



测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

现代大型斜拉桥塔梁 施工测控技术

岳东杰 郑德华 著



科学出版社

测绘科学与技术著作系列

现代大型斜拉桥塔梁 施工测控技术

岳东杰 郑德华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以高塔长跨度桥梁为研究对象,依据苏通大桥主桥工程,针对复杂条件下施工过程中动态变形监测、几何控制等关键技术进行全面、深入的研究与总结。本书共分十章,主要内容为绪论、特大斜拉桥施工测控技术、基于温度效应补偿的索塔测量技术、高索塔精密全站仪竖高程传递技术、索塔变形自动监测技术、悬臂梁安装的施工测控技术、苏通大桥悬拼梁段精确匹配方法、基于 TCA2003-GeoCOM 的自动监测软件开发、基于 GPS 技术的钢箱梁实时动态几何监测系统及基于现代谱估计的振动信号分析。

本书可供从事土木工程、交通、桥梁工程等领域研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代大型斜拉桥塔梁施工测控技术/岳东杰,郑德华著. —北京:科学出版社,2012

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-035250-7

I. ①现… II. ①岳… ②郑… III. ①斜拉桥-桥梁施工-施工控制网-研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 179763 号

责任编辑:童安齐 王 钰 闫洪霞 / 责任校对:马英菊
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 224 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

随着我国交通事业的迅猛发展,大跨度、高难度的大型复杂桥梁正在被越来越多地建造和规划着,为了保证桥梁结构施工的安全、达到成桥的设计目标、提高施工质量而进行的桥梁施工监测与控制已成为桥梁施工技术的重要组成部分和关键的一环。斜拉桥作为一种拉索体系,比梁式桥具有更大的跨越能力,加之具有良好的力学性能和经济指标,已成为当今大跨径桥梁最主要的桥型之一。索塔、梁、索是超大跨桥梁上部结构的三大组成部分,并由此构成斜拉桥这种高次超静定结构体系。这种超静定结构体系中节点的位置发生变化将影响结构内力的分配与成桥线形,因此在现代大型桥梁施工中对每个节点的定位要求都十分严格,索塔、梁、索的施工质量直接关系到整个桥梁施工的成败。施工测量与控制作为引导正确施工的基准,是工程形体质量的重要保障和施工的重要环节,起着举足轻重的作用。因此,开展对现代大型斜拉桥塔梁施工测控技术的研究具有重要的科学与现实意义。

该书以高塔长跨度桥梁为研究对象,依托苏通大桥主桥工程,针对复杂条件下施工过程中动态变形监测、几何控制等关键技术进行了全面、深入的研究与总结。书中详细分析了大型斜拉桥塔梁形态测控的关键技术;为了克服温度效应对施工测控的影响,研究提出了基于温度效应补偿的索塔测量技术;研究开发了高精度垂直高程传递技术,高索塔自动监测技术以及悬臂梁安装的施工测控技术;特别突出了测量机器人、GPS等先进的测量技术在桥梁施工测控中的应用;此外还研究了现代谱估计方法及其在桥梁振动信号分析中的应用。

该书内容丰富,方法先进,结构合理,是一部有关测绘工程与桥梁工程交叉学科方面的论著。

该书的完成得益于作者及其研究团队多年来在此领域的辛勤努力,特别是作者多年来从事该领域研究所取得的科研成果和实践经验,也反映了作者及其研究团队与时俱进、开拓创新的科研精神。希望该书的出版能为桥梁测控研究做出贡献,并进一步推动测绘与桥梁工程交叉学科的发展。

武汉大学教授 

2012年7月

前 言

斜拉桥是现代大型桥梁的首选桥型之一,以其跨越能力强、通航影响小而备受关注。随着跨径的不断增加,主要承重结构——索塔的高度也越来越高。最常见的索塔结构要属在现场采用分段浇筑的钢筋混凝土结构,这种结构索塔施工的精度完全依赖于现场测量和控制,索塔最终的应力状态和线形与施工过程有着紧密的联系,环境影响因素多,施工控制难度大。大悬臂梁施工过程中,温度、大风效应、风致振动和斜拉索振动影响比较大,箱梁安装精度控制难。索塔与箱梁成桥线形的优劣直接关系到结构的受力性能,从而直接影响桥梁的运营技术状态。随着桥梁跨度与索塔高度的加大,要求提高精度,索塔形态(轴线、垂直度、线形)测控和箱梁安装线形控制难度也随之加大,因此超高索塔与超长悬臂梁的形态测控和线形控制已经成为大型桥梁顺利实施的关键。本书是在总结作者近五年来的研究成果的基础上撰写而成的。书中针对高塔长跨度桥梁精密施工测控技术问题,对测控理论和技术进行了深入研究,将测绘技术与方法有机集成,充分发挥常规测量方法与现代测量新技术(测量机器人、GPS技术)的优势,开展了现代科技新成果在桥梁测控中应用的研究和开发,解决了大跨度桥梁高索塔的形态测控、动态变形监测以及钢箱梁的动态几何数据采集等关键性问题,同时使测控理论和技术得到创新及发展,并对大型工程的测控有重要的理论与现实意义。

全书共分十章。第一章概述了桥梁塔梁施工测控技术现状;第二章针对斜拉桥及复杂环境条件下塔梁形态测控的关键技术进行了分析;第三章针对温度效应对索塔施工的影响,讨论了基于温度效应补偿的索塔测量技术;第四章探讨了高索塔精密全站仪竖直高程传递技术;第五章研究了索塔变形自动监测技术;第六章与第七章讨论了悬臂梁安装施工测控技术及苏通大桥悬拼梁段精确匹配方法;第八章介绍了基于TCA2003-GeoCOM的自动监测软件开发;第九章探讨了基于GPS技术的钢箱梁实时动态几何监测系统;第十章基于动态监测数据讨论

了基于现代谱估计的振动信号分析方法。书中结合创四项世界之最佳的苏通大桥的塔梁施工工程,给出了大量的工程应用实例,验证了书中所提到的技术方法的有效性、实用性与先进性。

本书内容反映了作者主持的国家“十一五”科技支撑计划项目“300米索塔监测与控制技术研究”与交通部部重点计划项目“苏通大桥塔梁结构形态测控技术开发”的研究成果。感谢苏通大桥建设指挥部的支持与帮助,感谢合作单位中交二航局、中交二公局、武汉大学的支持与帮助。

感谢作者指导的研究生杨柏宁、邬昱坤、许昌、顾志强等,他们对本书所涉及的技术方法作了大量的应用与开发研究。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,望读者批评指正。

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 桥梁塔梁施工测控技术概述	1
1.2 桥梁施工测控的现状	4
1.2.1 索塔形态测量技术	4
1.2.2 索塔变形监测技术	5
第二章 特大斜拉桥施工测控技术	11
2.1 斜拉桥施工控制技术研究现状	11
2.2 复杂环境条件下塔梁形态测控的关键技术分析	12
2.2.1 塔梁形态测控的质量标准	12
2.2.2 长悬臂钢箱梁施工期塔梁形态测控的内容与质量标准	14
2.3 影响塔梁形态控制的因素分析	16
2.3.1 影响超高索塔形态控制的因素分析	16
2.3.2 影响长悬臂钢箱梁形态测控的因素分析	17
2.4 塔梁形态测控的关键技术分析	19
2.4.1 超高索塔形态测控的技术难点分析	19
2.4.2 长悬臂钢箱梁形态测控的技术难点分析	20
第三章 基于温度效应补偿的索塔测量技术	21
3.1 温度效应对索塔施工的影响	21
3.2 基于温度效应补偿的索塔测量技术	23
3.3 应用分析	24
3.3.1 追踪棱镜的布设与测量	24
3.3.2 索塔单节段施工温度效应修正	25
3.3.3 基于温度效应补偿技术的中下塔柱竣工测量结果	27
第四章 高索塔精密全站仪竖直高程传递技术	31
4.1 精密全站仪竖直传高方法	31
4.1.1 基本原理	31
4.1.2 测量距离的改正	33
4.1.3 测量距离的误差分析	33

4.1.4	设置铅垂线造成的距离误差	34
4.1.5	水准测量的误差与近距离三角高程测量的误差	35
4.1.6	常数的测定与误差分析	35
4.1.7	综合误差	36
4.2	全站仪竖直传高装置研制	36
4.3	试验分析与应用	36
4.3.1	试验分析	36
4.3.2	工程应用	37
4.3.3	试验结论	38
第五章	索塔变形自动监测技术	39
5.1	索塔变形监测方法分析	39
5.2	基于测量机器人的索塔变形自动监测系统	39
5.2.1	自动监测定位的原理	39
5.2.2	系统服务目标	42
5.2.3	系统开发原则	43
5.2.4	系统开发的软硬件环境	44
5.2.5	开发的技术指标	46
5.2.6	系统设计与实现	46
5.2.7	系统应用与分析	58
5.3	索塔 GPS 动态监测技术	67
5.3.1	GPS 技术在桥梁索塔监测的应用现状	67
5.3.2	索塔 GPS 动态监测试验	68
5.3.3	监测数据处理与分析	69
第六章	悬臂梁安装的施工测控技术	80
6.1	长悬臂钢箱梁几何测控的主要内容及其质量标准	80
6.1.1	苏通大桥梁段安装流程	80
6.1.2	长悬臂钢箱梁几何测控的主要内容	80
6.1.3	长悬臂钢箱梁几何测控的质量标准	81
6.2	长悬臂钢箱梁几何测控的技术难点	83
6.2.1	影响苏通大桥长悬臂钢箱梁几何测控的因素分析	83
6.2.2	长悬臂钢箱梁几何测控的技术难点	83
6.3	长悬臂钢箱梁几何测控方法可行性分析	84
6.3.1	主梁线形测量方法	84
6.3.2	主塔偏位测量	85
第七章	苏通大桥悬拼梁段精确匹配方法	87

7.1 苏通大桥梁段精确匹配方法	87
7.1.1 苏通大桥梁段精确匹配工作流程	87
7.1.2 梁段精确匹配方法	87
7.2 苏通大桥悬拼梁段局部测量多自由设站法	89
7.2.1 局部测量坐标系	89
7.2.2 局部测量多自由设站法	90
7.2.3 多自由设站法坐标转换模型	90
7.3 苏通大桥悬拼梁段全局测量方法	95
7.3.1 全局坐标系	95
7.3.2 三维极坐标法介绍	95
7.3.3 全局测量方法	97
7.3.4 全局测量精度估算	98
7.3.5 提高全局测量精度的一些措施	102
7.3.6 全局测量结果	102
第八章 基于 TCA2003-GeoCOM 的自动监测软件开发	104
8.1 测量机器人及软硬件开发环境	104
8.1.1 TCA 自动化全站仪	104
8.1.2 Visual Basic 语言	105
8.1.3 结构化查询语言	106
8.1.4 GeoCOM 接口技术	106
8.2 软件开发目标及其工作流程框架	109
8.2.1 软件开发目标	109
8.2.2 软件工作流程框架	110
8.3 观测数据改正方法	111
8.3.1 大气改正	111
8.3.2 观测房玻璃折射影响	113
8.3.3 多目标棱镜问题	114
8.4 软件开发设计	115
8.4.1 工程管理	115
8.4.2 常规测量模式	116
8.4.3 实时监测模式	120
8.4.4 后处理模式	122
8.5 软件调试	127
8.6 TCA2003 全站仪动态跟踪特性分析	128
8.7 苏通大桥主跨大气折光统计试验	130

8.8	开发软件在全局测量中的应用	131
8.9	箱梁动力特性测试实验	133
8.9.1	现场数据采集	133
8.9.2	观测序列样本预处理	133
8.9.3	动力特性功率谱估计	135
第九章	基于 GPS 技术的钢箱梁实时动态几何监测系统	139
9.1	GPS RTK 定位基本原理	139
9.1.1	GPS 简述	139
9.1.2	GPS 定位系统的应用特点	139
9.1.3	RTK(实时动态定位)技术	141
9.2	GPS 实时动态监测系统的设计	142
9.2.1	RTK GPS 定位设备	142
9.2.2	动态相对定位中的坐标转换	143
9.2.3	GPS 监测数据误差分析	143
9.3	苏通大桥 GPS 钢箱梁实时动态几何监测系统的实施	144
9.3.1	工程概况	144
9.3.2	GPS 动态监测系统的实验	145
第十章	基于现代谱估计的振动信号分析	150
10.1	传统的功率谱分析法	150
10.1.1	功率谱估计	150
10.1.2	传统的功率谱分析法	150
10.2	现代的功率谱分析法	152
10.3	AR 模型参数估计	154
10.3.1	最小二乘法	154
10.3.2	自相关法	154
10.3.3	Burg 算法	155
10.4	AR 模型定阶	156
10.5	算法实现及仿真	159
10.5.1	仿真数据生成	159
10.5.2	计算分析	161
10.6	工程实例	167
10.6.1	粗差探测与剔除	167
10.6.2	苏通大桥长悬臂钢箱梁变形分析	170
10.6.3	苏通大桥长悬臂钢箱梁频谱分析	173
	主要参考文献	175

第一章 绪 论

1.1 桥梁塔梁施工测控技术概述

随着高强钢材(筋)、钢绞线等优质材料的出现,结构分析的不断完善,施工工艺的日趋成熟,斜拉桥向跨径大、结构柔等方向发展已成为可能。无论是世界上第一座现代斜拉桥——跨径 182.6m 的瑞典斯特罗姆海峡钢斜拉桥和主跨为 856m 的法国诺曼底大桥,还是主跨为 890m 的日本多多罗大桥以及在建主跨为 1088m 的苏通长江公路大桥,无不向人们展示了斜拉桥强大的跨越能力。斜拉桥作为一种拉索体系桥梁,比梁式桥具有更大的跨越能力,另外由于拉索的自锚特性,不需要像悬索桥那样巨大的锚碇,加之斜拉桥具有良好的力学性能和经济指标,其已成为当今大跨径桥梁最主要的桥型之一,并且在跨径 200~800m 的范围内占据着优势。在跨径 800~1100m 的特大跨径桥梁角逐竞争中,斜拉桥也扮演着重要的角色。我国至今已建成各种类型的斜拉桥 100 多座,其中跨径大于 200m 的就有 50 多座,是世界上拥有斜拉桥最多的国家,这些斜拉桥无一例外地承担着各地交通纽带的作用,为我国经济的腾飞做出了巨大的贡献。

大跨径斜拉桥属于高次超静定结构,它对成桥线形有着较严格的要求;对塔柱空间位置、斜拉索位置、锚头相对尺寸精确度的要求也十分苛刻,并且在施工阶段随着斜拉桥结构体系和荷载状态的不断变化,结构内力和变形亦随之不断发生变化。另外,每个节点坐标的变化也都会影响到斜拉桥结构内力的分配,因此为了确保桥梁施工过程中结构的安全和成桥后线形平顺,必须对主梁标高、斜拉索索力和塔柱偏位等进行跟踪监测,并详尽分析、验算斜拉桥吨位、主梁挠度和塔柱位移等一些施工控制参数的理论计算值,从而对具体施工方法和安装程序作出明确的规定,并在施工中加以有效地管理和控制。同时,主梁、索塔和拉索之间的刚度相差十分悬殊,受拉索垂度、温度变化、风力和日照影响、施工临时荷载、混凝土收缩徐变等复杂因素干扰等,受力与变形的关系十分复杂。在施工计算中,虽然可以采用多种计算方法,算出各施工阶段或步骤的索力和相应的梁体变形,但由于设计时采用的计算参数诸如材料的弹性模量、构件重量、混凝土收缩徐变系数、施工中温度变化以及施工临时荷载条件等与实际情况不完全一致,导致按照理论计算所给出的索力、线形进行施工时,结构的实际变形却未必真正能够达到预期的结果。斜拉桥在施工中表现出来的这种理论与实际的偏差还具有累积性,若不及时有效地加

以控制和调整,随着主梁悬臂施工长度的不断增加,主梁标高最终将会显著地偏离设计目标,造成合龙困难,并影响成桥后的内力和线形。因此,研究和应用斜拉桥施工控制技术中的线形测量技术、应力测试技术、索力测试技术、温度测试技术、误差分析技术、现代控制理论以及调整手段等具有极现实的工程意义。

由于桥梁测控不利导致的桥梁事故有很多,如因在施工中发生两次事故而闻名于世的加拿大魁北克桥(跨径 548.64m),该桥采用悬臂拼装法施工,当南侧锚定桁架快架完时突然崩塌坠落,尽管造成该事故的原因是设计问题,但当时如果采取有效的监测手段,发现异常现象时及时停工检查,可能就会避免该事故的发生;又如 1978 年美国 P-K 斜拉桥(跨度 300m)合龙时偏差达到了 17cm;1977 年法国 Brotone 桥(跨径 320m)采用压重法才使主梁合龙;我国 20 世纪 80 年代四川达县洲河斜拉桥由于吊装主跨中段时承受过大的轴力而在合龙前垮塌。以上这些事故的发生,与桥梁施工期间没有进行有效地监测有着很大的关系,因此无论是在建设期还是运营期,桥梁的安全监测都是不容忽视的,否则后果将不堪设想。

索塔、梁、索是超大跨桥梁上部结构的三大组成部分,并由此构成斜拉桥这种高次超静定结构体系。这种超静定结构体系中节点的位置发生变化将影响结构内力的分配与成桥线形,因此,在现代大型桥梁施工中对每个节点的定位都要求十分严格,可以说,索塔、梁、索的施工质量直接关系到整个桥梁施工的成败。对于跨度和主塔高度同属世界同类桥梁之首的苏通大桥,施工工艺与技术也被提到了世界顶级水平。施工测量与控制作为引导正确施工的基准,是工程形体质量的重要保障和施工的重要环节,没有切实可行的测量技术与方法是难以保障施工质量的。同时,受施工条件与环境等各种因素的影响与限制,在建设过程中包含着许多极富挑战性的关键技术,如施工测量方面,主要需要开展索塔施工测控关键技术与钢箱梁施工测控关键技术研究。

索塔作为斜拉桥至关重要的组成部分,担负着全桥的荷载,是维系斜拉索的基础,关联着桥面曲线的形态。为满足大型斜拉桥这种高次超静定结构特点与设计要求,对塔柱的倾斜度、铅垂度和几何尺寸以及钢锚箱的精密定位等施工测量提出了越来越高的要求。在高塔柱施工中,塔柱倾斜度与形体是反映塔柱形体质量的两项重要指标,工程形体质量不仅体现了施工技术方案、方法的优劣,也体现了测量方案的正确、科学与否。现代大型斜拉桥工程的建设需要施工测量人员快速准确地提供放样点位,新型测量仪器与技术的应用为满足这种需要提供了保障。在实际工作中结合工程的进度、现场条件、大气温度等情况,研究克服不利影响因素限制的施工测量技术和方法,制订合理的工程施工测量的技术方案,能迅速提高测量速度,满足现代化快速施工要求,确保工程的高质量。综合分析苏通大桥工程的特点,充分研究工程建设中的存在施工测量技术难点,统一规划、系统研究,超前研究现代大型桥梁施工测控新技术与新方法,及时有效地解决实际工程建设中的难

题。为了确保施工测量控制的万无一失,在工程工期紧、施工难度大的条件下有效保证优质工程,在测量技术方案中采取强化措施,严格执行“三不同”原则,彻底消除因仪器和设备、测量方法不当等造成的工程质量缺陷。

为了满足高索塔施工中垂直度要求,以及确定施工中塔柱的周日形变及索力作用下引起的塔柱偏移,必须监测和研究外界条件影响下塔柱的变化规律,用于指导施工与测量工作。在塔体各层浇筑时,顶部是个自由端,会由于日照、风压产生变位,这种变位将随着塔体不断升高而迅速增大。斜拉索应力调整时也将对索塔产生影响,在调整前后的各个时刻,均须利用现代测量技术与方法准确、及时地监测索塔的变化情况,作为大桥线形调整的依据。

斜拉索是连接主塔和主梁的纽带,而索道管是将缆索两端分别锚固在主塔和主梁上的重要构件,为了防止缆索与索道管口发生摩擦而损坏缆索,影响工程质量,以及保证对称主塔两侧的各斜拉缆索位于同一设计面上,防止锚固点偏心而产生的附加弯矩超过设计允许值,对索道管锚垫板中心和塔壁外侧套筒中心的三维空间坐标位置提出了很高的精度要求,按大型斜拉桥设计规定,一般要求缆索、锚具轴线偏差小于 $\pm 5\text{mm}$ 。根据苏通大桥上部结构的特点,保证钢锚箱制作与安装的质量是确保斜拉索安装质量的关键,因此在索塔施工中,必须研究高空动态设站测量条件下的测量数据处理方法以解决钢锚箱的精确定位问题。

钢箱梁安装的施工测控是桥梁上部结构施工中最复杂的工序之一。为了保证塔、梁与索的结构受力均衡以及成桥线形,特大桥梁的钢箱梁施工控制是一种非线性动态数值分析过程,因此钢箱梁的安装过程由一系列动态调整环节构成。调整环节一般分为“实时测量系统”、“现场测试系统”、“测控分析计算系统”三部分。

钢箱梁安装的动态测控体系为特大型桥梁施工测控提供科学准确的分析数据。“实时测量系统”必须实时提供已安装段的线形与挠度,以供“测控分析计算系统”计算分析,指导下一步的调整措施。采用何种测量方法与技术保障大跨度桥梁线形控制的精度性与实时性,是钢箱梁安装的关键问题。

根据苏通大桥的特点及现场情况,充分考虑施测中的困难,使测量工作化繁琐为简易,尽量避免有中间过渡的测量作业,提高可靠性避免出差错,满足施工测控的精度。对此,提出在各部位施工过程中,以一种方法为主,借助于现代高精度测量仪器设备,如自动测量全站仪(TCA2003),辅以其他适宜的方法作检核,研究出一套适应苏通大桥上部结构施工测控的技术方法。

运用现代测绘技术与理论解决施工中超高索塔位置及体形的准确定位难题和复杂运动状态下钢锚箱的精密三维定位问题;为延长索塔施工的有效时间,研究复杂环境条件下索塔实时动态测控技术;分析日照、温度及风压等因素对索塔变形量值的影响规律;提出在塔体分段浇筑、钢锚箱安装的施工测量的控制方法及措施;研究钢箱梁安装的动态测控技术,从而形成一套高效、高精度的施工测量技术与方

法,为编制苏通大桥上部结构施工测量技术规则与施工测量指导书提供依据。

常规测控方法多样、灵活、简便,在桥梁建设中发挥了巨大作用,但受天气影响较大,夜间以及高空作业难度大,受施工环境和干扰严重,而且实时性较差。为确保世界一流的苏通大桥上部结构施工的质量和工期,必须研究适合苏通大桥工程上部结构形态施工测控技术,将测绘技术与方法有机集成,充分发挥常规测量方法与现代测量新技术(测量机器人、GPS技术)的优势,解决大跨度桥梁高塔索的形态测控、动态变形监测以及钢箱梁的动态几何数据采集等关键性问题。研究成果对测绘技术在超高塔、超大跨桥梁施工建设中的应用和推广及施工测量技术的发展具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 桥梁施工测控的现状

结构的形态测控包括形态测量与形态监测两方面,二者与施工控制结合共同完成结构的几何线形控制与施工期安全监测。结构施工几何形态控制的目的是为使桥梁在完成一系列的步骤和所有恒载作用下的最后目标几何线形能够满足要求。形态测量是充分发挥现代测绘新技术的优势,指导施工快速、准确完成各结构部位的定位与竣工测量。

施工期监测的目的是为了保证施工质量和施工安全,随时观测因基础变位、结构自重、混凝土收缩、徐变、温差、风力、振动等因素引起的偏移及变形规律,为施工控制提供计算数据,为实时精密调整提供依据,以保证结构几何形状及空间位置符合设计及规范要求。特别是在索塔浇筑过程中,随着施工高度增加,塔体受到施工临时荷载、日照、风力等的作用会逐渐增大,周日变形日趋严重,风振效应也更为显著,给施工测量安装、定位工作增加难度,也必然增加索塔的几何状态控制难度,所以施工时必须考虑或规避这些不利影响,这就需要采用先进的索塔实施监测技术来及时获取这些影响的大小和规律。通过对索塔施工过程进行监测,收集分析控制参数,建立监测模型,分析施工中产生的误差,并将理论计算和实测结果进行分析比较,以预测后续施工的结构几何形状,提出有效的技术措施,调整施工工艺和技术方案,使索塔的建设完全处于有效的控制当中。此外,在钢箱梁的精密安装定位中,精确测定索塔的状态,掌握其变形规律,对缆索的应力调整、塔柱几何形状及空间位置的控制、确保大桥设计的桥形曲线及随后的长期安全运行,均有重要的指导意义。当日照温差和风力使索塔或钢箱梁摆幅较大时,应暂停索塔、钢箱梁安装施工测量作业,进行连续动态监测以保证施工质量和施工安全。

1.2.1 索塔形态测量技术

近年来,随着大型桥梁的修建,在索塔形态测控方面也积累了一些经验。索塔

形态的测控从定位类型考虑可以分为平面位置定位与垂直位置(高程)定位,因此索塔的形态测控方法与技术也基于平面位置放样与高程传递这两方面考虑。南京二桥 195m 的索塔施工综合采用了全站仪极坐标法、三角高程测量技术,取得了较好的效果。润扬大桥索塔施工采用全站仪三维坐标法(极坐标加三角高程),索道管高程定位采用三角高程法。江阴大桥结合南、北塔的施工条件,分别采用天顶方向法与全站仪三维坐标法。番禺大桥索塔施工测量采用全站仪或经纬仪+测距仪的极坐标放样方法。南京三桥钢索塔的拼装与定位采用建立精密专用控制网的方法,使用全站仪极坐标法进行平面定位,高程传递采用悬挂钢尺法及精密三角高程法。归纳起来对于索塔的形态测控主要有天顶方向法、全站仪三维坐标法、三角高程传递技术。各种测量技术与方法因适用条件不同,在实施过程中将需要解决不同的技术问题,如天顶方向法除了要分析本身的精度、外界环境的影响,还应考虑微型控制网的建立问题,仪器与测量人员的安全问题;全站仪三维坐标法同样除了考虑大高度角的三维坐标精度情况,还应解决测站的优化布置问题。三角高程是获取三维坐标中的一维数据的重要方法,也是实现高程传递最简易的方法,但由于受大气折光严重,必须考虑大气折光的影响问题,这也是三角高程测量过程中一项重要的研究内容。大气折光问题一直是测绘界的一个难题,究其原因是大气时空分布的复杂性与随机性,导致不同的局部区域、不同的时间段大气折光影响不同。以上几座桥梁在施工过程中根据桥位区的自然环境、条件,采取了不同的手段与方法减弱大气折光的影响。苏通大桥由于地理位置的差别,特别是主塔距岸太远、索塔高等原因,必须研究合宜的技术与方法解决这一难题。

悬挂钢尺进行高程传递一直是高耸建筑物施工的主要方法之一,也是三角高程测量方法的一种检核方法,但对悬挂高度、条件都有一定的限制,操作起来比较复杂,而且钢尺必须悬挂重锤、保持稳定等。而由于苏通大桥区域的多风、风大以及塔高等因素的影响,不适宜采用这种方法。考虑到全站仪精度高、使用方便等特点,提出全站仪竖直高程传递技术,作为三角高程测量的补充和检核。

目前已建成的索塔多采用常规的测量方法直接进行测量放样,但随着索塔高度的增加,受环境因素影响越来越大,如天气影响,夜间以及高空作业难度大,施工环境受干扰严重,而且实时性较差,采用常规测量方法有一定限制,因此必须不断引进与研究适合高索塔结构形态测控的技术,将测绘技术与方法有机集成,充分发挥常规测量方法与现代测量新技术(测量机器人、GPS 技术)的优势,解决大跨度桥梁高塔柱的形态测控、动态变形监测等关键性问题。

1.2.2 索塔变形监测技术

建筑物在修建与营运过程中由于自重、混凝土收缩、徐变、温差、风力、振动等因素的影响会产生位移、沉降、倾斜、挠曲等变形。对于桥梁索塔,产生变形的原因

可以归纳为如下几点:

(1) 荷载的作用。静载主要是建筑物的自身重量,在地质条件 and 环境因素影响下,可能产生不均匀沉降,使建筑物倾斜或扭转;动载主要包括机械震动、地震效应等。

(2) 自然条件及其变化。受大气温度(日温、年温)、水位变化、潮汐等影响,桥梁以一定频率做周期性的缩胀和挠曲;风力引起桥梁振动。

(3) 风对桥梁的作用。风的作用是一个十分复杂的现象,受风的自然特性、结构的动力性能以及风与结构的相互作用三方面的制约,使风致振动与变形也十分复杂。

(4) 基础地质条件。由于结构体底部及周围的地质土体、岩石等物理性质差异及变化,引起了基础承载力发生变化,致使桥梁发生变形。

(5) 偶尔撞击,气候突变,材料老化,勘测、设计、施工、营运不合理。

这种变形随结构、地理位置、基础地质条件不同在周期、大小上呈现明显差异,例如通过对前苏联修建的高 533m 的奥斯塔基电视塔塔顶位移进行变形观测,发现电视塔按接近于二次抛物线的曲线弯曲,由于风力、风向、风速、阳光辐射作用,塔顶轴线一侧位移最大值达 2.5m,这种变化不但具有周日变化规律,而且有随年温变化的规律。日照产生的周日变形主要产生因素是结构向阳面与背阳面温差引起的伸缩变形。试验得知:一根 20m 高的细长混凝土立柱,若柱顶温差在 10°C 时,引起柱顶的水平位移高达 50mm 以上。同时,高耸建筑物在强风下会产生水平位移,属静力作用,是长周期。另外还产生振动振幅,属动力作用,其自振周期短。长周期一般在 10min 以上,位移可达几厘米到十几厘米。自振周期短是指零点几秒到四五秒的时间内,振幅从几毫米到几厘米。可见,这些变形远远超过施工测量的精度要求,必须在施工过程中加以考虑;如果变形超过设计要求将严重影响建筑物的安全,因此为了确保索塔的施工质量与安全,必须对其进行全面有效的变形监测。

索塔的变形可以通过监测点的三维坐标变化来反映,常用的技术方法有常规测量法、精密天顶基准法、埋设传感器法、GPS 法等。

1.2.2.1 常规变形监测法

常规变形监测方法主要指用常规测量仪器(经纬仪、测距仪、普通全站仪等)来测量监测点角度、边长和高程的变化,是变形观测的主要手段之一,一般在普通工程中应用较多。但是,常规的测量方法外业工作量大,作业时间长,不易于实现连续监测和测量过程的自动化。前方交会法、全站仪三维坐标法是监测索塔因日照、温度、风力等因素作用而产生周日变形的常用方法,这种方法在工作效率、自动化程度等方面逐渐不能适应现代化施工的需要。测量机器人、GPS 技术的出现为解