

Theory and Method
of Deck
Paving Design
for Long-span Bridges

大跨径 桥梁钢桥面 铺装设计 理论与方法

黄卫 著

Long-span Bridges

中国建筑工业出版社

大跨径桥梁钢桥面 铺装设计理论与方法

黄 卫 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法 / 黄卫著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006
ISBN 7-112-08721-X

I. 大… II. 黄… III. 长跨桥: 钢桥—桥面铺装—研究 IV. U448.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 121328 号

本书为作者多年来在大跨径桥梁钢桥面铺装方面进行科研、教学和工程实践的总结。主要内容包括: 大跨径桥梁钢桥面铺装的使用条件及现状、大跨径桥梁钢桥面铺装材料及相关的技术指标、大跨径桥梁钢桥面铺装轴载换算方法、大跨径桥梁钢桥面铺装静力和动力特性、大跨径桥梁钢桥面铺装疲劳特性及车辙预估方法、大跨径桥梁钢桥面铺装的高低温性能、大跨径桥梁钢桥面铺装防腐黏结层的设计方法及控制标准、大跨径桥梁钢桥面铺装设计的优化方法等。这些成果已经在我国最大的斜拉桥南京长江二桥和最大的悬索桥润扬长江大桥上成功实施。

本书是国内第一部论述大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法的书籍, 可供从事道路工程科研、教学和工程设计人员参考使用, 也可作为相关专业研究生教材或学习参考书。

责任编辑: 咸大庆 刘瑞霞

责任设计: 赵 力

责任校对: 邵鸣军 关 健

大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法

黄 卫 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京天成排版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21¼ 字数: 530 千字

2006 年 10 月第一版 2006 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 58.00 元

ISBN 7-112-08721-X

(15385)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

钢桥面铺装是大跨径钢箱梁桥建设的关键技术之一，一直受到国内外学术界与工程界的高度重视与关注。自 20 世纪 90 年代起我国开始兴起建设大跨径钢箱梁桥的热潮，对大跨径钢桥面铺装的研究也始于此时期。通过工程实践和较为广泛深入的研究，我国钢桥面铺装技术取得了长足的进步并形成了较为成熟的环氧沥青混合料铺装技术。但从已通车的桥面铺装使用状况来看，国内钢桥面铺装的使用条件和环境与国外有较大差异，特别是我国交通组成复杂，重载与超载车辆比例很高，已有的工程实践表明，我国钢桥面铺装不能直接套用国外设计模式。

从广东省肇庆市四会县马房镇的北江大桥开始，我国钢桥面铺装先后采用过普通沥青混凝土、改性沥青混凝土、SMA、Gussasphalt、环氧沥青混凝土等材料，钢桥面铺装的结构出现过单层、双层甚至多层等形式。但是实践表明，绝大部分铺装材料和结构无法满足正交异性钢桥面的特性，在短期使用之后便出现车辙、开裂、脱层、泛油等病害，这不但使铺装的服务性能大打折扣，而且也给钢桥面及桥梁结构带来诸多不利影响。造成这种局面的原因有很多，其中最主要的原因是人们对于正交异性钢桥面铺装的认识还较为肤浅，要从本质上了解钢桥面铺装的行为机理，探索钢桥面铺装的成功之路，需要从力学机理、材料组成、铺装结构设计和工程实施等多方面进行深入研究；另外，目前我国钢桥面铺装的设计无章可循，设计随意性大。许多钢桥面铺装的设计方法、试验方法、工程质量控制和验收标准大都只是简单地直接套用路面的设计理论和方法，这也是大跨径桥梁钢桥面铺装过早出现病害的一个重要因素。

东南大学桥面铺装课题组在十多年前开始对大跨径桥梁钢桥面铺装成套技术进行系统研究，在钢桥面铺装设计理论和方法上积累了丰富的研究成果。2000 年东南大学桥面铺装课题组和南京长江第二大桥建设指挥部合作，首次在南京长江第二大桥成功实施了环氧沥青混凝土钢桥面铺装，至今南京二桥桥面铺装已经成功运行了六年，打破了国外专家“中国没有能力实施环

氧沥青混凝土钢桥面铺装”的断言，结束了我国钢桥面铺装通车后不久就发生大面积破损的尴尬局面。此后，润扬长江公路大桥、南京长江第三大桥等多座大跨径桥梁钢桥面铺装相继由东南大学桥面铺装课题组负责研究和设计，也都获得了成功。

目前，我国大跨径桥梁建设方兴未艾，尤其在沿江沿海等经济较发达地区有更多的大跨径钢桥正在建设或者筹建。这为钢桥面铺装设计理论和方法的发展提供了机遇，同时也带来了更大的挑战。在这样的背景下撰写此书，一方面希望能够与同行一起分享多年的科研成果以及工程实践经验，另一方面也希望能够为我国大跨径钢桥面的快速发展略尽绵薄之力。

开发适合我国大跨径钢桥使用特点的铺装材料和结构及其关键技术任务是艰巨的，提出具有中国特色的钢桥面铺装理论与铺装成套技术是我国工程技术和研究人员的重要职责。我主持东南大学钢桥面铺装课题组的研究工作已经有十多年了，在研究中我们始终坚持理论研究与应用相结合。课题组的同志团结协作，勤奋工作，做了很多出色的工作。我指导的博士研究生和硕士研究生共有二十多位以桥面铺装的相关课题作为学位论文研究，为建立和完善钢桥面铺装设计理论和方法做了很多有益的工作，也为本书的写作提供了丰富的内容。

本书的写作过程中，东南大学的李一鸣教授审阅了部分章节，并提出了修改意见，钱振东、陈团结、张磊三位同志为本书的写作提供了帮助，出版社的同志也给予了大力支持。在此向与作者长期合作的人员和为本书写作出版给予帮助的同志们表示由衷的感谢。

本书涉及的专业技术面广，限于著者的水平，难免有错误与不当之处，敬请读者批评指正，以便于进一步完善。

黄 卫

2006年10月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 国内外大跨径桥梁建设	1
1.1.1 斜拉桥	1
1.1.2 悬索桥	4
1.2 加劲梁常用结构形式	6
1.2.1 斜拉桥常用加劲梁结构	6
1.2.2 悬索桥常用加劲梁结构	9
1.3 正交异性板桥面铺装	12
1.4 钢桥面铺装常用材料	15
1.4.1 浇注式沥青混凝土	16
1.4.2 改性沥青 SMA	17
1.4.3 环氧沥青混合料	18
1.5 钢桥面铺装破坏类型	20
参考文献	25
第 2 章 钢桥面铺装的基本使用条件	27
2.1 气候条件	28
2.2 交通条件	33
2.3 铺装结构受力和变形特点	37
2.3.1 正交异性钢桥面铺装的特点	37
2.3.2 正交异性钢桥面铺装层的力学分析方法	39
2.3.3 国内外常用的钢桥面铺装层结构形式	42
参考文献	44
第 3 章 钢桥面铺装材料的基本要求与设计	47
3.1 钢桥面铺装材料的基本要求	47
3.1.1 铺装层材料基本要求	47
3.1.2 常用桥面铺装材料及其设计	47

3.1.3 沥青混合料的力学性能分析	49
3.2 浇注式沥青混合料	51
3.2.1 国外浇注式沥青混合料设计	51
3.2.2 东南大学桥面铺装课题组设计方法	55
3.3 改性沥青 SMA	58
3.3.1 美国 SMA 的设计方法	58
3.3.2 国内 SMA 的设计	61
3.4 环氧沥青混合料	69
3.4.1 原材料的技术指标	70
3.4.2 环氧沥青混合料配合比设计	73
3.5 设计示例	74
3.5.1 浇注式沥青混合料设计示例	75
3.5.2 环氧沥青混合料设计示例	85
参考文献	96
第4章 钢桥面铺装体系的静荷载响应	98
4.1 桥面铺装体系分析	98
4.2 钢箱梁铺装体系有限元分析的基本原理	100
4.3 钢箱梁铺装体系有限元分析的基本参数	102
4.3.1 钢箱梁的类型及尺寸	102
4.3.2 车辆荷载图式及简化	104
4.3.3 计算荷载位置和有限元模型	109
4.4 钢箱梁铺装体系受力特性	110
4.4.1 不设纵隔板的钢桥面铺装体系有限元计算结果分析	111
4.4.2 铺装层表面最大横向拉应力或应变最不利荷位	111
4.4.3 铺装层表面最大纵向拉应力或应变最不利荷位	116
4.4.4 铺装层表面最大竖向位移及加劲肋局部挠跨比	117
4.5 钢箱梁结构参数与对铺装层受力的影响分析	119
4.5.1 纵隔板两侧加劲肋上口宽度 u 对铺装层受力的影响分析	120
4.5.2 纵隔板两侧加劲肋高度 h 对铺装层受力的影响分析	121
4.5.3 纵隔板两侧加劲肋厚度 t 对铺装层受力的影响分析	124
4.6 钢箱梁单层铺装体系力学性能控制指标回归分析	127
4.6.1 未设纵隔板钢桥面单层铺装体系铺装层表面最大拉应力计算公式	128
4.6.2 未设纵隔板钢桥面单层铺装体系铺装层表面局部挠跨比计算公式	138

4.6.3 钢桥面单层铺装体系纵隔板上方铺装层表面最大拉应力计算公式	147
4.7 钢箱梁双层铺装体系荷载响应回归分析	153
4.7.1 未设纵隔板钢桥面双层铺装体系铺装层表面最大拉应力计算公式	153
4.7.2 未设纵隔板钢桥面双层铺装体系铺装层表面局部挠跨比计算公式	159
4.7.3 钢桥面双层铺装体系纵隔板上方铺装层表面最大拉应力计算公式	164
4.7.4 算例	168
参考文献	169
第5章 钢桥面铺装层动力响应	172
5.1 铺装层动力分析的基本理论	172
5.1.1 三维弹性动力学方程	173
5.1.2 动力有限元方法的求解步骤	174
5.1.3 模态分析基础	176
5.1.4 动力方程的求解	177
5.2 车辆动荷载的简化	178
5.2.1 移动荷载模型	179
5.2.2 移动质量模型	180
5.2.3 移动车辆模型	180
5.3 铺装层表面不平整度的模拟	181
5.3.1 功率谱密度	181
5.3.2 <i>IRI</i> 与 <i>PSD</i> 的转换	183
5.4 铺装层有限元基本假设及模型	185
5.5 铺装层的动荷载响应	186
5.5.1 不同 <i>IRI</i> 时铺装层动力响应	186
5.5.2 不同车速时铺装层的动力响应	188
5.5.3 不同弹性模量时铺装层的动力响应	188
5.5.4 不同厚度时铺装层的动力响应	189
参考文献	190
第6章 钢桥面铺装温度应力分析	192
6.1 路面温度应力分析基本假定	192
6.2 二维弹性层状理论体系温度应力	193
6.3 黏弹性体系的温度应力	202
6.3.1 黏弹性层状体系的基本假设	202
6.3.2 黏弹性层状体系温度应力推导	202

6.4	沥青混合料的参数	205
6.4.1	沥青混合料的温度收缩系数	205
6.4.2	沥青混合料的应力松弛模量	206
6.5	钢桥面铺装层温度应力分析	209
6.5.1	钢桥面铺装层温度应力计算	209
6.5.2	周期性变化的温度应力	210
6.5.3	连续降温对钢桥面铺装层温度应力的影响	212
6.5.4	不同降温速率对钢桥面铺装层表面温度应力的影响	212
6.5.5	铺装层厚度变化对其温度应力的影响	213
	参考文献	215
第7章	钢桥面铺装车辙分析	217
7.1	铺装材料的高温稳定性	218
7.2	车辙形成与机理	220
7.2.1	沥青路面车辙破坏机理	220
7.2.2	钢桥面铺装层车辙形成机理及影响因素	222
7.3	铺装层车辙控制指标及预估模型	223
7.3.1	沥青路面和钢桥面铺装层车辙控制指标及容许值	223
7.3.2	钢桥面铺装层车辙预估模型	225
7.4	超载车辆对钢桥面铺装高温性能的影响	232
7.4.1	钢桥面铺装的超载车辆分析	232
7.4.2	超载车辆对钢桥面铺装高温性能的影响	234
7.5	算例分析	235
	参考文献	236
第8章	钢桥面铺装材料和铺装结构的疲劳特性	238
8.1	铺装层材料的疲劳特性	239
8.1.1	沥青混合料疲劳特性的基本分析方法	239
8.1.2	铺装材料的疲劳特性试验及分析	240
8.2	铺装复合结构的疲劳特性	244
8.2.1	复合梁疲劳试验模型	244
8.2.2	复合梁模量试验	248
8.2.3	复合梁极限加载试验	250
8.2.4	复合梁疲劳性能	253
8.3	能量法分析桥面铺装的疲劳特性	257

8.3.1 沥青混合料的滞后回路与能耗	257
8.3.2 沥青混合料疲劳特性的能耗分析	258
8.3.3 钢桥面铺装体系疲劳寿命预测方法及其应用	259
8.4 损伤断裂力学分析桥面铺装的疲劳特性	263
8.4.1 损伤力学中的疲劳损伤模型简介	263
8.4.2 沥青混合料铺装层的疲劳损伤特性分析	264
8.4.3 钢板与沥青混合料铺装复合结构的疲劳损伤特性分析及寿命预测	267
参考文献	271
第9章 钢板防腐涂装与铺装结构黏结层	273
9.1 钢板防腐涂装	274
9.1.1 国外防腐涂装的发展	275
9.1.2 国内防腐涂装的发展	277
9.2 黏结层材料及技术要求	280
9.2.1 国外常用的黏结层的发展	281
9.2.2 国内黏结层的发展	282
9.2.3 钢桥面黏结层的种类	283
9.2.4 黏结铺装层的功能	284
9.2.5 黏结层的技术要求	286
9.3 黏结层计算及试验	288
9.3.1 黏结层的力学分析	288
9.3.2 力学分析模型	288
9.3.3 最不利荷位分析	290
9.3.4 设置防水黏结层分析	291
9.3.5 水平荷载分析	292
9.3.6 黏结层的试验	293
参考文献	297
第10章 钢桥面铺装体系轴载换算方法	299
10.1 铺装层疲劳开裂和车辙破坏分析	300
10.1.1 疲劳开裂	300
10.1.2 车辙	301
10.1.3 推移和拥包	302
10.2 路面设计中的轴载换算方法	302
10.2.1 AASHTO 轴载换算方法	303

10.2.2	我国《公路沥青路面设计规范》中的轴载换算方法	305
10.3	基于疲劳等效的钢桥面铺装体系轴载换算	306
10.3.1	以铺装层表面最大拉应力或拉应变为设计指标的轴载换算方法	306
10.3.2	以铺装层与钢板间最大剪应力为设计指标的轴载换算方法	308
10.3.3	单轴双轮组不同轴载间换算指数的确定	309
10.3.4	其他轴型和轮组轴载换算为单轴双轮组轴载的方法	310
10.4	基于车辙等效的轴载换算	313
10.4.1	壳牌车辙预估中的轴载换算方法	314
10.4.2	基于车辙等效的钢桥面铺装体系轴载换算方法	314
参考文献		316
第 11 章	钢桥面铺装设计与优化	318
11.1	钢桥面铺装设计的主要内容	318
11.2	钢桥面铺装设计的参数指标	319
11.2.1	铺装设计的环境参数	319
11.2.2	铺装设计的交通参数	321
11.2.3	铺装结构破坏控制指标	321
11.2.4	铺装材料设计指标	323
11.2.5	黏结层设计指标	324
11.3	钢桥面铺装设计的流程	325
11.4	钢桥面铺装体系优化设计	325
11.4.1	设计对象	327
11.4.2	状态对象	327
11.4.3	目标对象	329
11.4.4	优化数学模型	331
11.4.5	优化算法	332
11.5	算例	334
参考文献		337

第 1 章 概 述

1.1 国内外大跨径桥梁建设

悬索桥和斜拉桥是现代大跨径桥梁的主要结构形式，特别是在跨越峡谷、海湾、大江、大河等不易修筑桥墩的地方架设大跨径特大桥梁时，往往都选择悬索桥和斜拉桥的桥型。斜拉桥是一种桥面体系受压、支承体系受拉的桥梁，其桥面体系由加劲梁构成，支承体系由钢索组成。悬索桥是特大跨径桥梁的主要形式之一，是目前惟一已建成跨千米以上桥梁的桥型。但从发展趋势上看，斜拉桥在某些条件下具有明显优势。根据地形、地质条件，若能采用隧道式锚碇，悬索桥在千米以内也可以同斜拉桥竞争^[1]。根据理论分析，就目前的建材水平，悬索桥的最大跨径可达到 3500m 左右。已建成的日本明石海峡大桥，主跨已达 1991m。正在计划中的意大利墨西拿海峡大桥，设计方案之一是悬索桥，其主跨为 3500m。当然还有规划中更大跨径的悬索桥。

自 20 世纪 90 年代以来，中国大跨径桥梁建设进入了一个高峰时期，相继建成和正在建设一大批的大跨径斜拉桥、悬索桥、拱桥和 PC 连续刚构桥，其共同特点是结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高等。

1.1.1 斜拉桥

斜拉桥是一种桥面体系以加劲梁受压(或受弯压)、支承体系以斜索受拉及桥塔受压为主的桥梁。它的上部结构由索塔、斜索和加劲梁三大构件组成。通过对各种桥梁上、下部构造技术、经济综合分析比较和实践证明，采用跨径在 300~600m 甚至以上的长、大斜拉桥来跨越大江、大河、深水急

流以及工程地质复杂情况下的地段是较为经济合理的,且能满足某些通航等特殊要求。一般情况下,斜拉桥在跨径 300~600m 甚至更大跨径范围内都具有很大的竞争力,它通过三大构件的不同有机结合,可以组合出很多的桥型来满足景观和使用的要求,突出直线感与柔细感,且具有强劲、雄伟挺拔的力感,使得斜拉桥建造既经济又美观,现代感很强。

斜拉桥的雏形远在几百年之前就出现了。1617 年意大利人设计过一座用钢杆铁链吊拉的桥梁,近似于悬索桥和斜拉桥的混合结构。1784 年 Löscher 在德国设计过一座木斜拉桥。1873 年英国泰晤士河上的 Albert 桥已基本构成斜拉桥形状。但在以后的近 300 余年里,斜拉桥的发展十分缓慢,期间曾发生几座早期斜拉桥倒塌的事故,因此在相当长的一段时间内,斜拉桥的发展处于被人遗弃而成空白状态。直到 1955 年瑞典建成主跨为 182.6m 的 Strömsand 桥,开创了现代斜拉桥的先河,斜拉桥的研究才重新引起设计者的重视。接着,1958 年又在德国的杜塞尔道夫建成了主跨为 260m 的 Theodor-Heuss 桥,它巩固了现代斜拉桥的地位。在以后的近半个世纪中,斜拉桥发展迅猛,至今世界建成斜拉桥近 400 座,其中跨径超过 400m 的有 40 多座。由于拉索的自锚特性使得斜拉桥不需要像悬索桥那样巨大的锚碇,加之斜拉桥比悬索桥有更好的力学性能和经济指标,它已是跨径在 400~800m 之间大跨径桥梁的最主要桥型,在跨径为 800~1100m 的特大跨径桥梁中也将扮演重要角色。

1975 年,我国四川省云帕县建造了主跨 76m 的云阳桥(双塔双索面混凝土斜拉桥),开始了中国建造现代斜拉桥的历史。此后,在吸收国外先进经验的基础上,我国斜拉桥建设技术发展很快,从 20 世纪 80 年代末 90 年代初开始长、大斜拉桥的设计和施工。至今我国已建成斜拉桥 100 多座,其中跨径超过 200m 的有 52 座,跨径超过 400m 的有 20 座。2001 年建成通车的南京长江第二大桥南汊桥主跨跨径达 628m;正在规划设计的珠海伶仃洋大桥主航道桥跨径达 900m;正在建设的苏通大桥(斜拉桥)跨径达到 1088m。目前,我国已成为拥有斜拉桥最多的国家,而且在世界 10 大著名斜拉桥排名榜上,中国有 7 座。到 2005 年世界上已建成的主跨 600m 以上的特大跨径斜拉桥(包括钢箱梁和钢与混凝土结合梁)共计 7 座,其中我国占据 5 座(南京长江第三大桥、南京长江二桥南汊桥、武汉白沙洲长江大桥、青州闽江大桥、上海杨浦大桥)。

整体来说,我国斜拉桥设计、施工水平已迈入国际先进行列,部分成果

达到国际领先水平。目前，我国正在建设的香港昂船洲大桥、江苏苏通大桥，其主跨分别达到 1018m 和 1088m，斜拉桥建设技术将有新的突破。表 1-1 和图 1-1 为国内外著名的钢梁斜拉桥^[2~4]。

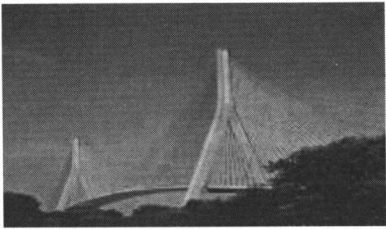
国内外著名的钢梁斜拉桥 表 1-1

桥 名	主跨(m)	国 家	建成年份	主跨加劲梁
苏通大桥	1088	中国	在建	钢箱梁
香港昂船洲大桥	1018	中国	在建	钢箱梁
多多罗大桥	890	日本	1999	钢箱梁
诺曼底大桥	856	法国	1995	钢箱梁
南京长江第三大桥	648	中国	2005	钢箱梁
南京长江第二大桥	628	中国	2001	钢箱梁
武汉白沙洲大桥	618	中国	2000	钢箱梁
青州闽江大桥	605	中国	2001	钢与混凝土结合梁
杨浦大桥	602	中国	1993	钢与混凝土结合梁
徐浦大桥	590	中国	1997	钢与混凝土结合梁
名港中央大桥	590	日本	1997	钢箱梁
浙江舟山桃夭门大桥	580	中国	2003	钢箱梁

注：统计日期截止到 2005 年底。



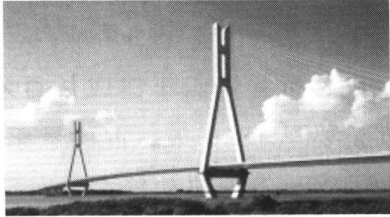
(a) 多多罗大桥



(b) 诺曼底大桥



(c) 武汉白沙洲大桥



(d) 南京长江第二大桥南汉桥

图 1-1 国内外著名的钢箱梁斜拉桥

1.1.2 悬索桥

悬索桥是一种古老的桥型,起源于中国,革新于英国,发展于美国,广泛应用于日本。它因具有跨度大、美观、架设方便等特点而得到广泛的应用。随着高强钢丝和优质材料的出现,架设工艺的改进以及计算理论和手段的不断完善,悬索桥正朝长、大方向发展,并因其在大跨度方面具有较大的优势而成为现代大跨径桥梁家族中的重要成员。

从1816年,英国建成了第一座具有现代意义的悬索桥——跨径为124m、以钢丝做主索的人行吊桥起,工程界开始重视对悬索桥的理论研究。1823年纳维尔发表了加劲梁悬索桥理论,认识到竖向挠度随着恒载的增加而减少。到19世纪末,悬索桥的跨度达到200~300m。1883年列特和1886年列维分别发表了弹性理论,这使悬索桥的跨径达到了500m以上。1888年米兰提出了挠度理论,利用该理论分析的第一座桥是曼哈顿(Manhattan)大桥(主跨径为448m)。到1931年,挠度理论使悬索桥的跨度增大了一倍,且突破了1000m,这就是跨越哈得孙河的乔治·华盛顿(George·Washington)大桥(主跨1067m)和旧金山金门(Golden Gate)大桥(主跨1280m)。悬索桥的发展至今已有近200年的历史,它是大跨径(尤其是1000m以上的特大跨径)桥梁的主要形式之一,其优美的造型和宏伟的规模,常被人们称为“桥梁皇后”。1966年英国塞文(Severn)桥的加劲梁首先采用流线型扁平钢箱梁,增大了桥梁抗风性能和抗扭刚度,且用钢量少、维护方便。1970年丹麦小贝尔特(Small Belt)桥的钢箱梁首先采用箱内空气干燥装置,增强了防腐性能。跨径为世界第一的明石海峡大桥悬索桥的抗震设计成功地经受了1995年日本神户大地震考验。我国虽然很早就开始修建悬索桥,但是其跨径和规模远不能同国外现代悬索桥相比。

我国悬索桥发源甚早,已有3000余年历史。其发展大致可分为古代悬索桥、近代悬索桥和现代悬索桥三个时期。

古代悬索桥:在我国四川境内,远在公元前250年就有李冰所建的人行“笮桥”。汉宣帝甘露四年建成长百米的铁索桥,它比英国在1741年修建的铁链悬索桥要早1800年。古代悬索桥只适用于人畜通过,跨长小于130m,面窄无加劲梁,上下波动较大。

近代悬索桥:1858—1949年修建的悬索桥归为近代悬索桥。近代悬索桥与古代悬索桥相比,其进步之处首先是按力学理论进行静力分析计算,其次以

钢索代替铁链,设高塔和加劲梁,改缆顶面上承为缆底面下承,提高了载重量和稳定性,可供汽车等车辆通行。我国近代第一座公路悬索桥是湖南能滩桥。

现代悬索桥:自1949年至今,我国建成悬索桥约为50座,跨径也大幅度地提高。20世纪50年代所建的悬索桥,基本上为通行汽—10级单车道桥,有加劲式和柔式两种形式。20世纪60年代我国悬索桥修建较多,不少桥跨径超过150m,最大的为186m。20世纪90年代以前,我国相继建成60多座悬索桥,但跨径小、桥面窄、荷载标准低。直至1997年建成通车的香港青马大桥(主跨达到1377m)才使我国悬索桥的跨径超过了1000m,随后1999年9月建成通车的堪称“中国第一、世界第四”的江阴长江公路大桥(主跨达到1385m)和2005年4月建成通车的润扬长江公路大桥南汊桥(主跨达到1490m,建成后位居“中国第一、世界第三”)的跨径也超过了1000m,在世界上已经建成的主跨超过了1000m的18座特大跨径钢箱梁悬索桥中占得3席^[2,5]。这些桥梁的建成大大缩小了我国与国外悬索桥梁建设水平的差距。

表1-2和图1-2为国内外著名的特大跨径悬索桥^[2,3,6]。

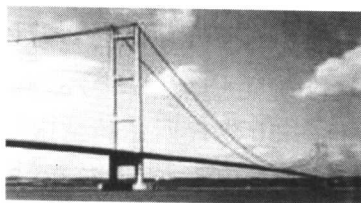
国内外相继建成的特大跨径悬索桥

表 1-2

桥 名	主跨(m)	国 家	建成年份	主跨加劲梁
明石海峡大桥	1991	日本	1998	钢桁梁
舟山西堠门大桥	1650	中国	在建	钢箱梁
大带桥(Great Belt)	1624	丹麦	1996	钢箱梁
润扬长江公路大桥	1490	中国	2004	钢箱梁
亨伯大桥	1410	英国	1981	钢箱梁
江阴长江公路大桥	1385	中国	1999	钢箱梁
香港青马大桥	1377	中国	1997	钢桁梁
维拉扎诺桥	1298	美国	1964	钢桁梁
金门大桥	1280	美国	1937	钢桁梁
Mackinac 桥	1158	美国	1957	钢桁梁
南备赞濑户桥	1100	日本	1988	钢桁梁
博斯普鲁斯Ⅱ桥	1090	土耳其	1988	钢箱梁
博斯普鲁斯Ⅰ桥	1074	土耳其	1973	钢箱梁
乔治华盛顿桥	1068	美国	1932	钢桁梁
来岛三桥	1030	日本	1999	钢箱梁
来岛二桥	1020	日本	1999	钢箱梁
4月25日桥(25 de Abril)	1013	葡萄牙	1966	钢桁梁



(a) 明石海峡大桥



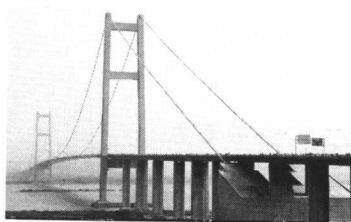
(b) 亨伯大桥



(c) 江阴长江公路大桥



(d) 香港青马大桥



(e) 润扬长江公路大桥(南汊桥)



(f) 旧金山金门大桥

图 1-2 国内外著名的特大大跨径悬索桥

1.2 加劲梁常用结构形式

作用在缆索支承桥梁上的绝大部分外荷载是由加劲梁和与其相结合的桥面板所承受。这是因为全部车辆荷载均作用于桥面板上，而大多数情况下加劲梁的恒载和承风面积均比缆索体系的大。因此加劲梁必须能够承受和传递局部荷载，并在将整个荷载传递给主墩的过程中，对缆索体系起着决定性的辅助作用^[1]。

1.2.1 斜拉桥常用加劲梁结构

由于受拉索的支承作用，加劲梁的受力性能不仅取决于自身的结构体系，同时与塔的刚度、梁塔的连接方式、索的刚度和索形等密切相关，所以加劲梁在设计时一般都要综合考虑梁、塔、索三者之间的关系。加劲梁的截面形式应该根据跨径、索距、桥宽等不同需要，综合考虑结构的力学要求、