

复杂曲面的测量加工一体化

孙玉文*, 郭东明, 贾振元

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024

* 联系人, E-mail: xiands@dlut.edu.cn

2014-09-03 收稿, 2014-11-03 接受, 2015-02-10 网络版发表

国家自然科学基金(11290143, 51321004)和国家重点基础研究发展计划(2011CB716800)资助

摘要 能源、动力、国防和航空航天等领域的高端装备性能要求高、需求迫切, 与此同时也涌现出一大批加工难度大、性能要求苛刻的复杂曲面零件. 这些零件往往具有尺寸大、精度高、材料难加工等特点, 且多具有透波、传热和密封等性能要求, 测量加工一体化技术是实现该类零件高质高效加工的有效途径. 本文介绍了复杂曲面测量加工一体化技术的基本内涵和应用方向, 围绕数字化寻位、机床加工参数反调修正、面形直接修正加工和面形再设计类零件加工, 评述了其有关测量、数据处理、加工基本模型和关键工艺技术方面的研究进展, 并展望了测量加工一体化技术在将来可能的应用领域、研究的关键问题和发展方向.

关键词

测量加工一体化
面形再设计
高性能
复杂曲面
误差补偿

复杂曲面的测量加工一体化技术较早出现在数字化仿形制造以及加工表面几何误差在线评定与修正加工中, 是数字化测量技术与加工技术的有机结合. 用于能源、动力、国防和航空航天等高端装备制造领域的一类复杂曲面零件, 不仅具有较高或超高的几何精度要求, 往往还注重加工表面形貌特征和零件物理性能的保证, 因此其加工较之常规零件要更精细、可控^[1]. 现代几何量测量技术和多物理量传感测试技术已有极大提升, 加之数控机床精度和联动轴数的保障, 以及数控系统的扩展性和兼容性, 使得数控机床集成具有相对高精度的传感测试功能成为可能. 通过功能集成, 在零件加工过程中依托测量单元获取工件加工状态、加工表面几何精度或性能参数信息, 在对数据进行建模、误差评定、分析的基础上修改加工单元的NC代码, 能够更好地保证零件加工质量并满足特定的性能需求. 我们注意到, 复杂曲面的测量加工一体化技术在制造领域的应用已经相当广泛, 一定程度上与当前国际上倡导的智能制造有很大的关联性, 具备了几何物理信息获取、分析、决策和控制等功能, 已构建起机床与工件加工工艺

之间交互的纽带, 为工艺规划与参数优化提供了基础和前提.

目前, 如何针对高几何精度、高物理性能类复杂曲面零件的加工要求, 构建相应的测量加工一体化系统, 并建立起性能驱动的加工目标曲面的计算模型, 是当前测量加工一体化领域理论探索和工程应用的研究热点与难点问题之一. 例如, 天线罩加工的主要性能考核指标是电性能要求, 受制造工艺限制, 材料介电常数和几何参数误差不可避免, 仅按几何参数满足设计要求制造的天线罩, 大都会存在电性能超差的问题. 因此, 天线罩的精密修磨加工需要以半精加工后实测的内廓形等几何数据和天线罩性能参数误差为依据, 通过性能与几何物理参数的耦合关系模型反求出修正性能偏差的加工去除余量分布, 并通过逐点可控修磨手段加工出满足电性能指标要求的天线罩. 大口径高精度光学元件往往具有亚微米面形精度和纳米级表面粗糙度要求, 其超精密修形加工一般要以采用激光干涉仪等测得的面形数据为依据, 通过与理想面形的比较, 建立元件表面的材料去除分布函数、局部区域的驻留时间函数, 并控制

引用格式: 孙玉文, 郭东明, 贾振元. 复杂曲面的测量加工一体化. 科学通报, 2015, 60: 781–791

Sun Y W, Guo D M, Jia Z Y. Integrated measurement and machining technology of complex surfaces (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 781–791, doi: 10.1360/N972014-00930

工具按特定的优化路径和速度运动,使其面形逐步收敛.我国在典型的高几何精度、高物理性能零件加工方面已取得显著进展.国际上,美国率先解决了大口径光学元件的大批量加工难题,建成了世界上最强大激光束的核聚变实验装置.欧盟集合德国、英国、比利时等欧盟各国的科研力量和公司进行联合攻关,开发出面向叶片修复加工系统,替代了手工打磨作业,使得数以百万计的破损涡轮叶片得到再利用,翻修成本仅为购置新叶片价格的1/5^[2].这些重大国际研究计划,以及我国业已启动的“神光计划”等的实施,均离不开测量加工一体化技术的强有力支撑.

测量加工一体化系统的高集成特性,使得一些具有苛刻加工要求的复杂曲面加工更加省时省力.概括而言,复杂曲面的测量加工一体化主要应用于以下几个方面(图1): (1) 数字化寻位.船用螺旋桨等大型复杂曲面零件具有极高的尺寸余量比,人工找正极其困难.通过在机测量并解算出零件名义几何位置,可使定位更加准确,并完全或最大限度满足材料包容原则.在叶片修复加工或超大型零件加工中,也往往要以零件的目标加工曲面的局部区域或者另一曲面的面形为基准,加工出零件的另一部分表面或进行整体精加工,此时也需要采用自寻位技术进行精确定位. (2) 参数反调修正.主要是针对共轭曲

面零件廓形的精密加工,通过建立机床加工调整参数与零件表面加工误差之间的关系,并依据基于实测数据得到的面形误差和分布信息,进行机床加工调整参数的反调修正,以提高零件表面的面形加工精度. (3) 表面完整性控制.旨在保证工艺系统不超过其允许的负荷能力或将加工表面形貌、加工中的亚表面损伤等控制在合理范围,其途径是采用力传感器、机器视觉等在机测量手段对加工过程中的切削力、刀具磨损或表面形貌等进行测量,以获取当前的加工状态参数并作出综合评估. (4) 直接修正加工.主要用于光学元件、大型叶片和整体结构件等复杂零件的精密加工中,通过在机测量零件面形精度和建立加工误差修正模型来保证或提高加工精度. (5) 面形再设计类零件加工.天线罩、火箭发动机喷管等一类高性能复杂曲面零件不仅要保证一定的几何精度,还要满足特定的加工要求和性能指标.需要根据零件几何/物理参数的实测结果,建立零件几何、物理与性能参数间的关联模型,进行加工目标曲面的面形再设计,并对其精密加工以获得满足几何与性能要求的高性能零件.

1 数字化寻位

对于规则零件,其加工定位相对容易.对于一些大尺寸小余量的复杂零件加工而言,其定位极其困难,需对工件在机床工作台上的位姿进行反复调整,有时要耗费数小时乃至数天进行定位,以避免因定位不准而出现加工欠切、余量过小等问题.为解决该问题,可利用在线测量装置获取毛坯表面数据,并进行测量数据与模型曲面间的最优配准,使毛坯最大限度地包容模型曲面,以得到加工坐标系与设计坐标系之间的坐标变换,在此基础上规划加工路径,实现零件在任意安装状态下的自寻位加工,保证毛坯各处都具有充足的加工余量,并使得加工余量分布尽量均匀.

加工定位问题通常可归结为对测量点集到给定曲面的法向距离有特定要求的最优化问题.在工件加工定位时,可采用接触扫描或激光非接触扫描等在线测量方式获得毛坯被加工表面的离散数据点集,设 $P = \{p_i \in \mathcal{R}^3, i = 0, 1, \dots, n\}$ 为毛坯的在线测量数据, $S = r(u, v)$ 为模型曲面,依据有向距离约束条件,则面向加工余量均布优化的加工定位数学模型一般可

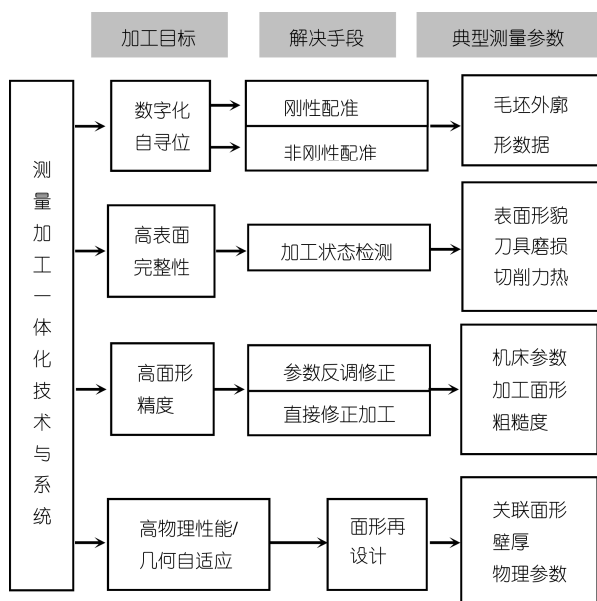


图1 测量加工一体化的典型应用

Figure 1 Typical applications of integrated measurement and machining technology

给为

$$\begin{cases} E(\mathbf{g}) = \min_{\mathbf{g}} \left(\sum_{i=0}^n |d_{p_i, r}^o(\mathbf{g})|^2 \right), \\ s.t. d_{p_i, r}^o(\mathbf{g}) \geq \varepsilon, i = 0, 1, \dots, n, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d_{p_i, r}^o(\mathbf{g})$ 为刚体变换 $\mathbf{g}$ 下测量点 p_i 到模型曲面 $r(u, v)$ 的有向距离, 且 $|d_{p_i, r}^o(\mathbf{g})| = \min_{u, v} (\|\mathbf{g}p_i - \mathbf{r}(u, v)\|)$, 刚体坐标变换 $\mathbf{g}$ 可表示为 $\mathbf{g} = (\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \mathbf{g}(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$. 对于工件完全包容设计模型的情形, 即 $d_{p_i, r}^o(\mathbf{g}) > 0$, 上述模型可描述为在约束条件 $d_{p_i, r}^o(\mathbf{g}) \geq \varepsilon$ 下寻找最优坐标变换 $\mathbf{g}_o$, 使毛坯的加工余量更为均匀; 若经上述余量优化处理, 毛坯表面上仍存在点使得 $d_{p_i, r}^o(\mathbf{g}) < 0$, 则零件毛坯必须进行补焊或重新制造.

在点-面配准定位过程中, 要求二者的初始贴合度较好, 否则会影响到模型求解的收敛速度和精确度, 甚至可能陷入局部解, 使配准结果不可靠. 上述基于实测数据的约束优化定位问题也需要事先给定一个较好的初始变换估计 $\mathbf{g}_o$. 在这里, 可采用基于曲率特征的初始匹配算法完成测量数据 $\mathbf{P}$ 到模型曲面 $r(u, v)$ 的初始定位. 任何能够唯一标识曲面点的几何特征都可被用于构造不同测量数据或模型曲面间的对应关系, 如曲面的曲率^[3]、Dupin标形^[4]、惯性不变量^[5]等; 也可以通过某些算法构造出能够唯一标识曲面点的特征参数, 如点标^[6]、面标^[7]、旋量图^[8]以及有向脚标^[9]等.

目前, 国内外对于用于加工定位的配准方法研究不多, 但已有相对成熟的算法. 如, Chatelain^[10]根据被加工面的重要程度, 为每一加工面设立优先度, 以尽可能优先保证重要表面的加工余量, 并利用罚函数法进行求解. Zhu等人^[11]提出了点-曲面有向距离函数的可微性条件, 建立了点-曲面有向距离关于曲面运动和变形的二阶微分增量的解析表达式, 在此基础上构造出快速测量定位算法, 较国际上通用的ICP算法在速度和精度方面均得到大幅度提升. 我们注意到常规的点到曲面距离计算的迭代算法依赖初值的问题和常规模型求解精度低、存在约束失效点等问题, 给出了基于伯恩斯坦多项式算术运算的最近点计算方法和加工定位的M-BFGS算法^[12], 效果较为显著.

工件数字化寻位的理论依据是曲线曲面的数字化配准技术, 在基于实测数据的零件自动修复加工

中的设计曲面与测量数据间的坐标变换, 多视角测量数据融合、大型零件的分区测量拼接(如大型光学元件测量中的子口径拼接问题)、飞机和航天飞行器的柔性装配中都有应用. 近期, 自寻位技术已用于解决大尺寸余量比零件的加工定位难题, 使得基于“蚂蚁啃骨头”的思想加工长达数十米的超大构件成为可能^[13]. 此时, 可通过多机床或小型机床移动式加工等方式, 借助激光跟踪仪等测量手段, 实现超大构件的分段自寻位加工, 避免了因购置超大型专用机床所带来的耗费过大问题. 总体来说, 零件的自寻位技术多以刚性配准为主, 然而, 对于复杂叶片的数字化修复加工而言, 受制造公差和变形等因素的影响^[14], 刚性配准有时难以解决实测数据与其名义曲面偏离的问题. 若直接从名义模型上截取相关面片来修复叶片破损区域, 则可能使修复加工区域与未加工区域过渡处出现几何不连续或修复区壁厚超差等问题. 鉴于此, 将非刚性配准技术应用于叶片破损区域的几何修复是一种可行的选择^[15], 通过刚性配准使测量数据与设计模型最大限度贴合, 再采用约束变形技术消减二者之间的微小偏差, 能够在满足公差要求的基础上实现修复与非修复区的光滑过渡.

2 表面完整性控制

表面完整性是影响零件疲劳寿命的关键因素^[16]. 大型叶片、叶轮、整体结构件等零件加工过程中在保证几何精度的同时, 表面完整性控制也是重要的环节. 表面完整性控制加工通常是通过切削过程的离线物理仿真与实验, 或通过力、温度、视觉、位移、加速度或声发射等传感器在线获取切削力、切削热、刀具磨损和表面形貌等加工信息, 并通过数据分析和模式识别等技术对影响加工表面完整性的因素做出评估, 以便于根据现场加工条件及时调整运行参数, 避免出现因机床参数选取不当、刀具磨损过大或加工颤振等原因而导致出现加工表面粗糙度增大、亚表面损伤过大等问题, 以满足零件加工的表面完整性要求.

影响表面完整性的刀具磨损、切削力/热、加工颤振等各因素间往往是相互联系、相互影响的, 因此加工中出现的某一问题可通过多种现象或参数直接或间接反映出来. 例如, 刀具磨损会造成切削力、切削热变化、加工表面完整性恶化和诱发刀具振动, 同时也会导致主轴功率的变化^[17]. 因此, 刀具磨损的

在线预报可以采用接触测量、机器视觉等手段直接检测刀具的磨损情况,也可以通过检测切削力、振动、噪声、扭矩^[18]或电流^[19]等方式对刀具状态进行间接评估.与表面完整性相关的几何参数与物理力学特性参数测量技术也往往是进行钛合金、镍基高温合金等难加工零件表面完整性控制加工的工艺规律与加工机理研究的基础.

Renishaw公司生产的接触探测传感器,能够直接在线检测出刀具磨损和破损情况,但一般不能用于实时检测.机器视觉方法^[20]能够借助CCD相机在线获得球头铣刀等刀具磨损区域的图形,并利用图像处理技术得到刀尖点位置和磨损区域面积,以便于对刀具磨损程度和剩余使用寿命作出正确评估.声发射信号反映的是金属材料内部晶格的变化,在影响声发射信号强度的因素中,刀具磨损量对其影响最为显著,因此声发射信号包含了与刀具磨损相关的信息,已成为刀具磨损和破损在线预报中被广泛采用的方法^[21,22].在目前已开发的刀具磨损检测仪中,主要是基于切削力、声发射或者同时检测振动信号与声发射信号^[23]、主轴振动和电流、电机功率和声发射信号,采用神经网络、模糊识别技术以及小波包能量分解与支持向量机相结合构造分类器等^[24-29],对刀具的磨损状态进行间接评估.

瑞士Kistler公司研制的旋转式测力仪,工作时如同刀柄一样将旋转测力仪安装在铣床主轴上,可直接检测出铣刀和工件之间的铣削力/扭矩.德国亚琛工业大学机床与产品工程实验室将Kistler公司的4分量高速旋转测力仪(x, y, z 方向铣削力和扭矩,可达18000 r/min),用于航空整体叶轮的加工实验中,为基于力控的复杂零件五轴铣削工艺的检测和控制策略研究提供了基础.同时,该实验室已专门设计出3分量拉削测力仪,并用于工业条件下镍基合金零件的拉削加工中^[30].加工过程中刀具与工件接触区的切削温度及其分布对刀具磨损、切屑去除率和表面层金相组织等有直接的影响.目前常用的切削温度测量方法主要有热电偶法、红外热像仪法、增强CCD相机法和金相结构法等^[31].切削温度在线检测通常是将红外高速传感器固结在机床主轴上,或以工件、刀具作为两极的自然热电偶法来实现^[32].采用红外传感器测得的温度可用于温度分布分析,而采用自然热电偶法只能获得平均温度.相关研究以高速加工切削热的产生和变化规律及检测技术的研究居多,

旨在为高速加工切削参数优化、控制或切屑去除机理分析等提供依据^[33].美国学者克莱姆森大学Henderson等人^[34]指出,加工中产生的切削力、热是亚表面损伤产生的2个关键因素(图2),为此,采用接触式探针在机检测铣刀磨损情况,并以此更新切削力模型,提高镍基高温合金铣削过程中的切削力预测精度,最终实现了亚表面损伤值的预测和有效控制.

在Tobias和Fishwick率先建立描述再生颤振效应的时滞微分方程模型以来,国内外学者相继提出振动、切削力和加工噪声等信号的在线检测方法,以及多频域法^[36]、半离散法^[37]和全离散法^[38]等加工稳定性极限值的数值解法,并已考虑了刀具跳动等因素的影响^[39],特别是在高速加工和难加工材料零件高表面完整性加工要求的推动下,切削颤振的在线识别、预测及抑制的方法与策略成为研究的热点和难点之一^[40].切削加工中的振动能够通过位移计、加速度计、测力计、声信号和光学检测装置等检测出来.例如,可通过声压、切削力和刀具位移的综合检测,进行高速铣削稳定性分析,把握从稳定切削向不稳定切削状态发展的规律^[41,42].由于很难直接根据采集的传感信号判断出是否存在切削不稳定预兆,因此需要运用有关信号处理方法,从传感信号中提取出能够用于稳定性预报和检测的特征量.Tansel等人^[43]通过训练神经网络识别工件振动位移信号波形的谐波加速度信号及其频率来预报加工不稳定状态;法国里昂国立应用科学院(INSA-Lyon)振动声学实验室学者与加拿大学者^[44]合作研究面向用于高速铣削颤振检测的标识参数,其颤振实验数据分析证实了

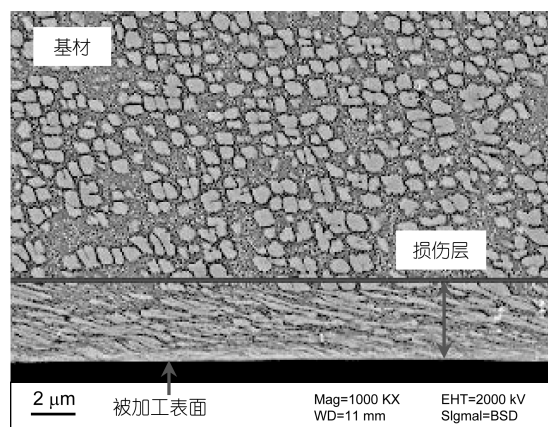


图2 典型的亚表面损伤^[35]

Figure 2 Typical subsurface damage^[35]

在主轴角频域内切削力分析对于颤振检测的重要性,并指出在实验室条件下可采用测力仪测量切削力方式进行颤振识别。进一步,他们通过角信号分析、功率谱密度和角频率表示等手段验证了主轴瞬时角速度和切削力之间具有很好的关联性,因此在工业生产条件下,可来源于主轴编码器的瞬时角速度信号进行颤振预报。

3 面形精度保证

3.1 间接修正加工

螺旋锥齿轮、面齿轮、蜗杆、刀具等零件工作曲面的磨削经常需要修正机床的加工调整参数,以保证加工精度^[45-47]。这种参数反调修正方式从本质上而言是一种“间接修正加工”,即利用加工误差与机床加工调整参数之间的关系,通过机床调整参数的多次调整,不断修正加工误差、逼近设计曲面的方法。机床调整参数一般随零件类型不同而有所不同,以螺旋锥齿轮磨削为例,其轮坯安装角、砂轮齿形角、二阶变性系数等机床调整参数可多达几十项。该类零件加工参数反调修正的理论依据均可归结到共轭曲面原理范畴,通过建立包含各项机床空间误差的被加工面误差方程和误差敏度分析,揭示各项机床误差与面形误差之间的关系,找到对面形误差影响显著的机床误差项,就能根据零件面形的真实误差计算出调整参数的修正量,使得机床在参数反调修正后加工出的工件面形误差最小化。

在螺旋锥齿轮、面齿轮等加工调整参数反调修正^[48]中,一种可行的方式是根据机床调整参数变化量与齿面法向误差的关系模型,求出对应的齿面误差敏感系数矩阵,采用改进的序列二次规划法求出调整参数修正量最优解,其基本修正模型可表达为

$$\min_{\Delta\gamma} f(\Delta\gamma) = \|\mathbf{S} \cdot \Delta\gamma - \Delta\mathbf{R}\|_{\infty}, \quad (2)$$

其约束条件为

$$\Delta\gamma_{j,\min} = \Delta\gamma_j = \Delta\gamma_{j,\max} \quad j = 1, \dots, n,$$

其中, $\Delta\gamma = (\Delta\gamma_1, \dots, \Delta\gamma_n)^T$ 为机床参数调整向量, n 为机床调整参数个数; $\Delta\mathbf{R} = (\Delta R_1, \dots, \Delta R_m)^T$ 为理论齿面法向误差向量, m 为离散测量点数; $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 为机床调整参数变化的敏感系数矩阵, $\Delta\gamma_{j,\min}$ 和 $\Delta\gamma_{j,\max}$ 分别为每个参数调整的上下界。提取经测量得到的齿面检测点阵列的误差数据,代入上式即可得到最佳

机床调整参数修正值。这样,经过2~3次的修正加工,齿轮精度往往会得到显著提高。

目前,基于曲面共轭理论的机床加工调整参数的反调修正采用离线测量居多,可以在齿轮测量中心和三坐标测量机上进行,通过对加工齿轮的误差分析后确定调整参数。近期,已有学者尝试采用非接触测量手段进行齿轮检测和评价^[49]。针对螺旋锥齿轮加工几何误差检测,Suh等人^[50]提出了基于STEP-NC标准和虚拟齿轮模型的测量方法,该方法以由CMM实测数据拟合得到的齿轮3次B样条模型为制导模型,能够实现齿轮的自动检测并可作为在线检测模块集成于先进数控系统中。自20世纪80年代以来,格里森公司开发了第一套基于真实齿面测量的齿轮加工精度控制系统,但其具体的控制方法迄今仍然保密。Litvin等人^[51]针对齿面误差修正发表了系列文章,提出了齿面误差补偿的函数法。我国学者在失配啮合、局部共轭、齿面接触分析(TCA)、螺旋面磨削正逆过程建模和误差敏度分析等方面开展了持续多年的研究,中南大学、西安交通大学和华中科技大学等单位均开展了螺旋锥齿轮磨削加工的参数反调修正研究,并开发了专用软件模块。格利森公司推出的Phoenix系列CNC Free-form型锥齿轮铣齿机和磨齿机已提供了多达25个调整参数,能够实现齿面的精确控制和修形。我国在齿轮加工装备方面同国外相比还有一定的差距,特别是航空面齿轮加工装备方面差距较大,采用修正机床加工调整参数来实现齿面加工误差补偿不失为现阶段我国提高齿轮制造精度的有效手段。

3.2 直接修正加工

在大尺寸薄壁件、光学元件及其成型模具等高精度零件加工中,几何误差的直接抑制和补偿是关键环节。特别是对于高精度超光滑表面加工而言,在保证面形精度的同时,属于表面完整性表征参数范畴的表面粗糙度也是其关键的评价指标。这些零件加工面形精度的保证往往需要测量加工一体化技术^[52],通过对工件进行在机原位检测,可为实时误差补偿提供必要的反馈信息,形成面向直接修正加工的闭环制造模式,使加工精度和效率均能得到大幅度提升。根据采用触发式测头或视觉装置测得的数据,通过加工误差分析并以此为依据形成合理的修正加工工艺技术,往往通过对加工路径的一些小

的调整,就能实现零件加工误差的综合补偿.对于航空航天整体薄壁结构件而言,其着重点在于加工几何误差的保证;对于高精度光学元件及其成型模具而言,不仅要控制零件表面的低频面形精度和高频粗糙度,还要严格限制中频波纹度误差,以满足其严苛的加工要求.

在直接修正加工中,除适宜的测量方法选择外,可能涉及的相关问题^[53-58]有:(1)图形制导的曲面或未知曲面的自适应自动跟踪测量与路径规划;(2)数据采集、扫描点云信号的滤波、传递与定标;(3)检测中的盲点、盲区问题;(4)多视、多区测量数据点云的拓扑重建、数据分割、高效数据结构、面形重建方法及运算稳定性;(5)修形过程的材料去除机理和去除量分布函数的计算模型;(6)考虑工具与工件接触压力等因素的材料去除深度模型;(7)计算机控制大镜面形误差修正的驻留时间求解算法、收敛率和优化控制方法;(8)去除工艺参数定制和加工路径优化等.相对于单纯的数据可视化而言,测量加工一体化系统的建模更注重模型的几何精确性、拓扑完整性以及特定信息的提取和表达.通用的CAD建模软件在约束建模能力、计算效率和精度方面有时还难于进行定量控制,往往需要过多的人机交互,不适合加工现场环境,对于测量加工一体化的数字化加工专用设备而言,通常需要开发专用的数据处理和几何规划模块.相比于手工修形,在线直接修正加工方式能够根据检测结果以铣削、抛光等方式实施定量去除和加工表面完整性控制,其核心在于修形原理与工艺,需要以去除机理、误差演变理论与控制技术为理论基础,探索在不同去除方式下材料去除量、去除函数、驻留时间和路径规划等具体形式和相互之间的关系.

目前,在船用螺旋桨、大型叶片抛光和大尺寸结构件铣削加工中,多将触发式扫描测头、激光点/线扫描测量装置或结构光三维视觉测量装置安装于机床主轴头^[59],由于该原位检测是基于机床的运动控制系统来实现工件的面形精度检测,故需要对获取的机床各轴坐标和检测装置采集的数据进行矢量求和,进而得到被加工表面的三维数据.因此,数控机床本身的运动精度将影响检测精度,需要考虑测量传感器姿态、机床运动误差等因素建立面形三维测量的误差综合补偿模型.一般来说,该测量方式多应用在加工精度低于机床本体精度的场合.为消除机床本体运动误差对测量带来的影响,亦有加工中心带有固

定基座的测量机械手,可实现复杂形状的精密测量,但其测量范围受到一定限制.此外,微波、超声和电容传感也是在机检测工件形状误差的常用方法.对于光学元件或模具,为避免刮擦,往往采用激光干涉、激光全息或条纹反射法等非接触高精度测量方法.用于在线粗糙度测量的方法主要是光学、超声波以及电容式传感器测量方法等,光散射法、像散法、散斑法、光干涉法、光学触针法等光学方法具有非接触、无损、测量精度高等优点,但对现场环境有一定的洁净度要求.

采用触发式测头的在线测量与误差补偿技术在铣削加工中已有应用,均是通过加工误差修正名义加工路径,效果显著.韩国仁和大学和美国加州大学学者合作,开发出一套基于在线检测数据库和多项式神经网络的铣削加工智能误差补偿系统,较之补偿前样件加工误差减少接近90%^[60].加拿大蒙特利尔大学与普惠公司(Pratt & Whitney)针对复杂曲面测量加工一体化技术开展合作,提出了基于切削顺应性系数模型的闭环加工策略,主要是采用在线测量和自动工艺调整策略,将加工误差控制在允许范围之内,在侧铣验证实验中,加工误差由补偿前的140 μm 缩减至补偿后的 $\pm 20 \mu\text{m}$ ^[61].在射频四级质子加速器(RFQ)腔体单元制造中,每个单元均由长达1 m的上下2个主端板和左右2个小端板边缘铣削加工后钎焊而成.为保证端板曲线边缘 $\pm 20 \mu\text{m}$ 的加工精度,基于激光位移传感器的闭环加工系统被采用,保证了加工精度和效率^[62].针对在数控铣床上安装主轴测头的闭环检测误差,美国学者将在机测得数据与采用坐标测量机测得数据进行对比分析,以找到影响在机测量数据精度的因素和规律,从而提高实时控制精度^[63].近年来,在机CMM系统、电容位移传感器和相位恢复技术等已用于具有微米级形状精度要求的光学元件修正加工^[64-67].光谱共焦传感器^[68]已用于铣削加工表面粗糙度的原位检测.基于散射光的光学传感器^[69]、基于双数字相机的混合视觉系统^[70]、瞬时移相剪切干涉法^[71]则被用于磨削表面和非球面光学透镜模具超精密加工表面粗糙度的在机原位测量中.Lin等人^[72]开发的空波光波扫描传感器已用于纳尺度表面粗糙度的原位检测.

4 面形再设计

天线罩、火箭发动机喷管、共底构件等大型复杂

曲面零件加工的共同特点是：加工表面受零件自身或另一零件的特定曲面约束，要求与之共形、等距或呈特定的关联关系。受制造工艺水平限制，关联面的实际面形与设计面形可能存在很大偏差，零件的材料物理特性也可能存在偏差。例如，薄板拼焊成形或板材热成型引起的几何偏差，材料介电常数的不一致性等，导致即使按设计尺寸和公差加工出的零件，其透波、传热或密封等特定指标也往往达不到要求，需要进行加工目标曲面的面形再设计^[73]。面形再设计类零件往往是具有力、热、声、光、电等高性能指标要求的一类零件，其加工制造中的测量加工一体化，多是以几何、物理和性能约束的非线性耦合模型与相容性分析为基础，基于待加工表面及其关联面的几何实测数据，依据零件的特定加工要求和面形误差等相关信息求解出能够补偿修正相应误差分布的工艺输入参数，真正实现对加工行为的定性或定量控制，在满足关键件功能、制造工艺、几何物理约束的前提下提高加工效率、成品率和实现性能的再提高。

面形再设计类复杂曲面零件加工中可能需要获取的测量信息有被加工表面或其关联面的几何形状、壁厚参数以及关键性能参数等。几何参数获取通常可采用三维扫描测头、激光扫描或光谱共焦式位移传感器。在性能参数的检测中，最关键的问题是检测原理和方法的确定。这类性能参数往往遵循一定的物理规律，要综合考虑测试精度以及测试系统物理信号处理装置、机械结构和控制实施的难易程度等因素选择具体的测试实施办法。采用上述测量手段获取的多源、异构、多维数据有时可达数十万个，其数据处理不仅要考虑关联面的几何建模，还要考虑后续加工目标曲面的求解问题。因此，尽管已有的测量建模方法很多，如隐式曲面、细分曲面和NURBS曲面等，在选择具体建模方法时要以精度和后续加工操作的便利性为原则。在加工目标曲面求解时，一般要从高性能零件的加工要求出发，进行零件具体加工过程所涉及的性能参数建模与仿真，从而找到零件特定几何参数、材料特性参数等与其性能的关联或耦合关系，并根据实测数据，解算出满足零件性能指标要求的加工目标曲面^[74]。对于一般壁厚约束的面形再设计类零件加工目标曲面的求解模型可简要概括为

$$S_o(u, v) = S_c(u, v) + h(u, v)n(u, v), \quad (3)$$

其中 S_c 为关联面， h 为壁厚， n 为单位法矢， (u, v) 为曲面参数。对称公差带条件下，对于给定采样点， $h(u, v)$ 应

满足如下不等式约束：

$$\begin{aligned} \varnothing_0(u_i, v_i) - \Delta\varnothing_L &\leq \varnothing(S_c(u_i, v_i), h(u_i, v_i), \beta(u_i, v_i)) \\ &\leq \varnothing_0(u_i, v_i) + \Delta\varnothing_L, i = 1, \dots, n, \end{aligned}$$

其中， $\varnothing$ 为性能指标， n 为采样点个数， $\varnothing_0(u_i, v_i)$ 为对称公差带下在参数位置 (u_i, v_i) 处的性能指标名义值， $\Delta\varnothing_L$ 为性能参数的上偏差， $\beta(u_i, v_i)$ 为参数位置 (u_i, v_i) 处的材料物理特性值，可以有多个。

德国亚琛工业大学机床与产品工程实验室Klocke和Willms^[75]提出了制造工艺对零件功能影响关系的描述方法，强调在保证零件宏微几何特性的同时，应重视工件的磁特性、光学特性或材料物理特性，以实现零件功能与制造工艺之间的交互。这种交互在一些高性能零件制造中得到充分体现。例如，导引头天线罩制造既要满足气动外形要求，还要保证电性能等指标，其内廓形修磨量的确定在本质上是以电性能为目标的加工余量分布反求问题。飞机风洞实验比例模型制造除几何相似外，还要满足与设计原型各部分的结构刚度和质量分布相似，其增材制造添加量的确定是以固有频率为目标且具有结构相似要求的结构反求问题。从这种意义上来说，该类零件的加工具有个性化特征，需在虑及实际关联面的基础上进行加工目标曲面的面形再设计，建立起零件性能与制造工艺的联系，实现零件的性能和几何要求的自适应。典型的面形再设计类零件制造需要首先建立性能驱动的目标加工曲面的反求模型，并以实际测得的零件性能参数和几何参数等作为初始条件，采用依据零件的实际性能偏差 $\Delta\varphi_1$ ，定量计算出按一定规律分布的加工去除量或增材制造添加量 $\Delta h(x, y, z)$ ，以此产生一个特定的性能偏差 $\Delta\varphi_2 \approx -\Delta\varphi_1$ ，抵消未修正前零件存在的性能偏差 $\Delta\varphi_1$ ，从而使零件的性能指标满足使役性能要求，即 $|\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2| < \delta\varphi$ 。鉴于此，该类高性能零件的制造已受到国内外重视，其关键在于零件性能与制造工艺的交互，并大都都需要研制具有测量加工一体化功能的工艺技术与装备。

5 展望

复杂曲面测量加工一体化系统的测量和加工子系统之间既是独立的，又是紧密联系的，二者之间的一体化设计将在面向特定产品的专用加工装备中得到更为充分的体现。在该系统中，测量是实现零件加工目标的前提条件和输入，而相关的工艺知识则是

系统的核心,起到“中央处理单元”的作用,需要构建相应的工艺参数决策模型作为支撑,但相关研究仍需持续深化和完善.在测量、信息融合、切削加工和装备技术等发展的引领下,测量加工一体化技术的应用会更加深入,如何将最适宜的单元技术集成于一体仍非常具有挑战性.目前,有关超大构件自寻位加工的高效配准算法、超长距离精密测量方法和相应的自寻位加工装备技术亟待完善,并已成为自寻位加工技术的一个重要的发展方向.在高等级齿轮和刀具等国产制造装备普遍存在差距的情况下,还需要寻求更为有效的在线测量手段和开发便于现场使用的反调修正软件模块.面形直接修正加工模式,当前主要以在线整体检测后修正名义加工路径或进给

率的方式为主,囿于时滞性等原因,基于检测数据反馈的实时加工控制仍具有相当大的难度.在复杂零件表面完整性控制加工方面,测量加工一体化模式将有很大的应用潜力和效能,依托获取的多源加工信息,建立工艺参数与表面粗糙度、表面层残余应力、显微结构、白层和冷作硬化等之间的定性或定量关系,实现加工过程中对表面完整性的综合评估,以提高零件的抗疲劳特性等综合性能,这一加工模式正处于逐步开展之中.零件物理性能驱动测量加工一体化方法,则提供了一类高性能复杂曲面零件高可靠加工的新途径,目前所取得的工程应用的实践经验表明,其在能源、动力、航空航天等领域关键件的加工中将会得到更加广泛的应用.

参考文献

- 1 Guo D M, Sun Y W, Jia Z Y. Methods and research progress of high performance manufacturing (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 119–134 [郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展. *机械工程学报*, 2014, 50: 119–134]
- 2 Bremer C. Adaptive machining technology and data management for automated repair of complex turbine components with focus on blisk repair, <http://www.bct-online.de>
- 3 Ko K H, Maekawa T, Patrikalakis N M. An algorithm for optimal free-form object matching. *Comput Aided Des*, 2003, 35: 913–923
- 4 Chua C S, Jarvis R. 3D free-form surface registration and object recognition. *Int J Comput Vision*, 1996, 17: 77–99
- 5 Sharp G C, Lee S W, Wehe D K. ICP registration using invariant features. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2002, 24: 90–102
- 6 Chua C S, Jarvis R. Point signature: A new representation for 3D object recognition. *Int J Comput Vision*, 1997, 25: 63–85
- 7 Yamany S M, Farag A A. Surface signatures: An orientation independent free-form surface representation scheme for the purpose of objects registration and matching. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2002, 24: 1105–1120
- 8 Johnson A E, Hebert M. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1999, 21: 433–449
- 9 Barequet G, Sharir M. Partial surface matching by using directed footprints. *Comput Geom*, 1999, 12: 45–62
- 10 Chatelain J F. A level-based optimization algorithm for complex part localization. *Precis Eng*, 2005, 29: 197–207
- 11 Zhu L M, Zhang X M, Ding H, et al. Geometry of signed point-to-surface distance function and its application to surface approximation. *J Comput Inf Sci Eng-Trans ASME*, 2010, 10: 041003
- 12 Sun Y W, Xu J T, Guo D M, et al. A unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surfaces. *Precis Eng*, 2009, 33: 516–523
- 13 Gao D, Wu J F, Yao Y X, et al. An automatic localization algorithm for machining huge workpieces. The 7th International Conference on Manufacturing Research (ICMR09), University of Warwick, UK, 2009
- 14 Bagci E. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. *Adv Eng Softw*, 2009, 40: 407–418
- 15 Bao Y R, Xu J T, Sun Y W. A surface reconstruction strategy based on deformable template for repairing damaged turbine blades. *Proc Inst Mech Eng Part G-J Aerosp Eng*, 2014, 228: 2358–2370
- 16 Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *Int J Mach Tools Manuf*, 2011, 51: 250–280
- 17 Dimla E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—A review of methods. *Int J Mach Tools Manuf*, 2000, 40: 1073–1098
- 18 Tansel I N, Li M, Demetgul M, et al. Detecting chatter and estimating wear from the torque of end milling signals by using index based reasoner (IBR). *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 58: 109–118
- 19 Sevilla-Camacho P Y, Herrera-Ruiz G, Robles-Ocampo J B. Tool breakage detection in CNC high-speed milling based in feed-motor current signals. *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 53: 1141–1148

- 20 Zhang C, Zhang J L. On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision. *Comput Ind*, 2013, 64: 708–719
- 21 Houshmand A A, Kannatey-Asibu Jr E. Statistical process control of acoustic emission for cutting tool monitoring. *Mech Syst Signal Proc*, 1989, 3: 405–425
- 22 Szecsi T. Automatic cutting-tool condition monitoring on CNC lathes. *J Mater Process Tech*, 1998, 77: 64–69
- 23 Jemielniak K, Bombinski S, Aristimuno P. Tool condition monitoring in micromilling based on hierarchical integration of signal measures. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2008, 57: 121–124
- 24 Tugrulo Z, Abhijit N. Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H13 steel with chamfered and honed CBN tools. *Int J Mach Tools Manuf*, 2002, 42: 287–297
- 25 Ghosha N, Ravib Y B, Patrac A. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion. *Mech Syst Signal Proc*, 2007, 21: 466–479
- 26 Yao Z H, Mei D Q, Chen Z C. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine. *J Mater Process Tech*, 2010, 210: 713–719
- 27 Kalvoda T, Hwang Y R. A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert-Huang transform. *Int J Mach Tools Manuf*, 2010, 50: 495–501
- 28 Pal S, Heyns P S, Freyer B H, et al. Tool wear monitoring and selection of optimum cutting conditions with progressive tool wear effect and input uncertainties. *J Intell Manuf*, 2011, 22: 491–504
- 29 Cao H R, Chen X F, Zi Y Y, et al. End milling tool breakage detection using lifting scheme and Mahalanobis distance. *Int J Mach Tools Manuf*, 2008, 48: 141–151
- 30 Klocke F, Gierlings S, Adams O, et al. New concepts of force measurement systems for specific machining processes in aeronautic industry. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 552–557
- 31 Longbottom J M, Lanham J D. Cutting temperature measurement while machining—A review. *Aircr Eng Aerosp Tec*, 2005, 77: 122–130
- 32 Davoodi B, Hosseinzadeh H. A new method for heat measurement during high speed machining. *Measurement*, 2012, 45: 2135–2140
- 33 Hao Z P, Lu Y, Gao D, et al. Cutting parameter optimization based on optimal cutting temperature in machining inconel718. *Mater Manuf Process*, 2012, 27: 1084–1089
- 34 Henderson A, Bunget C, Kurfess T R. Integration of on-machine measurements in the force modeling for machining of advanced nickel-based superalloys. *Proceedings of the ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation ISFA2012*, 2012. 561–567
- 35 Richardson B J, Bunget C, Kurfess T R. A statistically based determination of the depth of the machining affected zone in nickel-based superalloys using MATLAB. *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2010. 287–290
- 36 Merdol S D, Altintas Y. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling. *J Manuf Sci Eng-Trans ASME*, 2004, 126: 459–466
- 37 Insperger T, Stepan G. Semi-discretization method for delayed systems. *Int J Numer Meth Eng*, 2002, 55: 503–518
- 38 Ding Y, Zhu L, Zhang X, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability. *Int J Mach Tools Manuf*, 2010, 50: 502–509
- 39 Guo Q, Sun Y W, Jiang Y, et al. Prediction of stability limit for multi-regenerative chatter in high performance milling. *Int J Dyn Control*, 2014, 2: 35–45
- 40 Quintana G, Ciuran J. Chatter in machining processes: A review. *Int J Mach Tools Manuf*, 2011, 51: 363–376
- 41 LuizPolli M, Weingaertner W L, Bertr R, et al. Analysis of high-speed milling dynamic stability through sound pressure, machining force and tool displacement measurements. *Proc Inst Mech Eng Part B-J Eng*, 2014, 226: 1774–1783
- 42 Kuljanic E, Sortino M, Totis G. Multi sensor approaches for chatter detection in milling. *J Sound Vib*, 2008, 312: 672–693
- 43 Tansel I N, Wagiman A, Tziranis A. Recognition of chatter with neural networks. *Int J Mach Tools Manuf*, 1991, 31: 539–552
- 44 Lamraoui M, Thomas M, Badaoui M E, et al. Indicators for monitoring chatter in milling based on instantaneous angular speeds. *Mech Syst Signal Proc*, 2014, 44: 72–85
- 45 Zhou K, Tang J. Envelope-approximation theory of manufacture technology for point-contact tooth surface on six-axis CNC hypoid generator. *Mech Mach Theory*, 2011, 46: 806–819
- 46 Sun Y W, Wang J, Guo D M, et al. Modeling and numerical simulation for the machining of helical surface profiles on cutting tools. *Int J Adv Manuf Technol*, 2008, 36: 525–534
- 47 Cao X M, Fang Z D, Hao X, et al. Design of pinion machine tool-settings for spiral bevel gears by controlling contact path and transmission errors. *Chin J Aeronaut*, 2008, 21: 179–186
- 48 Tang J Y, Feng Y, Chen X M. The principle of profile modified face-gear grinding based on disk wheel. *Mech Mach Theory*, 2013, 70: 1–15
- 49 Gadelmawla E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears. *Measurement*, 2011, 44: 1669–1678

- 50 Suh S H, Lee E S, Kim H C, et al. Geometric error measurement of spiral bevel gears using a virtual gear model for STEP-NC. *Int J Mach Tools Manuf*, 2002, 42: 335–342
- 51 Litvin F L, Kuan C, Wang J C, et al. Minimization of deviations of gear real tooth surfaces determined by coordinate measurements. *J Mech Design-Trans ASME*, 1993, 115: 995–1001
- 52 Guo D M. Function-geometry integrated precision machining methods and technologies for high performance workpieces (in Chinese). *Eng Sci*, 2011, 13: 47–57 [郭东明. 高性能零件的性能与几何参数一体化精密加工方法与技术. *中国工程科学*, 2011, 13: 47–57]
- 53 Cho M W, Seo T I. Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on CAD/CAM/CAI integration. *Int J Adv Manuf Technol*, 2002, 19: 607–617
- 54 Yin Z Q, Li S Y, Tian F J. Exact reconstruction method for on-machine measurement of profile. *Precis Eng*, 2014, 38: 969–978
- 55 Li Y D, Gu P H. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Comput Aided Design*, 2004, 36: 1395–1417
- 56 Lin P D, Tzeng C S. Modeling and measurement of active parameters and workpiece home position of a multi-axis machine tool. *Int J Mach Tools Manuf*, 2008, 48: 338–349
- 57 Ko T J, Park J W, Kim H S, et al. On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model. *Int J Adv Manuf Technol*, 2007, 32: 739–746
- 58 Lasemi A, Xue D Y, Gu P H. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Comput Aided Design*, 2010, 42: 641–654
- 59 Li B, Li F, Liu H Q, et al. A measurement strategy and an error-compensation model for the on-machine laser measurement of large-scale free-form surfaces. *Meas Sci Technol*, 2014, 25: 015204
- 60 Cho M W, Kim G H, Seo T, et al. Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm. *Int J Mach Tools Manuf*, 2006, 46: 1417–1427
- 61 Guaiassa R, Mayer J R R, Balazinski M, et al. Closed door machining error compensation of complex surfaces using the cutting compliance coefficient and on-machine measurement for a milling process. *Int J Comput Integr Manuf*, 2014, 27: 1022–1030
- 62 Kondo Y, Hasegawa K, Kawamata H, et al. On-machine non-contact dimension-measurement system with laser displacement sensor for vane-tip machining of RFQs. *Nucl Instrum Meth A*, 2012, 667: 5–10
- 63 Kwon Y J, Tseng T L, Ertekin Y. Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling. *Robot Cim-Int Manuf*, 2006, 22: 288–296
- 64 Rahman M S, Saleh T, Lim H S, et al. Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation. *Int J Mach Tools Manuf*, 2008, 48: 887–897
- 65 Kong L B, Cheung C F. Design, fabrication and measurement of ultra-precision micro-structured freeform surfaces. *Comput Ind Eng*, 2011, 61: 216–225
- 66 Kim H S, Lee K, Lee K M, et al. Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement. *Int J Mach Tools Manuf*, 2009, 49: 991–997
- 67 Wu Y L, Hu X J, Dai Y F, et al. *In-situ* surface measurement for large aperture optical mirror based on phase retrieval technology. *J Mech Eng* (in Chinese), 2009, 45: 157–163 [吴宇列, 胡晓军, 戴一帆, 等. 基于相位恢复技术的大型光学镜面面形在位检测技术研究. *机械工程学报*, 2009, 45: 157–163]
- 68 Quinsat Y, Tournier C. *In situ* non-contact measurements of surface roughness. *Precis Eng*, 2012, 36: 97–103
- 69 Persson U. In process measurement of surface roughness using light scattering. *Wear*, 1998, 215: 54–58
- 70 Tian G Y, Lu R S. Hybrid vision system for online measurement of surface roughness. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23: 3072–3079
- 71 Zhu Y J, Na J X, Pan W Q, et al. Discussions on on-machine measurement of aspheric lens-mold surface. *Optik*, 2013, 124: 4406–4411
- 72 Lin D, Jiang X, Xie F, et al. High stability multiplexed fibre interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology. *Opt Express*, 2004, 23: 5729–5734
- 73 Jia Z Y, Wang Y Q, Wang F J, et al. Research on measure-redesign-machining integration manufacturing method for complicated surface parts with high performance (in Chinese). *J Mech Eng*, 2013, 49: 126–132 [贾振元, 王永青, 王福吉, 等. 高性能复杂曲面零件测量-再设计-数字加工一体化加工方法. *机械工程学报*, 2013, 49: 126–132]
- 74 Zhang C B, Guo D M, Sun Y W, et al. Inverse solution for electric thickness of radome from given boresight error. *J Inf Comput Sci*, 2006, 3: 605–611
- 75 Klocke F, Willms H. Methodology to describe the influence of manufacturing processes on the part functionality. *Prod Eng*, 2007, 1: 163–168

Integrated measurement and machining technology of complex surfaces

SUN YuWen, GUO DongMing & JIA ZhenYuan

Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

In the fields of energy, power engineering, defense, aeronautics and astronautics, the requirement for high-end equipment is vital, and the performance tolerances are extremely tight. In this environment, many high performance parts with considerable manufacturing complexity are created, which are often large in size, complex in shape and difficult to produce. The integrated technology of measuring and machining provides an effective route for high-quality and high-efficiency machining of these types of parts. In this paper, the basic implications and application directions of this integrated technology are introduced. Related research progress in measurement, data processing, theoretical modeling and key processes is reviewed with a focus on the machining localization, inverse modification of machining parameters, and the corrective machining of complex surfaces and surface-redesigned parts. Finally, the potential fields of application, key questions and development directions of the integrated technology are outlined.

integration of measurement and machining, surface redesign, high performance, complex surface, error compensation

doi: 10.1360/N972014-00930