

机床数控化改造技术及实例

JICHUANG SHUKONGHUA GAIZAO JISHU JI SHILI

■ 吴孜越 主 编 ■ 张 波 副主编

JICHUANG SHUKONGHUA
GAIZAO JISHU JI SHILI

非
外
借



化学工业出版社

机床数控化改造技术及实例

吴孜越 主 编
张 波 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要包括三大部分：机械设计、电控设计、改造案例。具体内容有：绪论；数控机床进给传动系统的设计，包括进给传动系统的负载计算、导轨的设计与选型、滚珠丝杠螺母副的选型与计算、进给传动系统的刚度计算与误差分析、驱动电动机的选型与计算、进给传动系统动态特性分析、驱动电动机与滚珠丝杠的连接等；数控机床控制系统的设计包括国内外伺服系统的设计及应用设计、接线等实用技术、国内外控制系统介绍、控制方案的分析及确定、控制系统的选择、PLC 控制系统介绍及接线、数控系统的接线调试、整机的电控设计举例等；数控机床进给传动系统设计实例以车床、铣床、齿轮加工机床为例，包括立式铣床数控化改造设计、普通机床数控化改造设计、滚齿机数控化改造设计等。

本书可作为高等院校机械类专业数控技术课程设计指导用书，也可作为其他类别学校及其他专业学生的学习指导用书，更可作为从事数控机床设计、普通机床数控化改造、自动化装备及自动化生产线设计等工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

机床数控化改造技术及实例/吴孜越主编. —北京：
化学工业出版社，2018.9
ISBN 978-7-122-32540-2

I. ①机… II. ①吴… III. ①数控机床-技术改造
IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 145364 号

责任编辑：高 钰	文字编辑：陈 喆
责任校对：秦 姣	装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：中煤（北京）印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 256 千字 2018 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

前言

当今社会对人才技能的需求越来越高，国家支持高校积极开展双创活动，鼓励大学生不但要学好理论知识，更要注重动手能力和实践能力的培养。因此，面对工科专业的大学生，在培养过程中必须加强实践环节训练，要有意识地把学生置于工程背景之中，引导工程概念的建立，强化工程意识培养，提升学生的动手能力，使其具备工程管理、工程实践、工程应用的能力，以提高学生的就业水平和就业率，因此教学过程中做好实践环节的培养尤为重要。自动化装备及自动化生产线的应用越来越广，高等院校机械类专业增强数控化改造的技能训练，显得尤为重要和迫切。

本书立足于学生实践能力的培养和工程人员的技术应用，对于多种类型机床的数控化改造进行了较全面的阐述，除了要求使用者能够进行工艺分析、机械结构方案的确定、伺服系统的选择计算等，还要求使用者了解国产控制系统的发展，学会不同类型控制系统的选择及使用，掌握数控机床的机械设计、电控设计，动手进行数控系统与伺服系统的接线调试。本书将工程应用贯穿全书，可作为自动化设计应用技术的指导书，也可作为从事数控机床设计、普通机床改造、自动化应用技术的参考书。

本书的主要内容包括三大部分：机械设计、电控设计和改造案例。

本书紧密结合生产实际，将机械与电子技术有机结合，并附有生产中常用的各类图表，帮助读者掌握改造的基本方法和步骤，完成通用装备的数控化改造。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取，或登录 www.cipedu.com.cn 免费下载。

参加本书编写的有：吴孜越、张波、张书涛、王笑一、胡东方、杨丙乾、曹慧敏等。同时还有多家优秀企业的专业技术人员参与编写，其中有洛阳汇翔精机有限公司的刘利粉，欧辰自动化有限公司的李新星，固高科技有限公司的闫隆、都兴兴等。绪论由胡东方编写；第 1 章由吴孜越编写；第 2 章由张波编写；第 3 章 3.1 节由王笑一编写；3.2~3.4 节由吴孜越编写；第 4 章 4.1 节由张波、吴孜越编写；4.2 节由张书涛编写；附录 A 由张书涛编写；附录 B 由刘利粉、李新星、闫隆、都兴兴整理；部分资料由李新星、刘利粉、闫隆、都兴兴提供，李新星、刘利粉对第 3 章的编写给予了很大的支持和帮助，在此深表感谢，插图及公式等由李红博、端伟林、瞿天赐、蒙祥锦、潘安邦、陈孟会、李先锋、张宁等同学完成，电控图由尚金旺、刘嘉敏、李明明、李恒、陈凯阳、周洛锋、张权等完成，全书由吴孜越担任主编，张波担任副主编，吴孜越、张波完成了全书的统稿工作。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者
2018 年 5 月

目录

第1章 绪论

1

第2章 数控机床进给传动系统的设计

5

2.1 进给传动系统的负载计算	5
2.1.1 主切削力及其切削分力的计算	5
2.1.2 摩擦力的计算	6
2.2 导轨	8
2.2.1 贴塑导轨	8
2.2.2 滑动导轨安装和维护	8
2.3 滚珠丝杠螺母传动	10
2.3.1 概述	10
2.3.2 滚珠丝杠螺母副的选型与计算	12
2.3.3 滚珠丝杠螺母副的承载能力校核	24
2.4 进给传动系统的刚度计算	26
2.4.1 进给传动系统的综合拉压刚度的计算	26
2.4.2 进给传动系统的最大、最小综合拉压刚度的计算	28
2.4.3 滚珠丝杠螺母副的扭转刚度的计算	29
2.5 进给传动系统的误差分析	29
2.6 驱动电机的选型与计算	31
2.6.1 折算到电动机轴上的负载力矩	31
2.6.2 折算到电动机轴上的加速力矩	31
2.6.3 折算到电动机轴上的负载惯量	32
2.6.4 电动机的选型	33
2.7 驱动电动机与滚珠丝杠的连接	37
2.7.1 联轴器	37
2.7.2 齿轮传动副	40
2.7.3 同步带	43

第3章 数控机床控制系统的设计

53

3.1 机床数控系统的组成方案	53
3.2 伺服驱动系统	56
3.2.1 驱动系统简介	56

3.2.2	步进电机驱动系统	57
3.2.3	交流伺服电机驱动系统	59
3.3	运动控制系统应用	65
3.3.1	SINUMERIK 828D 数控系统	65
3.3.2	新代 SYNTEC 数控系统	67
3.3.3	固高 GTC-NC600 系列运动控制器	69
3.3.4	欧辰 IDEABOX3 控制系统及其应用	71
3.4	机床电气的设计	80
3.4.1	电气设计要求分析	80
3.4.2	CA6140 车床数控化电控设计	83
3.4.3	X52K 数控铣床控制电路	93
3.4.4	Y3150E 滚齿机数控化电控设计	98
第 4 章 数控机床进给传动系统设计实例		104
4.1	立式（卧式）数控铣床工作台（X 轴）设计	104
4.2	数控滚齿机的工作台设计	113
附录		124
附录 A	附表	124
附录 B	附图	145
参考文献		160

第①章

绪论

数控机床的拥有量和技术水平的高低是一个国家现代制造业实力的重要标志，当前我国正处于从机械制造大国向机械制造强国转变的关键时期，数控机床在汽车工业、航空航天工业、模具等行业已广泛应用。它提高了零部件的性能水平、加工质量和生产效率，为数控机床的使用者创造了巨大的效益。

目前机床数控化改造的市场在我国还有很大的发展空间，现在我国机床数控化率不到3%。用普通机床加工出来的产品普遍存在质量差、品种少、档次低、成本高、供货期长，从而在国际、国内市场上缺乏竞争力，直接影响一个企业的产品、市场、效益，影响企业的生存和发展，所以必须大力提高机床的数控化率。本书以机床的数控改造为例，介绍了机床数控改造的方法，包括其结构的改造设计，性能与精度的选择以及最后改造方案的确定。

(1) 机床数控改造的意义

① 节省资金：机床的数控改造同购置新机床相比，一般可节省60%左右的费用，大型及特殊设备尤为明显。一般大型机床改造只需花费新机床购置费的1/3。即使将原机床的结构进行彻底改造升级，也只需花费购买新机床60%的费用，并可以利用现有地基。

② 性能稳定可靠：所改造的床身、立柱等基础件都是重而坚固的铸造构件，而不是那种焊接构件，改造后的机床性能高、质量好，但原来机械结构限制机床不宜做突破性的改造。

③ 提高生产效率：机床经数控改造后可实现加工的自动化效率比传统机床提高3~5倍。对复杂零件而言，难度越高，功效提高得越多，而且可以不用或少用工装。不仅节约了费用，而且可以缩短生产准备周期。

(2) 国内外数控改造研究现状

日本、美欧等一些发达国家对数控改造非常重视，一些制造企业为提升企业核心竞争力，想尽办法把普通机床改造成数控机床，甚至有些公司将普通机床数控化改造发展成一项产业，如德国的 Schioess 公司、美国的 US 设备公司，这些公司都是世界知名普通机床数控化改造公司。

受到当时制造技术限制，我国机械制造业普通机床在机械制造加工业中有约80%设备比例，数控化程度很低。由于当时数控化改造技术相对落后，我国数控化机床改造技术主要应用在国防军用机床设备，从20世纪80年代末起，一大批精通数控机床技术专家对普通机床数控化改造技术进行大量卓有成效的开发研究，取得了相当显著的成就。

(3) 普通机床数控化改造的必要性

① 普通机床在数字环境下存在不足：普通机床受技术限制，在加工精度、加工质量稳定性、可靠性、生产效率、改善劳动条件、生产管理现代化方面与数控机床相比相差甚远。普通机床工艺简单、功能单一，只能进行单一工序操作，而对于较多工序零部件、复杂零部件生产要求无法完成。

加工时间以及辅助时间多，因而影响效率，普通机床加工精度低、自动化程度低，很多操作工序依赖工人操作，劳动强度高，产品质量一致性差，常常无法保证加工零件高质量。

② 普通机床数控化改造后所具有的优点：同购置新机床相比，投资额少、交货期短，一般可以节省 60%~80% 的费用，改造费用低，特别是大型、特殊机床尤其明显。可充分利用现有的条件，采用最新的控制技术，根据技术革新的发展速度，及时地提高生产设备的自动化水平和效率，提高设备质量和档次。

柔性较好，数控机床上加工零件，并不需要对机床经常调整。加工零件质量稳定、一致性好，在一台数控机床上加工一批零件使用同样的加工程序和刀具，加工条件完全一致，走刀轨迹完全相同。生产效率高，数控机床与普通机床相比，与加工中心的刀库配合零件的辅助时间和加工时间可有效地减少，数控机床允许机床进行较大切削量的强力切削，进给量的范围扩大。与加工中心的刀库配合使用，可实现在一台机床上进行多道工序的连续加工，工序间周转时间大大减少，提高了生产率。

数控机床的加工精度一般可达 0.05~0.1mm，数控机床丝杆螺距平均误差与传动链的进给反向间隙可由数控装置进行曲补偿，数控机床是通过数字信号形式来实现控制其加工精度，机床每移动一个脉冲当量，需由数控装置输出一脉冲信号，因此，数控机床定位精度比较高。

利用现代化生产管理，在数控机床进行零件加工时，可对所使用的夹具、刀具进行规范化，并精确估计该零件辅助时间、加工时间，实现现代化管理。数控机床与普通机床相比，改善了劳动条件，加工前调整好数控机床，输入程序并启动，数控机床自动连续地对零件进行加工，直至零件加工完成。

(4) 数字环境下数控化改造措施

① 充分了解被改造机床：数控机床一般是由测量系统、伺服系统和数控系统组成。普通机床数控化改造究竟是要局部改造还是全部改造则要由普通机床改造费用和原有的参数性能决定。在数控化改造过程中，首先要明白现有需改造机床的功能、参数、机械传动精度、运行状况，再预先估计普通机床改造后的性能是否能满足要求，具体要明确如下事项。

a. 确定需改造普通机床的型号。

b. 对需改造的普通机床机构参数、性能参数要把握准确。

c. 普通机床数控化改造，应慎重选择控制轴数目，因为轴数目直接决定选择哪种数控系统与与之匹配。

d. 普通机床数控化改造前，必须清楚原机床核心功能部件，如变速箱、刀架等，这样才能保证数控化改造后的机床能够生产加工复杂零件。

e. 为了保证普通机床数控化改造后达到精度要求以及功能预期，对数控化改造后的数控机床所具有参数性能及机械结构参数要有足够的估计。

f. 普通机床数控化改造前，需了解机床的一些辅助安全性能参数，以保证机床数控改造后操作人员的人身安全。

g. 普通机床数控化改造过程中, 还要考虑现有的电气控制系统是否能够满足改造后数控机床的要求, 如果不能都达到要求, 就需通过可编程逻辑控制器来进行改造。

② 基于数字环境下数控系统选型: 基于数字环境下普通机床数控化改造关键是数控系统选型。选型时依据需改造机床的机构参数、性能参数选择合适的数控系统与之匹配, 才能保证普通机床在改造后按照事先默认好的功能要求进行零件加工, 否则无法达到功能预期。

市场上功能不一、类型不同的数控系统纷繁众多, 因而在基于数字环境下选择数控系统时, 应充分考虑改造前普通机床的功能及特性, 数控化改造后所要达到的精度要求, 功能预期以及预期改造费用。而且在选择数控系统时, 要特别注意改造时所选数控系统的厂家能提供的技术支持。

不同数控系统对需改造的机床的机械结构、驱动装置都有不同的具体要求, 不是全部机床都能进行数控化改造, 更不是任何需数控化改造机床与所有不同数控系统都匹配, 必须选择合适的数控系统与之匹配, 才能达到数控化改造目的。控制方式有以下3种类型, 改造时, 应根据具体情况进行选择。

a. 步进电动机拖动的开环系统。伺服驱动装置主要是步进电动机、功率步进电动机、电液脉冲电动机等。由数控系统送出的进给指令脉冲, 经驱动电路控制和功率放大后, 使步进电动机转动, 通过齿轮副与滚珠丝杠副驱动执行部件。只要控制指令脉冲的数量、频率以及通电顺序, 便可控制执行部件运动的位移量、速度和运动方向。这种系统不需要将所测得的实际位置和速度反馈到输入端, 故称为开环系统, 该系统的位移精度主要决定于步进电动机的角位移精度、齿轮丝杠等传动元件的节距精度、所以系统的位移精度较低。开环系统结构简单, 调试维修方便, 工作可靠, 成本低, 易改装成功。

b. 异步电动机或直流电动机拖动, 光栅测量反馈的闭环数控系统。由光栅、感应同步器等位置检测装置测得的实际位置反馈信号, 随时与给定值进行比较, 将两者的差值放大和变换, 驱动执行机构, 以给定的速度向着消除偏差的方向运动, 直到给定位置与反馈的实际位置的差值等于零为止。闭环进给系统在结构上比开环进给系统复杂, 成本也高, 对环境室温要求严格。设计和调试都比开环系统难, 但是可以获得比开环进给系统更高的精度、更快的速度, 驱动功率更大的特性指标。根据产品技术要求, 决定是否采用这种系统。

c. 交、直流伺服电动机拖动, 编码器反馈的半闭环数控系统。检测元件安装在中间传动件上, 间接测量执行部件的位置。它只能补偿系统环路内部部分元件的误差, 因此, 它的精度比闭环系统的精度低, 但是它的结构与调试都较闭环系统简单。在将角位移检测元件与速度检测元件和伺服电动机做成一个整体时, 则无须考虑位置检测装置的安装问题。当前生产数控系统的公司比较多, 国外著名的公司有德国 SIEMENS 公司、日本 FANUC 公司; 国内公司有中国珠峰公司、北京航天机床数控系统集团公司、华中数控公司和沈阳高档数控国家工程研究中心。选择数控系统时, 主要是根据数控改造后机床要达到的各种精度、驱动电动机的功率和用户的要求。

③ 基于数字环境下的机械结构设计和改造: 普通机床数控化改造关键是数控系统选型, 但是, 为了使数控化改造机床达到加工精度、功能参数、电气供给系统以及机床安全操作规程等要求, 在改造过程中, 对机床机械结构部分不得不重新设计、改造。首先, 基于数字环境下的机械结构设计要求, 必须要对机床传动轴等机械部件进行受力分析, 以确保数控机床能进行较大切削量的强力切削, 进行受力分析时依据机床行业标准及国家标准执行。

根据受力分析、计算结果, 确定为了保证数控化改造机床达到加工精度、功能参数、电

气供给系统以及机床安全操作等要求所需要的主要受力机械零件的大小尺寸以及供给动力装置,数控化改造机床在对机械结构进行设计和改造时,可参照改造成功案例,查阅相关技术文件资料,到改造成功企业现场实地调研。

一台新的数控机床,在设计上要达到:高的静动态刚度;运动副之间的摩擦系数小,传动无间隙;功率大;便于操作和维修。机床数控改造时应尽量达到上述要求。不能认为将数控装置与普通机床连接在一起就达到了数控机床的要求,还应对主要部件进行相应的改造,使其达到一定的设计要求,才能获得预期的改造目的。

a. 滑动导轨副。对数控机床来说,导轨除应具有普通车床导向精度和工艺性外,还要有良好的耐摩擦、磨损特性,并减少因摩擦阻力而致死区。同时要有足够的刚度,以减少导轨变形对加工精度的影响,要有合理的导轨防护和润滑。

b. 齿轮副。一般机床的齿轮主要集中在主轴箱和变速箱中。为了保证传动精度,数控机床上使用的齿轮精度等级都比普通机床高。在结构上要能达到无间隙传动,因而改造时,机床主要齿轮必须满足数控机床的要求,以保证机床加工精度。

c. 滑动丝杠与滚珠丝杠。丝杠传动直接关系到传动链精度。丝杠的选用主要取决于加工件的精度要求和拖动扭矩要求。被加工件精度要求不高时可采用滑动丝杠,但应检查原丝杠磨损情况,如螺距误差及螺距累计误差以及相配螺母间隙。一般情况下,滑动丝杠应不低于6级,螺母间隙过大则更换螺母。采用滑动丝杠相对滚珠丝杠价格较低,但难以满足精度较高的零件加工。

滚珠丝杠摩擦损失小,效率高,其传动效率可在90%以上。精度高,寿命长;启动力矩和运动时力矩相接近,可以降低电动机启动力矩,因此可满足较高精度零件加工要求。

d. 安全防护。高效必须以安全为前提。在机床改造中要根据实际情况采取相应的措施,切不可忽视。滚珠丝杠副是精密元件,工作时要严防灰尘特别是切屑及硬砂粒进入滚道。在纵向丝杠上也可加整体铁板防护罩。大拖板与滑动导轨接触的两端面要密封好,绝对防止硬质颗粒状的异物进入滑动面损伤导轨。

(5) 机床数控改造主要步骤

① 改造方案的确定:改造的可行性分析通过以后,就可以针对某台或某几台机床的现状确定改造方案,包括机械修理与电气改造相结合。一般来说,需进行电气改造的机床,都需进行机械修理。既要确定修理的要求、范围、内容,也要确定因电气改造而需进行机械结构改造的要求、内容。还要确定电气改造与机械修理、改造之间的交错时间要求。机械性能的完好是电气改造成功的基础。

② 先易后难、先局部后全局:确定改造步骤时,应把整个电气部分改造先分成若干个子系统进行,如数控系统、测量系统、主轴、进给系统、面板控制与强电部分等,待各系统基本成形后再互联完成全系统工作。这样可使改造工作减少遗漏和差错。在每个子系统工作中,应先做技术性较低的、工作量较大的工作,然后做技术性高的、要求精细的工作,使人的注意力能集中到关键地方。

③ 根据使用条件选择系统:针对某台或某几台机床,确定它的环境、温度、湿度、灰尘、电源、光线,甚至有无鼠害等外界使用条件,这对选择电气系统的防护性能、抗干扰性能、自冷却性能、空气过滤性能等可提供正确的依据,使改造后的电气系统有了可靠的使用保证。当然,电气系统的选择必须考虑成熟产品,性能合理、实用,有备件及维修支持,功能满足当前和今后若干年内的发展要求等。

第②章

数控机床进给传动系统的设计

2.1 进给传动系统的负载计算

在机床的数控化改造中,进给传动系统的负载主要由轴向负载构成,主要有下述两个来源:一方面是切削过程产生的切削力;另一方面是夹具、工件、工作台及拖板等部件的重力引起的摩擦力。

切削力和摩擦力在不同机床的改造过程中,有着不同的计算方法。后者在实际计算中估算如下:带有夹具、工件的工作台,其质量统一按照工作台体积的20%计算;腔体类部件,其质量也按照体积的20%进行估算即可。另外,值得提醒读者的是,在计算不同进给方向的摩擦力时,要弄清楚该方向的摩擦力来源及其方向与丝杠轴轴向之间的关系。具体的计算方法如下。

2.1.1 主切削力及其切削分力的计算

(1) 车削

1) 车削抗力分析

车削抗力是车削作用在车刀上的力,车削外圆时的切削抗力有 F_X 、 F_Y 、 F_Z 。主切削力 F_Z 与切削速度 v 的方向一致,垂直向下,是计算机床主电动机切削功率的主要依据。车削抗力 F_Y 与机床纵向进给方向垂直,影响加工精度或加工表面质量。车削抗力 F_X 与机床纵向进给方向平行,但是方向相反,是机床纵向进给时该坐标方向轴向负载力的组成部分。

2) 托板工作载荷的计算

由于 F_X 、 F_Y 所消耗的切削功率可以忽视不计,因此,机床的切削功率为:

$$P_m = F_Z v \times 10^{-3} \quad (2-1)$$

式中 P_m ——机床的切削功率, kW;

F_Z ——主切削力, N;

v ——机床主轴的计算转速。

考虑到机床的传动效率,机床的主电动机功率为:

$$P_E = \frac{P_m}{\eta_m} = \frac{F_Z v \times 10^{-3}}{\eta_m} \quad (2-2)$$

式中 P_E ——主电动机功率, kW;

η_m ——机床主传动系统的传动效率, 一般取 $\eta_m=0.8$ 。

$$F_Z = \frac{P_E \eta_m}{v} \times 10^{-3} \quad (2-3)$$

车削抗力 F_X 与 F_Y 可以按下列比例分别求出。

$$F_Z : F_X : F_Y = 1 : 0.25 : 0.4 \quad (2-4)$$

因为车刀装夹在托板上的刀架内, 车刀受到的车削抗力将传递到进给托板和导轨上。车削时作用在进给托板上的载荷 F_1 、 F_v 及 F_c 与车刀所受的车削抗力 F_X 与 F_Y 、 F_Z 有如下对应关系:

$$\begin{cases} F_1 = F_X \\ F_v = F_Z \\ F_c = F_Y \end{cases} \quad (2-5)$$

式中 F_1 ——纵向进给方向的载荷, N;

F_v ——垂直进给方向的载荷, N;

F_c ——横向进给方向的载荷, N。

(2) 铣削

1) 铣削抗力分析

铣削运动的特征是: 主运动为铣刀绕自身轴线高速旋转, 进给运动为工作台带动工件在垂直于铣刀方向缓慢进给。铣刀的类型很多, 大致可以分为圆柱铣刀和端铣刀两种。铣刀的切削部分可以看作是车刀刀头的演化, 铣刀的每一个刀齿可以看作一把车刀。不同点是铣刀回转, 刀齿较多。

切向铣削力 F_Z 是沿着铣刀运动方向的分力, 它消耗铣床主电动机功率最多。因此, 切向铣削力 F_Z 可按照铣削功率 P_m 或主电动机功率 P_E 算出。

$$F_Z = \frac{P_m}{v} \times 10^3 \quad (2-6)$$

或

$$F_Z = \frac{P_E \eta_m}{v} \times 10^3 \quad (2-7)$$

式中 v ——机床主轴的计算转速;

η_m ——机床主传动系统的传动效率, 一般取 $\eta_m=0.8$ 。

2) 进给工作台工作载荷的计算

作用在进给工作台上的合力 F' 与铣刀刀齿的铣削抗力 F 的合力大小相同、方向相反。合力 F' 就是设计和校核工作台进给系统时要考虑的工作载荷, 它可以沿着铣床工作台运动方向分解为 3 个力: 工作台纵向进给方向载荷 F_1 、工作台横向进给方向载荷 F_c 、工作台垂直进给方向载荷 F_v 。

进给工作台的工作载荷 F_1 、 F_c 、 F_v 与 F_Z 之间有一定的经验比值 (表 2-1)。因此计算出 F_Z 之后, 即可计算出进给工作台的工作载荷 F_1 、 F_c 和 F_v 。

2.1.2 摩擦力的计算

(1) 切削状态下导轨摩擦力 F_μ 的计算

① 导轨水平时:

$$F_{\mu}=\mu(W+f_g+F_v+F_c)$$
 (2-8)

式中 F_v, F_c ——主切削力的垂直切削分力和横向切削分力;
 W ——移动部件的全部重量;
 μ ——摩擦系数,对于贴塑导轨 $\mu=0.15$,对于滚动直线导轨 $\mu=0.01$;
 f_g ——镶条紧固力,其推荐值可查表 2-2。

表 2-1 工作台工作载荷与切向铣削力的经验比值

铣削条件	比值	对称端铣	不对称端铣床	
			逆铣	顺铣
端铣	F_1/F_Z	0.30~0.40	0.60~0.90	0.15~0.30
	F_c/F_Z	0.85~0.95	0.45~0.70	0.90~1.00
	F_v/F_Z	0.50~0.55	0.50~0.55	0.50~0.55
圆柱铣、立铣、盘铣和成形铣	F_1/F_Z	—	1.00~1.20	0.80~0.90
	F_c/F_Z	—	0.20~0.30	0.75~0.80
	F_v/F_Z	—	0.35~0.40	0.35~0.40

表 2-2 镶条紧固力推荐值

电动机功率/kW	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	18
镶条紧固力(贴塑滑动导轨)/N	500	800	1500	2000	2500	3000	3500
滚动直线导轨/N	25	40	75	100	125	150	175

② 导轨垂直时:

$$F_{\mu}=\mu(f_g+F_1+F_c)$$
 (2-9)

式中 F_1 ——主切削力的纵向切削分力。

(2) 不切削状态下导轨副摩擦力 $F_{\mu 0}$ 的计算

① 导轨水平时:

$$F_{\mu 0}=\mu(W+f_g)$$
 (2-10)

② 导轨垂直时:

$$F_{\mu 0}=\mu f_g$$
 (2-11)

(3) 滚珠丝杠螺母副轴向负载力的计算

1) 最大轴向负载力 F_{amax} 的计算

滚珠丝杠螺母副的最大轴向负载力发生在机床主电动机满功率运行的切削状态下。此时,最大轴向负载力可以用下式计算。

① 导轨水平时:

$$F_{amax}=F_1+\mu(W+f_g+F_v+F_c)$$
 (2-12)

② 导轨垂直时:

$$F_{amax}=F_v+\frac{1}{2}W+\mu(f_g+F_1+F_c)$$
 (2-13)

2) 最小轴向负载力 F_{amin} 的计算

滚珠丝杠螺母副的最小轴向负载力 F_{amin} 发生在机床空载运行时。此时,最小轴向负载力 F_{amin} 可以用下式计算。

① 导轨水平时:

$$F_{\text{amin}} = F_{\mu 0} = \mu (W + f_g) \quad (2-14)$$

② 导轨垂直时:

$$F_{\text{amin}} = \frac{1}{2}W + \mu f_g \quad (2-15)$$

2.2 导轨

导轨是两个相对运动部件接合面组成的滑动副，一般由机床的支承部件（床身、立柱、横梁）和执行部件（主轴箱、溜板箱、刀架）匹配而成。在支承部件上的导轨称为支承导轨或固定导轨，简称下导轨；在执行部件上的导轨称运动导轨或动导轨，简称上导轨。

导轨按摩擦性质可分为滑动导轨和滚动导轨。滑动导轨又细分为静压滑动导轨、动压滑动导轨和普通滑动导轨。普通滑动导轨为混合摩擦，导轨间有一定动压效应，但由于速度较低，油楔不能隔开导轨面，导轨面仍处于直接接触状态；机床中大多数导轨属于混合摩擦。滚动导轨在导轨面间装有滚动元件（绝大多数为钢球），因而是滚动摩擦，广泛应用于数控机床和精密、高精度机床中。在机床改造过程中，需要改造的机床导轨一般为普通滑动导轨，由于空间的限制和经济性因素不宜采用滚动导轨或者进行动静压导轨改造，贴塑成为普通机床数控化改造导轨减摩的优选方案。

2.2.1 贴塑导轨

贴塑导轨，是指床身仍是金属导轨，它只是在运动导轨面上贴一层或涂覆一层耐磨塑料制品。所以，贴塑导轨也称塑料导轨。

采用塑料导轨的主要目的在于以下几点。

① 克服金属滑动导轨摩擦因数大、磨损快、低速容易产生爬行和手动操作时手感重等缺点。

② 保护与其对磨的金属导轨面的精度和延长其使用寿命。塑料导轨一般用在机床滑动导轨副中较短的导轨面上，如工作台、溜板和滑座等运动部件的导轨、压板和镶条上。床身和底座上的长导轨，仍为金属（铸铁或淬火钢）导轨面。

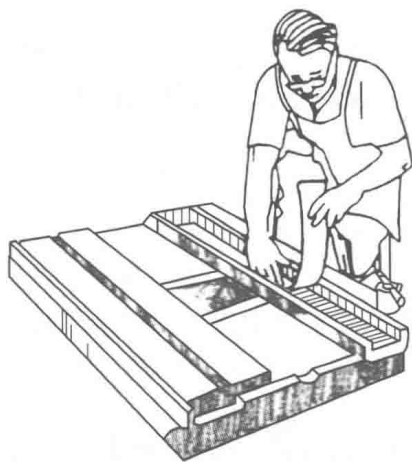


图 2-1 粘贴导轨软带示意图

最常用的塑料导轨制品为填充聚四氟乙烯导轨软带，是以聚四氟乙烯为基体，加入青铜粉、二硫化钼和石墨等填充剂混合烧结而成。它具有摩擦特性好、耐磨性好、减振性好等特点。实验和实践表明，聚四氟乙烯的摩擦因数比石墨和二硫化钼都低，在当今常用的固体耐磨材料中，是最低的。可以称为自润滑材料。这种独特的低摩擦行为，很适合做机床导轨材料，贴塑过程如图 2-1 所示。

2.2.2 滑动导轨安装和维护

(1) 导轨间隙调整

1) 辅助导轨副间隙调整

辅助导轨副用压板来调整间隙，压板用螺钉紧固在

运动部件上, 见图 2-2。图 2-2 (a) 通过精磨或刮削压板厚度调整间隙, 这种方法结构简单, 应用广泛。图 2-2 (b) 利用改变垫片层数和垫片厚度调整间隙, 垫片是许多薄钢片组成的。图 2-2 (c) 是通过压板与导轨间的平镶条调整间隙。

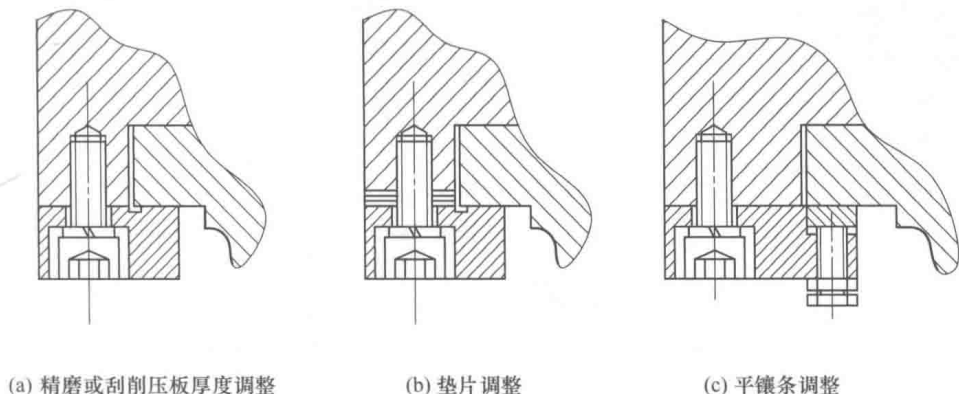


图 2-2 辅助导轨副的间隙调整方法

2) 矩形导轨和燕尾形导轨的间隙调整

矩形导轨和燕尾形导轨常用镶条来调整侧面间隙, 从提高刚度考虑, 镶条应放在不受力或受力较小的一侧。镶条分为平镶条和斜镶条两种。全长厚度相等, 横截面为平行四边形或矩形的镶条称为平镶条; 靠横向移动来调整导轨侧面间隙。全长厚度按 1 : (40~100) 的斜度变化的镶条称为斜镶条; 通过两斜面的相对纵向移动来调整导轨侧面间隙。

导轨副的平镶条及其调整方法见图 2-3, 图 2-3 (a) 用于矩形导轨, 图 2-3 (b)、(c) 用于燕尾形导轨。图 2-3 (c) 所示的导轨间隙调整有顺序要求, 必须在间隙调整完毕后, 才能拧紧紧固螺栓。平镶条易制造, 且调整方便; 但图 2-3 (a)、(b) 所示的平镶条较薄, 调整间隙的各螺钉单独调整, 调整力不均匀, 在调整螺钉与平镶条接触处存在变形, 故刚度较差。

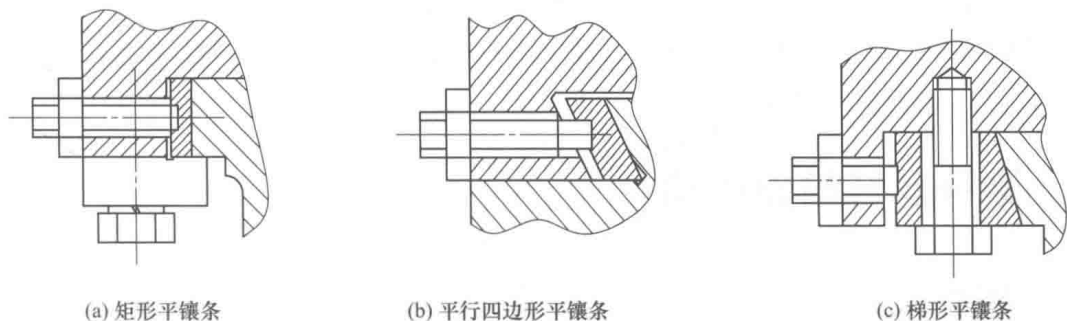


图 2-3 导轨副的平镶条及间隙调整方法

动导轨的一个导轨面在长度方向上 (移动方向) 做成斜面, 斜度与镶条的斜度相同, 动镶条调整导轨横向间隙。镶条配刮前应有一定的长度余量, 以减少刮削量或避免因刮削量不足而造成废品; 镶条平面与支承导轨面、镶条斜面与动导轨斜面配刮后, 截取长度余量, 固定在动导轨上, 如图 2-4 所示。图 2-4 (a) 所示的调整方法是用单螺钉推动镶条纵向移动, 沟槽在配刮后铣出, 结构简单、调整方便; 但螺钉凸肩和镶条沟槽间的间隙会引起镶条在运动中窜动。图 2-4 (b) 用双螺钉调整, 避免了镶条窜动, 性能较好。图 2-4 (c) 是将镶条沟槽变为圆孔, 将螺钉凸肩变为带圆柱销的调整套, 圆柱销与圆孔配作, 通过配合精度控制镶条的窜动。这种方法调整方便, 但纵向尺寸较长。

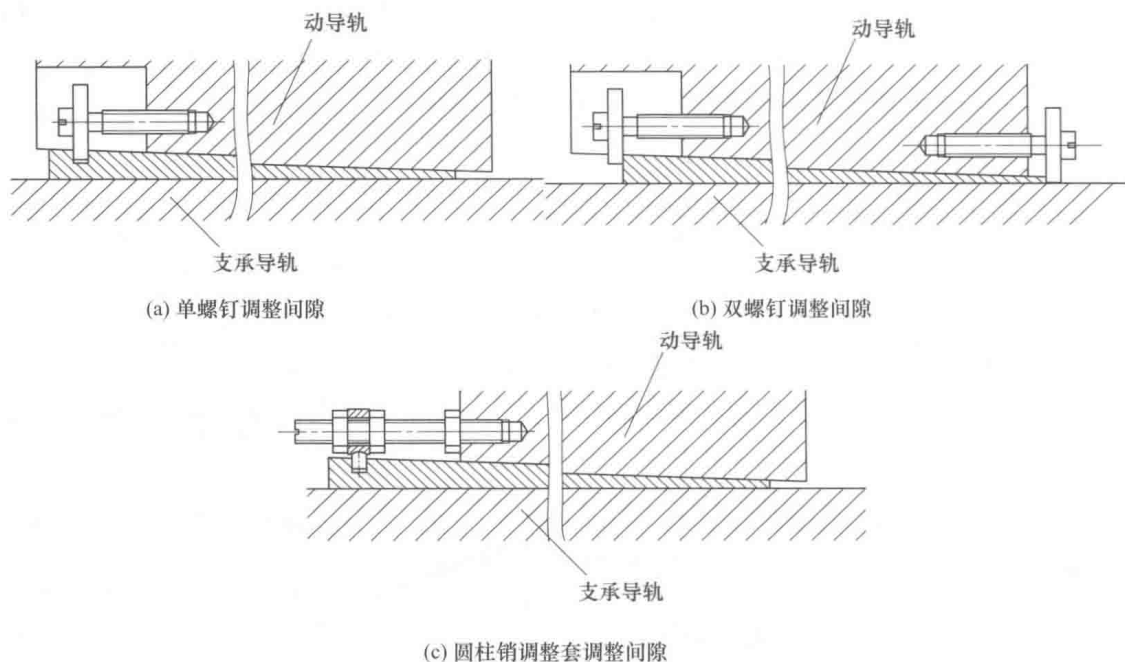


图 2-4 斜镶条的间隙调整

(2) 导轨的润滑

对导轨面进行润滑后,可以降低摩擦系数,减小磨损,并且可以防止导轨面锈蚀。因此,必须对导轨面进行润滑。导轨常用有润滑油和润滑脂,前者用于滑动导轨,而滚动导轨两者都能用。对贴塑导轨,常采用的润滑方式是油槽形式,为了把润滑油均匀地分布到导轨的全部工作表面,需在导轨面上开出油槽,油经运动导轨上的油孔进入油槽而达到均匀润滑的目的。

(3) 导轨的防护

为了防止切屑、磨料或冷却液散落在导轨面上引起磨损加快、擦伤和锈蚀,导轨面上应该有可靠的防护装置,采用的有刮板式、卷帘式和叠层式防护罩。这些装置结构简单,由专门厂家制造。

2.3 滚珠丝杠螺母传动

2.3.1 概述

滚珠丝杠螺母传动属于滚动螺旋传动。滚动螺旋传动的滚动体有球和滚子两大类。球又称滚珠。应用最广泛的是以球为滚动体的滚珠螺旋传动——滚珠丝杠副。

滚珠丝杠副作为精密、高效的传动元件在精密机床和数控机床中得到广泛应用,在机械工业、交通运输、航天航空、军工产品等各个领域应用得很普遍,可作为精密定位、自动控制、动力传递和运动转换。

(1) 滚珠丝杠螺母副的工作原理与特点

1) 滚珠丝杠螺母副的工作原理

滚珠螺旋传动亦称滚珠丝杠副,它是在丝杠和螺母滚道之间放入适量的滚珠,使螺纹间产生滚动摩擦取代滑动摩擦,从而提高传动效率和传动精度。丝杠和螺母转动时,带动滚珠

沿螺纹滚道滚动。螺母上装有反向器,滚珠通过此装置自动返回其入口,形成循环通道。为使滚珠与滚道之间形成无间隙甚至过盈配合,可设置预紧装置。为延长工作寿命,可设置润滑件和密封件。

过去采用滑动丝杠副或液压传动的装置均可改用滚珠丝杠副以获得精确、高效、灵敏、可靠、耐用等效果。在特殊环境或特殊要求下,如在高温、低温、高压、真空、强磁场、强辐射、无润滑、腐蚀介质中工作以及要求可逆运动、同步运动、瞬时高低速转换等场合,滚珠丝杠副均具有良好的传动性能。因此,滚珠丝杠副已成为应用非常广泛的传动元件,可用于精密定位、自动控制、动力传递和运动转换等场合,广泛应用于机床工业、航空、航天、军工产品等各个领域,并已作为配套元件通常由专业厂家生产和供应。

2) 滚珠丝杠螺母副的特点

① 传动效率高。

一般滚珠丝杠副的传动效率达85%~98%,为滑动丝杠副的2~4倍。这一特性对机械小型化、减小启动后的颤抖和滞后时间以及节约能源等方面,都具有重要意义。

② 运动平稳。

滚珠丝杠副在工作过程中摩擦阻力小,灵敏度高,而且摩擦因数几乎与运动速度无关,启动摩擦力矩与运动时的摩擦力矩差别很小。所以滚珠丝杠副运动平稳,启动时无颤动,低速时无爬行。

③ 传动可逆和不自锁性。

与滑动丝杠副相比,滚动丝杠副突出的特点是具有运动的可逆性。正传动与逆传动的效率几乎同样达到98%。但没有像滑动丝杠副那样运动具有自锁性。因此,在某些机构中,特别是垂直升降机构使用滚珠丝杠副时,必须附加自锁或制动装置。

④ 能够预紧。

通过施加预紧力可产生过盈,消除滚珠丝杠副的间隙,提高轴向接触刚度,而摩擦力矩却增加不大。

⑤ 定位精度和重复定位精度高。

由于滚珠丝杠副在工作过程中摩擦小、温升小、无爬行、无间隙,并可消除轴向间隙和对丝杠进行预拉伸以补偿热膨胀,因此能获得较高的定位精度和重复定位精度。

⑥ 同步性好。

用几套相同的滚珠丝杠副同时驱动相同的部件或装置时,由于反应灵敏,无阻滞,无滑移,其启动的同时性、运行中的速度和位移等,都具有准确的一致性,即同步性好。

⑦ 使用寿命长。

滚珠丝杠螺母副的摩擦表面为高硬度(58~62HRC)、高精度,具有较长的工作寿命和精度保持性。一般来说,滚珠丝杠副的使用寿命比普通滑动丝杠副高4~10倍。

⑧ 使用可靠、润滑简单、维修方便。

与液压传动相比,滚珠丝杠副在正常使用条件下故障率低,维修保养也极为方便,通常只需要进行一般的润滑与防尘即可。

⑨ 经济性差、成本高。

由于结构工艺复杂,故制造正本较高。

(2) 滚珠丝杠螺母副的循环方式

按滚珠循环过程中与丝杠表面的接触情况,可分为内循环和外循环两种。