



DAKUADU XIELAQIAO SHIGONG QUANGUOCHENG
JIHE KONGZHI GAILUN YU YINGYONG

大跨度斜拉桥施工全过程 几何控制概论与应用

李 乔 卜一之 张清华 等 著

四川省“十一五”重点图书出版规划项目

国家科技支撑计划项目：

大跨钢箱梁架设和控制技术与示范(2006BAG04B03)资助出版

大跨度斜拉桥施工全过程 几何控制概论与应用

李 乔 卜一之 张清华 等 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 摘 要

本书讨论基于新的几何控制理念的大跨度斜拉桥施工控制方法概论和实践,并结合世界最大跨度斜拉桥——苏通长江公路大桥的施工控制实践,介绍采用自适应控制理论的大跨度斜拉桥施工全过程几何控制方法的原理、系统构成及关键技术。本书可作为从事该领域研究、设计、施工和施工控制的科技人员及相关专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用 / 李乔等著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2009.12 (2010.3 重印)
ISBN 978-7-5643-0208-5

I. 大… II. 李… III. 大跨度结构—斜拉桥—桥梁工程—工程施工—研究 IV. U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 025331 号

大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用

李 乔 卜一之 张清华 等 著

*

责任编辑 张 波

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 16.25

字数: 291 千字

2009 年 12 月第 1 版 2010 年 3 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-5643-0208-5

定价: 39.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

目 录

第一章 斜拉桥施工控制概述	1
第一节 斜拉桥施工控制的必要性	1
第二节 斜拉桥的施工控制方法	2
第三节 斜拉桥的几何控制及全过程控制	9
第二章 几何控制理论及其控制体系	15
第一节 几何控制的理论基础与基本原理	15
第二节 几何控制的支撑体系	18
第三节 斜拉桥施工全过程几何自适应控制系统的建立	20
第三章 大跨度斜拉桥施工全过程仿真分析方法	27
第一节 斜拉桥几何非线性效应	27
第二节 大跨度斜拉桥施工全过程非线性分析系统	28
第三节 大跨度斜拉桥施工全过程非线性分析与施工控制	45
第四节 大跨度斜拉桥施工全过程稳定性分析与结构安全性	57
第四章 参数识别及误差处理	69
第一节 误差来源及误差效应分析	70
第二节 结构敏感性分析	77
第三节 全过程参数识别	95
第四节 斜拉桥施工全过程结构行为预测及误差处理理论研究	113
第五章 斜拉桥关键构件制造安装数字化控制体系	140
第一节 关键控制内容及总体控制思路	140
第二节 钢箱梁制造控制子系统	141
第三节 斜拉索制造控制子系统	145
第四节 关键构件安装数字化控制子系统 ——主梁标准梁段安装控制	146

第五节	关键构件安装数字化控制子系统——斜拉索安装控制	156
第六节	关键构件安装数字化控制子系统——索塔	167
第六章	关键技术在千米级斜拉桥施工控制中的工程实践	174
第一节	工程概况及控制原则	174
第二节	几何控制误差及施工流程	179
第三节	施工监控实施情况及结论	208
参考文献		246

第一章 斜拉桥施工控制概述

大跨度桥梁是国民经济和社会发展的基础设施，也是交通行业新技术集中应用与创新的综合体现。斜拉桥作为大跨度桥梁最为重要的形式之一，发展势头迅猛。据统计，目前国内斜拉桥数量已超过 200 座，数量约占全世界斜拉桥总数的 35%，并且进一步表现出向更大跨度方向发展的趋势。国内多座跨度突破 900 m 的超大跨度斜拉桥正在建设或规划，其中世界最大跨度的苏通长江公路大桥已经建成通车。大跨度斜拉桥作为所有桥型中最复杂的桥梁结构体系，对其实施有效的施工控制是确保桥梁高质量、高标准建设的关键；同时，大跨度斜拉桥施工控制也是一项涉及多个领域的系统工程。随着斜拉桥结构由大跨度向超大跨度方向发展，亟须在对相关关键理论、技术与方法进行深入研究的基础上发展具有普遍意义的大跨度斜拉桥施工控制技术。

第一节 斜拉桥施工控制的必要性

斜拉桥作为由主梁、拉索和索塔组成的组合体系桥梁，是众多的桥梁结构形式中在造型和构造上最富于变化的一种结构体系。按照立面布置的不同，斜拉桥可分为独塔结构、双塔结构和多塔结构；按照主梁横截面形式进行划分，斜拉桥可分为箱形梁、双主肋以及板梁等结构形式；按照桥面系进行划分，则可分为混凝土桥面系、叠合梁桥面系、混合梁桥面系以及钢桥面系等。斜拉索的布置灵活多变，按索面位置可分为单索面、双索面和多索面；按索面形状又可分为辐射形、平行形（竖琴形）及扇形等多种。索塔的建筑造型更是丰富多彩。与多变的结构体系相对应，斜拉桥的施工方法也是多种多样的。中小跨度的斜拉桥，根据桥址处的地形条件、环境条件和结构本身的特点，可采用支架法、顶推法或平转法等施工方法；而大跨度斜拉桥则主要采用悬臂浇筑和悬臂拼装的分阶段施工方法。悬臂浇筑法和悬臂拼装法均属于悬臂施工方法，该类方法采用挂篮进行现场分段现浇或采用桥面吊装设备实现预制节段拼装，待该段施工完毕后，再将挂篮或桥面吊装设备前移，进行下一节段施工，形成向桥跨中部逐渐增大的悬臂，直至跨中合龙或拼至下一个墩台上去。当前，这两种

悬臂施工方法已成为广泛采用的斜拉桥施工方法。

斜拉桥属高次超静定结构,其最为重要的特性之一是所采用的施工方法和安装程序与成桥后的主梁线形及结构恒载内力息息相关。与此同时,大跨度斜拉桥一般采用分阶段施工方法,结构的内力状态和线形随施工过程不断发生变化。设计阶段一般根据经验预先确定包括结构刚度、构件几何尺寸、梁段重量、施工临时荷载、斜拉索张拉力、收缩和徐变等关键参数为理想值,并根据上述参数的理想值确定结构各关键阶段的理想状态。尽管可对上述关键参数进行控制,但由于施工误差、环境误差、测量误差等不可避免,如不加以控制,必然导致实际结构状态和理想结构状态间的偏差。随着跨度和结构复杂性的增加,该偏差对结构线形和内力状态的不良效应显著增加,给结构的施工和正常运营带来诸多隐患,甚至危及施工及运营过程中的结构安全。

为确保施工过程中斜拉桥的结构内力和变形状态始终处在安全、合理的范围内,且成桥后的主梁线形逼近设计预期的理想线形,结构本身处于最优的受力状态,必须在施工过程中进行严密的施工控制,这是保障大跨度斜拉桥施工过程安全性及其高质量建设的必要条件。斜拉桥施工控制指通过对斜拉桥进行施工全过程仿真分析获得各关键施工阶段的主梁线形,斜拉索张拉力、索塔位移、主梁及索塔关键部位应力等理论值,进而根据理论值对施工过程作出明确规定,并在施工过程中加以有效地控制和管理,在对理论值和相应的实测值进行对比分析的基础上,根据误差分析结果对后续施工过程进行最优状态控制,以保障结构施工过程的安全性并最大限度地减少误差不良效应的过程。鉴于施工控制对斜拉桥的极端重要性,我国《公路斜拉桥设计细则》(JTJ/T D65-01—2007)中明确规定,对斜拉桥必须进行施工控制。

第二节 斜拉桥的施工控制方法

有效修正实际结构状态和理想结构状态间的偏差,最大限度降低偏差的不良效应,确保施工过程中的结构安全性,使得成桥内力状态和线形逼近设计理想状态,是斜拉桥施工控制最为重要的目的,也是斜拉桥施工控制研究的指导原则和研究目标。因此,斜拉桥施工控制方法的研究围绕施工误差的有效修正这一核心问题展开。现代控制理论为该问题的解决提供了强有力的工具。斜拉桥的施工控制方法是现代控制理论和斜拉桥工程实践相结合的产物,其发展随现代控制理论的发展而不断完善,经历了开环控制→闭环控制→自适应控制的发展历程。

一、开环控制

对于跨度不大且结构体系较为简单的桥梁结构，一般可以在设计计算阶段获得其各关键施工阶段的理想状态，进而得出各关键施工阶段的结构预拱度。这种情况下，若在施工过程中严格按照结构预拱度进行施工控制，理论上即可获得逼近理想成桥状态的结构几何线形和内力状态。这就是开环控制的基本原理。这一方法成功应用的基本前提是在设计阶段即能够实现对施工过程中结构预拱度的准确预测。J. Muller 和 C. A. Ballinger 在 20 世纪 70 年代初强调了精确计算施工过程中的结构变形对施工控制的极端重要性^[1,2]。著名学者 F. Leonhardt 提出的倒退分析法（Back Analysis）^[3]则为开环控制提供了可行的方法基础，极大地促进了该方法的发展。我国学者钟万勰、李国平分别通过斜拉桥、预应力混凝土连续梁桥的施工控制对开环控制的实际工程实施进行了探索。典型的开环控制流程如图 1-1 所示。图中， $S_{\max}$ 表示最大施工阶段数。

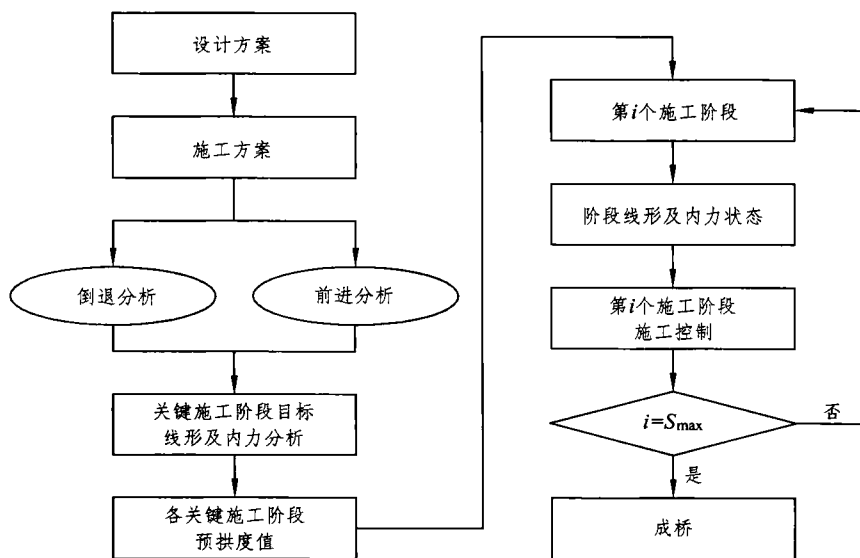


图 1-1 典型的开环控制流程

开环控制方法的理论依据如下：在设计阶段即可预先获知结构的恒载和活载，进而可以计算出结构的预拱度，在施工过程中只需按这一预拱度进行施工，即可获得逼近设计目标状态的成桥线形和内力状态。这一方法实施时仅根据理论控制参数进行施工控制，在施工过程中不进行参数识别和模型修正，本质上属于单向、确定性的控制方法。因此，称这一类控制为开环控制。其特点是不

需要根据结构的实际响应来改变施工中的预拱度,使用较为简便。但其成功应用有严格的条件限制,即应满足如下基本前提:

- (1) 设计阶段对各种关键参数有较为准确的估计;
- (2) 仿真分析模型能够准确模拟结构施工全过程的实际力学行为;
- (3) 施工控制过程中能够将结构关键参数的误差严格控制在允许范围内。

而对于大跨度斜拉桥而言,要同时满足上述3个条件基本上是不可能的,因此该方法仅在一些早期的中小跨度斜拉桥施工控制中得到了应用。

二、闭环控制

对于跨度大且结构体系复杂的桥梁结构,尽管能够精确确定成桥及各关键施工阶段的理想结构状态,但结构参数误差、施工过程误差、测试系统误差等众多因素均可能导致结构状态误差。且实际施工状态与理论施工状态的误差会随着施工过程的推进而不断扩大,若不及时修正,可能导致成桥状态欠佳甚至危及结构安全,对于大跨度斜拉桥尤其如此。因此,大跨度桥梁结构的施工控制客观上要求对施工过程中出现的误差及时进行修正和控制。实际桥梁结构的施工过程是一种带误差过程,施工过程中的实际结构状态和理想状态必然存在偏差,不可能完全吻合。为有效控制施工过程误差对成桥状态和施工过程结构安全性的不良效应,必须依据某种特定的最优原则,通过对误差的修正和控制使得存在误差的施工过程结构状态达到某种特定的最优状态。由于对误差进行修正和控制的施工控制决策是根据带误差的结构状态通过反馈计算确定的,这一过程实质上是一个闭环反馈控制过程,因此,这一控制方法又称为闭环反馈控制方法。

相对开环控制而言,闭环反馈控制能够实现对误差的及时调整和修正,对施工过程的控制更为深入,控制决策更为科学。从开环控制发展到闭环反馈控制是桥梁结构施工控制方法的一大进步,在一定程度上促进了斜拉桥的发展。

闭环反馈控制方法本质上属于随机性控制。随机性控制思想在斜拉桥施工控制中的应用可追溯至20世纪80年代中期。例如:日本学者N. Fujisawa和H. Tomo在Chichiby桥的施工中,采用计算机进行索力的辅助调整,建立了以最小二乘法为性能指标的索力调整方法^[4];K. Furukawa等在斜拉桥施工管理系统中纳入了多目标随机性控制方法^[5];加拿大Annacis桥施工过程中采用计算机对位移和内力进行跟踪分析,并考虑了施工误差和测量误差的调整问题^[6]。

20世纪80年代末,闭环反馈控制方法基本形成,并在世界范围内得到了广泛应用。应用于横滨海湾大桥(钢斜拉桥)的典型闭环反馈控制流程如图1-2所示。

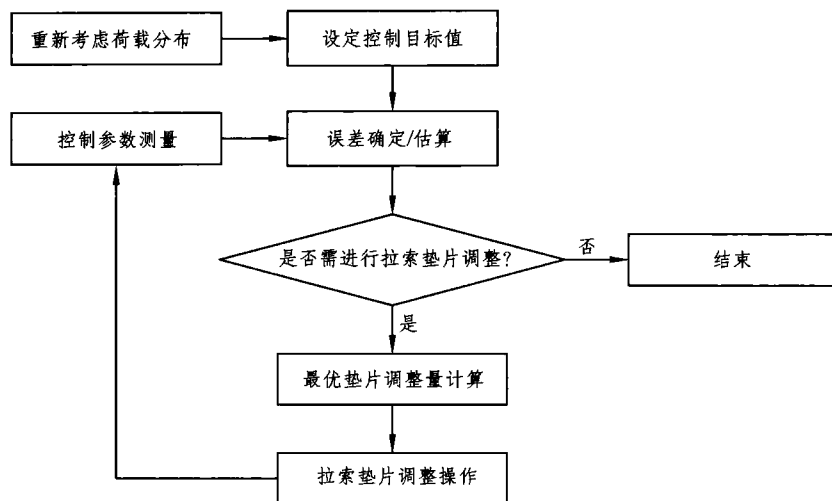


图 1-2 典型的早期闭环反馈控制流程

加拿大的 Annacis 桥, 日本的 Yokohama 海湾大桥、东神户大桥, 我国的南浦大桥、杨浦大桥、铜陵长江大桥、重庆马桑溪大桥和沙溪庙大桥等均采用闭环反馈控制方法进行施工控制。我国学者李乔、葛耀君、潘永仁、陈德伟等对闭环反馈控制方法及其工程实践进行了深入研究, 并对早期的闭环反馈控制方法进行了进一步发展和完善。基于闭环反馈控制理论所建立的典型的斜拉桥施工控制系统如图 1-3 所示。这一时期的理论与工程实践为斜拉桥施工控制方法的进一步发展奠定了坚实的基础。

三、自适应控制

自适应控制方法是随现代控制理论的发展而逐步发展并在斜拉桥施工控制中得到应用的。虽然闭环反馈控制方法能够通过控制消除或减小施工过程中的各种结构状态误差, 但这一方法仅能够在施工误差产生后根据误差的大小和具体性质确定调控对策, 本质上属于被动控制方法。施工过程中结构实际状态和理想状态存在偏差的根本原因是实际结构的关键参数和结构设计理想状态的关键参数并不完全一致, 或是用于进行结构施工过程分析的计算模型无法准确模拟结构的实际力学行为。因此, 在施工过程中若能够根据关键参数的识别结果不断进行模型修正, 使计算模型在与实际结构磨合后能够自动适应结构力学行为的实际情况, 从而有效降低模型误差, 即可为主动进行结构施工状态的准确控制提供决策依据, 这就是自适应控制的基本原理。自适应控制的原理及其实现过程如图 1-4 所示^[7]。

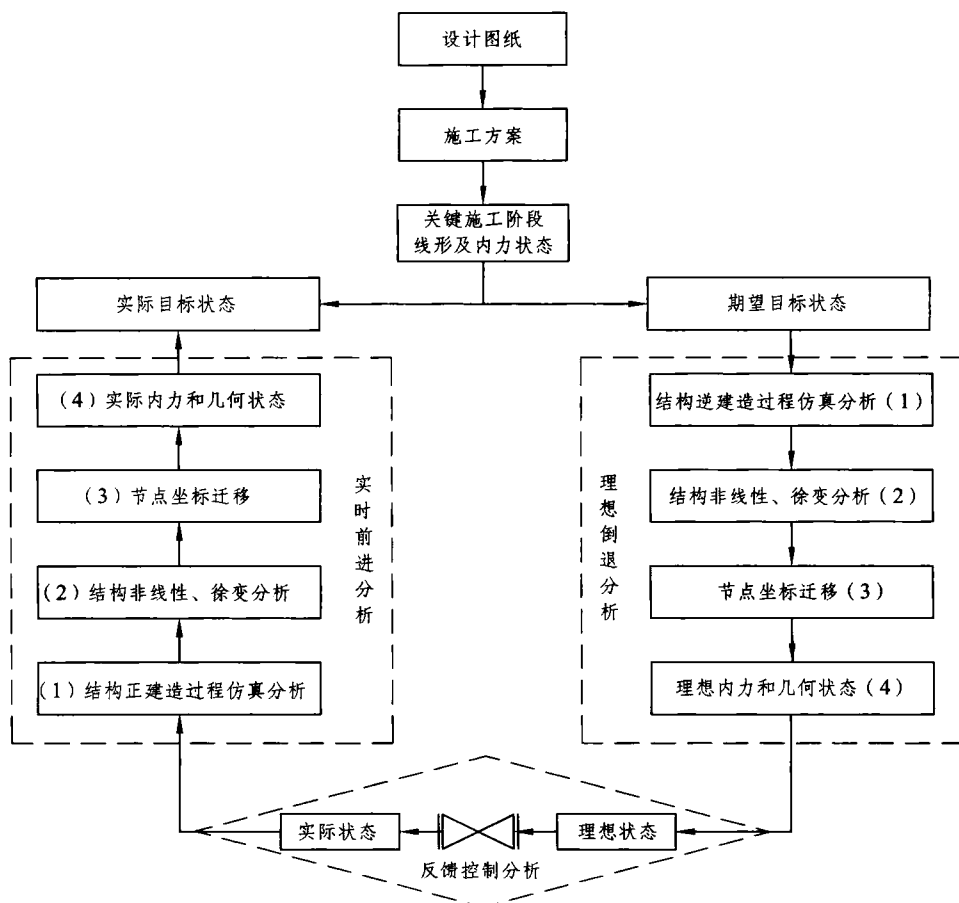


图 1-3 典型的斜拉桥闭环反馈控制系统

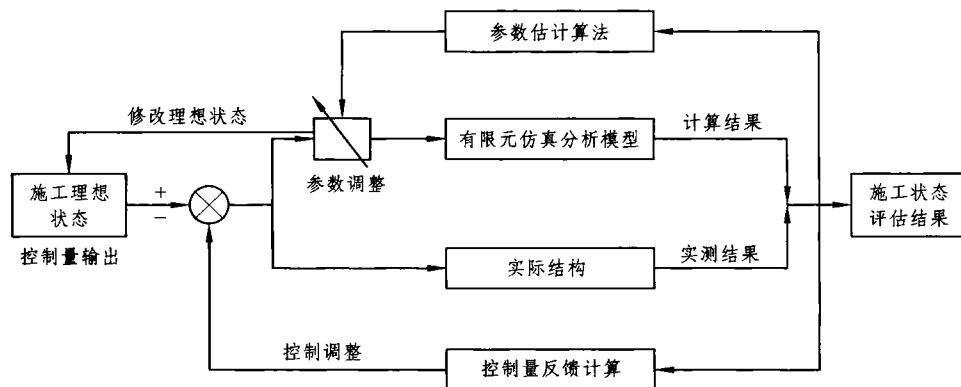


图 1-4 自适应控制的原理及其实现过程

自适应控制是在闭环反馈控制基础上发展起来的, 相对闭环反馈控制而言, 其最大特点是在施工控制中引入了参数识别, 即该系统是包含系统辨识的闭环反馈控制系统。对于悬臂拼装和悬臂现浇斜拉桥的施工控制而言, 主梁在施工控制初期的相对刚度大、变形小, 因此此时的施工误差对成桥状态的影响较小, 这对自适应控制方法的实施是有利的。经过几个施工阶段后, 计算模型已基本符合实际结构的力学行为, 可为后续阶段的高精度施工控制奠定基础。日本学者在 20 世纪 90 年代初期对自适应控制方法在现代斜拉桥施工控制中的应用进行了深入研究, F. Sakai 等人较早地建立了较为完善的桥梁施工控制系统, 并将这一控制系统成功应用在了主跨 570 m 的 Rainbow 桥 (悬索桥) 的施工控制中^[8]。该施工控制系统的控制流程如图 1-5 所示, 它主要包括两部分: ① 设计及制造阶段的

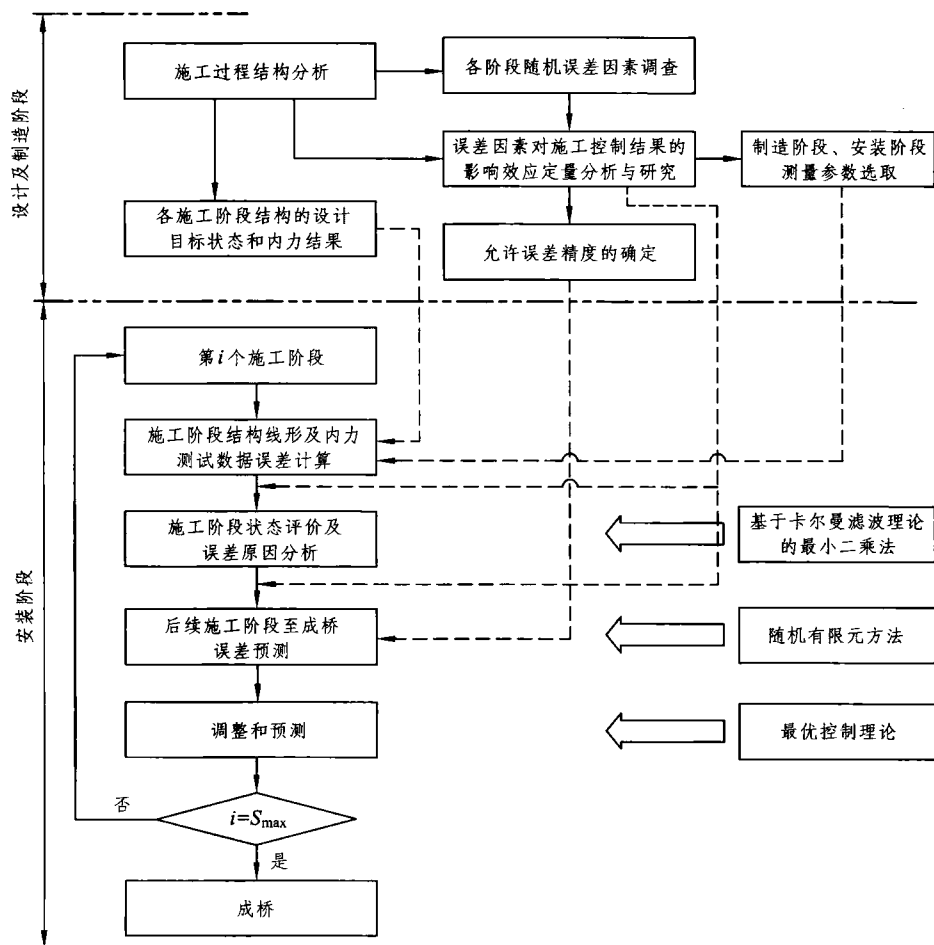


图 1-5 典型的早期桥梁施工自适应控制系统

分析预测部分；② 安装阶段的自适应控制部分。其中第一部分的主要作用在于通过对施工阶段结构线形、应力以及误差影响程度的预测分析，确定测量参数及允许误差等关键控制量，并确定各关键施工阶段的理想目标状态。第二部分根据误差评定结果，采用最小二乘法、卡尔曼滤波法等实现参数识别，进而基于随机有限元理论预测已发生的参数误差对后续施工过程的影响，并基于随机最优控制理论确定对既有状态偏差的进行有效调整的方法。F. Sakai 等不仅对自适应施工控制方法进行了深入研究，而且对施工控制的有效管理与实施进行了研究，并在此基础上对施工控制系统的建立进行了有益探讨，研究成果对后续施工控制研究及施工控制系统研发具有重要的参考和借鉴意义。

同一时期 F. Sakai 和 S. Tanaka 等人开发了包括状态测量系统、误差分析系统、控制预测系统以及实时分析系统等 4 个子系统的更为完善的斜拉桥施工控制系统^[9]，并在 Tomei Ashigara 桥的施工控制中对该系统进行了验证。该系统在实时分析子系统中考虑了参数识别结果对施工过程理想目标状态的影响，并根据该影响量对目标状态进行实时修正，因而其自适应控制过程更为完善。韩国 Hyundai 公司的 Park 等也自主研发了一个包含 5 个模块的结合梁斜拉桥施工控制系统。

从 20 世纪 90 年代初开始，随着斜拉桥建设高潮的到来，我国建造了包括南京长江第二大桥、安庆长江大桥、南京长江第三大桥、上海徐浦大桥、上海杨浦大桥、铜陵长江大桥等一大批大跨度斜拉桥，我国学者李乔、葛耀君、石雪飞、颜东煌、陈德伟等对自适应控制方法及其工程实施进行了深入系统的研究，建立了相对完备的自适应施工控制系统，为上述大跨度桥梁的高质量建设奠定了基础。这一时期所开发的典型施工控制系统如图 1-6 所示，其功能更为完备，控制流程更为完善。

从图 1-6 可以看出，随着施工控制方法的发展，为满足施工控制方法有效实施的需要，施工控制系统也在不断完善和发展，从早期较为粗糙、不成体系的施工控制系统向功能完善、模块分工明确的完备施工控制系统发展。当前，基于自适应控制理论所建立的相对完备的斜拉桥施工控制系统至少应包括如下子系统：

- (1) 施工过程仿真分析子系统；
- (2) 施工过程关键信息测试子系统；
- (3) 施工过程结构安全性评估子系统；
- (4) 施工过程结构状态误差评估子系统；
- (5) 参数识别与模型修正子系统；
- (6) 施工控制分析、预测与调控决策子系统。

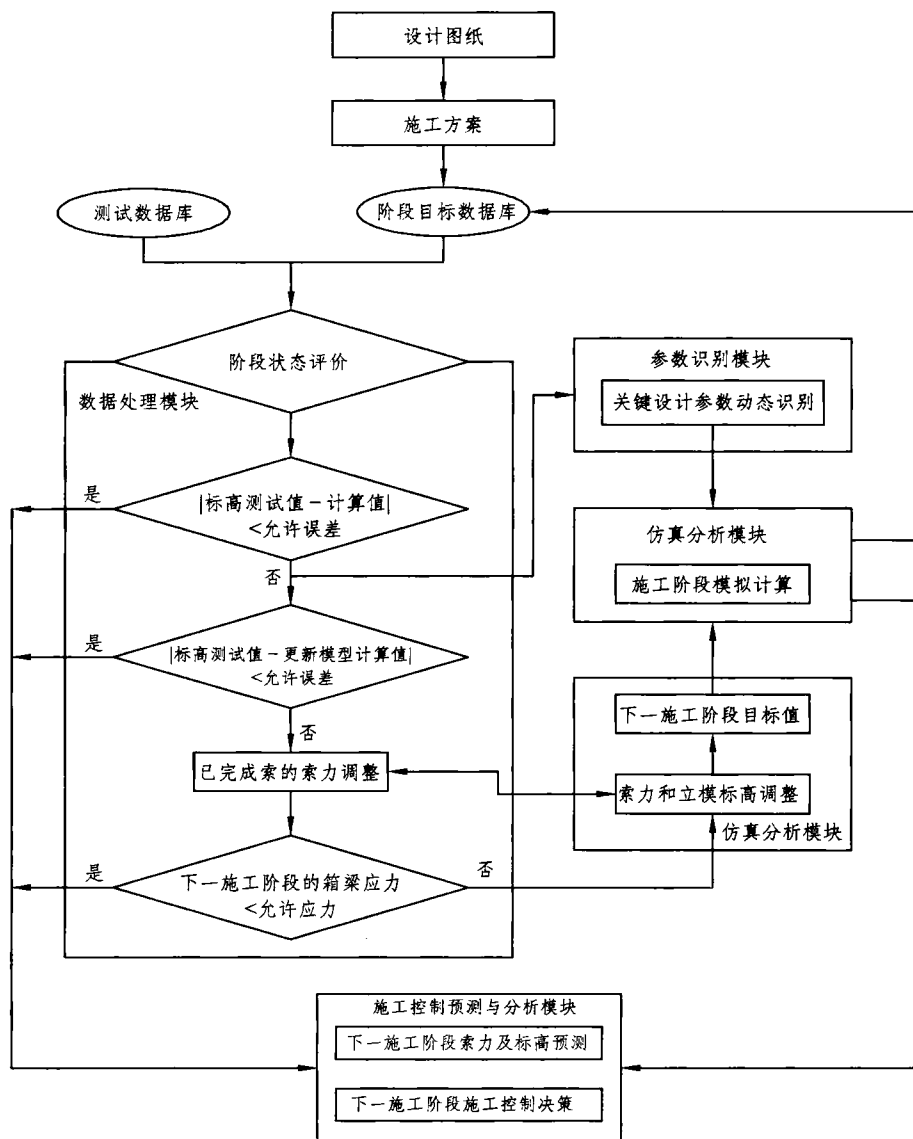


图 1-6 相对完备的自适应控制系统示意图

第三节 斜拉桥的几何控制及全过程控制

斜拉桥施工控制的最终目的是有效控制实际结构状态和理想结构状态间的

偏差,在保障结构施工全过程安全性的前提下,最大限度降低偏差的不良效应并使得成桥内力状态和线形逼近设计理想内力状态和线形。无论是施工控制方法的发展还是施工控制系统的发展均为这一目的的有效实现服务。斜拉桥施工控制系统发展的历史可以看做在现代控制论指导下结合斜拉桥施工控制面临的特定问题,发展适用于斜拉桥施工过程控制,并能确保获得逼近目标成桥状态的控制系统的历史。

影响施工控制结果的重要因素除控制方法、控制系统外,还包括施工控制理念,即施工控制的指导思想。回顾施工控制理念的发展过程对于了解施工控制的发展历程、发展更为有效的施工控制方法大有裨益。概括而言,施工控制理念经历了单控→双控→全过程控制的发展过程。所谓“单控”,即在悬臂架设过程中,以主梁线形平顺、正确为目标,以主梁标高控制为主,索力控制为辅;而在全桥合龙后二期恒载施工时,以使结构的内力和几何状态逼近理想目标状态为目标,以斜拉索二次张拉力控制为主,标高控制为辅。因上述控制过程中,在各主要施工状态下仅对最为重要的单一控制目标进行控制,因此,一般称之为“单控”。该控制理念目标单一、操作简单,是早期斜拉桥主要的施工控制指导思想。但其缺陷也是显而易见的:多数情况下,由于实际参数与设计参数间存在偏差,悬臂施工标高控制的结果常会导致合龙后结构无法达到最优受力状态,而要进行附加的二次调索工作,以优化结构受力,这样一方面拖延了工期,另一方面对于结构体系复杂的大跨度斜拉桥而言,二次调索不仅极为困难和繁琐,而且必然导致较大的斜拉索张拉和测量工作量。与此同时,即使通过二次调索达到了使得成桥内力状态逼近理想目标状态的目的,也难以确保实际标高与设计成桥标高的一致性。

鉴于上述原因,随着现代斜拉桥的发展,施工控制理念逐步由“单控”向“双控”方向发展。斜拉桥相对其他桥型最突出的特点之一就是可以通过索力调整使结构的内力和几何线形达到最优状态。现代斜拉桥大多是密索体系,索力可调整范围较大,索力调整可以通过多种方法实现。双控思想就是基于上述认识,将双控的目标定义为变形控制和内力控制,即在斜拉桥的施工过程中控制变形(主梁的挠度、索塔的水平偏位等)和内力(主梁内力、主塔内力等),只要结构几何线形和结构内力处于合理状态之内,通过小范围的索力调整,即可部分消除由于实际参数和设计参数的不一致性所导致的误差,达到使实际施工状态逼近设计目标状态的目的。

从单控向双控控制思想的发展是控制理念的重大进步,推动了斜拉桥施工控制方法和工程实践的发展。但应该看到,上述控制思想无论是“单控”还是“双控”都仅对施工过程进行了控制,本质上属于部分过程控制。基于该控制理

念所发展的施工控制方法的误差评估、参数识别、模型修正以及控制决策等等均基于施工过程中结构响应等的现场测试数据得出。在同时满足下述两个条件的情况下基于双控控制理念可以获得较好的控制结果：

(1) 现场测试数据的准确性、可靠性能够得到充分保证；

(2) 测试数据误差对施工控制结果及施工过程中的结构安全性影响较小。

而大跨度和超大跨度斜拉桥具有下述特性：

(1) 结构跨度大、结构体系较为纤柔，施工过程结构的安全性问题突出；

(2) 结构更易于受环境因素影响，施工过程中索力、线形等测试数据的可靠性显著降低；

(3) 施工误差的影响因素显著增多，更易于导致不合理的控制结果；

(4) 施工过程复杂，工序繁多，施工误差不易调整，且其不良效应更为显著。

显然，对于大跨度尤其是超大跨度斜拉桥，若采用部分过程控制理念作为指导原则进行施工控制，有可能导致施工控制精度下降及施工过程结构安全性降低的双重风险。而若对控制过程进行进一步拓展，同时对关键构件制造过程和安装过程进行控制，即采用所谓的全过程控制，无疑可以实现规避施工过程风险、显著提高控制质量的双重目的。为此，诺曼底大桥和多多罗大桥等大跨度斜拉桥开始引入全过程控制理念指导施工控制。多多罗大桥的施工控制流程如图 1-7 所示。

回顾多多罗大桥的施工控制方法有助于把握全过程控制思想发展的脉络。由于该桥属于极为纤柔的特大跨度桥梁，进行施工控制前期研究时，业主及施工方通过系统深入的仿真分析和研究认识到，仅进行施工安装过程中的索力和标高控制极可能导致几何线形出现较大误差。因此，在该桥施工控制系统的研发和实施过程中，引入了“精度控制”概念^[10]，以构件的几何形态作为控制手段，对构件的制造和安装过程进行全过程控制。施工控制实施时，多多罗大桥将控制重点放在了主梁节段和斜拉索的制造及安装长度控制上。其具体控制原则如下：

(1) 在现场主要是对主梁几何线形而不是对索力加以控制，索力仅供参考而不用控制；

(2) 将控制重点放在对构件制造长度的控制上；

(3) 采用通过垫片控制拉索安装长度的方式实现对主梁几何线形的控制；

(4) 如果施工过程中需通过在拉索锚具处加垫片的方式实现对拉索长度的调整和控制，则只对悬臂最外缘的一根拉索长度进行调整；

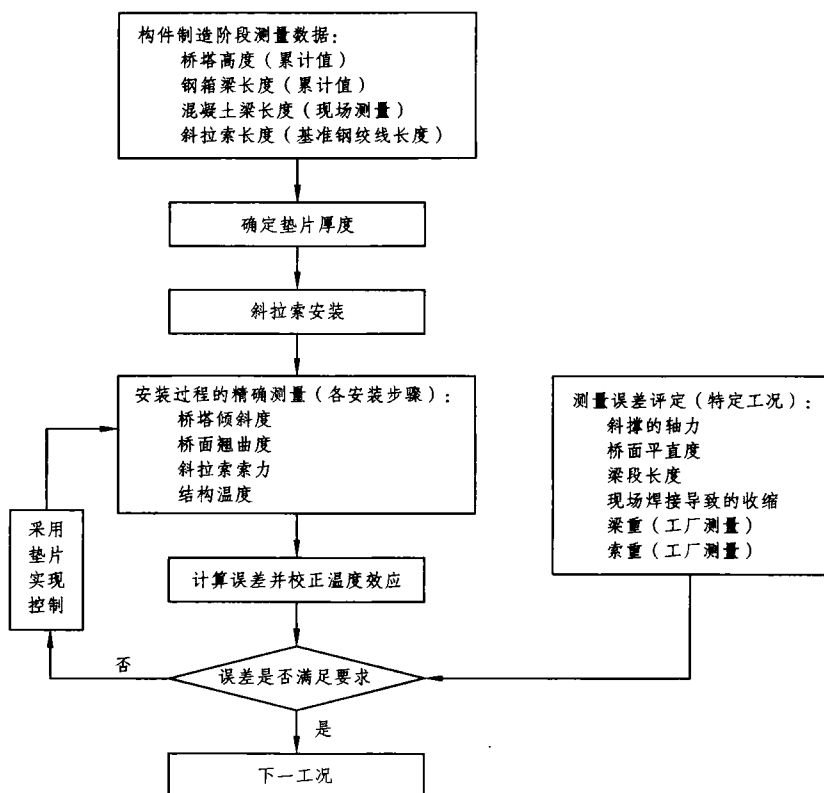


图 1-7 多多罗大桥的施工控制流程

(5) 因制造厂所获得的测试数据更为准确, 所以构件长度的控制以在工厂测得的数据为依据, 而将现场测得的数据作为补充;

(6) 主要测试工作在夜间恒温状态下进行;

(7) 混凝土预制梁部分的几何线形控制难度较大, 在拉索安装之前对该部分拉索锚具的坐标进行了测量, 并通过垫片修正相应的拉索长度误差;

(8) 控制过程中忽略徐变效应的影响。

多多罗大桥对索塔和主梁节段制造实现了极高的控制精度, 具体指标如下:

(1) 索塔和主梁的总长度累积误差小于 10 mm, 即每个构件的制造误差均极小;

(2) 索塔构件的结合面用刨床切削。主梁节段在温度控制下焊接, 上、下翼缘的温度差小于 2℃。

由于在工厂内所获取的数据本身很精确, 因此关键构件实际制造精度指标的可靠性较高。因构件制造及安装均能实现精确控制, 采用上述方法成功实现