

汽车与航空航天制造技术的相互推进

Mutual Promoting Between Automobile and Aerospace Manufacturing Technology

中国汽车工程学会 陈长年



陈长年

中国汽车工程学会装备部部长、教授、高级工程师。曾获机电部科技进步二等奖、广西科技进步一等奖。发表报告、论文、专著百余篇。

在国家中长期科学和技术发展规划纲要中，“高档数控机床与基础制造装备”已被列为重大专项。汽车与航空航天行业都是该重大专项服务的重点领域。其实，汽车与航空航天制造技术有许多共性。一个世纪来，世界制造技术最重要的发明，如自动流水线、数控技术、多轴联动技术、高速加工、柔性制造、敏捷制造、各种高效制造技术、精益生产等，

一个世纪来，世界制造技术最重要的发明，如自动流水线、数控技术、多轴联动技术、高速加工、柔性制造、敏捷制造、各种高效制造技术、精益生产等，大都发源于汽车和航空制造业，并且相互推进、相辅相成。

大都发源于汽车和航空制造业，并且相互推进、相辅相成。进入新世纪，“节能、减排”的要求，又催生了汽车和航空器的轻量化制造技术。美国制造业的核心是汽车和航空航天制造业，它们也成为美国国家核心竞争力的重要部分。这为正在大力振兴装备制造业、向创新型国家进军的我国提供了重要启迪。在我们实施《高档数控机床与基础制造装备》重大专项工程中，应该努力消除体制机制性障碍，加强行业之间、军民之间的统筹协调，切实提高整合科技资源、组织重大科技活动的能力，对汽车和航空航天共性技术进行“协同集成”。

改革开放以来，国内各主要飞机工厂都将飞机制造技术用于生产汽车，实现了“军转民”。国际上将汽车与航空航天业融为一体的典型代表是日本汽车制造商 Honda 与世

界上最大的喷气式飞机发动机生产厂家 GE，他们就共同开展小型商用喷气式飞机涡轮风扇发动机研究成立合资公司——GE Honda Aero Engines LLC。

本文就汽车与航空航天业的 3 项重要制造技术的相互推进、相辅相成进行分析。

数控技术

数控技术发源于飞机制造，在汽车生产中得到广泛的应用。

采用数字技术进行机械加工，始于上世纪 40 年代。美国派尔逊公司在制造飞机的框架和直升机的转动翼时，利用计算机对加工路径进行数据处理，并考虑刀具直径对加工路线的影响，实现了对机翼的数控加工，加工精度得到了很大的提高。在此基础上，1952 年，美国麻省理工学院研制出世界上第一台数控机床。

数控技术的应用,使飞机制造技术进入新的里程碑。后来,数控技术在汽车工业得到飞速发展,汽车工业发展成为数控机床的第一用户,各主要工业国数控机床市场大约一半与汽车工业有关。正是因为近年来大量采用先进数控设备,使我国轿车装备整体上进入柔性化时代,在一定程度上维持了我国汽车工业的不断发展。

数控技术在汽车与航空航天业的重要发展是多轴联动技术。多轴联动技术能够满足飞机工业对复杂的三维曲面形状的加工要求,如飞机的旋翼、发动机叶片、涡轮盘、整体构架等。

所谓多轴联动是指加工一个表面时需要同时由四轴或四轴以上的

花加工,这不仅耗费较长的时间而且还要制造形状复杂的电极。采用五轴联动,可以使用刀具最佳几何形状进行切削:加工凸曲面时可使用高效端铣刀;加工凹曲面时可使用球头刀效率较高的圆弧部分来进行切削。这些均是三轴联动无法实现的。这样,不仅光洁度高,而且效率也大幅度提高。美国 CINCINNATI 公司曾经宣称,一台五轴联动机床的切削效率可以等于两台三轴联动机床,特别是当前流行的用立方氮化硼铣刀高速铣淬硬钢工艺,在五轴联动情况下可比三轴联动时发挥更大的威力。所以,五轴联动才是三维曲面加工的最佳选择。五轴和多轴联动机床能一次加工完成复杂三维曲面

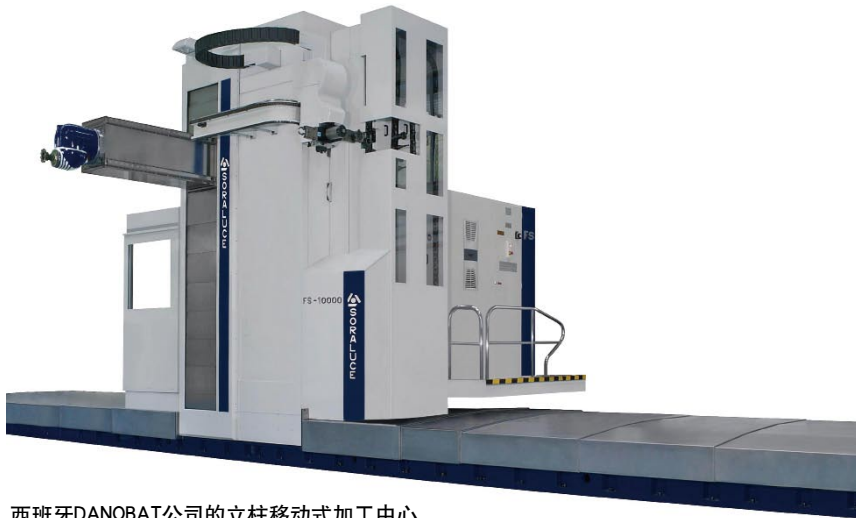
(SHM) 代替电火花加工(EDM);发电设备加工需要,使我国成为全球叶片加工基地。

(2) 技术背景。铣床发展第一个里程碑的关键零部件是数控和伺服系统。目前数控系统及应用软件的价格已经大众化,中低档数控系统国内已经基本满足需要,具有五轴联动和高速、高精加工功能的高档数控系统国内也已有成熟产品。第二个里程碑的关键零部件包括了换刀、换头机构。目前其国产化已经比较成熟。第三个里程碑的关键零部件是数控回转头,同时由于这时的数控铣床已经高速化,关键零部件还包括电主轴和直线电机。这3类关键零部件目前我国的差距还比较大。

研究多轴加工技术、多轴联动加工工艺,是保证五轴联动机床充分发挥效能的关键。

(1) 通过复杂零件加工工艺分析,确定五轴、多轴联动加工工艺最佳应用区段。统计表明,复杂零件加工过程中,多轴联动加工工艺最佳应用区段是精加工,通常只占复杂零件加工过程的5%~10%。占复杂零件大部分加工过程的工艺是“3+2”(3个直线轴+2个旋转轴)加工工艺。分析大型复杂零件几何特征、材料特性、加工精度要求、刀具和机床特性、切削用量之间的关系,研究不同切削条件对机床的要求,研究复杂零件加工过程各加工环节的技术特征和工艺特点,以实现曲面粗、精加工环节的优化分解。

(2) 建立智能化多轴联动加工仿真系统。根据工件、刀具、刀具轨迹等加工信息,进行工件切削过程、刀位轨迹和机床运动的三维动态仿真以便清楚地监控到工件加工过程中的过切与欠切、刀杆和联接系统与工件间的干涉碰撞、机床各运动部件与工件和夹具间的干涉碰撞,保证数控编程的质量,减少试切的工作量和劳动强度,提高了编程的一次成



西班牙DANOBAT公司的立柱移动式加工中心

关联运动来实现,用于加工叶片、涡轮盘和模具等复杂表面,常见的五轴联动铣削就是由 X 、 Y 、 Z 三个直线运动轴和 A 、 B 、 C 三个回转运动轴中任意两个轴组合而成的切削运动。

由于航空航天产品与许多汽车零部件均为复杂三维曲面,采用三轴联动不是最佳的选择。采用三轴联动加工时难以用刀具的最佳几何形状进行切削,不仅效率低而且表面粗糙度极差,采用球头刀具时残留高度值大,往往需要后续繁重的手工抛光,极大地影响了曲面的几何精确度。为此,某些公司采用后续的电火

的许多汽车零部件,如发动机叶片、涡轮盘、整体构架,大型整体机身、机翼,大型复杂模具等。

一个世纪以来,铣床发展经历了3个里程碑:从传统(非数控)铣床到数控铣床;从数控铣床到加工中心;从三轴联动到五轴联动。目前,国际一流加工中心/镗铣床制造商,已经完成了从三轴到五轴的转换,拉大了与我国的差距。

进入新世纪后,我国五轴铣床快速发展,有以下两个大背景:

(1) 市场背景。国防工业急需;模具制造技术革命——高速加工

功率,缩短了产品设计和加工周期,大大提高了生产效率。

(3) 建立复杂零件的切削模型和相应的切削数据库、专家系统等。

五轴联动数控铣床在航空工业得到了最广泛的应用。美国、俄罗斯一家飞机制造公司即拥有几百台五轴联动数控铣床。CINCINNATI公司生产用于大型飞机零件的五轴联动数控龙门铣床已有几十年的历史,已累计生产了500余台,可配备1~3个铣头。

五轴和多轴联动又催生了纤维、复合材料机身、机翼的涂覆和缠绕数控机床。目前,CINCINNATI公司正在研发纤维、复合材料涂覆技术和缠绕技术在汽车工业的应用。

高速加工技术

航空航天工业是高速加工率先应用的领域。原因主要是:

(1) 现代飞机设计中广泛采用先进的整体结构设计和整体制造方法,包括整体框、梁、肋、接头、壁板等复杂结构件。这类零件形状复杂,与飞机曲面外形、风道外形、翼身融合体外形等有关。零件内、外形角度变化较大。采用大型整体铝合金型材“掏空”的方法加工零件,切削量极大。如波音公司在生产F-15和F/A-18E/F战斗机中,为使大型飞机零件更容易制造、装配和维修,主要技术是“整体制造法”——整块毛坯加工,金属去除率约90%;以整体加工的零件代替装配在一起的多个零部件,飞机的零件数目减少了42%。以F15战斗机的零件为例,由一个整体零件代替了以前的500个零件,使原来的加工和装配等多道工序简化为一次完成,提高了生产效率,生产周期从三个月缩短到两个星期。

(2) 零件常具有极薄的壁和筋,刚度很差,只有高速切削才能进行加工。由于切削速度达到一定值后,切削力可降低30%以上,尤其是径向

切削力的大幅度减少,特别有利于提高薄壁细筋件等刚性差零件的高速精密加工。因而各国飞机厂大量采用主轴转速20000~40000r/min的三到五轴高速数控铣床。波音公司的经验表明,主轴转速为18000~40000r/min是最适合的。

(3) 大量采用镍基合金(如inconel718)和钛合金(如TiAl6V4)制造飞机和发动机零件。这些材料强度高、硬度高、耐冲击。加工中切削力大、发热量大,容易硬化,刀具磨损严重,属于难加工材料。而结构上大多是薄壁件,加工中难以保证零件的尺寸精度和形位精度,传统采用很低的切削速度进行加工,生产效率很低。如采用切削速度约为常规切速10倍左右的超高速切削(切削速度100~1000m/min),不但可大幅度提高生产效率,而且可有效地减少刀具磨损,提高加工零件的表面质量。

高速加工技术被引入汽车工业后,迅速得到推广并不断创新,使汽车制造技术进入新纪元。20世纪80年代末,为了解决产品的变型生产和便于更换品种,柔性生产技术被引进了汽车生产。由高速加工中心组成的柔性自动线(Flexible Transfer Line, FTL),使汽车大批量生产方式发生了意义深远的革命,又推动了制造业从数量时代进入多样化时代。同时,以单轴加工中心组成的柔性自动线代替由多轴组合/专用机床组成的传统自动线,必须克服高柔性和低效率的矛盾,这就使得高加减速成为汽车用高速机床的第一特征(目前国际上普遍达到1g)。由此又推动了直线电机驱动技术,高刚度、高精度、高速度机床(三高机床)的设计制造,超硬复杂汽车刀具,柔性夹具系统等新技术的创新,使高速加工技术提升到新的发展

阶段。

例如,为减轻机床运动件的质量,给提高加减速创造条件,汽车工业用高速机床普遍采用工作台固定、主轴进给结构——框架式结构,即“箱中箱”结构。

FTL的新发展是敏捷高速柔性自动线(Agile Flexible Transfer Line, AFTL),其目标是:

- 对变化的市场需求快速做出反应;
- 满足现代轿车发动机“多品种、大中批量、高效率、低成本”的需要;
- 符合“精益生产”原则——用



最小投资赢得最大经济效益。

为适应飞机结构件加工向整体化方向发展,要求机床具有超大型尺寸和复合加工的功能。采用直线电机驱动技术和工作台固定、主轴进给机床结构的机床,很快被引进到航空工业中。为适应主轴超高速、特大功率和超长X行程的需要,实现龙门式加工中心的高速度和高加速度运动,机床结构改变为工作台固定,进给为横梁运动。由于工作台质量大,加工的往往又是大型零件,实现工作台的高速、高加减速运动比较困难,方法之一是采用双墙式结构支撑横梁,横梁在墙式支撑上进行快速

进给运动。要求横梁在两面墙上采用双驱动,并保证双边进给的同步性,在这方面,直线电机比滚珠丝杠更易于实现。CINCINNATI公司的HyperMach机床采用直线电机以后,进给速度最大达60m/min,快速为100m/min,加速度达2g。据称,在HyperMach上切一件薄壁飞机零件,只花了30min;而同样的零件用一般高速铣床加工将费时3h。因而,可使加工成本减少85%。

上世纪90年代,美国INGERSOLL公司创造了立式安装工件、卧式加工的新工艺。其HVP

中心造价低于普通龙门式加工中心。

上世纪90年代首先在欧洲兴起的高速硬铣,普遍用于汽车、航空航天模具制造。此外,汽车和直升机上的弧齿锥齿轮,要求重载、低震动和低噪声,既要求高强度又要求高精度。以往淬硬后由于磨削效率极低,或在展成原理上根本无法磨削(如等高齿弧齿锥齿轮),采用成对互研工艺仅能改善接触状况。而现在可用高速硬铣工艺,直接从淬硬的齿胚一次切出高精度、表面粗糙度非常好的弧齿锥齿轮。瑞士Oelikon公司的切齿机床,对模数为5~6mm,

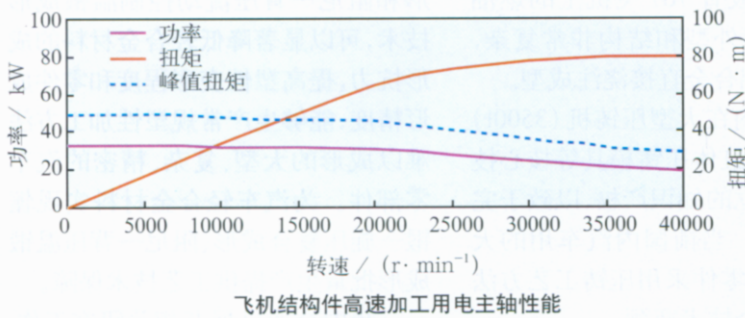
大。

轻量化制造技术

汽车的轻量化表现在两个方面:一是材质的轻量化,用铝合金代替钢铁,零件减重65%;二是工艺精确化。

目前美国通用公司汽车单车材料中铝合金已有148kg,镁合金6.8kg,预测到2009年,74%的汽车发动机缸体及98%的缸盖将用以压铸、低压铸造等有色精密铸造工艺生产,使用轻体材料已成为重要的发展趋势。

我国铝、镁资源丰富,但铝合金铸件产量所占铸件总量的比例大大低于发达国家。据统计,目前,铝合金铸件在铸件总量构成比例中,美国为14%,日本为18%,德国为13%,而我国仅为5%左右。本世纪初,工业发达国家每辆轿车重量平均约为1130~1250kg,其中铝合金制零部件占整车重量的约13%,铝铸件则是其中的65%~75%,约109.2kg;压铸件又是铝铸件的70%左右,约74kg,约为整车重量的7%左右。而我国与这一比例相差甚远,铝压铸件大约只有约15~25kg,约只占整车重量的(按1500kg计算)1%~1.6%。



飞机结构件高速加工用电主轴性能

机床一反传统的立式主轴布局,采用卧式主轴布局——工件垂直安装在墙式夹具上。也采用直线电机驱动技术,工作台固定、主轴运动的进给方式和“箱中箱”结构。HVP机床采用高性能电主轴,功率80kW,最高转速40000r/min。生产效率比传统龙门铣提高4~11倍。例如,加工机翼梁,在传统龙门铣上需要50h,而在HVP上只要5h多一点。高效来自高速和排屑容易。

目前,借鉴INGERSOLL公司创新的HVP式机床,日本、意大利和西班牙等国机床企业推出了类似产品。西班牙DANOBAT公司的立柱移动式加工中心可用于大型零件的卧式加工。即零件垂直安装于弯板夹具上,操作人员直接面对铣头加工部位,工作过程易于监测;而且由于切屑直接落下而不会集聚在加工表面,可保证加工质量;当然还有另外一个重要优点是立柱移动加工

机床电主轴性能至关重要。采用矢量控制技术,一般具有低速大扭矩、高速恒功率特性。飞机结构件高速加工一般不用低速区,对电主轴低速不要求大扭矩,而高速要求扭矩较

直径约300mm的淬硬齿胚,只用3~5min,就可切出一个弧齿锥齿轮。

高速



EASTWARD
伊斯沃公司

在各种产品、零件、整机上打
印中英文字符或图形标志
欢迎拨打免费热线电话: 800-807-6866

ISO9001质量管理体系认证和高新技术认定的外资企业
为用户设计定做各种工业专用标记机

- 气动标记打标机系列
- 无线声气动标记雕刻机
- 无线声气动标记压印机
- 扫描扫描激光标记打标机
- X-Y扫描连续激光打标机
- X-Y扫描脉冲激光打标机
- 电嘴标记打标机
- 喷砂标记打标机
- 半导体激光打标机系列
- 光纤激光打标机系列
- 汽车零配件专用打标机
- 智能卡激光专用打标机



▲ 气动标记打标机系列



▲ 光纤激光打标机系列



▲ 激光金属纸标签



▲ PM154轿车底盘VIN号数字字机



▲ 激光标记打标机系列

品牌, 专业, 不打不相识, 伊斯沃为您解决一切标记问题

中国公司
地址: 重庆市渝北区龙兴东路36号 邮编: 401147
电话: (023) 67610571 67607465
传真: (023) 67610577
网址: www.eastward.com.cn
E-mail: canada@eastward.com.cn

各地服务热线: 13916137046
华东服务热线: 15909317243
华南服务热线: 13594322465
东北服务热线: 15841087524
重庆服务热线: 13808369345

广告索引号 08-092

我国原镁产量居世界首位。2000年全国产量约200000t,80%以上作为初级原料低价出口,国内消费20000t左右。其中只有2000t用于桑塔纳轿车变速箱壳体,其余均作为合金制备等一般用途。镁合金由于其具有比强度和比弹性模量高,阻尼吸震降噪性能优越,铸造成形、机加工性能良好,易回收利用等优点,已逐渐在国外汽车上得到广泛的应用,包括发动机、齿轮箱体、曲轴箱体、变速箱壳体、转向机构、阀壳、轮毂、前灯支架、离合器壳体、制动/离合器踏板托架、进气歧管、驾驶杆、座椅框架、发动机盖、后舱盖、车门框架、仪表板等数十种零部件。2004年全球汽车工业镁压铸件和镁合金需求总量为11.7万t,2005年达12.8万t,2005年全球汽车工业镁压铸件市场份额占到全球镁市场总需求的88%。如果我国每年在100万辆汽车上平均使用镁合金10kg,则镁合金零部件的年用量为1万t。

钛合金材料由于具有比强度高和耐蚀性好等特点,目前得到越来越广泛的应用。其精铸件越来越向着大尺寸、薄壁复杂的方向发展,如载人航天系列飞船和登月工程空间相机的基座、机身等。在大尺寸复杂钛及钛合金铸件的整体熔模精密铸造领域,20世纪80年代美国PCC公司制造了直径达2m的GE90飞机发动机风扇轮毂,是目前世界上最大的精铸件,其铸造尺寸公差可达 $\pm 0.13\text{mm}$,最小壁厚达1.0~2.0mm。

(1) 铝镁钛合金零部件精铸工艺。

发动机是铝合金铸件应用的重要领域。发动机是汽车和飞机的“心脏”,发动机上最重要、最复杂的铸件非发动机缸体莫属。为使这颗“心脏”既动力澎湃又负荷小,发动机缸体结构越来越复杂,重量又要求越来越轻,即朝着复杂化、轻量化、薄壁化

方向发展。这就给发动机缸体的制造带来严峻的挑战。铝合金缸体由于其比重轻(只有灰铁缸体重量的1/3)、抗爆性好,已经成为提高汽车动力、降低油耗及尾气排放最有效的方法。随着世界能源日趋紧张,环保要求越来越高,发达国家采用的铸铁缸体数量迅速下降,越来越多的轿车已经采用铝合金缸体。日本丰田目前全部采用铝发动机,美国通用汽车公司铝发动机已达60%以上。

同时,面对航空航天市场对铝合金铸件大型精密化的需求,国外及时开发了相应的精密优质铝合金铸造技术。美国波音767飞机上的燃油增压泵壳,其外形和结构非常复杂,采用A356铝合金直接浇注成型。

由于国内在大型压铸机(3500t)和大型、复杂缸体压铸模具等核心技术上没有独立的知识产权,以致于完全受制于人。当前国内汽车用的大型铝、镁合金零件采用压铸工艺方法生产还是一个技术瓶颈。

同时,我国的压铸件综合质量较差:加工余量大,废品率高,合金利用率低,铸造工艺装备基础条件差,环保和能耗问题较严重,缺乏专门人才和新工艺新产品开发能力。致使产品价格较高,缺乏竞争力。近年来我国钛合金精密铸造技术得到快速发展,水平得到了较大提高,但同美、德等工业发达国家相比,在尺寸、壁厚、单件重量、生产规模和工艺水平等诸多方面均有较大差距。

针对以上情况,应尽快开发适用于制芯中心的铝合金汽车缸体等零部件的成套铸造技术;制造出浇注重量超过1t的大型精密铝合金铸件;具备薄壁(2~2.5mm)、大型(外形尺寸1500~2000mm)、复杂钛合金精铸件的整体精密铸造能力;研究铝、钛合金精确铸造技术,合金熔炼能耗低、污染小,所制造的铸件内部质量好,性能优良,尺寸精度高,稳定性好。可在主体制芯中心制造

汽车发动机缸体等铝合金重要铸件;为飞机复合材料部件的成型制造大型精密铝合金模具;实现1500mm以上大尺寸复杂薄壁钛铸件整体精密铸造。

(2) 铝镁合金精密塑性成形——温锻技术。

温锻成形技术的工艺特点是将材料加热至700~1000℃进行锻造,兼有热锻和冷锻的优点。主要用作轻体材料(铝、镁、钛)成形,在美国汽车和航空工业应用广泛,温锻件约占精锻件50%。

采用辗锻—旋压连续局部小变形和阻尼—背压流动控制温锻成形技术,可以显著降低轻合金材料的成形抗力,提高塑性变形程度和零件成形精度,能够生产常规塑性加工方法难以成形的大型、复杂、精密的汽车零部件。为汽车轻合金材料实现辗锻—旋压复合成形、阻尼—背压温锻成形批量生产提供工艺技术保障。

我国企业已展开相关研究工作:齐齐哈尔二机床集团公司拟开发温锻压力机;浙江四通车轮制造公司、江苏飞船股份公司等企业建成锻造铝车轮和汽车复杂精密铝合金零件阻尼—背压温锻精密成形应用示范工程。由天津锻压机公司和红原航空锻铸公司共同开发的数控等温锻造液压机,列入国家重大技术装备创新研制项目,已完成产品鉴定,并成功制造出国内最大钛合金模锻件。这项技术如能在汽车工业推广应用,将提升我国汽车制造技术,推动实施“汽车轻体材料(铝、镁、钛)成形与加工成套设备”重大专项。

此外,20世纪70年代以来,在发达国家的航空领域,等温成形,特别是高温合金、钛合金的等温成形已经成为某些零件规范的成型工艺,例如飞机上各种钛合金框架和钣金结构件,涡轮发动机的钛合金/高温合金涡轮盘等。

(责编 晓霖)