

福建省工程建设地方标准

DB

工程建设地方标准编号 :DBJ/T 13-454-2024

住房和城乡建设部备案号 : J 1 7 6 1 1 - 2 0 2 4

悬索桥施工监控技术标准

Technical Standard for Construction Monitoring and
Control of Suspension Bridges

2024-06-12 发布

2024-10-01 实施

福建省住房和城乡建设厅 发布

福建省工程建设地方标准

悬索桥施工监控技术标准

Technical Standard for Construction Monitoring and
Control of Suspension Bridges

工程建设地方标准编号 : DBJ/T 13-454-2024
住房和城乡建设部备案号 : J 1 7 6 1 1 - 2 0 2 4

主编单位: 福建省建筑科学研究院有限责任公司
福建省龙岩市城市建设投资发展有限公司
福建省建筑工程质量检测中心有限公司
批准部门: 福建省住房和城乡建设厅
实施日期: 2 0 2 4 年 1 0 月 1 日

2024 年 福州

前 言

根据福建省住房和城乡建设厅《关于公布全省住房和城乡建设行业 2022 年第五批科学技术计划项目的通知》（闽建科〔2022〕33 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准的主要技术内容是：1.总则；2.术语；3.基本规定；4.施工控制计算；5.施工监测；6.数据分析与反馈控制；7.监控成果；附录等。

本标准由福建省住房和城乡建设厅负责管理，由福建省建筑科学研究院有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送福建省住房和城乡建设厅科技与设计处（地址：福州市北大路 242 号，邮编：350001）和福建省建筑科学研究院有限责任公司（地址：闽侯县上街镇高新大道 58-1 号福建建科院建筑设计生产基地，邮编：350108），以供今后修订时参考。

本标准主编单位：福建省建筑科学研究院有限责任公司
福建省龙岩市城市建设投资发展有限公司
福建省建筑工程质量检测中心有限公司

本标准参编单位：交通运输部公路科学研究院
广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司

中交第二航务工程局有限公司

福建创盛建设有限公司

福州左海控股集团有限公司

福建省建研工程检测有限公司

厦门市交通建设质量安全中心

福州市建设工程质量监督站

福州左海建设投资有限责任公司

本标准主要起草人：张 玮 徐旺兴 朱 飞 黄学漾

张立业 王 涛 黄 灿 陈学农

朱付辉 陈宗燕 王 滨 王兵见

代百华 魏初材 林东龙 陈思远

林迪南 张星诚 程 亮 钟雅琪

本标准主要审查人：吴庆雄 林上顺 陈亚亮 陈伏立

黄文金 陈 鹏 刘腾飞

目 次

1	总 则	1
2	术 语	2
3	基本规定	5
4	施工控制计算	6
4.1	一般规定	6
4.2	施工控制计算内容	6
4.3	施工控制计算要点	7
4.4	施工控制计算模型	7
4.5	施工状态控制计算	8
5	施工监测	9
5.1	一般规定	9
5.2	施工监测内容	9
5.3	施工监测截面及测点	10
5.4	施工监测频度	12
5.5	施工监测仪器及元件	13
6	数据分析与反馈控制	15
6.1	一般规定	15
6.2	施工监测数据分析	15
6.3	误差及其影响分析	16
6.4	反馈控制	18
7	监控成果	19
附录 A	悬索桥施工监控常用记录表格	20
附录 B	悬索桥施工监测截面及测点布置	26

本标准用词说明	28
引用标准名录	29
附：条文说明	30

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Requirements	5
4	Construction Control Calculation	6
	4.1 General Requirements	6
	4.2 Contents of Construction Control Calculation	6
	4.3 Main points of Construction Control Calculation	7
	4.4 Models of Construction Control Calculation	7
	4.5 Construction Control Calculation for Geometrical and internal force states	8
5	Construction Monitoring	9
	5.1 General Requirements	9
	5.2 Contents of Construction Monitoring	9
	5.3 Sections and Points of Construction Monitoring	10
	5.4 Construction Monitoring Frequency	12
	5.5 Construction Monitoring Equipment and Devices	13
6	Data Analysis and Feedback Control	15
	6.1 General Requirements	15
	6.2 Analysis of Construction Monitoring Data	15
	6.3 Analysis of Errors and Influences	16
	6.4 Feedback Control	18
7	Results of Monitoring and Control	19

Appendix A	Common Record Sheets for Construction Monitoring and Control of Suspension Bridges	20
Appendix B	Monitoring Sections and Monitoring Points	
	Arrangement of Suspension Bridges	26
	Explanation of Wording in This Standard	28
	List of Quoted Standards	29
	Adittion: Explanation of Provisions	30

1 总 则

1.0.1 为规范悬索桥施工监控工作，提高施工监控水平，保障工程质量和安全，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于福建省内各类城市悬索桥的新建及改扩建项目的施工监控，其他带有悬索结构的协作体系桥梁可参照使用。

1.0.3 悬索桥施工监控应根据结构特点和施工方法，对桥梁结构的内力应力状态和几何状态进行监测及控制。

1.0.4 悬索桥施工监控除应符合本标准外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 悬索桥 suspension bridge

通过索塔悬挂缆索作为上部结构主要承重构件的桥梁。其中，缆索锚固于两岸锚碇的为地锚式悬索桥，缆索锚固于加劲梁梁端的为自锚式悬索桥。

2.0.2 自锚式悬索桥 self-anchored suspension bridge

特指不设重力式地锚而以加劲梁梁端锚固主缆，承受主缆端部的水平与竖向分力的悬索桥体系，主要由主缆、索塔、索鞍、锚跨（非锚碇）、吊索、加劲梁等部分组成。

2.0.3 施工监控 construction monitoring and control

为控制桥梁结构施工过程的结构状态，实现成桥结构内力应力状态与几何状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。

2.0.4 悬索桥改扩建 reconstruction and extension of suspension bridge

在既有悬索桥结构的基础上，为提高技术等级、通行能力或改善技术指标而进行的建设工程。

2.0.5 施工控制计算 construction calculation for control

为获得桥梁施工过程结构内力应力状态和几何状态，对桥梁结构进行的设计符合性计算、施工模拟计算、施工跟踪计算和参数敏感性分析。

2.0.6 施工反馈控制 construction feedback control

通过识别与分析已成结构实际状态与其预测状态间的误差，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

进行的调整。

2.0.7 设计符合性计算 calculation for design conformity

在桥梁施工前，根据设计文件，对主体结构（索塔、锚碇或锚跨、主缆、吊索（杆）、加劲梁等）施工过程及成桥状态进行的强度、刚度及稳定性计算分析，将计算结果与设计文件进行比较分析。

2.0.8 施工模拟计算 calculation for construction simulation

为获得桥梁施工过程结构内力应力状态和几何状态，对桥梁结构进行的事前模拟计算和过程仿真跟踪计算。

2.0.9 施工跟踪计算 calculation for construction tracking

在桥梁施工过程中，根据施工监测数据，对桥梁结构进行的实时模拟和修正计算。

2.0.10 参数敏感性分析 parameter sensitivity analysis

在合理的范围内改变有限元模型输入参数，并观察模型响应的相对变化的过程，其目的是明确模型在模拟中对输入参数的不确定性的敏感性。

2.0.11 几何状态 geometry state

桥梁结构或构件的高程、位置、线形、构形等。

2.0.12 内力状态 internal force state

桥梁结构或构件的轴力、弯矩、剪力等内力状态。

2.0.13 应力状态 stress state

桥梁结构或构件的轴力、弯矩、剪力等对应的应力状态。

2.0.14 体系转换 structural system transformation

由于桥梁合龙、后期张拉、铰接转固接、约束拆除或增加等原因，使桥梁结构的受力体系发生转换。

2.0.15 成桥状态 accomplishment state of bridge

二期恒载施加完成后的桥梁结构几何状态、内力状态和应力状态。

2.0.16 成桥目标线形 accomplishment target alignment of bridge

二期恒载施加完成后预期的结构线形（如桥面、加劲梁或主梁、主缆、索塔线形等）。

2.0.17 传感器 transducer / sensor

能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

2.0.18 分辨力 resolution

指传感器能检出被测信号的最小变化量，是有量纲的数。

3 基本规定

- 3.0.1** 悬索桥施工监控实施前,应依据审查合格的设计文件和审批通过的专项施工方案编制监控方案。
- 3.0.2** 悬索桥施工监控应包括控制计算、施工监测、数据分析与反馈控制。
- 3.0.3** 悬索桥施工监控宜按资料收集、监控方案编制、设计符合性计算、施工模拟计算、现场施工监测、施工跟踪计算、数据分析、反馈控制及提交监控成果的流程进行。
- 3.0.4** 悬索桥的施工监控工作,应保证施工过程中结构的稳定与安全,确保成桥状态符合设计要求。
- 3.0.5** 对于悬索桥改扩建项目的施工监控工作,应不影响既有结构主要受力构件和附属构件的受力状态。
- 3.0.6** 悬索桥施工监控成果应作为桥梁交(竣)工资料,纳入桥梁的交(竣)工及养护技术档案。
- 3.0.7** 悬索桥施工监控可采用智能传感器、北斗卫星定位、建筑信息模型(BIM)和人工智能等新技术,且宜与运营期监测统筹考虑。

4 施工控制计算

4.1 一般规定

4.1.1 悬索桥施工控制计算应包括设计符合性计算、施工模拟计算、施工跟踪计算和参数敏感性分析。

4.1.2 施工控制计算应采用可靠的理论和方法。

4.2 施工控制计算内容

4.2.1 设计符合性计算应依据设计文件及选取的合理计算参数，考虑施工过程状态，进行主体结构强度、刚度和稳定性计算。计算结果应与设计值进行对比，确认计算模型及参数的正确性。

4.2.2 设计符合性计算宜在设计文件完成后、施工开始前完成，主要内容应包含：

- 1 各材料参数的确定，各构件的理论重量、几何尺寸复核；
- 2 主缆、加劲梁、吊索、支座及索塔的成桥内力和应力计算；
- 3 主缆、加劲梁及索塔成桥线形计算。

4.2.3 施工模拟计算应依据确定的施工方案和相应的施工荷载，进行施工过程几何状态、内力状态和应力状态计算。

4.2.4 施工跟踪计算应根据现场实际的施工方案和相应施工荷载，按照预测、施工、监测、分析、参数修正、反馈控制进行施工过程几何状态、内力状态和应力状态跟踪计算。

4.2.5 参数敏感性分析宜在施工模拟计算和施工跟踪计算的模型上进行，分析参数变化对计算结果的影响程度。

4.3 施工控制计算要点

4.3.1 悬索桥施工控制计算应考虑施工过程中边界条件、结构参数、作用荷载等的变化，混凝土构件应计入混凝土收缩和徐变、预应力钢筋松弛等的影响。

4.3.2 悬索桥施工控制计算应考虑几何非线性的影响。

4.3.3 悬索桥施工控制计算应先确定成桥状态，再反推主缆的空缆状态。

4.3.4 对于跨径较小且主缆采用成品索的悬索桥，宜采用无应力法控制主缆下料长度。

4.3.5 悬索桥改扩建工程的施工监控工作，应根据原桥设计文件、交（竣）工验收资料、维修改造记录等历史资料，必要时宜补充检测，并按实际结构状态建模计算。

4.4 施工控制计算模型

4.4.1 对空间效应明显的悬索桥应建立空间模型进行计算。

4.4.2 对加劲梁、钢混结合段、锚固区等受力复杂的部位或构件，应进行局部受力和验算。

4.4.3 施工控制计算模型应包括节点信息、单元信息、材料信息、截面信息、荷载信息、时间信息、边界条件等，并考虑构件制作误差的影响。

4.4.4 在施工控制计算模型中，宜采用下列单元：

- 1 主缆宜采用索单元；吊索（杆）宜采用索（杆）单元；
- 2 桥墩、立柱、加劲梁（或主梁）宜采用梁单元；曲线构件宜用折线代替，每段折线为一个梁单元；变截面构件宜采用多段等截面或变截面组；
- 3 承台等大体积构件宜采用刚臂单元；
- 4 基础可采用弹簧单元，其刚度系数宜用 m 法计算得到。

对以砂砾土、块石土、岩石等为地基的基础，基础单元可直接在地面（局部冲刷线）以下 3~5 倍桩径处固结。

4.5 施工状态控制计算

4.5.1 悬索桥几何状态控制计算结果应包括下列内容：

- 1 主缆与吊索索股的无应力长度；
- 2 主缆基准索股架设时的线形及索鞍位置、主缆一般索股架设时的线形；
- 3 加劲梁架设过程中各阶段加劲梁线形、加劲梁节段端面空间状态、索鞍位置、索夹位置；
- 4 成桥时的主缆线形、塔顶变位、索鞍位置、索夹位置、加劲梁线形；
- 5 收缩、徐变影响结束时的加劲梁线形、塔顶变位。

4.5.2 悬索桥内力状态和应力状态的施工控制计算结果应包括下列内容：

- 1 施工过程中和成桥时主缆和吊索的索力；
- 2 施工过程中和成桥时索塔、加劲梁控制截面应力；
- 3 自锚式悬索桥施工过程中和成桥时的支座反力、加劲梁内力等。

4.5.3 当加劲梁或主塔等构件采用组合结构时，控制计算应根据组合结构的特殊要求确定其几何状态、内力状态和应力状态。

5 施工监测

5.1 一般规定

- 5.1.1** 悬索桥施工监测的参数应包括几何状态参数、内力和应力状态参数及其他参数。
- 5.1.2** 对温度变化敏感的参数,宜在温度场稳定的时间段进行监测,不具备监测条件时应考虑温度对监测结果的影响。
- 5.1.3** 施工监测所用测试设备及传感器的精度应满足悬索桥施工监控的需要。
- 5.1.4** 施工监测参数应有原始记录,且应同步记录环境温度、湿度、风速、天气等情况,表格可采用本标准附录 A 的格式。

5.2 施工监测内容

- 5.2.1** 几何状态参数监测应包括以下内容:
- 1 索塔、锚碇、基础的沉降和位移;
 - 2 索塔线形、索塔压缩量、桥墩偏位;
 - 3 主缆线形、索鞍偏位、索夹位置;
 - 4 加劲梁或主梁线形;
 - 5 成桥桥面线形。
- 5.2.2** 内力和应力状态参数监测应包括以下内容:
- 1 索塔、桥墩控制截面的应力;
 - 2 主缆、吊索(杆)的内力;
 - 3 加劲梁或主梁控制截面的应力。

5.2.3 其他参数监测宜包括以下内容：

- 1 温度、湿度；
- 2 风速、风向和风压；
- 3 水位、流速。

5.2.4 自锚式悬索桥在体系转换过程中，几何状态参数监测还应包括加劲梁的压缩量和支点变形量等。

5.2.5 悬索桥改扩建施工监测尚宜补充以下参数：

- 1 既有结构性裂缝的宽度；
- 2 桥面交通运行状况；
- 3 支架、兜吊系统等重要临时设施的内力和应力状态。

5.3 施工监测截面及测点

5.3.1 应结合监测需要及现场实际情况布置监测基准点，建立施工监测控制网。

5.3.2 几何状态参数监测截面及测点布置应符合下列规定：

1 锚碇、基础的沉降和位移监测截面应设置在锚碇、基础的顶面，每个截面的测点数不宜少于 2 个；

2 索塔线形监测截面应设置在索塔顶面、中部及塔梁交接处附近，每个截面的测点数不应少于 1 个；桥墩偏位监测截面应设置在桥墩顶面，每个截面的测点数不应少于 1 个；

3 主缆监测截面应设置在索鞍、主缆最大垂度处、主跨四分点、边跨二分点，每个截面的测点数不应少于 1 个；

4 加劲梁线形监测截面应设置在支点及吊索下锚固点附近，每个截面的测点数不应少于 2 个；

5 成桥桥面线形监测截面应设置在支点、跨中、四分点、八分点，每个截面的测点数不应少于 3 个，分别位于加劲梁中轴线和两侧防撞护栏内侧边缘。

5.3.3 结构应力和内力状态参数监测截面及测点布置应符合下

列规定：

1 桥墩、索塔应力监测截面应选择桥墩、索塔底面附近的应力控制截面，每个截面的测点数不应少于 4 个；

2 吊索索力监测应根据测试方法确定测试位置，每根吊索的测点数不应少于 1 个；

3 加劲梁应力监测点应布置在墩顶附近、主跨跨中、主跨四分点以及其他应力控制截面的上、下缘，每个截面测点数不应少于 4 个；当加劲梁采用混合梁时，应在钢混结合段附近布置应力监测测点，每个截面测点数不应少于 4 个。

5.3.4 温度监测截面及测点布置应符合下列规定：

1 钢箱加劲梁温度监测截面宜设置在标准梁段，监测截面不应少于 1 个，测点宜布置在钢箱梁外表面的上、下位置，每个截面的测点数不应少于 6 个；

2 混凝土加劲梁温度监测截面宜设置在典型断面，测点宜布置在箱梁的周边，每个截面的测点数不应少于 6 个；

3 主缆温度监测截面宜布置在主跨跨中、主跨四分点和索塔附近，每个截面的测点数不应少于 2 个；

4 索塔温度监测截面宜布置在标准段，每个索塔监测截面不应少于 1 个，每个截面的测点数不应少于 4 个；

5 温度测点宜与应变测点的温度补偿测点协同布设。

5.3.5 风速风向监测宜在主跨跨中和塔顶各布设一个测点；当需要监测风压时，可在主跨跨中和四分点断面布设风压监测测点。

5.3.6 自锚式悬索桥体系转换过程中的监测截面及测点布置尚应符合下列规定：

1 支点变形监测点应设置在墩台、横梁及临时支架上方的支座上，每个支座测点数不应少于 1 个；

2 加劲梁压缩量监测截面应设置在梁端伸缩缝截面，每个截面的测点数不应少于 2 个。

- 5.3.7** 施工监测测点应采取可靠的防护措施进行保护。
- 5.3.8** 竣工后应在桥面、主缆和索塔设置永久性变位观测点。
- 5.3.9** 地锚式悬索桥、自锚式悬索桥监测截面及测点布置可参考图 B.0.1、图 B.0.2。

5.4 施工监测频度

5.4.1 几何状态参数施工监测频度应不低于下列要求：

1 桥墩、索塔位移在裸墩（塔）、合龙前、桥面铺装完成后应各进行 1 次测试；在每一节段加劲梁施工完成后，均应进行 1 次测试；

2 主缆线形和索鞍空间位置在基准索股架设完成后、一般索股架设完成后、加劲梁安装前、加劲梁安装后、桥面铺装完成后应各进行 1 次测试；

3 加劲梁或主梁线形在加劲梁安装后、桥面铺装完成后应各进行 1 次测试。

5.4.2 内力和应力状态参数施工监测频度应不低于下列要求：

1 桥墩、索塔应力监测在裸墩（塔）、加劲梁施工关键环节、合龙前后及桥面铺装完成后各进行 1 次测试；

2 加劲梁应力监测在加劲梁施工完成后、桥面铺装完成后各进行 1 次测试；钢桁加劲梁应力监测应根据计算结果增加测试次数；

3 吊索（杆）索力监测在加劲梁节段安装完成后对当前索（杆）进行 1 次测试，成桥后对全部索（杆）进行 1 次测试。

5.4.3 自锚式悬索桥在体系转换过程中尚应满足以下监测频度要求：

1 在每批次吊索张拉完成后，对索塔偏位、主缆线形、索鞍偏位和支点位移各进行 1 次测试；

2 在每级张拉完成后对当前吊索及相邻 2~3 对吊索索力进

行 1 次测试；调索前后、成桥后对全部索各进行 1 次测试。

5.4.4 悬索桥改扩建施工尚应满足以下监测频度要求：

1 施工前应对现状桥梁桥面线形、主缆线形等进行 1 次测试，条件允许时宜对吊索长度、桥墩及索塔偏位等进行 1 次测试，作为改扩建施工监控的基础数据；

2 既有吊杆分级卸载、新吊杆分级张拉完成后，宜分别对当前吊索及相邻 2~3 对吊索索力进行一次测试；对受力最不利或损伤严重吊索索力进行施工全过程监测。

5.4.5 加劲梁或主梁合龙期间的环境温度监测，应在合龙前每 2h 进行 1 次测试，测试总次数不宜少于 12 次。

5.4.6 当遇到下列情况时，应提高施工监测频率。

1 加劲梁、索塔等关键截面实测静应变超过 0.8 倍材料强度设计值或者超过 1.0 倍设计值；

2 锚跨索股力、吊索实测索力超过 1.0 倍理论计算值；

3 关键截面实测位移超过 0.8 倍理论计算值；

4 极端气温、风荷载、桥面交通荷载等超过 1.0 倍设计值。

5.4.7 停工期间应对悬索桥的几何状态、内力状态和应力状态进行跟踪监测，监测频次不宜低于 1 次/月；复工后应对全桥所有测点进行一次测量。

5.5 施工监测仪器及元件

5.5.1 悬索桥施工监控应积极推广使用可靠的新技术、新设备，所用监测仪器及元件宜经过检定或校准合格，仪器选型及精度应符合本标准第 5.5.2~5.5.10 条的规定。

5.5.2 线形监测仪器的分辨力应能满足施工监测需要，可采用水准仪、全站仪、垂准仪等。

5.5.3 应力监测传感器的分辨力应不大于 $1\mu\epsilon$ ，可采用振弦式传感器、光纤式传感器、电阻应变式传感器等。

- 5.5.4** 温度监测传感器的分辨力应不大于 0.1°C ，可采用铂式热电阻温度传感器、热电偶点温计等。
- 5.5.5** 索力监测传感器的分辨力应能满足施工监测需要，可采用动测仪、压力传感器、磁通量传感器等。
- 5.5.6** 锚碇、基础、桥塔的沉降和位移监测仪器的分辨力应能满足施工监测需要，可采用全站仪、水准仪或 GNSS 静态方法等。
- 5.5.7** 风速风向监测仪器的分辨力应能满足施工监测需要，桥面风速监测可采用三向超声风速仪，塔顶风速监测可采用机械式风速仪或两向超声风速仪等。
- 5.5.8** 索鞍偏位和自锚式悬索桥支点位移监测的最大允许误差不宜大于 0.5% ，可采用拉线式位移传感器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器、高清摄像机等。
- 5.5.9** 裂缝宽度监测宜采用人工监测、自动化监测或两者相结合的方式，监测传感器的分辨力应不大于 0.01mm ，可采用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器、光纤式裂缝传感器等。
- 5.5.10** 若施工监测仪器与运营期监测系统统筹考虑，仪器性能、布设位置及安装要求除应满足本标准要求外，尚应符合结构监测相关标准规定。

6 数据分析与反馈控制

6.1 一般规定

- 6.1.1** 悬索桥施工监控应遵循几何状态、内力和应力状态双控原则，且宜以几何状态控制为主。
- 6.1.2** 数据分析与反馈控制应包括下列内容：
- 1 识别当前桥梁结构几何状态和内力应力状态，判别是否处于预测状态；
 - 2 预测桥梁施工误差对后续施工过程结构几何状态和内力应力状态的影响；
 - 3 确定是否对施工过程预测数据、施工方案实施调整。
- 6.1.3** 数据分析与反馈控制应采用施工监测过程中的实际数据。
- 6.1.4** 悬索桥成桥状态的目标线形应采用实际参数模拟计算确定，并根据施工控制的结果进行调整。

6.2 施工监测数据分析

- 6.2.1** 施工监测数据分析应考虑可能影响数据准确性和可靠性的各类因素，并剔除其影响。
- 6.2.2** 荷载监测数据分析中应考虑下列因素：
- 1 材料密度及其变化；
 - 2 结构尺寸变化；
 - 3 临时荷载作用。
- 6.2.3** 混凝土结构应力监测数据分析中宜考虑下列因素：

- 1 大体积混凝土水化热；
 - 2 混凝土弹性模量变化；
 - 3 结构体系温差；
 - 4 混凝土收缩与徐变。
- 6.2.4** 钢结构应力监测数据分析中应考虑下列因素：
- 1 结构体系温差与构件截面温度梯度；
 - 2 结构不同部件之间的温差。
- 6.2.5** 索力监测数据分析中应考虑下列因素：
- 1 索的垂度；
 - 2 索的约束条件；
 - 3 结构体系温差。
- 6.2.6** 纵桥向及竖向位移监测数据分析中应考虑下列因素：
- 1 施工临时荷载引起的变形；
 - 2 结构体系温度；
 - 3 索塔、桥墩弹性压缩变形。
- 6.2.7** 横桥向位移监测数据分析中应考虑下列因素：
- 1 日照温差；
 - 2 不均匀横向变形；
 - 3 横向变形时变规律。
- 6.2.8** 对于悬索桥改扩建项目，还应考虑既有结构的材料性能参数、几何状态参数和内力应力状态参数随运营时间的变化。

6.3 误差及其影响分析

- 6.3.1** 桥梁施工过程中的几何状态和内力应力状态可通过施工跟踪计算值与经过数据分析后的施工监测值之间的比较进行识别。
- 6.3.2** 桥梁施工过程中，施工监测值与施工跟踪计算值之间的误差限值宜符合表 6.3.2 的规定。

表 6.3.2 悬索桥结构几何状态和内力应力状态误差限值

项目			误差限值	
几何 状态	索塔	索塔倾斜度	塔高的 1/3000, 且不大于 30mm	
	主缆	主缆基准索架设后线形 (高程)	索股主跨跨中	跨径的 $\pm 1/20000$
			边跨跨中	主跨跨中的 2 倍
		上下游基准索股高差		10mm
	主缆形成过程中基准索和其他观测索股线形 (高程)		-5mm, +10mm	
	加劲梁	混凝土加劲梁各节段完成时的高程		$\pm 20\text{mm}$
		混凝土加劲梁合龙口相对高差		20mm
		钢加劲梁各节段完成时的高程		$\pm 15\text{mm}$
钢加劲梁合龙口相对高差		10mm		
内力 应力 状态	混凝土结构应力	计算值不大于 10MPa	$\pm 2.0\text{MPa}$	
		计算值大于 10MPa	$\pm 20\%$, 且不超过 $\pm 4.0\text{MPa}$	
	钢结构应力	计算值不大于 100MPa	$\pm 10.0\text{MPa}$	
		计算值大于 100MPa	$\pm 10\%$, 且不超过 $\pm 20.0\text{MPa}$	
	索力	主缆锚固端索股	$\pm 5\%$	
		吊索 (杆)	$\pm 10\%$	

6.3.3 桥梁成桥状态的结构几何线形误差应满足现行《城市桥梁工程施工与质量验收规范》(CJJ 2)的要求。

6.3.4 悬索桥施工过程中,当施工监测数据与施工跟踪计算结果之间的误差超过本标准第 6.3.2 条的限值时,应分析误差对结构几何状态和内力应力状态的影响,根据分析结果采取本标准第 6.4 节的反馈控制措施进行调整。

6.4 反馈控制

6.4.1 悬索桥施工过程的几何状态可采取下列措施进行调控：

1 索塔和桥墩施工阶段可调整索塔和桥墩线形、塔顶和墩顶高程；

2 主缆架设前可调整主缆和吊索无应力下料长度，架设阶段可调整基准索线形、索鞍预偏量；

3 加劲梁或主梁架设阶段可调整施工过程高程、成桥桥面线形。

6.4.2 悬索桥施工过程的内力应力状态可采取下列措施进行调控：

1 加劲梁或主梁架设阶段可调整吊索索力；

2 当因施工方案导致结构受力不利时，可采取调整方案、局部加固或增加辅助措施等。

6.4.3 当误差超出本标准限值且无法按本节第 6.4.1、6.4.2 条调整时，应进行专项研究。

6.4.4 自锚式悬索桥在体系转换过程中可调整吊索的张拉顺序、张拉批次和张拉力。

6.4.5 悬索桥改扩建项目应根据具体施工内容确定调控措施。

7 监控成果

7.0.1 悬索桥施工监控成果应包括施工监控方案、施工监控阶段报告、施工监控总报告以及施工过程中提交的相关监测数据与反馈控制文件。

7.0.2 悬索桥施工监控方案宜包括工程概况、监控依据与目标、各阶段工作内容、施工控制计算、监测实施、控制方法、人员及设备安排等内容。

7.0.3 施工监控阶段报告宜包括工程概况、监控依据、监控内容、几何状态监控、内力应力状态监控、本阶段工作总结及下阶段工作建议、附图与附表等内容。

7.0.4 施工监控总报告宜包括工程概况、监控依据与目标、监控内容、控制计算、几何状态监控、内力应力状态监控、结论及建议等内容。

附录 A 悬索桥施工监控常用记录表格

表 A.0.1 主缆、加劲梁线形测量记录表

监控单位：_____ 编号：_____

工程名称				工程部位			
测试仪器				测试时间			
天气/ 风速风向				气温/湿度			
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
测点布置 示意图							

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表 A.0.2 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/ 风速风向				气温/湿度			
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
测点布置 示意图							

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表 A.0.3 应力（应变）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/ 风速风向				气温/湿度			
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 ($\mu\epsilon$)
测点布置 示意图							

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表 A.0.4 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/ 风速风向		气温/湿度						
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.0.5 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/ 风速风向			气温/湿度		
施工工况					
测试断面	测点编号	温度 (°C)	测试断面	测点编号	温度 (°C)
测点布置 示意图					

日期： 年 月 日 校核： 测量：

表 A.0.6 工作联系函

编号：

项目名称		工程编号	
主送			
抄送			
主题			
发函事由 及内容			
	监控单位（盖章）： 日期： 年 月 日		
意见 栏	施工单位（盖章）： 日期： 年 月 日		
	监理单位（盖章）： 日期： 年 月 日		
	设计单位（盖章）： 日期： 年 月 日		
	建设单位（盖章）： 日期： 年 月 日		

（本联系函一式五份，签字后由建设单位、设计单位、监理单位、施工单位、监控单位各存档一份）

附录 B 悬索桥施工监测截面及测点布置

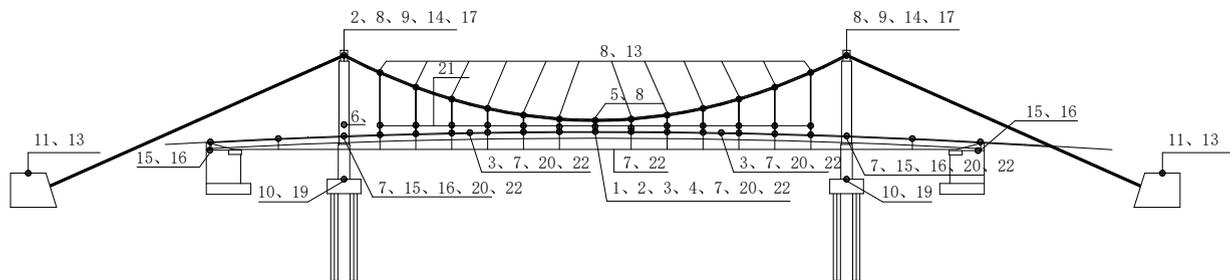


图 B.0.1 地锚式悬索桥监测截面及测点布置示意图

标引序号说明:

- | | | | | |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 1-环境温湿度 | 6-索塔温度 | 11-锚碇位移 | 16-支座竖向变形 | 21-吊索索力 |
| 2-风速风向 | 7-主梁线形 | 12-索夹空间位置 | 17-索塔压缩量 | 22-成桥桥面线形 |
| 3-主梁风压 | 8-主缆线形 | 13-锚碇空间位置 | 18-主梁压缩量 | |
| 4-加劲梁温度 | 9-索塔偏位 | 14-索鞍偏位 | 19-索塔应力 | |
| 5-主缆温度 | 10-基础沉降 | 15-支座偏位 | 20-加劲梁应力 | |

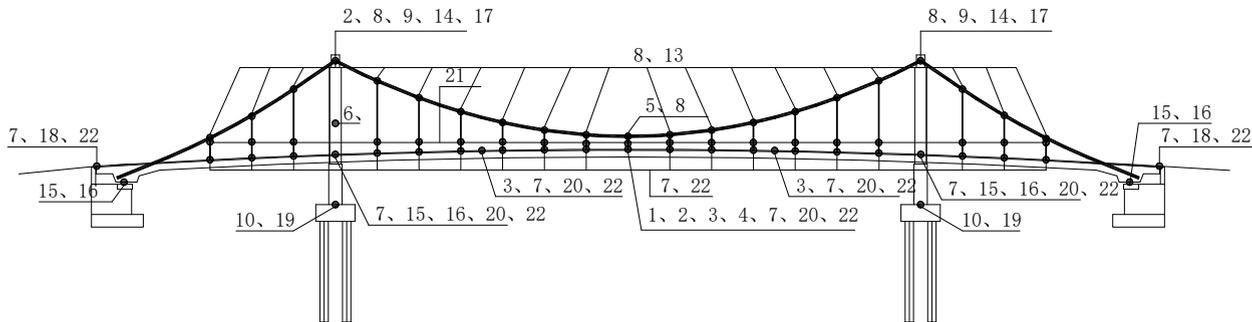


图 B.0.2 自锚式悬索桥监测截面及测点布置示意图

标引序号说明:

- | | | | | |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 1-环境温湿度 | 6-索塔温度 | 11-锚碇位移 | 16-支座竖向变形 | 21-吊索索力 |
| 2-风速风向 | 7-主梁线形 | 12-索夹空间位置 | 17-索塔压缩量 | 22-成桥桥面线形 |
| 3-主梁风压 | 8-主缆线形 | 13-锚碇空间位置 | 18-主梁压缩量 | |
| 4-加劲梁温度 | 9-索塔偏位 | 14-索鞍偏位 | 19-索塔应力 | |
| 5-主缆温度 | 10-基础沉降 | 15-支座偏位 | 20-加劲梁应力 | |

本标准用词说明

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先这样做的:

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执行时的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《工程测量规范》 GB 50026
- 2 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982
- 3 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ 2
- 4 《城市桥梁设计规范》 CJJ 11
- 5 《福建省城市桥梁健康监测系统设计标准》 DBJ/T13-240

福建省工程建设地方标准

悬索桥施工监控技术标准

DBJ/T13-454-2024

条文说明

编制说明

《悬索桥施工监控技术标准》DBJ/T13-454-2024，经福建省住房和城乡建设厅 2024 年 6 月 12 日以闽建科〔2024〕21 号文批准发布，并经住房和城乡建设部备案，备案号为 J17611-2024。

本标准制订过程中，编制组进行了广泛和深入的调查研究，总结了我国悬索桥施工监控相关的实践经验，同时参考了国外先进技术法规、技术标准，通过广泛征求意见、反复修改后制订的。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《悬索桥施工监控技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	33
2	术 语	34
3	基本规定	35
4	施工控制计算	37
4.1	一般规定	37
4.2	施工控制计算内容	38
4.3	施工控制计算要点	38
4.4	施工控制计算模型	39
4.5	施工状态控制计算	40
5	施工监测	41
5.1	一般规定	41
5.2	施工监测内容	41
5.3	施工监测截面及测点	42
5.4	施工监测频度	43
5.5	施工监测仪器及元件	44
6	数据分析与反馈控制	45
6.1	一般规定	45
6.2	施工监测数据分析	46
6.3	误差及其影响分析	47
6.4	反馈控制	48
7	监控成果	51

1 总 则

1.0.2 悬索桥结构复杂、跨径普遍较大，且施工过程复杂、结构受力体系不断变化、技术难度较大，因此需要进行施工监控工作。

在既有悬索桥改扩建项目中，涉及到更换吊杆、提高设计荷载等级、增加结构自重或采用新技术、新工艺存在较大不确定性的，也需要进行施工监控。

1.0.4 随着“智慧工地”、“智能建造”的发展和应用，数字化（如建筑信息模型（BIM））、人工智能、北斗卫星定位、5G 技等新技术以及智能化监测设备等新设备在桥梁施工监控中得到逐步应用。

统筹考虑施工监控与结构监测，如测点（包括传感器、采集仪器）共用、数据传承、系统融合等，也随着桥梁结构监测系统的快速推广应用而受到重视，不仅可以节约综合成本，还可以为结构监测提供更多原始数据。

1.0.5 在进行悬索桥施工监控工作时，除遵守本规范外，国家、行业与福建省内现行的有关标准，包括：设计规范、施工规范、检测标准、验收标准等，均应予遵守。

2 术 语

本节所列术语一般为其在本标准中出现时，其含义需要加以界定、说明或解释的重要词汇。尽管在界定和解释术语时考虑了术语的习惯和通用性，但理论上这些术语仅在本标准中有效，列出的目的主要是防止出现错误理解。当本标准列出的术语在本标准以外使用时，应注意其可能含有与本标准不同的含义。

3 基本规定

3.0.3 施工监控工作应按照既定的工作流程严格执行,从而保证桥梁结构自始至终处于受控状态。施工监控工作流程一般可归纳为图 1。

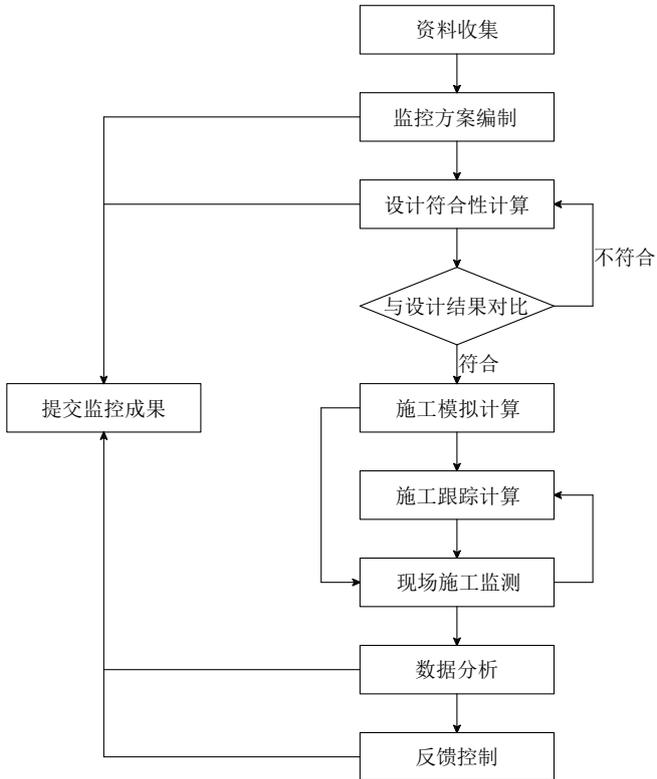


图 1 施工监控工作流程图

资料收集是桥梁施工监控的前期工作，资料的完整性与准确性关系到后续具体工作的质量。资料一般包括设计文件、相关规范、施工组织设计及相关的试验研究成果等。

监控成果是桥梁施工监控工作成果的具体体现，包括施工监控方案、施工监控计算报告、施工监控阶段报告、施工监控总报告及施工过程中提交的相关监测数据与反馈控制文件等。

3.0.6 悬索桥施工监控的技术资料是记录和反映桥梁施工过程的重要资料，从施工监控资料中可以了解到悬索桥的具体施工过程、监测部位变形与内力的变化过程、实际成桥状态及误差控制成果等重要信息，是后续进行交工和竣工验收的必要资料，也是后续桥梁管理和养护所依据的重要历史档案。

4 施工控制计算

4.1 一般规定

4.1.1 设计符合性计算的工作流程一般归纳为图 2。

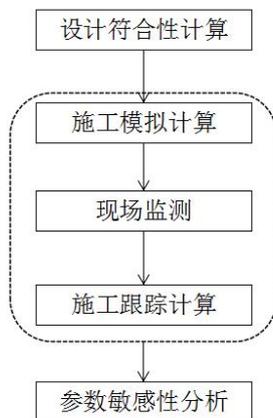


图 2 设计符合性计算工作流程图

设计符合性计算、施工模拟计算和施工跟踪计算的施工加载程序表的细化程度和参数取值方法可以有所不同。

结构离散图包括施工全过程的所有节点和所有单元、其节点设置和单元设置能涵盖桥梁施工的所有阶段。

施工加载程序表是反映桥梁分阶段结构形成过程的包括结构构件或单元的增减变化、结构构件截面变化、边界条件与耦合条件的变化、荷载变化及其相应时间的信息表，它的绘制与结构离散图的编写、修改是一个交互的过程。

参数敏感性分析是桥梁结构对自身的材料参数、结构参数以及外在的荷载参数和环境参数等的敏感性计算分析。通过参数敏感性分析得到桥梁结构对不同参数的敏感性程度，对施工过程中敏感性高的参数进行严格控制。

4.1.2 可靠的理论和方法是指经过实践、试验或其他可靠途径检验、验证的理论与方法，常用的计算理论和方法有线弹性理论、非线性理论、等效方法、简化方法等。

4.2 施工控制计算内容

4.2.3 施工模拟计算的目的是得到各施工阶段及成桥状态的理论结构几何状态和内力应力状态等控制计算目标数据。

4.2.4 施工跟踪计算的目的之一是从保障受力安全和实现成桥目标状态的角度，验证施工方案的合理性；目的之二是确定后续的合理施工状态，并得到后续各施工阶段及成桥状态的结构几何状态和内力应力状态等控制计算目标数据。

4.2.5 参数敏感性分析的目的是掌握控制计算模型中计算参数对计算结果的敏感性，明确施工监控关注的重要参数；确定重要参数的最大容许误差，评价其对线形和内力的影响。常用的敏感性参数有材料弹性模量及容重、主缆及吊索内力、加劲梁自重及线型、温度、加载龄期、吊索张拉次序等影响桥梁最终成桥状态的关键参数。

4.3 施工控制计算要点

4.3.2 对悬索桥，由于主缆和加劲梁在施工过程中变形较大，需要考虑几何非线性的影响。已有研究资料表明，几何非线性对内力、位移影响因跨径、结构具体形式、施工阶段、应力水平和截面位置而异。因此，几何非线性的影响不能忽略。

4.3.3 悬索桥主缆空缆状态确定是根据分段悬链线、分段直线或

抛物线等理论，考虑主缆的力学和位移边界条件，通过迭代计算，确定主缆各索段的几何要素和力学要素，以使理论上成桥主缆线形与设计相吻合的过程。

4.3.4 对于跨径较小且主缆采用成品索的悬索桥，主缆往往呈现索单元与梁单元的综合力学特性，并非纯粹的索单元特性，容易导致实际空缆状态与理论计算结果差别较大。

4.3.5 运营多年的悬索桥，由于车辆的超载，吊索的腐蚀、松弛，混凝土的收缩、徐变，运营期的加固改造等因素的影响，结构的内力、线形、材料特性、截面刚度、边界条件等参数会偏离原设计状态。为提高控制计算的分析的精度，需要采用实际结构状态而非原设计状态进行建模。若基础数据不足或历史资料久远，还可以采用检测手段搜集结构现状数据，作为建模计算分析的参考。

4.3.6 既有改扩建工程，应参考原设计文件的要求、历次维修改造的情况、改扩建前的结构状态等，重新拟定改扩建后的合理成桥状态，从而为改扩建工程的控制计算提供依据。

4.4 施工控制计算模型

4.4.1 施工监控的目的是保障桥梁施工过程安全，使成桥后的线形与内力符合设计和规范要求。因此，施工控制计算主要针对桥梁整体结构的变形和内力。

对于空间效应明显的悬索桥，采用平面模型不能准确反映结构的变形与内力特性，需建立空间有限元模型，才能得到准确的计算结果。

4.4.2 对于加劲梁、钢混结合段、主缆或吊索锚固区等构造复杂的部位或构件，简化的空间有限元模型精度已不能满足要求，还应建立精细化的局部模型进行详细计算分析。

特别是悬索桥更换吊索时，可能涉及锚固区的改造或优化，吊索类型和吊索索力也可能有所调整，故须对锚固区进行局部受

力分析和验算，以确保桥梁整体安全。

4.4.3 节点信息包括节点坐标、节点耦合信息。节点耦合信息主要有刚接节点、铰接节点、链杆节点、双连杆连接节点等。

单元信息一般包括单元类型、单元截面号、单元节点号。

材料信息主要有材料弹性模量、重度、线膨胀系数、混凝土的收缩与徐变参数、钢筋松弛参数等。

时间信息有单元存活开始时间和单元存活终止时间、节点耦合成立的开始时间和终止时间（刻）、混凝土终凝时间、计算时间、索单元钝化激活时间、吊索调索时间等。同一模型中的各种时间均是指距同一时刻的时间长短，通常用天表示。

4.4.4 m法是计算土体弹性抗力系数的一种方法，该方法假定土体的弹性抗力系数随着深度线性变化，具体见《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363-2019）附录L。

刚臂单元一般采用截面刚度足够大（1000倍正常单元的截面刚度）的单元表征。

已有研究表明，以砂砾土、块石土、岩石等为地基的桩基在横向荷载作用下，桩基弯矩第一个零点在地面（局部冲刷线）以下2~3倍桩径处，桩基在3~5倍桩径处固结可以简化计算模型，计算精度也能满足要求。

4.5 施工状态控制计算

4.5.1 收缩、徐变影响结束时间一般指成桥后10年，具体见《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）附录C中第C.2.3条的条文说明。

5 施工监测

5.1 一般规定

5.1.2 加劲梁、主缆线形、吊索索力、索塔偏位等对温度场变化比较敏感，一般选择温度场比较稳定的时段（如晚上 10 点至次日凌晨日出前）进行。如果无法满足测量条件，则需考虑采取合适的方法从施工监测结果中剔除温度的影响。

5.2 施工监测内容

5.2.1 本条所列的几何状态参数只是悬索桥施工监测的基本要求。在具体实施中，可以根据实际监控需要，增加其他需要的几何状态监测参数。

悬索桥监测的重点是主缆线形（尤其是基准索股的线形），因为主缆线形直接影响到加劲梁线形和吊索长度。索塔偏位监测数据对确保索塔内力不超标、确定索鞍顶推时机等都具有重要价值。

5.2.2 本条所列的内力应力状态参数只是桥梁施工监测的基本要求。在具体实施中，可以根据实际监控需要，增加其他需要的内力应力状态监测参数。

5.2.3 悬索桥属于大跨度柔性结构，当其他参数对施工过程的结构几何状态或内力应力状态有明显影响时，还应对其他参数进行监测。

几何状态和内力应力状态对温度的变化十分敏感，需要对温

度进行监测。当悬索桥位于江、海、山谷等可能出现大风的桥址时，风荷载对桥梁的施工过程影响较大，还需要对风速、风向或风压进行监测。汛期水位上涨、流速过大可能影响到悬索桥的施工安全，必要时应对水位和流速进行监测。

5.2.4 自锚式悬索桥在体系转换过程中，加劲梁的自重由临时支撑承担逐步转移到由吊索和主缆承担，同时需要平衡主缆传来的轴向压力，因此加劲梁的压缩量和支点竖向变形量也应进行监测。

5.2.5 对于悬索桥改扩建进行施工监测时，已经存在裂缝的区域需要进行裂缝宽度监测，以便及时掌握施工过程中是否有新的裂缝产生，以及既有裂缝的宽度变化情况。

桥梁改扩建大多存在中断交通困难的问题。采用不中断交通或部分中断交通施工，一方面增加了施工的复杂性和风向，另一方面需要对桥面交通状况进行监测，并充分考虑交通荷载对结构几何状态参数和内力应力状态参数的影响。

5.3 施工监测截面及测点

5.3.1 施工监测持续时间较长，建立稳定、可靠的监测控制网对保证后续的监测精度十分重要。监测控制网应符合现行国家标准《工程测量规范》（GB50026）的规定。

5.3.2 悬索桥索塔在施工过程中往往会由不对称受力而产生沿不对称受力方向的偏位，需要对其偏位情况进行监测，以便采取顶推索鞍措施给予调整。

自锚式悬索桥加劲梁采用顶推施工的，加劲梁的线形测点监测截面需要根据计算确定。

5.3.3 桥梁的墩、塔底附近截面经常会出现变截面的情况，应力监测通常选择应力控制截面而不是内力控制截面，以利于保证结构安全。

加劲梁应力监测截面布置，需要选择加劲梁施工过程中的应

力控制截面，梁桥一般为墩顶附近截面、中跨跨中截面、中跨四分点截面等。采用顶推施工的加劲梁，加劲梁的应力监测截面需要根据计算确定。

若悬索桥加劲梁采用桁架形式、截面形式复杂、或者截面宽度较大，应适当增加应力监测截面的测点数量，以便满足控制加劲梁截面应力的要求。

5.3.4 钢箱加劲梁温度监测的目的是监测钢箱梁的日照温差及季节性温差，以便分析加劲梁线形及应力受各种温差的影响。

混凝土加劲梁的周边是指混凝土箱梁的顶板、底板及腹板。根据温度梯度测试的需要，有针对性地布置温度测点。

索塔温度监测的目的是监测两侧索塔的日照温差，以便分析索塔高度差对主缆线形、加劲梁线形、吊索索力等参数的影响。

5.3.7 桥梁施工过程中存在大量交叉作业，若不进行有效防护施工监测测点很容易被无意破坏，从而影响监测数据的延续性。

5.4 施工监测频度

5.4.2 加劲梁施工的关键环节，一般是指加劲梁分别完成 1/4、1/2、3/4 的施工进度时，即单个桥墩、单个索塔支承的加劲梁施工完成的长度（节段数）比例。例如单个桥墩独立支承的加劲梁长度为 100m，则加劲梁施工完成 1/4、1/2、3/4 分别为该桥墩支承的加劲梁施工完成 25m、50m、75m。

由于钢桁加劲梁悬索桥的桥面板、调平层、沥青铺装层等的质量通常比钢桁加劲梁本身要大，应力变化较大除了发生在加劲梁施工完成后和桥面铺装完成后，还发生在桥面板施工、调平层施工等阶段，因此在该施工阶段需要根据控制计算结果增加钢桁加劲梁的应力监测次数。

5.4.3 自锚式悬索桥体系转换过程中结构处于高次超静定状态，对当前吊索的张拉会改变相邻吊索的受力情况。为保证施工过程

安全，除需对当前吊索索力进行测试外，还需对相邻 2~3 对吊索索力进行测试。更远处的吊索索力受影响程度通常很小，可视具体情况确定是否进行测试。

5.4.5 合龙前，对环境温度进行间隔为 2h 的连续测试，同时对合龙口梁端高程进行测试，找出合龙口梁端高程与环境温度的对应关系，并根据合龙前的天气预报情况，确定最佳合龙温度和合龙时间。

5.4.6 施工过程中可能因环境、荷载的变化或误差积累导致实测参数接近甚至超过设计值或最不利情况下的理论计算值，此时监控单位应适当提高监测频率，密切跟踪结构状态的变化和发展情况，以确保及时采取有效的反馈控制措施。

5.5 施工监测仪器及元件

5.5.1 本规范仅列出悬索桥施工监控部分常用监测仪器的选型及精度要求，随着传感器技术的发展，新型监测设备将不断出现。在实践过程中，应鼓励选用技术更新、精度更好的监测设备，但监测设备在使用前宜按有关规定进行检定或校准，确认精度和量程可以满足施工监控的需要，从而保障监测数据的准确性。

6 数据分析与反馈控制

6.1 一般规定

6.1.1 悬索桥结构具有大位移、非线性的特点，施工过程中应兼顾关键位移和控制截面内力，才能使施工完成的结构最大限度地接近设计成桥状态。当几何状态和内力应力状态无法协调时，为保证主缆和桥面线形连续，一般以几何状态控制为主，内力应力状态控制为辅。

6.1.2 桥梁施工内力应力状态、几何状态等识别的主要目的是判断当前工况下，结构实际状态（如高程、线形、内力等）是否与通过施工跟踪计算得出的理论状态（即预测状态）相符，或结构实际状态与理论状态间存在误差情况。

桥梁施工是否处于预测状态（误差限值范围）的判断主要通过将现场监测数据与依据施工模拟计算事先制定的控制目标状态数据的比较分析得出。

当桥梁施工过程偏离控制目标状态时，需对其误差的影响程度进行分析，重点是对下一阶段施工目标状态的影响预测及对桥梁施工控制最终目标的影响分析，从而为是否对桥梁施工过程预测数据或施工方案进行调控提供决策依据。

对施工过程预测数据或施工方案是否实施调整或变更，需根据桥梁施工误差影响预测分析结果进行判断。对与施工方案关系不大的误差影响，可以通过调整施工过程测控数据实现调控。例如，对当前结构状态进行调整（如悬索桥主缆基准索线形调整、斜拉桥斜拉索索力调整、系杆拱桥系杆力调整等），或对下一阶段

施工参数进行调整（如预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥节段浇筑立模高程调整等）；对与施工方案直接相关的误差，则需变更既有施工方案。

6.1.3 本条所指的监测数据只是数据分析与反馈控制的基本要求。在具体实施中，可以根据实际控制需要，增加相应的监测数据，如混凝土收缩和徐变、温度、风速、桥面交通状况等。

6.1.4 通常，设计文件中会给出悬索桥成桥状态目标线形（如桥面、加劲梁、主缆、索塔线形等）。由于设计时的相关参数在施工过程中可能发生变化，因此无论设计文件中是否给出成桥状态目标线形要求，施工监控均需根据设计文件和施工组织设计，针对实际参数情况进行施工模拟计算，从而确定成桥状态目标线形。

施工模拟计算得到的成桥状态目标线形经设计认可后，即成为成桥目标线形，供施工监控和交工验收使用。

由于在悬索桥施工过程中，施工模拟计算采用的参数还可能出现变化，因此，还需根据施工控制结果，对成桥状态目标线形进行调整，调整后的结果仍然需要经过设计的确认。

6.2 施工监测数据分析

6.2.1 桥梁施工过程中监测数据的准确性受测试环境、测试精度等多种因素的影响，为了提高监测数据的准确性和可靠性，需对影响监测数据的各种因素及其影响进行分析，并剔除其影响（例如在某一大气温度下测得的相关数据需将其换算到标准温度下的数据等）。

一方面，结构体系温差以及构件截面温度梯度难以避免；另一方面，其对缆索承重结构桥梁几何状态、内力影响又很大。对一天来讲，可以通过限制监测时间，如晚上 10 点至次日凌晨日出前温度稳定时段进行高程、位移（变形）测量，规避温度变化的影响；但对一年来讲，难以做到在相同温度下进行测量。所以，

需要将非设计温度（控制基准温度）下实测到的数据换算成设计温度下的数据，为反馈控制使用。

对结构不同部件间温差的影响，主要体现在桥梁主体结构与附属结构之间存在温度差。在施工监控中需要特别注意结构不同部件间温差的影响。

施工跟踪计算是监测数据真实性识别的基础，所以，要求计算模型符合桥梁施工过程实际，能够反映结构的真实内力应力状态与几何状态，分析采用的基准参数（如温度）正确、统一。对难以采用理论手段分析的影响因素，如混凝土水化热对应力（应变）测试的不利影响，可以通过现场试验方法进行分析。

6.2.7 本规范第 6.2.2~6.2.6 条中所列为需要考虑的基本因素。在具体的施工监控中，可能还需要考虑第 6.2.7 条横桥向水平位移以及其他需要计入的影响因素。

6.3 误差及其影响分析

6.3.1 结构几何状态和内力应力状态识别是为了判断当前工况下的结构状态是否与通过施工跟踪计算得出的理论状态（即预测状态）相符、或结构实际状态与理论状态间存在的误差情况，从而为后续的误差及影响分析、反馈控制提供可靠依据。

本条中所列参数误差控制值是施工过程中的施工监测值与施工跟踪计算值之间的误差控制值，与成桥时的相应误差并非完全一致。

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《城市桥梁工程施工与质量验收规范》（CJJ2），并参考《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。

6.3.3 按有关文件和标准的要求，桥梁成桥状态的结构几何线形和索力需满足现行《城市桥梁工程施工与质量验收规范》（CJJ 2）的要求，才能通过交（竣）工验收。除索力外，结构其他内力误差在现行《城市桥梁工程施工与质量验收规范》（CJJ 2）中未进行规定，故本条未专门提出成桥阶段要求，只要满足本规范第 6.3.2 条的规定即可。

6.4 反馈控制

6.4.2 桥梁施工过程中结构内力超过限值原因很多，例如：①临时荷载超限或位置不正确；②桥梁结构施工过程分析不全面深入，导致局部高应力未纳入控制，施工工序（工艺）不合理；③桥梁结构设计本身与所采取的施工方法不完全匹配，缺少相应的辅助措施；④施工监控技术与施工管理差，导致结构控制性受力部位失控，或未及时监测到结构受力，或监测到结构不利内力应力状态但未得到及时处置等。

为实现桥梁施工过程中结构安全控制目标，需要采取切实有效的措施实施反馈控制。

6.4.3 对施工误差进行调整或针对可能危及结构安全的状态进行预警是施工监控中安全控制的基本要求。监控单位需要准确把握，及时提出针对所有参建单位的调整、采取安全保障措施或暂停施工的建议。

桥梁常见的反馈控制方法有开环控制法、闭环控制法、适应控制法等，其流程图分别如图 3~图 5 所示。

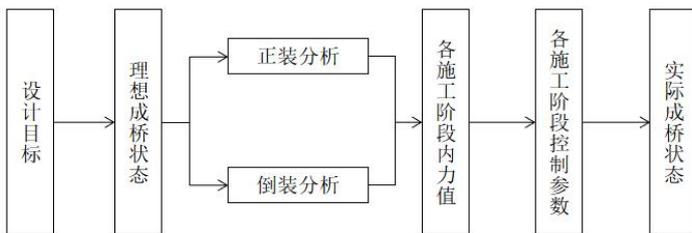


图3 开环控制值法流程图

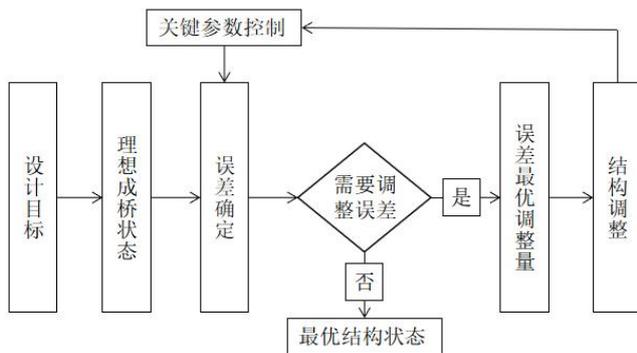


图4 闭环控制值法流程图

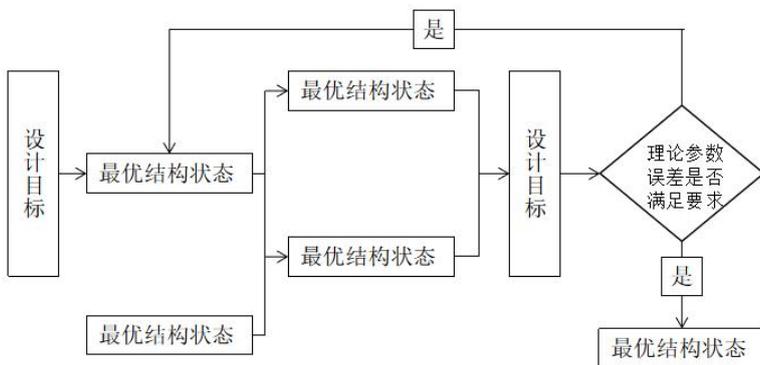


图5 适应控制值法流程图

误差及其影响较小时，监控单位根据误差情况采取调整措施。当误差及其影响严重或危及安全时，采取常规的手段可能难以达到调整或保证质量与安全的目的，因此，需要监控单位及时预警，提出暂停施工建议，并在必要时采取安全保障措施，以免发生安全事故；同时，及时进行专题论证，提出解决方案，如调整施工工艺、改变施工方法等。

7 监控成果

7.0.2 施工监控方案主要是指在施工监控实施以前对桥梁施工监控的工作思路和监控方法等进行总计计划和安排。

7.0.3 施工监控阶段报告是在施工监控过程中分阶段完成,对一定阶段(周、月、季度等,通常为月)内的施工监控工作进行的总结和分析。内容包括对结构的线形、应力(应变)、索力等参数进行计算、监测、分析、反馈控制、异常情况分析处理等。

7.0.4 施工监控总报告是在监控工作完成后,对整个施工监控过程的总结和分析。施工监控报告作为后续桥梁运营、管理和养护的重要资料,报告内容力求完整、正确、清楚,内容主要包括对结构的线形、应力(应变)、索力等参数进行计算、监测、分析、反馈控制等。