

现代结构设计的 概念与方法

Conceptual Design for
Modern Structures

黄真 林少培 编著

中国建筑工业出版社

现代结构设计的概念与方法

黄 真 林少培 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代结构设计的概念与方法/黄真, 林少培编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-11631-7

I. 现… II. ①黄…②林… III. 建筑结构-结构设计
IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 215131 号

本书介绍现代结构的概念设计和分析方法, 强调概念设计需要在总体构思上考虑美学和可持续发展理念, 同时应用力学的概念和体系构建结构的框架, 融汇结构的分解与集成, 将复杂结构简化分解为三维整体结构、二维子结构乃至一维构件进行分析, 并将这些构件集成为满足高层、大跨、空间等不同功能要求的整体结构。

本书共分八章, 主要内容有结构体系分类, 荷载估算, 结构的整体分析方法, 子体系分析方法, 构件分析方法, 竖向高层结构、横向大跨结构和空间结构的力学概念和简化设计方法, 同时结合国内外多个工程案例启发读者对结构的感悟性。本书附有习题, 可供读者训练手算能力。

全书可作为高等院校土建类专业的本科生或研究生教材, 也可供广大从事土木工程的工程师、建筑师等专业技术人员参考。

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 赵明霞

责任校对: 袁艳玲 兰曼利

现代结构设计的概念与方法

黄 真 林少培 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{1}{4}$ 字数: 390 千字

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-11631-7

(18876)

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)

作者简介

黄 真



女，1963 年出生
上海交通大学土木系教授
德国工学博士 Dr-Ing.
天津大学博士 Ph. D
英国皇家特许工程师 CEng.
英国土木工程师学会资深会员 FICE
美国土木工程师学会会员 M. ASCE

1982 年天津大学本科毕业，1988 年天津大学获博士学位。1990 年赴德国工作学习，并于 1995 年在德国布伦瑞克大学获德国工学博士学位。1998 年回国后任天津外资钢结构公司总工程师，负责设计施工多项钢结构工程。2001 年起在上海交通大学土木工程系从事教学与科研工作。

林少培



男，1934 年出生
上海交通大学土木系教授
英国土木工程师学会资深会员 FICE
英国皇家特许工程师 CEng.
英国“Bridge Engineering”杂志编委
英国“Civil Engineering Innovation”杂志编委
英国“Management, Procurement and Laws”杂志编委

大连理工大学 1956 年本科毕业，1956~1958 年钢结构研究生，1962~1966 年大连理工大学工程力学研究生。1992 年获国务院颁发的大连理工大学政府特殊津贴。曾任中国土木工程学会计算机应用委员会理事，中国力学学会计算力学委员会理事，前国家计委、中国国际工程咨询公司咨询专家。1967~1984 年在大连理工大学工程力学系和工程力学研究所从事教学与科研工作，1985 年后在上海交通大学土木工程系从事教学与科研工作。

序

很高兴能有机会给大家推荐一本有关“结构概念设计”的教材。十年前，本教材的作者领先在国内开设了“结构概念设计”课程，有十年的教学经验；为了撰写这本教材作者也准备了十年，渗透了作者多年来的辛勤劳动和汗水，累积和凝聚了作者长期教学的宝贵心得。在目前国内的教学环境中能这样坚持不懈地写一本教材，实属难得。更值得一提的是本教材的两位作者。一位是年近 75 岁的林少培教授，他是我国工程计算数学的前辈，至今仍工作在教学、科研第一线，不但对学科的前沿发展仍十分敏感，而且有广博的专业知识。另一位是年富力强的黄真教授，她不但有天津大学和德国布伦瑞克大学两个博士学位，而且有工程界多年的工作经历，曾在天津外资钢结构公司任总工程师三年。这两位作者实属两代人，他们能长期合作，在写作中充分发挥各人所长，在署名的次序上谦让，真正体现了上海交通大学一种学术文化的传承，这在目前国内的学术界也不多见。难怪学生们喜欢这本教材，真可谓“劳谦虚己，则附之者众”。

本教材的内容是围绕“结构设计”的“力学概念和简化计算方法”展开的。众所周知，人类在地球上生存、繁衍和发展需要建立一定的物质环境，这些物质环境必须满足特定的功能要求，满足功能要求的必要条件是它们必须保持专有的形态，而保持形态的必要条件是能承受作用在它们上面的各种作用，“结构”就是这种形态的基础。结构设计的起点在于“功能”，结构设计的终点也在“功能”。为了满足功能的要求必须去寻找合理的专有形态，为了实现形态必须选择合理的结构体系，在这条路径上不存在“唯一解”。这个寻找和选择的过程就是“结构概念设计”涵盖的主要内容。选择结构体系的过程必然要考虑到细节，包括材料和每一个构件，但是确定细节的最终目标还是要回到“功能”。在从细节到实现结构体系和形态的过程中，既有技术（力学）又有艺术（美学），二者并不割裂。所谓“合理的结构造就建筑的美”就是这个道理。“现代”的结构概念设计又具备了新的特点，它不仅从时间域上要扩大到“全寿命”，而且在空间域上要进一步扩大到整个生态空间。

我感到这本教材的特点是：一、作者用了大量的精力去理解结构大师林同炎先生的设计理念，这是以往不曾有过的；二、作者认真研究了国内外各种有教育意义的工程，从各种案例的经验和教训中去生动地体会现代结构的设计理念。这种基于案例的教学，在土木工程领域中尤其重要。

上海交通大学的一些学生在学习这本教材后，参加全国和地区的多次结构设计大奖赛赢得丰收。这些成果应该是对本教材最重要的评价。

刘西拉

于上海交通大学工程馆 242

前言

传统的土木工程专业的课程教学中,存在“分门授课多,综合归纳少”的情况。尤其对结构工程专业而言,除需学习 4~5 门力学课程外,尚需学习 8~10 门专业课程。众多的课程往往对学生的学习形成相互独立的“知识孤岛”,相互缺少有机的联系。这种情况就使他们缺乏对结构总体形态的了解,缺乏深入理解结构的内涵,获取对结构的感性和悟性。为土木工程专业高年级学生开设一门综合性的提高其对结构感悟性的课程,使他们在众多课程知识的基础上,归纳提炼并升华他们对结构的理解,是很有必要的。作为这样一门课程的教科书,必须反映现代结构工程的时代特征。它不仅要反映所谓“现代”的传统理解,即高层、大跨、空间作用和美学等要求,更必须强调 21 世纪对各项建设的“绿色”设计理念,即节能减排、环境友好和满足可持续发展的要求。

上海交通大学是国内率先在本科生中开设《结构概念设计》课程的高校。自 1998 年已经连续多年应用美国林同炎教授等的著作“结构概念与体系”作为教材。相对于结构细部设计,林同炎教授在书中更强调了结构总体的概念设计。做好概念设计,则得益最大。而做好概念设计,其思路则主要源于设计者对结构性态的感悟性和对基本力学概念的应用。林同炎教授提倡用最简单的方法来处理复杂的问题,通过对结构的感悟性,用简单的基本力学方法正确设计结构的组成和传力途径。其方法的特点和贡献就是将复杂的结构力学分析隐藏起来,而将其实质表达为简单静力学进行处理,这就很容易被工程师们所理解并付诸应用。

进入 21 世纪,由于人类频繁和多样的活动,对结构的功能提出了更高的要求。现代结构工程的发展必须满足社会、人和自然的协调发展,因此也面临着更严峻的挑战。本书传承林同炎教授结构概念设计的思维方法,结合现代结构工程对建筑功能的更高要求,并充分考虑“人和自然的协调发展”理念,尤其结合我国近年来结构工程的实践进行编写。现代的高层结构、桥梁结构、空间结构并不是一味地追求高、宽、大,而是更强调“功能需要”,强调“节约能源”和“环境友好”。

现代结构设计是由三条主线贯穿:力学理念、美学理念和可持续发展理念。三条主线各自独立,又互相关联。现代结构设计目的是满足建筑物的使用功能。在外界干扰下,建筑物形态是保证其使用功能的前提,而建筑形态的基础就是结构,结构又是由具体材料组成。所以现代结构设计就需要“从整体着眼,从局部着手”,即使在结构局部的设计时,都要考虑建筑整体的力学、美学和可持续发展需要。

为此,工程师需要在总体构思上考虑美学和可持续发展理念,同时应用力学的概念和

体系构建结构的框架，融汇结构的分解与集成，将复杂的整体结构简化为简单三维整体结构、二维平面子结构乃至一维线性或非线性构件，并将这些结构构件集成为满足高层、大跨、空间等不同功能要求的整体结构。

本书第一章是概论；第二章是荷载估算；第三章介绍结构的整体分析方法，将复杂的整体结构简化为简单的三维结构进行分析，通过“力流”方法优化结构的立面布置，通过“基印图”方法优化结构的平面布置；第四章介绍结构子体系的分析方法，将三维整体结构分解为二维子结构进行分析；第五章介绍结构构件的分析方法，将二维平面子结构分解为一维直线或曲线构件进行简化分析；第六章、第七章和第八章将这些结构构件综合集成成为满足不同现代功能要求的竖向高层结构、横向大跨结构和空间结构，同时结合多个工程案例启发读者对结构的感悟性。

书后提供的课程习题可以巩固读者对各章内容的理解，加强手算能力的训练。同时附录中有两个典型钢结构厂房的概念设计实例，说明如何应用本书的概念设计方法解决实际问题。

为了论证本书编著的必要性，并征集其应包含的内容，我们调查了几位国内外知名的教授。他们的这些建设性、创见性的谈话内容，也就成为本书的重要背景材料。在书后将调研报告提供给读者，以便大家共同分享他们的观点。由于作者的水平所限，本书可能未能全面反映他们的观点。

全书是基于作者长年教学和科研中的积累和对林同炎教授结构概念设计思想的理解而撰写的，对此，我们对林同炎教授深表感谢。同时本书参考了大量的已有文献和工程项目，在此，我们一并表示感谢。本书插图由研究生同学伏俊杰、刘冬、邓麟勇、王璞帮助完善，在此表示感谢。同时，感谢上海交通大学将本书列为校级立项本科教材，并给予一定资助。

书中的缺点和不足难免，敬请读者批评指正。

黄 真 林少培
于上海交通大学

目 录

作者简介

序

前言

目录

第一章 绪论	1
1.1 现代结构的特征	3
1.2 结构概念设计的意义	5
1.3 建筑设计的过程	6
1.4 结构性态和设计原则.....	10
1.5 结构设计与可持续发展.....	16
1.6 结构设计与美学应用.....	18
1.7 第一章小结.....	19
第二章 荷载估算	21
2.1 竖向荷载.....	21
2.2 风荷载.....	23
2.3 地震作用.....	25
2.4 其他间接荷载.....	28
2.5 结构荷载与变形反应.....	29
2.6 第二章小结.....	31
第三章 结构整体分析	32
3.1 结构体系分类	32
3.2 结构整体分析方法.....	41
3.3 结构立面布置的“力流”分析方法.....	42
3.4 结构平面布置的“基印图”分析方法.....	44
3.5 结构高宽比与平衡设计.....	49
3.6 非对称建筑与复杂结构分解.....	54
3.7 结构整体性能设计概念.....	61
3.8 第三章小结.....	74

第四章 结构子体系分析	76
4.1 结构体系分解	76
4.2 整体结构与子结构	78
4.3 横向子结构受力特性分析	82
4.4 横向子结构分类与简化计算	84
4.5 竖向子结构受力特性分析	91
4.6 竖向子结构分类与简化计算	92
4.7 第四章小结	110
第五章 结构构件分析	111
5.1 横向构件分析	111
5.2 竖向构件分析	118
5.3 预应力构件分析	125
5.4 节点的连接方法	130
5.5 第五章小结	132
第六章 竖向高耸结构分析	133
6.1 竖向高耸结构的特点	133
6.2 剪力墙结构体系	138
6.3 框架结构体系	140
6.4 筒结构体系	141
6.5 竖向混合结构体系	144
6.6 案例与讨论	150
6.7 第六章小结	165
第七章 横向大跨结构分析	167
7.1 横向大跨结构的特点	167
7.2 拱结构体系	169
7.3 悬索结构体系	176
7.4 斜拉结构体系	179
7.5 案例与讨论	180
7.6 第七章小结	196
第八章 空间结构分析	198
8.1 空间结构的特点	198
8.2 空间桁架和网架结构体系	199
8.3 空间网壳结构体系	202
8.4 膜结构体系	205
8.5 空间可展结构体系	206
8.6 案例与讨论	208
8.7 第八章小结	216

附录 1 思考与练习 218

附录 2 某单层多跨钢结构厂房概念设计实例 224

附录 3 某多层框架钢结构厂房概念设计实例 232

附录 4 关于本书的调研报告 241

参考文献..... 245

随着经济的飞速发展,我国正进行着前所未有的大规模的经济建设和基础设施的建设。大的基础建设项目包括西部开发中的交通运输公路与铁路运输网络新建工程,能源工程的“西气东输”工程和“西电东送”工程,水利工程的“南水北调”工程和“水电开发”工程以及京沪高铁工程等。顺应我国沿海大城市的经济腾飞和全国城市化步伐的飞速发展,各类城市建设工程正在大量兴建。反映 21 世纪的经济、文化和信息特征的高耸电视塔、超高层楼宇、新型空间结构的体育场馆、音乐厅与歌剧院、具备综合集散功能的现代运输枢纽、机场、码头和车站等现代建筑都将纷纷拔地而起。另外,为解决我国沿海地区的南北通道,大跨度过江桥梁、跨海桥梁和隧道的建设也将如雨后春笋般展开。2008 年北京国际奥运会和 2010 年上海世博会的举办更是使我国的场馆建设项目受到国际关注,极大地提高了我国的国际知名度和我国的建筑设计施工水平。

综上所述,目前遍布祖国大地的建设是世界上最大规模的基本建设,是当今世界上一次伟大的土木工程建设高潮。作为这场建设高潮的主流建设者——土木工程师和建筑师,必须针对 21 世纪的建设趋势与特点,与时俱进地发展土木工程学科,正面应对挑战,力求圆满地完成历史赋予的使命。

现代结构设计不仅要挑战特别高耸、特大跨度、特别新颖的结构形式,更体现在结构设计和施工中贯彻可持续发展的理念,综合考虑美学、社会、环境的要求。土木工程师(包括结构工程师和建筑师)处于人类改造自然并应用科学规律创造一个可持续发展的新世界的中心地位。现代结构设计的概念与方法是贯穿结构设计全过程的力学概念和体系特点的应用,同时在设计与施工全过程中强调并贯彻可持续发展理念。

本书的目的无意让读者陷于复杂抽象的力学分析学习而面对实际工程问题却不知从何下手;本书的目的在于让读者掌握结构的力学基本概念并在各种结构体系中加以应用,使读者面对具体的建筑设计方案能够从结构整体角度快速入手分析结构设计的关键问题,从而能在早期的建筑方案设计及初步设计阶段对结构的整体和局部设计通过手算的方法给出较为合理的分析意见。

建筑结构设计中贯穿设计全过程的思想是“从整体着眼,从局部着手”,因此本书的编排也是“从整体分析到局部分析,再由局部设计完成整体设计”,全书章节由“三维整

体结构分析→二维子结构分析→一维构件分析→三维高耸、大跨、空间结构分析”构成。本书主要内容有结构整体分类及整体分析方法，竖向和横向子结构分类及分析方法，竖向和横向构件分析方法，荷载估算，竖向高耸结构和横向大跨结构以及空间结构体系的设计概念等，书中有一些精心挑选的案例分析，以便读者参考。

第一章“绪论”主要介绍 21 世纪人们面临向更高空间和向更长的跨度去争取生存空间时，涌现出大量的超高层建筑、超大跨桥梁和超大空间的各类现代结构。这些现代结构的工作特点是极端复杂的。为了简化这些现代结构的分析，首先必须强调结构设计是力学和美学以及可持续发展理念的结合。今天，虽然结构的几何体系和外形是随功能需求而变迁的，但是用基本的构件和子结构来分解与集成整体结构的分析方法却是不变的。结构概念设计的任务就是根据力学原理和实际功能需要抽象简化整体结构系统和子结构系统，并对其进行简单合理的受力分析，从而达到对结构的设计进行力学优化，同时也是美学优化的目的。本章强调现代结构设计是由三条主线贯穿，力学概念、美学理念和可持续发展理念。三条主线各自独立，又互相关联。

第二章“荷载估算”分别介绍了竖向荷载、风荷载、地震作用及其他间接荷载的简化估算方法，讨论了结构性态中最基本的结构与变形反应的关系。

第三章“结构整体分析”按几何构成和承载特点对整体结构体系进行分类，可以分为竖向结构体系、横向结构体系与空间结构体系三大类。由于整体结构是由一系列子结构系统组成，具有可分性和叠加性，因此基本的子结构系统设计的好坏，直接影响到整个结构设计的质量。本章着重介绍评判结构立面布置的“力流”分析方法和结构平面布置的“基印图”分析方法，在高宽比平衡设计中引入整体倾覆稳定和抗横向变形能力的概念，并分析了非对称复杂结构的关键问题。为反映现代结构设计的发展，还介绍了预应力、结构“保险丝”设计、结构振动控制和结构“鲁棒性与易损性”、“全寿命”等结构整体性能设计概念。

第四章“子结构体系分析”是在结构整体与子结构体系的相互作用基础上，按结构基本的横向子结构、竖向子结构的设计顺序，讨论了横向子结构和竖向子结构的设计概念与分析方法。本章对整体结构进行分解，介绍结构的传力过程，并对平板体系、主次梁板体系、双向密肋体系和空间桁架体系等横向子结构以及刚架体系、剪力墙体系、筒体系等竖向子结构进行深入的讨论，介绍了一些简化计算方法。

第五章“结构构件分析”介绍横向构件和竖向构件的设计概念和简化设计方法，并讨论了结构的节点和结构构件的预应力设计原则。

第六章“竖向高耸结构分析”由高层结构设计中主要控制横向变形的要求出发，讨论高层建筑不同的刚架、剪力墙、筒结构等竖向基本结构体系和各类竖向混合结构体系的性能，强调结构设计控制变形与强度的理念，重视结构的整体静动力性态表现，并分别进行案例讨论。本章介绍了上海环球金融中心大厦的外桁架筒中筒结构、纽约世贸大厦的外框架筒中筒结构、芝加哥西尔斯大厦的束筒结构和北京 CCTV 大厦的曲管结构等有代表性的实际工程案例。

第七章“横向大跨结构分析”介绍拱、悬索和斜拉体系的不同力学特性和设计概念，并通过一系列实际工程案例加以分析。对应拱结构体系，本章介绍了上海卢浦大桥的钢结构拱桥结构和广西南宁双马鞍斜拱桥方案；对应悬索体系，本章介绍了江阴长江大桥的悬索桥结构；对应斜拉—悬索组合结构体系，则介绍了直布罗陀海峡的斜拉—悬索组合桥

方案。

第八章“空间结构分析”介绍空间桁架体系、空间网壳结构体系、膜结构体系和空间可展结构体系的设计概念和简化计算方法，并通过上海新国际博览中心的空间桁架结构、北京国家大剧院的空间网壳结构、美国亚特兰大体育馆的张拉膜结构和昆明世博园孔雀艺术广场的空间可开合结构的实际工程案例对空间结构的设计要点加以说明。

1.1 现代结构的特征

现代结构的特点是为满足人们对建筑功能更高的要求，这些建筑功能不仅仅是建筑高度的增加（世界最高楼的高度不断被刷新）、桥梁的跨度增加（最大跨越距离也在不断被刷新）、新型结构体系的增加（新体系和新材料的不断出现和应用），这些建筑功能更多地体现在“绿色”的可持续发展方面。

现代结构工程的发展必须满足社会、人和自然的协调发展。现代的高层结构、桥梁结构、空间结构并不是一味地追求高、宽、大，而是更强调“功能需要”，强调“节约能源”和“与环境友好”。为此，工程师需要在总体构思上考虑美学和可持续发展理念，同时应用力学的概念和体系构建结构的框架，融汇结构的分解与集成，将复杂的整体结构简化为简单三维整体结构、二维平面子结构乃至一维线性或非线性构件，并将这些结构构件集成满足高耸、大跨、空间等不同功能要求的现代结构。

现代结构的主要特征如下：

(1) 高耸：由于城市用地的限制，高耸或高层建筑已成为今后的一个发展方向。在继上海金茂大厦（88层，420.5m高）和上海环球金融中心（101层492m高）建成之后，更高的上海中心正在设计施工之中。超高层建筑设计，除了众所周知的地震响应以外，与建筑高度成量级增加的风荷载和其侧向变形以及基底倾覆力矩都将是设计中的难点。

(2) 大跨：纵横的江河大川，使我国成为大跨桥梁较为集中的地方。我国的大跨桥梁形式一般为斜拉桥、悬索桥和各类拱式桥。如已建成的江阴长江大桥，其悬索桥主跨为1385m。上海卢浦大桥和重庆朝天门长江大桥，均为钢结构拱桥，跨度分别达到540m和552m，位列目前世界上大跨度拱桥前列。随着桥梁跨度的增加，风振、地震和结构体系或构件的其他动力与稳定问题都将显得日益突出，为结构设计分析和灾害防范带来极大的困难和挑战。

(3) 新颖：随着21世纪大规模的建设，各类面向新世纪需求的新颖结构也将层出不穷。新颖结构的特点是体态的奇特和受力的复杂，目前尚缺乏现成有效的分析计算方法和设计规程，使结构的工作性态难于预测和控制。

(4) 绿色：现代结构除了上述传统意义上的高、宽、大等特征，更重要的是在建筑结构的设计和施工中更加强调“绿色”的理念，即在建筑结构的设计和施工中注重节能、节材、节水、节地和环保的设计理念。国家强制出台的建筑节能要求就是现代结构设计中必须要考虑的“绿色”设计理念的一项具体要求。

本世纪出现了大量的超高层建筑、超大跨桥梁和各类新颖特殊结构，分析它们在恶劣

环境下的工作性态是极端复杂和具有挑战性的。但只要能抓住结构的基本力学特点，抓住主要问题，将复杂结构用合理的力学模型简化分析，就可以在结构的早期设计阶段通过简化计算方法定量分析并比较各种设计方案，提出相对最优设计方案，节省造价，达到事半功倍的效果。

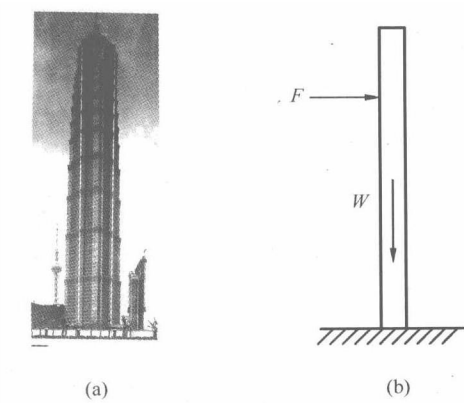


图 1-1 上海金茂大厦和
悬臂梁简化模型
(a) 上海金茂大厦；(b) 简化模型

对高耸结构，可以在结构的早期设计阶段将其整体简化为悬臂梁，进行各种受力分析，比较各种结构体系及外形，确定结构主受力构件的大致尺寸，估算不同结构体系的造价。例如，采用钢筋混凝土结构方案还是采用钢结构方案的对比，采用筒结构方案还是采用框架结构方案的对比，平面布置采用体形简单的矩形方案还是采用体形复杂的 H 形方案的对比，立面布置采用上下相同的长方体方案还是采用上小下大的梯形体方案的对比。上述问题都可以用本书讲述的概念设计和分析方法加以解决。图 1-1 为上海金茂大厦和其悬臂梁简化模型。

对大跨结构，特别是大跨桥梁，可以在结构的早期设计阶段将其整体看成简支梁或连续梁，进行各种受力分析，确定结构主受力构件的大致尺寸，估算不同结构体系的造价。如采用简支梁方案还是采用连续梁方案，采用钢筋混凝土结构还是采用钢结构，最终得到的建筑结构在造价上和建筑造型上都有很大的差异。图 1-2 为上海东海大桥和其斜拉桥（主航道）简化模型。

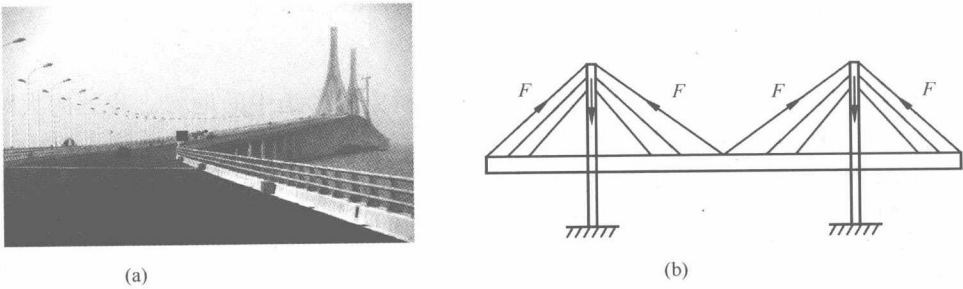


图 1-2 上海东海大桥和斜拉桥简化模型
(a) 上海东海大桥；(b) 简化模型

对一些新颖的空间结构，可以在结构的早期设计阶段将其整体简化为拱结构或悬索结构或几种结构体系的巧妙组合，进行各种受力分析，确定结构主受力构件的大致尺寸并估算结构的造价。图 1-3 为北京奥林匹克“鸟巢”主场馆的钢结构及其门式刚架简化模型。从图 1-3b 可见，“鸟巢”实际是由 48 榀桁架式的门式刚架绕屋面椭圆开口旋转而成，图 1-3c 为门式刚架简化模型。

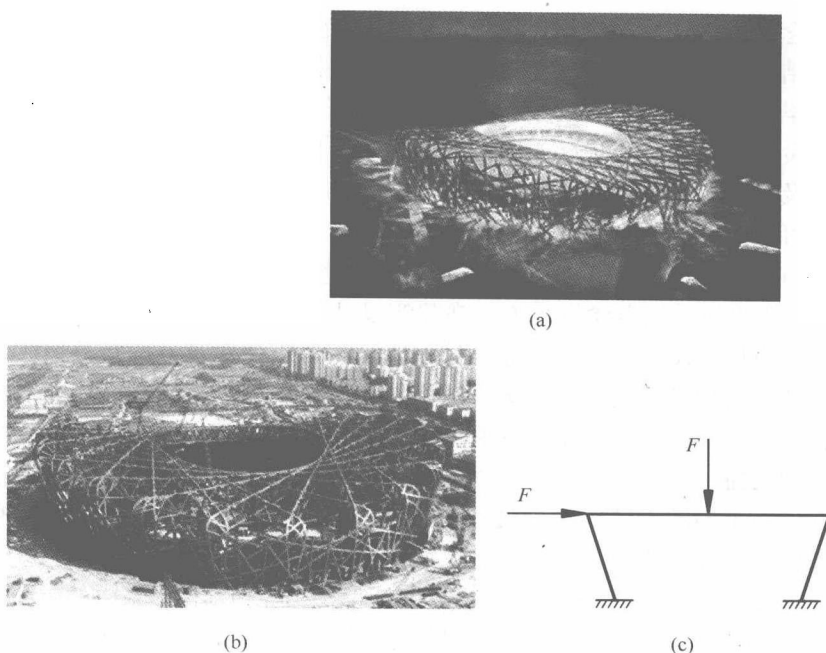


图 1-3 北京“鸟巢”体育馆钢结构和门式刚架简化模型
(a) “鸟巢”体育馆；(b) 钢结构；(c) 简化模型

1.2 结构概念设计的意义

结构工程所使用材料的属性只能估算，无法准确得知；所计算的真实结构只能近似分析，无法准确建模；所承受的外力只能估算，不能准确得知；但是所完成的结构设计必须满足公众对建筑物安全使用的要求^[3]。因此，结构工程是技术（力学）与艺术（美学）的结合。建筑设计需要建筑师和结构工程师通过技术的手段保证设计的可靠，同时通过艺术的手段保证设计的美学创意和使用功能要求，即在技术保证下发挥艺术的创作空间，并考虑可持续发展要求。

由此可见，结构设计没有唯一正确的解决方案，只有相对满意的解决方案。同时也说明了在结构设计过程中需要估算材料特性、近似分析结构模型、估计可能发生的各种外部荷载、保证结构的安全和满足使用功能的要求。这也说明建筑设计从方案设计到初步设计以及最后的详图设计实际上都是一种“概念设计”。概念设计不仅在前期的方案设计中起重要作用，对初步设计和详图设计也有重要的指导作用。因此，对结构工程师和建筑师来说，学习现代结构设计的概念和体系有十分重要的意义。

传统的土木工程专业教育体系过分强调结构的细节设计和精确的力学分析，而忽略结构

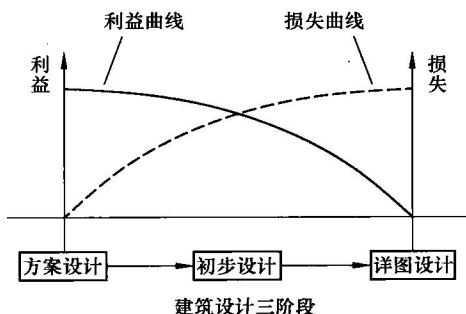


图 1-4 概念设计在建筑设计各阶段的重要性

的整体力学概念和结构体系的应用，使培养出来的工程师在结构设计的早期阶段不能发挥作用，即使在结构后期的设计中也不能抓住问题的关键。在现代结构设计中，要求设计师在结构设计的早期就能够提出好的结构体系和结构概念。好的结构概念和设计方案可以保证结构的整体设计方案可行，使建筑方案更为完美，使建筑造价更为节省，从而达到力学和美学表达以及可持续发展的总体要求。

建筑设计可分为方案设计（Schematic Design）、初步设计（Preliminary Design）和详图设计（Final Detail Design）三阶段。结构的概念设计方法可以贯穿建筑结构设计的全过程。从图 1-4 可以看出概念设计方法在建筑设计各阶段的重要性。如果在早期的方案设计阶段较好地应用了结构的力学概念和体系特点，可以使建筑方案获益最大，得到结构合理、造型美观、造价节省的最优方案，从而使该方案中标。如果在后期的初步设计或详图设计阶段较好地应用结构的力学概念和知识，抓住关键问题对建筑结构进行优化设计，亦可获得一定的利益。但相对早期的方案设计阶段，后期所获得的利益是相对较小的。同样的道理，如果在早期的设计阶段，设计师在结构的力学概念和体系应用方面有一些小小的失误，则在后期设计阶段，这些小小的失误会造成很大的损失，这方面的教训很多。

本书的目的是让读者掌握结构的力学概念和知识及在各种结构体系中的应用，学会从结构整体角度分析结构设计的关键问题，能在早期建筑设计的方案设计及初步设计阶段较好地应用结构概念和结构体系，使建筑设计获得最大的利益，避免后期设计施工中的损失。

1.3 建筑设计的过程

1. 建筑设计的要素

在介绍建筑设计的过程前，首先应明确建筑设计和结构设计有关的名词^{[1],[2]}。

（1）土木工程：人类为改善自身生存条件而建设的一切以固态材料组成的固定式人工构筑物的总和。

（2）结构工程：人类为改善自身生存条件而建造的一切以固态材料组成的、具有各种形态并具有承载力的结构系统的总和。

（3）建筑学：为满足建筑物的功能，完成各种内、外空间布置的一门学科。这些建筑布置不仅要满足空间组合的要求，还要满足人们对美的追求以及与周边环境的协调性。

（4）结构工程师：结构工程师负责工程结构的设计、规划、建造（包括质量、成本、工期的控制）、维护以及结构的改造等。

（5）建筑师：建筑师负责处理建筑规划（包括建筑群天际线）、建筑空间组成、建筑内、外轮廓及装饰的美学设计和处理，建筑物与周边环境的协调性等。

设计一个新建筑或评价一个老建筑，可以从是否满足建筑设计三要素来进行评判，它们是：

其一，满足建筑使用功能，如建筑的空间组合、使用性能等；

其二，满足建筑物理功能，如建筑的结构可靠、施工可行、造价节省等；

其三，满足建筑美学功能，如建筑的形象价值、美学象征、与周边环境协调等。

从上述建筑设计三要素可以看出，建筑师比较关心第一和第三要素，结构工程师比较

关心第二要素。成功的建筑设计必须是建筑师和结构工程师共同创造的完美作品，是建筑与结构的完美结合。

2. 结构和建筑的关系

不像其他工业或农业产品，建筑是一种意在表示空间布局和表达整体环境的独特产品，每一个建筑都是与周围环境结合的单一产品。没有完全相同的两个建筑就像“没有完全相同的两片树叶”。建筑物应当是建筑师和结构工程师合作完成的一项创造性的劳动产品。建筑师的建筑设计能力和结构工程师的结构设计能力应紧密地结合和协调地互补。

图 1-5 所示是 2000 年国际结构工程师协会颁奖的“阿拉伯塔 (Arabian Tower)”项目^[4]，它意图表达一艘行驶在阿拉伯海上的帆船，给人一种直接感官和间接遐想特别自然的感觉。整体建筑物外形尤如一片风帆，同前后侧的巨型曲柱框架连接，互相支撑形成水平刚度很大的整体结构。巨型曲柱框架的延伸形成“风帆”的桅杆，大厦建在海湾的人工填方岛上，其人工填方岛外形犹如“风帆”的船身。整个作品体现了建筑设计和结构设计的完美结合，综合反映了美学、社会、人文、建筑和工程技术各个方面的成就。其中，建筑设计起到了满足美学表达和功能要求的主导作用，而结构设计则起到了建造可行和结构可靠的保证作用。

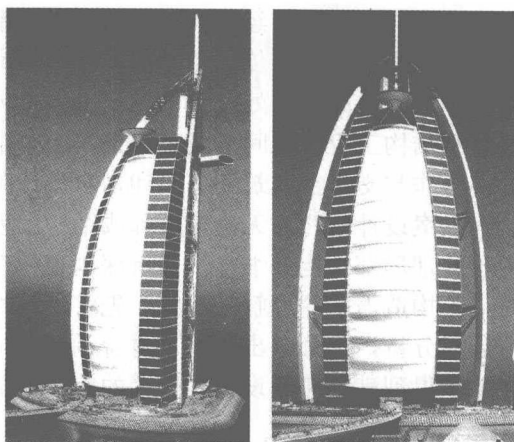


图 1-5 阿拉伯塔 (Arabian Tower)^[4]

然而大多数基础设施工程的设计是以结构工程为主的。如图 1-6 所示上海复兴东路双层过江隧道，它是一条总共包括 8 车道双线双管的隧道。在这类工程项目中，为了满足项目在工程方面的功能要求，建设的重点必然会集中到工程的选线、布局、水下和地下结构设计、开挖工艺、隧道通风、隧道事故等单纯土木工程的事务中去。建筑师的作用在这些

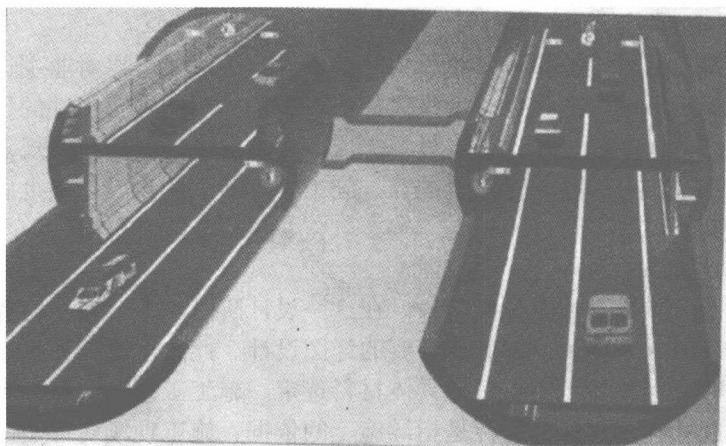


图 1-6 上海复兴东路双层过江隧道