

引文格式: 聂华海, 郭兵, 冯峻良, 等. 高陡度保形整流罩的机器人高精度轮带抛光加工技术[J]. 航空制造技术, 2026, 69(8): 25010122.

NIE Huahai, GUO Bing, FENG Junliang, et al. Precision robotic belt grinding technology for high-steepness conformal radome[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25010122.

高陡度保形整流罩的机器人高精度轮带抛光加工技术

聂华海¹, 郭兵¹, 冯峻良¹, 彭纪有¹, 赵清亮¹, 姚洪辉²

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院精密工程研究所, 哈尔滨 150001;

2. 中山超精密科技有限公司, 中山 528437)

[摘要] 高陡度保形整流罩由于其非常规的外形结构, 传统抛光技术无法对其进行高效确定性抛光, 亟需开发一种针对高陡度保形整流罩的适应性好、自由度高、加工稳定性好的抛光装置及工艺方法。本文首先构建了适用于高陡度保形整流罩的机器人轮带抛光装置, 其次基于抛光工艺试验建立了公自转轮带抛光去除函数模型, 最后开发了等重叠率抛光轨迹和驻留时间求解算法, 实现了高陡度保形整流罩的修形抛光, 将表面粗糙度 R_a 值降低至 3 nm 以内, 整体面形误差 PV 值收敛至 3 μm 以内。

关键词: 高陡度保形整流罩; 机器人轮带抛光; 去除函数模型; 轨迹规划; 驻留时间; 面形误差

中图分类号: V261.2; TH117; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010122



聂华海

博士研究生, 主要研究方向为精密/超精密加工。

保形整流罩在航空航天及军事领域的应用日益广泛, 通常其面形精度需达到 μm 级, 表面粗糙度需达到

nm 级才能保障红外探测系统的成像水平^[1]。然而, 面向保形整流罩在高精度加工技术上面临诸多难点, 其非常规的高陡度薄壁结构导致现有光学加工技术中, 如抛光装置、轨迹算法及工艺方案等方面均难以满足高陡度保形整流罩的加工精度要求^[2]。因此, 亟需开展高陡度保形整流罩的抛光技术研究。

随着对保形光学元件应用需求的不断增加, 众多学者围绕其需求系统地开展了抛光设备研发、抛光机理分析、驻留时间解算等一系列研究。美国罗切斯特大学与 OptiPro Systems 公司^[3]联合研发了精密加工专用五轴联动轮带抛光设备, 实现对多种硬脆材料高陡度光学元件的精密加工。高志浩^[4]针对保形光学

元件的精密加工需求研发的轮带抛光装置, 可使单晶硅表面粗糙度值从 212.2 nm 显著降至 13.5 nm。Jiang 等^[5]提出的圆盘流体动力抛光工具能有效抑制表面划痕的形成, 使表面粗糙度降低至 2 nm 以内。刘卓远^[6]设计的气囊抛光末端执行器以修整面形为加工目标, 工件精抛后的表面粗糙度达 3.72 nm。对于抛光去除函数模型的建立, Cui 等^[7]建立了 BK7 材料的去除函数模型, 并实现了抛光表面最大去除深度和材料去除率的精准预测。Shi 等^[8]利用微接触理论和摩擦学理论, 构建了材料去除微观分析模型。臧艺凯等^[9]通过仿真模型修正了机器人抛光对 M-ZnS 材料去除的函数模型, 提高了面形误差和表面粗糙度的收敛效率。关于抛光

收稿日期: 2025-07-14; 退修日期: 2025-07-23; 录用日期: 2025-08-11

通信作者: 郭兵, 教授, 博士, 研究方向为复杂表面的精密加工。

轨迹规划的研究, Wang 等^[10]采用正向标量优化法提高了驻留时间求解的稳定性和计算效率。Cui 等^[11]从表面粗糙度和功率谱密度分析角度开展分区域抛光轨迹的优选,并在光学玻璃上进行了试验,验证了分区域轨迹规划的有效性。Li 等^[12]提出基于 B 样条曲面驻留时间算法,并在复杂光学元件表面进行了试验验证,该算法有效降低了确定性抛光中工件的残余误差。综上所述,目前光学元件抛光技术主要应用于平面或低陡度曲面,而面向高陡度保形整流罩的抛光研究较少,其中存在的装置干涉、轨迹规划及工艺实现等问题亟待解决。

针对上述技术难题,本研究面向高陡度保形整流罩高精度抛光需求,研发新型公自转轮带抛光装置,并开展点坑抛光试验建立氟化镁材料去除函数模型,然后基于工件复杂面形特征规划抛光轨迹和优化驻留时间求解算法,最终实现全域面形误差高效收敛,为高陡度非球面光学元件的高精度抛光提供有效的技术方案。

1 机器人高精度轮带抛光装置

本文采用机器人夹持末端轮带抛光装置,实现抛光装置与高陡度保形整流罩表面保持全过程法向接触。同时,为避免机器人抛光装置与整流罩工件发生干涉,末端抛光装置采用悬臂式轮带结构设计,为保证抛光过程中轮带与工件的法向恒力接触以实现稳定的材料去除效果,需设计恒压组件来控制轮带抛光装置的作用方式。此外,为确保接触区域材料去除分布的均匀性,轮带抛光装置采用公自转运动方式。基于以上需求,本文设计了面向高陡度保形整流罩的机器人公自转轮带抛光设备。

机器人公自转轮带抛光设备如图 1 所示,该设备由六轴机器人主体、末端抛光装置、高精度电控转台

和抛光液供给系统组成,将工件安装至电动转台平面上,抛光液经过两层过滤处理后流向抛光接触区域,经由集液水槽回流至抛光液箱,过程中通过水冷机保持抛光液温度恒定。末端抛光装置可细分为抛光轮带组件、气动恒压组件和电机驱动组件,其中电机驱动组件采用步进电机驱动,由一对正交放置的锥齿轮控制轮带产生公转和自转的正交耦合运动。抛光轮带组件的设计面向高陡度非球面工件的机器人轮带抛光加工,为保持抛光工具与工件表面法向接触,需机器人控制末端抛光装置进行大幅度变换角度和位置。为了避免抛光过程机械臂与装置平台发生干涉,将抛光轮带装配在悬臂长杆上。抛光轮采用两端轴承支撑的结构,增强其承载能力和运动稳定性;轮体外部采用邵氏硬度为 A80 的橡胶材质,同时兼顾抛光带与轮体贴合度以及材料抛光去除效率。

气动恒压组件是为了防止抛光过程中接触压力不稳定而引起材料去除率的非线性畸变^[13]。如图 2 所示,悬臂式抛光轮带安装在气动导轨

上,使得实际作用于工件的接触压力由气压和悬臂杆自重的竖直分量组成,因此在其变换角度时法向接触压力会出现波动,通过倾角传感器识别角度变化后由工作机进行重力补偿量计算,实时调整气缸气压值,维持全过程接触压力恒定输出。

抛光轮在公转运动中的回转轴线偏心量影响工件抛光材料去除的稳定性。由于抛光轮受自身制造误差以及装配误差的影响,在完成抛光工具的安装后,需要对抛光轮进行偏心调整。首先对抛光轮偏心量进行粗调,调整过程如图 3 所示。利用激光测微仪对准悬臂杆位置 A,将悬臂杆旋转一周,根据扫描曲线高度差对应悬臂杆偏离旋转中心的距离;通过扫描位置 A 和 B 两侧边线的高度差,可计算悬臂杆的倾斜角度;通过旋动悬臂杆端部两侧紧定螺钉调整悬臂杆的偏移和旋转,经过多次迭代调整,将悬臂杆的偏移量调整至 10 μm 以内,其倾斜度在 100 mm 距离偏摆 1° 以内。

开展点坑抛光试验对抛光轮偏心量进一步精调,利用白光干涉仪检

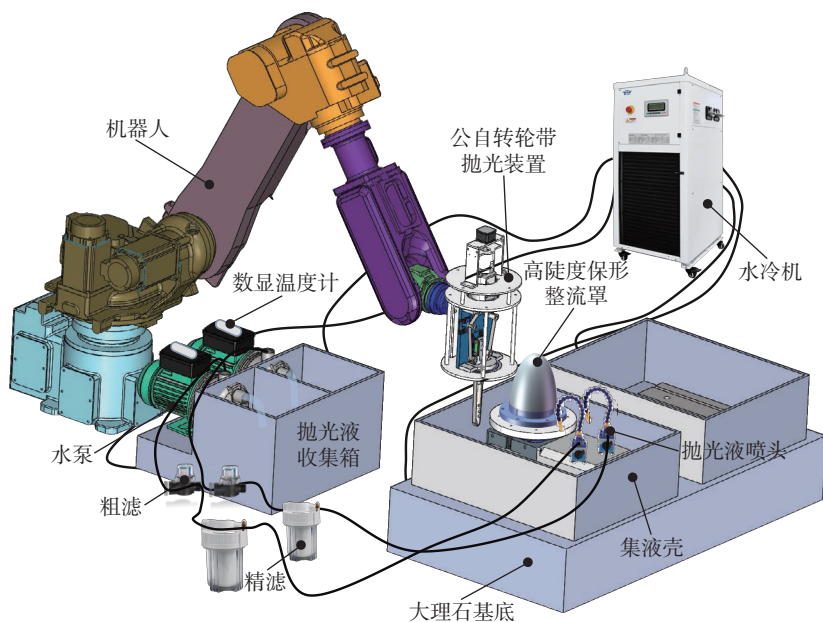


图 1 机器人公自转轮带抛光设备
Fig.1 Robotic revolution-and-rotation belt grinding equipment

测点坑区域形貌如图4所示。图4(a)为粗调后的点坑区域表面形貌,点坑区域截面轮廓呈“W”型,且两侧波谷深度不一致,可知抛光轮仍存在偏心现象。先以偏移量 $d/2$ 来调整抛光轮,再次在相同加工条件下进行点坑抛光,对应的点坑形貌如图4(b)所示,截面轮廓呈不对称分布,将轮廓理想中线与轮廓最低点法向夹角设为倾斜角度 φ 。调整抛光轮的倾斜度

后进行点坑试验,对应的区域形貌如图4(c)所示,截面轮廓呈对称分布,偏移量控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以内,倾斜角控制在 0.1° 以内,至此抛光装置安装完毕。

在完成抛光轮偏心调整后,需要选择适用于高陡度非球面工件抛光的抛光带材质。一方面,为了保持加工过程中材料去除的稳定性,柔性抛光带与抛光轮保持良好的贴合度,避免装置在公自转运动中抛光

带脱离而失去抛光能力;另一方面,抛光带需要具备良好的吸附抛光液的能力,具备一定的材料去除能力,以达到非球面工件修形的效果。将市面上常见的抛光带按顺序1~8依次编号,在气压 $0.2\ \text{MPa}$ 、轮带速度 $300\ \text{mm/s}$ 下,使用粒径 $1\ \mu\text{m}$ 氧化铝抛光粉对氟化镁样片依次开展点坑

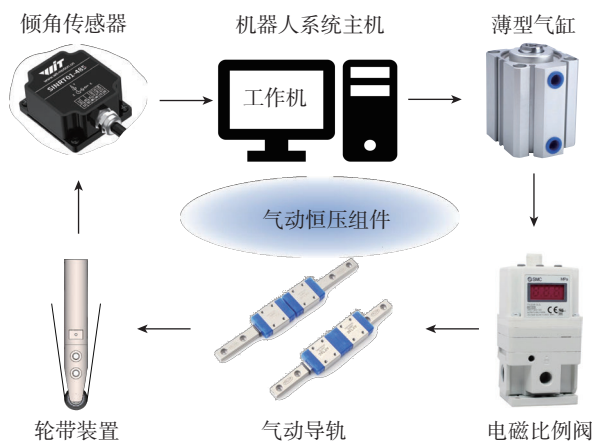


图2 Pneumatic constant pressure components

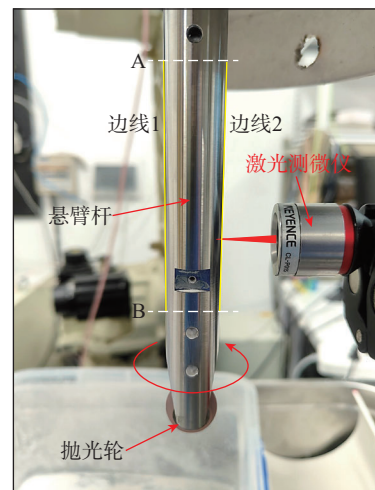


图3 Rough adjustment process of cantilever rod eccentricity

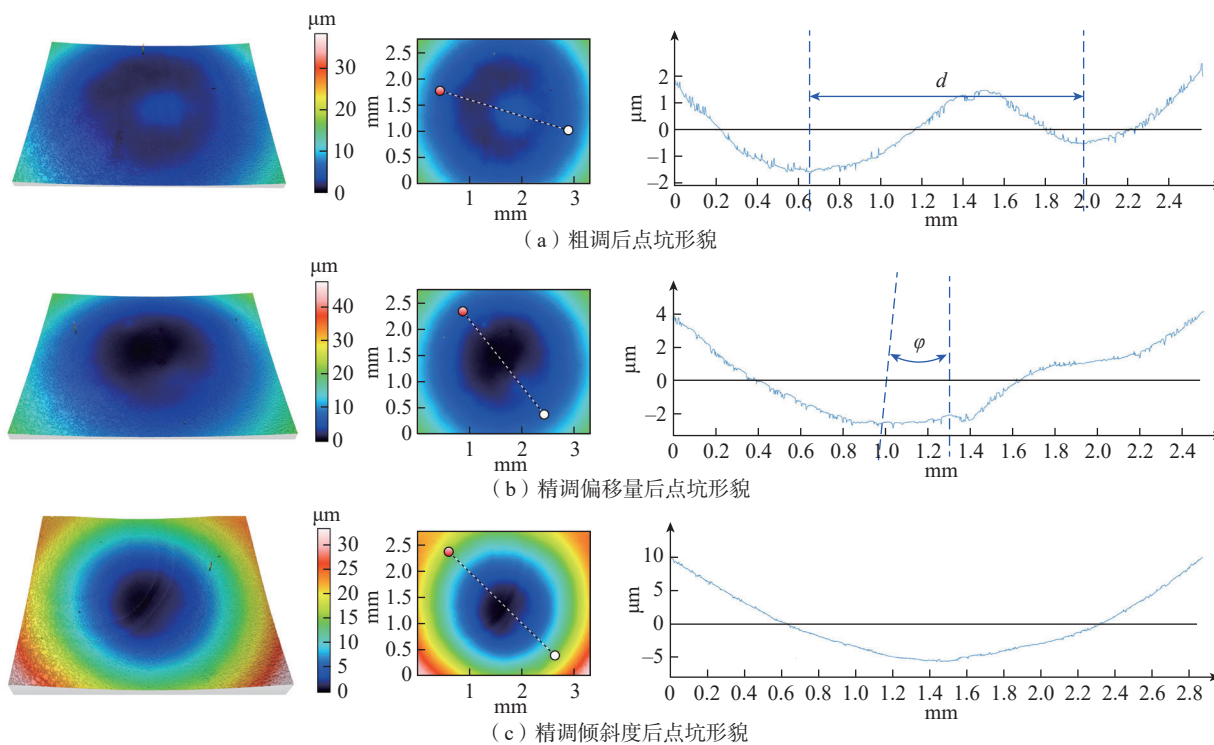


图4 悬臂杆偏心精调的点坑形貌

试验,抛光时长设定为 120 s,根据点坑的表面质量和材料去除率综合评价该材质抛光带的加工能力,试验结果汇总见表 1。

综合分析表中不同材质抛光带加工的点坑质量和材料去除率,6号抛光带兼顾抛光质量和效率,适用于氟化镁高陡度保形整流罩的抛光条件。

2 机器人高精度轮带抛光去除函数建模

基于设计的机器人柔性轮带抛

表 1 不同材质抛光带的抛光性能

Table 1 Polishing performance of different types of polishing belts

序号	粗糙度 S_a/nm	去除率 / ($mm^3 \cdot s^{-1}$)
1	8.639	2.44e-03
2	3.756	8.22e-04
3	3.987	7.49e-04
4	10.531	2.11e-03
5	4.774	1.43e-03
6	4.518	1.85e-03
7	8.365	1.97e-03
8	13.853	2.80e-03

光装置,在接触轮与工件表面接触时发生弹性变形的过程,弹性变形区域可以等效为赫兹接触理论模型中弹性应变以最初接触顶点为中心向延伸^[14],对应工件表面压力分布形式可用 Preston 方程表示。广义 Preston 方程是一种在磨抛加工领域中应用较广的经典数学模型,该模型将加工区域中某点 (x, y) 的材料去除率 $M(x, y)$ 定义为工具与工件间接触压力 $P(x, y)$ 、相对速度 $v(x, y)$ 的双重曲面积分,并受加工环境系数 K 的影响^[15]。广义 Preston 方程表达式为

$$M(x, y) = K \iint_s P(x, y)^\alpha v(x, y)^\beta dx dy \quad (1)$$

式中, K 为广义 Preston 系数; $P(x, y)$ 为接触区域的压力分布; $v(x, y)$ 为接触区域的速度分布; α 为压力拟合系数; β 为速度拟合系数。

本研究设计的抛光装置中抛光轮为双向同曲率标准球形轮廓,其与工件接触区域的压力分布呈圆形分布,压力分布方程可表示为

$$P(x, y) = P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}} \quad (2)$$

式中, P_0 为接触区域中心压力; r_p 为

接触区域半径。接触区域中心压力 P_0 可表示为

$$P_0 = \frac{k_c \delta}{R} \quad (3)$$

式中, k_c 为抛光轮基础弹性模量; δ 为抛光轮压缩量; R 为抛光轮半径。

由于抛光装置以公自转的形式运转,因此在接触区域中任意点 (x, y) 的相对速度 $v(x, y)$ 为轮带公转速度 v_1 与自转速度 v_2 的矢量和。

$$\vec{v}(x, y) = \vec{v}_1(x, y) + \vec{v}_2(x, y) \quad (4)$$

$$v_1(x, y) = 2\pi n \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

式中, n 为轮带公转转速。

$$v_2(x, y) = \frac{2\pi n r_s}{\rho} \quad (6)$$

式中, r_s 为抛光带驱动轮半径; ρ 为锥齿轮组齿数比, $\rho=1:4$ 。

为了建立适用于公自转轮带抛光装置的去除函数模型,需要通过开展点坑抛光试验获取式(1)中的参数 K 、 α 和 β 。试验对象为氟化镁样品,抛光装置公自转的转速比为 1:4,抛光液采用 1 μm 粒度氧化铝抛光粉,抛光液粉水质量比为 1:30。开展关于气压、轮带速度和抛光时间的单因素试验,详细的试验参数如表 2 所示。

表 2 单因素点坑抛光试验参数表

Table 2 Single-variable pit polishing test parameter table

序号	气压 /MPa	轮带速度 / ($mm \cdot s^{-1}$)	时间 /s	序号	气压 /MPa	轮带速度 / ($mm \cdot s^{-1}$)	时间 /s
1	0.10	400	90	13	0.30	400	90
2	0.14	400	90	14	0.30	450	90
3	0.18	400	90	15	0.30	500	90
4	0.22	400	90	16	0.30	550	90
5	0.26	400	90	17	0.30	400	10
6	0.30	400	90	18	0.30	400	30
7	0.34	400	90	19	0.30	400	50
8	0.38	400	90	20	0.30	400	70
9	0.30	200	90	21	0.30	400	90
10	0.30	250	90	22	0.30	400	110
11	0.30	300	90	23	0.30	400	130
12	0.30	350	90	24	0.30	400	150

点坑抛光试验设备如图 5 所示, 采用白光干涉仪检测以上各组单因素抛光试验中的点坑形貌如图 6 所示, 并将各组点坑去除轮廓中最大深度定义为本组试验参数下对应的氟化镁材料去除深度。

将去除深度检测结果整理如图 7 所示, 并对数据进行拟合, 得到式(1)中的针对氟化镁材料的公自转轮带抛光加工去除函数中压力系数 α 为 1.028, 速度系数 β 为 0.451, 其余影响因素参数 K 可通过 22 组单因素点坑试验拟合得到均值为 1.162。基于此, 完成建立机器人公自转轮带抛光氟化镁材料的实际去除函数模型。

在高陡度保形整流罩抛光过程中, 需选取合适的氧化铝抛光粉粒径, 本文开展了不同抛光粉粒径的单因素直槽抛光工艺试验, 试验参数如表 3 所示, 抛光液的粉水比为 1:30。

不同抛光粉粒径对应的抛光直槽表面粗糙度如图 8(a) 所示, 可见 $0.3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉加工后的表面粗糙度约为 2 nm ; $1 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉加工后的工件表面粗糙度约为 3 nm ; $2 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉加工的表面粗糙度约为 8 nm ; $3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉对应的表面粗糙度约为 11 nm 。同时计算不同抛光粉粒径下的抛光直槽材料去除率, 结果如图 8(b) 所示。 $0.3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉的材料去除率约为 $8.0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{s}$; $1 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉的材料去除率约为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{s}$; $2 \mu\text{m}$

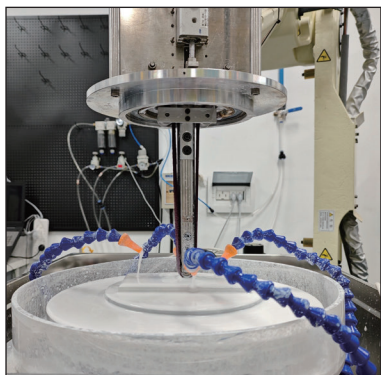


图 5 点坑抛光试验
Fig.5 Point pit polishing test

粒径抛光粉的材料去除率约为 $3.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{s}$; $3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉的材料去除率约为 $3.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

因此, 为了实现氟化镁材料高效去除使整流罩的面形误差 PV 值快速收敛, 表面粗糙度 R_a 达到 3 nm 以内, 需要合理安排抛光工序。在粗抛工序中选用 $3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉, 可快速修正面形误差; 然后在半精抛工序中采用 $1 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉, 可高效降低表面粗糙度, 同时将面形误差修正到位; 最后在精抛工序中采用 $0.3 \mu\text{m}$ 粒径抛光粉来进一步降低表面粗糙度, 可满足 3 nm 的高精度抛光目标。

3 机器人轮带抛光轨迹规划与加工工艺

3.1 轨迹规划

高陡度保形整流罩为回转对称型分布, 设计机器人末端装置的运动轨迹为沿着非球面母线运动, 并与工件表面保持法向接触, 再结合工件固定于转台的转动, 最终实际的抛光轨迹

为环绕在非球面工件表面的螺旋复合运动。抛光轨迹的方程可表示为

$$\begin{aligned} X &= r(\theta) \cdot \cos \theta \\ Y &= r(\theta) \cdot \sin \theta \\ Z &= H_z - \frac{cr(\theta)^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r(\theta)^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, r 为螺旋半径; θ 为螺旋角; H_z 为非球面始高; c 为非球面近轴曲率; k 为非球面偏心率。其中, 螺旋半径 r 与螺旋角 θ 成正比。

$$r(\theta) = r_0 + \frac{l}{2\pi} \theta \quad (8)$$

式中, r_0 为初始螺旋半径; l 为螺距。螺距 l 的计算公式为

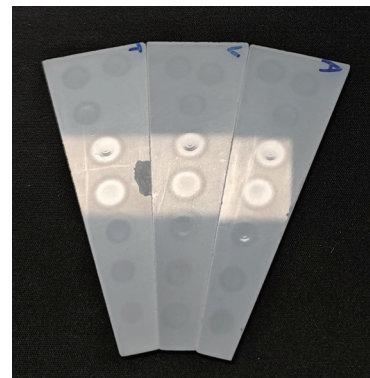
$$l = \frac{v_f}{60n} \quad (9)$$

式中, v_f 为抛光轮带进给速度; n 为转台转速。

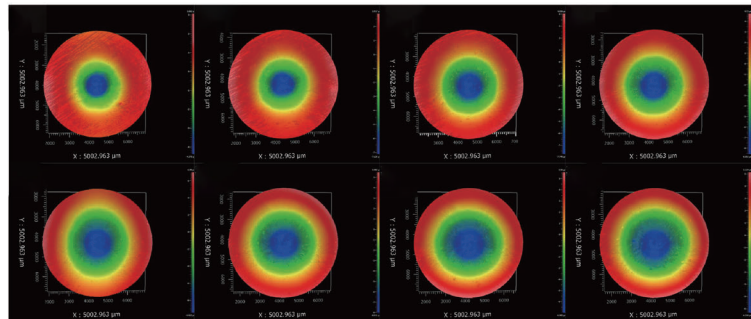
通过调整 v_f 和 n 的比例关系可以生成等重叠率抛光轨迹, 如图 9 所示, 此类抛光轨迹既可以保证非球面顶端和边缘去除量均匀, 又能均匀覆盖整个加工表面。



(a) ZYGO白光干涉仪



(b) 氟化镁抛光样品



(c) 点坑抛光形貌

图 6 点坑形貌检测设备及结果

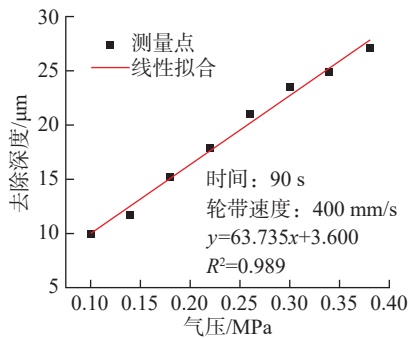
Fig.6 Point pit morphology detection equipment and results

在计算等距螺旋抛光轨迹的重叠率时,需要先分析抛光轮带与工件接触区域的压力分布范围,接触区域压力分布半径可表示为

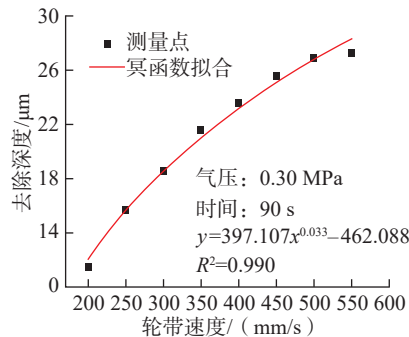
$$r_p = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{p_0}{A} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (10)$$

式中, μ_1 、 μ_2 分别为接触轮; 工件的泊松比; E_1 、 E_2 分别为接触轮、工件的弹性模量; A 为接触区域等效曲率,可表示为

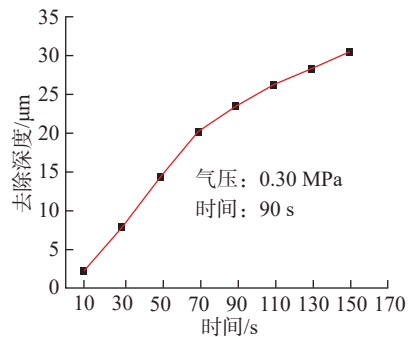
$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad (11)$$



(a) 气压对去除深度的影响



(b) 轮带速度对去除深度的影响



(c) 抛光时间对去除深度的影响

图7 单因素点坑试验去除深度

Fig.7 Single-variable point pit test removal depth

式中, R_1 为非球面子午曲率半径; R_1' 为非球面弧矢曲率半径; R_2 为抛光轮子午曲率半径; R_2' 为抛光轮弧矢曲率半径, mm;

3.2 驻留时间算法

本研究考虑高陡度保形整流罩的实际面形特点,将驻留时间的反卷

积求解方式转换为矩阵方程求解的形式,采用线性方程组的解法对抛光轨迹驻留时间集的进行求解,并转换为机器人的运行速度。材料去除量计算公式可表示为

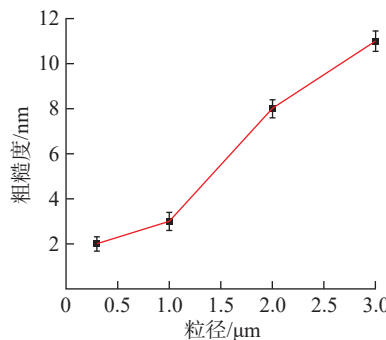
$$h = MT \quad (12)$$

其中,

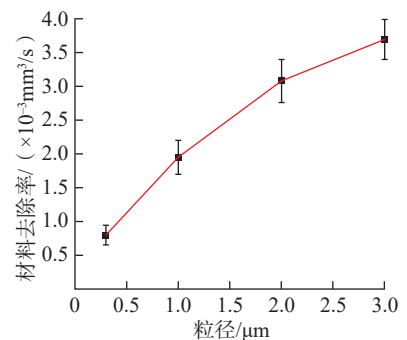
表3 抛光粉粒径单因素直线沟槽抛光工艺试验参数

Table 3 Test parameters of single-variable linear groove polishing process for polishing powder particle size

序号	粒径 / μm	气压 /MPa	轮带速度 / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	进给速度 / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.3	0.30	400	0.1
2	1.0			
3	2.0			
4	3.0			



(a) 粒径对粗糙度的影响



(b) 粒径对材料去除率的影响

图8 粒径对表面粗糙度及材料去除率的影响

Fig.8 Influence of particle size on surface roughness and material removal rate

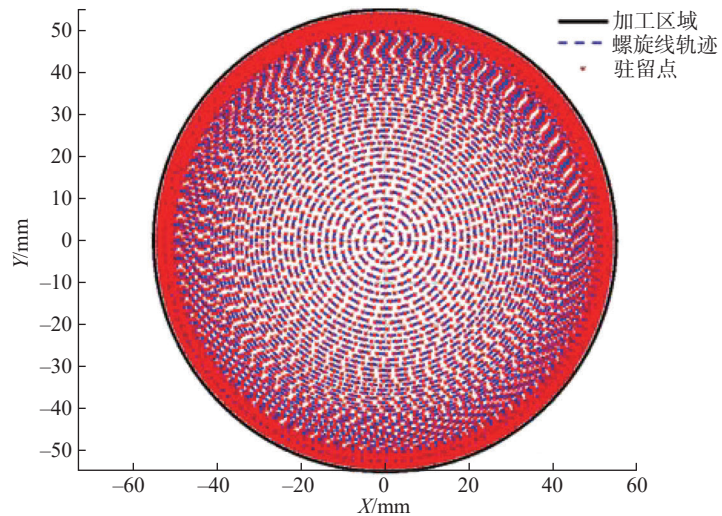


图9 等重叠率抛光轨迹投影示意图

Fig.9 Diagram of constant over rate grinding path projection schematic

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}$$

式中, \mathbf{h} 为 $m \times 1$ 的材料去除量向量; \mathbf{M} 为 $m \times n$ 的材料去除率矩阵; \mathbf{T} 为 $n \times 1$ 的驻留时间向量。

对于检测得到的误差点总数 N 远大于 \mathbf{M} 时, 式(12)中去除函数矩阵方程个数多于驻留时间解的个数, 方程变为超定方程组, 此时方程是没有精确解的, 同时基于去除函数矩阵转化为线性方程组的情况下, 该方程组中的 \mathbf{A} 矩阵中含有大量的 0 元素, 属于典型的大型稀疏矩阵, 对于测量的面形误差矩阵, 由于面形测量过程中不可避免地存在误差, 这些面形误差矩阵元素微小的变化将导致解的“病态”产生, 即面形误差矩阵其中一个元素微小变化, 驻留时间向量 \mathbf{T} 将全局变化。

驻留时间可直接通过在时域内

对去除量和去除函数反卷积求解。然而, 该过程的计算精度低、收敛效率差, 故目前多用奇异值分解算法 (Singular value decomposition, SVD) 等效替代^[16]。本文采用奇异值分解法对去除函数矩阵 \mathbf{A} 进行降维, 将大型稀疏矩阵的特征值提取组成新的 $\mathbf{M} \times \mathbf{M}$ 方阵, 奇异值分解将任何给定矩阵分解为 3 个矩阵的乘积: 1 个正交的左奇异矩阵、1 个对角的奇异值矩阵和 1 个正交的右奇异矩阵。将数据集的奇异值表征按重要性排列, 舍弃不重要的特征向量, 达到降维的目的。

式(12)的材料去除量矩阵计算可转换为特征值 λ 表示。

$$\mathbf{M}\mathbf{T} = \lambda\mathbf{T} \quad (13)$$

将材料去除率矩阵进行奇异值分解可得

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H \quad (14)$$

式中, \mathbf{U} 为左奇异矩阵; Σ 为对角奇异值矩阵, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1(\lambda), \sigma_2(\lambda), \dots, \sigma_n(\lambda))$; \mathbf{V} 为右奇异矩阵。

首先选择初始特征值 λ_0 , 其满足机器人可识别最小运动单元。计算 $M(\lambda_0)$ 的最小奇异值 σ_0 , 以及对应

的单位左奇异向量 u_0 和单位右奇异向量 v_0 , 则特征值 λ_0 可计算为^[17]

$$\lambda_1 = \lambda_0 - \sigma_0 / u_0^H M'(\lambda_0) v_0 \quad (15)$$

以此类推, 将由已知特征值 λ_k 逐个求解出 λ_{k+1} 。

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k - \sigma_k / u_k^H M'(\lambda_k) v_k \quad (16)$$

将求解得到的特征值向量代入式(13)可求解出在加工余量 h 下抛光轨迹的驻留时间向量 \mathbf{T} 。由此可见, 驻留时间求解不随加工轨迹变换, 其核心在于确定加工轨迹离散点阵分布, 求得该轨迹对应的去除速率矩阵。根据求解得到的驻留时间向量 \mathbf{T} , 结合上节等重叠率轨迹, 计算重叠率对非球面去除深度的影响如图 10 所示, 当重叠率达到 60%, 非球面面形误差的 PV 值可达到 $0.016 \mu\text{m}$, 为实际抛光试验提供了理论支撑。

3.3 抛光流程

基于建立的去除函数模型, 建立高陡度保形整流罩的全口径抛光技术路线, 如图 11 所示。经过以下流程反复迭代直至满足加工要求, 针对高陡度保形整流罩全口径抛光建立一条完整、可行的技术路线。

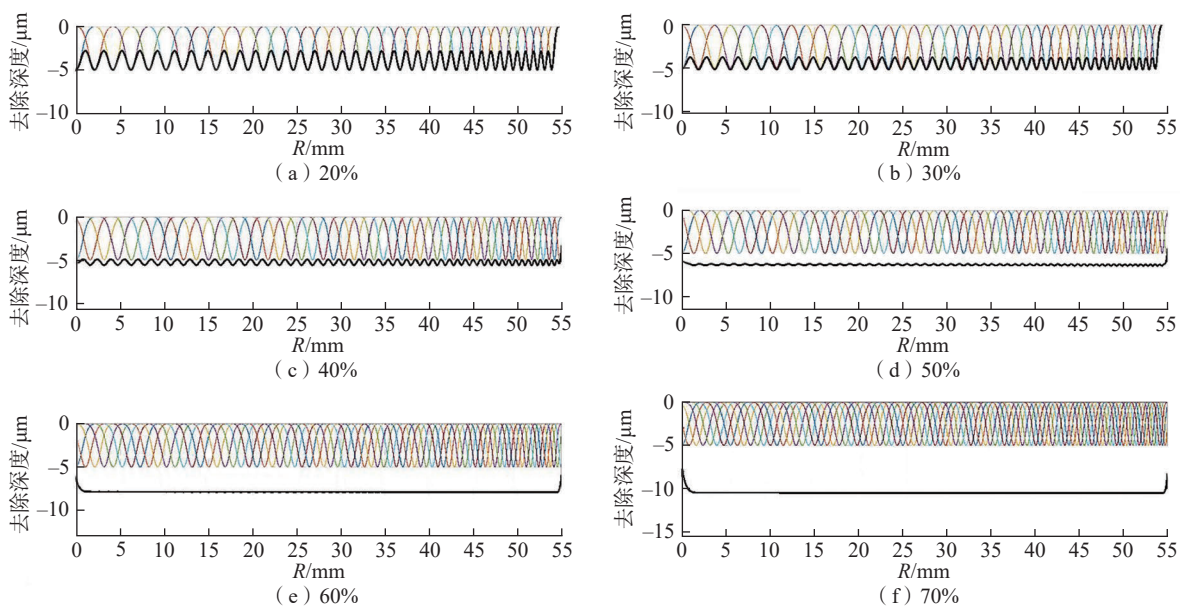


图 10 不同重叠率的二维去除轮廓

Fig.10 Two-dimensional contour removal with different overlap rates

3.4 抛光试验及结果

本节对口径为 120 mm 的高陡度保形整流罩外表面进行抛光加工,通过数值仿真软件编写加工轨迹程序,转换为机器人可识别代码后导入系统上位机成为抛光工具运行轨迹。加工过程中开启输出压力补偿系统,对输出压力进行实时监测与补偿,加工过程如图 12 所示。

经过机器人公自转轮带抛光加工高陡度非球面外表面,并采用光学轮廓仪检测抛光表面的粗糙度 R_a ,选择非球面检测模式以消除面形对结果的影响,检测结果如图 13 所示。可知经过机器人公自转轮带抛光加工后的高陡度保形整流罩外表面的局部粗糙度收敛至 3 nm 以下。依托如图 14 所示的高精度移动桥式三坐标测量机测量加工后的整流罩面形精度,法向面形误差 PV 值在 3 μm 以内。

4 结论

本研究区别于常规的平面抛光和低陡度曲面抛光,实现了高陡度保形整流罩的去函数模高效确定性抛光,研究成果总结如下。

(1) 针对高陡度保形整流罩开发了机器人高精度轮带抛光装置,并对其进行了精密装调和抛光带选型研究,为后续抛光加工奠定试验设备基础。

(2) 结合 Preston 理论模型和点坑抛光试验,建立了适用于公自转轮带抛光氟化镁材料的去除函数模型,并研究了抛光粉粒径对抛光表面质量的影响,为高陡度保形整流罩抛光提供了工艺支撑。

(3) 规划了适用于高陡度非球面的等重叠率抛光轨迹,并采用 SVG 算法提升了驻留时间求解效率和精度。开展高陡度非球面抛光试验,将高陡度非球面外表面 R_a 值降低至 3 nm 以内,整体面形误差 PV 值收敛至 3 μm 以内。

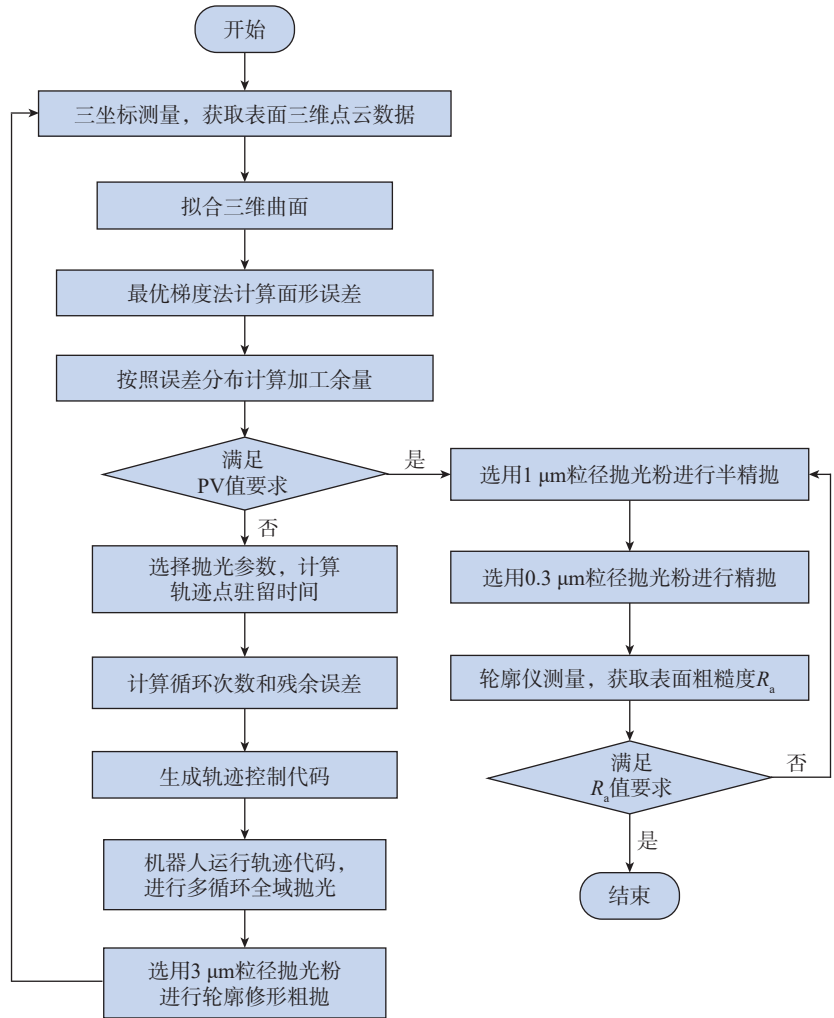


图 11 高陡度保形整流罩全口径抛光技术路线

Fig.11 Full-aperture polishing technical route for high-steepness conformal radome

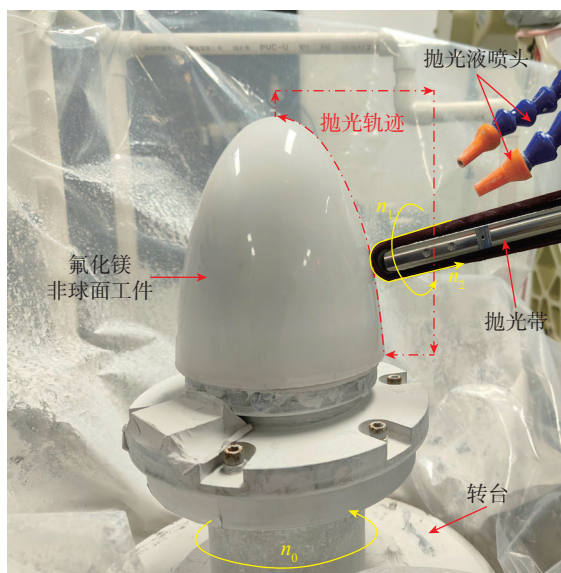


图 12 高陡度保形整流罩抛光加工试验

Fig.12 Polishing test on high-steepness conformal radome

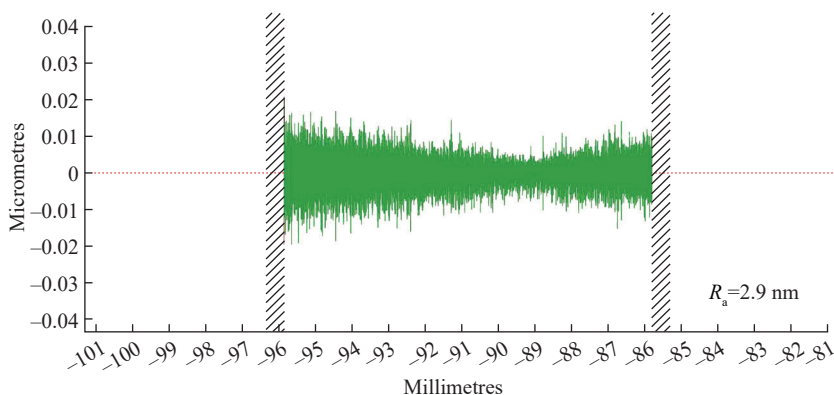


图 13 高陡度保形整流罩外表面检测结果

Fig.13 Inspection results of the external surface of high-steepness conformal radome

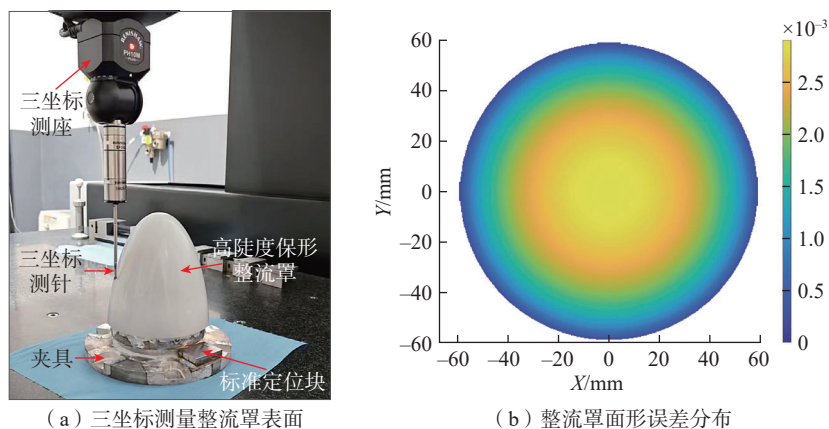


图 14 三坐标测量仪及整流罩面形误差分布图

Fig.14 CMM and radome surface form error distribution map

参考文献

[1] 王金虎. 高陡度蓝宝石保形整流罩的精密磨削关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

WANG Jinhui. Research of key technology on precision grinding of deep conformal sapphire dome[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[2] ZHAO J B, WANG S, ZHANG C Y, et al. Research status and challenges in the manufacturing of IR conformal optics[J]. Defence Technology, 2024, 40: 154–172.

[3] WOLFS F, FESS E, DEFISHER S. Freeform polishing with UltraForm finishing[J]. SPIE Proceedings, 2013, 8884: 88840N.

[4] 高志浩. 保形光学元件的轮带抛光装置设计及其实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

GAO Zhihao. Design of belt polishing device and polishing experiments for conformal optics[D]. Harbin: Harbin Institute of

Technology, 2018.

[5] LIN B, JIANG X M, CAO Z C, et al. Novel disc hydrodynamic polishing process and tool for high-efficiency polishing of ultra-smooth surfaces[J]. Micromachines, 2018, 9(7): 333–343.

[6] 刘卓远. 面向超精密光学元件制造的机器人气囊抛光平台搭建与工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

LIU Zhuoyuan. Research on robotic bonnet polishing platform and process for ultra-precision optical components manufacturing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[7] CUI Z J, LIANG Y D, CHEN X, et al. The ultrasonic vibration-assisted polishing material removal model of tilted cylindrical polishing tool based on BK7 glass[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(5): 2797–2814.

[8] SHI C C, PENG Y F, HOU L, et al. Micro-analysis model for material removal mechanisms of bonnet polishing[J]. Applied

Optics, 2018, 57(11): 2861–2872.

[9] 臧艺凯, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 机器人抛光 M-ZnS 去除函数建模与工艺参数优化[J]. 光学精密工程, 2024, 32(15): 2387–2400.

ZANG Yikai, ZHU Beibei, QIN Lin, et al. Modeling of removal function and optimization of process parameters for robotic polishing M-ZnS[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(15): 2387–2400.

[10] WANG T Y, HUANG L, VESCOVI M, et al. Universal dwell time optimization for deterministic optics fabrication[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38737.

[11] CUI Z J, MENG F W, LIANG Y D, et al. Sub-regional polishing and machining trajectory selection of complex surface based on K9 optical glass[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 304: 117563.

[12] LI Z L, WANG R, ZHANG X Q, et al. B-spline surface approximation method for achieving optimum dwell time in deterministic polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 318: 118031.

[13] 彭纪有, 郭兵, 王士辉, 等. 机器人轮带磨削的重力补偿设计及加工工艺[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 20230471.

PENG Jiyou, GUO Bing, WANG Shihui, et al. Design of gravity compensation and machining process for robotic belt grinding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(9): 20230471.

[14] 白明华, 刘洪彬. 工程弹性力学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

BAI Minghua, LIU Hongbin. Fundamentals of engineering elasticity[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.

[15] ZHANG J J, HAN L, LIU H Y, et al. Theoretical and experimental studies of over-polishing of silicon carbide in annular polishing[J]. Machines, 2018, 6(2): machines6020015.

[16] WU X Q, LI J, JIN Y Q, et al. Modeling and analysis of tool wear prediction based on SVD and BiLSTM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9): 4391–4399.

[17] 陈小平. 非线性特征值问题的数值方法及其应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

CHEN Xiaoping. Numerical methods for nonlinear eigenvalue problems and their applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

Precision Robotic Belt Grinding Technology for High-Steepness Conformal Radome

NIE Huahai¹, GUO Bing¹, FENG Junliang¹, PENG Jiyou¹, ZHAO Qingliang¹, YAO Honghui²

(1. Center for Precision Engineering, School of Mechatronics Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Zhongshan Precision Technology Co., Ltd, Zhongshan 528437, China)

[ABSTRACT] High-steepness conformal radome, due to its unconventional shape, cannot be effectively deterministically polished using conventional techniques. Therefore, it is imperative to develop a polishing apparatus and process method featuring good adaptability, high degrees of freedom, and excellent machining stability specifically for high-steepness conformal radome. This study first constructed a robotic belt grinding system suitable for high-steepness conformal radome. Secondly, based on polishing process experiments, a removal function model of revolution-and-rotation belt grinding was established. Finally, constant-overlap grinding path and a dwell time solution algorithm were developed, enabling form correction polishing of high-steepness conformal radome, reducing the surface roughness Ra value to within 3 nm and converging the overall surface form error PV value to within 3 μm .

Keywords: High-steepness conformal radome; Robot wheel belt polishing; Removal function model; Trajectory planning; Dwell time; Surface figure error

(责编 晓月)