



工业和信息化部“十二五”规划教材
黑龙江省精品图书出版工程项目

钢结构原理

GANGJIEGOUYUANLI

陈树华 张建华 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

钢结构原理

陈树华 张建华 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了钢结构设计的基本原理和方法。是结合《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)和作者多年的教学经验而编写的。

全书共分七章,主要包括:绪论、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、普通钢屋架设计。各章附有内容提要、规范参阅、学习指南、习题(包括单项选择题、简答题和计算题),书后附有相关附表。

本书可作为高等院校土木工程、船舶与海洋工程、水利水电工程等专业本科生教材或参考书,也可供从事上述专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构原理/陈树华,张建华主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2015.5
ISBN 978-7-5661-1018-3

I. ①钢… II. ①陈… ②张… III. ①钢结构-理论
IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 074998 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 24.75
插 页 1
字 数 654 千字
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
定 价 57.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书根据全国高校土木工程学科专业指导委员会制定的教学大纲和应用型土木工程专业的培养目标编写,结合作者多年的教学经验,全面参照我国现行最新规范《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)对全书内容进行梳理,突出核心知识单元体系,强调理论与实践并重,各章以知识点为主线列出内容提要、学习指南,和相关规范的条款规定,使本教材更具有新颖性、专业性和实用性。

全书共分为七章,包括:绪论、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、普通钢屋架设计。主要讲述了钢结构的特点和设计方法、钢结构材料的工作性能、钢结构连接的计算和构造,以及钢结构的基本构件(轴心受力构件、受弯构件和拉压弯构件)的工作性能、计算方法和设计要点。为了利于读者对基本概念的理解、设计原理和方法掌握,书中各章均有大量的计算和设计例题,并给出详细的分析;为了强化学生对知识点的理解,各章附有多类型习题(包括单项选择题、简答题和计算题),书后附有相关附表,便于读者查阅。

本书是高等院校土木工程专业的本科教材,也可以供桥梁、水利、港口、地下和建筑工程等专业人员参考使用。

本书由陈树华、张建华共同主编,陈树华负责编写本书的第1,2,4,5章,张建华负责编写第3,6,7章和附录。

感谢本书所引用和参考资料的作者,感谢研究生王启宇、谢逸群、木标为本书插图和校对所做的工作。

感谢工业与信息化部、哈尔滨工程大学、哈尔滨工程大学出版社领导和有关人员对本书出版的鼎力支持。

限于编者水平,书中不当之处,希望读者给予批评指正。

编 者

于哈尔滨工程大学

2014年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 钢结构的特点	1
1.2 钢结构的分类和应用	3
1.3 钢结构的设计方法	5
1.4 钢结构设计的发展方向	10
第2章 钢结构材料	19
2.1 钢材的破坏形式	20
2.2 钢材的生产	20
2.3 钢材的主要性能	25
2.4 影响钢材性能的主要因素	28
2.5 建筑用钢的种类、规格和选用	37
第3章 钢结构的连接	46
3.1 钢结构的连接方法	47
3.2 焊接连接的方法与形式	49
3.3 对接焊缝的构造和计算	55
3.4 角焊缝的构造和计算	61
3.5 焊接残余应力和焊接变形	84
3.6 普通螺栓的构造和计算	90
3.7 高强度螺栓连接的构造和计算	106
第4章 轴心受力构件	120
4.1 轴心受力构件的应用	121
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	123
4.3 轴心受压构件的整体稳定	126
4.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定	141
4.5 实腹式轴心受压构件的设计	145
4.6 格构式轴心受压构件的设计	151
4.7 轴心受压柱的柱头和柱脚	165
第5章 受弯构件	178
5.1 受弯构件的形式和应用	179
5.2 受弯构件的强度和刚度	181
5.3 受弯构件的整体稳定	187
5.4 受弯构件的局部稳定和腹板加劲肋设计	196
5.5 组合梁考虑腹板屈曲后强度的设计	211

5.6	受弯构件的截面设计	216
5.7	梁的拼接、连接和支座	225
第 6 章	拉弯和压弯构件	234
6.1	拉弯和压弯概述	234
6.2	拉弯和压弯构件的强度和刚度	236
6.3	实腹式压弯构件的整体稳定	239
6.4	实腹式压弯构件的局部稳定	247
6.5	实腹式压弯构件的截面设计	250
6.6	格构式压弯构件的强度、刚度和稳定性	254
6.7	柱脚设计	259
第 7 章	普通钢屋架设计	267
7.1	屋架的选型及结构特点	268
7.2	屋盖支撑体系	269
7.3	普通钢屋架设计	275
7.4	钢屋架设计实例	299
附录		316
附录 A	疲劳计算的构件和连接分类	316
附录 B	钢材和连接强度设计值	319
附录 C	螺栓和锚栓规格	323
附录 D	常用型钢规格和截面特征	324
附表 E	轴心受压构件的稳定系数	371
附录 F	各种截面回转半径的近似值	375
附录 G	结构或构件的变形容许值	377
附表 H	梁的整体稳定系数	378
附录 I	柱的计算长度系数	382
附表 J	Q235 钢(Q345 钢)锚栓规格	384
参考文献		387

第 1 章 绪 论

【内容提要】

本章论述了钢结构的特点和钢结构应用范围,介绍了钢结构的主要发展方向,和钢结构设计方法及其设计表达式的应用。

【规范参阅】

- ◆《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008);
- ◆《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001);
- ◆《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中第 3.1.1~3.1.6 条、3.2.1 条;
- ◆《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中第 3.9.2 条;
- ◆《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中第 3.2.2 条~3.2.10 条。

【学习指南】

知识要点	能力要求	相关知识
钢结构优点	掌握钢结构优点	高强轻质、塑性韧性好、良好可焊性、良好装配性、钢材不渗漏性、钢材重复使用
钢结构缺点	掌握钢结构缺点	耐腐蚀性差、耐火性差
钢结构分类	了解钢结构的分类	按应用领域分、按结构工作特点分
极限状态	熟练掌握承载能力极限状态和正常使用极限状态的适用计算表达式	承载能力极限状态、正常使用极限状态、失效概率、可靠指标、结构重要性系数、荷载分项系数、永久荷载分项系数取值、可变荷载分项系数取值
钢结构发展方向	了解钢结构发展的主要方向	高性能钢材研究、结构计算方法、结构形式创新、预应力钢结构、空间结构、钢-砼组合结构、高层钢结构、新型节点应用

钢结构是以钢板、钢管、热轧型钢或冷加工成型的型钢通过焊接、铆钉或螺栓连接而成的结构。

1.1 钢结构的特点

钢结构与其他结构相比具有下列特点:

1. 钢材强度高而质量小

钢的容重较大,但强度高,结构需要的构件截面小,因此钢结构自重轻。与其他材料相比,钢的容重与屈服点的比值最小。在相同的荷载和约束条件下,若采用钢材构建时,结构的自重通常较小。一般而言,当跨度和荷载相同时,钢屋架的质量仅有钢筋混凝土屋架质

量的 $1/4 \sim 1/3$, 若采用薄壁型钢屋架或空间结构则更轻。由于质量较小, 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。

2. 钢材材质均匀, 塑性韧性好

钢材的内部组织比较均匀, 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。在使用应力阶段, 钢材的弹性模量高达 206 GPa, 在正常使用情况下具有良好的延性, 可简化为理想弹塑性体, 符合一般工程力学基本假定。因此, 钢结构的实际受力情况和工程力学计算结果比较符合, 可靠性高。钢材塑性、韧性好, 塑性是指承受静力荷载时, 材料吸收变形能的能力; 韧性是指承受动力荷载时, 材料吸收能量的多少。由于钢材的塑性好, 钢结构一般情况下不会由于偶然超载而突然断裂, 而是在事先有较大的变形作为预兆; 韧性好, 说明钢材具有良好的动力工作性能, 使得钢结构具有优越的抗震性能。

3. 建筑用钢材具有良好的焊接性能

建筑用钢材具有良好的焊接性能, 使得钢结构的连接大为简化, 可满足制造各种复杂结构形状的需求, 但钢材焊接时产生很高的温度, 且温度分布很不均匀, 结构各部位的冷却速度也不同。因此, 在高温区(焊缝附近)不但材料性质有变坏的可能, 而且还会产生较高的焊接残余应力, 使结构中的应力状态复杂化。

4. 钢结构制造简便、施工方便, 具有良好的装配性

钢结构由各种型材制作, 采用机械加工, 在专业化的金属结构厂制造, 制造简便, 成品的精确度高。制成的构件可运到现场拼装, 采用螺栓连接。因结构较轻, 故施工方便, 建成的钢结构也易于拆卸、加固或改建。

钢结构的制造虽需较复杂的机械设备和严格的工艺要求, 但与其他建筑结构比较, 钢结构工业化生产程度最高, 能批量生产。采用厂制造、工地安装的施工方法, 可缩短工期、降低造价、提高经济效益。

5. 钢材可重复使用

钢结构加工制造过程中产生的余料和碎屑, 以及废弃和破坏的钢结构或构件, 均可回炉重新冶炼成钢材重新使用。因此, 钢材被称为绿色建筑材料或可持续发展的材料。

6. 钢材的密闭性好

钢材本身因组织非常致密, 当采用焊接连接, 甚至铆钉或螺栓连接时, 都易做到紧密不渗漏。因此钢材是制造容器, 特别是高压容器、大型油库、气柜、输油管道的良好材料。

7. 钢材耐腐蚀性差, 应采取防护措施

钢材在潮湿环境中, 特别是处于有腐蚀性介质的环境中容易腐蚀, 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。

8. 钢结构的耐热性好, 但耐火性差

钢材耐热而不耐火, 随着温度的升高, 强度降低。温度在 250°C 以内时, 钢的性质变化很小; 温度达到 300°C 以后, 其强度逐渐下降; 温度达到 $450^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 时, 其强度为零。因此, 钢结构的耐火性较钢筋混凝土差。当周围环境存在辐射热, 温度在 150°C 以上时, 就需采取遮挡措施。

1.2 钢结构的分类和应用

1.2.1 按应用领域分类

1. 民用建筑钢结构

建设部于1997年颁布的《1996—2010年建筑技术政策》首次提出了“发展钢结构、加速推广轻钢结构,研究推广组合结构的应用以及研究开发膜结构、张拉结构与空间结构体系”等技术措施,明确了我国建筑技术政策的导向,即由多年来的限制钢结构使用转变为发展、推广钢结构的应用。近年来我国钢结构行业快速发展,产量、产值成倍增加的同时,工程质量不断提高,钢结构相关技术和管理水平也有了显著的进步,在诸如制造、安装、钢材供应等方面达到了国内外先进水平,为国民经济发展做出了贡献。

民用建筑钢结构以房屋钢结构为主要对象。按传统的耗钢量大小来区分,大致可分为普通钢结构、重型钢结构和轻型钢结构。其中重型钢结构指采用大截面和厚板的结构,如高层钢结构、重型厂房和某些公共建筑等;轻型钢结构指采用轻型屋面和墙面的门式钢架房屋、某些多层建筑、薄壁压型钢板拱壳屋盖等,网架、网壳等空间结构也可属于轻型钢结构范畴。除上述钢结构主要类型外,另外还有索膜结构、玻璃幕墙支承结构、组合和复合结构等。

我国在“十一五”期间,建筑钢结构发展已取得巨大成绩,“十二五”期间仍将继续坚持鼓励发展钢结构的相关政策措施,保持其连续性和稳定性。推广和扩大钢结构的应用,要加强科技导向的规划和措施指导作用,促使钢结构整体的持续发展。高层和超高层建筑优先采用合理的钢结构或钢-混凝土组合结构体系,大跨度建筑积极采用空间网格结构、立体桁架结构、索膜结构以及施加预应力的结构体系,结合市场需求,积极开发钢结构的住宅建筑体系,并逐步实现产业化。在以后相当长的一段时间内,钢结构的需求将保持持续增长的趋势。

按照中国钢结构协会的分类标准,民用建筑结构分为高层钢结构、大跨度空间钢结构、钢-混凝土组合结构、索膜钢结构、钢结构住宅、幕墙钢结构等。

2. 一般工业建筑钢结构

一般工业建筑钢结构主要包括单层厂房、多层厂房等,用于重型车间的承重骨架,例如冶金工厂的平炉车间、初轧车间、混凝土炉车间,重型机械厂的铸钢车间、水压机车间、锻压车间,造船厂的船体车间,电厂的锅炉框架,飞机制造厂的装配车间,以及其他工厂跨度较大的车间屋架、吊车梁等。我国鞍钢、武钢、包钢和上海宝钢等几个著名的冶金联合企业的许多车间都采用了各种规模的钢结构厂房,上海重型机器厂、上海江南造船厂中也都有高大的钢结构厂房。

3. 桥梁钢结构

钢桥建造简便、迅速,易于修复,因此钢结构广泛应用于中等跨度和大跨度桥梁,著名的杭州钱塘江大桥(1934—1937年)是我国最早的自行设计的钢桥。此后的武汉长江大桥(1957年)、南京长江大桥(1968年)均为钢结构桥梁,其规模和难度都举世闻名,标志着我国钢结构桥梁事业已步入世界先进行列。20世纪90年代以来,我国连续刷新桥梁跨度的

纪录,现在建设的钢桥已不再是原来意义上的全钢结构,而是包含了钢-混凝土组合结构、钢管混凝土结构及钢筋混凝土结构。现在我国钢桥的建设正处于迅速发展的阶段,不管是铁路钢桥、公路桥梁还是市政桥梁,从材料的开发应用、科研成果的应用,到设计水平、制造水平、施工技术水平的提高,都取得了长足发展,并与钢桥建设的规模相适应。我国新建和在建的钢桥,其建筑跨度、建筑规模、建筑难度和建筑水平都达到了一个新的高度,如苏通长江大桥、上海长江大桥、南京第二长江大桥、九江长江大桥等。

4. 密闭压力容器钢结构

密闭压力容器钢结构主要用于要求密闭的容器,如大型储液库、煤气库等炉壳,要求能承受很大内力,另外温度急剧变化的高炉结构、大直径高压输油管和煤气管道等均采用钢结构。上海在1958年就建成了容积为 $54\,000\text{ m}^3$ 的湿式储气柜。上海金山及吴泽等石油、化工基地有众多的容器结构。一些容器、管道、锅炉、油罐等的支架也都采用钢结构。锅炉行业近几年来得到了迅猛的发展,特别是由于经济发展的需要,发电厂的锅炉都向着大型化的方向发展。

5. 塔桅钢结构

塔桅钢结构是指高度较大的无线电桅杆、微波塔、广播和电视发射塔架、高压输电线路塔架、化工排气塔、石油钻井架、大气监测塔、火箭发射塔等。

6. 船舶海洋钢结构

人类在开发和利用海洋活动中,形成了海洋产业,发展了种类繁多的海洋工程结构物。人们一般将江、河、湖、海中的结构物统称为海洋钢结构,海洋钢结构主要用于资源勘测、采油作业、海上施工、海上运输、海上潜水作业、生活服务、海上抢险救助以及海洋调查等。

船舶海洋钢结构基本上可分为舰船和海洋工程装置两大类。近些年,我国研制了高技术、高附加值的大型与超大型新型船舶,以及具有先进技术的战斗舰船和具有高风险、高投入、高回报、高科技、高附加值的海洋工程装置等。

7. 水利钢结构

我国近年来大力加快基础建设,在建和拟建相当数量的水利枢纽,钢结构在水利工程中占有相当大的比重。

钢结构在水利工程中用于以下方面:①钢闸门,用来关闭、开启或局部开启水工建筑物中过水孔口的活动结构;②拦污栅,主要包括拦污栅栅叶和栅槽两部分,栅叶结构是由栅面和支承框架所组成的;③升船机,是不同于船闸的船舶通航设施;④压力管,是从水库、压力前池或调压室向水轮机输送水流的水管。

8. 煤炭电力钢结构

发电厂中的钢结构主要应用在以下方面:干燥棚、运煤系统皮带机支架(输煤栈桥)、火电厂主厂房、管道、烟风道及钢支架、烟气脱硫系统、粉煤灰料仓、输电塔,风力发电中的风力机支撑结构,垃圾发电厂中的焚烧炉,核电站中的压力容器、钢烟囱、水泵房、安全壳等。

9. 钎具和钎钢

钎具也可称为钻具,由钎头、钎杆、连接套、钎尾组成。它是钻凿、采掘、开挖用的工具,有近千个品种规格,用于矿山、隧道、涵洞、采石、城建等工程中。钎钢是制作钎具的原材料,也有近百个品种规格。钎具按照凿岩工作的方式分为冲击式钎具、旋转式钎具、刮削式

钎具等。随着经济建设的进一步发展,以及多处铁路、公路、水利水电、输气工程、市政基础设施的修建和开工,对钎钢、钎具产品提出了更高、更多、更新的要求。

10. 地下钢结构

地下钢结构主要用于桩基础、基坑支护等,如钢管桩、钢板桩等。

11. 货架、脚手架钢结构

超市中的货架和展览时用的临时设施多采用钢结构,还有建筑施工中大量使用的脚手架都采用钢结构。

12. 雕塑和小品钢结构

钢结构因其轻盈简洁的外观而备受景观师的青睐,不仅很多雕塑是以钢结构作为骨架,而且很多城市小品和标志物的造型都是直接用钢结构完成的。

1.2.2 按结构体系工作特点分类

1. 梁状结构

梁状结构是由受弯曲工作的梁组成的结构。

2. 刚架结构

刚架结构是由受压、弯曲工作的梁和柱组成的框形结构。

3. 拱架结构

拱架结构是由单向弯曲形构件组成的平面结构。

4. 桁架结构

桁架结构主要是由受拉或受压的杆件组成的结构。

5. 网架结构

网架结构是由受拉或受压的杆件组成的空间平板形网格结构。

6. 网壳结构

网壳结构主要是受拉或受压的杆件组成的空间曲面形网格结构。

7. 预应力钢结构

预应力钢结构是由张力索或链杆和受压杆件组成的结构。

8. 悬索结构

悬索结构是以张拉索为主组成的结构。

9. 复合结构

复合结构是由上述八种类型中的两种及两种以上结构构件组成的新型结构。

1.3 钢结构的设计方法

钢结构设计中必须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。结构计算的一般过程是根据拟定的结构方案和构造,按所承受的荷载进行内力计算,确定出各杆件的内力,再根据所用材料的特性,对整个结构和构件及其连接进行

核算,看其是否符合经济、安全、适用等方面的要求。但从一些现场记录、调查数据和试验资料看来,计算中所采用的标准荷载和结构实际承受的荷载之间、钢材力学性能的取值和材料实际数值之间、计算截面和钢材实际尺寸之间、计算所得的应力值和实际应力数值之间,以及估计的施工质量与实际质量之间,都存在着一定的差异,所以计算的结果不一定安全可靠。为了保证安全,结构设计时的计算结果必须留有余量,使之具有一定的安全度。

钢结构设计内容包括:①结构方案设计,包括结构选型、构件布置;②材料选用;③作用及作用效应分析;④结构的极限状态验算;⑤结构、构件及连接的构造;⑥抗火设计;⑦制造、安装、防腐和防火等要求;⑧满足特殊要求结构的专门性能设计。

1.3.1 钢结构计算方法

我国钢结构的计算方法,自新中国成立以来有过四次变化,即建国初期到1957年,采用总安全系数的容许应力计算法;1957—1974年采用三个系数的极限状态计算方法;1974—1988年采用以结构的极限状态为依据,进行多系数分析,用单一安全系数的容许应力计算法;1988—2003年采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法。

1957年前,钢结构采用容许应力的安全系数法进行设计。安全系数为定值且都凭经验选定,因而设计的结构和不同构件的安全度不可能相等,这种设计方法显然是不合理的。

20世纪50年代,出现了极限状态设计法,即根据结构或构件能否满足功能要求来确定它们的极限状态。一般规定有两种极限状态。第一种是结构或构件的承载力极限,包括静力强度、动力强度和稳定等计算。达到此极限状态时,结构或构件达到了最大承载能力而发生破坏,或达到了不适应继续承受荷载的巨大变形。第二种是结构或构件的变形极限状态,或称为正常使用极限状态。达到此极限状态时,结构或构件虽仍保持承载能力,但在正常荷载作用下产生的变形使结构或构件已不能满足正常使用的要求(静力作用产生的过大变形和动力作用产生的剧烈振动等),或不能满足耐久性的要求。各种承重结构都应按照上述两种极限状态进行设计。

极限状态设计法比安全系数设计法要合理些,也先进些。它把有变异性的设计参数采用概率分析引入了结构设计中。根据应用概率分析的程度可分为三种水准类型:

水准Ⅰ——即半概率极限状态设计法。只有少量设计参数,如钢材的设计强度、风雪荷载等,采用概率分析确定其设计采用值,大多数荷载及其他不定性参数由于缺乏统计资料而仍采用经验值;同时结构构件的抗力(承载力)和作用效应之间并未进行综合的概率分析,因而仍然不能使所设计的各种构件得到相同的安全度。

水准Ⅱ——近似概率极限状态设计法。对结构可靠性赋予概率定义,以结构的失效概率或可靠指标来度量结构的可靠性,并建立了结构可靠度与结构极限状态方程之间的数学关系,在计算可靠指标时考虑了基本变量的概率分布型,并采用了线性化的近似手段,在设计截面时一般采用分项系数的适用设计表达式。

水准Ⅲ——全概率极限状态设计法。这是完全基于概率论的结构整体优化设计方法,要求对整个结构采用精确的概率分析,求得结构最优失效概率作为可靠度的直接度量,由于这种方法无论在基础数据的统计方面还是在可靠度计算方面都不成熟,目前尚处于探索阶段。

1.3.2 承载力极限状态

承载能力极限状态包括:构件或连接的强度破坏、疲劳破坏、脆性断裂、因过度变形而不适用于继续承载,结构或构件丧失稳定、结构转变为机动体系和结构倾覆。计算结构或构件的强度、稳定性以及连接的强度时,应采用荷载设计值(荷载标准值乘以荷载分项系数);计算疲劳时,应采用荷载标准值。

1. 近似概率极限状态设计法

结构或构件的承载力极限状态方程可表达为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \quad (1-1)$$

式中, x_i 为影响结构或构件可靠性的物理量。

式中各量都是相互独立的随机变量,例如材料抗力、几何参数和各种作用产生的效应(内力)。其中各种作用包括恒载、各种可变荷载、地震、温度变化和支座沉降等。

如将各因素概括为两个综合随机变量,即结构或构件的抗力只和各种作用对结构或构件产生的效应 S , 式(1-1)可写成

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (1-2)$$

结构或构件的失效概率可表示为

$$p_i = g(R - S) < 0 \quad (1-3)$$

设 R 和 S 的概率统计值均服从正态分布(设计基准期取 50 年),可分别算出它们的平均值 μ_R, μ_S 和标准差 σ_R, σ_S , 则极限状态函数 $Z = R - S$ 也服从正态分布,它的平均值和标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (1-4)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-5)$$

图 1.1 表示极限状态函数 $Z = R - S$ 的正态分布,图中由 $-\infty$ 到 0 的阴影面积表示 $g(R - S) < 0$ 的概率,即失效概率 p_i 需采用积分法求得。由图 1.1 可见,平均值 μ_Z 等于 $\beta\sigma_Z$, 显然 β 值和失效概率 p_i 存在对应关系: $p_i = \varphi(-\beta)$

$$(1-6)$$

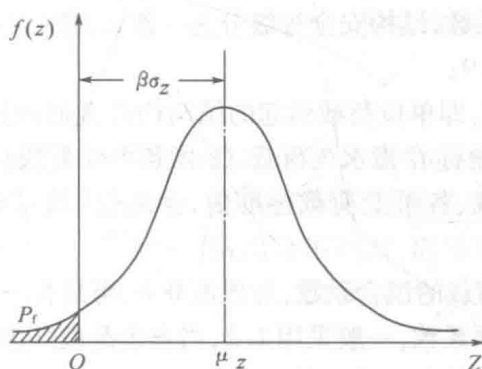


图 1.1 $Z = R - S$ 的正态分布

这样,只要计算出 β 值就能获得对应的失效概率 p_i (见表 1.1)。 β 称为可靠指标,由式(1-7)计算

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-7)$$

表 1.1 失效概率与可靠指标的对应

β	2.5	2.7	3.2	3.7	4.2
p_f	5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}

当 R 和 S 的统计值不按正态分布时,结构构件的可靠指标应以它们的当量正态分布的平均值和标准差代入式(1-7)来计算。

由于 R 和 S 的实际分布规律相当复杂,采用典型的正态分布,因而算得的 β 和 p_f 值是近似的,故称为近似概率极限状态设计法。在推导 β 公式时,只采用了 R 和 S 的二阶中心矩,同时还做了线性化的近似处理,故此设计法又称“一次二阶矩法”。

这种设计方法只需知道 R 和 S 的平均值和标准差或变异系数,就可以计算构件的安全指标 β 值,再使 β 值满足规定值即可。我国采用的安全指标为 Q235 钢 $\beta = 3 \sim 3.1$,对应的失效概率 $p_f = 0.001$; Q345 钢 $\beta = 3.2 \sim 3.3$,对应的失效概率 $p_f = 0.0005$ 。

由式(1-1)~(1-7)可见,此法将构件的抗力(承载力)和作用效应的概率分析联系在一起,以安全指标作为度量结构构件安全度的尺度,可以较合理地对各类构件的安全度做定量分析比较,以达到等安全度的设计目的。但是这种设计方法比较复杂,较难掌握,很多人也不习惯,因而仍宜采用广大设计人员所熟悉的分项系数设计公式。

2. 分项系数表达式

因为 $S = G + Q_1 + \sum_{i=2}^n \varphi_{c_i} Q_i$, 取 $G = \gamma_G C_G G_K$, $Q_1 = \gamma_{Q_1} C_{Q_1} G_{1K}$, $Q_i = \gamma_{Q_i} C_{Q_i} G_{iK}$, 引入结构重要系数,则

$$S = \gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q_1} C_{Q_1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \varphi_{c_i} \gamma_{Q_i} C_{Q_i} Q_{iK}) \quad (1-8)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,结构安全等级分为一级、二级、三级,结构重要系数分别采用 1.1、1.0 和 0.9;

C ——荷载效应系数,即单位荷载引起的结构构件截面或连接中的内力,按一般力学方法确定(其角标 G 指永久荷载, Q_i 指各可变荷载);

G_K, Q_{iK} ——永久荷载、各可变荷载标准值,参阅《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012);

φ_{c_i} ——第 i 个可变荷载的组合系数,一般取 0.6,当只有一个可变荷载时取 1.0;

γ_G ——永久荷载分项系数,一般采用 1.2,当永久荷载效应对结构构件的承载力有利时,宜采用 1.0;

γ_Q, γ_{Q_i} ——第 1 个和其他第 i 个可变荷载分项系数,一般情况可采用 1.4。

一般而言,式中 Q 是引起构件或连接最大荷载效应的可变荷载效应。对于一般排架和框架结构,由于很难区分产生最大效应的可变荷载,可采用简化计算公式

$$S = \gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \varphi \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} C_{Q_i} Q_{iK}) \quad (1-9)$$

式中,荷载组合系数 φ 取0.85。

构件本身的承载能力(抗力)只是材料性能和构件几何因素等的函数,即

$$R = f_k A / \gamma_R = f_d A \quad (1-10)$$

式中 γ_R ——抗力分项系数,Q235钢和Q345钢取1.087,Q390钢取1.111;

f_k ——材料强度的标准值,Q235钢第一组为235 MPa,Q345钢第一组为345 MPa,Q390钢第一组为390 MPa;

f_d ——结构所用材料和连接的设计强度;

A ——构件或连接的几何因素(如截面面积和截面抵抗矩等)。

考虑到一些结构构件和连接构件的特殊条件,构件承载力有时还应乘以调整系数。例如施工条件较差的高空安装焊缝和铆钉连接,应乘0.9;单面连接的单个角钢按轴心受力计算强度和连接时,应乘0.85等。

将式(1-8),(1-9),(1-10)带入式(1-2),得

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \leq f_d A \quad (1-11)$$

及

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_K + \varphi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \leq f_d A \quad (1-12)$$

考虑到设计工作者的习惯,将以上公式改写为应力表达式

$$\gamma_0(\sigma_{G_d} + \sigma_{Q_{1d}} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} \sigma_{Q_{id}}) \leq f_d \quad (1-13)$$

及

$$\gamma_0(\sigma_{G_d} + \varphi \sum_{i=1}^n \sigma_{Q_{id}}) \leq f_d \quad (1-14)$$

式中 σ_{G_d} ——永久荷载设计值($G_d = \gamma_G G_K$) in 结构构件的截面或连接中产生的应力;

$\sigma_{Q_{1d}}$ ——第1个可变荷载的设计值($Q_{1d} = \gamma_{Q1} Q_{1K}$) in 结构构件的截面或连接中产生的应力(该应力大于其他任意第*i*个可变荷载设计值产生的应力);

$\sigma_{Q_{id}}$ ——第*i*个可变荷载设计值($Q_{id} = \gamma_{Qi} Q_{iK}$) in 结构构件的截面或连接中产生的应力;

其余符号同前。

式(1-13)和(1-14)就是现行钢结构设计规范中采用的公式。

各分项系数是经过校准法确定的。所谓校准法,是使按式(1-11)计算的结果基本符合式(1-6)要求的可靠指标。不过当荷载组合不同时,应采用不同的各分项系数,才能符合 β 值的要求,这给设计带来困难。因此用优选法对各分项系数采用定值,从而使各不同荷载组合计算结果的 β 值相差为最小。

当考虑地震荷载的偶然荷载组合时,应按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的规定进行。

对于结构构件或连接的疲劳强度计算,由于疲劳极限状态的概念还不够确切,只能暂时沿用容许应力设计法,还不能采用上述的极限状态设计法。式(1-13)和式(1-14)虽然是用应力计算式表达的,但和过去的容许应力设计方法根本不同,是比较先进的一种设计方法。不过由于有些因素尚缺乏统计数据,暂时只能根据以往设计经验来确定。还有待于继续

研究和积累有关统计资料,才能进而采用更为科学的全概率极限状态设计法(水准三)。

1.3.3 正常使用极限状态

结构构件的第二种极限状态是正常使用极限状态。正常使用极限状态包括:影响结构、构件或非结构构件正常使用或外观的变形;影响正常使用的振动;影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括混凝土裂缝)。按正常使用极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的标准组合,对钢与混凝土组合梁,尚应考虑准永久组合。

钢结构设计主要控制变形和挠度,仅考虑短期效应组合,不考虑荷载分项系数。

$$v = v_{GK} + v_{Q_{1K}} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} v_{Q_{iK}} \leq [v] \quad (1-15)$$

式中 v_{GK} ——永久荷载标准值在结构或构件中产生的变形值;

$v_{Q_{1K}}$ ——第 1 个可变荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值(该值大于其他任意第 i 个可变荷载标准值产生的变形值);

$v_{Q_{iK}}$ ——第 i 个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值;

$[v]$ ——结构或构件的容许变形值,按钢结构设计规范的规定采用。

当只需要保证结构和构件在可变荷载作用下产生的变形能够满足正常使用的要求时,式(1-15)中的 v_{GK} 可不计入。

1.4 钢结构设计的发展方向

粗钢是指钢坯(矿石冶炼),即完成了冶炼过程未经塑性加工的钢。钢材是钢坯经过加工、添加合金、轧制成型后的成品材料。

1.4.1 我国房屋钢结构的发展

我国房屋钢结构的发展主要经历了以下阶段:

1. 初盛阶段(20 世纪 50 ~ 60 年代)

1949 年新中国刚成立,百废待兴,当时钢产量很低,每年仅 135 万吨(现已达 8 亿吨以上)。钢结构建设只有依靠苏联经济及技术援助,当时苏联援建 156 项重型工业工厂,包括冶金、重型机械、飞机汽车等工业,如鞍山钢铁厂,武汉钢铁厂、大连造船厂、哈尔滨飞机制造厂等。在短短几年里,建设了不少钢结构工业厂房(钢柱、钢屋架、吊车梁),培养了一大批设计、制造、安装方面的人才,为国家的发展打下坚实的基础。

2. 低潮阶段(20 世纪 60 年代中后期及 70 年代)

这个时期国家各部门钢结构需求量增加,但钢产量仍然不多,每年也只有 2 000 万吨,国家提出节约钢材的政策,当时有人片面理解为不用钢结构,于是钢结构数量减少。从国家整体上,也建造了一些大型的钢结构工程。由于节约钢材政策,平板网架工程得到推广应用,特别是焊接空心球节点研究成功,全国各地中小跨度的焊接球节点平板网架比比皆是,与此同时螺栓球节点网架也同样推广起来了。

3. 发展阶段(20 世纪 80 ~ 90 年代)

这 20 年应当是钢结构发展的兴盛期,由于钢结构具备一些独特优点,已成为建设工程

中的主要结构,特别是钢产量持续上升,1997年1亿吨,给我们发展钢结构创造了有利条件。1998年我们国家已能生产轧制H型钢,为钢结构提供了新的型钢系列,这时期钢结构工程发展主要有以下几个方面。

(1)单层厂房框架结构 规模较大的有钢铁厂、无缝钢管厂、火力发电厂等。其特点有面积大(20万平方米)、柱高度大(50米)、柱距大(48米)、连跨多(8跨)、吊车起重量大(450吨)等。

(2)空间结构 平板网架已广泛应用于大型体育场馆、会展中心、商场、航站楼、车站、仓库、工厂等。尤其是1990年亚运会场馆中大多数采用了焊接空心球节点平板网架。1996年北京首都机库(153米×153米,进深90米),焊接球节点四角锥三层网架。同年厦门太古机库150米×70米建成,大门口采用无黏结手动索拉杆拱。

(3)网壳结构 1994年天津体育馆($D=108$ 米)双层球面网壳;1997年长春体育馆(146米×191.8米)双层方钢管网壳、1995年黑龙江滑冰馆(86.2米×191.2米)中央柱面网壳两端半球壳。1995年四川攀枝花体育馆采用八边花瓣型双层网壳,跨度60米,采用多次预应力。这是国内首次采用多次预应力工程。1998年还建成上海国际体操中心主馆,采用铝合金球面网壳,直径68米。网架与网壳都有相应的设计规程。

(4)悬索结构 该结构发展较慢,只有少数工程采用,如山东淄博体育馆(54米)、安徽体育馆(53米×72米)、无锡体育馆(40米×43米)、吉林冰球馆等采用不同的索网体系。

(5)空间结构与拱、刚架组成的混合体系 亚运会的北京石景山体育馆(正三角形,边长99.7米)等,都是混合结构体系。

(6)膜及索膜结构 20世纪90年代后期得到一定的发展,现仍在不断地扩大作用,很有发展前景。如1998年建成的上海八万人体育馆看台等都是规模较大的索膜结构。

(7)高层建筑钢结构 高层建筑钢结构起步比较晚,1987年第一幢为165米高的深圳发展中心大厦,后来208米高的京广中心,1996年325米深圳地王大厦,1999年420米高的上海金茂大厦。

(8)轻钢结构 轻钢结构发展非常快,特别是门式刚架,如工业厂房、仓库、冷藏库、温室、旅馆、别墅等得到大量应用。轻钢结构住宅也开始研究并建造一些实验工程,很有发展前景。

4. 强盛时期(21世纪)

我国1996年粗钢产量突破1亿吨,2003年粗钢产量突破2亿吨,2005年粗钢产量突破3亿吨,2006年粗钢产量突破4亿吨,2008年粗钢产量突破5亿吨,而2009年粗钢产量达到5.678亿吨,占全球总产量的47%,2011年粗钢产量达到8.5亿吨,我国钢产量已跃居世界第一。这也给我们发展钢结构工程创造了有利条件。

传统的空间结构如网架、网壳等继续得到大力推广。新型空间结构开始得到广泛的应用,如张弦梁、张弦桁架、弦支穹顶等。上海浦东机场、哈尔滨会展中心、上海会展中心、广东会展中心等都采用超过100米的张弦桁架,这在世界上也极少见。特别是几个运动会、博览会更加大采用空间结构的力度,如2008年北京奥运会新建37个场馆,2009年山东济南全运会,2010年上海世博会及广州亚运会,2011年深圳大运会。值得一提的是2008年北京奥运会新建十一个场馆,它代表我国钢结构的技术水平:国家体育场(鸟巢)(292米×340米),由一系列超大跨度的门式刚架沿内环编制而成的空间结构,耗钢4.2万吨;国家游泳中心(水立方)(170米×70米×29米,异形多面体网格结构);国家体育馆(114米×144.5米双向张弦桁架结构);老山自行车馆(133米双层球面网壳);五棵松体育馆(120米×120