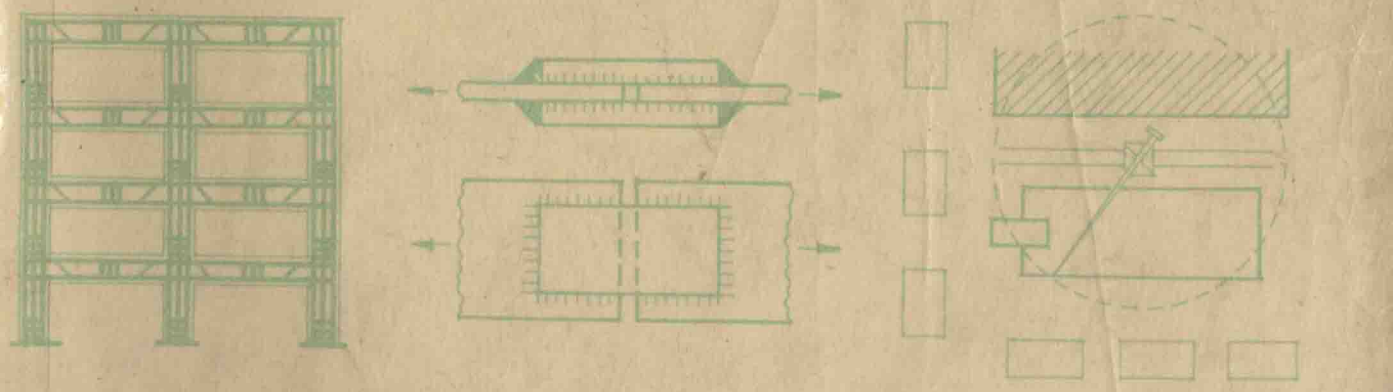
工业与民用建筑专业教材

钢结构

郑州工学院 编



河南科学技术出版社

钢结构

[illegible] 著

钢　结　构

郑州工学院　　编

河南科学技术出版社

豫新登字 02 号

钢 结 构

郑州工学院 编

责任编辑 封延阳

河南科学技术出版社出版发行

郑州工学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 442 千字

1992 年 9 月第 1 版 1995 年 5 月第 2 次印刷

印数: 5000—10000 册

ISBN 7-5349-1141-9/T·235

定 价: 12.00 元

前　　言

钢结构是工业与民用建筑专业的一门重要的专业课程。为了贯彻《钢结构设计规范》(GBJ17-88) 的精神，反映学科领域的新发展，更新教学内容，我们编写了这本书。本书力求全面、系统、简明地阐述新规范的设计思想和设计方法，以及与此有关的基本理论，俾使读者掌握钢结构设计的基本知识，具备从事钢结构研究的能力。

本书内容有：绪论、材料、连接设计、梁柱构件设计以及钢屋盖设计。为适应不同程度不同要求的学员学习，标有 * 号的内容可以自由选读。本书可以作为本科生、函授生、自学考试生的教科书以及工程技术人员的参考书。

参加本书编写人员有许琪楼（主编及编写第三、五章），张正国（副主编及编写一、二、四、六章），周鉴清（编写第七章）。对于书中存在的缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者　　1992 年 1 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　　录

第一章　绪论 …… (1)
§1-1　钢结构的发展概况 …… (1)
§1-2　钢结构的特点和应用范围 …… (3)
§1-3　钢结构设计方法 …… (5)
§1-4　钢结构的发展与展望 …… (10)
第二章　钢结构材料 …… (13)
§2-1　钢材的两种破坏形式 …… (13)
§2-2　钢材的主要性能 …… (13)
§2-3　影响钢材主要性能的因素 …… (17)
§2-4　复杂应力作用下钢材的工作性能 …… (24)
§2-5　钢材的疲劳 …… (26)
§2-6　钢材的种类、规格及选择 …… (31)
第三章　钢结构的连接 …… (36)
§3-1　概述 …… (36)
§3-2　焊接连接方法 …… (37)
§3-3　角焊缝设计 …… (41)
§3-4　对接焊缝的设计 …… (53)
§3-5　焊接残余应力和焊接残余变形 …… (57)
§3-6　普通螺栓连接设计 …… (62)
§3-7　高强度螺栓设计 …… (71)
第四章　轴心受力构件 …… (81)
§4-1　轴心受力构件的应用和截面形式 …… (81)
§4-2　轴心受力构件的强度和刚度 …… (82)
§4-3　轴心压杆的整体稳定 …… (85)
§4-4　实腹式轴心压杆的局部稳定 …… (108)
§4-5　实腹式轴心压杆设计 …… (114)
§4-6　格构式轴心压杆设计 …… (119)
*§4-7　压杆稳定的数值积分法 …… (124)
第五章　梁 …… (129)
§5-1　梁的类型 …… (129)
§5-2　梁的强度 …… (130)
§5-3　梁的刚度 …… (134)
§5-4　梁的整体稳定 …… (135)
§5-5　梁截面设计 …… (146)
§5-6　梁的局部稳定和加劲肋设计 …… (156)
§5-7　梁的拼接 …… (171)

§ 5-8　主次梁的连接 …… (172)
第六章　拉弯、压弯构件 …… (176)
§ 6-1　拉弯、压弯构件的应用和截面形式 …… (176)
§ 6-2　拉弯、压弯构件的强度计算 …… (177)
§ 6-3　压弯构件的整体稳定 …… (179)
§ 6-4　实腹式压弯构件的局部稳定 …… (187)
§ 6-5　实腹式压弯构件设计 …… (190)
§ 6-6　格构式压弯构件设计 …… (195)
§ 6-7　双向压弯构件 …… (200)
§ 6-8　柱头和柱脚设计 …… (200)
第七章　钢屋盖 …… (210)
§ 7-1　屋盖结构的组成和布置 …… (210)
§ 7-2　钢檩条 …… (211)
§ 7-3　钢屋盖支撑 …… (215)
§ 7-4　普通钢屋架 …… (220)
§ 7-5　轻型钢屋架 …… (235)
§ 7-6　普通钢屋架设计例题 …… (239)
附录一　材料性能 …… (254)
附录二　材料设计强度 …… (259)
附录三　梁的整体稳定系数 …… (262)
附录四　梁腹板局部稳定计算 …… (265)
附录五　轴心受压构件的稳定系数 …… (268)
附录六　柱的计算长度 …… (277)
附录七　疲劳计算的构件和连接分类 …… (280)
附录八　各种截面回转半径的近似值 …… (283)
附录九　截面塑性发展系数 γ_x、γ_y …… (284)
附录十　普通螺栓、锚栓规格 …… (285)
附录十一　型钢表 …… (286)

第一章 绪 论

由于在各种结构中钢结构具有轻质高强之绝对优势，在科学技术日益发达的今天，它已成为被广泛应用的一种建筑结构，并且具有广阔无限的发展前景。随着科学技术的进一步发展，人们对建筑物的功能要求亦越来越高，钢结构几乎适用于各种场合，因而将在越来越多的建筑工程中采用。

§1-1 钢结构的发展概况

钢结构的应用及发展与钢铁冶炼技术的发展有着密切关系。在近代钢铁冶炼技术发展之前，我国的钢铁冶炼技术一直处于世界领先地位，因而早在公元前二百多年间，就成功地把熟铁应用于工程结构中，建造了一些铁链桥。在公元前六七十年间，我国建造了有史料记载的世界上第一座铁链桥——云南兰津桥，这是世界各国公认的最古的铁桥，比欧洲最早出现的铁承重结构早很多年。我国现存最早的铁链桥当数云南的沅江桥，大约建于16世纪，距今已有四百多年。其后建造的比较著名的铁链桥，有贵州的盘江桥（三百多年前建造）和四川大渡河桥等。大渡河桥建于1696年，净跨长达100m，是当时世界上跨度最大的桥。它由13根铁索链组成，两端固定于直径20cm，长4m的生铁锚桩上。大渡河桥因是中国工农红军长征途中所经过的险关之一而享誉海内外。

中国古代的金属结构除铁链桥外，尚有众多的铁塔建筑。现存的有湖北荆州玉泉寺铁塔（13层），山东济宁铁塔寺铁塔，江苏镇江甘露寺铁塔等。这些古老建筑物都是我们中华民族的优秀文化遗产，代表着我国古代建筑和冶金技术方面的发展水平。

18世纪以后，欧洲的工业革命给钢铁冶炼技术创造了高速发展的条件，因而使钢结构的发展和应用远远走在了我国前面，钢结构开始应用于工业与民用建筑和其它一些方面。

1720年，在欧洲的克尔布鲁克代尔（Coalbrookdale），由亚伯拉汗·达贝（AbrahamDarby）发明了高炉炼铁以焦炭代替木炭的冶炼技术，为能够大量生产生铁创造了条件。1784年开始用焦炭使生铁转化为熟铁。1855～1864年间，亨利·贝斯莫（Herry—Bessemer）和西门氏·马丁（Siemens Martin）发明了转炉和平炉炼钢技术，随即开始了软钢时代。1830年轧制工艺开始问世。1854年法国生产出了第一批工字形熟铁。1872年，欧洲大陆的索尔尼尔工厂大楼落成，该建筑的骨架即为用工字钢制造的钢框架，成为世界上第一座钢框架结构房屋。其后，钢结构的应用得到迅速发展，不但在数量上增多，而且应用范围亦得到不断地扩大。如高层建筑，高耸结构，大跨度结构，特种构筑物等大量涌现。本世纪初，美国出现了摩天大楼。纽约的50层都市生活办公楼竣工于1909年，高213m。1913年，纽约建成了57层242m高的伍尔沃斯大厦；1930和1931年，纽约又分别建成了77层319m高的科瑞斯勒办公楼和102层381m高的帝国大厦。30年代以后，摩天大楼数量迅速增多，到80年代中期，高度超过200m的超高层建

筑已有95幢，其中80幢为纯钢结构或型钢混凝土结构。在工业建筑中，钢结构建筑物所占的比例越来越大。近十几年来，美、英、法、日等发达的资本主义国家中建造的工业建筑，钢结构约占70%左右。原苏联对采用钢结构的限制较严格，70年代后也逐渐放宽，近年来每年用于工业建筑的钢材达到700万吨。

在近代，由于我国长期受封建制度的束缚，加之近百年来帝国主义的侵略，钢铁冶炼技术长期停滞不前，钢结构的发展比较缓慢。解放前，我国几乎没有像样的设计单位和营造企业，一些为数不多的钢结构，像铁路桥、公路桥、高层楼房大部分是外商承揽设计和施工的。

解放后，在中国共产党的正确领导下，我国的钢铁冶炼技术和钢结构应用进入了一个飞速发展时期。50年代相继建造了一大批钢结构工业建筑，例如鞍钢、首钢、包钢和武钢等大型钢铁联合企业，都采用了较大规模的钢结构厂房；在重型机械制造厂，大型动力设备制造厂，飞机和船舶制造厂等企业内都建有高大的钢结构车间。这些钢结构工程基本上奠定了我国社会主义工业化的基础。在公用和民用建筑方面，50年代还建造了一大批体育馆、文化馆、大会堂等建筑。例如1959年建成使用的首都人民大会堂，钢屋架的跨度达60m，可容纳万人集会。1957年建成的武汉长江大桥，在结构设计、制造、安装等方面，反映着当时我国的钢结构发展水平。然而当时我国的钢产量还不高，还不能满足大规模建设的需要。国内钢产量长期徘徊在1000万吨左右，因而六七十年代钢结构在我国的应用受到了客观条件的很大限制，只有在十分必须的重要建筑物中才能得到应用。这个时期落成的主要钢结构工程，有北京工人体育馆（1961年），首都体育馆（1967年），南京长江大桥（1968年），上海体育馆（1973年）等。

70年代后期以来，我国正处于经济建设迅速发展的阶段。1983年我国钢产量突破了4000万吨大关，轧制钢材增至3千多万吨，规格品种多达2万3千余种；1986年提前完成了5000万吨任务；1988年接近6千万吨；1989年10月统计资料表明，我国钢材总量跃居世界第四位。十几年来，钢结构应用也发展很快，不仅建造了很多大型重要钢结构工程，而且很多中小型工程也开始采用钢结构。例如武汉钢铁公司1.7米热轧薄板厂（1978年），耗用钢材12万吨；上海宝山钢铁公司一期工程（1983年），投资120多亿人民币。其它还有为数众多的石油化工厂、发电厂、造船厂等，都大量采用了钢结构。尤其是近年来，钢结构正在进入我国的高层建筑领域，在北京、上海、广州、深圳已建成或正在设计建造十几幢钢结构大厦。其中北京京广大厦高208m，地上53层；北京京城大厦高183.5m，地上52层；深圳发展中心大厦主体高165.3m，地上43层；上海锦江饭店分馆高153m，地上43层；北京国际贸易中心大厦高155.3m，地上39层。在塔桅结构中，采用钢结构的有210m高的上海电视塔、325m高的北京环境气象桅杆、200m高的广州电视塔、194m高的南京跨越长江线路塔等。在各种钢结构工程中，预应力钢结构，薄壁钢结构，钢和混凝土组合结构，以及高强度螺栓连接等，都得到了不同程度的应用和发展，标志着我国钢结构在科学研究、设计制造和安装等方面都达到了较高的水平。目前国内采用钢结构投资虽然较高，但由于它强度高，重量轻，性能好；施工速度快，工期短，并且适用于大跨度、大柱距、超高层结构，易于扩建和拆迁，钢结构的发展仍明显的呈上升趋势。可以预言，随着我国经济建设计划的逐步实现，国民经济实力的不断增长，钢结构在我国的应用将更加广泛，它将在我国的社会主义现代化建设事业中发挥更大的作用。

§1-2 钢结构的特点和应用范围

一、钢结构的特点

钢结构是由钢板、热轧型钢或冷弯薄壁型钢制造而成的。与其它结构相比，它有如下一些特点：

1. 材料强度高，结构重量轻

钢材的容重较大，约为混凝土容重的 3.3 倍，但它的强度却高得更多。以低碳钢为例，钢材的抗压强度约为普通混凝土的 10～20 倍，因而与钢筋混凝土、砌体结构相比，当受力条件和其它条件相同时，钢结构可以做得很轻巧，结构总体自重远小于其它结构，特别适用于大跨度、大荷载、超高层结构。例如，当荷载和跨度条件都相同时，钢屋架的重量仅为钢筋混凝土屋架的 1／3～1／4；如果采用轻型薄壁钢屋架，结构重量将会更小。

2. 钢材的塑性和韧性好

建筑钢材属于塑性材料，具有很强的塑性变形能力。钢结构在一般条件下，不会因超载而突然断裂破坏，它在破坏前会产生很大的明显可见的塑性变形，并且要经历一定时间的发展过程，能给使用者以预兆，使人们有机会采取适当的补救措施。钢材的韧性好，表明它具有很强的吸收能量的能力，具有良好的耗能机制，结构对动态荷载的适应性强，抗震性能优越。

3. 钢材材质均匀，性能与结构的力学计算假定比较符合

钢材的内部组织致密而均匀，接近于匀质材料。宏观上表现为各向同性体，各个方向的物理力学性能很接近。钢材在一定的应力幅度范围内几乎是完全弹性体，超出该应力范围后又接近于理想塑性体，并且弹性模量很大，弹性变形很小，而塑性变形很大。在正常工作情况下，结构一般处于弹性范围内工作。在设计荷载作用下，结构一般处于部分塑性范围内工作。与其它各种结构相比，钢结构材料的性能与力学计算假定的符合程度最好，因而计算结果最可靠。同时，钢材有着成熟的冶炼和加工工艺，质量可以得到严格控制，材质波动很小。

4. 钢结构制造的现代化程度较高

尽管制造钢结构需要复杂的机械化设备和严格的工艺要求，但与其它结构相比，钢结构的工业化生产程度最高。钢结构主要由各种型材组成，具备成批大量生产和高准确度等特点，因而大部分都采用工厂化，专业化，标准化生产。加工速度快，精度高。制成的构件运到工地后即可拼接；有时可在地面上拼接成较大的吊装单元再行吊装，施工安装非常方便，不占用过大场地，建设周期短。

另外钢材具有可焊性，使钢结构连接大为简化，可方便地制造出各种复杂形状的结构。但焊接时产生的局部高温热循环作用可能引起材质劣化，并产生残余应力和残余变形，使结构中的应力状态复杂化。

5. 钢结构密闭性较好

由于钢材本身的内部组织致密而均匀，经过焊接连接后可做到完全密闭，采用铆钉或螺栓连接，也较易做到紧密不渗漏，因而一些对气密性和水密性要求很高的高压容器、大

型油罐、气柜、船舶等壳体都适于采用钢结构。

6. 钢材耐腐蚀性差

在潮湿环境中，特别是处于有腐蚀介质的环境中，钢材容易生锈，影响钢结构的使用寿命。在较高应力作用下，钢材对腐蚀的敏感性会大大加强。经过一段时间后会在钢材表面形成一些大小不等弥散分布的腐蚀坑，相当于一系列"缺口"，在"缺口"边缘引起应力集中，会造成结构的脆性断裂破坏，因此必须彻底清除铁锈，并涂上合格的防锈漆加以保护。在使用期间，还要定期维护，因而提高了维护费用。

7. 钢材耐热不耐火

所谓耐热，指钢材能够抵抗不很高的环境温度作用。当环境温度在200℃以下变化时，钢材性能变化很小。为慎重起见，规定钢结构可经受的长期热幅射温度为100℃。当长期热幅射温度高于150℃时，应采用隔热层予以保护，以防止徐变现象。所谓不耐火，指钢材不耐高温。发生火灾时，钢结构局部或大部分处于高温包围之中，当温度高于300℃以后，强度急剧下降，达到600℃左右时，强度为零，失去继续承载的能力，结构可能瞬间倒塌。因此必须注意防火，例如外包混凝土或涂防火涂料等，特别对于人流较为集中的公用和民用钢结构工程，更应注意采取可靠的防火措施。

二、钢结构的应用范围

根据钢结构的上述特点，综合考虑我国钢产量还不高，国家还不富裕，钢材消耗量应加以适当控制的具体情况，目前在下列几种情况下才考虑采用钢结构。

1. 重型厂房结构

冶金工业，重型机械制造工业及大型动力设备制造工业等，有许多车间属于重型厂房。所谓重，就是车间里的吊车起吊吨位较大，常在100吨以上，甚至高达440吨，或者吊车起吊吨位并不很大，但它的工作频率很繁重，经常是24小时运转。厂房高度也较大。这类车间的特点是荷载大，并且动态荷载所占比例也大，因而要求结构材料轻质高强，同时具有较好的韧性。它们的承重骨架往往全部或大部采用钢结构。另外，有强烈热幅射作用的热车间，有较大锻锤等产生较大振动作用的其它设备的厂房，抗震要求较高的结构物，也经常采用钢结构。

2. 大跨度结构

随结构物跨度的增大，结构自重在全部荷载中所占的比例也随着增大，减轻结构自重将带来很明显的经济效益。钢结构轻质高强，用于大跨度结构的优点特别突出。因此大跨度结构，例如大会堂、飞机库、火车站、体育馆、展览馆、影剧院、造船车间等，大部分结构跨度都在五六十米以上，甚至超过100m，它们的结构体系，经常采用拱结构、网架结构、悬索结构及预应力钢结构等。

3. 塔桅结构及高层建筑

随着建筑物高度的增加，不但结构自重近似成比例增大，而且水平荷载如风力、地震力等也以更快的速度增大，结构内力和侧移的相应增长很快，因而要求采用轻质高强的钢结构。对公用和民用建筑，如旅馆、饭店、公寓、办公楼等，采用钢结构可减小主要承重构件的截面尺寸，增大使用空间。减轻结构自重后，地基处理难度和基础造价均相应降低。对塔桅结构（无线电桅杆，气象桅杆，微波塔，电视塔，高压输电线塔等），可减小迎风面面积，经济效益更加显著。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

4. 可拆卸的结构

需要经常拆迁的结构，例如流动式展览馆，建筑工地的临时塔架，活动房屋等，采用钢结构最为合适，因为钢结构重量轻，便于搬迁，同时由于可以采用螺栓连接，也便于拆卸和安装。

5. 容器和其它构筑物

钢材不仅强度高，而且材料内部组织致密均匀，具有不渗漏性，因此适用于冶金、石油、化工等企业中的容器结构，如高压气缸、油罐、煤气罐、高炉、热风炉等。此外，由于钢材具有可焊性、可铸性和可塑性，钢结构还经常用于形状比较复杂或者有特殊要求的运输通廊、栈桥、各种管道支架、高炉构架、钻井和石油塔架及海上采油平台等其它构筑物。

6. 轻型钢结构

钢结构重量轻不仅对大跨度、重荷载结构有利，对使用荷载特别小的小跨度结构也有显著的优越性。因为使用荷载很小的小跨度结构的自重也在全部荷载中占有很大比例，所以它成为控制结构设计的一个重要因素。例如采用轻屋面的薄壁型钢屋架，耗钢量比普通钢屋架低 25～50%。在一定条件下，耗钢量可不超过钢筋混凝土屋架。

以上是我国目前建筑结构采用钢结构的一般合理应用范围，在确定是否采用钢结构时，应从建筑物的具体要求，具体条件和结构的重要性及材料供应情况等出发，综合考虑其经济效益来确定。例如钢铁厂的一些结构，国家重点工程以及施工周期对经济效益影响显著的工程等，均可不受上述条件的限制。另外，随着我国钢产量的不断提高，国民经济发展水平的不断增长，限制条件也应适当随时放宽。

§1-3 钢结构设计方法

一、基本设计原则

同其它各种结构一样，钢结构设计应保证结构构件在充分满足功能要求的基础上，安全可靠地工作，同时应尽量节约钢材，认真贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进，经济合理，安全适用，确保质量。

二、设计方法的发展概况

为了满足基本设计原则的要求，也就是寻求钢结构在可靠性和经济性之间的最佳平衡，设计方法的研究始终受到人们的重视，并推动设计方法不断向前发展。随着人们对结构设计的认识不断加深和工程实践经验的逐渐积累，钢结构设计方法的发展经历了四个阶段。

1. 传统容许应力法

传统容许应力法应用于本世纪初至 50 年代中期，其设计原则是：结构构件中按标准工作荷载，采用线弹性理论计算得到的最大计算应力，不大于材料的容许应力：

$$\sigma_c \leq [\sigma] \tag{1-1}$$

这里的容许应力等于材料可以使用的最大强度除以一个笼统的大于 1.0 的系数 k，k 是人为凭经验确定的，属于经验设计方法。

该方法的优点是：应用简便，它分别计算各种荷载引起的应力，叠加后乘以组合系

数，使最大计算应力不超过容许值，这样可自然满足正常使用要求。因为在标准荷载下，构件保持低应力状态，挠度、振动等都难于达到极限状态。其缺点是：过于笼统地采用一个人为的定值安全系数，不能保证各种结构或同一结构中的各种构件具有比较一致的安全度水平，安全储备相差过大，而整个结构的安全度取决于可靠度最小的构件。

2. 三系数法

三系数法即计算极限状态设计方法，应用于50年代中期至70年代中期。它有三个特点：(1) 明确提出了极限状态的概念，一直沿用至今，并不断得到完善和补充；(2) 在结构安全度计算问题上引入了概率概念，因而比传统容许应力法要合理和先进，是结构设计方法由经验向理论过渡的开始。少数设计参数如材料强度和风雪荷载等采用了概率统计方法确定其设计值，大多数荷载及其它不定参数，因缺乏资料而仍采用经验值，因此该方法也称为水准一的"半经验半概率极限状态设计方法"；(3) 采用分项安全系数表达结构可靠度，把结构工作条件系数、荷载系数和抗力系数分别表达，比单一安全系数考虑得更细致。

很显然，三系数法计算较为麻烦。

3. 多系数分析单系数表达的半经验半概率容许应力设计方法

该方法是1974年我国自己正式编制的《钢结构设计规范》所采用的方法。它在形式上与传统容许应力法相似，本质上属于半经验半概率极限状态设计方法。其安全系数 k 是通过分项分析确定的，它继承和发展了概率设计方法，但在应用概率的水平上仍属水准一，尽管其统计参数更多，经验积累更丰富。它也吸收了传统容许应力法"形式简单，使用方便"的优点。

4. 以概率论为基础的近似概率极限状态设计方法

该方法是现行《钢结构设计规范》GBJ17-88所采用的方法，从1989年7月开始试行。它把各种影响结构或构件可靠性的因素都作为独立的随机变量，根据统计分析确定失效概率来度量结构或构件的可靠性。但由于在分析中忽略或简化了基本变量随时间的变化关系，对随机变量的分布规律做了相当程度的近似处理，并且为了简化计算而将一些复杂关系进行了线性化处理，所以它还只能算是一种水准二的近似概率设计方法。完全的精确概率设计方法有待于今后继续深入和完善，还要经历一个较长的发展过程。

三、对结构物的功能要求

设计任意一个结构，都必须使其满足下列四个功能要求：

1. 能够承受正常施工和使用时可能出现的各种作用，包括各种荷载、温度效应、风力作用、地震反应和基础不均匀沉降等；
2. 在正常使用时能够满足各种使用要求并具有良好的工作性能；
3. 在正常维护下具有足够的耐久性；
4. 在偶然事件发生时及发生后仍能保持必要的整体稳定性。

上述四项功能要求中，第1、4两项是结构安全性要求，第2项是结构的适用性要求，第3项是结构的耐久性要求。结构的安全性、适用性和耐久性统称为可靠性。

四、两种极限状态

根据结构物的功能要求，存在某一特定状态，当结构或构件或其组成部分达到或超过这一状态时，就不能满足某一功能的要求，这一特定状态就是极限状态。结构的极限状态

包括两类:

1. 承载能力极限状态

这种极限状态对应于结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。包括整个结构或其一部分作为刚体失去平衡，结构构件或连接因材料强度超过而破坏，疲劳破坏，产生过大的塑性变形而不适于继续承载，结构转变为机动体系，结构或构件丧失稳定等。

2. 正常使用极限状态

这种极限状态对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定值。包括结构或构件出现了影响正常使用或外观的变形；影响正常使用或耐久性的局部损坏；影响正常使用的振动和影响正常使用的其它特定状态。

***五、设计方法要点**

近似概率极限状态设计方法的要点是：把影响结构或构件可靠性的各种因素，如材料抗力、构件几何参数、各种作用等，都视为相互独立的随机变量，采用概率统计理论进行统计分析。再将各因素概括为相互独立的两个综合随机变量，即结构或构件的抗力 R 和各种作用对结构或构件的综合效应 S，建立如下的功能函数

$$Z = R - S \tag{1-2}$$

抗力 R 与材料强度、构件几何尺寸和计算公式三个因素有关，效应 S 包括永久荷载，各种可变荷载如活载、风载、雪载、地震作用，以及支座不均匀沉降，温度变化等引起的结构内力和变形。

当结构或构件达到极限状态时，抗力 R 和效应 S 相等，即:

$$Z = R - S = 0 \tag{1-3}$$

此即为极限状态方程。

当 $R > S$ 时，$Z > 0$，结构安全可靠；当 $R < S$ 时，$Z < 0$，结构失去使用功能，称为结构失效。

结构设计的任务是保证结构失效概率足够小，小到人们可以接受的程度，而不是百分之百地保证 R 总大于 S。由于抗力，计算模式和各种作用总是存在着不确定性，都是随机变量，要求结构绝对安全可靠，R 总大于 S 或者是不可能的，或者是不切实际的，或者是不经济的。

根据概率理论，结构失效的概率可表示为:

$$P_f = P\{Z = R - S < 0\} \tag{1-4}$$

结构可靠的概率为

$$P_r = P\{Z = R - S > 0\} = 1 - P_f \tag{1-5}$$

可靠概率与失效概率互补

用概率理论研究结构或构件的可靠性，综合考虑风险和经济性，使失效概率足够小或使可靠概率足够大，即认为结构是安全可靠的。因此可以引出结构可靠度的定义如下：在设计基准期（我国规定为 50 年）内，结构在规定条件下完成预定功能的概率，称为结构的可靠度。

***六、可靠指标 β**

结构构件的可靠度如何表示？当然可以用可靠概率或失效概率表示，但计算概率值时

不仅要首先知道各随机变量的分布，而且要进行无穷积分，其过程相当繁杂，因此引入可靠指标 β 来表达结构可靠度。定义

$$\beta=\frac{m_z}{\sigma_z} \tag{1-6}$$

式中，m_z 为功能函数的平均值，σ_z 为其均方差。β 的物理意义见图 1-1。

假定功能函数中的抗力 R 和作用效应 S 为相互独立的两个正态分布随机变量，那么 $Z=R-S$ 也服从正态分布，根据随机变量的性质有：

$$m_Z=m_R-m_S \tag{1-7}$$

$$\sigma_Z=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2} \tag{1-8}$$

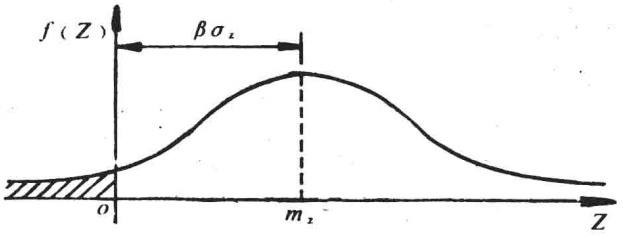


图1－1 失效概率p_f与可靠指标β的关系

因此β的计算式为：

$$\beta=\frac{m_R-m_S}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}} \tag{1-9}$$

式中，m_R 和 m_S 分别为 R 和 S 的平均值，σ_R 和 σ_S 分别为相应的均方差，Z 的分布密度函数为：

$$f(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_z}e^{-\frac{(z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} \tag{1-10}$$

从而失效概率可表示为：

$$P_f=\int_{-\infty}^{0}f(z)dz=\int_{-\infty}^{0}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_z}e^{-\frac{(z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}}dz \tag{1-11}$$

P_f 就是图 1-1 中纵坐标轴左边的阴影区域面积。

通过变量代换：$t=\dfrac{z-m_z}{\sigma_z}$，可将上式转化为标准正态分布函数的概率积分形式：

$$P_f=\int_{-\infty}^{-\frac{m_z}{\sigma_z}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{t^2}{2}}dt=\Phi\left(-\frac{m_z}{\sigma_z}\right)=\Phi(-\beta) \tag{1-12}$$

根据失效概率与可靠概率的互补性，可靠概率与可靠指标的关系为：

$$P_r=\Phi\ (\beta) \tag{1-13}$$

Φ 为标准正态概率积分函数，可由表格查出。可见 P_r、P_f 和 β 之间存在着数值上的一一对应关系，β 值越大，P_f 越小，因而 β 可以很好地反映结构的可靠度。表 1-1 列出了几个常见情况下的可靠指标 β 与失效概率的对应值。确定 β 时不需进行积分计算，只要知道 R 和 S 的平均值和均方差即可，计算较为简单。

计算失效概率 P_f 和可靠指标 β 时，把影响结构构件可靠性的各种因素综合为抗力 R 和作用效应 S，并假设它们是相互独立的正态随机变量，近似用二者之差构成功能函数。该法用到了它们的平均值和均方差两个统计参数，因而该方法称为近似概率极限状态方

法。因为方差又称为二阶中心矩，且功能函数采用了线性表达式，所以它又称为一次二阶矩法。

表 1-1　常见可靠指标 β 与失效概率 P_f 的对应值

β	2.0	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5
P_f	2.275×10^{-2}	6.210×10^{-3}	3.467×10^{-3}	1.350×10^{-3}	6.871×10^{-4}	2.326×10^{-4}	1.087×10^{-4}	3.167×10^{-5}	1.335×10^{-5}	3.398×10^{-6}

七、设计表达式

目前，工程技术人员习惯于采用安全系数法进行设计，按可靠指标设计较难为工程技术人员掌握，因此现行规范把钢结构构件的承载能力极限状态设计公式表达为如下形式：

$$\gamma_o(\sigma_{Gd}+\sigma_{Q1d}+\sum_{i=2}^{n}\psi_{ci}\sigma_{Qid})\leqslant f \qquad (1-14)$$

式中　γ_o—— 结构重要性系数，对安全等级为一、二、三级的结构分别取 $\gamma_o=1.1$、1.0、0.9；一般工业与民用建筑钢结构的安全等级可取二级，特殊建筑钢结构的安全等级可根据具体情况另行确定；

σ_{Gd}——永久荷载的设计值 $G_d=\gamma_G G_k$ 在结构构件截面或连接中产生的应力；

γ_G——永久荷载分项系数，一般采用 $\gamma_G=1.2$，当永久荷载效应对结构承载能力有利时取 $\gamma_G=1.0$；

G_k——永久荷载的标准值；

σ_{Q1d}、σ_{Qid}——第一个可变荷载的设计值 $Q_{1d}=\gamma_{Q1}Q_{1k}$ 和其它第 i 个可变荷载的设计值 $Q_{id}=\gamma_{Qi}Q_{ik}$ 在结构构件截面或连接中产生的应力，规定 σ_{Q1d} 取所有可变荷载设计值引起的应力最大值，即 $\sigma_{Q1d}\geqslant\sigma_{Qid}(i\geqslant2)$；

γ_{Q1}、γ_{Qi}——第一个可变荷载和其它第 i 个可变荷载分项系数，一般取 $\gamma_{Q1}=\gamma_{Qi}=1.4$；

Q_{1k}、Q_{ik}——第一个可变荷载和其它第 i 个可变荷载的标准值；

ψ_{ci}——第 i 个可变荷载的组合值系数。一般当有风荷载参与组合时取 $\psi_{ci}=0.6$，当无风荷载参与组合时取 $\psi_{ci}=1.0$；对高层建筑，风荷载组合值系数取 $\psi_c=1.0$；

f——结构构件和连接的设计强度，$f=\dfrac{f_k}{\gamma_R}$；见附录二；

γ_R——抗力分项系数，它已包含在规范直接给出的设计强度指标 f 之内；

f_k——材料强度的标准值，包括连接材料。

对于一般排架、框架结构，很难区分出产生最大应力的可变荷载，可采用下列简化的承载能力极限状态设计表达式：

$$\gamma_o(\sigma_{Gd}+\psi\sum_{i=1}^{n}\sigma_{Qid})\leqslant f \qquad (1-15)$$

式中　ψ——可变荷载组合值系数，当参与组合的可变荷载不少于两个时，取 $\psi=0.85$，否则取 1.0。

上列公式适用于按荷载效应的基本组合对结构构件进行强度和稳定性计算以及连接计算。对于荷载的偶然组合，例如考虑罕遇地震作用等，应按其它有关专门规范确定可变荷

载的组合值系数。关于钢结构的疲劳强度计算，由于目前其极限状态的概念还不够确切，因此仍按容许应力法设计，计算时采用标准荷载。

对于正常使用极限状态，结构或构件应按荷载的短期效应组合采用下式进行计算：

$$w = w_{GK} + w_{Q1k} + \sum_{i=2}^{n} \psi_{ci} w_{Qik} \leqslant [w] \tag{1-16}$$

式中　w——结构或构件产生的变形值；

w_{GK}——永久荷载标准值引起的结构或构件变形值；

w_{Q1K}、w_{QiK}——第一个和其它第 i 个可变荷载标准值引起的结构或构件变形值，规定 $w_{Q1K} \geqslant w_{QiK}(i \geqslant 2)$；

$[w]$——结构或构件的容许变形值。

值得注意的是：按承载能力极限状态计算结构或构件的强度、稳定及其连接时，应采用荷载设计值；按正常使用极限状态计算结构或构件的变形时，应采用荷载标准值；疲劳强度计算的方法为容许应力法，应采用荷载标准值；在动力荷载作用下计算强度和稳定时，应考虑动力系数，但计算疲劳和变形时不考虑。

现行规范采用的上述设计表达式从形式上看是采用定值分项系数表达结构的可靠度，实质上，它代表着用可靠指标 β 表达结构可靠度的近似概率极限状态设计方法。各分项系数是根据国家统一规定的目标可靠指标经过校准，优选确定的。目标可靠指标见表1-2。所谓校准，就是针对现有结构根据各类材料的原结构设计规范进行可靠度分析，求出大量现有结构的可靠指标，经综合平衡后定出目标可靠指标，因而现行规范从安全度上讲是继承了原规范的平均安全度。所谓优选，指规范给出的各分项系数系按下列原则经优选确定的：在各种荷载标准值已给定的情况下，要选取一组分项系数，使按极限状态设计表达式设计的各种结构构件具有的可靠指标，与目标可靠指标之间在总体上误差最小，因而所采用的各分项系数是在"各种荷载组合下各种结构的计算可靠指标最接近目标可靠指标"意义上的最优定值。

表 1-2　承载能力极限状态设计时的目标可靠指标 β

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

§1-4　钢结构的发展与展望

如前所述，解放以来我国钢结构在设计、制造、施工等方面，已经取得了很大的成就，但由于目前钢材产量还较低，在应用上还受到材料供应和结构造价等方面的种种制约。当前我国正处在以四个现代化为目标的规模宏伟的社会主义建设新时期，国民经济正在高速发展，钢材产量不断提高，钢结构的应用即将进入一个更高的发展阶段。为适应这一形势，钢结构的科学技术水平应迅速提高。根据国内外的现状，当前需要做好下列几个方面的工作：

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com