



普通高等院校交通运输类专业系列教材

桥梁钢结构

BRIDGE STEEL STRUCTURE

■ 主编 谭金华 杨吉新 陈响平 主审 陈忠延 ■



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

013031212

U443-43

03

普通高校交通运输类专业系列教

Bridge Steel Structure

桥梁钢结构

主 编 谭金华 杨吉新 陈响平

主 审 陈忠延



U443-43

03

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·



北航

C1636640

515180810

内 容 简 介

本书作为高等院校土木工程专业、桥梁专业的教材,主要介绍了钢结构的特点、分类、设计方法及应用前景;钢结构连接的构造与设计以及基本构件(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,并加入了桥梁钢结构的材料、设计等相关内容和规范;各主要类型钢桥(钢桁架桥、组合桥、悬索桥等)的设计、制造、检测、评估、维护与加固等。书中附录给出了钢结构设计所需的各种数据、表格以及公式,供参考或查用。

本书可作为高等院校土木工程专业、桥梁专业及其他相关专业的教材,亦可供有关工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁钢结构/谭金华,杨吉新,陈响平主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-5629-3838-5

I. ①桥… II. ①谭… ②杨… ③陈… III. ①桥梁结构-钢结构 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 224758 号

项目负责人:陈军东

责任编辑:彭佳佳

责任校对:梁雪姣

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn>

印 刷 者:武汉兴和彩色印务有限公司

经 销 者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:23.25

字 数:610 千字

版 次:2013 年 2 月第 1 版

印 次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~1500 册

定 价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87515798 87384729 87165708(传真)

版权所有,盗版必究。

前 言

随着我国经济建设突飞猛进地发展,钢结构的应用领域有了较大的扩展。城市桥梁和大跨度公路桥梁、高层和超高层房屋、多层房屋、单层轻型房屋、体育场馆、大跨度会展中心、大型客机检修库、自动化高架仓库、粮仓以及海上采油平台等大型结构基本上都采用钢结构。

“钢结构”一般主要讲解各类钢结构设计计算原理,是土木类专业的重要专业必修课。授课专业方向包括岩土工程、桥梁工程、建筑工程、道路工程、水工结构等。常见教材多只讲解钢结构的设计原理,以建筑钢结构设计规范和建筑工程钢结构为背景,但桥梁专业钢结构的授课内容应涵盖桥梁钢结构基础知识、相关规范和设计原理的讲解,同时要兼顾当今桥梁钢结构最新技术和发展状况。

本书是将钢结构与钢桥内容结合在一起的适合于桥梁专业本科生学习的钢结构课程教材。全书共9章,前5章内容以讲述桥梁钢结构设计原理为主,后4章讲述各类钢桥的建造、检测、评估与维护方面的基本理论、新技术和最新应用动态等内容,其关于桥梁工程常用钢结构的部分内容也可以同时用于“钢桥”课程作教材参考。

本书主要特色如下:

(1)在钢结构设计基础的有关内容中加入与桥梁用钢结构有关的内容,包括:

①在“钢结构的材料”一章中加入在桥梁工程中常用的钢材编号、特定适用范围,桥梁用钢发展需求与展望等,并在钢桥中强调钢材的疲劳性能概念及其在钢桥剩余寿命评估中的应用理论;

②在常规钢结构的连接内容中加上桥梁工程中常见的连接和验算,并且取钢桥中的构件为例题模板;

③在拉压杆或拉弯、压弯杆件的设计和验算章节,加入实际钢桥常见的对应杆件作为例子。

(2)加入桥梁用钢结构的相关内容,主要包括:

①有关钢桥的概念、构造、特点,设计与计算基本理论;

②主要钢桥细节的设计验算,包括钢桁架桥中主要杆件与节点连接的形式、构造与设计等;

③现有钢桥的检测、评估与维护;

④国内外钢桥最新应用技术、发展状态与前景展望等。

参加本书编写的人员主要有武汉理工大学谭金华博士、杨吉新教授、李南、杨志勇、孙永等。全书由谭金华、杨吉新和陈响平主编定稿,同济大学陈忠延教授主审。

感谢武汉理工大学教务处、出版社和交通学院领导对本书编写工作的帮助和支持。感谢同济大学陈惟珍教授、徐俊博士和长安大学王春生教授等对本书提供的有益的修改意见和帮助。本书参考并引用了一些公开发表的文献和资料,谨向这些作者表示深深的谢意。

由于水平所限,时间仓促,难免会有错误和不妥之处,恳请读者指正。

编 者

2012年9月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 钢结构的发展概况	(1)
1.1.1 应用概述	(1)
1.1.2 理论和标准的发展	(3)
1.2 钢结构的特点及应用	(4)
1.2.1 钢结构的特点	(4)
1.2.2 钢结构的应用分类	(5)
1.3 钢结构的设计方法	(6)
1.4 我国桥梁钢结构	(10)
1.5 展望	(13)
2 钢结构的材料	(15)
2.1 钢材的分类及破坏形式	(15)
2.1.1 钢材的分类	(15)
2.1.2 钢材的破坏形式	(16)
2.2 钢材的性能	(17)
2.2.1 主要力学性能	(17)
2.2.2 物理性能	(19)
2.2.3 工艺性能	(19)
2.2.4 疲劳和断裂韧性	(21)
2.3 钢材性能的影响因素	(22)
2.3.1 化学成分的影响	(22)
2.3.2 生产过程的影响	(25)
2.3.3 时效硬化	(25)
2.3.4 温度的影响	(26)
2.3.5 应力集中的影响	(26)
2.4 桥梁用钢牌号及性能要求	(27)
2.4.1 桥梁用钢的牌号和标准	(27)
2.4.2 《桥梁用结构钢》中钢性能要求	(28)
2.4.3 铁路桥梁用钢性能要求	(29)
2.4.4 厚度方向性能钢板	(30)
2.4.5 基材和焊接接头的韧性	(30)
2.4.6 钢材的选用	(32)
2.5 高性能钢	(32)
2.5.1 国内外的的发展	(33)

2.5.2	主要性能	(34)
2.5.3	耐候钢	(37)
2.5.4	典型应用	(38)
3	钢结构的连接	(40)
3.1	钢结构的连接方法	(40)
3.1.1	焊缝连接	(40)
3.1.2	铆钉连接	(41)
3.1.3	螺栓连接	(41)
3.2	焊缝连接	(41)
3.2.1	常用焊接方法	(42)
3.2.2	焊缝形式	(44)
3.2.3	焊接试验和焊接工艺评定	(45)
3.2.4	焊接缺陷与控制	(46)
3.2.5	对接焊缝的构造和计算	(49)
3.2.6	角焊缝的构造和计算	(53)
3.3	螺栓连接	(67)
3.3.1	分类与特点	(67)
3.3.2	构造要求	(69)
3.3.3	普通螺栓	(71)
3.3.4	高强度螺栓	(81)
3.4	节点板的连接设计与计算	(90)
3.4.1	节点的构造要求	(90)
3.4.2	节点的设计步骤	(90)
3.4.3	节点板的强度验算	(91)
4	轴心受力钢构件	(95)
4.1	概述	(95)
4.2	强度与刚度	(97)
4.2.1	强度计算	(97)
4.2.2	刚度计算	(99)
4.3	轴心受压构件的稳定性	(104)
4.3.1	柱子曲线	(105)
4.3.2	整体稳定性	(110)
4.3.3	局部稳定性	(110)
4.4	轴压杆件的设计	(116)
4.4.1	实腹式杆件设计	(116)
4.4.2	格构式受压构件	(120)
4.5	柱头与柱脚	(130)
4.5.1	轴心受压柱的柱头	(130)
4.5.2	轴心受压柱的柱脚	(130)

5 受弯构件	(133)
5.1 截面形式	(133)
5.2 纯弯构件验算	(134)
5.2.1 强度和刚度	(134)
5.2.2 整体稳定性和支撑	(137)
5.2.3 受压翼缘的局部稳定性	(140)
5.2.4 腹板的局部稳定性	(141)
5.3 拉弯和压弯构件验算	(148)
5.3.1 截面形式	(148)
5.3.2 强度和刚度	(149)
5.3.3 整体稳定性	(152)
5.3.4 局部稳定性	(155)
5.4 梁的设计	(159)
5.4.1 型钢梁的设计	(159)
5.4.2 实腹式组合梁设计	(159)
5.5 压弯构件的设计	(163)
5.5.1 框架柱的计算长度	(163)
5.5.2 实腹式压弯构件截面设计	(164)
5.5.3 格构式压弯构件设计	(165)
5.6 加劲梁的设计与验算	(170)
5.6.1 加劲肋的构造与截面尺寸	(170)
5.6.2 支撑加劲肋的计算	(171)
5.7 梁的拼接	(171)
6 钢桥的构造与设计	(175)
6.1 钢梁桥	(175)
6.1.1 钢板梁桥	(175)
6.1.2 钢桁梁桥	(180)
6.1.3 钢箱梁桥	(190)
6.2 组合梁桥	(194)
6.2.1 组合梁桥的构造特点	(194)
6.2.2 组合梁桥的计算	(197)
6.3 斜拉桥	(199)
6.3.1 斜拉桥的概述	(199)
6.3.2 斜拉桥的组成及总体布置	(200)
6.3.3 斜拉桥的计算原则	(204)
6.4 悬索桥	(206)
6.4.1 悬索桥的概述	(206)
6.4.2 悬索桥的总体布置	(207)
6.4.3 悬索桥的构造特点	(208)

6.4.4 悬索桥的计算理论	(212)
7 钢桥的制造与架设	(219)
7.1 钢桥的制造	(219)
7.1.1 料件加工	(219)
7.1.2 杆件组焊	(224)
7.1.3 制孔与梁的制造	(228)
7.1.4 除锈、油漆和装运	(232)
7.2 钢梁的架设	(233)
7.2.1 悬臂拼装法	(233)
7.2.2 拖拉法	(237)
7.2.3 浮运法	(239)
7.3 钢桥桥面铺装	(241)
7.3.1 三种常用的铺装材料	(242)
7.3.2 桥面铺装的结构组合	(243)
7.3.3 钢桥桥面铺装常用结构实例	(244)
8 钢桥病害检测与维护	(248)
8.1 钢桥的主要病害	(248)
8.1.1 锈蚀	(248)
8.1.2 疲劳开裂	(254)
8.1.3 变形	(257)
8.2 钢桁架梁桥的检测与维护	(258)
8.3 钢-混凝土组合梁桥的维修与养护	(260)
8.4 斜拉桥的养护与加固	(261)
8.4.1 常见病害	(261)
8.4.2 检查与评估	(263)
8.4.3 修复与加固	(264)
8.5 悬索桥的养护与加固	(264)
8.5.1 常见病害	(264)
8.5.2 检查与评估	(265)
8.5.3 日常养护与维修	(269)
8.5.4 更换主缆	(271)
8.6 钢拱桥的养护与加固	(272)
8.7 桥梁支座的养护与加固	(273)
8.8 桥梁墩台的养护与加固	(273)
8.9 桥面与附属设施的养护	(275)
8.9.1 桥面铺装	(275)
8.9.2 伸缩缝	(276)
8.9.3 栏杆与灯柱	(276)
8.9.4 混凝土防撞护栏	(277)

8.9.5 人行道铺设	(277)
8.9.6 桥头搭板	(278)
8.9.7 其他附属设施	(278)
9 钢桥评估与管理	(280)
9.1 概述	(280)
9.2 评估原则与内容	(281)
9.3 外观调查与技术状态评估	(282)
9.3.1 BCI 的评估方法	(282)
9.3.2 《公路桥涵养护规范》的评估方法	(293)
9.3.3 《公路桥梁技术状况评定标准》中的评估方法	(295)
9.4 承载能力评定	(302)
9.4.1 评定原则与内容	(302)
9.4.2 开裂状况评定	(303)
9.4.3 极限状态检算	(304)
9.5 剩余寿命评估	(307)
9.5.1 S—N 疲劳曲线法	(307)
9.5.2 断裂力学方法	(312)
9.5.3 可靠度方法	(315)
9.6 桥梁管理概述	(316)
9.6.1 桥梁管理的重要性	(316)
9.6.2 桥梁管理工作内容	(317)
附录.....	(320)
参考文献.....	(359)

1 绪 论

1.1 钢结构的发展概况

钢结构是指主要承重结构由钢材制成的结构。由于钢结构具有自重轻、强度高、塑性及韧性好、抗震性能优越、装配化程度高、耐久性好、造型美观等众多优点,经过了数百年的实践与发展,在建筑、交通、航天、军事等各个领域都得到了广泛的应用,是大型结构的首要选择。

1.1.1 应用概述

钢(steel)是铁碳合金,公元前 2000 年左右在人类古代文明的发祥地之一的美索不达米亚平原(两河流域)就出现了早期的炼铁术。

1. 我国古代的钢结构

我国战国时代(公元前 475 年~公元前 221 年)已有铁制生产工具,东汉(公元 25 年~公元 220 年)出现锻铁,并建成世界最早的铁链悬桥——兰津桥。公元 694 年(唐代)在洛阳建成的“天枢”,高 35 m,直径 4 m,顶部有直径为 11.3 m 的“腾云承露盘”,底部有直径约 16.7 m 用来保持天枢稳定的“铁山”。公元 1061 年(宋代)在湖北荆州玉泉寺建成的 13 层铁塔,现存完好。1705 年(清康熙),四川泸定大渡河桥建成,跨径 100 m,由 9 根桥面铁链和四根桥栏铁链组成。

2. 国外钢结构的发展

国外在 1840 年以前,多采用铸铁来建造结构。1779 年世界上第一座铸铁拱桥在英格兰中部科布鲁克代尔的塞文河上建成。1786 年法国建造巴黎法兰西剧院,首次采用铁加玻璃材料建造大型结构。1828 年维也纳建造第一座钢桥。1840 年后,铆钉和锻铁技术的发展使得铸铁被锻铁取代,英国威尔士的布里塔尼亚箱型梁式大桥用锻铁型板和角铁经铆钉连接而成。

1851 年,伦敦“水晶宫”展览馆为玻璃铁架结构,它完全表现了工业生产的机械本能,开创了建筑形式的新纪元,如图 1.1 所示。当时英国政府决定修造这座展览馆时,由于展期临近,在时间上根本不能完成常规建筑,于是决定采用英国风景建筑师约瑟夫·帕克斯顿提出的应急方案——房式钢铁骨架和平板玻璃组装而成的建筑。由于采用了钢铁结构形式,水晶宫的承重柱截面面积总和只占其总建筑面积的 0.1%左右,成为当时世界上最大的单体房屋建筑。仅用 9 个月时间就建成了铁与玻璃组成的庞大建筑,充分说明了钢铁和玻璃是能够创造出崭新空间、大跨度结构和具有美感的建筑新材料。

1855 年英国人发明贝氏转炉炼钢法,1865 年法国人发明平炉炼钢法。1856 年美国开始产钢,1870 年轧制出工字钢,形成工业化大批量生产,强度高且韧性好的钢材才开始取代锻铁。随后的标志性钢结构有 1874 年在圣路易建成的第一座大跨度钢桁桥、1883 年完工的布鲁克林吊桥、1889 年法国巴黎建造的埃菲尔铁塔。

其中埃菲尔铁塔于 1887 年 11 月 26 日动工,1889 年 3 月 31 日竣工,历时 21 个月,铁塔占

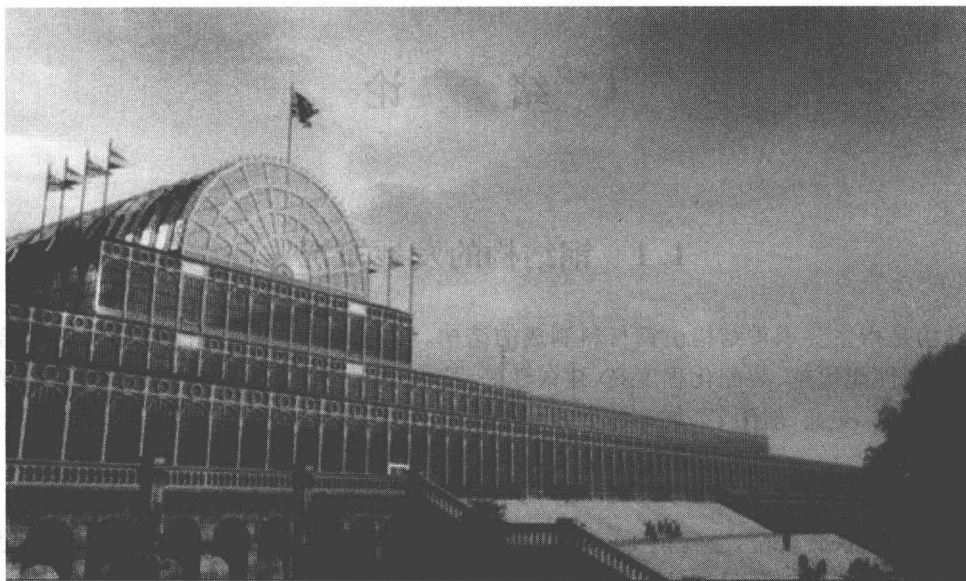


图 1.1 伦敦水晶宫

地 12.5 hm^2 , 高 320.7 m , 重 7000 t , 由 18038 个优质钢铁部件和 250 万个铆钉铆接而成。由于设计和施工都十分细致, 至今虽历经 100 多年的风雨洗礼, 铁塔塔身的 1500 多根钢梁仍没有一根需要更换和拆除。1889 年以前人类所造的建筑物的高度没有达到 200 m 的, 埃菲尔铁塔把人工建造物的高度一举推进到 300 m 以上, 是近代建筑工程史上的一项重大成就。埃菲尔铁塔向人们证明了采用金属结构将会大大增加建筑物的高度。

从 1881 年电弧焊工艺的问世至 20 世纪初焊接技术的不断发展, 以及 1934 年出现的高强螺栓的应用, 这些都极大地促进了钢结构的发展。西欧、北美、前苏联和日本等国家或地区钢结构获得了广泛的应用。1889 年法国世博会上设计的“机械馆”采用了超越前人的大跨度 (115 m) 结构, 宽 115 m 、长 420 m 的空间内无其他支撑, 刷新了世界建筑的新纪录, 并首次运用了三铰拱。

1889 年芝加哥建成第一栋全钢结构的大厦。1907 年美国设立伯力恒钢厂。1908 年伯力恒开始生产热轧型钢。

1909 年德意志制造联盟的彼得·贝伦斯设计了“柏林通用电气公司透平机车间”, 以钢结构骨架与大玻璃窗为特点, 被称为是第一座真正的现代建筑。1909 年美国麻州开始把热轧型钢用于建筑结构。1931 年纽约帝国大厦完工, 102 层, 高 381 m 。1953 年建成世界上第一个悬索屋面, 美国北卡罗里那州的雷里体育馆, 是现代悬索结构的开始。

1962 年日本大和公司推荐 A 型钢结构住宅。1995 年阪神地震, 钢结构展现了良好的抗震性能。随着对钢结构抗震性能的不断认识, 在几次灾难性地震后钢结构住宅得到了大量采用。20 世纪 90 年代, 美国的民用住宅采用钢结构的约为 5% , 至今已经超过 35% 。

3. 我国近代钢结构的发展

新中国成立前经济凋敝、工业落后。1907 年建成的汉阳钢铁厂, 年产钢量只有 0.85 万 t 。日本侵略期间, 在东北建立钢厂, 1943 年生产铁 180 万 t , 钢 90 万 t , 大部分被日本用于战争。

新中国成立后, 由于受到钢产量的制约, 在很长时间内钢结构被限制使用, 影响了钢结构

的发展,钢结构仅在军事、航天、铁路和重工业上应用较多。

1978年后钢产量开始逐年增加,1996年超过1亿t,钢产量世界第一,2003年产量为2.2亿t,2006年为4.2亿t,2011年达6.8亿t。随着钢产量的增加,我国政策也从“限制使用”改为积极合理地推广应用。1997年建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996—2010年)明确提出了发展钢结构的要求,繁荣的市场和国家政策促使我国钢结构迅速发展,全国各地体育(场)馆、影剧院、会展馆、航站楼、候车大厅、高层及超高层建筑、多层大空间建筑(如商场、停车场)、厂房、公路铁路桥梁、电视观光塔、景观雕塑等大量采用钢结构。同时我国在设计、制造和安装等方面的技术水平也在不断提高,逐渐掌握了各种复杂建筑物的设计和施工技术,至21世纪初已在全国各地建造了大量规模巨大而结构复杂的钢结构厂房、大跨度钢结构民用建筑及公路铁路桥梁等,逐渐成为真正的世界钢结构强国。我国的人民大会堂钢屋架、北京和上海等地体育馆的钢网架、陕西秦始皇兵马俑陈列馆的三铰钢拱架、武汉火车站钢管屋架、北京的鸟巢和苏通大桥等都是典型的现代钢结构建筑。

1.1.2 理论和标准的发展

1678年胡克发现材料变形与受力大小的比例关系(胡克定律),成为钢结构材料分析的基础。1744年欧拉(Euler)推导出压杆稳定极限荷载公式,沿用至今。

1921年美国钢结构学会AISC成立。1923年AISC发行了第一版钢结构设计规范AISC—ASD(容许应力法)。1930年耐侯钢问世。1940年利哈伊大学开始研究结构及构件的极限强度。1944年美国柱研究学会(Column Research Council,CRC)成立。1947年高强度螺栓规范出版。

1950年中国东北制定了钢结构设计内部规定。1954年中国颁布了第一本《钢结构设计规范试行草案》(规结—4—54)。1955年苏联颁布了HиTY 121—55规范;1956年12月中国采用苏联颁布的HиTY 121—55规范为参考规范。1957年塑性设计法第一次用于建筑。1974年中国颁布了TJ 17—44规范(半概率,半经验的设计法)。

1976年在加拿大的西安大略大学进行了风洞实验室研究。这一研究对世界其他一些国家的规范中风荷载的规定做出了贡献,广泛用于低层金属结构系统。同年,法国USINOR开发了能耐900℃的耐火钢。1980年日本钢管公司NKK发明了OLAC钢板工艺(TMCP钢板)。1983年美国钢结构学会AISC颁布了第一本AISC—LRFD极限设计法。1988年中国颁布了《钢结构设计规范》(GBJ 17—1988)概率极限设计法。1994年日本公布了JISG 3106SN钢材标准。

中国目前使用的钢结构有关规范除了新版的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)外,还有《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)、《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)、《建筑钢结构焊接技术规程》(JGJ 81—2002)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—1998)、《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10002.2—2005)等。至此,钢结构应用技术与标准日益完善。

1.2 钢结构的特点及应用

1.2.1 钢结构的特点

与其他材料的结构相比,钢结构有如下一些优点:

(1) 钢材材质均匀,计算准确

钢材在冶炼和轧制过程中质量可以严格控制,材质波动小,钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性体,而且在一定的应力幅度内几乎是完全弹性的。因此,钢结构的实际受力情况与工程力学计算结果比较符合,可简化为理想弹塑性体,计算结果可靠。

(2) 钢结构强度高、质量轻、塑性和韧性好

钢材与其他建筑材料诸如混凝土、砖石和木材相比,强度要高得多。钢结构承受同样荷载时要比其他结构轻。当跨度和荷载均相同时,钢屋架的重量仅为钢筋混凝土屋架的 $1/4 \sim 1/3$,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。因而钢结构特别适用于跨度大或荷载很大的构件和结构。钢材还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,结构对动力荷载的适应性强。良好的吸能能力和延性还使钢结构具有优越的抗震性能。

(3) 良好的加工性能和焊接性能

钢结构具有良好的冷热加工性能和焊接性能,便于在专业化的金属结构厂大批量生产出精度较高的构件,然后运至现场安装,既可保证质量,又可缩短施工周期。

(4) 密封性好

钢材的气密性、水密性均良好,可用来制作压力容器、管道,甚至载人太空结构。

(5) 钢材的可重复使用性

钢结构建筑是一种新型的节能环保的建筑体系,被誉为 21 世纪的“绿色建筑”。材料能回收循环使用,符合发展节能建筑和经济持续健康发展的要求。

(6) 钢材耐热性较好

经受 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的辐射热时,钢材的性能变化不大。

钢结构具有以下缺点:

(1) 耐腐蚀性差

必须对钢结构采取防护措施,维护费用较高。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。对处于湿度大,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。

(2) 有低温冷脆倾向

厚钢板焊接节点,应力复杂,有低温脆性破坏倾向。

(3) 不耐火

当温度超过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,会出现变蓝、变脆、强度增加的蓝脆现象,随后随着温度的升高,强度会显著下降。当温度达 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢材进入热塑性状态,完全丧失承载能力。有防火要求的建筑钢结构必须采用耐火材料加以保护。

(4) 疲劳和稳定性问题较突出

钢构件常较柔细,或为薄壁构件,稳定问题需要关注。由于存在材料缺陷、应力集中、焊接

残余应力、变形或开孔等,钢结构的疲劳断裂问题也比较突出。

1.2.2 钢结构的应用分类

现代钢结构按其造型和用途可分为以下几类:

- (1)高(多)层及超高层钢结构——房屋类结构;
- (2)高耸钢结构——塔架、桅杆类结构;
- (3)桥梁钢结构——各种桥梁结构;
- (4)空间钢结构——各种屋盖、公共建筑、城市雕塑、工业建筑结构;
- (5)特种钢结构——各种适用于特殊用途的结构,如管线、工作平台、容器罐、航天器材等。

钢结构的具体应用有:

(1)大跨度结构

跨度越大,自重荷载中所占的比例越大,减轻结构自重会带来明显的经济效益。钢材强度高、重量轻的优势正好适合于大跨度结构。典型的大跨钢结构包括钢桥、体育场、储煤仓、工业厂房、航站楼、博物馆等,其结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索、张弦梁、实腹式或格构式拱架和框架等。图 1.2 所示为我国国家体育场——鸟巢,主承重结构采用加肋薄壁箱形截面钢构件,总用钢量达 16 万 t。图 1.3 所示为杭州萧山国际机场航站楼。

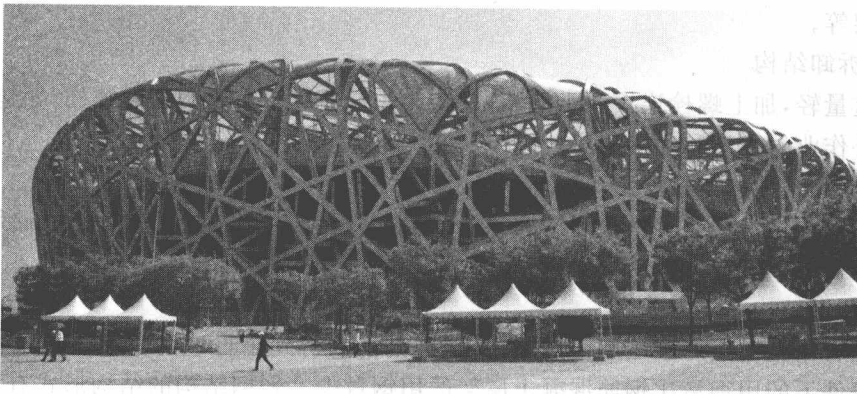


图 1.2 国家体育场——鸟巢

现代大跨度空间结构体系可分为三大类,刚性结构体系(框架、薄壳、网架、网壳、空间桁架等)、柔性结构体系(索结构、膜结构、索膜结构、张拉集成体系等)和杂交结构体系(拉索-网架、拉索-网壳、拱-索、索-桁架等)。

(2)工业厂房和受动力荷载影响的结构

钢材非常适合建造有较大起重量吊车的厂房、吊车工作较繁重的厂房、有强烈辐射热的车间。一般采用由钢屋架和阶形柱组成的门式刚架或排架形式,也可采用网架屋盖。

钢材具有良好韧性,有较大锻锤或产生动力设备的厂房往往使用钢结构。对于抗震能力要求高的结构,也应采用钢结构。

(3)多层和高层建筑

高强度、塑性耗能能力使得钢结构在多层、高层民用建筑中也得到了广泛的应用。结构形式有多层框架、框架-支撑结构、框筒、悬挂、巨型框架等。

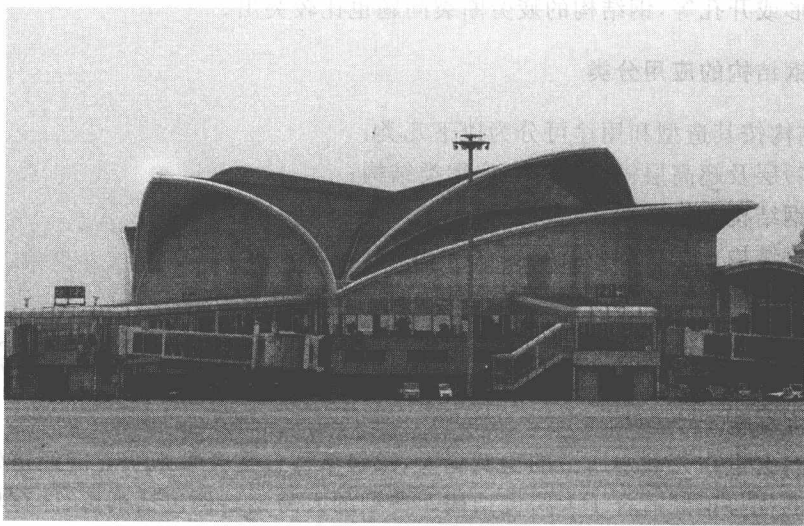


图 1.3 杭州萧山国际机场航站楼

(4) 高耸结构

包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路的塔架,广播、通信和电视发射用的塔架和桅杆,火箭发射塔架等。

(5) 可拆卸结构

由于重量轻,加上螺栓连接便于拆装,钢结构非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和需野外作业的生产和生活用房。

(6) 容器和其他构筑物

冶金、石油、化工企业大量采用钢板容器,包括油罐、煤气罐、高炉、热风炉、储煤仓等。此外还有通廊栈桥、管道支架、锅炉支架、海洋平台等。

(7) 轻型钢结构

近年随着压型钢板等轻型屋面的采用,轻型钢结构得到了迅速的发展。冷弯薄壁型钢屋架在一定条件下的用钢量比钢筋混凝土屋架的用钢量少。轻钢结构的结构形式有实腹式变截面门式刚架、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。

(8) 钢和混凝土的组合结构

钢板件容易受压失稳,不能充分发挥它的高强度,而混凝土则宜于受压不适于受拉,将钢材和混凝土并用,可使两种材料都充分发挥各自的长处。近年来,组合结构在我国得到了快速的发展,并广泛应用于高层建筑(如深圳的赛格广场)、大跨桥梁、工业厂房和地铁站等。主要构件形式有钢筋与混凝土组合梁和钢管混凝土柱。

1.3 钢结构的设计方法

钢结构设计方法经历了从早期确定性的容许应力法到以概率理论为基础的设计方法的演变过程。从 20 世纪初到 20 世纪 50 年代,钢结构采用安全系数法设计,即:

$$\frac{N}{A} \leq \frac{f}{k} = [\sigma] \quad (1.1)$$

式中 N ——构件截面的内力；

A ——构件截面面积；

f ——钢材的设计强度；

k ——大于 1 的安全系数；

$[\sigma]$ ——钢材的容许应力。

以概率分析为基础的设计方法根据应用概率分析的程度不同可分为三种水准：

(1) 半概率极限状态设计方法

1957 年至 1973 年我国钢结构设计采用半概率的分项系数法，结构设计中引入三个分项系数的三系数法（当时称为计算极限状态法），即：

荷载分项系数（ K_1 ）——考虑荷载的不定性；

材料分项系数（ K_2 ）——考虑材料的不均性；

工作条件系数（ K_3 ）——考虑结构及构件的工作特点以及某些假定的计算简图与实际情况不完全相符等因素。

其设计表达式为：

$$\frac{N}{A} \leq \frac{f}{K_1 K_2 K_3} = \frac{f}{K} = [\sigma] \quad (1.2)$$

(2) 全概率设计方法

全概率设计方法是对结构的各种基本变量均采用随机变量或随机过程来描述，进行精确的概率分析，求得结构最优失效概率作为结构可靠度的直接度量的设计方法。由于基本变量数目众多、相互关系复杂，随机变化过程难于精确确定，全概率设计方法尚在研究中，但它是规范规划的未来发展方向。

(3) 近似概率极限状态设计方法

现行《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）除疲劳计算外，都采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数的设计表达式进行计算。

① 极限状态

当结构或其组成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时，此特定状态就称为该功能的极限状态。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。

a. 承载能力极限状态 指结构或构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形，包括构件和连接的强度破坏、疲劳破坏，因过度变形而不适于继续承载，结构和构件丧失稳定，结构转变为机动体系和结构倾覆。

b. 正常使用极限状态 指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（包括混凝土裂缝）。

根据结构在施工和使用中的环境条件和影响，结构有三种设计状态：

a. 持久状况 在结构使用过程中必然出现，且持续期很长（一般与设计使用年限在同一数量级）的状况。

b. 短暂状况 在结构施工和使用过程中出现概率较大，而与设计使用年限相比，持续期很短的状况，如施工和维修等。

c. 偶然状况 在结构使用过程中出现概率很小，且持续期很短的状况，如火灾、爆炸、撞

击等。

结构的三种设计状况应分别进行承载力极限状态设计,如下所述:

- 对三种状况,均应进行承载力极限状态设计;
- 对持久状况,尚应进行正常使用极限状态设计;
- 对短暂状况,可根据需要进行正常使用极限状态设计。

②分项系数的设计表达式

对于承载能力极限状态荷载效应的基本组合按设计表达式中最不利值确定。

可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 (\gamma_G \sigma_{GK} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \varphi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.3)$$

永久荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 (\gamma_G \sigma_{GK} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \varphi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.4)$$

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 年及以上的结构构件,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;

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} ——起控制作用的第一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);

σ_{QiK} ——其他第 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力不利时取 1.2,但对式(1.4)则取 1.35;当永久荷载效应对结构构件的承载力有利时取 1.0;验算结构倾覆、滑移或漂浮时取 0.9;

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第 1 个、其他第 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力不利时取 1.4(当楼面活荷载大于 4.0 kN/m^2 时,取 1.3);有利时取为 0;

φ_{ci} ——第 i 个可变荷载组合值系数,可按荷载规范的规定采用。

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:

$$\gamma_0 (\gamma_G \sigma_{GK} + \varphi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.5)$$

式中 φ ——简化式中采用的荷载组合值系数,一般情况下可采用 0.9;当只有 1 个可变荷载时,取为 1.0。

对于正常使用极限状态,采用荷载的标准组合进行设计,并使变形等设计不超过相应的规定限值。设计式为:

$$v_{GK} + v_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} v_{QiK} \leq [v] \quad (1.6)$$

式中 v_{GK} ——永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值;

v_{Q1K} ——起控制作用的第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值