



陈仁福 著

大跨悬索桥理论

DAKUA XUANSUOQIAO LILUN



西南交通大学出版社

陈仁福 著

大跨悬索桥理论

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大跨悬索桥理论 / 陈仁福著 — 成都: 西南交通大学出版社, 2015.3
ISBN 978-7-5643-3803-9

I. ①大… II. ①陈… III. ①长跨桥—悬索桥—研究
IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 049035 号

大跨悬索桥理论

陈仁福 著

责任编辑 胡晗欣
装帧设计 原谋书装

印张 16.5 字数 296千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版本 2015年3月第1版

印次 2015年3月第1次

印刷 四川煤田地质制图印刷厂

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市金牛区交大路146号

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

书号: ISBN 978-7-5643-3803-9

定价: 65.00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

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的。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）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定为1:6，但悬索桥的这一比值却是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倡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曾诚说了：“编写教材、工程参考书及专著。其第一本是《大跨悬索桥的设计与施工》。”曾老当即表示支持，并为该书写了序。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有利。这种精神也值得发扬。”由于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第二本。

本书就是以上所说的第二本。虽着重于讲计算分析，但颇有拓宽。内容较为浓缩。在描绘大跨悬索桥整个理论体系方面，硬是下了工夫。这是专著性质书籍，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。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，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,他们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。该书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(见图4.1,日本的本州四国联络桥所用)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。”

老前辈曾威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方案,并且进行了大量的推导和计算,确实是难能可贵。”

由此而使我们对于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)还是在外国;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搜

集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以此宗旨而作。（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
第一节	1
第二节	3
第三节	7
参考文献	7
第二章 悬索桥静力分析	9
第一节 概 述	9
第二节 竖向荷载作用下作为连续体的分析	26
第三节 竖向荷载作用下的非线性杆系有限元分析	36
第四节 竖向荷载作用下的近似分析和影响线方法	41
第五节 横向荷载作用下的结构分析	52
第六节 扭转及偏心荷载作用下的结构分析	56
第七节 空间分析	67
第八节 塔的结构分析	79
第九节 数值算例	82
参考文献	85
第三章 悬索桥振动性状分析	90
第一节 概 述	90
第二节 悬索桥作为连续体的空间耦合自由振动分析	99
第三节 悬索桥作为连续体的二维自由振动分析	105
第四节 悬索桥自由振动分析的二维有限元法	109
第五节 悬索桥自由振动分析的三维空间有限元法	116
第六节 塔的振动性状分析	118
第七节 振型参与系数和振型贡献率	119
第八节 数值算例	123
参考文献	134
第四章 悬索桥地震响应理论分析	139
第一节 概 述	139

第二节	悬索桥在动力行为方面的特殊性	145
第三节	适用于大跨悬索桥的地震激励模型	146
第四节	随机场时间历程样本模拟	152
第五节	非一致激励的时间历程响应分析	159
第六节	非一致随机激励下的稳态随机响应分析	164
第七节	非一致非平稳随机激励下的瞬态随机响应分析	166
第八节	结构随机振动的峰响应评价	167
第九节	非一致激励响应分析的反应谱法	174
第十节	数值算例及讨论	178
	参考文献	182
第五章	悬索桥风致振动效应的理论分析	188
第一节	概 述	188
第二节	非定常气动力(自激气动力)	197
第三节	大气紊流随机荷载模型	200
第四节	三维空间耦合颤振和抖振分析的一般方法	207
第五节	三维耦合颤振分析的复特征值方法	213
第六节	三维抖振响应分析的实用算法	217
第七节	作为连续体的二维抖振响应分析简化算法	220
第八节	数值算例及讨论	223
	参考文献	234
第六章	总 结	240
附录 A	悬索桥计算机软件系统简介	242
附录 B	随机场理论基础	246
附录 C	悬索桥译名对照	254

第一章 绪 论

第一节

在悬索桥的编年史上,我们祖先的业绩闪耀着永恒的光辉。从最早出现竿桥(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^[1]。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^[21]。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^[1]。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^[1]。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^[1]。到1741年,英国方建成欧洲的第一座永久性铁索桥,即偶氏桥,跨度22.3m,但它已毁于1802年^[1,2]。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,Brunei修建的克里夫顿桥^[3]。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^[1,2]。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^[1,2]。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^[1,2]。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 450~490 m 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 20 世纪 30 年代，跨度超过 1 000 m 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他各国远远甩在后面。1940 年，在美国发生了塔可马桥风毁事故，专家们经过调查研究，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 1 298 m；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 1 000 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，日本一跃而成为经济大国，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 1 000 m 以上的大跨悬索桥，并且打算在 20 世纪内建成跨度逼近 2 000 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^[4]。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 1 385 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 1 000 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 1 000 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^[5]!作者企盼在 20 世纪之内,我国的桥梁工程师也能有类似感受。

第二节

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^[3]。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^[3],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 Bernoulli 解决了的问题^[3]。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^[1,3]。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^[3],从实验结果可知:即使采用较弱一些有加劲梁,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”^[3],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量力刚度^[3]。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^[3]。弹性理论也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梁高度达到跨度的 1/40^[3,14]! 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^[3]。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^[3,13]。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^[6,10]。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^[6,10]。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^[7]。经过 Farquharson、VonKarman、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

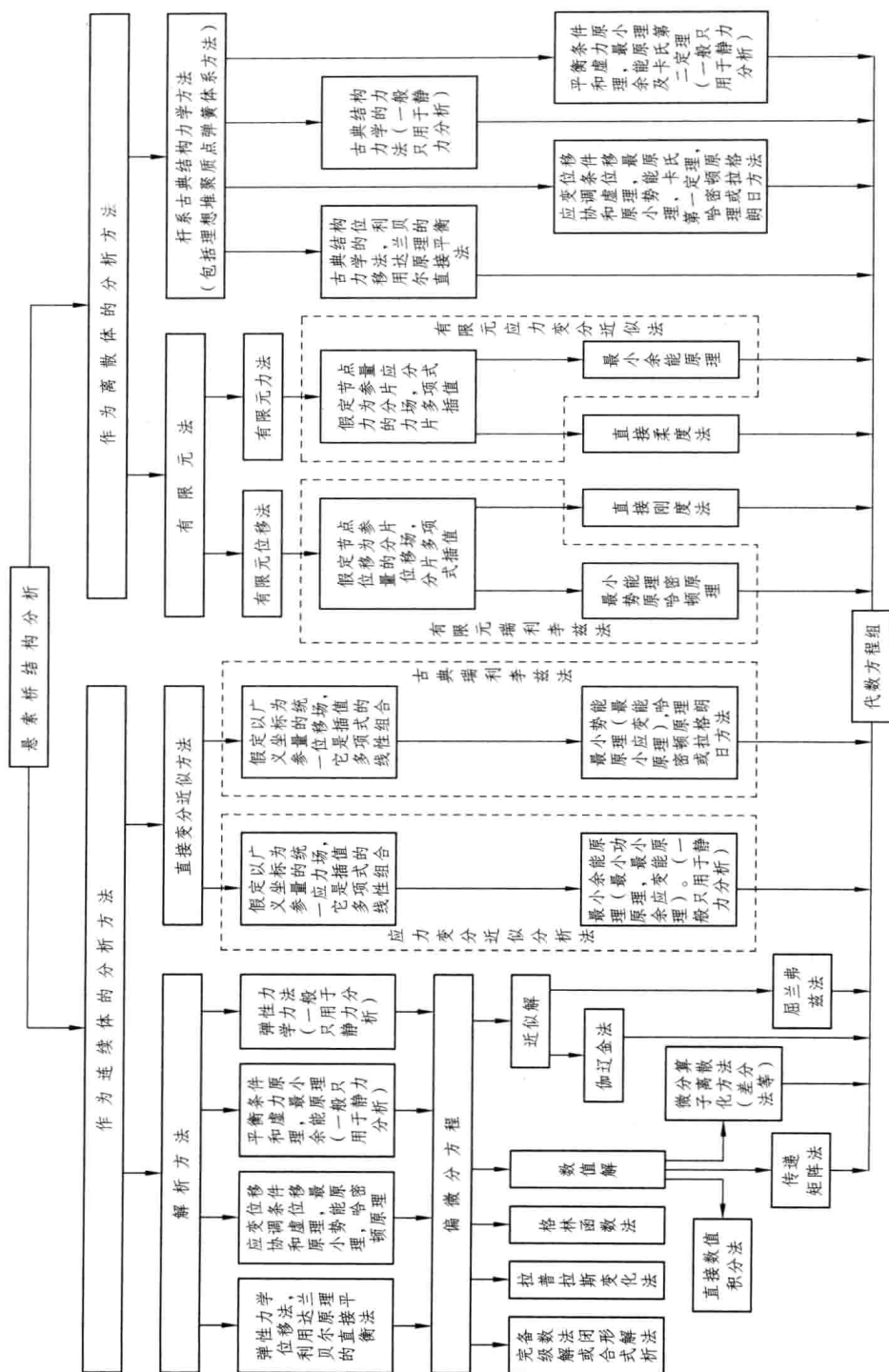


图 1.1 悬索桥结构分析与计算力学体系

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,英国在为修建其福斯桥和塞文桥面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^[7]。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,又认识到了其他一些风致振动现象,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20世纪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。80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^[8]。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^[9]。此外,将这样的理论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^[10-14],其中除一部外^[13],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^[15]。在这些书籍中,只有三部涉及大跨问题^[10,13,14]。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20世纪30至40年代从事过悬索桥理论研究外^[16,17],直到近年来的很长一段时期内,这一领域似乎没有多大进展。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^[18-20],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。

第三节

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,最后还将给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对其基于第二至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[C]//Proc. ASCE National Convention. Boston: 1979.

- [2] Latimer M, et al. Bridge to the future: a centennial celebration of the Brooklyn Bridge[C]//Annals of the New York Academy of Sciences. 1984, Vol. 424.
- [3] Pugsley A. The theory of suspension bridges[M]. London: Edward Arnold, Ltd., 1957.
- [4] 钱冬生, 陈仁福. 在跨度 600 m 以上应该考虑悬索桥[C]//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)[G]. 1993.
- [6] 陈仁福. 关于悬索桥的结构分析理论[C]//第二届铁路桥梁情报会议论文集. 峨眉: 1988.
- [7] 辽宁省交通科研所. 桥梁风振论文集[C]. 1982.
- [8] Baron F, Arikan M, Hamati R E. The effects of seismic disturbances on the Golden Gate Bridge (EERC Report). 1976, No. 76-31.
- [9] 陈仁福. 大跨悬索桥抗震研究与设计方法[C]//四川省第二届结构振动学术会议论文集. 眉山: 1992.
- [10] 小西一郎. 钢桥⑤[M]. 戴振藩, 译. 北京: 人民铁道出版社, 1981.
- [11] 查普林 C A. 吊桥[M]. 姚玲森, 译. 北京: 人民交通出版社, 1963.
- [12] 斯特累列茨基 H H. 桥梁的格式组合体系[M]. 许成业, 译. 北京: 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[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1992.
- [14] Gimsing N J. 缆索承重桥[M]. 姚玲森, 林长川, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [15] 贵州省交通设计院. 吊桥设计实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 1962.
- [16] 李国豪. 桥梁与结构理论研究[M]. 上海: 上海科技出版社, 1983.
- [17] Lingxi Qian. A simplified method of analyzing suspension bridges[J]. ASCE Trans, Paper No. 2383, 1948.
- [18] 四川省交通厅. 四川公路·悬索桥专辑[M]. 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[C]. 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] 罗世勤, 等. 当代四川公路桥梁[M]. 成都: 四川科技出版社, 1988.