

李传习 著

现代悬索桥静力非线性 理论与实践

Static Nonlinear Theory and Practice of Modern Suspension Bridge



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

现代悬索桥静力非线性 理论与实践

Static Nonlinear Theory and Practice of Modern Suspension Bridge

李传习 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书以主缆找形的分段悬链线理论和非线性有限元理论为基础,紧密结合世界上第一座独塔混合梁自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥、世界上最大横向倾斜角空间主缆自锚式悬索桥——杭州江东大桥、世界上第一座三塔中跨斜拉一边跨悬吊自锚式组合索桥——汉中龙岗大桥等工程实际,综合考虑混合梁、自锚式、地锚式、空间主缆、组合索桥桥型等的构造、受力和施工特点,根据设计计算和施工控制计算的需要,围绕悬索桥几何非线性与时变效应精细分析、软件开发、鞍座设计位置和合理成桥状态确定、自锚式悬索桥体系转换、大型通用软件应用、顶推施工控制理论等进行了一系列的阐述。

本书可供从事悬索桥(特别是自锚式悬索桥和组合索桥)设计、施工和研究的工程技术人员参考,也可作为高等院校桥梁专业研究生和高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代悬索桥静力非线性理论与实践/李传习著. —
北京:人民交通出版社股份有限公司,2014. 10
ISBN 978 - 7 - 114 - 11736 - 7

I. ①现… II. ①李… III. ①悬索桥 - 非线性力学 -
研究 IV. ①U448. 251

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 221663 号

书 名:现代悬索桥静力非线性理论与实践

著 作 者:李传习

责任编辑:王文华(125976580@qq.com)

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

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:25.5

字 数:564 千

版 次:2014 年 10 月 第 1 版

印 次:2014 年 10 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 114 - 11736 - 7

定 价:69.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



前言

改革开放以来,随着经济的发展和人民生活水平的提高,我国进入悬索桥建设的新时期,建造的悬索桥跨度越来越大,结构形式愈加丰富多彩。

为适应这一形式,作者与同事陈浩军教授应邀提出了佛山平胜大桥独塔自锚式悬索桥的竞赛方案。在恩师刘光栋教授的指导与支持下,进入悬索桥理论研究领域,并完成了博士论文——《混合梁悬索桥非线性精细计算理论及其应用》。

在这个过程中及以后,作者承担了国家自然科学基金项目“复杂悬索桥多重非线性精细计算理论与方法”(50778024)、“空间主缆悬索桥自适应的构形与效应协调控制的理论与方法”(51078041)和“空间主缆自锚式悬索桥成桥状态确定及其科学实现的理论与方法”(51378080),教育部博士点基金项目“空间主缆力学特性及其悬索桥自适应构形控制理论”(20114316110002),交通部应用基础研究项目“混合梁悬索桥非线性精细计算理论及其应用”(2008-329-825-040)等课题研究,获得科学技术部 973 项目“特大跨桥梁安全性设计与评定的基础理论研究”(2015CB057700)的前期研究支持,并有幸主持了广东佛山平胜大桥(世界上首座独塔、四索面、混合梁悬索桥,也是当时世界跨度最大的自锚式悬索桥)、杭州江东大桥(世界上最大横向倾角自锚式悬索桥)、广州猎德大桥(当时世界上最大跨度独塔空间主缆自锚式悬索桥)、汉中龙岗大桥(世界上首座中跨斜拉一边跨悬吊组合索桥)、黄河桃花峪大桥(世界上最大跨度自锚式悬索桥)、张花高速公路澧水大桥(典型山区地锚式悬索桥)等各具特色的悬索桥施工控制、施工控制复核或模型试验等工作,对悬索桥设计与施工控制计算所涉及的关键技术和科学问题开展了深入研究,并取得了可喜的成果。其中,“平胜大桥独塔自锚式悬索桥施工控制计算理论与施工成套技术”获广东省科技进步二等奖,“大跨度自锚式悬索桥设计理论与关键技术研究”获湖南省科技进步一等奖,并发表相关学术论文 20 余篇,获相关发明专利 7 项、实用新型专利 2 项。这些成果是集体智慧的结晶,倾注了合作单位和长沙理工大学桥梁与隧道工程学科全体教师的强力支持与辛勤劳动,包含了作者所带团队各位教师、博士研究生、硕士研究生等的聪明才智与汗水。

正是因为上述工作需要和可贵支持,才使作者在他人研究的基础上,不断地进行消化和探索,进而取得上述成果,才有了本书写作的基础。作者感谢为研究工作及本书写作提供立项资助、文献参考、学术交流与工程背景的管理者、专家和同仁,感谢书中所列参考文献的作者。

全书共分 11 章。

第 1 章介绍了开展本书所述研究的目的和意义。



第2章介绍了悬索桥的发展历史、悬索桥静力分析的已有经典理论及其发展动态,分析了不足,明确了需研究的主要问题。

第3~5章分别介绍平面缆索悬索桥数值解析法的基本方程与主缆找形、平面缆索悬索桥鞍座设计位置确定的分离算法、空间缆索悬索桥数值解析法的基本方程与索鞍设计位置的确定理论与方法。

第6、7章分别介绍悬索桥非线性有限元精细分析的基本理论、组合截面时变效应的计算原理。

第8章介绍复杂悬索桥合理成桥状态确定及其科学实现的理论与方法。

第9、10章分别介绍主缆找形与悬索桥计算的软件开发、基于大型通用软件及其二次开发的悬索桥成桥状态与施工过程分析。

第11章介绍自锚式悬索桥加劲梁常用的施工方法(即梁体顶推施工方法)的施工控制计算理论与方法。

全书由李传习统稿。第1~7章由李传习撰写;第8~10章由李传习、柯红军共同撰写;第11章,除第11.1、11.2、11.3.5和11.4.6节由董创文单独撰写外,其余由李传习、董创文共同撰写;第9章附录由李传习、柯红军、董创文共同撰写。

贺君、李红利、郑亮亮、刘智侃等对本文的录入、绘图和英文校对等进行了细致工作。恩师刘光栋教授始终关注本书的编写。林元培院士审阅了本书的重要章节,并提出了宝贵意见。人民交通出版社王文华、卢俊丽、潘艳霞等同志为本书的出版付出了辛勤劳动。本书还得到了国家自然科学基金、长沙理工大学出版基金等的资助。在此,一并表示衷心的感谢。

由于时间和作者水平有限,书中一定存在缺点和不足,恳请专家和读者批评指正。

作者

2014年9月



Summary

Based on shape finding of the main cable in segment suspension theory and nonlinear finite element theory, combined with engineering practices of the world's first self-anchored suspension bridge with single tower and hybrid girder (Foshan Pingsheng Bridge), the spatial main cable suspension bridge with largest lateral inclination angle (Hangzhou Jiangdong Bridge), the world's first hybrid cable-stayed (middle span) and self-anchored suspension (side span) bridge (Hanzhong Longgang Bridge), etc, and considering structural, mechanical and constructional features of hybrid girder, self-anchored, earth-anchored, spatial main cable, hybrid cable-stayed and suspension bridges, a series of research work of suspension bridge are conducted according to the requirements of design calculation and construction control, which includes refined analysis of geometric nonlinearity and time-dependent effects, software development, determination of design saddle position and reasonable finished state, system transformation of self-anchored suspension bridge, large general software applications and control theory of incremental launched construction, etc.

This book can be available not only for engineering technician in the design, construction and research of suspension bridges (especially self-anchored suspension bridges, hybrid cable-stayed and suspension bridges), but also for graduate students and advanced undergraduate students at colleges and universities majoring in bridge engineering as a teaching reference book.

Index: suspension bridge; nonlinear refined analysis; design calculation; analytical method; finite element method; time-dependent effects; design saddle position; software design; reasonable finished state; hanger tension and system transformation; large general software application; constructional control of incremental launched girder; elevation adjustment of support



目录

第1章 绪论	1
第2章 悬索桥及其计算理论的发展	4
2.1 悬索桥的历史与发展	4
2.1.1 悬索桥的组成	4
2.1.2 地锚式悬索桥的发展	5
2.1.3 自锚式悬索桥的发展	20
2.1.4 悬索桥展望	27
2.2 悬索桥静力分析的弹性理论、挠度理论与非线性杆系有限元理论	34
2.2.1 悬索桥“弹性理论”简介	34
2.2.2 悬索桥“挠度理论”简介	36
2.2.3 悬索桥“非线性杆系有限元分析法”简介	37
2.3 悬索桥计算理论研究的现状与动态	38
2.3.1 悬索桥设计计算概述	38
2.3.2 国内外研究现状与动态分析	39
2.4 存在的主要问题	42
本章参考文献	42
第3章 平面缆索悬索桥数值解析法的基本方程与主缆找形	49
3.1 分段悬链线理论的基本方程	49
3.1.1 基本假定	49
3.1.2 索段分析	50
3.1.3 索段状态方程性质的讨论	51
3.1.4 有集中外荷载作用下的悬索分析	53
3.2 主缆系统找形的总体思路和计算流程	54
3.3 考虑索鞍切点位置修正的约束条件	57
3.4 设计基准温度成桥状态主跨找形的迭代算法	58
3.4.1 主缆始端索力迭代初值参考值的确定——传统抛物线理论	59
3.4.2 单跨主缆的线形变化刚度	60
3.4.3 新的主缆始端索力迭代值确定的牛顿下山法	61
3.4.4 主跨找形的迭代算法与步骤	61

3.5 设计基准温度成桥状态边跨找形的迭代算法	64
3.5.1 单跨主缆的竖向变形形式刚度	64
3.5.2 边跨找形的迭代算法与步骤	66
3.6 设计基准温度成桥状态锚跨找形的迭代算法	67
3.6.1 一端为摆柱式散索鞍锚跨找形的迭代算法	67
3.6.2 一端为滚动式散索鞍锚跨找形的迭代算法	69
3.6.3 已知一端张力的锚跨找形迭代算法	69
3.7 其他温度状态及设计基准温度空缆状态的找形迭代算法	70
3.7.1 鞍槽上不动点的位置和鞍座两侧索段的无应力索长	70
3.7.2 鞍座位置已知的各跨主缆找形迭代算法	70
3.7.3 设计基准温度空缆状态鞍座预偏量与各跨找形的迭代算法	71
3.8 索股架设线形计算	72
3.8.1 索股架设调整的施工程序	72
3.8.2 参考状态索股架设线形与索夹放样计算	72
3.8.3 基准索股及猫道承重索股调索计算的简便方法	73
3.9 本章小结	81
本章参考文献	81
第4章 平面缆索悬索桥鞍座设计位置确定的分离算法	83
4.1 计算模型及计算公式	84
4.1.1 计算模型	84
4.1.2 计算公式的推导	84
4.2 牛顿—拉斐森迭代算法及约束条件	86
4.2.1 牛顿—拉斐森迭代算法	86
4.2.2 雅可比矩阵的推导	87
4.2.3 初值 x^0 的计算	88
4.2.4 约束条件的确定	89
4.3 理论顶点两种定义下索鞍位置计算结果比较与近似算法	90
4.4 本章小结	91
本章参考文献	91
第5章 空间缆索悬索桥数值解析法的基本方程与索鞍设计位置的确定理论与方法	93
5.1 引言	93
5.2 空间缆索悬索桥数值解析法的基本方程	95
5.3 倾斜母线索鞍设计位置的确定理论与方法	97
5.3.1 计算模型与计算公式	97
5.3.2 牛顿—拉斐森迭代法及约束条件	99
5.3.3 索鞍顶部主缆形状长度 s 及无应力索长 s_0 的计算	102
5.3.4 实桥应用	103
5.3.5 本节结论	103

5.4 水平母线索鞍设计位置的确定理论与方法	104
5.4.1 计算模型	104
5.4.2 计算公式	105
5.4.3 求解过程	106
5.4.4 算例分析	109
5.4.5 本节结论	109
5.5 本章小结	110
本章参考文献	110
第6章 悬索桥非线性有限元精细分析的基本理论	112
6.1 悬索桥有限元法求解的总体思路和方法	112
6.1.1 本书有限元法研究问题的范围	112
6.1.2 非线性结构的平衡状态和有限元法的基本方程	113
6.1.3 非线性有限元基本方程(平衡状态)的求解方法	114
6.1.4 边界条件的处理与鞍座顶推的模拟	117
6.1.5 悬索桥有限元法的单元类型	119
6.2 各类平面梁单元的杆端抗力与切线刚度矩阵	120
6.2.1 普通梁单元的 CR 列式法与杆端抗力	120
6.2.2 普通梁单元的切线刚度矩阵——Saanfan & Brotton 理论	123
6.2.3 两端带刚臂的梁单元的杆端抗力	125
6.2.4 两端带刚臂的梁单元的切线刚度矩阵	126
6.2.5 单向受力梁单元的杆端抗力	127
6.2.6 单向受力梁单元的切线刚度矩阵	127
6.3 平面滚动式支承单元的杆端抗力与切线刚度矩阵	128
6.3.1 滚动式支承单元杆端抗力的求解	128
6.3.2 滚动式支承单元的切线刚度矩阵	133
6.4 平面索单元的杆端抗力与切线刚度矩阵	134
6.4.1 非张拉或者调索的索单元杆端抗力	134
6.4.2 正在张拉或者调索的索单元杆端抗力	137
6.4.3 索单元的切线刚度矩阵	139
6.5 平面杆系节点荷载向量的求解	139
6.6 分阶段成形结构有限元求解特点的说明	141
6.7 悬索桥非线性空间杆系有限元理论要点	141
6.7.1 刚体位移欧拉定理与有限转动正确表达——Euler-Rodrigues 公式	141
6.7.2 空间梁单元 CR 列式法坐标系的定义与计算	145
6.7.3 空间梁单元 CR 列式法杆端变形的计算	147
6.7.4 空间梁单元 CR 列式法的杆端抗力	149
6.7.5 空间梁单元的切线刚度矩阵	152
6.7.6 空间梁单元坐标系与整体坐标系的转换矩阵	155

6.7.7 空间索单元的杆端抗力	156
6.7.8 空间索单元的切线刚度矩阵	156
6.8 本章小结	158
本章参考文献	158
第7章 组合截面时变效应的计算原理	161
7.1 组合截面收缩徐变效应非线性分析的原理	161
7.1.1 研究对象与基本假定	161
7.1.2 初应变法	162
7.1.3 二次组合截面的受力分配	163
7.1.4 徐变系数和徐变变形计算递推公式	163
7.1.5 组合截面收缩效应的计算原理	166
7.1.6 组合截面徐变效应计算原理	168
7.2 组合截面温变效应计算原理	179
7.2.1 温变对结构的影响	179
7.2.2 静定基本结构上温变自应力的计算	180
7.2.3 CR 列式法梁单元温变初位移的计算	180
7.3 组合截面时变效应分析的矩阵位移法的计算步骤	182
7.4 本章小结	182
本章参考文献	182
第8章 复杂悬索桥合理成桥状态确定及其科学实现的理论与方法	184
8.1 自锚式空间主缆悬索桥合理成桥状态确定的理论与方法	184
8.1.1 概述	184
8.1.2 吊索成桥状态合理竖向力	186
8.1.3 主缆成桥状态	186
8.1.4 吊索成桥状态横向水平分力	191
8.1.5 实桥应用	192
8.2 自锚式平面主缆和地锚式空间主缆悬索桥合理成桥状态确定特点	193
8.3 自锚式悬索桥与自锚式组合索桥体系转换方案确定的总体思路与原则	194
8.3.1 概述	194
8.3.2 体系转换方案确定的总体思路	194
8.3.3 体系转换方案确定的原则	194
8.3.4 多座典型自锚式悬索桥的吊索张拉与体系转换	196
8.4 三塔中跨斜拉一边跨悬吊自锚式组合索桥合理成桥与合理施工状态确定的合二为一法	233
8.4.1 工程背景——陕西汉中龙岗大桥设计概况	233
8.4.2 组合索桥的设计与分析特点	239
8.4.3 合理成桥与合理施工状态确定的合二为一法	240
8.4.4 陕西汉中龙岗大桥的合理成桥状态与合理施工状态	242

8.5 本章小结	256
本章参考文献	256
第9章 主缆找形与悬索桥计算的软件开发	259
9.1 基于分段悬链线理论的主缆找形计算软件的开发	259
9.1.1 平面主缆找形计算软件的开发	259
9.1.2 空间主缆找形计算软件的开发	268
9.2 基于解析法与有限元法相结合的悬索桥软件开发	277
9.2.1 需求分析与编程思路	277
9.2.2 软件功能与特点	280
9.2.3 用户手册的设计	280
9.2.4 软件考证	281
9.3 本章小结	284
本章参考文献	285
本章附录	287
附录 A 平面主缆找形用户数据文件格式	287
附录 B 空间主缆找形用户数据文件格式	291
附录 C 基于解析法与有限元法结合的悬索桥平面杆系计算软件用户数据 文件格式	294
第10章 基于大型通用软件及其二次开发的悬索桥成桥状态与施工过程分析	318
10.1 基于大型通用软件的悬索桥成桥状态及施工过程分析	318
10.1.1 悬索桥关键构件的模拟方法	319
10.1.2 悬索桥关键计算内容的实施方法	321
10.1.3 悬索桥关键结果的后处理方法	322
10.1.4 实桥应用	323
10.2 基于 ANSYS 二次开发的悬索桥主缆与索鞍切点自动修正方法	324
10.2.1 主索鞍及主缆的 ANSYS 模拟	324
10.2.2 ANSYS 二次开发实现主缆与主索鞍切点自动修正的方法与原理	326
10.2.3 实桥应用	329
10.3 本章小结	330
本章参考文献	330
第11章 梁体顶推施工控制计算理论与方法	332
11.1 顶推梁体整体受力分析的解析法及各支点处弯矩	332
11.1.1 顶推过程导梁—主梁模型的三弯矩方程及其各支点处弯矩的 变化规律	332
11.1.2 支点竖向位移引起的顶推梁各支点处弯矩	338
11.1.3 支点脱空引起的各支点处弯矩与脱空条件	340
11.2 顶推梁体整体受力分析的通用有限元方法	342
11.2.1 整体计算思路	342



11.2.2	单元选取	343
11.2.3	支点位移的模拟	344
11.2.4	工况选取	346
11.2.5	主要结果	346
11.3	顶推钢箱梁无应力构形自适应控制的相位变换法	346
11.3.1	基本假定	347
11.3.2	梁体的线形描述及其理论无应力线形确定	348
11.3.3	顶推钢梁各梁段制造构形的确定	348
11.3.4	顶推梁体理论无应力构形自适应控制的相位变换法	350
11.3.5	工程应用实例	353
11.4	变曲率竖曲线钢箱梁顶推过程支点高程调整的优化理论与方法	357
11.4.1	变曲率竖曲线钢箱梁顶推面临的难点	357
11.4.2	变曲率竖曲线钢箱梁顶推解决的措施	358
11.4.3	支点高程调整优化问题的基本假定与顶推计算模型	360
11.4.4	支点高程调整优化问题的描述	362
11.4.5	支点高程调整的优化方法	364
11.4.6	支点高程调整的优化算例	372
11.5	本章小结	379
	本章参考文献	379
附录	本书理论与方法应用的典型桥梁照片	383

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Development of Suspension Bridge and its Calculation Theory	4
2.1 History and Development of Suspension Bridge	4
2.1.1 Composition of Suspension Bridge	4
2.1.2 Development of Earth-anchored Suspension Bridge	5
2.1.3 Development of Self-anchored Suspension Bridge	20
2.1.4 Prospect of Suspension Bridge	27
2.2 Elasticity Theory, Deflection Theory and Nonlinear Frame Finite Element Theory of Static Analysis for Suspension Bridge	34
2.2.1 Introduction of Elasticity Theory for Suspension Bridge	34
2.2.2 Introduction of Deflection Theory for Suspension Bridge	36
2.2.3 Introduction of Nonlinear Frame Finite Element Theory for Suspension Bridge	37
2.3 Status and Development of Calculation Theory for Suspension Bridge	38
2.3.1 Summary of Design and Calculation for Suspension Bridge	38
2.3.2 Research Status and Development Investigation at Home and Abroad	39
2.4 Main Existing Problems	42
References	42
Chapter 3 Basic Equation of Numerical Analytical Method and Main Cable Shape- finding for Suspension Bridge with Plane Cable	49
3.1 Basic Equation of Segmented Catenary Theory	49
3.1.1 Basic Assumptions	49
3.1.2 Cable Segment Analysis	50
3.1.3 Discussion of Property of Cable Segment State Equation	51
3.1.4 Cable Segment Analysis under Concentrated External Loads	53
3.2 General Idea and Calculation Process of Main Cable Shape-finding	54



3.3	Constraint Condition Considering Correction of Cable Saddle Tangent Point Position	57
3.4	Iterative Algorithm for Main Span Shape-finding at Completed State under Design Reference Temperature	58
3.4.1	Determination of Reference Value for Iterative Initial Value of Cable Force at Strading End—Traditional Parabola Theory	59
3.4.2	Linetype Change Stiffness of Single-span Main Cable	60
3.4.3	Modified Newton Downhill Method for Iterative Initial Value of Cable Force at Strading End	61
3.4.4	Iterative Algorithm and Steps for Main Span Shape-finding	61
3.5	Iterative Algorithm for Side Span Shape-finding at Completed State under Design Reference Temperature	64
3.5.1	Nominal Stiffness for Vertical Deformation of Single-span Main Cable	64
3.5.2	Iterative Algorithm and Steps for Side Span Shape-finding	66
3.6	Iterative Algorithm for Anchor Span Shape-finding at Completed State under Design Reference Temperature	67
3.6.1	Iterative Algorithm for Shape-finding of Anchor Span with Rockshaft Splay Saddle at One End	67
3.6.2	Iterative Algorithm for Shape-finding of Anchor Span with Roller Splay Saddle at One End	69
3.6.3	Iterative Algorithm for Shape-finding of Anchor Span with Determined Cable Tension at One End	69
3.7	Iterative Algorithm for Unloaded Cable Shape-finding under Design Reference Temperature and Other Temperature State	70
3.7.1	Fixed Point Position at Saddle Groove and Unstressed Length of Cable Segment at Both Sides of Saddle	70
3.7.2	Iterative Algorithm for Each Span Shape-finding with Determined Saddle Position	70
3.7.3	Iterative Algorithm for Saddle Pre-offsetting and Each Span Shape-finding at Unloaded Cable State under Design Reference Temperature	71
3.8	Calculation of Strand Erection	72
3.8.1	Construction Procedure for Adjusting Strand Erection	72
3.8.2	Calculation of Strand Erection and Clamp Lofting at Reference State	72
3.8.3	Simplified Calculation Method for Adjusting Reference Strand and Catwalk Cable	73

3.9 Summary	81
References	81
Chapter 4 Separate Calculation Method for Determining Saddle Design	
Position of Suspension Bridge with Plane Cable	83
4.1 Calculation Model and Formula	84
4.1.1 Calculation Model	84
4.1.2 Calculation Formula Deduced Process	84
4.2 Newton-Raphson Iterative Method and Constraint Condition	86
4.2.1 Newton-Raphson Iterative Method	86
4.2.2 Jacobian Matrix Deduced Process	87
4.2.3 Calculation of Initial Value x^0	88
4.2.4 Determination of Constraint Condition	89
4.3 Comparison Between Calculation Results of Saddle Position under Two Different Definitions of Theoretical Vertex	90
4.4 Summary	91
References	91
Chapter 5 Basic Equation of Numerical Analytical Method, Theory and Method for Determining Design Saddle Position for Suspension Bridge with Spatial Cable	93
5.1 Introduction	93
5.2 Basic Equation of Numerical Analytical Method for Suspension Bridge with Spatial Cable	95
5.3 Theory and Method for Determining Design Position of Lean Busbar Saddle	97
5.3.1 Calculation Model and Formula	97
5.3.2 Newton-Raphson Iterative Method and Constraint Condition	99
5.3.3 Calculation of Main Cable Shape-length s and Unstressed Length s_0 at top of Saddle	102
5.3.4 Practical Bridge Application	103
5.3.5 Conclusion	103
5.4 Theory and Method for Determining Design Position of Horizontal Busbar Saddle	104
5.4.1 Calculation Model	104
5.4.2 Calculation Formula	105
5.4.3 Solution Process	106
5.4.4 Analysis of Examples	109



5.4.5	Conclusion	109
5.5	Summary	110
	References	110
Chapter 6	Basic Theory of Refined Non-linear Finite Element Analysis for	
	Suspension Bridge	112
6.1	General Idea and Method of Finite Element Method for Suspension Bridge	112
6.1.1	Research Range of Proposed Finite Element Method	112
6.1.2	Equilibrium State of Non-linear Structure and Basic Equation of Finite Element Method	113
6.1.3	Method for Solving Basic Equation of Finite Element Method (Equilibrium State)	114
6.1.4	Treatment of Boundary Conditions and Simulation of Incremental Launching of Saddle	117
6.1.5	Element Types of Finite Element Method for Suspension Bridge	119
6.2	Resistant Force and Tangent Stiffness Matrix of Plane Beam Elements	120
6.2.1	CR Formulation and Resistant Force of Beam Element	120
6.2.2	Tangent Stiffness Matrix of Beam Element—Saanfan & Brotton Theory	123
6.2.3	Resistant Force of Beam Element with Rigid Arms	125
6.2.4	Tangent Stiffness Matrix of Beam Element with Rigid Arms	126
6.2.5	Resistant Force of One-way Bearing Beam Element	127
6.2.6	Tangent Stiffness Matrix of One-way Bearing Beam Element	127
6.3	Resistant Force and Tangent Stiffness Matrix of Planar Roller Supported Element	128
6.3.1	Solution of Resistant Force of Planar Roller Supported Element	128
6.3.2	Tangent Stiffness Matrix of Planar Roller Supported Element	133
6.4	Resistant Force and Tangent Stiffness Matrix of Planar Suspension-cable Element and Stayed-cable Element	134
6.4.1	Resistant Force of Cable Element without Tension or Adjustment	134
6.4.2	Resistant Force of Cable Element with Tension or Adjustment	137
6.4.3	Tangent Stiffness Matrix of Suspension-cable Element or Stayed-cable Element	139
6.5	Solution of Nodal Load Vector of Planar Frame System	139
6.6	Illustration of Finite Element Method Solution's Features of Structure Constructed by Stages	141
6.7	Keypoints of Non-linear Finite Element Spatial Frame System for	

Suspension Bridge	141
6.7.1 Euler Theorem for Rigid Displacement and Correct Expression of Finite Rotation—Euler-Rodrigues Formula	141
6.7.2 Definition and Calculation of Coordinate System for CR Formulation of Spatial Beam Element	145
6.7.3 Calculation of Beam End Deformation for CR Formulation of Spatial Beam Element	147
6.7.4 Resistant Force for CR Formulation of Spatial Beam Element	149
6.7.5 Tangent Stiffness Matrix of Spatial Beam Element	152
6.7.6 Transformation Matrix between Element Coordinate System and Global Coordinate System of Spatial Beam Element	155
6.7.7 Resistant Force of Spatial Suspension-cable Element and Spatial Stayed-cable Element	156
6.7.8 Tangent Stiffness Matrix of Spatial Suspension-cable Element and Spatial Stayed-cable Element	156
6.8 Summary	158
References	158
Chapter 7 Calculation Principle of Time-dependent Effect for Composite Section	161
7.1 Principle of Non-linear Analysis of Shrinkage and Creep Effects for Composite Section	161
7.1.1 Research Object and Basic Assumptions	161
7.1.2 Initial Strain Method	162
7.1.3 Force Distribution for Secondary Composite Section	163
7.1.4 Recurrence Calculation Formula of Creep Coefficient and Creep Deformation in Code	163
7.1.5 Calculation Principle of Shrinkage Effect for Composite Section	166
7.1.6 Calculation Principle of Creep Effect for Composite Section	168
7.2 Calculation Principle of Temperature Effect for Composite Section	179
7.2.1 Temperature Effect on Structure	179
7.2.2 Calculation of Thermal Self-restraint Stress for Statically Determined Structure	180
7.2.3 Calculation of Thermal Initial Displacement for CR Formulation of Beam Element	180
7.3 Calculation Process of Displacement Matrix Method for Analyzing	