



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十三五”规划教材



# Design of Manufacturing Equipment

# 机械制造装备设计

第④版

李庆余 孟广耀 岳明君 © 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十三五”规划教材

# 机械制造装备设计

第4版

主编 李庆余 孟广耀 岳明君  
参编 王士军 赵国勇 李 丽  
侯秦国 牛宗伟 黄向阳  
主审 藏镇书 李 章



机械工业出版社

本书第2版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，第3版获2015年中国机械工业科技进步三等奖。

本书内容包括金属切削机床的传动设计和主要零部件的设计、金属切削刀具设计、金属切削机床夹具设计三部分。

本书的特点：贯彻“少而精”的原则，突出重点，以点带面；注重基础理论的阐述，保留普通机床设计理论的精华，以机床设计为宗旨，在理论与实践相结合的基础上培养学生分析问题和解决问题的能力；适当反映国内外机械制造装备的科技成果及其发展趋势。

本书配有电子课件、习题及思考题答案，请需要的教师到机械工业出版社教育服务网（<http://www.cmpedu.com>）查询、下载。

本书是普通高等院校机械设计制造及自动化专业的专业课规划教材，也可作为机电工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

机械制造装备设计/李庆余，孟广耀，岳明君主编. —4版. —北京：机械工业出版社，2017.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-58052-2

I. ①机… II. ①李… ②孟… ③岳… III. ①机械制造-工艺装备-设计-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第230616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 朱琳琳 任正一

责任校对：刘志文 封面设计：张静

责任印制：李昂

北京玥实印刷有限公司印刷

2018年1月第4版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·432千字

标准书号：ISBN 978-7-111-58052-2

定价：42.00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)

封面防伪标均为盗版

# 前 言

---

本书是普通高等院校机械设计制造及自动化专业的专业课规划教材，也可作为机电工程技术人员的参考书。

本书自第3版出版以来，已在全国三十多所高校广泛应用，受到师生的广泛好评。

本书注重基础理论的阐述，理论与实际结合；适当反映国内外金属切削机床（数控机床、组合机床）、切削刀具、机床夹具的科技成果及其发展趋势；保留普通机床设计理论的精华。

本书修改完善了第3版的内容：完善了等比数列转速分解理论、普通机床转速的确定、齿轮齿数的确定、现代数控无级变速系统的设计，删除了较复杂的非对称双公比传动系统的设计等内容，对最基础的齿轮宽式排列增加了创新内涵，即无齿顶干涉齿轮排列。

本次修订由山东理工大学李庆余、青岛理工大学孟广耀、山东大学岳明君任主编，参编人员有山东理工大学王士军、赵国勇、李丽、侯荣国、牛宗伟，中国铝业公司山东分公司高级工程师黄向阳。全书由李庆余统稿。多媒体课件由孟广耀、侯荣国、李庆余制作。全书由山东大学刘镇昌教授、山东理工大学李传义教授主审。

在本书的编写过程中，得到了山东理工大学、青岛理工大学、山东大学等有关院校的大力支持和帮助，对教材编写提出了宝贵意见，在此谨致谢意。

本书大部分内容都经编者多年教学实践，但由于学术水平有限和编写时间仓促，不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

## CONTENTS

### 前言

绪论	1
<b>第一章 金属切削机床的总体设计</b>	<b>3</b>
第一节 机床的基本要求	3
第二节 机床的设计步骤	5
第三节 机床的总体布局	6
第四节 机床主要技术参数的确定	11
习题与思考题	25
<b>第二章 机床的传动设计</b>	<b>26</b>
第一节 分级变速主传动系统设计	26
第二节 扩大变速范围的传动系统设计	37
第三节 计算转速	42
第四节 无级变速系统的设计	44
第五节 进给传动系统的设计	53
第六节 结构设计	57
习题与思考题	63
<b>第三章 机床主要部件设计</b>	<b>66</b>
第一节 主轴组件设计	66
第二节 支承件的设计	84
第三节 导轨设计	95
第四节 滚珠丝杠螺母副机构	111
习题与思考题	119
<b>第四章 组合机床设计</b>	<b>121</b>
第一节 概述	121
第二节 组合机床总体设计	131
第三节 通用多轴箱设计	147
习题与思考题	167

<b>第五章 专用刀具设计</b> .....	168
第一节 成形车刀设计.....	168
第二节 拉刀设计.....	186
第三节 孔加工复合刀具.....	205
习题与思考题.....	210
<b>第六章 机床夹具设计</b> .....	213
第一节 机床夹具概述.....	213
第二节 工件的定位和夹具的定位设计.....	215
第三节 工件的夹紧及夹具的夹紧设计.....	232
第四节 机床夹具的其他装置.....	245
第五节 机床专用夹具的设计方法.....	254
习题与思考题.....	271
<b>参考文献</b> .....	274

# 绪 论

## 一、机械制造业在国民经济中的地位

机械制造业是国民经济各部门赖以发展的基础，是国民经济的重要支柱，是生产力的重要组成部分。机械制造业不仅为工业、农业、交通运输业、科研和国防等部门提供各种生产设备、仪器仪表和工具，而且为制造业包括机械制造业本身提供机械制造装备。机械制造业的生产能力和制造水平，标志着一个国家或地区的科学技术水平和经济实力。

机械制造业的生产能力和制造水平，主要取决于机械制造装备的先进程度。机械制造装备的核心是金属切削机床。精密零件的加工主要依赖切削加工来达到所需要的精度。金属切削机床所担负的工作量约占机器制造总工作量的 40%~60%，它的技术水平直接影响到机械制造业的产品质量和劳动生产率。换言之，一个国家的机床工业水平在很大程度上代表着这个国家的工业生产能力和科学技术水平。显然，金属切削机床在国民经济现代化建设中起着不可替代的作用。

## 二、机械制造装备的状况及发展前景

不同的“经济模式”对制造装备的要求不同，制造装备决定了“经济模式”。工业发达国家为了将先进技术、先进生产模式、先进工艺应用于制造业，增强其经济实力，非常重视机械制造业的发展。尤其是机械制造装备工业的发展。在已经过去的 20 世纪中，对机械制造装备进行了多次更新换代：50 年代为“规模效益”模式，即少品种、大批量生产模式；70 年代是“精益生产”（Lean Production）模式，以提高质量、降低成本为标志；80 年代较多地采用数控机床、机器人、柔性制造单元和系统等高技术的集成机械制造装备；90 年代以来，机械制造装备普遍具有“柔性化”“自动化”和“精密化”的特点，以适应多品种、小批量和经常更新产品的需要。

我国过去实行计划经济，传统产业的改造进展缓慢，机械制造业的装备基本上处于工业发达国家 20 世纪 50 年代的水平，适应“规模效益”的生产模式。改革开放以来，我国机械制造装备工业迅猛发展。目前我国已能生产从小型仪表机床到重型机床的各种机床，能够生产出各种精密的、高度自动化的以及高效率的机床和自动生产线；我们国家能够生产 200 种铣床，并研制出六轴五联动的数控系统，分辨率可达  $1\mu\text{m}$ ，适用于复杂形体的加工。我国生产的几种数控机床已成功用于日本富士通公司的无人工厂。

虽然我国机械制造装备工业取得了很大成就，但与世界先进水平相比还有很大差距。主要表现为：大部分高精度和超精密机床还不能满足现实需求，精度保持性较差；国外数控系统平均无故障工作时间为 10000h，我国自主开发的数控系统仅 3000~5000h；整机平均无故障工作时间，国外数控机床为 800h 以上，国内数控机床仅 548h。2013 年，我国数控机床的产量仅为全部机床产量的 34.6%，远低于发达国家的 65%；我国数控机床的产值数控化率为 54.7%，而发达国家为 80%左右；国产数控机床约 80%采用国外数控系统，高档数控机



床几乎完全依赖进口, 国产机床仅占 2%; 五轴联动数控机床国外产品无故障运行时间为 1500h, 而国内产品大约 1000h。

经济全球化时代已经到来, 我国机械制造工业面临严峻的挑战。我们必须发奋图强, 努力工作, 不断扩大技术队伍和提高人员技术素质, 学习和引进国外的先进科学技术, 大力开展科学研究, 尽快达到世界先进水平。

国家中长期科技发展规划纲要(2006~2026)中规定: 提高装备设计、制造和集成能力, 以促进企业技术创新为突破口, 通过科技攻关, 基本实现高档数控机床、工作母机、重大成套技术装备、关键材料与关键零部件的自主设计制造。“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项“十二五”期间重点实施的内容和目标分别是: 重点攻克数控系统、功能部件的核心关键技术, 增强我国高档数控机床和基础制造装备的自主创新能力, 实现主机与数控系统、功能部件协同发展, 重型、超重型装备与精细装备统筹部署, 打造完整产业链。国产高档数控系统国内市场占有率达到 8%~10%。研制 40 种重大、精密、成套装备, 数控机床主机可靠性提高 60%以上, 基本满足航天、船舶、汽车、发电设备制造四个领域的重大需求。

### 三、机械制造装备的组成

机械制造装备包括加工设备、工艺装备、工件输送装备和辅助装备。它与制造方法、制造工艺紧密地联系在一起, 是机械制造技术的重要载体。

#### 1. 加工设备

加工设备主要指金属切削机床、特种加工机床, 如电加工机床、超声波加工机床、激光加工机床等, 以及金属成形机床, 如锻压机床、冲压机、挤压机等。

#### 2. 工艺装备

工艺装备是机械加工中所使用的刀具、模具、机床夹具、量具、工具的总称。

#### 3. 工件输送装备

工件输送装备主要指坯料、半成品或成品在车间内工作地点间的转移输送装置, 以及机床的上下料装置。

工件输送装置主要应用于流水线和自动生产线上。输送装置的主要类型有: 悬挂输送装置; 辊道输送装置, 即由一系列装在固定框架(型钢组成)上的托辊形成的输送装置, 靠人力或工件重力输送工件; 由刚性推杆推动工件做同步输送的步伐式输送装置; 带有抓取机构, 既能为机床上下料, 又能在两工位间输送工件的机械手; 由连续运动的链条带动工件或随行夹具做非同步运行的链条输送装置。

#### 4. 辅助装备

辅助装备包括清洗剂、排屑装置和计量装置等。

排屑装置用于自动线或自动机床上, 从加工区域将切屑清除, 然后输送到机床外或自动加工生产线外的小车内。清除切屑常用压缩空气、切削液冲刷等方法。输送切屑装置常用平带输送机、螺旋输送机、刮板输送机。

### 四、本课程主要研究内容

根据专业教学指导委员会推荐的指导性教学计划, 本教材仅包括金属切削机床设计、刀具设计、机床夹具设计等机械制造装备设计的主要内容。工件输送装备、辅助装备的设计等内容并入机械制造自动化技术课程。



# 第一章

## 金属切削机床的总体设计

金属切削机床（以下简称机床）的总体设计是机床设计的关键环节，对机床的技术性能和经济性指标起着决定性作用。机床的总体设计是根据设计要求，通过调查研究，检索资料，掌握机床设计的依据；然后进行工艺分析，拟定出性能先进、经济性好的工艺方案，必要时画出加工示意图；在此基础上确定机床总体布局，画出机床联系尺寸图；确定所设计机床的主要技术参数。

### 第一节 机床的基本要求

机床是利用去除表面材料的方法获得零件所需的形状、尺寸的设备。机床的性能直接影响到零件的加工精度、生产率和生产成本。因而机床应具有良好的技术性能，满足使用要求；同时，机床要造型美观，色彩协调，有良好的人机关系；在此基础上，机床应尽量经济实用，质优价廉。

#### 一、机床应具有的性能指标

##### 1. 工艺范围

机床的工艺范围是指机床适应不同生产要求的能力。它包括可加工的零件类型、形状和尺寸范围，能完成的工序种类等。

不同的生产模式对机床的工艺范围要求不同。大批量生产，工序分散，要求一台机床只完成一个零件的一道或几道工序的加工，加工效率高，工艺范围窄。适应这种生产模式的机床是专用机床和组合机床。单件、小批量生产，工序集中，要求机床完成尽可能多的工序，工艺范围广。适应这种生产模式的机床是普通机床和万能机床。多品种、小批量生产模式，要求机床适应一定要加工对象的变化，即在同一时期内，适应多品种的加工；机床运动数目多、刀具种类多、数量多，工艺范围更广，且加工精度和加工效率高。适应这一生产模式的机床是数控机床和柔性制造单元、柔性制造系统。

##### 2. 加工精度

机床的加工精度是指被加工工件表面的形状、位置、尺寸的准确度、表面的粗糙程度。

机床的精度分为三级：普通精度机床、精密机床、高精度机床。同一类别的三种精度的机床，其公差值的比值约为  $1 : 0.4 : 0.25$ 。不同类别的普通级机床的公差等级是不同的，它们是按其工艺特点确定的。如 CA6140 车床与 M1432B 万能磨床皆为普通机床，但 M1432B 的精度明显比 CA6140 要高。机床的精度，包括几何精度、传动精度、运动精度和定位精度等。几何精度是指机床在不运动（机床主轴不转动、工作台不移动等情况下）或空载低速运动时的精度。它反映了机床主要零部件的几何形状精度和它们间的相对位置与相

对运动轨迹的精度,如导轨副的直线度,主轴的旋转轴心线对工作台移动方向的平行度或垂直度,主轴的全跳动等,它主要取决于零部件的结构设计和制造装配精度。几何精度是评价机床质量的基本指标。传动精度是指内联系传动链两末端执行件相对运动的精度,它取决于传动零件的制造精度和传动系统的设计合理性。运动精度是指机床在额定负载下运动时主要零部件的几何位置精度。运动精度是评价机床质量的重要指标,它取决于运动部件的制造精度和机床零部件的动态刚度(在载荷下机床抵抗变形的能力)以及机床热变形的程度。动刚度与静刚度成正比,在共振区中与阻尼比近似成正比。可通过提高机床零部件的静刚度和阻尼来防止共振,提高动刚度。定位精度是指机床工作零部件运动终了时所达到的位置的准确性和机床调整精度。

机床设计不仅要保证机床的加工精度,而且要使机床的加工精度保持一定时间,即精度保持性。精度保持性又称为使用寿命。随着技术设备更新的加速,机床的使用寿命也在缩短,中小型普通精度级通用机床包括组合机床的使用寿命约为8年;由于产品的更新换代较快,专用机床的使用寿命较通用机床短;大型机床和精密机床、高精度机床,质量大、价格高,使用寿命较长。提高机床关键零部件(如主轴轴承和导轨副)的耐磨性,可延长机床的使用寿命。

### 3. 生产率和自动化

机床的生产率是指机床在单位时间内所能加工的工件数量。要提高机床生产率,必须缩短单个工件加工过程的总时间,包括切削加工时间、装卸工件等辅助时间及分摊到每个工件上的准备和终了时间。较高切削速度、大背吃刀量、大进给量,多刀多刃切削(如将刨削平面改为铣削)等,可减少单件加工时间,提高生产率。采用机械手等机构自动装卸工件、自动换刀,利用气动、液动、电动、离心力等夹紧机构自动装夹工件,可减少辅助时间,从而提高生产率。机床的自动化程度越高,它的生产率就越高。另外,机床的自动化可减少人对加工的干预,保证被加工工件的精度稳定性,还可减轻操作者的劳动强度。

机床的自动化分为大批量生产自动化和单件、小批量生产自动化。大批量生产自动化,采用自动化单机(如组合机床、自动机床,包括数控机床)组成生产流水线。单件、小批量生产自动化,采用数控机床、加工中心组成能控制加工、工件输送的高灵活性、高效自动化生产系统,简称柔性制造系统(Flexible Manufacturing System)。多个柔性制造系统可形成工厂自动化(Factory Automatizatoin),能够实现多品种、小批量生产自动化。

### 4. 可靠性

机床的可靠性是指机床在整个使用寿命期间完成规定功能的能力。它是一项重要的技术经济指标。可靠性包括两方面:一是机床在规定时间内发生失效的难易程度;二是可修复机床失效后在规定时间内修复的难易程度。从可靠性考虑,机床不仅要求在使用过程中不易发生故障,即无故障性,而且要求发生故障后容易维修,即维修性。按机床可靠性的形成机理,机床可靠性分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性是通过设计、制造赋予机床的;使用可靠性既受设计、制造的影响,又受使用条件的影响。一般使用可靠性总低于固有可靠性。衡量机床可靠性的指标有平均无故障工作时间、有效度。例如,转塔数控车床CK3263B平均无故障工作时间为200h,有效度为0.95;车床CA6140平均无故障工作时间为5000h,有效度为0.95,大修周期为10年;精密丝杠车床SG8630、超高精度车床SI-235平均无故障工作时间均为4500h,有效度为0.95,大修周期为7年;无心磨床M1040平

均无故障工作时间为 120h, 有效度为 0.99; 高精度无心磨床 MG1050 平均无故障工作时间为 100h, 有效度为 0.98。

## 二、人机关系

机床除具有一定的技术性能指标外, 还应有良好的人机关系, 也就是使机床能符合人的生理和心理特征, 实现人机环境高度协调统一, 为操作者创造一个安全、舒适、可靠、高效的工作条件; 能减轻操作者精神紧张和身体疲劳。

机床的信号指示系统的显示方式、显示器位置等都能使人易于无误地接受; 机床的操纵应灵活方便, 符合人的动作习惯, 使操作者从接收信号到产生动作不用经过思考, 提高正确操作的速度, 不易产生误操作或故障。

机床造型应美观大方, 色彩协调, 提高作业舒适度。另外, 应降低噪声, 减少噪声污染。

## 第二节 机床的设计步骤

机床设计大致包括总体设计、技术设计、零件设计及资料编写、样机试制和试验鉴定四个阶段。

### 一、总体设计

#### 1. 掌握机床的设计依据

根据设计要求, 进行调查研究, 检索有关资料, 包括技术信息、实验研究成果、新技术的应用成果等, 类似机床的使用情况, 要设计的机床的先进程度, 国际水平等相关资料。另外, 可通过市场调研, 搜集资料, 掌握机床设计的依据。

#### 2. 工艺分析

将获得的资料进行工艺分析, 拟定出几个加工方案, 进行经济效果预测对比, 从中找出性能优良、经济实用的工艺方案(加工方法、多刀多刃等), 必要时画出加工示意图。

#### 3. 总体布局

按照确定的工艺方案, 进行机床总体布局, 进而确定机床刀具和工件的相对运动, 确定各部件的相互位置。其步骤是: 分配机床运动, 选择传动形式和机床的支承形式, 安排操作位置, 拟定提高动刚度的措施, 造型设计与色彩选择; 另外, 应画出传动原理图、主要部件的结构草图、液压系统原理图、电气控制电路图、操纵控制系统原理图。画出机床联系尺寸图——机床原始总图, 图中应包括各部件的轮廓尺寸和各部件间的相互关系尺寸, 以检查部件正确的空间位置及协调地运动。

总体设计阶段应采用可靠性设计原理, 进行预防故障设计, 即按下述六原则进行设计: ①采用成熟的经验或经分析试验验证了的方案; ②结构简单, 零部件数量少; ③多用标准化、通用化零部件; ④重视维修性, 便于检修、调整、拆换; ⑤重视关键零件的可靠性和材料选择; ⑥充分运用故障分析成果, 及时反馈, 尽早改进。利用概率设计, 将所设计零件的失效概率限制在允许的很小范围内, 以满足可靠性定量的要求。

#### 4. 确定主要的技术参数

主要技术参数包括尺寸参数、运动参数和动力参数。尺寸参数主要是对机床加工性能影响较大的一些尺寸。运动参数是指机床主轴转速或主运动速度,以及移动部件的速度等。动力参数包括电动机功率、伺服电动机的功率或转矩、步进电动机的转矩等。

## 二、技术设计

根据已确定的主要技术参数设计机床的运动系统,画出传动系统图。设计时可采用计算机辅助设计、可靠性设计以及优化设计,绘制部件装配图、电气系统接线图、液压系统和操纵控制系统装配图。修改完善机床联系尺寸图,绘制总装配图及部件装配图。

## 三、零件设计及资料编写

绘制机床的全部零件图,并及时反馈信息,修改完善部件装配图和总图。整理编写零件明细表、设计说明书,制定机床的检验方法和标准、使用说明书等有关技术文件。

## 四、样机试制和试验鉴定

零件设计完成后,应进行样机试制。设计人员应根据设计要求,采购标准件、通用件。在试制过程中,设计人员应跟踪试制的全过程,特别要重视关键零件,及时指导修正其加工工艺,及时指导加工装配,确保样机制造质量。

样机试制后,进行空车试运转。随后进行工业性试验,即在额定载荷下进行试验,按规定使其工作一段时间后,拆检其精度,并写出工业性试验报告,然后进行样机鉴定。根据工业性试验报告、鉴定意见进行改进完善设计,进行批量生产。

# 第三节 机床的总体布局

经工艺分析、优化设计、经济效果评价,确定最佳工艺方案,在此基础上画出加工示意图。工艺分析只确定零件的加工方法,以及要获得零件需求表面应具有的运动。如何实现这些运动,由哪个部件产生运动以及怎样产生所需要的运动,工件是立式加工还是卧式加工,以及有关运动控制、机床操作位置等,是总体布局所要解决的问题。

## 一、分配机床的运动

机床运动的分配应掌握四个原则:

### 1. 将运动分配给质量小的零部件

运动件质量小,惯性小,需要的驱动力就小,传动机构的体积就小,一般来说制造成本就低。例如,铣削小型工件的铣床,铣刀只有旋转运动,工件的纵向、横向、垂直运动分别由工作台、床鞍、升降台实现;加工大型工件的龙门铣床,工件、工作台质量之和远大于铣削动力头的质量,铣床主轴有旋转运动和垂直、横向两个方向的移动,工作台带动工件只做纵向往复运动;大型镗铣中心,工件不动,全部进给运动都由镗铣床主轴箱完成。

### 2. 运动分配应有利于提高工件的加工精度

运动部件不同,加工精度就不同。如工件钻孔,钻头旋转并轴向进给,钻孔精度较低;

深孔钻床上钻孔时,工件旋转,专用深孔钻头轴向进给移动,切削液从钻杆周围进入冷却钻头,并将切屑从空心钻杆中排出,这类深孔钻床加工的孔,其精度高于一般钻孔。

### 3. 运动分配应有利于提高运动部件的刚度

运动应分配给刚度高的部件。如小型外圆磨床,工件较短,工作台结构简单、刚度较高,纵向往复运动则由工作台完成;而大型外圆磨床,工件较长,工作台相对较窄,往复移动时支承导轨的长度大于工件长度的两倍,刚度较差,而砂轮架移动距离短,结构刚度相对较高,故纵向进给由砂轮架完成。

### 4. 运动分配应视工件形状而定

不同形状的工件,需要的运动部件也不一样。如圆柱形工件的内孔常在车床上加工,工件旋转,刀具做纵向移动;箱形体的内孔则在镗床上镗孔,工件移动,刀具旋转。因而应根据工件形状确定运动部件。

## 二、选择传动形式和支承形式

机床的主传动按驱动电动机类型分为交流电动机驱动和直流电动机驱动。交流电动机驱动又分为单速电动机、双速电动机及变频调速电动机驱动。机床传动的形式有机械传动、液压传动等。机械传动靠滑移齿轮变速,变速级数一般小于30级,传递功率大、变速范围较广、传动比准确、工作可靠,广泛用于通用机床中,尤其是中小型机床中。缺点是有相对转速损失,工作中不能变速。随着变频调速技术的迅速发展,变频调速—多楔带—齿轮传动组合的传动已成为机床主传动的主导形式。液压无级变速传动平稳,运动换向冲击小,易于实现直线运动,适用于刨床、拉床、大型矩台平面磨床等机床的主运动中。机床进给运动的传动多采用机械传动(齿轮副、丝杠螺母副、齿轮齿条等)或液压无级传动。数控机床进给运动采用伺服电动机—齿轮传动—滚珠丝杠副传动。设计时应根据具体情况,以满足使用要求为原则,合理选定。

机床形式与支承形式虽然都称为卧式、立式,但其含义不同。机床形式是指主运动执行件的状态,如卧式机床的主轴或主运动方向是水平的,也称为卧轴机床。支承形式是指支承件的形状,支承件高度方向尺寸小于长度方向尺寸时称为卧式支承;支承件高度方向尺寸大于长度方向尺寸时称为立式支承。卧式机床可用卧式支承,也可用立式支承。如CA6140卧式机床卧式支承,X6132A卧式机床立式支承。单臂式和龙门式机床是按照机床形状定义的,实质上就是支承形式。

卧式支承的机床重心低、刚度大,是中小型机床的首选支承形式。立式支承又称为柱式支承,简称为立柱。这种支承占地面积小,刚度较卧式差,机床的操作位置比较灵活。立式支承适用于加工工件直径大轴向尺寸小的机床(落地车床除外)和箱形零件加工机床,如立式车床、镗床、铣床、钻床以及齿轮加工机床。单臂支承是在立柱的基础上增加了可上下移动的横向(水平方向)悬臂梁,结构简单,但刚度差,应尽量不用。摇臂钻床为单臂支承,更换加工位置方便,大中型工件或群孔加工时可不移动工件,而利用摇臂的转动、升降及主轴箱的水平移动找准钻孔位置。单柱立车也是单臂支承机床。这类支承的机床需有提高刚度的措施。龙门框架式支承可以说是单臂式支承的改进形式,又称为双柱式支承。它的刚度大,结构复杂,适用于立式大型机床,如龙门刨床、龙门铣床、双柱立车、双柱立式坐标



镗床等。这类支承的机床适用于大型工件的加工,或多件同时加工。必要时龙门框架式支承做成封闭框架,以承受巨大的冲击力。

### 三、安排操作部位

机床总体设计,在考虑达到技术性能指标的同时,必须注意机床操作者的生理和心理特征,充分发挥人和机床各自的特点,达到人机最佳综合功效。

机床各部件相对位置的安排,应保证:①操作者和工件有适当的相对位置,有足够的活动空间,以便于工件的装卸、刀具的安装调试、加工情况的观察和工件检验;②操作者与操作手柄等控制元件的位置适当,使操作者有足够的操作空间,达到操作准确、省力、方便的目的;③操作件应按 JB/T 7270~JB/T 7277 选用,操作件之间应有合理的距离;④功能不同的按钮应有不同的颜色,且这些颜色应和人的视觉习惯一致,符合人的心理、生理特征,避免误操作。

机床工件的安装高度,应充分考虑人的身体高度,按照机床的形式合理确定。卧式机床,主轴高度应在 900~1200mm 之间,若机床主轴高度过高时,应设置操作垫板,以降低操作高度;机床高度过低时,应将机床基础加高或用垫铁抬高机床;卧式机床下部应留有操作者双脚站立的空间,以便靠近机床,观察加工情况。立式大型机床,为了使操作者弯腰装卸工件方便,工作台面高度较低,一般在 700mm 左右。中小型立式支承的机床,工件尺寸较小,工件安装高度应与人体脐高等高为宜,一般在 950~1050mm,以方便操作者操作和观察加工。

操作者站立不动,手臂最大可及的工作范围是 1600mm,正常活动范围是 1200mm。常用手柄应集中设置在操作者正常活动范围内,不常用的手柄可就近设置。需在多个位置工作的机床,可采用联动控制机构。大型和重型机床,切削刃或切削面太高,超出人体视觉和操作的最高高度,应设置阶梯式操作平台,便于观察不同高度的工件加工;并采用悬挂式按钮控制箱,实现多位置控制。当运动件做直线或旋转运动时,手柄操作方向应与运动件产生的运动方向一致。当操作件是手轮时,如运动件做直线运动,顺时针转动手轮,运动件应离开、向右、向上运动;如运动件做旋转运动,手轮的转向应与运动件一致;如运动件做径向运动,顺时针转动手轮,运动件做向心运动。

视距是指人在操作过程中正常的观察距离,一般为 50~760mm,最佳为 560mm。视距过大或过小都会影响人的阅读的速度及准确性,应根据工作要求的性质和精确程度来确定最佳视距。

人的眼睛沿水平方向运动比沿垂直方向运动灵活,目测水平尺寸比垂直尺寸精确,且不易疲劳,因而视觉接受的信号源应尽量水平排列。人的视线习惯是从左到右、从上到下、顺时针移动。观察某一区域时,视区观察效果最佳象限依次是右上象限(第一象限)、左上象限(第二象限)、左下象限(第三象限)、右下象限(第四象限)。人的眼睛对直线轮廓比曲线轮廓更容易接受。人的眼睛最容易辨别的颜色依次是红色、绿色、黄色、白色;通常用红色表示危险、禁止,要求立即处理的状态,红色按钮为停车;黄色表示提醒、警告,表达状态变得危险,达到临界状态,黄色按钮为点动;绿色表示安全、正常的工作状态,绿色按钮为工作。当两种颜色配合在一起时,最易辨别的顺序是黄底黑字、黑底白字、蓝底白字、白底黑字等。

### 四、提高动刚度的措施

#### 1. 提高抗振性能

机床的抗振性是指机床工作部件在交变载荷下抵抗变形的能力,包括抵抗受迫振动和自

激振振动的能力。习惯上称前者为抗振性，后者为切削稳定性。

受迫振动的振源可能来自机床之外，如电动机转子轴的质量偏心等；也可能来自机床传动系统内部，如机床做回转运动的工作部件的质量偏心、受载后工作部件的弹性弯曲变形等。机床受迫振动的频率与振源激振力的频率相同。振幅与振动方向的静刚度成反比，即与机床质量成反比、与振动方向的固有频率的平方成反比；在共振区与阻尼比近似成反比。机床是由许多零部件装配成的复杂振动系统，各部分的不同方向的静刚度（如卧式机床床身的横向抗弯刚度、纵向抗弯刚度以及床身与床腿的接触刚度）不可能相同，因而机床有多个固有频率。固有频率较低的振动易与激振力的频率接近从而形成共振。应针对对机床性能影响较大的固有频率低的几种振型，制定提高动刚度的措施。

对来自机床外部的振源，最可靠、最有效的方法就是隔离振源。应尽量使主运动电动机与主机分离，并且采用带传动（如平带传动、V带传动、多楔带传动等）驱动机床的主运动，避免电动机振动的传递。对无法隔离的振源（如立式机床的电动机）或传动链内部形成的振源，则应：①选择合理的传动形式（如采用变频无级调速电动机或双速电动机），尽量缩短传动链，减少传动件个数，即减少振动源的数量；②提高传动链各传动轴组件，尤其是主轴组件的刚度，提高其固有角频率；③大传动件应做动平衡或设置阻尼机构；④箱体外表面涂刷高阻尼涂层，如机床腻子等，增加阻尼比；⑤提高各部件结合面的表面精度，增强结合面的局部刚度。

自激振动与机床的阻尼比，特别是主轴组件的阻尼比、刀具以及切削用量，尤其是切削宽度密切相关。除增大工作部件的阻尼比外，还可调整切削用量来避免自激振动，使切削稳定。

## 2. 减小热变形

机床工作时受到外部热源的影响，如电动机、液压泵、阀、环境温度等，以及内部热源的影响，如摩擦热、切削热等，使机床各部分温度发生变化。热源在机床上分布不均，且产生的热量不同，自然会导致机床各部分不同的温升。由于不同的金属材料具有不同的热膨胀系数，造成机床各部分变形不一，产生机床热变形，使机床加工精度降低，运动部件磨损加快，严重时会导致机床无法工作。据统计，机床热变形导致的加工误差的最大值约占全部误差的70%。尤其是精密机床、大型机床、自动化机床、数控机床，热变形的影响较大，不容忽视。

同样，减少热变形最简单、最有效的方法是隔离热源。除将电动机尽量与主机分离外，液压泵、液压阀、油箱等应与主机隔离，减少传给机床的热量，从而减少机床热变形。加强空气流通、改善环境温度，也是减少热变形的有效措施之一。

不能分离的热源，应采取以下措施：①产生热量较大的热源，进行强制冷却。如用切削液冷却加工部位，用压力润滑油循环冷却主轴轴承等。精密机床可在恒温下加工。②热源相对结构对称，热变形后中心位置不变。如卧式车床主轴水平位置基本对称，机床温度升高后，机床主轴水平位移很小。③改善排屑状态。数控车床的床身导轨倾斜于主轴后上方，使切屑在自重作用下落入下面小车中或切屑输送机上，切屑不与床身和导轨副接触，避免了切屑携带的切削热传给导轨床身，减少了热变形。

## 3. 降低噪声

机床振动是噪声源，主要包括：①齿轮、滚动轴承及其他传动零件的振动、摩擦等造成



的机械噪声。传动件的传动线速度增加一倍, 噪声增加 6dB; 载荷增加一倍, 噪声增加 3dB。②液压泵、液压阀、管道中的油液冲击造成的液压噪声。③电动机风扇、转子旋转搅动空气形成的空气噪声。④电动机的电磁噪声。

齿轮振动影响传动的平稳性, 是机床主要的噪声源。影响传动平稳性的主要误差是齿轮的单个齿距偏差  $f_{pt}$  和一齿切向综合偏差  $f_i'$ 。  $f_{pt}$  指实际齿距与理论齿距的代数差;  $f_i'$  指在一个齿距内齿轮分度圆上齿廓实际圆周位移与理论位移的最大差值。当两齿轮的齿距不相同和齿的圆周位置产生变化时, 齿轮在进入啮合和退出啮合时会造成撞击, 引起振动和噪声。  $f_{pt}$ 、 $f_i'$  主要是由滚齿刀的制造误差和安装误差 (径向圆跳动和轴向窜动)、展成运动链中分度蜗杆误差、齿坯的安装误差产生的。根据共轭齿轮的啮合原理, 实际齿形与渐开线有差异, 会使齿轮在一齿啮合范围内的瞬时传动比不断变化, 形成振动和噪声。另外, 齿轮的啮合重合度大于 1, 啮合初始和退出时都是两齿同时啮合, 可部分消除单个齿距偏差和一齿切向综合偏差的影响。重合度越大, 振动和噪声就越小。

降低齿轮噪声的措施: ①缩短传动链, 减少传动件的个数。②采用小模数、硬齿面齿轮, 降低传动件的线速度。实践证明, 线速度降低 50%, 噪声降低 6dB。③提高齿轮的精度。④采用增加齿数、减小压力角的方式或采用圆柱螺旋齿轮, 增加齿轮啮合的重合度, 机床齿轮的重合度应不小于 1.3。⑤提高传动件的阻尼比, 增加支承组件的刚度。

## 五、造型设计

机床的造型必须与功能相适应, 功能决定造型, 造型表现功能。机床造型不是将各功能部件简单地组合, 杂乱无章地堆砌, 而是在保证人机关系的基础上, 应用艺术规律和造型美学法则加以精炼和塑造, 得到恰到好处的造型。机床造型总的原则是经济实用、美观大方。尽管人的审美观不尽相同, 但还是有规律可循的, 良好的外观造型应从机床造型设计和色彩两方面去评价。

外观造型应使机床整体统一、均衡稳定、比例协调。部件的形体目前多流行小圆角过渡的棱柱体造型, 长、宽 (或高) 的比例要适当, 常用的比例为: 黄金分割比例、均方根比例、整数比例等。其中长宽比为黄金分割比例的矩形称为黄金矩形; 各部件的形体比例相互协调, 做到衔接紧密、转换自然, 组合而成的外形轮廓的几何线型要大体一致, 达到线型风格的协调统一; 整体造型应使人觉得稳定而不笨重, 轻巧且安定。

色彩可配合造型使机床达到人的审美要求。机床的主色调是绿色。实践证明, 绿色有助于提高劳动生产率, 蓝色和紫色则有碍于劳动生产率的提高。国内外各种机床多采用绿色, 它给人以贴近自然、适宜、舒畅的感觉, 同时也是一种耐油污的隐蔽色。机床色彩应适应不同的使用环境。热带地区使用的机床宜采用冷色, 如乳白色、奶黄色, 使人产生清凉、心情平静的感觉; 寒冷地区应采用暖色, 如橘黄色、橘红色等, 以增强人们的温暖感。另外, 出口机床, 应注意不同国家和地区对色彩的好恶, 使机床适合这些国家和地区人们的审美观。目前, 有些机床, 特别是加工中心和数控机床, 趋向于采用套色, 以减弱形体的笨重感, 上浅下深的色彩又可收到稳重的效果。

中小型机床, 应根据使用的工作环境确定主体色调, 通常用明快、活泼的配色; 大型、重型机床, 不宜用太浅的颜色, 而是用纯度、明度都较低的色调为主色调, 增强视觉的稳定感和力度感; 可用少部分与主体调和的、明度较高的其他色彩, 有目的、有重点地装饰和点

缀,提高机床生动活泼的效果。

## 第四节 机床主要技术参数的确定

### 一、尺寸参数

机床的尺寸参数是指影响机床加工性能的一些尺寸。主参数代表机床的规格大小,是最重要的尺寸参数。另外,机床尺寸参数还包括第二主参数和一些重要的尺寸。

机床的主参数已规定在 GB/T 15375—2008《金属切削机床 型号编制方法》中。每种机床的主参数按等比数列排列。如中型卧式车床的主参数为床身上工件的最大回转直径。主参数的系列为:250mm、320mm、400mm、500mm、630mm、800mm、1000mm 七种规格,系列的公比为 1.25。工件回转的机床主参数都是工件的最大加工尺寸,如车床、外圆磨床、无心磨床、钻床、齿轮加工机床等;工件移动的机床(镗床除外),主参数都是工作台面的宽度,如龙门铣床、龙门刨床、升降台式铣床、矩台平面磨床等;主运动为直线运动的机床(拉床、插齿机除外),主参数是主运动执行件的最大位移,如刨床、插床等;卧式铣镗床的主参数是镗轴的直径;拉床不是用尺寸作为主参数,而是用拉力值(单位是 N)作为主参数。

有的机床还有第二主参数,如卧式车床第二主参数为最大加工工件长度;升降台式铣床、龙门刨铣床为工作台面的长度;摇臂钻床为最大跨距等。第二主参数是主参数的补充。另外,还要确定与被加工零件有关的尺寸,以及与标准化工具或夹具安装有关的尺寸参数,如卧式车床刀架上工件的最大回转直径、主轴锥孔的莫氏锥度及主轴孔允许通过的最大棒料直径等;龙门机床横梁的最高、最低位置等;摇臂钻床主轴下端面至底座的最大、最小距离,主轴的最大伸出量等。

### 二、运动参数

主运动为旋转运动的机床,主运动的运动参数为主轴转速。主轴转速与切削速度的关系为

$$n = \frac{1000v}{\pi d} \quad (1-1)$$

式中  $n$ ——主轴转速 (r/min);

$v$ ——切削速度 (m/min);

$d$ ——工件或刀具直径 (mm)。

主运动是直线运动的机床,如刨床、插床、插齿机,主运动参数是每分钟的往复次数。

不同的机床,对主运动参数的要求不同。专用机床和组合机床是为特定工件的某一特定工序而设计的,每根主轴只有一种转速,根据最佳切削速度而定。通用机床是为适应多种工件加工而设计的,工艺范围广,工件尺寸变化大,主轴需要变速,因此需确定主轴的变速范围,即最高转速、最低转速。主运动可采用无级变速,也可采用分级变速。如果采用分级变速,则还应确定转速级数。

#### 1. 最低转速和最高转速的确定

分析在设计机床上可能进行的工序,从中找出要求最高和最低转速的典型工序。按照典型工序的切削速度和刀具(或工件)直径,由式(1-1)计算出最低转速  $n_{\min}$ 、最高转速