

中国激光

多轴联动数控激光刻型加工关键技术及装备研发

刘强^{1,4*}, 王健^{1,5}, 孙鹏鹏^{1,6}, 李明², 王辉³, 殷振朔^{1,4}, 王柳权^{1,5}, 李坤航³

¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

³中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043;

⁴北京航空航天大学江西研究院, 江西 南昌 330096;

⁵北京市高效绿色数控加工工艺及装备工程技术研究中心, 北京 100191;

⁶国防科技工业高效数控加工技术创新中心, 北京 100191

摘要 针对航空航天薄壁类金属结构件多次化铣过程中的激光刻型需求,研究了激光刻型轨迹规划、光机电协同控制优化、刻型参数自适应匹配与优化等关键技术。在多轴联动数控激光刻型加工机床构成与设计、激光器与激光光路系统设计、光机电协同控制系统开发的基础上,研制出六轴五联动数控激光刻型机床原理样机和工程样机,实现了大型环形薄壁类化铣零件的一次、二次激光刻型加工,各项技术指标均达到设计要求,且该样机在航空制造企业 and 重点型号中实现了工程应用。

关键词 微细加工; 激光刻型; 轨迹规划; 光机电协同控制; 工艺参数优化; 五轴联动数控

中图分类号 TN249; TG659

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002401

1 引言

航空航天薄壁类金属结构零件在切削加工后常采用化学铣削(以下简称“化铣”)工艺进行材料去除加工,即通过化学溶液腐蚀的方式去除零件上多余的材料,形成设计要求的加强筋、凸台等结构,以获得减重效果,同时不改变零件应力状态^[1]。在化铣工艺中,需先在工件表面涂覆保护胶,然后在需要化铣部分的保护胶层上刻出设计图案并将胶层剥离,使化铣表面暴露出来,该过程称为刻型加工(以下简称“刻型”)。传统刻型加工采用手工刻型方法,即人工使用薄刀片按照预先做好的图案划线进行刻型。手工刻型方法存在刻型精度低、人力成本高、劳动强度大和加工周期长等问题,而且难以进行二次刻型(即在第一次完成化铣之后,在零件表面上重新涂覆保护胶后再进行刻型),直接制约了化铣加工的质量与效率,化铣刻型已经成为制约化铣零件制造的关键瓶颈技术之一^[2]。

数控激光刻型是近年发展起来的一种新的刻型加工方法,它在多轴联动数控机床上以激光束为刻型加工的“刀具”,按照化铣几何图案(或数模)和工艺参数预先编制的数控加工程序,在光机电协同控制系统的控制下,用激光烧蚀方法在保护胶层上刻画出几何图案,去除胶层,完成刻型加工。激光刻型将激光加工与数控技术、数字化制造工艺相结合,实现程序自动控制的刻型加工,具有高精度、高效率、数字化和柔性化等特点,并且可适应复杂曲面上的一次/二次刻型,为解决航空航天复杂薄壁类结构件化铣工艺中刻型加工的瓶颈问题提供了一个新的解决方案。

激光加工的概念出现在 20 世纪 70 年代,主要应用在切割、表面处理和焊接等领域,并在上述应用领域得到迅速发展。复杂薄壁类化铣结构零件的激光刻型加工机床属于一种五轴联动控制的高端数控机床,有关激光刻型关键技术和装备的研究开发,主要集中在激光刻型装备研制、激光刻型工艺及参数

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102503)

通信作者: *qliusmea@buaa.edu.cn

优化、光机电协同控制等方面。

1) 激光刻型装备方面。1991年, M. Torres 公司将 TORRESLASER 激光刻型机与 TORRESTOOL 柔性夹具系统集成, 成为空客德国工厂的首台刻型机^[3], 经过 30 年的发展, 已经形成了系列产品, 可以适应各种形状零件。Prima (北美) 公司开发了 LASERDYNE 高精度多轴激光加工系统, 应用于航空发动机难加工材料的切割、群孔加工以及表面激光刻型等。2015 年, 邱兆峰^[4]采用 LASERDYNE 890 实现了对机匣筒体复杂形线的高精度、高效率刻型。滕志强等^[5]提出一种五坐标数控实验装置, 采用 CO₂ 激光器在三维筒形薄壁零件上实现刻型加工。殷世坤等^[6]介绍了一种五坐标龙门式数控激光刻型机床, 配套柔性工装进行蒙皮类曲面零件的刻型加工。陈良辉等^[7]研究了一种五轴数控三维曲面激光加工装备, 可以实现曲面激光打标、模具蚀纹和刻型等功能。也有学者将多轴关节机器人 (FANUC Robot R-2000iB 210F 型) 应用于刻型, 但精度较差, 难以满足工程应用要求^[8]。

2) 激光刻型工艺方面。Arnold 等^[9]建立了烧蚀阈值附近的烧蚀深度与激光能量密度之间的关系。Nakamura 等^[10]研究飞秒和皮秒钛宝石激光脉冲的脉冲宽度对烧蚀速率的影响。倪晓昌等^[11]研究了激光烧蚀过程中聚合物的多键吸收过多能量后发生断裂的烧蚀现象。李文豪等^[12]针对不同基底材料、不同胶黏剂类型、不同激光脉冲能量的去除效率及去除效果, 指出对于金属基底材料, 使用脉冲能量为 0.5 mJ 的激光可有效清洗其表面的胶黏剂, 脉冲能量的增加会对基底产生较大的影响。Desai 等^[13]研究了激光吸收率、汽化潜热、激光功率和切削速度等参数对热塑性塑料微铣削加工性能的影响。Sauerbrey 等^[14]研究了紫外激光脉冲刻蚀有机材料的理论, 给出激光烧蚀阈值的等价条件。Leone 等^[15]分析了 CO₂ 激光光源条件下工艺参数、切割速度和光束功率对聚合物激光切割过程中相互作用现象和缺陷形成的影响。叶匀分等^[16]采用激光刻蚀法和激光成膜法, 分别以聚四氟乙烯、聚酰亚胺和环氧树脂为基体, 制造了圆锥微带天线。高献娟等^[17]实现了钛合金焊接机匣化铣图形柔性精确刻型。阚田田等^[18]发明了一种钣焊机匣零件的激光刻型方法。张云鹏等^[19]提出了一种双曲率立体化铣零件激光刻型方法和工艺。孙新等^[20]研究激光强度对铝合金刻型质量的影响以及对化铣侵蚀比的影响。尚洪帅等^[21]研究了激光功率(80~140 W)

对有化铣保护层铝合金基材(2219、LD10 和 LF6)的力学性能和刻型质量的影响。王帅东等^[22]研究了铝合金一次刻型最佳工艺参数。裴丽艳等^[23]研究了刻透化铣胶膜但不伤及钛合金基体的激光刻型工艺参数和一般规律。

3) 激光刻型的控制技术方面。赵凯^[24]提出一种考虑机床动态特性的复杂曲面图案激光加工进给速度与激光功率协同控制技术。刘彦君^[25]完成了空间直线的五轴联动精插补控制。贺磊^[26]研究开发的五轴联动激光加工机床 5LC-1 可进行曲面类零件的激光加工。潘克江^[27]提出一种基于 STEP-NC 激光切割数控系统的设计方案。Lee 等^[28]研究了利用 CO₂ 激光切割机进行非传统切割时的功率控制方法, 基于自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 建立了进给速度、激光功率和切削深度之间的关系, 使用内嵌在现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片上的软件控制激光功率, 实现了激光切割深度的精确控制。Kramer 等^[29]与 Kadlec 等^[30]分别介绍了工业应用中具有反馈功能的激光功率测量系统。激光加工的五轴联动控制系统有西门子 840D PowerLine 激光加工数控系统^[31]、通快 TruLaser Cell 激光切割数控系统^[32]等, 面向实际应用需求的不同激光加工控制系统也被广泛关注和开发^[33-35]。

综上所述, 数控激光刻型是一种快速发展的激光加工技术, 近年来在激光刻型加工装备、刻型工艺、刻型加工过程控制等方面已开展较多研究并取得进展, 且研究开发成果已进入实际应用, 但还存在如下主要问题: 1) 当前激光刻型加工装备多是将通用的激光切割机床用于刻型, 缺乏对复杂化铣零件激光刻型特点的考虑, 在刻型轨迹规划及编程、刻型工艺参数选取和优化、刻型过程控制方面的适应性较差; 2) 缺乏对二次刻型过程的轨迹规划、工艺参数优化方法和技术研究; 3) 激光刻型控制系统多是在利用数控系统实现轴运动控制的基础上, 另增加工控机对激光部分进行控制, 缺乏“光、机、电”之间的协同控制; 4) 国内尚无自主研发的多轴联动的激光刻型机床。

为解决上述问题, 本文重点研究了激光刻型轨迹规划、光机电协同优化模型, 刻型过程参数自适应匹配与优化等关键技术, 开展了机床构成与设计、激光器与光路传输系统、光机电协同控制系统等方面的研制工作, 成功研制出六轴五联动数控激光刻型机床, 并进行实验和工程应用, 验证了上述关键技术的有效性。

2 激光刻型轨迹规划

2.1 激光刻型轨迹规划基本流程

智能数控激光刻型机床是针对航空发动机环形薄壁化铣零件的刻型加工工艺要求设计开发的一种新型数控机床,它主要完成零件化铣加工过程中对保护胶的数控刻型。通常,零部件进行两次化铣加工的工艺流程包括:毛坯→涂胶(一次涂胶)→一次刻型→一次化铣→二次涂胶→二次刻型→二次化

铣→最终成形。图1为机匣环型零件上一个局部图案化铣过程的示意图。由于航空发动机环形薄壁化铣零件一般为曲面类零件,刻型加工本质上是控制激光束在曲面上按给定的空间曲线轨迹运动(同时还要控制激光束与曲面保持给定的角度)进行刻蚀加工,特别是在二次刻型中,必须对激光刀轴倾角进行联动控制,以保证化铣形成工字型加强筋,因此该类激光刻型加工需要五轴联动才能在加工过程中实现轨迹和角度的同时控制。

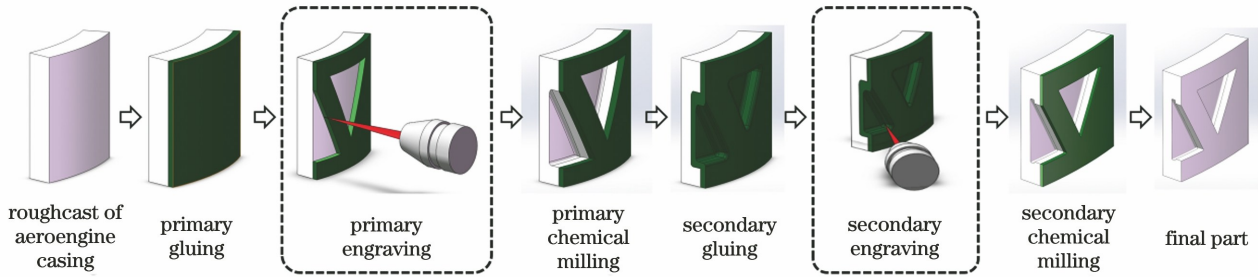


图1 化铣工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic of chemical milling process

在激光刻型加工过程中,一次刻型可以依据化铣零件的三维数模和化铣图形要求,调用 CAD/CAM 软件生成;但在二次化铣时,缺乏定位基准、化铣后变形、侵蚀比缩放等问题一直是刻型加工过程中未得到解决的难题。本文提出一种面向化铣演变的激光刻蚀过程的轨迹规划方法,为多次激光刻型位置点选取及轨迹规划提供了一种有效的解决方案。

它采用基于特征的计算机辅助编程,主要环节包括:零件分析→特征定义→特征提取→刀轨生成→刀轨优化。在二次刻型自动编程中,进一步考虑化铣过程曲面演变过程,需要进行第一次激光刻型位置点、形成工字型结构后第二次激光刻型侵蚀比和期望点、二次刻型光束指向、规则特征图形的轨迹规划、自由曲面曲线的轨迹规划、工作坐标系/机床坐标系变换等计算。图4所示为一次、二次激光刻型编程中复杂刀轨自动生成的实例。

对保护层进行一次、二次刻型的基本过程如图2所示。图3为激光刻型自动编程过程示意图,

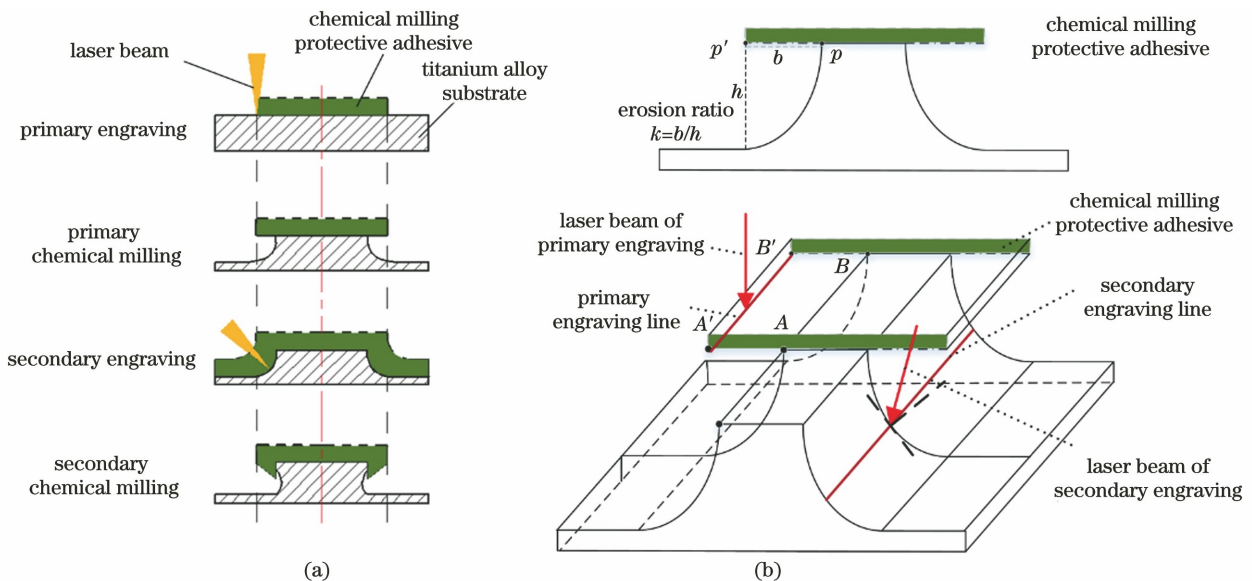


图2 一次、二次激光刻型过程示意图。(a)激光刻型截面图;(b)激光刻型侵蚀比和刻型加工线

Fig. 2 Schematic of primary and secondary laser engraving process. (a) Section of laser engraving; (b) erosion ratio and processing line of laser engraving

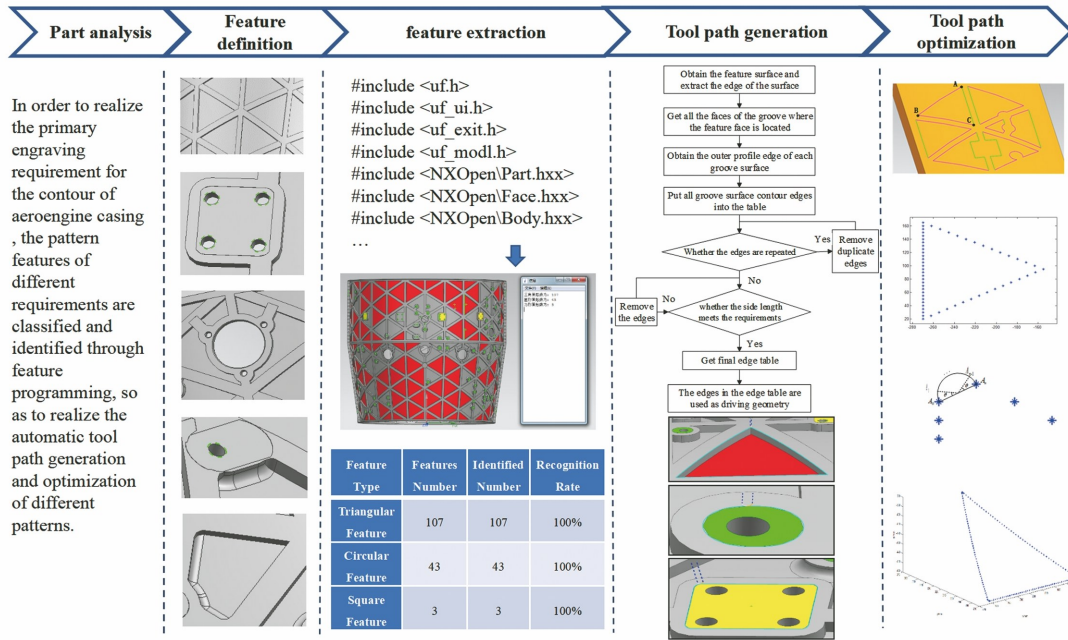


图3 激光刻型自动编程流程示意图

Fig. 3 Schematic of automatic programming of laser engraving

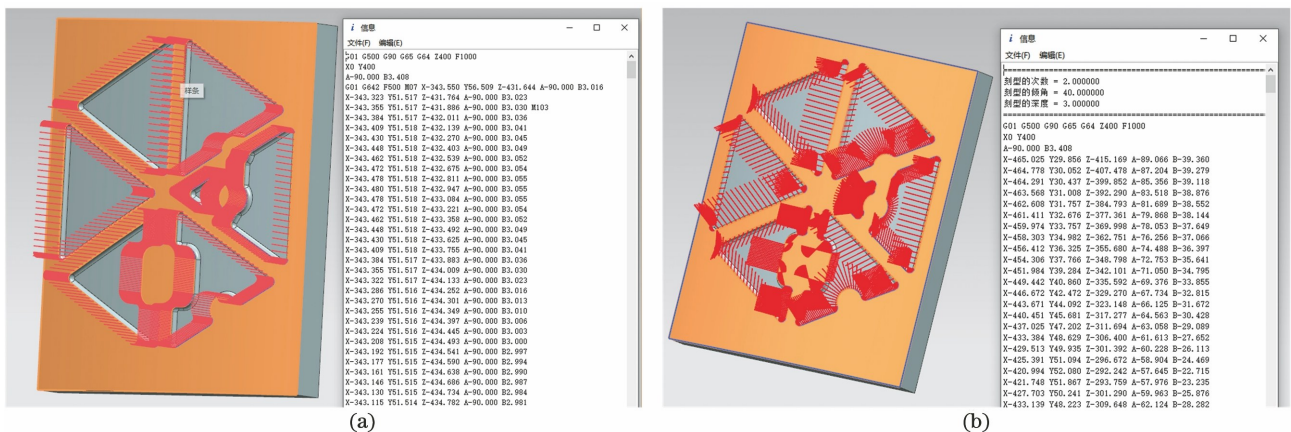


图4 激光刻型复杂刀轨的自动生成。(a) 一次刻型编程结果；(b) 二次刻型编程结果

Fig. 4 Automatic generation of complex tool path for laser engraving. (a) Program results of primary engraving; (b) program results of secondary engraving

2.2 面向一般曲线、曲面特征的轨迹规划算法

面向激光刻型的自由曲线、曲面几何特征的轨迹规划,本研究采用双B样条曲线逼近原始轨迹的方法。假设待拟合激光刻型位置和姿态轨迹的型值点分别为 $Q_{c,k} = \{x_{c,k}, y_{c,k}, z_{c,k}\}$ 和 $Q_{h,k} = \{x_{h,k}, y_{h,k}, z_{h,k}\}, k=0, \dots, m$, 求解目标刻型位置点曲线 $C(u)$ 和激光姿态点曲线 $H(u)$, 可得

$$\begin{cases} Q_{c,k} \approx C(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^n N_{c,i,p}(\bar{u}_k) P_{c,i} \\ Q_{h,k} \approx H(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^n N_{h,i,p}(\bar{u}_k) P_{h,i} \end{cases}, i=0, \dots, n, \quad (1)$$

式中:下标 c 表示位置点标记; h 表示姿态点标记; k 表示第 k 个位姿点; p 表示 B 样条的次数; \bar{u}_k 为型值点对应的参数值; $N_{c,i,p}$ 和 $N_{h,i,p}$ 分别为位置点和姿态点的 p 次 B 样条基函数; $P_{c,i}$ 和 $P_{h,i}$ 均为模型中的位置点轨迹曲线和姿态点轨迹曲线的控制顶点序列。带约束 B 样条最小二乘拟合的本质是用一条 p 次 B 样条在给定约束条件下逼近型值点,使得逼近误差平方和最小,则双 B 样条应有如下关系:对于 $C(u)$, 有

$$\begin{cases} \min f_c = \sum_{k=0}^m \left\| Q_{c,k} - \sum_{i=0}^n N_{c,i,p}(\bar{u}_k) P_{c,i} \right\|^2 \\ \text{s. t. } M_c P_c = T_c \end{cases}, (2)$$

对于 $\mathbf{H}(u)$, 有

$$\begin{cases} \min f_h = \sum_{k=0}^m \left\| \mathbf{Q}_{h,k} - \sum_{i=0}^n N_{h,i,p}(\bar{u}_k) \mathbf{P}_{h,i} \right\|^2, & (3) \\ \text{s. t. } \mathbf{M}_h \mathbf{P}_h = \mathbf{T}_h \end{cases}$$

式中: f_c 、 f_h 分别为位置点和姿态点轨迹曲线的逼近误差平方和; \mathbf{M}_c 、 \mathbf{M}_h 分别为位置点和姿态点轨迹的约束条件项, 常用的约束条件为端点插值(即首末控制定点等于型值点), 或首末点的切矢量等于给定的约束值。

根据式(2)、式(3)可以求解模型中的控制顶点 $\mathbf{P}_{c,i}$ 以及 $\mathbf{P}_{h,i}$, 两条曲线的误差定义表达式为

$$\begin{cases} \epsilon_{c, \max} = \max_{0 \leq k \leq m} \left\| \mathbf{C}(\bar{u}_k) - \mathbf{Q}_{c,k} \right\| \\ \epsilon_{h, \max} = \max_{0 \leq k \leq m} \left\| \mathbf{H}(\bar{u}_k) - \mathbf{Q}_{h,k} \right\| \end{cases} \quad (4)$$

选取某航空发动机机匣刻型的一段包含 121 个点的微小线段刻型特征轨迹, 采用本文算法在等弧长参数化和均匀节点矢量条件下进行 B 样条曲线

拟合, 拟合误差约束为 0.008 mm。分别拟合一段完整 B 样条轨迹和分段 B 样条轨迹(6 段), 拟合后激光刻型位置点轨迹曲线 $\mathbf{C}(u)$ 的控制顶点数量和曲线误差见表 1。一段完整 B 样条轨迹所有点的拟合精度如图 5(a)所示, 分段 B 样条轨迹所有点的拟合精度如图 5(b)所示。由拟合的不同曲线可知, 为了保证拟合精度, 可以增加控制顶点数量, 也可以对曲线进行分段拟合。

采用分段双 B 样条对刻型轨迹进行进一步轨迹规划, 采用等弧长参数化和均匀节点矢量对双 B 样条 $\mathbf{C}(u)$ 和 $\mathbf{H}(u)$ 曲线拟合, 拟合误差约束均为 0.005 mm, 结果见图 6。分段双 B 样条激光刻型轨迹 $\mathbf{C}(u)$ 和 $\mathbf{H}(u)$ 的控制顶点和曲线拟合误差见表 2。通过 $\mathbf{C}(u)$ 和 $\mathbf{H}(u)$ 计算得到的拟合后刀轴矢量角度误差如图 7 所示, 最大误差值为 0.00611 rad, 平均误差值为 0.00154 rad, 能满足实际加工需求。

表 1 激光刻型位置点不同轨迹曲线比较

Table 1 Comparison of different trajectory curves of laser engraving position points

Trajectory curve	Constraint of fitting error /mm	Number of control points	Actual fitting error /mm	
			Max error	Average error
Complete B-spline curve	0.008	Total: 73	0.00785	0.00209
Segmented B-spline curve (6 segment)	0.008	Each segment: 4, 4, 4, 4, 4, 4	0.00776	0.00315

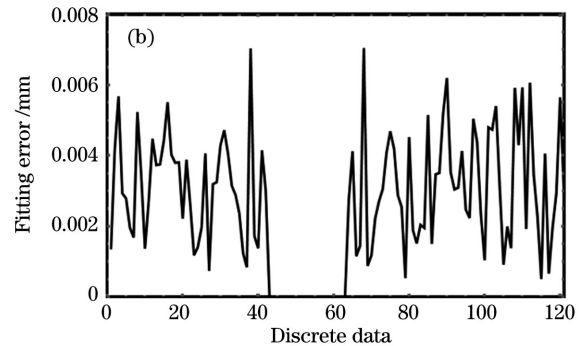
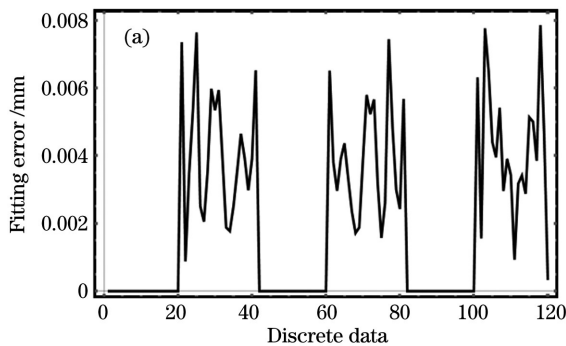


图 5 激光刻型位置点 B 样条拟合精度。(a) 一条完整 B 样条曲线的拟合精度; (b) 分段 B 样条曲线的拟合精度
Fig. 5 B-spline fitting accuracy of laser engraving position points. (a) Fitting accuracy of complete B-spline curve; (b) fitting accuracy of segmented B-spline curve

表 2 分段双 B 样条激光刻型轨迹

Table 2 Laser engraving trajectory of segmented double B-spline curve

Segmented B-spline curve	Constraint of fitting error /mm	Number of control points	Actual fitting error /mm	
			Max error	Average error
$\mathbf{C}(u)$	0.005	Each segment: 7, 8, 4, 8, 7, 16	0.00485	0.00189
$\mathbf{H}(u)$	0.005	Each segment: 17, 14, 4, 15, 16, 15	0.00456	0.00085

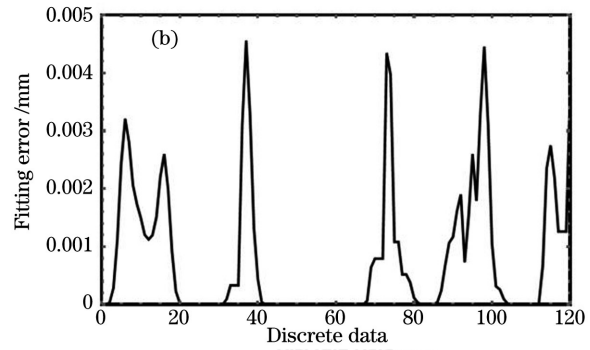
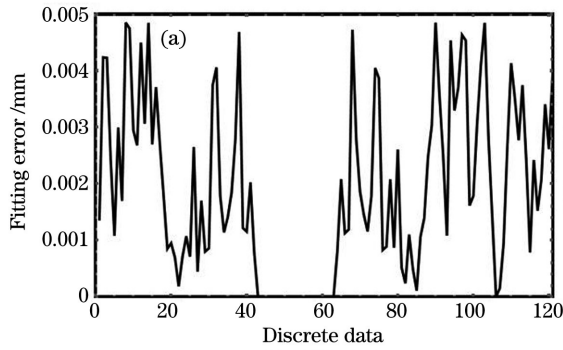


图6 分段双B样条轨迹的拟合精度。(a) 激光刻型位置点分段B样条拟合精度;(b)激光刻型姿态点分段B样条拟合精度
Fig. 6 Fitting accuracy of segmented double B-spline trajectory. (a) Fitting accuracy of segmented B-spline curve of laser engraving position; (b) fitting accuracy of segmented B-spline curve of laser engraving direction

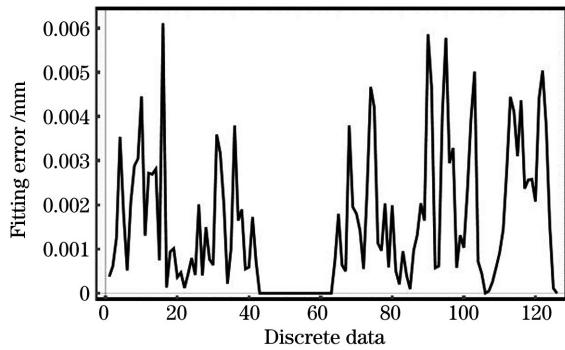


图7 激光刻型姿态点角度精度

Fig. 7 Angular accuracy of laser engraving attitude point

3 光机电协同优化模型

3.1 激光刻型光机电优化建模

激光刻型加工过程是综合了装备运动学、动力学、光学和热学的多参数多变量耦合过程,激光刻型过程优化和控制是一个多目标多约束的优化问题。

机床进给轴动力学约束速度(v)、加速度(a)和加速度变化率(j)均不超过给定约束值 v_m 、 a_m 、 j_m ,即

$$\begin{cases} v = \dot{q}v_i \leq v_m \\ a = \ddot{q}v_i^2 + \dot{q}a_i \leq a_m \\ j = \dddot{q}v_i^3 + 3\ddot{q}v_i a_i + \dot{q}j_i \leq j_m \end{cases}, \quad (5)$$

式中: q 为机床进给轴的位置轨迹, $q = (X, Y, Z, \dots)$; v_i 、 a_i 和 j_i 分别为第 i 段轨迹上的线速度、线加速度和加速度变化率。运动轨迹的弓高误差约束为

$$v_i \leq \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - \delta_m)^2}, \quad (6)$$

式中: T_s 为插补周期; ρ_i 为曲线在当前点处的曲率

半径; δ_m 为最大允许的弓高误差。

假设在给定激光器频率和功率的条件下,对第 i 个轨迹线段进行刻型, Δs_i 为第 i 段轨迹的弧长,则加工时间 Δt_i 、刻线深度 h_i 、热影响区宽度 w_i 的计算公式为

$$\Delta t_i = \frac{\Delta s_i}{v_i}, \quad (7)$$

$$h_i = C_h \left(\frac{p_i}{v_i} \right)^a, \quad (8)$$

$$w_i = C_w v_i^b p_i^d, \quad (9)$$

式中: C_h 和 a 为激光刻蚀深度模型中的参数,可以通过实验数据辨识获得; C_w 、 b 和 d 为热影响区经验模型中的参数,也可以通过实验数据辨识获得。刻线深度约束为刻线深度 h_i 大于或等于给定的胶层厚度 h_{\min} :

$$h_i > h_{\min}. \quad (10)$$

要实现刻型加工时间最小,且满足胶层刻透,同时热影响区宽度最小的优化目标,需要对刻型轨迹运动过程中的速度、加速度和加速度变化率等变量进行优化和控制。可将加工时间最小等效为进给速度最大,即 $J = \max \sum v_i^2 - A_{\beta i} \beta_i - A_{\alpha i} \alpha_i$ 。

将加速度变化率约束改为弱约束,引入偏差变量 α 和 β ,允许各轴的加速度变化率超出一定的比例,通过将超出部分的最小值作为目标函数进行优化。对应的权重 A_α 代表加速度变化率超出约束部分对加工结果的影响因子,可以去除偏差变量的目标成本为

$$\begin{cases} A_{\alpha i} = n a_m \Delta s_i \\ A_{\beta i} = 2n V_{\text{heat}}^2 \end{cases}. \quad (11)$$

因此,激光刻型加工参数光机电协同优化问题可表示为

$$J = \max \sum v_i^2 - A_{\beta i} \beta_i - A_{\alpha i} \alpha_i,$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} h_i = C_h \left(\frac{p_i}{v_i} \right)^a > h_{\min} \\ v_i \leq \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - \delta_m)^2} \\ v = \dot{q}v_i \leq v_m \\ a = \ddot{q}v_i^2 + \dot{q}a_i \leq a_m \\ j = \ddot{q}v_i^3 + 3\dot{q}\ddot{q}v_i a_i + \dot{q}j_i \leq j_m \\ v_i, p_i, a_i, j_i \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 激光刻型的光机电协同优化模型仿真

选取激光刻型轨迹规划中的一段 B 样条轨迹

表 3 光机电协同优化仿真条件

Table 3 Simulation conditions of optical electromechanical collaborative optimization

Variable parameter	Constraint condition	Variable parameter	Value	Variable parameter	Value
$v_m / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	{100,100,100}	$v_{\text{cmd}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	40	$v_{\text{heat}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	15
$A_m / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	{1000,1000,1000}	$v_{\text{start}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0	T_s / s	0.002
$J_m / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-3})$	{5000,5000,5000}	$v_{\text{end}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0	$\alpha_m / \%$	50

从图 8 所示的整段曲线速度优化结果可以看出,当速度低于热影响区能量阈值所允许的最低速度时(即 $v_i < v_{\text{heat}} = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$),可适当放宽轴加速度和加速度约束来提高进给速度。其中,在(a)区域曲线的曲率极大值处,即使动力学约束放宽也无法大幅增大进给速度,但是可以有效提升速度以减小热影响区能量阈值超出程度;在(b)区域,优化后的速度被提升至 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,保证了热影响区的能量阈值在许用范围内。需要说明的是,所提出的协同优化模型只在低速造成热影响区宽度超出的情况下才会放宽动力学约束,而且是有限地放宽约束,当速度高于热影响区能量阈值允许的最低速度时,按照原动力学约束进行约束,实现了刻型效

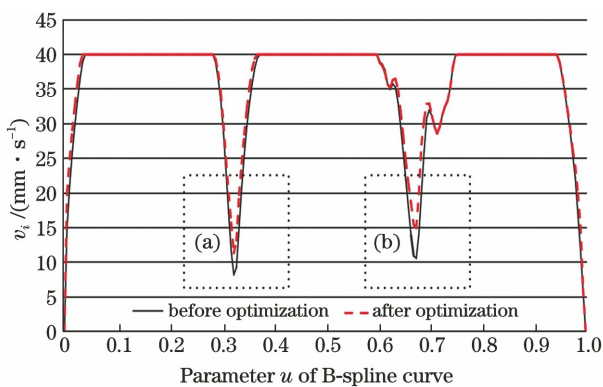


图 8 光机电协同优化算法的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of optical electromechanical collaborative optimization algorithm

曲线,对光机电协同优化过程进行仿真,仿真条件见表 3,其中 v_{heat} 为热影响区相关的参数。变量的取值范围为

$$\begin{cases} 0 \leq v_i \leq v_{\text{cmd}} \\ 0 \leq \beta_i \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq \alpha_m \\ v_0 = v_{\text{start}}, v_n = v_{\text{end}} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: α_m 为可放宽动力学约束的程度; $\beta_i \leq 1$ 表示热影响区的松约束,该值可以避免没有可行域的情况发生; v_{cmd} 为该曲线段的指令速度; v_{start} 和 v_{end} 为始末速度。

率和刻型质量的综合平衡。

4 刻型过程参数自适应匹配与优化研究

4.1 刻型过程参数自适应匹配与优化建模

刻型过程参数自适应匹配与控制主要解决两个问题:一是自动选择激光参数,以适配运动速度、加速度变化,避免刻型加工的起始点和拐角位置出现过烧;二是在 3D 曲面上刻型加工时,实时控制激光入射角度变化,以保证刻型质量。刻型过程中参数自适应匹配与控制的算法流程如下:

Step 1 选取激光器;

Step 2 匹配激光参数与刻型功率,

$$P = T(\gamma_{\text{DR}}, f);$$

Step 3 测试激光能量密度, $E_{\min} < E < E_{\max}$;

Step 4 选取激光刻型工艺参数与许用区间,

$$\begin{cases} v_{\min} < v < v_{\max} \\ \gamma_{\text{DR-min}} < \gamma_{\text{DR}} < \gamma_{\text{DR-max}} \\ f_{\min} < f < f_{\max} \\ \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max} \end{cases};$$

Step 5 控制激光刻型工艺与运动参数自适应匹配,

$$v = \frac{P}{w \times E} = \frac{T(\gamma_{\text{DR}}, f)}{w \times E};$$

Step 6 选取运动参数最优解,

$$\min(\kappa_{Pra}) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_i (\kappa_{Pra-i} - \kappa_{Pra-opt-i})^2};$$

Step 7 进行激光刻型加工。

其中： $P = T(\gamma_{DR}, f)$ 为通过实验测得的激光输出功率 P 与占空比 γ_{DR} 和脉冲频率 f 的映射关系； E 为激光能量密度，即单位面积的激光能量，通过实验可以获得透胶膜不伤及基体时的最小激光能量密度 E_{min} 和最大能量密度 E_{max} ； w 为激光刻型刻线的宽度； κ_{Pra-i} 为变量参数，可取为速度 v 、占空比 γ_{DR} 、频率 f 、入射角 θ 、激光能量密度 E ； ω_i 为各变量参数的权重系数。最终选取的工艺参数由以下优化计算求得：

优化目标

$$\min(\kappa_{Pra}) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_i (\kappa_{Pra-i} - \kappa_{Pra-opt-i})^2}; \quad (14)$$

约束条件

$$\begin{cases} v_{min} \leq \kappa_{Pra-1} = v \leq v_{max} \\ \gamma_{DR-min} \leq \kappa_{Pra-2} = \gamma_{DR} \leq \gamma_{DR-max} \\ f_{min} \leq \kappa_{Pra-3} = f \leq f_{max} \\ \theta_{min} \leq \kappa_{Pra-4} = \theta \leq \theta_{max} \\ E_{min} \leq \kappa_{Pra-5} = E \leq E_{max} \\ v = \frac{T(\gamma_{DR}, f)}{w \times E} \end{cases} \quad (15)$$

4.2 刻型过程参数自适应匹配与优化仿真

4.2.1 激光刻型最优参数和约束分析

刻型速度的约束主要由机床性能决定，一般情况下，刻型速度越快，加工效率越高。在实际刻型过程中，每个插补周期内，刻型的速度由速度规划决定，因此需要确定在不同速度状态下其他工艺参数的优化值。

表4 激光刻型工艺参数优化约束条件

Table 4 Optimization constraints of laser engraving process parameters

Parameter	Speed / (mm · s ⁻¹)	Laser energy density / (J · mm ⁻²)	Duty ratio	Frequency / Hz	Incident angle / (°)
$\kappa_{Pra-opt-i}$	100	3	80	5000	90
κ_{Pra-i}	0-100	3-12	1-100	0-5000	60-120

采用等权重方法，即各参数权重 $\omega_i = 1$ ，在 $0 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内，以 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为步长选取速度，其中频率最优值保持为 5000 Hz ，入射角度为 90° ，速度与能量密度和功率的对应关系如图9(a)所示。随着速度不断增加，占空比快速达到最终占空比目标值，激光能量密度初始为许用区间最大值，随后逐渐减小至许用区间最小值；随着速度增加，为了满足最小能量要求，占空比进一步增加至最大值。

激光能量密度约束主要取决于刻透胶膜所需要的能量密度。能量密度过低，激光无法刻透给定厚度的胶膜；能量密度过高会导致热量累积，刻线边缘融化，刻型刻线精度下降。

激光脉冲重复频率约束受激光设备自身的限制，激光脉冲重叠率直接决定了加工速度，重复频率越高，速度越快。速度与频率的关系为 $f = \sqrt{v^2 / (8Rh + 4h^2)}$ ，其中 R 为光斑直径， h 为两光斑的残留误差。本研究采用的光斑直径 $R = 0.15 \text{ mm}$ ， $h = 0.001$ ，可以计算出不同速度条件下激光频率的最小值，速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，频率为 2881.95 Hz 以上就可以满足误差要求。

占空比约束直接决定激光器的平均功率，一般与平均功率呈线性关系。本研究采用的激光器功率与占空比的关系为 $P = 0.32 \times \gamma_{DR} - 0.311$ 。

入射角度约束一般为垂直于曲面，入射光线的倾斜使得激光的辐射面积更加大，且所需要的刻蚀化铣保护胶的深度增加，激光刻型引入可变倾斜角，使得激光刻型呈现出与平面刻型不同的特性，因此入射角度以垂直于曲面的角度进行加工。同时，为了避免激光加工装置的干涉和碰撞，激光刻型入射光线也以某种倾斜角度进行加工，此时需要计算该入射角度状态下所需的激光能量，使激光刻型能够满足要求。

4.2.2 激光刻型参数自适应匹配与控制优化仿真结果

给定一组优化模型的激光刻型参数的最优值和变量区间，见表4。给定不同的权重，对激光刻型参数自适应匹配与控制算法开展仿真计算。

等权重工艺参数下，综合优化结果为 $v = 70 \text{ mm/s}$ 、 $E = 3 \text{ J/mm}^2$ 、 $\gamma_{DR} = 100$ 、 $f = 5000 \text{ Hz}$ 、 $\theta = 90^\circ$ ； $v = 40 \text{ mm/s}$ 时，优化结果为 $E = 4.16 \text{ J/mm}^2$ 、 $\gamma_{DR} = 80$ 、 $f = 5000 \text{ Hz}$ 、 $\theta = 90^\circ$ 。

采用不等权重方法，即激光能量权重 $\omega_j = 100$ ，占空比权重 $\omega_{DR} = 1$ ，其他权重 ω 均为 0 ，并在 $0 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内以 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为步长选取速度，其中频率最优值保持为 5000 Hz ，入射角度为 90° ，

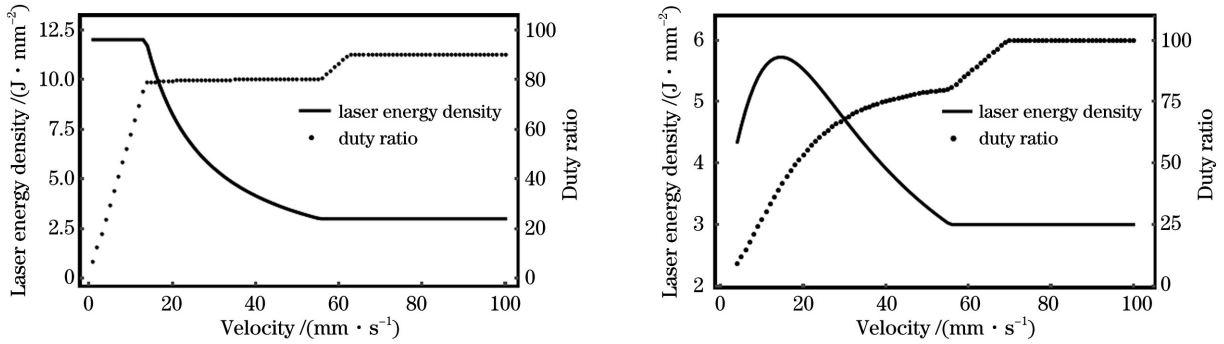


图9 激光刻型工艺参数优化结果;(a)等权重工艺参数下优化结果;(b)不等权重工艺参数下优化结果

Fig. 9 Optimization results of laser engraving process parameters; (a) Optimization results of engraving process parameters under equal weight; (b) optimization results of engraving process parameters under unequal weight

速度与能量密度和占空比的对应关系如图9(b)所示。随着速度的增加,激光能量密度先增大到许用区间的最大值后快速降低至许用区间最小值,占空比则缓慢增大到许用区间的最大值。特别注意的是,当激光能量密度权重较大时,在不同速度条件下,激光能量密度始终可以保持在较低的状态。不等权重工艺参数下的综合优化结果如下: $v = 55.5 \text{ mm/s}$ 、 $E = 3 \text{ J/mm}^2$ 、 $\gamma_{DR} = 80$ 、 $f = 5000 \text{ Hz}$ 、 $\theta = 90^\circ$; 当 $v = 40 \text{ mm/s}$ 时,优化结果为 $E = 3.9 \text{ J/mm}^2$ 、 $\gamma_{DR} = 75$ 、 $f = 5000 \text{ Hz}$ 、 $\theta = 90^\circ$ 。需要说明的是,当取某一个参数的权重系数 $\omega_i = 1$,其他参数的权重系数 $\omega_i = 0$ 时,上述优化模型可以简化为某一个单一变量的优化模型。

5 工程样机研制及验证

5.1 激光刻型原理样机构成及总体设计

根据刻型加工工艺要求,设计了一种六轴五联动智能数控激光刻型机床的原理样机,其构成如图10所示。图10(a)所示为主机结构原理及构成,主要部件包括机床床身和立柱、光路安装平台、X/Y/Z直线进给轴、A/B通光旋转轴、C轴机械旋转轴工作台、激光及光路系统等。图10(b)所示的系统功能模块框图从“光-机-电”一体化功能实现的角度,给出了激光刻型原理样机系统软件的功能总体架构设计。

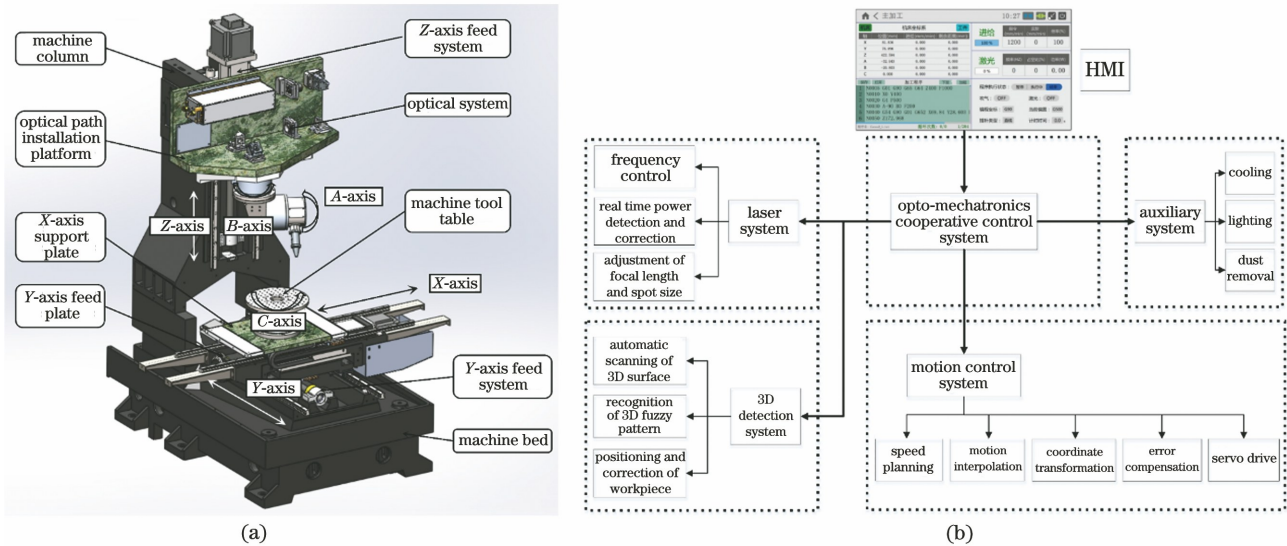


图10 六轴五联动智能数控激光刻型机床原理样机构成。(a)主机结构示意图;(b)系统功能模块

Fig. 10 Principle and prototype composition of 6-axis 5-linkage intelligent NC laser engraving machine tool. (a) Schematic of main equipment; (b) function model of system

5.2 激光器及光路传输系统

根据数控激光刻型加工要求进行具有高精度光路柔性传输定位功能的光学传输系统设计,该系统主要包含扩束镜、反射镜、光阑、指示光源、反射

式1/4波片、聚焦镜和保护窗口片等。CO₂激光器发出的激光光束经扩束镜扩展后,通过反射镜M1、M2调节激光束位置和指向,经光阑对光束进行整形;利用反射式1/4波片调节激光束为圆偏振态,结

合反射镜 M3 调节激光光束的指向和位置后,进入 AB 轴激光加工头,AB 轴激光加工头可实现激光光束的三维旋转(其中,B 轴可以使它之后的所有光学元件整体绕光轴旋转 360° ,A 轴可以使它之后的所有光学元件整体绕光轴在 $-120^\circ \sim 120^\circ$ 范围内摆动)后,再通过聚焦镜将激光束会聚到工作面上进行刻型加工。激光器及光路传输系统的主要参数如下:激光器为 CO_2 激光器,功率为 30 W,波长为 $10.6 \mu\text{m}$,光束直径为 2.5 mm ($1/e^2$ 处),光束因子 $M^2 < 1.2$;扩束镜倍数为 8 倍,扩束后的光束直径为

20 mm;聚焦镜焦距为 150 mm;焦点直径为 $121 \mu\text{m}$,焦深为 $583 \mu\text{m}$;A、B 通光旋转轴的定位精度分别为 $\pm 4.1''$ 、 $\pm 2.3''$,重复定位精度分别为 $\pm 0.6''$ 、 $\pm 1.0''$ 。

所设计的光路传输系统结合空间旋转同步精度控制技术,实现了光路柔性空间传输定位装置在五轴加工系统中空间位置的精准定位及五轴高精度联动,为复杂构件表面图案精细制造提供了关键技术。光路传输系统设计总图如图 11(a)所示;光路传输系统硬件如图 11(b)所示。

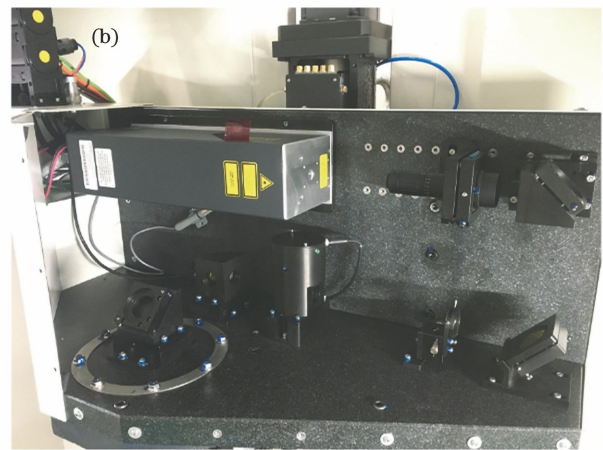
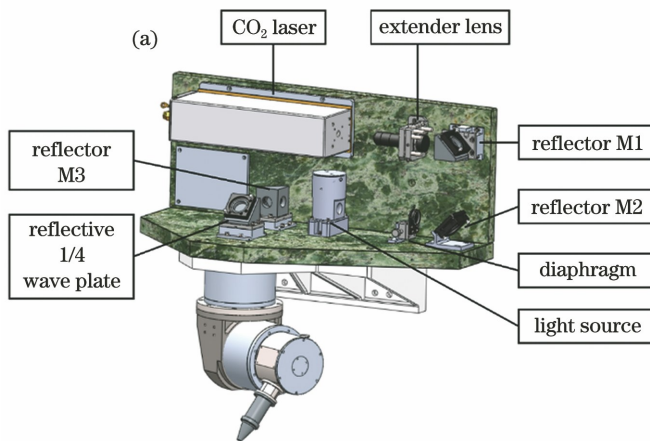


图 11 光路传输系统。(a)光路传输系统设计总图;(b)光路传输系统硬件

Fig. 11 Optical transmission system. (a) Design drawing of optical transmission system; (b) hardware of optical transmission system

5.3 光机电协同系统构成及开发

光机电协同控制的任务是根据激光刻型加工要求,综合考虑激光刻型过程热能平衡、激光能量与进给速度关联模型、各伺服运动轴动力学特点和多轴联动运动控制等因素,对刻型机床和刻型过程的光、机、电等多参数多变量进行协同控制,满足这一要求的系统称为光机电协同控制系统。

结合激光刻型关键技术研究,开发了一种多轴运动激光刻型光机电协同控制系统,实现了激光功率与运动参数的自适应控制。首先,实现数控系统对激光器脉冲频率、功率的实时控制;其次,基于机床运动学动力学约束并引入激光刻型深度和宽度约束对刻型轨迹进行速度规划,获得最优的进给速度和激光参数;最后,针对不同的数控系统采用不同的方式实现参数协同,通过在开放式数控系统中添加光机电协同控制模块实现光机电参数的实时控制,通过对 G 代码进行二次后处理以修改进给速度和激光参数的方式实现商用数控系统的光机电协同控制。其中,面向

数控系统,实现了第三方嵌入式运动控制的光机电协同控制方案。

六轴五联动数控激光刻型机床的光机电协同控制构成如图 12 所示。该系统的硬件层包括:用作光机电协同控制系统主机的工控机、数控运动控制系统、激光系统、3D 检测系统(扫描和定位)、辅助控制系统(冷却、集尘等)。软件层的主要功能模块有:定位测量、3D 测量、自动编程模块;定位找正控制、光机电参数控制、刻型过程状态管理模块;六轴五联动运动控制、激光频率/功率控制、柔性装夹控制、辅助控制模块等。协同控制系统采用开放式数控系统架构,按功能进行模块化开发。图 13 为光机电协同控制系统软件功能框图。上位机的 Windows 平台主要实现人机交互、接收指令代码和译码、速度规划、刻型过程状态监测及信息显示等非实时任务。实时任务运行于下位机的实时内核中,其主要任务是接收上位机发送的指令队列,实时进行插补、变换等运算,控制各轴运动和激光功率的调整。上、下位机之间通过 ADS 协议实现通信和信息交互。

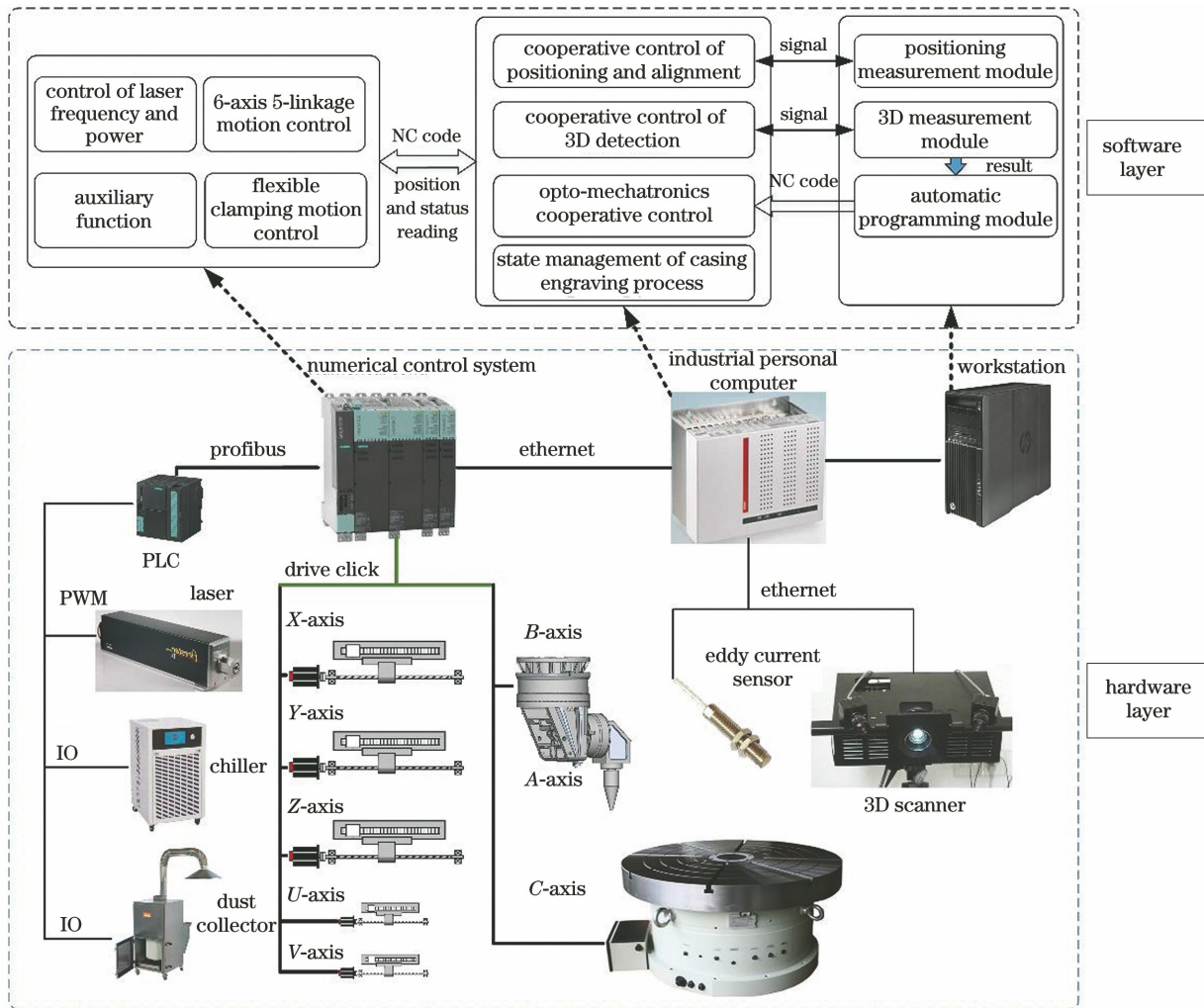


图 12 光机电协同控制系统构成

Fig. 12 Composition of opto-mechatronics cooperative control system

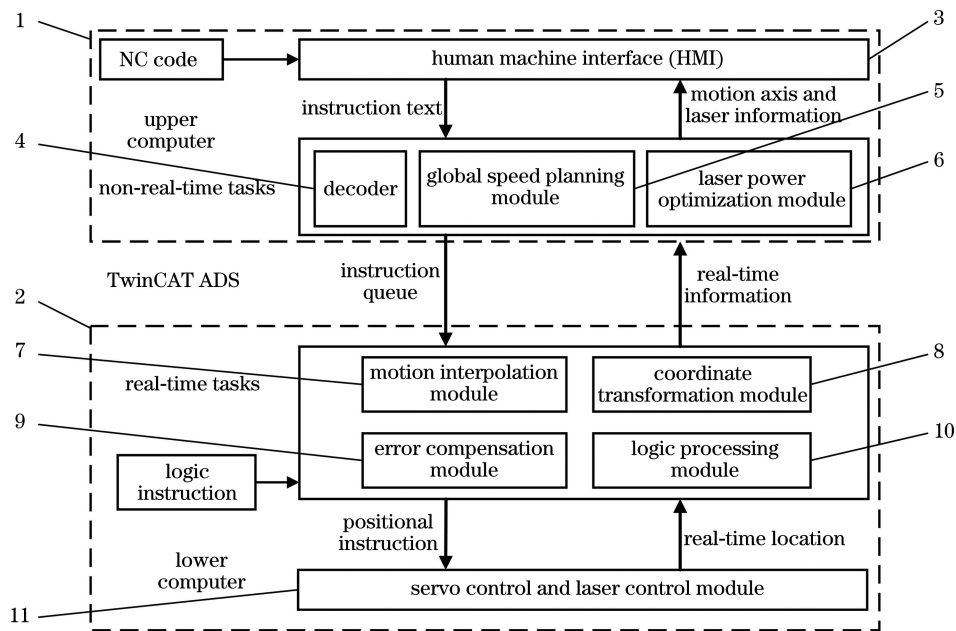


图 13 光机电协同控制系统软件功能框图

Fig. 13 Software function block diagram of opto-mechatronics cooperative control system

5.4 工程样机研制及应用验证

基于原理样机研制和关键技术攻关,针对航空发动机环型薄壁类化铣零件加工工艺需求,研制出

一台全尺寸的六轴五联动激光刻型机床工程样机(型号为 TC16022TW-1-1),可实现大型环型薄壁类化铣零件的一次、二次激光刻型加工,如图 14 所示。

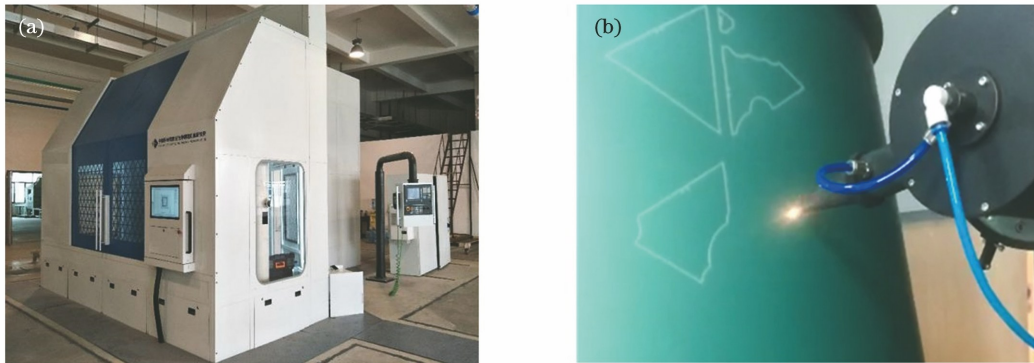


图 14 工程样机和零件刻型过程。(a)工程样机;(b)刻型过程

Fig. 14 Engineering prototype and laser engraving process. (a) Engineering prototype; (b) laser engraving process

工程测试样件的实际刻型加工结果如图 15 所示,图 15(a)、(b)所示为一次刻型及揭去保护胶层

后的样件(局部),图 15(c)、(d)所示为二次刻型及揭去保护胶层后的样件(局部)。



图 15 工程测试样件的激光刻型结果。(a)一次刻型;(b)一次揭胶;(c)二次刻型;(d)二次揭胶

Fig. 15 Laser engraving results of engineering sample. (a) Primary engraving; (b) primary stripping; (c) secondary engraving; (d) secondary stripping

根据激光刻型检测结果,激光一次/二次刻型可以实现刻透胶膜(胶膜厚度为 0.3 mm);激光刻型刻缝宽度为 0.092 mm(工艺要求:0.1 mm),如图 16(a)所示;基体无烧蚀,刻缝上部边缘整齐,底部边沿整齐,如图 16(b)、图 17 所示;激光二次重复

刻型精度 ≤ 0.034 mm(工艺要求:2次重复刻型精度误差 ≤ 0.05 mm)。需要说明的是,激光二次刻型的实际误差受到定位精度、机床精度、化铣精度等环节的影响,本研究的刻型关键技术和装备最终满足刻型加工的工艺要求。

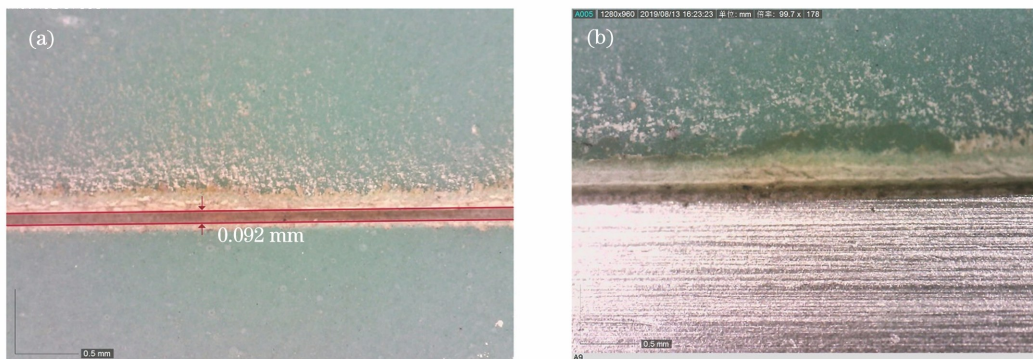


图 16 一次刻型刻线及剥胶效果。(a)一次刻型刻缝;(b)一次刻型剥胶效果

Fig. 16 Laser grooving and removing chemical milling adhesive of primary engraving. (a) Laser grooving of primary engraving; (b) effect after removing chemical milling adhesive



图 17 二次刻型刻线及剥胶效果

Fig. 17 Laser grooving and removing chemical milling adhesive of secondary engraving

图 18 所示为经过两次化铣过程的样件局部和化铣后形成的“工”字型加强筋横截面的实际测量结果,可以看到,工字型加强筋宽度和棱边侧壁方向刻蚀深度均匀,具有理想的“工”字型截面特征。

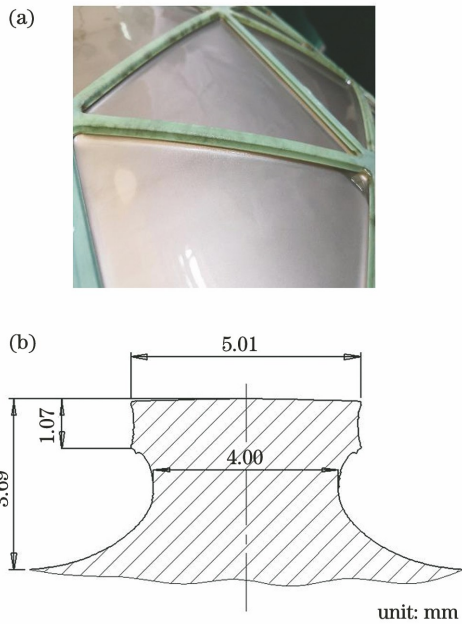


图 18 工程测试样件二次化铣结果。(a)实际样件;
(b)工字型截面测量结果

Fig. 18 Secondary chemical milling results of engineering sample. (a) Actual part; (b) measured result

6 结 论

针对机匣环形薄壁筒体激光刻型加工问题,突破了高精度光路柔性传输定位、激光刻型过程多参数多变量耦合控制、具有直接运动和嵌入式运动多模式的开放光电协同控制系统、激光刻型特征轨迹规划和自动编程等核心技术,研制出六轴五联动数控激光刻型机床原理样机和工程样机,实现了航空发动机机匣环形薄壁化铣筒体零件的一次刻型/

二次刻型,为解决航空航天化铣结构零件激光刻型问题提供了关键技术和装备的支持,具有良好的应用前景。

致谢 在研究过程中得到西安交通大学梅雪松团队、西安中科光电精密工程有限公司吴易明团队、北京航天控制仪器研究所王军龙团队等的支持,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] Mahamood R M, Akinlabi E T. Chemical cutting process [M] // Mahamood R M, Akinlabi R T. Advanced noncontact cutting and joining technologies. Mechanical engineering series. Cham: Springer, 2018: 11-25.
- [2] 于志涌. 航空发动机机匣加工工艺探讨[J]. 科技创新与应用, 2013(17): 103.
Yu Z Y. Discussion on machining technology of aeroengine casing [J]. Technology Innovation and Application, 2013(17): 103.
- [3] 丁韬. 自动定位系统、激光刻型机和卧式数控蒙皮下料钻铣床[J]. 航空制造技术, 2007, 50(5): 46-50.
Ding T. Automatic positioning system, laser engraving machine and horizontal NC skin blanking drilling and milling machine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(5): 46-50.
- [4] 邱兆峰. 激光切割技术在航空发动机制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2015(4): 42-44.
Qiu Z F. Application of laser cutting technology in aeroengine manufacturing [J]. MW Metal Forming, 2015(4): 42-44.
- [5] 滕志强, 李明, 王辉. 一种大尺寸环形薄壁零件激光刻型新方法[J]. 机械设计与制造, 2016(12): 177-179, 183.
Teng Z Q, Li M, Wang H. Research on laser engraving method for large annular thin wall parts [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(12): 177-179, 183.
- [6] 殷世坤, 郭岩, 解二伟, 等. 化铣生产中激光刻型技术的应用优势探讨[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(3): 32-36.
Yin S K, Guo Y, Xie E W, et al. Discussion on the application advantages of laser engraving technology in open milling production [J]. Plating and Finishing, 2021, 43(3): 32-36.
- [7] 陈良辉, 赵盛宇, 周泳全, 等. 五轴数控系统的三维曲面激光加工关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071406.

- Chen L H, Zhao S Y, Zhou Y Q, et al. Key technologies of laser machining of 5-axes CNC system for three-dimensional freeform surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071406.
- [8] 朱贺轩. 基于电磁变刚度关节的机翼曲面蒙皮机器人刻型系统设计与实验[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Zhu H X. Design and experiment of wing surface skinning robot engraving system based on electromagnetic variable stiffness joint [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [9] Arnold N, Bityurin N, Bäuerle D. Laser-induced thermal degradation and ablation of polymers: bulk model[J]. *Applied Surface Science*, 1999, 138/139: 212-217.
- [10] Nakamura S, Midorikawa K, Kumagai H, et al. Effect of pulse duration on ablation characteristics of tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene copolymer film using Ti:sapphire laser[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(1R): 101-106.
- [11] 倪晓昌, 王清月. 飞秒激光烧蚀研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, 39(12): 4-9.
- Ni X C, Wang Q Y. Research progress of femtosecond laser ablation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, 39(12): 4-9.
- [12] 李文豪, 石玮玮, 李灌华, 等. 激光清洗技术在某类型装备修理中的应用研究[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-9[2021-01-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20211022.1410.002.html>.
- Li W H, Shi W W, Li G H, et al. Research of laser cleaning technology application in a type of equipment repair[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-9[2021-01-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20211022.1410.002.html>.
- [13] Desai C K, Shaikh A. Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(9/10/11/12): 865-882.
- [14] Sauerbrey R, Pettit G H. Theory for the etching of organic materials by ultraviolet laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 55(5): 421-423.
- [15] Leone C, Lopresto V, Minutolo F M C, et al. Laser ablation of maskant used in chemical milling process for aerospace applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7751: 77511M.
- [16] 叶匀分, 朱荣林. 激光在曲面微带天线制作中的应用[J]. *中国激光*, 2003, 30(4): 361-363.
- Ye Y F, Zhu R L. Application of laser in the execution of microband antenna on curved surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(4): 361-363.
- [17] 高献娟, 黄青松, 刘宝琪, 等. 三维激光切割工艺在化铣焊接机匣加工中的应用研究[J]. *机械设计与制造*, 2012(7): 92-94.
- Gao X J, Huang Q S, Liu B Q, et al. Research on application of three dimensional laser cutting technique in chemical milling and welding case[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(7): 92-94.
- [18] 阚田田, 邱兆峰, 高献娟. 一种钣焊机匣的激光刻型方法: CN102489881A[P]. 2012-06-13.
- Kan T T, Qiu Z F, Gao X J. Laser texturing method for plate welding machine box: CN102489881A[P]. 2012-06-13.
- [19] 张云鹏, 纪瑞东. 双曲率立体化铣零件激光刻型加工方法: CN104985329B[P]. 2016-09-21.
- Zhang Y P, Ji R D. Double curvature stereoscopic part milling laser etching machining method: CN104985329B[P]. 2016-09-21.
- [20] 孙新, 张政斌, 陈素明. 激光刻型技术在铝合金化学铣切中的应用[J]. *科技传播*, 2016, 8(11): 227-228.
- Sun X, Zhang Z B, Chen S M. Application of laser molding technology in chemical milling of aluminum alloy [J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2016, 8(11): 227-228.
- [21] 尚洪帅, 邹松华, 王帅东, 等. 铝合金表面化铣保护胶层激光刻型的可行性分析[J]. *电镀与涂饰*, 2018, 37(24): 1139-1142.
- Shang H S, Zou S H, Wang S D, et al. Analysis on feasibility of laser engraving on aluminum alloys with protective coatings for chemical milling[J]. *Electroplating & Finishing*, 2018, 37(24): 1139-1142.
- [22] 王帅东, 邹松华, 尚洪帅, 等. 铝合金化学铣切激光刻型工艺参数研究[J]. *电镀与精饰*, 2019, 41(2): 39-42.
- Wang S D, Zou S H, Shang H S, et al. Study on process parameters of laser engraving of aluminum alloy[J]. *Plating & Finishing*, 2019, 41(2): 39-42.
- [23] 裴丽艳, 王辉, 孙鹏鹏, 等. 钛合金基体化铣保护层激光刻型工艺参数研究[J]. *电镀与精饰*, 2021, 43(11): 29-35.
- Pei L Y, Wang H, Sun P P, et al. Study on laser engraving process parameters of protective coatings on titanium alloy substrate for chemical milling[J]. *Plating and Finishing*, 2021, 43(11): 29-35.
- [24] 赵凯. 工程塑料复杂曲面零件表层跨尺度金属图案精密制造技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Zhao K. Precision manufacturing technology for multi-scale metal pattern on engineering plastic parts

- with complex surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [25] 刘彦君. 三维激光切割数控软件架构及其关键功能开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Liu Y J. Design and development of software architecture and major functional for three dimensional laser cutting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [26] 贺磊. 五轴联动激光加工机数控系统的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
He L. Study on the numerical control system of the simultaneous five-axis laser processing machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [27] 潘克江. 基于 STEP-NC 激光切割数控系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Pan K J. Studies in laser-cutting technology CNC system based on STEP-NC [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [28] Lee K C, Wang C K, Shieh C H. Reliable analysis and power control for the nontraditional cutting methodology on the CO₂ laser machine[J]. *Advanced Science Letters*, 2012, 14(1): 356-359.
- [29] Kramer R, Schwede H, Haensel K, et al. Laser power measurement in industrial environment [J]. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2003, 805: 51-58.
- [30] Kadlec J, Vrba R. Control system for precise power laser measurement[C]//Second International Conference on Systems (ICONS'07), April 22-28, 2007, Martinique, France. New York: IEEE Press, 2007: 21-23.
- [31] Andolfatto L, Mayer J R R, Lavernhe S. Adaptive Monte Carlo applied to uncertainty estimation in five axis machine tool link errors identification with thermal disturbance [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(7/8): 618-627.
- [32] Yilbas B S, Akhtar S S, Keles O. Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1/2/3/4): 101-111.
- [33] Yang J, Bin H, Zhang X, et al. Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering (SLS)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(3): 293-300.
- [34] Martinov G M, Kozak N V, Nezhmetdinov R A, et al. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems [J]. *Automation and Remote Control*, 2017, 78(3): 525-536.
- [35] Grigoriev S N, Martinov G M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized CNC systems[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 41: 858-863.

Research and Development of Key Technologies and Equipment for Multiaxis CNC Laser Engraving

Liu Qiang^{1,4*}, Wang Jian^{1,5}, Sun Pengpeng^{1,6}, Li Ming², Wang Hui³, Yin Zhenshuo^{1,4},
Wang Liuquan^{1,5}, Li Kunhang³

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

³ AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China;

⁴ Jiangxi Research Institute of Beihang University, Nanchang 330096, Jiangxi, China;

⁵ Beijing Engineering Technological Research Center of High-Efficient and Green CNC Machining Process and Equipment, Beijing 100191, China;

⁶ DSTI Innovation Center of High-Efficient CNC Machining Technology, Beijing 100191, China

Abstract

Objective As a new pattern engraving method of chemical milling parts, laser engraving is one of the important processes in chemical milling for aeroengine casing. This technique can effectively improve the precision and the efficiency of chemical milling. Moreover, it is greatly significant in improving the thrust-weight ratio and the manufacturing efficiency of the aeroengine. In the laser engraving process, according to the numerical control (NC) machining program based on the geometric pattern information and the process parameters of chemical milling, the geometric pattern is engraved on the protective adhesive layer by laser ablation under the control of the optical electromechanical cooperative control system. Laser engraving combines laser processing with the NC technology and

a digital manufacturing process that has high precision and efficiency, digitization, and flexibility. The method can also be used for primary/secondary engraving on complex surfaces to solve the engraving bottleneck problem of aerospace complex thin-walled structures. The laser engraving research in China is still in its initial stage and mainly focuses on investigating the primary laser engraving process parameters and the engineering application of foreign laser engraving machines. Less research has been conducted on the key technologies and equipment used for the laser engraving of three-dimensional (3D) complex structure parts, and many technical difficulties have not yet been overcome. This work investigates the key technologies of the engraving process parameters, including laser engraving trajectory planning, optical electromechanical collaborative optimization model, and adaptive matching mechanism. The six-axis, five-linkage NC laser engraving machine tool is developed to provide a new solution to the bottleneck problem of engraving in the chemical milling of the complex thin-walled structures of the aerospace.

Methods First, based on the laser multiple engraving process, a laser engraving trajectory planning algorithm considering the chemical milling evolution is proposed herein to solve the laser engraving problem of the complex surface on aeroengine casing. The basic processes of trajectory planning and automatic programming of the pattern features for multiple laser engraving are given. The multi-axis motion trajectory of the laser engraving position and direction is fitted by a complete B-spline curve and a segmented double B-spline curve. The number of control points and the fitting error of the curve are then analyzed. Second, an opto-mechatronics collaborative optimization model is established aiming at the minimum processing time and the minimum width of the heat-affected zone while the adhesive layer is etched through. In this model, the bow height error of the trajectory curve, speed, acceleration, and jerk of the feed axis are considered. Furthermore, the minimum processing time is equivalent to the maximum feed speed. Third, an adaptive matching optimization algorithm for the engraving process parameters is established to solve the optimization problem of the motion and laser process parameters. The laser process parameters that satisfy the constraints under different speed conditions are simulated and calculated, providing theoretical parameters for the optical electromechanical cooperative control of laser engraving. Finally, the structure of the six-axis, five-linkage NC laser engraving machine tool, the high-precision optical path flexible transmission and positioning, and the optical electromechanical cooperative control system are implemented. The six-axis, five-linkage NC laser engraving machine tool is developed to realize the application of primary/secondary laser engraving.

Results and Discussions First, for the trajectory planning of the laser engraving position points, a complete B-spline curve and a segmented B-spline curve are used to generate the trajectory that meets the accuracy requirements. The fitting accuracy of each curve is less than 0.008 mm (Fig. 5). To ensure the fitting accuracy, the complete B-spline curve needs more control points, while the segmented B-spline curve needs less control points (Table 1). The segmented double B-spline curve is used to generate the trajectory for the engraving position and direction. The fitting accuracy of the segmented double B-spline curve of the laser engraving position and direction can reach 0.005 mm (Fig. 5). The maximum error of the direction vector angle by the segmented double B-spline curve is 0.0061 rad, which effectively meets the laser engraving process requirements. Second, the simulation results of the opto-mechatronics collaborative optimization model illustrate that the energy in the heat-affected zone exceeding the threshold is mainly considered in the low-speed movement section. In addition, the engraving speed is increased to ensure the engraving quality (Fig. 8). The kinematic constraints of the equipment are mainly considered to complete the engraving processing with the highest efficiency in the high-speed movement section. The comprehensive balance between the engraving quality and efficiency is realized in this model. Third, to optimize the motion and process parameters in the engraving process, the comprehensive optimization results under different weight conditions are given, and the corresponding process parameters of the laser energy density and the duty ratio under different speeds are calculated (Fig. 9). Different laser motion and laser parameters can be quickly selected through different weight settings. Fourth, the primary engraving/secondary engraving of the annular thin-walled milling cylinder parts of an aeroengine casing is realized. The accuracy error of the secondary laser engraving can reach 0.034 mm, meeting the process requirements of the secondary laser engraving accuracy that should be less than 0.05 mm.

Conclusions This study investigates the key technologies of the laser engraving process, including laser engraving feature trajectory planning and automatic programming, collaborative optimization control of the laser engraving process, high-precision optical path flexible transmission and positioning, and optical electromechanical collaborative control system. The principle and engineering prototypes of the six-axis, five-linkage NC laser engraving machine tool are successfully developed, consequently providing the key technologies and the equipment support for solving

the laser engraving problem of aerospace chemical milling structural parts. The key technologies of the laser engraving process and the six-axis, five-linkage NC laser engraving machine tool will not only solve the manufacturing problem of aerospace chemical milling parts, they can also be widely used in the fine manufacturing of 3D complex surfaces, which will effectively improve the performance and the manufacturing efficiency of major instruments and equipment.

Key words microfabrication; laser engraving; trajectory planning; optical electromechanical cooperative control; optimization of process parameters; 5-axis CNC