

普通高等教育土木工程专业新形态教材

钢结构设计原理

白泉 盛国华 金生吉 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本教材根据现行的《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)、《钢结构通用规范》(GB 55006—2021)及《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)等规范并参考国内同类相关教材编写而成。

本教材按照《高等学校土木工程本科指导性专业规范》要求,着重讲述钢结构设计的基本原理,主要包括钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。对于重要知识点,配备了必要的例题和习题,便于使用者学习掌握。同时,为方便读者使用,本教材附录提供了计算分析中常用的各种表格。

本教材内容充实、难易适当,注重理论与应用结合,同时,积极落实立德树人根本任务,教材中融入了大量课程思政资源,突出价值引领。本教材既可作为高等学校土木类相关专业本科生教学用书,也可作为相关科研人员和工程设计人员的参考书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/白泉,盛国华,金生吉主编. —北京:清华大学出版社,2024.5
普通高等教育土木工程专业新形态教材
ISBN 978-7-302-66359-1

I. ①钢… II. ①白… ②盛… ③金… III. ①钢结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU391.04

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2024)第 107737 号

责任编辑:王向珍 王 华

封面设计:陈国熙

责任校对:欧 洋

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市天利华印刷装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.75

字 数:505 千字

版 次:2024 年 7 月第 1 版

印 次:2024 年 7 月第 1 次印刷

定 价:65.00 元

产品编号:096415-01

前言

PREFACE

钢材是一种优质的工程结构材料,具有强度高、塑性韧性好、加工性能优良等诸多优点,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、质量小、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等。多年来,我国钢材产量稳居世界第一,年产量均在 10 亿 t 以上,为钢结构的应用奠定了坚实的物质基础;与此同时,我国一批相关标准和规范相继更新,也为钢结构的应用发展提供了可靠的技术保障。《钢结构行业“十四五”规划及 2035 年远景目标》提出钢结构行业“十四五”期间发展目标:到 2025 年年底,全国钢结构用量达到 1.4 亿 t 左右,占全国粗钢产量 15%以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例达到 15%以上;到 2035 年年底,我国钢结构建筑应用达到中等发达国家水平,钢结构用量达到每年 2.0 亿 t 以上,占粗钢产量 25%以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例逐步达到 40%,基本实现钢结构智能建造。目前,距离上述目标还有很大空间,钢结构发展前景广阔。

钢结构的快速发展对于钢结构人才需求将更加旺盛。适应行业发展变化、培养满足社会需求的土木人才是各高校的重要任务。加强教材建设,提高人才培养质量势在必行。基于此,作者组织编写了《钢结构设计原理》教材。本教材主要特色为:

1. 强化理论基础、注重工程应用。立足于沈阳工业大学建设国内一流本科专业、培养一流创新应用人才的目标,以地方院校土木工程相关专业应用型本科为主要受众对象,秉承少而精和理论联系实际的原则,强化基本理论的同时,配备大量例题、习题,强化工程应用,教材针对性和实用性强。

2. 结合新标准、时效性好。顺应行业发展趋势、紧抓前沿发展动态,尽量反映钢结构的国内外最新成就,并突出新近国家颁布的相关标准及内容,增强学生从业的适应性;同时,在编制例题和习题时密切结合全国一级注册结构工程师执业资格考试的相关内容,为学生未来参加执业考试奠定良好的专业基础。

3. 加强课程思政、凸显价值引领。全面落实立德树人根本任务,深入挖掘课程思政元素,融入教材内容,在潜移默化中讲好中国故事,引导学生树立正确的人生观、世界观和价值观。

参加本教材编写工作的有:白泉、盛国华、金生吉、徐金花、陆海燕、徐超、赵东阳、孙乐娟。主要分工如下:第 1 章由白泉、赵东阳编写;第 2 章由金生吉、孙乐娟编写;第 3 章由白泉、盛国华编写;第 4 章由盛国华、徐金花编写;第 5 章由盛国华、孙乐娟编写;第 6 章由金生吉、徐超编写;陆海燕、赵东阳对全书例题和附录进行了编写。土木工程专业侯添一、卢建南等同学参与了本教材部分插图的绘制。全书由白泉统稿。

本教材的编写工作得到了清华大学出版社的鼎力支持,谨向他们高水准的辛勤工作致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2023 年 9 月

清华大学出版社

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	5
1.3 我国钢结构的发展	13
1.4 补充阅读：中国杰出的爱国工程师——詹天佑	21
习题	25
第 2 章 钢结构的材料	26
2.1 钢结构对钢材的要求	26
2.2 钢材的主要性能	27
2.3 钢材的疲劳	34
2.4 影响钢材性能的因素	44
2.5 建筑用钢的规格及选用	53
2.6 补充阅读：我国钢铁工业百年发展的伟大成就和主要经验分析(节选)	59
习题	63
第 3 章 钢结构的连接	64
3.1 连接的基本知识	64
3.2 对接焊缝的构造和计算	74
3.3 角焊缝的构造和计算	80
3.4 焊接残余应力和焊接残余变形	98
3.5 螺栓连接的构造	103
3.6 普通螺栓连接的工作性能和计算	106
3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算	122
3.8 补充阅读：茅以升——立强国之志 建强国之桥	132
习题	136
第 4 章 轴心受力构件	139
4.1 轴心受力构件的类型	139
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	141

4.3	轴心受压构件的整体稳定	144
4.4	轴心受压构件的局部稳定	167
4.5	实腹式轴心受压构件的设计	175
4.6	格构式轴心受压构件的设计	182
4.7	轴心受压柱的柱头和柱脚	193
4.8	补充阅读: 工程师之戒——加拿大魁北克桥垮塌失败案例	201
	习题	207
第 5 章	受弯构件	209
5.1	梁的形式和应用	209
5.2	梁的强度和刚度	211
5.3	梁的整体稳定	220
5.4	梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	236
5.5	考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力计算	252
5.6	型钢梁的设计	258
5.7	组合梁的设计	259
5.8	梁的拼接、连接和支座	265
5.9	补充阅读: 伟大的数学家、力学家——莱昂哈德·欧拉	275
	习题	279
第 6 章	拉弯和压弯构件	280
6.1	拉弯、压弯构件的应用、截面形式及破坏形式	280
6.2	拉弯、压弯构件的强度与刚度计算	282
6.3	实腹式压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算	285
6.4	实腹式压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算	290
6.5	实腹式压弯构件的局部稳定	294
6.6	格构式压弯构件的稳定	296
6.7	压弯构件的设计步骤	301
	习题	302
	参考文献	303
	附录	304
附录 1	钢材的强度设计值	304
附录 2	螺栓和锚栓规格	308
附录 3	轴心受压构件的稳定系数	308
附录 4	梁的整体稳定系数	311
附录 5	各种截面回转半径的近似值	315
附录 6	型钢表	316



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

以钢板、热轧型钢或冷加工成型的薄壁型钢等钢材为主要承重结构材料,通过焊接、铆接或螺栓连接等组成的承重结构称为钢结构。钢结构与钢筋混凝土结构、砌体结构、木结构等相比,具有如下特点。

1. 材料强度高,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,因此,特别适用于跨度大、高度高以及荷载重的构件和结构。

钢材还具有塑性和韧性好的特点。钢材塑性好,承受静力荷载时,材料吸收变形能量的能力强,有利于结构在一般条件下不会因超载而突然断裂;同时,还能将局部高峰应力重新分配,使应力变化趋于平缓。钢材韧性好,具有更强的抵抗冲击或振动荷载的能力,适宜在动力荷载下工作。

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,非常符合一般工程力学的基本假定,计算上的不确定性相对较小,计算结果比较可靠。

3. 质量小,抗震性能好

钢材的密度虽比混凝土等建筑材料大,但由于钢材强度高,构件截面尺寸小,做成的结构比较轻且柔。钢材的强度与密度之比要比钢筋混凝土结构的强度与密度之比大得多,在同样的跨度、承受同样荷载的条件下,钢屋架的质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 $1/10$,为运输及吊装提供便利。

钢结构由于质量小,且结构比较柔,地震作用相对较小;同时,钢材又具有较高的抗拉和抗压强度及较好的塑性和韧性,能很好地承受动力荷载。国内外的历次地震中,钢结构建筑损坏程度最小,钢材已被工程界确定为最合适的抗震结构材料。

4. 制造简便,施工周期短

钢结构所用的材料单一而且是成材,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加工厂制作成构件,然后再运至现场安装,装配化率比较高,精确度也较高,质量更易于控制。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吊装,以缩短施工周期。小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较容易改建和加固,用螺栓连接的结构还可以根据需要拆迁,具有其他结构不可替代的优势。

5. 密封性好

钢结构钢材及焊接连接的水密性和气密性较好,不易渗漏,特别适用于制作各种压力容器、油罐、气柜、管道等水密性、气密性要求较高的结构。

6. 钢材可重复利用

钢结构加工制作过程中产生的余料和碎屑,以及废弃和破坏了的钢结构或构件,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材料。

7. 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。总体来说,钢结构耐腐蚀性差的缺点不足以对钢结构的使用产生显著的负面影响。

8. 耐热但不耐火

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,材质变化较大,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,强度降为零,已不能继续承载。因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定:钢结构的温度超过 100°C 时,进行钢结构的承载力和变形验算时,应该考虑长期高温作用对钢材和钢结构连接性能的影响;高温环境下的钢结构温度超过 100°C 时,应进行结构温度作用验算,并应根据不同情况采取防护措施。

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. 钢材的脆断

钢结构在低温环境下和其他条件下可能发生脆性断裂,应引起足够的重视。

1.1.2 钢结构的应用范围

钢结构具有强度高、质量小、施工速度快等优点,因此,一直深受人们喜爱。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年全国钢产量只有十几万吨,虽然大力发展钢铁工业,但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1亿t,局面才得到根本改变,钢结构的技术政策调整为“合理使用钢材”。此后,我国粗钢产量持续快速增长,2003年粗钢产量首次突破2亿t,2010年达到6.4亿t,2013年达到8.1亿t,2020年超过10亿t,连续多年,我国钢产量高居世界第一,遥遥领先其他国家。

改革开放后,钢产量的大幅增加和经济的快速发展,为我国钢结构的广泛应用奠定了物质基础。随着我国使用钢材的政策由限制转变为推广使用,钢结构在高层建筑、工业厂房、大跨度体育场馆、会展中心、大型飞机安装检修库、大跨度桥梁、海上采油平台、各种大中型仓库中得到广泛应用。新结构形式层出不穷,计算和分析手段不断更新,各种大型复杂钢结构工程不断出现,我国钢结构设计、建造水平也快速提升到世界前列。

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,钢结构强度高而质量小的优点在大跨桥梁和大跨建筑结构中特别突出。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。2008年北京奥运会的主场馆——国家体育场“鸟巢”的屋面结构(图1-1),跨度为 $332.3\text{m} \times 296.4\text{m}$;2019年建成通车的武汉杨泗港长江大桥(图1-2),采用双层钢桁架悬索结构,主跨达到1700m,是世界第二大跨度桥梁。



图 1-1 国家体育场“鸟巢”



图 1-2 武汉杨泗港长江大桥

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,车间里吊车的起重质量大(常在 110t 以上,有的达到 440t),其中有些作业十分繁重(24h 运转),往往承受较大的振动荷载,钢材因其塑性、韧性好,钢结构的应用可使重型工业厂房更安全可靠。近年来,轻型钢结构工业厂房应用也越来越广泛。

3. 高耸结构

高耸结构通常高度较大、横断面相对较小,要求结构具备较强的抗风及抗震能力,同时,也希望有较轻的自重,采用钢结构具有明显优势。根据其结构形式,主要分为塔式结构和桅式结构,如广播或电视的发射塔、发射桅杆、高压输电线塔、钻井塔、环境大气监测塔等。

4. 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广泛应用。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。

5. 可拆卸或移动的结构

钢结构不仅质量小,还可以用螺栓或其他便于拆装的手段连接,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,临时性展览馆等。还可用作钢筋混凝土结构施工用的模板支架、脚手架,塔式起重机、履带式起重机的吊臂,门式起重机等。

6. 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,广泛应用于冶金、石油、化工企业中,包括油罐、煤气罐、高炉、热风炉等。此外,还经常用于皮带通廊栈桥、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。

7. 轻型钢结构

钢结构质量小不仅对大跨结构有利,对使用荷载特别小的小跨结构也有优越性。因为使用荷载特别小时,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比钢筋混凝土屋架的用钢量还少。轻型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,同时还要保证其经济合理性。因此,钢结构设计的原则为技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。这一设计原则是根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)制定的。除疲劳计算外,钢结构设计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,由于疲劳破坏的不确定性较大,研究方法也欠成熟,我国现行设计标准仍然沿用传统的容许应力设计法,而不采用概率极限状态设计法。

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) 能承受施工和使用期间可能出现的各种作用;
- (2) 保持良好的使用性能;
- (3) 具有足够的耐久性能;
- (4) 当发生火灾时,在规定的时间内可保持足够的承载力;
- (5) 当发生爆炸、撞击、人为错误等偶然事件时,结构能保持必需的整体稳固性,不出现与起因不相称的破坏后果,防止出现结构的连续倒塌。

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《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018),结构的可靠性是指结构在规定时间内,规定条件下,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,即结构在规定的时间内,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,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。现行《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中,将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。《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)中,新增了结构耐久性极限状态相关内容。

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,包括构件或连接的强度破坏、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。

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处拉断,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 。设计钢结构时可以考虑适当利用材料的塑性,但是,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控制。

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移动荷载,桥梁、吊车梁都属于这类构件。这些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使用功能上允许的某个限值,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适当放宽。

承载能力极限状态与正常使用极限状态相比,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小;而后者对生命的危害较小,故允许出现的概率可大些,但仍应给予足够的重视。

3) 耐久性极限状态

值得注意的是,结构的可靠性包括安全性、适用性和耐久性,相应的可靠性设计也应包括承载能力、正常使用和耐久性三种极限状态设计。《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)中,新增了有关结构耐久性极限状态设计的内容。结构耐久性是指在服役环境作用和正常使用维护条件下,结构抵御性能劣化(或退化)的能力,因此,在结构全寿命性能变化过程中,原则上结构劣化过程的各个阶段均可以选作耐久性极限状态的基准。理论上讲,足够的耐久性要求已包含在一段时间内的安全性和适用性要求中。然而,出于实用的原因,增加与耐久性有关的极限状态内容或针对一定(非临界)条件的极限状态是有用的。因此,广义上来说,对于极限状态可定义以下3类状态:

第1类极限状态:影响结构初始耐久性能的状态(如碳化或氯盐侵蚀深度达到钢筋表面导致钢筋开始脱钝、钢结构防腐涂层作用丧失等);

第2类极限状态:影响结构正常使用的状态(如钢结构的锈蚀斑点、混凝土表面裂缝宽度超出限值等);

第3类极限状态:影响结构安全性能的状态(如钢结构的锈蚀孔、混凝土保护层的脱离等)。

《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)中首次引入的耐久性极限状态系指第1类极限状态。

4. 结构的极限状态原理

结构的工作性能可以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 $X_1, X_2, \dots, X_n$,则这 n 个随机变量通常可建立某种特定的函数关系

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

式(1-1)被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3种可能状态:

- (1) $Z = g(R, S) = R - S > 0$, 结构处于可靠状态;
- (2) $Z = g(R, S) = R - S = 0$, 结构达到临界状态,即极限状态;
- (3) $Z = g(R, S) = R - S < 0$, 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,对所设计结构的功能只能给出一定概率的保证。

按照结构极限状态设计方法,结构的可靠性用结构的可靠度来度量,即结构安全的概率,它可用下面的公式表达:

结构的安全概率(可靠度 p_s)可表示为

$$p_s = P(Z \geq 0) \quad (1-3)$$

结构的失效概率(不可靠度 p_f)可表示为

$$p_f = P(Z < 0) \quad (1-4)$$

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 符合式(1-5)

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

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(1-4)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

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-10)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 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)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

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

因为是正态分布,故:

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

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 1-3 和表 1-1 都给出了 β 和 p_f 的对应关系。图中 $f_Z(Z)$ 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。

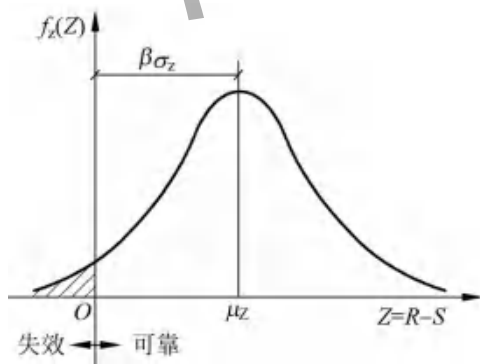


图 1-3 功能函数 Z 的概率密度曲线

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。实际上结构的作用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,《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)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(表 1-2)。

表 1-2 结构构件承载能力极限状态设计时的可靠指标 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

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。一般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,可靠指标应比构件高,一般推荐用 4.5。

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

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad \alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

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 (图 1-4)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 ——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, $\eta = 1.645$ 。

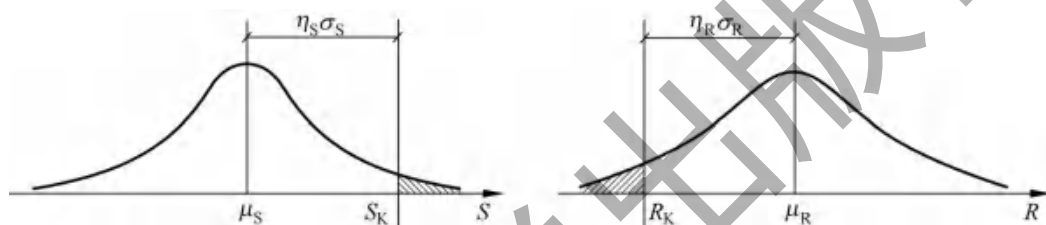


图 1-4 S_K 和 R_K 的取值

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)、式(1-16)可得到

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

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

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 分别为作用效应分项系数和结构抗力分项系数。其表达式分别为

$$\gamma_S = \frac{1 + \alpha_S \beta \delta_S}{1 + \eta_S \delta_S} \quad (1-22)$$

$$\gamma_R = \frac{1 - \eta_R \delta_R}{1 - \alpha_R \beta \delta_R} \quad (1-23)$$

《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)规定,结构构件宜根据规定的可靠

指标,采用由作用的代表值、材料性能的标准值、几何参数的标准值和各相应的分项系数构成的极限状态设计表达式进行设计。

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 规定的可靠指标,通过计算分析,并考虑工程经验确定。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中,基于各牌号钢材和各厚度组别调研和试验数据,按照《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)的要求进行数理统计和可靠度分析,并考虑设计使用方便,最终确定钢材的抗力分项系数 γ_R (表 1-3)。

表 1-3 钢材抗力分项系数 γ_R

厚度分组/mm		6~40	40~100	原规范值
钢牌号	Q235 钢	1.09		1.087
	Q355 钢	1.125		1.111
	Q390 钢			
	Q420 钢	1.125	1.18	—
	Q460 钢			

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} 。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定,按承载力极限状态设计钢结构时,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、龙卷风等偶然事件的组合)。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。

(1) 对于持久设计状况、短暂设计状况,承载力极限状态设计表达式为

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-24)$$

式中, γ_0 ——结构重要性系数,对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1,对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0,对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9;

S ——承载力极限状况下作用组合的效应设计值,对持久或短暂设计状况应按作用的基本组合计算;

R ——结构构件的承载力设计值。

作用的基本组合效应设计值 S 应从式(1-25)荷载效应组合值中取用最不利值:

$$S = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{Gik} + \gamma_P S_P + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{Qj} \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Qjk} \quad (1-25)$$

式中, S_{Gik} ——第 i 个永久作用标准值的效应;

S_P ——预应力作用有关代表值的效应;

S_{Q1k} ——第 1 个可变作用标准值的效应;

S_{Qjk} ——第 j 个可变作用标准值的效应;

γ_{Gi} ——第 i 个永久荷载分项系数,当永久荷载效应对结构构件的承载力不利时取 1.3,当永久荷载效应对结构构件的承载力有利时取值不应大于 1.0;

γ_P ——预应力作用的分项系数;当预应力作用效应对结构构件的承载力不利时取

1.3,当预应力作用效应对结构构件的承载能力有利时取值不应大于1.0;

γ_{Q1} 、 γ_{Qj} ——分别为第1个和第j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1.5;有利时,取0;

γ_{L1} 、 γ_{Lj} ——分别为第1个和第j个考虑结构设计使用年限的荷载调整系数,结构设计使用年限5年时,取0.9;结构设计使用年限50年时,取1.0;结构设计使用年限100年时,取1.1;

ϕ_{cj} ——第j个可变荷载的组合值系数,可按《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)的规定采用。

(2) 对于地震设计状况,多遇地震采用式(1-26)的表达式,设防地震采用式(1-27)的表达式。

$$\text{多遇地震} \quad S \leq R/\gamma_{RE} \quad (1-26)$$

$$\text{设防地震} \quad S \leq R_k \quad (1-27)$$

式中, S ——承载能力极限状况下作用组合的效应设计值,对地震设计状况应按作用的地震组合计算,即按式(1-28)计算。

$$S = \gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \phi_w \gamma_w S_{wk} \quad (1-28)$$

式中, γ_G ——重力荷载分项系数,一般情况应采用1.3,当重力荷载效应对构件承载能力有利时,不应大于1.0;

γ_{Eh} 、 γ_{Ev} ——分别为水平、竖向地震作用分项系数,当仅计算水平地震作用或竖向地震作用时,分别应采用1.3;同时计算水平与竖向地震作用时,其中主要作用的该系数应采用1.3,另一作用的该系数应采用0.5;

γ_w ——风荷载分项系数,应采用1.5;

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应,有吊车时,尚应包括悬吊物重力标准值的效应;

S_{Ehk} ——水平地震作用标准值的效应,尚应乘以相应的增大系数或调整系数;

S_{Evk} ——竖向地震作用标准值的效应,尚应乘以相应的增大系数或调整系数;

S_{wk} ——风荷载标准值的效应;

ϕ_w ——风荷载组合值系数,一般结构取0.0,风荷载起控制作用的建筑应采用0.2。

(3) 偶然设计状况,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

对于正常使用极限状态,按《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)的规定,宜根据不同情况采用作用的标准组合、频遇组合或准永久组合分别进行设计,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

$$\sum_{i=1}^m \nu_{Gik} + \nu_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \phi_{cj} \nu_{Qjk} \leq [\nu] \quad (1-29)$$

式中, ν_{Gik} ——第i个永久荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值;

ν_{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(该值使计算结果最大);

ν_{Qjk} ——第 i 个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值；

$[\nu]$ ——结构或构件的允许变形值,按《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)相关规定采用。

1.2.2 容许应力法

以结构构件的计算应力 σ 不大于有关规范所给定的材料容许应力 $[\sigma]$ 的原则进行设计的方法称为容许应力法。其表达式为

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{f_b}{K} \quad (1-30)$$

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。

容许应力设计法以线性弹性理论为基础,以构件危险截面的某一点或某一局部的计算应力小于或等于材料的容许应力为准则。在应力分布不均匀的情况下,如受弯构件、受扭构件或静不定结构,用这种设计方法比较保守。

容许应力设计法应用简便,是工程结构中的一种传统设计方法。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、储液罐和压力容器等结构仍在应用。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。

在钢结构设计中,采用容许应力法进行结构疲劳计算,相关内容详见后续章节。

1.3 我国钢结构的发展

1. 古代——探索开展

钢结构是现代建筑工程中较常用的结构形式之一,但其应用历史却较久远。

中国作为世界上最早掌握炼钢技术的国家之一,早在春秋时期就有了钢的应用历史。考古工作者曾经在湖南长沙杨家山春秋晚期的墓葬中发掘出一把“铁剑”,经金相检验,其含碳量为 0.5%,与现在的中碳钢相当,它说明在距今已有 2500 多年的春秋晚期,中国就能够炼钢。公元 7 世纪,北齐的著名冶金家綦母怀文在总结前人经验的基础上,对古代一种新的炼钢方法——灌钢法做出了突破性发展和完善,为世界冶炼技术的发展做出了划时代的贡献。

我国也是最早用钢铁建造承重结构的国家。据《水经注·渭水三》记载:“秦始皇造桥。铁墩重不胜,故刻石作力士孟贲像以祭之,墩乃可移动也”,可见,秦始皇时期就有用铁墩造桥的历史。公元前 206 年,汉将樊哙在汉中留坝建樊河铁索桥,这是世界上最早的铁索桥,距今有 2200 多年历史,该桥经多次修复,直至 20 世纪 50 年代毁坏。公元 1 世纪中叶汉明

帝时,曾在今云南景东地区的澜沧江上“以铁锁系甫北为桥”,名为兰津桥。两汉至隋朝时期,除上述之外,还出现了铁索浮桥,主要代表有湖北西陵峡铁索浮桥、湖北荆门虎牙浮桥、河南洛水天津桥等。唐代至元代时期,铁索桥无论是在建造技术,还是在使用方面都得到飞速发展,特别是铁索浮桥发展更快,其数量明显增多;此外,由于冶铁技术的发展,铁索浮桥被大量用于长江与黄河河道的防御。这一时期铁索桥的主要代表有云南神川铁索桥、云南漾濞水桥、西藏拉萨布达拉宫金桥、四川江油云岩寺桥等;铁索浮桥的主要代表有浙江临海中津桥、浙江黄岩利涉浮桥、山西永济蒲津浮桥等。到了明清时期,全国范围内的铁索桥数量急剧增多,尤其是西部云、贵、川、藏等地的铁索桥数量飞速增加,出现了并列多索铁链桥和并列多索铁眼杆桥等新式铁索桥。我国现存最早的铁索桥是四川大渡河泸定桥,长 103.67m、宽 3m,由 13 根铁索组成,建于 1705 年,距今已 300 余年,新中国成立后修复过一次,现仍在使用。与我国相比,欧洲最早的铁索桥是 1741 年在英格兰建成的温奇(Winch)人行桥;而美国则是 1801 年,由苏格兰移民到美国宾夕法尼亚州的詹姆斯·芬利建造的一座熟铁链式悬索桥(Jacob's Creek Bridge),但在 1825 年损毁,比中国樊河铁索桥晚了近 2000 年。

除悬索桥之外,我国古代还在钢结构建筑方面取得了领先地位。位于江苏省镇江市的甘露寺铁塔,始建于唐宝历元年(825 年),名曰“卫公塔”,唐乾符年间(874—879 年)被毁,宋熙宁年间(1068—1077 年)原址重建。甘露寺铁塔全部以铁仿木构楼阁式塔铸制,残高约为 8m,包括塔基(须弥座)及残塔 4 层。塔身平面为八角形,八面四门,塔基和塔身均有图案,如云水纹、莲瓣双雀、游龙戏珠、佛及飞天像等。甘露寺铁塔不仅反映了中国古代冶铁铸造技术水平和佛教艺术,也反映了宋代木构形制,具有重要的历史、科学、文物及佛教研究价值。建于北宋崇宁四年(1105 年)的山东济宁寺铁塔,铁铸塔身 9 层,计塔座在内共 11 层,通高 23.8m,为八角仿楼阁式建筑风格,塔尖采用鎏金塔顶防雷技术,体现了高超的建筑学、力学原理,是我国现存最高、保存最完整的宋代铁塔。

这一时期,我国在钢结构应用方面处在世界前列,积累了丰富的工程经验。

2. 近代——突破进展

进入 18 世纪 60 年代,第一次工业革命开始。钢铁冶炼技术的进步和生产能力的大幅提高,为钢结构的广泛应用提供了可能。1779 年,英国科尔布鲁克戴尔厂利用生铁建造了塞文河桥(拱桥),跨径 30.7m。由于生铁性脆,宜受压,不宜受拉,仅适用于拱桥。熟(锻)铁抗拉性能较生铁好,19 世纪 40 年代开始出现熟(锻)铁桥,跨径 60~70m 的公路桥多采用锻铁链悬索桥,铁路由于悬索桥的刚度不足而采用桁架桥,1850 年英国建造的布列坦尼亚双线铁路桥,为世界上第一座用熟铁铆接的箱形锻铁梁桥。1855 年美国建成尼亚加拉瀑布公路铁路两用桥,为采用锻铁索和加劲梁的悬索桥,跨径达 250m。1883 年美国建成了布鲁克林大桥,跨度跃升至空前的 486m,由此,拉开了现代大跨度悬索桥建设的帷幕。

在房屋建筑方面,1786 年巴黎法兰西剧院建造了生铁结构屋顶,1801 年建造的英国曼彻斯特萨福棉纺厂的 7 层生产车间,采用生铁梁柱,并首次使用了工字形断面的铁件。1851 年,英国约瑟夫·帕克斯顿设计的水晶宫是 19 世纪前半期铁框架结构技术发展的杰出代表。与此同时,资本主义各国的钢产量迅速增加,价格下降,钢所具有的高强度、良好的韧性和塑性使铁相形见绌,于是铁结构逐渐被钢结构所替代,再加上计算理论的进步,建筑

的高度和跨度都得以大幅提高。1889年,法国建成了埃菲尔铁塔,高度超过300m。同一时期,第一座依照现代钢框架结构原理建造的高层建筑——芝加哥家庭保险公司大厦(10层)于1885年建成。1907年,美国设立伯力恒钢厂(Bethlehem steel),次年开始生产热轧型钢,之后热轧型钢开始应用于建筑结构,一批钢结构摩天大楼不断涌现。20世纪初,焊接技术的突破性进步以及高强螺栓连接的出现,极大地促进了钢结构发展。

20世纪前半叶,由于钢结构防火能力弱等缺陷和钢筋混凝土结构的兴起,钢结构在房屋建筑领域发展一度低迷。第二次世界大战之后,随着经济的复苏及科学技术的进步,钢材的性能和产量取得了突破性进展,计算机逐渐开始应用于钢结构建筑的辅助设计,钢结构建筑的各种结构体系日益成熟,除了在超高层、大跨度结构等方面继续保持优势,以工业化为特征的轻型钢结构在欧美发达国家迅速发展,尤其是60年代以后,发达国家钢材供应有了充分保证,建筑钢材亦有了突破性进展,如新型彩色压型钢板、新型高效能冷弯薄壁型钢和第三代热轧型钢——H型钢的出现,为钢结构在低层建筑的应用和普及创造了条件。

我国近代以来,饱受封建压迫和外敌入侵的屈辱,科学技术发展全面滞后。19世纪末、20世纪初修建的许多钢桥都由外国人设计、建造,如1909年建成的兰州黄河大桥(五跨超静定钢桁架结构),由美国公司设计、德国公司承建。完全由中国人自行设计建造的钢桥可追溯至1905—1909年詹天佑主持建造的京张铁路,其中,钢桥121座,总长度1951.03m。京张铁路的建成,显示了中国人民杰出的智慧和才干,大大增强了中国人民建设自己祖国的信心,周恩来总理曾盛赞这一业绩是“中国人民的光荣”。1937年9月26日,茅以升主持建设的钱塘江大桥建成通车,这是中国人自己设计、建造的第一座双层铁路、公路两用桥,它的建成彻底结束了中国人不能独立建设现代化大桥的历史,是中国桥梁工程史上一座不朽的丰碑。1937年12月23日,为了阻止日军南下,茅以升亲手炸毁了通车仅89天的大桥。抗日战争胜利以后,茅以升受命组织修复,大桥服役至今,远超设计使用年限。在房屋建筑方面,1927年建成了沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房;1931年建成了广州中山纪念堂,屋顶采用钢桁架结构,跨度达到71m。

近代,西方发达国家在钢结构应用方面取得了突破进展,设计理论不断完善,建造经验不断丰富,建筑物的跨度、高度及承载能力大幅提高。我国在这一时期,总体处于落后位置,但也诞生了以詹天佑、茅以升为杰出代表的一批发奋图强、自力更生的爱国工程师,不但给后人留下了传世的不朽工程,更给后人注入了不竭的精神动力!

3. 现代——快速发展

新中国成立后,党和国家非常重视钢铁生产和建筑钢结构发展,但受限于我国当时钢材的生产能力和综合国力水平,钢结构广泛应用还不具备条件,主要集中于一些重点工程。

桥梁工程中,1957年,在苏联专家的帮助下建成我国第一座跨长江公铁两用桥——武汉长江大桥,桥长1670m,实现了“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,桥长4589m,它是长江上第一座由中国自行设计和建造的现代化双层式铁路、公路两用桥梁,是苏联专家撤走并中断了钢铁供应和成套技术后,中国人靠自己的力量建成的桥,它是20世纪60年代中国经济建设的重要成就、中国桥梁建设的重要里程碑,它破解了当时的“卡脖子”问题,具有极大的经济、政治和战略意义,是中国人民的“争气桥”,它开创了我国“自力更生”建设大型桥梁的新纪元。

房屋建筑方面,新中国成立初期,钢结构主要集中应用于重型厂房、大跨度公共建筑以及塔桅结构中。新中国成立初期,几个大型钢铁联合企业如鞍山、武汉、包头等钢厂的炼钢、轧钢、连铸车间等都采用了钢结构。1959年建成的人民大会堂,钢屋架达到60.9m;1968年建成的首都体育馆,屋盖为平板钢网架,长112.9m,宽99m;1975年建成的上海体育馆,屋面为圆形钢网架,跨度110m;1975年建成的兵马俑1号坑钢结构,形式为三铰拱,跨度72m。1962年建成的北京工人体育馆,采用的圆形双层辐射式悬索结构,直径为94m;1967年建成的浙江体育馆,采用的双曲抛物面正交索网的悬索结构,呈椭圆平面,尺寸达80m×60m。在塔桅结构方面,广州、上海等地都建造了高度超过200m的多边形空间桁架钢电视塔。1977年北京建成的环境气象塔为高达325m的五层纤绳三角形杆身的钢桅杆结构。

1978年以后,我国实行改革开放政策,伴随经济建设的突飞猛进,我国钢结构行业走出低潮期,迎来前所未有的快速发展。各类钢结构桥梁、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、机场候机楼、大型客机检修库、自动化高架仓库等大批量涌现。尤其是20世纪90年代,我国1996年钢铁产量突破1亿t,一举跃居世界第一,钢结构应用范围和规模进一步扩大。

桥梁工程中,斜拉桥方面,1987年建成通车的胜利黄河大桥,是国内首座双箱钢斜拉桥,主桥长682m,主跨达288m。1991年通车的上海南浦大桥,主桥为一跨过江的双塔双索面斜拉桥,全长846m,采用钢梁与钢筋混凝土预制板相结合的叠合梁结构,主孔跨径423m,邓小平亲自题名“南浦大桥”,这座当年国内第一跨度斜拉桥,见证了中国建桥史的高歌猛进之路。1993年建成的上海杨浦斜拉桥(钢与钢筋混凝土叠合梁),主桥全长1172m,主跨602m,一举超越1991年挪威建成的主跨530m的斯堪桑德大桥,成为当时世界最大跨径斜拉桥,它标志着我国斜拉桥的建设水平已进入世界前列。福州青洲闽江大桥(2000年建成,主跨605m)、南京长江二桥(2001年建成,主跨628m)、南京长江三桥(2005年建成,主跨648m)、武汉白沙洲长江大桥(2008年建成,主跨620m)、苏通长江公路大桥(2008年建成,主跨1088m)、香港昂船洲大桥(2009年建成,主跨1018m)、鄂东长江大桥(2010年建成,主跨926m)等世界跨度前列的斜拉桥集中涌现,其中,苏通长江公路大桥(双索面钢箱梁)首次将斜拉桥跨度突破千米大关,并成为新的世界第一跨度斜拉桥。2011年建成的胶州湾大桥,由沧口航道桥、红岛航道桥及大沽河航道桥三部分组成,分别采用双钢箱梁斜拉桥、钢箱梁斜拉桥、钢箱梁悬索桥,是国际屈指可数的现代化桥梁集群工程,并于2013年荣获国际桥梁大会乔治·理查德森奖。悬索桥方面,1996年西陵长江大桥(主梁采用钢箱梁)建成通车,全桥总长1118.66m,主跨900m,该桥的设计理论及施工工艺水平均代表了当时世界上大跨度桥梁的发展方向,该桥的成功建成,带动中国的桥梁建设水平进入一个新时代。1997年虎门大桥(主梁采用加劲钢箱梁)建成通车,航道桥单跨888m,虎门大桥是当时中国国内规模最大的公路桥梁,也是中国首座加劲钢箱梁悬索结构桥梁。1999年建成通车的江阴长江公路大桥(主梁采用钢箱梁),是中国第一座跨度超千米的特大桥(桥梁全长3071m,主跨1385m),代表中国20世纪90年代造桥最高水平,是我国桥梁工程建设新的里程碑,跻身世界桥梁前列(当时的世界第四)。之后,润扬长江公路大桥(2005年建成,主跨1490m)、武汉阳逻长江大桥(2007年建成,主跨1280m)、舟山西堠门大桥(2009年建成,主跨1650m)等世界跨度排名前十的悬索桥成批涌现,尤其是西堠门大桥,更是荣获了国际桥梁界“诺贝尔奖”——古斯塔夫·林德撒尔奖。钢桁梁桥及拱桥方面,2003年建成通车的上

海卢浦大桥,主跨 550m,是当时世界跨度最大的钢结构拱桥。2009 年建成的重庆朝天门长江大桥,主跨 552m,打破了卢浦大桥的纪录。2011 年建成通车的南京大胜关长江大桥,为六跨连续钢桁梁拱桥,建成时是世界首座六线铁路大桥,世界上跨度最大的高速铁路桥,也是设计荷载最大的高速铁路桥,具有体量大、跨度大、荷载大、速度高“三大一高”的特点,它建成时代表了中国桥梁建造的最高水平,标志着中国桥梁建造技术跻身于世界领先行列,并荣获古斯塔夫·林德撒尔奖。2012 年建成的四川合江县波司登大桥,主跨 530m,是世界上跨度最大的钢管混凝土拱桥。其他如巫山长江大桥(2005 年建成,主跨 492m,钢管混凝土拱桥)、宁波明州大桥(2011 年建成,主跨 450m,钢拱桥)等,比比皆是,均在同类桥型中排在世界前列。2013 年建成通车的九江长江大桥,是双层双线铁路、公路两用桥,是中国桥梁建设史上第三座“里程碑”式的桥梁,是当时世界最长的铁路、公路两用的钢桁梁大桥。

房屋建筑方面,同发达国家相比,我国的超高层钢结构建筑发展起步较晚,在改革开放以后,尤其是 20 世纪 90 年代以后,进入高速发展期,也成为国民经济高速发展的重要标志。1988 年建成的深圳发展中心大厦,高度 165.3m,是国内第一座超高层钢结构建筑。1990 年北京建成的京广中心大厦,高度 209m,是我国第一座突破 200m 的超高层钢结构建筑。1992 年建成的香港中环广场(374m)一度居亚洲第一,1996 年建成的深圳地王大厦(384m),成为当年的亚洲第一、世界第四高楼。1999 年建成的上海金茂大厦(88 层,高 420.5m),央视纪录片中赞誉其为“中国建筑通向新世纪的通天宝塔”,标志着我国超高层钢结构已进入世界前列。之后,2003 年香港国际金融中心二期(420m)、2003 年台北 101 大厦(508m)、2008 年上海环球金融中心(492m)、2010 年香港环球贸易广场(484m)、2010 年广州国际金融中心(439m)、2010 年南京紫峰大厦(450m)、2011 年深圳京基 100 大厦(442m)等如雨后春笋般涌现,集团式冲进世界最高建筑排行榜前列。在钢塔桅结构方面,1995 年建成的青岛电视塔,塔高 232m,是当时的“中国第一钢塔”。2000 年建成的石家庄电视塔,塔高 280m,同年建成的哈尔滨龙塔,塔高 336m,成为当时亚洲第一;2009 年建成的河南广播电视塔(中原福塔),塔高 388m;2009 年建成的广州塔(小蛮腰),总高度达到 600m,位居世界前列。在大跨度建筑和单层工业厂房方面,1994 年建成的天津市体育中心体育馆,屋面采用双层网壳,跨度达 135m;1996 年建成的嘉兴电厂干煤棚,采用柱面双层网壳结构,跨度达 103.5m;1997 年建成的上海八万人体育场,屋盖采用马鞍形环形大悬挑空间钢结构,最大悬挑长度达 73.5m,当时为世界第一;1999 年建成的上海浦东国际机场航站楼(一期),首次采用张弦梁屋盖结构,跨度达 82.6m,2002 年广州国际会展中心采用这种结构,跨度达 126.6m;2004 年,哈尔滨国际会展中心跨度达 128m。2010 年上海世博会主题馆西侧展厅屋盖结构采用单向张弦桁架,实现了 180m×120m 展厅全厅无柱,为亚洲最大的无柱展馆。这些建筑都位居当时同类建筑中最大跨度的前列,这些建筑的建成也说明我国大跨度钢结构技术已接近国际先进水平。

从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初,我国钢结构在各个领域高速发展,迅速摆脱了落后面貌,尤其是进入 21 世纪的十几年,更是在多个领域达到世界先进水平。经济的飞速发展大型土木工程建设创造了前所未有的机遇,中国土木人奋发图强、创新发展,没有辜负时代,向世界展示了中国高度、中国跨度、中国速度。

4. 新时代——高质量创新发展

进入新时代,我国钢结构保持高速发展的良好势头,在各个领域继续发展。

桥梁方面,2013年建成通车的浙江常台高速嘉绍大桥,全长10.137km,主航道桥采用独柱四索面六塔斜拉钢箱梁桥(70m+200m+5×428m+200m+70m),索塔数量、主桥长度规模位居世界前列,该桥的设计将自然、人文和科技创新完美融合,获得了包括国际桥梁最高奖——古斯塔夫·林德撒尔奖在内的多个奖项。2016年建成通车的杭瑞高速北盘江大桥,主桥采用双塔双索面钢桁梁斜拉桥,全长1341.4m,主跨720m,桥面至江面距离565.4m,桥塔顶部至江面垂直距离740m,为世界少有的高桥,荣获古斯塔夫·林德撒尔奖。2016年建成通车的贵黔高速鸭池河大桥,为双塔双索面钢桁梁斜拉桥,全长1240m,主跨800m,荣获古斯塔夫·林德撒尔奖。2019年建成的平罗高速平塘大桥,为三塔双索面钢混组合梁斜拉桥,大桥全长2135m(249.5m+550m+550m+249.5m),荣获古斯塔夫·林德撒尔奖。2022年7月,中国最大跨度多功能斜拉桥——红莲大桥成功合龙,该桥全长1772m,采用双塔双索面混合梁斜拉桥型,塔高180m,采用钢箱梁结构的主跨达580m,同时搭载多回路高压电缆、燃气、通信和输水等过江市政管道,是目前我国同类型多功能斜拉桥的最大跨度。2012年建成的泰州长江公路大桥,主桥采用三塔双跨(2×1080m)钢箱梁悬索桥,是世界上该种桥型的最大跨径。2018年建成的太渡河大桥,为钢桁梁悬索桥,全长1411m,主跨1100m,荣获古斯塔夫·林德撒尔奖。2019年建成通车的南沙大桥,主桥采用钢箱梁悬索桥,主跨达1688m,为世界第三大跨度。2019年建成通车的武汉杨泗港长江大桥,采用钢桁梁悬索结构,主跨长1700m,为世界第二大跨度。2020年投入使用的五峰山长江大桥,为公铁两用钢桁梁双塔悬索桥,主桥长1428m,采用84m+84m+1092m+84m+84m跨径布置,该桥是高速铁路桥梁首次采用悬索桥结构体系,填补了世界高速铁路悬索桥、中国公铁两用悬索桥和中国铁路悬索桥三项空白,并在国际上率先建立起中国高速铁路悬索桥的设计方法、计算理论和相关技术标准。2019年9月27日通车运营的秭归长江大桥,为中承式钢桁架拱桥,全长883.2m,采用2×35m+531.2m+9×30m的跨径布置,2020年获古斯塔夫·林德撒尔奖。2021年建成通车的国道G320线贵州花鱼洞大桥,该桥将原主跨150m预应力混凝土桁式组合拱桥拆除重建为主跨180m中承式钢管混凝土提篮拱桥,新建桥梁全长269.6m,采取“利用新拱拆旧桥”的办法,实现了“水源零污染、景区零干扰、废料再利用、景观新地标”,2022年获古斯塔夫·林德撒尔奖,凸显了该桥的技术含量、环保价值和美学价值,标志着我国桥梁在“小而精”建设方面达到世界认可的全新高度。

2018年建成的港珠澳大桥,是世界第一跨海大桥,全长55km,由桥、岛、隧三部分组成,连接粤港澳三地,三座通航桥采用斜拉桥。港珠澳大桥被称为桥梁界“珠穆朗玛峰”,创下世界上里程最长、沉管隧道最长、寿命最长、钢结构最大、施工难度最大、技术含量最高、科学专利和投资金额最多等多项世界纪录,获“2020年国际桥梁大会(IBC)超级工程奖”。习近平总书记对该项目给予了高度评价:港珠澳大桥的建设创下多项世界之最,非常了不起,体现了一个国家逢山开路、遇水架桥的奋斗精神,体现了我国综合国力、自主创新能力,体现了勇创世界一流的民族志气。这是一座圆梦桥、同心桥、自信桥、复兴桥。大桥的建成通车,进一步坚定了我们对中国特色的社会主义的道路自信、理论自信、制度自信、文化自信,充分说明社会主义是干出来的,新时代也是干出来的!

目前在建的常泰长江大桥,全长 10.03km,主航道桥为主跨 1176m 钢桁梁斜拉桥,建成后将成为世界最大跨度斜拉桥。南京仙新路过江通道悬索桥(主跨 1760m,钢箱梁悬索桥)、六横公路大桥(主跨 1768m 钢箱梁悬索桥)、深中通道伶仃洋大桥(主跨 1666m 钢箱梁悬索桥)、龙潭长江大桥(主跨 1560m 钢箱梁悬索桥)等一批大跨度悬索桥正在建设中。

总体来讲,进入新时代,我国钢结构桥梁在保持大跨度优势的同时,更加注重技术与材料创新、工程与周边环境的协调,从我国近年屡获国际桥梁协会大奖可充分证明,我国桥梁建设水平在国际上处于领先地位,得到了全世界的认可。

房屋建筑方面,同样发展迅速。2019 年建成北京大兴国际机场航站楼,最大跨度 180m,总用钢量约 6 万 t。2020 年投入使用的国家速滑馆,采用单层双向正交马鞍形索网屋面(198m×124m),用钢量仅为传统屋面的 1/4。2020 年竣工的陕西奥体中心体育馆,屋盖采用双层经纬式网架结构,最大跨度达 136.6m,入选“2020 年度全球最佳体育场”。2021 年建成的国家会展中心(天津)一期工程,16 个展厅均采用 84m 跨度的钢桁架结构,总建筑面积 48 万 m²,总用钢量 12.8 万 t,入围国际“杰出建筑结构奖”。超高层建筑越来越多、越建越高。2015 年封顶武汉中心大厦(438m),2016 年建成上海中心大厦(632m),2017 年建成广州周大福金融中心(530m),2017 年建成深圳平安大厦(599m),2018 年建成深圳华润总部大厦(392.5m),2018 年建成长沙国金中心(452m),2018 年建成北京中信大厦(528m),2019 年建成天津周大福金融中心(530m),均位居世界高楼排行榜前列。截至 2022 年,据不完全统计,国内建成 300m 以上高度的超高层建筑 100 多座、200m 以上的 1100 多座,超高层建筑占全球总数超过 60%。另外,在建的武汉绿地中心(设计高度 636m)、济南山东国金中心(设计高度 428m)、重庆陆海国际中心(458m)等均已封顶,贵阳国际金融中心(401m)、苏州中南中心(设计高度 499m)、南京绿地金茂国际金融中心(499.8m)、南京河西鱼嘴金融中心(498.8m)、武汉周大福金融中心(475m)、昆明绿地东南亚中心(428m)等正在建设中。

“建筑高度的背后,是一个城市的梦想”。超高层建筑一方面具有集约化利用土地、提升日常工作效率、强化城市地标意象、推动建筑科技进步等优点,同时也产生了诸多现实问题,如大量空置、环境污染、城市热岛、碳排放量高、建设运营成本高、安全隐患大等,为贯彻落实新发展理念,统筹发展和安全,科学规划建设管理超高层建筑,促进城市高质量发展,住房和城乡建设部、应急管理部于 2021 年 10 月联合印发《关于加强超高层建筑规划建设管理的通知》,对超高层建筑建设进行限制。2022 年,国家发展改革委在《“十四五”新型城镇化实施方案》中明确要求“严格限制新建超高层建筑,不得新建 500 米以上建筑,严格限制新建 250 米以上建筑”。“落实适用、经济、绿色、美观的新时期建筑方针,治理‘贪大、媚洋、求怪’等建筑乱象”。至此,在未来较长时间内,我国超高层建筑将不会再有明显增长。

与超高层建筑限制使用对应,国家积极推进装配式建筑发展,钢结构作为装配式建筑的典型结构形式之一,在推动装配式建筑大潮中得到快速发展。

进入新时代,国家牢固树立和贯彻落实创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,按照适用、经济、安全、绿色、美观的要求,推动建造方式创新,大力发展装配式混凝土建筑和钢结构建筑,近年出台了一系列相关政策文件,支持鼓励作为装配式建筑重要内容的钢结构发展。

2016 年 2 月,《中共中央 国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》明确指出,“发展新型建造方式。大力推广装配式建筑,减少建筑垃圾和扬尘污染,缩短建造

工期,提升工程质量”。“加大政策支持力度,力争用 10 年左右时间,使装配式建筑占新建建筑的比例达到 30%。积极稳妥推广钢结构建筑”。

2016 年 9 月,发布了《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》,指出:“发展装配式建筑是建造方式的重大变革,是推进供给侧结构性改革和新型城镇化发展的重要举措,有利于节约资源能源、减少施工污染、提升劳动生产率和质量安全水平,有利于促进建筑业与信息化、工业化深度融合、培育新产业新动能、推动化解过剩产能。近年来,我国积极探索发展装配式建筑,但建造方式大多仍以现场浇筑为主,装配式建筑比例和规模化程度较低,与发展绿色建筑的有关要求以及先进建造方式相比还有很大差距”。“因地制宜发展装配式混凝土结构、钢结构和现代木结构等装配式建筑。力争用 10 年左右的时间,使装配式建筑占新建建筑面积的比例达到 30%”。

2017 年 3 月,住房和城乡建设部印发《“十三五”装配式建筑行动方案》,提出“到 2020 年,全国装配式建筑占新建建筑的比例达到 15%以上,其中重点推进地区达到 20%以上,积极推进地区达到 15%以上,鼓励推进地区达到 10%以上”。

2019 年 10 月,国家发展改革委印发《绿色生活创建行动总体方案》,按此要求,2020 年 7 月,住房和城乡建设部、国家发展改革委、教育部、工业和信息化部等七部委联合发布《绿色建筑创建行动方案的通知》,明确要求:“推广装配化建造方式。大力发展钢结构等装配式建筑,新建公共建筑原则上采用钢结构。编制钢结构装配式住宅常用构件尺寸指南,强化设计要求,规范构件选型,提高装配式建筑构配件标准化水平。推动装配式装修。打造装配式建筑产业基地,提升建造水平。”

2021 年 6 月,住房和城乡建设部发布《关于加强县城绿色低碳建设的意见》,指出:“发展装配式钢结构等新型建造方式。全面推行绿色施工。”

2021 年 10 月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于推动城乡建设绿色发展的意见》,文件中明确:“大力发展装配式建筑,重点推动钢结构装配式住宅建设,不断提升构件标准化水平,推动形成完整产业链,推动智能建造和建筑工业化协同发展。”文件强调必须坚持以人民为中心,坚持生态优先、节约优先、保护优先,坚持系统观念,统筹发展和安全。

2021 年 10 月,国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》,对碳达峰阶段的工作进行总体部署,确定了 2030 年前碳达峰“十大重点行动”。其中在城乡建设领域碳达峰方案中明确:“加快推进新型建筑工业化,大力发展装配式建筑,推广钢结构住宅,推动建材循环利用,强化绿色设计和绿色施工管理”。在“双碳”目标背景下,开启我国钢结构建筑应用新篇章,必须打通型钢生产、钢结构制作安装、工程承包和房地产全产业链联合协作、配套集成环节,突破推广瓶颈、培育产业化力量,不断提高钢结构建筑质量、品质,合理降低工程造价,充分体现钢结构建筑优势。

2022 年 5 月由中共中央、国务院出台的《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》提出要大力发展绿色建筑,推广装配式建筑、节能门窗、绿色建材、绿色照明,全面推行绿色施工。

2022 年 6 月,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确要求,推进新型城市建设,要“推广绿色建材、装配式建筑和钢结构住宅,建设低碳城市”。

我国建筑钢结构应用经过近 10 年的快速发展,已经进入一个新的发展阶段,这个阶段

将以绿色低碳发展理念,推动产业升级和节能减排为重要特征。

受益于政策的大力支持,我国钢结构已经步入一个快速发展期。2015—2020年,全国钢结构产量由5100万t增加至8900万t,钢结构产值占建筑业总产值的比例总体呈上升趋势,2020年达到3.07%。2021年,全国钢结构产量达到9700万t,2022年达10180万t,钢结构占比建筑业总产值稳步上升,但这仍远远落后于国外30%的比例,未来发展潜力巨大。《钢结构行业“十四五”规划及2035年远景目标》提出钢结构行业“十四五”期间发展目标:到2025年年底,全国钢结构用量达到1.4亿t左右,占全国粗钢产量比例15%以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例达到15%以上。到2035年年底,我国钢结构建筑应用达到中等发达国家水平,钢结构用量达到每年2.0亿t以上,占粗钢产量25%以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例逐步达到40%,基本实现钢结构智能建造。

2022年召开的党的二十大,在报告中明确指出,要加快构建新发展格局,着力推动高质量发展,并强调“高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务”,“要坚持以推动高质量发展为主题”。作为国民经济重要支柱的建筑产业,正经历着深刻、复杂而全面的变革,作为碳排放大户的建筑业绿色化、低碳化势在必行,责任重大。大力推广钢结构不仅对生态文明建设、绿色发展具有重要意义,并且对于供给侧结构性改革、促进工业化转型具有积极作用。因此,准确把握党的二十大报告提出的数字化、“双碳”、绿色发展、智能化等方面新思想,按照国家关于“双碳”工作的部署和要求,从根本上改变当前城乡建设领域存在的“大量建设、大量消耗、大量排放”的突出问题,推动建筑行业的高质量发展是大势所趋!

钢结构凸显的绿色低碳特征,将作为中国工业产业和循环经济的代表之一,引领“创造绿色城市生活”的建筑方向,推动低碳经济健康发展。

钢结构未来可期!

1.4 补充阅读:中国杰出的爱国工程师——詹天佑

我国科学技术界和广大人民,以景仰和自豪的心情,纪念19世纪末20世纪初我国最杰出的爱国工程师詹天佑一百周年诞辰;纪念他建成了第一条完全由中国工程技术人员设计、施工的铁路干线——京张铁路,在我国铁路建设史上写下了光辉的一页;纪念他为我国铁路工程技术的发展,作出的卓越贡献;更纪念他蔑视帝国主义,发奋图强、自力更生的爱国主义精神,以及踏实钻研、同工人结合的作风。

1861年4月26日詹天佑出生在广东省南海县。他祖父原来开设一家茶行,在鸦片战争中,被英国的军舰大炮轰垮了,他父亲只好过着穷苦的生活。詹天佑幼小时,就常听到“平英团”“升平社学”“佛山团练局”等人民抗英武装斗争的故事,从小就种下了爱国主义思想的种子。

詹天佑11岁时(1872年),被清政府第一批派遣出国留学。他在美国学习了近代的科学技术知识,接触了资本主义的“物质文明”,同时也看到了美国社会存在着的许多不平等现象,尤其是对华工的种种虐待歧视。他中学毕业后,曾报考美国陆海军学校,美国国务院的回答是:“这里没有地方可以容纳中国学生”,就这样极端轻蔑无礼地拒绝了他的要求。詹天佑深深感到祖国地位的低下和中国人民受到的耻辱。他努力寻找祖国贫弱的原因和挽救祖国的出路,在具有资产阶级改良主义思想的老师容闳等人的影响下,他认为只有通过修筑

铁路,建造工厂,开发矿藏,发展科学技术,才能使祖国富强起来。因此,他决心学习科学技术,为祖国服务。1878年,他考入美国耶鲁大学土木工程专科。他学习非常努力,成绩优异,入学第一年数学考试成绩就得全校第一名,他的毕业论文《码头起重机的研究》得到很高评价。1881年,他以出色的成绩毕业,同年秋天和同学们一起回国。

1888年,天津铁路公司总经理伍廷芳聘请詹天佑为工程司,参加修筑芦台到天津的铁路(这条铁路以后延长为关内外铁路,即现在的京沈铁路)。他是第一个担任铁路工程师的中国人。从此,他终生都为了中国的铁路建设事业而奋斗。他参加修筑铁路后,在实践中积累了丰富的经验和本领。他参加了当时最艰巨的滦河大桥等的修建工程,并显示出他已经是一个优秀的工程师了。1894年,英国土木工程学会推选詹天佑为会员,这是外国人第一次吸收中国人参加具有较大代表性的学术团体。

我国的铁路一开始就被帝国主义所控制,用作对我国进行经济、政治、军事、文化侵略的工具。尤其是1894年中日战争后,西方资本主义国家已进入帝国主义阶段,加紧了对殖民地的分割,当时的我国成了列强争夺的最后一块“大肥肉”。各个帝国主义国家开始了对中国铁路建筑让与权的疯狂争夺,争先恐后地在我国抢占修建铁路的权利,铁路沿线成了帝国主义的“势力范围”,我国面临被帝国主义瓜分的危险。当时,具有爱国主义思想的我国人民提出了“中国铁路应修自中国人”的爱国口号。詹天佑在铁路工地上亲眼看到帝国主义分子侵略我国的暴行和我国人民的反抗斗争,他下定决心:一定要为祖国修建完全由我国人民自己来修的铁路,不让帝国主义霸占掠夺。

1900年,我国人民发动了伟大的反帝爱国斗争——“义和团运动”,帝国主义为了镇压中国人民革命斗争,派遣侵略军队占领了关内外铁路,利用它来运输军队屠杀中国人民。1901年,詹天佑毅然离开被“八国联军”占领的关内外铁路,到长江以南的萍醴铁路工作。1902年,“八国联军”在强迫清政府签订卖国投降的《辛丑条约》,抢夺了许多权利后,将关内外铁路“归还”中国。詹天佑被派参加接收关内外铁路的工作。他日夜忙碌,披风沥雨,恢复了饱受帝国主义蹂躏的关内外铁路,并继续展筑,不久,这条铁路就全线竣工。

“戊戌变法”和“义和团运动”失败后,新兴的民族资产阶级开始了独立的政治和经济运动,在经济方面,全国出现了“拒借洋债、拒用洋匠、收回权利、自办铁路”的群众运动。全国各省几乎都成立了商办铁路公司,要求修筑铁路。1905年,在人民的压力和帝国主义国家自相矛盾的情况下,清政府决定派詹天佑为总工程师,负责修建京张铁路。这个消息一传出,马上轰动了全国。

京张铁路长约二百公里,经过内外长城间的燕山山脉。这条铁路是连接华北和西北必经的交通要道,也是古来军事上兵家必争之地,它具有重大的经济、政治、军事意义。英国等帝国主义国家早就垂涎欲滴,想夺取这条铁路,控制我国北部。英国工程师金达曾秘密勘测过这条线路,他发现这条铁路工程巨大,尤其是从南口到岔道城一带,叫作“关沟段”的地方,要在悬崖绝壁之上修起一条陡险的铁路,穿过古称“天险”的长城要塞居庸关、八达岭。铁路要通过八达岭,按照欧美的设计,必须开凿一条长达六千余尺的隧道,工程的艰险当时在世界上是少见的。帝国主义分子认为我国人根本不可能担负这样艰巨的工程。他们到处发表诬蔑中国人民的谬论,说什么“会修铁路通过关沟段的中国工程师还没有出世!”“中国人想不靠外国人自己修铁路,就算不是梦想,至少也要过五十年才能实现!”这群帝国主义分子都等待着詹天佑的失败,好出面夺取京张铁路。

詹天佑知道修筑这条铁路有很大困难,但他决心要用中国人民自己的力量修成京张铁路,来驳斥帝国主义者的谰言。他先后勘测了好几条路线,根据经费、工期和地形等条件,认真比较,最后选定了现在的线路。对全线最困难的八达岭隧道,他在现场进行了反复勘测,和我国工程师、工人、当地居民共同研究,大胆推翻了外国工程师的设计。按照他们的设计,铁路在爬山时,每升高一尺,要有至少一百尺长的线路,因而上升很慢,山腰隧道很低,需要很长的隧道。詹天佑为了要缩短隧道长度,就把隧道抬高,但这就要求非常陡峻的铁路“坡度”,因此他采用了两个办法,一是把升高一尺所需的铁路长度,从一百尺减至三十三尺,准备将来行车时,用两个火车头牵引列车,来克服上下陡坡的困难;二是在青龙桥车站附近,修筑一条“人”字形铁路,也用很陡的坡度,使火车先往西走一段,升高一层,然后“折返”,再往东又走一段,再上升一层,因而在原有有限回旋余地的半山腰中,就把铁路大大抬高,也就是把隧道抬高,来减少隧道的长度。这样,八达岭隧道的长度就降低到外国工程师设计的一半。他还取消了鹁鸽梁、九里桥等地的隧道,大大节省了工款,缩短了工期。

为了争取早日修成京张铁路,詹天佑运用了分段勘测、设计、施工和分段通车的方法。在这里,他对我国铁路的技术标准,又树立了一个良好模范。那时,帝国主义者为了推销他们的铁路器材,想使我国铁路的技术标准都跟着他们走,如“轨距”一项,就有英美制、比法制、日本制、俄国制等,纷然杂陈,非常混乱。詹天佑坚持采用适合我国情况的一点四三五米的标准轨距,树立先声,以便将来全国铁路都可“车同轨”,畅通无阻。1905年10月,丰台到南口的第一段工程开始动工,同时继续进行第二、三段的勘测设计。不到一年,第一段工程完工,丰台到南口就先行通车。这时,第二、三段也已完成勘测设计,不久就陆续开工。

京张铁路的第二段就是有名的“关沟段”,共有四座隧道,这是全线工程的关键。开工后,詹天佑一直住在工地上亲自指导施工,注意吸取工人建议,研究改进施工方法和劳动组织。八达岭隧道太长,如按一般方法仅从两端施工,工期势必太久。因而他采用了中部“凿井法”,从山顶打下两口直井,到了路基后再分两头向洞口开凿,加上两端洞口,一共有6个工作面同时施工,把一座长隧道变成了三座短隧道,使工期大大缩短了。他工作认真细致,测量打线都要一再复核,尽力避免错误,八达岭隧道接通时,尺寸和原设计完全相符。在八达岭隧道的施工过程中,他们曾遇到缺乏经验、没有机器设备、石质坚硬、通风不畅、洞顶漏水等许多困难。詹天佑以对祖国荣誉负责的态度来对待这些困难的考验。他经常和工人在一起商量问题,有一次他对计算一种土石方的工作量感到困难,就请教一位工人,那位工人就用算盘把它解决了,他非常高兴。他在工程中,总用最简单而最有效的方法来克服困难。他对工程检查最为认真,时常拿一根铁签和一桶水,在混凝土表层打一小洞,灌进水,看透水情况来察看质量,这个方法为工人们采用,直到现在。他藐视困难,艰苦朴素的作风,对群众产生了很大影响。他说:“我国地大物博,而于一路之工,必须借重外人,引以为耻。”(《京张铁路工程纪略叙》)参加修筑京张铁路的全体中国职工,“上自工程师,下至工人,莫不发愤自雄,专心致意,以求达其工竣之目的”(《旅汉同学会新年大会演说词》)。就在这种高度爱国主义精神的鼓舞下,他们团结一心,努力工作,终于克服了重重艰难险阻,出色地完成了这项空前巨大复杂的工程,仅用了十八个月就把八达岭隧道打通了,工期缩短一半。

詹天佑注意学习我国民族建筑的传统。他采用我国自造的水泥和当地开采的石料,修筑了许多民族形式的拱桥,这些拱桥质量坚固,形式美观,而且节省了大量钢材。

詹天佑在勘测线路时,发现铁路附近有煤矿,就亲自去进行勘查。他在勘测报告中提出

开发这些煤矿的建议,指出这样做有许多好处,比如就地供应铁路用煤,降低运输成本;增加铁路运输量;增加人民谋生机会等。后来他修建了煤矿支线,适应开矿运输的需要。他在施工中时刻注意保护农业生产,少占耕地民房,尽量不使农民遭受损失,因而受到了群众的欢迎和支持。

在施工中,詹天佑很注意培养训练我国的工程技术人员。京张铁路开始勘测时,只有两个学生跟他一起工作,后来他还把其中的一个调给另一条急需工程师的我国自办铁路。詹天佑知道我国迫切需要自己的技术人才,就大胆地运用在实践中培养人才的办法,招收了一批青年做练习生,边学边做,边做边学,迅速地培养出一批土生土长的技术力量,不但担任了京张铁路的技术工作,还为我国自建铁路培养了人才。他们在我国铁路建设事业中起了很大作用。

1909年9月京张铁路全线竣工。它的全部工程都是由我国自己修建的,施工期不满四年,比原计划提前两年完成,共用工款六百多万两白银,这是当时我国修筑的成本最低的铁路干线。京张铁路完工后,国内外许多人都来参观。他们看到我国自力修建这样艰巨的工程,都啧啧称赞,连那些原来嘲笑詹天佑“狂妄自大”“不自量力”的帝国主义分子,也不得不承认詹天佑和我国职工工作得“十分完善”。1909年10月2日,在南口举行了盛大的通车庆祝会,会上各地来宾热烈祝贺这项伟大的成就。来宾朱淇激动地说:“詹天佑和我国职工修成京张铁路,给我国争了口气。既然铁路可以我国自己修,那么将来一切矿山工厂也都可以由我国人民自己办。今天我国人为京张铁路庆祝,也就是为全中国的矿山工厂庆祝。”这段话代表了当时全国广大群众的共同心情。

京张铁路的修成,极大地鼓舞了中国人民的民族自信心,推动了广大群众“收回利权”,自办铁路的爱国运动。他曾亲自到京汉线的黄河大桥进行勘察,并担任了沪嘉、洛潼铁路的顾问总工程师。京张铁路通车后,詹天佑一面开始展筑张家口到绥远的铁路,一面应四川、湖北人民要求担任川汉铁路总工程师兼会办。1910年,商办粤汉铁路公司选举詹天佑为总理兼总工程师。他热情地支持商办铁路,用中国技术人员代替原来盘踞在粤汉铁路的外国工程师,使工程大有起色。但是,清政府在“宁赠友邦,不予家奴”的卖国政策指导下,把商办的汉粤川铁路出卖给英美法德四国。这个卖国行为激起了全国人民强烈的反抗。1911年,以反对清政府出卖中国铁路的“保路运动”为导火线,爆发了伟大的辛亥革命,推翻了君主专制制度。詹天佑欢迎辛亥革命,觉得这是拯救中国的希望。他组织粤汉铁路公司的同人,欢迎回到广州的孙中山先生。孙中山先生也十分器重他,希望他帮助实现修建十万英里铁路的计划。

1912年,辛亥革命后不久,詹天佑发起组织了“中华工程师会”(后改名为“中华工程师学会”),并被选为会长。他希望能把全中国的工程技术人员团结和组织起来,为建设富强的祖国而共同努力。他积极主持“中华工程师学会”的工作,开展各种学术活动,出版学报,还亲自编撰出版了《京张铁路工程记略》和《华英工学字汇》两部著作。前一部记述了修筑京张铁路的经验,后一部是中国第一部工程技术的词典,这两部著作对我国技术界起了很大作用。他还举办了科学征文悬赏以鼓励科学技术著作,并组织捐款在北京买了一所房子,作为“中华工程师学会”的会所。

由于资产阶级的软弱,辛亥革命中途流产。北洋军阀窃取政权后,把中国铁路的许多权利出卖给帝国主义,詹天佑的理想破灭了。