



■ 陈跃 房锐 张瑾 著 ■

索鞍无预偏施工钢混叠合梁 悬索桥 施工控制技术



NLIC2970800403



人民交通出版社
China Communications Press

Suoan Wuyupian Shigong Ganghun Dieheliang
索鞍无预偏施工钢混叠合梁
Xuansuoqiao Shigong Kongzhi Jishu
悬索桥施工控制技术

陈 跃 房 锐 张 瑾 著



NLIC2970800403

人民交通出版社

内 容 提 要

本文针对索鞍无预偏施工悬索桥的特点,从索鞍安装时就将主索鞍与塔柱中心固定不动,施工中通过张拉锚跨索股进行结构受力调整。从悬索桥的施工过程模拟分析入手,建立能够准确描述索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥结构的有限元计算模型,对索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥的施工阶段及成桥状态进行模拟分析,结合云南省祥临公路澜沧江索鞍无预偏施工钢混叠合加劲梁悬索桥的施工控制技术进行深入分析,探讨此类悬索桥施工监测、施工控制技术。

图书在版编目(CIP)数据

索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制技术/
陈跃,房锐,张瑾著. --北京:人民交通出版社,2012.5
ISBN 978-7-114-09807-9

I. ①索… II. ①陈…②房…③张… III. ①型钢混
凝土—叠合梁—悬索桥—桥梁施工—安全控制技术 IV.
①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 098257 号

书 名: 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制技术

著 者: 陈 跃 房 锐 张 瑾

责任编辑: 任雪莲

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 9

字 数: 224 千

版 次: 2012 年 5 月 第 1 版

印 次: 2012 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09807-9

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

根据悬索桥的结构特点及发展情况,目前国内外在悬索桥的施工方法及设计上较多采用的是通过设置主索鞍的预偏量来平衡施工中的中边跨主缆水平力,保证索塔受力安全,施工过程中视索塔的受力及主缆不平衡力的大小向中跨分阶段顶推索鞍。本书针对索鞍无预偏施工悬索桥的特点,从索鞍安装时就将主索鞍与塔柱中心固定不动,施工中通过张拉锚跨索股进行结构受力调整。这种方法在国内悬索桥的施工中未见先例。本书从悬索桥的施工过程模拟分析入手,建立能够准确描述索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥结构的空缆计算模型,对索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥的施工阶段及成桥状态进行模拟分析,结合云南省祥临公路澜沧江索鞍无预偏施工钢混叠合加劲梁悬索桥主梁节段模型风洞试验研究成果,对施工阶段抗风稳定性进行了控制分析,在此基础上对索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥的施工控制进行深入研究,特别对影响悬索桥施工控制的因素、误差、参数识别及索鞍无预偏施工悬索桥锚跨索股张拉纠偏索塔施工控制进行了详细分析,探索此类悬索桥施工监测、控制分析方法。本书主要内容归纳起来主要有:

(1) 悬索桥结构分析、设计与实际施工情况的差异如何调整,如何分析它们之间的误差、参数识别,以及影响悬索桥施工控制的因素等;分析并提出解决的方法。

(2) 建立适合于索鞍无预偏施工悬索桥模拟分析和施工控制的空缆计算模型。所建模型能够描述悬索桥各施工阶段的结构形式、工况荷载、边界约束条件,加入实际的计算参数,以准确地计算各施工阶段的内力和变形。

(3) 研究有限位移理论和解析理论用于此类悬索桥施工控制计算的应用,在此基础上,提出施工控制计算的新思路。重点研究了主缆的力学特点,结构计算模型的选取修正,包括全桥结构计算模型,索单元的处理,前进、倒装计算,锚跨索股张拉与控制分析,张拉过程的模拟等。

(4) 通过与有索鞍预偏施工方法对比,定义了此类施工方法对应的空缆状态及该状态下的空缆线形计算方法;对猫道、主缆索股线形施工控制进行了研究。

(5) 结合云南省祥临公路澜沧江索鞍无预偏施工钢混叠合加劲梁悬索桥主梁节段模型风洞试验研究结果,重点对实桥位风场特性、结构动力特性、全桥静风稳定性、结构风载内力、成桥状态、施工阶段结构抗风稳定性进行了分析。

(6) 研究了此类施工方法下锚跨索股张拉纠偏索塔施工控制,高温下锚跨索股张力合理控制值,锚跨索股张拉时段、张拉量与张力监测。

实桥的风洞实验是依托西南交通大学风工程实验研究中心完成的,在此向老师们表示衷心感谢。

在研究过程中,得到了长安大学公路学院桥梁系(所)的博导、教授们的关怀和帮助,得到了祥临指挥部、云南省公路规划设计院、长安大学大桥监控组、中铁四局等单位的同志们给予

的大力支持,在此一并表示感谢。

最后,衷心感谢家人在研究期间给予的理解与支持。

限于作者的理论水平和实践经验有限,书中难免存在不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 3 月

目 录

1 绪论	1
1.1 现代悬索桥发展	1
1.2 悬索桥结构分析理论的演化与发展	2
1.3 悬索桥施工控制系统与方法	4
1.4 当前悬索桥的重点研究问题及发展前景	12
1.5 本书主要研究的内容	13
2 悬索桥施工控制中影响因素、误差分析和参数识别	16
2.1 影响悬索桥施工控制的因素	16
2.2 悬索桥施工控制误差分析	18
2.3 悬索桥施工控制参数识别	22
2.4 悬索桥施工过程中施工管理的重要性	25
2.5 小结	26
3 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥受力特征与结构分析理论	27
3.1 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥的结构与受力特征	27
3.2 悬索桥结构分析的解析计算理论	30
3.3 有限位移理论几何非线性有限元的分析过程	35
3.4 有限位移理论进行施工控制分析时解的延续性和可逆性	43
3.5 悬索桥施工控制中温度场作用下近似数值分析理论	45
3.6 小结	49
4 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制抗风分析	50
4.1 概述	50
4.2 实桥位风场特性计算分析	52
4.3 结构动力特性计算分析	58
4.4 模型风洞实验研究	61
4.5 全桥静风稳定性计算分析	78
4.6 结构风载内力计算分析	80
4.7 小结	82
5 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制	83
5.1 索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工监测	83
5.2 悬索桥施工过程模拟、施工控制结构分析	90
5.3 猫道的施工控制	99
5.4 主缆索股安装与调整控制	102
5.5 钢混叠合梁施工控制	103

5.6 小结	105
6 索鞍无预偏施工悬索桥锚跨索股张拉纠偏索塔施工控制	106
6.1 主塔的稳定变形控制	106
6.2 锚跨索股张拉与索塔纠偏控制分析	107
6.3 高温下锚跨索股张力合理控制值分析	112
6.4 小结	114
7 实桥施工控制	115
7.1 工程概况	115
7.2 施工监测控制结果	116
7.3 施工控制体系与控制建议	125
7.4 小结	126
8 结论与建议	127
附录 A 成桥状态各阶振型	129
附录 B 颤振导数曲线	131
参考文献	134

1 绪 论

1.1 现代悬索桥发展

悬索桥,又名吊桥,是一种古老的桥型。其以独特的曲线美和跨越能力而赢得越来越高的重视。早在远古时代,我们的祖先就开始用藤条和竹子编制简单的人行吊桥,到公元前 50 年,我国四川出现了跨长百米的铁索吊桥,这比西方国家要早近 1800 年。在此后漫长的封建社会里,随着冶炼技术的进步,铁索桥的建设在我国曾经不胜枚举,因此在很长一段时间内,中国的铁索桥建筑技术远比西方国家先进。

但进入 19 世纪后,随着资本主义革命的胜利,西方在政治、经济、文化与科技方面发展突飞猛进。1808 年,英国建成 Finley 悬索桥,该桥除了使用铁链制成的铁索外,还用到吊杆悬吊水平桥面即加劲梁,从而第一次出现了近代悬索桥的雏形。之后,英国开始尝试采用眼杆(Eyebars)制作主索,并分别于 1826 年与 1864 年建成跨径达 177m 的 Menai Strait 桥与 214m 的 Clifton 桥。1816 年,法国工程师率先发明了用钢丝制成悬索桥主缆的方法,并提出用无端索进行主缆施工的理念,从而揭开了现代悬索桥发展的序幕。利用钢丝和钢绞线乃至后来出现的高强钢丝等现代钢材制造的承重缆索开始在悬索桥中得以广泛应用,在材料不断革新的同时,悬索桥的施工工艺特别是主缆施工工艺也在不断改进。1855 年,美国的 John. A. Roebling 首创“空中纺缆”的方法(AS 法)来架设平行钢丝主缆,并在尼亚加拉峡谷上建成跨度达 250m 的公路铁路两用悬索桥。到 1883 年,美国在纽约伊斯特河上建成的 Brooklyn 桥主跨跨度已达 486m。在此后的多年里,悬索桥的主缆施工基本都采用了这种方法。而即使在今天,这一方法仍然有其用武之地。悬索桥主缆施工工艺的另一次重大创新是在 1957 年,美国的麦基纳克桥首次采用预制平行钢丝索股逐根架设施工方法(PPWS 法)进行主缆施工,并在此后得到大量推广,而且逐渐成为一种主流方法。尤其是在日本,其从 1969 年以后建成的长大悬索桥,除平户大桥与下津井獭户桥以外几乎全部采用这一方法。到目前为止,采用这一方法施工的悬索桥的最大跨径已达 1 990m(日本明石海峡大桥)。

如果仅有材料的革新与施工工艺的改进,并不足以代表推动悬索桥发展的全部动力,实际上其中一个更为重要的原因是,人们对这一桥型结构行为与力学特性认识的不断加深。1940 年 11 月 7 日刚刚建成通车 3 个月的塔科马老桥由于加劲梁断面抗风稳定性差,在 19m/s 风速下被毁。20 世纪 50 年代兴起的风洞实验使悬索桥风致振动理论有了长足的进步。在这一过程中,曾先后产生了弹性理论、挠度理论与有限位移理论等。可以说,悬索桥本身的发展与其计算分析理论的不完善是密不可分的。随着结构计算分析手段的提高,特别是近年来计算机的应用与有限元技术的发展,施工控制技术不断提高,人们对这一特殊结构的认识也更为透彻。在设计上,现代悬索桥的跨径向越来越大的方向发展,目前建成通车的最大跨径为 1 991m,同时 5 000m 跨径的悬索桥也在规划研究之中。加劲梁的高跨比正向越来越小的方向

发展(从 1/30 下降到 1/40)。主缆等主要承重构件的安全系数取值越来越小(从 4.0 下降到 2.0),采用较小的矢跨比增大了主缆的重力刚度。高强钢丝强度的进一步提高使悬索桥跨径的增大成为可能,同时也必将把悬索桥建设推向一个新的高度。

由于历史等方面的原因,现代悬索桥在我国出现相对较晚,但近年来发展势头迅猛。1995 年我国建成第一座现代化悬索桥——广东汕头海湾大桥。它采用预应力混凝土加劲梁,主跨长 452m,为世界同类桥梁之最。之后我国又相继建成主跨 888m 的广东虎门大桥、主跨 900m 的西陵长江大桥,已建成的江阴长江大桥其跨度已达 1 385m,润扬长江大桥其跨度已达 1 490m,居世界前列。不难想象,随着我国经济与交通运输事业的发展,悬索桥在中国大地上必将焕发出愈来愈夺目的光彩。

表 1-1 所列世界各国主跨度大于 1 000m 的悬索桥的一些统计资料。

世界大跨度悬索桥一览表				表 1-1
序 号	桥 名	所 处 国 家	主跨跨度(m)	建成时间(年)
1	明石海峡大桥	日本	1 991	1998
2	大贝特东桥	丹麦	1 624	1998
3	润扬长江大桥	中国	1 490	2005
4	恒伯尔大桥	英国	1 410	1981
5	江阴长江大桥	中国	1 385	1999
6	香港青马大桥	中国	1 377	1998
7	维拉扎诺桥	美国	1 298	1964
8	金门大桥	美国	1 280	1937
9	高海岸桥	瑞典	1 210	1997
10	麦基纳克桥	美国	1 158	1957
11	南备赞大桥	日本	1 100	1988
12	博斯普鲁斯二桥	土耳其	1 090	1988
13	博斯普鲁斯一桥	土耳其	1 074	1973
14	乔治·华盛顿桥	美国	1 067	1931
15	来岛二桥	日本	1 020	1999
16	来岛三桥	日本	1 030	1999
17	4 月 25 日桥	葡萄牙	1 013	1966
18	福斯公路桥	英国	1 006	1964

1.2 悬索桥结构分析理论的演化与发展

在悬索桥结构计算理论的发展史上,其结构分析理论从无到有经历了弹性理论、挠度理论、有限位移理论的演变。一般的研究文献都会提及这三种理论。现代悬索桥的发展与其计算理论的发展以及人们对这一结构力学特性了解的深入程度是密不可分的。

1.2.1 弹性理论

在 19 世纪以前,针对悬索桥还没有任何力学分析方法。直到 1823 年,法国的 Navier 才总结发表了无加劲梁悬索桥弹性计算理论。到 1858 年,英国的 Rankine 提出有加劲梁悬索桥弹

性计算理论,此后 Levy 等人也作了一些有益的尝试,并最终由 Steinman 整理成惯用的标准形式。

弹性理论是一种将悬索桥作为主缆与加劲梁结合体的计算理论,是建立于超静定结构分析方法基础上的一种方法。它认为缆索承受自重及全部桥面恒载,其几何形状为二次抛物线,并且这一线形不因后来作用于桥面上的外荷载而变化。由于该理论没有考虑缆索中的初始拉力对后续变形的抵抗能力,即通常所说悬索桥的重力刚度,从而忽略了缆索拉力的非线性性质。另外也没有考虑结构大位移的非线性影响。所以,按弹性理论计算出来的控制内力与位移总是偏大,这对设计来说是偏于安全的,但却不可避免地造成材料的浪费,这种情况在加劲梁愈柔时表现愈显著。对于早期修建的悬索桥,由于桥跨小,梁有足够的刚度,且恒载相对活载较大,这种效应并不明显。

1.2.2 挠度理论

随着桥梁跨度的增加,梁的刚度相对变小,活载产生的变形对于结构力的平衡的影响变得不可忽略。在 19 世纪上半叶,人们已逐渐认识到这个问题,但直到 1862 年,才由一个佚名的学者提出无加劲梁悬索桥的挠度理论。1888 年,奥地利的 Melan 教授在此基础上提出了有加劲梁的挠度理论,并在 1906 年作了改进。而建桥史上第一次将 Melan 的挠度理论付诸实施的是 L. S. Moiseif 在纽约曼哈顿桥的设计中,该桥于 1909 年建成。以后美国在实践中逐渐积累了经验,这些经验加上对 Melan 著作的翻译、整理和总结,使 D. B. Steinman 得以发展挠度理论并使其可以应用于带边跨的悬索桥。挠度理论考虑了恒、活载产生的缆索拉力的二次非线性影响,索的平衡是建立在变形之后的位置上的,平衡方程是一个四阶非线性微分方程。为了使方程解析化,该理论将离散的吊杆化为一连续介质——膜,所以挠度理论又叫膜理论。当然,它也略去了一些次要因素,如吊杆倾斜和伸长、缆索和加劲梁的纵向位移等。即便如此,求解这个非线性微分方程还是很复杂的。各国学者又相继提出了一些实用的简化解法。如针对恒、活载比值较大的特点,Godard 提出了线性挠度理论,该理论仅考虑恒载产生的缆索拉力对活载产生竖向位移的抵抗作用。在此基础上,我国的李国豪教授于 1941 年提出等代梁法,将悬索桥缆索恒载拉力产生的非线性行为转化为将缆索拉力作用于加劲梁端产生的梁柱效应来分析;另外,他还提出了奇异影响线概念,即在某一特定缆索水平力 H 作用下主梁内力影响线,从而解决了利用影响线确定最不利荷载位置的问题。在此之后,West 和 Robinson 在考虑缆索纵向位移和吊杆伸长的基础上提出了近代膜理论。但它仍未计入吊杆倾斜和加劲梁纵向位移的影响,并且计算繁琐,因此,应用并不理想。尽管如此,由于挠度理论力学概念明晰,并且能揭示悬索桥力学本质及非线性的主要来源,在计算机普及的今天,对悬索桥的理论分析仍有其指导意义。挠度理论与弹性理论相比,考虑原有荷载(如恒载)已产生的主缆轴力对新的荷载(如活载)产生的竖向变形(挠度)将产生一种新的抗力。这就是说,这种计算理论是在变形之后再考虑内力的平衡,比弹性理论计算思想有明显的进步,但仍采用了较多不符合实际的假设,如

- (1) 结构恒载沿桥梁纵向是均匀分布的;
- (2) 假设竖向吊索为沿跨径分布的一张膜;
- (3) 在恒载作用下主梁处于无应力状态;
- (4) 忽略加劲梁纵向变形,只考虑其竖向挠度变化。

在继承挠度理论将悬索桥看作为由承受轴向拉力的主缆与承受竖向弯矩的加劲梁所组合

的结构体系的基础上,将作用于主缆及加劲梁中的内力从纵向连续分布修正为分散作用于各吊索与主缆的节点上,使之精度有所提高,这种修正将原来以单一计算式来表达连续分布的平衡式,修正为分散在各个节点处的 n 个平衡式(n 为吊索与主缆的节点个数),要求在每个节点处都建立一个能满足其自身条件的平衡式。

1.2.3 有限位移理论

随着现代悬索桥跨度的不断增大,其加劲梁刚度相对减小,高跨比小于 $1/30$ 时,采用线性挠度理论引起的误差变得不容忽略。除计算误差外,挠度理论不便于计算机运算,并且对斜吊杆悬索桥的分析更显不足。正是在这种情况下,1963 年出现的有限位移理论,使分析工作摆脱了这一困境。1966 年,几位美国学者相继提出了基于此理论的数值解法和有限元分析技术。比如 Sannfan 在计入初始轴力和大位移影响,同时还计入初始弯矩、剪力及轴力—弯矩相互作用等因素产生的二次效应的基础上,推导出非线性情况下的切线刚度矩阵,并由此建立了构架大位移理论。而 Poskitt 则引入 Newton-Raphson 法来求解非线性方程组。1973 年,C. Oran 系统地研究了二维及三维单元的切线刚度矩阵。这些研究使悬索桥的计算框架逐渐形成。1979 年,Fleming 将稳定函数与动坐标法引入计算,并改进了 Newton-Raphson 迭代算法,使之与荷载增量法相结合,提高了计算的精度和收敛速度。之后,他又正式将理论程序化,虽然还不能直接应用于设计,但已向工程应用迈出了一大步。1985 年以后,理论研究迈向更精确,如 S. G. Araoumanidis 利用各种空间非线性或线性单元,包括杆单元、梁单元、板单元等,来模拟悬索桥结构,从而使悬索桥的空间结构分析变得可能。应用有限位移理论的有限单元法,可综合考虑体系节点位移影响,轴力效应,把悬索桥结构分析方法统一到一般非线性有限元法之中,是目前比较有效的分析方法之一。总之,随着现代计算机和有限元技术的不断发展,对悬索桥的结构分析将日趋精确与完善。

可以从结构刚度方程中刚度矩阵所包含的内容来表示以上各种理论的实质与区别:

对于弹性理论, $[K] = [K]_e$, 此时方程是线性的;

对于线性挠度理论, $[K] = [K]_e + [K(\{N\})]_s$;

对于有限位移理论, $[K] = [K]_e + [K(\{R\})]_s + [K(\{\delta\})]_L$;

其中, $[K]_e$, $[K]_s$, $[K]_L$ 分别为结构的弹性、几何、大位移刚度矩阵。 $\{N\}$ 、 $\{R\}$ 、 $\{\delta\}$ 分别表示恒载轴力向量、恒活载内力(包括轴力与弯矩)向量和节点位移向量。

以上各种理论的演变对比见表 1-2。

理论演变对比

表 1-2

理论演化	适用的悬索桥	理论的对比	主缆受力处理
弹性理论	小跨度悬索桥梁的刚度较大时	小变形理论	不计主缆的初始轴力
挠度理论	大跨度悬索桥竖直吊索	有限变形理论	主缆拉力的水平分力为定值
有限位移理论	大跨度悬索桥任意形状	有限变形大变形理论	主缆拉力在水平方向有变化

1.3 悬索桥施工控制系统与方法

1.3.1 施工控制技术

桥梁施工控制就是对桥梁施工过程中结构的受力、变形及稳定进行监控,使施工中的结构

处于最优状态,保证施工过程中安全和成桥状态(包括内力和线形状态)符合设计、规范要求。施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。施工控制在施工技术中以往未被重视的原因是,由于过去所建桥梁一般跨径不大、规模较小、影响因素相对较少等,因为施工控制不力而产生的不良后果也就不明显,从而使人们忽视了它的重要性。事实上,任何桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,都是一个系统工程。在该系统中,设计图只是目标蓝图,而在自开工到竣工整个为实现设计蓝图而必须经历的过程中,将受到许许多多确定和不确定因素(误差)的影响,包括设计计算、材料性能、施工精度、荷载、大气温度等诸多方面在理想状态与实际状态之间存在的差异。施工中,如何从各种假定、误差影响而失真的参数中找出相对真实之值,对施工状态进行实时识别(监测)、调整(纠偏)、预测,对设计蓝图的实现是至关重要的。上述工作一般需以现代控制论为理论基础来进行,所以称之为施工控制。

由于国外在桥梁施工控制技术方面的研究和应用起步较早,众多发达国家已将施工控制纳入常规施工管理工作中,控制方法已从人工测量、分析与预报,发展到自动监控、分析预报、调整的计算机自动控制,并已形成了较完善的桥梁施工控制系统。即便如此,国外对桥梁施工控制技术的研究还在继续,这是由于影响桥梁施工的因素太多、太复杂,同时,不断涌现的、新型的、规模(跨径)更大的桥梁工程也对桥梁施工控制提出了更高的要求。

国内在桥梁施工控制技术方面的研究与应用起步较晚,自20世纪80年代以后,虽在桥梁施工中已注意到结构应力调整和预拱度的设置,但并未将系统控制概念引入。在以后的研究中,主要集中在斜拉桥上,在20世纪90年代中后期,对桥梁施工控制的研究才逐渐在悬索桥上展开和应用。比较起来,我国在该领域的研究与西方国家比还有差距,主要表现在对桥梁施工控制的理论与实践研究还不够,监测手段落后,对影响施工控制的因素研究不透,预测和判断精度不高,还未建立起一套完善的施工控制技术系统和组织管理系统。因此,深入研究桥梁施工控制理论,研制更加合理、实用的控制软件以及更加方便、精确的监测设备,建立完善的桥梁施工控制技术系统和组织管理系统是今后桥梁建设事业发展迫切需要进行的工作。

悬索桥施工控制的重点和特点是由其施工的技术要点和特点决定的。考虑到主缆架设完毕后,桥梁线形很难作大的调整,所以悬索桥的施工控制以先期控制为主,在悬索桥施工前根据各种参数对悬索桥线形进行预先计算,并由此指导主缆架设施工。确定主缆的空缆线形等先期控制是悬索桥施工控制的重点和特点。悬索桥施工控制的目标是使成桥线形和内力满足设计要求,悬索桥结构为缆索承载结构,全桥所受绝大多数恒载和活载最终通过主缆传递到桥塔和锚碇,而主缆线形较小的变化将会引起全桥的线形和受力大的变化,一旦悬索桥恒载确定了,影响成桥主缆线形变化的将主要是空缆时的线形。控制好空缆线形也就成为悬索桥施工控制的重中之重。同时,对于全桥受力有影响的构件,都是悬索桥施工控制的重点。锚碇的质量直接关系着悬索桥成桥后的受力安全,是悬索桥结构安全的最基本保障。由于悬索桥桥塔主要承受主缆传递的竖向压力,施工过程中来自主缆传递的恒载、施工荷载等不平衡水平力,桥塔的受力安全同样也关系到全桥的安全,但桥塔受力的危险期不在运营阶段,而是大桥施工阶段,这要求监控人员在施工过程中注意桥塔内力及塔顶位移的变化控制。对于索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥,通过锚跨索股张拉纠偏塔顶位移的变化控制更是施工控制的关键。加劲梁有钢箱梁、预应力混凝土加劲梁,还有本书研究的钢混叠合加劲梁等。对加劲梁的重量准确控制也是关键,由于加劲梁的重量直接对主缆线形和加劲梁高程有直接影响,一旦需要调整的高程量超过吊索所能达到的微调量,可能会对运营阶段的大桥受力造成不利的影响;索夹位置关系到主缆所受外力位置,将直接影响到主缆的线形和内力;施工中的索吊系统是加劲梁

吊装的主要机具,关系到吊装的安全,会直接影响到施工的安全和进度。

以上所提到的因素都是悬索桥施工控制的重点,也是悬索桥施工控制是否满足要求的标志,需要认真控制。悬索桥主缆架设完毕后,再对其调整是非常困难的事情,这就决定对悬索桥的施工控制重点应放在前期,对主缆空缆线形的前期控制是建立在前期计算的基础上,在施工进行之前对结构模拟计算就成了悬索桥施工控制的主要工作之一。对主缆空缆进行放样是对悬索桥施工控制实施的关键一步,一旦主缆线形确定后,对全桥线形调整就只能是微幅调整了。因此,对悬索桥的施工控制工作主要是放在前期,这也是悬索桥施工控制的最大的特点之一。施工控制又是悬索桥建设的安全保证。为避免突发事件的出现,按期、安全地建成一座桥梁,施工控制是有力的保证。换句话说,桥梁施工控制系统也就是桥梁建设的安全系统。

1.3.2 悬索桥施工控制的必要性

现代悬索桥以其良好的结构性能和跨越能力以及优美的建筑造型在现代桥梁结构中占据重要的地位。现代结构分析理论、高强新材料、计算技术以及施工技术的进步,使悬索桥在近50年间迅速发展,最大跨径记录一再被刷新。悬索桥跨径的增大,又使得大跨径悬索桥的施工控制理论和技术成为竞相研究的重要课题。因为悬索桥属高次超静定结构,所采用的施工方法和安装顺序与成桥后的主梁线型和结构恒载内力有着密切的关系,且在施工阶段随着悬索桥结构体系和荷载工况的不断变化,结构内力和变形也随之不断发生变化,并决定成桥后结构的受力及线型。因此必须对悬索桥的每一施工阶段进行详尽的分析和验算,求得缆索的张力、主梁高程、塔柱位移以及结构内力等施工控制参数的理论计算值,对施工的顺序作出明确的规定,并在施工中加以有效的控制和施工管理。只有这样,才能确保悬索桥在施工过程中结构的受力状态和变形始终在设计所要求的合理范围内,成桥后的主梁的几何线型符合设计期望,结构本身又处于最优的受力状态。这就是各种类型的悬索桥在建造过程中都必须解决的一个重要课题,即悬索桥的施工控制问题。可以说悬索桥的施工控制是保证悬索桥成功修建的必要条件之一,特别是未来的悬索桥跨度更大,结构更纤细、轻薄,给施工带来的难度更大。

施工控制系统不仅是建桥中的安全系统,也是桥梁运营中安全性和耐久性的综合监测系统。随着交通事业的发展,荷载等级、交通流量、行车速度等必然提高,还有一些不可预测的自然破坏力也会危及桥梁的安全,若在桥梁建设时进行施工控制,并预留长期观测点,将会给桥梁创造终身安全监测条件,从而给桥梁安全提供可靠保证。随着现代悬索桥技术的进步,悬索桥的施工方法也在不断的发展,在施工过程中,其特点为:

(1)悬索桥是由刚度相差很大的构件(索塔、主缆、吊索、梁)组成的结构,与其他形式的桥梁相比,具有显著可挠的特点,在整个施工过程中,悬索桥结构的几何形状变化较大。

(2)悬索桥结构几何形状对温度变化非常敏感。

(3)施工各阶段中消除误差比较困难,在悬索桥的施工过程中,主缆一旦施工完毕,是无法调整其长度的,而且吊索的长度也无法像在悬索桥施工中那样通过对悬索的重复张拉进行调整。悬索桥的吊索长度是通过垫片进行微幅调整的。

(4)加劲梁段之间是先上翼缘临时铰接、下翼缘张开,等到加劲梁全部吊装完毕,才把临时铰接变为刚接。在吊梁的某些阶段,颤振失稳的临界风速有可能大大低于成桥状态的临界风速。

(5)悬索桥的吊梁与鞍座顶推(锚跨索股张拉)不是同时进行。在吊梁时,塔根弯矩将不断加大。为了不让塔根应力超限,吊梁到一定的程度,就要释放塔根的弯矩一次。在顶推索鞍

法施工的悬索桥中,做法是用千斤顶调整塔顶鞍座与塔顶之间的相互位置,使塔顶回到原来没有水平位移时的状态;而在张拉锚跨索股施工的悬索桥中,具体做法是循环对称张拉锚跨各个索股,使主塔顶偏位回到安全的位置。

(6)实际施工中,为了减少在恶劣气候条件下现场焊接的工作量,总是希望能一次安装较长的节段,如果一次安装的节段长度太大,则有节段最外侧的吊索超载、加劲梁的弯曲应力超限的危险。

在悬索主缆的施工中可采用空中纺丝法(AS)或预制平行索股法(PPWS)进行架设,采用跨缆吊机或缆索吊机进行加劲梁的安装,预偏主索鞍或张拉锚跨索股进行主塔受力的调整。悬索桥的施工流程一般为:锚碇、主塔→安装主索鞍→导索架设→安装猫道→安装牵引系统及导向滚轮→采用预制平行索股法(PPWS)架设主缆→紧缆→安装索夹→猫道体系转换→安装吊索→吊装加劲梁节段→加劲梁节段的现场焊接→桥面系施工→主缆缠丝防护→塔顶建筑及钢箱梁表面涂装→拆除猫道→成桥。

悬索桥是非线性行为表现较为突出的桥型之一,施工中的桥梁是几何可变体系,结构变形大,内力变化大,随着其跨径的不断增大,设计中结构安装思想也在不断更新,结构成桥的真实线型既非抛物线又非悬链线,而是由桥梁在实际荷载下的平衡条件与结构的变形条件共同确定的。悬索桥的这些特点要求在施工时必须精确合理地确定其阶段成桥内力状态与构形,精确分析其在荷载下的响应。大跨度悬索桥的结构线形主要受主缆线形和吊索长度的控制,主缆一旦架设完成,主缆内力、挠度完全取决于结构体系(索鞍、主梁连接情况)、结构自重、施工荷载和温度变化,主缆无应力下料长度,主缆在自重作用下的初始安装位置(主缆初始垂度和线型)成为悬索桥施工控制技术的关键;吊索长度根据主缆完成线形提出,一般也不预留太大的调整长度,如何保证竣工后结构的内力和线形与设计状态一致成了问题的焦点,因而施工过程中的结构模拟分析工作越来越重要。设计图纸中仅给定理想状态下悬索桥竣工后的内力、线型,以及施工方案的总体安排,由于实际采用材料的力学性能存在偏差(如主缆、吊索的弹性模量、重度、混凝土的收缩徐变等),构件制造安装误差,以及计算假定误差等客观因素,都会对悬索桥的内力、线型造成影响。此外,根据设计图纸,精确地计算出各部分构件在无应力状态下的尺寸,以便指导施工时下料工作也是模拟分析工作的重要组成部分。

因此,桥梁施工控制是桥梁建设的安全保证。对大跨悬索桥的施工,开展施工控制分析方面的研究是很有必要的,通过实际检测各施工阶段的主要控制参数,修正计算模型,并通过现场计算分析及预测得出合理的控制措施,用以指导和控制施工,预报桥梁安全,并使各施工阶段的实际状态最大限度地接近理想设计状态,确保成桥后的内力状态和几何线型符合设计要求。当发现实际值与模拟计算值相差过大时,就要进行检查并分析原因,而不能再继续施工,否则将可能出现事故。

1.3.3 悬索桥施工控制系统

影响悬索桥施工控制的因素很多,特别是随着桥梁跨径的不断增大,建设规模也相应增大,施工中所受到的不确定性影响因素也越来越多。要使桥梁施工安全、顺利地向前推进,并保证成桥状态符合设计要求,就必须将其作为一个系统工程予以严格控制,由于桥梁施工控制的实施牵涉到许多方面,所以,必须事先建立完善、有效的控制系统才能达到预期的控制目标。

桥梁施工控制系统的建立及其功能的确定要根据不同的工程施工实际分配考虑,但不论是哪种类型的桥梁施工控制系统,都必须具备管理与控制的功能,即施工控制系统一般应由结

构模拟分析系统、施工控制管理系统、结构状态监测系统、施工现场控制系统、信息反馈系统等组成,而各系统又由多个支系统组成。图 1-1 为桥梁施工控制系统框图。

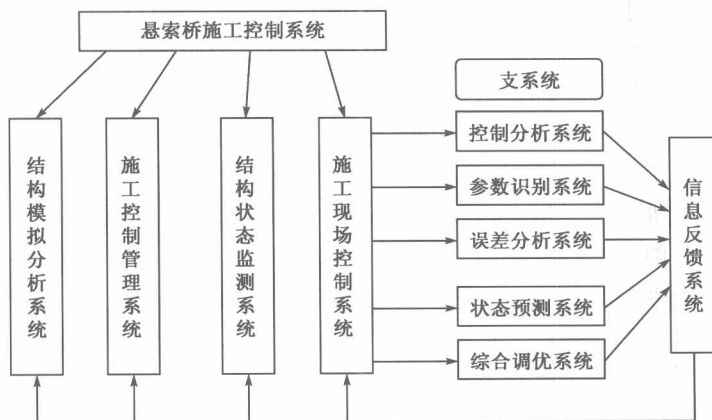


图 1-1 悬索桥桥梁施工控制系统框图

桥梁施工控制本身是一个大的系统工程,必须具备足够的人、财、物以及先进的管理手段,方能使其正常运行。同时,桥梁施工通常要涉及业主、设计、施工、监理、政府监督、施工控制等多个部门与单位,这些单位都将在施工控制中起到不同程度的作用。

控制由于所处地位的特殊性与重要性,往往也是整个桥梁施工的核心。施工控制是多方协作、共同努力的结果。因此,在实施控制前必须首先建立一个完善的控制管理系统和组织机构,要求该系统既有分工负责,又有协同作战,做到上下、左右信息渠道畅通,令行禁止,高效运转。图 1-2 为云南省祥临公路澜沧江索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制与调整的管理情况。

悬索桥施工现场控制系统是施工控制系统的核心,它包含整个施工控制的主要分析过程,具有数据比较、结构当前状态把握、误差分析、参数识别、前进或倒拆仿真分析、未来预测等功能。

在现场施工中,首先将由设计计算确定的各施工阶段的施工控制目标数据送入计算机控制系统,然后在对当前施工阶段完成后的现场监测数据进行判别与“过滤”处理后,将其可靠数据也送入计算机系统,计算机系统则对两方面的数据信息进行分析处理,最后输出有关信息,供施工控制组进行决策时参考。

(1) 施工控制分析系统。

施工控制分析系统必须具有很强的适应性、可操作性和可视性,以满足施工中结构的多变性要求,一般包括:能快速、准确完成多种结构施工模拟分析的软件,它是判别当前结构状态是否与实际相符合,以及对未来状态进行预测的必备工具。所用软件最好能将计算过程中以及计算结果数据转换成几何图形及图像信息,在屏幕上显示出来并进行交互处理,以便输入数据的正误检查模拟显示施工过程中及相应结构内力与变形状态,形象地比较所控制项目的实测值、理论值以及参数的变化,从而指导施工。

(2) 参数识别系统。

参数识别系统包括结构参数敏感性分析和结构参数识别计算分析。前者就是考察各参数对结构状态的影响程度,通过参数敏感性分析,将参数分类,确定出主要参数(对结构状态影响较显

著,呈现活性)和次要参数(对结构状态影响不敏感,呈现惰性),为参数识别打下基础。后者就是对结构参数进行分析、判定与确认。常用的识别方法有最小二乘法、模糊数据法、灰色理论法等。通过参数识别确定出结构参数综合效应真实值,为结构的准确分析提供可靠数据。

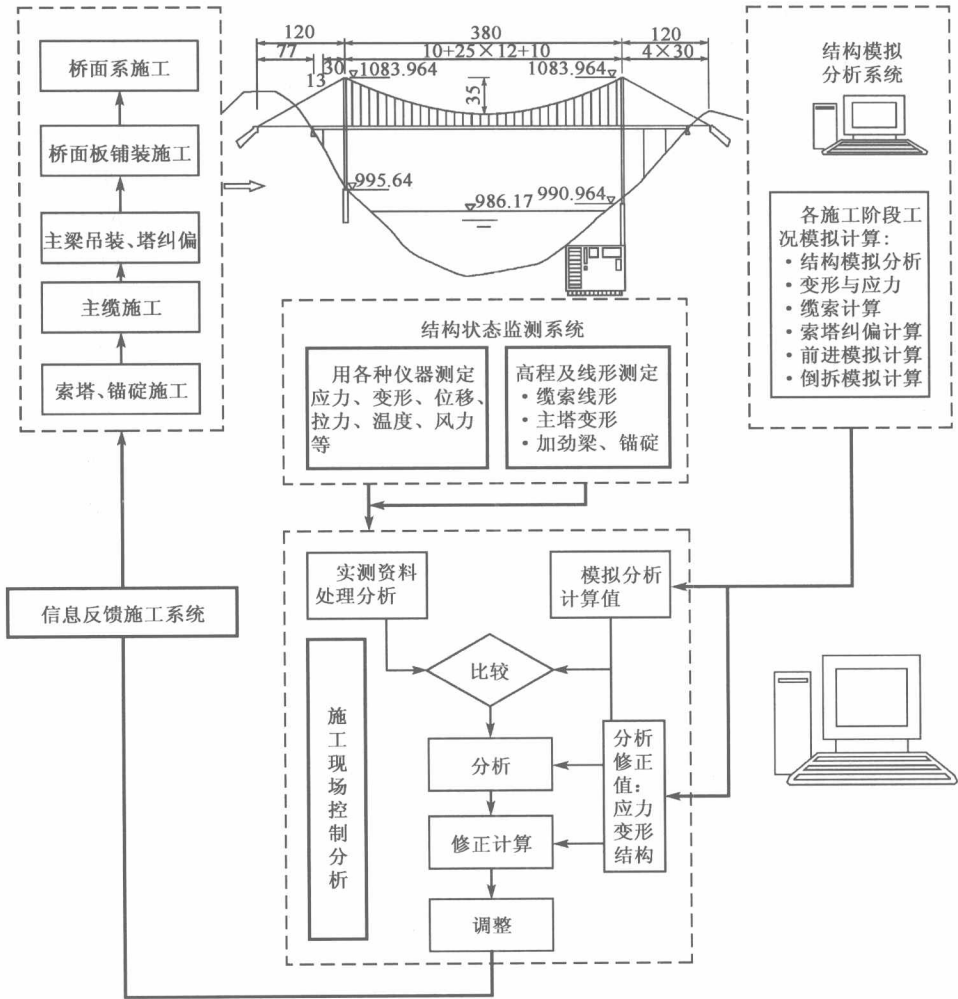


图 1-2 云南祥临公路澜沧江索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥施工控制管理情况

(3) 误差分析系统。

施工中总是存在误差,其中主要包括理论计算假定误差、分析误差与施工误差等,这些误差均将使施工实际偏离理想和控制目标。主要功能是对结构理想状态、实测状态和误差信息进行分析,做出最佳调整方案,使结构施工实际状态、设计理论状态的差值控制在允许范围内。

(4) 状态预测系统。

该系统的功能是在计入结构参数调整修改值、结构初始状态最优估计值、结构施工误差、量测误差等信息后,通过控制模拟分析系统对结构施工状态进行超前预测控制值的确定。

(5) 综合调优系统。

通过修改施工方案,与状态预测系统形成循环,最终输出合理的、可指导下一步施工的建议或措施。

结构状态监测系统包括对结构设计参数进行监测以及对结构状态(包括应力、变形或高程)参数进行量测。主要是控制模拟分析提供合理的基本参数,判断当前施工状态是否与设计(预测)值相符提供结构实际状态参数。

结构变形控制:桥梁结构尺寸的控制是施工控制的基本要求,由于结构在施工过程中要产生变形,加之施工中各种误差的积累,因此没有任何一个结构能达到与设计完全吻合,故要尽量减少实际结构与设计的偏差,并将其降低到设计要求范围之内。

结构应力控制:结构实际应力状态与设计状态不符,应力过大,将会给结构造成危害。因此在桥梁的施工控制中,对结构应力的控制尤为重要。索鞍无预偏施工钢混叠合梁悬索桥的结构应力控制的主要内容是控制施工预应力钢筋、索塔应力和锚跨张拉索股应力的平衡。

结构稳定控制:桥梁的稳定关系到桥梁的安全,因而桥梁施工过程中不仅要严格控制变形和应力,更要严格控制施工各阶段结构构件的局部和整体稳定。目前桥梁的稳定性已引起人们的注意,对桥梁进行结构分析时已开始进行稳定计算,但对施工过程中可能出现的失稳现象还没有可靠的监测手段,尤其是随着桥梁跨径的增大,针对受动荷载和突发情况的影响,还没有快速反应系统。为此,应建立一套全面监控系统,对桥梁进行终身监控,确保桥梁安全施工、安全运营。

总之,施工控制是一个系统工程,牵涉的面很广,要有效实施施工控制,就必须保证在施工控制管理和控制技术上的有效性。所以,在实施施工控制前,建立完善的控制系统和制订实施细则,并在实施中根据实际情况和需要进行调整。

1.3.4 悬索桥施工控制方法

近年来,悬索桥的施工控制已被桥梁工程界所重视,悬索桥施工控制的主要任务是桥梁施工过程的安全控制和桥梁结构线形、变形与内力状态控制,并形成一些实用的控制方法,主要有以下几种方法。

(1)事前预测控制方法:是指在全面考虑影响桥梁结构状态的各种因素和施工所要达到的目标后,对结构的每一个施工阶段(节段)形成前后的状态进行预测,使施工按预定状态进行。由于预测状态与实际状态间免不了有误差存在,某种误差对施工目标的影响则在后续施工状态的预测中予以考虑,以此循环,直到施工完成和获得与设计相符合的结构状态。这是悬索桥施工控制的主要方法。预测控制以现代控制论为理论基础,其常见的预测方法有卡尔曼(Kalman)滤波法、灰色理论法等。图 1-3 为预测控制的基本结构。

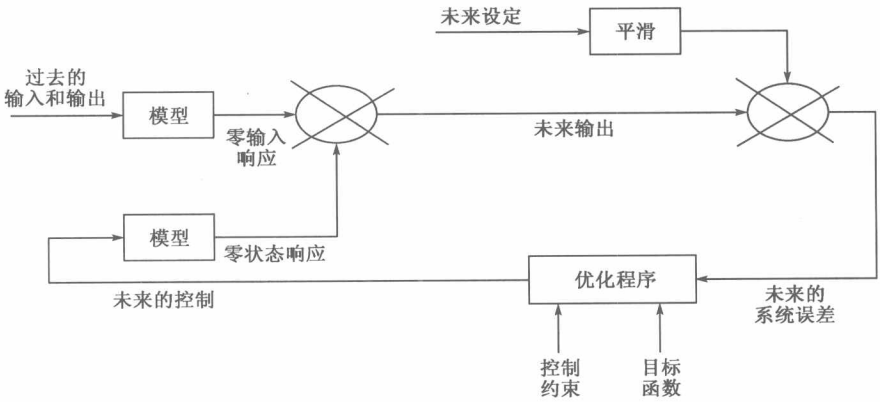


图 1-3 预测控制的基本结构