

DOI: 10.3901/JME.2010.17.105

复杂曲面加工技术的研究现状与发展趋势*

周志雄¹ 周秦源^{1,2} 任莹晖¹

- (1. 湖南大学机械与运载工程学院 长沙 410082;
2. 张家界航空工业职业技术学院 张家界 427000)

摘要: 随着高新技术的发展,复杂曲面的应用也越来越广泛,其应用主要取决于两个方面:一方面是力学特性和功能的需要,使设备满足特定的性能要求,这就要求产品形面达到高精度的数学特征;另一方面是外观美学效果的需要,满足人们对产品外形的需求。复杂曲面的发展和实现,又取决于复杂曲面的设计技术和制造技术。从3个方面分别阐述它们的研究现状与发展趋势:复杂曲面设计技术,如曲面造型设计技术、反求技术;复杂曲面加工技术,如光学自由曲面加工技术、复杂刀具加工技术;复杂曲面加工设备,如功能部件、控制系统等。指出复杂曲面设计技术、加工技术及加工设备发展存在的主要问题,对其发展趋势进行科学预测。

关键词: 复杂曲面 设计 加工 装备 现状 趋势

中图分类号: TH161

Current Research and Development Trends of Complex Surface Machining Technology

ZHOU Zhixiong¹ ZHOU Qinyuan^{1,2} REN Yinghui¹

- (1. College of Mechanical & Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082;
2. Zhangjiajie Aeronautical Industrial Vocational and Technical College, Zhangjiajie 427000)

Abstract: With the development of high-tech, applications of complex surface are more and more extensive. Its applications primarily depend on two aspects: on the one hand, requirements of mechanical properties, functions and devices with specific performance, which requires products to achieve high-precision mathematical characteristics; on the other hand, it is the need for aesthetic appearance to meet the demand for product. Development and implementation of complex surface depend on complex surface design and manufacturing technologies. Three aspects on research and development trends are described: Design technology of complex surface, such as surface modeling and reverse engineering; machining technology of complex surface, such as optical free-form surfaces and complex machining; machining equipment of complex surface, such as function parts and control system. The main problems in the development of complex surface design techniques, processing technology and machining equipment are pointed out, and their development trend is forecasted.

Key words: Complex curve surface Design Machining Equipment Current research Trend

0 前言

随着全球经济的发展,市场竞争日趋激烈,新的技术革命不断取得进展和突破,技术的飞跃发展已经成为推动世界经济增长的重要因素。为了保持和加强产品在市场中的竞争力,产品的开发周期、生产周期越来越短,促使工业产品越来越向多品种、小批量、高质量、低成本的方向发展,具有复杂曲

面的产品越来越多,广泛应用于模具、工具、能源、交通、航空航天、航海等领域^[1]。

复杂曲面的复杂性主要体现在:许多边缘学科、高科技产品领域对产品涉及的曲面造型有很高的精度要求,以达到某些数学特征的高精度为目的;现代社会中,人们在注重产品功能的同时,对产品的外观造型提出了越来越高的要求,以追求美学效果或功能要求为目的。因此,进一步提高复杂曲面的设计和加工水平成了国内外竞相研究的焦点。

近年来,随着计算机技术、自动控制技术的发展,数控技术^[2]有效地应用于曲面加工中,特别是

* 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04012-031)。20100223 收到初稿,20100419 收到修改稿

多轴数控加工技术在复杂曲面加工中的广泛应用,复杂曲面加工技术有了突破性发展,出现了激光开槽、快速原型制造和快速工装等新加工方法^[3-5]。

我国在复杂曲面的加工技术方面取得了不少成果。但是,与世界先进水平相比还有较大的差距。因此,研究其国内外的研究现状和发展趋势,对我国机械设计与制造水平的提高具有重要的理论意义和实用价值。

本文论述了复杂曲面设计与加工技术(曲面造型、反求技术、光学自由曲面加工技术、复杂刀具的设计与制造技术)和复杂曲面加工设备的研究现状,指出了复杂曲面加工技术领域存在的问题,对其领域发展趋势进行了科学预测。

1 复杂曲面设计与加工技术的发展

1.1 复杂曲面造型技术的发展及现状

复杂曲面造型技术是计算机辅助设计和计算机图形学(Computer graphics, CG)中最为活跃、同时也是最为关键的学科分支之一,它随着 CAD/CAM 技术的发展而不断完善,渐趋成熟。它主要研究在计算机图像系统的环境下对曲面的表示、设计、显示和分析,肇源于飞机、船舶的外形放样工艺,由 Coons、Bézier 等于 20 世纪 60 年代奠定理论基础。经几十年的发展,现在它已经形成了以 Bézier 和 B 样条方法^[6]为代表的参数化特征设计和隐式代数曲面表示方法为主体,以插值、拟合、逼近这三种手段为骨架的几何理论体系。非有理与有理曲线曲面形式和非有理的 B 样条曲线曲面形式都被统一在 NURBS 形式之中^[7-9]。国际标准化组织于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准,将 NURBS 方法作为定义工业产品几何形状的唯一数学描述方法,从而使 NURBS 方法成为曲面造型技术发展趋势中最重要基础。

我国学者在曲面造型技术方面取得了显著的成绩,如复旦大学对参数曲线分类及形状控制和多元散乱资料逼近拟合的研究^[10-11],中国科技大学对 Bézier 曲面凸性条件和隐式曲面算法的研究^[12],浙江大学对曲面几何连续拼接理论和曲面几何逼近方法的研究^[13],这些学术成就已在国际计算机图形界占有重要的一席之地。

从研究领域来看,曲面造型技术已从传统的曲面表示、曲面求交和曲面拼接,扩充到曲面变形、曲面重建、曲面简化、曲面转换和曲面等距性^[14]。此外,随着工业生产的发展和需要,其他学科的技术方法被引进到计算机图形学中来,形成一种融合

的趋势,出现了许多新造型方法的研究:如基于物理模型优化的曲面造型方法^[15-17]、基于力密度方法的曲线曲面的造型方法^[18]、基于偏微分方程的曲面造型方法^[19-20]、小波曲线曲面的造型方法^[21-22]、流曲线曲面造型方法^[23]、基于移动最小二乘近似的曲面造型方法^[24-25]等。

1.2 复杂曲面反求技术的发展和现状

随着计算机、数控和激光测量技术的飞速发展,反求技术不再是对已有产品进行简单的“复制”,其内涵与外延都发生了深刻变化,成为家电、汽车、玩具、轻工、建筑、医疗、航空、航天、兵器等行业最重要的产品设计方法之一,是工程技术人员通过实物样件、图样等快速获取工程设计概念和设计模型的重要手段。

复杂曲面反求技术是 20 世纪 80 年代初分别由美国明尼苏达采矿制造公司、日本名古屋工业研究所以及美国思博明仪器设备有限公司提出并研制开发成功的。在越来越剧烈的市场竞争中,先进工业国家加大力度研究此项技术,例如美国华盛顿大学解决了数据预处理并提出了多视区测量数据的处理问题,澳大利亚大学、新加坡国立大学和英国曼彻斯特大学等研究了指定区域内的动态测量点计算^[26-30]。同时,还涌现出一批复杂曲面反求技术的商用软件,如美国电子数据系统公司产品 Surfacer、英国 Delcam 公司产品 CopyCAD、英国 MDTV 公司的 STRIM and Surface Reconstruction、英国 Renishaw 公司的 TRACE 等。

在我国,复杂曲面反求技术是 20 世纪 90 年代后期才迅速发展和推广的。目前,已有一些高等学校和企业正致力于这方面的研究。如浙江大学、西北工业大学、南京航空航天大学、西安交通大学、清华大学、上海交通大学、华中科技大学等先后开展了复杂曲面反求工程 CAD 问题的研究。浙江大学研制开发了基于三角曲面初始表达的复杂曲面反求工程软件 RE-SOFT。此外,复杂曲面反求技术在我国企业也有一定的应用,如珠海模具中心、东风汽车公司、天津大学内燃机研究所、浙江大学和湖南大学等运用反求技术进行新产品的开发与研制。在商用软件方面,主要有西安交通大学、清华大学和华中科技大学等在开展反求工程设备和软件的研发。

1.3 光学自由曲面加工技术的发展

加工高精度复杂曲面光学零件代表了超精密加工技术的最高水平。由于对光学自由曲面零件的形状精度要求达到微米、亚微米级,表面粗糙度达到纳米、亚纳米级,必然使得光学自由曲面加工的复杂程度远比传统球面和非球面要高得多。但是,

由于光学自由曲面零件在工业上应用广泛，使得其成为复杂曲面加工技术的重要研究领域^[31]。

由于曲面光学零件属于难加工的硬脆材料，且自由曲面有较大的曲率变化和多变的曲率中心，该领域除了采用超精密磨削、研磨及抛光技术外，还多采用计算机控制光学表面成形(Computer controlled optical surfacing, CCOS)等技术实现光学自由曲面的加工。国内外学者对各种硬脆材料的磨削机理、加工工艺、加工设备、磨削力、磨削热、砂轮磨损等问题进行了广泛而深入的研究，相继研发出了高速磨削、缓进给磨削、镜面磨削、恒压力磨削和延性域磨削等高效磨削工艺^[32]，对光学自由曲面加工需要多轴联动的超精密数控机床，例如，美国摩尔公司的超精密五轴数控车床 Nanotech 500FG，Precitech 公司的 Freeform700A 超精密五轴机床等采用单点金刚石车削或铣削等加工技术实现自由曲面的加工。天津大学微纳制造技术工程中心成功开发出广泛应用于医疗、通信、光学成像、生物及传感器领域的复眼结构、螺旋透镜、立方相位片及非球面透镜阵列等。

1.4 复杂刀具的设计与制造技术的发展

由于产品结构形状、加工精度、加工效率和耐用度等要求，使加工刀具应具有高精度的复杂曲面。刀具是机械制造中的基础件，应用极为广泛，所以复杂曲面刀具本身的设计与制造成为复杂曲面加工技术的一个极其重要的研究领域。

国外一些公司基于各行业对刀具的需求，深入系统开展了对可转位刀具、多功能复合刀具、高速切削刀具和钻削、镗削刀具等复杂曲面刀具的研究。例如，三菱株式会社针对重型铣削高效加工的要求，推出了 SPX 系列波形刃直角立铣刀(图 1a)。此系列采用的波形切削刃铣刀片，使得刀片在切入和切出工件时能降低刀具与工件的冲击，并能有效分断切屑，实现在重切削、大切削深度铣削加工中获得稳定的低切削力。伊斯卡公司推出的 FINISHRED 精加工波形刃立铣刀(图 1b)，同时具有两个螺旋波形粗加工刃和两个螺旋光精加工刃，可达到金属快速切除的目的，且同时产生的短小切屑和长切屑在混合后更有利于排出，特别适用于槽铣加工和型腔铣削加工。美国万耐特公司推出的直径 76~305 mm 的高速面铣刀，设计中采用零或负前角，刀尖用圆弧或多个直线刃过渡，对高速切削刀具的月牙洼磨损、刀尖热磨损和边界缺口损伤都能起到明显的抑制作用^[33-35]。德国玛帕公司推出带 4 个导棱的整体硬质合金钻头(图 2)。此钻头在提高钻孔时钻头的稳定性、防止颤刀的同时，可进一步降低孔的表面粗

糙度。此外，日本的 Hosoi(图 3a)、Sumitomo Multi 钻头(图 3b)和美国的 Bickford 钻头(图 3c)等通过修磨横刃来提高其钻削性能，法国“雷诺”和“标致”两大汽车公司发明的三倾角 Renault-Peugeot 钻头(图 3d)，比标准麻花钻的轴向力降低了 25%~50%，刀具使用寿命提高了 2~3 倍，钻削进给率提高了 1~2 倍。

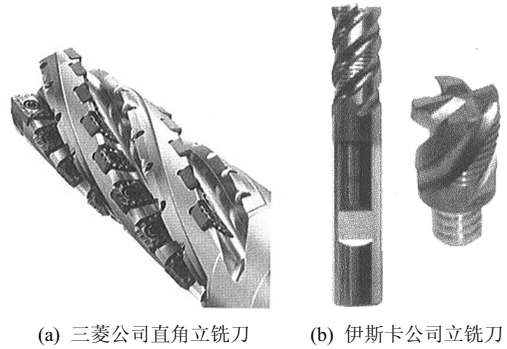


图 1 波形刃立铣刀

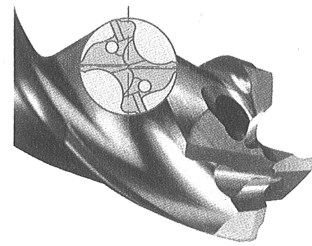


图 2 四导棱钻头

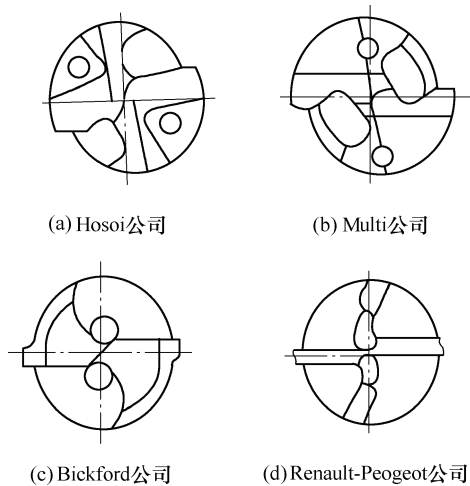


图 3 国外各公司制造的钻头

国内部分高校、院所和刀具生产企业对具有复杂曲面的刀具设计和制造进行了大量研究。例如，湖南大学成功地研究出非共轴螺旋面钻尖的微钻头和具有复杂曲面的后刀面刃磨技术。大连交通大学以降低切削力和切削热为衡量指标，对钻头横刃和主切削刃进行再设计，采用零前角，并修磨主刃外缘转点，对钻削高锰钢 ZGMn13 钻头刃形作了改进研究^[36]。华中科技大学研究及设计了可转位刀片三

维断屑槽,建立了平前刀面刀具切屑三维卷出的模型,设计了一种减摩槽结构的三维槽型刀片^[37]。山东大学对高速整体硬质合金立铣刀结构设计及其性能进行了研究^[38]。国内一些刀具制造企业(如株洲钻石刀具股份有限公司)也对一些复杂曲面刀具进行了设计与应用研究。

2 复杂曲面加工设备的发展和现状

近年来,复杂曲面零件的加工技术由于多轴联动数控加工中心的应用得到了突破。国外多轴数控切削技术发展很快,CNC 机床已经从三轴发展到十轴。日本研制的五面加工机床采用复合主轴头,可实现 4 个垂直平面、任意角度的倾斜面和倒锥孔的加工。德国德马吉公司生产的 DMUVoution 系列加工中心可由 CNC 系统控制、CAD/CAM 直接或间接控制,在一次装夹下完成五面加工。还有一些专门为特定的复杂零件定制的专用 CAD/CAM 系统,如针对叶轮加工的五坐标加工系统 MAX-AB(端铣加工)和 MAX-5(直纹面侧铣加工),专门用于叶轮类零件侧铣加工的 FLAMINGO,用于螺旋桨 CAD/CAM 的 VX,专门用于加工模拟的 VERICUT 等。

此外,在多轴磨削机床中,瑞士开发了六轴控制的、砂轮可曲面法向跟踪进行磨削的高精度磨床,提高了效率,避免了接刀误差,大大提高了曲面加工的质量。德国研究开发的外圆磨床,快速点磨的同时利用与车削一样的两坐标联动实现复杂零件的表面磨削,生产效率大幅提高。另外,随着数字化光电技术的高速发展,精密多轴曲面磨床的技术性能得到改善。瑞士的罗诺曼迪克有限公司研究开发的高精度 NC600Xplus 六轴工具磨削中心配装了光学装夹,每个磨削砂轮的位置在机床上都可以在线测量。

近年来,我国在多轴数控机床的研制方面也取得了很大的发展。沈阳机床厂研制生产的 GMB25505x 龙门式五轴镗铣加工中心应用于大型叶轮等复杂曲面高速、精密加工。济南二机床集团有限公司研制生产的 XKV2740 型五轴联动定梁龙门(双龙门)移动数控镗铣床(图 4),可以完成对多种叶片、螺旋桨、金属模具等大型复杂曲面的精密加工。北京机电院与东方汽轮机厂联合开发了五轴联动大型叶片加工中心,可一次装夹完成 60 MW 汽轮机首末级叶片的加工。西北工业大学开发出与国际领先的 MAX-SI 软件功能相当的整体叶盘数控加工专用系统。齐齐哈尔二机床厂、清华大学和哈尔滨电机厂有限责任公司联合研制了新型龙门式五轴

联动混合机床,实现了三维立体曲面的高速切削,成功加工出三峡工程左岸水轮发电机组特大型水泵叶片。杭州机床集团有限公司研制出 MKL7150×16/2 七轴五联动数控强力成形磨床(图 5),实现了对燃气轮机叶片(图 6)圆弧叶冠的凸凹圆弧面高效率、高精度、高质量的磨削加工。

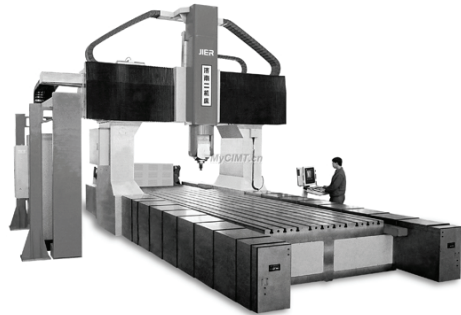


图 4 XKV2740 型五轴联动定梁龙门移动数控镗铣床

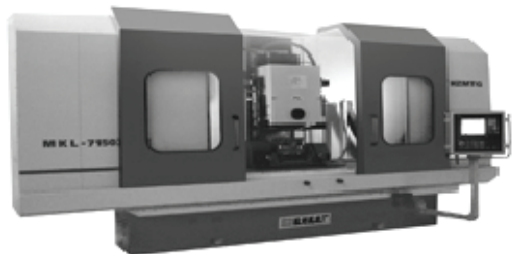


图 5 MKL7150×16/2 七轴五联动成形磨床

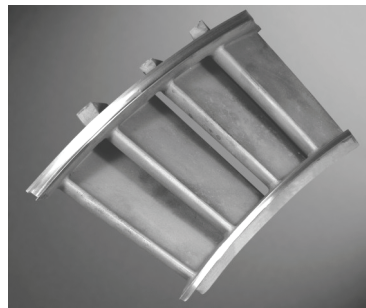


图 6 燃气轮机叶片

湖南大学开发研制出五轴数控群钻刃磨机床(图 7)及刃磨出的两种群钻(图 8),MK6335A 五轴数控高效钻尖磨床(图 9)和五轴四联动数控凸轮轴磨床(图 10),达到国际先进水平。成都量仪开发公司和成都工具研究所联合研制了五坐标四联动数控工具磨床;秦川机床集团公司研制开发了数控蜗杆砂轮磨齿机;武汉机床厂研制了六坐标五联动数控控制磨削中心;营口机床厂先后研制了四轴三联动数控工具磨床样机、八坐标五联动数控工具磨床;长沙弘力精密机械有限公司研制了七轴五联动数控弧齿锥齿轮磨齿机(图 11),可磨削直径为 12~1 100 mm、模数为 1~24 mm 的弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮。



(a) 第 2 代数控群钻刃磨机床 (b) 第 3 代数控群钻刃磨机床



(c) 第 4 代数控群钻刃磨机床 (d) 第 5 代数控群钻刃磨机床

图 7 五轴数控群钻刃磨机床

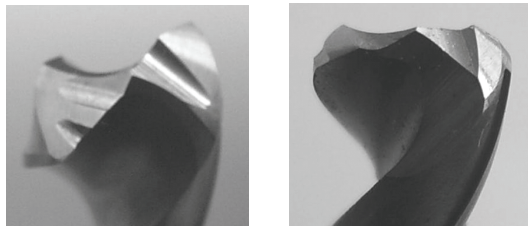


图 8 刃磨出的两种群钻

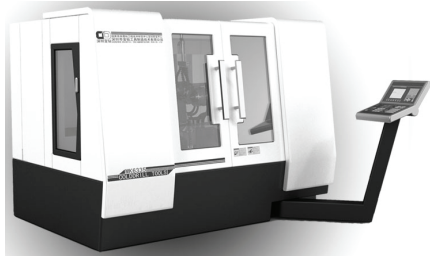


图 9 MK6335A 五轴数控高效钻尖磨床



图 10 五轴四联动数控凸轮轴磨床



图 11 数控弧齿锥齿轮磨齿机

3 国内存在的问题

进入 21 世纪以来, 复杂曲面加工技术领域作为机械制造的重要组成部分, 在我国虽然已经取得了长足的进展, 但是与国际先进水平仍然存在很大差距, 主要表现在以下几个方面。

(1) 高档多轴数控机床主要依赖于进口。复杂零件曲面结构的多样化、复杂化及高精度化需要依靠多轴数控切削加工来实现。我国对多轴数控机床的研究与开发起步较晚, 虽然已经开发了一些多轴数控机床, 但在质量、功能和性能等方面还有待提高, 其中一些关键零部件、特别是支承系统、驱动系统和控制系统、在线检测系统主要还是依赖进口。

(2) 复杂型面数控加工软件有待进一步开发。近年来虽然在复杂型面建模和切削加工方面的研究取得了一定的成果, 但在复杂型面数控切削软件的开发方面仍需要努力。有的机床公司虽然开发了多轴数控机床, 但在开发数控加工软件方面显得力量不够, 数控加工软件问题没有彻底解决, 使得整机的应用受到严重影响, 针对工具机床的研究较多, 但很少从多轴联动复杂型面加工路径生成的角度去研究问题。

(3) 复杂型面检测技术及仪器设备的研究有待加强。复杂型面的加工虽然是按照零件设计中所描述的结构特征及结构尺寸进行的, 但由于加工过程中复杂型面的特征表面的形成过程非常复杂, 且往往会出现干涉现象。由于复杂形状的零件具有形状复杂的功能表面, 在检测与这些功能表面有关的零件结构参数时, 传统的检测方法难以实现, 只能采取间接测量的方式, 但必须得到零件在法剖面及端面内的截形, 按照这样的方法实际操作起来十分困难, 一些高档的检测设备仍然依赖进口。因此, 需要探讨更有效的检测方法, 研制高档的检测仪器设备。

4 展望与对策

4.1 复杂曲面加工技术

在复杂曲面造型方面, 从数学的角度和加工的可行性综合考虑复杂曲面造型, 加强造型人员与制造人员的有关信息交流, 避免复杂曲面加工中产生重选现象(造型→加工→修改模型→再加工), 增强企业的市场竞争力和经济效益。

在数控程序设计方面, 随着复杂曲面的数控程

序设计技术的进一步发展,要研究基于特征的刀具轨迹生成方法,并且进一步发展高速加工的数控程序设计技术,特别是 NURBS 加工的使用和有效的 NURBS 刀具轨迹的研究。在数控加工模拟方面,要向提高模型的精确度、仿真计算实时化和改善图形显示的真实感等方向发展,并充分利用因特网技术,提高复杂曲面加工中信息交流与共享。另外,改变数控程序设计时加工工艺方案制定的随机性大的缺点,制定系统的加工工艺过程方案,并能够在多种加工工艺中选择最优的复杂曲面加工方法。

因此,应支持高速、高精度加工的 NURBS 插补加工技术的研发;加强对前沿数控技术、在线监测技术、多轴加工技术等研发。

4.2 光学自由曲面制造技术

由于光学自由曲面在光学电子行业的应用深入展开,其加工技术已经逐渐成为光电子器件不可或缺的增加产品附加值的技术,因此应加强光学自由曲面微米、亚微米甚至纳米级加工技术的研究。用传统的切削理论和刀具运动模型无法正确解释超精密切削加工的切削机理和表面创成原理,应该加大力度开展数控单齿进给量达到微小尺寸的研究。随着加工设备精度及稳定性的不断提高、加工机理的进一步揭示及加工技术的深入发展,加工光学自由曲面零件将会达到 $0.1\ \mu\text{m}$ 或更高的形状精度,应该深入开展加工机理、纳米级多轴控制系统、五轴超声辅助振动加工机床等的研究。

4.3 复杂曲面刀具设计与制造技术

复杂曲面刀具的设计随着不同行业(如风电、高速火车、航空航天、船舶等)的加工特点,应更加重视刀具几何结构的细节改进,以提高刀具使用的经济性。传统的复杂曲面的刀形参数已不能满足现代切削对刀具的加工要求和加工特点,应开发相应系列产品。例如,采用大圆弧开槽和渐变芯径设计使刀具刚性和排屑能力大大加强;刃口抛光技术和容屑槽特殊处理工艺等提高加工效率和质量;加工过程中应用工装和加工工艺使整批刀具外径公差控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,轴向径向圆跳动控制在 $5\ \mu\text{m}$ 以下,刀具动平衡等级控制在 $G2.5$ 以下。

复杂切削刀具和工具系统更加小型化甚至微型化是刀具发展的另一个趋势。随着工业产品不断向尺寸和尺度微小化发展,越来越多的产品(如医疗和牙医设备、移动电话、笔记本电脑、航空航天和电子器件等微小零部件)加工都提出了刀具微小化的要求。应开展高速高精度微主轴系统及刀具、微细刀具设计及几何参数的优化和微细刀具制造设备的设计与制造技术等研究。

此外,随着机械加工愈来愈向高速、高效的方向发展,势必带动多功能刀具的发展。如:钻、镗多功能刀具的开发,能一次使用一把刀具即可加工出预孔、内孔和倒角;多功能车削刀片的开发,能使用一个刀片和一次进给进行原来需要 4~5 把刀具才能完成的深槽、外圆柱面、端面、内槽及内孔的多任务多工步加工,而且各种不同工步的加工可以选择不同的切削速度和进给量等;多功能铣刀的设计与研究;多功能加工刀具制造设备的设计与制造技术的研究等。

同时,还必须加强对刀具材料、热处理技术、加工质量标准及检测技术等研究,提高刀具的可靠性和使用寿命。

4.4 复杂曲面加工设备技术

随着对复杂曲面质量的要求提高,带动了复杂曲面加工设备的进一步发展。基于五轴联动加工技术的复杂曲面加工日趋成熟,五轴联动不仅限于 x 、 y 、 z 、 A 、 B (或 C)轴联动,而且包括 U 、 V 、 W 轴不同组合的多轴控制多坐标轴联动;多轴数控机床将采用高精度的全闭环控制及温度、振动等动态误差补偿技术,提高机床加工的几何精度,降低形位误差、表面粗糙度等;复杂曲面加工设备功能部件不断向高速度、高精度、大功率和智能化方向发展,应加强对机床关键零部件,如电主轴、全数字交流伺服电动机及驱动装置、力矩电动机、直线电动机、滚珠丝杠及直线导轨等功能部件的开发。此外,在复杂曲面加工数控机床上要配备智能化技术,如防振动功能、热补偿功能、防碰撞功能、智能主轴、智能平衡分析器、设备维护智能支持系统等,要加强对这些技术的研究,开发出具有自主知识产权的数控技术、在线监测技术、高性能数控系统的多轴数控机床等,以全面提升我国机械制造技术的水平。

5 结 论

(1) 复杂曲面广泛应用于航空、航天、航海、模具、工具、能源、交通等领域,它作为机械制造的重要组成部分,在我国虽然已经取得了长足的进展,但是与国际先进水平仍然存在很大差距,其发展对提高我国机械设计与制造水平具有重要的理论意义和应用价值。

(2) 近年来,随着计算机技术、自动控制技术的发展,特别是多轴数控加工技术在复杂曲面加工中的广泛应用,从曲面造型、反求技术等复杂曲面设计到光学自由曲面、复杂刀具等的曲面加工技术,复杂曲面设计和加工技术有了突破性的发展。

(3) 对复杂曲面质量的要求带动了复杂曲面加工设备的进一步发展, 复杂曲面多轴联动加工技术也日趋成熟。我国对多轴数控机床的研究与开发起步较晚, 虽然已经开发了一些多轴数控机床, 但是, 还应该加强对机床关键零部件等功能部件、配备智能化技术和高性能数控系统的多轴数控机床的研究和开发。

参 考 文 献

- [1] 孙大涌. 先进制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
SUN Dayong. Advanced manufacturing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [2] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
LIU Xiongwei. CNC machining theory and programming technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [3] 周建忠, 张永康. 激光加工技术在汽车车身制造中的应用[J]. 电加工与模具, 2000(4): 32-36.
ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongkang. Laser processing technology applied in automobile body manufacturing[J]. Electromachining & Mould, 2000(4): 32-36.
- [4] 焦向东, 贾永田. 基于快速原型技术的金属模具制造发展现状[J]. 制造技术与机床, 2000(7): 8-9.
JIAO Xiangdong, JIA Yongtian. Development of metal die manufacturing based on rapid prototyping technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2000(7): 8-9.
- [5] 赵玉刚, 周锦进. 新型的复杂曲面磁粒光整加工机床[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 100-103.
ZHAO Yugang, ZHOU Jinjin. Magnetic abrasive finishing machine tool on the new complex surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 100-103.
- [6] LEE S, WALBERG G, SHIN S Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines[J]. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3(3): 228-244.
- [7] THOMAS F, TUMBULL C, ROS L, et al. Computing signed distance between free-form objects[C]//Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. Piscataway, NJ. USA: IEEE, 2000: 3 713-3 718.
- [8] PAGE F, GUIBAULT F. Collision detection algorithm for NURBS surfaces in interactive applications[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 4-7, 2003, Montreal, Que., Canada. Piscataway, NJ. USA: IEEE, 2003: 1 417-1 420.
- [9] 刘浩. NURBS 曲面间的最短距离[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
LIU Hao. The shortest distance between NURBS surfaces [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [10] 潘俊. PH 曲线及有理 PH 曲线插值及其应用[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
PAN Jun. PH curves and rational PH curves interpolation and its application[D]. Shanghai: Fudan University, 2006.
- [11] 吴宗敏. 径向基函数、散乱数据拟合与无网格偏微分方程数值解[J]. 工程数学学报, 2002(5): 1-11.
WU Zongmin. Radial basis functions, scattered data fitting with the non-grid numerical solution of partial differential equations[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2002(5): 1-11.
- [12] 陈发来. 双二次 Bézier 曲面的正性与凸性[J]. 高校应用数学学报, 1996(12): 467-476.
CHEN Falai. Positive nature and protruding nature of two repeated Bézier curved surface[J]. Applied Mathematics Journal of Chinese Universities, 1996(12): 467-476.
- [13] 范树迁. 反求工程中自由形状模型的美化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
FAN Shuqian. Landscaping techniques of free-form model in reverse engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2006.
- [14] 朱永强, 鲁聪达. 自由曲线曲面造型技术的综述[J]. 中国制造业信息化, 2003, 32(5): 110-113.
ZHU Yongqiang, LU Congda. Overview on free curve and curved surface model technology[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2003, 32(5): 110-113.
- [15] 柳晓燕, 冯峰. 基于能量优化的 NURBS 曲面几何特征修改[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(26): 41-44.
LIU Xiaoyan, FENG Feng. Geometric features modification of NURBS surfaces via energy optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(26): 41-44.
- [16] 刘肖健, 孙守迁, 陈实. 产品复杂表面形态结构的映射设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(7): 1 268-1 273.
LIU Xiaojian, SUN Shouqian, CHEN Shi. Mapping design method of products with complicated surface shape structures[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(7): 1 268-1 273.

- [17] 龙小平. 局部能量最优法与曲线曲面的光顺[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(12): 1 109-1 113.
LONG Xiaoping. Fairing of curves and surfaces by local energy optimization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(12): 1 109-1 113.
- [18] 王青, 柯映林, 李江雄. 基于力密度方法的 MJF, BS 曲线曲面变形框架[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 135-142.
WANG Qing, KE Yinglin, LI Jiangxiong. Shape modification of NURBS curves and surfaces based on force density method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 135-142.
- [19] 丁正刚. 偏微分方程(PDE)曲面造型及其交互式曲面设计技术[D]. 厦门: 华侨大学, 2005.
DING Zhenggang. Partial differential equations (PDE) surface modeling and interactive surface design technology[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2005.
- [20] 马岭, 朱心雄. PDE 造型方法在复杂曲面设计中的应用[J]. 计算机学报, 1998(21): 357-362.
MA Ling, ZHU Xinxiong. Application of PDE method to free form surface design[J]. Chinese Journal of Computers, 1998 (21): 357-362.
- [21] 吕长寿. 基于小波的曲线曲面造型设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
Lǚ Changshou. Curves and surfaces modeling based on wavelets [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [22] 赵罡, 穆国旺, 朱心雄. 基于小波的准均匀 B 样条曲线曲面变分造型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(1): 61-65.
ZHAO Gang, MU Guowang, ZHU Xinxiong. Variational modeling of quasi-uniform B-spline curve and surface with wavelets[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(1): 61-65.
- [23] 屈新怀, 李学京, 夏登玉. 齿轮挤压成型腔流曲线曲面造型[J]. 合肥工业大学学报, 2004, 27(3): 269-272.
QU Xinhuai, LI Xuejing, XIA Dengyu. Stream surface modeling for the gear extrusion mould cavity[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2004, 27(3): 269-272.
- [24] 曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004, 25(1): 84-89.
ZENG Qinghong, LU Detang. Fitting curves and surfaces based on moving least squares[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(1): 84-89.
- [25] 李昆. 汽车后视镜的理论建模与应用技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
LI Kun. Automobile rear-view mirror theory of modeling and application technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [26] 柯映林, 肖尧先, 李江雄. 反求工程 CAD 建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 13(6): 570-576.
KE Yinglin, XIAO Yaoxian, LI Jiangxiong. Study of CAD modeling for reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2006, 13(6): 570-576.
- [27] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78.
- [28] SARKER B. Smooth surface approximation and reverse engineering [J]. Computer Aided Geometric Design, 1991, 23(9): 623-628.
- [29] CHEN L C. A vision-aided reverse engineering approach to reconstruction of free-form surface[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1997, 13(4): 323-336.
- [30] MILROY M J, BRADLEY C, VICKERS G W, et al. G-continuity of B-spline surface patches in reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(7): 471-478.
- [31] FANG Fengzhou, ZHANG Xiaodong, HU Xiaotang. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7 323-7 329.
- [32] FANG Fengzhou, LIU Xiangdong, LEE L C. Ultra-precision machining of brittle materials[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2003(12): 38-47.
- [33] 罗可安. 实现数控刀具国产化刻不容缓[J]. 数控机床市场, 2008 (7): 23-28.
LUO Kean. Localization of urgency for NC tool[J]. CNC Machine Tool Market, 2008(7): 23-28.
- [34] 刘战强, 艾兴, 宋世学. 高速切削技术的发展与展望[J]. 制造技术与机床, 2001(7): 5-7.
LIU Zhanqiang, AI Xing, SONG Shixue. Development and prospects for high-speed cutting technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2001(7): 5-7.
- [35] 杨小璠. 高速切削及关键技术发展现状[J]. 机械设计与制造, 2002(6): 109-111.
YANG Xiaofan. High speed cutting and the developing state of its key technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2002(6): 109-111.

- [36] 陈志慧. 钴削高锰钢 ZGMn13 钻头刃形改进研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2007.
CHEN Zhihui. Improvement of drilling blade-shaped on high manganese steel ZGMn13[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [37] 吴克忠. 可转位刀片三维断屑槽的研究及设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
WU Kezhong. Study and design on indexable inserts three-dimensional chip-breaker[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [38] 邵子东. 高速整体硬质合金立铣刀结构设计及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

SHAO Zidong. Research on structural design properties of high-speed solid carbide end mills[D]. Jinan: Shandong University, 2007.

作者简介: 周志雄, 男, 1953 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂刀具的设计与制造、数控机床装备、切削磨削理论及其设备等。发表论文 90 余篇。

E-mail: zhouzx8@sina.com

周秦源, 女, 1974 年出生, 博士研究生。主要研究方向为复杂刀具的设计与制造、数控机床装备的研究与开发等。

E-mail: zqy5199@sina.com