+单侧环道支撑体系时,转体结构重心位于中心转铰和环道支腿之间。转体时,结构始终处于稳定平衡状态,平衡称重试验无法操作也并非必要。驱动系统布置在支腿处,力臂较大,所需驱动力较小,在转铰的制造安装质量有保证的前提下,基本不会出现动力不足的情况。

采用本标准正文图 5 所示的中心+环道支撑体系时,支腿围绕中心转铰均匀设置在转盘范围内,为保证各支腿的受力均匀,宜将偏心量控制在 5cm 以内。如采用称重试验测定偏心量,则需要将各支腿临

时脱空,此时出现了仅有中心转铰传力的最不利工况。建议采用在支腿内设置测力装置的方法来计算偏心率并进行配重。

无中心转铰的环道支撑体系,无法进行平衡称重试验,宜在支腿内设置测力装置。

6.3.9 本条由正文第4.3.7条推导而来,球铰的抗倾覆力矩 $M_{bk1} = \mu_0 GR_0$,为满足抗倾覆系数1.5的要求,则重心偏移值的上限值取为 $0.6\mu_0 R_0$ 。

6.5 正式转体

6.5.1 从已成功完成转体的工程实例及相关研究来看,现行标准中 $0.01\text{rad/min} \sim 0.02\text{rad/min}$ 的平转角速度限值偏保守,造成部分转体桥无法在一次正常的铁路天窗时间内完成转体。而一些工程实际采用的转速大幅超过现有标准,也并未造成任何影响。

2020年国家铁路局组织开展了铁路工程建设标准基础研究项目——《铁路桥梁转体技术标准研究》,平转速度专题研究由中铁大桥院负责完成,相关成果《平转施工桥梁转体角速度及角加速度合理取值分析》一文发表在《铁道建筑》2024年第2期,以下为主要研究结论:

1) 转体桥主梁悬臂根部截面的附加应力和转体墩墩身附加应力与转体速度、悬臂长度及墩梁截面尺寸相关,转速越大,附加拉应力越大。但匀速转动产生的截面拉应力值较小,转速不大于 1.0rad/min 时,应力值在 10kPa 以下,可忽略不计。

2) 转速越大,转体过程中的振动越明显,稳定性也越差。模型试验表明,转速在 0.06rad/min 以下时,梁体振幅及转体稳定性是可控的。

3) 采用千斤顶张拉钢绞线牵引上转盘的方式进行转体时,转体速度受到牵引设备能力的限制,一般不超过 0.06rad/min 。仅利用上、下球铰间的摩阻力进行平缓制动时,转速越大,制动时间越长,转体速度在 0.1rad/min 以下时,制动时间一般不超过20s。

4) 匀速及加速平转产生的主梁截面附加应力及梁端振幅均随着转体悬臂长度的增大而增大,宜结合主梁悬臂长度选择合理的转体速度。悬臂较小时,选择大的平转角速度;悬臂较大时,选择相对小的平转角速度。

5) 考虑到干线铁路垂直天窗点的时长一般在120min以下,当转角为 90° 且转速取 0.01rad/min 时,需要157min,在一个天窗点内无法完成转体。跨线桥的斜交角度不宜小于 60° ,则转体角度一般不大于 120° ,铁路天窗点多在90min~120min,转体有效时间在70min~100min之间,一般情况下,均应在一个天窗点内完成转体,转体角速度下限值宜为 $0.021\text{rad/min} \sim 0.03\text{rad/min}$ 。

综合以上因素,本文件建议转体角速度最大值取 0.05rad/min ,对应的悬臂长度为40m;转体角速度最小值取 0.025rad/min ,对应的悬臂长度为80m及以上;悬臂长度在40~80m时,转体角速度的上限值可内插取值。据统计,公跨铁转体桥一次跨越2股或1股铁路的情况占80%以上,对应的主梁悬臂长度在50~70m范围内,计算得到的平转角速度在 $0.03 \sim 0.04\text{rad/min}$ 之间,平转 120° 所需时长约为52~70分钟。

2024年5月发布实施的中国铁建股份有限公司企业标准《桥梁转体技术规程》,对平转角速度的规定为:①墩高20m以下且主梁单侧悬臂长度80m以下时,角速度宜控制在 0.04rad/min 以下;②墩高超过20m或主梁单侧悬臂长度超过80m时,角速度宜控制在 0.03rad/min 以下。

6.5.2 理论上,转体桥主梁根部截面及主墩底截面附加应力与转体加速度成正比例关系。国内一些文献以主梁混凝土的应力达到材料容许应力值为控制条件,计算出转体角加速度允许值的数量级为 10^{-2}rad/s^2 。为便于监测,并将加速度对结构的影响控制在较低的水平,建议按10s~15s的启动加速时间来确定角加速度,即将角加速度控制在 $2.2 \times 10^{-5}\text{rad/s}^2 \sim 4.2 \times 10^{-5}\text{rad/s}^2$ 是较为合理的,此时由转体加速度产生的附加应力基本可以忽略不计。

6.5.4 斜拉桥等高耸结构转体对风荷载较为敏感，采用中心转铰支撑体系时，结构的稳定性较差，宜选择无风或微风条件下进行转体施工，故本文件建议在3级风以下转体；若采取保险措施，并通过分析计算确定了结构的安全性，也可适当提高施工控制风速。中心+环道支撑体系可显著提高转体施工时的结构稳定性，采用中心+环道支撑转体方式的斜拉桥有襄阳内环跨襄北编组站大桥、京港澳高速湖北段跨沪蓉铁路立交桥及武汉和平大道跨地铁车辆段斜拉桥等，实桥现场最大转速达到0.04rad/min，塔顶、桥面和地面最大平均风速超过4级，转体过程中各项状态十分平稳。

为了充分发挥多点支撑转体技术的优势，本文件结合理论分析与工程实例，将采用中心+环道支撑体系的斜拉桥转体施工控制风速设定为5级，与常规桥梁中心支撑转体保持一致。

6.7 转体系统封固及体系转换

6.7.9 相比于墩底转体，墩顶转体一般无需进行转体系统封固处理，但需进行结构体系转换。正常运营状态下，主墩横向应布置2个支座或者更多，故应拆除转铰后落梁至永久支座，以符合设计受力模式。也有一些工程实例转铰不拆除，只抽取定位转轴，作为永久支座保留使用，两侧再新装支座，但各支座的受力值较难与设计值吻合，且后期维护与更换也较困难。

6.8 转体监控

6.8.4-6.8.5 转体前，对现场风速的监测非常重要。梁式桥的风速测量装置宜布设在桥面；斜拉桥等高耸结构风速的测量：在墩底、桥面及塔顶各设一个风速测量装置，根据墩高、塔高、梁体长度等参数，综合分析确定是否适宜转体。

7 质量检查与验收

7.2 检查与验收标准

7.2.14 《公路工程质量检验评定标准第一册土建工程》（JTG F80/1-2017）第8.7.5条关于转体施工梁式桥的检查验收标准如表S.1所示，本文件正文表6是根据表S.1制定的，部分检查项目与转体无关，故进行了删减，相关检查方法和频率可按照JTG F80/1-2017执行。

表S.1 公路桥梁工程验收规范中关于转体梁式桥的检查验收标准

序号	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	封闭转盘和合龙段混凝土强度（Mpa）	在合格标准内	按JTG F80/1附录D方法
2	轴线偏位（mm）	≤L/10000	全站仪，测5处
3	梁顶面高程（mm）	±20	水准仪：跨中及梁端断面，每断面测3处
4	同一横断面两侧或相邻上部构件高差（mm）	≤10	水准仪：测5个断面

注：L为梁跨径，计算规定值或允许偏差时以mm计。

本文件正文表8参考引用《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》（TB10752—2018）第10.4.20条。