

面向航空制造的数控加工机床 主轴单元及其发展趋势*

Spindle Unit of NC Machine Tool in Aviation Manufacturing
and Its Development Trend

西安交通大学机械工程学院 章云 梅雪松



章云

西安交通大学机械工程学院博士研究生。研究方向为高速主轴动力学和旋转机械回转误差分析与控制。

航空科技是国际竞争的战略制高点。我国航空事业正处在飞速发展阶段：支线客机等现代化先进机型相继实现量产；大飞机等重大工程和重大专项陆续实施。

航空关键零件大多采用高强铝

* 国家 973 计划(2009CB724405)、国家 863 计划(2008AA042405) 资助项目。

随着我国航空制造业的高速发展,国内相关院所也开展了航空关键零件制造技术探索研究工作,而掌握主轴单元的核心技术,尽快提高国产高档数控机床整机性能,是航空制造行业的当务之急。

合金、钛合金等高性能材料;多采用整体结构,零件轮廓大型化,如新一代宽体飞机的起落架尺寸可达 6m;零件结构通常具有复杂的理论外形曲面,如整体叶轮叶型多为非可展扭曲直纹面,其相邻叶片空间最小 2.8mm,叶片最薄 0.8mm^[1]。总体来说,航空零部件具有尺寸大、形状复杂、材料难加工、精度和使役性能要求高等特点,其制造能力和水平体现了一个国家制造业的核心竞争力。

随着航空工业的不断发展,航空制造业对相关装备制造技术的要求越来越高。数控技术是航空先进制造技术的重要组成部分,航空零件的大型化、复杂化和材料多元化,迫切需求精准的数字装备以提高加工效

率和加工质量^[2-4]。高速主轴单元是现代高档数控机床的关键功能部件,数控机床要朝高速、高效、高精度加工方向发展,离不开主轴单元技术的提高。

航空制造技术的突破,需要有针对性地提升面向典型航空零件加工的数控装备技术。随着我国航空制造业的高速发展,国内相关院所也开展了航空关键零件制造技术探索研究工作,而掌握主轴单元的核心技术,尽快提高国产高档数控机床整机性能,是航空制造行业的当务之急。

航空制造业零件加工特点

航空制造一直是先进技术高度

密集的行业之一,航空产品的零部件形状和结构复杂、材料多种多样、加工精度要求非常严格。对于飞机结构零件,按照结构形式分类,一般可分为壁板、梁、框、肋、长桁等;按材料分类一般有钛合金、铝合金、结构钢、镁合金等;这些零件的毛坯形式一般有板材、型材、模锻件、自由锻、铸件等^[5]。航空产品零件的加工主要具有以下特点。

1 材料切除量大,需要高效加工

技术先进的现代飞机决定了飞机结构件必须强度高、刚度大、重量轻,这就必然导致要尽可能多的采用整体结构件,例如大型整体壁板、整体框等。

对于航空航天中大型复杂薄壁曲面的加工,如机翼肋板、阵列天线、波导管、挠性陀螺框架等大型薄壁件,极限壁厚可至 0.25mm,加工时 95%~97% 的材料被切除,机械加工工作量非常大。

2 零件结构复杂

航空制造业中的零件通常具有复杂的理论外形曲面、纵横交错的加强筋结构、厚度较小的薄壁结构等。航空发动机异型零件、飞机起落架是航空制造中的典型复杂零件。

航空发动机是飞机的“心脏”,其关键技术在于提高发动机的推重比,这就要求在提高发动机性能的同时,优化发动机的结构、降低发动机的重量。因此,各种结构复杂的发动机整体机匣、整体叶轮和叶盘等结构件以及各种复杂型面的叶片都成为发动机零件加工中的最大技术难点。

3 材料多元化,且多为难加工材料

由于航空工业的特殊需求,航空零件材料常以高强度铝合金、钛合金、高温合金、不锈钢、复台材料、蜂窝结构为主,且多数为难加工材料。

以飞机起落架为例,飞机落地时将承受飞机重量的 2~3 倍载荷,对起落架构件的抗冲击性、抗疲劳强度、

韧性等提出了严格的要求。因此,飞机起落架所要求材料 300M 钢的强度是民用船舶的 2~3 倍,是军用舰艇的 1.5 倍以上。

世界上大型飞机复合材料应用量越来越大,如波音 787 已达 50%,最新设计的 A350 上复合材料用量则达到了 52%。在我国,考虑到大飞机的经济性,以及与国外飞机的竞争力,大量应用复合材料已经成为大型飞机设计制造的发展趋势。

4 多采用整体结构,零件轮廓大型化

为满足航空结构件高强度、高刚度、轻重量的要求,在航空制造中必须大量采用整体框、梁、壁板等结构,零件的外廓尺寸越来越大,其中梁类零件长度通常在 1~12m 之间,框类零件轮廓尺寸最大可达 4m×2.5m^[6]。而且随着现代飞机性能的不不断提升,整体结构加工在现代航空产品制造中所占的比例快速增加,如现代大型飞机起落架主筒结构复杂,长度超过 2.5m,投影面积超过 2m²,材料去除率达 90% 以上,对内部微观组织要求严格,为了满足起落架高强度的需要,必须采用整体结构设计。

5 加工要求更为精密

现代飞机技术性能的提高,要求机载设备高度集成化、整体轻型化。发动机各种控制系统中的壳体、阀体、液压偶件、液压平板阀等关键零件以及一些光管零件,都具有尺寸小、结构复杂、精度要求高的特点,必须采用精密、超精密加工技术^[4]。

航空叶轮和面齿轮是高性能航空动力系统的零件,要能长期工作在极压、高温、高流速颗粒冲刷和干摩擦等极端工况下,其几何精度和表面微观形貌对压缩效率有直接影响,英国 Rolls·Royce 公司的研究表明:发动机转子叶片的加工精度由 60 μ m 提高到 12 μ m,表面粗糙度值由 $R_a0.5\mu$ m 减小到 $R_a0.2\mu$ m,则发动机的压缩效率将从 89% 提升到 94%。

航空制造业数控机床 主轴单元的特点

目前,数控技术在航空工业中的应用水平与工业发达国家相比差距很大,与当前和今后所承担的航空产品研制生产任务的需求也很不适应。这就对作为数控加工核心部分的主轴单元提出了更高的要求,面向航空制造的主轴单元主要具有以下特征。

1 高速性

随着切削速度的提高,切削力降低,加工效率可以提高 3~5 倍以上,切削力和切削热的影响也显著降低^[7]。同时,高速主轴切削速度越高,切削激励越远离机床的低阶固有频率,加工质量将得到显著提高,由此可达到高效率、高精度的完美结合,满足了航空制造中大型精密结构件的加工要求。此外,高速机床可切削硬度在 HRC45~65 的淬硬钢,避免了淬火变形,有利于航空零件中难加工材料的切削。因此,高速切削已是航空零件加工必然的发展趋势。高速切削技术已在美、日、德等发达国家的航空制造行业中得到广泛应用,并成为切削加工的主流,整体飞机结构件和航空发动机的主要构件(包括 α 型、 $\alpha+\beta$ 型和 β 型钛合金)已全部采用了高效切削加工技术^[8],例如,波音公司就采用高速切削加工飞机舱壁、机翼和飞机零件。表 1 为高速加工与传统加工在航空制造中的优势对比。

国际航空航天制造业中钛合金的切削速度达 60~240m/min,镍基合金的切削速度达 50~200m/min,铝合金精加工为 5000~7500m/min,铸铁精加工最高达 2200m/min,钢为 300~800m/min,淬硬钢(HRC45~65)精加工为 100~500m/min,模数为 1.5 的钢齿轮滚齿速度达 200~400m/min。目前已有主轴最高转速为 150000r/min、快速进给 120m/min、换刀时间 0.7~1.5s 的坐标磨削加工中心。国外高速机床主轴

表1 高速加工与传统加工在航空制造中的优势对比^[9]

典型零件	加工要求	传统加工	高速加工
F15 制动件	1600kg/ 50kg (500 个零件组成)	分体加工 工期 2 ~ 3 月	整体加工工期仅几天 节约 3 万美元
空客 A380 机翼肋板	尺寸 3.1m × 2m, 壁厚 1mm	工期 1 周	工期 1 ~ 2 天

转速为 20000~250000r/min, 功率为 10~40kW。

第 41 届 CIRP 会议上发表了不同材料的切削速度范围, 可以说, 目前各国的切削速度尚未达到 CIRP 所界定的超高速切削阶段。而超高速切削代表了机床高效、高精度、高柔性的发展方向, 必将成为面向航空制造的高档数控机床的发展主流。

2 高刚度, 高速大功率, 低速大扭矩

对于航空产品中的钛合金、高温合金、不锈钢等难加工材料, 材料变形屈服极限高、切削变形抗力大。因此, 在加工钛合金、耐热合金等难加工材料时, 要提高金属的切除效率, 必须选用高刚度、大扭矩、大功率的主轴系统, 在航空制造业中, 主轴功率通常为几十 kW, 扭矩最高可达上千 N·m。

为了满足航空制造业以及国防的需要, 国家“十一五”重大科技项目第二批计划中把加工中心电主轴的开发目标定位在大功率、高刚度上, 主轴转速为 40000r/min 时, 要求恒功率为 20kW; 主轴转速为 20000r/min 时, 要求恒功率为 50kW^[10]。

目前, 国外 GMN 电主轴扭矩可以达到 1250N·m, 恒功率输出为 150kW。国内大功率电主轴仍然主要依赖进口。国内大连高金与 IBAG 合作, 生产出的高速主轴扭矩可达 260N·m, 在第十一届中国国际机床展览会中, 洛阳轴研所展出的电主轴扭矩达到 620N·m。

3 高精度

主轴系统是高精度加工中心的核⼼部件, 它包括主轴、轴承及支撑主轴和轴承的主轴箱体等。精密数控机床的加工精度很大程度上受主

轴系统的几何精度、静态和动态刚度及热性能的影响, 因此, 电主轴精度指标直接关系到被加工零件的几何精度和表面粗糙度。

主轴精度的提高与所采用轴承支撑形式布局具有直接关系。采用滚动轴承时, 主轴回转精度一般在微米级, 而且由于陶瓷球和滚道制造的误差, 在高速运动状态下球轴承很难实现高精度; 采用磁悬浮轴承, 主轴回转精度可达 0.2μm, 但磁悬浮轴承因为绕组发热等因素, 难以实现高刚度, 空气静压轴承虽然精度较高, 但也同样存在刚度不足的问题。因此, 世界各国热衷于采用的液体动静压滑动轴承作为主轴支撑方式, 它能使主轴的回转精度保持在几十纳米, 且在高速下抗振性能良好。

除了合理配置轴承支撑方式外, 也可通过补偿技术来提高主轴的精度, 瑞士 IBAG 公司在其电主轴部件上配备轴向尺寸监测传感器, 可与机床数控系统联合进行轴向尺寸的补偿^[11]。法国优龙机床公司在主轴内部配置了电子检测装置, 自动启动冷

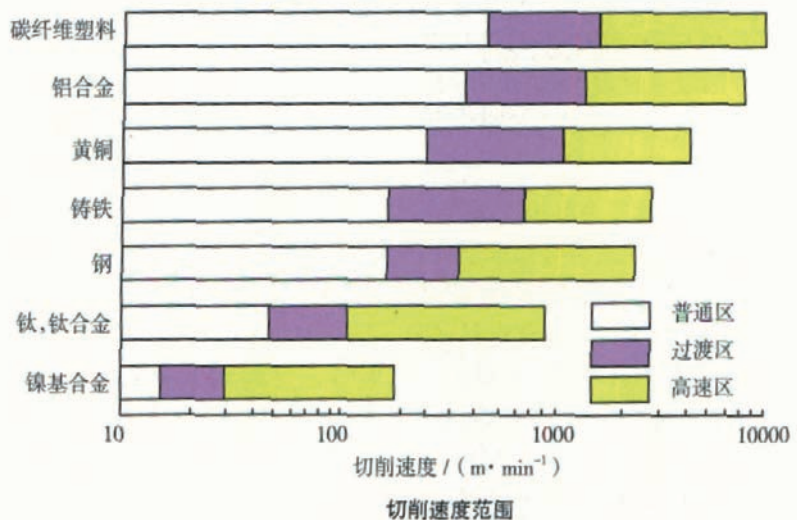
却单元来控制温度变化, 调整间隙和主轴轴承伸长量, 使得加工后的零件表面轮廓精度提高一级^[12]。

高速主轴关键技术

我国宣布大飞机计划之后, 西方发达国家对我国高性能机床的进口和先进加工技术的合作实行新一轮限制。因此, 获得具有自主知识产权的高速加工关键技术和装备的工作日益紧迫。当前, 主轴单元面临的难点主要在于高精密轴承以及高精度自动平衡技术。

1 主轴单元高速精密轴承技术

高刚度、高精度、长寿命的轴承不仅是主轴的核⼼基础件, 在航空、航天、国防等装备制造中也有重要意义。国内外用于高速机床主轴轴系的轴承主要有: 陶瓷球轴承、静压轴承、动静压轴承、气浮轴承、磁悬浮轴承等。其中陶瓷球轴承的寿命最多只有数千小时, 这是高速切削技术应用的一大制约。国产陶瓷球轴承的转速仅达到 2000r/min, 且只能承受轻负载; 气浮轴承、磁悬浮轴承可以满足高转速要求, 可以在较高转速下运行上万小时, 但其主轴的支撑刚度较低, 难以承受冲击切削力, 不能适用于铣削等冲击切削负载的场合; 静压轴承抗过载能力低; 动静压轴承则综合了动压与静压轴承的优点, 它所具有的高承载力、高刚度及长寿命是其



他轴承无法比拟的,其 DN 值已经达到了 4×10^6 ,属超高速的范畴,而且动静压混合轴承性能仍有很大的提升空间,是面向航空制造超高速机床最具竞争潜力的主轴支承形式。

国内在 80 年代开始关注动静压轴承,建立了动静压混合轴承的数学模型。近年来西安交大轴承研究所全面研究了低粘度动静压轴承性能的数学模型^[13-44],分析了动静压混合润滑轴承热瞬态润滑特性。此外,国内还有许多研究者对动静压轴承进行了比较广泛的理论与试验研究,取得了大量的研究成果^[15-17]。

2 高速主轴的高精度控制技术

高速精密主轴的不平衡控制要求比普通转子严格得多,主要体现在:主轴的振动量要求控制在 $1 \mu\text{m}$ 以下,而主轴工作转速往往又超过系统一阶临界转速;高速主轴系统支承在液体润滑薄膜之上,转子的微小不平衡将可能导致回转精度的严重丧失;主轴系统还要受到换刀、切削力激励以及主轴刀具系统受热变形和高速旋转离心力等复杂工况干扰。以上因素使得超高速机床主轴系统的稳定性控制受到空前挑战,因此,有必要提出精准高效的高速旋转柔性主轴在线动平衡方法,实现高速主轴不平衡控制。

(1) 在线动平衡控制理论。

早期的柔性转子动平衡方法是由西德 Federn 提出的,后称为振型平衡法或模态平衡法^[18],该方法高速平衡时启动次数相对较少,有较高的敏感性。后来美国 Goodman 正式提出了影响系数法^[19],其最大优点是可以采用电子计算机辅助动平衡,不受支承特性影响,可同时平衡几阶振型。但是,基于传统的动平衡算法平衡质量和位置的计算精度低,需要多次试配重,难以满足超高速主轴系统动平衡在精度和速度上的严格要求。

近年来出现了转子无试重平衡、低速平衡等新技术^[20-21],较好地实现

了不平衡故障的确诊以及平衡策略的决定。以国内为例,1995 年,浙江大学王群峰、汪希萱在影响系数法的基础上,提出了无试重辨识方法^[22];2002 年,西安交通大学屈梁生等人将全息谱理论与大型转子现场动平衡技术相结合,形成了完整的大型柔性转子全息动平衡理论和技术^[23-25]。

(2) 在线主动平衡控制技术。

主轴转速越来越高,如磨床高速电主轴的设计转速需达到 $50000 \sim 90000 \text{r/min}$,而平衡精度等级要求达 G1~G0.4 级,传统现场动平衡技术日趋难以满足需要。主动式自动平衡技术采取由外部输入能量的控制方式强制实现转子自动平衡,该技术可以在线调整配重逐渐成为高速主轴动平衡领域的研究热点。

应用广泛的自动平衡装置主要有 3 种形式,分别为通过可控微型电机驱动多级齿轮传动补偿质量的电机式;通过向不同的容腔喷入液体,以改变重心位置的喷液式;通过电磁力拖动平衡质量块相对平衡头转动的电磁式。这 3 种主动平衡装置都有商品化的产品,例如,美国 SBS 公司电机驱动式 SB-4500 系列,转速 $300 \sim 13000 \text{r/min}$,平衡精度 $0.02 \mu\text{m}$,平衡能力 $75 \sim 12000 \text{g} \cdot \text{cm}$ 。SBS 公司喷液型,转速 $300 \sim 30000 \text{r/min}$,平衡精度 $0.02 \mu\text{m}$,平衡能力 $5 \sim 50000 \text{g} \cdot \text{cm}$ ^[26]。德国 Dittle 公司喷液式 H6000 系列,最高转速可达 30000r/min 。德国 Dittel 公司的电机驱动式分为 2 种,一种安装在转轴内部,最高转速可达 20000r/min ,最大平衡能力 $3300 \text{g} \cdot \text{cm}$;另一种将平衡装置做成法兰形状,通过螺栓连接在轴端,最高转速可达 10000r/min ,最大平衡能力 $12000 \text{g} \cdot \text{cm}$ ^[27]。美国 LORD 公司电磁式,最高转速可达 40000r/min ^[28]。

国内学者对主动平衡装置的研究也有较多尝试,哈尔滨工业大学王欲欣、北京化工大学何立东、长春光机所李晓冬等人分别研究了这 3 种

动平衡装置^[29]。但直到目前为止,这 3 种平衡头仅能长期稳定地工作于较低转速下,仍无法满足高速、超高速主轴的需要。

现阶段主动平衡技术主要面临的问题在于如何通过有限的激励实现无限的振动模态的控制,即通过模型缩聚后得到的低阶模型实现对高阶模型的控制策略^[30]。尽管面临各种挑战,工业现场对动平衡精度和效率的迫切需求将进一步推动在线、高精度主动平衡技术的发展。

结束语

世界航空制造业不断向着高、精、尖方向发展,现阶段中国航空工业承担着重大的研制生产任务,为使我国航空制造技术尽快赶超世界先进水平,需要发展相当数量的高性能数控机床设备。但国内数控加工技术远远不能满足快速发展的航空制造业的需求,主轴单元等几种主要功能部件的技术水平,对主机发展起到很大的制约作用。从某种程度上讲,电主轴等功能部件的发展水平代表了数控机床的发展水平,进而影响国家航空制造业水平的提高。

为了满足航空制造业的需求,主轴单元的性能还需要不断提高,其发展趋势主要体现在:向超高速、大功率发展;向高精度、高刚度发展;实现精确定向,快速启、停;向多功能、智能化方向发展。目前,国产的电主轴和国外产品相比较还有较大差距,大功率、高转速、高精度的电主轴大多依赖进口。要使国内的主轴设计加工水平达到世界前列,除了要解决上述关键技术外,还要在主轴伺服驱动单元参数设计及控制技术、热稳定性保持与冷却系统设计技术、装配及性能检测技术等方面深入研究。

本文共有参考文献 30 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 小颖)