

SHUJIAO GONGNENG BUJIAN XUANYONG

ZHIDAO SHOUCE

数控功能部件选用 指导手册

付承云 主编

马俊庆 赵顺利 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数控功能部件选用指导手册

主 编	付承云			
副主编	马俊庆	赵顺利		
参 编	姜怀胜	陈永龙	刘永强	张成义
	苏达智	李 薇	刘莲花	罗秀珍
	王浩钢	张秀兰	黄克敏	王向东
	刘明飞	李保伟		



机械工业出版社

前 言

随着我国国民经济的快速发展，数控机床的制造和使用越来越广泛，因而，与之配套的数控机床功能部件的性能、品种及规格也发展迅猛。为了使广大数控机床生产商和设计者以及维修人员，在研发、制造和维修数控机床时，能准确优化选配数控机床功能部件，以降低设计、制造、维修等成本，快速掌握数控机床相关功能部件的性能参数和使用特点，特编写了《数控功能部件选用指导手册》一书。

本书以大连高金数控有限公司研发制造的滚珠丝杠、线性导轨、主轴、刀塔和刀库等典型常用数控功能部件为例，详细介绍了数控功能部件的特点、功能、参数、选用计算、安装、调试、注意事项等专业知识，内容系统全面。

为了方便读者查阅，本书采用了按系统品种分别介绍并独立成章的编写方法，便于读者查阅。

本书是以“部件典型性、功能普及性”为宗旨，并在设计和生产实际经验的基础上形成的，特别适用于数控技术人员的选用指导和数控维修人员及操作工人的自学和培训。

本书由付承云任主编，马俊庆、赵顺利任副主编，陈永开主审。参加编写的人员有姜怀胜、陈永龙、刘永强、张成义、苏达智、李薇、刘莲花、罗秀珍、王浩钢、张秀兰、黄克敏、王向东、刘明飞、李保伟。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，真诚希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 数控机床功能部件的定义	1
1.2 数控机床功能部件的特点	1
1.3 数控机床功能部件的基本种类	2
1.4 国内外数控机床功能部件的现状与发展趋势	3
1.4.1 滚动直线导轨	3
1.4.2 滚珠丝杠	4
1.4.3 主轴	6
1.4.4 刀塔	10
1.4.5 刀库	10
1.4.6 数控系统	11
1.5 我国数控机床功能部件行业的历史使命	14
第 2 章 滚动直线导轨副	15
2.1 DGC 系列直线导轨副产品分类	16
2.1.1 滑座形式	16
2.1.2 导轨型式	17
2.2 选用流程	17
2.3 导轨精度等级	19
2.4 预紧力分类	19
2.5 精度选用	20
2.6 寿命与载荷	21
2.6.1 名词术语	21
2.6.2 寿命计算	23
2.7 计算实例	28
2.7.1 每个滑块载荷的大小计算	29
2.7.2 等效载荷的计算	30
2.7.3 静安全系数计算	31
2.7.4 每个滑块的平均载荷计算 P_{mn}	31
2.7.5 额定寿命 (L_n) 的计算	31

2.8 产品安装	32
2.8.1 常用安装形式	32
2.8.2 导轨固定方式	33
2.8.3 导轨安装基准表示方法	34
2.8.4 安装基面平行度要求	35
2.8.5 安装基面台肩高度及倒角	35
2.8.6 安装螺钉拧紧力矩	36
2.8.7 几种典型安装方式	37
2.8.8 安装精度检测方法	40
2.9 产品精度标准	40
2.10 润滑与防护	42
2.11 结构选型	43
2.11.1 非互换性产品编号规则	43
2.11.2 互换性产品编号规则	44
2.12 DGC 系列直线导轨副的类型	44
2.12.1 LBB 系列滚珠直线导轨副	44
2.12.2 LBZ 系列自润滑滚珠直线导轨副	53
2.12.3 LBD 系列低组装紧凑型滚珠直线导轨副	62
2.12.4 LBA 系列高密封滚珠直线导轨副	68
2.12.5 LBAZ 系列高密封自润滑滚珠直线导轨副	77
2.12.6 LRB 系列滚柱直线导轨副	85
2.12.7 LRZ 系列自润滑滚柱直线导轨副	93
2.12.8 高防锈高耐蚀系列滚动直线导轨副	103
2.13 产品选用需求表	104
2.14 关键设备与品质保证	105
第3章 主轴	108
3.1 主轴系列产品的特点	108
3.2 主轴系列产品命名规则	109
3.3 主轴产品分类	110
3.3.1 机械主轴	110
3.3.2 电主轴	123
第4章 滚珠丝杠副	128
4.1 基本特点	128
4.2 滚珠丝杠副精度及安装基面精度	129
4.2.1 滚珠丝杠副导程精度	129
4.2.2 滚珠丝杠副安装基面的形状位置公差	130

4.3 滚珠丝杠副预紧力计算	134
4.4 丝杠常用规格	134
4.5 订购方法	135
4.6 代号含义及实例	135
4.7 使用注意事项	136
4.8 高性能滚珠丝杠副	137
4.8.1 高速精密低噪声滚珠丝杠副	137
4.8.2 中空内冷滚珠丝杠副	138
4.9 滚珠丝杠副设计计算及选用	138
4.9.1 确定滚珠丝杠副的导程 P_h	140
4.9.2 允许载荷和转速的计算	140
4.9.3 确定预期额定动载荷	140
4.9.4 确定滚珠丝杠副的轴径 d_{om}	141
4.9.5 确定滚珠丝杠副的规格代号	144
4.9.6 确定预紧力	144
4.9.7 计算行程补偿值和拉伸力	144
4.9.8 选择轴承规格型号	145
4.9.9 设计所需滚珠丝杠副方案图样	145
4.9.10 计算传动力矩, 选择电动机	145
4.9.11 传动系统的刚度计算	147
4.9.12 校验刚性及精度选择	149
4.9.13 临界压缩载荷的校验	150
4.9.14 校验极限转速	150
4.9.15 校验 $D \times n$ 值	151
4.9.16 验算基本轴向额定静载荷	151
4.9.17 验算强度	151
4.9.18 计算举例	151
4.10 选型表	156
4.10.1 DGC—GB 系列	156
4.10.2 DGC—GZ 系列	158
4.10.3 DGC—DGD 系列	160
4.10.4 DGC—DGZ 系列	162
4.10.5 DGC—GD 系列	164
4.10.6 DGC—CBT 系列	167
4.10.7 DGC—CDT 系列	169
4.10.8 DGC—CBM 系列	171

4.10.9 DGC—CDM 系列	173
4.10.10 DGC—WGZI 系列	175
4.10.11 DGC—WGZ 系列	177
4.10.12 DGC—DCT 系列	178
4.10.13 DGC—GZI 系列	179
4.11 关键加工设备	181
第5章 刀库和刀塔	182
5.1 刀库	182
5.1.1 刀库产品分类及主要功能特点	182
5.1.2 DL 系列斗笠式刀库	183
5.1.3 YP 系列圆盘式刀库	190
5.1.4 LS 系列链式刀库	201
5.1.5 伞形刀库	211
5.1.6 同步打刀圆盘式刀库	212
5.1.7 分离式链式刀库	215
5.1.8 折返式链式刀库	216
5.1.9 大型链式刀库	220
5.2 刀塔	222
5.2.1 刀塔产品分类及主要功能特点	222
5.2.2 DTY 系列液压凸轮刀塔	222
5.2.3 LGDTY180 轮毂刀塔	247
5.2.4 DTS 伺服刀塔	255
5.2.5 DTSA 伺服动力刀塔	270
5.2.6 DTSR 伺服动力刀塔	291
5.2.7 DTFAY 带 Y 轴液压分度马达动力刀塔	311
第6章 电动分度盘	322
6.1 概述	322
6.2 FD125 电动分度盘结构	322
6.3 工作原理	323
6.4 FD125 电动分度盘主要技术参数	323
6.5 FD125 电动分度盘外形尺寸	324
6.6 FD125 电动分度盘电气部分	324
6.7 FD125 电动分度盘精度检验	325
6.8 FD125 电动分度盘型号说明	326
6.9 电动分度盘使用的注意事项	326

第 1 章 概 述

数控机床的发展对构成数控机床的功能部件提出了更高的要求。同时设计者和使用者也应该对数控机床功能部件有更深刻的了解，以便在设计时方便选用。

1.1 数控机床功能部件的定义

数控机床功能部件就是在数控机床中可实现特定功能的部件或单元。功能的通用性与结构的完整性是数控功能部件的重要特征。数控机床功能部件可用于不同的机床，也用于其他数控设备，这些部件可单独更换和调整，如数控系统（NC 单元、伺服单元、伺服电动机）、滚珠丝杠、滚动直线导轨、主轴、刀塔、刀库、数控旋转工作台和动力卡盘等。

1.2 数控机床功能部件的特点

与机床部件或附件相比，数控机床功能部件具有以下特点：

1) 这些部件各自功能的集合决定了机床的功能、精度与性能，不是可有可无的选配附件。

2) 产品具有广泛的通用性，如滚珠丝杠、直线导轨、主轴及电主轴，不仅在数控机床领域得到了广泛的应用，而且在传统机床、工程机械、物流系统、航空航天、医疗器械和电梯等领域也得到了广泛的应用。

3) 这些产品自成体系，功能可靠，性能优良，选用简单，更换快捷，为数控机床的制造与维修提供了方便。如滚动直线导轨是可以按照标准产品选择从而满足数控设备设计要求的独立产品。滚珠丝杠、刀库和主轴则以关键技术为依托，可根据客户要求提供量体裁衣式的产品服务。

4) 功能部件领域在专业化发展过程中形成了大量的专利技术与制造诀窍。如滚动直线导轨领域，先后产生过多达 400 多项的专利技术。而日本 FANUC（法那科）、德国 SIEMENS（西门子）的数控系统，德国 GMN 公司、瑞士 IBAG 公司的电主轴，日本 THK 公司、日本精工株式会社（NSK）及德国 REXROTH（力士乐）公司的滚珠丝杠与直线导轨，意大利迪普马（DUPLO-MATIC）公司的刀塔等功能部件，凝结了各自研发者多年的心血，形成了各自的核心技术。

5) 功能部件的经济价值一般占数控机床的 40% 以上, 在中高档机床方面, 则达到 70% 以上。

1.3 数控机床功能部件的基本种类

数控机床功能部件主要包括: 主轴、滚动功能部件、数控转台、刀塔、刀库、回转液压缸及动力卡盘和数控系统等。

(1) 主轴 主轴是加工中实现机床主运动的部件, 包括机械主轴和电主轴以及以此为基础演变的立卧复合铣头; 立卧可转换铣头; 用于机床第四、第五数控运动轴进行空间型面连续加工的摆动式 AC 轴; 镗削类机床用的各种可伸缩轴等。

(2) 滚动功能部件 滚动功能部件是使工件或刀具实现坐标运动的运动支撑与传动单元。通常包括滚动直线导轨副与滚珠丝杠副、滚动花键等。

1) 滚动直线导轨支撑机床运动部分及工件的重量, 同时保证运动坐标的直线性精度。

2) 滚珠丝杠实现运动过程中的动力传递及运动位置确定。

3) 滚动花键是带轴向移动功能的运动副传递动力时的首选。

(3) 数控转台 数控转台是使工件实现圆周分度或空间旋转运动的部件, 分为实现机床第四轴数控联动的单轴数控转台与实现机床第四、第五数控轴的复合转台。A/B 复合转台是实现五轴联动加工的核心单元。

(4) 刀塔 刀塔是车削类数控机床的自动刀具交换装置, 包括液压凸轮刀塔, 液压分度马达刀塔, 伺服刀塔, 可使刀具旋转以便进行钻、铣类加工的动力刀塔(轴向及径向加工), 可进行平面加工的带 Y 轴的动力刀塔和可完成斜孔加工的带 B 轴的动力刀塔等。

(5) 刀库 刀库是铣削类数控机床的刀具自动交换装置, 包括由主轴进行换刀的斗笠式刀库和伞形刀库, 通过自动刀具交换装置(ATC)换刀装置实现刀库与主轴之间的刀具交换的圆盘式刀库, 大型多功能机床用的刀具固定在“运动链条”上的链式刀库, 刀具固定、ATC 换刀装置移动的塔形刀库和货柜式刀库。

(6) 回转液压缸及动力卡盘 数控车床以及工件高速回转类机床用的回转液压缸及动力卡盘是以液压为动力、用于工件自动卡紧的装置。

(7) 数控系统 数控系统是实现并控制数控机床实现各种运动及功能的核心部件, 被誉为数控机床的中枢神经, 包括数控单元、伺服电动机、伺服主轴电动机和驱动单元。

1.4 国内外数控机床功能部件的现状与发展趋势

1.4.1 滚动直线导轨

1. 国内外产品的现状

世界上生产滚动直线导轨的著名厂商有日本的 THK 公司、NSK（精工株式会社）、IKO 轴承公司及德国的 REXROTH 公司、INA 公司、瑞士 Schneerberger（施奈博格）等公司。这些公司的产品代表了世界最高水平，其中以日本 THK 公司为代表的日本公司做工精细，结构灵巧，运动速度高，在中高端市场有极强的竞争力。以 INA 公司为代表的德系产品则设计严谨，制作精细，在承载能力、减振等方面独具匠心，其中 REXROTH 公司的高精度、重载互换性产品显示了该公司精湛的制造水平与严格的检验水平。德系产品在高精度、大载荷数控机床领域已占得先机。

国内滚动直线导轨的发展已走过 24 个年头，主要厂家有陕西汉江机床有限公司、南京工艺装备制造有限公司、济宁博特精工股份有限公司、广东高新凯特精密机械有限公司、大连高金数控集团有限公司等。

国内产品具有以下特点和不足：

1) 以钢球为滚动体的产品基本成熟，日、德产品逐步淡出。

2) 应用于大型数控机床的滚柱导轨发展迅速，各主要厂家投入大量资源进行研发，并陆续进入批量化生产阶段。

3) 绿色、环保产品受到了重视。大连高金数控集团推出了自润滑导轨，减少了润滑油带来的污染。

4) 高速静音导轨不断推出。大连高金数控集团、南京工艺装备制造有限公司等厂家推出了带隔离链及减振结构的滚柱导轨，降低了运动噪声，提高了润滑效果，运动速度达到 100m/min。大连高金数控集团的产品在重型卧式加工中心及龙门加工中心机床中得到了应用。

5) 与国外相比，产品研发能力比较单薄，实验装置几近空白，院校结合的研究机制起步较晚。产品验证机制的薄弱直接影响了中高端产品的发展进程及推广速度。

6) 与国外产品相比，在运动精度方面，尤其是关键精度，国内产品与国外产品不相上下，甚至高于国外。但受到原材料限制及系统的试验手段的不足，导致了产品性能指标难以提升，使得产品在噪声、稳定性等方面略显不足。

7) 产品外观、倒角、粗加工面的处理水平较低，影响了国内产品的推广力度乃至经济效益，尤其是在出口方面。

2. 滚动直线导轨的发展趋势

(1) 规格不断延伸 随着滚动直线导轨应用领域的不断扩大,产品规格得到了充分扩展。如日本 THK 公司在 2009 年的欧洲机床展上推出的导轨最小规格为 LWL1,导轨宽度仅 1mm,最大规格导轨宽度达 250mm,可用于港口机械。

(2) 承载能力不断加大 为了提高产品的承载能力,各公司大力发展滚柱导轨。如日本 THK 公司的 250 滚柱导轨,单只滑座的承载能力达到了几十吨,可用于港口装载机械与高层建筑物的减震系统。为了满足小型机械高刚性要求,日本 IKO 轴承公司则推出了 15 规格的滚柱导轨。德国 INA 轴承公司的产品还配置了液压夹紧机构,以提高运动副接触刚性。

(3) 运动速度不断提高 随着高速数控机床的发展,要求工作台的移动速度达到 120m/min,而随着直线电动机等高速驱动技术的发展,要求导轨的运动速度可达到 150m/min 甚至 200m/min 以上,日本 THK 公司和精工株式会社 (NSK) 开发出了速度为 250m/min 的产品。

(4) 静音导轨 随着运动速度的不断提高,对导轨的振动与噪声性能提出了更高的要求。各公司均推出了高速静音导轨,滚动体循环系统设置了隔离链,兼有减振、降噪声及润滑功能。反向密封系统配置了减振机构,循环内设置了降噪声通道。INA 的产品则配置了阻尼系统,有效地降低了振动。

(5) 环保产品层出不穷 为了提高润滑效果,提高润滑液的利用率,THK、NSK 公司推出了自润滑导轨,利用经过处理的树酯材料制成自润滑装置,可保证 2 年使用期或运行 5 万 m 的润滑效果。

1.4.2 滚珠丝杠

1. 国内外产品的现状

随着数控机床高速、精密、环保的发展需求,滚珠丝杠副得到了前所未有的发展,国外企业不断加大对滚珠丝杠副的研究力度,并取得了显著的成果。主要表现在以下方面:

(1) 高速丝杠 从近两年机床展会上可以看到,很多企业研制的高速丝杠的速度是十几年前的 2~3 倍,如日本精工株式会社 (NSK) 的 BSS 系列的 DN 值达到 22 万, HMD 系列 DN 值达到 16 万;日本 THK、西班牙 KORTA、SHUTON 产品的 DN 值也达到 22 万;而加速度已经能达到 1.5~2g 的水平。

(2) 重载丝杠 NSK、THK、SHUTON、REXROTH 采用新的工艺方法,将基本额定动载荷在原来的基础上提高了 25%。各厂家通过结构优化设计提高载荷,如 NSK 的 HTF-SRC 系列、THK 的 HBN 系列。

高速加上重载催生了滚珠丝杠副在注塑机上的重要应用,注塑机利用伺服电动机和高速重载滚珠丝杠副,效率能达到 90% 以上。电动式注塑机目前最大规格

做到了1000t。现在日本电动式注塑机已占到注塑机总量的75%以上,电动式注塑机已是制造业绿色化的一个典范,发展前景看好。

(3) 大型丝杠 大型及超大型滚珠丝杠副近两年可谓屡见不鲜,西班牙 KORTA 公司生产的直径 $\Phi 225\text{mm}$ 的滚珠丝杠副长度达20m。

(4) 绿色环保丝杠 滚珠丝杠副的低噪声、长期免维护一直是业内人士追求的目标。在这方面有很多厂家推出了球保持器和自润滑装置,如日本 NSK、THK 公司等。在使用了球保持器后,噪声可在原来基础上降低8~10dB(A)。根据 THK 样本介绍,自润滑装置可保证10000km 直线行程的润滑。

(5) 双驱动丝杠 为了满足机床高刚性、高效率需求,NSK 采用特殊的工艺方法,制造出了双驱动滚珠丝杠副,螺纹长度为1200mm 的两根丝杠,相互累积导程偏差不超过0.005mm。

(6) 个性化产品 针对各行各业不同的要求,特别是针对一些特殊行业,如化工机械、木工机械、航空航天、包装机械、机器人、铁路等,滚珠丝杠生产厂有针对性地开发出了许多新产品,如 NSK 开发的木工机械用高防尘系列产品,防尘效果十分显著。THK、NSK 生产的防锈丝杠,可在化工、液晶制造等环境下使用。

国内大陆地区的制造企业生产滚珠丝杠副经过50多年的发展,也取得了较大的成就,尤其最近5~10年,设计和制造工艺都有了突飞猛进的发展。

国产高速滚珠丝杠副不断崭露头角。北京机床研究所开发的高速丝杠副 DN 值可达12万,加速度为1g。南京工艺装备制造有限公司开发的 DK 系列滚珠丝杠副 DN 值达到16万。大连高金数控集团生产的三维管系列和端面返向系列的 DN 值达到16万,高速重载滚珠丝杠副(型号: CW8016—10.5) DN 值达到16万,额定动载荷 C_d 可达460kN,静载荷 C_{0a} 可达1868kN。

从返向器的种类来看,从最早的单一内循环和插管式外循环发展到现在,呈现出了多样化的特点,而且性能也在不断地优化。如大连高金数控集团开发的三维管、端面返向器、挡珠器循环结构、内循环阵列式返向器,深圳威远精密技术有限公司开发的耳式返向器,山东济宁博特精工股份有限公司开发的引桥式返向器和端面返向器,南京工艺装备制造有限公司开发的端面返向器等。返向器的材料更是从最早的45钢发展到现在的工程塑料和不锈钢粉末冶金等。

国内大陆地区的滚珠丝杠副的制造工艺近两年也在逐渐地向国际先进水平靠近。近两年,大陆地区的企业纷纷引进国外先进制造技术,很多企业如大连高金数控集团、山东济宁博特精工股份有限公司、南京工艺装备制造有限公司从德国进口了高速旋风铣床。该铣床的应用大大提高了丝杠螺纹的加工效率,1m 长的4010规格丝杠螺纹加工时间仅为11.37min。大连高金数控集团还从日本引进了大导程内螺纹磨削技术,可以磨削螺旋角为 $17^{\circ}39'$ 的螺母。此外,滚珠丝杠制造工艺

方面还有很多自主创新,如北京科技大学采用金属注射成型的方法来制造返向器,这种方法接近国际先进水平。另外,山东济宁博特精工股份有限公司与山东大学合作的“激光反馈螺纹磨床误差补偿系统的智能 PID 控制”技术也具有较高的水平。

中国台湾地区的制造企业如 HIWIN 公司、ABBA 公司等具有相当先进的制造水平,其中 HIWIN 公司的重载荷型丝杠的承载能力是普通丝杠的 2~3 倍。

2. 滚珠丝杠发展趋势

纵观各国滚珠丝杠副现状,可以判断出今后滚珠丝杠发展趋势如下:

1) 高速、重载、低噪声、低温升、自润滑和高可靠性是滚珠丝杠副发展的主要方向。

2) 特殊行业用滚珠丝杠副,如在木工机械、医疗机械、食品机械、真空环境、核电、铁路、机器人等行业的应用是滚珠丝杠副发展的重要方面。

3) 新工艺、新材料是滚珠丝杠副进一步发展的保障,如丝杠的冷轧技术、材料的稳定性及材料热处理等。

1.4.3 主轴

主轴包括机械主轴和电主轴,还可分为一般主轴和高速主轴。

1. 国内、外产品现状

(1) 机械主轴 机械高速主轴是数控机床高精度、高速度、高刚性发展的核心。一般来说,主轴转速达 8000r/min 以上称为高速主轴。

国外主轴制造商以生产电主轴为主,机械主轴产品成系列的不多。

中国大陆机械主轴生产厂商较多,厂家基本上都在同一起跑线上。这其中有许多是企业内部配套的,如沈阳机床集团、北京北一数控机床有限责任公司、北京机电院高技术股份有限公司、汉川机床厂、大河机床有限公司、青海一机数控机床有限责任公司等。专业生产机械主轴的有大连高金数控集团、山东济宁博特精工股份有限公司、安阳莱必泰机械有限公司、江苏星晨高速电机有限公司等厂家,其产品相关技术指标基本相同,产品规格各有侧重。而中国台湾地区主轴生产企业更注重市场导向,以制造满足用户要求的产品为特点,具有较高的市场适应能力,其产品也集中在市场需求量大的领域。如中国台湾旭泰精密机械股份有限公司、中国台湾罗翌科技股份有限公司、中国台湾盛钰精密机械有限公司、中国台湾台达电子工业股份有限公司、中国台湾数格科技股份有限公司等公司均有这些特点。

(2) 电主轴 目前,国外从事高速数控机床电主轴研发与生产的企业主要有如下几家:德国 GMN 公司、SIEMENS (西门子) 公司、瑞士 IBAG 公司、美国 Setco 公司、意大利 Omlet 公司、FAEMAT 公司、Gamfior 公司、日本 OKUMA (大

限)株式会社等,其中GMN公司、IBAG公司、Omlet公司、Setco公司、Gammfier公司等几家公司的技术水平代表了这个领域的世界先进水平。这些公司生产的电主轴较之国内产品有以下几个特点:

1) 功率大、转速高。采用高速、高刚度轴承。国外高速精密主轴上采用高速、高刚度轴承,主要有陶瓷轴承和动静压轴承,特殊场合采用空气润滑轴承和磁悬浮轴承。

2) 精密加工与精密装配工艺水平高。

3) 配套控制系统水平高。包括转子自动平衡系统、轴承油气润滑与精密控制系统、定转子冷却温度精密控制系统、主轴变形温度补偿精密控制系统等。

在此基础上,美国、日本、德国、意大利和瑞士等工业发达国家已生产了多种商品化高速机床。如瑞士米克朗公司生产的机床配备最高达 60000r/min 的高速电主轴,电主轴装有恒温冷却水套对主轴电动机和轴承进行冷却,通过高压油雾对复合陶瓷轴承进行润滑,采用矢量控制技术,可以在低转速时输出大扭矩。

国内从事电主轴研究与生产的企业主要有大连高金数控集团、洛阳轴研科技股份有限公司等厂家。大连高金数控集团的产品集中于金属切削机床使用的高速、大扭矩、高刚性产品,最高转速 24000r/min ,最大功率 35kW ,最大扭矩 $400\text{N}\cdot\text{m}$ 。

国产电主轴目前处于对国外产品的消化与吸收阶段,从研发水平、制造水平与配套水平各方面和国外产品相比较,主要存在以下差距:

1) 在电主轴的低速大转矩方面,国外产品低速段的输出转矩可以达到 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 以上,有的更是高达 $600\text{N}\cdot\text{m}$ (如德国CYTEC公司),而国内目前则多在 $100\text{N}\cdot\text{m}$ 以内。

2) 在高速方面,国外用于加工中心电主轴的转速已经达到 75000r/min (意大利CAMFIOR公司),而我国则多在 20000r/min 以下。其他用途的电主轴,国外已经达到了 250000r/min (英国WestWind公司D1733),而我国电主轴的最高转速为 150000r/min 。

3) 在电主轴的润滑方面,国外高速电主轴轴承已经普遍采用先进的油气润滑技术,而我国则仍然以油脂润滑和油雾润滑为主。

4) 在电主轴的支承技术方面,国外已经有动静压液(气)浮轴承电主轴(瑞士IBAG公司等)、磁浮轴承电主轴(瑞士IBAG公司等)的成熟商品,我国则仍然处于科学研究或小批量试制之中。

5) 在相关配套技术方面,如电主轴内装电动机闭环矢量控制技术、交流伺服技术、停机角向准确定位(准停)技术、C轴传动技术、快速启动与停止技术、HSK刀柄制造与应用技术和主轴智能监控技术等,国内仍然不够成熟,或不能满足实际应用需要。

6) 在产品的品种、数量及制造规模方面,尽管国内已经有部分企业在从事电

主轴的研究和制造,但仍然以磨床用电主轴为主,对于数控机床用高速电主轴,则仍然处于小批量开发和研究阶段,与国外先进水平相比,远远不能满足国内市场日益增长的需要,更不具备与国外产品相抗衡的能力。

7) 在关键部件的研发上,欧美公司具有很强的前瞻性和创新能力,国际上涉及电主轴的,例如编码器系统、刀具接口和电动机工作制等的国际标准和产品,都是欧美相关企业制定和生产的,这是它们最具有优势的地方。

2. 国内外产品发展趋势

(1) 机械主轴 现阶段,国际机床市场的发展越来越向重型化、复合化、高速化发展,其中复合化的发展速度非常惊人。2009 年米兰 EMO 机床展会中,在龙门加工中心和大型镗铣加工中心中,机床的各种复合加工头体、专业加工头体已经较为普遍,其中包括各种可自动交换的两坐标摆动主轴头、实现五面体加工机床的卧式主轴头体,各种加长卧式主轴头体,各种加长立式主轴头体等,使同一台机床通过自动交换各种不同功能主轴头体的功能,完成多种零件的加工,充分体现出大型加工中心的复合化特点。

对于复合铣头,我国的航空航天、汽车、柴油发动机等行业目前急需进行设备的更新换代,而他们需要的关键设备有相当一部分需要从国外进口,尤其是带有自动换头的多功能龙门加工中心、落地镗铣类加工中心。而这一类设备长期受到国外发达国家的进口限制,且性能参数也一般,使我国的航空航天等行业的发展受到很大的制约。所以开发、制造拥有自主知识产权的可交换复合铣头,装备我国的高档机床制造业已经迫在眉睫。

(2) 电主轴

1) 继续向高速度、高刚度方向发展。随着主轴轴承及其润滑技术、精密加工技术、精密动平衡技术、高速刀具及其接口技术等相关技术的发展,数控机床用电主轴高速化已成为目前发展的普遍趋势。如钻、铣用电主轴,瑞士 IBAG 公司的 HF42 电主轴的转速达到 140000r/min ,英国 WestWind 公司的 PCB 钻孔机电主轴 D1733 更是达到了 250000r/min ;对于加工中心用电主轴,瑞士 FISCHER 公司的产品最高转速达到 42000r/min ,意大利 CAMFIOR 公司的达到了 75000r/min 。在电主轴的系统刚度方面,由于轴承及其润滑技术的发展,电主轴的系统刚度越来越大,满足了数控机床高速、高效和精密加工发展的需要。

2) 向高速大功率、低速大转矩方向发展。根据实际使用的需要,数控机床需要同时能够满足低速粗加工时的大切削量切削和高速切削时精加工的要求,因此,机床电主轴应该具备低速大转矩、高速大功率的性能。如意大利 CAMFIOR 公司、瑞士 Step-Tec 公司、德国 GMN 公司等制造商生产的加工中心用电主轴,低速段输出转矩达 $200\text{N}\cdot\text{m}$,德国 CYTEC 公司的数控铣床和车床用电主轴的最大转矩更是达到了 $630\text{N}\cdot\text{m}$;在高速段大功率方面,CYTEC 公司的电主轴的最大输出功率为

50kW；瑞士 Step-Tec 公司的电主轴的最大功率更是达到 65kW。

3) 进一步向高精度、高可靠性和延长工作寿命方向发展。用户对数控机床的精度和使用可靠性提出了更高的要求，这样对电主轴的精度和可靠性的要求越来越高，如主轴径向跳动要在 0.001mm 以内、轴向定位精度要达到 0.0005mm 以下。同时，由于采用了特殊的精密主轴轴承、先进的润滑方法以及特殊的预载荷施加方式，电主轴的寿命相应得到了延长，其使用可靠性也越来越高。瑞士 Step-Tec 公司的电主轴则加装了加速度传感器，安装了振动监测模块，以延长电主轴的工作寿命。

4) 电主轴的内装电动机性能和形式多样化。为满足实际应用的需要，电主轴电动机的性能得到了改善，如瑞士 FISCHER 主轴电动机输出的恒转矩高转速与恒功率高转速之比（即恒功率调速范围）达到了 1:14。永磁同步电动机的出现，提高了功率密度，满足了电主轴小尺寸、大功率的要求。

5) 向快速起、停方向发展。为缩短辅助时间，提高效率，要求数控机床电主轴的起、停时间越短越好，因此需要很高的起动和停机加（减）速度。目前，国外机床电主轴的起、停加速度可达到 $1g$ 以上，全速起、停时间在 1s 以内。

6) 轴承及其预载荷施加方式、润滑方式多样化。除了常规的钢制滚动轴承外，近年来，陶瓷球混合轴承得到了广泛的应用。润滑方式有油脂、油雾、油气等。由于油气润滑方法，具有适应高速、环保节能的特点，得到越来越广泛的推广和应用。滚动轴承的预载荷施加方式除了刚性预载荷（又称定位预载荷）、弹性预载荷（又称定压预载荷）之外，又发展了一种智能预载荷方式，即可以根据主轴的转速、负载实际工作状况控制预载荷的大小，使轴承的支承性能更加优良。在非接触形式轴承支承的电主轴方面，如磁悬浮轴承、气浮轴承电主轴（瑞士 IBAG 等）、液浮轴承电主轴（美国 Ingersoll 等）等已经有系列商品供应市场。

7) 刀具接口逐步趋于 HSK、Capto 刀柄技术。高速机床由于离心力作用，传统的 BT/CAT (7:24) 刀柄结构已经不能满足使用要求。HSK 刀柄具有突出的静态和动态联接刚性，传递扭矩能力大、刀具重复定位精度高，特别适合在高速、高精度情况下使用。因此，HSK 刀柄接口已经广泛为高速电主轴所采用（如瑞士的 IBAG、德国的 CYTEC、意大利 CAMFIOR 等）。近年来，由 SANDVIK 公司提出的 Capto 刀具接口也开始在机床行业得到应用。

8) 向多功能、智能化方向发展。在多功能方面，有角向停机精确定位（准停）、C 轴传动、换刀中空吹气、中空通冷却液、轴端气体密封、低速转矩放大、轴向定位精密补偿、换刀自动平衡技术等。在智能化方面，主要表现在各种安全保护和故障监测诊断措施，如换刀联锁保护、轴承温度监控、电动机过载和过热保护、松刀时轴承卸载保护、主轴振动信号监测和故障异常诊断、轴向位置变化自动补偿、砂轮修整过程信号监测和自动控制、刀具磨损和损坏信号监控等。

Step-Tec 电主轴安装有诊断模块, 维修人员可通过红外接口读取数据, 识别过载, 统计电主轴工作寿命。

1.4.4 刀塔

刀塔产品的主要专业化厂家有德国 SAUTER 公司、意大利 DUPLOMATIC 公司和 BARUFFALDI 公司等, 产品品种及系列比较全面, 质量水平较高。从 2009 米兰欧洲机床展上看, 刀塔发展具有以下特点:

1) 伺服电动机作为刀塔选刀的动力, 刀盘可以连续旋转, 提高了选刀速度。力矩电动机驱动实现选刀与刀具双重驱动的刀塔成为展会的亮点。

2) 动力刀塔成为展会的主流产品, 以满足车铣复合机床的要求。

3) 刀塔的出刀方向多样化, 包括轴向(正、反向)及径向出刀, 满足了端面(前、后)、外圆的铣、钻加工以及双主轴机床的要求。

4) 刀塔的加工性能不断提高, 刀具的转速达到 12000r/min, 功率为 13kW, 扭矩为 30N·m。HSK 刀柄的应用提高了刀具的连接刚性。

5) 带 Y 轴与 B 轴的刀塔增大了刀塔的加工范围, B 轴可以实现斜面及斜孔的加工。

6) 储刀数量不断增多, 刀具呈双层布置, 可装刀 20 把以上。

中低档数控车床用的液压、电动刀塔主要的生产厂家有中国台湾地区的亘阳公司和六鑫公司。

烟台环球机床附件厂、常州亚兴等公司主要生产电动刀塔。大连高金数控集团有限公司生产各类刀塔, 主要有液压凸轮刀塔、电动刀塔、分度马达刀塔、伺服刀塔等产品系列, 在国内同类产品居中先进水平。该公司近年来新开发的产品还有全功能数控动力刀塔、带 Y 轴动力刀塔等高档刀塔及刀盘、刀座等多种附件, 致力于在产品可靠性、高速、精度水平、夹持承载能力、动态特性等方面的进步, 跟踪世界先进水平, 逐步替代进口产品, 满足数控机床高速发展的需要。

1.4.5 刀库

1. 国内外产品现状

德国 KTC 刀库系统公司可以针对不同款式的主机, 提供各种大型重载刀库。中国台湾地区的盛钰、德大、吉普、马特、纲豪等公司和印度 PRAGATI 等公司, 主要生产各种系列的斗笠刀库、圆盘刀库和链式刀库, 产品品种及系列比较全面。

我国大陆地区生产刀库的主要厂家有大连高金数控集团、呼和浩特众环有限责任公司等公司。大连高金数控集团有限公司生产各类刀库, 主要有斗笠刀库、圆盘刀库、链式刀库等系列产品, 满足 BT、JT、CAT、HSK 等不同刀柄需求。为