

ICS 号
中国标准文献分类号

团体标准

T/CCMS XXX-XXXX

代替 T/CCMS XXX-XXXX

大型结构整体安装同步施工现场监测规程

Regulations for On-Site Monitoring of
Synchronous Construction of Large Structural
Assembly

xxxx-xx-xx 发布

xxxx-xx-xx 实施

中国工程机械学会 发布

目 次

前 言 II

大型结构整体安装同步施工现场监测规程 1

1 总则 1

2 术语 1

3 基本规定 2

4 控制计算 2

 4.1 一般规定 3

 4.2 控制计算内容 3

 4.3 控制计算要点 3

 4.4 控制计算模型 4

 4.5 几何状态计算（同步施工） 5

 4.6 内力状态计算 5

5 施工监测 6

 5.1 一般规定 6

 5.2 结构监测规范 6

 5.3 施工环境监测规范 8

 5.4 施工设备状态监测 8

 5.5 系统技术要求 8

6 数据分析与反馈控制 9

 6.1 一般规定 9

 6.2 监测数据分析 9

 6.3 误差及其影响分析 10

 6.4 反馈控制 11

7 监控成果 12

前 言

本文件按照GB/T1.1—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。

本文件由中国工程机械学会提出并归口。

本文件起草单位: XXXX。

本文件主要起草人: XXXX。

本标准首次发布。

大型结构整体安装同步施工现场监测规程

1 总则

- 1.0.1 为适应大型结构整体安装与同步施工过程中施工监测与安全控制的需 要，规范施工现场监测系统的配置与应用，提高同步施工过程的安全性、可靠性和可控性，保障工程质量与施工安全，制定本规程。
- 1.0.2 本规程适用于在大型结构整体提升、整体滑移、整体顶推等同步施工过程中，针对施工结构、支承结构、施工环境及施工设备运行状态开展实时监测与信息管理的监测系统。
- 1.0.3 同步施工监测应根据工程结构特征、施工方法及施工阶段，对结构内力、变形、环境作用及施工设备状态进行监测与分析，并为施工过程的调整与控制提供技术支持。
- 1.0.4 同步施工监测宜结合工程实际情况，合理采用成熟可靠的新技术、新设备和新方法，并综合考虑施工监控与结构监测的协同实施，提高监测系统的整体效能。
- 1.0.5 同步施工监测除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1

同步施工 synchronous construction

采用多套动力与执行装置，在统一控制条件下，对大型结构或构件实施同步提升、同步滑移或同步顶推的施工过程。

2.0.2

实时监测系统 real-time monitoring system

由传感器、数据采集装置、通信网络及数据处理单元组成，用于在同步施工过程中连续获取、传输、处理和展示施工状态信息的系统。

2.0.3

施工结构 construction structure

在同步施工过程中被直接提升、移动或调整位置与姿态的主体结构或构件。

2.0.4

支承系统 support system

在同步施工过程中用于承载、约束或辅助施工结构的临时或永久性结构体系，包括支撑结构和基础。

2.0.5

几何状态 geometric state

施工结构或支承结构在同步施工过程中所处的空间状态，包括位置、高程、姿态、线形及变形等特征。

2.0.6

力学状态 mechanical state

施工结构或支承结构在同步施工过程中所表现出的受力响应状态，包括应力、应变、内力及相关力学参数。

2.0.7

施工环境状态 construction environment state

可能对同步施工安全性和稳定性产生影响的外部环境条件，包括风、温度、湿度、腐蚀介质、浪涌、沙尘等因素。

2.0.8

设备运行状态 equipment running state

同步施工过程中施工设备在工作状态下的运行特征，包括动力输出、执行响应、工作参数及其稳定性。

2.0.9

监测数据 monitoring data

由实时监测系统采集并用于反映同步施工过程中结构状态、环境状态和设备运行状态的各类数据。

2.0.10

状态评估 state assessment

基于监测数据，对同步施工过程中结构、环境或设备状态进行分析、判断和综合评价的过程。

3 基本规定

3.0.1 同步施工监测工作实施前，应依据经批准的施工组织设计、施工方案及相关技术文件，结合工程结构特征和施工工艺，编制施工监测实施方案。

3.0.2 同步施工监测应围绕施工结构、支承结构、施工环境及施工设备运行状态开展，主要包括监测方案制定、状态监测、数据分析与结果反馈等工作内容。

3.0.3 同步施工监测工作宜按照资料准备、监测方案实施、施工过程监测、数据分析与状态评估、监测结果反馈与应用的流程进行。

3.0.4 同步施工监测过程中获取的监测数据及分析成果，应作为施工过程技术资料进行管理，并纳入工程技术档案。

4 控制计算

4.1 一般规定

4.1.1 同步施工控制计算应服务于施工监测与过程控制需要，围绕施工结构和支承结构在各施工阶段的受力状态与几何状态变化开展，并为施工监测、施工参数调整和施工决策提供依据。

4.1.2 同步施工控制计算内容应包括施工阶段模拟分析、施工过程跟踪分析以及不同步施工敏感性分析。

4.1.3 同步施工控制计算应结合施工阶段划分，对施工结构及支承结构在加载、调整、移动及卸载等过程中可能出现的力学响应和几何变化进行分析。

4.1.4 同步施工控制计算所采用的计算模型、参数选取及分析精度，应与施工组织方式、施工工艺复杂程度和风险等级相适应。

4.1.5 同步施工控制计算宜与现场监测数据相结合，对计算结果进行校核和修正，并作为施工过程反馈控制的重要依据。

4.1.6 同步施工控制计算过程中应考虑施工环境条件、结构参数变化及施工设备运行状态对计算结果的影响。

4.2 控制计算内容

4.2.1 施工状态基准计算

同步施工监测中的控制计算应首先建立施工结构及支承结构在不同施工阶段下的状态基准，用于描述结构在无异常情况下的力学状态和几何状态特征。

4.2.2 施工过程状态预测计算

控制计算应结合施工工序安排和施工动作特征，对同步施工过程中结构状态的变化趋势进行预测，用于识别可能出现的风险状态和异常演化方向。

4.2.3 监测数据驱动的状态修正计算

在同步施工过程中，控制计算应基于实时监测数据，对既有状态基准或预测结果进行修正，用于反映结构、环境和设备运行状态的实际变化。

4.2.4 施工控制参数关联分析

控制计算宜分析施工参数、环境条件和设备运行状态与结构响应之间的关联关系，用于识别对同步施工安全性和施工精度具有显著影响的关键控制因素。

4.2.5 控制计算结果的应用要求

控制计算结果应作为同步施工监测与反馈控制的重要技术依据，用于支撑施工调整决策、监测预警判别及施工状态评估。

4.3 控制计算要点

4.3.1 施工结构及支承结构模型准确性

施工结构及支承结构一般采用空间杆系计算模型；对空间效应明显的施工结构，应建立空间实体模型进行计算。

4.3.2 同步施工结构荷载及施工工况全面性

同步施工计算时，结构荷载分为永久作用和可变作用。可变作用除风荷载外，还包括施工可变作用、温度荷载、雪荷载、基础沉降、安装过程中预紧不同步作用、提升不同步作用、提升过程中斜吊附加水平力作用等。同步施工工况一般需包括加载、施工过程、合龙与卸载的施工全过程，施工过程中还需分析不同步效应。

4.3.3 同步施工计算方法的准确性

模型中包含钢绞线时，须进行非线性分析；受力变形后，对受力性能有较大影响的结构体系，如提升塔架，在进行计算时需考虑P- Δ 效应；对薄壁和细长结构，需进行屈曲分析；对联系较弱的空间结构，需计算其承载稳定性。

4.3.4 结构、环境与设备状态的协同考虑

同步施工控制计算应综合考虑施工结构状态、施工环境状态及施工设备运行状态对结构响应的影响，避免单一结构假定导致计算结果失真。

4.3.5 监测数据对计算结果的校核作用

同步施工控制计算结果应结合现场监测数据进行校核，通过对计算结果与监测结果的对比分析，识别计算偏差及潜在风险。

4.3.6 关键控制参数的识别与约束

同步施工控制计算应识别对施工安全性和施工精度具有重要影响的关键参数，并明确其合理变化范围，为监测指标选取和预警阈值设置提供依据。

4.3.7 控制计算结果的可解释性要求

控制计算结果应具有清晰的物理意义和工程解释性，能够与监测结果和施工实际状态进行对照，用于支撑施工决策和现场控制。

4.4 控制计算模型

4.4.1 控制计算模型的基本组成

控制计算模型应包含反映施工对象和施工过程特征的必要信息，包括但不限于结构组成信息、材料特性信息、施工工序信息、荷载与作用信息、时间信息以及约束与边界条件。

4.4.2 在杆系模型中，宜采用下列单元：

- 1) 提升索、柔性系杆、缆风索、后背索，宜采用索杆单元。
- 2) 提升梁、下吊点托梁、滑移支承梁、滑道梁、主梁、主拱，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；变截面构件宜用多段等截面代替，每段为一个梁单元。
- 3) 原结构混凝土柱、承台等大体积构件宜采用刚臂单元。

4.4.3 时间相关信息的建模要求

控制计算模型应考虑施工过程中的时间因素，合理反映施工开始、施工持续及施工转换等时间特征，并支持与监测数据时间序列的对应分析。

4.4.4 模型简化与适用性的基本原则

控制计算模型在满足控制需求的前提下,可根据施工阶段和控制目标对模型进行合理简化,但应确保简化后的模型仍能反映关键受力特征和控制参数的变化规律。

4.4.5 模型结果在控制中的应用要求

控制计算模型的计算结果应能够为施工监测指标选取、预警阈值设置以及施工调整决策提供支持,并与现场监测结果进行对比分析。

4.5 几何状态计算(同步施工)

4.5.1 同步施工几何状态控制计算结果应包括下列内容:

- 1) 同步施工各施工单元的制造或安装初始几何构形;
- 2) 同步施工过程中各主要施工阶段的几何状态变化;
- 3) 同步施工完成状态下整体结构及关键施工单元的几何形态。

4.5.2 当工程采用分区同步施工方式时,几何状态控制计算结果应包括下列内容:

- 1) 同步施工各施工单元在分区施工条件下的制造或安装构形;
- 2) 同步施工完成状态下各分区之间的几何协调关系;
- 3) 各施工分区在施工过程各阶段的几何状态演化。

4.5.3 在多施工单元并行作业条件下,几何状态控制计算结果应包括下列内容:

- 1) 同步施工过程中关键施工单元的空间位置变化;
- 2) 各施工阶段关键节点的位移、转角等几何状态指标;
- 3) 安装界面及连接部位的空间匹配状态;
- 4) 预制或预装施工单元的几何精度控制要求。

。

4.5.4 当同步施工过程中涉及施工体系调整或阶段转换时,几何状态控制计算结果应包括下列内容:

- 1) 体系调整前后的整体几何状态;
- 2) 阶段转换过程中关键施工单元的几何变化;
- 3) 体系调整对后续同步施工几何控制的影响分析;
- 4) 相关施工单元的安装或调整基准几何状态。

4.5.5 组合施工方式几何状态计算

当工程采用多种施工方式组合实施同步施工时,几何状态控制计算可参照本章第 4.5.1~4.5.4 条的规定,并结合组合施工方式的特点确定相应的计算内容和控制重点。

4.6 内力状态计算

4.6.1 一般规定

同步施工内力状态计算应围绕施工过程中结构体系受力演化与施工安全控制的开展,用于分析施工阶段内力变化规律,并为施工调整与风险控制提供依据。

4.6.2 内力状态计算对象与范围

内力状态计算应针对同步施工过程中起控制作用的结构单元、连接部位及受力路径，重点分析关键施工阶段和关键工序下的内力响应。

施工阶段内力状态计算要求

内力状态计算应覆盖主要施工阶段，包括构件成形阶段、结构体系转换阶段以及合龙卸载阶段，并反映施工过程中内力的阶段性变化。

4.6.3 内力状态的更新与反馈计算

内力状态计算应结合施工进展和监测结果进行动态更新，通过对比分析计算结果与实测数据，修正计算参数并调整控制策略。

4.6.4 内力状态敏感性分析

内力状态计算宜开展参数敏感性分析，评估施工参数、材料参数及施工条件变化对内力结果的影响程度，识别对内力控制具有显著影响的关键因素。

4.6.5 多工序同步施工内力耦合分析

在多工序同步施工条件下，内力状态计算应考虑不同施工单元和施工工序之间的内力耦合效应，分析其对整体受力状态和施工安全的影响。

5 施工监测

5.1 一般规定

5.1.1 同步施工监测的参数应包括力学结构、施工环境和施工设备状态监测三类。

力学结构状态监测的参数应包括施工结构及支承结构的关键截面应力与应变、整体与局部变形（位移、线形、姿态），以及关键部位的温度。

5.1.2 力学结构状态监测应覆盖静置未受力、静置不离地、分级加载、离地、正式同步施工及卸载等全部代表性施工阶段，并应在各阶段获取结构稳定的监测数据。

5.1.3 施工环境状态监测的参数应包括风载荷、环境温度与湿度。在海上、荒漠等特殊环境下，尚应对盐雾腐蚀、沙尘、浪涌潮流等因素进行专项监测。

5.1.4 施工设备运行状态监测应覆盖泵站、油缸、计算机控制系统、传感器、钢绞线及无人巡视设备等关键设备，监测其工作参数、运行稳定性及可靠性。

5.1.5 对温度 and 环境影响敏感的参数，如结构线形、应力应变基准值等，应在温度场稳定或环境条件平稳的时段进行初始测量或关键读数采集。

5.1.6 监测数据应及时采集、处理与分析，并与控制计算值进行对比。当监测数据异常或超过预警阈值时，应立即预警并按规定程序启动响应措施。

5.2 结构监测规范

5.2.1 静置未受力状态监测

1) 施工结构监测：应在施工结构未受施工荷载的静置状态下，对其关键截面进行初始应变测量。

应通过至少 24 小时的连续或定时采集，同步记录环境温度，确定各测点的稳定初始值，作为后续所有监测数据的比较基准。

- 2) 支承结构监测：应在临时支承体系安装完成、承受施工荷载前，对其关键受力杆件或部位进行初始应变测量与记录，以检验其初始安装状态。

5.2.2 静置不离地状态监测

- 1) 施工结构监测：在同步提升钢绞线预紧过程中，应测量关键截面相对于初始状态的应变增量和几何变形的变化量，以确认荷载传递路径的正确性。
- 2) 支承结构监测：应同步测量支承结构关键部位的应变增量和基础沉降变化量，评估其开始承受部分荷载时的初始响应。

5.2.3 分级加载状态监测

- 1) 施工结构监测：应按预定比例分级加载，每级持荷至数据稳定后，记录各关键截面的应变值和整体变形的变化值，并与理论计算值对比分析，验证结构受力状态。
- 2) 支承结构监测：分级加载过程中，应同步监测支承结构关键部位的应变值、几何变形的变化量和基础沉降变化量，并与理论计算值对比分析，验证结构受力状态，特别关注不同支承点间的荷载分配差异，防止局部过载。

5.2.4 离地状态监测

- 1) 施工结构监测：在结构平稳离地并保持稳定后，应对其关键截面进行持续监测，获取荷载全部由同步系统承担时的最终稳定应力状态数据。
- 2) 支承结构监测：应同步测量支承结构在承受全部施工荷载时的稳定应变值和整体变形量，确认其工作状态处于设计安全范围内。
- 3) 地面基础沉降监测：应在结构离地稳定后，立即对所有沉降观测点进行初次测量，作为沉降监测的初始值。

5.2.5 正式同步施工状态监测

- 1) 应力应变监测：应对施工结构及支承系统的关键部位进行连续动态应力应变监测，并设置多级预警阈值，实时判断与预警。
- 2) 变形监测：应采用全站仪、GPS 或倾角仪等设备，对施工结构的整体线形、标高、关键点位移及支承结构的水平位移、垂直度进行实时或准实时监控。
- 3) 基础沉降监测：应使用精密水准仪等设备，对基础沉降的倾斜角度和相互间的一致性进行实时检测。
- 4) 温度监测：应同步监测结构与支承关键部位的温度，所获数据应用于对应变监测结果进行温度效应修正。
- 5) 合龙或就位偏差监测：利用独立测量方法实时复核各项升（牵引）点标高、平面位置及结构姿态，同步控制系统配合调整，严格控制合龙或就位偏差与累计偏差。

5.2.6 卸载状态监测

- 1) 施工结构监测：分级卸载过程中，应监测施工结构关键截面的应力释放情况，记录最终残余应力应变以评估结构状态。
- 2) 支承系统监测：分级卸载过程中，应同步监测支承结构的应力应变和整体变形的变化、基础沉降量的变化情况，分析变化的合理性。

5.2.7 焊接过程监测

在结构焊接前，应测量并记录焊接区域的应力应变基准值。焊接过程中需对邻近区域进行监测，控制焊接热应力。焊接完成后应进行最终测量，评估焊接影响并归档数据。

5.3 施工环境监测规范

5.3.1 应对施工区域的风速、风向进行实时监测，评估风载荷对施工结构、支承系统及施工设备安全的影响。

5.3.2 应对环境温度、湿度进行监测，评估温湿度对施工结构、支承系统及施工设备安全的影响。

5.3.3 在海上施工时，应对盐雾腐蚀程度进行监测；在荒漠施工时，应对沙尘影响进行监测；在海上施工涉及浮式平台或钢套箱时，应对浪、涌、潮、流进行监测。

5.3.4 环境监测宜采用布置风速仪、温度计、湿度计等传感器进行自动采集，并应建立与气象部门的预报信息获取机制，进行趋势性预警。

5.3.5 系统应根据环境监测数据，设置多级告警机制，针对不同程度的异常情况（如大风、极端温度等）设定不同级别的告警与响应措施。

5.4 施工设备状态监测

5.4.1 出厂与安装状态核查

- 1) 关键施工设备（包括泵站、油缸、计算机控制系统、传感器、钢绞线、无人巡视设备等）进场时，应核查其出厂合格证、型式试验报告、校准证书及技术文件。
- 2) 设备安装完成后，应检查其基础固定、连接密封、对中精度、电气接线规范性及安全装置的有效性。

5.4.2 调试与试运行监测

- 1) 单机调试：应进行单台设备上电、空载运行测试，检查基本功能、运行平稳性及有无泄漏。
- 2) 系统联调：应进行多设备联动、同步控制、冗余切换、闭环控制等系统级调试，检验协同工作精度与逻辑可靠性。
- 3) 试运行监测：在设备空载及分级加载调试过程中，应监测其工作压力、流量、油温、同步位移偏差、控制信号响应及传感器数据稳定性等关键参数。

5.4.3 运行监测与维护

- 1) 状态监测：施工全程应持续监测设备的核心工作参数与运行状态，包括泵站油温油位、油缸压力与同步误差、控制系统负载与网络状态、传感器信号连续性等。
- 2) 巡视检查：宜利用无人巡视设备对分布式设备集群进行自动化巡检，辅助进行外观检查、温度点检及状态查看。
- 3) 定期维护：应制定并执行设备定期维护规程，包括更换液压油与滤芯、清洁传感器与散热器、检查钢绞线疲劳与锈蚀、校准仪器仪表、更新导航地图与管理电池等。

5.5 系统技术要求

5.5.1 测点布置原则

- 1) 力学结构测点应布置在关键受力截面、变形敏感部位及理论计算的关注点，能反映整体状态与局部响应。
- 2) 环境监测传感器应布置在能代表施工区域整体环境状况的位置，避开局部遮挡或干扰。
- 3) 施工设备监测点应选择能反映设备核心性能与安全状态的关键参数采集点。

5.5.2 视觉与导航标识点布置

- 1) 视觉测量标定点：用于多摄像机协同测量系统的标定点，应具有高对比度、标准尺寸，在监控空间内均匀、稳固布置，并定期进行位置校准与验证。
- 2) 无人巡视导航点：用于无人设备导航的标识点，应具有显著的视觉或反射特征，根据巡检路径合理布置，并具备环境耐久性。

5.5.3 系统性能要求

- 1) 测量精度：位移（基础沉降量）、姿态（整体变形）、应力应变等监测应具备高精度，其传感器精度应满足施工控制的要求。
- 2) 实时性与可靠性：系统应具备低延迟的数据传输与处理能力，关键部件应有冗余设计，确保在复杂施工环境下稳定、可靠运行。
- 3) 环境适应性：监测设备应具备抗震、防尘、防水、抗电磁干扰等能力，适应施工现场环境。
- 4) 智能化功能：系统宜具备自动报警、多级预警、远程监控及数据追溯功能。
- 5) 可扩展性：系统宜采用模块化设计，便于根据施工阶段进展进行功能扩展与配置调整。

6 数据分析与反馈控制

6.1 一般规定

6.1.1 数据分析与反馈控制是保障同步施工安全、精度及实现控制目标的核心环节，其工作内容应包括下列内容：

- 1) 基于监测数据，识别施工结构、支承系统、施工环境及设备的当前状态，并判断其是否处于预测（理论计算）的安全与可控状态。
- 2) 分析施工过程中出现的各类误差（如不同步偏差、荷载分配不均、结构变形超限等）对当前及后续施工阶段结构安全性、稳定性及最终成形状态的影响。
- 3) 根据误差影响分析结果，决策是否需要后续施工控制参数、施工工序乃至施工方案进行调整，并制定具体的反馈控制措施。

6.1.2 数据分析与反馈控制应以实时监测数据、经复核的材料与结构参数、实际施工荷载及环境作用为依据，并应与施工控制计算模型紧密结合。

6.1.3 施工结构最终就位（或合龙）的目标几何状态应通过施工全过程模拟计算确定，并在施工过程中根据实际监测数据和参数识别结果进行动态调整和确认。

6.1.4 应建立分级预警与响应机制，根据数据分析结果，设定不同的预警等级（如观察、预警、报警），并明确各等级对应的数据复核、原因分析、决策响应和措施执行的流程与权限。

6.2 监测数据分析

6.2.1 应对采集的所有监测数据进行预处理和深入分析，以提高数据的准确性、可靠性和可用性，为状态识别和误差分析提供可靠输入。

6.2.2 力学结构监测数据分析中，应重点考虑并修正下列因素的影响：

- 1) 温度效应：结构体系整体温差、构件截面温度梯度以及不同部件（如钢支撑与混凝土结构）间的温差对应变、线形和索力（或钢绞线张力）监测数据的显著影响。应利用温度监测数据对应变进行修正，并将几何测量数据统一换算至基准温度下的数值。
- 2) 结构体系时变效应：对于混凝土施工结构，需考虑混凝土收缩、徐变对长期应力应变和变形监测数据的影响。
- 3) 焊接热影响：在焊接施工阶段，应对焊接热应力引起的局部应变变化进行分析和剥离，以评估结构自身荷载产生的应力。（一般用不到）
- 4) 步运动动态效应：在正式同步施工阶段，应考虑结构加速度、振动对动应力、动应变监测数据的可能影响。
- 5) 不同步运动效应：在正式同步施工阶段，应考虑提升不同步、滑移不同步或顶推不同步对提升载荷、顶推载荷、结构应变监测数据的影响。

6.2.3 施工环境监测数据分析中，应重点分析下列内容：

- 1) 风载荷的时程特性（平均风、脉动风）及其对结构风致响应、设备抗风稳定性的影响。
- 2) 温度、湿度变化趋势对液压系统效率、电气系统绝缘及结构温度场的影响。
- 3) 浪涌流数据的频谱特性，评估其对水上施工平台的动力荷载和运动响应。

6.2.4 施工设备状态监测数据分析中，应重点分析下列内容：

- 1) 各执行油缸（顶升点）的压力、位移同步误差及其随时间的变化趋势，判断荷载分配均匀性与控制系统稳定性。
- 2) 泵站组压力-流量特性、油温变化，评估液压系统工作效率与健康状态。
- 3) 传感器群数据的一致性、跳变和失效情况，评估监测系统的可靠性。
- 4) 钢绞线张力监测值的均匀性及异常波动。

6.2.5 应通过多源数据融合分析，相互校验。例如，将应力应变监测结果与变形监测结果进行对比，将设备油压数据与结构应力监测数据进行关联分析，以综合判断结构真实受力状态和系统工作状态。

6.3 误差及其影响分析

6.3.1 同步施工过程中的误差应通过对比经数据分析后的监测值与该阶段施工控制计算的理论预测值进行识别。主要误差类型应包括：

- 1) 几何状态误差：施工结构与支承结构的标高、轴线位置、倾斜度、线形与理论值的偏差。
- 2) 内力状态误差：施工结构与支承结构关键截面应力、关键索（杆）件内力与理论值的偏差。
- 3) 同步控制误差：各顶升/牵引点之间的位移不同步偏差、速度不同步偏差。
- 4) 荷载分配误差：各支承点反力或荷载分配比例与设计要求的偏差。

6.3.2 同步施工过程中，关键参数的监测值与理论计算值之间的允许误差限值，应根据工程结构特点、施工工艺精度要求及风险等级，在施工监测方案中明确规定。主要参数误差限值可参考下表。

表 1 同步施工关键参数误差限值参考

项目	子项	误差限值
几何状态	施工结构就位标高	$\pm L/5000$ ，且 $\leq 20\text{mm}$ （L 为跨径或特征长度）
	施工结构轴线偏位	$\pm 10\text{mm}$

	支承结构垂直度	$H/1000$, 且 $\leq 20\text{mm}$ (H 为支撑高度)
	顶升点同步位移偏差	$\pm 2\text{mm}$ (瞬间), $\pm 5\text{mm}$ (累计)
内力状态	钢结构应力	$\pm 15\%$ 或 $\pm 15\text{MPa}$, 取小值
	混凝土结构应力	$\pm 20\%$ 或 $\pm 2.5\text{MPa}$, 取小值
	关键临时索/杆内力	$\pm 10\%$
	支撑点反力分配差异	$\pm 15\%$ (相对于设计分配比例)
设备状态	油缸压力偏差 (同组)	$\pm 5\%$
	控制系统同步控制精度	满足几何状态同步偏差要求

6.3.3 当识别出的误差超过允许限值时, 应立即分析其产生的原因、发展趋势及对施工安全与质量的影响, 重点分析:

- 1) 误差是系统性偏差还是偶然波动。
- 2) 误差对当前结构安全性、稳定性的直接影响。
- 3) 误差若不纠正, 对后续施工步骤 (如合龙) 和最终成桥 (或就位) 状态的累积影响。
- 4) 误差可能诱发的次生风险 (如局部失稳、设备过载)。

6.4 反馈控制

6.4.1 反馈控制应根据误差影响分析结果, 遵循“分级响应、及时调整”的原则, 采取下列措施:

- 1) 当误差在允许范围内时, 继续施工并加强监测。
- 2) 当误差达到或超过预警值但未超限时, 应分析原因, 在后续施工步骤中通过微调施工参数 (如微调顶升力、标高) 予以逐步纠正。
- 3) 当误差超过控制限值时, 应立即暂停施工, 查明原因, 并必须采取有效的干预措施后方可复工。
- 4) 当误差超限且可能危及结构或施工安全时, 必须立即启动应急预案, 采取卸载、临时加固等抢险措施。

6.4.2 对于几何状态误差, 可采取下列反馈控制措施进行调控:

- 1) 可调系统的直接调整: 对于采用液压同步控制系统且结构处于弹性、可控状态时, 可通过系统直接调整各项升点的目标标高或压力, 对结构整体姿态 (如倾斜、扭转) 或局部标高进行在线纠偏。
- 2) 后续工序的参数预调: 对于不可直接调整或调整幅度有限的状态, 可在后续安装或浇筑工序中, 对立模标高、安装定位线等进行反向预偏移补偿。
- 3) 合龙口的主动适应调整: 对于因误差导致合龙口尺寸偏差的情况, 可研究采用温差调整、顶撑辅助等手段进行合龙。

6.4.3 对于内力状态及荷载分配误差, 可采取下列反馈控制措施进行调控:

- 1) 调整荷载分布: 通过微调各项升点的出力, 改变支承反力分配, 使结构内力分布趋向合理。
- 2) 调整施工顺序或工艺: 改变后续构件的安装顺序、调整焊接顺序以减少累积应力。
- 3) 增设临时措施: 对识别出的薄弱或过载部位, 采取增加临时支承、施加临时预应力或粘贴加固等辅助措施。
- 4) 修正计算模型与参数: 将误差分析结果反馈至控制计算模型, 修正材料参数、边界条件等, 并基于新模型重新制定后续施工控制指令。

6.4.4 于设备状态异常, 反馈控制应立即执行:

- 1) 对故障或性能下降的设备进行切换、隔离或维修。
- 2) 校准失效或漂移的传感器。
- 3) 调整控制系统的控制参数（如 PID 参数）或切换控制策略（如主从模式切换）。
- 4) 根据设备状态评估结果，决定是否需降低施工速度或暂停施工。

7 监控成果

7.0.1 一般规定

同步施工监控成果应系统反映桥梁同步施工全过程中的结构状态演化、控制分析与反馈调整情况，为施工组织优化、安全控制和工程技术档案提供依据。

7.0.2 监控成果的组成

同步施工监控成果宜包括同步施工监控实施方案、结构状态控制计算成果、阶段性监控分析成果、同步施工监控总结成果，以及施工过程中形成的监测数据、分析记录和反馈控制文件。

7.0.3 同步施工监控实施方案成果

同步施工监控实施方案成果应明确同步施工条件下的监控目标、技术路线和实施安排，内容宜包括工程概况、同步施工特点分析、监控目标与控制指标、监测与计算方法、反馈控制流程、组织与资源配置等。

7.0.4 结构状态控制计算成果

结构状态控制计算成果应反映桥梁在同步施工全过程中的几何状态和受力状态控制分析结果，内容宜包括计算依据、计算模型说明、同步施工过程计算分析、关键工况和关键阶段控制结果等。

7.0.5 同步施工阶段监控分析成果

同步施工阶段监控分析成果应按照施工阶段或施工周期形成，对阶段内同步施工过程中的结构状态变化、监测结果与计算结果对比、反馈控制措施及异常情况处理进行系统分析。

7.0.6 同步施工监控总结成果

同步施工监控总结成果应在同步施工监控工作完成后形成，对全过程同步施工监控工作进行系统总结，内容宜包括同步施工控制目标实现情况、结构状态控制效果评价、主要监控结论及相关技术建议。

7.0.7 监测数据与反馈控制文件

同步施工过程中形成的监测数据、分析记录和反馈控制文件应进行系统整理和归档，确保监控成果具有可追溯性和完整性。