

# 大跨悬索桥理论

陈仁福 著

西南交通大学出版社

(川)新登字 018 号

### 内 容 提 要

本书在全面而系统地总结整理既往悬索桥理论研究成果的基础上,利用计算力学、随机振动、地震工程学和风工程学方面的最新研究成果,针对大跨悬索桥所面临的理论问题提出新的见解,并汇集成一个较完善的体系。主要包括大跨悬索桥的静力分析、振动性态分析、地震响应理论分析和风致振动效应理论分析等。

本书可供桥梁及结构工程专业人员和高等院校有关专业师生阅读参考。

## 大跨悬索桥理论

陈仁福 著

\*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 二环路北一段)

新华书店经销

郫县印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.25

字数: 291 千字 印数: 1—1000 册

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7—81022—799—8/T·140

定价: 9.90 元

## 序

科学技术是生产力;科技工作是一种重要的社会实践。当社会生产还不够发达时,人们对于这两点总是体会不到。随着生产的技术性越来越复杂,生产规模也发展为越来越需要有众多的技术职工和广泛的协作,事实乃反复证明:若是离开了科学,许多生产问题将长期无法解决;若是众多职工乃至社会有关部门掌握不住所必需的科学知识,生产将无法正常进行。因此,自觉的认识到这两点,尊重科学,普及科学,让生产按着科学规律进行,显然是十分必要的。

科学技术在其众多的每一个领域之中的发展,都要不断地经历两个过程:一是积累资料、整理资料、上升为理论;二是用前一过程所得的理论来指导实践,让它经受检验,得到订正、丰富和提高,并由此而积累新的资料。在历史上,许多生产实践曾经是在只有不完善或很不完善的理论的情况下进行的。它们曾经是失败了不少次,然而也有成功的。因其有成功,人们就时常认为实践是走在理论之前。但是,由于盲目性的存在,其代价实在是巨大的。在当前的世界上,自觉地发展且不断完善科学理论、培养人才、创办新的产业已屡见不鲜,能不能从他们的实践中汲取教益,使我国的大跨悬索桥建设迅速走上健康发展的道路呢?我们一直在思考着。

因应我国经济建设和交通建设需要,大跨悬索桥必然要提上日程,这在“七五”期间已成为工程界的一种共识。某些单位当即为此而进行了不少准备。我们则是鼓励几名硕士生以悬索桥静力分析为题,编制程序,提出小结性意见,写出论文。不久便抓住重力刚度这一特点,在1988年的第8届全国桥梁和结构学术交流会(广州)的大会上,宣讲了《在跨度大于600m处应该考虑悬索桥》这一命题。对于德国桥梁界泰斗、誉满全球的F. Leonhardt教授和W. Zellner在国际桥协(IABSE)论文32卷(1972)所发表的《关于跨度大于600m的悬索桥和斜张桥的对比》一文所阐述的斜张桥在刚度上的优越性提出异议。我们指出:他们将塔高对梁跨之比订为1:6,但悬索桥的这一比值每是1:10及更小;他们说活载集度对恒载集度之比可按0.6取用,但既有大跨悬索桥的这一比值却是从0.13至0.26。这两个前提被取错了,这就难怪他们得到了偏袒斜张桥的结论。为免除人们受其误导,忠于职守的态度便当是直言不讳。

进入“八五”期间,汕头海湾桥、虎门珠江桥、西陵峡长江桥、江阴长江桥、伶仃洋跨海大桥都相继提上日程,而在其主航道处都是使用大跨悬索桥。从其方案编制直到施工,到处都需要使用大跨悬索桥的知识,到处都需要有懂得大跨悬索桥的人才参与其事。于是,这种社会实践也就孕育着我国悬索桥科技学术体系的成长和发展。为了在某些具体业务问题上统一认识,避免走弯路,我曾从应急出发,写了若干短文,还计划着在广东省交通厅所偶办的工程硕士生班上编印一些讲义,借以普及这类知识。但是,高等学校不能以此为满足,她应该从上述的“科学技术是生产力、科技工作是一种重要的社会实践”出发,有计划地写一点好书,为奠定我国科学技术的基础出力。

1991年,我将这一写书的意愿向公路工程界老前辈曹威说了:要“编教材、工程参考书及专著。其第一本是《大跨悬索桥的设计与施工》”。曹老当即表示支持,并为该第一本写了序。序中在讲到好几座悬索桥正在筹建之后,立即表示:“对于大家感兴趣的问题,能有人率先写书立说,这一工作对于大桥工程科技发展实属有利。这种精神也值得发扬”。由于该第一本所讲

的设计只是着重于构造,这就将讲述计算分析的任务交给了其第二本。

本书就是所说的第二本。虽着重于讲计算分析,但颇有拓宽之处。内容较为浓缩。在描绘大跨悬索桥整个理论体系方面,硬是下了功夫。这是专著性质,是陈仁福同志的博士论文,是他从1985年攻读硕士学位以来所花费的心血的结晶。他的研究是从静力分析开始,将迄今为止所有的方法予以总结、补充和发展;包含其以连续体为对象的解析法和以离散体为对象的数解法,包含其作用力是竖向的、横向的、扭转的、偏心的;在二维分析之外,还讲空间分析;在着重讲加劲梁之外,也讲塔的分析。这一部分当是设计人员最为关心的。在现有文献往往只讲(或只是推荐)少数几种方法、不讲其优劣得失的情况下,设计者当可通过对比,从这里挑选一种或几种最适用于解决他所面临的问题的方法。动力分析是这书的重点,是从振动性状开始,接着便讲地震响应和风致振动。由于大跨悬索桥的柔性十分明显,其振动行为很突出,设计者在编制初步方案时就需考虑,而在结构安全性评估之中则应进行专门的研究。问题是复杂的,学者们的研究是仍在进行之中的。现今所通行的、往往流于片面的、不考虑事物的随机性的处理方法是有待改进的。本书抓住悬索桥特性,阐述其解题的思路和做法,对抗震问题的数值算例进行了讨论;抓住不同风致振动在危害性程度方面的差异,对颤振和抖振进行了一些论述。

在西南和北方交通大学内,有几位教授认真地阅读了全文。对其逻辑论证和算式推导,没有发现什么毛病。徐昭鑫教授(高等教育出版社1990年出版的教材《随机振动》的作者)在评语中写道:“目前对于悬索桥理论工作尚少全面而系统的论述和总结。可以看到:一门学科在其日益重要、且将大体建立之时,就需要有人来做系统的总结工作。”这就有其学术价值。“作者概括阐述的理论及计算方法,在静、动、地震及风致振动方面,是扼要的、周到的、实用的,可供从事此项工作的人员参考和选用,从而节省他们用于检索、阅读、理解和推论所需的时间和精力。”为了充分发挥学位点所在单位的整体优势,我又访问了几位教授,共同肯定了这书的成就。

在所收到的评议意见书中,中国科学院院士、国家地震局地球物理研究所的胡聿贤研究员所给予的支持和鼓舞最为突出。他认为:“在地震反应分析上,考虑以随机场为输入的多支点不同输入的随机反应是一项重要的贡献,既有重要的理论意义,又有实用价值。这些工作是针对悬索桥的特点(第四章第二节)进行的,抓住了问题的重点。通过作者的论文,可以看出作者广泛而系统地了解了有关的分析理论及设计考虑,了解了国际动态;对问题的分析中肯,能抓住关键,并能正确地运用理论知识解决复杂的难题,进行有所创新的科研工作,得到正确的结果,能应用于实际设计分析。”他还认为:“作者能抓住悬索桥地震动输入这个关键问题,是十分重要的。只要输入选择改变,悬索桥的地震反应可以有若干倍的变化。因此,除了按照一般标准或规范规定的反应谱(如图4.1,日本的本州四国连络桥所用)之外,似应特别强调结合大桥所在地点的地震和地质环境,特别是有无大震、远震的背景以及桥墩、桥塔局部地形的影响。作者在第四章第十节最后一段所强调的更多振型反应的考虑等,也是十分必要的。”

老前辈曾成仍然满腔热情地给予嘉勉。他在评议意见中指出:论文“在静力分析、自由振动分析、地震分析、风振分析方面的论述,都是在悬索桥分析理论当代水平基础上的提高。”“涉及的面很广,费时很长,对现有理论追根溯源,提出新的见解和改进,并且进行了大量的推导和计算,确实是难能可贵。”

由此而使我们下列各点有更深的体会:(1)有成效的科研活动必然不是孤立的,让研究生参与我国当前正在进行的大跨悬索桥建设中的一些工作,对于科研和生产都有利。(2)古今异趣,这是事实;尽管我国古代的索桥乃至一些小跨悬索桥很出名,但人类对于现代大跨悬索

桥所积累的诸多资料(理论及实践)还是在国外;国外的同行至今还没有人对于那些丰富的资料进行全面整理;为着有效地处理当前我们所遇到的问题,现在应该不遗余力地占有国外所有的有关资料,进行全面整理,直至上升为理论;今陈仁福的论文就是本此宗旨而作。(3)个人、乃至一个单位的力量很有限,我国不同学科(数学、力学、计算机应用、尤其是地球物理学、风工程学等)的专家对于桥梁工程科技的发展极为关心,已经给予了很多的启示和教益,这是我们赖以前进的条件之一,必须十分珍视。(4)在“上升为理论”的过程初步完成之后,就要自觉地进入“经受检验”的过程。将这书及时出版,殆有助于这些过程的推进。

现且抒其所感,写成此序。不当之处,诸祈指教是幸。

西南交通大学

钱冬生

1994年4月10日于成都

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 绪 论.....                | 1   |
| 一 .....                     | 1   |
| 二 .....                     | 2   |
| 三 .....                     | 5   |
| 参考文献.....                   | 6   |
| 第二章 悬索桥静力分析.....            | 7   |
| 一 概述.....                   | 7   |
| 二 竖向荷载作用下作为连续体的分析 .....     | 19  |
| 三 竖向荷载作用下的非线性杆系有限元分析 .....  | 27  |
| 四 竖向荷载作用下的近似分析和影响线方法 .....  | 31  |
| 五 横向荷载作用下的结构分析 .....        | 39  |
| 六 扭转及偏心荷载作用下的结构分析 .....     | 42  |
| 七 空间分析 .....                | 50  |
| 八 塔的结构分析 .....              | 59  |
| 九 数值算例 .....                | 61  |
| 参考文献 .....                  | 63  |
| 第三章 悬索桥振动性状分析 .....         | 67  |
| 一 概述 .....                  | 67  |
| 二 悬索桥作为连续体的空间耦合自由振动分析 ..... | 73  |
| 三 悬索桥作为连续体的二维自由振动分析 .....   | 78  |
| 四 悬索桥自由振动分析的二维有限元法 .....    | 81  |
| 五 悬索桥自由振动分析的三维空间有限元法 .....  | 87  |
| 六 塔的振动性状分析 .....            | 88  |
| 七 振型参与系数和振型贡献率 .....        | 89  |
| 八 数值算例 .....                | 91  |
| 参考文献.....                   | 100 |
| 第四章 悬索桥地震响应理论分析.....        | 103 |
| 一 概述.....                   | 103 |
| 二 悬索桥在动力行为方面的特殊性.....       | 107 |
| 三 适用于大跨悬索桥的地震激励模型.....      | 108 |
| 四 随机场时间历程样本模拟.....          | 112 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 五          | 非一致激励的时间历程响应分析.....        | 118        |
| 六          | 非一致随机激励下的稳态随机响应分析.....     | 121        |
| 七          | 非一致非平稳随机激励下的瞬态随机响应分析.....  | 122        |
| 八          | 结构随机振动的峰响应评价.....          | 123        |
| 九          | 非一致激励响应分析的反应谱法.....        | 128        |
| 十          | 数值算例及讨论.....               | 131        |
|            | 参考文献.....                  | 135        |
| <b>第五章</b> | <b>悬索桥风致振动效应的理论分析.....</b> | <b>139</b> |
| 一          | 概述.....                    | 139        |
| 二          | 非定常气动力(自激气动力).....         | 145        |
| 三          | 大气紊流随机荷载模型.....            | 147        |
| 四          | 三维空间耦合颤振和抖振分析的一般方法.....    | 153        |
| 五          | 三维耦合颤振分析的复特征值方法.....       | 157        |
| 六          | 三维抖振响应分析的实用算法.....         | 160        |
| 七          | 作为连续体的二维抖振响应分析简化算法.....    | 162        |
| 八          | 数值算例及讨论.....               | 164        |
|            | 参考文献.....                  | 172        |
| <b>第六章</b> | <b>总结.....</b>             | <b>176</b> |
| 附录 A       | 悬索桥计算机软件系统简介 .....         | 178        |
| 附录 B       | 随机场理论基础 .....              | 181        |
| 附录 C       | 悬索桥译名对照 .....              | 187        |

## 序

科学技术是生产力;科技工作是一种重要的社会实践。当社会生产还不够发达时,人们对于这两点总是体会不到。随着生产的技术性越来越复杂,生产规模也发展为越来越需要有众多的技术职工和广泛的协作,事实乃反复证明:若是离开了科学,许多生产问题将长期无法解决;若是众多职工乃至社会有关部门掌握不住所必需的科学知识,生产将无法正常进行。因此,自觉的认识到这两点,尊重科学,普及科学,让生产按着科学规律进行,显然是十分必要的。

科学技术在其众多的每一个领域之中的发展,都要不断地经历两个过程:一是积累资料、整理资料、上升为理论;二是用前一过程所得的理论来指导实践,让它经受检验,得到订正、丰富和提高,并由此而积累新的资料。在历史上,许多生产实践曾经是在只有不完善或很不完善的理论的情况下进行的。它们曾经是失败了不少次,然而也有成功的。因其有成功,人们就时常认为实践是走在理论之前。但是,由于盲目性的存在,其代价实在是巨大的。在当前的世界上,自觉地发展且不断完善科学理论、培养人才、创办新的产业已屡见不鲜,能不能从他们的实践中汲取教益,使我国的大跨悬索桥建设迅速走上健康发展的道路呢?我们一直在思考着。

因应我国经济建设和交通建设需要,大跨悬索桥必然要提上日程,这在“七五”期间已成为工程界的一种共识。某些单位当即为此而进行了不少准备。我们则是鼓励几名硕士生以悬索桥静力分析为题,编制程序,提出小结性意见,写出论文。不久便抓住重力刚度这一特点,在1988年的第8届全国桥梁和结构学术交流会(广州)的大会上,宣讲了《在跨度大于600 m处应该考虑悬索桥》这一命题。对于德国桥梁界泰斗、誉满全球的F. Leonhardt教授和W. Zellner在国际桥协(IABSE)论文32卷(1972)所发表的《关于跨度大于600 m的悬索桥和斜张桥的对比》一文所阐述的斜张桥在刚度上的优越性提出异议。我们指出:他们将塔高对梁跨之比订为1:6,但悬索桥的这一比值每是1:10及更小;他们说活载集度对恒载集度之比可按0.6取用,但既有大跨悬索桥的这一比值却是从0.13至0.26。这两个前提被取错了,这就难怪他们得到了偏袒斜张桥的结论。为免除人们受其误导,忠于职守的态度便当是直言不讳。

进入“八五”期间,汕头海湾桥、虎门珠江桥、西陵峡长江桥、江阴长江桥、伶仃洋跨海大桥都相继提上日程,而在其主航道处都是使用大跨悬索桥。从其方案编制直到施工,到处都需要使用大跨悬索桥的知识,到处都需要有懂得大跨悬索桥的人才参与其事。于是,这种社会实践也就孕育着我国悬索桥科技学术体系的成长和发展。为了在某些具体业务问题上统一认识,避免走弯路,我曾从应急出发,写了若干短文,还计划着在广东省交通厅所偶办的工程硕士生班上编印一些讲义,借以普及这类知识。但是,高等学校不能以此为满足,她应该从上述的“科学技术是生产力、科技工作是一种重要的社会实践”出发,有计划地写一点好书,为奠定我国科学技术的基础出力。

1991年,我将这一写书的意愿向公路工程界老前辈曹威说了:要“编教材、工程参考书及专著。其第一本是《大跨悬索桥的设计与施工》”。曹老当即表示支持,并为该第一本写了序。序中在讲到好几座悬索桥正在筹建之后,立即表示:“对于大家感兴趣的问题,能有人率先写书立说,这一工作对于大桥工程科技发展实属有利。这种精神也值得发扬”。由于该第一本所讲

# 第一章 绪 论

## —

在悬索桥的编年史上,我们祖先的业绩闪耀着永恒的光辉。从最早出现笮桥(竹索桥)和藤索桥算起,悬索桥在我国曾经历了二十多个世纪的发展,并且在它的发展过程中不断地向外传播。Joseph Needham(李约瑟)认为,南美的古索桥是在公元前7世纪至公元16世纪的前哥伦布时代由中国人传播到那里的<sup>[1]</sup>。文献记载,早在公元前50年(汉宣帝甘露4年),我国四川就出现了跨长百米的铁索桥<sup>[2]</sup>。在我国漫长的封建社会里,铁索作为一种工具被广泛应用,所以,铁索桥曾经不计其数。而欧美则由于在建桥和炼铁技术方面落后于我国,也许还由于其地形不一样,所以直到17世纪那里一直未出现索桥<sup>[1]</sup>。1665年,徐霞客有一篇题为《铁索桥记》的游记曾被传教士Martini译介到西方,该书详细记述了1629年在贵州省境内修建的一座跨度约122m的铁索桥。两年后,即1667年,法国的传教士Kircher从我国回去,出版一书,名为《中国奇迹览胜》(China Monumenta Illustrata),书中描述了建于公元65年的云南景东(Ching-tung)附近的兰津铁桥(此桥曾于1410年重修)。该书曾被译成多种文字,并多次再版。根据科技史家的研究,只是在这两部书出版之后,索桥才被西方人所知晓。李约瑟曾指出,这两部书直接导致了西方人进行悬索桥的尝试<sup>[1]</sup>。1734年,萨克森的军队远征但泽(今波兰格但斯克),途经奥得河时,修建了西方第一座临时性铁索桥<sup>[1]</sup>。到1741年,英国方才建成欧洲的第一座永久性铁索桥,即侗氏桥,跨度22.3m,但它已毁于1802年<sup>[1,2]</sup>。其时的欧洲已经历文艺复兴运动和宗教改革,资产阶级革命已取得进展。随着资本主义的胜利,欧洲在政治、经济、文化和科技方面出现了很大进步。进入19世纪后的欧洲,特别是英国,修建了不少悬索桥,著名的如Telford修建的梅耐桥,Brunel修建的克里夫顿桥<sup>[3]</sup>。这些桥跨度稍大于中国的古桥,桥面能够行走马车,有一些则增加了斜拉索,桥的主缆已开始使用眼杆链。这时,在刚刚独立的美国,Finley等也修建了一批铁索桥<sup>[1,2]</sup>。法国的发展则稍慢,但她有自己的特色。法国工程师Seguin和Dufour在1820年前后发明了用铁丝制成的悬索桥主缆,还提出了用无端索进行主缆施工的方法<sup>[1,2]</sup>。这些技术后来被在法国学习的美国人Ellet带回美国,并在J. A. Roebling手里得到发展<sup>[1,2]</sup>。随着大城市的兴起,美国人首先要在纽约市的东河之上修建几座跨度在450~490m左右的悬索桥,这一任务在1880至1920年之间陆续完成了,它们是:布鲁克林桥、威廉斯堡桥、曼哈顿桥。接着,在30年代,跨度超过1000m的华盛顿桥、金门桥相继在美国建成。这使美国在悬索桥的成就方面将其它各国远远甩在后面。1940年,在美国发生了塔可马桥风毁事故,经过专家们的调查研究,找出了症结所在,提出了相应对策。这样,美国的大跨悬索桥事业在50年代又蓬勃发展起来了,其突出的表现,就是1964年建成的韦拉扎诺桥:双层桥面,12条车道,跨度1298m;这一世界跨度记录一直保持到80年代之初。在第二次世界大战之后,公路交通在全世界取得很大发展,大跨悬索桥的修建成为全世界普遍关心的问题。1964

年,英国建成福斯公路桥,这是欧洲第一座跨度超过 1000 m 的大桥。1966 年,英国又建成塞文桥,其加劲梁采用全焊的扁平钢箱,并利用正交异性钢桥面板充当其钢箱的顶板,就抗风及节省钢材而言开辟了一条新途径。到 70 年代,日本一跃而为经济大国,其联络本州和四国的交通建设开始实施。进入 80 年代,她也开始拥有了跨度 1000 m 以上的大跨悬索桥,并且打算在本世纪内建成跨度逼近 2000 m 的大桥。

交通建设是经济建设的一个重要的、不可或缺的部门,而大桥建设往往又是在陆上交通线路建设中一个重要的、不可缺少的环节。近十多年来,我国经济建设、交通建设发展很快,大跨悬索桥在我国势必要提上日程,这在 10 年之前已开始成为我国桥梁界的共识。1986 年,钱冬生教授开始指导其几名硕士研究生从事悬索桥的分析计算,本文作者就是其中之一。1988 年,钱教授同作者联名发表《在跨度 600 m 以上应该考虑悬索桥》一文<sup>[4]</sup>。1990 年,江苏省委托 3 个单位,研究在其省内的长江之上开辟第二通道的可行性。作者有幸应邀到交通部公路规划设计院,参与为江阴长江大桥(这是随后被选中的通道)进行分析计算、编制方案的工作。作者越发认识到进行大跨悬索桥理论研究对我国的经济建设具有实用价值,对提高我国桥梁科技水平也有重大意义。

目前,我国跨度 452 m 的汕头海湾大桥(其加劲梁采用预应力混凝土扁箱梁,具有很大特色)和跨度 888 m 的虎门珠江大桥都已开工。跨度 900 m 的西陵峡大桥已作为长江三峡开发工程的第一个标发包给承办单位。跨度 1385 m 的江阴长江公路大桥已经国家批准立项,其技术设计已部分完成。从珠海市直达香港的伶仃洋跨海工程(其中必然要包含 1000 m 以上跨度悬索桥两座)已提上日程。我国的建桥队伍正在茁壮成长,作者深受鼓舞,更有遐想。饶有兴趣的是,江阴是徐霞客的故乡,我国古代的索桥从徐霞客开始传播到西方,而现在我国要在他的故乡建设一座跨度超 1000 m 的大跨悬索桥,这使作者想到 1966 年塞文桥竣工时,英国一位知名教授的感叹,他说:塞文桥的建成,是在 Telford 和 Brunel 之后,历时大约 100 年,我大不列颠在悬索桥建造方面所占据的世界领先地位,终于得到了恢复<sup>[5]</sup>! 作者企盼在本世纪之内,我国的桥梁工程师也能有类似感受。

## 二

悬索桥的理论研究大概起始于 18 世纪末 19 世纪初,Fuss 研究抛物线缆的问题。当时,俄国计划在圣彼得堡附近的涅瓦河上建造一座悬索桥,Euler 的学生 Fuss 作为沙俄皇家科学院的数学家受命研究缆索应取的形状。他的研究揭示了在沿跨向的均布荷载作用下,缆的几何形状为抛物线,缆的水平内力为恒定值的规律<sup>[3]</sup>。此后,Telford 在修建梅耐桥之前,曾就缆的形状向英国皇家学会主席 Gilbert 请教,Gilbert 因而组织力量研究受均匀应力的变截面缆的形状问题。梅耐桥曾采用了 Gilbert 的建议,并通过眼杆数目的增减来改变主缆截面<sup>[3]</sup>,因此,梅耐桥可以算是第一座注意到理论研究的悬索桥。紧随其后,Brunel 在设计克里夫顿桥时,曾就三种缆索形式进行过计算,即:抛物线缆、等截面悬链线缆、均匀应力悬链线缆,其中关于等截面悬链线缆的数学理论是早就由 Bernouilli 解决了的问题<sup>[3]</sup>。上述关于缆索计算的理论被当时在英国学习和研究悬索桥的法国数学家和工程师 Navier 收录在他 1823 年发表的著作中<sup>[1,3]</sup>。到 19 世纪的上半叶,理论研究还是局限在缆索方面,并没有发展到对全桥整体行为的

分析。这时的英国工程师对缆索的刚度不放心,就借助加劲梁或斜拉索来增加全桥的刚度。同样的设计思想也体现在美国工程师 J. A. Roebling 的设计中。例如,在尼亚加拉河公铁两用悬索桥中,同时使用了典型的带竖吊索的主缆、木质加劲桁架梁和斜拉索。然而,Barlow 曾在 1858 年进行过一系列的模型实验<sup>[3]</sup>,从实验结果可知:即使采用较弱一些的加劲梁,也能使吊索传到缆上的活载分布相当均匀。于是,就提出了一个主缆和加劲梁如何分担活载的问题。对这问题的探讨导致 Rankine 在当年提出其“Rankine 理论”<sup>[3]</sup>,但该理论在本质上却强调了加劲梁的刚度作用。这是关于悬索桥结构分析的第一个理论。尽管它也许并未真正用于悬索桥设计,但它所强调加劲梁刚度作用的思想却在一个时期内影响了悬索桥的设计,并且也可能是英国的悬索桥跨度在相当长的时期内裹足不前的原因。但是在美国,J. A. Roebling 在修建尼亚加拉河公路铁路两用桥时,就开始认识到主缆重力刚度的作用。这样的认识,加上高强碳素钢丝的使用,使他敢于把布鲁克林桥的跨度一下提高到 486 m,而梁高只是跨度的 1/90。尽管该桥仍然使用了斜拉索,但它同时也依靠了主缆的重力刚度<sup>[3]</sup>。布鲁克林桥的设计思路主要是来自经验,并不曾进行结构力学理论分析。在 1880 年前后,鉴于 Rankine 理论分析所得的缆和加劲梁的变形不协调,在欧洲和美国分别有一些学者尝试将拱的弹性分析理论应用于悬索桥,这就导致悬索桥弹性分析理论的建立<sup>[3]</sup>。弹性理论也是使工程师注重加劲梁的刚度作用,这就使 1903 年建成的跨度 488 m 的威廉斯堡桥的加劲桁架梁高度达到跨度的 1/40<sup>[3,14]</sup>! 另一方面,早在 1888 年,奥地利的 Melan 教授就提出了适用于拱和悬索桥一类结构的挠度理论,并于 1906 年作出进一步的改进<sup>[3]</sup>。这一理论首先由 Moisseiff 应用于 1909 年建成的跨度 448 m 的曼哈顿桥的设计计算中,其结果是使曼哈顿桥的加劲梁梁高仅是其跨度的 1/60<sup>[3,13]</sup>。与弹性理论比较,挠度理论在它诞生之后的一段时期曾被称为“精确理论”。但实际上它是建立在若干个理想化(简化)的假定之上,这就必然要带来误差。再加上其所使用的是非线性微分方程,求解不方便。随着计算数学、计算力学和计算工具的发展,便提出了许多种改进或避开挠度理论的悬索桥竖向分析理论和方法<sup>[6,10]</sup>。这还只是竖向分析一个方面。随着 Moisseiff 1933 年提出横向分析的弹性分配法,以及塔可马桥事故后为服务于风振研究而提出自由振动分析理论以来,为用于不同情况的分析理论又出现了好多种<sup>[6,10]</sup>。在所有这些用于不同情况的分析理论中,每一类所最先出现的总是作为连续体的分析理论,随着计算力学和计算机的发展,才涌现出各种离散化的分析理论。这些理论或方法在后续各章的概述中有详细的综述。现在先将这些理论所涉及到的计算力学体系表示于图 1.1 中。关于悬索桥分析理论的文献,目前仍然层出不穷,这是因为:就分析的精度、理论的适用性(或通用性)以及计算的效率而言,各种需要探讨的大小问题总是存在的。

在上述的分析理论之中,竖向分析的挠度理论和横向分析的弹性分配法都隐含着加劲梁愈柔愈经济的观念。美国工程师曾因应用这两种理论于悬索桥设计而尝到甜头,于是变本加厉,加劲梁愈做愈柔,用钢量愈来愈省,在节省横向风撑的同时,几乎使加劲梁不具有任何抗扭刚度。其结果,便是导致了 1940 年塔可马桥因风致振动而垮塌的恶果。这一事件震惊了桥梁界,并吸引了许多著名学者从事所谓桥梁气动失稳问题的研究<sup>[7]</sup>。经过 Farquharson、Von Karman、Bleich 及 Steinman 等的多年研究,认识到破坏的原因是由于加劲梁断面的气动外形不良及抗扭刚度太低所致。又经过大量的风洞试验和分析,发现桥面中央开槽并有上下两个平纵联的闭合桁架加劲梁具有良好的气动稳定性。于是,在塔可马桥的重建中就采用了这样的方案,并且根据类似的原则,对以前所建的几座悬索桥进行了加固。紧随其后,英国在为修建其福

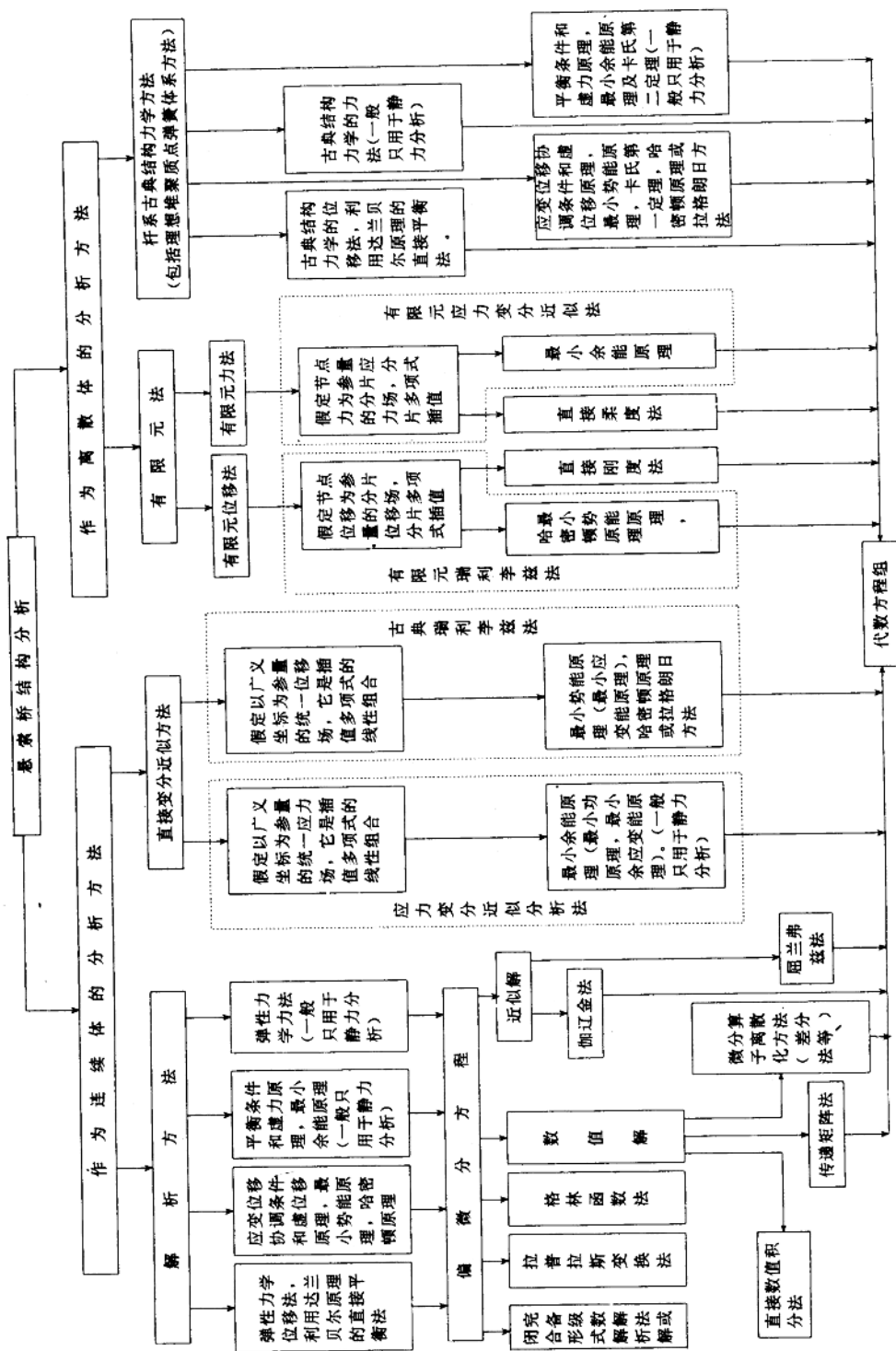


图 1.1 悬索桥结构分析与计算力学体系

斯桥和塞文桥而进行的风洞实验研究中,找到了气动稳定性更优越的加劲梁型式,这就是在塞文桥中所采用的那种具有较大抗扭刚度和气动外形良好的扁平箱梁<sup>[7]</sup>。随着风洞试验方法的发展、经验的积累以及机翼颤振理论的近似应用,气动失稳问题现在实际上已能避免,但是有关的机理一直没有彻底搞清楚,所以,这方面的研究工作一直在继续。在随后的发展中,Scanlan 提出了一个适用于结构物的半经验、半理论的气动力模型。但如何利用节段模型实验所获得的气动力数据来推断全桥的气动稳定性判据,虽然有一些学者对此进行了探讨,却仍然有必要进一步研究。另一方面,随着结构物抗风工程学的发展,又认识到了其它一些风致振动现象,特别是紊流引起的随机响应和构件的涡激振动,在悬索桥的抗风研究中现已受到重视。前者以 Davenport 的研究为发端,吸引了许多学者进行研究,但有关紊流场随机特性的研究和响应的计算方法仍然还不完善;对于后者,主要是采取措施加以避免。

关于地震问题,早在 30 年代,当日本的末广教授应邀到美国进行地震工程的学术交流后,美国工程师就开始在随后建造的金门桥和相邻的奥克兰海湾桥的设计中予以考虑。50 多年来,伴随着地震工程学的发展,悬索桥的地震响应评价和抗震设计方法也经历了从静态的地震系数法(震度法)到动态的反应谱法、时间历程响应法直到随机振动方法的发展。但是随着 1971 年 San Fernando(圣费尔南多)地震后兴起的所谓生命线结构的防灾研究的发展,在美国以 Baron 为首提出所谓悬索桥非一致支承激励的地震响应问题<sup>[8]</sup>。由于按这种方式分析所得的地震响应要比一致支承激励的地震响应严重得多,这就导致人们重新审视以往的悬索桥抗震设计方法及现存悬索桥的抗震安全性。近年来,Abdel-Ghaffar 等主要针对美国式的桁架加劲悬索桥,Dumanoglu 和 Severn 等主要针对英国式的扁平箱梁加劲的悬索桥分别进行了非一致支承激励的地震响应研究。但是,在非一致激励模型的确定、响应计算方法、动力可靠性的评价方面,现在都还存在许多问题,尤其是在激励模型的研究方面,所有的研究者都未考虑地震动在空间和时间两个方面的双重随机特性,因此,这一研究仍有待于向更合理、更科学的方向推进<sup>[9]</sup>。此外,将这样的理论研究与抗震设计实践相联系,也还有许多工作要做。

迄今为止,国内出版、论述到悬索桥的书籍,只有为数很少的几部<sup>[10-14]</sup>,其中除一部外<sup>[13]</sup>,其余均为翻译。另外还有一部汇集了一些小跨悬索桥的设计实例<sup>[15]</sup>。在这些书籍中,只有三部涉及到大跨问题<sup>[10,13,14]</sup>。对于大跨悬索桥的理论研究,国内似乎还留有相当多的空白。也就是说,除了老一辈学者在 30 至 40 年代从事过悬索桥理论研究外<sup>[16,17]</sup>,直到近年来的很长一段时期内,似乎没有多大进展。为因应大跨悬索桥建设的需要,近年来虽已开始有一些零星的研究文献逐步发表<sup>[18-20]</sup>,但那是滞后于我国经济建设需要的。快马加鞭,只争朝夕,全面而系统地开展工作,这确实是不容逡巡的。

### 三

本书试图解决大跨悬索桥设计所遇到的主要理论问题,并企图形成一个体系。第二章至第五章是其主体。第二章探讨悬索桥静力结构分析,包括竖向一纵向、横向、扭转及偏心荷载下的结构分析、空间分析、塔的结构分析等。第三章探讨悬索桥自由振动分析,包括竖向一纵向、扭转、横向自由振动和空间耦合自由振动及塔的振动,这一章也是后续的动力响应分析的基础。这两章中既有作为连续体的分析理论,也有有限元法。第四章探讨悬索桥地震响应分析,首先

根据悬索桥在动力行为方面的特殊性定义适合悬索桥需要的地震动随机场激励模型,建立恰当的随机场时间历程样本模拟方法,然后分别建立地震动随机场激励下的时间历程响应分析方法、稳态随机响应分析方法、瞬态随机响应分析方法,并使用动力可靠度理论来评价最大响应,最后还将提出多点非一致激励的反应谱法。第五章探讨悬索桥风致振动效应的分析,包括悬索桥三维颤振和抖振分析的统一算法、不考虑抖振力时三维颤振问题的复特征值算法、不考虑振型气动耦合时三维抖振响应的实用算法以及一个二维抖振响应的简化近似算法。这两章的理论都是基于对结构的有限元离散模型,只有二维抖振响应的简化近似算法是基于对连续体的分析。最后,第六章是一个简短的总结。另外,附录 A 对其基于第二、三、四、五章的理论所开发的软件系统进行扼要介绍;附录 B 则对阅读第四、五章所需的随机场理论作了简单介绍。

## 参 考 文 献

- [1] ASCE: Long span suspension bridges: history and performance, Proc. ASCE National Convention, Boston, 1979.
- [2] Latimer M, et al: Bridge to the future: a centennial celebration of the Brooklyn Bridge, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 424, 1984.
- [3] Pugsley A: The theory of suspension bridges, Edward Arnold LTD, London, 1957.
- [4] 钱冬生, 陈仁福: 在跨度 600 m 以上应该考虑悬索桥, 第八届全国桥梁及结构工程学术会议论文集, 1988.
- [5] 钱冬生: 从英国对其塞文河桥渡的加固中汲取教益(交流资料), 1993.
- [6] 陈仁福: 关于悬索桥的结构分析理论, 第二届铁路桥梁情报会议论文, 四川峨眉, 1988.
- [7] 辽宁省交通科研所编译: 桥梁风振论文集, 1982.
- [8] Baron F, Arikan M, Hamati R E: The effects of seismic disturbances on the Golden Gate Bridge, EERC Report No. 76-31, 1976.
- [9] 陈仁福: 大跨悬索桥抗震研究与设计方法, 四川省第二届结构振动学术会议论文集, 四川眉山, 1992.
- [10] 小西一郎著, 戴振藩译: 钢桥⑤, 人民铁道出版社, 1981.
- [11] 查普林 C A 著, 姚玲森译: 吊桥, 人民交通出版社, 1963.
- [12] 斯特累列茨基 H H 著, 许成业译: 桥梁的格式组合体系, 人民交通出版社, 1956.
- [13] 钱冬生, 陈仁福: 大跨悬索桥的设计与施工, 西南交通大学出版社, 1992.
- [14] Gimsing N J 著, 姚玲森、林长川译: 缆索承重桥, 同济大学出版社, 1992.
- [15] 贵州省交通设计院: 吊桥设计实例, 人民交通出版社, 1962.
- [16] 李国豪: 桥梁与结构理论研究, 上海科技出版社, 1983.
- [17] 钱令希: A simplified method of analyzing suspension bridges, ASCE Trans. Paper No. 2383, 1948.
- [18] 四川省交通厅: 四川公路·悬索桥专辑, 1989.
- [19] 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会: 第一届全国索结构学术交流会论文集, 无锡, 1991.
- [20] 严国敏: 悬索桥专题情报资料, 铁道部大桥局设计院, 1989.
- [21] 罗世勋等: 当代四川公路桥梁, 四川科技出版社, 1988.

## 第二章 悬索桥静力分析

### 一 概 述

悬索桥在静荷载下的结构行为是决定悬索桥结构设计的主要依据,所以,关于静力分析理论和方法的研究,就成了悬索桥理论研究中最重要和最基本的部分。

#### (一) 悬索桥静力分析理论研究的历史发展与现状述评

悬索桥在成桥阶段受有竖向荷载、横向荷载和偏心荷载等,针对不同方向的荷载,通常采用不同的计算模型和方法。

##### 1. 悬索桥在竖向荷载下的结构分析

一般认为,悬索桥在竖向荷载下的结构分析理论的发展构成了近代悬索桥的理论基础。而分析理论的这种发展,其根源在于:①对悬索桥行为特点的愈来愈正确的认识;②数值方法和计算机的发展;③悬索桥因其向大跨发展而出现的一些新的结构特色。

大致说来,悬索桥承受竖向荷载的结构分析理论可以划分为如下几类:弹性理论,作为连续参数方法的非线性膜理论,作为离散参数方法的非线性离散吊杆理论和非线性有限元理论,以及由上述理论导出的简化和近似分析方法。

##### (1) 弹性理论

在19世纪以前,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悬索桥的计算理论<sup>[1]</sup>。后在1858年,英国的Rankine才提出了针对有加劲梁的悬索桥的计算理论。但这个理论武断地假定由活载所生的吊杆拉力集度等于所有活载除以跨长所得的值,且沿跨均布,以此为基础来分别分析缆索和加劲梁的内力。由于这个武断假定导致了分析所得的缆和加劲梁变形不协调,所以该理论自然是不合理的。大约在1880年前后,在美国以Levy为代表的一批学者尝试用Navier及Castigliano建立的结构分析理论来分析悬索桥的内力;在欧洲Navier及Castigliano本人也在进行这样的尝试(此前他们的理论主要用于拱类结构的分析),这就出现了最初的悬索桥弹性理论<sup>[1]</sup>。根据这个弹性理论,吊杆拉力集度将仍为沿跨度均布,但是其值将取决于缆索和加劲梁的刚度。这种弹性理论后经Steinman整理成习用的标准形式<sup>[2-4]</sup>。弹性理论的要点示于图2.1中。

弹性理论曾在一个时期支配悬索桥设计,在挠度理论出现之后,它仍未失效,直至今日,跨度小于200m的悬索桥设计仍然可以借助于弹性理论。但是弹性理论有两个非常显著的缺陷:一是没有考虑到恒载对悬索桥刚度的有益影响(如前述,这是Roebing在1855年修建尼亚加拉河悬索桥时就意识到的);二是没有考虑非线性大位移影响。尽管按弹性理论做设计可以偏于安全,但却严重浪费了材料。因作为悬索桥主要承重构件的缆索是受拉构件,当考虑

了上述两因素时,其内力和位移值将显著减少(注:拱桥的主要承重构件是受压,考虑上述两因素时,内力和位移值将显著加大;拱肋越柔,其影响越甚。这就是拱桥很难向大跨发展的主因之

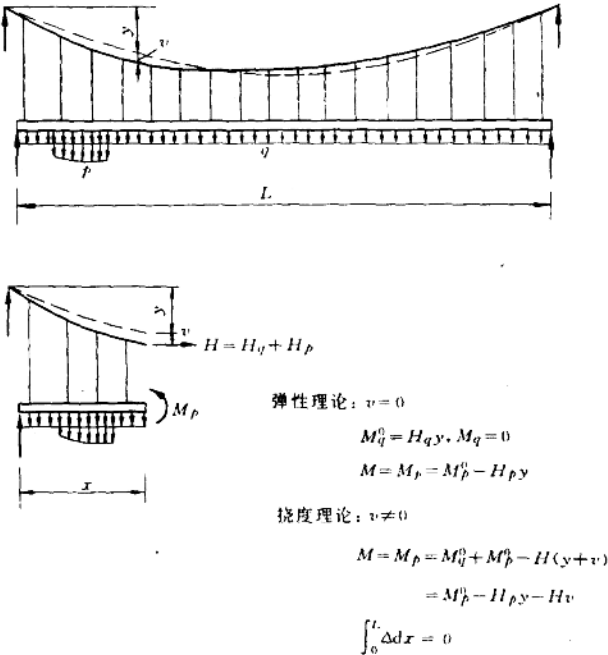


图 2.1 悬索桥的弹性理论和挠度理论

一)。Steinman 曾研究了弹性理论和后述的挠度理论分析结果的差别,表 2.1 列出了这种差别的考察实例<sup>[4]</sup>。由表可见,由弹性理论计算的弯矩偏大很多。这种情况在跨度愈大、加劲梁愈柔、活恒载比值愈小等条件下表现愈显著。因此,弹性理论不能用于大跨悬索桥的内力分析。

表 2.1 弹性理论与挠度理论计算结果之比

| 桥 名      | 跨 长<br>$l$ | 弹性理论与挠度理论结果之比 |           |
|----------|------------|---------------|-----------|
|          |            | $l/4$ 处弯矩     | $l/2$ 处弯矩 |
| 弗洛莲那波里斯桥 | 340 m      | 125%          | 159%      |
| 费城-坎母登桥  | 533 m      | 152%          | 161%      |
| 芒特-霍普桥   | 366 m      | 200%          | 154%      |

### (2) 非线性膜理论

该理论是将悬索桥作为连续体进行结构分析,此时要将悬索桥吊杆比拟为仅在竖向有抗力的膜,故而得名。古典膜理论即指通常所说的挠度理论。

早在 19 世纪上半叶,人们就已认识到受均布荷载的悬缆当再施加一个集中荷载时,其行为是非线性的,但直到 1862 年才由一个佚名的学者提出无加劲悬索桥的挠度理论。而有加劲悬索桥的挠度理论则是奥地利 Melan 教授在 1888 年提出并在 1906 年作了改进<sup>[1]</sup>。建桥史上第一次将 Melan 的挠度理论付诸实用是 Moiseiff 设计的纽约曼哈顿桥,该桥是在 1909 年建

成的。曼哈顿桥的经验加上对 Melan 著作的翻译、整理和总结,使 Steinman 及 Moiseiff 等得以发展挠度理论使其可以用于带边跨的悬索桥<sup>[3,4]</sup>。

挠度理论基于以下的假定:恒载为沿跨度匀布,在无活载状态下,缆索为抛物线,加劲梁内无应力;吊杆为竖直,且沿跨密布,不考虑其在活载作用下的拉伸和倾斜,当作仅在竖向有抗力的膜;在每一跨度内加劲梁为等直截面梁;缆索及加劲梁都只有竖向位移,不考虑其在纵向的位移。基于这些假定可导出挠度理论的基础微分—积分方程<sup>[5]</sup>。挠度理论的要点也示于图 2.1,便于与弹性理论作比较。

挠度理论的基础微分方程是非线性的,所以求得的闭合解是以包含未知的活载水平缆力  $H_p$  的形式给出,为此就须先假设一个  $H_p$ ,将它代入微分方程解出挠度  $v$ ,再将  $v$  代入一个表达相容条件的缆索积分方程,以便反求  $H_p$ 。必须保证所得的  $H_p$  与假定值一致。当不一致时就必须反复同样计算。这样的方法计算很烦琐,却又不适于计算机运算。特别是由于迭加原理不适于非线性情况,所以对每一种荷载状况都得进行类似计算,这更增加了问题的难度。由于这个原因,Timoshenko 在 1928 年提出求解挠度理论基础方程的完备级数解法<sup>[6-7]</sup>。在这个解法中, Timoshenko 假定挠度为正弦级数形式,在将微分方程中的恒载和活载项展开为 Fourier (付立叶)级数形式后,可获得挠度级数的各系数,但它们仍为  $H_p$  的函数。在将挠度级数代入表达相容条件的积分方程后,可获得  $H_p$  的渐近式;取  $H_p$  的近似值代入挠度级数,可获得挠度的近似解。如此反复几次,即可获得  $H_p$  和挠度的精确度适当的近似解。这个方法的好处在于每做一次渐近计算后就能获得更精确的解。但是这个方法仍不适于计算机运算。

由于闭合解析解法和完备级数解法都不适合于计算机运算,所以在进入电子计算机时代以来,一些学者另行寻求适于计算机应用的挠度理论基础方程数值解法。如果不考虑吊杆拉伸,仓西茂在 1962 年<sup>[8,9]</sup>及 Poskitt 在 1966 年<sup>[10]</sup>提出的方法因采用了与挠度理论相同的假定,故可看作是对挠度理论二阶形式的微分方程的微分算子进行差分离散化的算法。而 1968 年, Fukuda (福田武雄)提出的算法是对挠度理论的四阶形式的微分方程进行差分离散化的算法<sup>[11]</sup>。由于差分离散,非线性微分方程转化为非线性代数方程组,通过使用 Newton-Raphson (牛顿—拉斐逊)迭代法,这样的方程组的求解容易借助于计算机进行。除差分法外,1962 年 Esslinger 提出了挠度理论基础方程的传递矩阵解法,但仅考虑了线性化的情况<sup>[12]</sup>;1976 年中井博和野口二郎继承了 Esslinger 的传递矩阵法,但使用 Newton-Raphson 法来求解由非线性微分方程经利用边界条件和传递矩阵运算导得的非线性代数方程组<sup>[13]</sup>。上述的差分法和传递矩阵法都属于离散形式的数值方法,它们不仅适用于计算机运算,而且适用性比挠度理论更好,例如,可以方便地考虑加劲梁刚度以及荷载等因素沿跨度变化的情况。但在反映结构行为的精度方面,与挠度理论大致是相同的,这是因为它们继承了挠度理论不考虑吊杆倾斜、不考虑缆和加劲梁纵向位移等缺陷。

除此之外, Ohshima 最近使用了 Laplace (拉普拉斯)变换和 Green (格林)函数法相结合的方法来求解挠度理论的基础方程。这个方法是将微分方程变换成了代数形式的四阶矩阵方程,求解要比微分方程方便,但其中的刚度矩阵和荷载项的计算仍较麻烦。

除了古典膜理论之外,还有所谓近代膜理论。近代膜理论通常是指 West 和 Robinson 在 1968 年建立的可考虑缆索纵向位移和吊杆延伸并采用 Newton-Raphson 法求解非线性微分方程的连续分析方法<sup>[14]</sup>。但是它的起源却可以追溯到 Rode 在 1930 年发表的“新挠度理论”一文,在该文中, Rode 考虑了缆索纵向位移的影响<sup>[15]</sup>。随后在 1939 年, Atkinson 和 Southwell 也