

机械工业出版社高水平著作出版基金资助

数控机床 电主轴单元技术

吴玉厚 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TG659
109

机械工业出版社高水平著作出版基金资助

数控机床

电主轴单元技术

吴玉厚 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书介绍了数控机床电主轴单元的研究、发展和应用情况；在论述数控机床电主轴工作原理和机构设计的基础上，进行了电主轴单元轴承技术、润滑技术、冷却技术、动平衡技术、主轴电动机的驱动和控制技术以及电主轴的精密加工和精密装配技术等数控机床电主轴关键技术的研究；进一步完善和提高电主轴用高精度氮化硅陶瓷球轴承的设计和制造技术；对数控机床电主轴单元的动态、静态性能及热态性能进行了讨论和分析，并在此基础上进行了电主轴单元应用于非圆零件表面高速精密加工的试验研究；利用 PMAC-PC，结合电主轴单元技术和直线电动机驱动进给技术，设计集成了一套精密加工系统和零件圆度误差的在线检测系统；研究开发了电主轴单元的控制应用软件，实现了对圆及非圆零件的精密加工，加快了数控机床电主轴单元的工程应用。

本书可供从事机械设计、制造和管理的工程技术人员使用，也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床电主轴单元技术/吴玉厚著. —北京:机械工业出版社, 2006.1

ISBN 7-111-18357-6

I. 数... II. 吴... III. 数控机床-主轴 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 002612 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李俊玲 覃密道 宋学敏

版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明

责任印制:洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2006 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·5.875 印张·1 插页·224 千字

0001—2500 册

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面防伪标均为盗版

前 言

高速数控机床是装备制造业的技术基础和发展方向之一，是装备制造业的战略产业，其技术水平的高低和拥有量的多少也是衡量一个国家制造业水平高低的标志。电主轴单元是数控机床的核心部件，是高速主轴单元中一种理想结构，其性能好坏在很大程度上决定了整台机床的加工精度和生产效率。

电主轴单元具有结构紧凑、重量轻、惯性小、振动小、噪声低、响应快等优点，不但转速高、功率大，还有一系列控制主轴温升与振动等机床运行参数的功能，以确保其高速运转的可靠性与安全性。电主轴单元已在机械、电子、航空航天、国防、冶金、食品、化工、医药和光学等领域内表现出旺盛的生命力。因此，各工业国家都十分关注电主轴单元技术的研究与发展，谁先在该领域的研究方面有突破性进展，谁就率先将为国民经济的发展和国防实力的提高打下坚实的基础。

“十五”期间，我国数控机床的电主轴技术发展很快，但国产电主轴从水平、种类、质量等方面，与国外先进国家相比还存在很大差距，从而严重阻碍了我国高速高精度数控机床的发展。我国中、高档数控机床既满足不了国内市场的需要，更无力在国际市场上竞争。近年来，我国每年都要花费几十亿元进口数控机床。还应注意，高速高精度数控机床是我们有钱也难买到的。数控机床的关键制造技术研究必须走自主创新的道路。为了能进一步提高机床主轴单元的精度、转速、功率和可靠性，尽快发展我国电主轴产业，赶超世界先进水平，作者做了大量的研究工作，并希望通过本书向广大读者介绍数控机床电主轴单元技术研究的最新成果和发展方向。

本书总结了作者近年来主持完成的相关研究课题的部分研究成果。这些课题主要有：陶瓷球轴承及其相关技术研究（国家自然科学基金资助项目，编号：59375028）；大功率超高速数控机床主轴系统（国家自然科学基金资助项目，编号：59775064）；高速机床主轴系统（国家教委资助优秀年轻教师基金，1997年）；高精度热压氮化硅陶瓷球轴承（辽宁省自然科学基金资助项目，编号：002003）；数控机床主轴轴承（辽宁省教育厅资助项目，编号：20201055）；高速数控机床大功率电主轴单元技术（辽宁省自然科学基金资助项目，编号：20022002）；高速数控机床陶瓷电主轴单元技术研究（国家自然科学基金资助项目，编号：50475167）。

参加上述课题研究的，有来自沈阳建筑大学、中国科学院上海硅酸盐研究

所、东北大学、哈尔滨工业大学、沈阳机床集团、洛阳轴承研究所等单位的几十名同志。

在上述课题的研究期间，作者多次作为国家公派高级访问学者，先后到日本、美国进行合作研究，得到了日本东北大学工学部的庄司克雄教授、美国麻省大学工学院的 S. Malkin 教授、郭长胜博士和迈阿密大学工学院的刘洪潭教授的大力支持与帮助。在此，一并表示衷心的感谢。

由于作者水平、经验和时间有限，书中不足之处，敬请专家、学者和广大读者批评指正。

作者 吴玉厚

2005 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电主轴概述	1
1.2 电主轴单元关键技术	3
1.3 国外电主轴技术现状	7
1.4 国内电主轴技术现状	8
1.5 电主轴对高速加工技术及现代数控机床发展的意义	10
第 2 章 电主轴工作原理及结构	13
2.1 电主轴的基本结构	13
2.2 电主轴的工作原理	15
2.3 电主轴的基本参数	16
2.4 电主轴的轴端结构	18
第 3 章 电主轴的轴承技术	20
3.1 电主轴的主要支承类型	20
3.2 陶瓷球轴承关键技术的研究	22
3.3 滚动轴承的配置形式和预加载荷	61
第 4 章 电主轴的润滑、冷却及动平衡技术	63
4.1 电主轴的润滑	63
4.2 电主轴的冷却	67
4.3 电主轴的动平衡	74
4.4 电主轴单元的精密加工及装配	74
4.5 电主轴的防尘与密封	80
第 5 章 电主轴的驱动与控制	82
5.1 普通变频器的驱动与控制	82
5.2 矢量控制驱动器的驱动与控制	85
5.3 大功率电主轴单元的 PMAC 控制	88

第 6 章 电主轴单元的性能分析	94
6.1 电主轴的精度和刚度	94
6.2 电主轴的温升特性分析	95
6.3 电主轴的使用寿命	99
6.4 电主轴动态振动测试	100
第 7 章 电主轴的应用研究	111
7.1 电主轴的选用	111
7.2 高速精密加工系统集成	111
7.3 基于 PMAC 下零件圆度误差测量系统设计	116
7.4 直线电动机伺服进给机构及其控制	140
7.5 外圆及椭圆截面零件精密加工实验研究	150
7.6 电主轴的维护、保养及使用	167
第 8 章 电主轴单元技术研究展望	169
8.1 国外电主轴技术发展趋势	169
8.2 国内电主轴技术研究方向	170
参考文献	172

第1章 绪 论

1.1 电主轴概述

高速数控机床是装备制造业的技术基础和发展方向之一，是装备制造业的战略性产业。高速数控机床的工作性能，首先取决于高速主轴的性能。数控机床高速主轴单元包括主轴动力源、主轴、轴承和机架等几个部分，它影响加工系统的精度、稳定性及应用范围，其动力学性能及稳定性对高速加工起着关键的作用。高速高精度主轴单元系统，应该具有刚性好、回转精度高、运转时温升小、稳定性好、功耗低、寿命长、可靠性高等优点，同时，制造及操作成本也应适中。要满足这些要求，主轴的制造及动平衡、主轴的支承（轴承）、主轴系统的润滑和冷却、主轴系统的刚性等是很重要的。

高速主轴单元的类型主要有电主轴、气动主轴、水动主轴等。不同类型的高速主轴单元输出功率相差较大。高速加工机床主轴要求在极短的时间内实现升降速，并在指定位置快速准停。这就需要主轴有较高的角减速度和角加速度。如果通过传动带等中间环节，不仅会在高速状态下打滑，产生振动和噪声，而且增加转动惯量，给机床快速准停造成困难。目前，随着电气传动技术（变频调速技术、电动机矢量控制技术等的迅速发展和日趋完善，高速数控机床主传动系统的机械结构已得到极大的简化，基本上取消了带轮传动和齿轮传动。机床主轴由内装式电动机直接驱动，从而把机床主传动链的长度缩短为零，实现了机床的“零传动”。这种主轴电动机与机床主轴“合二为一”的传动结构形式，使主轴部件从机床的传动系统和整体结构中相对独立出来，因此可做成“主轴单元”，俗称“电主轴”。它在英文中有多种称谓，如 Electric Spindle, Motor Spindle 和 Motorized Spindle 等等。由于当前电主轴主要采用的是交流高频电动机，故也称为“高频主轴”（High Frequency Spindle）。由于没有中间传动环节，有时又称它为“直接传动主轴”（Direct Drive Spindle）。电主轴是一种智能型功能部件，它采用无外壳电动机，将带有冷却套的电动机定子装配在主轴单元的壳体内，转子和机床主轴的旋转部件做成一体，主轴的变速范围完全由变频交流电动机控制，使变频电动机和机床主轴合二为一。电主轴具有结构紧凑、重量轻、惯性小、振动小、噪声低、响应快等优点，不但转速高、功率大，还具有一系列控制主轴温升与振动

等机床运行参数的功能,以确保其高速运转的可靠性与安全性。使用电主轴可以减少带轮传动和齿轮传动,简化机床设计,易于实现主轴定位,是高速主轴单元中的一种理想结构。

当然,将电动机内置也会带来不少麻烦,但在高速加工时,采用该举措几乎是惟一的选择,也是最佳的选择。原因如下:

(1) 如果电动机不内置,仍采用电动机通过带轮或齿轮等方式传动,则在高速运转条件下,由此产生的振动等,势必影响高速加工的精度、加工表面粗糙度,而产生的噪声导致环境质量的恶化,这些问题都很难解决。

(2) 高速加工的最终目的是为了提高生产率,相应地要求在最短时间内实现高转速的速度变化,即要求主轴回转时具有很高的角加速度和角减速度。达到这个要求的最经济的办法是将主轴传动系统的转动惯量尽可能地减至最小。而只有将电动机内置,省掉齿轮、带轮等一系列中间环节,才有可能达到这一目的。

(3) 电动机内置于主轴两支承之间,与用带轮、齿轮等作末端传动的结构相比,可提高主轴系统的刚度,也就提高了系统的固有频率,从而提高了其临界转速值。这样,电主轴即使在最高转速运转时,仍可确保低于其临界转速,保证高速运转时的安全。

(4) 由于没有中间传动环节的传动冲击等外力作用,主轴高速运行更为平稳,使得主轴轴承的使用寿命相应得到延长。

(5) 电主轴与传统的主轴传动系统相比有结构简单、紧凑等优点,这样便于把它用在多轴联动机床、多面体加工机床和并联(虚拟轴)机床上。

电动机内置于主轴部件后,不可避免的将会产生发热的问题,从而需要设计专门用于冷却电动机的油冷或水冷系统。高频电动机要有变频器类的驱动器,以实现主轴转速的变换。高速轴承有时要有专门的润滑装置。另外为了保证高速回转部件的安全,还要有报警及停车用的传感器及其控制系统等一系列支持电主轴运转的外围设备和技术。因此,“电主轴”的概念不应简单地理解为只是一根主轴套筒,而是一个完整的、在机床数控系统监控下的子系统,如图 1-1 所示。

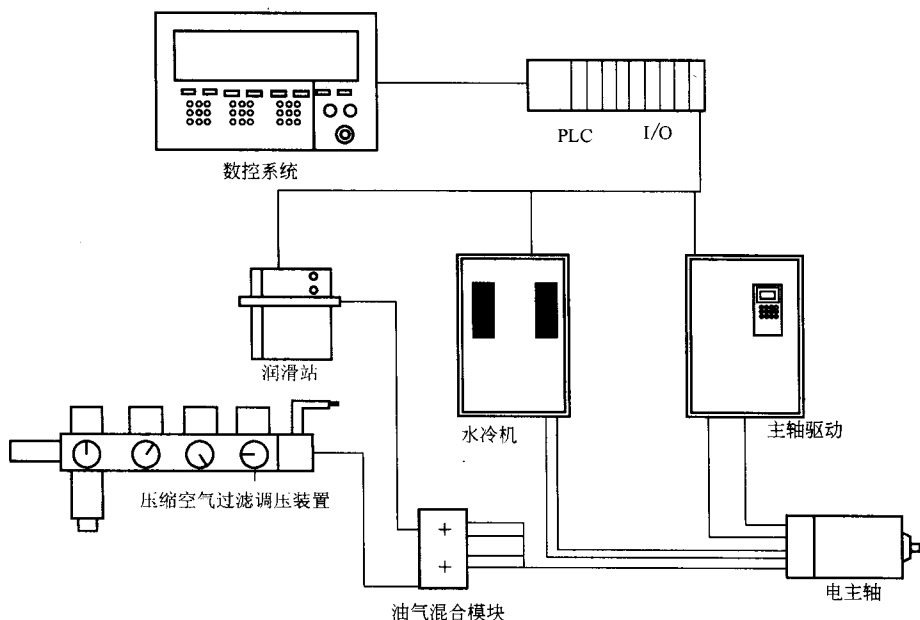


图 1-1 完整的电主轴系统

1.2 电主轴单元关键技术

电主轴单元是一套组件，它是一项涉及电主轴本身及其附件的系统工程。电主轴单元所融合的技术主要包括以下几方面。

1.2.1 高速精密轴承技术

实现电主轴高速化和精密化的关键是轴承的应用。目前在大功率高速精密电主轴中应用的轴承主要是角接触陶瓷球轴承和液体动静压轴承。空气轴承不适合于大功率场合，磁悬浮轴承由于价格昂贵、控制系统复杂，其实用性受到限制。

角接触球轴承是精密数控机床常用的主轴支承。由于滚球高速运转时会产生巨大的离心力和陀螺力矩，其所造成的动载荷常常超过机床的切削负荷，为了降低传统钢质球的离心力和陀螺力矩，采用陶瓷球和钢质套圈混合轴承成为一种选择。最常用的陶瓷球材料是 Si_3N_4 。 Si_3N_4 陶瓷具有密度小、热膨胀系数小、弹性模量大和硬度高等优点。用它作为高速主轴轴承的滚动元件，可大大减少滚球的离心力和陀螺力矩，从而使轴承获得高速度、低温升和长寿命的性能。除混合轴承外，目前国内已开始在高速精密主轴上试验采用全陶瓷球轴承，其内外套圈、保持架和陶瓷球采用的材料有 ZrO_2 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 和聚四氟乙烯等。陶瓷球的等静压成型和烧结是保证陶瓷球强度的基础，球的加工精度靠加工和检测来保证。

目前国内滚球的加工精度可达 G5 级以上。对于全陶瓷球轴承,除陶瓷球外,陶瓷内外圈的精密加工也是关键,需要设计专门的工装固定内外圈坯件才能实现精密加工,内外沟道的加工精度的一致性也要靠恰当的工装和工序来保证。

尽管目前高速精密电主轴的支承绝大部分为角接触陶瓷球轴承,但由于在极限转速和大负载工况下滚动轴承的功能丧失很快,液体动静压轴承的研究一直为国内外电主轴企业及专家所重视。动静压轴承作为电主轴轴承的主要技术难点是实现高速化,对其关键技术的研究主要有:动静压轴承的层流、紊流流体惯性的计算算法研究;动静压轴承层油腔结构的研究;轴承温升及热变形控制技术的研究及润滑介质的研究等。

1.2.2 高速精密电主轴的动态性能和热态性能设计

高速精密电主轴设计目标要求主轴刚度高、精度高、抗振性好、可靠性高。传统的动力学分析常常将轴承刚度用假设的弹簧代替,利用有限元或传递矩阵法等数值计算方法计算主轴的各阶固有频率和振型,并在设计时使主轴的一阶固有频率高于设计的主轴最高转速所对应的频率。该方法还能解释随着主轴速度升高,球轴承离心力变化导致主轴固有频率变化等动力学现象。但该方法对球轴承刚度的非线性变化特点没有充分考虑。根据电主轴的实际运行特点,有必要将“轴承——主轴——电动机——轴承座”作为一个系统进行动力学分析,同时充分考虑支承刚度非线性、主轴热扩散及热变形等热态性能对主轴动态性能的影响,并对整个电主轴进行动态优化设计,而轴承系统的动力学仿真是基础。1971~1982年,MTI公司的Gupta等研究人员比较系统地提出了模拟任意运转条件下滚动轴承性能的动力学分析模型。1994年,Nording公司采用在并行计算机上解微分方程组的方法进行了轴承动态仿真研究。1997年NSK公司开发了滚动轴承分析软件BRAIN;同年,国内科研人员根据热路网络热流量平衡原理,采用热流网络交换法对轴承系统的温度场进行了计算机仿真;洛阳轴承研究所开发了轴承系统温度场的分析软件,并对基本的轴承传热模型和辐射模型做了分析。

主轴动态热态性能设计的关键技术有:

(1) 滚动接触界面的非线性刚度变化规律。滚动轴承的支承刚度与运转速度之间、载荷与变形之间是非线性的关系,且由于有限个滚动体的存在、轴承元件接触表面的加工几何误差、轴承材料的弹性及外力的变化等,使得轴承的刚度成为时变函数。在考虑定位预紧和定压预紧两种预紧方式、计算球与内外圈沟道接触载荷和接触角的基础上,计算每个球与内外圈沟道接触点的接触刚度,需要根据轴承内部变形的几何关系,提出合适的计算轴承径向刚度、轴向刚度和角刚度的方法。

(2) 主轴的热变形和热扩散规律。高速精密主轴单元各零件的刚度及精度都较高,主轴的弹性变形所引起的误差常常很小,而运动副间的摩擦发热和温升却

不可避免。在各类误差中,热变形引起的误差往往比其他误差更为突出。高速旋转状态下,主轴多个支承轴承和电动机转子是电主轴多区段的主要热源,会直接导致主轴热变形,改变轴承的预紧状况,影响主轴的加工精度,严重时甚至会烧毁轴承,导致主轴损坏。为了避免这种危害,对主轴热变形和热扩散的研究至关重要,而建立高速精密主轴多区段热扩散、热变形及主轴热变形与振动耦合规律的数学模型,是主轴系统动力学分析的一个关键。主轴热分析可在获得正确的主轴热传导系数(热导率)后,采用有限元法进行研究,预测主轴热变形后引起的间隙变化对轴承及主轴部件性能的影响,并在主轴系统设计、制造、装配过程中做出补偿,防止主轴单元工作精度降低。

1.2.3 高速电动机设计及驱动技术

电主轴是电动机与主轴结合在一起的产物,电动机的转子即为主轴的旋转部分,理论上可以把电主轴看作一台高速电动机,其关键技术是高速下的动平衡。

电主轴实现高速化存在的问题,从机械方面考虑主要是轴承发热和振动问题;从设计方面考虑主要是定转子功率密度和线圈发热问题;从驱动和控制角度考虑主要是调速性能问题。异步型电主轴的主要优点在于结构简单、制造工艺相对成熟、驱动系统易于实现高速化,其不足之处在于转子发热严重、低速性能不好、转子参数受温度影响大,难于实现精密控制。异步型电主轴功率容量增大、转速提高时,常常需配备中心冷却系统以降低主轴温升,同时,在主轴结构设计时,对轴承采用恒压预紧方式,以克服主轴轴向热变形带来的影响。对于同步型电主轴,其优点在于:

(1) 转子不发热,从原理上避免了旋转轴热变形和向轴承散热等问题。

(2) 转子无损耗,功率密度大,工作效率高,功率因数高,与同容量的异步电动机相比,其驱动装置容量较小。

(3) 体积和重量大为减小,转动惯量小,易于快速启动和准停。

(4) 与同体积的异步电动机相比,其输出转矩大一倍以上。

(5) 低速性能好。

(6) 易于实现精密控制。

同步型电主轴的不足在于功率容量有限,弱磁困难,在实现高速化方面存在较大难度。针对永磁同步电主轴的弱点,采取的主要措施有:

(1) 采用内置式转子结构,尽量减小气隙长度,增大直轴电感,以利于弱磁,从而有利于实现高速化。

(2) 采用转子磁场定向控制方法。

(3) 采用交直交电压型自控方式。

(4) 减小定子槽开口,采用磁性槽楔,减小定位力矩,以实现高精度控制。

(5) 研制开发同步驱动功率模块, 实现同步主轴的高速化。

1.2.4 高速电主轴的精密加工和精密装配技术

为了保证电主轴在高速运转时的回转精度和刚度, 其关键零件必须进行精密加工或超精密加工。主轴单元的精密加工件包括主轴、箱体、前后轴承座以及随主轴高速旋转的轴承隔圈和定位过盈套等。主轴与轴承的配合面、主轴锥孔与刀柄的配合面、主轴拉刀孔的表面、主轴前后轴承的同轴度、主轴的径向圆跳动是必须保证的主要精度指标。主轴单元的精密装配包括主轴与电动机转子、主轴与前后轴承、主轴与轴承隔圈和定位过盈套、主轴与刀具、轴系与轴承座、轴承座与壳体之间的精密装配。精密装配要保证的主要两点是电主轴整体刚度和整体的动平衡精度。围绕精密加工和精密装配开发的工装和专用机床是高速精密电主轴核心技术的重要组成部分。此外, 高速主轴上旋转刀具的装配也是精密装配工艺需要考虑的因素。

1.2.5 高速精密电主轴的润滑技术

电主轴的润滑一般采用定时定量的油气润滑, 也可以采用脂润滑, 但其相应的速度要大打折扣。定时就是指每隔一定的时间间隔注一次油, 定量是指通过一个叫做定量阀的器件, 精确地控制每次润滑油的注油量。油气润滑, 通常是润滑油在压缩空气的携带下, 被吹入陶瓷球轴承。油气润滑技术中, 油量控制显得十分重要, 如果过少, 起不到润滑作用; 过多, 又会在轴承高速旋转时因油的阻力而发热。

1.2.6 高速精密电主轴的冷却技术

为了尽快使高速运行的电主轴散热, 通常对电主轴的外壁通以循环冷却剂, 而冷却剂的温度通过冷却装置来保持。

1.2.7 高速精密电主轴的内置脉冲编码器技术

为了实现自动换刀以及刚性攻螺纹, 电主轴内需安装一个脉冲编码器, 以实现准确的相位控制以及进给的配合。

1.2.8 高速精密电主轴的矢量变频技术

要实现电主轴每分钟几万甚至十几万转的转速, 必须用变频装置来驱动电主轴的内置高速电动机, 变频器的输出频率甚至需要达到几千赫兹。

1.2.9 高速刀具的装卡技术

广为熟悉的 BT、ISO 刀具, 已被实践证明为不适合于高速加工的刀具。在此背景下, 出现了 HSK、SKI 等高速刀柄。

1.2.10 自动换刀技术

为了适用于加工中心, 电主轴配备了能进行自动换刀的装置, 包括碟形弹簧、拉刀油缸等。

1.3 国外电主轴技术现状

国外对电主轴的研究开展较早,最早应用于内圆磨床。20世纪80年代末90年代初,随着高速切削技术的发展,电主轴逐渐应用于加工中心、数控铣床、数控钻床等高档机床。目前,电主轴已经成为现代数控机床主要的功能部件之一,世界上生产金属切削加工设备的多数机床制造商,基本上都采用电主轴数控产品。由于电主轴结构简单,传动、联接环节少,因此提高了机床的可靠性,技术成熟、性能完善的电主轴功能部件又使机床的性能得到进一步改善。同时,世界上也已经出现了许多著名的机床电主轴功能部件专业制造商,他们生产的电主轴功能部件已经系列化,如瑞士的 FISCHER、STEP-TEC 和 IBAG,德国的 GMN 和 CYTEC,意大利的 CAMFIOR 和 OMLAT 等等。

德国公司生产的 SPECHT500 和 SPECHT600 高速加工中心,其主轴均为装有混合陶瓷球轴承的电主轴,采用液态冷却,主轴转速为 16 000r/min (22kW)。瑞士公司生产的 HSM700 高速加工中心,装有 HF 系列陶瓷轴承电主轴,主轴径向圆跳动在 $0.5 \sim 2.0\mu\text{m}$ 之间,主轴转速已达 42 000r/min (12kW),切削速度提高了 5~10 倍,可对精密和薄壁零件快速连续加工,生产成本减少 20%~80%。意大利的一些公司的精密机床,使用装有内置电动机和陶瓷球轴承的电主轴,主轴转速达 30 000r/min (17kW),用于加工重量高达 900kg、精度达 $1.5\mu\text{m}$ 的壳体零件。美国公司生产的 HVM 型高速机床,主轴转速达 20 000r/min (25kW)。德国阿亨工业大学研制的 DYNA-M 并联机床,主轴转速可达 16 000r/min (15kW)。上述机床由于采用内置电动机主轴单元,提高了机床主轴的转速和加工精度。有些加工中心的加工精度已从 $\pm 5\mu\text{m}$ 提高到了 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

近年来,国际上大功率高速铣削和钻削电主轴技术发展很快。德国 GMN 公司在 Dannstanf 工业大学协助下开发的 HC 系列高速电主轴,日本 NSK 公司的 M 系列,意大利 G&F 公司的 EFA、EMC 系列,瑞士 STEP-TEC 公司的 HVC 系列电主轴都具有功率大、刚度高及调速范围广的特性,完全适用于高速、高效切削。随着实际应用的需要和机床技术的进步,对数控机床用电主轴提出了越来越高的要求,其总体发展趋势是:大功率、高转速、高主轴回转精度,其中,主轴转速不小于 10^5r/min ,功率不小于 100kW,主轴回转精度在 50nm 以下。

目前,国际上电主轴的研究应用有以下进展。瑞士 FISCHER 公司,推出了配有在线自动平衡装置的电主轴部件,加工中心每换一次刀进行一次包括刀具在内的自动平衡,可在 1 秒钟内消除 80%~99% 的由动平衡所引起的振动;瑞士 IBAG 公司,推出了静压轴承的电主轴,同时还推出了磁浮轴承的电主轴;美国 INGERSOLL 公司,推出了动静压轴承的电主轴,可作为独立部件销售;瑞士

IBAG 公司,在其电主轴部件上配备主轴轴向尺寸监测传感器,可与机床数控系统联结进行轴向尺寸补偿;永磁同步电动机的电主轴已问世,其转子为永久磁铁,不发热,解决了电主轴结构的最大负面效应——内装式电动机散热不良的问题。

1.4 国内电主轴技术现状

电主轴在我国的应用也较早,20 世纪 50 年代末 60 年代初就已经将电主轴应用于工业生产中,但多用于专用内圆磨床,如轴承、油泵和油嘴中的专用内孔磨床等。直到 90 年代中后期,由于市场需要,国内各科研单位或企业开始开发其他用途的电主轴,如印制电路板(PCB)钻床用高速电主轴、小型数控铣床用电主轴等。多年来,依次完成 DZ、2GDZ 系列数控磨床用电主轴、ZD 系列数控铣床用电主轴、CD 系列数控车床用电主轴、ZD 系列 PCB 行业钻、铣削用电主轴、M 系列高档管材旋辗用电主轴和 ED 系列高速离心机用电主轴等的研究与开发。我国生产的 PCB 行业用钻、铣削电主轴,转速达到 100 000r/min,为国内 PCB 行业数控机床所普遍采用,并且已经替代部分进口产品;生产的磨床用电主轴,最高转速达到 150 000r/min,为国内轴承行业和其他一些行业所广泛采用,有的已经在进口磨床(如汽车制造行业中加工生产等速万向节的德国 NOVEL 磨床)的改造中替代进口电主轴。

“九五”期间,我国研制出拥有自主知识产权的加工中心和数控铣床用内装式电主轴单元,转速 80 ~ 24 000r/min,功率 2.5 ~ 29kW,转矩 4 ~ 86N·m,其噪声低,振动小,松、拉刀结构可靠,且电主轴具有内冷功能,产品综合精度接近或达到同期国际水平。产品性能得到主机厂认可,并应用于许多台国产加工中心和数控铣床。此外,国内部分机床厂也应用户要求,在引进国外公司电动机定、转子配件和配套编码器、交流伺服驱动器的基础上,也研制出加工中心等数控机床用电主轴。内装式高速电主轴的开发极大地推动了国内加工中心、数控铣床、虚拟机床和数控车床的发展,为主机厂提供了广阔的选择余地,使国内相关的金属切削加工设备能选择优质的国产内装式电主轴单元作为主要功能部件,而价格仅为进口产品的三分之一左右,从而降低了国产数控设备的开发成本,增强了国产数控设备的竞争能力。

“九五”期间我国数控机床用电主轴技术发展很快,但国产电主轴在水平、种类、质量等方面,与国外先进国家相比还存在很大差距,高转速、高精度数控机床和加工中心所用的电主轴,主要还是从国外进口。如大连机床公司与德国阿亨大学共同研制开发的 DHSC500 高速加工中心,电主轴采用了德国 GMN 公司的产品;济南第二机床集团有限公司、常州多棱数控机床股份有限公司、宁江机床(集团)股份有限公司、秦川机床集团有限公司等的电主轴都采用了瑞士 IBAG

公司的产品。据有关资料显示,国产电主轴所占份额还不足国内市场总额的三分之一,远远不能满足日益发展的国内市场的需求。我国数控机床用电主轴单元技术与国际水平的差距,主要表现在以下几个方面:

(1) 电主轴的低速大转矩方面。

(2) 高速方面。

(3) 电主轴的轴承润滑方面。

(4) 电主轴的支承方面。国外采用的轴承有钢制轴承、陶瓷球混合轴承、全陶瓷轴承和流体动、静压轴承、磁悬浮轴承等,国内则多采用钢制轴承,近年来也采用陶瓷球混合轴承,但数量不多,研究不够,不能满足电主轴转速日益提高的要求。

(5) 其他与电主轴相关的配套技术方面。如主轴电动机矢量控制和交流伺服控制技术、精确定向(准停)技术、快速起动与停止技术等,国内仍然不够成熟,不能满足实际需要。

我国在高速主轴单元技术各项性能指标方面与国外相比差距较大,从而严重阻碍我国高速高精度数控机床的发展。我国中、高档数控机床既满足不了国内的需要,更无力在国际市场上竞争。近年来我国每年都要花费几十亿元人民币进口数控机床。还应注意,高速高精度数控机床的采购难度相当大。高速高精度机床的关键制造技术研究必须走自主创新的道路。陶瓷球轴承电主轴单元的出现,使数控机床的产品档次明显提高。如何在此基础上进一步提高机床主轴单元的加工精度、转速、功率和可靠性,赶超世界先进水平,是我国机械装备制造业的当务之急。

作为数控机床的关键功能部件,电主轴应进行规范化、系列化、标准化开发、设计与制造,不断提高电主轴的转速等技术性能指标和产品的质量及可靠性,使国产电主轴成为一个拥有自主知识产权,可供用户选择使用、批量生产、稳定供货的优质功能部件,进一步促进国产数控机床整体水平的提高。根据需求预测,2005年国内数控装备市场总容量约30 000~35 000台,中、高档市场年需求量12 000台,各种主机配套用电主轴(主轴单元)约为30 000~40 000根,市场需求旺盛。因此,解决影响电主轴性能和质量的关键技术问题,提高各种国产数控机床用电主轴的整体技术水平,缩短与国外先进国家之间的差距,逐步实现电主轴制造的专业化和产业化,从而提高国产加工中心等数控机床在市场上的竞争力,这对扩大国产数控机床的市场占有率和提高数控机床的总体质量有着十分重要的意义。

数控机床关键零部件(高速主轴、刀库、动力卡盘等)制造列入国家机械工业“十五”科技发展规划。高速、大功率电主轴单元技术的研究与应用,可以使我国数控机床的经济技术指标有较大幅度提高,如加工中心主轴转速从“九五”

末期的 8 000 ~ 12 000r/min 提高到 30 000 ~ 40 000r/min; 数控车床转速从 4 000 ~ 6 000r/min 提高到 8 000r/min; 生产线的生产节拍提高到 0.8 ~ 1.2min/件; 机床的可靠性指标有较大提高等。实现机床行业产品与技术结构的优化升级, 提高机床行业的技术创新能力, 培育新的经济增长点, 发展先进制造技术, 振兴我国制造业, 迎接新世纪的挑战, 这是建立强大工业国家的根本。

1.5 电主轴对高速加工技术及现代数控机床发展的意义

以高切削速度、高进给速度、高加工精度为主要特征的高速加工是当代四大先进制造技术之一, 是制造技术产生第二次革命性飞跃的一项高新技术。当今世界各国都竞相发展自己的高速加工技术, 并成功应用, 产生了巨大的经济效益。要发展和应用高速加工技术, 首先必须有性能优良的高速数控机床, 而数控机床性能的好坏则首先取决于高速主轴。

高速加工的主要优势是:

(1) 加工时间大幅度缩短, 加工节拍只有原来的 1/4, 这意味着一台高速机床可以代替 4 台普通 CNC 机床。

(2) 表面质量很高, 不用再进行比如打磨等表面处理工序。

(3) 零件可换性好, 有利于模具行业制造。

(4) 零件变形小, 可以加工很薄的零件。

(5) 从管理角度看, 高速机床的投资可以很快收回, 并能缩短交货期, 占地面积小, 人工数量可减少。

因此, 近年来高速加工技术发展十分迅猛, 在航空航天、汽车工业、模具加工和摩托车工业等工业生产中得到广泛应用。表 1-1 对高速加工与传统加工了进行比较。

表 1-1 高速加工与传统加工的比较

机床类别 技术参数	普通 CNC 机床	普通 CNC 机床带 HFK 快换电主轴	HSC 高速机床
刀具直径/mm	6	6	6
主轴转速/(r/min)	2 000	20 000	24 000
计算进给速度/(mm/min)	600	4 000	10 000
实际进给速度/(mm/min)	400	1 500	4 000
切深/mm	0.5	0.2	0.2
切宽/mm	0.5	0.2	0.2
切削速度/(mm ³ /min)	1 200	1 800	4 800
表面粗糙度/ μm	6	4.5	2.4
加工时间/h	9.42	6.28	2.36