



“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



Design of Metal Structure for  
Mechanical Equipment

# 机械装备金属结构设计

第③版

太原科技大学 徐格宁 © 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育机械类特色专业教材

# 机械装备金属 结构设计

第3版

主编 徐格宁  
参编 徐克晋 陆凤仪 郑 荣  
翟甲昌 张荣康 周奇才  
宋甲宗 王 欣 董 青  
戚其松  
主审 王金诺 郑惠强



机械工业出版社

本书是“十三五”国家重点出版物出版规划项目——现代机械工程系系列精品教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分十二章，分别阐述机械装备金属结构设计的目的、要求、特点、方法和应用场合，金属结构计算原理和基本规定。本书以起重机金属结构设计为主线，详细介绍了金属结构的材料特性与选择原则，起重机整机、结构件工作级别的划分方法，载荷计算及载荷组合，焊缝、铆钉、螺栓连接计算方法，轴向受力、横向受弯、受扭等基本构件的计算方法，柱、梁、桁架、桥架、门架、臂架、塔架等典型机械装备结构的构造和 design 方法及步骤。

为便于总结和复习，每章末附有本章小结。为方便设计使用，本书提供了有关结构计算的公式和计算图表及数据。附录中给出了金属结构设计所需的型钢表。

本书全面贯彻国家、行业有关现行标准和法定计量单位，符合工程设计的要求。

本书不仅注重金属结构基本计算原理的阐述，而且坚持理论方法与实际工程相结合，针对产品对象提出分析方法，有的放矢地解决实际工程问题。基本设计内容体现了计算原理的理论性，典型装备设计体现了设计步骤的实践性，引进现行国标体现了设计依据的先进性，结构设计的 3S (Strength, Stiffness, Stability) 基本要求体现了设计方法的系统性。

本书主要作为高等院校机械工程专业机械装备（起重机械、运输机械、工程机械、矿山机械、物流机械等）结构设计的教学用书，也可供有关专业结构方向的工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械装备金属结构设计/徐格宁主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2018. 8

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-59835-0

I. ①机… II. ①徐… III. ①机械设备-金属结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 088489 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘小慧 责任编辑: 刘小慧 张丹丹 刘丽敏

责任校对: 王延 封面设计: 张静 责任印制: 孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·31.25 印张·768 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59835-0

定价: 69.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是“十三五”国家重点出版物出版规划项目——现代机械工程系列精品教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书自2009年出版至今，已有9年，解决了特色专业教材的缺失和内容陈旧的问题，满足了企业和科研院所本专业工程技术人员对特色专业教材的日益需求，对教学支撑和工程应用发挥了积极作用。

“百年大计，教育为本；教育大计，教师为本；教师大计，教学为本；教学大计，教材为本；教材大计，适用为本；适用大计，修订为本。”随着科技和经济的发展，对教材的适用性、内容的协调性、标准的一致性和理论的先进性提出了更高要求。

本书第2版曾全面贯彻GB/T 3811—2008《起重机设计规范》，在科学分析的基础上，合理引进国外先进工业国家标准技术成果，最大限度地与国际接轨，统一设计原理和方法，力求适用，形式新颖，计算合理，注重效果。而GB/T 3811—2008《起重机设计规范》自颁布实施至今已使用10年，对我国起重机设计、制造起到了技术规范和指导作用，有力地促进了我国起重机技术的进步和行业发展。随着全球起重机技术的不断进步，ISO陆续颁布了ISO 8686-1: 1989《起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分：总则》、ISO 22986: 2007《起重机 刚性 桥式和门式起重机》、ISO 20332: 2008《起重机 金属结构能力验证》，虽然国内及时对应转化了GB/T 22437.1—2008《起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分：总则》、GB/T 30561—2014《起重机 刚性 桥式和门式起重机》、GB/T 30024—2013《起重机 金属结构能力验证》，但ISO 8686-1: 1989《起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分：总则》已修订为2012版，ISO 20332: 2008《起重机 金属结构能力验证》已修订为2013版，修改调整了定义术语，大幅增加了条款内容。其中ISO 8686-1: 2012《起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分：总则》已由作者转化为国家标准，完成报批稿，正在国家标准化委员会审批中。ISO 20332: 2013《起重机 金属结构能力验证》由作者完成国际标准修订立项，完成初稿。

鉴于ISO 8686-1和ISO 20332的基础性，使得GB/T 3811—2008《起重机设计规范》的载荷及载荷组合设计原则和计算方法及计算基础数据必须相应更新，以保持《起重机设计规范》的先进性。因此需同步对本书进行修订再版。

本书在2009版的基础上，基于GB/T 22437.1—2008《起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分：总则》、ISO 8686-1: 2012《起重机 载荷与载

荷组合的设计原则 第1部分:总则》、GB/T 30024—2013《起重机 金属结构能力验证》、ISO 20332:2013《起重机 金属结构能力验证》的有关内容,进行了改编和补充。

本书修订内容如下:

(1) 载荷组合 采用国际标准的载荷组合:引入安全载荷系数(极限状态法)和强度系数(许用应力法),划分A(无风工作)、B(有风工作)、C(受特殊载荷作用工作或非工作)三种载荷情况,在原有18种(A1~A4、B1~B5、C1~C9)载荷组合的基础上,增加了激活过载保护引起的载荷C10与有效载荷丧失引起的载荷C11,使载荷组合增加至20种。

(2) 设计方法 在原“许用应力设计法与极限状态设计法并列使用”表述基础上,增加了“若将GB/T 22437的本部分与GB/T 30024—2013结合使用,则极限状态法为首选的二阶方法”的规定。

(3) 设计内容 修改了起升动载系数 $\phi_2$ 的计算公式及相应数表,增加了五种起升驱动类型的图表和公式;增加了有效载荷意外丧失所引起的动力效应系数 $\phi_8$ ;增加了基于极限状态法-应力幅法关于结构、焊缝、螺栓和销轴的疲劳强度校验计算方法和图表;增加了“对结构计算有利或不利的质量”“起重机质量的分项安全系数(极限状态法)”“起重机质量的整体安全系数(许用应力法)”“计算预变形引起的载荷的分项安全系数”“计算刚(整)体稳定性的分项安全系数”以及相应的数据表。

(4) 调整勘误 对个别公式、图形、语句的表达形式进行调整,对个别数据错误进行勘误。

本书全面贯彻国家、行业有关最新标准和法定计量单位,符合工程设计的要求。本书的组织结构符合认知规律,逻辑性强,利于掌握,便于应用。学生通过学习和设计实践能较好地掌握金属结构设计的原理和方法,培养机械结构工程师的设计、分析能力和综合创新能力。

本书主要作为高等院校机械工程专业机械装备(起重机械、运输机械、工程机械、矿山机械、物流机械等)结构设计的教学用书,也可供有关专业结构方向的工程技术人员参考使用。

本书由徐格宁教授担任主编,并对全书进行修改、整理、统稿和定稿;由徐克晋教授对全书进行校核和把关。本书的编写分工是:徐格宁教授编写第一章,陆凤仪教授编写第二章以及附录,徐格宁教授、董青、戚其松博士编写第三、四章,徐格宁教授、戚其松博士编写第五章,徐克晋、郑荣教授编写第六章,徐克晋教授编写第七、八章,徐克晋、翟甲昌教授编写第九章,徐格宁、张荣康、周奇才教授编写第十章,徐格宁、张荣康教授、王欣副教授编写第十一章,徐格宁、宋甲宗教授编写第十二章。(徐格宁、徐克晋、陆凤仪、董青、戚其松、郑荣、翟甲昌所在单位为太原科技大学,张荣康所在单位为上海交通大学,周奇才所在单位为同济大学,宋甲宗、王欣所在单位为大连理工大学)。

本书由西南交通大学王金诺教授、同济大学郑惠强教授担任主审,两位教授对书稿进行了认真细致的审阅,提出了宝贵的意见和建议,在此对他们认真负责的精神和付出的辛劳表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前 言

## 第一章 绪论 ..... 1

### 第一节 机械装备金属结构的定义、作用、 发展和特点 ..... 1

一、金属结构的定义 ..... 1

二、金属结构的作用 ..... 1

三、金属结构的发展 ..... 1

四、金属结构的特点 ..... 2

### 第二节 机械装备金属结构的分类和应用 ..... 2

一、金属结构的分类 ..... 2

二、金属结构的应用 ..... 6

### 第三节 机械装备金属结构的基本要求和 发展趋势 ..... 7

一、基本要求 ..... 7

二、发展趋势 ..... 8

### 第四节 机械装备金属结构的课程特点、 课程任务和学习方法 ..... 14

一、课程特点 ..... 14

二、课程任务 ..... 14

三、学习方法 ..... 14

本章小结 ..... 15

## 第二章 材料 ..... 16

### 第一节 钢材的力学特性及影响因素 ..... 16

一、钢材的力学性能 ..... 16

二、钢材的加工性能 ..... 18

三、钢材的耐久性能 ..... 19

四、影响钢材性能的主要因素 ..... 19

### 第二节 材料的类别、特征和选择 ..... 21

一、材料的类别和特征 ..... 21

二、材料的选择 ..... 28

三、影响脆性破坏因素的评价和钢材质量  
组别的确定 ..... 29

本章小结 ..... 32

## 第三章 载荷与载荷组合 ..... 33

### 第一节 载荷的分类 ..... 33

一、按其作用性质、工作特点和发生

频度划分 ..... 33

二、按其作用效果与时间变化相关性

划分 ..... 33

### 第二节 载荷的计算 ..... 34

一、载荷计算原则 ..... 34

二、载荷计算方法 ..... 34

### 第三节 金属结构的设计方法、载荷情况和 载荷组合 ..... 63

一、设计方法 ..... 63

二、载荷情况 ..... 65

三、载荷组合 ..... 65

四、载荷组合表及其应用 ..... 66

本章小结 ..... 77

## 第四章 计算原理 ..... 79

### 第一节 工作级别的划分 ..... 79

一、工作级别的分级 ..... 79

二、起重机的分级 ..... 79

三、结构件的分级 ..... 81

四、典型起重机整机分级举例 ..... 83

### 第二节 计算原理和基本规定 ..... 85

一、计算原理 ..... 85

二、基本规定 ..... 85

三、金属结构的材料与承载能力 ..... 85

四、结构静强度计算 ..... 87

五、结构疲劳强度计算 ..... 88

六、结构刚度计算 ..... 120

七、结构稳定性计算 ..... 123

### 第三节 轴心受压构件的极限载荷与 应力 ..... 128

一、轴心受压构件的极限载荷 ..... 129

二、轴心受压构件的极限应力 ..... 131

三、弹塑性临界应力 ..... 132

### 第四节 压弯构件的精确计算 ..... 134

一、基本概念 ..... 134

二、压弯构件的总挠度和总弯矩 ..... 134

三、压弯构件的强度 ..... 137

四、压弯构件的整体稳定性 .....	138	一、偏心受力(拉或压)构件的强度 ...	196
五、实腹式受压构件的局部稳定性 .....	140	二、偏心受压构件的刚度 .....	196
第五节 结构动态分析中的质量换算 .....	143	三、偏心受压构件的整体稳定性 .....	197
一、结构振动连续系统转化成离散系统的 质量换算 .....	143	第四节 柱的承载能力 .....	198
二、多自由度系统转化成等效单自由度 系统的质量换算 .....	145	一、剪力对柱临界力的影响 .....	198
第六节 结构的断裂计算 .....	148	二、等效剪力 .....	203
一、结构的断裂 .....	148	三、变截面柱的计算 .....	204
二、应力强度因子及临界值 .....	149	第五节 实腹柱的设计计算 .....	208
三、结构的断裂计算 .....	151	一、截面选择和验算 .....	208
本章小结 .....	151	二、板的局部稳定性 .....	211
<b>第五章 连接</b> .....	152	第六节 格构柱的设计计算 .....	212
第一节 焊缝连接 .....	152	一、截面选择 .....	212
一、焊接的方法与构造 .....	152	二、强度和刚度验算 .....	213
二、焊缝的标注 .....	154	三、稳定性验算 .....	215
三、焊缝的强度与许用应力 .....	155	四、连缀和横隔 .....	216
四、基于许用应力法的焊缝计算 .....	156	本章小结 .....	218
五、基于极限状态法的焊缝计算 .....	162	<b>第七章 横向受弯实腹式构件——梁</b> ...	219
第二节 普通螺栓连接和铆钉连接 .....	164	第一节 横向受弯实腹式构件——梁的 构造和截面 .....	219
一、普通螺栓及铆钉连接的分类和基本 要求 .....	164	一、梁的构造 .....	219
二、螺栓、销轴和铆钉的许用应力 .....	166	二、梁的截面 .....	219
三、基于许用应力法的栓接和铆接 计算 .....	166	第二节 型钢梁的设计 .....	220
四、基于极限状态法的螺栓连接计算 .....	170	一、截面选择 .....	220
五、基于许用应力法的销轴计算 .....	178	二、强度和刚度验算 .....	220
六、基于极限状态法的销轴计算 .....	179	三、稳定性验算 .....	221
第三节 高强度螺栓连接 .....	181	第三节 组合梁的合理高度和质量 .....	224
一、工作性能和构造要求 .....	182	一、梁高的确定 .....	224
二、高强度螺栓的承载能力计算 .....	183	二、梁的质量 .....	227
三、高强度螺栓连接的计算 .....	184	第四节 组合梁的截面选择和验算 .....	227
本章小结 .....	186	一、腹板 .....	227
<b>第六章 轴向受力构件——柱</b> .....	188	二、翼缘板 .....	228
第一节 轴向受力构件——柱的构造和 应用 .....	188	三、强度和刚度验算 .....	229
一、轴向受力构件——柱的构造 .....	188	四、变截面组合梁 .....	230
二、轴向受力构件——柱的应用 .....	189	第五节 梁的翼缘和腹板的连接 .....	231
第二节 轴心受力构件的计算 .....	189	一、工字梁的翼缘焊缝 .....	231
一、轴心受力构件的强度 .....	189	二、箱形梁的翼缘焊缝 .....	233
二、轴心受力构件的刚度 .....	190	第六节 梁翼缘板的局部弯曲应力 .....	233
三、轴心受压构件的整体稳定性 .....	191	一、工字梁翼缘板的局部弯曲 .....	233
第三节 偏心受力构件的计算 .....	196	二、箱形梁翼缘板的局部弯曲 .....	235
		第七节 组合梁的整体稳定性 .....	241
		一、工字形截面组合梁 .....	241
		二、箱形梁 .....	241
		第八节 组合梁的局部稳定性 .....	243
		一、梁中薄板局部失稳的概念 .....	243

二、板的极限宽厚比和加劲肋的设置	245	一、桁架的挠度	284
三、板的临界应力	246	二、桁架的拱度	285
四、梁腹板局部稳定性验算	249	本章小结	286
五、加劲肋的构造尺寸和焊接要求	250	<b>第九章 桥架</b>	287
第九节 梁约束弯曲和约束扭转的简化		第一节 桥架型式和应用范围	287
计算	253	一、梁式起重机的桥架	287
一、梁的约束弯曲	253	二、通用桥式起重机的桥架	289
二、梁的约束扭转	254	三、冶金桥式起重机的桥架	291
第十节 梁的拼接	259	四、国内外桥式起重机新型桥架	292
一、工厂拼接	259	第二节 桥架的载荷计算与载荷组合	293
二、安装拼接	260	一、垂直载荷	293
第十一节 梁的挠度和拱度	261	二、水平载荷	294
一、梁的挠度	261	三、扭转载荷	295
二、梁的拱度	262	第三节 单梁桥架	296
本章小结	263	一、工字钢截面单梁桥架	296
<b>第八章 横向受弯格构式构件——</b>		二、模压封闭截面单梁桥架	300
<b>桁架</b>	264	第四节 中轨箱形梁桥架	303
第一节 横向受弯格构式构件——桁架的		一、确定桥架型式和规划结构尺寸	303
构造和应用	264	二、箱形主梁的设计计算	304
一、桁架的构造	264	三、端梁结构和计算	312
二、桁架的应用	265	四、主、端梁的连接和计算	313
第二节 桁架的外形与腹杆体系	265	第五节 偏轨箱形梁桥架	315
一、桁架的外形	265	一、桥架的强度计算	315
二、桁架的腹杆体系	265	二、桥架的刚度计算	317
第三节 桁架的主要参数	266	第六节 四桁架桥架	318
一、桁架的跨度	266	一、桥架的结构和参数	318
二、桁架的高度	267	二、桥架的载荷与分配	319
三、节间尺寸	267	三、桥架的强度计算	320
第四节 桁架杆件内力分析	267	四、桥架的刚度计算	321
一、桁架内力分析与假定	267	第七节 起重机的轨道	322
二、杆件内力分析方法的选择	268	一、轨道的选择	322
三、桁架弦杆的整体弯曲和局部弯曲	268	二、轨道的固定	322
第五节 桁架杆件的计算长度	271	三、轨道的接头	322
一、杆件在桁架平面内的计算长度	271	本章小结	322
二、杆件在桁架平面外的计算长度	272	<b>第十章 门架</b>	324
第六节 杆件截面设计和弦杆拼接	273	第一节 门式起重机的门架结构	324
一、杆件的截面型式	273	一、通用门式起重机的门架	324
二、杆件截面设计的一般原则	274	二、造船用门式起重机的门架	347
三、杆件截面选择与验算	275	第二节 装卸桥的门架结构	350
四、弦杆的拼接	277	一、装卸桥	350
第七节 桁架节点构造设计与计算	280	二、岸边集装箱装卸桥	352
一、节点设计的构造要求和原则	280	第三节 门座起重机的门架结构	353
二、节点的设计计算	281	一、门架的结构	353
第八节 桁架的挠度和拱度	284		

二、门架外形尺寸选择的原则	355	三、臂架结构特点与组成	427
三、门架上的载荷	356	四、臂架结构设计要点	431
四、交叉门架结构的计算	357	本章小结	437
五、八杆门架结构的计算	361	<b>第十二章 塔架</b>	438
六、圆筒形门架结构的计算	361	第一节 塔式起重机塔身的结构及载荷	438
第四节 自动化立体仓库巷道堆垛机的 门架结构	364	一、塔身的结构与类别	438
一、自动化仓库系统简介	364	二、塔身标准节之间接头的型式	442
二、巷道堆垛机简介	365	三、载荷及载荷组合	443
三、单立柱巷道堆垛机结构计算	365	第二节 桅杆式起重机的结构及载荷	444
四、双立柱巷道堆垛机结构计算	374	一、独杆式桅杆起重机	444
第五节 自动化立体仓库货架群金属结构 计算机辅助设计	377	二、臂架回转式桅杆起重机	444
一、理论建模	377	第三节 塔桅结构的分析计算方法	447
二、货架群金属结构计算机辅助设计	380	一、空间桁架的内力分析方法	447
三、工程实例	381	二、位移的计算方法	453
本章小结	381	三、高耸塔架的非线性分析方法	455
<b>第十一章 臂架</b>	382	四、塔架整体稳定性计算方法	458
第一节 臂架的应用与分类	382	五、附着式塔身的强度、位移及稳定性 计算方法	461
一、臂架的应用	382	本章小结	462
二、臂架的分类	382	<b>附录</b>	463
第二节 单臂架	384	附录 A 热轧钢板的尺寸、质量 (GB/T 709—2016)	463
一、单臂架的结构型式	385	附录 B 热轧型钢截面尺寸、截面面积、理论 质量及截面特性 (GB/T 706— 2016)	464
二、单臂架设计计算	386	附录 C 热轧圆钢和方钢的尺寸、理论质量 (GB/T 702—2017)	476
第三节 组合臂架	388	附录 D 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢的截面 尺寸、截面面积、理论质量及截面 特性 (GB/T 11263—2017)	477
一、组合臂架的类型	388	附录 E 低压流体输送用焊接钢管 (GB/T 3091—2015)	484
二、象鼻架	389	附录 F 起重机钢轨的截面尺寸、截面面积、 理论质量及截面特性 (YB/T 5055—2014)	485
三、臂架	394	附录 G 轻轨的截面尺寸、截面面积、 理论质量及截面特性 (GB/T 11264—2012)	486
四、拉杆	399	附录 H 铁路用热轧钢轨的截面尺寸、 截面面积、理论质量及截面特性 (GB 2585—2007)	486
五、臂架的铰接关节	401	<b>参考文献</b>	488
第四节 伸缩臂架	402		
一、伸缩臂架的结构及工作原理	402		
二、箱形伸缩臂受力分析	403		
三、箱形伸缩臂架的设计计算	405		
第五节 小车变幅臂架和挖掘机臂架	413		
一、小车变幅臂架结构型式	413		
二、小车变幅臂架的合理吊点位置	414		
三、挖掘机臂架系统的型式	415		
四、挖掘机臂架的计算机辅助设计与 分析	416		
第六节 履带起重机臂架	423		
一、履带起重机简介	423		
二、履带起重机臂架组合方式	423		

# 第一章

## 绪 论

### 第一节 机械装备金属结构的定义、作用、发展和特点

#### 一、金属结构的定义

以金属材料轧制成的型钢及钢板作为基本元件，采用铆、焊、栓接等连接方法，按照一定的结构（而非机构）组成规则连接构成能够承受载荷的结构物。

#### 二、金属结构的作用

金属结构作为机械装备的骨架，承受和传递机械装备负担的各种工作载荷、自然载荷以及自重载荷。如桥式起重机的起升载荷是通过起重小车的车轮传递给主梁，主梁再传递给端梁，端梁再通过大车车轮传递给轨道，最终由轨道传递到轨道梁的基础来完成载荷的传承。

金属结构是机械装备的主要组成部分，起到“骨架”的作用，约占整机总重的60%~80%。许多起重机是以金属结构的外形而命名的，如桥式起重机、门式起重机、门座起重机、塔式起重机和桅杆起重机等。

#### 三、金属结构的发展

金属结构是出现较晚的一种结构型式，仅在19世纪后期，由于钢铁工业、铁路、水运的发展，机器制造业的进一步完善，金属结构才得以较快的发展。

金属结构的发展史，是科技进步史的缩影。以起重机为例，最早的起重机是木制的；1827年，出现了第一台用蒸汽机驱动的固定式旋转起重机。1846年，出现了液力机械驱动的起重机。1869年，美国首先制成了第一台40t的蒸汽轨道起重机，1879年英国科尔斯公司制成一台3.5t轨道式抓斗起重机。1880年德国制成了世界上第一台电力拖动的钢制桥式起重机，1889年在码头上出现了门座和半门座起重机。当时的起重机金属结构全是铆接结构。

20世纪以来，钢铁、机械制造业和铁路、港口及交通运输业的发展，促进了起重运输机械的发展，对起重运输机械的性能也提出了更高的要求。1902年和1917年，英国分别制成电传动的和内燃机-机械传动的轨道式起重机；1916年美国开始制造硬橡胶实心轮胎的自行式起重机；1918年，德国生产出第一台履带式起重机；1922年英国开始制造以汽油机为

动力的电传动汽车起重机；1937年，英国制成充气轮胎的轮式起重机，行驶速度达15.3km/h，大大提高了工作效率。

特别是20世纪开始采用焊接技术后，在金属结构领域引发了重要变革。由于焊接结构对减少钢材用量、改革结构型式、减少制造劳动量、缩短工时等方面都起到了很大的促进作用，因此焊接结构是现代金属结构的特征。

我国是应用起重机械最早的国家之一，古代的祖先采用杠杆及辘轳取水，就是采用起重设备节省人力的范例。由于是人力驱动，故起重能力小，效率很低。

新中国成立前，我国自行设计制造的起重机金属结构很少，绝大多数起重运输设备主要依靠进口。货物的装卸以人力为主。

新中国成立后，随着冶金、钢铁工业的发展，起重运输机械获得了飞速的发展。“一五”期间，相继建立了全国最大的大连起重机器厂、太原重型机器厂。1949年10月，试制成功我国第一台起重量50t、跨度22.5m的桥式起重机。为培养起重机械行业的专门人才，国家在上海交通大学、大连理工大学、太原科技大学、北京科技大学、武汉理工大学、西南交通大学等多所高等工科院校中，创办了起重运输机械专业，为起重机械行业输送了大批高级工程技术人才。

#### 四、金属结构的特点

(1) 金属结构计算方法准确，安全可靠 钢材比其他材料（木材、混凝土）强度高，弹性模量大，质地优良，计算结果与实际情况比较符合，能够保证结构的安全。

(2) 金属结构自重轻 由于钢材强度高，力学性能稳定，使得结构构件截面最小，自重轻，故运输和架设也较方便。

(3) 金属结构制造工业化程度高 由于制造是在设备完善、生产成熟的专用场地进行，故具备成批生产和精度高的特点。

(4) 金属结构易于安装 由于金属结构是由一些独立构件、梁、柱等组成，在安装现场便于直接用焊缝、铆钉或螺栓连接，故可机械化施工，安装较迅速。同时部件的更换、修配均很方便。

(5) 金属结构便于做成密封的容器 金属结构具有良好的弹塑性、成形性和焊接性，便于制造成耐中、常压的压力容器。

(6) 金属结构容易锈蚀 需经常维修，保养维修费用也较高。

(7) 金属结构的材料较贵 造价较高，耐高温性能较差。

选用金属结构时应根据上述特点，综合考虑结构物的使用要求、结构安全、经济以及寿命等因素来确定。

## 第二节 机械装备金属结构的分类和应用

### 一、金属结构的分类

#### 1. 按照金属结构的构造分类

按照金属结构的构造不同分为格构（桁架）结构和实腹（板梁）结构。

格构（桁架）结构由二力杆件连接而成，其特点是杆件长度尺寸较大，而截面尺寸较小。格构结构用型钢制成，多做成桁架和格构柱。如塔式起重机的桁架臂和塔身都是桁架结构（见图 1-1），牙轮钻机的钻架采用开式桁架结构（见图 1-2）。

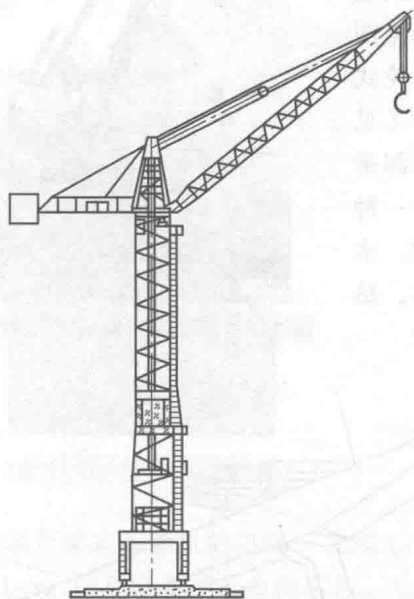


图 1-1 塔式起重机（桁架式臂架）



图 1-2 牙轮钻机（桁架式钻架）

实腹（板梁）结构由薄板焊接而成，其特点是长度和宽度尺寸较大，而厚度较小。因此实腹结构又称薄壁结构，如工字形梁、箱形梁和箱形柱等。门式起重机的箱形主梁和变截面箱形支腿（见图 1-3），矿用挖掘机的箱形臂架和斗杆（见图 1-4），门座起重机的箱形臂架和支腿门架（见图 1-5）都是实腹结构。

实腹结构自重较大，制造方便，格构结构自重小，但工艺复杂。一般是承载较大、尺寸较小的结构采用实腹结构，而承载较小、尺寸较大的结构采用格构结构。实腹结构和格构结构是起重运输机金属结构中最常用的结构型式。

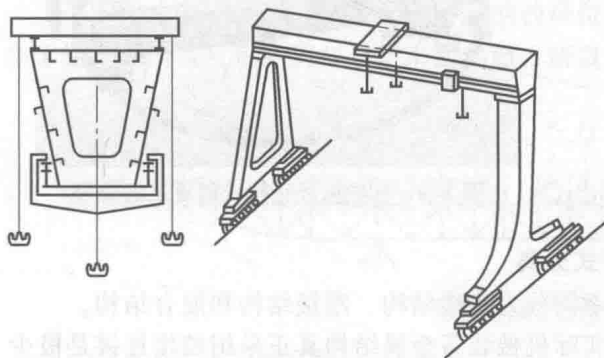


图 1-3 造船箱形门式起重机  
（受压弯的支腿和受弯的梁）



图 1-4 矿用挖掘机（箱形臂架）

## 2. 按照金属结构外形分类

按照金属结构外形不同分为门架结构、桥架结构、臂架结构和塔架结构。

门架结构包括叉车的门架（见图 1-6）和 L 形门式起重机的门架（见图 1-7），桥架结构如桥式起重机（见图 1-8）和核电站环行桥式起重机的桥架（见图 1-9），轮式起重机的车架都属于实腹结构。陆地钻井机械（见图 1-10）的 A 型井架，上部是一整体桁架结构，下部采用四根格构柱组成的塔式井架，是目前使用最多的一种格构结构。海洋钻井平台（见图 1-11）的金属结构，水下为圆管格构式支承结构，水上平台采用箱形结构，钻机井架和起重设备则采用格构结构。



图 1-5 门座起重机（箱形臂架）

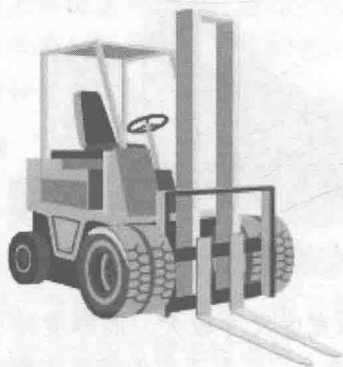


图 1-6 叉车（门架）

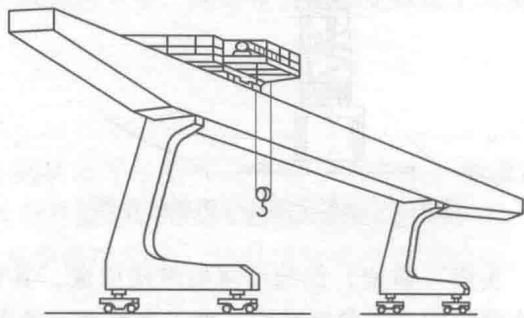


图 1-7 L 形门式起重机（门架结构）

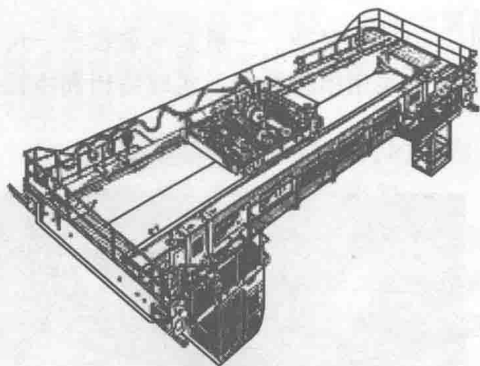


图 1-8 桥式起重机（桥架结构）

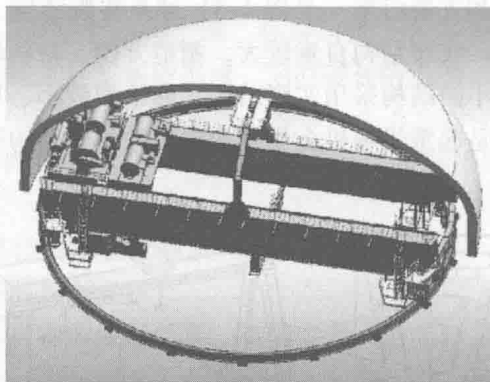


图 1-9 核电站环行桥式起重机的桥架

## 3. 按照组成金属结构构件之间的连接方式分类

按照组成金属结构构件之间的连接方式不同分为铰接结构、刚接结构和混合结构。

铰接结构中，所有节点都是理想铰，而实际机械装备金属结构真正采用铰接连接是极少的。通常在桁架结构中，杆件主要承受轴向力，而承受弯矩很小，可称为铰接结构。

刚接结构构件间的节点承受较大的弯矩。如门式起重机支腿与主梁间的节点（见图 1-3），既有铰接的（柔性），又有刚接的（刚性）。混合结构是兼有铰接和刚接节点的结构，



图 1-10 陆地钻井机械



图 1-11 海洋钻井平台

如电动葫芦梁式起重机的主梁（见图 1-12），可做成桁架和梁混合的桁构结构，门座起重机（见图 1-5）的象鼻梁也是桁构结构。

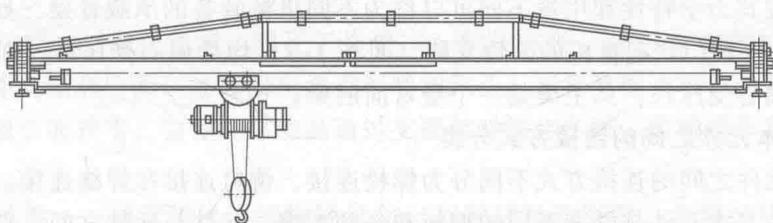


图 1-12 电动葫芦梁式起重机的主梁

#### 4. 按照作用载荷与结构空间相互位置分类

按照作用载荷与结构空间相互位置不同分为平面结构和空间结构。

平面结构的作用载荷和结构各杆件的轴线位于同一平面内，如图 1-13 所示的桁架结构，小车轮压、结构自重载荷与桁架平面共面，所以此桁架结构属于平面结构。

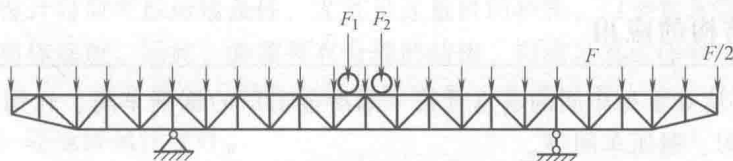


图 1-13 平面桁架结构

当结构杆件的轴线不在一个平面内，或结构杆件轴线虽位于同一平面，但外载荷作用于结构平面外（即平面结构空间受力）时均为空间结构。图 1-14 所示的集装箱门式起重机的门架和图 1-15 所示的轮式起重机的车架，都是空间结构的范例。

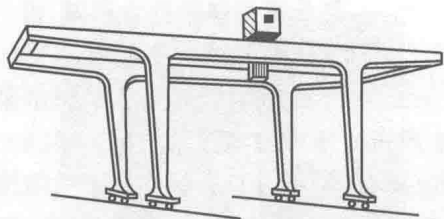


图 1-14 集装箱门式起重机的门架

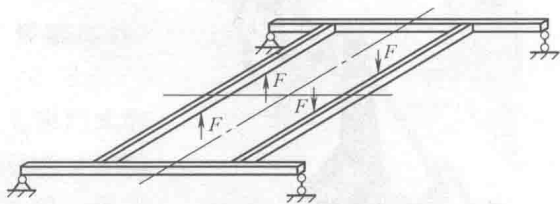


图 1-15 轮式起重机的车架

### 5. 按照金属结构受力特征分类

按照金属结构受力特征不同分为受弯构件、轴心受力构件、压弯构件、受扭构件和弯扭构件等。

- 1) 受弯构件指主要承受弯矩的构件，如梁和桁架。
- 2) 轴心受力构件指主要承受轴向力的构件，如受压柱。轴向受拉构件的构造接近于柱，归为柱类。
- 3) 压弯构件指同时承受轴向压缩力和弯矩的构件，它是一种偏心受压构件，构造与柱相同，但截面要扩大，如臂架和塔架。
- 4) 受扭构件指承受扭转力矩的构件，如塔式起重机的塔架。
- 5) 弯扭构件指同时承受弯矩和扭矩的构件，如承受偏心载荷作用的桥式起重机的主梁。

这些部件按其力学特性和用途不同可以作为不同机械装备的承载骨架，如塔式起重机的塔架（见图 1-1）和门式起重机的刚性支腿（见图 1-3）均是偏心受压柱，而门式起重机的柔性支腿则是轴心受压柱，其主梁是一个受弯曲的梁。

### 6. 按照基本元件之间的连接方式分类

按照基本元件之间的连接方式不同分为螺栓连接、铆钉连接和焊缝连接。

金属结构的基本元件是厚度不同的钢板和各种型钢。元件与元件之间，部件与部件之间通常用铆钉、螺栓、焊缝连接。由这些基本元件组成金属结构的构件——梁、柱、桁架等，再由构件组成金属结构整体。

焊缝连接不仅简化了结构，缩短工时，而且大大减轻自重，因此在机械装备金属结构中得到广泛使用。螺栓连接工艺性好，拆装方便，应用广泛。铆钉连接由于自重大，制造工时多等缺点，应用渐少。但由于铆接安全可靠，对受冲击大的重型结构的某些部位仍然使用铆钉连接的构造。

## 二、金属结构的应用

(1) 工业厂房和重型车间的承重骨架 如冶金工厂的炼钢车间、轧钢车间，重型机械制造厂的铸钢车间、锻压车间等。

(2) 大跨度建筑物骨架 如飞机库、火车站、剧场、体育馆等。

(3) 多层框架结构 如高层楼房、炼油化工设备构架等。

(4) 机械装备的骨架 如桥式类型起重机的桥架和门架，塔式起重机的塔架和臂架，石油钻机的井架等结构。

(5) 板壳结构 如高炉、大型储油库、船体和煤气库等。

(6) 塔桅结构 如矿井钻架、无线电发射塔、航天器发射塔、输电塔等。

(7) 桥梁结构 如各种公路、铁路桥梁和车间的承轨梁。

(8) 水工建筑物 如水坝闸门、钢管道等。

(9) 仓储结构 如自动化立体仓库、车库的骨架、货架等。

综上所述,金属结构应用非常广泛,结构型式多种多样,在国家经济建设中起着重要的作用。

本书涉及的范围有限,不可能逐一介绍,主要对起重机械、工程机械、矿山机械、输送机械等机械装备金属结构的设计理论、典型部件的构造及其计算方法等方面进行重点阐述,便于从事该专业工作的人员学习和掌握其基本内容及设计原理。

### 第三节 机械装备金属结构的基本要求和的发展趋势

#### 一、基本要求

起重机械、工程机械、矿山机械均为重型机械,其特点是作用载荷大,工作繁忙,大多是移动机械,为保证其正常使用,对其金属结构提出如下要求:

(1) 力学性能——坚固耐用 金属结构必须保证有足够的承载能力,也就是应保证有足够的强度(静强度,疲劳强度)、刚度(静态刚度,动态刚度)和稳定性(整体稳定,局部稳定,单肢稳定)要求。

(2) 工作性能——保证功能 满足工作要求,使用方便。如门式起重机的门架,只有保证足够的工作高度和空间,才能安全地进行装卸作业。工作高度太小,会限制起升高度和起升速度。过腿空间狭窄,会使起吊物品通过支腿架时发生干涉,影响操作视野,降低机械装备的效率。

(3) 节材性能——减重节材 结构轻量化,节省材料和资源。金属结构的质量在整机质量中占有很大比例。例如起重机金属结构自重约占总重的50%~70%,重型起重机则达90%。这些机械装备多半是移动的,因此,减轻自重不但节省钢材与能耗,而且减轻了机构的负荷和支承基础及厂房的造价,并为运输安装提供了方便。

(4) 工艺性能——可制造性 制造工艺性好,工业化程度高,制造成本低,经济性能好。

(5) 装运性能——可拆装性 安装迅速,便于运移,维修简便。机械装备的金属结构往往都很庞大,设计时应考虑运输条件,尤其是起重机的桥架、门架常常需要分段或整体运输,水平组装,整体起放。因此,必须要有合理的结构,以满足其运输和安装方便的要求。

(6) 美学性能——宜人美观 注重人机系统工程,造型美观大方,色彩调配合理,追求宜人化和人-机-环境协调性设计。

(7) 绿色性能——节能环保 制造、使用过程中的节能降耗与环境保护,将设备的设计、制造、运输、安装、检验、监察、维修、报废各过程纳入全生命周期而实现节能、节材、减振、降噪、减排。

(8) 安全性能——安全可靠 从设计层面保证机械装备的本质安全,提供安全运行的硬件保证,如安全装置的设计与配置,关键零部件的可靠性以及剩余寿命的评估。

上述基本要求既互相联系又互相制约,首先要保证金属结构坚固耐用和使用性能,其次应注意减轻自重,节约钢材,降低成本及运输维修等问题,在可能条件下考虑外形美观。

在设计时应该辩证地处理上述要求。若结构设计较为坚固,性能优良,则会导致耗材较多,整机装备过于笨重,经济成本较高。若单纯追求节省钢材,而忽视使用要求,使机械装备的性能较差或过早损坏,则会导致更大的浪费。同时,还要考虑不同用途的机械装备金属结构的特殊性。如采油井架,除考虑性能好、坚固耐用外,安装运输是否方便也是很重要的。因此,设计机械装备金属结构时,在首先满足坚固耐用、方便使用的前提下,要最大限度地充分利用材料,减轻自重,并结合机械装备的特殊性,注意解决运输、安装、维护、维修、美观等问题。

## 二、发展趋势

机械装备金属结构的工作特点是受力复杂,自重较重,耗材较多,导致金属结构的成本约占产品总成本的1/3以上。因此在满足使用和力学性能的前提下,合理利用材料,减轻自重,降低制造和运行成本,仍是机械装备金属结构设计制造的发展方向。近几年来,国内外对金属结构进行大量的研究工作,创造出许多新颖结构型式,涌现出先进的设计方法和制造工艺,使金属结构的设计和制造取得很大成就。但是,金属结构的设计和制造仍有不足之处,应进一步完善。

根据对机械金属结构的基本要求,其发展方向和研究的重点是:

### 1. 研究并广泛运用、推广新的设计理论和设计方法

在机械金属结构中一直使用许用应力设计法,该方法使用简便,能满足设计要求,但缺点是对不同用途、不同工作性质的结构均采用相同的整体安全系数,导致结构耗材盲目,而安全储备失度。随着生产发展的要求和科学研究工作的开展,促使设计理论和计算方法不断改进和完善。当前国内外出现许多新的设计理论、计算方法,提出许多新的参数、数据、计算公式等,主要有:

- 1) 极限状态设计方法。
- 2) 最优化设计方法。
- 3) 有限元设计方法。
- 4) 抗疲劳设计方法。
- 5) 创新设计方法。
- 6) 可靠性设计方法。
- 7) 绿色设计法。
- 8) 虚拟仿真设计方法。
- 9) 并行设计方法。
- 10) 反求设计方法。
- 11) 全生命周期设计法。
- 12) 减量化设计法。
- 13) 动态设计法。
- 14) 网络分析设计方法。
- 15) 预加应力设计方法。