



GANGJIEGOU SHEJI YUANLI



PUTONG GAODENG YUANXIAO
TUMU GONGCHENG LEI GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校土木工程类规划系列教材

钢结构 设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

主 编 康 锐 李燕强

 山东大学出版社





PUTONG GAODENG YUANYIAO
TUMU GONGCHENG LEI GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校土木工程类规划系列教材

钢结构 设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

主 编 康 锐 李燕强
副主编 肖新科 宫 赛

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书是按照高等学校土木工程专业指导委员会编制的《钢结构课程教学大纲》的要求编写的,全书共分6章,主要内容有:概述、钢结构材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。书中理论与设计并重,并给出了一些例题和适量习题。

本书可作为土木工程、道路桥梁与渡河工程、城市地下空间工程、铁道工程等土木类专业学生的学习用书,也可作为结构设计、施工及研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理 / 康锐, 李燕强主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2016.8
普通高等院校土木工程类规划系列教材
ISBN 978-7-5643-4988-2

I. ①钢… II. ①康… ②李… III. ①钢结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第210349号

普通高等院校土木工程类规划系列教材

钢结构设计原理

主编 康锐 李燕强

责任编辑 曾荣兵

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 15.5

字数 386千

版次 2016年8月第1版

印次 2016年8月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-4988-2

定价 36.00元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是按照高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》中的《钢结构基本原理课程教学大纲》的要求,根据现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)编写的。本书可作为高等学校土木工程、道路桥梁与渡河工程、城市地下空间工程、铁道工程等土木类本科生的教学用书,也可作为钢结构相关设计、施工及研究人员的参考书。

钢结构设计原理主要讲述钢结构的材料性能、连接以及基本构件的受力性能和设计计算方法,是土木类专业重要的专业基础课。全书共分6章,主要内容有:概述、钢结构材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。本书除给出相应例题外,还在各章后列出了反映相应重点概念和计算方法的思考题和习题。

本书由西南交通大学康锐、李燕强任主编,由南阳理工学院肖新科、官赛任副主编。此外,西南交通大学黄艳霞、张明、李倩、严传坤等老师参编了部分章节,并承担了校核工作;研究生张克礼、赖小盼、刘旭东、庞博、郑柯汗、陈文强、杨一维对书中的例题及习题进行了复核。

在编写本书的过程中参考了国内同行的教材,在此谨向这些作者表示感谢。鉴于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016年6月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 钢结构的发展概况	1
1.2 钢结构的特点及应用	4
1.3 钢结构设计方法	7
1.4 钢结构设计的基本要求	12
1.5 钢结构的发展趋势	12
第二章 钢结构材料及其性能	15
2.1 结构钢材的主要性能	15
2.2 影响钢材力学性能的因素	21
2.3 钢材的破坏形式	24
2.4 应力集中对钢材性能的影响	25
2.5 钢材的疲劳破坏及疲劳计算	27
2.6 钢材的种类和规格	32
2.7 钢材的选用原则	36
第三章 钢结构的连接	38
3.1 连接概述	38
3.2 对接焊缝连接设计	45
3.3 角焊缝连接的形式和构造	49
3.4 角焊缝连接的计算	53
3.5 焊接残余应力和焊接残余变形	64
3.6 螺栓连接设计	69
第四章 轴心受力构件	95
4.1 概 述	95
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	96
4.3 轴心受压构件的稳定	98
4.4 实腹式轴心受压构件的截面设计	116
4.5 格构式轴心受压构件	121
4.6 柱头和柱脚设计	136

第五章 受弯构件——梁	145
5.1 梁的形式和应用	145
5.2 梁的强度和刚度	146
5.3 梁的整体稳定	151
5.4 梁的局部稳定和加劲肋设计	159
5.5 考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力计算	171
5.6 钢梁的设计	177
第六章 拉弯和压弯构件	196
6.1 概 述	196
6.2 拉弯和压弯构件的强度和刚度计算	198
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	201
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	210
6.5 格构式压弯构件	212
参考文献	219
附 录	220
附录 1 钢材和连接强度设计值	220
附录 2 疲劳计算的构件和连接分类	223
附录 3 结构或构件的变形容许值	226
附录 4 轴心受压构件的稳定系数	227
附录 5 各种截面回转半径的近似值	231
附录 6 型钢表	232
附录 7 螺栓规格	241

第一章 绪论

钢结构是世界上早期的工程结构中最先使用的结构类型之一。钢结构由于具有强度高、自重轻、施工速度快、抗震性能好等优点,成为被广泛采用的一种结构,近百年来得到了快速的发展。尤其是在20世纪下半叶,随着世界钢产量的大幅度增加,钢结构也极大地扩展了应用领域。随着我国城市化的快速发展以及我国钢产量跃居世界第一,建筑钢结构在综合经济效益方面和抗震能力上的优点,正逐渐得到普遍的认识,发展钢结构建筑已成为工程建设的一项基本政策,给钢结构事业的发展带来了莫大的机遇。为了抗风、抗震,减小结构占用面积,降低基础费用,缩短建筑工期,钢结构已成为工程结构中优先考虑使用的结构类型之一。

1.1 钢结构的发展概况

在早期的钢结构发展历程中,最早使用钢铁的建筑结构应该是铁索桥。据历史资料记载,中国最早的铁索桥是陕西汉中攀河铁索桥,建于公元前206年的西汉时期,距今约有2200年的历史。该桥经过了多次修复,于1951年毁坏。另外,云南神州铁索桥建于隋唐时期,于唐贞元十年(794年)战乱时毁坏,距今1200多年。英国1779年建造了一座铁索桥,俄国1824年开始建铁索桥,美国1851年开始建铁索桥,都比中国晚2000年左右。我国现存最早的铁索桥为四川大渡河泸定桥,长127m,建于1705年,距今约311年,中华人民共和国成立后修复过一次,现还在使用。中华人民共和国成立前由外国人建造的钢桥有:唐山运河铁路桥,1906年建成,英国人设计,比利时人建造,为中国第一座现代铁路钢桥;天津金汤开启式钢桥也建于1906年,2005年整修后重新恢复开启功能;兰州中山大桥,建于1907年,长233m、宽7m,连续使用至今,2007年维修后改为人行桥,距今109年。由中国人自行设计建造的铁路钢桥是1902—1909年詹天佑主持建造的京张铁路桥,共121座,累计长1951m,其中最大跨度最大的为33.5m,距今有100余年;1937年由茅以升主持建造了杭州钱塘江公铁两用大桥。

中华人民共和国成立后,非常重视钢铁生产和建筑钢结构发展,具有代表性的工程有:1957年建成我国第一座跨长江公铁两用武汉长江大桥,长1670m,可谓“一桥飞架南北,天堑变通途”,圆了几代人的梦想;1968年建成南京长江大桥,长4589m,这是苏联专家撤走并中断了钢铁供应和成套技术后,中国人自己建造的一座为国增光的钢结构桥梁,它开创了我国自力更生建设大型桥梁的新纪元。

1968年建成首都体育馆,屋盖为平板钢网架,长112.9m,宽99m;1975年建成上海体育馆,屋面采用圆形钢网架,跨度110m,使用8个独脚拔杆整体抬吊、高空水平移位安装;1975年建成兵马俑1号坑钢结构,结构形式为三铰拱,跨度为72m。从此我国大跨度建筑

钢结构设计原理 GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

钢结构的使用拉开了序幕,建筑钢结构设计与施工技术得到了发展,尤其是南京长江大桥和上海体育馆钢结构网架依靠我国自己的力量顺利建成,得到外国有关专家的一致好评。

钢结构在我国真正发展期是改革开放以后,随着国内经济的全面发展,钢结构的发展进入了新时期,这一时期国内钢产量逐年上升。我国1949年钢产量只有15.8万吨;1978年为3178万吨;1993年8956万吨,产量居世界第一;1996年产量超过1亿吨;2008年为5.1亿吨;2014年8.2亿吨,占世界钢总量的一半左右。我国钢结构的用钢量,2010年为2500万吨,占总钢产量的3.9%;2014年钢结构用钢5025万吨,占总钢产量的6.1%。

改革开放以来,随着科学技术的发展,我国建筑钢结构技术得到迅猛发展。生产的钢材品种、规格越来越齐全,钢材质量有了很大的提高,钢结构形式越来越新颖,钢结构设计与施工技术越来越发达。如“鸟巢”、“水立方”、CCTV新址大楼、广州新电视塔、上海环球金融中心、港珠澳大桥等具有代表性的钢结构建筑在建筑造型和结构形式上有了新的突破。从此,拉开了我国建筑钢结构迈向世界领先水平的序幕。

1990年,北京建成京广中心大厦,高209m,为钢框架、带边框钢筋混凝土剪力墙结构,总用钢量1.9万吨,这是我国第一座超高层钢结构建筑;1993年建成上海杨浦斜拉桥,主跨度为602m;1996年建成的深圳地王大厦高383.95m,为钢结构砼核心筒、外框钢结构,总用钢量1.2万吨;1997年,上海建成的8万人体育场,钢结构单棚最大悬挑73.5m。这几个具有代表性的工程是我国建筑钢结构在跨度和高度上的大的飞跃。尤其是“鸟巢”、“水立方”、CCTV新址、广州新电视塔、杭州湾跨海大桥等在世界上具有影响的工程,为我国建筑行业翻开了辉煌的篇章。

近年来,世界各国的建筑钢结构在高度、跨度、长度、造型等方面发展很快。衡量建筑钢结构技术标准的标准,目前主要为跨度和高度。多年来,世界各大城市在高层建筑、广播电视塔、体育场馆屋盖造型等方面不断地攀比竞争,为人类建筑史上创造了一个又一个奇迹。

电视塔——到2009年,世界最高电视塔是美国1963年建成的北达科他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)。另外,广州电视塔高610m,加拿大多伦多电视塔高553m,俄罗斯奥斯坦电视塔高540m,上海“东方明珠”电视塔高468m。美国在建的芝加哥螺旋塔,高度为610m。

超高层建筑——早期,高度在300m以上的高层建筑为美国纽约克莱斯勒大楼,高318.8m,1930年建成;纽约帝国大厦高381m,1931年建成;美国世贸大厦“姐妹塔”高417m,1969年建成;芝加哥韦莱集团大厦高442m,1974年建成。在我国,1996年建成的深圳地王大厦高383.95m;上海金茂大厦高403m,1997年建成,为钢结构砼核心筒、外框钢骨砼柱及钢柱结构,总用钢量1.4万吨;台北101大厦高508m,2006年建成;上海中心大厦高632m,2016年建成。阿拉伯联合酋长国“哈利法塔”高达828m,2010年1月1日建成,为目前世界最高的摩天大楼。美国迈阿密计划修建975m高的摩天大楼,在不远的将来,世界摩天大楼有望突破1000m。

最大的跨海大桥——美国1969年建成庞恰特雷恩湖跨海大桥,长3.84km,可谓世界海上第一桥。在我国,杭州湾跨海大桥长3.6km,由杭州慈溪至平湖,2008年5月通车;东海大桥长3.25km,由上海浦东至小洋山岛深水港,2005年通车;在建的港珠澳大桥是一座连接香港、珠海和澳门的巨大桥梁,全长为49.968km,桥梁上部结构的用钢量超过42万吨(小部分为钢塔)。

大跨度斜拉索桥——俄罗斯的跨东博斯鲁斯海峡的俄罗斯岛大桥，主跨 1104 m，2012 年通车；日本多多罗大桥，跨度 890 m，1999 年建成；法国诺曼底大桥，跨度 856 m，1995 年建成。在我国，苏通大桥，跨度 1088 m，钢箱梁 4.9 万吨，2008 年建成；香港昂船洲大桥，跨度 1018 m，1999 年建成；上海闵浦大桥，跨度 708 m，2009 年建成。

大跨度悬索桥——日本明石海峡悬索桥，跨度 1991 m，1998 年建成。在我国，西堠门悬索桥，跨度 1650 m，2009 年建成；杨润悬索桥，跨度 1490 m，2005 建成；江阴悬索桥，跨度 1385 m，1999 年建成；香港青马悬索桥，跨度 1377 m，1997 年建成。

大跨度钢结构拱桥——上海卢浦大桥跨度 750 m，为全焊接钢结构拱桥，用钢 3.5 万吨，2003 年通车；重庆朝天门大桥主跨 552 m，为钢桥桁架拱桥形式，全桥永久用钢 4.6 万吨。

大跨度房屋建筑——美国 1979 年建成的底特律体育馆，屋盖为网壳结构，跨度 266 m，为世界最大跨度钢结构建筑；1996 年建成的亚特兰大体育馆，屋盖为索、杆、膜张拉结构，跨度 235 m。日本 20 世纪 90 年代建成的名古屋穹顶，屋盖为网壳结构，跨度 229.6 m。英国 2000 年建成外形似飞碟状的展览馆（千年穹顶），属斜拉索钢结构，跨度 320 m。北京国家体育场“鸟巢”，平面为椭圆形 343 m×292 m，它不同于现代大跨度常用的网架、网壳、拱架等结构形式，也未采用斜拉、预应力等提高跨度的有关措施，自身支撑，为世界大跨度建筑的首例。与体育场罩棚比较，其结构最大悬挑长度 79 m，尚属少有。“鸟巢”用最小、最简易的原始鸟窝来表现最大、最复杂的现代化建筑，可谓一大奇迹。

大悬挑钢结构——十一届亚运会前，北京工人体育场改建了一个钢罩棚，悬挑长 18 m；接着 1991 年建成北京丰台体育场罩棚，最大悬挑长度 25 m。上海 1997 年建成的 8 万人体育场罩棚，最大悬挑长度达 73.5 m，达到了世界领先水平。无论是悬挑长度、悬挑高度，还是悬挑重量，北京 CCTV 新址主楼无疑为世界第一。它是一幢不对称悬挑大楼，楼高 234 m，两座塔楼倾斜 6°，顶层偏离底层 24 m，并在 163~234 m 高度处悬挑 14 层，悬挑质量 1.5 万余吨，悬挑长度达 75 m，考虑塔楼倾斜 24 m，结构最大悬挑跨度为 99 m，单从建筑力学和技术难度看，CCTV 新址主楼在世界上是独一无二的。

特种钢结构——我国西安的法门寺合十舍利塔工程，结构形式为钢骨结构，造型结合佛教文化，选型双手合十状，立面呈多次折线，属标志性特种造型结构。其高 148 m，总用钢量约 1.48 万吨，施工难度大。法门寺舍利塔造型比较复杂，结构形式为钢骨结构，平面展示为双对称结构，体系高度方向平面变化大。其转换、转折节点以及开口数量多，层间尺寸大，外形三次折线往复变化，钢骨柱长度变化频繁。此外，该工程采用悬挑形式施工，使施工难度加大。该工程为筒体钢骨混凝土结构，上部属多向悬挑，施工过程中钢结构变形大，安装过程必须采取一系列技术措施，质量要求高。该工程焊缝等级为一级，检验等级为 B 级，评定等级为 I 级。低温焊接，要达到这一标准，必须采取一系列有效的技术措施。结构安装难度大，塔楼高 127 m，54~74 m 向外倾斜 54°，74~104 m 向内倾斜 54°，悬臂部分外伸 22.5 m，由于周围土建施工，采用常规外支撑安装方法无法实现，给施工带来很大的技术难题。施工单位克服以上重重困难，打破常规，采用一系列科学、先进的施工技术，用 8 个月时间按期完成了 1.48 万吨的钢结构安装任务，在国内特种结构施工领域创造了一个奇迹。

建筑钢结构的创新是无休止的，它激发和推动人类在建筑史上不断创造奇迹，是人类挑战大自然的本能，是人类社会进步、科学技术发展的必然结果。“鸟巢”以跨度大、结构奇特震撼人心，它与“水立方”对应，勾画出一幅完美、和谐的北京奥体蓝图。它代表了中国建

钢结构设计原理 GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

筑业先进技术走向世界。CCTV 新址大楼无疑是世界悬挑最大的高层建筑，也是设计和施工难度很大的工程。“法门寺舍利塔”是代表佛学理念的新型特种结构，是现代建筑和佛教文化相结合的艺术品。“中国苏通大桥”以跨度 1088 m，成为世界跨度最大的斜拉索桥梁。“上海卢浦大桥”以跨度 750 m，成为世界跨度最大的钢结构拱桥。“中国西堍门大桥”以跨度 1650 m，成为国内第一、世界第二的悬索桥梁。“杭州湾跨海大桥”以长度 36 km 成为亚洲第一、世界第二的跨海大桥。“广州新电视塔”以 610 m 的高度成为亚洲第一、世界第二的电视塔。“鸟巢”和“水立方”虽曾有争议，但它们代表我国建筑钢结构先进技术走向了世界，特别是通过奥运会亮相，已被世人认同。它们以“最新的服饰”、“最美的仪容”、“最优美的舞姿”在世界建筑舞台上“尽情炫耀”；它们集新、奇、大于一体，集漂亮、精致、宏伟于一身，向世界展示了中国建筑钢结构的辉煌成就。

“十二五”期间，我国钢结构用钢量占钢产量的比例为 5%~6%，在量大面广的住宅建筑和中小跨度桥梁中，钢结构所占比例不到 1%，远低于发达国家的水平。因此，在我国发展钢结构产业，空间巨大。

1.2 钢结构的特点及应用

1.2.1 钢结构的特点

钢结构是以钢材（钢板和型钢等）制作的结构。与其他材料的结构相比，钢结构具有如下优点：

1. 材料强度高、重量轻

钢的密度虽然较大，但强度却高得多，与其他建筑材料相比，钢材的密度和强度比值最小，为 $(1.7 \sim 3.7) \times 10^{-4} \text{ m}$ ，而钢筋混凝土的比值约为 $18 \times 10^{-4} \text{ m}$ ，所以采用钢材建造的结构比较轻。在相同的荷载和约束条件下，采用钢结构时，结构的自重通常较小。当跨度和荷载相同时，钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架重量的 $1/4 \sim 1/3$ ，若用薄壁型钢屋架或空间结构则更轻，甚至接近于钢筋混凝土屋架的 $1/10$ 。例如：相比传统结构，住宅钢结构可减轻结构自重 30% 以上。高层钢筋混凝土建筑物的自重为 $1.5 \sim 2.0 \text{ t/m}^2$ ，高层建筑钢结构自重大多在 1.0 t/m^2 以下，低的只有 $0.5 \sim 0.6 \text{ t/m}^2$ 。钢结构建筑的自重为同等高度混凝土结构建筑的 $1/2 \sim 3/5$ ，且钢结构柱截面面积较混凝土结构柱的截面面积减少 $1/2$ 左右，有效增加了建筑的使用面积。由于重量较轻，便于运输和安装，因此钢结构特别适用于跨度大、高度高、荷载大的结构，也最适用于可移动、有装拆要求的结构，且可减少下部结构和基础的造价。

自重轻这一特点使得钢结构的运输和吊装费用减少，且钢结构具有良好的灵活性，运输半径是预应力混凝土预制装配式混凝土结构的 10 倍；建造 20 层以上的建筑物时，相对于预应力混凝土预制结构来说，钢结构建筑优势显著。

2. 钢材材质均匀、可靠性高

钢材的内部组织均匀，非常接近匀质体，其各个方向的物理力学性能基本相同，接近各

向同性体；且在一定应力范围内，接近于理想弹性工作状态，符合工程力学所采用的基本假定。因此，目前采用的计算理论能够较好地反映钢结构的实际工作性能，可靠性高。

3. 工业化程度高，工期短

钢结构构件在工厂制成，能成批量生产，便于机械化制造，生产效率高，速度快，成品精度较高，质量易于保证，因而钢结构是工程结构中工业化程度最高的一种结构。采用工厂制造、工地安装的施工方法，可缩短建设周期、降低造价，提高经济效益。

4. 抗震性能好

钢结构由于自重轻和结构体系相对较柔，受到的地震作用较小，且钢材具有较高的抗拉和抗压强度以及较好的塑性和韧性，因此在国内外的历次地震中，钢结构是损坏最轻的结构，已被公认为是抗震设防地区特别是强震区的最合适的结构。

地震发生时，混凝土建筑易粉碎性垮塌，而钢结构建筑所具有的延展性可降低地震对建筑的破坏。钢梁和钢柱组成的柔性框架可抵抗 8 度以上地震，因此在日本等地震频发国家应用广泛，钢结构建筑在日本的占有率为 70% 左右。据日本阪神地震后资料显示，钢结构建筑在地震中的受损率远低于混凝土结构建筑。

5. 耐热性较好

实验证明，钢材从常温到 250 °C 时，性能变化不大，耐热性较好。钢结构可用于温度不高于 250 °C 的场所。

6. 钢结构符合可持续发展的需要

钢结构产业对资源和能源的利用相对合理，对环境的破坏相对较少，是一项绿色环保型建筑产业。相对于手工湿作业产生大量工地粉尘和噪声，钢结构具有粉尘少、噪声低，不污染水源土壤等特点，不含石棉，无毒无害，能够有效降低建筑垃圾数量。钢构建筑物由于很少使用砂石、水泥等散料，从而在根本上避免了扬尘、废弃物堆积和噪声污染问题。钢结构的材料基本是钢材，100% 可回收，契合可持续发展理念。对同样规模的建筑物，钢结构建造过程中有害气体的排放量只相当于混凝土结构的 65%（混凝土结构住宅每平方米建筑材料碳排放量达 740 kg，钢结构住宅每平方米建筑材料碳排放量为 480 kg），钢结构制造施工过程能耗低，隔热性能优越，在降低住宅碳排放量方面具有明显的优势。

但是，钢结构的以下缺点有时会影响钢结构的应用：

1. 钢材价格相对较贵

钢结构因材料成本相对较高，其上部结构成本高是目前制约建筑钢结构应用的一个重要因素。但应该看到，上部结构造价占工程总投资的比例是相对较小的，采用钢结构与采用钢筋混凝土结构间的结构费用差价占工程总投资的比例就更小了。以高层建筑为例，前者约为 10%，后者则不到 2%，显然，结构造价单一因素不应作为决定采用何种材料的主要依据。如果综合考虑各种因素，尤其是工期优势，则钢结构将日益受到重视。

2. 耐锈蚀性差

钢材易于锈蚀，应采用防护措施。钢材在潮湿环境中，特别是在有腐蚀性介质的环境中容易锈蚀，必须用油漆或镀锌加以保护，而且在使用期间还应定期维护。这就使钢结构的维

钢结构设计原理 GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

护费用比钢筋混凝土结构高。目前国内外正在发展各种高性能的涂料和不易锈蚀的耐候钢，钢结构耐锈蚀性差的问题有望得到解决。

3. 耐火性差

钢材在温度达到 300 °C 以后，强度逐渐下降；在 450 ~ 650 °C 时，强度几乎丧失，结构失去承载能力。因此，钢结构的耐火性较钢筋混凝土结构差。当耐火要求较高时，需采取保护措施，如在钢结构外面包混凝土或其他防火板材，或在构件表面喷涂一层含隔热材料和化学助剂的防火涂料，以提高耐火等级。但这样处理既提高了造价，又增加了结构所占的空间。

钢结构的上述特点是确定结构的设计方法与合理进行工程应用的重要依据，应予以特别注意。

1.2.2 钢结构的应用

钢结构的特点决定了其适用范围。与其特点相适，钢结构适用于以下工程结构形式。

1. 承受大荷载、动载的结构

钢材强度高，适于承载重的结构；具有良好的韧性和塑性，其破坏常呈现延性性质，因此，钢结构适宜在动荷载作用下工作，可良好地满足抗震能力要求高的结构需求。

2. 大跨度或高度很大的结构

钢材轻质高强的特性使钢结构在大跨度、大高度的建筑中体现出良好的综合效益。因此，近年来钢结构在大跨度及高层、高耸结构中得到广泛应用。

3. 拼装式结构或需要移动的结构

钢结构不仅重量轻，还可以机械化生产，并可采用螺栓或其他便于拆装的方式进行连接，具有拼装、运输方便的优点，因此非常适用于拼装式结构或需要移动的结构。临时性建筑、野外作业的生产和生活用房的骨架、过街天桥、管道支架及海洋平台等多采用钢结构。钢筋混凝土结构施工时所用的模板和支架、脚手架等也大量采用钢材制作。

4. 轻型结构

钢结构重量轻，不仅在结构跨度大时有利，在屋面活载比较小时也有优势。工业厂房多采用钢结构。

5. 其他复杂造型结构

钢材具有良好的可塑性，焊接、螺栓连接等钢结构连接方法灵活、适用性强，因此，造型复杂的结构经常采用钢结构。

结合钢结构的特点和适用范围，钢结构的主要形式如下：

1. 大跨度结构

如大跨度桥梁、大跨度屋盖等结构，其结构体系可为网壳、网架、张弦、悬索、索膜、拱架、框架等。

2. 重型结构

吊车等起重量较大的设备或工作比较繁重的厂房间多采用钢结构，如冶金厂房与重型

机械厂的厂房；起重量较大的起重机械等也多采用钢结构。

3. 高耸结构

高层建筑结构与塔桅结构通常采用钢结构，如电视台、微波塔、输电线塔、发射桅杆等。

4. 多层与高层结构

多、高层建筑经常采用钢结构。近年来，钢结构在此领域的发展非常迅速。

5. 活动结构

各种移动式起重机械，如军用桥、栈桥、施工脚手架等拆装结构。

6. 轻型结构

轻型厂房、仓储、贸易市场等轻型结构，结构形式多为门式刚架、波纹拱板等。

常见的钢结构类型见表 1.2.1。

表 1.2.1 常见的钢结构类型表

结构类别	结构特点	主要应用方向
轻型 钢结构	用冷弯薄壁型钢或 H 型钢作为结构承重体系，具有自重轻、建设周期短、适应性强、外表美观、造价低、易维护等特点	多用于工厂、仓库、体育馆、展览管、超市等建筑
高层 钢结构	属于钢-混凝土混合结构，是一个国家钢结构发展程度的标志	多用于建筑大型金融中心、会议中心等，常被作为一座城市的标志
住宅 钢结构	是一种以钢结构为结构承重体系并与轻质高强墙板配套建设的住宅建筑体系，具有施工快速、抗震性能优良、重量轻、居住舒适度高优点	主要用于建筑大型钢结构体系住宅
空间 钢结构	主要分为空间网架结构和空间桁架结构，具有连续的大跨度，外观轻巧，具有现代建筑美感，且建设周期较短，绿色环保	多用于建筑大型体育馆、展览中心、飞机库等大型公共建筑
桥梁 钢结构	分为桁架式结构、箱形结构、拱形结构、斜拉式结构和悬索式结构，具有跨距大、施工迅速等优点	多用于高速铁路、高速公路、跨海大桥、市政建设等大型交通工程的桥梁建设

1.3 钢结构设计方法

1.3.1 钢结构设计方法的发展

钢结构设计的基本原则是做到技术先进、经济合理、安全适用和确保质量。因此，结构设计要解决的根本问题是在结构的可靠和经济之间选择一种最佳的平衡，使由最经济的途径建造成的结构能以适当的可靠度满足各种预定的功能要求，即要求结构在施工和使用期间经受各种自然作用和人为作用的考验，而且不妨碍建筑物的正常使用。为此，在结构设计中应考虑如下两个方面的问题：① 结构在各种作用下的效应计算，即结构分析；② 结构作

钢结构设计原理 GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

为工程系统正常运行的可靠性确定,即可靠分析。无论从结构分析方法演进的历史,还是从其未来发展的趋势上看,只有将结构分析与可靠性分析两者相结合,相得益彰,才能使结构设计方法逐步前进,臻于完善。

钢结构设计方法的发展历程可描述为:容许应力法→塑性设计法→极限状态法。

1. 容许应力法(ASD)

ASD的设计原则是:结构构件的计算应力不得大于结构设计规范所给定的容许应力。结构构件的计算应力是按规范规定的标准荷载,以一阶段弹性理论计算得到;容许应力则是用一个由经验判断的大于1的安全系数去除以材料的屈服应力或极限应力而确定的。

ASD设计公式的通式为

$$\sum S_{ni} \leq [\sigma] = \frac{R_n}{K}$$

式中 $[\sigma]$ ——材料的容许应力;

R_n ——材料的屈服应力或极限应力的标准值;

K ——安全系数;

S_n ——结构构件在某一工况下由荷载标准值求得的计算应力;

n ——工况数;

i ——某一工况下的荷载数。

容许应力法的主要优点是计算简单,但存在如下主要缺陷:

- (1) 对于塑性材料,由于没有考虑结构在塑性阶段的承载潜力,其实际安全水平偏高;
- (2) 不能合理考虑结构几何非线性的影响;
- (3) 由于采用单一安全系数,无法有效地反映抗力和荷载变异的独立性,致使承受不同类型荷载的结构的安全水平相差甚远(如活载的变异性要比恒载的变异性大得多);
- (4) 不能定量地测试结构的可靠度,更不能使各类结构的安全度达到同一水准。

2. 塑性设计法(PD)

PD的设计原则是:结构构件的塑性极限承载力应力不低于标准荷载引起的构件内力乘以安全系数。在结构分析中常采用一阶塑性分析法或刚塑性分析法。

PD设计公式的通式为

$$K \cdot \sum S_{ni} \leq R_n$$

式中 R_n ——考虑结构材料的塑性性质及其极限强度而确定的极限承载力;

其他符号含义同前。

塑性设计法的主要优点是允许结构在进入塑性后进行内力重分布。这就要求结构和构件有足够的延性,因而对塑性设计截面腹板和翼缘的尺寸比例有严格的限制。虽然塑性设计方法考虑了材料的非线性,可克服容许应力法的缺陷(1),但材料屈服点的扩展和结构构件的稳定性在结构设计中仍然没有得到反映。同时在结构可靠性方面,塑性设计法同容许应力法一样,还是由经验性的安全系数来保证的。

3. 极限状态设计法 (LRFD)

为了克服上述缺陷,采用抗力和荷载分项系数代替原来单一安全系数的极限状态设计法,已成为世界各国现行的主要设计方法。由于荷载的作用,结构在使用周期内有可能达到各种极限状态,这些极限状态可分为两类:承载能力极限状态和正常使用极限状态。

极限状态设计法将影响结构功能的诸因素作为随机变量,因而对所设计的结构的功能也只给出一定的概率保证,即认为任何设计都不能保证绝对安全,而是存在着一定风险的。但是,只要失效概率小到人们可以接受的程度,便可以认为所设计的结构是安全的。基于这种认识,在结构的可靠性与经济性之间达到合理的设计方法即称为概率极限状态设计法。

结构的安全性对应结构的限载能力极限状态,包括构件断裂、失稳、过大的塑性变形等所导致的结构破坏。极限状态设计法就是要求保证结构在使用期内不超越各种极限状态。

若结构或构件的某一部分超过某一特定状态后,就不能满足某一规定的功能要求,则此特定状态称为该功能的极限状态。

结构的4种基本功能包括:

- (1) 能承受在正常使用和施工时可能出现的各种作用;
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能;
- (3) 具有足够的耐久性;
- (4) 在偶然事件发生时及发生后,能保持必需的整体稳定性。

其中,第(1)项和第(4)项是结构安全性要求,第(2)项是结构适用性要求,第(3)项是结构耐久性要求。

结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的能力,称为结构的可靠性。结构的可靠性是结构安全性、适用性和耐久性的总称;可靠度则是可靠性的度量。

结构必须满足设计规定的各项功能。这些功能可用功能函数描述。若结构设计时需要考虑的影响结构可靠性的随机变量有 n 个,即 x_1, x_2, \dots, x_n ,则通常可建立函数关系:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

此函数称为功能函数。

在简单的设计场合,仅以结构抗力 R 和荷载效应 S 两个基本随机变量来表达功能函数,即

$$Z = R - S$$

式中 R ——结构抗力,指结构或构件承受内力和变形的能力,如构件的承载能力、刚度等(结构抗力是结构或构件的材料性能、几何参数和计算模式的函数);

S ——作用效应,指结构上的作用引起的结构或其构件的内力和变形,如弯矩、剪力、轴力、扭矩和应力以及挠度、转角和应变等(当作用为荷载时,其效应称为荷载效应)。

由于影响结构抗力 R 和作用效应 S 的各种因素都是独立的随机变量,所以结构抗力和作用效应也是随机变量。结构或构件的极限状态可用功能函数 $Z = R - S$ 来描述:

当 $Z < 0$,即 $R < S$ 时,结构或构件处于失效状态;

当 $Z > 0$,即 $R > S$ 时,结构或构件处于可靠状态;

钢结构设计原理
GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

当 $Z = 0$ ，即 $R = S$ 时，结构或构件处于极限状态。

$Z = R - S = 0$ 称为结构的极限状态方程。

结构或构件的失效概率，可以用下列公式表示：

$$P_f = P(Z = R - S < 0)$$

只要使通过上式计算出的结构或构件的失效概率 P_f 小到人们可以接受的程度，就可以认为结构设计是可靠的。

但直接应用结构可靠度或失效概率的方法进行计算比较复杂，因此，目前各国在确定可靠性指标时都采用“校准法”，通过对原有的规范作反演，找出隐含在现有工程中相应的可靠指标值。对钢结构各类主要构件校准的结果，可靠度指标 β 一般为 3.16 ~ 3.62。

《建筑结构设计统一标准》规定的可靠性指标 β 见表 1.3.1。

表 1.3.1 可靠性指标 β 和相应的失效概率 P_f

破坏类型	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：括号内的数据为失效概率。

钢结构连接的承载能力极限状态经常是强度破坏，可靠性指标较构件为高，推荐取 $\beta = 4.5$ 。LRFD 设计公式的通式为

$$\sum \gamma_i \cdot S_{ni} \leq \varphi \cdot R_n$$

式中 R_n ——结构构件抗力标准值；

S_n ——荷载效应的标准值；

φ ——抗力分项系数；

γ_i ——荷载分项系数。

它们是通过概率分析和可靠度校核得到的，同经验性的安全系数相比，在概念上有本质的区别。在极限状态设计法中，可进行二阶分析，考虑几何非线性的影响，从而克服容许应力法的缺陷（2）。在结构的可靠性方面，由于采用不同的荷载分项系数和极限状态方程，极限状态设计法从根本上克服了容许应力法的缺陷（3），使结构构件具有比较一致的可靠度水平。

1.3.2 《钢结构设计规范》的设计方法

《钢结构设计规范》采用的是用分项系数表示的极限状态法。

各种承重结构均应按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

（1）承载能力极限状态（状态 1）：当结构或结构构件达到最大承载能力或达到不适于继续承载的变形时的极限状态。可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态，超过此极限状态，结构将破坏。这种状态包括以下情况：

① 结构或构件达到最大承载能力极限状态，如强度、稳定和疲劳破坏等；

② 结构或构件达到不适于继续承载的变形极限状态，如受压构件的过大变形、结构倾覆等。

(2) 正常使用极限状态(状态 2): 结构或构件达到正常使用或耐久性能(刚度、锈蚀等)的某项规定限值时的状态。可理解为结构或构件并未破坏，而是达到使用功能上允许的某个限值的状态。

对于状态 1，按荷载效应基本组合(必要时考虑偶然组合)进行强度和稳定设计时，采用式(1.3.1)进行计算。

$$\gamma_0 \left(\sigma_{Gd} + \sigma_{Qid} + \psi_c \sum_{i=2}^n \sigma_{Qid} \right) \leq f \quad (1.3.1)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数，根据结构或构件的安全等级，按《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)规定选用(对安全等级为一级或设计使用上限为 100 年及以上的结构构件，不应小于 1.1；对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件，不应小于 1.0；对于设计使用年限为 25 年的结构构件，不应小于 0.95；对安全等级为三级或设计使用年限为 5 年的结构构件，不应小于 0.9)；

σ_{Gd} ——永久荷载设计值 G_d 在构件截面产生的应力， $G_d = \gamma_G \cdot G_k$ (G_k 为永久荷载标准值， γ_G 为永久荷载分项系数，当其效应对结构不利时，由永久荷载效应控制采用 1.35，由可变荷载效应控制采用 1.2；对结构有利时采用 1.0，对结构的倾覆、滑移或漂浮检算时取 0.9)；

σ_{Qid} ——第 i 个可变荷载设计值 Q_{id} 在构件截面产生的应力， $Q_{id} = \gamma_{Qi} \cdot Q_{ik}$ (Q_{ik} 为第 i 个可变荷载标准值， γ_{Qi} 为第 i 个可变荷载分项系数，一般情况采用 1.4，对标准值大于 4 kN/m^2 的工业房屋楼面结构的活荷载应取 1.3)；

ψ_c ——可变荷载组合系数，有风荷载参加组合时取 0.6，否则按《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)的各章规定取用；

f ——构件或连接的设计强度值， $f = f_k / \gamma_R$ (f_k 为材料强度标准值，对于钢材 $f_k = f_y$ ， f_y 为钢材的屈服强度； γ_R 为抗力(材料)分项系数，Q235 钢和 Q345 钢取 1.087，Q390 钢取为 1.111)。

对于正常使用极限状态，结构或构件的相关计算应按荷载的短期效应组合公式进行：

$$w = \left(w_{Gk} + w_{Q1k} + \psi_c \sum_{i=2}^n w_{Qik} \right) \leq [w]$$

式中 w ——结构或构件中产生折变形值；

w_{Gk} ——永久荷载标准值在结构或构件中产生的变形值；

w_{Qik} ——第 i 个可变荷载在结构或构件中产生的变形值；

$[w]$ ——结构或构件的容许变形值(或容许长细比)。

计算构件强度、连接强度及构件稳定性时，应采用荷载设计值；计算疲劳和变形时，应采用荷载标准值(即不考虑荷载分项系数)。