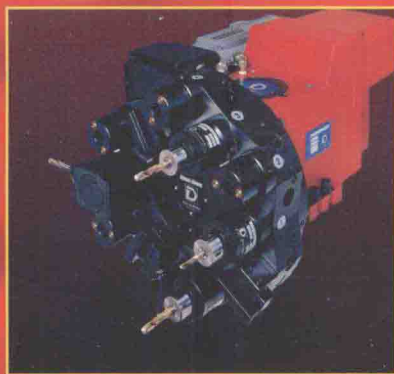




“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

数控刀架的典型结构 及可靠性设计

· 张义民 闫 明 编著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

数控刀架的典型结构 及可靠性设计

张义民 闫 明 编著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了数控刀架典型结构及可靠性设计的理论与方法。内容包括:数控机床的基础知识,动力刀架的基本理论,数控刀架核心零件和数控刀架典型结构的设计与分析及其在机床上的应用,数控刀架的精度检测技术,数控刀架部件的可靠性设计方法,数控刀架的可靠性试验方法,数控刀架伺服电机的性能试验方法,数控刀架转位电机的可靠性试验方法,实验数据统计和分析的基本方法等。本书内容丰富,概念清晰,阐述详尽,系统性强,为读者展现了多种数控刀架典型结构及可靠性设计方法,有助于开阔读者的视野。

本书可供从事数控刀架结构设计分析、数控刀架可靠性分析和可靠性试验研究等工作的科研技术人员使用,同时也可作为高等院校从事数控机床动力伺服刀架设计教学、科研工作的教师以及研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控刀架的典型结构及可靠性设计/张义民,闫明编著. —北京:科学出版社,2014.6

(“十二五”国家重点图书出版规划项目;21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-040888-4

I. ①数… II. ①张…②闫… III. ①数控机床-刀架-结构设计
IV. ①TG502.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第119599号

责任编辑:陈 婕 唐保军 / 责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:220 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 丁 汉(上海交通大学/华中科技大学) | 张宪民(华南理工大学) |
| 王 煜(香港中文大学) | 周仲荣(西南交通大学) |
| 王田苗(北京航空航天大学) | 赵淳生(南京航空航天大学) |
| 王立鼎(大连理工大学) | 查建中(北京交通大学) |
| 王国彪(国家自然科学基金委员会) | 柳百成(清华大学) |
| 王越超(中科院沈阳自动化所) | 钟志华(湖南大学) |
| 冯 刚(香港城市大学) | 顾佩华(汕头大学) |
| 冯培恩(浙江大学) | 徐滨士(解放军装甲兵工程学院) |
| 任露泉(吉林大学) | 黄 田(天津大学) |
| 刘洪海(朴次茅斯大学) | 黄 真(燕山大学) |
| 江平宇(西安交通大学) | 黄 强(北京理工大学) |
| 孙立宁(哈尔滨工业大学) | 管晓宏(西安交通大学) |
| 李泽湘(香港科技大学) | 雒建斌(清华大学) |
| 李涤尘(西安交通大学) | 谭 民(中科院自动化研究所) |
| 李涵雄(香港城市大学/中南大学) | 谭建荣(浙江大学) |
| 宋玉泉(吉林大学) | 熊蔡华(华中科技大学) |
| 张玉茹(北京航空航天大学) | 翟婉明(西南交通大学) |

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有伦' (Xie Youjun).

华中科技大学

2008年4月

前 言

为了提高国产数控机床的可靠性水平及提升机床产品的国产化程度,作者结合研究团队长期从事机械产品的动态设计和可靠性设计研究所沉淀的理论与技术和所积累的知识与经验,对数控机床的动力伺服刀架进行了相关研究,重点从数控机床动力伺服刀架的典型结构、数控机床动力伺服刀架的核心部件检测、数控机床动力伺服刀架关键部件的可靠性分析与优化设计方法、数控机床动力伺服刀架可靠性试验等方面展开了大量的研究工作。所涉及的动力伺服刀架相关研究的基本概念、思路理念、理论方法、技术经验等对机械产品的分析与设计具有通用性,并具有指导与借鉴价值。本书就是在前述相关研究的基础上将涉及的相关基础理论、基本方法和基准技术等加以概括总结和提高。

本书系统介绍了数控机床和动力刀架的基础知识,详细阐述了国内外多种典型动力伺服刀架的结构系统和工作方式,为动力伺服刀架结构设计与性能分析奠定了基础,在深入阐明数控刀架的核心零件和数控刀架的应用同时,也系统论述了数控刀架的精度检测技术、可靠性试验方法和可靠性设计理论。全书共6章,分别讨论了数控刀架原理、数控刀架的应用、数控刀架的典型结构、数控刀架结构的可靠性设计、数控刀架的可靠性试验等。通过对本书的研读,读者可以增强对数控机床分类、用途、工作方式等多方面的理解,加深对属于数控机床动力刀架的类别、用途、结构等多方面的认识,明晰动力伺服刀架精度检测分析技术,领悟数控刀架的可靠性试验方法和可靠性设计理论及实验数据处理手段,并对实际机械产品进行可靠性分析与评估。

本书由国家“高档数控机床与基础制造设备”科技重大专项课题“动力伺服刀架的动态可靠性与可靠性灵敏度设计及试验技术(2010ZX04014014-001)”和国家自然科学基金重点项目“机械关键零件的动态与渐变可靠性稳健设计理论研究(51135003)”等项目资助出版,在此,对资助本书的项目单位表示感谢。

本书的出版离不开团队成员的卓越科研工作。在撰写本书过程中,得到了团队成员的热情鼓励和大力支持,在此要深切感谢的是:刘春时教授级高级工程师、赵进教授级高级工程师、林剑峰高级工程师、李焱高级工程师、马晓波高级工程师、刘阔高级工程师、史荣生高级工程师、孙志礼教授、赵春雨教授、郭立新教授、王永富教授、李鹤教授、赵亚平教授、李常有副教授、闫明副教授、杨周副教授、黄贤振副教授、张耀满副教授、刘宇副教授、马辉副教授、张旭方讲师、朱丽莎讲师、赵薇讲师、吕春梅讲师、周娜讲师、赵群超讲师、孙晓枫讲师、王倩倩博士、王一冰博士、吕

昊博士、胡鹏博士、梁松博士等以及其他参与工作的博士研究生和硕士研究生。特别感谢周笛同学对书稿的整理和校对工作。

在撰写书稿过程中,参考了一些国内外文献和互联网资料,在此,谨向文献作者表示衷心感谢。

限于水平,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。如果本书能够为提高我国数控机床的设计制造水平发挥作用,作者会深感欣慰。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 车床概述	1
1.2 数控车床概述	2
1.3 数控车床分类	3
1.4 数控刀架概述	5
1.5 数控刀架分类	6
1.6 动力刀架	8
1.6.1 动力刀架的类别	9
1.6.2 动力刀架的用途	11
1.6.3 动力刀架的结构	12
1.7 数控刀架的发展.....	15
第 2 章 数控刀架原理	17
2.1 数控刀架通用设计原理.....	17
2.2 数控刀架核心零件.....	18
2.2.1 端齿盘	18
2.2.2 端齿盘的精度指标	20
2.2.3 端齿盘材料选用与热处理要求	20
2.2.4 端面齿受力计算	21
2.3 数控刀架精度检测.....	25
2.3.1 刀架几何精度检测	25
2.3.2 刀架刚性检测	27
第 3 章 数控刀架的应用	31
3.1 经济型数控刀架的应用.....	31
3.2 普及型数控刀架的应用.....	32
3.3 高档数控刀架的应用.....	35
第 4 章 数控刀架的典型结构	38
4.1 高速动力刀架结构.....	38
4.2 经济型动力刀架结构.....	42

4.3	气压锁紧旋转动力刀架结构	43
4.4	内置电机式动力刀架结构	46
4.5	双伺服动力刀架结构	53
4.6	单电机动力刀架结构	59
4.7	双向选刀动力刀架结构	67
4.8	气压锁紧动力刀架结构	80
4.9	单伺服电机驱动动力刀架结构	83
4.10	径向出刀双伺服刀架结构	88
4.11	直驱式伺服刀架结构	91
4.12	含Y轴动力刀架结构	94
4.13	回转式刀座	100
4.14	具有旋转锁紧结构动力刀架结构	105
4.15	含冷却装置动力刀架结构	107
4.16	皇冠式转塔动力刀架结构	110
4.17	内置力矩电机动力刀架结构	112
4.18	精密三联齿盘刀架结构	120
4.19	精确分度定位刀架结构	121
第5章	数控刀架结构可靠性设计	125
5.1	结构可靠性设计理论	126
5.1.1	可靠性设计的摄动法	126
5.1.2	任意分布参数可靠性的设计	128
5.1.3	可靠性灵敏度的设计方法	129
5.1.4	可靠性灵敏度无量纲化	130
5.2	齿轮系统可靠性求解算例	131
5.2.1	确定随机参数	131
5.2.2	基于人工神经网络算法的可靠度求解	131
5.2.3	一次二阶矩法求解可靠度	136
5.2.4	蒙特卡罗法求解可靠度	136
5.2.5	齿轮的可靠性灵敏度分析	138
第6章	数控刀架可靠性试验	140
6.1	数控刀架性能试验	140
6.1.1	刀架性能试验	140
6.1.2	刀具位置、转速、转矩检测试验	141
6.1.3	定位精度检测试验	143
6.2	动力刀架动态特性试验	145

6.3 伺服电机性能检测	149
6.3.1 转矩波动系数测试	149
6.3.2 转速波动系数测试	150
6.3.3 负载变化转速调整率	150
6.3.4 系统效率测试	151
6.3.5 正反转速差率	151
6.4 转位电机在线性能检测	151
6.5 试验数据统计分析方法	152
6.5.1 数据分析的直方图法	153
6.5.2 极大似然估计	154
6.5.3 皮尔逊 χ^2 检验	155
参考文献	157

第 1 章 绪 论

1.1 车 床 概 述

在金属切削机床领域,车床是切削加工的主要技术装备,主要用于加工各种回转表面,如内外圆柱面、圆锥面、成形回转面、端面及切断面等。车床是使用最早、应用最广和数量最多的一种金属切削机床,占金属切削机床拥有量的 30%左右。车床经历了普通车床和数控车床及车铣复合中心的发展阶段。

公元前 2000 多年出现的树木机床是机床最早的雏形。古代树木机床工作时,脚踏绳索下端的套圈,利用树枝的弹性使工件由绳索带动旋转,手持贝壳或石片等作为刀具,沿板条移动工具切削工件。世界上第一台机床是在英国诞生的。1769 年,英国人詹姆斯·瓦特发明了蒸汽机,拉开了工业革命的序幕,而作为制造机器的工业母机就是在这一时代背景下催生的。1797 年,英国人莫兹利制成带有机动进给刀架的铁制螺纹切削车床,并于 1800 年完成了其改进型。莫兹利的近代车床可谓是产生工作母机的始祖机器,莫兹利也因此被誉为英国机床工业之父。到了 19 世纪,作为工作母机的机床在美国扎下了根。美国内战中,大量的军火消费刺激了美国的机床业发展,孕育出转塔车床、自动车床等用于批量消费的机床。19 世纪初,由于被誉为机床新技术奠定人的约瑟夫·布朗等的成就,机床工业的主导权由英国转移至美国。第一次世界大战后,世界工业化进程加快,纺织、动力、交通运输机械和军火生产推动了各种高效车床和专门化车床的迅速发展。为了提高小批量工件的生产率,到 20 世纪 40 年代末,出现了利用液压仿形装置的液压仿形车床,与此同时,多刀车床、转塔车床也得到发展。广义上讲,这些车床称为普通车床。

1953 年,我国将机床的开发作为重点建设工程之一。当时的沈阳第一机床厂引进管理技术与苏联机床制造技术,并自行研制开发出中国第一台普通车床 C620-1;1972 年,研发生产出普通车床 CA6140。CA6140 产品性能可靠、结构先进、操作方便、质量稳定,多年来一直被大专院校当做典型机床案例编入教材。1984 年,该型号产品成为国内机床行业中唯一获得国家质量银牌奖项的普通车床。这种机床的加工对象广,主轴转速和进给量的调整范围大,能加工工件的内外表面、端面和内外螺纹等,主要由工人手工操作,生产效率低,适用于单件、小批生产和修配车间。图 1.1 是由沈阳机床厂生产的 CA6150A 型机床。

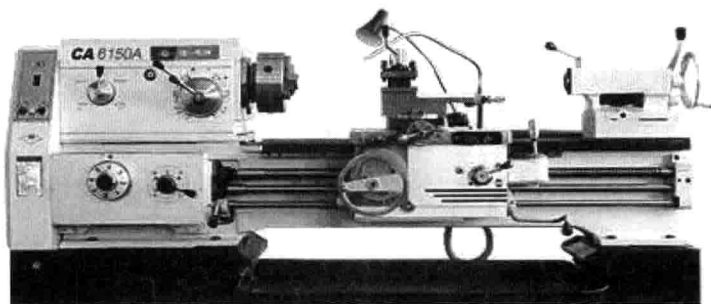


图 1.1 CA6150A 型机床

1.2 数控车床概述

普通机床经历了近两百年的历史。随着电子技术、计算机及自动化技术、精密机械与测量技术等的发展与综合应用,出现了机电一体化的数控机床。数控机床是在普通机床上发展起来的,数控的含义就是数字控制(number control, NC)。数控机床是通过数字信息控制机床按给定的运动轨迹,进行自动加工的机电一体化的加工装备。世界上最早的数控机床是 1951 年诞生的数控铣床。数控机床的方案,是美国的帕森斯在研制和检查飞机螺旋桨叶剖面轮廓的板叶加工机时向美国空军提出的,在麻省理工学院的参与协助下,终于在 1949 年研制成功。1951 年,正式制造出第一台电子管数控机床样机,成功地解决了多品种、小批量复杂零件加工的自动化问题。之后,数控原理从铣床扩展到铣镗床、钻床和车床;而数控系统从电子管向晶体管、集成电路方向过渡。数控机床是在电子计算机发明之后,运用数字控制原理,将加工程序、要求和更换刀具的操作数码和文字码作为信息进行存储,并按其发出的指令控制的、按既定要求进行加工的机床。数控技术于 20 世纪 60 年代开始应用于车床。目前,数控机床一般是采用通用或专用计算机实现数字程序控制,因此数控也称为计算机数控(computerized numerical control, CNC)。

毫无疑问,数控车床是在普通车床的基础上发展起来的。经过半个世纪的发展,数控机床已经是现代制造业的重要标志之一。在中国制造业之中,体现企业综合实力的数控机床的应用也越来越广泛。数控车床是数字程序控制车床的简称,集通用性好的万能型车床、加工精度高的精密型车床和加工效率高的专用型车床的特点于一身,是国内使用量最大、覆盖面最广的一种数控机床。数控车床是集机械、电气、液压、气动、微电子和信息等多项技术于一体的机电一体化产品。按照事先编制的加工程序,自动地对被加工的零件进行加工。将零件的加工工艺路线、工艺参数、刀具的运动轨迹、位移量、切削参数(主轴转数、进给量、背吃刀量等)以及辅助功能(换刀、主轴正转、反转、切削液开、切削液关等),按照数控机床规定的指

令代码及程序格式编写加工程序单,从而实现机床自动加工零件^[1~3]。

数控车床的主体结构与普通车床基本相似,为了提高加工效率,数控车床多采用液压、气压和电动卡盘。数控车床由主轴传动装置、进给系统、床身、滑板、辅助运动装置、尾座、液压气动系统、润滑系统及冷却装置等组成^[4,5]。而数控机床在整体布局、外观造型、传动系统、刀具系统的结构甚至控制方式等有很大变化,这种变化更大程度上是为了满足数控车床的要求及发挥数控机床功能和特点。比较明显的是,数控车床配置数控刀架替代普通车床的手动刀架,从而实现数控车床的自动换刀。另外,数控车床没有传统的进给箱和交换齿轮架,而是直接采用伺服电机通过滚珠丝杠驱动溜板和刀架实现进给运动,因而进给系统的结构大为简化。车螺纹也不再需要另配丝杆和挂轮,刻度盘式的手摇移动调节机构也被脉冲触发计数装置所取代。再者,数控柜、操作面板及显示监控器是数控机床特有的部件^[6~9]。

1.3 数控车床分类

数控车床品种多样,可以从机床的数控系统、结构和性能等方面进行分类。

按数控系统功能和机械构成,可将数控车床分为简易数控车床或经济型数控车床、全功能数控车床和车铣复合加工中心。简易数控车床是比较低档的数控车床,一般用单板机或单片机进行控制,使用开环的步进数控系统,采用步进电机,没有反馈,控制精度低,价格较低;机械部分是在普通车床的基础上改进完成的;成本较低,自动化程度和功能都比较差,车削加工精度也不高,适用于要求不高的回转类零件的车削加工。图 1.2 是由沈阳机床集团生产的 CA6250C 型机床。

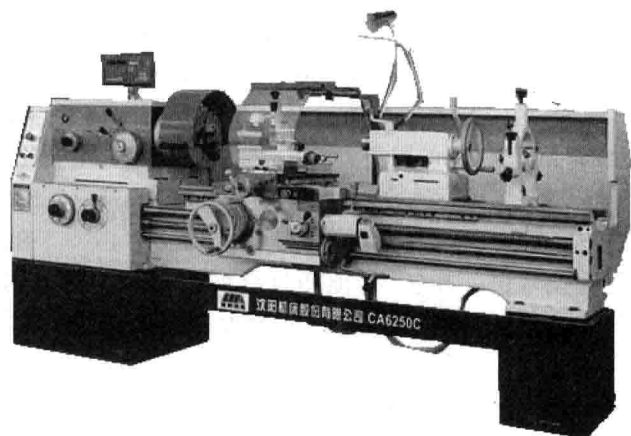


图 1.2 CA6250C 型机床

全功能数控车床是中档数控机床,根据车削加工要求进行专门的结构设计,并配备通用数控系统而形成的数控车床,数控系统功能强,具备数控车床的各种结构特点,自动化程度和加工精度也比较高,适用于一般回转类零件的车削加工。这种数控车床可同时控制两个坐标轴,即 X 轴和 Z 轴,一般为半闭环或全闭环控制,精度较高。图 1.3 为 EL6153 型机床的外观结构图。

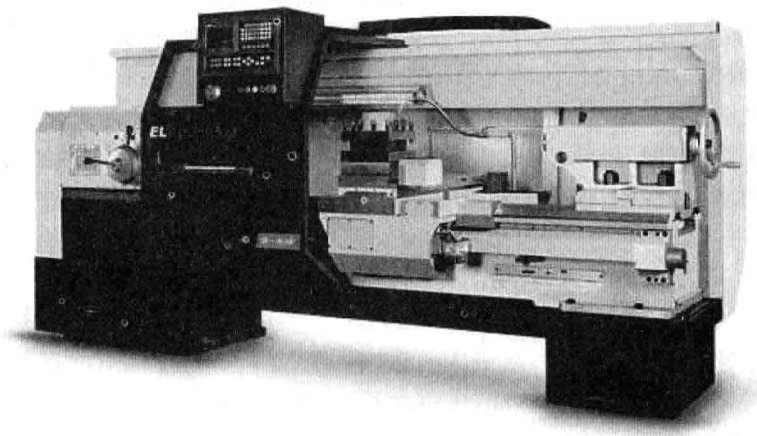


图 1.3 EL6153 型机床

车削加工中心是在全功能数控车床的基础上,增加了 C 轴和具有动力刀具输出功能的动力刀架,更高级的数控车床带有刀库,可控制 X 、 Z 和 C 三个坐标轴,联动控制轴可以是 (X,Z) 、 (X,C) 或 (Z,C) 。由于增加了 C 轴和铣削动力头,这种数控车床的加工功能大大增强,除可以进行一般车削以外,还可以进行径向和轴向铣削、曲面铣削、中心线不在零件回转中心的孔和径向孔的钻削等加工。主轴部分^[10]有卧式的车床轴,结构与车床主轴类似,可以作为普通车削主轴应用,功率较大,车床轴上安装有分度装置,可以进行千分之一度连续分度,类似于 CNC 转台的功用。另外,机床还安装有一铣主轴,一般刀具接口为 BT 、 HSK 、 $CAPTO$ 等,可作为普通铣削主轴使用,功率等级一般略小于立式加工中心^[11]。随着数控机床技术的进步,机床复合技术进一步扩展,促使复合加工技术日趋成熟,包括铣-车复合、车-铣复合、车-镗-钻-齿轮加工等复合、车-磨复合等,成形了复合加工、特种复合加工等多种技术的状态,复合加工的精度和效率大大提高。“一台机床就是一个加工厂”、“一次装卡,完全加工”等理念正在被更多人接受,车铣复合中心的发展正呈现多样化的态势。图 1.4 为 $HTC2550m$ 车削加工中心。

按照数控车床的结构方式即数控车床的主轴放置形式,数控车床可分为卧式和立式两大类。卧式数控车床又分为数控水平导轨卧式车床和数控倾斜导轨卧式

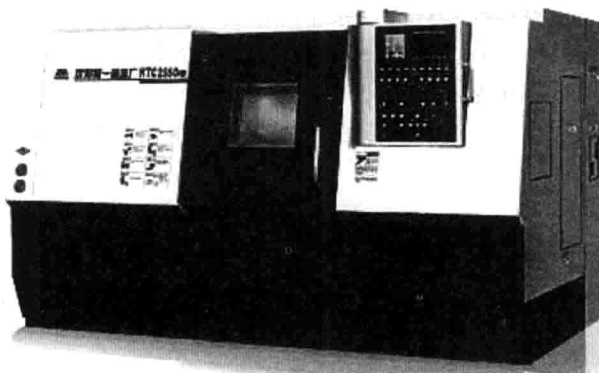


图 1.4 HTC2550m 车削加工中心

车床。档次较高的数控卧车一般采用倾斜导轨,常用的有 45° 、 55° 和 70° 床身,以适应不同行业工件的加工需求。其倾斜导轨结构可以使车床具有更大的刚性,尤其是整体铸造床身,并易于排屑,角度大的机床的排屑性能好。机床主轴中心高与操作者接近,便于切屑流动和调整卡紧力,并易于操作,卧式数控车床一般适合加工轴盘类零件,特别适合细长轴零件的车削加工。立式数控车床简称为数控立车,其车床主轴垂直于水平面,有用来装夹工件直径很大的圆形工作台。这类机床主要用于加工径向尺寸大、轴向尺寸相对较小的大型复杂零件。

按刀架数量分类,又可分为单刀架数控车床和多刀架数控车,前者是单主轴、两坐标控制,后者是双主轴、多坐标控制。一般常用的结构形式是双主轴双刀架,双刀架卧车多数采用倾斜导轨。这种机床的刀架一般是水平平行放置,也有垂直分布的。这种机床加工的工序较多,更加复杂,一次装卡可实现两端面整体加工。例如,近些年出现的双主轴三刀架的 9 轴联动数控车削中心,一台机床简直就是一个工厂。

1.4 数控刀架概述

刀架也称为刀塔,是车床的重要组成部分。早期刀架的主要功能就是把持车床刀具,实现车床的切削加工和变换刀具。

数控刀架的产生及发展与数控车床的产生及发展是密不可分的:一方面数控刀架随数控车床的发展而产生;另一方面数控刀架的进步和不断创新又刺激和推动了数控车床的发展。从普通车床到数控车床以及车铣复合加工中心,刀架已经脱离把持刀具装置的范畴,如实现自动换刀、自带铣削动力实现铣削、钻削、攻丝等复合化功能,是一个既有动力输入,又有动力输出以及具备控制系统的完整的自动

化设备^[12]。

数控刀架,在我国曾被定性为机床附件,在国外则被定义为机床功能件。随着数控机床的飞速发展,机床设计已由传统的统筹设计发展到模块化设计,即按照机床的功能化分模块,因此这些功能部件的性能已成为整机性能的决定因素。

1.5 数控刀架分类

数控刀架可以从刀架的档次、刀架的动力驱动源及刀架的安装方式等方面进行划分。

1. 按照行业上应用的数控刀架档次进行分类

按主机配套场合不同,数控刀架主要分为高、中、低三个档次^[13~15]。

1) 低档数控刀架

我国经济型数控车床、简易数控和电子车床所使用的刀架属于低档数控刀架,主要有沈阳生产的SLD系列电动刀架、WD系列电动刀架,常州生产的LD-4电动刀架等。这种刀架结构简单,容易设计、制造,是我国的特色产品,已经形成规模化生产;其品种多、规格全,可以满足我国该种机床的使用要求。图1.5为低档数控刀架结构。

2) 中档数控刀架

普及型数控车床或者称为全功能数控车床所使用的刀架属于中档数控刀架,包括数控卧车和数控立车,主要有双选电动刀架、液压刀架以及伺服刀架。此类刀架在我国初具规模,但是国外产品对我国市场冲击较大,进口比例较大。图1.6为中档数控刀架结构。



图 1.5 低档数控刀架

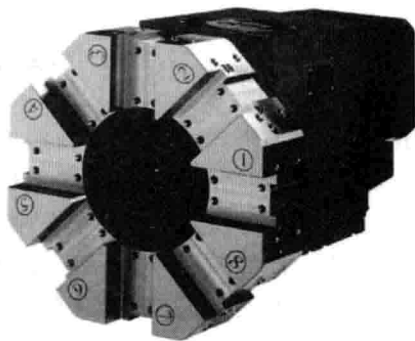


图 1.6 中档数控刀架