



21世纪高等院校
土木与建筑专业“十二五”规划教材

顾问：鲍文博

钢结构基本原理

主编 金生吉 白 泉 谷军明



中国建材工业出版社



21 世纪高等院校土木与建筑专业“十二五”规划教材

钢结构基本原理

主要内容

主 编 金生吉 白 泉 谷军明

副主编 王晓东 沈 璐 辛 浩

参 编 曾晓云 吴 英

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本原理 / 金生吉, 白泉, 谷军明主编. —

北京: 中国建材工业出版社, 2013.1

21 世纪高等院校土木与建筑专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5160-0393-0

I. ①钢… II. ①金… ②白… ③谷… 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(2013)第 019063 号

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等院校土木与建筑专业“十二五”规划教材。本书依据现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 的规定, 着重讲述了钢结构的基本原理, 主要内容包括钢材的基本性能、钢结构连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件的设计方法。为便于应用, 本书附录提供了设计常用的各种数据。各章还附带了必要的例题和习题, 便于读者学习掌握。

本书内容难易适当, 注重工程应用性, 既可作为高等院校土木工程专业教学用书, 也可作为有关科研和工程设计人员的参考用书。

钢结构基本原理

金生吉 白泉 谷军明 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 16

字 数: 358 千字

版 次: 2013 年 1 月第 1 版

印 次: 2013 年 1 月第 1 次

定 价: 35.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。电话: (010)88386906

对本书内容有任何疑问及建议, 请与本书责编联系。邮箱: jiaocaidayi51@sina.com

序 Preface

前言

钢材是一种优质的工程结构材料,具有强度高、塑性韧性好、加工性能良等诸多优点,而且钢材是一种绿色建筑材料,符合可持续发展的理念。以钢材为主制作的工程结构具有承载力高、重量轻、跨越能力强、施工速度快等优势,越来越得到人们的青睐,广泛应用于高层建筑、工业厂房、高耸结构、桥梁和大型公共设施。近年来,我国钢材产量逐年增加,2012年粗钢产量已超过7亿吨,为钢结构的应用奠定了坚实的物质基础,与此同时,我国一批相关规范和标准相继出台,也为钢结构的应用发展提供了可靠的技术保障。可以预见,未来几十年,伴随我国经济建设持续发展和人们对生存环境改善的迫切需求,我国钢结构的应用和发展将会呈现出前所未有的欣欣向荣的景象。

目前,国家对建设类人才需求日增,对高等院校建设类高素质人才培养目标提出了新的要求,从而对土建类教材建设也提出了新的要求。有鉴于此,中国建材工业出版社组织启动了21世纪高等院校土木与建筑专业“十二五”规划教材的编写和出版工作。《钢结构基本原理》正是为了适应当今时代对高层次建设类人才培养的需求而编写的。

这本教材具有以下特点:

1. 教材编写内容突出实用性。编写力求贯彻少而精和理论联系实际的原则,突出理论知识的应用,加强针对性和实用性,并尽量反映国内外最新成就和发展趋势。
2. 教材编写结构体系新颖。结合具有土建类学科特色的教学理论、教学方法和教学模式,该教材系统地编排了例题和习题,其中包括近年来注册结构工程师考试题,突出教材的实用性。

3. 教材编作者经验丰富。该书编者均为各院校教学一线教师,具有丰富的教学和工作经验。

这本教材图文并茂、深入浅出、繁简得当,可作为高等院校土木工程专业教材使用,也可作为工程技术人员的参考借鉴,还可作为成人、函授、网络教育、自学考试等参考用书。

希望本教材能有助于培养适应社会发展需要的、素质全面的工程建设人才。相信这本教材能达到这个目标,从形式到内容都成为精品,为教师和学生以及专业人士所喜爱。

全书由沈阳工业大学建筑工程学院院长、教授

沈阳,担任主编,负责全书的编写和出版工作。

本书由沈阳工业大学建筑工程学院院长、教授

沈阳,担任主编,负责全书的编写和出版工作。

本书由沈阳工业大学建筑工程学院院长、教授

沈阳,担任主编,负责全书的编写和出版工作。

本书由沈阳工业大学建筑工程学院院长、教授

沈阳,担任主编,负责全书的编写和出版工作。

本书由沈阳工业大学建筑工程学院院长、教授

沈阳,担任主编,负责全书的编写和出版工作。

沈阳

前言

Foreword

钢结构是土木工程结构中的一种重要结构形式,由于其具有强度高、工程造价低、重量轻、施工速度快、环境污染小等诸多优点,在工程中得到了广泛应用。尤其在我国,经历了一个长期的“节约钢材”阶段后,随着近年来国内钢材产量的迅速增加和国民经济的整体发展,大力发展和应用钢结构已经成为业内的共识。根据国家《关于国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》与住房和城乡建设部《建筑业发展“十二五”规划》的内容,“十二五”期间,我国要逐步实现年建筑钢结构用材占到全国钢材总产量的10%左右,钢结构住宅建设占到房屋总建筑面积15%左右的规模,其前景令人期待。

为适应当前钢结构的发展形势和高等学校本科土木工程专业教学需要,根据高等学校土木工程专业指导委员会的指导意见,并结合《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)等现行国家标准,我们编写了本教材。本书内容主要限定于钢结构基本原理部分,全书共分6章。第1章主要介绍了钢结构的特点、应用范围、设计方法及钢结构的发展;第2章主要介绍了钢结构的材料及其性能;第3章主要介绍了钢结构连接的构造、原理和设计方法;第4章~第6章分别介绍了轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件的工作原理和设计方法。

本书由金生吉、白泉、谷军明担任主编,王晓东、沈璐、辛浩担任副主编,曾晓云和吴英担任参编。各章节具体编写分工如下:第1章由白泉、王晓东(1.3节)负责编写;第2章由白泉、谷军明、辛浩负责编写;第3章由白泉负责编写;第4章由金生吉负责编写;第5章由曾晓云和王晓东(5.5~5.8节)负责编写;第6章由金生吉、沈璐负责编写;附录由沈璐、吴英负责编写;本书例题部分由谷军明编写。全书由金生吉负责统稿。

本书的编写工作得到了中国建材工业出版社的鼎力支持,在此谨向他们致以谢意。

限于编者水平,加之成稿时间仓促,书中不当或错误之处,敬请读者批评指正。

编者

目 录 Contents

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 钢结构的特点和应用范围 / 1
- 1.2 钢结构的设计方法 / 3
- 1.3 钢结构的新发展 / 10

第 2 章 钢结构材料 / 21

- 2.1 钢材概述 / 21
- 2.2 钢材的主要性能 / 21
- 2.3 影响钢材性能的因素 / 27
- 2.4 钢材的疲劳 / 36
- 2.5 建筑用钢的规格及选用 / 43

第 3 章 钢结构连接 / 49

- 3.1 钢结构连接概述 / 49
- 3.2 对接焊缝的构造和计算 / 58
- 3.3 角焊缝的构造和计算 / 64
- 3.4 焊接残余应力和焊接残余变形 / 80
- 3.5 螺栓连接的构造 / 85
- 3.6 普通螺栓连接的工作性能和计算 / 87
- 3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算 / 102

第 4 章 轴心受力构件 / 114

- 4.1 轴心受力构件的类型 / 114
- 4.2 轴心受力构件的强度和刚度 / 116

- 4.3 轴心受压构件的整体稳定 / 120
- 4.4 实腹式轴心受压构件的截面设计 / 133
- 4.5 格构式轴心受压构件的截面设计 / 136
- 4.6 轴心受压柱的柱头和柱脚 / 145

第5章 受弯构件 / 150

- 5.1 梁的形式和应用 / 150
- 5.2 梁的强度和刚度 / 151
- 5.3 梁的整体稳定 / 157
- 5.4 梁的局部稳定和腹板加劲肋设计 / 166
- 5.5 考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力计算 / 175
- 5.6 型钢梁的设计 / 179
- 5.7 梁的拼接和连接 / 180
- 5.8 组合梁的设计 / 182

第6章 拉弯和压弯构件 / 191

- 6.1 拉弯、压弯构件的应用和截面形式 / 191
- 6.2 拉弯、压弯构件的刚度与强度计算 / 193
- 6.3 实腹式压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算 / 197
- 6.4 实腹式压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算 / 201
- 6.5 实腹式压弯构件的局部稳定 / 205
- 6.6 格构式压弯构件的稳定 / 208
- 6.7 压弯构件的设计步骤 / 213
- 6.8 压弯构件的计算长度 / 214

附录 / 220

参考文献 / 250

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构的特点和应用范围

1.1.1 钢结构的特点

钢结构是用钢板、热轧型钢或冷加工成型的薄壁型钢制造而成的结构。它和其他材料的结构相比,具有如下特点。

(1)材料的强度高,塑性和韧性好。钢材和其他建筑材料诸如混凝土、砖石和木材相比,强度要高得多。因此,特别适用于跨度大或荷载很大的构件和结构。

钢材还具有塑性和韧性好的特点。塑性好,结构在一般条件下不会因超载而突然断裂;韧性好,结构对动荷载的适应性就强。

良好的吸能能力和延性还使钢结构具有优越的抗震性能。

(2)材质均匀,与力学计算的假定比较符合。与砖石和混凝土相比,钢材属单一材料,由于生产过程质量控制严格,钢材内部组织构造比较均匀,且接近各向同性,钢材的弹性模量很高,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,最符合一般工程力学的基本假定,计算结果比较可靠。

(3)钢结构制造简便,施工周期短。钢结构所用的材料单纯而且是成材,加工比较简便,并能使用机械操作。因此,大量的钢结构一般在专业化的金属结构厂做成构件,精确度较高。构件在工地拼装,可以采用安装简便的普通螺栓和高强度螺栓,有时还可以在地面拼装和焊接成较大的单元再行吊装,以缩短施工周期。少量的钢结构和轻钢屋架也可以在现场就地制造,随即用简便机具吊装。此外,对已建成的钢结构也比较容易进行改建和加固,用螺栓连接的结构还可以根据需要进行拆迁。

(4)钢结构的重量轻。钢材的密度虽比混凝土等建筑材料大,但做成的结构却比较轻。原因是钢材的强度与密度之比要比钢筋混凝土大得多。以同样的跨度承受同样荷载,钢屋架的重量最多不过钢筋混凝土屋架的 $1/3$ 至 $1/4$,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$,为运输及吊装提供了方便条件。

钢结构屋盖重量轻,可减小地震作用,也可减轻基础的负荷,降低地基、基础部分的造价。另一方面,质轻的屋盖结构对可变荷载的变动比较敏感,荷载超额的不利影响比较大。受有积

灰荷载的结构如不注意及时清灰,可能会造成事故。风吸力可能造成钢屋架的拉杆、压杆发生转变,设计时不能忽视。

(5)钢材的密封性好。采用焊接连接的钢板结构,具有较好的水密性和气密性,可用来制作压力容器、管道等结构。

(6)钢材可重复利用。钢结构加工制造过程中产生的余料和碎屑,以及废弃和破坏了的结构或构件,均可回炉重新冶炼成钢材重复使用。因此,钢材被称为绿色建筑材料或可持续发展的材料。

(7)钢材耐腐蚀性差。钢材容易锈蚀,因此,必须对结构注意防护。通常,在没有侵蚀性介质的一般厂房中,钢构件经过彻底除锈并涂上合格的油漆后,锈蚀问题并不严重。对于湿度大、有侵蚀性介质环境中的结构,可采用耐候钢或不锈钢提高其抗锈蚀性能。

(8)钢材耐热不耐火。钢材长期经受 100°C 辐射热时,性能变化不大,具有一定的耐热性能。但当温度超过 200°C 后,性能变化较大,此时,强度开始逐步降低,并伴有蓝脆现象。当温度达 600°C 时,钢材进入热塑性状态,已不能再承载。因此,设计规定:钢材表面温度超过 150°C 时需采取隔热防护,对有防火要求的,必须按照相关规定采取隔热保护措施。

(9)钢结构具有低温冷脆倾向。由厚钢板焊接而成的承受拉力和弯矩的构件及其连接节点,在低温下有脆性破坏的倾向,应引起足够的重视。

1.1.2 钢结构的应用范围

钢结构由于具有强度高、重量轻、施工速度快等优点,故一直是人们喜爱采用的结构。但其合理应用范围不仅取决于钢结构本身的特点,还受到国民经济发展情况的制约。在我国,从新中国成立到 20 世纪 90 年代中期,钢结构的应用经历了一个长期的“节约钢材”阶段,即在土建工程中钢结构只用在钢筋混凝土不能代替的地方,主要原因是钢材短缺。1949 年我国全国钢产量只有十几万吨,虽然大力发展钢铁工业,钢产量一直跟不上社会主义建设宏大规模的要求。直至 1996 年钢产量突破一亿吨,局面才得到根本改变,钢结构的技术政策改成“合理使用钢材”。此后,我国钢产量持续快速增长,2003 年钢产量突破 2 亿吨,2010 已经达到 6.2 亿吨。钢产量的大幅增加,以及新结构形式的不断推出,使得钢结构的应用得到了很大发展。

目前,钢结构的应用范围大致如下:

(1)大跨度结构。结构跨度越大,自重在全荷载中所占比重也就越大,减轻自重可以获得明显的经济效益。因此,钢结构强度高而重量轻的优点对于大跨桥梁和大跨建筑结构特别突出。所采用的结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索(包括斜拉体系)、张弦梁、实腹或格构式拱架和框架等。

(2)厂房结构。钢铁企业和重型机械制造业有许多车间属于重型厂房,车间里起重机的起重量大(常在 110t 以上,有的达到 440t),其中有些作业也十分繁重(24 小时全天运转)。另外,有强烈辐射热的车间,也经常采用钢结构。

(3)受动荷载影响的结构。由于钢材具有良好的韧性,设有较大锻锤或其他产生动力作用

的其他设备的厂房,即使屋架跨度不大,也往往用钢制成。对于抗震能力要求高的结构,用钢来做也是比较适宜的。

(4)高耸结构。高耸结构主要包括塔架和桅杆结构,如广播或电视的发射塔、发射桅杆、高压输电线塔、环境大气监测塔等。

(5)多层和高层建筑。由于钢结构的综合效益指标优良,近年来在多、高层民用建筑中也得到了广泛的应用。其结构形式主要有多层框架、框架—支撑结构、框筒、悬挂、巨型框架等。

(6)可拆卸或移动的结构。钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的手段来连接,因此,非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和野外作业的生产和生活用房的骨架、临时性展览馆,钢筋混凝土结构施工用的模板支架、塔式起重机、履带式起重机的吊臂、龙门起重机等。

(7)容器和其他构筑物。用钢板焊成的容器具有密封和耐高压的特点,广泛用于冶金、石油、化工企业中,包括油罐、燃气罐、高炉、热风炉等。此外,经常使用的还有皮带通廊栈桥、管道支架、钻井和采油塔架,以及海上采油平台等其他钢构筑物。

(8)轻型钢结构。钢结构重量轻不仅对大跨结构有利,对使用荷载特别轻的小跨结构也有优越性。因为使用荷载特别轻时,小跨结构的自重也就成了一个重要因素。冷弯薄壁型钢屋架在一定条件下的用钢量可比钢筋混凝土屋架的用钢量还少。轻型钢结构的结构形式有实腹变截面门式刚架、冷弯薄壁型钢结构(包括金属拱形波纹屋盖)以及钢管结构等。

1.2 钢结构的设计方法

钢结构设计的目的是保证结构和构件在充分满足功能要求的基础上安全可靠地工作。即在施工和规定的设计使用年限内能满足预期的安全性、适用性和耐久性的要求,还要保证其经济合理性。因此,钢结构设计的原则要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。这一设计原则是根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)制定的,除疲劳计算外,采用以概率理论为基础的极限状态设计方法(简称概率极限状态设计法),用分项系数的设计表达式进行计算。关于钢结构的疲劳计算,仍然沿用过去传统的容许应力设计法。

1.2.1 概率极限状态设计法

1. 结构的功能要求

结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求:

(1)在正常施工和正常使用时,能承受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)在正常维护下具有足够的耐久性能。

(4)在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

上述“各种作用”是指引起结构内力或变形的各种原因,包括施加在结构上的集中力或分

布力(直接作用,也称为荷载)和引起结构外加变形或约束变形的原因(间接作用)。

2. 结构的可靠度

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》,结构的可靠性是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。结构的可靠度是对结构可靠性的定量描述,即在结构规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。规定的时间是指结构的设计使用年限。规定的条件是指正常设计、正常施工、正常使用和维护的条件,不包括非正常的,例如人为的错误等。

3. 结构的极限状态

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态为该功能的极限状态。和其他建筑结构一样,钢结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两大类。

(1)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出现不适于继续承载的变形,包括倾覆、强度破坏、疲劳破坏、丧失稳定、结构变为机动体系或出现过度的塑性变形。

强度破坏是指构件的某一截面或连接件因应力超过材料强度而导致的破坏。有孔洞的钢构件在削弱截面拉断,属于一般的强度破坏。钢结构还有一种特殊情况,即在特定条件下出现低应力状态的脆性断裂。材质低劣、构造不合理和低温等因素都会促成这种断裂。

土建钢结构用的钢材具有较好的塑性变形能力,并且在屈服之后还会强化,表现为抗拉强度 f_u 高于屈服强度 f_y 。在设计钢结构时,可以考虑适当利用材料的塑性,但是利用塑性工作阶段不应导致过大的变形。桁架的受拉弦杆如果以 f_u 而不是 f_y 为承载极限,就会因过大变形而使桁架不适于继续承载。

超静定梁或框架可以允许在受力最大的截面出现全塑性,形成所谓塑性铰。荷载继续增大时,这个截面有如真实的铰一样工作。多次超静定的结构可以出现几个塑性铰而不丧失承载能力,直至塑性铰的数目增加到形成机动体系为止。当然,达到这种极限状态有一定条件,即丧失稳定的可能性得到防止。

钢构件因材料强度高而截面小,且组成构件的板件又较薄,使失稳成为承载能力极限状态极为重要的方面。压应力是使构件失稳的原因。除轴心受拉杆外,压杆、梁和压弯构件都在不同程度上存在压应力。因此,失稳又在钢结构中具有普遍性。不过,有些局部性的失稳现象并不构成承载能力的极限。读者将从后面的有关章节了解这方面的情况。

许多钢构件用来承受多次重复的行动荷载,桥梁、吊车梁都属于这类构件。在反复循环荷载作用下,有可能出现疲劳破坏。

承载能力极限状态绝大多数是不可逆的,一旦发生就导致结构失效,因而必须慎重对待。

(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限值,包括:影响结构、构件和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(包括组合结构中混凝土裂缝)。

正常使用极限状态中的变形和振动限制,通常都在弹性范围内,并且是可逆的。对于可逆的极限,可靠度方面的要求可以放宽一些。

承载能力极限状态与正常使用极限状态相比较,前者可能导致人身伤亡和大量财产损失,故其出现的概率应当很低,而后者对生命的危害较小,故允许出现的概率可高些,但仍应给予足够的重视。

4. 结构的极限状态原理

结构的工作性能可用结构的功能函数来描述。若结构设计时需要考虑影响结构可靠度的随机变量有 n 个,即 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 则在这 n 个随机变量间通常可建立函数关系

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1-1)$$

式(1-1)即称为结构的功能函数。

结构的可靠度受各种作用、材料性能、几何参数和计算公式精确性等因素的影响,这些具有随机性的因素称为基本变量。基本变量均可考虑为相互独立的随机变量。对于一般的建筑结构,可以将上述的基本变量归并为两个综合的基本变量,即作用效应 S 和结构抗力 R 。结构的功能函数可表示为

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

由于 S 和 R 都是随机变量,其函数 Z 也是一个随机变量。功能函数 Z 存在三种可能状态: $Z > 0$, 结构处于可靠状态; $Z = 0$, 结构达到临界状态,即极限状态; $Z < 0$, 结构处于失效状态。

由于基本变量的不确定性,作用效应 S 有出现高值的可能,结构抗力 R 也有出现低值的可能,即使设计中采用了相当保守的设计方案,但在结构投入使用后,谁也不能保证它绝对可靠,因而,对所设计的结构的功能只能作出一定概率的保证。

结构的失效概率可表示为

$$p_f = P(Z < 0) \quad (1-3)$$

结构的可靠概率可表示为

$$p_s = P(Z \geq 0) \quad (1-4)$$

并且,由于事件 $Z < 0$ 与事件 $Z \geq 0$ 是对立的,所以结构可靠度 p_s 与结构的失效概率 p_f 符合下式

$$p_s = 1 - p_f \quad (1-5)$$

因此,结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。可靠的结构设计是指失效概率小到可以接受的程度,并不等同于结构绝对可靠。

设 S 和 R 都服从正态分布,则功能函数 $Z = R - S$ 也服从正态分布。若以 μ 代表平均值, σ 代表标准差,则根据平均值和标准差的性质可知

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (1-6)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (1-7)$$

由于标准差都取正值,则结构的失效概率表达式(1-3)可改写成

$$p_f = P\left(\frac{Z}{\sigma_z} < 0\right) \quad (1-8)$$

和

$$p_f = P\left(\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z} < \frac{-\mu_z}{\sigma_z}\right) \quad (1-9)$$

因为 $\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}$ 服从标准正态分布, 所以又可写成

$$p_f = \varphi\left(-\frac{Z}{\sigma_z}\right) \quad (1-10)$$

式中, $\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

令

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$$

并将式(1-6)和式(1-7)的值代入, 则有

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-11)$$

式(1-10)成为

$$p_f = \varphi(-\beta) \quad (1-12)$$

因为是正态分布

$$p_s = 1 - p_f = \varphi(\beta) \quad (1-13)$$

由以上两式可以看出, β 和 p_s (或 p_f) 具有数值上的一一对应关系。已知 β 后即可由标准正态分布函数值的表中查得 p_f 。图 1-1 和表 1-1 都给出了 β 和 p_f 的对应关系。图中 β 和 $f_z(Z)$ 是 Z 的概率密度函数, 阴影面积的大小就是 p_f 。由于 β 越大, p_f 就越小, 也就是结构越可靠, 所以称 β 为可靠指标。

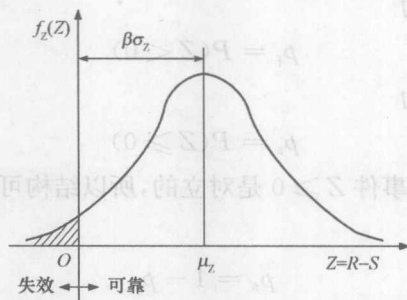


图 1-1 β 与 p_f 的对应关系

表 1-1

β 与 p_f 的对应关系

β	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
p_f	6.68×10^{-2}	2.28×10^{-2}	6.21×10^{-3}	1.35×10^{-3}	2.33×10^{-4}	3.17×10^{-5}	3.40×10^{-6}

以上推算均假定 S 和 R 都服从正态分布。实际上结构的荷载效应多数不服从正态分布,

结构的抗力一般也不服从正态分布。然而对于非正态的随机变量可以作当量正态变换,找出它的当量正态分布的平均值和标准差。然后再按照正态随机变量一样对待。当功能函数 Z 为非线性函数时,可将此函数展开为泰勒级数而取其线性项计算 β 。由于 β 的计算只采用分布的特征值,即一阶原点矩(均值) μ_Z 和二阶中心矩(方差,即标准差的平方) σ_Z^2 ,对非线性函数只取线性项,而不考虑 Z 的全分布,故称该方法为一次二阶矩法。

为了使不同结构能够具有相同的可靠度,《建筑结构可靠度设计统一标准》规定了各类构件按承载能力极限状态设计时的可靠指标,即目标可靠指标。目标可靠指标的取值从理论上说,应根据各种结构构件的重要性、破坏性质及失效后果,以优化方法确定。但是,实际上这些因素还难以找到合理的定量分析方法。因此,目前各个国家在确定目标可靠指标时都采用“校准法”,通过对原有规范作反演算,找出隐含在现有工程结构中相应的可靠指标值,经过综合分析后确定设计规范中相应的可靠指标值。这种方法的实质是从整体上继承原有的可靠度水准,是一种稳妥可行的办法。对钢结构各类主要构件校准的结果, β 一般在 3.16~3.62 之间。一般的工业与民用建筑的安全等级属于二级。钢结构的强度破坏和大多数失稳破坏都具有延性破坏性质,所以钢结构构件设计的目标可靠指标一般为 3.2。但是,也有少数情况(主要是某些壳体结构和圆管压杆及一部分方管压杆)失稳时具有脆性破坏特征。对这些构件,可靠指标按表 1-2 应取 3.7。疲劳破坏也具有脆性特征,但我国现行设计规范对疲劳计算仍然采用容许应力法。钢结构连接的承载能力极限状态经常是强度破坏而不是屈服,可靠指标应比构件为高,一般推荐用 4.5。

表 1-2

目标可靠指标

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

5. 设计表达式

(1) 承载能力极限状态表达式。为了应用简便并符合人们长期已熟悉的形式,可将式(1-11)做如下变换

$$\mu_S = \mu_R - \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

由于

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \frac{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

故得

$$\mu_S + \alpha_S \beta \sigma_S \leq \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \quad (1-14)$$

式中, $\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$; $\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$ 。

式(1-14)就是以平均值表示的一次二阶矩法的设计表达式,只要根据结构的重要性和破坏特性确定了结构的可靠指标,又统计出了各随机变量的平均值和标准差,就可利用式(1-14)设计。

考虑到工程设计中经常以 S 和 R 的标准值 S_K 和 R_K 为统计对象

$$S_K = \mu_S + \eta_S \sigma_S \quad (1-15)$$

$$R_K = \mu_R - \eta_R \sigma_R \quad (1-16)$$

式中 η_S 、 η_R ——分别为确定标准值时所用的保证度系数:一般取 95% 的保证度(对应 0.05 的分位数)时, $\eta = 1.645$ 。

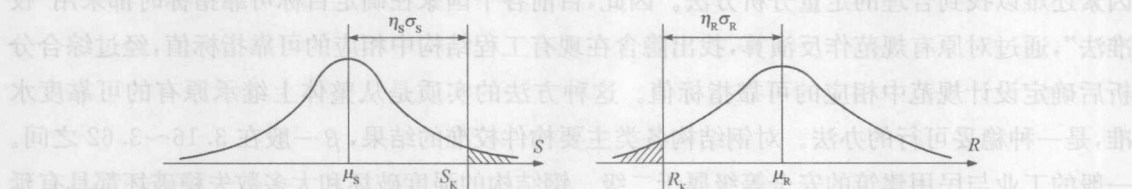


图 1-2 S_K 和 R_K 的取值

由式(1-14)可以得到

$$\mu_S(1 + \alpha_S \beta \delta_S) \leq \mu_R(1 - \alpha_R \beta \delta_R) \quad (1-17)$$

式中, $\delta_S = \sigma_S / \mu_S$, $\delta_R = \sigma_R / \mu_R$, 分别为 S 和 R 的变异系数。

由式(1-15)和式(1-16)可以得到

$$S_K = \mu_S(1 + \eta_S \delta_S) \quad (1-18)$$

$$R_K = \mu_R(1 - \eta_R \delta_R) \quad (1-19)$$

把式(1-18)和式(1-19)分别表示为 μ_S 和 μ_R 的等式,并代入式(1-17)中,则式(1-17)转化为

$$\frac{1 + \alpha_S \beta \delta_S}{1 + \eta_S \delta_S} S_K \leq \frac{1 - \alpha_R \beta \delta_R}{1 - \eta_R \delta_R} R_K \quad (1-20)$$

或

$$\gamma_S S_K \leq \frac{1}{\gamma_R} R_K \quad (1-21)$$

此即为以标准值表示的设计公式。式中, γ_S 、 γ_R 分别为荷载分项系数和抗力分项系数。其表达式分别为

$$\gamma_S = \frac{1 + \alpha_S \beta \delta_S}{1 + \eta_S \delta_S}$$

$$\gamma_R = \frac{1 - \eta_R \delta_R}{1 - \alpha_R \beta \delta_R}$$

《建筑结构可靠度设计统一标准》规定,结构构件的极限状态设计表达式,应根据各种极限状态的设计要求,采用有关的作用代表值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达。

作用效应分项系数(包括永久荷载分项系数 γ_G 、可变荷载分项系数 γ_Q)和结构构件抗力分

项系数 γ_R 应根据结构功能函数中基本变量的统计参数和概率分布类型,以及表 1-2 规定的结构构件可靠指标,通过计算分析,并考虑工程经验确定。

考虑到施加在结构上的可变荷载往往不止一种,这些荷载不可能同时达到各自的最大值,因此,还要根据组合荷载效应分布来确定荷载的组合系数 ψ_{ci} 。结构的重要性系数 γ_0 应按结构构件的安全等级、设计使用年限并考虑工程经验确定。

根据结构的功能要求,进行承载能力极限状态设计时,应考虑作用效应的基本组合,必要时尚应考虑作用效应的偶然组合(考虑如火灾、爆炸、撞击等偶然事件的组合)。

1) 基本组合。在荷载(作用)效应的基本组合条件下,式(1-21)可转化为等效的基本变量标准值、分项系数和组合系数,并以应力形式表达的极限状态公式。其荷载效应的基本组合按下列设计表达式中的最不利值确定:

可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \leq f \quad (1-22)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年以上的结构构件,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;

S_{Gk} ——永久荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力;

S_{Q1k} ——起控制作用的第 1 个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力(该值使计算结果为最大);

S_{Qik} ——起控制作用的第 i 个可变荷载标准值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,当永久荷载效应对结构构件的承载能力不利时取 1.2,但遇到以永久荷载为主的结构时则取 1.35,当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时取 1.0,验算结构倾覆、滑移或漂浮时取 0.9;

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第 1 个和第 i 个可变荷载分项系数,当可变荷载效应对结构构件的承载能力不利时取 1.4(当楼面活荷载大于 4.0kN/m^2 ,取 1.3),有利时取 0;

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数,可按《建筑结构可靠度设计统一标准》的规定采用。

永久荷载效应控制的组合

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \leq f \quad (1-23)$$

对于一般排架、框架结构,可采用简化式计算。

由可变荷载效应控制的组合

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{Qik}) \leq f \quad (1-24)$$

式中 ψ ——荷载组合值系数,一般情况下取 0.9,当只有一个可变荷载时,取 1.0。

由永久荷载效应控制的组合,仍按式(1-23)进行计算。

2)偶然组合。对于偶然组合,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,具体的设计表达式及各种系数,应符合专门规范的规定。

(2)正常使用极限状态表达式。对于正常使用极限状态,按《建筑结构可靠度设计统一标准》的规定要求分别采用荷载的标准组合、频遇组合和准永久组合进行设计,并使变形等设计值不超过相应的规定限值。

钢结构只考虑荷载的标准组合,其设计式为

$$v_{Gk} + v_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Qik} \leq [v] \quad (1-25)$$

式中 v_{Gk} ——永久荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值;

v_{Q1k} ——起控制作用的第1个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值(该值使计算结果为最大);

v_{Qik} ——第*i*个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值;

$[v]$ ——结构或构件的允许变形值。

1.2.2 容许应力法

长期以来,人们采用以经验为主的容许应力设计方法进行结构设计,其表达式为

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{f_b}{K} \quad (1-26)$$

式中 σ ——由标准荷载采用弹性分析求得的结构构件中的最大应力;

$[\sigma]$ ——规范规定的钢材的容许应力;

f_b ——材料的极限强度,对塑性材料取屈服点 f_y ,对脆性材料取强度极限 f_u ;

K ——安全系数,凭经验取值。

该方法的优点是简单适用,已有多年的使用经验,目前疲劳验算、钢桥、储液罐和压力窗口等结构仍在应用容许应力法。此法缺点是将非确定性的结构可靠性问题作为确定性问题考虑,用单一的安全系数来表达,不能保证各种结构具有比较一致的可靠度水平,该法以弹性分析得到的某点强度来确定整个结构安全与否,没有考虑钢材的塑性性能和内力重分布。

1.3 钢结构的新发展

钢结构分为建筑钢结构、桥梁钢结构等,与目前建筑领域普遍采用的钢筋混凝土结构相比,具有强度高、工程造价低、自重轻、施工周期短和可工厂化制作等优点,因此,得到广泛重视并迅速发展,从重大工程、标志性建筑使用钢结构到钢结构普遍使用,呈现出了从未有过的兴旺景象。