

ICS 93.040

CCS P 28

DB42

湖北省地方标准

DB42/T 2249—2024

桥梁水平转体技术规程

Code of practice for horizontal swivel bridges

2024 - 07 - 29 发布

2024 - 09 - 29 实施

湖北省市场监督管理局 发布

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 转体系统设计 3

 4.1 一般规定 3

 4.2 转铰系统设计 6

 4.3 转体平衡系统设计 7

 4.4 转体驱动系统设计 9

 4.5 上、下转盘设计 10

5 转体桥梁设计 11

 5.1 一般规定 11

 5.2 转体方案设计 11

 5.3 转体桥梁结构设计与计算 13

6 转体施工与控制 15

 6.1 一般规定 15

 6.2 转体系统安装与施工 15

 6.3 转体准备工作 16

 6.4 试转与正式转体 17

 6.5 姿态调整 18

 6.6 转体系统封固和体系转换 18

7 转体施工监控 18

 7.1 一般规定 18

 7.2 监控内容 18

 7.3 监控系统 19

8 安全与环境保护 19

 8.1 一般规定 19

 8.2 安全要求与管理 19

 8.3 环境保护要求 20

9 标准实施及评价 20

附录 A （规范性） 跨越铁路的水平转体桥梁限界及孔跨布置要求 21

附录 B （规范性） 平衡称重试验 24

附录 C （资料性） 湖北省地方标准实施信息及意见反馈表 27

参考文献 28

条文说明 29

前 言

本文件按照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。

本文件由湖北省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：中铁武汉勘察设计院有限公司、武汉武铁工程项目管理有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、华中科技大学、中铁十一局集团有限公司、中铁七局集团武汉工程有限公司、湖北建科国际工程有限公司、中船双瑞（洛阳）特种装备股份有限公司、中铁大桥局集团物资有限公司、湖北中测鸿程工程咨询有限公司、中铁重工有限公司。

本文件主要起草人：肖宇松、马行川、李前名、李卫东、宁伯伟、熊世树、李明、罗华松、邬毛志、王良、刘登、谢方俊、范昕、邹向农、陈卫华、龙俊贤、陈银伟、张巨生、崔军、张保国、唐达昆、梅慧浩、王雪强、华志鸿、吕强、杨泽伟、殷伟哲、梁旭、王福华、张欢、李相周、李潭、田小凤、张广潮。

本文件实施应用中的疑问，可咨询湖北省交通运输厅，联系电话：027-83460670，邮箱：2651259230@qq.com；对本文件的有关修改意见、建议请反馈至中铁武汉勘察设计院有限公司，联系电话：027-65270787，邮箱：25886293@qq.com。

引 言

湖北省行政区域内大量跨越既有线路（铁路、高速公路等）的桥梁工程（包括公路桥梁、铁路桥梁、市政桥梁等）采用了水平转体技术，为了规范水平转体桥梁的设计、施工流程，实现桥梁水平转体技术高效智能化整体提升，由中铁武汉勘察设计院有限公司会同有关单位，对近年来湖北省内转体桥设计和施工实践经验及相关科研成果进行了广泛的调查研究和全面的总结，参照国内外相关准则和规范，并在反复征求意见的基础上，制定本文件。

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到4.1.2与极不对称转体桥梁设计与施工技术相关专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：中铁武汉勘察设计院有限公司

地址：武汉东湖新技术开发区关山大道特一号光谷软件园四期E5栋

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

桥梁水平转体技术规程

1 范围

本文件规定了桥梁水平转体系统的主要设计计算参数、水平转体桥梁的总体布置及构造、转体施工控制参数及施工监控的技术要求、安全与环境保护要求。

本文件适用于湖北省行政区域内公路、市政、铁路等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、拱桥等的设计、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 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

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

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。

3.2

水平转体桥梁 horizontal swivel bridge
采用水平转体施工法建造的桥梁结构。

3.3

转体系统 swivel system
为实现转体施工而设置的包含转体支撑、转体平衡和转体驱动等系统的总称。

3.4

转体支撑系统 swivel bearing system
转体施工时承受转动体重量并能实现转动的装置。

3.5

中心支撑 centre bearing
由中心转铰装置承受转动体全部重量的支撑形式。

3.6

环道支撑 loop bearing
由环向分布的支撑装置承受转动体全部重量的支撑形式。

3.7

中心与环道共同支撑 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动体全部重量的支撑形式。

3.8

转体平衡系统 swivel balance 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。

3.9

转体驱动系统 swivel driving system

为转体施工提供驱动力的机械、设备及装置总称。

3.10

转铰 spherical hinge bearing

主要承受转动体竖向荷载，并能在一定范围内旋转的铰结构。

3.11

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。

3.12

撑脚 bearing leg

为防止转体结构发生倾覆而设置的，通常情况下与滑道保持一定竖向间距的临时安全装置。

3.13

支腿 ancillary shoring

为保证转体结构稳定性而设置的，转体时承受一定竖向荷载的装置。

3.14

滑道 slide way

采用滑动或滚动接触方式与撑脚或支腿接触，为其提供支承并发挥导向作用的结构或装置。

3.15

上转盘 upper turnplate

与转动体连接，并将转体荷载传递至转铰的结构或装置。

3.16

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。

3.17

下转盘 lower turnplate

与转铰连接，并向下传递荷载的结构或装置。

3.18

称重 weighing test

转体前测试转体结构的不平衡力矩，推算偏心距及摩阻系数，为正式转体提供数据支持的工序。

3.19

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序。

3.20

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。

3.21

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。

3.22

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。

3.23

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。

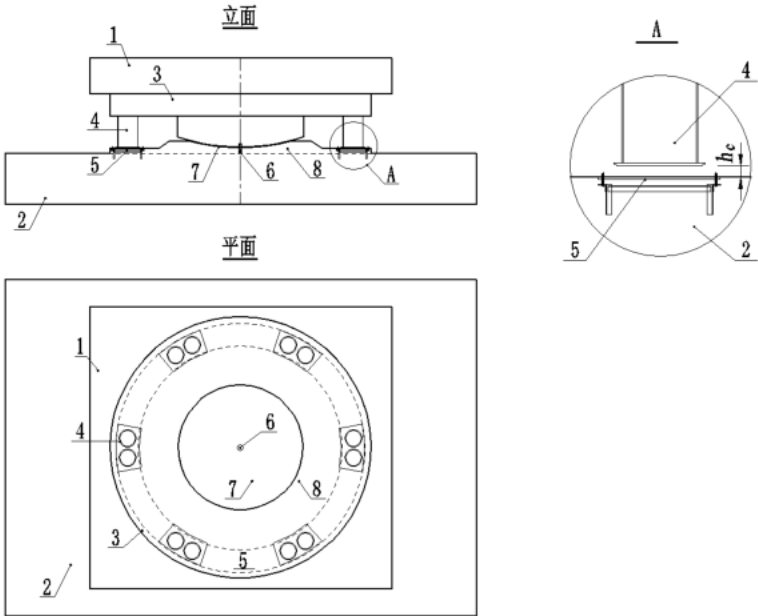
4 转体系统设计

4.1 一般规定

4.1.1 应根据桥梁结构特点和工程建设条件，综合考虑施工的难易程度、安全性和经济效益，选择合适的转体系统，并对转体系统进行专项设计。

4.1.2 根据支撑类型的不同，桥梁水平转体系统可分为中心支撑、环道支撑、中心与环道共同支撑三种基本类型。

a) 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、滑道等部件组成，如图 1 所示，通常情况下，撑脚与滑道间保持一定的竖向间距；



标引序号说明：

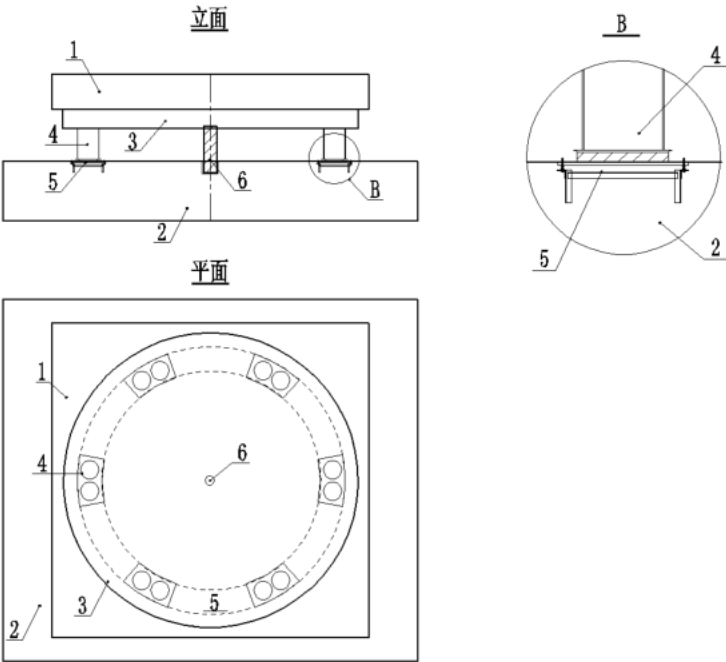
- 1——上转盘；
- 2——下转盘；
- 3——转台；
- 4——撑脚；
- 5——滑道；
- 6——定位转轴；

- 7——转铰；
- 8——凸台或转铰垫石。

注： h 为撑脚底面与下转盘顶面的垂直距离。

图1 中心支撑转体系统示意图

- b) 环道支撑转体系统由上转盘、转台、下转盘、支腿、定位转轴、滑道等部件组成，如图 2 所示，支腿与滑道之间应接触形成稳定支撑；



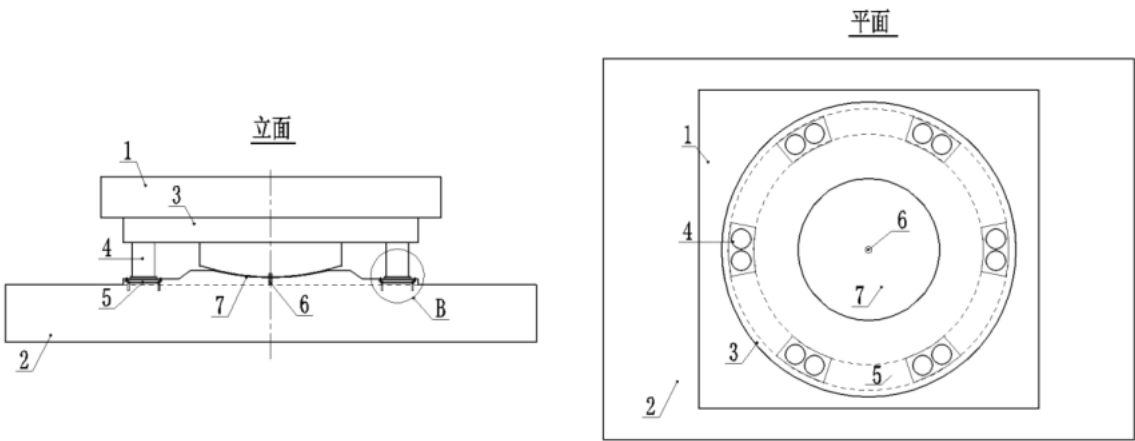
标引序号说明：

- 1——上转盘；
- 2——下转盘；
- 3——转台；
- 4——支腿；
- 5——滑道；
- 6——定位转轴。

注：支腿自带转体驱动装置时，可不设转台。

图2 环道支撑转体系统示意图

- c) 中心与环道共同支撑转体系统由上转盘、转台、下转盘、支腿、转铰、定位转轴、滑道等部件组成，分为周边环道和单侧环道两种类型，如图 3、图 4 所示，支腿与滑道之间应接触形成稳定支撑。

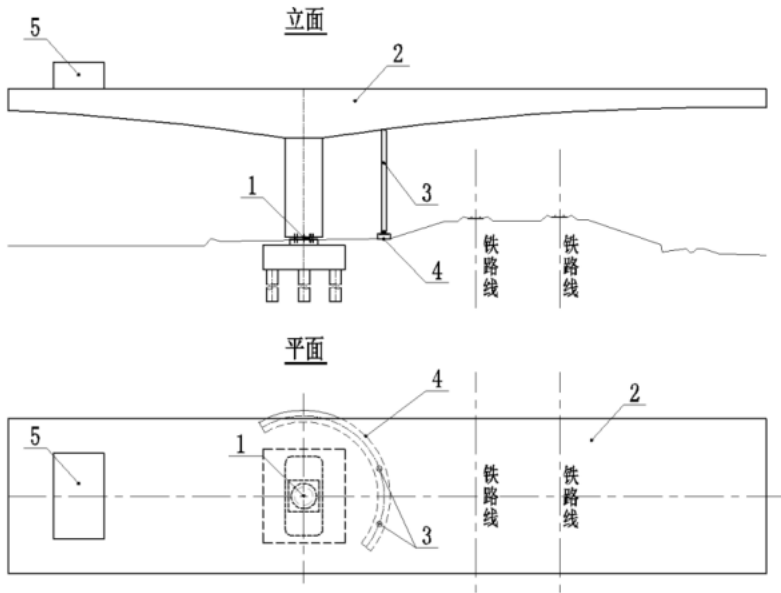


标引序号说明:

- 1——上转盘;
- 2——下转盘;
- 3——转台;
- 4——支腿;
- 5——滑道;
- 6——中心定位转轴;
- 7——转铰。

注: 本图B大样与图2相同, 支腿自带转体驱动装置时, 可不设转台。

图3 中心与周边环道共同支撑转体系统示意图



标引序号说明:

- 1——转铰系统;
- 2——转体结构;
- 3——支腿;
- 4——环向滑道;

5——配重。

注：配重在必要时设置。

图4 中心与单侧环道共同支撑转体系统示意图

4.1.3 转体系统设计时，应对转体支撑系统、转体平衡系统、转体驱动系统的强度、刚度及稳定性进行检算。

4.2 转铰系统设计

4.2.1 水平转体桥梁应结合转体重量、转体系统布置形式和运输条件等，选择相适应的转铰结构。

4.2.2 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。

4.2.3 转铰结构与上、下转盘之间应形成可靠连接，以保证转体施工过程中剪力、扭矩等内力的有效传递。

4.2.4 转铰下方宜设置凸台或转铰垫石，并满足以下要求：

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

4.2.5 转铰的尺寸应满足下列要求：

- a) 转铰接触面的平均压应力 σ_0 按公式(1)计算：

$$\sigma_0 = \frac{G_c}{\pi R_1^2} \leq [\sigma_0] \dots\dots\dots (1)$$

式中：

G_c ——转铰承担的转体重量（kN）；

R_1 ——转铰接触面平面投影半径（m）；

$[\sigma_0]$ ——转铰竖向平均压应力限值（MPa），钢制转铰的取值可按表 1 确定。

表1 钢制转铰竖向平均压应力限值 $[\sigma_0]$

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

- b) 钢球铰的球面半径和接触面平面投影半径宜满足公式(2)的要求：

$$3.24R_1 \leq R_0 \leq 5.76R_1 \dots\dots\dots (2)$$

式中：

R_0 ——钢球铰的球面半径（m）；

R_1 ——钢球铰接触面平面投影半径（m）。

4.2.6 转体结构应在转动中心设置定位转轴，转轴应按公式(3)进行抗剪承载力验算：

$$k \cdot \tau = k \frac{Q}{A} \leq [\tau] \dots\dots\dots (3)$$

式中：

τ ——中心定位转轴的計算剪应力（MPa）；

k ——安全储备系数，取 1.5；

Q ——中心定位转轴的剪力设计值（N）；

A ——中心定位转轴的有效横截面积（mm²）；

$[\tau]$ ——中心定位转轴的容许剪应力（MPa）。

4.2.7 定位转轴的剪力设计值 Q 可按公式(4)、公式(5)计算确定：

a) 中心支撑转体系统

$$Q = (M_G - M_Z)/R_0 \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 M_G ——转体结构不平衡力矩（kN·m）；
 M_Z ——转铰摩阻力矩（kN·m）；
 R_0 ——转铰球面半径（m）。
b) 环道支撑及中心与环道共同支撑转体系统

$$Q = \sum \vec{V} - \sum \mu_t \vec{F}_t \dots\dots\dots (5)$$

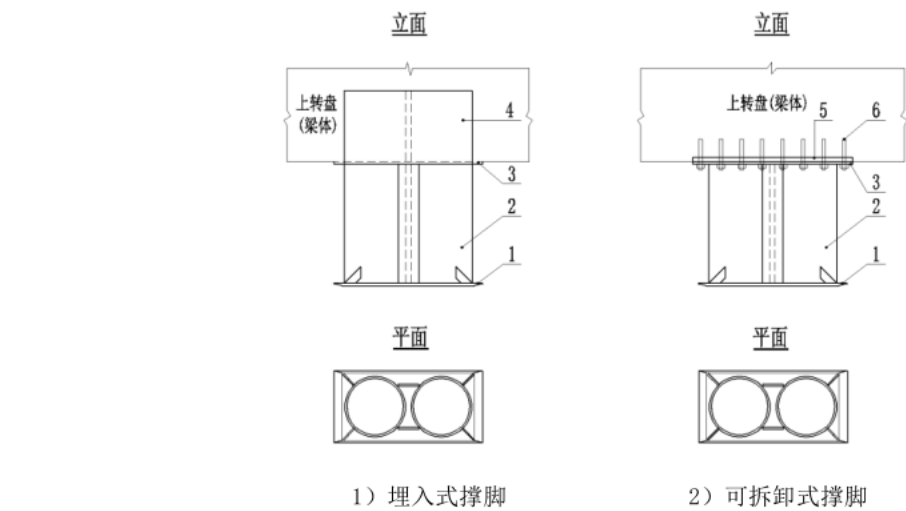
式中：
 μ_t ——支腿与滑道间的摩阻系数，按表 2 取值；
 $\vec{V}$ ——转体驱动力（kN）；
 $\vec{F}_t$ ——各支腿的反力（kN），其产生的摩阻力为向量。

表2 摩阻系数建议值

	滑动摩擦	滚动摩擦
启动时静摩阻系数	0.08~0.10	0.02~0.04
转体时动摩擦系数	0.05~0.08	0.01~0.02

4.3 转体平衡系统设计

- 4.3.1 转体平衡系统包含撑脚、支腿和滑道，其结构设计应满足 GB 50017、GB 50936 的要求。
- 4.3.2 撑脚可采用钢管结构或钢管混凝土结构。采用钢管混凝土结构时，撑脚内混凝土宜采用微膨胀或补偿收缩混凝土，强度等级不宜低于 C40。
- 4.3.3 撑脚可采用埋入式或可拆卸式，其构造形式如图 5 所示。



- 标引序号说明：
- 1——船型板；
- 2——支撑钢管；
- 3——承压钢板；
- 4——预埋钢管；
- 5——预埋钢板；
- 6——预埋螺栓。

图5 撑脚结构示意图

4.3.4 撑脚可采用单圆柱或双圆柱形式，钢管直径 d_c 不宜小于 0.5m，圆钢管的外径 d_c 与壁厚 t_c 之比应符合公式(6)、公式(7)的要求：

a) 圆钢管结构

$$\frac{d_c}{t_c} \leq 100 \times \frac{235}{f_y} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

f_y ——钢管的屈服强度（MPa）。

b) 圆钢管混凝土结构

$$\frac{d_c}{t_c} \leq 135 \times \frac{235}{f_y} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

f_y ——钢管的屈服强度（MPa）。

4.3.5 撑脚的布置应符合以下规定：

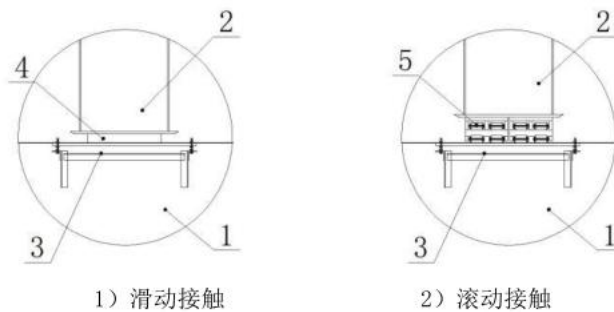
- a) 撑脚应以转铰为中心沿圆周对称均匀布置，全部撑脚底面应处在同一水平面内；
- b) 撑脚数量应根据转盘直径和施工操作空间确定，撑脚间的切向距离可控制在 5m~8m 之间，且不应少于 4 个；
- c) 撑脚直径 d_c 小于或等于 1m 时，撑脚外侧至上转盘边缘的最小距离不宜小于 0.4 d_c 且不宜小于 250mm；撑脚直径 d_c 大于 1m 时，撑脚外侧至上转盘边缘的最小距离不宜小于 0.3 d_c 且不宜小于 400mm；
- d) 采用中心支撑转体系统时，撑脚与滑道的安装间隙宜控制在 20mm~30mm 之间。

4.3.6 环道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，调节各支腿所承担的竖向力；
- 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，计算确定各支腿所承担的竖向力。

4.3.7 环道支撑转体系统及中心与环道共同支撑转体系统，支腿的布置应能对转体结构形成稳定支撑，满足转体结构的受力要求。

4.3.8 支腿与滑道的接触方式可采用滑动摩擦接触或滚动摩擦接触，如图 6 所示。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。



- 标引序号说明：
- 1——下转盘；
 - 2——支腿；
 - 3——环形滑道；
 - 4——滑块；
 - 5——滚轮。

图6 支腿与滑道的接触方式

- 4.3.9 支腿与滑道间采用滚动摩擦接触时，单个支腿承受竖向力不宜大于 20000kN；采用滑动摩擦接触时，单个支腿竖向力不宜大于 5000kN，全部支腿竖向力不宜大于 20000kN。
- 4.3.10 支腿与中心转铰形成超静定的支撑体系时，设计中应考虑转体过程中因滑道不平顺引起的支腿内力的变化。支腿应有可靠的加载及适应滑道表面不平顺的设备与措施。
- 4.3.11 墩顶转体时，滑道可布置在墩顶，也可在其他位置单独布设。
- 4.3.12 滑道应采用圆环形布置，其中心与撑脚或支腿的中心重合，滑道中心应与转动中心重合。
- 4.3.13 滑道结构应满足上部结构施工及转体过程中撑脚、支腿等承力的要求。
- 4.3.14 滑道应有足够的刚度、表面硬度及平顺度，滑道钢板厚度不宜小于 12mm。

4.4 转体驱动系统设计

- 4.4.1 常用的转体驱动系统包含千斤顶顶推、连续千斤顶张拉牵引索、齿轮齿轨驱动等几种基本类型。
- 4.4.2 中心支撑转体系统的驱动系统可采用千斤顶顶推或连续千斤顶张拉牵引索方式，二者也可相互结合使用；环道支撑及中心与环道共同支撑转体系统的驱动系统可采用千斤顶顶推、连续千斤顶张拉牵引索或齿轮齿轨方式。采用中心与单侧环道共同支撑转体系统，当转体角度大于 45 度时，宜采用齿轮齿轨方式。
- 4.4.3 当环道支撑半径较大，支腿位于上转盘范围以外时，宜将驱动系统布置到支腿处。
- 4.4.4 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，转体系统应设置圆形转台和牵引反力座，且应满足下列要求：
- 牵引索宜对称转铰中心设置，每根索的预埋走向应与牵引方向保持一致；
 - 牵引索宜采用预应力钢绞线，强度安全系数应大于 2.0；
 - 牵引索与转台之间应形成有效连接；
 - 牵引反力座宜对称转动中心设置，使牵引力形成平衡驱动力偶；
 - 牵引反力座的承载力宜按不小于牵引力的 2 倍进行设计，其刚度应满足转体牵引设备正常使用要求；
 - 牵引反力座的轴线应与转台侧立面切线重合，高度应满足牵引索水平牵引要求，牵引反力座至基坑等围护结构之间的距离应满足连续千斤顶的张拉空间需求。
- 4.4.5 墩顶转体的钢梁桥宜采用可拆卸式钢转台或钢制牵引盘，其余宜采用钢筋混凝土转台。
- 4.4.6 钢筋混凝土转台的设计，应符合下列要求：
- 转台宜与上转盘采用同一强度等级混凝土材料，且不宜低于 C40；
 - 转台钢筋应伸入上转盘内，并满足最小锚固长度要求；
 - 转台高度不宜小于 60cm。
- 4.4.7 可拆卸式钢转台的设计，应符合下列要求：
- 钢转台截面宜采用箱形截面，并设计成多段拼装结构，钢转台与钢箱梁底板间连接宜采用螺栓连接；
 - 采用中心支撑转体系统时，钢转台底部应预留可拆卸式撑脚的施工安装条件。
- 4.4.8 采用齿轮齿轨驱动时，转体驱动系统的设计应符合下列要求：
- 转体驱动系统应包括：电机（液压马达）、减速机、齿轮齿轨、连接及限位构造；
 - 齿轨应根据转体角度的需要沿支撑环道布置成圆弧形，齿轨圆心与转动中心重合，齿轨、齿轨基座、支撑环道间的连接强度应满足不小于 2 倍驱动力的要求；
 - 应设置合理的齿隙限位及调节装置，保证齿轮与齿轨间的良好啮合；
 - 采用多点驱动时，应使用同步控制技术。
- 4.4.9 中心支撑转体系统的转体驱动力按公式(8)计算：

$$T = \frac{2\mu_0 GR_1}{3R_2} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

T ——转体总驱动力设计值 (kN);

G ——转体重量 (kN);

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 为转台平面半径;

R_1 ——转铰的平面投影半径;

μ_0 ——转铰摩阻系数, 应通过试验确定。无试验数据时: 启动时静摩阻系数取 0.06~0.08, 转体过程中动摩阻系数取 0.03~0.06。

4.4.10 环道支撑转体系统的转体驱动力可按公式(9)计算:

$$T = \frac{\sum \mu_t F_{ti} R_i}{R_2} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

T ——转体总驱动力设计值 (kN);

F_{ti} ——各支腿所承担的转体重量 (kN);

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; 采用电机齿轮齿轨驱动方式时, R_2 为齿轨的平面半径;

μ_t ——支腿与滑道之间的摩阻系数, 应通过试验确定, 无试验数据时, 可按表2选取。

4.4.11 中心与环道共同支撑转体系统的转体驱动力按公式(10)计算:

$$T = \frac{2\mu_0 G_c R_1}{3R_2} + \frac{\sum \mu_t F_{ti} R_i}{R_2} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

G_c ——中心转铰承担的转体重量 (kN);

注: 其余各符号含义同 4.4.9、4.4.10 条。

4.4.12 当采用千斤顶顶推或连续千斤顶张拉牵引索驱动方式时, 应设置水平转动限位装置。

4.5 上、下转盘设计

4.5.1 上、下转盘的混凝土材料强度等级不宜低于 C40。

4.5.2 上、下转盘之间应预留足够的施工操作空间, 上转盘或转台底面至下转盘顶面的竖向净距不宜小于 1.5m。

4.5.3 上、下转盘的设计应符合下列规定:

- a) 上、下转盘的设计尺寸应满足桥梁结构受力及转体系统的布置要求;
- b) 下转盘与转铰、撑脚或支腿的接触部位, 应按局部承压构件进行加强设计。

4.5.4 采用墩底转体施工时, 可通过增加下转盘(承台)厚度、配置下转盘预应力钢束等措施, 改善转体施工阶段承台及桩基础的受力状况。

4.5.5 采用墩底转体施工时, 下转盘(承台)的厚度宜满足公式(11)的要求:

$$t_c \geq \frac{G_c}{100000} + 2 \dots\dots\dots (11)$$

式中:

G_c ——转铰承担的转体重量 (kN)，小于 $1.0 \times 10^5 \text{ kN}$ 时，取 $G_c = 1.0 \times 10^5 \text{ kN}$ ；

t_c ——下转盘 (承台) 的厚度 (m)。

4.5.6 采用墩底转体施工时，上转盘的设计应满足下列规定：

- a) 上转盘的平面形状宜根据桥梁结构形式及场地条件，采用多边形或圆形；
- b) 上转盘宜采用预应力混凝土结构，厚度不宜小于 1.5m；
- c) 当上转盘内布置有撑脚或支腿时，应根据撑脚或支腿的设计内力配置必要的抗冲切钢筋。

4.5.7 采用墩底转体施工时，承台桩基础的单桩桩顶竖向力设计值可按公式 (12) 计算：

$$N_{id} = N_{id}^z + N_{id}^o \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

N_{id} ——第 i 根桩桩顶竖向力设计值 (kN)；

N_{id}^z ——上、下转盘封固前，单桩桩顶竖向力 (kN)，可采用有限元模型分析确定；

N_{id}^o ——封固后至运营阶段，单桩桩顶竖向力增加值 (kN)，可按刚性承台计算确定。

4.5.8 上、下转盘受力状态复杂，宜采用实体有限元模型进行分析计算。设置预应力的上、下转盘应通过计算确定合理的预应力体系及张拉工序。

4.5.9 上、下转盘后封固设计应满足下列要求：

- a) 后封固钢筋应能与上、下转盘钢筋形成有效连接，锚固长度及保护层厚度应符合相关规范的要求；
- b) 后封固混凝土强度等级不应低于上、下转盘混凝土的强度。

5 转体桥梁设计

5.1 一般规定

5.1.1 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。

5.1.2 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。

5.1.3 水平转体桥梁的平面位置及高程设置应确保转体范围内无障碍物，并应考虑结构变形和施工误差的影响。

5.1.4 跨越铁路的平转桥梁的墩台布置宜遵循以下原则：

- a) 所跨线路为路堑时，桥墩 (台) 宜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，宜将基础及支架范围内边坡削方成平坡，并验算边坡稳定性；
- b) 所跨线路为路堤时，基础及支架不宜进入既有线路路基边坡。困难条件下，应采取可靠防护措施，保障既有路基的稳定；
- c) 桥梁限界及孔跨布置要求可参照附录 A 执行；
- d) 跨越公路平转桥梁的墩台布置可参照上述原则执行。

5.1.5 转动体高度大于 50m 或转体悬臂长度大于 100m 的高耸、大跨水平转体桥梁，左右两端结构相差较为悬殊的不对称转体桥梁，宜采用中心与环道共同支撑体系来提高转体结构的稳定性；曲线桥、宽幅桥必要时也可采用中心与环道共同支撑体系。

5.2 转体方案设计

5.2.1 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。

5.2.2 转体系统宜设置在墩底或墩顶，特殊条件下也可设置在墩中。

5.2.3 水平转体桥梁边跨宜设置合龙段或后浇段，不设合龙段或后浇段时，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。

5.2.4 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。

5.2.5 合龙段长度由桥宽、转体长度、合龙段形状及施工方式等因素确定，一般取 2.0m~4.0m，且转体施工过程中，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连接钢筋等的影响。

5.2.6 上跨铁路的水平转体桥梁，中跨合龙段宜设置在铁路建筑限界平面投影范围以外，并应满足铁路相关管理部门的安全距离要求。

5.2.7 转体方案设计时，一般情况下宜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，使转体结构的重心偏向于非铁路（公路）侧，重心偏移值应满足 6.3.11 条的要求；对于斜拉桥等高耸结构转体，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。

5.2.8 采用临时配重方式时，应对结构进行压重状态下的整体与局部计算，并验算运营状态下边跨梁端支座是否脱空，以保证结构安全和施工安全。

5.2.9 转体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，如图 7 所示，设置临时配重方式调整转体系统重心时，配重重量按公式(13)计算：

$$W_0 = (W_2 L_2 - W_1 L_1) / L_0 \quad \text{..... (13)}$$

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中心的距离（m）；

L_0 ——配重中心至转铰轴心的距离（m）。

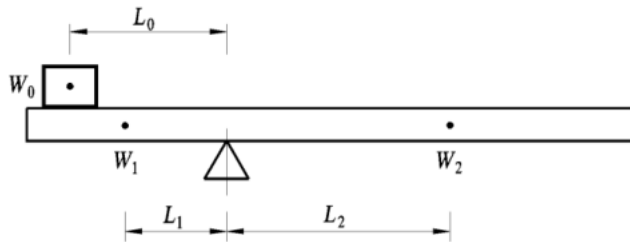


图7 中心支撑平衡转体配重计算图示

- b) 采用中心与环道共同支撑转体系统，如图 8 所示，设置临时配重方式调整转体系统重心时，配重重量按公式(14)计算：

$$W_0 = (W_2 L_2 - W_1 L_1 - F_t L_t) / L_0 \quad \text{..... (14)}$$

式中：

F_t ——支腿反力（kN）；

L_t ——支腿到转铰中心的水平距离（m）；

注：其余符号含义同公式（13）。

$$M_{bk1} = \mu_0 G R_0 \cdots \cdots \cdots (17)$$

式中:

M_{bk1} ——抗倾覆力矩, 即转铰竖向转动摩阻力矩 (kN·m);

μ_0 ——转铰摩阻系数;

G ——转体结构重量 (kN);

R_0 ——球铰球面半径 (m)。

5.3.6 采用中心与环道共同支撑转体系统时, 如图 10 所示的临界状态, 转体结构的抗倾覆力矩按公式 (18) 计算:

$$M_{bk2} = \mu_0 G_c R_0 + N_{\Delta 1} L_c \cdots \cdots \cdots (18)$$

式中:

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

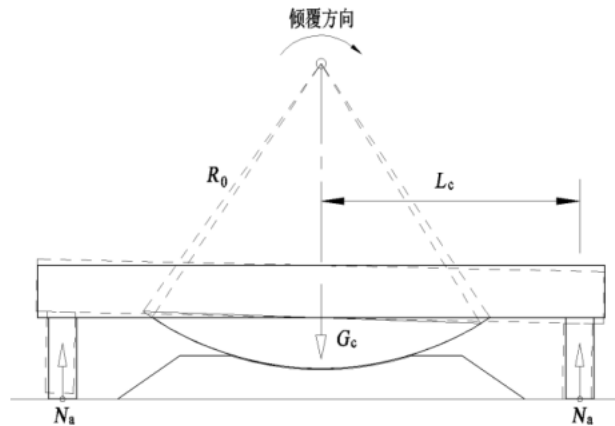
G_c ——转铰承担的转体重量 (kN);

L_c ——转动中心到支腿的水平距离 (m), 倾覆轴线上支腿个数为 2 个及以上时, 按 2 个计算, 取 $L_c = 2R_3 \cos(\theta/2)$;

R_3 ——支腿的分布半径 (m);

θ ——相邻两个承力支腿对应的圆心角;

$N_{\Delta 1}$ ——单个支腿的竖向承载力 N_s 与实际加载反力 N_o 的差值 (kN)。



注: 图中所示 N_a 为初始状态下主动施加的支腿反力, 临界状态下倾覆方向相反侧的支腿反力为零。

图10 中心与环道共同支撑临界稳定状态

5.3.7 采用环道支撑转体系统时, 如图 11 所示的临界状态, 转体结构的抗倾覆力矩按公式 (19) 计算:

$$M_{bk3} = \min(G L_c, 2N_{\Delta 2} L_c) \cdots \cdots \cdots (19)$$

式中:

M_{bk3} ——环道支撑临界稳定状态下的抗倾覆力矩 (kN·m);

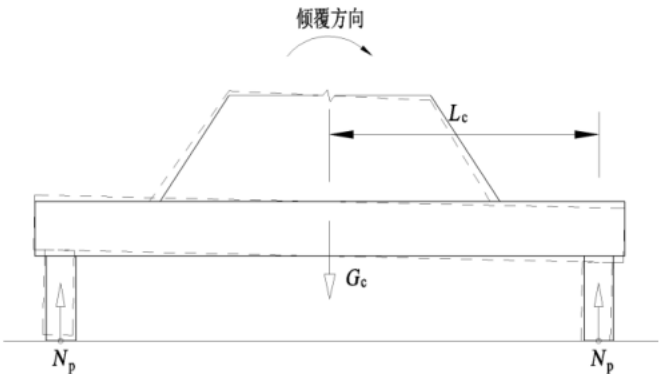
G ——转体结构重量 (kN);

L_c ——结构重心到支腿的水平距离 (m), 倾覆轴线上支腿个数为 2 个及以上时, 按 2 个计算, 取 $L_c = 2R_3 \cos(\theta/2)$;

R_3 ——支腿的分布半径 (m);

θ ——相邻两个支腿对应的圆心角;

$N_{\Delta 2}$ ——单个支腿的竖向承载力 N_s 与转体重量作用下初始反力 N_p 的差值 (kN)。



注：图中所示 N_p 为初始状态下由转体重量产生的支腿反力，临界状态下倾覆方向相反侧的支腿反力为零。

图11 环道支撑临界稳定状态

5.3.8 采用中心与环道共同支撑转体系统时，应根据驱动力的作用位置及设备的驱动能力合理设定支腿的受力大小。

6 转体施工与控制

6.1 一般规定

- 6.1.1 采用水平转体施工法进行桥梁转体施工前，施工单位应结合现场实际情况及设计文件，编制转体施工专项方案，并组织方案评审。
- 6.1.2 转体施工前，应做好各项施工准备并落实施工协议和营业线施工计划。
- 6.1.3 转体施工前，应做好转体桥下设施的防护工作，并针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。
- 6.1.4 转体施工操作各岗位人员应进行培训。

6.2 转体系统安装与施工

- 6.2.1 转体系统各构件的材料及制造、安装、施工精度应符合设计及相关规范的要求，并应进行质量检查和验收。
- 6.2.2 中心与环道共同支撑转体系统各构件出厂前应进行试拼装。
- 6.2.3 当转铰或滑道采用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有效措施保证转铰及滑道下方混凝土的密实度。
- 6.2.4 下转盘设置有预应力钢筋时，预应力钢筋的施工应满足下列要求：
 - a) 预应力钢筋波纹管宜准确定位，当预应力钢筋与转铰、滑道定位骨架位置冲突时，应优先保证定位骨架的位置；
 - b) 预应力钢筋张拉时机与方式，设计无明确规定时，应考虑基坑回填及上、下部结构的施工工序等因素，并根据计算确定。
- 6.2.5 转铰和滑道的安装施工，宜尽量避免对下转盘顶面钢筋的截断破坏；若无法避免，应对截断的钢筋采取等效补强措施。
- 6.2.6 转铰和滑道定位骨架的制作与安装，应满足下列要求：
 - a) 定位骨架的尺寸应满足滑道钢板及转铰的布置要求；
 - b) 定位骨架应有足够的强度和刚度，并应与下转盘第一次浇筑时的预埋钢筋焊接牢固；
 - c) 定位骨架的安装精度误差应不大于 5mm；

- d) 滑道定位骨架的调整螺栓间距不宜大于 1200mm。
- 6.2.7 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。
- 6.2.8 滑道的安装与固定应符合下列规定:
 - a) 滑道钢板与定位骨架之间宜设置调节螺栓,对滑道钢板表面高程进行精确调整,保证滑道表面整体平整度误差不大于 2mm,局部高差不大于 1.0mm/m,拼接焊缝应打磨平整;
 - b) 滑道在安装到位后应做好防腐措施。
- 6.2.9 钢球铰的制造精度应符合下列要求:
 - a) 球面粗糙度不大于 $Ra\ 12.5\ \mu m$;
 - b) 球面各处的曲率应相等,其曲率半径之差不大于 2mm;
 - c) 边缘各点的高程差不大于 1mm;
 - d) 球面轮廓度公差不应超过球铰平面直径的 0.03%和 0.2mm 中的较大值;
 - e) 上、下球铰形心轴、球铰转动中心轴应重合,其误差不大于 1mm;
 - f) 定位转轴套管的中心轴应与转动轴重合,其误差不大于 1mm,定位转轴套管应竖直,其倾斜误差不得大于 3%。
- 6.2.10 钢球铰的安装精度应符合下列要求:
 - a) 球铰安装顶口应保持水平,其顶面任两点误差不大于 1mm;
 - b) 球铰转动中心应位于设计位置,其顺桥向误差不大于 1mm,横桥向误差不大于 1mm。
- 6.2.11 上转盘施工应注意下列事项:
 - a) 按设计要求预埋撑脚、牵引索、封固混凝土竖向连接钢筋及监测装置等,并对预埋件进行固定;
 - b) 转体完成后需进行上、下转盘封固的桥梁,上转盘宜预留压浆孔、振捣孔、排气孔。
- 6.2.12 撑脚与滑道的预留间隙应考虑临时支撑结构拆除后转体结构的下沉量,保证下沉稳定后,撑脚与滑道顶面之间的垂直距离控制在 15mm~25mm 范围内。
- 6.2.13 各撑脚之间的安装高度误差应控制在 $\pm 1mm$ 以内。
- 6.2.14 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,梁体采用悬臂浇筑(拼装)方式时,上、下转盘间宜设置抗拉装置。
- 6.2.15 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 $\pm 10mm$,反力座顶面标高允许误差为 $\pm 20mm$ 。
- 6.2.16 采用齿轮齿轨驱动方式时,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 $\pm 5mm$ 。
- 6.2.17 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) 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;
 - b) 牵引索安装前应进行全面的检查,清理表面灰尘及浮锈;
 - c) 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。
- 6.2.18 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。

6.3 转体准备工作

- 6.3.1 转体前应对转体设备进行检查、标定和调试,以保障各转体设备正常工作;千斤顶、驱动电机、发电机等应配置备用设备。
- 6.3.2 控制系统在运行前应经过空载联试,功能正常方可投入使用。
- 6.3.3 转体动力设备应保证不小于 2 倍的动力安全储备。
- 6.3.4 转体前应完成监控设备的安装和调试,保证安装位置准确,设备运行正常。
- 6.3.5 转体前应对转体结构范围内的构筑物、施工设施、设备等的空间位置进行核实,对梁端及后封固区的预留钢筋等构件进行处理,防止转体过程中互相干扰。

- 6.3.6 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，应检查反力座后的张拉空间是否满足要求。
- 6.3.7 转体前应清理桥面、梁体及其他附属结构表面的漂浮物、易坠物，对无法拆除的设备应采取可靠的固定措施，防止其在转体过程中移位、坠落。
- 6.3.8 转体前应清理滑道，核查撑脚或支腿与滑道之间的间隙或接触状态。
- 6.3.9 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，牵引索应提前预紧，不应交叉、打绞和扭转，预紧力取设计张拉力的 5%~10%。
- 6.3.10 转体前应根据所采用的转体支撑系统，确定是否需要进行平衡称重试验：
- 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；
 - 采用中心与环道共同支撑转体时，应根据支腿布置情况，综合判断是否进行平衡称重试验；
 - 采用环道支撑转体时，不进行平衡称重试验；
 - 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 5.3.4 条的要求。
 - 称重试验可参照附录 B 执行。
- 6.3.11 中心支撑平衡转体称配重时，其重心偏移值应控制在 $0\sim\delta$ 范围内，且不应大于设计初始偏心值， δ 可按公式 (20) 计算：

$$\delta = 0.6R_0\mu_0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

δ ——结构重心偏移值 (m)；

R_0 ——转铰球面半径 (m)；

μ_0 ——转铰滑动摩阻系数。

- 6.3.12 转体前，应拆除梁体支架和上、下转盘间的临时支撑，完成体系转换。支架和临时支撑拆除后应静置观察结构位移、变形情况，遇异常情况时应及时处理。
- 6.3.13 转体前，应在转台或其他合适位置设置弧长及角度观测标尺。

6.4 试转与正式转体

- 6.4.1 正式转体施工前应进行试转体，监测转动系统的应力与变形，测定摩阻系数及驱动力，用于指导正式转体施工。
- 6.4.2 试转角度不宜小于 3° ，以保证试转数据有效采集；试转角度也不宜过大，避免影响桥下交通。
- 6.4.3 试转体时应进行下列工作：
- 试转体开始后应分级加载至结构开始转动，并应记录启动牵引力及转动牵引力；
 - 施工人员应对整个转体系统的工作状态、转体结构平衡状态和关键部位受力状态进行检查，遇异常情况时应及时处理；
 - 试转体时应记录转动时间和转速，并应根据实测结果确定正式转体时的转速；
 - 采用连续千斤顶张拉牵引索方式时，应测试点动一次悬臂端所转动水平弧线距离的数据。
- 6.4.4 正式转体时，转体结构的平转角速度宜根据转体梁段的悬臂长度确定：
- 悬臂长度不大于 40m 时，角速度宜控制在 0.05rad/min 以下；
 - 悬臂长度大于 80m 时，角速度宜控制在 0.025rad/min 以下；
 - 悬臂长度在 40m~80m 之间时，转体角速度的上限值可内插取值。
- 6.4.5 正式转体角加速度宜控制在 $2.2\times 10^{-5}\text{rad/s}^2\sim 4.2\times 10^{-5}\text{rad/s}^2$ 之间。
- 6.4.6 转体动力控制宜采用计算机同步控制技术，各动力点的行程误差不宜大于 1mm。
- 6.4.7 驱动系统启动后，达到设计转速后应保持匀速转动。
- 6.4.8 采用连续千斤顶张拉牵引索驱动方式时，距转体就位相差 2° 时，牵引千斤顶应由连续作业变更为点动操作，梁体逐步就位。
- 6.4.9 采用齿轮齿轨驱动方式时，距转体就位相差 5° 时，开始分级减速，依次下调到正常转速的 1/2、

1/4、1/8，停止。

6.4.10 采用中心支撑转体时，宜选择 5 级风速以下进行转体。

6.4.11 斜拉桥等高耸结构采用中心支撑转体时，宜选择在 3 级风速以下转体；采用中心与环道共同支撑转体系统时，在满足倾覆稳定性及支腿承载力要求的情况下，可在 5 级风速以下转体。

6.4.12 转体就位后，应及时采取措施对转体系统予以临时锁定。

6.5 姿态调整

6.5.1 转体就位后，应对转体结构全面测量检查，并测算出轴线及高程偏差值。

6.5.2 转体结构偏差调整应按照先轴线后高程的顺序进行。

6.5.3 采用连续千斤顶张拉牵引索驱动方式时，轴线偏差可采用连续千斤顶点动控制及限位装置来调整；采用齿轮齿轨驱动方式时，可采用点动控制或改变转动方向来调整。

6.5.4 梁体的横向倾斜及纵向高程偏差可通过设置在上、下转盘之间或支腿内的微调千斤顶来调整，也可通过梁端设置微调千斤顶进行调整。

6.5.5 姿态精确调整后的轴线偏差不应大于 10mm，高程偏差不应大于 20mm。

6.5.6 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。

6.5.7 姿态调整完成后，应及时采取措施对转体系统予以永久锁定。

6.6 转体系统封固和体系转换

6.6.1 转铰封固及梁体合龙施工顺序应按照设计文件中的规定执行。设计文件无规定时，转铰封固应在梁体合龙前完成，合龙宜先边跨，后中跨。

6.6.2 上、下转盘之间的封固混凝土宜采用自密实混凝土，钢筋的连接应满足设计要求。

6.6.3 采用墩顶转体施工桥梁，转体就位、完成边跨合龙后，应拆除转体系统并落梁至永久支座，完成转铰支承到支座支承的体系转换。

6.6.4 混凝土梁桥合龙段宜设置劲性骨架，并按设计文件要求选择合龙温度及张拉预应力，合龙段混凝土宜采用相同强度等级的微膨胀混凝土。

6.6.5 体系转换过程中，应严格保证每个施工阶段转体桥梁整体状态的平衡，应验算每个施工阶段主体结构 and 施工临时结构的强度和刚度，保证施工阶段结构的安全。

7 转体施工监控

7.1 一般规定

7.1.1 采用水平转体施工法施工的桥梁应进行转体施工过程监控，及时掌握转体结构状态，保障转体施工安全。

7.1.2 转体施工监控宜与全桥施工监控统筹考虑。

7.1.3 转体施工监控应编制专项方案，并根据施工进度分阶段实施。

7.1.4 监控单位的资质、人员和设备配置应符合监控要求。

7.1.5 转体施工宜采用具备智能化、信息化功能的监控系统。

7.1.6 应实时分析、处理转体施工监测数据，数据异常时，应及时核查，研判处理措施。

7.2 监控内容

7.2.1 转体施工监控包含转体前、试转及正式转体和转体后三个阶段的监控。

7.2.2 转体施工监控应包含以下内容：

- a) 称、配重试验过程监控；
- b) 转体系统关键部位的应力、变形监控；
- 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与环道共同支撑时，对支腿竖向力或竖向力变化值的监控；
- d) 转体阶段，动力设备工作状态及驱动系统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。

7.3 监控系统

7.3.1 应根据监测目的和转体施工要求、环境特征选择相适应的监控系统，宜采用具备数据自动采集功能的监控设备。

7.3.2 监控系统的采样频率应满足转体施工监控的精度要求。

7.3.3 监控测点的布设应与转体施工桥梁的结构特点、施工方法及所处的环境相适应，并满足 GB 50982 的要求。

7.3.4 监控测点、监控设备的布设不应妨碍桥梁转体施工。

7.3.5 监控期间，应对测点和监控设备采取有效保护措施，避免出现移位、损坏和采集的数据失真等情况。

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 安全要求与管理

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 转体施工前应气象部门联系，按照 6.4.10 及 6.4.11 条的要求，选择适宜的时间段进行转体。

8.2.5 转体前，应成立转体施工临时指挥部，设现场总指挥一名，专家组及应急组成员若干名。

8.2.6 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。

8.2.7 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。

8.2.8 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。

8.2.9 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。钢筋加工、混凝土拌制、振捣等施工作业在施工场界的允许噪声级应满足 GB 12523 的要求。

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 对施工过程中产生的污水应采取沉淀、隔油等措施进行处理，污水处理达标后方可排放。

8.3.7 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。

9 标准实施及评价

9.1 本文件使用方应结合实际，认真做好标准实施准备，包括标准实施的方案准备、组织准备、知识准备、手段准备和物质条件准备等。

9.2 本文件使用方应制定标准实施方案，明确适用对象和场景、提供实施必备条件和保障（组织、制度、资金、人员和设备仪器等）、推荐实施方法路径，确定资源要素配置、关键环节和控制点，提出标准实施中的注意事项。

9.3 本文件使用方应针对相关方和具体对象/岗位进行标准宣贯和培训，结合标准要求，落实责任制，做到横向到边，纵向到底。

9.4 本文件实施主要在工程建设、技术改造等活动中开展。标准实施的重点是落实国家的环境保护、健康、卫生、安全的要求。

9.5 本文件监管单位对标准实施的检查主要是检查标准实施方案的落实情况，需要逐条检查标准实施内容的落实，并记录未实施内容的理由或原因。标准实施检查也要检查标准实施的支持手段和物质条件的落实情况。做好标准实施验证记录，畅通标准实施信息采集的方式方法和反馈渠道，定期整理并处理收集到的意见建议。

9.6 对标准实施评价的基本依据是《中华人民共和国标准化法》等。

9.7 本文件监管单位在标准实施一定时间后，对照标准实施方案，开展标准实施效果评价分析，总结实施经验成效，梳理存在的薄弱环节，标准实施的评价主要是评价标准实施的效果，主要从技术进步、质量水平提高、客户满意度、规范秩序、效率提高、节约费用、节省时间、履行社会责任等方面进行有益性评价，同时还要评价标准实施带来的问题，以便为未来改进提供参考。

9.8 本文件使用方可适时向专业标准化技术委员会和标准归口管理单位反馈情况，提出标准推广、修改、补充、完善或者废止等意见建议。

9.9 标准实施信息及意见反馈表相关示例见附录 C。

附录 A
(规范性)

跨越铁路的水平转体桥梁限界及孔跨布置要求

A.1.1 水平转体桥梁与所跨铁路之间的关系分为：转体施工前、转体过程中、转体完成和成桥后与铁路的相互关系。具体包括：

- a) 预制梁支架基础与铁路安全距离；
- b) 转体前预制梁与铁路安全距离；
- c) 桥墩基础与铁路安全距离；
- d) 转体期间的转体梁体与铁路安全距离（含成桥后桥下净空）；
- e) 边跨现浇段与铁路安全距离；
- f) 边跨现浇段支架基础与铁路安全距离；
- g) 合龙段与铁路安全距离。

A.1.2 为保证转体段梁体浇筑（安装）和转体施工时既有铁路的运营安全，新建水平转体桥梁在转体前、转体过程中及转体施工完成后，不应侵入铁路建筑限界，并与既有铁路设施保持适当的安全距离。

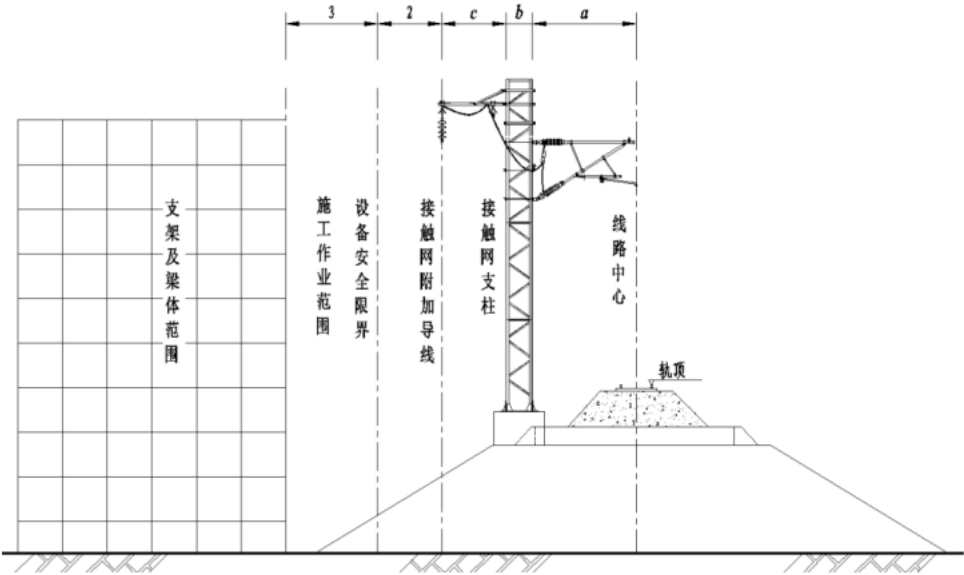
A.1.3 转体段梁体浇筑（安装）支架与铁路安全距离：

- a) 在路堤段，支架基础不宜进入铁路路基边坡。困难条件下，支架进入路堤边坡时，需对铁路路基采取防护措施，以保障铁路路基及支架稳定。如图 A.1 所示，桥梁施工支架边缘线与最外侧铁路中心线水平距离最小控制值 B_1 按公式 (A.1) 计算：

$$B_1 = (a + b + c + 5) \text{m} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- a ——设备安全限界，电气化铁路 a 一般取 3.1m，非电气化铁路 a 一般取 2.9m；
- b ——设备宽度，电气化铁路 b 一般取 0.5m，非电气化铁路 b 一般取 0.15m；
- c ——接触网附加导线至立柱外边缘的净距，电气化铁路 c 一般取 1.9m，非电气化铁路 $c=0$ 。



图A.1 路堤段支架与铁路安全距离示意图

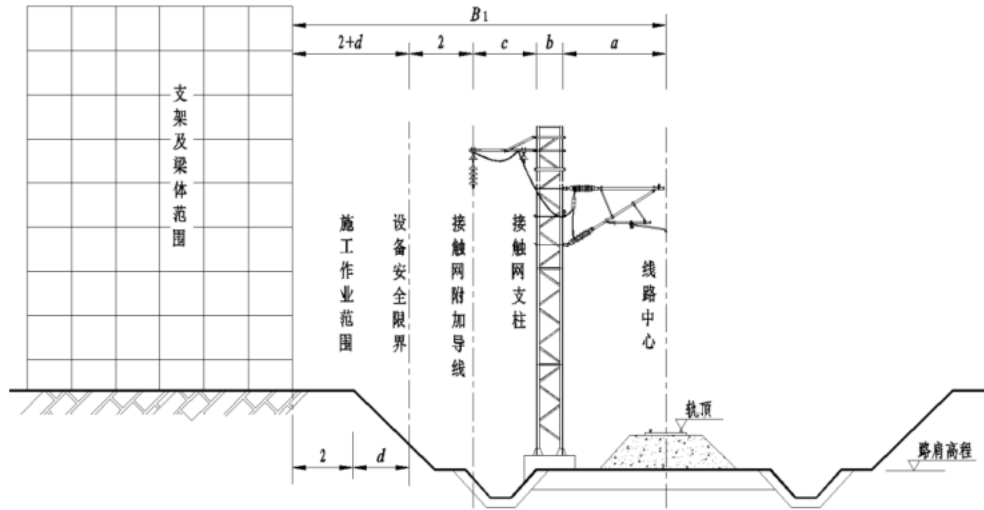
- b) 在路堑段，路堑顶采用满堂支架施工时，需验算支架荷载是否会造成路堑边坡失稳。一般情况下，堑顶预制梁支架距离堑顶边坡不宜小于 2m。如图 A.2 所示，桥梁施工支架边缘线与最外侧铁路中心线水平距离最小控制值 B_1 按公式 (A.2) 计算：

$$B_1 = (a + b + c + d + 4)\text{m} \quad \text{..... (A. 2)}$$

式中：

d ——路堑边坡顶至设备限界的水平垂直距离（m）；

注：其余符号含义同式 A.1。



图A.2 路堑段支架与铁路安全距离示意图

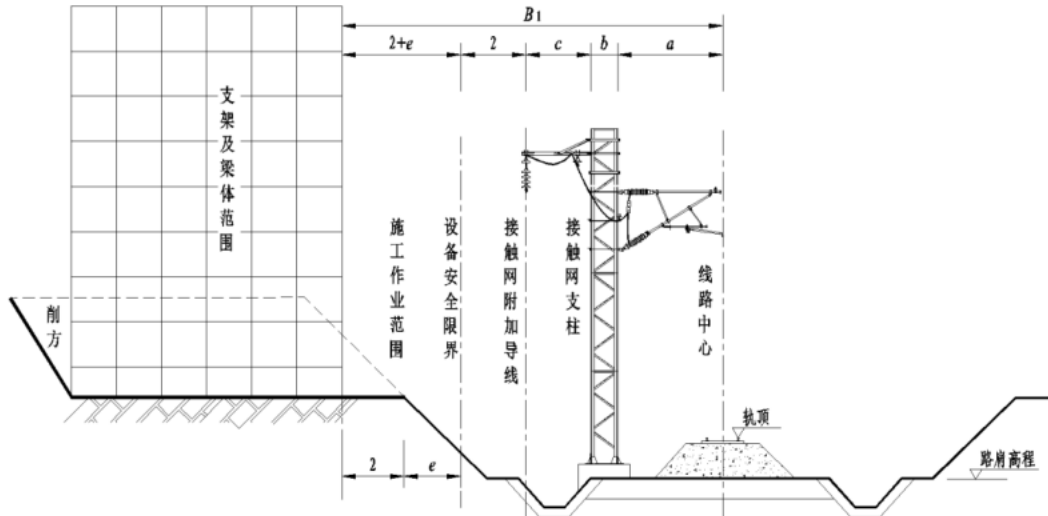
- c) 支架基础不宜在路堑边坡上，困难条件下，可采用改变边坡地形，将基础及支架范围内边坡削方成平坡方式保护边坡。支架边缘距离路堑顶不宜小于 2m，并验算边坡稳定性，以保障路基边坡稳定。如图 A.3 所示，桥梁施工支架边缘线与最外侧铁路中心线水平距离最小控制值 B_1 按公式 (A.3) 计算：

$$B_1 = (a + b + c + e + 4)\text{m} \quad \text{..... (A. 3)}$$

式中：

e ——削方后路堑边坡顶至设备限界的水平垂直距离（m）；

注：其余符号含义同式 A.1。



图A.3 侵入路堑边坡段支架与铁路安全距离示意图

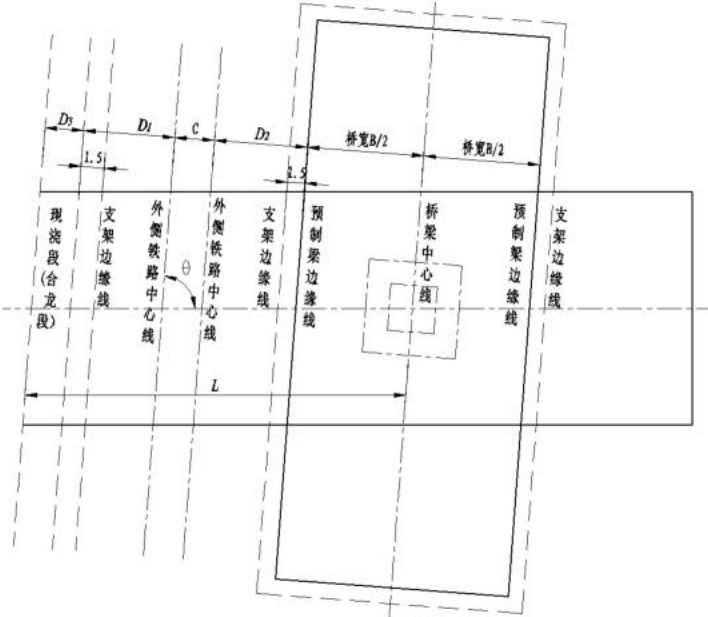
- A. 1. 4 转体前梁体边缘线与铁路的安全距离宜按 $B_1+1.5\text{m}$ 控制。
- A. 1. 5 转体施工过程中、转体施工完成及成桥后的桥下净空：
- a) 跨越速度目标值 160km/h 及以下及其它相关线路时，采用 GB 146.2 第 4.1.1 条关于“建限-1”电气化净空的规定，相关专业无特殊要求时，一般采用 6.55m；
 - b) 跨越速度目标值大于 160km/h 客货共线铁路时，采用 GB 146.2 第 5.1.1 条关于“建限-3”电气化净空的规定，相关专业无特殊要求时，一般采用 7.5m；
 - c) 上跨客运专线铁路时，采用 GB 146.2 第 6.1 条关于“建限-4”净空的规定，相关专业无特殊要求时，一般采用 7.25m；
 - d) 跨越拟开行双层集装箱列车的线路，无特殊要求时，一般采用 7.96m；
 - e) 转体过程中梁底与接触网杆顶竖向净距不宜小于 0.5m；
 - f) 成桥后的桥下净空尚应满足铁路管理部门的维修养护作业要求。
- A. 1. 6 边跨现浇段支架与铁路安全距离控制要求同转体段梁体支架与铁路安全距离要求。
- A. 1. 7 跨铁路水平转体桥梁的跨径布置应根据桥梁宽度、所跨铁路横断面宽度、交叉角度、地形地质条件、铁路设施和管线布置位置等因素综合确定：

- a) 铁路线间不设合龙段时，如图 A. 4 所示，其最小跨径 L 可按公式 (A. 4) 确定：

$$L = \left(\frac{B}{2} + D_1 + D_2 + D_3 + C \right) / \sin \theta \dots\dots\dots (A. 4)$$

式中：

- B ——桥梁宽度 (m)；
 - D_1 ——现浇段梁体端部与外侧铁路中心最小距离 (m)；
 - D_2 ——转体梁段边缘线与外侧铁路中心最小距离 (m)；
 - D_3 ——现浇 (合龙) 段长度 (m)；
 - C ——多线铁路时，最外侧两股道之间的线间距 (m)，单线铁路时， $C=0$ ；
 - θ ——平转桥梁与既有铁路的交叉角，正交时取 $\theta=90^\circ$ 。
- b) 铁路线间设合龙段时，最小跨径的计算参照公式 (A. 4) 执行，合龙段应设置在铁路限界投影范围之外，且每侧宜预留不小于 1.5m 的水平安全距离。



图A. 4 跨越铁路水平转体桥梁跨径计算示意图

附录 B (规范性) 平衡称重试验

B.1.1 平衡称重试验应包括以下内容：

- a) 测算转动体的纵桥向、横桥向不平衡力矩及偏心距；
- b) 测算球铰的摩阻力矩及摩阻系数；
- c) 完成转动体的配重方案。

B.1.2 采用中心支撑转体方案，施工支架拆除后，转动体的平衡状态表现为下列两种形式：

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

B.1.3 球铰摩阻力矩和转动体不平衡力矩的确定：

- a) 球铰摩阻力矩大于转动体不平衡力矩时。支架拆除后，转动体在自身的不平衡力矩作用下不能发生转动。如图 B.1 所示，此时平衡称重试验可采用千斤顶分别从纵向两侧支顶转动体，直至转动体在沿梁轴线的竖直面内发生逆时针、顺时针方向轻微转动，千斤顶力-位移曲线出现拐点，记录此时千斤顶的顶力值。转动体不平衡力矩和球铰摩阻力矩按公式 (B.1)、(B.2) 计算：

$$M_G = (P_{2\text{顶}}L_2 - P_{1\text{顶}}L_1)/2 \dots\dots\dots (B.1)$$

$$M_z = (P_{2\text{顶}}L_2 + P_{1\text{顶}}L_1)/2 \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

M_G ——转动体不平衡力矩 (kN·m)；

M_z ——球铰摩阻力矩 (kN·m)；

$P_{1\text{顶}}$ ——使梁体顺时针转动时的千斤顶顶力 (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 ——千斤顶顶力点距球铰几何中心的距离 (m)。

- b) 球铰摩阻力矩小于转动体不平衡力矩时。支架拆除后，转动体在自身的不平衡力矩作用下即发生转动。如图 B.2 所示，此时称重试验可首先在偏重侧支顶转动体，使转动体在沿梁轴线的竖直面内发生逆时针方向轻微转动，且千斤顶顶力-位移曲线出现拐点，记录此时千斤顶的顶力值。然后，转动体偏重侧千斤顶落顶，使转动体发生顺时针方向轻微转动且回落千斤顶顶力-位移曲线出现拐点，记录此时千斤顶的顶力值。转动体不平衡力矩和球铰摩阻力矩按公式 (B.3)、(B.4) 计算：

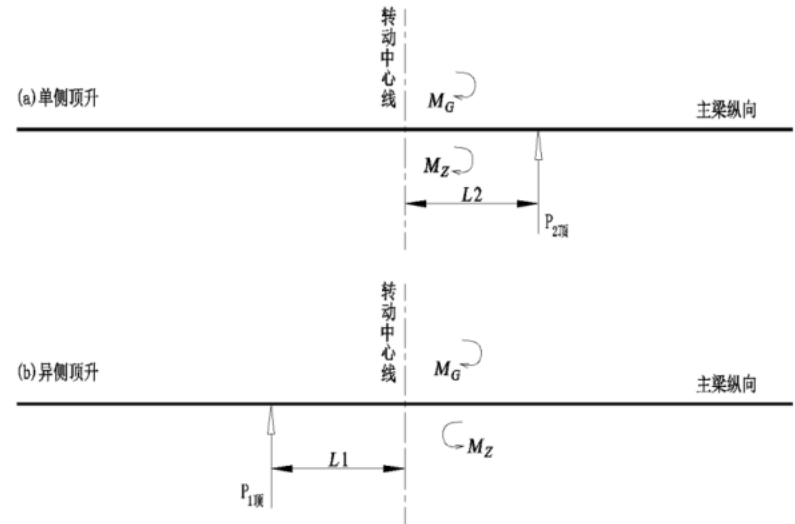
$$M_G = (P_{2\text{顶}} + P_{2\text{放}}) \cdot L_2/2 \dots\dots\dots (B.3)$$

$$M_z = (P_{2\text{顶}} - P_{2\text{放}}) \cdot L_2/2 \dots\dots\dots (B.4)$$

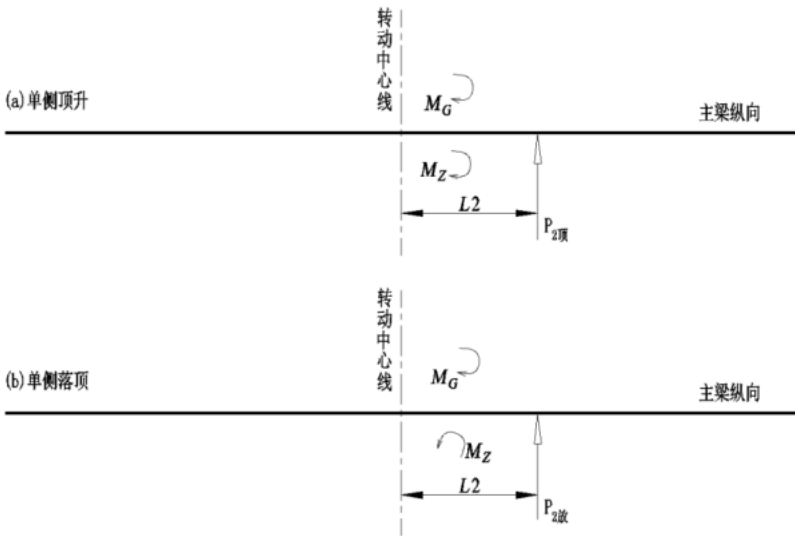
式中：

M_G ——转动体不平衡力矩 (kN·m)；

M_z ——球铰摩阻力矩（ $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）；
 $P_{2\text{顶}}$ ——使梁体逆时针转动时千斤顶顶力（ kN ）；
 $P_{2\text{放}}$ ——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B.1 转铰摩阻力矩大于转动体不平衡力矩时的顶升试验



图B.2 转铰摩阻力矩小于转动体不平衡力矩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、高耸大跨结构桥梁应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。

B.1.4 球铰静摩阻系数和重心偏心距的分析计算

平衡称重试验时，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。摩阻力矩为摩擦面每个微面积上的摩阻力对球铰中心竖转法线的力矩之和。

球铰静摩阻系数 μ_0 可按公式(B.5)计算：

$$\mu_0 = M_z / (R_0 G) \cdots \cdots \cdots (B. 5)$$

转动体偏心距 e_0 应按公式 (B. 6) 计算:

$$e_0 = M_G / G \cdots \cdots \cdots (B. 6)$$

式中:

R_0 ——球铰的球面半径 (m);

G ——转动体的总重量 (kN);

M_G ——转动体不平衡力矩 (kN·m);

M_z ——球铰摩阻力矩 (kN·m)。

附录 C
(资料性)

湖北省地方标准实施信息及意见反馈表

对本标准的实施情况及修改意见的反馈，可采用表C.1的格式。

表C.1 标准实施信息及意见反馈表

标准名称及编号			
总体评价	适用性	该标准与当前所在地的产业或社会发展水平是否相匹配？	☐ 是 ☐ 否
	协调性	该标准的特色要求与其他强制性标准的主要技术指标、相关法律法规、部门规章或产业政策是否协调？	☐ 是 ☐ 否
	执行情况	标准执行单位或人员是否按照标准要求组织开展相关工作？	☐ 是 ☐ 否
实施信息	标准实施过程中是否存在阻力和障碍？		☐ 是 ☐ 否
	实施过程中存在的主要问题		
修改意见	总体意见	☐ 适用 ☐ 修改 ☐ 废止	
	具体修改意见	需修改章节： 具体修改意见：	
反馈渠道	☐ 标准化行政主管部门 ☐ 省直行业主管部门 ☐ 专业标准化技术委员会（工作组） ☐ 标准起草组（牵头起草单位）		
反馈人	姓名： 单位： 联系方式：		

填表说明：为及时掌握标准实施情况，了解地方标准实施过程中存在的问题，并为标准复审提供科学依据，特制定《湖北省地方标准实施信息及意见反馈表》。可根据实际情况在表格中对应方框打勾，有需要文字说明的反馈意见可在相应位置进行文字描述，也可另附页。

参 考 文 献

- [1] DG/TJ 08-2220-2016 桥梁水平转体法施工技术规程
- [2] TG/01-2014 铁路技术管理规程
- [3] TB 10303-2020 铁路桥涵工程施工安全技术规程
- [4] Q/CR 830-2021 铁路桥梁施工用转体球铰
- [5] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范

湖北省地方标准

DB42/T 2249—2024

桥梁水平转体技术规程

Code of practice for horizontal swivel bridges

条 文 说 明

3 术语和定义

3.1 术语

3.13 本文件中的支腿是指主动承担转体竖向荷载的临时结构措施，不包含结构发生竖向转动状态下而被动受力的“保险腿”，也不含上、下承台间可承受拉压荷载的临时连接型钢等结构措施。

4 转体系统设计

4.1 一般规定

4.1.2 目前，中心支撑适用范围较广泛，一般情况下的常规转体桥均可采用该形式；环道支撑多用于重心较高，但转体重量不大的转体桥；中心与环道共同支撑一般用于高耸、大跨、曲线、宽桥面等复杂转体桥。中心与周边环道共同支撑的环道为封闭的360°圆环，中心与单侧环道共同支撑的环道一般为不封闭的部分圆环。

环道支撑及中心与环道共同支撑转体系统采用连续千斤顶张拉钢绞线驱动时，需在上转盘与转铰之间设置转台，支腿自带驱动装置或采用顶推方式驱动时，可不设转台。

4.2 转铰系统设计

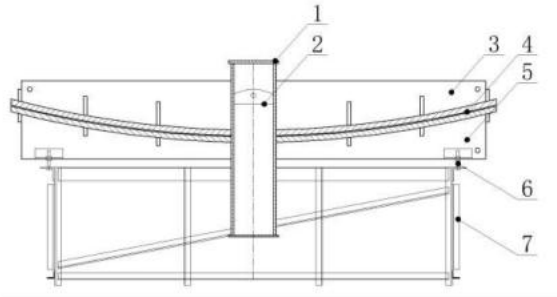
4.2.2 进入21世纪以来，我国的转体桥梁工程向大跨径、大吨位方向发展。普通钢筋混凝土球铰的承载力较低，属于相对落后的工艺和技术，本着技术先进的理念，本文件未纳入。

随着先进材料的研发突破，加工制造水平的不断进步，转铰的生产制造技术已逐渐成熟。目前，市面上水平转体桥梁的转铰产品主要有钢球铰、钢平铰、支座式球铰和超高性能混凝土球铰等。

钢球铰和支座式球铰因制造精度高，承载能力强，受力均匀性好，易于姿态调整，在水平转体桥梁工程中应用最为广泛，故推荐使用。钢球铰根据加工成型工艺分为冲压成型钢球铰和整体铸造钢球铰。本文件中的“转铰”除特别注明外，均指钢球铰或支座式球铰。

以下为常用转铰的示意图，供本文件使用者参考：

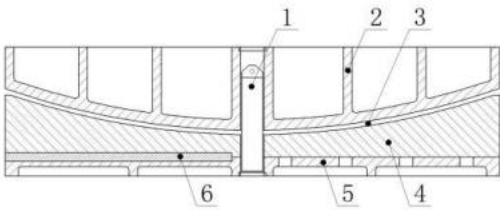
a) 冲压成型钢球铰



(1-轴套，2-定位转轴，3-上球铰，4-滑动面板，5-下球铰，6-安装调平装置，7-定位骨架)

图 S.1 冲压成型钢球铰结构示意图

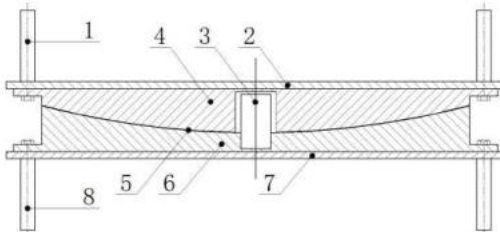
b) 整体铸造钢球铰



(1-定位转轴, 2-上球铰, 3-滑动面板, 4-下球铰, 5-底座, 6-剪力键)

图 S.2 整体铸造钢球铰结构示意图

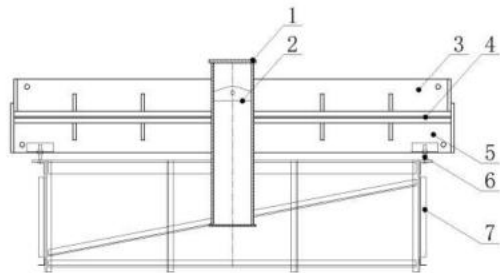
c) 支座型球铰



(1-上锚栓, 2-上预埋板, 3-定位转轴, 4-上球铰, 5-滑动面板, 6-下球铰, 7-下预埋板, 8-下锚栓)

图 S.3 支座型球铰结构示意图

d) 钢平铰



(1-轴套, 2-定位转轴, 3-上平铰, 4-滑动面板, 5-下平铰, 6-安装调平装置, 7-定位骨架)

图 S.4 钢平铰结构示意图

4.2.4 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，以便于施工人员对转铰部位进行施工操作、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 $R_1=250\text{cm}$ ，球面半径 $R_0=1000\text{cm}$ ，矢高 $f=32\text{cm}$ ，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。

4.2.5 上、下转铰间的接触应力分布较为复杂。通过弹性力学、接触理论和实体有限元接触分析方法对转铰进行分析，均可以发现：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：

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

其中， $[\sigma_c]$ 为混凝土的轴心抗压容许应力；

$$\text{局部承压应力提高系数 } \beta = \sqrt{\frac{A}{A_c}} \quad \dots\dots\dots (\text{S.2})$$

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 4.5.5 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 1 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。

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 4.4.9 条公式 (8) 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：

$$\frac{R_1}{\sin 18^\circ} \leq R_0 \leq \frac{R_1}{\sin 10^\circ} \quad \dots\dots\dots (\text{S.3})$$

即：

$$3.24R_1 \leq R_0 \leq 5.76R_1 \quad \dots\dots\dots (\text{S.4})$$

4.2.6 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 $[\tau]=453/2=226\text{Mpa}$ 。

4.2.7 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：

$$QR_0 = M_G - M_z \quad \dots\dots\dots (\text{S.5})$$

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与环道共同支撑转体系统，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 2 中的滚动摩阻系数为按滑动摩擦方式简化计算后的取值。

4.3 转体平衡系统设计

4.3.1 一般情况下，转体时撑脚不与滑道接触，也不受力，仅作为“保险腿”使用；当出现较大的临时偏心荷载，转体结构整体倾斜到一定程度时，部分撑脚与滑道接触、参与受力，以保证结构不发生倾覆。

4.3.3 撑脚可采用埋入式或可拆卸式：

埋入式撑脚的埋入长度宜根据上转盘的厚度及转体工况的受力模式综合确定，必要时可在埋入钢管外壁设置剪力键。

可拆卸式撑脚预埋板顶面应设置剪力键，承压钢板与预埋钢板间应采用螺栓连接，保证撑脚与上转盘的有效连接。

4.3.4 撑脚钢管属于薄壁结构，其局部稳定性与钢管外径及壁厚相关，本条参考《钢结构设计标准》（GB 50017）、《钢管混凝土结构技术规范》（GB 50936）对撑脚钢管外径与壁厚的比值进行了限制。

4.3.5 对于中心支撑转体来说，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。

4.3.8 环道支撑和中心与环道共同支撑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。滚轮锥度可按下式确定：

$$\triangleright = D/R \cdots \cdots \cdots (S.6)$$

式中：
 $\triangleright$ ——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。

4.3.9 支腿底部设置滚轮时，滚轮与滑道之间为滚动摩擦接触，国内已成功运用滚轮小车做支腿的转体桥项目有武汉常青路跨铁路转体桥及襄阳内环跨襄北编组站大桥，单个支腿由 4 台滚轮小车组成，设计承载能力 12000kN。因滚动摩擦为线接触，承载能力提高空间有限，本文件限制单个支腿竖向力不大于 20000kN。支腿采用钢管混凝土结构时，底部设滑靴，与滑道间为滑动摩擦接触，支腿自身的承载力可通过增大截面尺寸及提高材料强度来实现，但滑动摩擦系数远大于滚动摩擦系数，从而对牵引驱动设备的性能提出了较高的要求。本文件建议滑动摩擦支腿所产生的总摩阻力不宜大于 20000kN，以避免牵引驱动设备布置困难。

4.3.10 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。

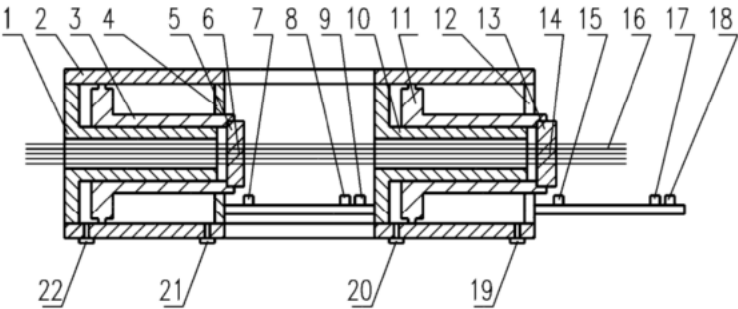
4.4 转体驱动系统设计

4.4.1 近年来，齿轮齿轨式转体驱动装置在武汉市常青路跨铁路转体桥、襄阳北编组站大桥等工程上得到了成功应用，并推广应用到后续多个在建转体桥工程上。单个装置的竖向承载力分为2500kN、5000kN、10000kN等3种规格，单个装置的水平驱动力范围在100kN~2000kN之间。

以下为常用转体驱动装置的示意图及部分性能参数，供本文件使用者参考：

a) 连续千斤顶

自动连续转体千斤顶结构如图S.6所示



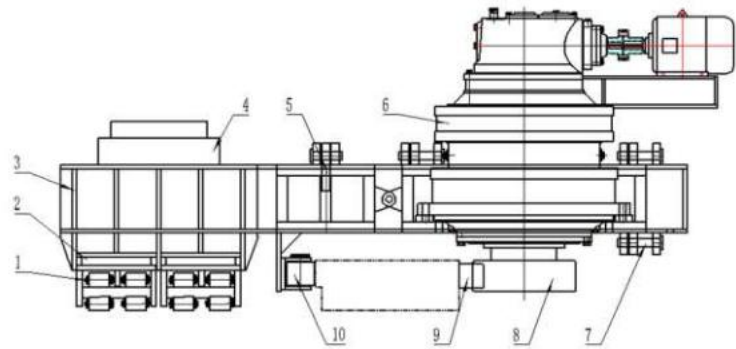
(1-后顶穿心套, 2-油缸, 3-后顶活塞, 4-后顶密封板, 5-后顶锚板, 6-后顶夹片, 7-行程开关 SQ1, 8-行程开关 SQ2, 9-行程开关 SQ3, 10-前顶穿心套, 11-前顶活塞, 12-前顶密封板, 13-前顶锚板, 14-前顶夹片, 15-行程开关 SQ4, 16-钢绞线, 17-行程开关 SQ5, 18-行程开关 SQ6, 19-前顶回油嘴, 20-前顶进油嘴, 21-后顶回油嘴, 22-后顶进油嘴)

图 S.5 自动连续转体千斤顶示意图

表 S.1 自动连续千斤顶性能参数表

项目名称	ZLD 400	ZLD 600	ZLD 1200	ZLD 2000	ZLD 3000	ZLD 3500	ZLD 5000	ZLD 7500
公称张拉力(kN)	392	596	1193	1978	3000	3567	4962	7504
公称油压(MPa)	26	20	26	26	30	25	27	26
张拉活塞面积 $\times 10^{-2}(\text{m}^2)$	1.508	2.98	4.593	7.61	10.05	14.271	18.378	28.863
回程活塞面积 $\times 10^{-2}(\text{m}^2)$	0.359	1.382	2.45	3.683	4.775	9.087	8.325	16.423
回程油压(MPa)	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
活塞行程(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
穿心孔径(mm)	$\phi 68$	$\phi 120$	$\phi 140$	$\phi 175$	$\phi 196$	$\phi 240$	$\phi 280$	$\phi 400$
主机质量 (kg)	150	385	576	983	1320	2050	2826	4848
主机外形尺寸外径 $\phi D \times L$ (mm)	$\phi 236 \times 1532$	$\phi 285 \times 1580$	$\phi 344 \times 1625$	$\phi 430 \times 1738$	$\phi 495 \times 1790$	$\phi 580 \times 1800$	$\phi 700 \times 2180$	$\phi 840 \times 2560$
连接板外形 $A \times B \times C$ (mm)	$230 \times 230 \times 30$	$300 \times 300 \times 30$	$365 \times 365 \times 30$	$460 \times 460 \times 40$	$510 \times 510 \times 50$	$600 \times 600 \times 50$	$725 \times 725 \times 60$	$865 \times 865 \times 60$
连接板安装孔径 $\phi E \times \phi F$ (mm)	$\phi 250 \times \phi 26$	$\phi 355 \times \phi 26$	$\phi 410 \times \phi 26$	$\phi 530 \times \phi 32$	$\phi 594 \times \phi 40$	$\phi 679 \times \phi 40$	$\phi 820 \times \phi 40$	$\phi 985 \times \phi 40$

b) 齿轮齿轨式驱动装置



(1-滚轮小车, 2-弹性垫, 3-台车架, 4-连接支座, 5-减速机架, 6-减速机, 7-销轴, 8-齿轮组, 9-齿轨, 10-导向轮)

图 S.6 齿轮齿轨式驱动装置示意图

4.4.2 中心与单侧环道共同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。齿轮齿轨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。

4.4.5 钢转台与钢制牵引盘的区别在于: 钢转台底面与转铰接触, 上部转体荷载通过转台传递给转铰; 牵引盘不与转铰接触, 不传递竖向荷载, 其作用在于缠绕钢绞线, 并传递转体所需的平衡力偶矩。

4.4.9 中心支撑转体系统转体驱动力的计算公式采用平面积分进行推导。积分时假定上下球铰均为全面积接触, 忽略因滑片布置引起的接触空隙。平面积分微元图如 S.7 所示, 微元面积 $ds = r d\theta dr$ 。

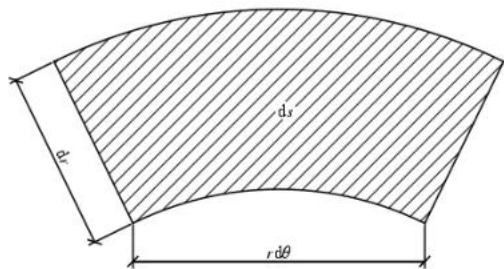


图 S.7 平面积分微元图

球铰转动摩阻力矩 M_0 为

$$M_0 = \mu_0 P_0 \int_0^R \int_0^{2\pi} r^2 d\theta dr = \frac{2\pi\mu_0 R_1^3 P_0}{3} \dots\dots\dots (S.7)$$

式中:

P_0 ——球铰单位面积的压力;

R_1 ——球铰的平面投影半径;

μ_0 ——球铰的摩阻系数。

假定球铰均匀受压, 则 $P_0 = \frac{G}{\pi R_1^2}$, 设驱动半径为 R_2 , 由此得到 $T = \frac{M_0}{R_2} = \frac{2\mu_0 G R_1}{3 R_2}$ 。

4.4.11 采用中心与环道共同支撑转体系统时, 应根据转体结构的受力体系, 确定中心转铰和各支腿所分别承担的转体重量。设有多个环道支腿时, 支腿的反力受滑道表面高差的影响, 在转体过程中处于变化状态, 计算牵引力时, 应考虑滑道表面的实际不平顺度所产生的最不利工况。

4.4.12 当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。齿轮齿轨驱动方式具备正反方向转动功能，故可不设限位装置。

4.5 上、下转盘设计

4.5.1 上、下转盘局部承压应力较大，且一般采用预应力混凝土结构，本条引用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中关于“预应力混凝土构件的强度等级不低于 C40”的规定。大吨位转体时，上、下转盘混凝土材料强度等级一般不低于 C50。

4.5.2 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。

4.5.4 转体重量较小（一般认为 30000kN 以下）时，下转盘（承台）水平尺寸较小，可考虑按刚性承台设计，不设预应力。

当转体重量在 80000kN 以上时，下转盘（承台）水平方向的尺寸较大，转铰平面尺寸相对较小，若按刚性承台设计，承台厚度较大，基坑的深度及支护开挖难度显著增大，技术经济性较差。适当增加下转盘厚度能够提高其刚度，改善下转盘下缘受拉和桩基础受力不均的状况。设置预应力钢筋能够有效减小转体施工时承台水平方向的拉应力，同时也使桩顶反力更均匀，避免中心桩与角点桩的反力值差别过大。

4.5.5 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.8 所示。

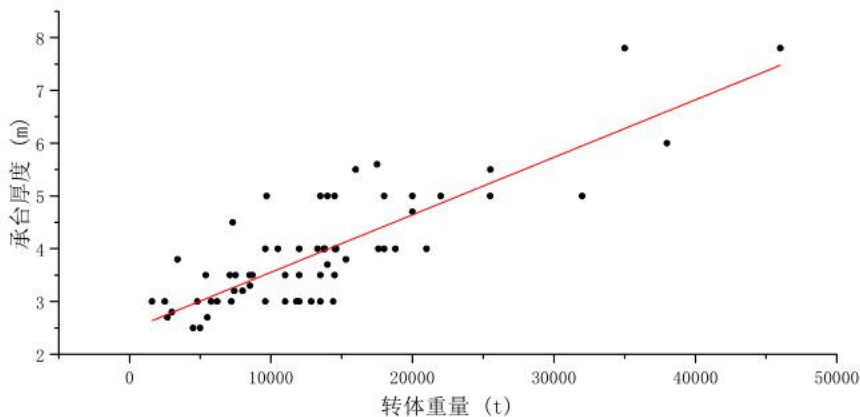


图 S.8 承台厚度与转体重量关系图

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：

$$t_c = 1.08952 \times 10^{-4} G_c + 2.4632 \dots \dots \dots (S.8)$$

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。

4.5.8 上、下转盘均属于构造和边界条件较为复杂的受力构件，采用实体有限元模型对其进行分析计算可以获得相对准确的应力分布情况，宜遵循以下原则：

- 1) 上、下转盘可分别建立模型进行分析计算；

- 2) 上转盘模型应包含与其相连的转台、桥墩或上部结构等构件；
- 3) 下转盘模型应包含桩基础，并应考虑周围土体对桩基的约束作用。

在上、下转盘中配置预应力，能够有效改善上、下转盘及桩基础的受力状态。但应结合施工实际情况，通过计算明确预应力的布置方式和张拉顺序，保证转体结构施工过程中的受力安全。

5 转体桥梁设计

5.1 一般规定

5.1.1 据统计，水平转体桥梁多采用二跨式或三跨式，其中二跨式以 T 型刚构居多。T 型刚构的温度中心位于主墩处，受温度荷载作用较小，且无需进行墩梁临时固结，在公路、铁路跨线转体桥上应用最为广泛。

三跨式一般采用连续梁结构，墩高大于 20m 以上时可考虑连续刚构。

单跨拱桥转体一般需要设置临时配重及扣索塔架，早期工程应用较多，目前应用较少；三跨上承式混凝土拱桥可实现自平衡转体，在高速铁路上已有成功应用先例。

斜拉桥跨越能力较强，且桥面以下的结构高度也较小，是 200m 以上大跨度转体桥的首选桥型。混凝土斜拉桥单个桥墩（塔）转体重量超过 500000kN 时，应对斜拉桥的梁型与塔型方案进行比选论证，主梁可采用钢箱梁或钢-混组合梁，主塔可采用钢结构。

5.1.5 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，中心与环道共同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、襄阳内环线跨襄阳北编组站大桥等工程上成功应用，转体状态平稳，合龙精度高。

“宽幅桥”是一个相对概念，一般认为宽跨比大于 1/2，即为宽幅桥，宽幅桥在受力方面具有明显的横向效应。对于转体桥来说，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。根据已成功实施的转体桥梁工程实例统计，跨铁路转体 T 构一般跨径在 50m~80m，双向 4 车道高速公路整幅桥宽 31m 左右，双向 6 车道城市快速路整幅桥宽 32m 左右，采用常规中心支撑方式均可顺利完成转体。参考相关文献资料，本文件将宽度大于 35m 的转体桥定义为“宽幅桥”，并建议采用中心与环道共同支撑转体系统。悬臂长度较大的曲线桥，横向偏心较大，无法通过设置预偏心及配重实现平衡转体时，也可采用中心与环道共同支撑转体系统。

5.2 转体方案设计

5.2.3 结合大量平转桥梁设计与施工的经验数据，并广泛征求了业内意见，普遍认为设置边跨合龙段是有必要的。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。

另外，需要注意的是：设置合龙段和不设置合龙段两种方式主梁预拱度的设置图式有差别的。

5.2.5 设计在确定合龙段长度时，往往疏忽梁端预留钢筋的影响因素。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，没有预留钢筋的影响，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。

5.2.6 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的风。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。因此，一些跨铁路转体桥被设计成不对称形式，例如高低塔斜拉桥和不对称连续梁（刚构）。

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。

5.2.7 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。

5.2.8 采用桥面临时配重或箱室内压重时，不仅要结构的整体受力进行计算分析，还应注意对桥面板、底板、横梁（肋）等进行局部检算。箱室内的压重既要保证转体状态下的平衡，也要保证运营状态下边跨梁端支座不脱空。

5.2.9 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向外边缘，超过此范围或纵向配重不能平衡时，宜采用中心与环道共同支撑体系。

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。

5.3 转体桥梁结构设计与计算

5.3.1 影响转体结构安全性及稳定性的荷载包括：结构不平衡重或结构的初始偏心、配重、施工临时荷载、风荷载、转体结构振动产生的不平衡力矩。其中，初始偏心值可在本文件 6.3.11 条规定的范围内取值。

振动产生的不平衡力矩较难计算，常规转体桥可不考虑；高耸、大跨、曲线转体桥可通过试验或数值模拟方式确定。

5.3.2 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：湖北省行政区域内，嘉鱼县十年一遇风速最大，为 27m/s，相当于 10 级风，房县十年一遇风速最小，为 19.5m/s，相当于 8 级风；全国范围内，陕西省汉中市十年一遇风速最小，为 18.5m/s，相当于 8 级风。由此可见，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 级风速进行计算。

5.3.4 一些文献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，这三道失稳防线下结构抗倾覆力矩是不同的，计算出来的稳定系数相差较大。正常转体情况下，也不应出现第二、三种失稳状态。

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”、“中心与环道共同支撑临界稳定状态”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。

5.3.5 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。

5.3.6 采用中心与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：

$$M_{bk2} = \mu_0 G_c R_0 + \sum N_{\Delta 1i} L_{ci} \cdots \cdots (S.9)$$

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 (18)。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.9) 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 (18) 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。

5.3.7 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：

$$M_{bk3} = \min(G L_c, \sum N_{\Delta 2i} L_{ci}) \cdots \cdots (S.10)$$

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 (19)。

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.10) 可简化为正文公式 (19)。

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。

6 转体施工与控制

6.2 转体系统安装与施工

6.2.2 各构件的加工与安装精度直接影响中心与环道共同支撑转体系统各支腿反力能否达到设计要求，可通过试拼装实现精确测量，并及时调整。

环道支撑采用齿轮齿轨式驱动方式时，齿隙要求较为严格，宜通过试拼装来验证滚轮小车、台车架、驱动电机、齿轮、齿轨及加载装置之间的匹配性，并测量其安装精度是否满足转体系统的设计要求。

6.2.3 下转盘混凝土分次浇筑的原因在于保证转铰和滑道的安装精度，防止安装误差较大影响转体顺利进行以及转体就位精度。保证转铰及滑道下方混凝土的密实度是转体成功的关键，若混凝土的密实度不达标，在转体重量的作用下，可能引起转铰变形致使转动困难。

下转盘混凝土分次浇筑施工一般按以下顺序及要求进行：

1) 第一次混凝土浇筑至转铰和滑道定位骨架底部。浇筑混凝土时应预埋第二次浇筑混凝土构件中

的钢筋，预留的外露长度应满足钢筋最小锚固长度的相关规定。

2) 第一次浇筑混凝土强度达到设计强度的 75% 以上后，方可进行第二次混凝土浇筑。第二次混凝土浇筑前，应完成转铰下盘、滑道钢板、定位骨架、预埋锚栓、千斤顶反力座或齿轨基础的预埋钢筋等构件的安装，并精确定位和固定，确保预埋件的位置、标高及尺寸准确无误。

3) 第二次混凝土浇筑时应对转铰和滑道下方混凝土充分振捣，采取有效措施保证滑道下方混凝土浇筑的密实度。第二次混凝土浇筑时应避免扰动转铰、滑道及其定位骨架。

6.2.4 作为大尺寸、深受弯构件，承台内预应力筋的布置精度要求低于梁式构件，故当转铰和滑道的定位骨架与预应力钢筋位置冲突时，可适当移动预应力筋以保证定位骨架的安装精度。

承台内预应力筋的张拉顺序与时间，应通过计算确定。如基坑需持续降水，宜尽快完成承台预应力筋张拉并回填基坑，但全部预应力筋一次性张拉完成，可能会造成承台反拱、中心桩基出现负反力。故应选择已浇筑主墩及梁体自重效应大于承台预应力的反拱效应之后的时间段，完成承台预应力张拉。

也可以选择承台预应力分批多次张拉、基坑分层多次回填的施工方式。

6.2.9-6.2.10 球铰的加工和安装精度直接影响转体驱动力及振动效应的大小，尤其对于高耸、大跨转体，上述精度的控制情况影响效果更为明显，因此对球铰的加工和安装精度提出了相应的指标要求。

6.2.12 本条是与 4.3.5 条相对应的，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，4.3.5 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。

6.2.14 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

6.3.3 千斤顶、钢绞线，电机、齿轮齿轨等驱动设备的选型宜满足 2 倍的启动力储备，启动力的计算采用静摩擦系数。

6.3.10 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擦系数及偏心量，并进行适当配重，以控制转体施工的稳定性的，还可验证驱动力是否满足设计要求。

采用与武汉常青路跨铁路转体桥类似的中心与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。

采用与襄阳内环线跨襄阳北编组站大桥类似的中心与周边环道共同支撑体系时，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量并进行配重。

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。

6.3.11 本条由 5.3.5 条推导而来，球铰的抗倾覆力矩 $M_{bk1} = \mu_0 GR_0$ ，为了保证抗倾覆系数达到 1.5，则重心偏移值的上限值取为 $0.6\mu_0 R_0$ 。

6.4 试转与正式转体

6.4.4 平转速度限值是目前争论较大的问题，从现有的工程实例及相关研究来看，0.01rad/min~0.02rad/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 年国家铁路局组织中铁设计、中铁武汉院、铁科院、西南交大等多家单位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》。该课题对平转速度进行了详细研究，还依托襄阳内环线跨襄阳北编组站大桥开展了模型试验。以下引用《铁路桥梁转体技术标准研究报告》相关章节的主要研究结论：

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° 且转速取用 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 $90\text{min}\sim 120\text{min}$ ，转体有效时间在 $70\text{min}\sim 100\text{min}$ 之间，因此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，本文件按转体悬臂长度的大小提出了新的平转角速度限值。据统计，公跨铁转体桥一次跨越 2 股或 1 股铁路的情况占 70%，悬臂长度在 $50\sim 70\text{m}$ 之间，计算得到的平转角速度在 $0.03\sim 0.04\text{rad/min}$ 之间，平转 90° 所需时长约为 $40\sim 53$ 分钟，可在一次天窗点内完成转体。

6.4.5 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。国内一些文献提出转体角加速度允许值的数量级为 10^{-2}rad/s^2 ，实际工程中均控制在 10^{-3}rad/s^2 以下，对应的加速时间也不到 1s 。为了便于监测，并将加速度对结构的影响控制在较低的水平，建议按 $10\text{s}\sim 15\text{s}$ 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。

6.4.8 转体悬臂 60m 长时，角度 2° 对应的梁端切向距离为 2m ，按 0.02rad/min 的平转角速度计算，需 1.8min 。部分文献提出梁端距转体就位时的切向距离 1m 时，再开始点动操作，若转体速度较高，会出现人工难以及时控制的情况。本文件提高了平转速度的限值，故相应调整了点动操作开始至转体就位时的角度差值。

6.4.9 中心与环道共同支撑转体系统，采用齿轮齿轨驱动方式时，可以选择较高的转体速度。为了减小冲击，保证驱动系统的平稳运行，临近转体就位时，宜阶梯减速制动。

6.4.10 常规混凝土结构转体桥，如 T 构、连续梁（刚构）等，悬臂长度一般在 70m 以下，墩高在 25m 以下，结构刚度大、重心低，转体时受风荷载的影响相对较小。

跨铁路转体桥需提前申请天窗点，铁路天窗点的审批十分严格，错过天窗点会造成工期及铁路运输损失。以往要求的“4 级以上大风禁止转体”过于严苛，考虑到沿海地区常年风速较高、内陆地区也存在阵风影响，结合文献资料及参编单位的工程实践经验、现场监测数据，本文件将常规转体施工控制风速设定为 5 级风。

设计与施工单位应结合桥梁结构特点，经计算分析后提出适合该工点的合理控制风速。

6.4.11 斜拉桥等高耸结构转体对风荷载非常敏感，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。中心与环道共同支撑体系可显著提高转体施工时的结构稳定性。

襄阳内环跨襄北编组站大桥采用中心与环道共同支撑转体系统，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。

为了充分发挥中心与环道共同支撑转体系统的优势，本文件结合理论分析与工程实例，将采用中心与环道共同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。

6.6 转体系统封固和体系转换

6.6.3 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。

7 转体施工监控

7.2.2 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。
