



“十三五”普通高等教育本科规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材

(第四版)

钢结构

曹平周 朱召泉 编 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材

(第四版)

钢结构

编 著 曹平周 朱召泉
主 审 石永久 童根树



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材，也是“十二五”江苏省高等学校重点教材。全书共分十章，主要内容为概论，钢结构的材料，钢结构的连接，轴心受力构件，梁，拉弯和压弯构件，单层房屋钢结构，平面钢闸门，多层钢结构，钢结构的制作、防护与安装等。书中包括土木工程中的钢结构与水利水电工程中的水工钢结构方面的内容，列举了较多的计算例题、思考题和习题，可供读者学习和参考。

本书可作为高等院校土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程等专业的本科教材，还可作为有关设计和施工技术人员的技术参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构/曹平周，朱召泉编著. —4 版. —北京：中国电力出版社，2015.6

“十三五”普通高等教育本科规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-8457-6

I. ①钢… II. ①曹…②朱… III. ①钢结构-高等学校-教材 IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 238969 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 10 月第一版

2015 年 6 月第四版 2015 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28.5 印张 695 千字 1 插页

定价 56.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

为充分发挥优质教材的示范辐射作用，加强高等教育教材建设工作，推进江苏省高等学校优质教育教学资源共享，根据《江苏省教育厅关于全面提高高等学校人才培养质量的意见》启动高等学校重点教材立项建设工作。《钢结构》（第四版）入选“十二五”江苏省高等学校重点教材，同时列为中国电力教育协会“十三五”普通高等教育本科规划教材。本教材纳入“江苏高校品牌专业建设工程一期项目（PPZY2015B142）”。

为适应钢结构领域的新发展和社会发展对钢结构教学的新要求，编写了《钢结构》（第四版）。本次编写吸取了读者对《钢结构》（第三版）的珍贵意见，并聆取了一些专家教授的中肯建议。该书第三版2008年2月出版以来已过去7年有余，钢结构又有了不少新进展。第四版融入了近年来钢结构的新进展。修订的重点放在内容的更新和充实上。强化基本理论、设计概念、设计原理与最新的科研成果和新颁发及即将要颁发的规范相结合。拓展知识面，使其能适应土木建筑类和水利类相关专业对钢结构的要求。

本次修订，第一章内容作了较大充实，鉴于近年来一些没有适当分析模型的工程结构和新型结构不断涌现，既有设计理论有时难以满足工程需要，增加了试验辅助设计法。为使设计者对工程设计任务有明确认识，增加了设计与基本要求，补充了钢结构的新进展。第二章增加了钢材可焊性方面的量化要求，更新了钢材的疲劳设计方法，增加了防脆断设计，补充了新材料和设计要求。第三章和第四章主要结合新规范中新的设计方法作了修订。第五章增加了新的钢梁类型、钢梁腹板开孔设计，并结合新规范中新的设计方法对相关内容作了修订。第六章增加了梁与柱连接节点在柱的腹板不设置水平加劲肋设计方法、充实了新型柱脚的设计方法，并结合新规范中新的设计方法对相关内容作了修订。第七章增加了钢管桁架节点设计，并结合新规范中新的设计方法对相关内容作了修订。第八章主要结合新规范中新的设计方法对相关内容作了修订。近年来钢结构多高层建筑应用日益增多，教材增加了“多层钢结构”作为第九章。第十章增加了钢结构的施工步骤、介绍了施工新技术、增加了钢结构防护设计等。对全书例题和思考题及习题进行了充实。

本书的设计公式主要是结合《钢结构设计规范》（GB 50017—2013）的修订报批稿和《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL 74—2013）编写的。本书成稿时《钢结构设计规范》（GB 50017—2013）的修订报批稿尚未正式颁布，书中内容若有不妥之处，以正式颁布的《钢结构设计规范》（GB 50017）为准。

本书十余年来用作土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程等本科专业的钢结构教材，并有幸作为我国注册工程师（港口与航道工程）考试大纲中钢结构方面的考试参考书。编者希望经过这次修订后，本书能更好地满足钢结构教学的要求，并为从事钢结构工作的广大工程技术人员提供有益的参考。

本书第一、二、四、五、六、七、九、十章由曹平周教授编写，第三、八章由朱召泉教授编写。在编写过程中，引用了有关单位和作者的资料谨致谢意。

本书的修订难免存在新的不足，敬请读者批评指正。

编 者
2015 年 5 月
于河海大学

第三版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

为了适应钢结构领域的新发展和社会发展对钢结构教学的新要求，吸取读者对原书第二版的珍贵意见，并聆取一些专家教授的中肯建议，编写了《钢结构》（第三版）。本次编写着重论述钢结构的基本性能和设计原理，强化基本理论和设计方法，将设计原理与最新的科研成果和新颁发的规范相结合，也介绍了有关钢结构工程设计的基本知识和方法。考虑钢结构企业正朝着集设计、制作与安装一体化的方向发展，对钢结构的制作、防护与安装作了介绍。本书以现行《工程结构可靠度设计统一标准》（GB 50153—1992）、《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GB 50018—2002）、《高层民用建筑钢结构技术规程》（JGJ 99—1998）、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》（CECS 102：2002）、《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL 74—1995）、《碳素结构钢》（GB/T 700—2006）、《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205—2001）等为依据编写。

全书共分九章，主要内容为概论，钢结构的材料，钢结构的连接，轴心受力构件，梁，拉弯和压弯构件，单层房屋钢结构，平面钢闸门，钢结构的制作、防护与安装等。书中包括了土木工程中的钢结构与水利水电工程中的水工钢结构方面的内容，列举了较多的计算例题、思考题和习题，可供读者学习和参考。鉴于目前各高等学校及不同专业的教学时数不统一，教学时可根据具体情况来选择教材内容。

本书第一、二、四、五、六、七、九章及附录由曹平周教授编写，第三、八章由朱召泉教授编写。全书由清华大学石永久教授、浙江大学童根树教授主审。

本书可作为土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程、工程力学等专业的本科教材，并作为我国“注册土木工程师（港口与航道工程）专业考试大纲”中钢结构方面的参考书，还可作为有关设计和施工技术人员的技术参考书。编者希望经过这次修订后，本书能更好地满足钢结构教学的要求，并为从事钢结构工作的广大工程技术人员提供有益的参考。

本书已列入江苏省高等学校精品教材建设项目，在编写过程中得到了江苏省教育厅和河海大学的大力支持，在书中引用了有关单位的资料，在此深表感谢。

本书难免存在不妥之处，敬请读者和专家不吝指正。

曹平周 朱召泉

2007年12月于河海大学

目 录

前言

第三版前言

第一章 概论	1
第一节 钢结构的特点和应用	1
第二节 钢结构的设计方法	3
第三节 钢结构的发展概况	16
思考题	18
第二章 钢结构的材料	19
第一节 钢结构对所用材料的要求	19
第二节 钢材的主要机械性能和工艺性能	19
第三节 影响钢材性能的主要因素	23
第四节 钢材的疲劳和防脆断设计	27
第五节 钢材的钢种、钢号及选择	37
第六节 国外钢材品种和钢号	42
思考题	44
习题	45
第三章 钢结构的连接	47
第一节 钢结构的连接方法	47
第二节 焊接方法、焊接类型和质量级别	48
第三节 对接焊缝连接的构造和计算	52
第四节 角焊缝连接的构造和计算	56
第五节 焊接残余应力和焊缝残余变形	68
第六节 普通螺栓连接的构造和计算	72
第七节 高强度螺栓连接的性能和计算	83
思考题	89
习题	90
第四章 轴心受力构件	94
第一节 概述	94
第二节 轴心受力构件的强度和刚度计算	95
第三节 轴心受压构件的整体稳定	98
第四节 轴心受压构件的局部稳定	113
第五节 轴心受压构件设计	120

思考题.....	134
习题.....	134
第五章 梁.....	136
第一节 概述.....	136
第二节 梁的强度和刚度计算.....	138
第三节 梁的整体稳定.....	144
第四节 梁的局部稳定.....	148
第五节 组合梁考虑腹板屈曲后强度的计算.....	158
第六节 钢梁的设计.....	161
第七节 梁的拼接、连接和支座设计.....	178
思考题.....	184
习题.....	184
第六章 拉弯和压弯构件.....	187
第一节 概述.....	187
第二节 拉弯、压弯构件的强度和刚度计算.....	189
第三节 压弯构件的整体稳定.....	191
第四节 实腹式压弯构件的局部稳定.....	203
第五节 压弯构件的截面设计和构造要求.....	206
第六节 梁与柱的连接和构件的拼接.....	212
第七节 柱脚设计.....	218
思考题.....	232
习题.....	232
第七章 单层房屋钢结构.....	235
第一节 概述.....	235
第二节 重钢结构厂房结构设计.....	238
第三节 门式刚架轻型房屋钢结构设计.....	270
思考题.....	289
习题.....	290
第八章 平面钢闸门.....	292
第一节 概述.....	292
第二节 平面钢闸门的组成和结构布置.....	293
第三节 平面钢闸门的结构设计.....	299
第四节 平面钢闸门的零部件设计.....	310
第五节 平面钢闸门的埋件.....	320
第六节 设计例题——露顶式平面钢闸门设计.....	323
思考题.....	338
第九章 多层钢结构.....	340
第一节 多层建筑钢结构的组成与结构体系.....	340

第二节 多层钢结构的结构分析..... 343

第三节 多层钢结构的结构设计..... 351

思考题..... 367

第十章 钢结构的制作、防护与安装..... 368

第一节 钢结构的制作..... 368

第二节 钢结构的防护..... 375

第三节 钢结构的安装..... 385

思考题..... 388

附录一 钢材的化学和机械性能..... 389

附录二 构件的稳定..... 393

附录三 型钢和螺栓规格及截面特性..... 398

附录四 矩形弹性薄板承受均载的弯应力系数 k 438

附录五 钢闸门自重估算公式..... 440

附录六 材料的摩擦系数..... 441

附录七 轴套的容许应力及混凝土的容许应力..... 442

附录八 钢桁架施工图（见文后插页）

参考文献..... 443

第一章 概 论

第一节 钢结构的特点和应用

一、钢结构的特点

钢结构是用钢材制造而成的工程结构。通常由型钢、钢板、钢索等材料加工,采用焊接、螺栓等连接方式而形成不同的结构形式。钢结构与钢筋混凝土结构、砌体结构等都属于按材料划分的工程结构的不同分支。钢结构与其他结构相比,具有下列特点:

(1) 可靠性高。钢结构的材料性能可靠性高,钢材在钢厂生产时,整个过程可严格控制,质量比较稳定,性能可靠;钢结构的设计计算结果可靠性高,钢材组织均匀,接近于各向同性匀质体,钢材的物理力学特性与工程力学对材料性能所作的基本假定符合较好,钢结构的实际工作性能比较符合目前采用的理论计算结果,计算结果可靠;钢结构制作与安装质量可靠,钢构件一般在专业工厂制作,成品精度高,采用现场安装,施工质量易于保证。

(2) 材料的强度高,钢结构自重轻。钢材与混凝土、砖石材料相比,虽然钢材的重力密度大,但它的强度和弹性模量及强度与重力密度之比要高得多。在同样的受力条件下,钢结构构件的截面积要小得多,材料用量少。结构的自重轻,便于运输和安装;基础的负荷减小,可降低地基与基础部分的造价。上部结构质量轻,地震作用就小,有利于抗震,且基础的负荷减小,可降低地基与基础部分的造价。

(3) 钢材的塑性和韧性好。钢材的塑性好,钢结构在一般情况下不会因超载等而突然断裂。破坏前一般都会产生显著的变形,易于被发现,可及时采取补救措施,避免重大事故发生。钢材的韧性好,钢结构对动力荷载的适应性强,具有良好的吸能能力,抗震性能优越。

(4) 钢结构制作与安装工业化程度高,施工周期短。钢结构一般在专业工厂制作,易实现机械化和自动化,生产效率和产品精度高,是工程结构中工业化程度最高的结构。构件制造完成后,运至施工现场拼装成结构。拼装可采用安装方便的螺栓连接,有时还可在地面拼装成较大的单元,再行吊装。施工周期短,可尽快发挥投资的经济效益。钢结构由于连接的特性,使其易于加固、改建和拆迁。

(5) 钢结构密闭性好。钢结构采用焊接连接时可制成水密性和气密性较好的常压和高压容器结构和管道。

(6) 普通钢材的耐锈蚀性差。在没有腐蚀性介质的一般环境中,钢结构经除锈后再涂上合格的防锈涂料后,锈蚀问题并不严重。但在潮湿和有腐蚀性介质的环境中,钢结构容易锈蚀,需定期维护。目前国内外正在开发各种高性能防腐涂料和抗锈蚀性能良好的耐大气腐蚀钢,并用于工程结构,较好地解决了钢结构耐锈蚀性差的问题。我国近期建设的一些大桥如南京长江三桥采用的防腐涂料具有 50 年的抗腐蚀性能。具有较好耐腐蚀性能的耐候钢已在一些工程中得到应用。

(7) 普通钢材耐热但不耐火。普通钢材受热温度在 200°C 以内时,其主要性能变化很小,

具有较好的耐热性能;但是当温度超过 200°C 时,材料性能变化较大,强度随温度升高而下降;当温度达 600°C 时屈服强度不足常温时的 $1/3$;温度继续升高时,钢材的承载力几乎完全丧失,所以钢材不耐火。当温度在 250°C 左右时,钢材的塑性和韧性降低,破坏时常呈脆性断裂。考虑一定的安全储备,当结构表面长期受辐射热温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 时,需采取隔热防护措施。当有防火要求时,要采取防火措施,如在钢结构外面包混凝土或其他防火材料,或在构件表面喷涂防火涂料。我国生产的有机钛耐高温漆,耐高温 $600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 可达 24h。采用耐火钢也是解决钢结构不耐火的一种方法,我国武汉钢铁集团生产出的高性能耐火耐候钢,在 1080°C 高温下 2.5h 仍然保持较高强度。钢结构耐火性能差的问题,正在加速改进中。

(8) 钢材在低温时脆性增大。在严寒地区的钢结构应特别注意钢材的选择。

二、钢结构的应用范围

应根据钢结构的特点,扬长避短,合理使用。在土木工程和水利水电工程及桥梁工程等中,钢结构的主要应用范围如下:

1. 大跨度结构

随着结构跨度增大,结构自重在全荷载中所占比重也就越大,减轻自重可获得明显的经济效益。钢结构自重轻,已成为大跨度结构的主要结构形式。我国近年来建设的大型体育场馆、剧院、飞机场航站楼、火车站站房等大型公共建筑的屋盖几乎全部为钢结构,如国家体育场、国家大剧院、上海浦东机场航站楼、武汉火车站等。水利枢纽工程中的垂直升船机的行车大梁,不仅跨度大,而且承受荷载也大,通常采用钢结构。

越来越多的大跨度桥梁采用钢结构,南京公路长江三桥是目前我国第一座钢塔(高 215m)钢箱梁桥面斜拉桥,主桥跨径 648m,也是世界上第一座弧线形斜拉桥。江苏公路苏通长江大桥为钢箱梁桥面斜拉桥,主跨长 1080m。江苏公路润扬大桥为钢箱梁桥面悬索桥,跨度 1490m。中国西堠门悬索桥,跨度 1650m。日本明石海峡悬索桥跨度 1991m。上海卢浦大桥为钢拱桥,跨度 750m。目前在建的沪通公铁两用长江大桥正桥为两塔五跨斜拉桥,大桥主跨为 1092m,为世界首座跨度超千米的公铁两用桥。

2. 高层建筑

高层建筑已成为现代化城市的一个标志。钢结构重量轻和抗震性能好的特点对高层建筑具有重要意义。钢材强度高则构件截面尺寸小,可提高有效使用面积。重量轻可大大减轻构件、基础和地基所承受的荷载,降低基础工程等的造价,且有利于抗震。美国目前的最高建筑为纽约新世贸 1 号楼,高度为 541m。台北 101 大楼高度为 508m,地上 101 层。我国的上海中心大厦 121 层,高度为 580m。深圳的平安大厦和天津 117 大楼高度均为 597m。

3. 工业建筑

当工业建筑的跨度和柱距较大,或者设有大吨位吊车,结构需承受大的动力荷载时,往往部分或全部采用钢结构。为了尽快发挥投资效益,要求缩短厂房建设周期,近年来我国的普通工业建筑大量采用了钢结构。

4. 轻型结构

当自重是使用荷载较小或跨度不大结构的主要荷载时,常采用冷弯薄壁型钢或轻型钢制成轻型钢结构。主要包括轻型门式刚架房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构、钢管结构和拱形波纹屋盖结构。轻型钢结构已广泛用于仓库、办公楼、工业厂房、住宅、体育馆等公共设施。

5. 高耸结构

高耸结构主要有塔架和桅杆等，它们的高度大，横截面尺寸较小，风荷载和地震作用常常起主要作用，自重对结构的影响较大，常采用钢结构。广州电视塔高 450m，若加上 160m 的天线，总高度达 610m。美国的北达科他 KVLV 电视塔，高 628.8m，属柔性缆索全钢结构。波兰曾建成高 645m 同类型电视塔，1991 年在替换缆索时倒塌。火箭发射架也采用钢结构。

6. 活动式结构

如水利水电工程中的水工钢闸门、升船机等，可充分发挥钢结构重量轻的特点，降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。一些钢闸门为动水启闭，可发挥钢材塑性和韧性好的性能。三峡水利枢纽工程的永久船闸设计采用双线五级连续梯级船闸，闸门孔口净宽 34m，门高近 40m，共采用 24 扇门，每扇门重达 820 多吨。无论是面积还是重量，都堪称“天下第一门”。三峡工程的升船机承船厢设计轮廓尺寸为 132.0m×23.4m×10.0m，一次可通过一条 3000t 级客货轮或一条 1200 马力的 1500t 级驳船，最大提升重量为 11800t，提升高度为 113m。

7. 可拆卸或移动的结构

钢结构可采用便于拆装的螺栓连接，一些临时建筑和钢栈桥、流动式展览馆、移动式平台等采用钢结构，可发挥钢结构重量轻，便于运输和安装与拆卸方便的优点。我国建造的深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”号质量超过 3 万 t，平台高 136m，可在 3000m 深水区作业，钻井深度可达 12000m。

8. 容器和大直径管道

利用钢结构密闭性好的特点，可制成储罐、输油（气、原料）管道、水工压力管道、石油化工塔等。三峡水利枢纽工程中的发电机组采用的压力钢管内径达 12.4m，钢管壁厚达 60mm。

9. 抗震要求高的结构

钢结构自重轻，受到地震作用较小，钢材塑性和韧性好，是国内外历次地震中损坏最轻的结构形式，在抗震设防区特别是强震区宜优先选用钢结构。

10. 急需早日交付使用的工程或运输条件差的工程

可发挥钢结构施工工期短和重量轻便于运输的特点。

11. 特种结构

特种结构主要有纪念性建筑（如北京的世纪坛）、城市大型雕塑、钢水塔、钢烟囱等。

综上所述，钢结构是在各种工程中广泛应用的一种重要的结构形式。终止使用的钢结构可拆除异地重建或用作炼钢材料，钢结构符合可持续发展要求。我国钢材产量已位居世界第一，产能约 10 亿 t。钢结构在工程建设中将会发挥日益重要的作用，具有广阔的应用发展前景。

第二节 钢结构的设计方法

一、结构设计的目的

任何结构都是为了完成所要求的某些功能而设计的。工程结构必须具备下列功能：

1. 安全性

在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用。当发生火灾时,在规定的时间内可保持足够的承载力。当发生爆炸、撞击、人为错误等偶然事件时,结构能保持必需的整体稳固性,不出现与起因不相称的破坏后果。对重要的结构,应采取必要的措施,防止出现结构的连续倒塌;对一般的结构,宜采取适当的措施,防止出现结构的连续倒塌。

2. 适用性

结构在正常使用条件下具有良好的工作性能。

3. 耐久性

结构在正常维护条件下具有足够的耐久性能。

结构的安全性、适用性、耐久性总称为结构的可靠性,反映结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的能力。结构设计的目的是在满足可靠性要求的前提下,保证所设计的结构和结构构件在施工和使用过程中,结构符合可持续发展要求,技术先进、安全适用、经济合理,并确保质量。要实现这一目的,必须借助于合理的设计方法。

二、设计方法

1. 影响结构可靠性的因素与设计方法

对于一般工程结构,影响结构可靠性的因素可以归纳为荷载效应和结构抗力两个基本变量。以 S 表示荷载效应,指荷载、温度变化、基础不均匀沉降、地震等对结构和结构构件作用引起的结构或构件的内力、变形等。以 R 表示结构的抗力,指结构或构件承受荷载效应的能力,如承载力、刚度等。 Z 为表示结构完成预定功能状态的函数,简称功能函数。

$$Z=R-S \quad (1-1)$$

当 $Z>0$ 时,结构能满足预定功能的要求,处于可靠状态;当 $Z<0$ 时,结构不能实现预定功能,处于失效状态;当 $Z=0$ 时,结构处于可靠与失效的临界状态,一旦超过这一状态,结构将不再能满足设计要求,因此它也称为极限状态。

影响 S 的主要因素是各种荷载或作用的取值,而各种作用并非都是确定值,大多是随机变量,有的还是与时间有关的随机过程。同时施加在结构上的各单个作用对结构的共同影响,应通过作用组合(荷载组合)来考虑;对不可能同时出现的各种作用,不应考虑其组合。影响 R 的主要因素有结构材料的力学性能、结构的几何参数和抗力的计算模式等,它们也都是随机变量。例如,钢厂提供的材料,其性能不可能没有差异;在制作和安装中,结构的尺寸也存在误差;计算抗力所采用的基本假设和方法也不可能完全精确。随机性因素的量值是不确定的,但却服从概率和统计规律,采用概率理论来处理随机变量是最适宜的方法。在我国的国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)中,明确指出工程结构设计宜采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法(简称概率极限状态设计法);当缺乏统计资料时,工程结构设计可根据可靠的工程经验和必要的试验研究进行,也可采用容许应力或单一安全系数等经验方法进行。《钢结构设计规范》(GB 50017)中除疲劳设计采用容许应力法外,其余采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用分项系数设计表达式进行计算。

2. 概率极限状态设计法

结构设计应考虑下列两种极限状态:

第一种为承载能力极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形状态。当结构或结构构件出现下列状态之一时，就认为超过了承载能力极限状态：① 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡（如倾覆等）；②结构构件或连接因超过材料强度料强度而破坏，或因过度变形而不适于继续承载；③结构转变为机动体系；④结构或结构构件丧失稳定性；⑤地基丧失承载能力而破坏；⑥结构因局部破坏而发生连续倒塌；⑦结构或结构构件发生疲劳破坏。

第二种为正常使用极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的状态。当结构或结构构件出现下列状态之一时，就认为超过了正常使用极限状态：① 影响正常使用或外观的变形；②影响正常使用或耐久性能的局部损坏（包括裂缝）；③影响正常使用的振动；④影响正常使用的其他特定状态。

采用“可靠度”来定量地描述结构的可靠性。结构可靠度定义为“结构在规定的设计使用年限内，在规定的条件下，完成预定功能的概率”。设计使用年限是指“设计规定的结构和结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的年限”。设计使用年限应按表 1-1 采用，表中未列出工程结构的设计使用年限应符合国家现行标准的有关规定。超过了设计使用年限，结构虽仍然可能继续使用，但其可靠概率将有所减小。规定的条件是指结构必须满足正常设计、正常施工、正常使用和正常维护条件。以 P_r 和 P_f 分别表示结构的可靠度和失效概率，则有

$$\left. \begin{aligned} P_f &= P(Z < 0) \\ P_r &= P(Z \geq 0) = 1 - P_f \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

表 1-1 设计使用年限分类

类别	设计使用年限（年）	示例
1	5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物、公路中桥和重要的小桥、永久性港口建筑物
4	100	纪念性建筑和特别重要的结构、铁路桥、大和特大公路桥及重要的中桥

可见结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。由于结构失效概率的计算涉及的基本变量具有不定性，作用在结构上的荷载潜在着出现高值的可能性，材料性能也潜在着出现低值的可能性，也就无法保证所设计的结构绝对可靠（失效概率为零）。当结构的失效概率小到某一公认的大家可以接受的程度，就认为该结构设计是安全可靠的，即可靠性满足要求。

图 1-1 表示功能函数 Z 的概率密度 $f(Z)$ 曲线，失效概率可用图中的阴影区面积来表示，计算公式为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \quad (1-3)$$

由于目前尚难求出 Z 的理论概率分布，难以用积分法求得结构的失效概率，因此采用简化方法。由图 1-1 可见阴影区的面积与 Z 的平均值 μ_Z 和标准差 σ_Z 的大小有关。增大 μ_Z ，曲线右移，阴影区的面积将减小；减小 σ_Z ，曲

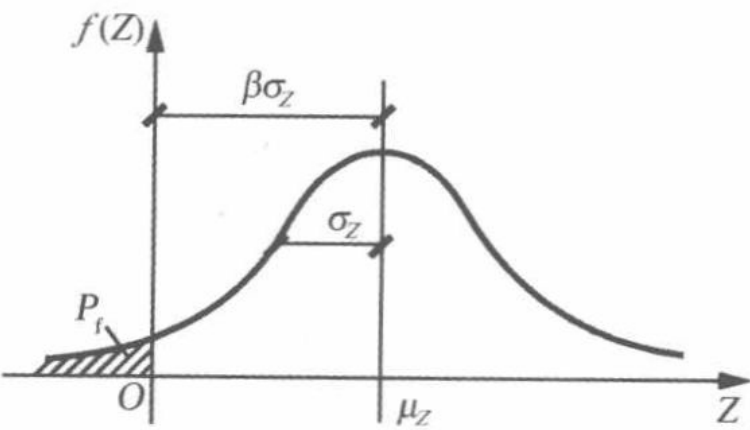


图 1-1 Z 的概率密度曲线

线将变高变窄, 阴影区的面积也将减小。现将曲线的对称轴至纵轴的距离表示成 σ_Z 的倍数, 即令

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad (1-4)$$

β 大, 则失效概率就小。故 β 和失效概率一样, 可作为衡量结构可靠度的一个指标, 称为可靠指标。

设 S 和 R 服从正态分布, 则 Z 也服从正态分布。可知

$$\left. \begin{aligned} \mu_Z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 μ_R 、 σ_R —— R 的平均值和标准差;

μ_S 、 σ_S —— S 的平均值和标准差。

由于 σ_Z 为正值, 失效概率可写为

$$P_f = P(Z < 0) = P\left(\frac{Z}{\sigma_Z} < 0\right) = P\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-6)$$

因为 $\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$ 服从标准正态分布, 用 $\phi(\cdot)$ 表示标准正态分布函数, 则有

$$P_f = \phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

即

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可知, 已知 β 后即可由标准正态分布函数值的表中查得 P_f 。确定 β 并不要求知道 S 和 R 的分布, 只要知道它们的平均值和标准差, 就可由式 (1-5) 和式 (1-4) 算得 β 值。

当 S 和 R 不服从正态分布时, 可作当量正态变换, 求出其当量正态分布的平均值和标准差后, 就可按正态随机变量一样对待。

由于上述的 β 值计算避开了 Z 的全分布推求, 只采用分布的特征值一阶原点矩 (平均值) μ_Z 和二阶中心矩 (方差) σ_Z 来表示, 其中最高阶为二; 且把影响结构满足功能要求的各个随机变量归纳和简化为两个基本变量 S 和 R , 并遵循线形关系 (一次式), 所以称这种方法为考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩极限状态设计方法。这种方法在结构可靠度分析中还存在一定近似性, 故也称为近似概率极限状态设计法。

结构设计应依一预先规定的可靠指标作为依据, 称其为目标可靠指标, 也称为设计可靠指标。设计可靠指标的选择直接与结构造价、维修费用以及失效后果等有关, 失效后果不仅涉及生命财产的损失, 有时还会产生严重社会影响, 所以是制定设计规范的一个重要问题。从理论上说应根据结构构件的重要性、破坏性质及失效后果, 以优化方法确定。但实际上这些因素现还难以找到合理的定量分析方法。因此, 目前一般是通过按传统方法所设计结构作反演计算, 找出隐含在现有工程结构中相应的可靠指标, 经过综合分析后, 确定今后设计结构时采用的目标可靠指标。这种方法的实质是从整体上继承现有的可靠度水准, 是一种稳妥可行的方法。这种方法称为校准法, 校准中所选取的结构或构件应具有代表性。不同的工程结构, 如建筑结构与港口工程结构, 具有不同的目标可靠指标。对于承载能力极限状态,

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001) 规定的结构构件的可靠指标 β 值不应小于表 1-2 中的值, 与 β 值相应的失效概率 P_f 也在表 1-2 中给出。

表 1-2 中提到的结构安全等级, 是根据结构破坏可能产生的后果 (危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等) 的严重性来划分的。依破坏后果很严重、严重或不严重, 划分为一、二或三级。重要的工业与民用建筑为一级, 如影剧院、体育馆及高层建筑; 一般的工业与民用建筑为二级; 次要的建筑物为三级。对特殊的建筑物, 其安全等级应见专门规定。建筑物中各类结构构件的安全等级, 宜与整个结构的安全等级相同。对其中部分结构构件的安全等级可进行调整, 但不得低于三级。延性破坏指结构或构件在破坏前有明显变形或其他预兆的破坏类型, 也称为塑性破坏; 脆性破坏指结构或构件在破坏前无明显变形或其他预兆的破坏类型。《钢结构设计规范》(GB 50017) 采用的最低 β 值是 3.2。

表 1-2 结构构件承载能力极限状态设计时采用的可靠指标 β (P_f) 值

构件类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7 (1.08×10^{-4})	3.2 (6.87×10^{-4})	2.7 (3.47×10^{-3})
脆性破坏	4.2 (1.34×10^{-5})	3.7 (1.08×10^{-4})	3.2 (6.87×10^{-4})

注 当承受偶然作用时, 结构构件的可靠指标应符合专门规范的规定。

钢结构连接是以破坏强度而不是屈服作为承载能力的极限状态, 其可靠指标 β 值应比构件为高, 一般可取 4.5。对于正常使用极限状态设计时采用的 β 值, 宜根据其可逆程度确定, 一般可取 $\beta=0 \sim 1.5$ 。

直接使用给定的可靠指标进行结构设计, 由于某些与设计有关的统计参数还不容易求得, 且计算繁复, 不便于设计应用。《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001) 指出, 结构构件的可靠指标宜采用考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩方法进行计算, 可将其等效地转化为以“分项系数表达的概率极限状态设计表达式”。分项系数是按照目标可靠指标 β 并考虑工程经验确定的, 因而计算结果能满足可靠度的要求。采用的设计表达式使结构设计仍可按传统的方式进行, 符合设计人员的习惯, 使用比较方便。

进行承载能力极限状态设计时, 对于持久设计状况 (不包括结构疲劳设计) 或短暂设计状况, 采用基本组合; 用于偶然设计状况采用偶然组合; 地震设计状况采用地震组合, 参照相关结构抗震设计规范进行计算。

进行正常使用极限状态设计时, 对于不可逆正常使用极限状态 (当产生超越正常使用要求的作用卸除后, 该作用产生的后果不可恢复的正常使用极限状态) 设计, 采用标准组合; 对于可逆正常使用极限状态 (当产生超越正常使用要求的作用卸除后, 该作用产生的后果可以恢复的正常使用极限状态) 设计, 采用频遇组合。可变作用的频遇值是指在设计基准期内被超越的总时间占设计基准期的比率较小的作用值, 或被超越的频率限制在规定频率内的作用值; 对于长期效应是决定性因素的正常使用极限状态设计, 采用准永久组合。可变作用的准永久值是指在设计基准期内被超越的总时间占设计基准期的比率较大的作用值。组合值、频遇值和准永久值可通过对可变作用标准值的折减来表示, 即分别对可变作用的标准值乘以不大于 1 的组合值系数 ψ_c 、频遇值系数 ψ_f 和准永久值系数 ψ_q 。

《钢结构设计规范》(GB 50017) 中对承载能力极限状态采用应力表达式。抗力采用结

构不同受力状态时材料的强度设计值 R 。钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值 f 为钢材的屈服强度标准值除以抗力分项系数 γ_R 。为了计算简便,取 γ_R 为定值,应使得所设计的构件的实际 β 值与目标可靠指标的偏差最小。经分析碳素结构钢 Q235 钢做成的构件,取 $\gamma_R = 1.090$; 低合金高强度结构钢 Q345、Q390、厚度 $\leq 40\text{mm}$ 的 Q420、Q460 钢,取 $\gamma_R = 1.125$; 厚度 $> 40 \sim 100\text{mm}$ 的 Q420、Q460 钢,取 $\gamma_R = 1.180$; Q345GJ 钢的厚度分别为 $\leq 40\text{mm}$ 和 $> 40 \sim 60\text{mm}$ 及 $> 60 \sim 100\text{mm}$ 时,取 γ_R 分别为 1.059 和 1.095 及 1.120; 铸钢件取 $\gamma_R = 1.282$ 。取钢材的抗剪强度设计值 $f_v = f/\sqrt{3}$ 。钢材端面承压(刨平顶紧)强度设计值 f_{ce} 取钢材的抗拉强度 f_u 除以承压抗力分项系数 γ_{Rce} , 碳素结构钢和低合金高强度结构钢及铸钢件的 γ_{Rce} 分别取 1.150 和 1.175 及 1.538。

(1) 基本组合。

1) 对于基本组合,应按下列极限状态设计表达式中最不利值确定

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \gamma_{Q1}\sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci}\gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq R \quad (1-8)$$

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \sum_{i=1}^n \psi_{ci}\gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq R \quad (1-9)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,对于安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上者,不应小于 1.1; 二级或设计使用年限为 50 年的结构,不应小于 1.0; 设计使用年限为 25 年的结构,可取 0.95; 三级或设计使用年限为 5 年的结构,不应小于 0.9。

γ_G ——永久荷载分项系数,当永久荷载效应对结构构件的承载能力不利时,对式 (1-8) 和式 (1-9) 应分别取 1.2 和 1.35,当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时,不应大于 1.0。

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第 1 个和第 i 个可变荷载的分项系数,当可变荷载效应对结构构件的承载能力不利时,取 1.4; 当可变荷载效应对结构构件的承载能力有利时,应取为 0。

σ_{GK} ——永久荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

σ_{Q1K} 、 σ_{QiK} ——在基本组合中起控制作用的一个可变荷载和第 i 个可变荷载的标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合系数,取值见荷载规范。

2) 对于排架、框架结构,式 (1-8) 可采用下列简化承载力极限状态设计表达式

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq R \quad (1-10)$$

式中 ψ ——简化设计表达式中采用的荷载组合系数,当只有一个可变荷载时,取 $\psi = 1.0$,其他情况取 $\psi = 0.9$ 。

(2) 偶然组合。偶然组合的极限状态设计表达式宜按下列原则确定: 偶然作用的代表值不乘以分项系数; 与偶然作用同时出现的可变荷载,应根据观测资料和工程经验采用适当的代表值。具体的设计表达式和各种系数,应符合专门规范的规定。

钢材的强度设计值见表 1-3; 焊缝的强度设计值见表 1-4; 螺栓连接的强度设计值见表 1-5。钢材和铸钢件的物理性能指标应按表 1-6 采用。