

土木工程研究生系列教材
教育部创新团队资助项目

工程结构可靠性 设计原理

贡金鑫 魏巍巍 编著
赵国藩 主审

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



土木工程研究生系列教材

工程结构可靠性 设计原理

贡金鑫 魏巍巍 编著
赵国藩 主审

机械工业出版社

本书是土木工程研究生系列教材之一。本书共八章及两个附录。主要内容为绪论，结构可靠性的基本概念和原理，结构可靠度的计算方法，结构上的作用和作用效应，结构及结构构件的抗力，结构可靠度校准及极限状态设计，结构的稳健性与抗连续倒塌设计及既有结构可靠性评估。附录 A 给出了有关结构可靠性的一些中英文名词对照，附录 B 简要回顾了概率论与数理统计的基本概念。

本书可作为高等学校土木、水利、交通、海洋等工程专业硕士研究生和博士研究生的教材或教学参考书，也可供从事工程结构可靠性研究、工程结构设计和施工的科技人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构可靠性设计原理/贡金鑫, 魏巍巍编著. —北京: 机械工业出版社, 2007. 7

(土木工程研究生系列教材)

ISBN 978-7-111-21266-9

I. 工... II. ①贡... ②魏... III. 工程结构 - 可靠性设计 - 研究生 - 教材 IV. TU311. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 047580 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 季顺利 责任编辑: 马军平 版式设计: 霍永明
责任校对: 李秋荣 封面设计: 张静 责任印制: 杨曦
北京机工印刷厂印刷

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

170mm × 230mm · 10.5 印张 · 385 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-21266-9

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问：（以姓氏笔画为序）

王正宏	任爱珠	朱博鸿	刘怀恒
刘宝琛	刘祖德	沈世钊	沈祖炎
陈英俊	林 皋	欧进萍	周 氏
周锡元	赵国藩	钟善桐	殷宗泽
顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员：江见鲸

副主任委员：（以姓氏笔画为序）

朱合华	李 奇	李宏男	李爱群
杜修力	陈云敏	张永兴	张素梅
尚守平	姜忻良	夏 禾	徐志胜
廖红建			

委员：（以姓氏笔画为序）

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩
朱召泉	刘晶波	李正良	李英民
李洪泉	李鸿晶	杨果林	吴知丰
陈国兴	张家生	张毅刚	张耀春
郑 刚	单 建	易伟建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清梁
盛宏玉			

秘书长：季顺利

土木工程研究生系列教材序

随着我国高等教育的发展，普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展，对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求日益迫切，这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校硕士研究生的招生规模，近年来正以15%~30%的速度发展。对一些研究型的重点高校，在“十五”期间，本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权，这为研究生的培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大，对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式，主要靠传帮带式的教育模式，而对数量增大的研究生教育，必须建立建制制的培养模式，即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规模化方向发展。因此，硕士研究生的教材，特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状，本着“大土木工程”的教育思想，组织国内部分高校土木工程专业的教授，对土木工程研究生用教材建设进行了研讨，并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量，组织成立了教材编审委员会，聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是：先基础课、平台课教材，后专业课教材。教材由长期给研究生授课的老师合作编写，达到“学校优势互补，质量上乘”的目标。教材体系设计，本着“重基本理论、重学科发展，结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量，本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则，符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材已于2005年陆续出版。我们相信，本套系列教材的出版，将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养产生积极作用，为我国经济建设和社会发展做出贡献。

王见第

前 言

不确定性是自然界存在的一种客观现象，人类在认识自然、改造自然以及日常生活和工作当中，也无时无刻不与这种现象打交道，掌握其内在规律，并自觉或不自觉地将应用其规律而行其事。例如，公司规定早上8点钟上班，员工一般都会在8点之前的几分钟内到达。这是因为每个员工都清楚，为了不迟到，就要使自己到公司的时间与公司规定的时间有一段富裕的时间。每个员工都会根据自己住所与公司的距离、所乘的车辆来确定这段时间的长短。此外，还要考虑可能会出现种种不确定性因素，如等车时间、路上交通堵塞等。同样，与人的生命财产和社会稳定密切相关的工程结构的安全性，存在着更为明显的不确定性。为保证结构的安全，就要对影响结构安全的不确定性进行分析和研究。

工程设计中的不确定性有多种形式，其中人们认识最早、目前得到广泛应用的是随机性。随机性用概率方法描述。实际上，在概率方法形成科学理论之前，我们的祖先在建造结构物时就定性地应用着其规律。在概率理论形成之后，则将其用于确定材料强度和荷载的取值，如将材料强度取一定概率分布的分位值，用重现期定义荷载的取值等。用概率方法确定材料强度和荷载的取值是工程结构设计的一大进步，但设计中仍不能将材料强度和荷载的概率与结构失效的概率联系起来，因为使用的安全系数仍然是根据经验确定的，这样概率意义下的材料强度和荷载并没有使工程结构的安全性具有同等的概率意义，工程结构的安全性仍然是不明确的。

20世纪40年代发展起来的结构可靠性方法是结构可靠性设计方法的一个里程碑，可靠性方法用可靠度或可靠指标描述工程结构的安全性，今天已形成一套完整的理论并在设计规范中得到应用。从概念上讲，可靠性设计方法是传统设计方法的延伸。可靠性设计方法的目标是将工程结构的可靠性用设计变量的概率特征来反映，这样设计中得到的是一个具有明确概率值的结果。尽管由于问题的复杂性，目前这一概率值仍不能与结构或结构构件的真实失效概率等同起来，但在描述工程结构可靠性方面毕竟有了一个可定量和对比的尺度。所以

说，用可靠性理论进行工程结构设计是结构设计理论的又一个新的大进步。但同时应该认识到，结构可靠性理论是人们对事物客观规律认识上的一个新的层次，除理论上需要继续完善外，实际应用中比较大的困难是缺乏设计变量的统计数据。所以，完全按照可靠性方法进行结构设计是不现实的，完全沿用传统设计方法则不能反映科学技术的进步，而将可靠性方法与传统的方法结合起来，随着统计数据的不断积累，更多地反映设计中的客观成分，才是人类主动认识自然和改造自然的明智之举。

本书作者自 20 世纪 80 年代末开始从事工程结构可靠性理论和应用的研究，先后参加和主持了多项国家、省、部级结构可靠性方面的研究项目，并一直承担研究生和高年级本科生“工程结构可靠度”课程的教学工作，近年又参加了国家标准《工程结构设计可靠度统一标准》(GB 50153—1992)和《港口工程结构设计可靠度统一标准》(GB 50158—1992)的修订工作，以及建筑、港口工程和水利水电工程等多本规范的编制和修订。在参与标准、规范编制和修订的过程中，认真学习和研究了国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394: 1998)、欧洲规范《结构设计基础》(EN 1990: 2002)及其他多本相关国内外标准。本书在写作过程中，得到了中国工程建设标准化协会邵卓民副理事长，中国建筑科学研究院李明顺总工及胡德忻、陈基发、史志华、李云贵研究员，中交水运规划设计院杜廷瑞、杨松泉教授级高工，铁道部铁道科学研究院姚明初研究员，铁道部第三设计研究院李铁夫教授级高工，中国水电工程顾问集团公司沈义生教授级高工，中交公路规划设计院赵君黎高工，上海交通大学刘西拉教授，西安建筑科技大学姚继涛教授等的鼓励和支持。他们当中有的是我国各本可靠度设计统一标准及相关设计规范的主编或主要编写人，在结构可靠性理论与应用研究方面有很深的造诣，同时还又有丰富的工程管理经验或设计经验；有的是可靠性研究方面的知名学者和专家，多年来一直坚持不懈地从事结构可靠性方面的研究。同时，本书得到了教育部创新团队(NO IR70518)项目的资助。本书写作过程中一直得到赵国藩院士的指导，并最终由赵院士审定。在此一并向他们表示感谢。

作者

目 录

土木工程研究生系列教材序

前言

第1章 绪论	1
1.1 土木工程是人类文明的起源	1
1.2 土木工程与力学的发展	3
1.3 土木工程设计方法的发展	6
1.4 标准与规范	15
1.5 国外主要标准机构及标准、规范介绍	18
1.6 本书主要内容	29
第2章 结构可靠性的基本概念和原理	31
2.1 结构分析中的不确定性	31
2.2 结构设计中的变量	34
2.3 结构的功能要求	36
2.4 结构极限状态	39
2.5 极限状态方程	53
2.6 设计状况	59
2.7 结构可靠性和可靠度	60
2.8 结构安全等级	70
2.9 结构可靠性设计方法的分类	71
第3章 结构可靠度的计算	76
3.1 中心点法	76
3.2 验算点法	81
3.3 相关随机变量可靠指标的计算	99

3.4	蒙特卡洛方法	103
第4章	结构上的作用和作用效应	112
4.1	作用的概念和分类	112
4.2	作用的概率模型及统计分析	118
4.3	作用效应	139
4.4	作用组合	140
4.5	作用代表值	145
第5章	结构及结构构件的抗力	153
5.1	抗力的概念	153
5.2	结构构件抗力的统计分析	156
5.3	影响结构构件抗力不确定性的因素	158
5.4	结构构件抗力的统计参数和概率分布类型	168
5.5	结构构件抗力的概率分布类型	172
5.6	岩土性能的不确定性	173
第6章	结构可靠度校准及极限状态设计	178
6.1	结构可靠度校准	178
6.2	目标可靠指标	185
6.3	结构可靠度设计方法	194
6.4	实用设计表达式	198
6.5	标准和规范中的设计表达式	209
6.6	基于试验的设计	224
第7章	结构的稳健性与抗连续倒塌设计	227
7.1	建筑物连续倒塌事件的概率分析	228
7.2	规范对结构抗连续倒塌的规定	231
7.3	钢筋混凝土框架抗连续倒塌设计实例	245
第8章	既有结构可靠性评估	254

8.1	既有结构可靠性评估的原因	254
8.2	既有结构的抗力	257
8.3	既有结构的作用	259
8.4	既有结构的可靠性分析	260
8.5	规范中的实用评估方法	264
附录 A	中英文名词对照	274
A.1	一般名词	274
A.2	设计方面的名词	275
A.3	概率统计方面的名词	275
A.4	作用方面的名词	276
A.5	材料及材料性能方面的名词	277
A.6	几何参数方面的名词	277
A.7	结构分析方面的名词	278
A.8	关于时间方面的名词	278
A.9	可靠度计算方面的名词	278
A.10	标准、规范与设计方法方面的名词	279
A.11	试验方面的名词	279
附录 B	概率论与数理统计概要	280
B.1	概率论	280
B.2	数理统计	306
B.3	随机过程	315
参考文献	321

第 1 章 绪 论

土木工程是建造各类工程设施的统称。在卫星上天、信息网络技术覆盖地球各角落、生物研究已进入基因阶段的今天，土木工程似乎与高科技相差较远。的确，从建筑材料、建造手段来讲，土木与当今高科技产品都是不能同日而语的。然而，谁又能否认我们今天生活的方方面面和高科技的发展离不开土木工程呢？人们居住、生活、工作离不开房屋，运送货物、跨江过水离不开桥梁，拦水、灌溉、发电离不开水坝，海上运输装卸离不开码头。总而言之，土木建筑与我们的生活息息相关。特别是，今天许多工程试验和力学的进步，得益于历史上土木工程的不断发展。而无论是力学对土木工程的推动，还是土木工程本身的发展，安全贯穿于其始终。

1.1 土木工程是人类文明的起源

人类生存的第一需要是吃饭和居住，所以，自从地球上有了人，也就有了建筑物。这种建筑物可能是原始人居住的极其简陋的天然建筑物，如可挡风遮雨的原始森林、洞穴等（姑且称为建筑物），也可能是当今现代化的高楼大厦等。

我国是世界上最优秀的民族之一，历史悠久，文化源远流长，对人类文化和科技的发展作出了重要贡献，留下了许多代表人类文明的建筑遗产。

我们的祖先很早就掌握了土木建造技术。在新石器时代后期仰韶文化的重要遗址中已发现用木骨泥墙构成的居室。如在 1954 年开始发掘的仰韶文化（约为公元前 5000—公元前 3000 年）重要遗址——西安东郊半坡遗址中已有居住区，并且有制造陶器的窑场。到公元前 20 世纪（约相当于夏代），已发现有夯土的城墙。商代时已逐渐采用粘土做成的板筑墙（约为公元前 1324—公元前 1265 年）。西周时期已有烧制的瓦。战国（约为公元前 475—公元前 221 年）墓葬中发现有烧制的大尺寸空心砖。

我国大规模兴修水利工程是传说中的夏禹，在治水的 13 年中，三过家门而

不入。春秋时期（公元前 600 年）修建了安徽丰塘灌溉水库。战国魏文侯（约为公元前 445—公元前 396 年）时西门豹开凿水渠 12 条，引漳水灌溉。秦昭王（约为公元前 306—公元前 251 年）时，李冰在岷山流域兴建了许多水利工程，其中以灌县都江堰最为有名。

长城原是春秋、战国时各国为了相互防御各在形势险要处修筑的城墙。秦始皇（公元前 246—公元前 210 年）于公元前 221 年统一中国后，为了防御北方匈奴贵族的南侵，于公元前 214 年将秦、赵、燕三国的北边长城，予以修缮，连贯为一体。蜿蜒万山之中的长城，气势磅礴，是世界上最伟大的工程之一。

桥梁结构最早是为行人建造的石板桥和木梁桥，这可能是最简单和最古老的桥梁形式。后来逐步发展成为石拱桥。拱桥最早见于记载的是晋太康 3 年（282 年）建造的洛阳七里涧旅人桥（石拱桥）。现保存完好的我国最早石器拱桥为河北赵县安济桥，又名赵州桥，该桥大约在隋开皇 11 年—开皇 19 年（591—599 年）由李春建造，净跨 37.02m，矢高 7.23m，宽约 10m。该桥无论在材料使用、结构受力、艺术造型和经济上都达到极高的成就，是世界上最早的敞肩式拱桥，它比欧洲同类桥约早 1000 年。1991 年该桥被美国土木工程学会（ASCE）选为世界第 12 个土木工程里程碑，这对弘扬我国民族文化有深远意义。

到了宋辽金元时期，我国建筑技术已经达到了成熟和高度发展的阶段，这一阶段主要是以木结构为主体的结构形式。著名的山西应县佛宫寺释迦塔就是一个典型的例子。该木质佛塔高达 65.86m，距今已有近千年的历史，虽然历经千年的风雨侵蚀和多次地震、炮击的重创，至今仍巍然耸立。据分析，为了保持塔身的稳定，应县塔采用双层环形空间、明暗层的结构形式，所用木料超过 5000m³，所用构件的尺寸只有 6 种规格。用现代力学的观点看，每种规格的构件的受力特性都较好，是近乎优化选择的尺寸。正是在这些技术成就所提供的经验知识的基础上，北宋出现了总结性的著作《营造法式》。

在国外，古埃及人于公元前 27—公元前 26 世纪创建了世界上最大的帝王陵墓建筑群——吉萨金字塔，其计算准确、施工精细、规模宏大。古罗马人在公元前 4 世纪用拱圈技术砌筑下水道、隧道、渡槽。公元前 2 世纪，用火山灰和石灰的混合物制成的天然混凝土得到广泛应用，有力地推动了古罗马的拱圈结构的大发展。如万神庙的圆形正殿屋顶，直径为 43.43m，是古代最大的圆顶庙。古罗马的公共建筑类型多，结构设计、施工水平高，已初步建立了土木建筑科

学理论，如维特鲁威著《建筑十书》奠定了欧洲土木建筑科学的体系，并对欧洲土木建筑的发展有深远影响。

“土木”在中国是一个古老的名词，意指建筑房屋等的工事，如把大量建造房屋称作大兴土木。古代建房主要依靠泥土和木料，所以称土木工程。在国外，土木工程一词是1750年由设计建造艾德斯通灯塔的英国人J. 斯米顿首先引用的，意即民用工程，以区别于当时的军事工程。至1828年，伦敦土木工程师学会的皇家特许状为土木工程下的定义为：“Civil Engineering 是利用伟大的自然资源为人类造福的艺术”，与中国土木工程的含义相近，故译作土木工程。事实上，土木工程是所有工程中发展最早、内容最广的工程学科，是人类改造和建设生活、生产环境的先行基本手段。它所建造的各种工程设施，满足了当时的生活和生产的需求，也反映了各个历史时期的社会、经济、文化和科学技术的面貌。

1.2 土木工程与力学的发展

建筑物建造及使用过程中安全与否，决定于它是否符合力学原理。所以，土木工程离不开力学。但如前所述，在有现代力学知识以前，人们就已经会建造房子了。可以想象，那时的建筑师已经有了关于建筑结构及材料强度的感性认识，并由此有了决定构件安全尺寸的经验法则。即便是今天，经验在土木工程中也是不可缺少的。本节内容主要取自于文献[7]的论述。

古希腊人在把建筑技术推向前进的过程中，发展了静力学。阿基米德是静力学的创始人，是将力学与数学结合的典范。他对杠杆平衡条件作了严格的证明，并且概述了物体重心的求法。古罗马时期的建筑经常采用拱形，但因为当时还没有对拱这种结构的力学分析，所以他们并不知道怎样合理选择尺寸，古代建筑中的拱都是跨度较小的半圆拱，而各部分的尺寸都比现代的拱笨重。

在欧洲文艺复兴时期，出现了一些杰出的建筑师和工程师，其中出生于意大利佛罗伦萨的画家、自然科学家、工程师达·芬奇可能是最突出的一个。达·芬奇强调数学和力学是科学的基础。他研究过落体运动，研究过梁的强度；他也做过一项关于柱（压杆）的强度的研究；他是最早试图用实验来确定结构材料强度的人。然而，可惜的是，达·芬奇的这些杰出的力学研究成果一直埋没在他的笔记里，没有写成书，也没有发表，只留下了大量的手稿。同时，这

个时期（15世纪和16世纪）的工程师却和古罗马时代人一样，继续仅凭经验和臆断来决定构件的尺寸。

最早尝试用力学分析的方法来求构件的经济安全尺寸是从17世纪开始的。著名力学家伽利略（Galileo）、胡克（Hooke R.）以及提出理想气体公式的物理学家马略特（Mariotte）都对梁的变形和抗弯强度做过研究。

1729年，法国人贝利多（Belidor）出版了《工程师的科学》一书。此书在当时的建筑工程师中流传极广而且多次再版。在该书中，贝利多将伽利略和马略特的成果应用到木梁的试验中，得出了决定梁的经济安全尺寸的法则。1798年，法国人吉拉尔（Girard）出版了另一本书，名为《固体的抗力分析》。在该书中，作者介绍说，关于梁的弯曲，伽利略和马略特的两种理论都被土木工程师采用了。对于脆性材料，例如石料，工程师们采用了伽利略的假说，即假定在断裂时，内力是均匀分布在整个截面上的；对于木梁，工程师们采用了马略特的假说，即假定内力集度在凹面上为零，而在凸面上的最外层纤维中达到最大。有趣的是，这个时期的许多力学家都在土木工程这个领域中作出了卓越贡献，有的甚至本人就是土木工程师。例如，上面提到的胡克，他是一位卓有建树的力学家，线弹性材料的本构关系（描述材料受力与变形之间的关系）就是他于1678年提出的，现在称为胡克定理——他本人还是一位土木工程师。胡克在1666年9月的伦敦大火后，曾做过一个重建城市的模型，并写了建议书，后受聘担任测量师，亲自设计过几栋房屋。

梁是现代工程结构的主要构件之一。历史上最早提出梁弯曲问题的是伽利略。贝努利（Bernoulli）对纯弯梁进行了研究，为纪念他及其家族所做出的贡献，也把梁称为“贝努利梁”。铁木辛柯（Timoshenko）考虑两剪切变形的影响，进一步完善了梁的计算理论。对梁弯曲理论有重大贡献的还有库仑（Coulomb）、纳维（Navier）和圣维南（Saint-Venant）等。根据对梁弯曲理论的研究，他们已经知道梁的中间部分起的作用不大，如果挖掉这一部分，对梁的承载力影响很小，从而减轻梁的自重。这就是今天工字型梁、T型梁及箱型梁的由来。

柱是承受压力的基本构件。第一次柱的压屈试验是由包辛格（Bauschinger J.）作出的。与此同时，力学家们却在注意一个根本性的问题，即结构压屈失稳前后，虽然结构的形状发生了变化，但它们都满足弹性理论方程。1888年，布赖恩（Bryan G. H.）发表了一篇关于弹性稳定的一般理论的论文，大大提高

了人们对于稳定性的认识。

事实上,稳定性理论有三个研究方向。除了欧拉和拉格朗日的两个方向以外,另一个方向则是法国数学力学家庞伽莱(Poincaré H.)于1881年在研究周期运动轨道稳定性问题时所开创的。目前,一些力学家致力于将上述三个方向统一起来的稳定性理论研究。

拱是主要承受压力的构件。古时采用的石拱是用楔形石块拼接而成的。各个楔块之间传递推力使其保持稳定。一直到18世纪30年代,拱的设计者都依从库仑的理论。后来,著名力学家拉梅(Lamé M. G.)对库仑理论作了补充。纳维于1826年讨论了拱内的应力。1830年,匈牙利人格斯特纳(Gerstner F. J. von)主编了《力学手册》一书,首先在拱的分析中引入了压力线和抗力线的概念。此后的力学工作者们大多致力于寻找解压力线的简便方法,以及据此选定拱中心线的最佳形状。采用钢筋混凝土建造拱以后,应力分析成为工程师们主要关心的问题,拱的理论又有了新的发展。

板的弯曲问题一直以来是许多力学工作者研究的问题。1829年泊松(Poisson S. D.)给出了板抗弯刚度的正确表述。1850年,基尔霍夫给出了板的边界条件的正确表述。现在的薄板理论,包括薄板的基本假设都认为是基尔霍夫建立的。工程上广泛采用薄板理论是从20世纪才开始的,那时在薄板问题的数值解中已广泛采用里兹法和有限差分法,工程中有用的数据都可以通过数值计算求得。薄板理论有小挠度理论和大挠度理论。最早的薄板大挠度方程是基尔霍夫在1877年给出的,最著名的则是德国力学家冯·卡门(T. von Kármán)于1910年给出的。我国著名力学家钱伟长也作出了卓越的贡献。直到现在,还有力学工作者在为完善各种厚度的板理论而努力。

壳这种构件是指具有一定厚度的曲面。壳体结构具有强度和刚度高而用料省的优点,所以在自然界,像蛋壳、贝壳、果核等都自然选择了壳体结构。薄壳理论最早是由德国力学家阿伦(Aron H.)于1874年,英国力学家乐夫(Love A. E. H.)于1888年分别提出的。第一次将壳体方程用于土木工程的是斯托多拉(Stodola A.)。在土木建筑中用处很广的是唐奈(Donnell L. H.)的扁壳方程,它指出双曲屋盖和拱形板等都可以看作是扁壳。20世纪以来,各类工程中开始应用壳体结构。例如,1959年建造的北京天文馆就是一个直径25m的半球形球壳;1978年建造的天津市新体育馆,采用了直径108m的双层球壳。

桁架最早出现在木桥和屋架上。古罗马人在建造木桥时就用过桁架;文艺

复兴时期，意大利建筑师也采用木桁架建造桥梁；18世纪出现铁路以后，美国和俄国更是大量使用木桁架建造桥梁。

美国桥梁工程师惠普尔（Whipple S.）和俄国工程师儒拉夫斯基（Zhulavski）最先提出了求静定桁架各杆内力的节点平衡法。随后，德国工程师里特（Ritter A.）和施维德勒（Schwedler J. W.）提出了截面法。英国剑桥大学教授麦克斯维（Maxwell J. C.）把图解法引入到桁架分析中，1864年在分析桁架节点位移时，他提出了位移互等定理，直至今日，这个定理还是分析超静定结构的重要工具，称为麦克斯维互等定理。在桁架分析中作出很多贡献的还有莫尔，他独立导出勒麦克斯维的公式，讨论了桁架的一般理论。从他开始，在桁架分析中使用了虚位移原理。德国慕尼黑工程学院的弗普尔（Föppl A.）发展了空间桁架理论，并讨论了把空间桁架作为屋盖的可能性。

1.3 土木工程设计方法的发展

科学试验和力学的发展使土木工程由完全凭直觉和经验走向了科学与经验相结合的道路。土木工程设计理论和方法的发展经历了几个阶段，包括几何学设计法、荷载系数设计法、容许应力设计法、破损阶段设计法和极限状态设计法。

1.3.1 几何学设计法

将数学和科学应用于建筑以前，设计准则主要依据传统经验。许多准则通常根据几何原理给出使建筑安全的限制。西方的古代建筑物主要是采用笨重的承重墙和拱式体系，这种结构体系自重甚大，只要拆除了施工中所搭建的脚手架而结构不倒塌，就认为是安全的。这些准则通常建立于不断的尝试与失败的基础上，曾发生过多次结构倒塌事故。然而，从古代一直到文艺复兴时期的哥特式教堂及其他结构，应用这种方法却产生了一些伟大的建筑，而且许多建筑至今还存在。这些设计准则与砌体结构符合得很好，砌体结构一般应力较低，破坏不是由刚体运动导致的，即结构强度取决于几何形状而不是材料性能。通常，如果此类结构满足要求，预计规模扩大一倍后也会满足要求。我国的古代房屋建筑结构多采用构架体系，即梁柱体系。这种体系开门窗方便，使用的灵活性大，梁柱尺寸也是根据经验按建筑物的比例而定，而其中斗拱为各部分比