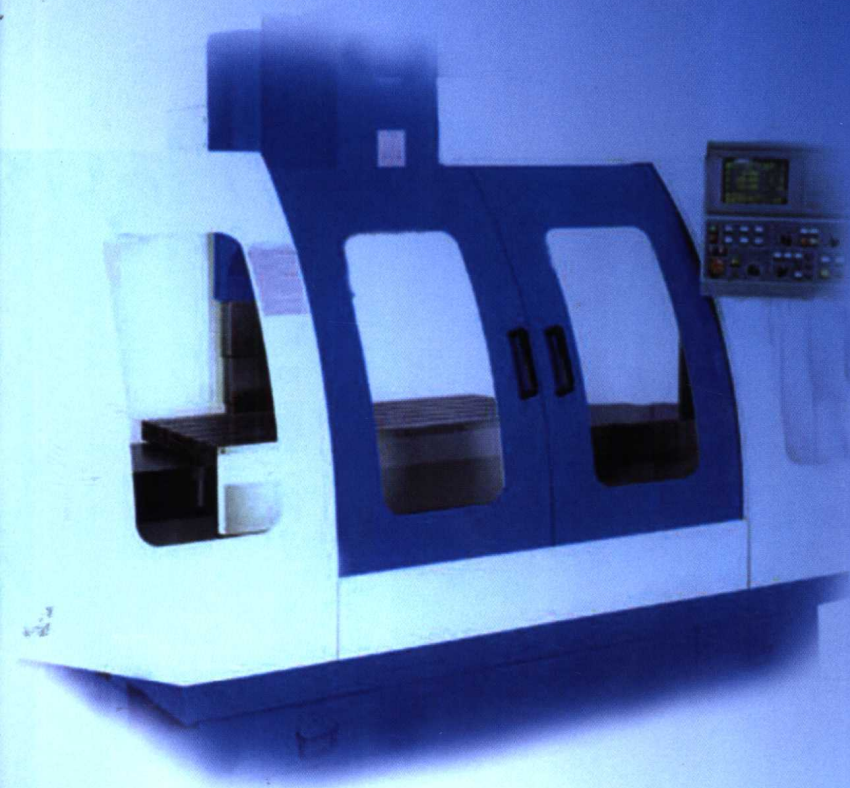


专用机床设备设计

ZhuanYong JiChuang SheBei SheJi

主编 许晓暘



重庆大学出版社

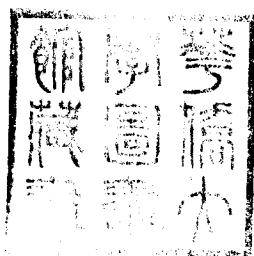
36 502-1
X717
高等工程专科学校教材

专用机床设备设计

许晓旻 编 著



A1089370



重庆大学出版社

0416

内容提要

高等工程专科教育的目的是要培养在工业、工程第一线的,从事制造、设计、运行、维护、测试等方面的工艺、技术和管理工作的应用型人才。本书根据国家教育部有关高等工程专科教育与高等职业技术教育的要求,从加强针对性和实用性的角度出发,介绍了机床设计的基本知识、专用机床设计的基本方法及一般规律。全书共7章,内容包括:机床总体设计、传动设计、主轴部件、支承件及导轨、操纵机构、自动上料机构、组合机床。

本书可作为高等专科学校和其他各类高等职业院校机械类专业教材,也可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

专用机床设备设计/许晓阳编著. —重庆:重庆大学出版社,2003.7

ISBN 7-5624-2820-4

I. 专... II. 许... III. 专用机床—设计 IV. TG502.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第038603号

高等工程专科学校教材

专用机床设备设计

许晓阳 编著

责任编辑:谭敏 版式设计:谭敏

责任校对:廖应碧 责任印制:秦梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:20 字数:499千

2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2820-4/TH·98 定价:25.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

1998年11月在重庆召开的全国高等工业专科机械工程类专业教学指导委员会和全国高等工业专科机械工程类专业协会会议纪要指出:“传统的机械专业是以制造工艺为主要业务方向的,其教学计划中的设计课程,如机床设计、工装设计,基本上是为制造工艺服务的,社会对毕业生的需求量很大。基于此,应适当调整某些专业课程,以进一步拓宽专业服务方向,适应全行业的制造工艺和技术管理等一线工作。”拓宽后的机械工程类专业的业务规格,可描述为:“能从事现代化机械制造工艺、工装、专用机床的设计,从事生产现场的运行、控制、维修、管理工作。”本书正是根据这一精神编写的。

本书从专用机床设计所要求的知识点出发,深入浅出地介绍了机床总体设计、传动设计、主要部件设计的基本理论和基本方法。考虑到机床设计领域内数控技术的发展将导致的机床结构变化,本书的主运动设计部分除介绍分级变速外,还扼要介绍了无级变速传动知识。在介绍主轴部件、支承件和导轨时,也适当地反映了这方面的有关新技术和新知识。考虑到部分读者对轴承新标准还不熟悉,本书在所涉及的部分轴承新标准代号后列出了相应的旧标准代号。

近年来,我国机械制造业的自动化生产技术有了较快的发展,据统计,生产过程中材料、半成品的输送、定向及设备的上下料等辅助工序所花的费用约占全部加工费用的三分之一以上,所花的时间约占全部加工时间的三分之二以上,对此环节必须有足够的重视。故本书适当地介绍了机械自动化上下料装置的类型、特点及设计方法,学生也可将本书所介绍的这部分知识用于轻工业产品的自动化上下料装置的设计。

为培养学生使用通用零部件设计专用机床的能力,本书还讲述了组合机床的总体设计及多轴箱设计方法,介绍了“1字头”主要通用部件的工作原理、性能参数及选用配套方法,并对攻螺纹多轴箱的设计特点做了阐述。

高等工业专科教育是以培养工业、工程生产第一线所需的高等工程技术应用型人才为其目标的,因此,本书在介绍机床设计的基本理论时,力求简明扼要,在介绍专用机床设计的方法和步骤时,力求针对性和实用性。

本书在出版前曾在成都电子机械高等专科学校机械系作为内部教材使用,其间经过两次修订,本次出版前再次做了修订。焦根昌先生和重庆大学出版社谭敏编辑为本书的出版做了许多工作,在此谨表谢忱。

热诚欢迎读者对书中的疏漏和不足之处进行批评指正。

编著者
2003年3月

目 录

第1章 机床总体设计	1
第1节 机床设计的步骤	1
第2节 机床总体布局	2
第3节 机床主要技术参数的确定	8
第2章 传动设计	19
第1节 有级变速主传动系统的组成和要求	19
第2节 有级变速主传动系统设计	21
第3节 主传动系统的几种特殊变速方式	41
第4节 计算转速	49
第5节 无级变速系统	52
第6节 内联传动链设计原则	53
第3章 主轴部件	57
第1节 对主轴部件的基本要求	57
第2节 主轴轴承的选择和主轴滚动轴承	59
第3节 主轴	69
第4节 主轴部件的典型结构	72
第5节 主轴滑动轴承	76
第6节 主轴部件的设计计算	82
第7节 轴承的润滑与密封	93
第8节 提高主轴部件性能的一些措施	97
第4章 支承件及导轨	101
第1节 支承件的功用及基本要求	101
第2节 支承件的受力分析	102
第3节 支承件的静刚度	104
第4节 支承件的结构设计	107
第5节 导轨的功用、分类和基本要求	119
第6节 滑动导轨	121
第7节 低速运动的平稳性	131
第8节 动压导轨、静压导轨、卸荷导轨	133
第9节 滚动导轨	136

第 5 章 操纵机构	141
第 1 节 概述	141
第 2 节 分散式操纵机构	142
第 3 节 集中式操纵机构	145
第 4 节 操纵机构的定位和互锁	150
第 6 章 自动上料机构	155
第 1 节 概述	155
第 2 节 件料自动上料机构	158
第 3 节 卷料自动上料机构	183
第 4 节 棒料自动上料机构	193
第 5 节 薄片料自动上料机构	197
第 7 章 组合机床	200
第 1 节 组合机床概述	200
第 2 节 组合机床的通用部件	209
第 3 节 常用通用部件	213
第 4 节 通用部件的选用	227
第 5 节 组合机床总体设计	230
第 6 节 组合机床多轴箱设计	267
第 7 节 攻螺纹多轴箱的设计特点	293
附录	306

第 1 章

机床总体设计

机床设计是机床设计师根据市场的需求、现有的制造条件和新工艺的发展,运用有关的科学技术知识进行的一项创造性劳动。机床设计的发展历程,经历了以下三个阶段:经验类比阶段、以实验为基础围绕着机床性能开展研究的阶段、计算机辅助设计阶段。

近年来,现代科学技术的发展已经为机床设计提供了大量的测试数据,机床设计的理论研究也有了新的进展,尤其是计算机的应用,使机床设计师能够利用计算机对设计所需的大量技术资料进行检索,自动地对设计方案进行分析比较,从而选出最佳方案。也可以利用计算机对主要零部件进行强度、刚度校核及误差计算,从而提高了机床设计的质量和效率。

第 1 节 机床设计的步骤

一、调查研究

研究市场和用户对机床的具体要求、目前使用的加工方法,收集并分析国内外同类型机床的现状、发展趋势以及有关的科技动向;调查机床制造厂的设备条件、技术能力和生产经验等。

二、拟定方案

分析工件的加工工艺,提出总体设计方案,其中包括:工艺方案、主要参数、机床总体布局、传动系统、电气系统、液压系统、主要部件的结构草图、试验结果及技术经济分析报告等。

在拟定方案时要注意尽可能采用先进的工艺和结构,尽量采用先进技术,设计方案必须以生产实践和科学实验为依据。

三、技术设计

根据总体设计方案,绘制机床总图、部件装配图、液压与电气装配图,并进行运动计算和动力计算。

进行零件图设计并编写各种技术文件。

四、样机试制和鉴定

如果所设计的机床是有一定批量的产品,在零件图设计完成后,应进行样机试制以考验设计。对样机要进行试验和鉴定,合格后再进行小批试制以考验工艺。在试制、试验和鉴定过程中,要根据暴露出来的问题,对图纸进行修改,直到机床达到使用要求为止。此时,设计工作才算基本完成。

第2节 机床总体布局

机床总体布局是指确定机床的组成部件,以及各个部件和操纵、控制机构在整台机床中的配置。例如,图 1-1 所示为加工柴油机机体的专用铣床的总体布局。

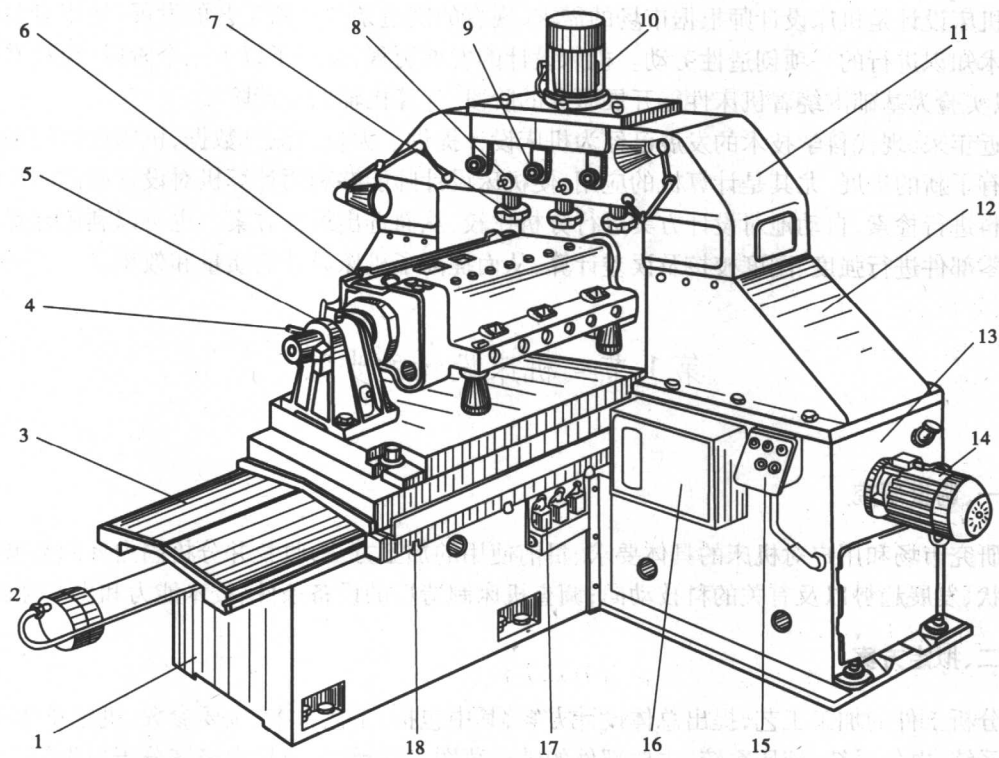


图 1-1 加工柴油机机体的专用铣床的总体布局

1—床身;2—进给油缸;3—工作台;4—移动顶盘手柄;5—夹具;6—工件;7—端铣刀;8—主轴套筒夹紧方头;9—主轴套筒移动方头;10—主电动机;11—顶梁;12—右立柱;13—右侧底座;14—液压电动机;15—按钮台;16—液压操纵板;17—行程开关;18—挡铁

机床共包括 9 个部件,由床身、右侧底座(内装液压设备)、左侧底座(内装电气设备)、右立柱、左立柱、顶梁(内装主传动装置)组成龙门式支承系统。夹持工件的夹具,安装在工作台上,工作台由进给油缸驱动,沿床身导轨作纵向进给运动。按钮台、手柄、手轮、挡铁、行程开关等分别设置在机床中适当的部位。

合理的总体布局的基本要求是:

- (1) 保证工艺方法所要求的工件和刀具的相对位置和相对运动。
- (2) 保证机床具有与所要求的加工精度相适应的刚度和抗振性。
- (3) 便于操作、调整、修理机床;便于输送、装卸工件、排除切屑。
- (4) 经济效果好,如节省材料、减少机床占地面积等。
- (5) 造型美观。

机床总体布局设计的一般步骤是,首先根据工艺分析分配机床部件的运动,选择传动形式和支承形式;然后安排操作部位,并拟定在布局上改善机床性能和技术经济指标的措施。上述步骤之间有着密切联系,必要时可互相穿插或并进。

一、运动的分配

机床上的工艺方法确定后,刀具和工件在切削加工时的相对运动亦随之被确定了。但是,这个相对运动可分配给刀具,也可分配给工件,或者由刀具和工件共同来完成。机床运动的合理分配,是由多方面因素决定的,下面举几个例子。

(一) 简化机床的传动和结构

在其他条件相同的情况下,运动部件(包括工件或刀具)的重量越小,所需电动机功率和传动件尺寸也越小。因此,从简化传动的角度看,应把运动分配给重量小的执行件。

例如,加工一个数十吨重的重型工件时,要驱动它,非但需要庞大的工作台和传动装置,而且为了承受巨大的工件重量和惯性力,机床的结构比较复杂,为了简化机床的传动和结构,可令工件不动,把运动都分配给刀具。

图 1-2 为用两个铣头、一个车头同时加工三处表面的示意图。工件 2 用垫铁 11 和楔铁 10 垫高,安置在平板 9 上,以床身 8 的导轨面为基准,对工件找正划线,并用 6 根拉杆 4 紧固。加工完毕,可拆卸部件,重新布置,这种方法,使机床的传动和结构简化很多,可用于重型工件的单件加工。

(二) 提高加工精度

对于一般钻孔工作,主运动和进给运动均由刀具完成(图 1-3a)比较方便,但在钻深孔时,为了提高被加工孔中心线的直线度,须将回转主运动分配给工件(图 1-3b)。

(三) 缩小机床占地面积

外圆磨床的纵向进给运动,或者由刀具完成(图 1-4 左图),或者由工件完成(图 1-4 右图)。前者机床比较短,占地面积较小,但操作者观察切削加工时走动较多。对于中小型外圆磨床,由于工件长度不大,多采用工件进给(工作台纵向移动);对于大型外圆磨床,采用刀具进给(砂轮座纵向移动)可显著地缩小机床占地面积。

二、机床传动形式的选择

机床的传动有机械的、液压的、气动的、电气的及综合的等多种形式。选择机床传动形式的基本要求是:

(1) 实现所需运动,例如,所需运动轨迹是直线运动、回转运动还是其他运动;所需运动是简单运动还是复合运动;是否需要变速、换向;是否要求按自动循环进行等。

(2) 满足运动性能要求,例如,要求无级变速还是有级变速;要求的变速范围和行程范围;

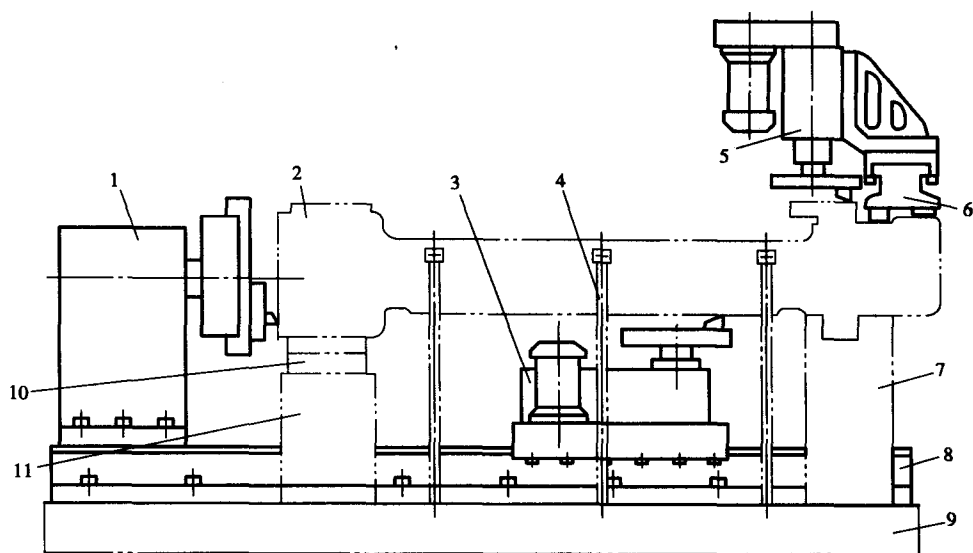


图 1-2 用简化的机床加工重型工件方法举例

1—车头;2—工件;3、5—铣头;4—拉杆;6、8—床身;9—平板;7、11—垫铁;10—楔铁

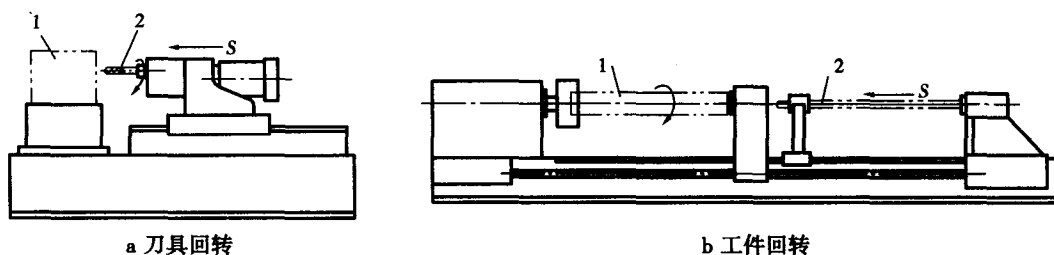


图 1-3 钻床的运动分配

1—工件;2—钻头

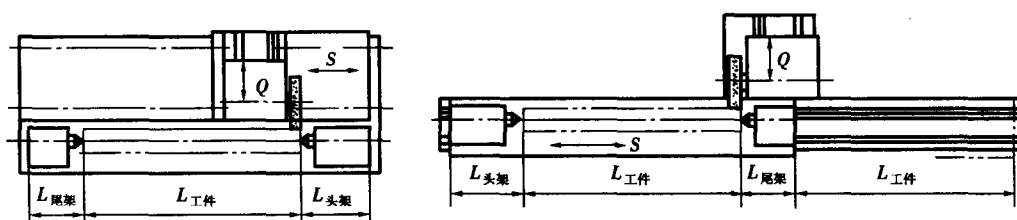


图 1-4 外圆磨床纵向进给运动分配

对传动精度、定位精度、运动平稳性的要求等。

(3) 经济效益高

图 1-5 所示为典型的机床传动形式。对于回转运动的驱动,可以是机械的,也可以是液压或电气的。图 1-5a 所示为机械驱动形式。一般利用齿轮变速机构实现有级变速。它工作可靠,要求的制造水平一般,在机床中得到广泛的应用。图 1-5b 表示液动机驱动形式,这样可实现机床在工作中无级变速。

对于直线运动的驱动,机械的和液压的都得到了广泛应用。图 1-5c 所示为机械驱动形

式,一般为有级变速,也有某些机床利用机械无级变速器,进行无级变速。图 1-5d 所示为另一种机械驱动形式,多用于自动机床中,能实现的行程一般不超过 100 ~ 150 mm。图 1-5e 所示为液压驱动形式,由于传动平稳,容易实现无级变速和运动控制的自动化,在机床中应用很广。

内联系传动亦有多种形式。图 1-5f 所示为机械传动形式,特点是能保证定传动比,工作可靠,目前广泛用于实现齿轮及螺纹加工机床的内联系传动。图 1-5g 所示为开环伺服传动形

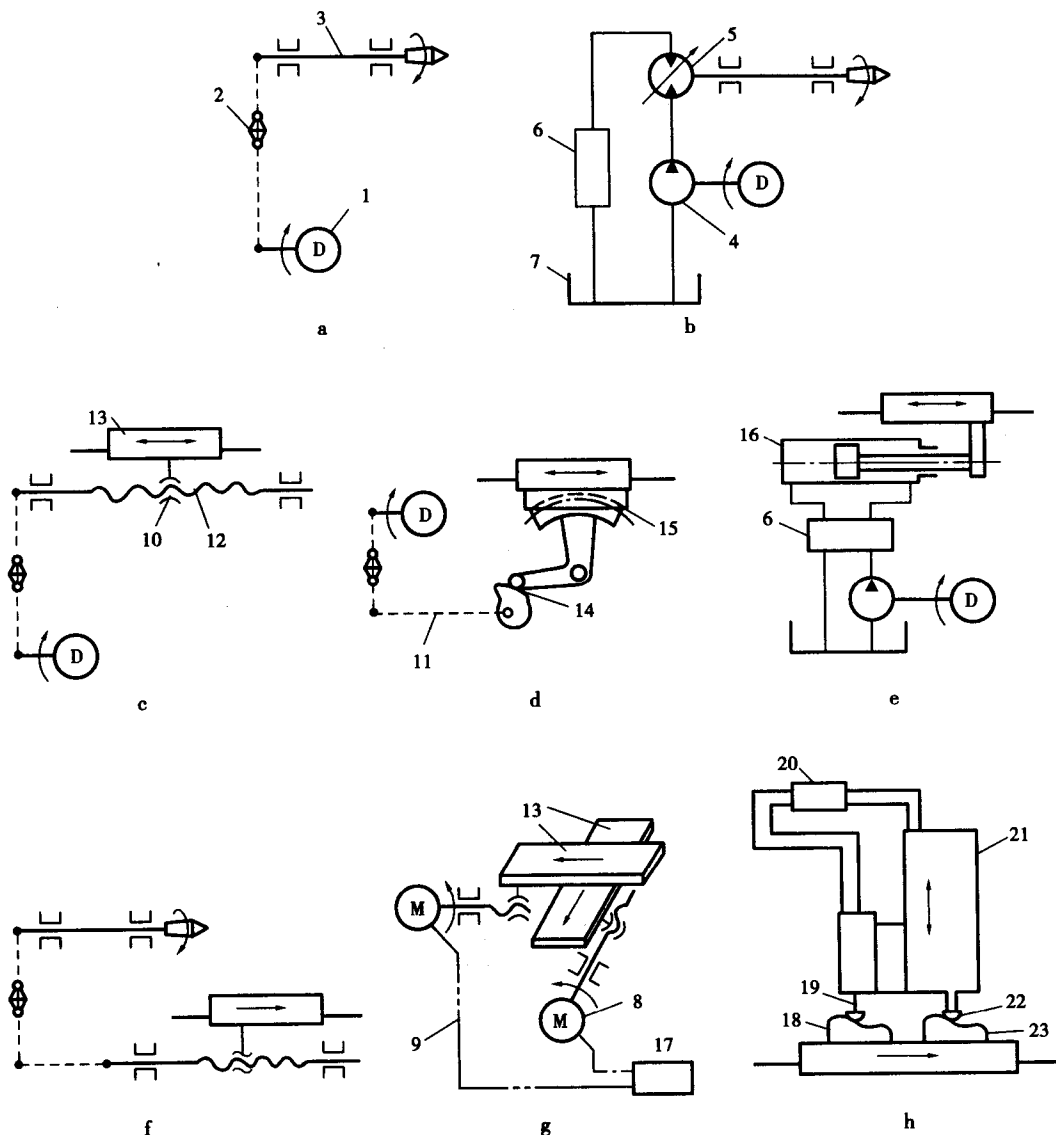


图 1-5 典型的机床传动形式

1—交流电动机;2—变速机构;3—主轴;4—油泵;5—液动机;6—液压控制装置;7—油箱;8—步进电机;
9—电联系;10—螺母;11—固定传动比的传动链;12—丝杠;13—直线移动部件;14—凸轮机构;15—齿条机
构;16—油缸;17—伺服驱动电路;18—模板;19—触指;20—液压随动系统;21—主轴箱;22—铣刀;23—工件
式,可实现运动变速、换向的自动化,并可保证定传动比,用于实现数控机床的坐标移动等。图

1-5h 所示为液压传动形式,利用液压随动系统,保证仿形机床的刀具和触指之间的运动联系,实现复杂表面加工的自动化。

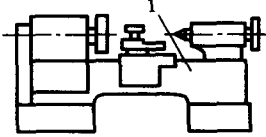
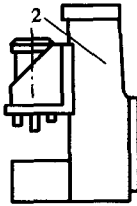
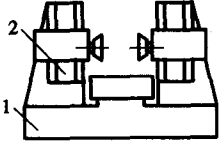
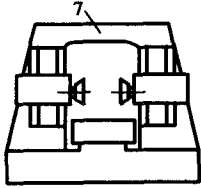
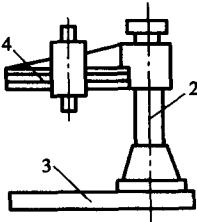
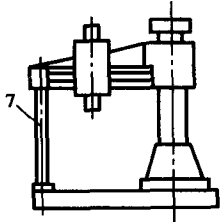
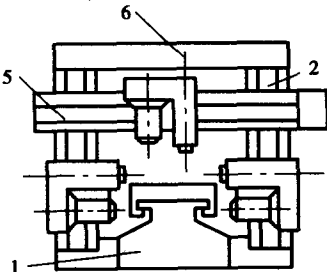
支承形式	机床类型	无附加支承	有附加支承
“一”形	卧式		
“ ”形	立式		
“⊥”形	复合式		
“C”形	单臂式		
“□”形	龙门式		

图 1-6 机床的支承形式

1—床身;2—立柱;3—底座;4—横臂;5—横梁;6—顶梁;7—附加支承

三、机床支承形式的选择

机床中常用的支承件有床身、底座、立柱、横梁、横臂等。这些支承件或单独使用,或组合使用,机床支承形式可归纳为下列5种:

(1)一字形(“—”形)支承 支承件是床身,或床身与底座的组合。具有这种支承形式的机床,称为卧式机床。

(2)柱形(“|”形)支承 支承件是立柱,或立柱与底座的组合。具有这种支承形式的机床,称为立式机床。

(3)倒丁字形(“⊥”形)支承 支承件是床身和立柱的组合。具有这种支承形式的机床,称为复合式机床。

(4)槽形(“□”形)支承 支承件是床身(或底座)、立柱、横臂三者的组合。具有这种支承形式的机床,称为单臂式机床。

(5)框形(“□”形)支承 机床的支承件由床身、横梁及双立柱组合而成,形成封闭的框形结构。具有这种支承形式的机床,称为龙门式机床。

图1-6为具有各种支承形式的机床的例子。这5种支承形式各有特点。与卧式机床相比,立式机床占地面积较小,但当工件较长时,机床的高度大,重心位置高,因此机床易于振动,操作也不方便。立式机床的执行部件可在纵、横、垂直三个方向运动,而卧式机床的执行部件一般在纵、横两个方向运动。操作立式机床时,操作者可站在机床的前面、左面或右面,而操作卧式机床,一般站在机床的前面。

与立式机床相比,单臂式机床可加工横向尺寸较大的工件。但受力时横臂相当于悬臂梁,横臂越长,可加工的横向尺寸越大,但横臂根部受到的弯矩也越大。

龙门式机床的支承件是框形结构,刚度较高,但支承件较多,结构庞大,总体布局时要注意操作机床的方便性。

卧式、立式、复合式、单臂式机床的支承一般是不封闭的,为了提高机床的刚度,必要时可添置附加支承(图1-6),以构成框形结构。

四、机床操作部位的布局

机床总体布局应保证操作者与工件之间有合适的相对位置,以便于装卸工件、调整刀具、观察加工情况以及测量工件尺寸,常用的操纵手柄、手轮、按钮、数显表等应尽可能设置在操作者近身处,使操作方便、省力。

图1-7左图示出视距 A 、视角 θ_1 、 θ_2 ,主轴离地面高度 H 的较为适宜的数值。右图示出设置操纵手柄(在水平面内)的一般范围和优先范围。手柄离地面高度以600~1100 mm为宜,其中较大值适于较小的操纵力,较小值适于较大的操纵力。

当工件或机床部件的尺寸相当大,致使切削刃或被加工面离地面的高度过大时,为了得到适宜的视距,可设置操作者站台,或将工件安装在地坑内。对于特大型机床,可采用电视设备,操作者通过电视屏幕观察切削加工情况。为了简化机床结构,有时允许将不常用的手柄就近设置在被操纵的部件上,尽管这些手柄离操作者较远。例如,专用铣床主轴套筒的移动方头9和夹紧方头8就设置在顶梁的侧面(图1-1)。对于某些大型机床,当操作者须在几个位置上

工作时,可采用联动手柄或悬挂式按钮站,使操作者在各个位置上都可以操纵机床。

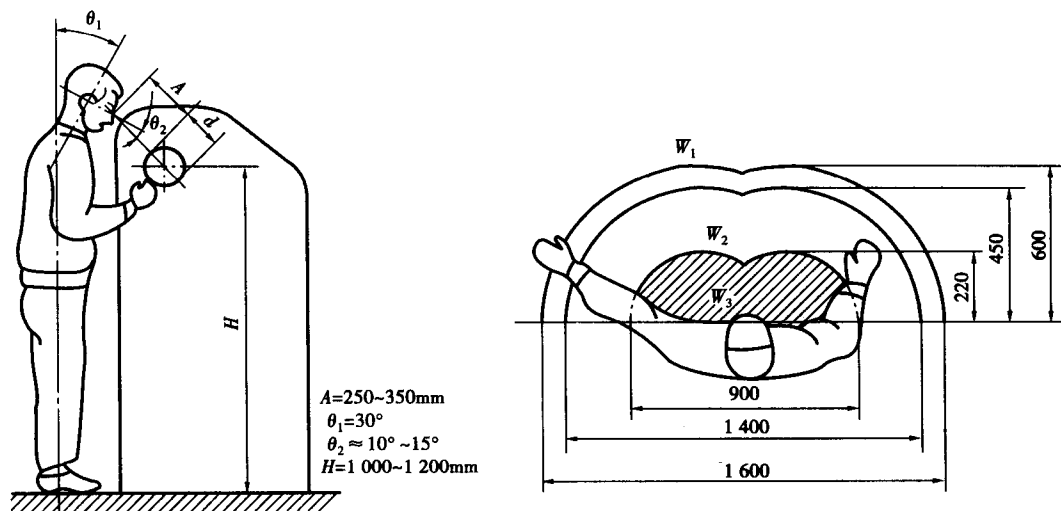


图 1-7 人体尺寸与操纵手柄位置的关系

A —视距; θ_1 、 θ_2 —视角; H —工件(刀具)中心线离地面高度; d —典型工件的直径;
 W_1 —双手所及的极限范围; W_2 —设置操纵手柄的一般范围; W_3 —设置操纵手柄的优先范围

第 3 节 机床主要技术参数的确定

机床的主要技术参数包括机床的主参数和基本参数,基本参数可包括尺寸参数、运动参数、动力参数 3 种。

一、主参数和尺寸参数

机床的主参数是最为重要的,它必须满足以下要求:

- (1) 直接反映出机床的加工能力和特性。
- (2) 能决定其他基本参数值的大小。
- (3) 作为机床设计和用户选用机床的主要依据。

对于通用机床(包括专门化机床),主参数通常都以机床的最大加工尺寸来表示,也是代表机床规格大小的一种参数,对各种类型机床,有关标准统一规定了主参数的内容。例如,摇臂钻床的主参数(最大钻孔直径)为:25、40、63、80、100、125 mm。普通车床是以床身上被加工工件的最大回转直径作为主参数。有的机床不使用最大加工尺寸表示,可以用其他物理量表示,例如,拉床用额定拉力来表示。为了更完整地表示机床的工作能力和加工范围,在主参数后面标出另一参数值,称为第二主参数。如最大工件长度、最大跨度、主轴数和最大加工模数等。

专用机床的主参数,一般以与通用机床相对应的主参数表示。

尺寸参数用来表示机床工作范围的主要尺寸和与工、夹、量具的标准化、机床结构有关的

主要尺寸。因此,机床的主参数和第二主参数也是尺寸参数的一种。与工件有关的参数,如普通车床最大加工工件长度、刀架上最大加工直径等;与工、夹、量具有关的参数,如普通车床的主轴锥孔尺寸;与机床结构有关的参数,如床身宽度尺寸等。这些参数与主参数有一定的关系,因此大多是根据主参数来决定的。但是由于机床的使用情况复杂,影响这些参数的因素很多,如刚度、强度、被加工工件的尺寸等,所以一般采用统计法来决定。具体进行这项工作时,可根据被加工零件的尺寸,参考现有同类型的机床或根据系列设计规定的各项数值来确定。

二、运动参数

运动参数是指机床执行件(如主轴、工作台、刀架)运动的速度。即主轴的最高转速、最低转速、主轴转速数列、进给量最大值和最小值、进给量数列等。

(一)主运动参数

主运动为回转运动的机床,主运动参数是主轴转速 n (单位 r/min):

$$n = \frac{1\,000v}{\pi d} \quad (1-1)$$

式中 v ——切削速度,单位为 m/min ;

d ——工件(或刀具)直径,单位为 mm 。

主运动为往复直线运动的机床,如刨床、插床等,主运动参数是刀具或工件的每分钟往复次数(次/分)。

对于专用机床,因为它是用来完成特定工序的,可以根据特定工序实际使用的切削速度和工件(或刀具)的直径确定主轴转速,而且大多数情况只需一种速度。

对于通用机床,为了适应各种不同加工情况,主轴需要进行变速,因而必须确定主轴的变速范围,最高与最低转速,无级或有级变速。

1. 主运动的速度范围

$$\left. \begin{aligned} n_{\min} &= \frac{1\,000v_{\min}}{\pi d_{\max}} \\ n_{\max} &= \frac{1\,000v_{\max}}{\pi d_{\min}} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

变速范围 R_n :

$$R_n = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-3)$$

通用机床由于切削速度、工件(或刀具)直径的变化繁多,在确定切削速度时,应考虑到多种工艺需要。切削速度与刀具材料、工件材料、进给量和切削深度有关,其中主要是工件材料和刀具材料。

选择 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 时,是根据机床上几种典型加工情况来考虑的。例如,车床最高切削速度是在用硬质合金刀具半精车钢件时,最低切削速度是在用高速钢刀具车螺纹时,可以此作为选择 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 的典型加工情况。

$d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 也不是指机床上可能加工的最小直径和最大直径,而是根据典型加工情况决定, $d_{\min}$ 是指在典型加工实际使用 $v_{\max}$ 时经常加工工件直径 d 值的较小值。同样,对于 $d_{\max}$ 是指在典型加工实际使用 $v_{\min}$ 时经常加工工件直径 d 值的较大值。

例如, $\phi 400$ mm 的中型普通车床用硬质合金车刀半精车钢料时合理的最高切削速度 $v_{\max}$ 取 200 m/min, 这时加工轴类工件最小直径 $d_{\min}$ 取 50 mm (主要考虑工件变形)。精加工丝杆螺纹的合理切削速度, 一般取 $v_{\min} = 1.5$ m/min, 加工丝杆最大直径 $d_{\max}$ 取 40 mm。

通常推荐的 $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 值, 对于普通车床, 如用 D 表示最大回转直径 (主参数), $d_{\max} = (0.5 \sim 0.6)D$, $d_{\min} = (0.2 \sim 0.25)d_{\max}$; 摇臂钻床, 如用 D 表示最大钻孔直径 (主参数), $d_{\max} = D$, $d_{\min} = (0.2 \sim 0.25)d_{\max}$ 。

2. 有级变速的转速数列

普通机床仍然广泛采用有级变速, 如机床的主传动系统的转速数列或双行程次数数列和一部分机床的进给量数列。多数是采用等比数列。

设某变速箱共有 Z 级转速, 分别为:

$$n_1, n_2, n_3, \dots, n_j, n_{j+1}, \dots, n_z$$

对于有级变速传动, 加工某一工件所需的最有利的切削速度为 v , 相应的转速为 n , 通常情况最有利的转速 n 介于两个相邻转速 n_j 和 n_{j+1} 之间, 即

$$n_j < n < n_{j+1}$$

如果采用较高的转速 n_{j+1} , 由于提高了切削速度, 刀具的耐用度将要降低。为了不降低刀具耐用度, 只能选用较低的转速 n_j , 这时转速的损失为 $(n - n_j)$, 如用相对转速损失表示:

$$A = \frac{n - n_j}{n}$$

最大的相对转速损失是当所需的最有利的转速 n 趋近于 n_{j+1} 时, 即

$$A_{\max} = \lim_{n \rightarrow n_{j+1}} \frac{n - n_j}{n} = \frac{n_{j+1} - n_j}{n_{j+1}} = 1 - \frac{n_j}{n_{j+1}} \quad (1-4)$$

从式(1-4)可以看到, 最大相对转速损失是取决于两相邻转速之比, 在其他条件 (加工直径、进给、切深) 不变的情况下, 相对转速的损失就是反映了生产率的损失。在转速数列中, 可以认为每个转速的使用机会均等, 因此, 应使任意相邻两转速间最大相对转速损失相等, 即

$$A_{\max} = 1 - \frac{n_j}{n_{j+1}} = \text{常数}$$

或

$$\frac{n_j}{n_{j+1}} = \text{常数} = \frac{1}{\varphi}$$

从这里可以看出, 任意相邻两转速之间的关系为:

$$n_{j+1} = n_j \varphi \quad (1-5)$$

即机床的转速是按等比数列 (几何级数) 分级。其公比为 φ , 各级转速:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_{\min} \\ n_2 &= n_1 \varphi \\ n_3 &= n_2 \varphi = n_1 \varphi^2 \\ &\vdots \\ n_z &= n_{z-1} \varphi = n_1 \varphi^{z-1} = n_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

最大相对转速损失率为

$$A_{\max} = \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) \times 100\% = \frac{\varphi - 1}{\varphi} \times 100\% \quad (1-7)$$