

桥梁概念设计与分析理论

CONCEPTURAL DESIGN AND ANALYTICAL THEORY OF BRIDGES

上册

刘 钊 编著
吕志涛 主审



人民交通出版社
China Communications Press

桥梁概念设计与分析理论

CONCEPTURAL DESIGN AND ANALYTICAL THEORY OF BRIDGES

上册

刘 钊 编著

吕志涛 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是以桥梁概念设计和分析理论为主线的桥梁工程教程。上册内容包括两部分:桥梁设计总说和混凝土梁桥;下册内容包括三部分:拱桥、斜拉桥和悬索桥。

本书上册的特点有:①对桥梁设计准则和概念设计要点进行了深入讨论,结合工程实践,强调基本概念、基本原理和基本方法。②注重吸收国内外新的设计理念和方法。例如,预应力混凝土梁桥的合理成桥状态设计方法,混凝土梁桥D区设计的拉压杆模型方法,节段预制拼装桥梁的抗剪设计等,其中不乏最新研究成果。③面向工程实际,推崇实用方法,注重定性判断和定量估算。④列举了不少世界范围内的工程案例和经验教训。

本书可以作为桥梁及结构工程类博士、硕士研究生教材,也可供从事桥梁设计、研究和施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁概念设计与分析理论.上册/刘钊编著. —北京:人民交通出版社, 2010.9
ISBN 978-7-114-08551-2

I. ①桥… II. ①刘… III. ①桥梁工程—设计—理论
IV. ①U442.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第141158号

书 名: 桥梁概念设计与分析理论(上册)

著 作 者: 刘 钊

责任编辑: 曲 乐 王文华

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.ccpres.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: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20.25

字 数: 471千

版 次: 2010年9月 第1版

印 次: 2010年9月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08551-2

印 数: 0001~2000册

定 价: 40.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

自改革开放以来,我国桥梁技术得到空前发展,表现为持续增长的桥梁数量、推陈出新的结构形式、不断刷新的桥跨记录和日渐显现的创新成果。然而,在我国桥梁建设取得重大成就的同时,还应该清醒地认识并坦然地承认,我国的桥梁科技距离世界先进水平还有不小的差距,诸如,在桥梁工程建设的总体质量管理水平上,在桥梁技术的重大创新上,在桥梁规范的结构体系上,甚至在高质量的桥梁著述上。所有这些,都需要土木工程界的广大科技工作者付出艰辛的努力。

现在,呈现在读者面前的这本《桥梁概念设计与分析理论》,就是一本高质量、有见地的桥梁著述。本书有这样几个鲜明的特色:

一、以桥梁结构形式为纲目,以概念设计和分析理论为线索,搭建了一本桥梁工程基本教程的框架。上册内容包括两部分:桥梁设计总说和混凝土梁桥;下册内容包括三部分:拱桥、斜拉桥和悬索桥。

二、对桥梁设计准则和概念设计要点进行了深入讨论,结合工程实践,强调基本概念、基本原理和基本方法。如在讲述抗弯、抗剪设计原理以及空间效应、温度作用和收缩徐变等影响时,试图深入浅出地阐明公式、方法背后的本源。

三、注重吸收国内外新的设计理念和方法。例如,混凝土梁桥中,区分B区与D区的概念,在B区设计中提出了合理成桥状态的实用设计方法,在D区设计中较系统地阐述了拉压杆模型的方法和应用,其中不乏最新研究成果。

四、面向工程实际,推崇实用方法,注重定性判断和定量估算。例如,在讨论变截面箱梁的剪应力分布规律、箱梁桥偏载系数沿桥跨分布、徐变次内力的产生条件及其影响、曲线梁桥的力学特征等内容中,有许多有实用意义的讨论。书中阐述的简化公式也为桥梁初步设计方案的比选提供了有力的工具。

五、列举了不少世界范围内的工程案例,总结了值得反思的经验教训。

因此,本书不但可以作为博士、硕士研究生教材,而且也是桥梁工程设计人员和科技工作者的重要参考书。

本书作者于1998~2001年间在我指导下攻读博士学位,此前他已有十余年的桥梁工程实践经历,现在是东南大学土木工程学院的教授。或许,正因为作者有这样的施工、设计、科研和教学经历,更能使本书贴近广大桥梁科技工作者。我也衷心期待本书能够得到工程界和学术界的广泛批评与共鸣。

中国工程院院士

东南大学教授

李国豪

2010年3月 南京

前 言

现代桥梁设计要同时接受两种挑战:一方面,要使桥梁建筑融于自然环境,满足经济、美观、人文等理性需求;另一方面,要使桥梁结构出于力学原理,满足安全、适用、耐久等技术指标。杰出的桥梁工程,或以传承历史文化而成为地标性建筑,或以道法自然的力学美而被叹为巧夺天工。

近年来,在我国社会经济持续发展的迫切需求中,在工业化制造水平全面提升、计算机辅助设计普及应用的大背景下,桥梁建设规模和建造技术得到了空前发展,与此同时,也有不良的快餐化设计倾向在坊间流行。那么,桥梁工程教育也要与时俱进,不断更新,要讲授在新的工程实践和技术条件下发现的新知识和新规律;要让在计算机和网络时代成长起来的工程师们,既能利用强大的计算机辅助设计功能,又能运用概念设计和分析理论,建造出返璞归真的桥梁。

本书初稿是东南大学的研究生教学讲义,立意于阐述桥梁设计中的基本概念、基本原理和基本方法,体现理论与实践相结合,探讨新的设计理念和方法。全书分上下册编写,内容包括五个部分:

- 桥梁设计总说
- 混凝土梁桥
- 拱桥
- 斜拉桥
- 悬索桥

东南大学教授、中国工程院吕志涛院士一直热情鼓励编写本书,并在百忙中给予了认真审阅和指导。本书的编写工作得到了我们研究团队师生的大力协助,其中有孟少平教授、王景全副教授和惠卓副教授所给予的指导与帮助,更有研究生们的直接参与,需要特别指出的是贺志启(Ⅱ-4,5,12,13)、林波(Ⅱ-12,13)和郑和晖(Ⅱ-13.4)在相应章节的贡献。此外,贺志启、林波、臧华、李准华、刘厚军、孙莉、王恒、薛雄、苏俭、孟杰、郑和晖、李甲丁、戴玮、朱小康、陈扬、聂永福、周剑、王建超、王勇、端茂军、仝腾、徐舒、黄华琪、张琪峰等同学还帮助完成了一些文稿整理和算例,他们的优秀表现让我对“无贵无贱,无长无少,道之所存,师之所存”的古训有了深切的领悟。

苏州大学艺术系雍自鸿老师帮助绘制了第Ⅰ部分第2章中的大部分桥梁插图(第Ⅰ部分:图2-5~图2-19),东南大学舒翔同学也帮助完成了一些插图(第Ⅰ部分:图2-4,图3-6,图3-7,图3-27;第Ⅱ部分:图11-1)。这些精美的艺术绘图无疑使本书大为增色。

笔者的桥梁工程学习(本、硕两阶段)始于西南交通大学,硕士阶段的导师是陈国藩教授,此后在铁道部第四工程局工作十余年,1998年师从吕志涛院士攻读博士学位,研究课题依然是桥梁工程方向。自2001年以来,在东南大学的教学和科研平台上,有幸得到国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、江苏省交通科学研究计划和一些桥梁横向课题的支持,也有幸在美国加州大学圣地亚哥分校(2005.10~2006.10,受益于东南大学华英文教基金)和德国斯图加特大学(2008.9~2008.11,受益于德国DAAD基金)进行了短期学习访问,正是这些经历,在不断促进自己的学习和思考。

在本书成稿阶段,张恒平教授(东南大学)、艾军教授(南京航空航天大学)、施大震教授级高工(上海市市政工程设计研究院安徽分院)等友人应约提出了宝贵意见。在交付出版之际,得到了东南大学校级优秀研究生教学用书建设的立项资助,人民交通出版社的曲乐副主任和王文华编辑给予了真诚帮助。最后,感谢妻子余水,没有她的支持,书稿的完成也是不可想象的。

本书作为研究生教材和专业著述,力图简练达意,但自知相去甚远,期待读者不吝指正。

刘钊

2010年5月于南京

上册目录

第 I 部分 桥梁设计总说

第 1 章 桥梁属性与结构形式	3
1.1 桥梁的属性	3
1.2 桥梁结构的分类	3
1.3 桥梁结构形式与合理跨度范围	6
本章参考文献	8
第 2 章 桥梁设计准则	9
2.1 桥梁设计的基本目标	9
2.2 安全性和适用性	10
2.3 经济性	11
2.4 美观性	12
2.5 桥梁设计准则讨论	19
本章参考文献	25
第 3 章 桥梁概念设计讨论	27
3.1 结构方案不唯一,要权衡择优	28
3.2 清晰的传力途径,可靠的平衡机制	29
3.3 细节决定成败	30
3.4 对可施工性的考虑	32
3.5 对极端事件的考虑	37
3.6 对可维护性和可更换性的考虑	42
3.7 对耐久性的考虑	44
3.8 定性校核定量,手算判定电算	47
3.9 建筑师的参与有助于提高设计品质	48
本章参考文献	48

第 II 部分 混凝土梁桥

第 1 章 混凝土梁桥概述	51
1.1 混凝土梁桥技术溯源	51

1.2 混凝土的特性·····	54
1.3 预应力钢筋及其锚固装置·····	59
1.4 预应力混凝土结构的基本行为·····	62
本章参考文献·····	64
第2章 混凝土梁桥的结构形式与构造 ·····	65
2.1 预应力混凝土梁桥的结构特点·····	65
2.2 中小跨度混凝土梁桥·····	66
2.3 大跨度混凝土箱梁桥·····	70
2.4 节段预制拼装和体外预应力技术·····	79
2.5 混凝土梁桥的施工方法和预应力筋布置方式·····	86
2.6 预应力混凝土梁桥的材料用量·····	90
本章参考文献·····	93
第3章 混凝土梁桥的结构分析模型 ·····	94
3.1 混凝土梁桥中的B区和D区·····	94
3.2 结构总体分析模型(B区)·····	97
3.3 结构局部分析模型(D区)·····	103
本章参考文献·····	105
第4章 正截面抗裂和受弯承载力设计原理 ·····	106
4.1 正截面抗裂验算·····	106
4.2 裂缝宽度验算·····	107
4.3 正截面弯曲破坏形态·····	108
4.4 正截面受弯承载力·····	108
4.5 无黏结或体外预应力混凝土梁的受弯承载力·····	110
4.6 无黏结预应力筋的极限应力增量·····	111
本章参考文献·····	120
第5章 斜截面抗裂和受剪承载力设计原理 ·····	121
5.1 两类斜裂缝·····	121
5.2 基于主拉应力控制的抗裂设计·····	121
5.3 斜截面剪切破坏形态和过程·····	127
5.4 斜截面受剪承载力·····	128
5.5 节段预制拼装桥梁接缝面的受剪承载力·····	134
本章参考文献·····	139
第6章 预应力作用的设计分析方法 ·····	141
6.1 预应力作用的等效和模拟·····	141
6.2 预加力产生的初内力、次内力和总内力·····	142

6.3	预应力损失	143
6.4	基于截面应力限值条件的预应力配束索界	145
6.5	基于荷载平衡原理的预应力设计方法	148
	本章参考文献	150
第7章	连续梁桥的合理成桥状态及预应力设计方法	151
7.1	悬臂施工连续梁桥的成桥内力分布	151
7.2	悬臂施工连续梁桥的预应力弯矩分析	154
7.3	连续梁桥的合理成桥状态	156
7.4	基于合理成桥状态的预应力设计方法	160
7.5	关于合理成桥状态的讨论	165
	本章参考文献	167
第8章	箱梁桥的空间效应	168
8.1	箱梁空间效应的分解	168
8.2	箱梁的剪力滞	170
8.3	箱梁的扭转	174
8.4	箱梁的畸变	180
8.5	箱梁桥的偏载系数	181
	本章参考文献	184
第9章	温度作用效应	185
9.1	混凝土桥梁所受温度作用	185
9.2	混凝土形成期的水化热	186
9.3	混凝土桥梁的环境温度作用模式	190
9.4	环境温度下的结构纵向分析	192
9.5	温度梯度下的箱梁横向分析	198
	本章参考文献	199
第10章	混凝土徐变和收缩作用效应	201
10.1	徐变和收缩的机理及影响因素	201
10.2	徐变和收缩的度量	205
10.3	徐变引起结构次内力的条件	211
10.4	收缩、徐变引起的预应力损失	212
10.5	徐变内力重分布的简化分析方法	214
10.6	收缩、徐变计算的有限单元法	216
10.7	算例	217
	本章参考文献	222
第11章	斜板桥、斜梁桥与曲线梁桥设计原理	223
11.1	斜板桥	223

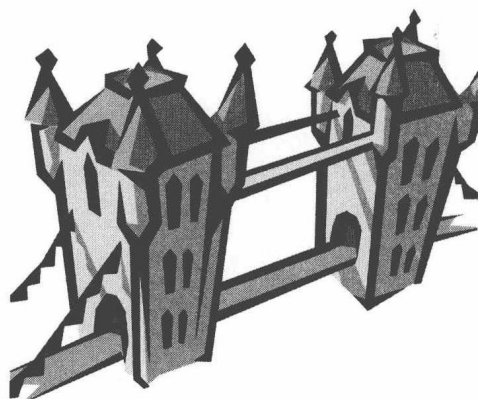
11.2 斜梁桥	228
11.3 曲线梁桥	229
本章参考文献	236
第 12 章 拉压杆模型的概念与基本组成	237
12.1 应力、应力迹线和拉压杆模型	237
12.2 拉压杆模型的基本组成	242
12.3 拉压杆模型的强度验算	244
12.4 D 区拉压杆模型法设计流程	246
12.5 拉压杆模型的构形准则及方法讨论	247
本章参考文献	249
第 13 章 混凝土梁桥中一些典型 D 区的设计方法	250
13.1 端部锚固区	250
13.2 齿板锚固区	259
13.3 体外预应力横隔梁锚固区	266
13.4 墩顶横隔梁	270
13.5 变截面箱梁桥跨中底板径向力作用区	279
本章参考文献	283
第 14 章 混凝土梁桥的裂缝	285
14.1 混凝土裂缝产生的一般机理	285
14.2 施工期裂缝及其对策	287
14.3 使用期裂缝及其对策	296
本章参考文献	296
第 15 章 混凝土梁桥工程案例及经验教训	297
15.1 帕劳共和国 K-B 桥的倒塌	297
15.2 我国辽河大桥悬臂端牛腿断裂	301
15.3 瑞典 Gröndal 桥的病害与加固	302
15.4 法国 Boivre 高架桥的病害与加固	305
15.5 加拿大 Grand-Mère 桥病害与加固	308
本章参考文献	310

第 I 部分 桥梁设计总说

第1章 桥梁属性与结构形式

第2章 桥梁设计准则

第3章 桥梁概念设计讨论



第 1 章 桥梁属性与结构形式

桥梁是跨越障碍而提供交通功能的结构物。本章阐述桥梁的工程属性、自然属性和社会属性,介绍桥梁分类、结构形式与合理跨度范围。

1.1 桥梁的属性

桥梁建造是土木工程范畴的问题,作为土木工程学科的一个重要分支,桥梁工程与科学、技术、艺术之间有着密切的关联性,这里用图 1-1 来示意。桥梁工程中的科学手段,在于通过结构理论分析和试验把握材料特性和结构的力学行为;桥梁工程与技术的相关性,在于开发和应用工程材料,不断总结工程经验,通过设计和施工的实践来建造桥梁;桥梁工程与艺术的结合,在于塑造桥梁的形体与视觉表现,使之与自然环境和地域文化相协调。虽然历史上一些伟大的桥梁工程实践,很明显超越了当时的科学理论水平,但是,因缺乏理论指导,而导致桥梁失效的事例也不胜枚举。毋庸置疑,现代桥梁工程的发展,得益于科学、技术和艺术所取得的成就。

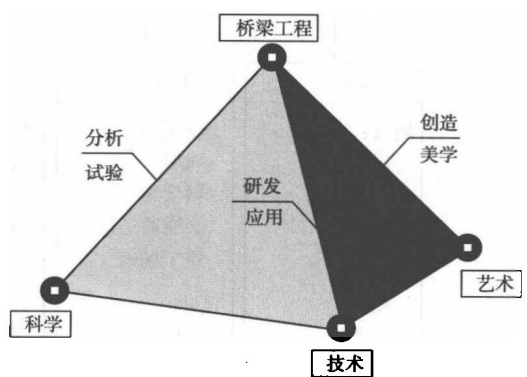


图 1-1 桥梁工程与科学、技术和艺术之间的关联性

桥梁作为人工结构物,需要利用自然资源建造,并镶嵌于大自然之中,吟诵千年的“青山隐隐水迢迢,秋尽江南草未凋,二十四桥明月夜,玉人何处教吹箫?”恰是自然、桥梁与人文相融合的写照。

桥梁作为公共建筑物,建造中需要大量的社会资源,建成后的桥梁服务于公众,要为公众所使用和认同。在西方一些国家,大型桥梁方案经常要公示于众。桥梁的设计与施工不仅仅要满足业主要求,还涉及环境因素、技术因素与劳动因素等方面,见图 1-2。桥梁设计施工的挑战性,不仅在于桥梁规模的大小,还在于因地制宜地处理好边界约束条件,做出经济合理的选择。大桥有大桥的问题,小桥有小桥的麻烦。大型桥梁往往由于投资大,参与面广,重视程度高,工程风险反而降低。在困难的边界条件下,中小桥梁的建设,同样考验着建设者的智慧。

1.2 桥梁结构的分类

桥梁可以从不同的角度进行分类。表 1-1 为桥梁根据用途、材料、结构形式、规模或跨径等不同标准进行的分类。

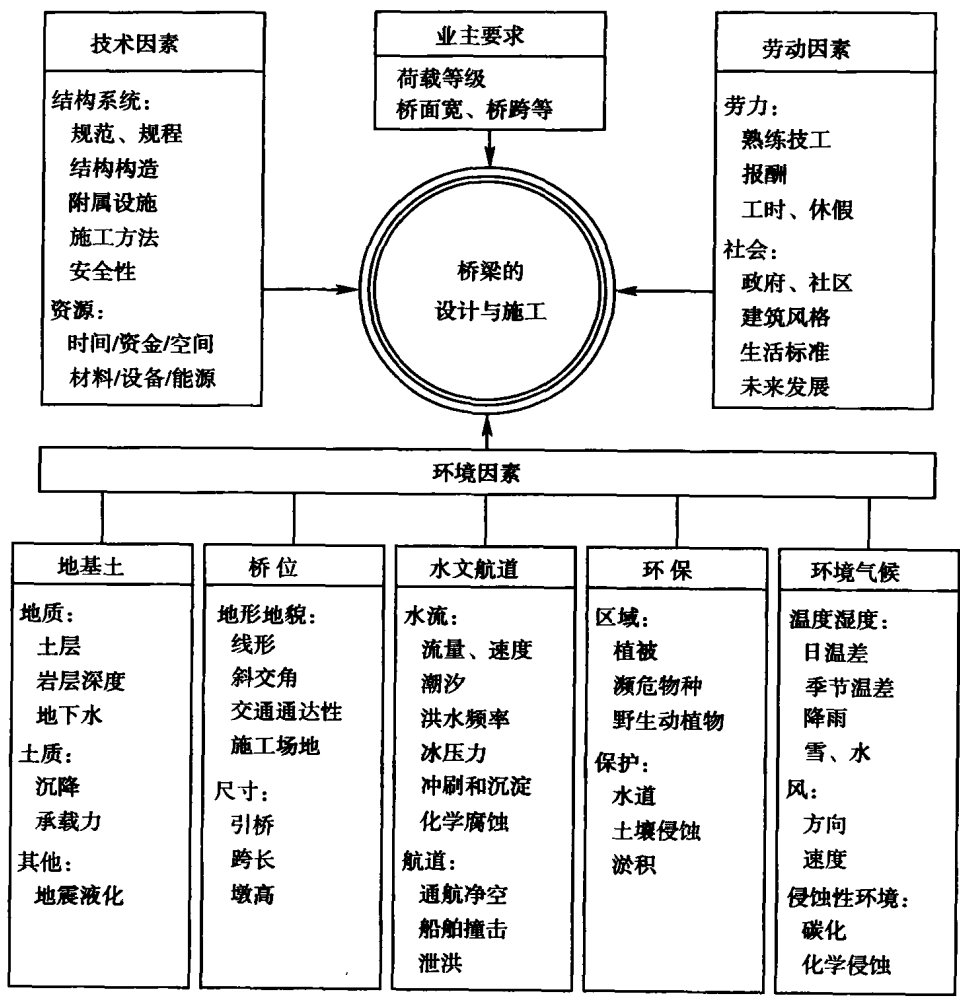


图 1-2 影响桥梁设计与施工的因素

从不同角度进行的桥梁分类

表 1-1

分类标准	分 类
用 途	人行桥、公路桥、铁路桥、公铁两用桥、城市桥、管道桥、明渠桥等
材 料	石桥、木桥、钢桥、混凝土桥、预应力混凝土桥、钢—混凝土组合结构桥等
结构形式	梁桥(简支、连续、连续刚构、桁架桥)、拱桥、斜拉桥、悬索桥,此外还有各种组合桥,如拱梁组合桥、斜拉—悬索协作体系等
规模或跨径	小桥、中桥、大桥、特大桥

(1)按用途分类

根据用途的不同,桥梁可以分为人行桥、公路桥、铁路桥、公铁两用桥、城市桥、管道桥、明渠桥等。

在不同用途下,桥梁设计的出发点和结构特点的差异也很大。例如,人行桥的荷载小,但与环境的协调性要求一般较高。铁路桥的行车轨道是固定的,冲击力大,此外,还要考虑温度作用等附加轨道力。

(2) 按材料分类

根据使用材料的不同,桥梁可以分为石桥、木桥、钢桥、混凝土桥、预应力混凝土桥、钢—混凝土组合结构桥等。

石料和木材为直接取之于自然的传统建筑材料,目前主要用于人行桥和公园景观小桥;钢筋混凝土和预应力混凝土是目前应用最广泛的建桥材料;钢桥由于其轻质高强,成为大跨度桥梁的首选材料;钢与混凝土可以有不同的组合方式,构建出各种组合结构桥梁;各类高分子纤维加劲材料、铝合金、玻璃钢等也在尝试作为新型桥梁结构材料。

(3) 按结构形式分类

梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥是四种比较典型的桥梁结构形式,梁桥又包括简支、连续、连续刚构、桁架桥等形式。此外,梁、拱和缆索支承方式可以有各种组合,衍生出多种新型桥梁结构形式。

(4) 按桥梁规模分类

桥梁跨度的大小是工程中十分关注的技术指标,虽然不能说桥梁的跨度与其技术水平完全成正比,但它能够反映桥梁的技术风险与宏伟程度,因而大跨度桥梁总是格外引人注目。

《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)对于特大桥、大桥、中桥、小桥直至涵洞的划分标准,见表 1-2。但是,对于大跨度桥梁的界定,尚没有统一的标准。

桥 涵 分 类

表 1-2

桥涵分类	多孔跨径总长 L (m)	单孔跨径 L_k (m)
特大桥	$L > 1\,000$	$L_k > 150$
大桥	$100 \leq L \leq 1\,000$	$40 \leq L_k \leq 150$
中桥	$30 < L < 100$	$20 \leq L_k < 40$
小桥	$8 \leq L \leq 30$	$5 \leq L_k < 20$
涵洞	—	$L_k < 5$

注:①单孔跨径系指标准跨径;

②梁式桥、板式桥的多孔跨径总长为多孔标准跨径的总长;拱式桥为两岸桥台内起拱线间的距离;其他形式桥梁为桥面系行车道长度;

③管涵及箱涵不论管径或跨径大小、孔数多少,均称为涵洞;

④标准跨径:梁式桥、板式桥以两桥墩中线之间桥中心线长度或桥墩中线与桥台台背前缘之间中心线长度为准;拱式桥和涵洞以净跨径为准。

自改革开放以来,我国交通建设进入大发展时期,特别是 2000 年以来,公路、铁路及市政桥梁建设均呈现快速发展态势。

根据公路水路交通运输行业发展统计公报,2001 ~ 2009 年我国公路桥梁总数量与总里程情况见表 1-3,从中可见,2009 年桥梁总数达 62 万座,比 2001 年增长约 2.2 倍;2009 年桥

梁总里程达 2.7 万千米,比 2001 年增长约 2.6 倍。图 1-3 和图 1-4 直观地给出了我国公路桥梁总数量与总里程在近 10 年的增长情况。

2001 ~ 2009 年我国公路桥梁统计 表 1-3

年份	桥梁总数 (万座)	桥梁总里程 (万 m)	特 大 桥		大 桥		中 小 桥	
			总数(座)	比例(%)	总数(座)	比例(%)	总数(座)	比例(%)
2001	28.40	1 065.00	1 580	0.56	14 429	5.08	26.78	94.30
2002	29.90	1 161.20	1 900	0.64	15 891	5.31	28.16	94.18
2003	31.08	1 246.61	2 155	0.69	17 417	5.60	29.12	93.69
2004	32.16	1 337.64	717	0.22	20 672	6.43	30.02	93.35
2005	33.66	1 474.75	876	0.26	23 290	6.92	31.24	92.81
2006	53.36	2 039.91	1 036	0.19	30 982	5.81	50.16	94.00
2007	57.00	2 319.18	1 254	0.22	35 816	6.28	53.29	93.49
2008	59.46	2 524.70	1 457	0.25	39 381	6.62	55.38	93.14
2009	62.19	2 726.06	1 699	0.27	42 859	6.89	57.73	92.83

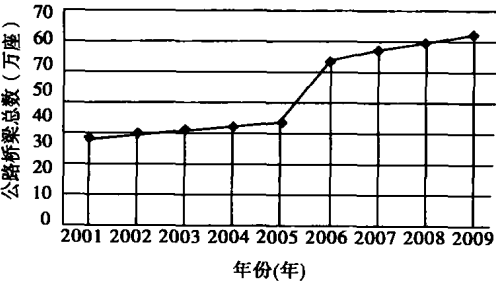


图 1-3 2001 ~ 2009 年公路桥梁数量统计

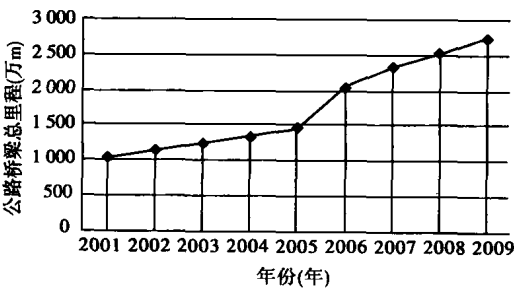


图 1-4 2001 ~ 2009 年公路桥梁里程统计

截至 2007 年,全国铁路营业线路中的桥梁有 4.7 万座,合计 3 356km。其中,全长在 500m 以上的特大桥 826 座,全长 100m 以上至 500m 的大桥 5 459 座,全长 20m 以上至 100m 的中桥 13 872 座,全长不足 20m 的小桥 26 731 座。

随着科技的进步,桥梁跨度在日益增大,各式桥梁的跨度纪录在不断刷新,因此衡量桥梁跨度大小的标准也应该有所变化。目前从跨径上谈桥梁规模,建议划分如表 1-4 所示。

桥梁按跨度分类 表 1-4

分 类	小跨度桥梁	中等跨度桥梁	大跨度桥梁	特大跨度桥梁
桥梁跨度(m)	$L < 50$	$50 \leq L < 100$	$100 \leq L < 500$	$L \geq 500$

1.3 桥梁结构形式与合理跨度范围

我们知道,每一种桥梁结构形式有其合理的跨度范围,超出这一范围,桥梁的经济指标往往会显著下降,甚至不可行。

在目前的材料性能及技术水平下,各种桥梁的适宜跨度范围大致如表 1-5 和图 1-5 所示。

各种桥梁的适宜跨度范围 表 1-5

桥梁形式		跨 度 (m)												
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 200	1 500	>1 500
桥 梁	简支梁	■												
	等截面连续梁	■	■											
	变截面连续梁/连续刚构	■	■	■	■									
钢 桁 架 桥	简支钢桁	■	■											
	连续/悬臂钢桁	■	■	■	■	■								
拱 桥		■	■	■	■	■	■							
系杆拱桥		■	■	■	■	■	■	■	■					
斜拉桥			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
悬索桥				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

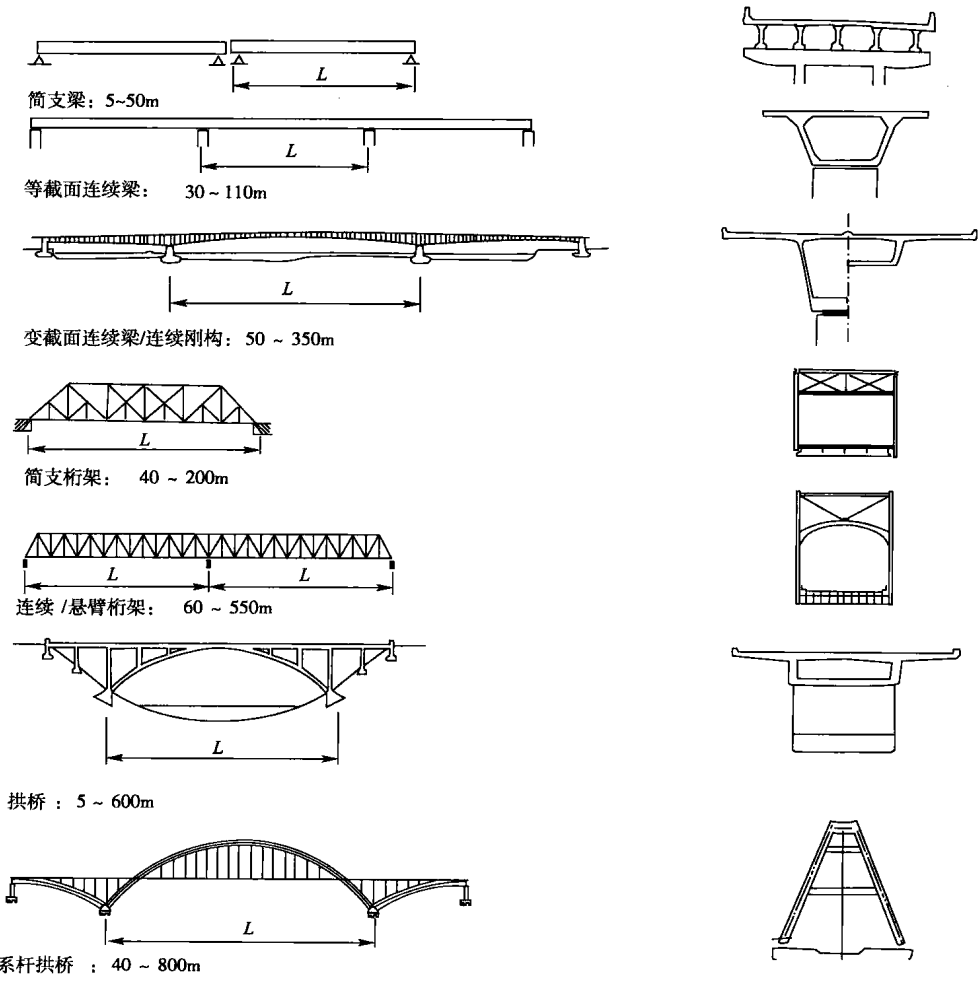


图 1-5