

团 体 标 准

T/SDHTS XXXXX-XXXX

大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计要求

Design guidelines for long-span single-pylon equal-span
self-anchored suspension bridges

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

山东公路学会 发 布

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 材料 3

5 总体设计 4

6 计算 6

7 构造设计 6

8 设计对施工的要求 9

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东高速建设管理集团有限公司提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东高速建设管理集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、西南交通大学。

本文件主要起草人：王洪国.....。

大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计要求

1 范围

本文件规定了大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的材料、设计、结构及构造、施工等技术要求。

本文件适用于大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的设计与施工。

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/T 700 碳素结构钢

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓

GB/T 1229 钢结构用高强度大六角头螺母

GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈

GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件

GB 1499.2 钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 3077 合金结构钢

GB/T 5313 厚度方向性能钢板

GB/T 7659 焊接结构用铸钢件

GB 8918 重要用途钢丝绳

GB/T 11352 一般工程用铸造碳钢件

GB 13014 钢筋混凝土用余热处理钢筋 GB 1499.1 钢筋混凝土用钢第1部分：热轧光圆钢筋

GB/T 14408 一般工程与结构用低合金铸钢件

GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌或锌-铝合金钢丝

GB/T 19879 建筑结构用钢板

GB/T 20067 粗直径钢丝绳

GB/T 31387 活性粉末混凝土

GB/T 32963 锌铝合金镀层钢丝缆索

GB/T 36483 悬索桥用主缆平行钢丝索股

GB/T 38818 悬索桥吊索用钢丝绳

GB/T 39133 悬索桥吊索

GB 50164 混凝土质量控制标准

GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

CJJ 11-2011 城市桥梁设计规范

JB/T 6402 大型低合金钢铸件

JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件

JTG B01 公路工程技术标准

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/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范

JTG/T D65-05 公路悬索桥设计规范

JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

JTG 2231 公路桥梁抗震设计规范

JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范

JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范

T/CCES 27 超高性能混凝土梁式桥技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

独塔等跨自锚式悬索桥 single-tower equal-span self-anchored suspension bridge

一种单塔且主梁跨径相对桥塔等跨对称布置的自锚式悬索桥体系。

4 材料

4.1 混凝土、普通钢筋及预应力筋

4.1.1 索塔塔身的混凝土强度等级不应低于 C40。

4.1.2 主梁及主缆锚固结构混凝土强度等级不应低于 C50。

4.1.3 普通钢筋应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1、《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2、《钢筋混凝土用余热处理钢筋》GB 13014 的规定。预应力混凝土构件所采用与预应力钢筋材料性能指标，应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定取用。

4.1.4 用于主梁及桥面铺装的超高性能混凝土（UHPC）原材料和制备方法应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定，强度等级等主要技术指标应符合《超高性能混凝土梁式桥技术规程》T/CCES 27 的规定。

4.2 高强度钢丝及钢丝绳

4.2.1 主缆索股、吊索所用高强度钢丝及钢丝绳宜采用热镀锌或热镀锌铝合金线材。

4.2.2 高强度钢丝的技术条件应符合现行《桥梁缆索用热镀锌或锌-铝合金钢丝》GB/T 17101《锌铝合金镀层钢丝缆索》GB/T 32963 和《悬索桥用主缆平行钢丝索股》GB/T 36483 的规定。

4.2.3 高强度钢丝绳的技术条件应符合现行《悬索桥吊索用钢丝绳》GB/T 38818、《粗直径钢丝绳》GB/T 20067、《重要用途钢丝绳》GB 8918 和《悬索桥吊索》GB/T 39133 的规定。

4.2.4 高强度钢丝主缆的抗拉强度设计值 f_d 应按其抗拉强度标准值 f_k 除以钢丝抗拉强度分项系数 γ_R 确定。高强钢丝主缆抗拉强度分项系数 γ_R 应不小于 2.0，高强钢丝吊索的抗拉强度标准值不宜大于 1770MPa，其抗拉强度分项系数 γ_R 不应小于 2.2。

4.2.5 钢丝绳最小破断拉力设计值 f_d 应按其最小破断力除以钢丝绳抗拉强度分项系数 γ_R 确定。最小破断力应根据现行国家标准《粗直径钢丝绳》GB/T 20067 钢芯钢丝绳取值。钢丝绳抗拉强度分项系数 γ_R 应符合表 1 的规定。

表 1 钢丝绳抗拉强度分项系数 γ_R

构件种类	骑跨式吊索	销接式吊索
抗拉强度分项系数 γ_R	2.95	2.20

4.3 钢材

- 4.3.1 钢索塔、钢主梁主体结构钢材的技术条件应符合《桥梁用结构钢》GB/T 714 或《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。
- 4.3.2 索鞍宜采用 ZG275 - 485H、ZG270-500、ZG310-570 等铸钢或铸焊结构钢，索套、索夹本体材料宜采用 ZG20Mn、ZG35SiMnMo 等铸钢，其技术条件应符合《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352、《焊接结构用铸钢件》GB/T 7659、《一般工程与结构用低合金铸钢件》GB/T 14408、《大型低合金钢铸件》JB/T 6402 的规定。焊接钢板的技术条件应符合《桥梁用结构钢》GB/T 714 或《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。
- 4.3.3 索鞍、索夹的拉杆宜采用 40CrNiMoA、40Cr、35CrMo 等合金结构钢，其技术条件应符合现行《合金结构钢》GB/T 3077 的规定。
- 4.3.4 高强度螺栓连接副的技术条件应符合《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228 ，《钢结构用高强度大六角头螺母》GB/T 1229 ，《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230 ，《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 的规定。
- 4.3.5 锚头锚杯宜采用 ZG20Mn、ZG270-500、ZG310-570 等铸钢，盖板宜采用 Q235 或 20 号钢，销接式锚头耳板及销轴宜采用 40Cr 或 35CrMo 等优质钢材制造，其技术要求不应低于现行《一般工程用铸造碳钢件》（GB/T 11352）、《优质碳素结构钢》（GB/T 699）、《合金结构钢》（GB/T 3077）的规定。
- 4.3.6 焊接材料应与主体钢材相匹配，并应符合《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》JTG/T 3651 的规定。
- 4.3.7 锚头铸体材料应符合《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65-05 的规定。

5 总体设计

5.1 一般规定

- 5.1.1 大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计与施工应遵循安全、耐久、适用、环保、经济的原则。
- 5.1.2 本文件适用于公路及城市道路新建和改建工程，跨径在 400 m 以下的独塔等跨自锚式悬索桥设计与施工。
- 5.1.3 桥梁主体结构设计使用年限不应小于 100 年。

5.1.4 总体设计应根据使用功能、建设条件、景观等要求，对桥位、桥跨、结构体系、索塔、锚碇、主缆、吊索、斜拉索、主梁形式及桥面系等进行综合设计。

5.1.5 总体设计应重点处理好抗风设计、抗震设计，解决好钢桥面疲劳、钢桥面铺装、钢结构防腐等耐久性等关键技术问题。

5.1.6 独塔等跨自锚式悬索桥总体设计应使桥梁形式统一，外形简洁，索塔的设计应力求简洁、力的传递直接顺畅。

5.1.7 索塔及桥墩基础的设计应考虑施工方案的可行性及成熟性，钢梁的制造应考虑施工的先进性、高效性及受力的合理性。

5.1.8 结构设计应处理好功能性构造的细节设计，满足施工、营运、养护的需求，体现人性化设计。

5.1.9 跨越通航水域自锚式悬索桥的总体设计应满足通航净空要求，必要时考虑防、抗船撞的要求。

5.2 结构体系设计

5.2.1 独塔等跨自锚式悬索桥由锚碇、索塔、缆索系统、主梁及附属结构五大部分组成，缆索系统包括主缆、索夹、吊索、主索鞍、散索套（鞍）或转索鞍以及防护系统等。

5.2.2 独塔等跨自锚式悬索桥采用独塔布置形式，宜设计成两跨或四跨。

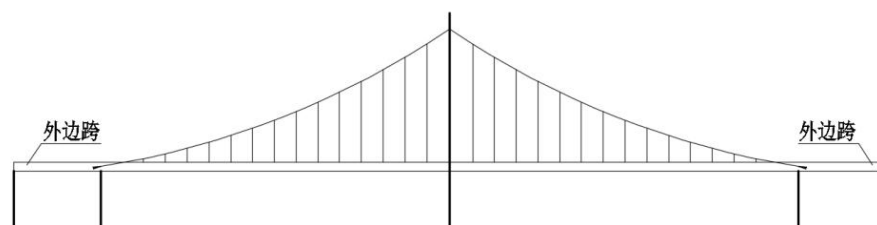


图 1 设置边跨示意图

5.2.3 主缆垂跨比应综合考虑结构受力与主缆布置要求，宜在 $1/12 \sim 1/15$ 的范围内确定。主梁采用钢梁宜取下限值，采用混凝土梁宜取上限值。

5.2.4 主梁采用钢梁时，吊索间距宜为 $12\text{ m} \sim 16\text{ m}$ ；采用钢-混凝土组合梁时，吊索间距宜为 $9\text{ m} \sim 14\text{ m}$ ；采用混凝土梁时，吊索间距宜为 $6\text{ m} \sim 9\text{ m}$ 。

5.2.5 主梁由车道荷载（不计冲击力）频遇值引起的最大竖向挠度值不宜大于跨径的 $1/300$ ，频遇系数取 1。

5.2.6 独塔等跨自锚式悬索桥可采用钢结构锚碇、混凝土结构锚碇。

5.2.7 应比较锚碇采用压重还是外伸跨方案，确保运营过程中锚碇处桥墩支座和外伸跨梁端支座不出现负反力。

5.2.8 独塔自锚式悬索桥宜采用塔梁固结、双排支座、增设斜拉索等有效措施增加结构刚度。

6 计算

6.1 一般规定

6.1.1 独塔等跨自锚式悬索桥设计采用的结构重要性系数、作用及其组合，应符合《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 或《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的相关规定。

6.1.2 在自锚式悬索桥设计计算中，应进行静力、抗风、抗震以及稳定分析，并应考虑施工过程的影响。

6.2 作用

6.2.1 主梁专用检修道上的人群荷载可取 1.5 kN/m^2 。

6.2.2 风荷载计算应按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 的规定执行，在风环境复杂的地区应进行专题研究。

6.2.3 无实测数据资料时，混凝土索塔两侧的梯度温差可取 $\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，宽幅无悬臂主梁宜考虑横桥向温度梯度作用的影响。

6.2.4 作用组合应符合《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的有关规定，并应考虑吊索断索作用。

6.3 总体计算

6.3.1 自锚式悬索桥计算宜采用几何非线性影响的方法计算，计算模型宜符合《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65-05 的有关规定。

6.3.2 自锚式悬索桥的主要分析和计算内容宜采用空间模型。

6.3.3 采用钢-UHPC 组合桥面板总体计算时宜考虑 UHPC 铺装层在总体刚度及强度的作用。

6.3.4 对于构造复杂的主缆锚固部分的主梁，宜采用三维实体单元或板壳单元模型。

7 构造设计

7.1 一般规定

7.1.1 自锚式悬索桥各主要组成部分的构造，应保证结构具有足够的强度和刚度，同时使内力传递顺畅，减少应力集中，便于施工和养护。

7.1.2 自锚式悬索桥构造设计时应考虑吊索、支座、伸缩装置等可更换部件的维护和更换，预留必要的空间和构造措施。

7.1.3 大跨径自锚式悬索桥宜设置健康监测系统。

7.2 索塔

7.2.1 桥面以上塔柱高度应根据主跨缆索矢跨比、主缆锚固角度、主索鞍构造和塔顶附属设施确定。

7.2.2 索塔形式横桥向宜采用单柱式、A型、钻石型或倒Y型结构形式、塔顶布置分离式索鞍时可采用双柱式或门型结构形式，如图2所示。顺桥向宜采用单柱式或倒Y型。

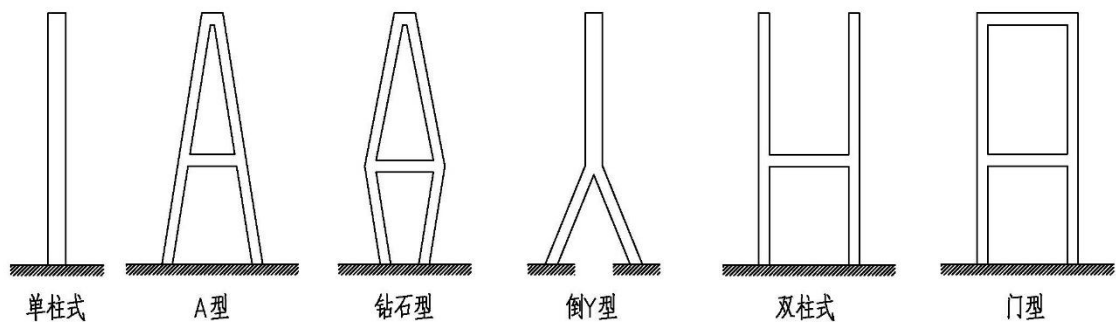


图2 索塔横桥向结构形式

7.2.3 混凝土索塔截面宽度大于4 m时，宜采用空心截面，壁厚不应小于60 cm。竖向受力钢筋直径不宜小于25 mm，箍筋直径不宜小于16 mm，间距不应大于200 mm。

7.2.4 钢索塔内外壁板和竖向加劲板厚度不宜小于20 mm，水平横隔板间距不宜大于4 m。

7.3 主梁

7.3.1 主跨跨径小于150 m时宜采用预应力混凝土梁，主跨跨径在100 m~200 m之间时宜采用钢-混组合梁，主跨跨径大于200 m时宜采用钢主梁。

7.3.2 钢主梁桥面板一般采用正交异性板结构，纵向加劲肋宜采用U形闭口加劲肋，桥面板板厚一般不宜小于14 mm，U肋厚度不宜小于8 mm。

7.3.3 采用超高性能混凝土铺装结构时，超高性能混凝土厚度不宜小于5 cm，钢面板厚度不宜小于10 mm，加劲肋可采用开口型式。

7.4 缆索系统

7.4.1 缆索高强度钢丝直径宜为5.5 mm~6.2 mm。

7.4.2 主缆宜选择预制平行索股，单根索股中的钢丝数量宜采用61丝，91丝、127丝，宜排列成正六边形。

7.4.3 主缆空隙率索夹内应控制在18%以内，索夹外应控制在20%以内。

7.4.4 主缆索股锚头宜采用热铸锚，吊索锚头宜采用冷铸锚。

7.4.5 吊索设计长度应根据施工中主缆的实际空缆线形、主缆弹模、主梁等实际恒载重量及吊索实测弹性模量进行修正。

7.4.6 短吊索长度的确定应考虑由于主缆与加劲梁之间的相对位移所产生的附加应力的影响，平行钢丝与钢丝绳吊索的弹性体长度不宜小于 1.0 m，端部短吊索可采用两端可转动的刚性杆。

7.4.7 吊索与主梁的连接构造应具备索力调节能力，销接头宜配置关节轴承，承压式锚固端宜增加球型垫板等减小转动力的措施。

7.4.8 主缆倾斜角度较大时，索夹设计应适当提高其抗滑承载力。

7.4.9 主缆应设置防腐措施。可采用“缠丝+表面涂装+通干空气除湿”或“缠丝+封闭包裹+通干空气除湿”等防腐方案。

7.4.10 索夹的设计应符合《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65-05 的相关规定。

7.4.11 距离桥面高度小于 12 m 范围内的主缆、吊索、索夹及连接件，应考虑防火设计。防火的要求应达到烃类火灾作用下，30 分钟内构件金属材料的温度不超过 300 ℃。

7.5 索鞍及锚碇

7.5.1 主索鞍宜设计为肋传力结构或外壳传力结构。当索塔为混凝土结构时，主索鞍宜采用肋传力的结构形式；当索塔为钢结构时，主索鞍宜采用外壳传力的结构形式。

7.5.2 主索鞍一般设计为分体式，宜根据吊装能力进行块件划分。大跨径独塔等跨自锚式悬索桥索鞍和承压板之间宜设置可靠连接防止滑动。

7.5.3 鞍槽中钢隔板宜采用整体不分层摩擦板增加抗剪切能力。

7.5.4 主缆锚固结构根据主梁规格和主梁结构可采用分散锚固和环绕锚固，见图 3-4。

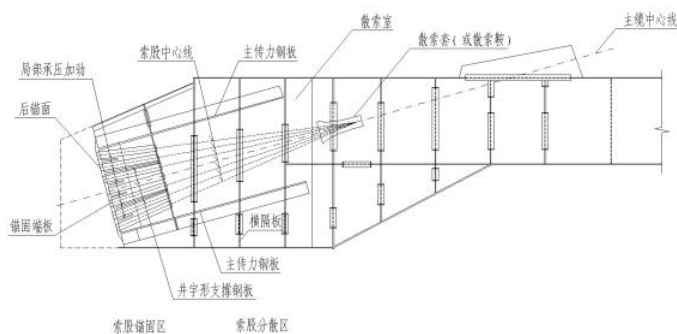


图 3 主缆分散锚固

- 8.4 塔柱施工时，塔顶标高应考虑混凝土的收缩徐变和弹性压缩对高程的影响，设置适当的预抬高。
- 8.5 索夹螺杆应进行三轮以上张拉紧固保证受力均匀，每轮均张拉至设计夹紧力，施工过程中应进行多次检测，及时补张夹紧力。
- 8.6 在桥梁交付使用一年后，需对所有索夹螺栓进行再次夹紧至设计值 1.2 倍~1.4 倍。应长期对螺杆拉力进行监控，螺杆拉力小于设计值时应及时紧固螺栓至设计夹紧力 1.2 倍~1.4 倍。
-

大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计要求 编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

根据山东公路学会《关于发布第二批山东公路学会标准立项计划的通知》（鲁公学会〔2024〕8号），《大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计要求》为团体标准制定项目，立项编号：2024-08。

（二）编制背景

随着我国基础设施建设的快速发展，桥梁工程逐渐向大跨径、高适应性、景观协调性方向演进。自锚式悬索桥作为一种无需依赖大型地锚的特殊悬索桥型，凭借其对复杂地质条件（如软土地基、高地震烈度区）的强适应性，以及独特的空间造型优势，在国内城市桥梁与跨江跨河工程中得到广泛应用。据统计，截至2024年，我国已建成跨径超过200m的自锚式悬索桥超过30余座，其中独塔等跨布置形式因结构对称性强、景观协调性优、施工风险可控等特点，逐渐成为城市地标性桥梁的首选方案，特别适合于黄河下游的地质与地形。

然而，随着跨径的增大（突破300m级）和结构形式的创新，独塔等跨自锚式悬索桥面临以下亟待解决的技术难题：1）结构体系复杂化，主缆直接锚固于主梁，导致主梁承受巨大的轴向压力与局部弯矩，传统混凝土主梁易开裂，钢主梁需解决疲劳累积损伤等问题；独塔等跨布置下，结构的约束体系需要适应独塔对称的要求，考虑运营荷载、地震及风荷载的作用，选择合适的约束体系；同时，独塔对称的自锚式悬索桥，主缆垂跨比与吊索间距的优化需兼顾结构刚度与经济性，目前缺乏统一设计准则。2）施工工艺特殊化，“先梁后缆”工艺要求主梁在无缆索支撑状态下完成架设，临时支撑体系的设计精度与成本控制面临挑战；主缆索股锚固区施工误差易引发主梁应力集中，现有施工规范未明确精细化控制指标。3）耐久性短板突出，钢桥面铺装层在重载交通下易出现疲劳开裂，UHPC（超高性能混凝土）铺装层协同受力机制尚未形成标准化设计方法。

与此同时，国内外相关技术标准存在明显滞后：1）国内规范空白：现行《公路悬索桥设计规范》（JTG/T D65-05）主要针对传统地锚式悬索桥，未涵盖自锚式悬索桥主梁锚固区设计、缆-梁协同计

算等核心内容；2）国际经验局限：欧美国家自锚式悬索桥案例较少（如美国旧金山-奥克兰海湾大桥东段跨径 385m），其技术标准（如 AASHTO LRFD）偏重理论分析，缺乏针对大跨径独塔等跨体系的构造细节指导；3）区域发展需求：山东省作为桥梁建设大省，胶州湾、黄河三角洲等区域地质条件复杂，亟需结合本地工程实践形成专项技术指南，推动设计施工标准化；4）建设经验的支撑：山东胶州湾大沽河航道桥、第二绕城高速大北环黄河大桥都采用了空间缆的独塔自锚式悬索桥结构，积累了设计与建设经验，为指南的编制提供了支撑。

在此背景下，《大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计要求》的编制具有紧迫性与战略意义，本指南的发布将填补该领域的标准空白，为提升我国大跨径自锚式悬索桥的技术竞争力、服务“交通强国”战略提供重要支撑。

（三）起草过程

本指南的编制工作以解决技术难题为导向，依托山东省内典型工程实践经验，结合理论研究与技术创新，分阶段推进标准制定，具体过程如下：

1. 立项筹备与框架搭建（2023 年 10 月-2024 年 1 月）

根据山东公路学会立项要求，山东高速建设管理集团有限公司联合山东省交通规划设计院集团有限公司、西南交通大学成立标准起草组，明确分工与时间节点。对山东省内已建成的济南凤凰黄河大桥（跨径 70+168+428+428+168+70m）、青岛海湾大沽河航道桥（跨径 80+90+260+90+80m）等多座独塔等跨自锚式悬索桥开展实地调研，梳理施工难点与运维问题，召开多次专题研讨会，确定指南编制技术框架。

2. 关键技术与试验验证（2024 年 2 月-2024 年 6 月）

针对编制背景中提出的技术难题，开展了主梁锚固区受力分析、吊索间距优化、施工误差控制等方面的研究，明确了分级控制指标。

3. 初稿编制与内部修订（2024 年 7 月-2025 年 4 月）

整合研究成果与工程案例，完成初稿编制，重点落实了结构体系、材料要求、施工工艺等方面内容。

4. 家审查与修订（2025 年 5 月-2025 年 8 月）

初稿提交山东公路学会组织专家评审，根据审查意见重点修订。

二、主要技术内容及其确定依据

（一）标准主要内容

为满足山东省桥梁工程建设的需要，使大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计与施工工作符合技术先进、安全可靠、耐久适用、经济合理的要求，特制定本指南。本指南主要包括两大部分：第一部分为通用部分，包括范围、术语和符号、材料等内容；第二部分为大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计与施工部分：包括基本规定、持久状况承载能力极限状态计算、持久状况正常使用极限状态计算、施工阶段计算、结构与构造、耐久性设计、施工等内容。

（二）适用范围

本指南适用于跨径 $\leq 400\text{m}$ 的公路及城市道路新建、改建独塔等跨自锚式悬索桥，主梁形式包括混凝土梁、钢箱梁、钢-混组合梁。

（三）章节框架和主要内容

1. 范围：进行本规范编制目的、适用范围和与国家现行标准的关系的描述。
2. 规范性引用文件：进行本规范编制所参考的标准。
3. 术语和定义：对大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的结构体系等术语和定义进行了规定，其他与上位规范相同的术语在本指南中不重复列出。
4. 材料：对钢材、混凝土及 UHPC 材料的强度与物理性能指标等进行了规定。
5. 总体设计：对大跨径独塔等跨自锚式悬索桥设计的一般规定、桥跨布置原则、垂跨比、刚度控制指标等方面进行了阐述。
6. 计算：对大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的持久状况承载力极限状态设计计算进行了规定，与上位规范相同的内容，指明使用规范，不重复列出。
7. 构造设计：对大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的索塔截面形式、主梁锚固构造、索夹抗滑设计等方面给出了建议。
8. 设计对施工的要求：对大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的施工工艺控制方面给出了建议。

三、试验验证的分析和综述报告

（一）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥材料设计指标（本标准条文 4.1.1、4.1.2、4.2.3 节）

近年来，混凝土材料性能提升，高标号混凝土性能逐渐稳定，同时自锚式悬索桥的主缆锚固于加劲梁端部，锚固区承受巨大的轴向压力和局部集中应力，传统 C40 混凝土易因强度不足导致压溃或开

裂，而提升至 C50 及以上可显著增强抗压与抗裂能力，延长桥梁寿命。此外，主梁采用高强度混凝土可减轻自重 15%~20%，降低主缆索力，为大跨径设计提供可能。对于索塔，C40 混凝土相比常规 C35 弹性模量更高，可有效抵抗主缆竖向分力与风振变形，提升整体稳定性。

在钢丝材料方面，分项系数精细化（主缆 $\gamma_R=2.0$ 、吊索 $\gamma_R=2.2$ ）则基于构件失效风险的差异化：主缆作为全桥核心需高冗余度，而吊索因承受交变荷载和疲劳风险需更高安全储备。

（二）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥结构体系设计指标（本标准条文 5.2.3、5.2.4 节）

传统地锚式悬索桥垂跨比多为 $1/10 \sim 1/12$ ，但自锚式悬索桥因主梁直接承受主缆拉力，需更严格的垂跨比控制。主缆垂跨比减小会增大主缆水平分力（与垂度成反比），导致主梁轴向压力显著增加。反之，垂跨比过大会抬高索塔高度，加剧风振风险。通过参数化分析（ANSYS 模型）， $1/12 \sim 1/15$ 范围可确保主梁压应力 $\leq 0.4f_{ck}$ （混凝土抗压强度标准值），同时可以合理控制索塔高度。

吊索间距直接影响主梁局部受力、施工成本及结构耐久性，而现行规范（如 JTG/T D65-05）通常按跨度统一设定间距（如 $12 \sim 20\text{m}$ ），但不同材料力学特性、局部受力、寿命经济性不同，因此可根据不同主梁形式，确定吊索间距。对于钢梁，抗弯及抗疲劳性能优异，可承受较大跨度下的局部弯矩。增大吊索间距可减少吊索数量，降低施工成本并简化索夹布置；对于混凝土梁，混凝土抗拉强度低，密布吊索可减小主梁局部弯矩，避免腹板开裂。对于组合梁，钢-混凝土组合梁通过剪力钉协同受力，但需平衡钢梁局部屈曲与混凝土界面滑移风险，采用中等吊索间距可平衡钢梁预制与混凝土现浇工序，缩短工期。

（三）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥作用与总体计算设计指标（本标准条文 6.3.3、6.3.4 节）

现行 JTG/T D65-05 未明确断索验算要求，但吊索作为传递主梁荷载至主缆的关键构件，其突发断裂可能导致荷载重分布，引发相邻吊索超载、主梁局部应力剧增甚至整体失稳，通过对断索工况进行验算分析，可提高结构的冗余安全性和抗偶然事件能力，提升极端工况下的安全性，优化吊索布置间距与材料等级，实现预防性设计，避免灾后高昂修复成本。

现行规范（如 JTG D64）将铺装层视为二期恒载，仅计算其自重，忽略其刚度贡献。然而，UHPC 弹性模量高达 45GPa （普通混凝土为 $30 \sim 35\text{GPa}$ ），抗拉强度超 8MPa ，其与钢主梁协同工作可提升组合截面整体刚度，从而可优化主梁截面高度，降低用钢量，UHPC 层参与受力可抑制钢梁局部屈曲，减少桥面铺装层开裂风险，延长维护周期。

现行规范 JTG/T D65-05 采用等效梁单元模拟锚固区，但锚固区作为主缆与主梁的荷载传递核心，对于部分构造复杂的主缆锚固部分的主梁，传统梁杆单元模型无法精确模拟其三维应力分布，三维建模可精准捕捉锚垫板接触滑移、螺栓预紧力分布及混凝土锚块的拉压损伤，避免简化模型导致的应力低估或路径误判。

（四）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥索塔设计指标（本标准条文 7.2.2、7.2.3、7.2.4 节）

传统索塔设计偏重结构强度，忽视构造匹配性，导致局部应力集中与景观协调性不足。本指南提出塔型-索鞍一体化设计原则，明确整体式索鞍适配单柱式或 A 型塔、分离式索鞍适配双柱式或门型塔的对对应关系。

此外，针对混凝土索塔的高轴压-弯矩复合受力特性，配筋精细化要求，将箍筋直径从规范 12mm 提升至 16mm、间距加密至 200mm，并通过壁厚 $\geq 60\text{cm}$ 限制裂缝扩展。钢索塔则通过加劲板厚 $\geq 20\text{mm}$ 、横隔板间距 $\leq 4\text{m}$ 抑制局部屈曲，确保其在风荷载作用下的稳定性。

（五）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥主梁设计指标（本标准条文 7.3.2、7.3.3 节）

传统主梁选型依赖经验判断，易导致材料冗余或性能不足。本指南量化跨径-材料对应关系，规定混凝土梁适用跨径 $<150\text{m}$ 、组合梁 100~200m、钢梁 $>200\text{m}$ 。针对自锚式悬索桥特有的主缆上拔力问题，锚固区抗拔措施要求压重、锚固跨与抗拉连接协同作用。

（六）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥缆索系统设计指标（本标准条文 7.4.7、7.4.8 节）

短吊索疲劳破坏是自锚式悬索桥主要病害之一。传统设计采用普通铰接构造，且因构造简化，常导致短吊索应力集中、主缆防腐失效及索力分布不均等隐患，本指南针对这些问题，规定长度 $<5\text{m}$ 的吊索采用两端铰接刚性杆，并在销接端配置关节轴承与球型垫板。该种结构形式可增加结构的变形协调能力，更好的将吊索端部弯矩传递转化为局部接触压应力。

（七）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥索鞍及锚碇设计指标（本标准条文 7.5.2、7.5.5 节）

索鞍与锚固系统是主缆荷载向索塔及主梁传递的关键节点，其构造设计的合理性直接影响结构整体受力性能与空间效率。本指南提出传力模式分化原则，混凝土索塔采用肋传力结构，通过竖向肋板将主缆压力直接传递至塔身混凝土核心区，充分发挥混凝土抗压强度高、造价低的优势；钢索塔采用外壳传力结构，利用钢箱壁板的双向抗弯刚度，将主缆荷载均匀分布至塔柱全截面。

同时针对城市桥梁锚固区空间受限的痛点，提出将散索鞍水平放置的方式，减小锚固区的宽度和高度。

（八）大跨径独塔等跨自锚式悬索桥施工技术指标（本标准条文 8.2、8.4、8.5、8.6 节）

现行规范未针对桥型差异限定施工顺序（先梁后缆或先缆后梁），依托已建成的济南绕城高速公路二环线黄河特大桥，采用“先梁后缆”施工工艺，避免了通航困难的问题，提高了主缆定位精度。为降低吊索入锚偏差风险，引入主动横撑系统替代传统被动构造，借助液压实时调节主缆横向间距。对于索夹螺杆张拉，现行规范并未明确张拉轮次与检测方法，根据济南绕城高速公路二环线黄河特大桥现场张拉情况及实测数据，采用三轮以上张拉紧固可保证受力均匀。同时现行规范缺乏运营期维护的要求，由于温度等各个因素的影响，运营阶段索夹可能会松弛，发生索夹滑移事故。通过长期监测、及时紧固可保证索夹处于正常工作状态。

四、技术经济论证

大跨径独塔等跨自锚式悬索桥在我国具有广阔的应用前景，因此在现有悬索桥相关设计及施工规范的基础上制定本指南，通过系统性技术创新，在确保结构性能的同时构建了全寿命周期的经济性优化路径。经济效益方面，指南通过材料优化、构造集约化设计以及施工工艺革新，有效降低建设期材料损耗与施工风险，减少临时设施投入和工期延误概率，同时依托全寿命周期运维策略，大幅压缩后期养护成本，实现从建设到运营的全流程成本可控。社会效益层面，指南提出的精细化施工标准与安全控制措施显著提升桥梁结构的安全性与耐久性，降低全生命周期内的质量隐患与事故风险；其标准化设计与模块化施工理念推动行业技术进步，为复杂地形桥梁建设提供可复用的技术范式，促进区域交通网络优化与经济发展。此外，材料性能提升与空间集约化设计减少资源消耗与环境干扰，契合绿色建造理念，而桥梁长效服役能力的增强进一步延长社会基础设施的服务周期，提升公共投资效益。该指南不仅填补了自锚式悬索桥在特殊桥型设计与施工领域的规范空白，更通过技术集成创新为桥梁工程的高质量发展提供系统性解决方案，对提升我国桥梁建设水平、保障基础设施安全运营、推动交通强国战略实施具有深远意义。

五、与国家标准、行业标准、地方标准同类标准技术内容的对比情况

本指南在现行《公路悬索桥设计规范》（JTG/T D65-05-2015）、《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T

3650-2020)等标准基础上,针对自锚式悬索桥特殊结构体系进行了系统性深化与创新:相较于传统规范中通用的悬索桥技术条款,本指南重点补充了独塔等跨自锚式悬索桥的差异化设计原则,新增“先梁后缆”工艺适用范围、主梁抗扭稳定性控制标准及主动横撑动态调位技术,突破了现有规范对自锚式桥型施工顺序与精度控制模糊的局限;在施工精度领域,细化塔顶预抬高分项计算模型(涵盖混凝土收缩徐变、弹性压缩及温度效应),同时提出索夹螺杆三轮分级张拉与超声波检测联动的精细化工工艺,填补了现行标准对张拉轮次与检测方法的空白;全寿命管理方面,提出运营期索夹螺栓复紧力阈值(设计值1.2~1.4倍)及螺杆力长期监控体系,完善了现有规范仅关注施工期张拉而忽视运营期松弛补偿的缺陷。本指南通过结构理论创新、工艺标准升级与全周期管控体系的融合,为大跨径独塔等跨自锚式悬索桥的设计施工提供了更具针对性和前瞻性的技术框架。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

编制期间,山东高速建设管理集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、西南交通大学建立了编写组,编写组建立了专题例会与节点性全员会议制度,针对编制过程中的技术路线及其参数等进行充分沟通,也针对编制过程中遇到的问题进行了多次内部讨论、协商,未有重大分歧意见。

七、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利。