



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

MECHANICAL STRUCTURAL DESIGN

机械装备结构设计

丁晓红·主编



上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

机械装备结构设计



丁晓红·主编



上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书详细阐述了机械装备结构设计的基本原理和方法。全书共分8章,第1章介绍机械装备结构设计的内涵、一般要求和基本过程;第2章介绍典型加工工艺(切削、铸造、焊接及塑性成形)对零件结构设计的要求;第3章至第7章以机床结构为例,详细介绍机床主要系统和结构的设计要求、设计原则;第8章介绍机械装备结构优化设计方法。本书依托增强现实(AR)技术,将视频、彩色图片等数字资源与纸质教材交互,为读者和用户带来更丰富有效的阅读体验。

本书可作为高等院校机械工程类专业的本科教材,也可供相关专业研究生、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械装备结构设计 / 丁晓红主编. —上海:上海
科学技术出版社,2018.1

创新应用型数字交互规划教材. 机械工程

ISBN 978-7-5478-3674-3

I. ①机… II. ①丁… III. ①机械设备—结构设计—
高等学校—教材 IV. ①TH12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 194308 号

机械装备结构设计

丁晓红 主编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.75

字数: 300千字

2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-3674-3/TH·70

定价: 40.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

编审委员会

主 任 李郝林 陈关龙

副主任 钱 炜

委 员 (以姓氏笔画为序)

王小静 李峥嵘 张慧敏 陈 浩

陈军华 徐 洋 惠 虎

顾 问 曹自强

编写委员会

(以姓氏笔画为序)

丁晓红 马淑梅 王岩松 朱文峰

任 彬 李 晏 李郝林 李蓓智

张东民 张而耕 荆学东 黄迪山

支持单位

(按首字拼音排序)

德玛吉森精机公司

东华大学

ETA(Engineering Technology Associates, Inc.)中国分公司

华东理工大学

雷尼绍(上海)贸易有限公司

青岛海尔模具有限公司

瑞士奇石乐(中国)有限公司

上海大学

上海电气集团上海锅炉厂有限公司

上海电气集团上海机床厂有限公司

上海高罗输送装备有限公司技术中心

上海工程技术大学

上海理工大学

上海麦迅惯性航仪技术有限公司

上海麦迅机床工具技术有限公司

上海师范大学

上海新松机器人自动化有限公司

上海应用技术大学

上海紫江集团

上汽大众汽车有限公司

同济大学

西门子工业软件(上海)研发中心

浙江大学

中国航天科技集团公司上海航天设备制造总厂

从书序

在“中国制造 2025”国家战略指引下,在“深化教育领域综合改革,加快现代职业教育体系建设,深化产教融合、校企合作,培养高素质劳动者和技能型人才”的形势下,我国高教人才培养领域也正在经历又一重大改革,制造强国建设对工程科技人才培养提出了新的要求,需要更多的高素质应用型人才,同时随着人才培养与互联网技术的深度融合,尽早推出适合创新应用型人才模式的出版项目势在必行。

教科书是人才培养过程中受教育者获得系统知识、进行学习的主要材料和载体,教材在提高人才培养质量中起着基础性作用。目前市场上专业知识领域的教材建设,普遍存在建设主体是高校,而缺乏企业参与编写的问题,致使专业教学教材内容陈旧,无法反映行业技术的发展。本套教材的出版是深化教学改革,践行产教融合、校企合作的一次尝试,尤其是吸收了较多长期活跃在教学和企业技术一线的专业技术人员参与教材编写,有助于改善在传统机械工程向智能制造转变的过程中,“机械工程”这一专业传统教科书中内容陈旧、无法适应技术和行业发展需要的问题。

另外,传统教科书形式单一,一般形式为纸媒或者是纸媒配光盘的形式。互联网技术的发展,为教材的数字化资源建设提供了新手段。本丛书利用增强现实(AR)技术,将诸如智能制造虚拟场景、实验实训操作视频、机械工程材料性能及智能机器人技术演示动画、国内外名企案例展示等在传统媒体形态中无法或很少涉及的数字资源,与纸质产品交互,为读者带来更丰富有效的体验,不失为一种增强教学效果、提高人才培养的有效途径。

本套教材是在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,立足国内相关领域产学研发展的整体情况,来自上海交通大学、上海理工大学、同济大学、上海大学、上海应用技术大学、上海工程技术大学等近 10 所院校制造业学科的专家学者,以及来自江浙沪制造业名企及部分国际制造业名企的专家和工程师等一并参与的内容创作。本套创新教材的推出,是智能制造专业人才培养的融合出版创新探索,一方面体现和保持了人才培养的创新性,促使受教育者学会思考、与社会融为一体;另一方面也凸显了新闻出版、文化发展对于人才培养的价值和必要性。

中国工程院院士

丛书前言

进入 21 世纪以来,在全球新一轮科技革命和产业变革中,世界各国纷纷将发展制造业作为抢占未来竞争制高点的重要战略,把人才作为实施制造业发展战略的重要支撑,改革创新教育与培训体系。我国深入实施人才强国战略,并加快从教育大国向教育强国、从人力资源大国向人力资源强国迈进。

《中国制造 2025》是国务院于 2015 年部署的全面推进实施制造强国战略文件,实现“中国制造 2025”的宏伟目标是一个复杂的系统工程,但是最重要的是创新型人才培养。当前随着先进制造业的迅猛发展,迫切需要一大批具有坚实基础理论和专业技能的制造业高素质人才,这些都对现代工程教育提出了新的要求。经济发展方式转变、产业结构转型升级急需应用技术类创新型、复合型人才。借鉴国外尤其是德国等制造业发达国家人才培养模式,校企合作人才培养成为学校培养高素质高技能人才的一种有效途径,同时借助于互联网技术,尽早推出适合创新应用型人才培养模式的出版项目势在必行。

为此,在充分调研的基础上,根据机械工程的专业和行业特点,在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,上海科学技术出版社组织成立教材编审委员会和编写委员会,联络国内本科院校及一些国内外大型名企等支持单位,搭建校企交流平台,启动了“创新应用型数字交互规划教材 | 机械工程”的组织编写工作。本套教材编写特色如下:

1. 创新模式、多维教学。教材依托增强现实(AR)技术,尽可能多地融入数字资源内容(如动画、视频、模型等),突破传统教材模式,创新内容和形式,帮助学生提高学习兴趣,突出教学交互效果,促进学习方式的变革,进行智能制造领域的融合出版创新探索。

2. 行业融合、校企合作。与传统教材主要由任课教师编写不同,本套教材突破性地引入企业参与编写,校企联合,突出应用实践特色,旨在推进高校与行业企业联合培养人才模式改革,创新教学模式,以期达到与应用型人才培养目标的高度契合。

3. 教师、专家共同参与。主要参与创作人员是活跃在教学和企业技术一线的人员,并充分吸取专家意见,突出专业特色和应用特色。在内容编写上实行主编负责下的民主集中制,按照应用型人才培养的具体要求确定教材内容和形式,促进教材与人才培养目标和质量的接轨。

4. 优化实践环节。本套教材以上海地区院校为主,并立足江浙沪地区产业发展的整体情况。参与企业整体发展情况在全国行业中处于技术水平比较领先的位置。增加、植入这些企业中当下的生产工艺、操作流程、技术方案等,可以确保教材在内容上具有技术先进、工艺领

先、案例新颖的特色,将在同类教材中起到一定的引领作用。

5. 与国际工程教育认证接轨。增设与国际工程教育认证接轨的“学习成果达成要求”,即本套教材在每章开始,明确说明本章教学内容对学生应达成的能力要求。

本套教材“创新、数字交互、应用、规划”的特色,对避免培养目标脱离实际的现象将起到较好作用。

丛书编委会先后于上海交通大学、上海理工大学召开 5 次研讨会,分别开展了选题论证、选题启动、大纲审定、统稿定稿、出版统筹等工作。目前确定先行出版 10 种专业基础课程教材,具体包括《机械工程测试技术基础》《机械装备结构设计》《机械制造技术基础》《互换性与技术测量》《机械 CAD/CAM》《工业机器人技术》《机械工程材料》《机械动力学》《液压与气动技术》《机电传动与控制》。教材编审委员会主要由参加编写的高校教学负责人、教学指导委员会专家和行业学会专家组成,亦吸收了多家国际名企如瑞士奇石乐(中国)有限公司和江浙沪地区大型企业的参与。

本丛书项目拟于 2017 年 12 月底前完成全部纸质教材与数字交互的融合出版。该套教材在内容和形式上进行了创新性的尝试,希望高校师生和广大读者不吝指正。

上海市机械专业教学指导委员会

前 言

机械装备结构设计是将抽象的机械工作原理具体化为零部件技术图样的过程,是机械设计中的重要阶段,其设计质量对满足机械装备的功能要求、保证装备的整体质量和可靠性、降低成本,具有十分重要的作用。随着科学技术的发展,对机械装备结构技术经济性的要求日趋提高,从设计角度来说,需要采用优化设计技术得到最优结构。

本书是编者根据多年本科机械专业的教学经验,并针对本领域的技术发展趋势编写而成的,全书内容既涉及机械装备结构的一般设计原则和方法,也涉及机械制造装备中典型装备(机床)的结构设计原理。教材编排上采用从面到点的方式,使学生掌握一般机械装备结构设计的基本原理和方法,并通过大量工程案例,以点带面地使学生掌握和实际应用机械装备结构设计技术。

教材特点体现在以下几个方面。

1. 紧密结合工程实际。由于机械装备结构涉及具体的装备,具有各种不同的设计要求、工艺要求和经济性要求,因此必须紧密结合工程实际。教材中涉及的案例充分考虑工程实际需求,部分案例得到沈阳机床集团工程师的大力协助。

2. 注重机械装备结构的创新设计。本书引入机械结构拓扑优化设计等近年来发展起来的现代设计技术内容,并将编者的最新科研成果作为案例进行介绍,用以引导学生的创新思维,在机械装备结构设计中开展创新实践。

3. 注重学生能力的培养和达成。在教材的编排上,突出“以学生为中心,以成果为导向”的现代工程教育理念,明确各章内容对学生学习成果达成的要求,注重学生实际能力的提升。

4. 三维动态的装备结构表现形式。针对学生对复杂机械装备结构难以理解的问题,本教材提供了部分数字资源,学生或读者通过数字交互观察学习具体机械装备结构的三维实体、运动仿真等资源。


本书由丁晓红策划并统稿,其中第1章、第8章由丁晓红编写,第2章由杨丽红编写,第3章、第4章由王蕾编写,第5章由张永亮编写,第6章、第7章由熊敏编写。在编写过程中,得到李郝林、徐名聪、方键、麦云飞、杜宝江等老师的大力支持,他们对本书的编写提出了有益的建议,在此一并表示谢意;同时,在编写过程中参考了国内外一些教材和著作,以及部分网上资源,在此也对其著作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在误漏欠妥之处,恳请读者批评指正。

本书配套数字交互资源使用说明

针对本书配套数字资源的使用方式和资源分布,特做如下说明:

1. 用户(或读者)可持安卓移动设备(系统要求安卓 4.0 及以上),打开移动端扫码软件(本书仅限于手机二维码、手机 qq),扫描教材封底二维码,下载安装本书配套 APP,即可阅读识别、交互使用。

2. 插图图题或表格表题后有加“”标识的,提供视频等数字资源,进行识别、交互。具体扫描对象位置和数字资源对应关系参见下列附表。

扫描对象位置	数字资源类型	数字资源名称
图 1-5	视频	刨床传动原理
图 1-15	视频	模块化双主轴机床
图 3-1	视频	牙嵌式离合器结构
图 3-5	视频	单向超越式离合器
图 3-6	视频	带拨爪心轴双向超越式离合器
图 3-7	视频	双向超越式离合器
图 3-23	彩色图片	CA6140 型卧式车床主轴箱展开图
图 3-29	彩色图片	溜板箱结构图
图 3-30	视频	开合螺母机构
图 7-1	视频	数控中心加工过程
图 7-12	视频	主轴换刀时刀具的自动夹紧过程
图 7-18	视频	滚珠丝杠副的内循环方式
图 7-19	视频	滚珠丝杠副的外循环方式
表 7-1	视频	自动换刀及刀库

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	机械装备结构设计任务、内容及步骤	1
1.2	机械装备结构设计的基本要求	4
1.3	机械装备结构设计中的力学准则	6
1.4	机械装备结构设计的发展	9
第 2 章	典型加工工艺零件结构设计基本原则	11
2.1	金属切削件结构设计基本原则	11
2.2	铸件结构设计基本原则	19
2.3	焊接件结构设计基本原则	24
2.4	金属塑性成形零件结构设计基本原则	27
第 3 章	机床传动系统结构设计	32
3.1	传动系统中的典型机构	32
3.2	CA6140 车床传动系统结构分析	43
第 4 章	机床传动系统运动设计	54
4.1	主传动系统运动设计	54
4.2	主传动的几种特殊变速方式	62
4.3	计算转速的确定	67
4.4	CA6140 卧式车床传动系统运动分析	69
第 5 章	主轴组件设计	78
5.1	主轴组件概述	78

5.2	主轴组件常用轴承结构及选型·····	80
5.3	轴支承定位方式及结构设计原则·····	92
5.4	主轴结构设计·····	99
5.5	主轴组件结构实例·····	104
第6章 支承件与导轨设计 ·····		109
6.1	支承件的设计要求与材料·····	109
6.2	支承件的结构设计·····	113
6.3	导轨的分类、要求及材料·····	120
6.4	滑动导轨·····	123
6.5	滚动导轨·····	128
第7章 数控机床结构 ·····		131
7.1	数控机床机械结构概述·····	131
7.2	主传动系统及结构·····	135
7.3	进给传动系统及结构·····	141
7.4	自动换刀装置及结构·····	146
第8章 机械装备结构优化设计方法 ·····		152
8.1	结构优化设计的基本概念·····	153
8.2	结构拓扑优化设计·····	159
8.3	结构形状优化设计·····	165
8.4	结构尺寸优化设计·····	166
8.5	结构优化设计软件及其应用·····	168
参考文献 ·····		174

第 1 章

绪 论

1.1 机械装备结构设计的任务、内容及步骤

1.1.1 机械装备结构设计的任务

机械装备结构设计的任务是在机械装备总体设计的基础上,根据已确定的功能原理方案,决定机械装备中零件的形状、材料、尺寸、加工方法和装配形式等关键因素,即把机构系统转化为机械的实体系统,以实现机械装备所要求的功能。具体地说,机械装备结构设计的过程就是将抽象的机械工作原理具体化为构件或零部件的技术图样的过程,用技术图纸来体现装备结构设计的结果。

机械装备结构设计是机械设计中一个重要的阶段,涉及问题繁多,约束条件复杂,设计工作量大。机械装备结构设计的质量对于满足机械装备的功能要求、保证装备的整体质量和可靠性、降低成本,具有十分重要的作用。

1.1.2 机械装备结构设计的内容

机械装备按用途,可分为动力机械(如电动机、内燃机、蒸汽机等)、金属切削机械(如车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、电加工机床、锯床和其他机床等)、交通运输机械(如飞机、汽车、铁路机车、船舶等)、起重运输机械(如各种起重机、运输机、升降机、卷扬机等)、工程机械(如挖掘机、铲运机、工程起重机、压路机、打桩机、钢筋切割机、混凝土搅拌机、凿岩机、军工专用工程机械等)、轻工机械(如纺织机械、食品加工机械、印刷机械、制药机械、造纸机械等),以及专用机械(如冶金机械、采煤机械、化工机械、石油机械等)。图 1-1 所示为一些常见的典型机械装备。



(a) 氢燃料内燃机



(b) 液压挖掘机



(c) 高架起重机



(d) 数控磨床

图 1-1 典型机械装备示例

减速器是各种机械装备中常用的部件,用于实现运动和动力的传递。图 1-2 为两级圆柱斜齿轮减速器的工作原理,该减速器通过斜齿轮实现两级减速,从而使运动和动力由输入轴 I 传递到输出轴 III。根据图 1-2 的工作原理,可设计出图 1-3 所示的两级齿轮减速器的结构设计总装图。

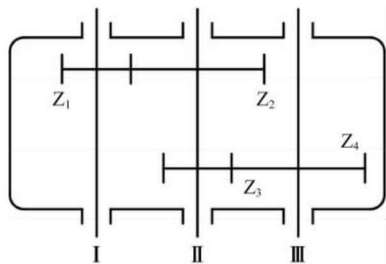


图 1-2 两级变速箱工作原理图

(1) 设计减速器结构的主要步骤包括以下几点。

- ① 明确设计要求,包括减速比、传动功率、使用寿命等。
- ② 齿轮设计:根据齿轮的工作情况,按照齿轮的接触疲劳强度和弯曲疲劳强度等设计准则,确定齿轮的基本尺寸,选择齿轮的材料和热处理方法。
- ③ 轴的设计:根据弯扭组合疲劳强度条件确定轴的几何尺寸,选择轴的材料和热处理方法。
- ④ 轴系设计:选择轴承,确定轴的支撑方式,轴上零件的定位方式;
- ⑤ 减速器箱体设计。
- ⑥ 方案可行性评估及完善。
- ⑦ 绘制减速器结构图。

(2) 由两级齿轮减速器的结构设计过程可知,一般机械结构设计包含以下两方面的内容。

- ① 功能设计。为实现机械的功能进行的设计,即通过机械装备结构设计实现机械的功能原理方案。
- ② 保质设计。为保证机械装备结构的力学性能、工艺条件、经济性和安全性等要求所进行的设计。

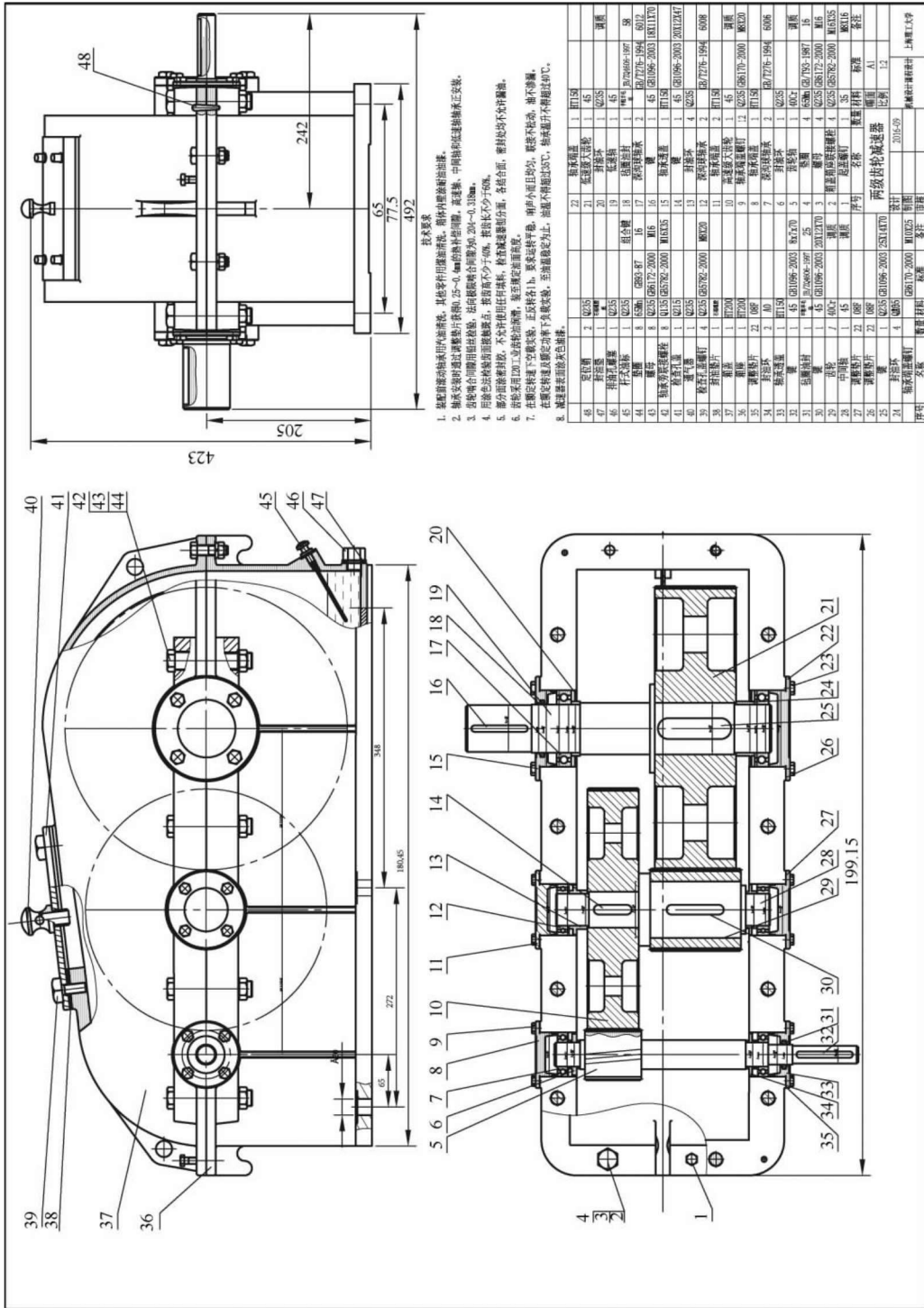


图 1-3 两级齿轮减速器的结构设计总装图

1.1.3 机械装备结构设计的步骤

机械装备结构设计流程可归纳为图 1-4 所示。

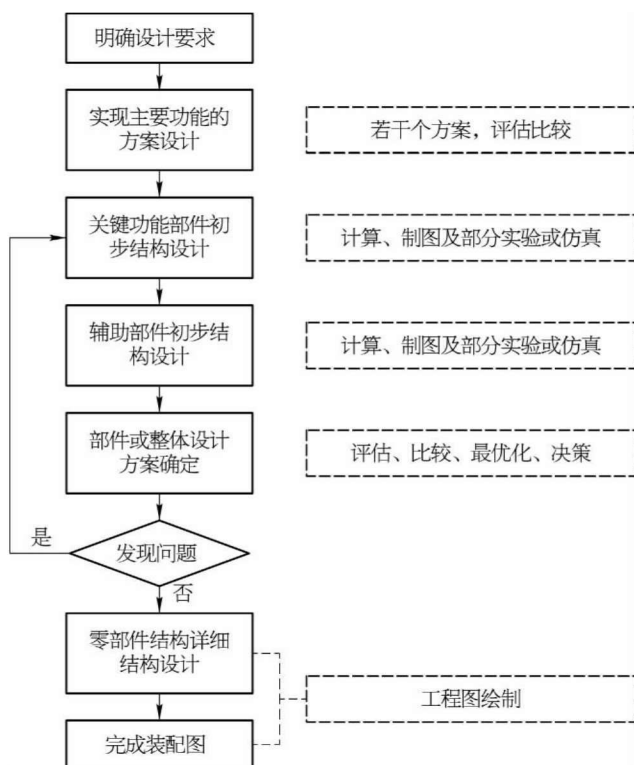


图 1-4 机械装备结构设计流程

机械装备结构设计的步骤如下。

(1) 明确设计要求。设计要求包括：机械装备结构所需要完成的功能要求（如传动功率、流量、工作高度等）；机械装备结构的使用要求（如结构的强度、刚度和稳定性等）；结构的工艺性和经济性要求（如合理选择毛坯类型、结构形状便于加工等）。

(2) 实现主要功能的方案设计。根据该结构需实现的主要功能进行方案设计。一般应有若干个方案，进行评估比较后，确定 1、2 个方案进行进一步设计。

(3) 对关键功能部件进行初步结构设计。关键功能部件是指实现结构主要功能的构件，如减速箱的轴和齿轮。在结构设计时，应首先对关键功能部件进行初步设计，即确定其主要形状、尺寸，如轴的最小直径、齿轮的直径等，并按比例初步绘制结构设计草图。应设计多个结构方案，以便进行比较并选优，必要时需进行实验或仿真。

(4) 对辅助部件进行初步结构设计。如减速箱的设计中对轴的支承、密封、润滑等装置进行初步设计，确定其主要形状、尺寸，以保证关键功能部件正常工作。设计中应尽可能选择标准件、通用件。

(5) 对设计方案进行综合评价。对若干个初步结构设计方案的可行性和经济性进行综合评价，选择满足功能要求、性能良好、结构简单和成本较低的较优方案。如发现问题，则需重新进行设计。

(6) 零部件结构详细设计。根据国家标准、规范，完成所有零部件的详细设计，绘制零部件工作图。

(7) 完成总体结构设计图。装备结构设计的最终设计结果是总体结构设计图，能清楚地表达产品的结构形状、尺寸、位置关系、材料和热处理等各要素和细节，体现设计的意图，即完成全部装配图、零件图。在此过程中应进一步检查在结构功能、空间相容性等方面的问题，并注意结构工艺性设计，进一步优化结构。

1.2 机械装备结构设计的基本要求

机械装备结构设计的最终结果需以一定的结构形式表现出来，并按所设计的结构进行加工、装配，制造成最终的产品。因此，机械装备结构设计应满足机械装备产品的多方面要求，包

括功能、可靠性、工艺性、经济性和外观造型等。

1.2.1 功能要求

机械装备结构设计的基本任务是将功能原理方案具体化,即构造能够实现功能要求的三维实体零部件及其装配关系,因此功能要求是结构设计的主要依据和必须满足的要求。

零件的基本功能要求如下。

1) 传递运动和动力

如图1-5所示的牛头刨床传动机构中,曲柄1通过滑块带动摆动导杆2往复摆动,把运动和动力传给滑枕3,以便使装在滑枕上的刨刀实现直线往复运动。

2) 承受载荷

机械装备在工作的过程中受到多种载荷的作用,包括工作时所需的力、自身的重力、由于速度变化产生的惯性力、直接接触表面的摩擦力等。如图1-2所示的减速器结构中,齿轮传动所受的力通过轴传递给轴承,其中径向力和切向力通过轴承传递给箱体,而轴向力经轴承传递给端盖,继而传递给箱体。机械结构正是由于承受载荷而可能发生失效,因此正确分析机械结构的受力是进行机械装备结构设计的重要基础。对机械结构进行受力分析,需要首先建立结构的力学模型,并应用力学原理进行正确的受力分析。

3) 实现其他功能

机械装备结构除了传递运动和动力及承载外,还可能实现其他必需的功能,如油箱需要容纳油液、导轨和螺旋需要引导其他零件的运动等。

需要指出,在一个机械装置中,每一个零件都不是独立存在的,机械装置的功能依靠零部件的形状、尺寸和相对位置关系得以实现。如轴与装配在轴上的齿轮,通过轴颈圆柱表面确定相互之间的径向位置关系,通过轴肩端面确定相互之间的轴向位置关系;而相互啮合的一对齿轮通过齿面接触确定两轮之间的相对转角关系;另外,轴与装配在轴上的齿轮之间的周向位置关系是通过各自与键的接触间接实现的。

1.2.2 使用要求

机械装备结构必须保证在规定的使用期限内正常地实现其功能,保证零件不失效。一般情况下,机械装备结构需具有足够的强度、刚度和稳定性,承受动载荷的机械结构还需保证其具有足够的疲劳寿命。

1.2.3 制造要求

组成机械装备的零部件需要具有良好的制造性,也就是可采用最经济的制造和装配方法得以实现。机器的成本主要取决于制造该机器零件的材料和制造费用,因此制造要求通常和经济性密切相关。通常在设计时应考虑以下两个方面。

(1) 采用便于制造的结构:零件形状尽可能简单合理,合理选用毛坯类型,制造时材料损耗少,效率高,生产成本低,易于保证质量要求。

(2) 便于装配和拆卸:由于装配质量直接影响机器设备的性能,因此设计时要考虑装配定位的要求;对于需经常更换的零件,还需要考虑拆卸方便的问题,如对于盲孔,为避免孔中可能密封有空气而引起装拆困难,还应该设有通气孔。

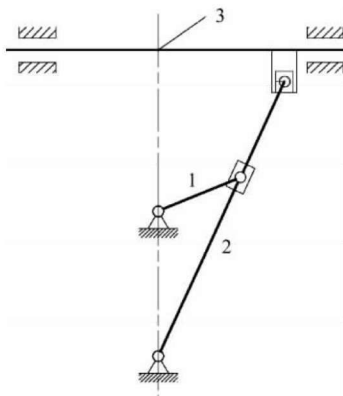


图1-5 刨床传动原理

1—曲柄; 2—导杆; 3—滑枕

