

湖南省地方标准

DBXX/T XXXX—XXXX

城市自锚式悬索桥施工监控技术规程

Technical Standards for Construction Monitoring of Urban Self-Anchored
Suspension Bridge

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

湖南省住房和城乡建设厅
湖南省市场监督管理局

联合发布

湖南省地方标准

城市自锚式悬索桥施工监控技术标准

Technical Standards for Construction Monitoring of Urban Self-Anchored
Suspension Bridge

DB 43/TXXX-2026

批准部门：湖南省住房和城乡建设厅

湖南省市场监督管理局

施行日期：2026 年 X 月 X 日

前言

根据湖南省市场监督管理局《关于下达2025年度地方标准制修订项目增补立项计划的通知》（湘市监标函〔2025〕89号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内先进标准，并在广泛征求意见基础上，制定了本标准。

本标准主要技术内容是：1. 总则；2. 术语；3. 基本规定；4. 控制计算；5. 施工监测；6. 数据分析与反馈控制；附录A城市自锚式悬索桥施工监控常用记录表格；附录B城市自锚式悬索桥施工监测截面及测点布设。

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

本标准由湖南省住房和城乡建设厅负责管理，由湖南省交通规划勘察设计院有限公司、长安大学负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给湖南省交通规划勘察设计院有限公司（地址：湖南长沙市月亮岛路598号，邮政编码：410200，电子邮箱：heyaobei@qq.com）。

本标准主编单位：湖南省交通规划勘察设计院有限公司

长安大学

本标准参编单位：

本标准主要起草人员：

本标准主要审查人员：

目 次

1 总则 1

2 术语 1

3 基本规定 1

4 控制计算 2

 4.1 一般规定 2

 4.2 计算参数取值与校准 2

 4.3 成桥状态确定与符合性计算 3

 4.4 施工过程模拟计算 3

 4.5 体系转换专项计算 3

5 施工监测 3

 5.1 一般规定 3

 5.2 施工监测内容 4

 5.3 监测截面及测点布设 4

 5.4 监测频度 5

 5.5 监测仪器及元件 7

6 数据分析与反馈控制 7

 6.1 一般规定 7

 6.2 施工监测数据分析 8

 6.3 误差识别与状态评估 8

 6.4 误差反馈与模型修正 9

 6.5 反馈控制实施 9

附 录 A （资料性） 城市自锚式悬索桥施工监控常用记录表格..... 11

附 录 B （资料性） 城市自锚式悬索桥施工监测截面及测点布设..... 14

用词用语说明 15

引用标准名录 16

条文说明 17

Contents

1 General Provision1

2 Terms1

3 Basic Requirements1

4 Control Calculation2

4.1 General Requirements.....2

4.2 Calculation Parameter Selection and Calibration.....2

4.3 Determination of Bridge Completion State and Compliance Calculation3

4.4 Construction Process Simulation Calculation3

4.5 System Conversion Special Calculation3

5 Construction Monitoring3

5.1 General Provisions3

5.2 Construction Monitoring Content4

5.3 Monitoring Sections and Measuring Points Layout.....4

5.4 Monitoring Frequency5

5.5 Monitoring Instruments and Components7

6 Data Analysis and Feedback Control7

6.1 General Provisions7

6.2 Construction Monitoring Data Analysis8

6.3 Error Identification and Condition Assessment.....8

6.4 Error Feedback and Model Correction9

6.5 Feedback Control Implementation9

Appendix A: Common Record Forms for Construction Monitoring of Urban Self-Anchored Suspension
Bridges..... 11

Appendix B: Monitoring Sections and Measuring Points Layout for Construction of Urban Self-Anchored
Suspension Bridges.....14

Explanation of Wording in This Standard15

List of Quoted Standards.....16

Addition:Explanation of Provisions.....17

城市自锚式悬索桥施工监控技术规程

1 总则

- 1.1 为规范城市自锚式悬索桥施工监控工作，提高其施工质量和控制精度，制定本标准。
- 1.2 本标准适用于采用“先梁后缆”法施工的自锚式悬索桥。
- 1.3 自锚式悬索桥施工监控应根据结构特点和施工方法、工序、工艺，对桥梁结构状态和几何形态进行监测与过程控制。
- 1.4 自锚式悬索桥施工监控宜积极采用新技术、新设备，鼓励绿色化、智能化、数字化技术的应用。
- 1.5 自锚式悬索桥施工监控除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

下列术语适用于本文件。

2.1

城市自锚式悬索桥 urban self-anchored suspension bridge
主缆直接锚固于主梁上的城市悬索桥。

2.2

施工监控 construction monitoring and control
为控制桥梁结构施工过程的结构状态，实现结构成桥内力状态与几何形态目标而进行的控制计算、施工监测、数据分析与反馈控制等工作的总称。

2.3

控制计算 control calculation
为获得桥梁施工过程结构内力状态和几何形态，对桥梁结构进行的成桥状态确定与符合性计算、施工过程模拟计算和体系转换专项计算。

2.4

反馈控制 feedback control
通过识别与分析已成结构实际状态与预测状态之间的误差，对桥梁施工状态进行判别，并根据判别结果对后续施工控制参数进行调整。

2.5

体系转换过程 structural system changing process
主梁由临时支承向主缆一吊索体系承重转变的施工过程。

2.6

施工重要临时装置 important temporary construction equipment
用于自锚式悬索桥施工关键工序的承载、导向或约束类临时设施。

3 基本规定

- 3.1 自锚式悬索桥施工监控工作应遵循全过程、动态控制的原则，通过对施工过程中结构几何状态与内力状态的监测、分析、反馈与调整，实现成桥状态符合设计要求。
- 3.2 自锚式悬索桥施工监控的主要技术工作应包括控制计算、施工监测、数据分析与反馈控制，并提交相应的监控成果。
- 3.3 自锚式悬索桥施工监控宜按资料收集、监控方案编制、成桥状态确定与符合性计算、施工过程模拟计算、体系转换专项计算、施工监测、数据分析、误差识别与状态评估、误差反馈与模型修正、反馈控制及提交监控成果的流程进行。
- 3.4 资料收集应包括设计文件、施工组织方案、工程场地与环境条件等相关资料。
- 3.5 施工监控应编制监控方案。监控方案应包括以下章节：
- 1) 工程概况；
 - 2) 监控目标；
 - 3) 监测项目与方法；
 - 4) 控制计算模型；
 - 5) 预警与误差调控；
 - 6) 组织架构与职责分工。
- 3.6 自锚式悬索桥施工监控工作应符合下列安全与环保要求：
- 1) 监控工作应对重要临时设施拆除过程进行监测；
 - 2) 监控工作本身应采取必要的安全防护措施；
 - 3) 监控工作宜采用节能、环保的技术与设备。

4 控制计算

4.1 一般规定

- 4.1.1 控制计算应依次进行计算参数取值与校准、成桥状态确定、设计符合性计算、施工过程模拟计算和体系转换专项计算。
- 4.1.2 控制计算宜采用空间有限元分析软件建立能够准确反映施工过程的空间计算模型。
- 4.1.3 控制计算应考虑几何非线性与接触非线性的影响。
- 4.1.4 控制计算应计入施工重要临时设施及外部边界条件的影响。

4.2 计算参数取值与校准

- 4.2.1 计算参数应能准确反映结构实际情况，宜包括：
- 1) 材料参数：弹性模量、容重、龄期、线膨胀系数、收缩徐变参数等；
 - 2) 几何参数：结构尺寸、坐标、高程等；
 - 3) 荷载参数：结构自重、施工临时荷载、预应力等；
 - 4) 施工工艺参数：施工周期、临时约束条件、体系转换方案等；
 - 5) 环境参数：风向、风速、温度、湿度等。
- 4.2.2 主要计算参数的取值应符合下列规定：
- 1) 几何参数应在现场采用精密测量方法获取；
 - 2) 材料参数应通过室内试验或工厂测试获取；
 - 3) 主梁、主缆、吊索等构件的重量及无应力尺寸应在制造阶段进行测量。
- 4.2.3 无法直接测量的计算参数宜通过现场测试与参数识别反演确定。
- 4.2.4 计算参数应通过复测、误差检验等方式进行校验。

4.2.5 设计符合性计算宜参照设计或相关规范进行计算参数取值。

4.3 成桥状态确定与符合性计算

4.3.1 成桥状态确定分析应基于自锚式悬索桥自平衡特点，求得几何形态与内力状态符合设计要求的成桥目标状态。

4.3.2 成桥状态确定分析应包括以下内容：

- 1) 基于成桥目标状态进行主缆找形计算；
- 2) 确定满足主梁和索塔合理受力要求的成桥吊索力分布；
- 3) 计算成桥状态下主缆、吊索、主梁、索塔及支座的内力与变形；
- 4) 确定主缆、吊索和主梁的无应力长度及索夹的成桥位置。

4.3.3 成桥状态确定后，应迭代分析确定主缆架设阶段的空缆线形、索鞍预偏量及索夹初始安装位置等初始状态控制参数。

4.3.4 设计符合性计算应对主体结构在各施工阶段及运营状态的强度、刚度和稳定性进行验算，并与设计文件进行对比分析。

4.4 施工过程模拟计算

4.4.1 施工过程模拟应采用正装分析法，模拟从下部施工到成桥的全部过程。

4.4.2 施工过程模拟计算应提出各施工阶段的几何形态控制目标值，应包括：

- 1) 确定各施工阶段主梁、主缆、索塔的理论线形或标高，以及施工重要临时装置沉降与变形；
- 2) 确定主索鞍、散索鞍或散索套的偏移状态；

4.4.3 施工过程模拟计算应提出各施工阶段的内力状态控制目标值，应包括：

- 1) 确定吊索合理张拉力和张拉顺序；
- 2) 计算各施工阶段主体结构及重要临时设施的控制截面内力与应力。

4.5 体系转换专项计算

4.5.1 体系转换应符合受力安全、构造防触碰要求，并兼顾施工便利性与经济性。

4.5.2 体系转换应进行专项计算与多方案比选，明确吊索张拉顺序、分级张拉力、索鞍顶推时机与顶推量等关键控制参数。

4.5.3 体系转换专项计算的验算要求应包括：

- 1) 主梁及索塔的控制截面应力不应超限；
- 2) 索塔顶偏位不应超限；
- 3) 吊索应力安全系数不应小于 2.5；
- 4) 索塔及边墩处永久支座不应出现负反力。

4.5.4 体系转换专项计算的构造防触碰要求应包括：

- 1) 吊索不与索导管管壁发生触碰；
- 2) 散索套处主缆索股锚固导管口发生触碰；
- 3) 主缆不与索塔、主梁发生触碰。

4.5.5 体系转换专项计算应考虑空间缆索体系的缆索横向线形变化，并应对缆间横撑、临时拉索等临时辅助装置进行强度、刚度和稳定性验算。

5 施工监测

5.1 一般规定

- 5.1.1 施工监测应遵循全过程、系统性、同步性与可靠性原则，对施工全过程的结构状态进行跟踪监测，监测数据应真实反映结构实际状态，并为数据分析与反馈控制提供依据。
- 5.1.2 施工监测的参数应包括几何形态参数、内力状态参数、环境与荷载参数三类。
- 5.1.3 对温度变化敏感的参数，应在温度场稳定的时段进行监测。当无法在稳定温度场条件下监测时，应记录监测时刻的环境与结构温度数据，并采用可靠方法分离温度效应。
- 5.1.4 施工监测应使用满足精度、量程和稳定性要求的仪器设备，所有仪器设备应在检定或校准有效期内使用。
- 5.1.5 监测数据应及时、准确、完整记录，记录格式应符合附录 A 要求。记录应同步包含监测时间、环境条件、施工工况及临时荷载等信息。

5.2 施工监测内容

- 5.2.1 几何形态监测应包括下列内容：
- 1) 主梁线形与压缩变形；
 - 2) 索塔标高、压缩变形与纵横向偏位；
 - 3) 主缆线形与空间位置
 - 4) 吊索倾角；
 - 5) 索夹、主索鞍、散索鞍（或散索套）的空间位置及偏位；
 - 6) 支座变形；
 - 7) 桥墩、索塔基础沉降；
 - 8) 施工重要临时装置的沉降或变形。
- 5.2.2 内力状态监测应包括下列内容：
- 1) 主梁、索塔及桥墩控制截面的应力；
 - 2) 吊索索力；
 - 3) 主缆锚跨索股索力；
 - 4) 重要施工临时装置的控制截面应力。
- 5.2.3 环境与荷载监测宜包括下列内容：
- 1) 环境温度、湿度；
 - 2) 风速、风向；
 - 3) 水位、流速；
 - 4) 桥面临时堆载与施工机具荷载。

5.3 监测截面及测点布设

- 5.3.1 应建立统一、稳定的施工监测基准网，基准网的布设与精度应符合现行《工程测量通用规范》（GB 55018）的规定。
- 5.3.2 几何形态监测的测点布置应满足表 1 的要求。测点应布设在能反映结构整体和局部变形的特征断面上，并应牢固、醒目、便于长期观测。

表1 几何形态监测测点布置要求

序号	监测内容	监测截面位置	测点布设及数量要求
1	主梁线形与压缩变形	支点、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨、吊索锚固点附近断面	每个断面沿桥宽方向不少于 3 点
2	索塔标高、压	塔顶、塔身变化处、承台顶面	塔顶及每个监测截面不少于 4 点

	缩量与偏位		
3	主缆线形与空间位置	索鞍出口、边跨跨中、主跨 1/4、1/2、3/4 跨、索夹附近	每个监测截面不少于 1 点
4	吊索倾角	代表性长、短吊索	每根被测吊索的上、下锚点
5	索夹、索鞍位置及偏位	各索夹顶面、主索鞍、散索鞍（套）的预定标记点	每个对象不少于 2 点
6	支座变形	永久支座及关键临时支座的顶、底面	每个支座不少于 1 个位移测点
7	桥墩、索塔基础沉降	索塔、桥墩、重要临时支架的承台四角或基础顶面	每个独立基础不少于 4 点

- 5.3.3 内力状态监测的测点布置应符合下列规定：
- 1) 应力监测截面应选择在结构内力最大或受力复杂的控制部位，如索塔底部、主梁支点附近、跨中截面等。每个监测截面沿周边布置的测点数不宜少于 4 个；
 - 2) 吊索索力监测应根据测试方法确定测点位置，每根吊索的测点不应少于 1 个；
 - 3) 主缆锚跨索股索力宜在锚固端布设压力传感器监测。
- 5.3.4 温度监测测点布置应能反映结构温度场的分布特征，并符合下列规定：
- 1) 钢主梁宜在标准梁段截面布置测点，监测钢箱梁顶板、底板及腹板的温度，每个截面测点数不宜少于 6 个；
 - 2) 混凝土主梁宜在典型断面布置测点，监测箱梁顶板、底板及腹板内外表面温度，每个截面测点数不宜少于 6 个；
 - 3) 主缆温度监测截面宜布置在主跨跨中、四分点及索塔附近，每个截面测点数不宜少于 4 个；
 - 4) 主缆温度监测截面宜布置在主跨跨中、四分点及索塔附近，每个截面测点数不宜少于 4 个；
 - 5) 温度测点宜靠近应变测点布设，以提供温度补偿基准。
- 5.3.5 风速风向监测点宜布设在主跨跨中和桥塔顶部，可在主梁跨中及四分点断面布置风压监测点。
- 5.3.6 施工期间应采取有效措施保护监测点、监测元件及传输线路，成桥后宜在桥面、主缆、索塔等部位设置永久性观测点。
- 5.3.7 自锚式悬索桥监测截面及测点布设宜符合图 B.0.1 的要求。

5.4 监测频度

5.4.1 监测频次应根据施工阶段、结构响应特点和控制要求确定，几何形态应满足表 2 的基本要求，内力状态应满足表 3 的基本要求。

表2 几何形态监测基本频次表

监测对象	监测内容	主要监测截面/位置	关键施工阶段及监测频次要求
桥墩、索塔	标高、压缩变形、纵横向偏位、沉降	承台顶面或墩底侧面；塔顶	1. 索塔施工阶段：裸塔状态应测试 1 次标高与偏位。 2. 体系转换阶段：每批次吊索张拉或索鞍顶推后，应测试 1 次索塔偏位与标高。 3. 成桥阶段：桥面铺装完成后，应测试 1 次最终偏位与标高。

			4. 基础沉降宜每月 1 次，荷载显著变化后应加测。
主梁	线形、压缩变形	支点、跨中、四分点、吊索锚固点附近；梁端伸缩缝附件截面	1. 主梁安装阶段：梁段安装就位后，应测试其线形；若为顶推施工，顶推过程中应加密监测。 2. 体系转换阶段：每批次吊索张拉后，应测试主梁线形变化。 3. 成桥阶段：桥面铺装完成后，应测试最终桥面线形与主梁压缩变形。
主缆	线形与空间位置	索鞍处、最大垂度处、主跨四分点、边跨二分点、索夹附近	1. 缆索系统施工阶段：基准索股架设完成后，应测试 1 次绝对线形，且应连续稳定观测 2 天；一般索股架设完成后，应测试相对垂度；紧缆、索夹安装后，应复测线形与索夹位置。 2. 体系转换阶段：每次吊索张拉前后，应加密监测主缆线形变化。 3. 成桥阶段：桥面铺装完成后，应测试最终主缆线形。
吊索	倾角	索体段	吊索安装后及每次张拉调整后，应测试其空间倾角。
索夹	空间位置	索夹首尾两端	索夹安装后，应测试 1 次其空间位置。
索鞍	空间位置与偏位	主索鞍、散索鞍（套）设计位置	1. 缆索系统施工阶段：安装就位时，应测试初始预偏量。 2. 体系转换阶段：每次顶推作业前后，应测试索鞍偏位量。
支座	变形	支座外缘	1. 体系转换阶段：荷载发生转移（如吊索张拉、临时支架卸载）前后，应测试支座变形。2. 成桥阶段：应测试支座最终变形。

表3 内力状态监测基本频次表

监测对象	监测内容	主要监测截面	关键施工阶段及监测频次要求
索塔	应力	塔底等控制截面	1. 裸塔状态：应测试 1 次。 2. 体系转换阶段：应与吊索张拉、索鞍顶推同步加密监测，每完成一个调整步骤后均应测试。
主梁	应力	支点附近、跨中、四分点等控制截面上下缘	1. 主梁安装阶段：梁段安装就位、连接后，应测试 1 次。 2. 体系转换阶段：每批次吊索张拉、梁体脱离临时支撑前后，应测试应力变化。3. 成桥阶段：桥面铺装完成后，应测试最终应力状态。
吊索	索力	张拉端或专用测点	1. 体系转换过程张拉：每轮次或批次张拉调整后，不仅测试当前张拉索，还应测试相邻 3-5 对索的索力变化。 2. 调索与成桥：全部吊索张拉完成及最终调索后，应对全桥吊索索力进行普测。

主缆锚跨索股	索力	锚固端	1. 缆索系统施工阶段：主缆架设完成时，应测试锚固端索股力。 2. 体系转换阶段：在体系转换完成、荷载发生重大转移后，应复测索股力。
重要临时设施	内力	临时拉索、缆间横撑等关键受力构件	在安装完成后、荷载施加前应测试初始状态；在体系转换等荷载变化的关键工况前后，必须进行测试，以确保安全。

- 5.4.2 遇有下列情况之一时，应提高监测频率：
- 1) 结构关键截面应力或索力实测值达到或超过控制计算预警值；
 - 2) 结构变形实测值持续增大或超过控制限值；
 - 3) 遭遇大风、暴雨、急剧降温等极端天气；
 - 4) 监测数据出现异常波动。

5.5 监测仪器及元件

- 5.5.1 施工监测应选用技术成熟、性能可靠的仪器设备，鼓励采用智能化、数字化的新型监测技术。监测仪器设备的精度、量程和稳定性应满足监测项目要求。
- 5.5.2 监测仪器设备应在使用前进行检定或校准，并定期维护，确保其在有效期内正常工作。
- 5.5.3 常用监测仪器设备的选型及精度宜符合下列规定：
- 1) 几何监测可采用全站仪、水准仪、GNSS 接收机等，其精度应不低于相应测量等级的规范要求；
 - 2) 应变监测可采用振弦式传感器、光纤式传感器等，分辨率应不大于 1 $\mu\epsilon$ ；
 - 3) 索力监测可采用振动频率法、压力传感器法、磁通量法、微波雷达法等，其监测分辨率宜不低于 1 kN；
 - 4) 温度监测可采用铂电阻温度传感器、热电偶等，分辨率应不大于 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ；
 - 5) 支座变形和索鞍偏位等位移监测宜选用拉线式位移传感器或激光位移传感器等进行自动化监测，其监测分辨率应不低于 1 mm。
 - 6) 风速风向监测可采用机械式风速仪或超声风速仪，其测量量程应覆盖桥梁设计风速范围；其测量精度应满足：风速不低于 0.3 m/s，风向不低于 1 $^{\circ}$ 。
- 5.5.4 监测元件的安装应牢固可靠，不影响结构受力，并能适应施工环境。数据传输线路应布置整齐，做好防护措施。

6 数据分析与反馈控制

6.1 一般规定

- 6.1.1 自锚式悬索桥施工监控应建立并执行贯穿施工全过程的数据分析、误差识别与反馈控制机制。
- 6.1.2 数据分析与反馈控制应充分考虑自锚式悬索桥的结构特点，并符合下列规定：
- 1) 应计及主梁轴向压力与弯矩的耦合效应，倾斜吊索的垂度效应，以及主缆的大位移效应。
 - 2) 应关注索塔、主梁、主缆在施工过程中的变形协调性，重点分析体系转换阶段结构内力状态与几何形态变化。
 - 3) 应对温度变化引起的结构响应进行专项分析与处理。
- 6.1.3 施工监控应遵循几何状态与内力状态双控原则。在体系转换等关键工序，应以控制结构内力状态为主，兼顾几何状态。

- 6.1.4 数据分析与反馈控制工作，应以施工监测数据、经识别确认的计算参数及实际施工荷载记录为依据。
- 6.1.5 施工监控宜建立信息管理系统，对监测数据、分析结果、预警信息及控制指令进行集成管理。

6.2 施工监测数据分析

- 6.2.1 施工监测数据分析应包括荷载效应分析，结构应力、内力与变形分析，温度影响分析，测试系统效应分析等。
- 6.2.2 施工监测数据分析应剔除测试环境影响，识别结构的真实状态。
- 6.2.3 荷载效应分析应符合下列规定：
- 1) 应核查主梁、桥面系等构件的实际重量与设计值的差异，并评估其对主缆线形、吊索索力及主梁内力的影响。
 - 2) 应分析架梁吊机、施工材料堆放等施工临时荷载的位置与大小变化对结构内力与变形的影响。
 - 3) 应对风荷载、温度荷载等环境荷载的效应进行定量分析。
- 6.2.4 结构应力、内力与变形分析应符合下列规定：
- 1) 混凝土索塔及主梁的应力、变形分析，应计入收缩、徐变效应的影响。
 - 2) 钢结构应力分析应考虑焊接残余应力、应力集中及构件初始变形的影响。
 - 3) 在主缆架设与体系转换阶段的结构整体受力与变形分析，应考虑非线性效应，关注主缆垂度变化、吊索倾角变化、结构大位移以及主缆与索鞍切点位置变化对内力状态与几何形态的影响。
- 6.2.5 温度影响分析应符合下列规定：
- 1) 主梁、主缆线形分析时，应将在非基准温度下测得的数据统一换算至设计基准温度。
 - 2) 索力、结构应力分析时，应分离由截面温度梯度引起的结构自应力和由体系温差引起的结构内力。
 - 3) 对于钢箱梁等对日照温度场敏感的结构，应分析昼夜温差引起的结构竖向及横向线形的周期性变化。
- 6.2.6 测试系统效应分析应符合下列规定：
- 1) 应对传感器、采集系统的零点漂移、温漂等系统误差进行定期标定与修正。
 - 2) 采用振动法测量索力时，对于短索应考虑其抗弯刚度的影响，对于长索应考虑其垂度效应的影响，并应对计算公式进行相应修正。
- 6.2.7 数据分析后，应形成可用于后续误差识别与状态评估的标准化数据成果，并应对数据的可靠性做出明确判断。

6.3 误差识别与状态评估

- 6.3.1 自锚式悬索桥施工过程中应对比施工过程模拟计算值与经本标准 6.2 节分析后的施工监测值，识别结构的几何形态与内力状态误差。
- 6.3.2 施工过程中主体结构几何形态与内力状态的实测值与施工跟踪计算值之间的误差，不应超过表 4 规定的限值。

表4 结构内力状态和几何形态误差限值

项目			误差限值
结构应力	混凝土结构	计算值不大于10 MPa	±2.0 MPa
		计算值大于10 MPa	±20%，且不超过±4.0 MPa

	钢结构	计算值不大于100 MPa		±10.0 MPa	
		计算值大于100 MPa		±10%，且不超过±15.0 MPa	
索力	主缆锚固端索股			±10%	
	吊索（杆）			±5%	
索夹偏位	顺缆向			≤10 mm	
	偏转角			≤0.5°	
高程、高差、倾斜度	索塔倾斜度			塔高的1/3000，且不大于30 mm	
	主缆	主缆基准索架设后线形（高程）	索股主跨跨中	±20 mm	
			边跨跨中	±30 mm	
		上下游基准索股高差			≤10 mm
	主梁	混凝土主梁各节段完成时的高程			±20 mm
		钢主梁各节段完成时的高程			±15 mm
主梁轴向压缩变形			±20%		

6.3.3 误差识别后应对已成结构的实际状态进行评估，并预测当前误差对后续施工过程及成桥状态的影响。评估应包括下列内容：

- 1) 误差在结构体系内的传递与累积效应；
- 2) 误差对体系转换过程吊索张拉、索鞍顶推等关键工序控制目标的影响；
- 3) 误差对结构受力安全及构造防触碰的潜在风险。

6.3.4 在体系转换过程中，应对吊索索力、主梁应力、索塔偏位及主缆线形进行实时跟踪识别与评估，其变化规律应与模拟计算相符，且符合本标准第 4.5 节的相关规定。

6.4 误差反馈与模型修正

6.4.1 结构几何状态或内力状态的误差超过本标准第 6.3.2 条规定的限值时，应进行误差反馈与模型修正。

6.4.2 模型修正前应进行参数敏感性分析，识别对结构响应影响显著的关键参数。参数敏感性分析应包括下列内容：

- 1) 主梁的轴向刚度与抗弯刚度；
- 2) 索塔的抗推刚度；
- 3) 主缆与索鞍间的摩擦系数；
- 4) 吊索的制造与安装长度；
- 5) 临时支架的沉降与刚度；
- 6) 混凝土收缩徐变参数。

6.4.3 模型修正宜采用基于参数敏感性分析的反分析方法。应以现场实测的结构响应（如线形、索力、应力）为目标，对通过敏感性分析识别出的关键参数进行调整，使计算模型的理论预测值逼近实测值。

6.4.4 经修正后的计算模型及参数，应能同时复现主要施工阶段结构的静力响应。模型修正后，应利用更新后的模型重新进行后续施工过程的跟踪计算，预测调整后的结构状态，并将其作为后续施工反馈控制的新理论基准。

6.4.5 在体系转换阶段，应将吊索张拉过程中主梁应力、索塔偏位及支座反力的变化作为重要的反馈比对数据，对计算模型进行阶段性验证与修正。

6.5 反馈控制实施

6.5.1 反馈控制应根据本标准第 6.3 节的误差识别与状态评估，以及第 6.4 节的误差反馈与模型修正

进行决策，并应对后续施工的调控参数、施工工序或施工方案提出调整指令。

6.5.2 结构状态的反馈控制应综合考虑几何形态与内力状态的耦合关系，通过调整吊索的张拉力、张拉顺序及张拉批次，以及主索鞍及散索鞍的顶推时机与顶推量，实施力形综合调控。各项控制应符合下列规定：

- 1) 主缆线形控制应通过保证索股架设精度、索夹初始安装位置以及吊索无应力长度的准确性来实现；出现负误差时，可在锚固端通过调整垫板厚度对索股无应力长度进行补偿；
- 2) 对于已架设的主梁，其线形调整空间有限，应以调整吊索张拉长度为主要手段，通过优化后续吊索的张拉进行逐步修正；
- 3) 索塔偏位控制应通过适时、分阶段顶推主索鞍进行调整。顶推时机和顶推量应根据施工跟踪计算和索塔实际偏位监测数据综合确定。

6.5.3 对于空间缆索自锚式悬索桥，除应满足第 6.5.2 条的要求外，尚应在反馈控制中采取下列措施：

- 1) 应对主缆横向线形进行专项监控。当预测或监测到吊索横向倾角与索导管设计倾角偏差过大，存在碰撞风险时，应通过调整张拉顺序或启用临时缆间横撑等措施进行干预。
- 2) 用于线形控制的所有临时装置，其拆除时机和顺序应通过计算分析确定，并在监控指令下进行。

6.5.4 当施工过程中出现下列情况之一时，应发出预警，采取调整措施或暂停施工：

- 1) 结构应力或吊索索力超过本标准第 6.3.2 条规定的限值。
- 2) 结构变形或位移超过本标准第 6.3.2 条规定的限值，且经评估对成桥状态或施工安全产生不利影响。
- 3) 出现未预见的不利荷载工况或结构异常现象。

附 录 A
(资料性)
城市自锚式悬索桥施工监控常用记录表格
表A.1 主缆、主梁线形测量记录表

监控单位：_____ 编号：_____

工程名称				工程部位			
测试仪器				测试时间			
天气				气温			
施工工况							
测点编号	实测坐标(m)			测点编号	实测坐标(m)		
	X	Y	Z		X	Y	Z
测点布设示意图							

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表A.2 索塔偏位测量记录表

监控单位：_____ 编号：_____

工程名称				工程部位			
测试仪器				测试时间			
天气				气温			
施工工况							
测点编号	实测坐标(m)			测点编号	实测坐标(m)		
	X	Y	Z		X	Y	Z
测点布设示意图							

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表A.3 应力（应变）测试记录表

监控单位：_____ 编号：_____

日期： 年 月 日 校核： 测量：_____

工程名称				工程部位			
测试仪器				测试时间			
天气				气温			
施工工况							
测试断面	测点编号	传感器编号	读数 ($\mu\epsilon$)	测试断面	测点编号	传感器编号	读数 ($\mu\epsilon$)
测点布设示意图							

表A.4 吊索索力（振动法）测试记录表

监控单位：_____ 编号：_____

工程名称				工程部位				
测试仪器				测试时间				
天气				气温				
施工工况								
索编号	理论频率/频差	实测频率(Hz)						备注
		一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	
备注								

日期： 年 月 日 校核： 测量：_____

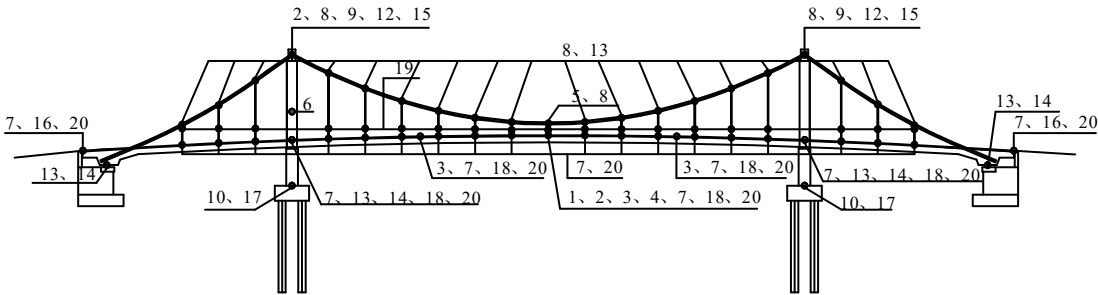
表A. 5 温度监测记录表

监控单位：_____ 编号：_____

工程名称			工程部位		
测试仪器			测试时间		
天气			气温		
施工工况					
测试断面	测点编号	温度（℃）	测试断面	测点编号	温度（℃）
测点布设示意图					

日期： 年 月 日 校核： 测量：

附 录 B
(资料性)
城市自锚式悬索桥施工监测截面及测点布设



图B.1 城市自锚式悬索桥监测截面及测点布设示意图

标引序号说明:

1-环境温湿度	6-索塔温度	11-索夹空间位置	16-主梁压缩量
2-风速风向	7-主梁线形	12-索鞍偏位	17-索塔应力
3-主梁风压	8-主缆线形	13-支座偏位	18-主梁应力
4-主梁温度	9-索塔偏位	14-支座竖向变形	19-吊索索力
5-主缆温度	10-基础沉降	15-索塔压缩量	20-成桥桥面线形

用词用语说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格 在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为：“应符合.....的规定”或“应按.....执行”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版本适用于本规程。

- 《通用硅酸盐水泥》GB 175
- 《混凝土外加剂》GB 8076
- 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119
- 《混凝土膨胀剂》GB 23439
- 《工程测量通用规范》GB 55018
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓连接副》GB/T 1231
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596
- 《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》GB/T 11263
- 《建设用砂》GB/T 14684
- 《活性粉末混凝土》GB/T 31387
- 《城市桥梁桥面防水工程技术规程》CJJ 139
- 《道桥用防水涂料》JC/T 975
- 《钢纤维混凝土》JG/T 472
- 《混凝土用水标准》JGJ 63
- 《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》JT/T 722
- 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
- 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64—2015
- 《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40
- 《公路工程施工安全技术规范》JTG F90
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362
- 《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363
- 《公路工程水泥及水泥混凝土试验规范》JTG 3420
- 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01
- 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650-2020
- 《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》JTG/T 3651
- 《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1

湖南省地方标准

城市自锚式悬索桥施工监控技术标准

DB 43/TXXX-2026

条文说明

目 次

1 总则 19

2 术语 19

3 基本规定 19

4 控制计算 19

 4.3 成桥状态确定与符合性计算 19

 4.5 体系转换专项计算 20

6 数据分析与反馈控制 20

 6.1 一般规定 20

 6.2 施工监测数据分析 20

 6.3 误差识别与状态评估 20

 6.4 误差反馈与模型修正 21

 6.5 反馈控制实施 21

1. 总则

1.2 锚式悬索桥的施工方法主要分为两类：“先梁后缆”施工法和“先缆后梁”施工法。

“先梁后缆”施工法的特点为：先架设主梁于临时支撑上，再安装主缆并完成体系转换，临时支撑通常采用落地支架；当采用斜拉索作为临时支撑时，称为临时斜拉法或斜拉扣挂法。其分类为：吊索张拉法，通过张拉吊索逐步转移荷载至主缆，为常用方法；落梁法，以抬升梁线形安装吊索后逐步落梁完成转换，需要大量千斤顶；顶升索鞍法，通过调整索鞍高度实现无应力安装，适用于小跨径桥梁。

“先缆后梁”施工法的特点为：先架设主缆，再吊装主梁节段，适用于桥下空间受限或需要避免干扰交通的场合。其分类为：临时地锚法，主梁架设期间利用临时地锚平衡主缆拉力；临时墩锚法，将主缆锚固区与边墩临时固结，主梁架设期间利用边墩平衡主缆拉力；临时塔锚法，将边跨主梁与索塔临时锚固，中跨主梁架设期间利用索塔平衡主缆水平力。

根据自锚式悬索桥主缆锚固于主梁端的受力特点，其施工主要采用“先缆后梁”工艺。

2 术语

2.5 体系转换过程伴随着吊索张拉、索鞍顶推、临时支撑脱架或拆除等工序，且结构的几何与内力状态变化剧烈，是整个施工过程的重难点。

2.6 工重要临时装置具体包括：主梁架设时需要的临时支架、临时墩、临时扣索、临时索塔、临时锚固等；主缆架设时的猫道、临时紧缆及支撑装置；体系转换时的索鞍顶推反力装置；空间缆索线形转换时需要的临时缆间横撑、临时吊索等。

3 基本规定

3.2 本标准所要求的监控成果，其内容、格式及深度均应符合现行行业标准《公路桥梁施工监控技术规程》（JTG/T 3650-01）中相关章节的规定。

4 控制计算

4.3 成桥状态确定与符合性计算

4.3.1 自锚式悬索桥与地锚式悬索桥的根本区别在于，其主缆水平力由主梁直接承受，形成自平衡体系。这一特点决定了塔、梁、缆在荷载下的变形是相互耦合、相互制约的。因此，成桥状态分析不仅是为求取一个理想的线形，更是为了找到一个主梁弯矩、索塔受力、主缆线形均处于合理状态的静态平衡点。将此平衡点确立为施工控制的最终目标，是整个监控工作的基础和前提。

4.3.2 本条规定了确定成桥目标状态的具体工作内容。第1款“找形分析”是悬索桥计算的基础，旨在确定与成桥目标相匹配的主缆线形。第2款“调索分析”是自锚式悬索桥的重点，通过优化吊索力来改善主梁和索塔的受力，是实现“合理成桥状态”的关键步骤。第3、4款则是该目标状态下的具体输出成果，其中第4款得出的无应力尺寸是桥梁建造的根本控制量，它不随施工过程和环境变化而改变，是保证最终实现目标状态的最可靠依据。

4.3.3 本条规定了如何从“终点”反推“起点”。施工监控需要明确的起点，即主缆开始架设时的状态。通过本条分析，将成桥目标精确地转换为施工初始阶段的控制参数，确保施工起点与设计终点在力学和几何上的连贯性与可实现性。

自锚式悬索桥为塔、梁、缆协同受力体系，几何非线性效应显著。若简单采用传统的倒拆分析方法，因结构大变位、主缆垂度及主梁轴向压缩及收缩徐变等因素影响，从成桥状态逆向推算得到的空缆状态与实际正装施工过程无法闭合，将导致成桥状态存在不可忽略的残余误差（如吊索倾斜度超限、索鞍未能归位等）。

为实现精确的施工控制，本条规定的迭代分析方法，是指以设计成桥状态为起点，通过“有限元正装分析 + 分段悬链线数值计算”的循环迭代，不断修正空缆线形及无应力长度，使按此空缆状态经正装施工后得到的成桥状态最大限度地逼近设计目标。该方法可有效消除传统倒拆分析的残余误差，确保施工起算数据准确可靠。具体迭代流程可参照相关研究成果执行。

4.5 体系转换专项计算

4.5.2 体系转换是自锚式悬索桥施工中结构体系变化最复杂、控制难度最高的阶段。通过专项计算与多方案比选，预先制定周密的实施方案，是确保过程安全与控制精度的关键。

4.5.5 空间缆索自锚式悬索桥在从空缆状态向成桥状态转换的过程中，主缆不仅发生竖向位移，同时会产生显著的横向线形变化，导致吊索的横向倾角持续改变。然而，预埋在索塔和主梁中的索导管其横向倾角在安装后即为定值。二者在横向上的相对运动，使得吊索护套与索导管管壁在施工过程中发生横向触碰的风险显著增高。因此，必须通过计算分析预测此过程，并在必要时设置临时装置（如缆间横撑）来主动干预和控制主缆的横向线形，以消除碰撞风险。对这些临时装置本身也必须进行严格的验算，确保其在使用过程中的安全可靠。

6 数据分析与反馈控制

6.1 一般规定

6.1.1 自锚式悬索桥施工过程结构体系变化复杂，且具有显著的几何非线性特征，仅依靠事前计算不足以应对施工中的不确定性。因此，必须建立一个动态的、闭环的控制系统，将现场监测、数据分析与施工调整紧密结合。

6.1.2 本条规定了针对自锚式悬索桥特点的控制要点。区别于地锚式体系，自锚式悬索桥的主梁承受巨大压力，其变形与主缆紧密耦合，且体系转换过程是荷载从临时支撑向缆吊体系转移的关键阶段，内力与线形变化复杂，是监控的重点。

6.1.3 “双控原则”是桥梁施工监控的通用原则。对于自锚式悬索桥，在体系转换过程中，结构内力（如主梁应力、吊索索力）直接关系到施工安全，是首要控制目标；而成桥线形是最终验收标准，故需在保障安全的前提下兼顾几何形态。

6.2 施工监测数据分析

6.2.2 自锚式悬索桥作为高次超静定结构，其监测数据是多种因素共同作用的结果。直接使用原始数据可能导致误判，因此必须进行精细化的数据分析，分离出由结构内力与几何变化引起的真实响应。

6.2.4 与传统地锚式悬索桥不同，自锚式悬索桥的主梁直接承受主缆传递的巨大轴力，这使得主梁的压缩变形、混凝土的收缩徐变以及施工过程中的几何、接触非线性行为变得尤为显著。这些效应相互耦合，共同影响成桥线形与内力。对混凝土索塔及主梁，应分析收缩、徐变效应导致的主梁线形下挠与主梁轴向压缩，并评估由此引发的主缆与吊索索力重分布及对主缆锚固区局部受力的影响。此外，在体系转换过程中，应分析主梁从临时支撑转换至缆吊体系承力时，由主梁巨大轴向压力与弯矩耦合作用引发的 $P-\Delta$ 效应，及其对主梁稳定性和应力的影响。

6.3 误差识别与状态评估

6.3.1 误差识别是反馈控制的起点。对于自锚式悬索桥，由于其塔、梁、缆在施工过程中相互耦合，任一构件的误差都可能通过自平衡体系传递并放大，因此系统性的误差识别至关重要。

6.3.2 本规范根据已有桥梁施工监控参数误差取值情况、桥梁结构特点并结合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)、《公路桥梁施工监控技术规程》(JTG/T 3650-01)综合提出施工监测值与施工跟踪计算值之间的误差限值。

本条所列为施工监控中的常见内容，在具体实施中，可以根据实际控制需要，研究确定其他参数误差限值的合理取值。

对于自锚式悬索桥，应特别评估主梁轴向压缩变形对边跨吊索索力、主缆线形及锚固区局部受力的影响。当实测压缩量与理论值偏差超过 $\pm 20\%$ 时，应分析原因并判断其对成桥状态的影响。

6.3.3 对于自锚式悬索桥施工监控，不仅要误差进行“数值识别”，也要对误差进行“影响评估”，尤其需评估误差在体系转换过程中的放大效应，例如主梁线形误差对后续吊索张拉力和主缆线形的连锁影响。

6.4 误差反馈与模型修正

6.4.1 对于自锚式悬索桥，其自平衡体系对参数误差更为敏感，误差的累积会直接影响成桥内力分配与线形，因此必须建立及时、有效的动态修正机制。

6.4.5 体系转换是自锚式悬索桥受力体系变化最剧烈的阶段，是检验和修正计算模型准确性的关键时期。将此过程中的内力重分布数据作为修正依据，对于确保体系转换安全和控制最终成桥状态至关重要。

6.5 反馈控制实施

6.5.1 反馈控制是施工监控的最终执行环节，其决策必须基于前期系统的数据分析和模型修正成果，确保指令的科学性与可靠性。对于自锚式悬索桥，调整指令应重点关注吊索张拉顺序与力值的优化、索鞍顶推时机与量的控制。

6.5.2 自锚式悬索桥是高次超静定结构，几何形态与内力状态相互耦合，存在显著的“力形效应”。任何调整措施都会同时引起内力重分布和几何形态变化。实施控制时，应基于计算分析，制定能够同时兼顾几何与内力目标的综合调整方案，避免单目标调整导致其他控制指标超限。