

※ 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

千米级斜拉桥

——结构体系、性能与设计

Kilometer-scale Cable Stayed Bridge

——Structural System, Performance and Design



张喜刚 陈艾荣 等著



人民交通出版社

China Communications Press

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

Kilometer-scale Cable Stayed Bridge
——**Structural System, Performance and Design**

千米级斜拉桥 ——结构体系、性能与设计

张喜刚 陈艾荣 等著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书针对千米级斜拉桥结构体系、性能 and 设计方法等问题,以主跨 1 088m 苏通大桥为基础,拓展到主跨 1 308m、1 500m、1 800m 等跨度的千米级斜拉桥,研究了千米级斜拉桥设计理论和方法、结构体系与关键参数、风作用特性与结果响应、抗震设计、船舶撞击作用和设计方法、汽车作用下结构性能、弹塑性稳定性能、极端作用特性及设计方法等。本书系统解决了千米级斜拉桥设计理论、方法、参数、标准方面关键问题,可为同类桥型的建设提供参考和借鉴。

本书可供从事桥梁设计、施工及相关研究人员阅读,也可供高等学校相关专业研究生和高年级本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

千米级斜拉桥:结构体系、性能与设计/张喜刚等著.

北京:人民交通出版社,2010.2

ISBN 978-7-114-07769-2

I. 千… II. 张… III. ①斜拉桥—结构体系②斜拉桥—结构设计 IV. U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021306 号

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

书 名:千米级斜拉桥——结构体系、性能与设计

著 者:张喜刚 陈艾荣 等

责任编辑:沈鸿雁 王文华 郑蕉林 丁润铎 韩亚楠

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.ccpress.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:北京市凯鑫彩色印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:15

字 数:431 千

版 次:2010 年 2 月 第 1 版

印 次:2010 年 2 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07769-2

定 价:38.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

现代斜拉桥的发展是桥梁工程师最引以为豪的成就之一。

虽然利用藤、竹等柔性天然材料承重并实现跨越是人类最早认识到的自然规律之一，但斜拉桥作为一种固定结构形式，其发展却由于缆索材料的性能问题长期停滞。在现代材料与技术进步的推动下，1956 年 Strömsund 桥在瑞典建成通车；之后，在德国著名工程师 Franz Dischinger 的推动下，多座稀索体系斜拉桥在莱茵河上相继建成，现代斜拉桥正式形成，也实现了斜拉桥跨径的第一次发展。随后，现代斜拉桥又经历了从稀索体系到密索体系等一系列重要的发展历程，跨越能力稳步提升。1995 年，法国诺曼底大桥实现了 856m 的跨径；1999 年日本多多罗大桥实现了 890m 的跨径。而挑战千米级斜拉桥，实现斜拉桥跨径的千米级突破，则成为桥梁工程师在那之后又一个奋斗目标。

我国第一座斜拉桥为 1975 年原交通部重庆公路科学研究所设计和指导施工的四川云阳桥，跨径组合为 34.91m+75.84m+34.91m，主梁为混凝土单箱，每塔三对斜拉索。与此同时，上海市政工程设计研究总院也设计了新五桥，跨径组合为 24m+54m+24m，双车道宽 6.6m。此后国内又相继修建了三台涪江桥、上海浏港桥、广西红水河铁路桥等。在 1975 年~1985 年的 11 年间，我国大陆共建成各式混凝土斜拉桥 15 座，台湾建成了跨径 $2\times 134\text{m}$ 的三塔斜拉桥光复桥。我国大跨径斜拉桥的发展始自 1991 年建成的 423m 跨径的上海南浦大桥；随后，1993 年上海杨浦大桥突破了 600m 跨径，建成时跨径位于世界同类桥梁前列。此后，全国各地掀起大跨径斜拉桥的建设热潮，大批 400~600m 跨径的斜拉桥相继建成通车。

据不完全统计，我国 1986 年~1990 年 5 年间建成斜拉桥 33 座，1991 年~1995 年 5 年间建成 43 座，1996 年~2000 年 5 年间建成 63 座，自 1975 年开始到 2002 年共建成斜拉桥 155 座。从一定程度上看，大跨径斜拉桥的快速发展和跨径在 600m 左右的突破，解决了我国现代交通网络建设中的关键技术问题，是 20 世纪 80~90 年代桥梁工程领域取得的最重要成就之一。通过大量的斜拉桥建设，我国也积累了丰富的斜拉桥建设经验，并与世界同步，甚至是更为超前地考虑斜拉桥千米跨径的突破问题。

20 世纪末，仍处于方案研究阶段的苏通大桥与香港昂船洲大桥几乎同时提出了超千米跨径的斜拉桥方案。2002 年苏通大桥率先进入工程实施阶段，并于 2008 年 5 月正式建成通车，成为世界首座突破千米跨径的斜拉桥，是世界桥梁建设的里程碑工程。苏通大桥

的建成极大地提高了国内外桥梁建设者的信心,如我国主跨 926m 的鄂东长江大桥也已开工建设,国外也有跨径超千米的斜拉桥即将投入建设。这些千米级斜拉桥的建设,将世界斜拉桥建设的跨径水平提升到了一个崭新的高度。

如果说 20 世纪 90 年代,实现斜拉桥跨径 600m 级的突破主要依靠引进和学习国外先进桥梁建设技术成果的话,那么本次实现的斜拉桥千米跨径的突破,则更多地体现了自主创新。全面总结苏通大桥建设经验,解决结构体系和设计方面的关键技术问题,形成系统的千米级斜拉桥设计理论与方法,开发具有自主知识产权的桥梁设计分析工具,为类似工程提供有力的技术支撑,并研究千米级斜拉桥结构性能的一般规律,探索斜拉桥跨径提升的制约条件及其工程设计对策,为斜拉桥跨径的下一步突破进行技术储备,已成为迫切需要解决的问题。

苏通大桥是国家“十一五”重点工程建设项目,是《国家高速公路网规划》中沈阳至海口高速公路跨越长江的重要节点工程。苏通大桥位于上海西北约 100km 处,横跨长江,连接苏州、南通两市,是我国沿海高速公路跨越长江的咽喉工程。

苏通大桥地处长江河口地区,该大桥建设具有水文条件差、气象条件复杂、基岩埋藏深、通航标准高等建设条件方面和高、大、长、柔等结构方面的特点,千米级斜拉桥的技术要求超越了国内外现行标准、规范规定。千米级斜拉桥结构体系及特殊设计方法、深水急流潮汐河段条件下大型群桩基础施工控制、千米级斜拉桥塔梁索施工控制等多项世界级技术难题需要攻克,工程建设面临着极大的技术挑战。为了支撑苏通大桥建设,系统攻克千米级斜拉桥建设关键技术问题,科学技术部于 2006 年批准了国家科技支撑计划支持的首个重大公路交通工程项目——“苏通大桥建设关键技术研究”。

“千米级斜拉桥技术标准和关键结构及特性研究”是“苏通大桥建设关键技术研究”项目课题之一。课题研究针对千米级斜拉桥建设面临的复杂建设条件特点和结构体系等设计方面的技术难点,对技术标准、结构体系、关键结构及设计方法等进行攻关,解决了一系列关键技术问题,有力地支撑了苏通大桥的建设,并为以后同类桥型的建设提供了重要参考和借鉴。

本套丛书是课题研究成果的系统总结。《千米级斜拉桥——结构体系、性能与设计》是对千米级斜拉桥结构体系、性能和设计方法方面研究的成果总结,包括以苏通大桥为设计原型的主跨 1 088m 斜拉桥,以及在其基础上拓展的主跨 1 308m、1 500m、1 800m 斜拉桥结构性能及作用特性的研究。考虑到千米级斜拉桥特殊的结构性能,研究还针对千米级斜拉桥特殊的设计理论、前沿设计方法等进行了研究。《苏通大桥设计与结构性能》中详细介绍了苏通大桥设计过程中对抗风、抗震等关键问题的研究成果。《组合索塔锚固结构》和《超长群桩基础承载机理研究》系统介绍了在苏通大桥中应用的组合索塔锚固结构

和超长大型群桩基础的相关机理、设计理论和方法等。《千米级斜拉桥设计指南》是对研究形成的千米级斜拉桥设计方法和技术的总结,也是国内外有关超大跨径斜拉桥设计的首部专门指导性专著。

课题研究及本丛书的编写凝结了课题组近百位研究人员多年的研究成果。国内外多位知名专家及交通运输部、科学技术部相关领导也在研究过程中多次关注,并提出了重要的指导意见,在此对他们一并表示衷心的感谢。

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚

2010 年 1 月

前 言

20 世纪末,在苏通大桥前期研究阶段,结构体系对千米级斜拉桥的总体设计、结构性能和影响安全的关键作用就引起了作者的重视。当时的研究已经表明:斜拉桥几种传统的基本结构体系,在跨径突破千米之后存在静、动力作用效应难以协调的问题,结构体系创新成为千米级斜拉桥设计首先需要攻克的技术挑战。基于结构体系创新,充分研究结构性能,适当引入新的设计理论和方法,科学合理地考虑各种设计作用,也自然地成为千米级斜拉桥设计理论与方法创新的总体方向。

在苏通大桥设计过程中,对千米级斜拉桥的性能及结构体系开展了深入研究。基于利用弹性约束控制结构静力响应、附加阻尼控制结构动力响应的设计理论,在国际上首创了能保证桥梁静、动力响应相互协调的新型组合结构体系及关键装置系统,提出了相应的设计方法,并成功应用于工程实践,突破了千米级斜拉桥设计的关键技术瓶颈。在此基础上,作者带领的研究团队在国家科技支撑计划的支持下,针对千米级斜拉桥结构体系、性能与设计方法等问题又开展了大量系统研究。

本书对这部分研究成果进行了系统的总结,以便为同类大桥的建设提供参考和借鉴。全书分为 9 个章节,第一章对斜拉桥的发展历史和千米级斜拉桥设计的关键问题进行了简单介绍;第二章介绍了本研究提出的基于寿命周期设计理论和性能设计方法的千米级斜拉桥设计理论;第三章研究了不同体系、不同结构设计关键参数对斜拉桥力学行为的影响,方便设计者对特大跨径斜拉桥的总体把握;第四章研究了千米级斜拉桥风作用特性及结构响应;第五章研究了千米级斜拉桥地震响应及抗震设计方法;第六章研究了千米级斜拉桥船舶作用特性及设计方法;第七章研究了千米级斜拉桥在汽车作用下的结构性能;第八章研究了千米级斜拉桥弹塑性稳定性能;第九章研究了千米级斜拉桥在极端作用下的响应特性及设计方法。

在本书编写过程中,裴岷山、袁洪、石雪飞、袁万城、叶爱君、李国强、刘高、朱斌、阮欣、马如进、王达磊、吴宏波等参加了部分内容的编写工作,在此一并致谢!

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚 陈艾荣

2009 年 2 月

目 录

1 斜拉桥跨径发展和关键问题	1
1.1 斜拉桥的发展历程	1
1.2 斜拉桥基本结构体系	2
1.3 斜拉桥跨径发展的性能演变	4
1.4 千米级斜拉桥设计的关键问题	5
2 千米级斜拉桥设计理论与方法	7
2.1 寿命周期设计理论和基本过程	7
2.2 基于性能的设计方法及其应用	12
2.3 极端作用及其组合设计方法	29
3 千米级斜拉桥结构体系与关键参数影响	34
3.1 千米级斜拉桥合理结构体系	34
3.2 千米级斜拉桥关键参数影响分析	42
3.3 千米级斜拉桥结构方案设计	56
4 千米级斜拉桥风作用特性及结构响应	63
4.1 斜拉索静风风荷载特性研究	63
4.2 桥塔气动力研究	67
4.3 非线性静动力响应研究	69
4.4 千米级斜拉桥风荷载及合理体系研究	74
4.5 千米级斜拉桥风致振动响应特性试验研究	77
4.6 千米级斜拉桥安全行车风速	84
5 千米级斜拉桥抗震设计	90
5.1 国内外桥梁抗震设计规范比较研究	90
5.2 部分已建大跨度缆索支撑桥梁的抗震设计	94
5.3 千米级斜拉桥的地震反应特性及简化计算	100
5.4 跨度增大对千米级斜拉桥地震反应的影响	115
5.5 群桩基础的非线性地震反应分析	119
6 千米级斜拉桥船舶撞击作用和设计方法	137
6.1 大跨径桥梁船撞事故	137
6.2 船撞作用下非线性动力响应特性	142
6.3 船撞力实用计算方法	149
7 千米级斜拉桥在汽车作用下的结构性能	156
7.1 各国规范汽车作用比较研究	156
7.2 汽车活载计算分析方法适用性分析	165
7.3 千米级斜拉桥汽车作用非线性响应特性	169
7.4 千米级斜拉桥汽车作用简化计算方法	170
7.5 千米级斜拉桥车辆动力放大系数	174

8 千米级斜拉桥弹塑性稳定性能研究	181
8.1 桥梁稳定问题及其分析方法	181
8.2 千米级斜拉桥弹性稳定分析	184
8.3 千米级斜拉桥弹塑性稳定特性	188
8.4 弹塑性稳定安全系数的合理取值	192
9 千米级斜拉桥极端作用特性及设计方法	194
9.1 千米级斜拉桥抗火设计	194
9.2 千米级斜拉桥拉索系统强健性设计	206
9.3 千米级斜拉桥龙卷风作用设计	212
参考文献	219

1 斜拉桥跨径发展和关键问题

1.1 斜拉桥的发展历程

利用藤、竹等柔性材料承重并实现跨越,是人类最早认识到的自然规律之一,但斜拉桥作为一种固定结构形式的发展却由于缆索材料的性能问题长期停滞。

欧洲在第二次世界大战后的大规模重建和现代材料进步,给斜拉桥带来了发展的机遇。1956 年 Strömsund 桥在瑞典建成通车,随后在德国著名工程师 Franz Dischinger 的推动下,多座稀索体系斜拉桥在莱茵河上建成,现代斜拉桥正式形成,也实现了斜拉桥跨径的第一次发展。

斜拉桥结构发展的另一个关键进步是由稀索体系转变到密索体系,结构受力进一步合理化。密索体系斜拉桥的第一座是由德国的霍姆伯格(H. Homberg)设计的波恩弗里特里希-欧贝特(Friedrich Ebert)桥,该桥建成于 1967 年,采用一中心索面及各支承 40 根斜拉索的双塔。汉堡港的柯尔勃仑特(Köhlbrand)桥,是具有修正扇形索面构造以及短边跨的高效斜拉桥体系之一。随后,现代密索体系斜拉桥建造技术不断发展,跨越能力稳步提升。1995 年,法国诺曼底大桥实现了 856m 的跨径;1999 年日本多多罗大桥实现了 890m 的跨径。挑战千米级斜拉桥,实现斜拉桥跨径的千米级突破成为桥梁工程师在那之后的又一个目标。

在短短的 50 年时间里,斜拉桥跨径的迅速发展(图 1.1-1)不但大大拓展了该桥型的应用范围,同时也带动了桥梁设计理论与方法、施工方法与设备等的进步。现代斜拉桥的发展是桥梁工程师最引以为豪的成就之一。

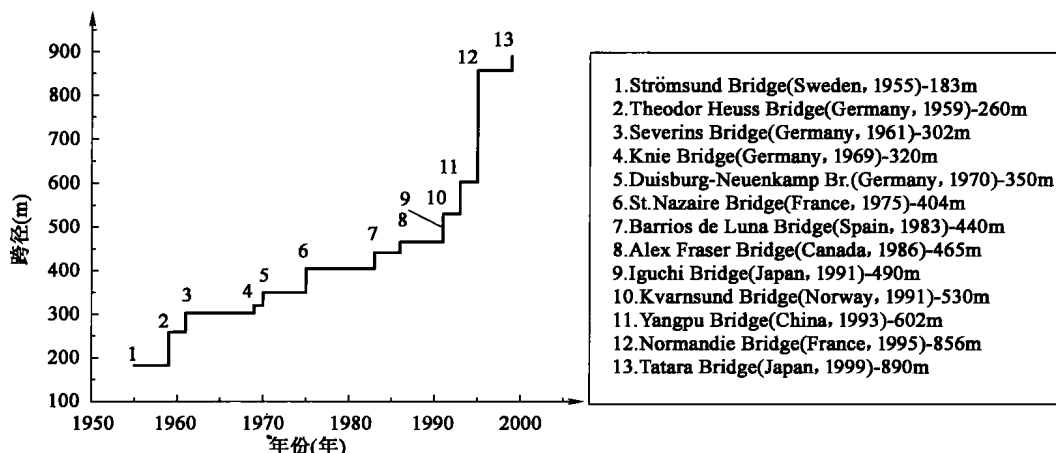


图 1.1-1 现代斜拉桥跨径发展

我国第一座斜拉桥为 1975 年原交通部重庆公路科学研究所设计和指导施工的四川云阳桥,跨径组合为 34.91m+75.84m+34.91m,主梁为混凝土单箱,每塔三对斜拉索。与此同时,上海市政工程设计研究总院也设计了新五桥,跨径组合为 24m+54m+24m,双车道宽 6.6m。此后又相继修建了三台涪江桥、上海浏港桥、广西红水河铁路桥等。总计在 1975~1985 年的 11 年间,我国内地共建成各式混凝土斜拉桥 15 座,中国台湾建成跨径 2×134 m 的三塔斜拉桥光复桥。我国大跨径斜拉桥的发展始自 1991 年的上海南浦大桥;随后,1993 年上海杨浦大桥突破 600m 跨径,建成时跨径位于世界同类桥梁前列。此后,全国各地掀起斜拉桥建设的热潮,大批 400~600m 跨径的斜拉桥相继建成通车。

据不完全统计,我国 1986~1990 年 5 年间建成斜拉桥 33 座,1991~1995 年 5 年间建成 43 座,1996~2000 年 5 年间建成 63 座;1975~2002 年共建成斜拉桥 155 座。从一定程度上看,斜拉桥跨径在 600m 左右的突破,解决了我国现代交通网络建设中的关键问题,是 20 世纪 90 年代桥梁工程取得的最重要的成就之一。通过大量的斜拉桥建设,我国也积累了丰富的斜拉桥建设经验,与世界同步,甚至是更为超前地考虑斜拉桥千米级突破问题。

20 世纪 90 年代末,仍处于方案阶段的苏通大桥(图 1.1-2)与香港昂船洲大桥几乎同时提出了超千米的斜拉桥方案。2002 年苏通大桥首先进入工程实施阶段,并于 2008 年 5 月正式通车。苏通大桥的建成极大地提高了我国桥梁建设者的信心,主跨 926m 的鄂东长江大桥业已开工建设。这些千米级斜拉桥的建设也将世界斜拉桥建设的跨径水平提升到了新的高度。

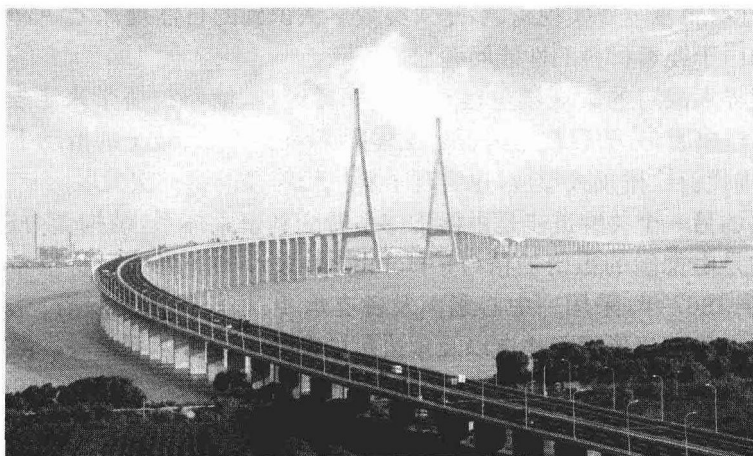


图 1.1-2 苏通大桥

如果说 20 世纪 90 年代,实现斜拉桥跨径 600m 级的突破主要依靠引进和学习国外先进桥梁建设技术成果的话,本次实现的斜拉桥千米跨径的突破,则更多地体现了自主创新。全面总结苏通大桥建设经验,解决结构体系和设计方面的关键问题,形成系统的千米级斜拉桥设计理论与方法,开发具有自主知识产权的桥梁设计分析工具,可为类似工程提供有力的技术支撑;同时,研究千米级斜拉桥结构性能一般规律,探索斜拉桥跨径提升的制约条件及其工程设计对策,为斜拉桥跨径的下一步突破进行技术储备已经成为日益紧迫的问题。

1.2 斜拉桥基本结构体系

斜拉桥与一般连续梁桥都有作为跨越和承载作用的主梁,它们的差别在于斜拉桥多了将主梁连续支承的拉索和将主梁中沿拉索传至的力进一步传递到基础的桥塔,斜拉索的弹性支承作用降低了梁跨的截面弯矩,使斜拉桥主梁比一般连续梁桥更轻,跨越能力更高,斜拉桥的主梁、拉索、桥塔形成了一个简单明确的受力体系。

斜拉桥上部结构由主梁、拉索和索塔三种构件组成。它是一种桥面体系以主梁受轴向力(密索体系)为主、支承体系以拉索受拉和索塔受压为主的桥梁。在活载等荷载作用下,构件受力按刚度分配。斜拉桥的主要特点是利用由桥塔引出的斜拉索作为梁跨的弹性中间支承,借以降低梁跨的截面弯矩、减轻梁重、提高梁的跨越能力,见图 1.2-1。

斜拉桥的结构体系可概括为:形式上主要是指梁、塔、索三种基本构件之间不同的结合方式,受力上主要是指力在三种基本构件之间传递的过渡方式。按梁塔的结合方式,可组成四种不同的结构体系(图 1.2-2),即飘浮体系、支承体系、固结体系和刚构体系。按斜拉索在索面内的布置形式,有两种结构体

系:竖琴体系和扇形体系(图 1.2-3)。由空间索面布置可分为单索面体系、双索面体系(图 1.2-4)。由锚拉方式不同形成两种结构体系:自锚式体系和地锚式体系(含部分地锚式)(图 1.2-5)。

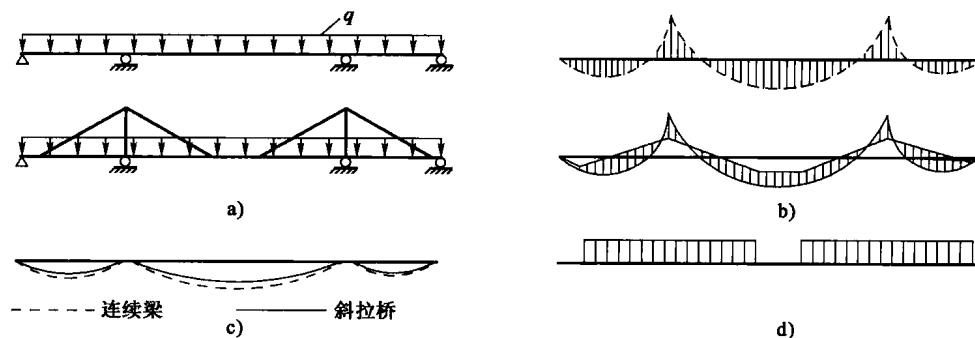


图 1.2-1 斜拉桥与连续梁的比较

a)桥式;b)弯矩;c)挠度;d)轴向力

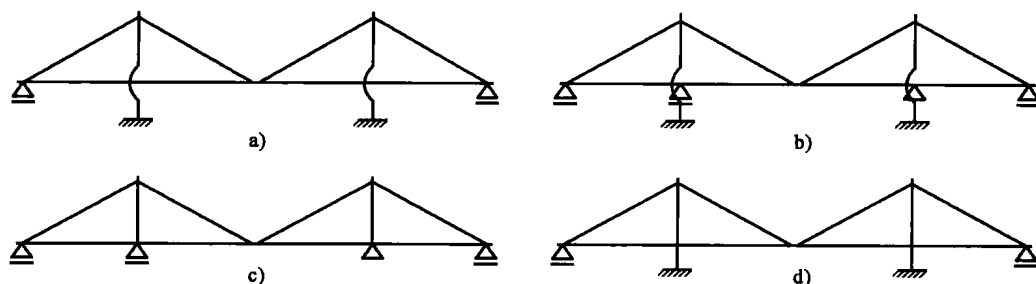


图 1.2-2 斜拉桥的结构体系

a) 飘浮体系; b) 支承体系; c) 固结体系; d) 刚构体系

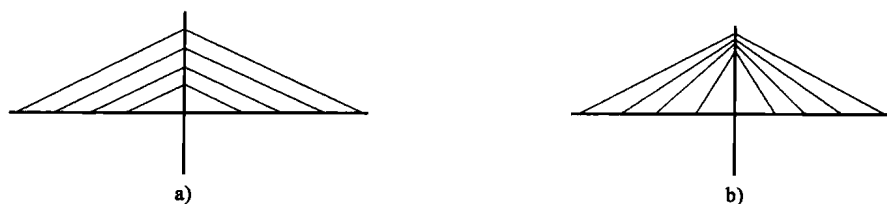


图 1.2-3 拉索在索面内的布置

a) 竖琴体系; b) 扇形体系

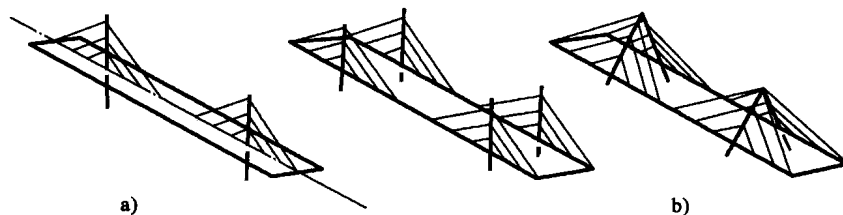


图 1.2-4 拉索的空间布置

a)单索面体系;b)双索面体系

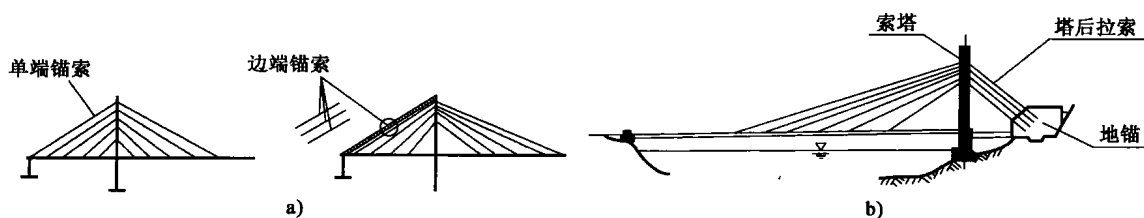


图 1.2-5 自锚体系与地锚体系

a) 自锚式体系; b) 地锚式体系

1.3 斜拉桥跨径发展的性能演变

斜拉桥利用主梁、拉索、索塔三者的不同组合形成不同的结构体系,可适应不同的地形和地质条件。与同样适用于大跨径的悬索桥相比,斜拉桥不需要大型锚碇,抗风性能也较优;同时也便于采用悬臂法施工和架设,借助斜拉索的作用可减轻施工机具对结构的影响,安全可靠。

但是,斜拉桥是一种高次超静定的组合结构,包含较多的设计变量,全桥总的技术经济合理性不能单从结构体积小、用料省或者满应力等概念来衡量,这给选定合理的桥型方案和经济合理的设计带来困难,同时,拉索与主梁和索塔的连接构造较复杂,施工技术要求高。拉索索力的调整工序也较复杂。斜拉桥的结构特点可归结为:恒载内力状态具有多样性;跨径增大后结构状态具有非线性;施工过程与成桥状态具有相关性。对于斜拉桥随着跨径增加而体现的性能演化特性的认识是制订设计对策的关键,以下将尝试从结构体系概念的层面分析斜拉桥随跨径发展而发生的性能演变的主要特征。

1) 主梁轴向压力大

主梁内轴向力的分布和轴力的正负号随斜拉桥拉索的锚拉体系和主梁的支承条件不同而变化。主梁处于完全受压状态,这对抗拉性能差的混凝土主梁来说,相当于施加了预应力,既能充分发挥高强材料的特性,又提高了梁的抗裂性,对混凝土斜拉桥是十分有利的。但随着斜拉桥跨径的增大,混凝土主梁自重太大,将不再适用,钢主梁将占主导;斜拉索的水平拉力对主梁形成的水平轴向压力逐渐积累,在近塔处轴向力增加到很大值,钢主梁截面积较小,使得稳定问题逐渐突出(图 1.3-1)。

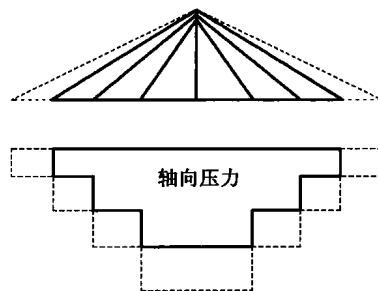


图 1.3-1 主梁轴向力随跨径增大的示意图

2) 斜拉索的效率与振动

调整拉索的预拉力可以调整主梁的内力,使主梁的内力分布更均匀合理。斜拉索水平分力对梁产生轴向预加力,可增强主梁的抗裂性能;竖向分力则在为主梁提供向上支撑的同时,还需要为自重提供支撑。随着跨径增加,斜拉索长度增加,需要克服索自重的竖向分力越大,能为主梁提供支撑的竖向分力越少,拉索效率将迅速降低。而在活载作用下,索的刚度是结构刚度的重要组成部分,拉索增长后自重垂度使其弹性模量下降,使拉索刚度也迅速衰减。

另一个需要考虑的问题是长拉索的振动问题。引起斜拉索振动的机理十分复杂,迄今为止已经知道可能发生的振动类型有以下几种:涡激振动、尾流驰振、风雨激振、抖振、参数振动。拉索长度增加后的振动特性及其控制方法是需要解决的另一个关键问题。

3) 结构抗风和抗震性能

成桥和施工过程中的结构抗风、抗震性能是影响千米级斜拉桥结构体系是否成立和安全的关键问题。对于超大跨径的柔性结构,大跨径斜拉桥在风和地震作用下的结构响应特性、计算方法等都有待探索。

4) 结构非线性

随着斜拉桥跨度的增加,结构刚度急剧下降,可能会出现一系列新的特殊力学问题。当斜拉桥的跨径较小时,非线性对结构的影响较小,因此,以往的斜拉桥在设计初始阶段一般还是采用线性方法进行计算。随着斜拉桥跨径的增大,非线性计算结果与线性计算结果的差别越来越大,对传统设计思路提出挑战。

虽然近 30 年来,围绕一些跨海或越江工程,专家们纷纷提出了很多关于特大跨径斜拉桥的建设设想,如 Leonhardt 曾提出主跨 1 800m 跨径斜拉桥的设想,Nagai 研究了主跨 1 400m 跨径斜拉桥方案的

可行性,林元培预测“建造 1 600m 的斜拉桥是十分现实的”,Gimsing 甚至提出了主跨达 8 400m 斜拉桥的概念。但从工程实践的层面看,千米级的斜拉桥跨径仍然有很多关键问题需要解决。

1.4 千米级斜拉桥设计的关键问题

当斜拉桥主跨跨径增大到千米附近后,仍有许多挑战需要正视。综合考虑国内外斜拉桥发展水平,千米级斜拉桥在结构体系、设计理论与方法方面需要突破的关键问题包括:

(1)千米级斜拉桥设计理论、方法和参数体系。目前国外各种桥梁设计规范、规程和指南对千米级斜拉桥的适用性非常有限,系统满足千米级斜拉桥设计要求,体现目前设计理论发展水平的设计规范尚处于空白。对其设计理论、方法和参数的研究,也多数针对几个有限的实桥背景。适用于千米级斜拉桥的设计理论、方法和参数亟待研究。

(2)千米级斜拉桥体系和结构性能。目前,对千米级斜拉桥结构性能的认识主要通过计算分析实现,尚没有实测的数据对目前理论方法的适用性进行检验。因此,对千米级斜拉桥结构性能的认识仍处于理论认识水平。另一方面,对于超千米,或是突破千米斜拉桥结构性能的研究也处于空白,对斜拉桥跨径进一步提升的研究处于概念阶段,与工程实际相去甚远。

(3)特殊构件的性能及其设计方法。千米级斜拉桥中将出现很多特殊构件,对这些构件进行性能研究,完善设计方法,是完善千米级斜拉桥设计理论与方法的重要支撑。

基于上述认识,尝试从以下几方面对千米级斜拉桥结构体系、性能和设计方法进行系统研究:

- (1)千米级斜拉桥设计理论和方法;
- (2)千米级斜拉桥结构体系与关键设计参数影响;
- (3)千米级斜拉桥抗风性能;
- (4)千米级斜拉桥抗震性能;
- (5)千米级斜拉桥抗船舶撞击性能及设计计算方法;
- (6)千米级斜拉桥车辆作用及设计方法;
- (7)千米级斜拉桥弹性及弹塑性稳定性能;
- (8)千米级斜拉桥极端作用设计。

为了便于比较,并考虑工程实用,研究中以苏通大桥主桥结构体系为原型,采用七跨双塔双索面半飘浮体系,进行了主跨分别为 1 088m、1 308m、1 500m、1 800m、2 100m 斜拉桥试设计方案。

桥型布置见图 1.4-1,主要设计参数见表 1.4-1。

千米级斜拉桥方案主要设计参数

表 1.4-1

主跨 (m)	主梁断面 形式	主梁高度 (m)	边中跨比	边跨支点 布置个数	斜拉索间距 (m)	索塔高度 (m)
1 088	整体	4.0	0.46	2	16	300
1 308	整体	4.5	0.45	2	16	330
1 500	整体	5.0	0.45	2	16	370
1 800	分体	5.5	0.47	3	20	430
2 100	分体	6.0	0.46	3	22	490

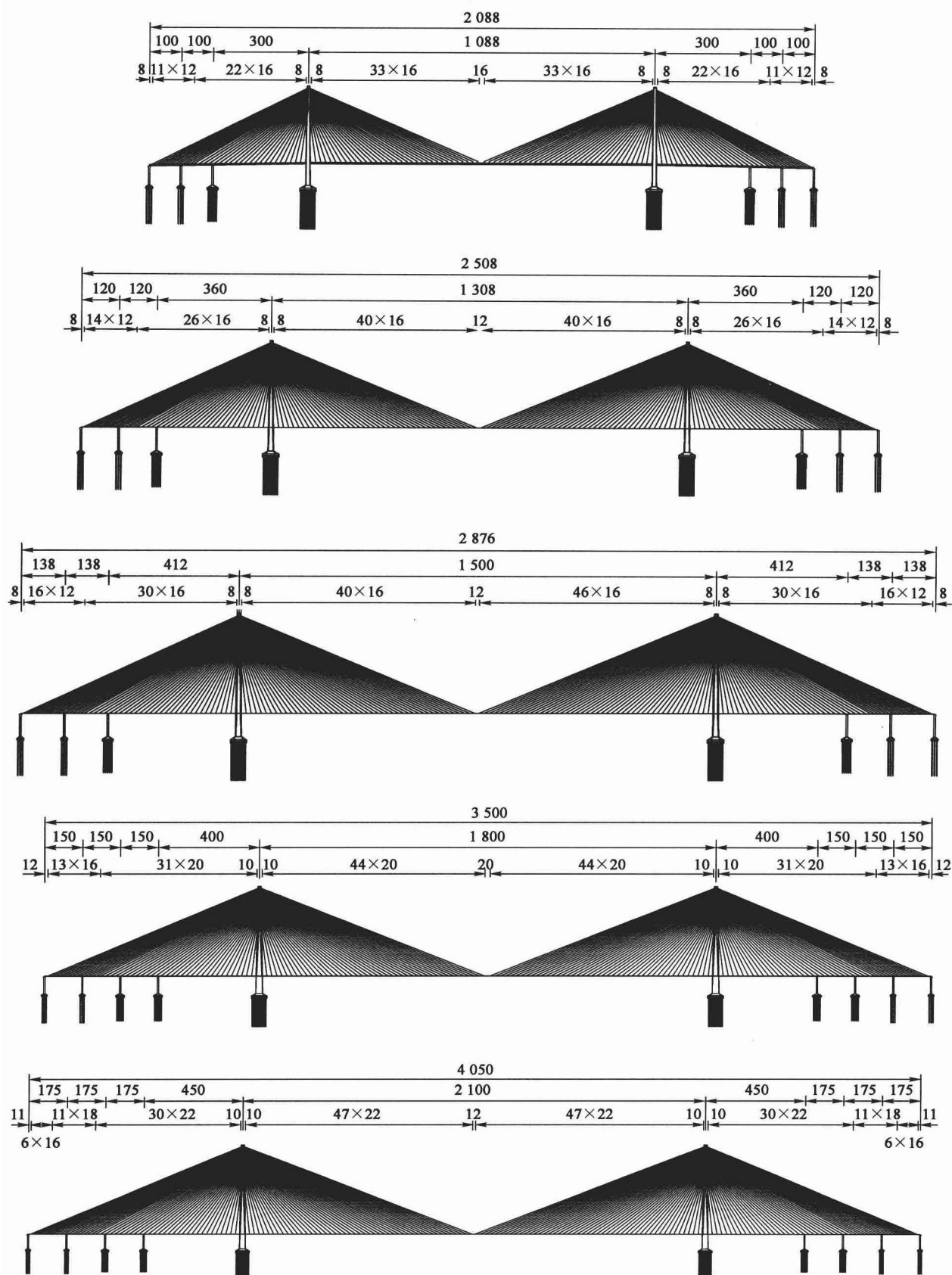


图 1.4-1 千米级斜拉桥方案桥跨布置(尺寸单位:m)

2 千米级斜拉桥设计理论与方法

千米级斜拉桥是特别重要的交通基础设施,其设计理论和方法与常规桥梁显著不同。首先,千米级斜拉桥结构性能的特殊性使得一般规范和设计指南难以覆盖,目前世界各国的设计规范均未覆盖千米级斜拉桥设计内容;其次,目前规范中采用设计理论和方法,难以描述千米级斜拉桥设计过程中的一些特殊作用,或现有的设计参数和指标难以满足其设计的要求。因此,研究桥梁设计理论的前沿发展情况,探索各种新的设计理论在千米级斜拉桥设计中应用的方法或过程,是建立和完善千米级斜拉桥设计方法与标准体系的重要基础性工作。

2.1 寿命周期设计理论和基本过程

2.1.1 典型的桥梁寿命周期过程

典型的桥梁寿命周期从规划开始,将经历桥位规划、方案设计、性能分析、详图设计、建造施工、管理养护、拆除/倒塌等几个阶段(图 2.1-1)。各个阶段的工作内容密切联系,相互影响。其中设计阶段是将业主、使用者和社会的需求转化为技术体系的性能要求,确定并优化结构方案的最为关键的阶段。

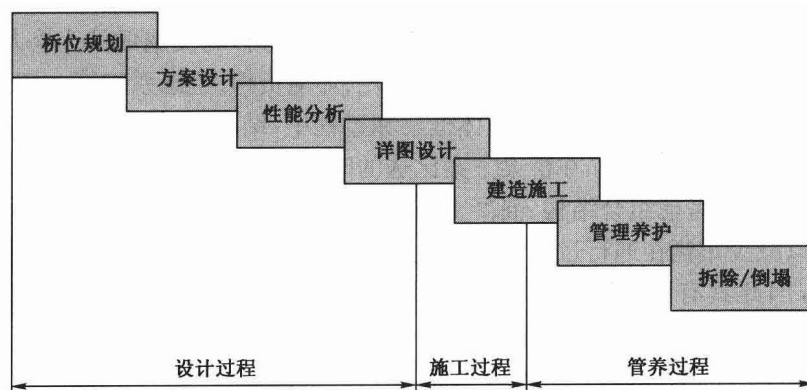


图 2.1-1 典型桥梁寿命周期过程

寿命周期理论的核心思想是在实施具体的工程措施之前,将后续寿命周期中可能出现的各种问题和工作内容,以达到预期目标最优(通常是成本最低)为目标,进行系统规划和全盘考虑。这其中,如何考虑和界定寿命周期各个阶段可能出现的问题,如何定义预期目标及其衡量指标体系,如何协调不同目标之间的矛盾,如何描述寿命周期中性能指标(及)需求的变化过程,以及考虑寿命期内可能的不确定性等一系列问题,构成了桥梁寿命周期理论研究的范围。

千米级斜拉桥属于特别重要的交通基础设施,其寿命周期均在百年以上,它的建设和运营对区域经济具有举足轻重的作用。在其设计过程中全面贯彻寿命周期设计理论可以直接和间接创造重大的社会和经济价值。

2.1.2 桥梁寿命周期总体需求

一直以来,实用、经济、安全和美观作为我国公路桥梁设计的基本原则被明确在设计规范中[《公路

桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)规范中修订为技术先进、安全可靠、适用耐久、经济合理。从寿命周期设计方法的角度来看,这些基本原则都应包含在设计要求中,但也并不全面。也有学者尝试在此基础上进行补充,例如将可持续发展的要求补充进来等。千米级斜拉桥寿命周期设计的总体要求可概括为使用需求、资金需求、生态需求、文化需求四个方面。

使用需求考虑的是建造桥梁的最初基本目的和使用要求。在以往的设计规范中,使用需求是最为重要的设计要求,并且被细化为安全性能、服务性能等具体性能指标。现行大多数设计规范中,正常使用极限状态和承载能力极限状态是两个基本设计目标。在寿命周期的设计过程中,使用需求仍然是必须满足的基本需求之一,并且进行适当延伸,这里将其尝试概括为功能要求、安全要求和舒适要求。功能要求是指桥梁应提供交通的便利,这是建造桥梁的最初目的,在寿命周期的设计过程中应考虑到在整个寿命周期过程中可能发生的功能变化(例如桥梁需要拓宽或改建);安全要求和舒适要求是保证通行者在通过时的安全舒适,这是桥梁作为现代社会基础设施的基本条件;类似地,在寿命周期的设计中,需要考虑在不同寿命阶段的桥梁提供安全和舒适服务的能力。千米级斜拉桥结构性能特殊,改建难度较大,因此在设计阶段对使用需求的全面考虑非常重要。

资金需求是保证桥梁建设和维护其正常运营的基本条件。桥梁在使用过程中的性能表现在极大程度上依靠管理和维护。换言之,保证使用过程中的维护资金投入至关重要。寿命周期设计研究的起点就是对维护过程的资金进行优化。和传统的设计要求相比,除了对初始建设成本的关注外,寿命周期设计对桥梁整个寿命周期中可能发生的各种费用都进行关注,并引入经济学中成本分析的基本原理进行科学的计算和分析,使得在设计初期对桥梁寿命周期总成本就形成了总体的认识。寿命周期中对资金需求的全面考虑是决定设计方案的重要决策指标。

生态需求是可持续发展原则的具体体现,可以从以下几个方面理解:首先,桥梁建造和维护过程消耗的材料,以及这些材料在生产过程废弃物的排放等,都是桥梁寿命周期中需要考虑的生态负担;其次,桥梁的建设和使用还可能对周边的生态环境和生态系统造成影响,例如对水域的污染和对生态群落的破坏。对生态需求的考虑就是对桥梁寿命周期可能产生的生态影响及造成的生态负担进行分析和优化。总体上,生态需求可以概括为原材料消耗、能源消耗、环境负担、生态系统等。相比于仅从材料角度出发的工程耐久性措施,在寿命周期设计的总体框架和过程中,结合设计对生态需求进行考虑和优化,往往可以取得更为显著的效果。例如在桥梁方案比选的时候,不仅可以考虑普通混凝土材料和高性能混凝土材料的优劣,还可以考虑组合结构、混凝土结构和钢结构等不同结构形式的生态影响;或者可以考虑降低桥梁坡度以减少车辆在通行过程中的尾气排放等。千米级斜拉桥工程规模大、建设周期较长,使用周期长达百年,因此具有影响桥址附近生态系统的可能。目前这方面研究开展较少,但应尽量考虑。

文化需求中包含了对桥梁造型、景观效果等方面的要求,同时还包括对文化传统、风俗继承等方面的要求。在寿命周期的设计方法中将明确桥梁的服役寿命,千米级斜拉桥这一寿命往往较长,可以达到100年或者更长。从历史和文化的角度来看,在这样一个时间跨度中,桥梁完全有可能成为历史遗产被后世进行保护和继承。因此,有必要将以往对于桥梁景观方面的要求上升为文化需求,其内涵也相应发展为造型(景观)需求、风俗传统需求、事件记录需求、设计风格和建造历史需求等。

上述四个方面构成了桥梁寿命周期的总体需求(图2.1-2),也构成了桥梁寿命周期设计决策的基本目标集合。桥梁寿命周期设计过程就是在众

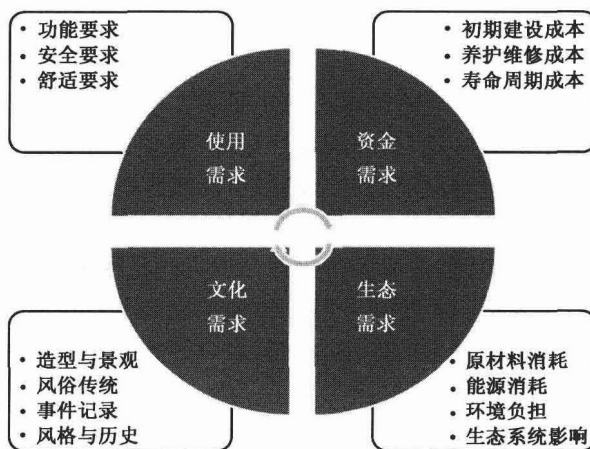


图 2.1-2 桥梁寿命周期设计总体需求