



·前沿技术与交叉科学·

六自由度气囊抛光机器人模态分析与中频误差抑制

陆 锋^{1,2}, 王振忠^{1,2}, 黄雪鹏^{1,2}, 雷鹏立¹

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 深圳研究院, 广东 深圳 518000)

摘 要: 针对六自由度串联式关节机器人气囊抛光系统因刚度不足引起的加工振动以及引入中频误差的问题, 以 IRB 6700 机器人作为研究对象, 基于 Ansys Workbench 建立模态分析模型, 并结合实验分析机器人气囊抛光系统工况频带内动态特性, 实验与仿真结果共同表明, 机器人气囊抛光系统在工况频带至少存在 5 阶模态, 且共振时机器人末端抖动幅值为 mm 级, 机器人加工严重受限。同时针对机器人气囊抛光系统先进光学元件抛光工艺应用, 设计一种阻尼抑振气囊工具头, 与普通气囊工具头进行定点抛光与整面抛光对比实验。结果表明: 抑振气囊头定点抛光斑粗糙度与频谱幅值普遍低于普通气囊工具头, 引入的中频误差较一般气囊工具头低 40%, 抛光优化效果显著。

关键词: 气囊抛光机器人; 中频误差; 模态分析; 光学元件抛光

中图分类号: TP242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220013

Modal analysis and mid-spatial-frequency errors suppression of 6-DOF bonnet polishing robot

Lu Feng^{1,2}, Wang Zhenzhong^{1,2}, Huang Xuepeng^{1,2}, Lei Pengli¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Aiming at the insufficient stiffness of the bonnet polishing system of the six-degree-of-freedom tandem joint robot, which may cause vibration and further mid-spatial-frequency errors, used we the IRB 6700 robot as the research object, established the modal analysis model based on Ansys Workbench and combined experiment to analyze the dynamic characteristics of the robot bonnet polishing system in the working condition frequency range. The experimental and simulation results together show that the robot bonnet polishing system has at least 5 modes in the working condition frequency range, and the jitter amplitude at the end of the robot is millimeter-level when the resonance occurs. Robot processing is severely restricted. In addition, for the application of advanced optical component polishing technology in the robotic bonnet polishing system, a vibration suppression bonnet tool was designed, and the fixed-point polishing and whole-surface polishing comparison experiments were carried out with the ordinary bonnet tool. The results show that the RMS and spectral amplitude of the fixed-point polishing spot of the vibration suppression bonnet are generally lower than that of the ordinary bonnet, and the introduced mid-spatial-frequency errors PSD is 40% lower than that of general bonnet polishing.

Key words: bonnet polishing robot, mid-spatial-frequency errors, modal analysis, optical element polishing

大批量高精度光学元件应用于光刻机、空天望远镜、激光核聚变等高精尖领域^[1-2]。例如用于惯性约束聚变的高功率固体激光装置需要上万件超高精度大口径强激光光学元件^[3]; 美国国家点火装置 (NIF) 的 192 路高功率激光系统使用超 7000 片大口径光学元件^[4]。如何高效获得大尺寸、高质量、低损伤的光学元件是光学元件制造领域亟待解决的难题。结合具有高效率、高精度、低成本优点的工业机器人技术与最适用大口径光学元件抛光的气囊抛光技术的工业机器人气囊抛光技术, 在需求日益增长的光学元件制造领域展现出极大应用潜力。浙江工业大学计

* 收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-06-02

基金项目: 深圳市科技计划项目 (JCYJ20180306172924636)

联系方式: 陆 锋, 19920191151156@stu.xmu.edu.cn。

通信作者: 王振忠, wangzhenzhong@xmu.edu.cn。

时鸣^[5-6]、黄智^[7]、厦门大学林泽文^[8]等人均基于多自由度机器人搭建气囊抛光系统,在多种光学元件上开展抛光工艺、运动轨迹规划等方向的研究,并验证机器人气囊抛光的可行性。

高精度光学表面质量评价按空间频率误差常分为:低频段、中频段和高频段^[9]。而气囊抛光虽可以有效消除表面低频段误差,但也常常会在光学表面残留波纹状的小尺度制造误差,这些波纹状误差集中在空间频段的中高频区域^[10-11],其对光学系统的光学性能具有决定性的影响。现有研究^[12]认为,中频误差的产生主要因素有:气囊抛光的卷积效应、抛光设备的周期性振动、初始表面频谱误差的影响等。

近年来,关于中频误差的抑制已有大量研究。Zeeko 公司针对规则气囊抛光加工路径是引入中频误差的主因,提出两种解决办法:一是设计了采用表面贴有沥青盘的半刚性 Grolishing 气囊工具^[13],二是开发伪随机的抛光加工路径避免规则周期性中频误差的形成^[14]。厦门大学王春锦等开发了一种采用内嵌不锈钢网增强的改进半刚性气囊工具,可有效防止气囊工具的波纹塌陷现象,避免引入新的频段误差^[15]。厦门大学的潘日、王春锦和姜涛等深入分析了气囊抛光中频误差的形成机理,开发了基于迷宫路径和自适应 Peano 抛光路径的中频误差控制方法与策略,实际光学精密抛光的中频误差控制效果明显^[12, 16-17]。

然而,上述中频误差抑制措施侧重点在于如何抑制气囊抛光卷积效应,对于控制抛光设备振动引入的中频误差的研究则较少。尤其是,一般加工中心或数控机床系统刚度高达 $50\sim 100\text{ N}/\mu\text{m}$,而多自由度串连结构的工业机器人的系统刚度偏低,仅为 $1\text{ N}/\mu\text{m}$ ^[18-19]。工业机器人加工系统在实际加工过程中易因强迫振动或颤振而产生末端抖动现象^[20-21],可能会进一步放大气囊抛光引入的中频误差。因此,如何抑制由工业机器人振动引入的光学元件中频误差是气囊抛光工业机器人加工光学元件应用领域亟待解决的技术难题。

综上,本文对 IRB 6700 机器人气囊抛光系统开展研究,通过 Ansys Workbench 建立机器人气囊抛光系统的模态分析模型,并结合模态实验分析 IRB 6700 机器人工况频带内动态特性;针对该机器人气囊抛光系统,基于阻尼耗能机理,设计一种采用高阻尼弹性元件隔振的抑振气囊工具头,并与普通气囊工具头进行定点抛光与整面抛光对比实验,剖析抑振气囊工具头与普通气囊工具头的中频误差抑制效果。

1 机器人气囊抛光系统及其动态特性分析

1.1 机器人气囊抛光系统及其三维模型

本文以基于 ABB 工业机器人 IRB 6700 搭建的气囊抛光系统为研究对象,如图 1(a)所示,系统包含工业机器人本体、气囊工具、控制柜、抛光液系统、电磁工作台等,机器人其余关键参数信息见表 1。工业机器人 IRB 6700 三维模型如图 1(b)所示,机器人末端关节 Joint6 挂载气囊抛光工具头。工业机器人气囊抛光系统仿真三维模型如图 1(c)所示。

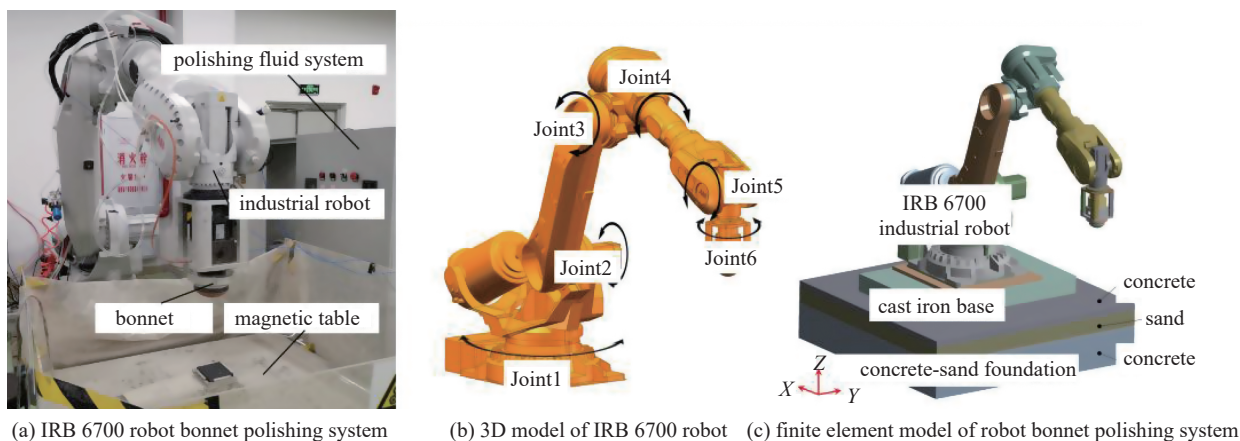


Fig. 1 Robot bonnet polishing system

图 1 机器人气囊抛光系统

表 1 气囊抛光系统参数

Table 1 Bonnet polishing system parameters

scope of work/m	carrying capacity/kg	repeatability/mm	repeat path accuracy/mm	total mass/kg
2.6	200	0.05	0.10	1170

1.2 机器人气囊抛光系统模态仿真分析

根据图1(c)建立模态仿真模型,分析其动态特性。有限元仿真模型参数设置如下。

(1) **参数与条件**。机器人各个臂件及其底座设为 Gray Cast Iron; 机器人末端执行器零件材料统一设为 Aluminum Alloy; 机器人弹性地基设置为分层土体结构, 上下两层土体材料设置为 Concrete, 中间土层材料设置为砂石。仿真材料参数如表2所示。在模态分析中仅考虑重力影响。

表2 仿真材料参数
Table 2 Simulation material parameters

material	density/(kg/m ³)	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio
gray cast iron	7200	1.1×10^{11}	0.28
aluminum alloy	2770	7.1×10^{10}	0.33
concrete	2300	3×10^{10}	0.18
sand	2000	1×10^8	0.25
60Si ₂ MnA	7740	2.06×10^{11}	0.29

(2) **连接**。机器人各个关节的接触设置为 Revolute Joint, 代入对应关节刚度。机器人关节刚度值采用文献[8]所获得的关于 ABB IRB 6700 机器人的关节刚度, 各个关节刚度的具体数值见表3。

表3 IRB 6700 关节刚度
Table 3 IRB 6700 joint stiffness

	joint1	joint2	joint3	joint4	joint5	joint6
joint stiffness/(mm·N/rad)	2.53×10^9	9.31×10^8	6.52×10^8	9.12×10^7	4.36×10^7	2.34×10^7

图2为机器人前六阶模态频率及振型, 最低阶模态频率仅为4.75 Hz, 可见机器人气囊抛光加工系统动态刚度较差, 共振振幅最大处均为机器人末端, 这表明机器人末端执行件易随着机器人振动而产生大幅摆动。

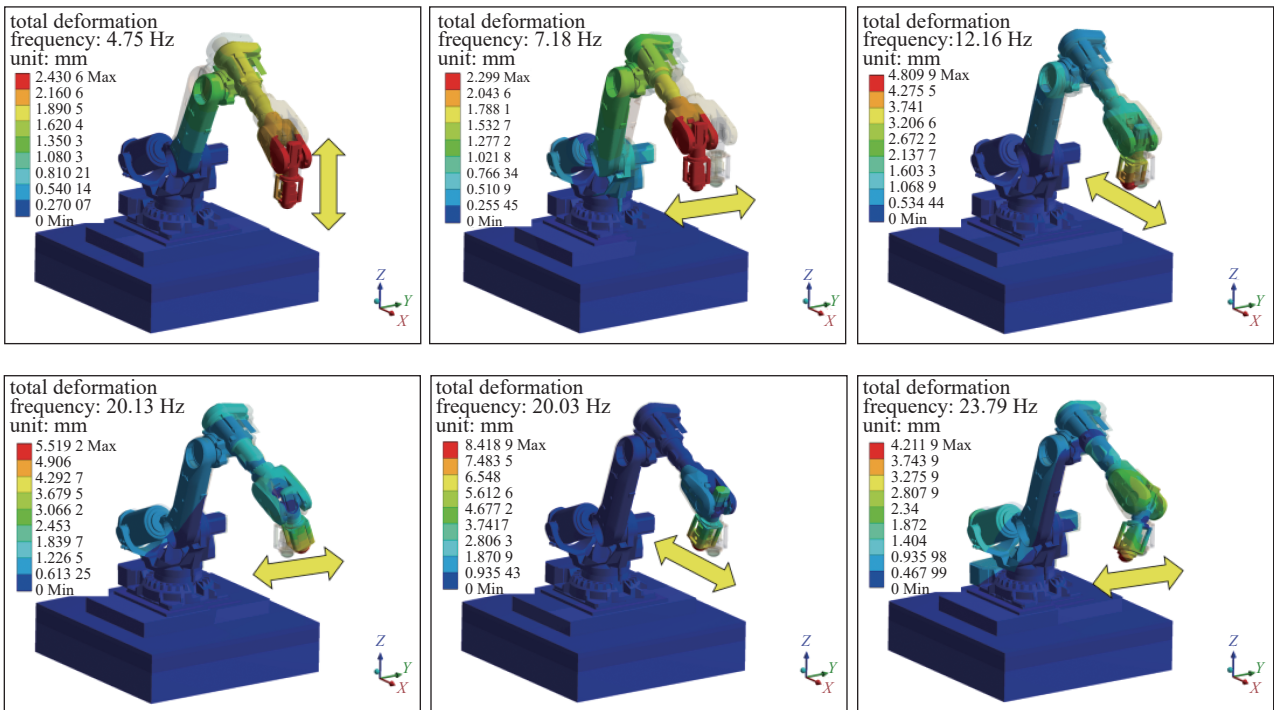


Fig. 2 Mode shapes of the industrial robot

图2 工业机器人各阶模态振型

1.3 机器人气囊抛光系统模态测试实验分析

为进一步确认机器人动态特性, 本文对气囊抛光机器人系统展开脉冲激励法与机器人空转关节位移响应测量实验。

脉冲激励法模态实验中机器人姿态与4个加速度传感器布置如图3所示,通过NI系统与PCB三向加速度振动传感器采集加速度信号,设置采样频率10000 Hz、采集时长4 s。实验中用铜棒给予机器人X、Y、Z三向激励,对采集到的机器人关节处加速度信号做FFT分析并做归一化处理。脉冲激励法模态实验测量结果如图4所示。

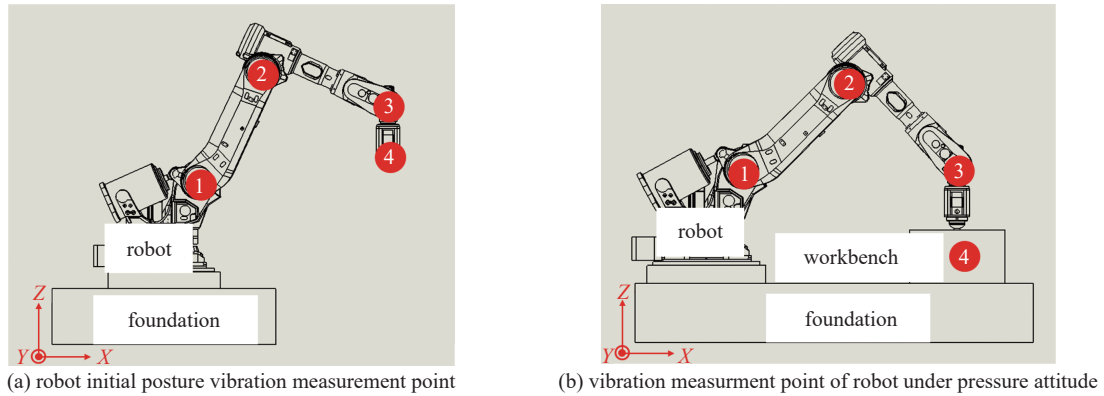
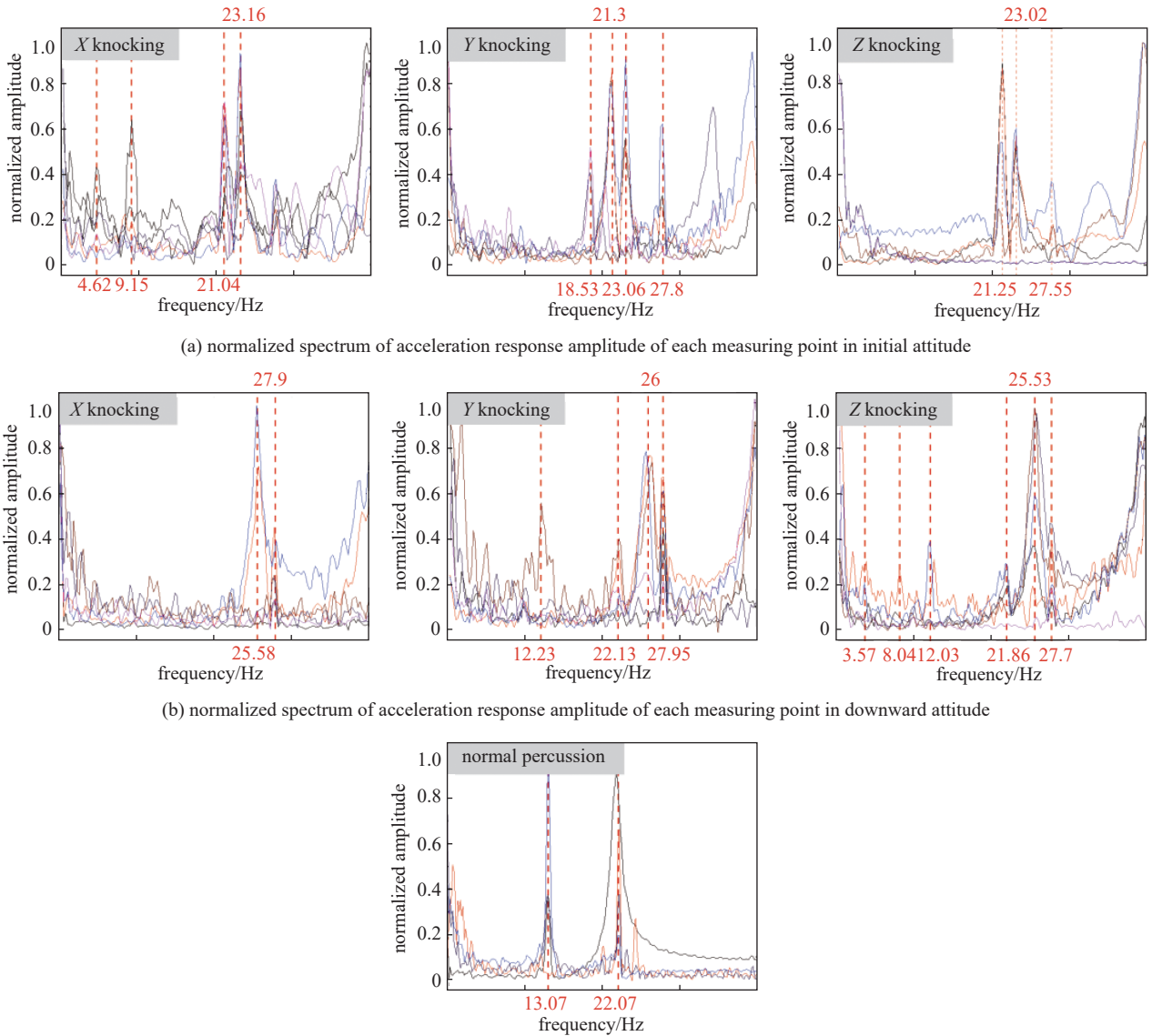


Fig. 3 Sensor placement in pulse excitation method modal experiment

图3 脉冲激励法模态实验传感器布点



(a) normalized spectrum of acceleration response amplitude of each measuring point in initial attitude

(b) normalized spectrum of acceleration response amplitude of each measuring point in downward attitude

(c) normalized spectrum of acceleration response amplitude of worktable

Fig. 4 Acceleration response spectrum of each measuring point of the robot in dual postures

图4 机器人双姿态各测点加速度响应频谱

仅考虑机器人工作频率区间,截取频谱0~30 Hz分析,通过峰值拾取法可以得到初始姿态下工业机器人的实际模态频率分别约为:4.62 Hz、9.15 Hz、18.53 Hz、21.28 Hz、23.03 Hz、27.55 Hz;当下压力为0.8 mm时,下压姿态下机器人气囊抛光系统的实际模态频率约为3.57 Hz、8.04 Hz、12.03 Hz、22 Hz、25.58 Hz、27.7 Hz。其中下压姿态的模态-12.03Hz源自工作台耦合。两次试验的机器人各阶频率均存在轻微偏差,这是由于机器人姿态不同、受载状态不同,再加上引入工作台,因此模态频率发生些许变化。

机器人关节位移响应测量实验中采用激光测振仪和示波器对处于空转状态下的工业机器人进行的关节位移响应幅值测量。选择4个关节点进行位移响应测量,节点分别为:Joint2、Joint3、Joint5、末端执行器。测量方法如图5所示,令工业机器人在初始姿态下变转速空转,机器人末端执行器的转速每次增加50 rpm,激光测振仪分别从X、Y、Z三个方向测量工业机器人关节点不同转速下的位移幅值,示波器显示激光测振仪采集到的数据。

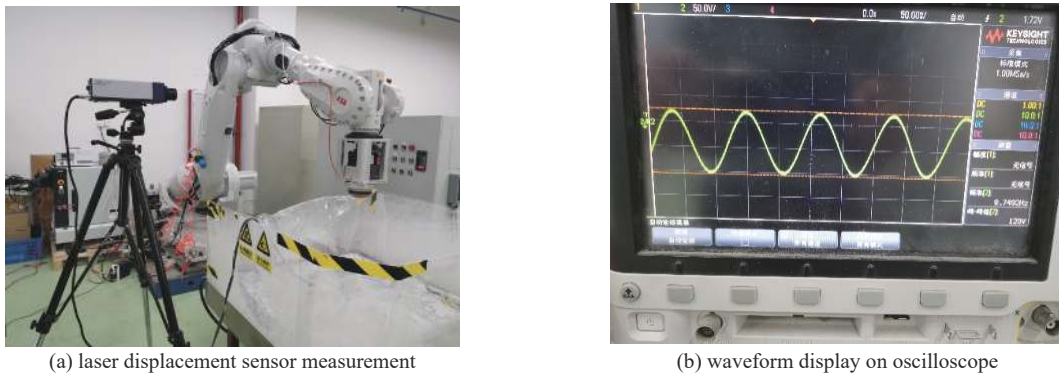


Fig. 5 Industrial robot vibration measurement site

图5 工业机器人振动测量现场

实验测量结果如图6所示,可以判断机器人工况频带间的模态主要集中在两个频带8~10 Hz、20~25 Hz。根据测量可以确认:(1)由于机器人悬臂结构特性,悬臂远端的位移振幅更大,这与仿真结果一致,共振时机器人

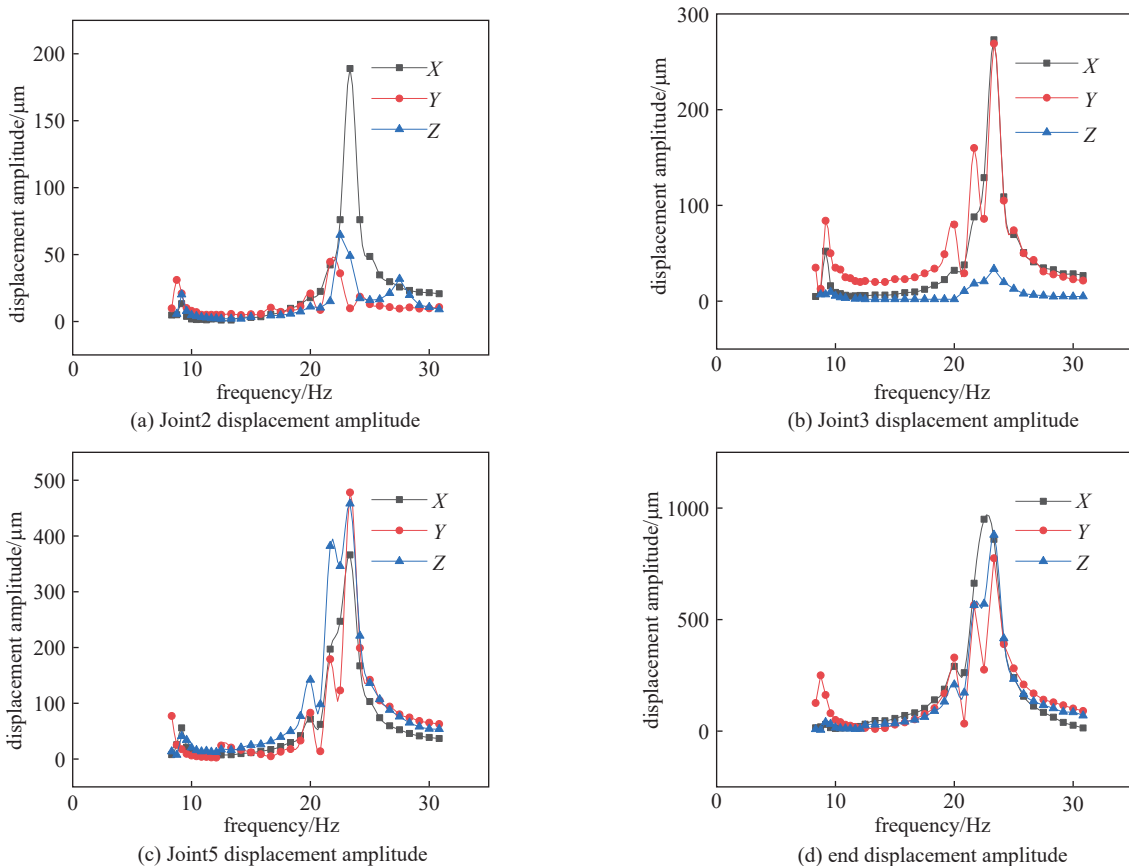


Fig. 6 Displacement response of each joint point of an industrial robot at variable speed idling

图6 工业机器人变转速空转各关节点位移响应

末端的共振振幅最大为毫米级,常规机器人气囊抛光下压量多在 1 mm 以内,显然会显著影响光学元件表面加工质量;(2)可确认 11~18 Hz 为工业机器人非共振区,各测量点振幅均在 10 μm 以内,利于抛光。

综上,结合仿真模型与实验的结果,可以确定:机器人本体在工况频带至少存在 4 阶模态,主要分布在两个频段:8~10 Hz、18~25 Hz,但机器人下压加工时亦会耦合工作台的模态,其分布在 12 Hz 附近,机器人可用加工频段严重受限。

2 一种新型抑振气囊工具头结构设计

考虑气囊抛光机器人的动态特性所存在问题,为控制因工业机器人振动引入的中频误差,需要一种振动抑制措施。目前,机器人加工领域被动抑制振动的措施主要有以下几种:增加辅助支撑或支脚压制结构以提高整体刚度^[22]、调整机器人加工姿态以获得更优姿态刚度^[23]、提高机器人本体结构材料的阻尼耗能能力^[24]等。

本文提出一种工业机器人气囊抛光系统的抑振气囊工具头,该设计依据单自由度振动系统阻尼耗能原理^[25],将高阻尼弹性元件串入工业机器人研抛加工系统的工具系统中,提高气囊抛光头的阻尼耗能能力。高阻尼弹性元件主要包含波形弹簧组与高阻尼橡胶环。波形弹簧按组合形式可分对合、复合、叠合,对合形式刚度低摩擦阻尼小,叠合形式刚度高,摩擦阻尼大,但加工成本高。本文折中采用复合组合形式。复合波形弹簧组主要提供刚度与少量摩擦阻尼,高阻尼橡胶环提供粘弹性阻尼,为主要耗能元件。

高阻尼弹性元件静态滞回曲线仿真模型及弹性元件结构如图 7 所示,波簧组材料设为 60Si2MnA,波簧间摩擦系数为 0.03,橡胶环材料参考文献^[26]所构建的粘弹性本构模型,模型参数如表 5、6 所示。

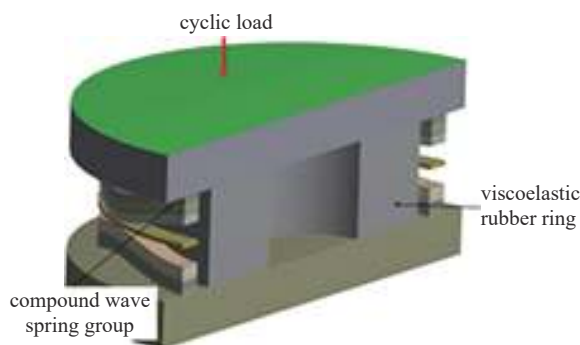


Fig. 7 Elastic component simulation model

图 7 弹性元件仿真模型

表 5 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型

Table 5 Mooney-Rivlin hyperelastic constitutive model

material constant/Pa	
C_{10}	C_{01}
2.45×10^6	-9.58×10^5

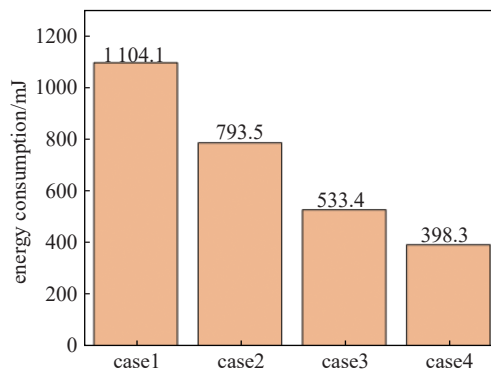
表 6 3 阶广义麦克斯韦粘弹性本构模型

Table 6 The third-order generalized Maxwell viscoelastic constitutive model

dimensionless material constant			relaxation time/s		
g_1	g_2	g_3	τ_1	τ_2	τ_3
0.10293	0.57067	0.05479	0.02905	0.00082	0.78611

对静态仿真模型施加半个周期的正弦位移载荷,幅值为 2 mm,绘制滞回曲线,计算不同尺寸弹性元件的滞回曲线面积即能耗值,仿真结果如图 8 所示。弹性元件的能耗能力与其尺寸正相关,考虑气囊头尺寸限制,高阻尼弹性元件选用 case2 型号:波簧直径 80 mm,内橡胶环外径 63 mm、内径 20 mm。设计气囊结构如图 9 所示。

对图 9 原始气囊头和抑振气囊头构建自由振动有限元仿真模型,材料设置与前文一致,计算 1 mm 初始位移载荷下两种气囊头球端的自由振动曲线,结果如图 10 所示,采用自由衰减法^[25]计算阻尼比,可得原始气囊头阻尼比约为 0,抑振气囊头阻尼比约为 0.05,加入弹性元件的抑振气囊头耗能能力优于普通气囊头。



case1: wave spring size-D90; rubber ring size-D70
case2: wave spring size-D80; rubber ring size-D63
case3: wave spring size-D72; rubber ring size-D54
case4: wave spring size-D62; rubber ring size-D54

Fig. 8 Simulated energy consumption values of elastic components of different specifications

图 8 不同规格弹性元件仿真耗能值

3 抑振气囊工具头与普通气囊头抛光对比实验

3.1 定点抛光实验比对

为验证抑振气囊工具头的有效性,本文设计不同转速下原始结构和抑振结构的机器人定点气囊抛光的定点抛

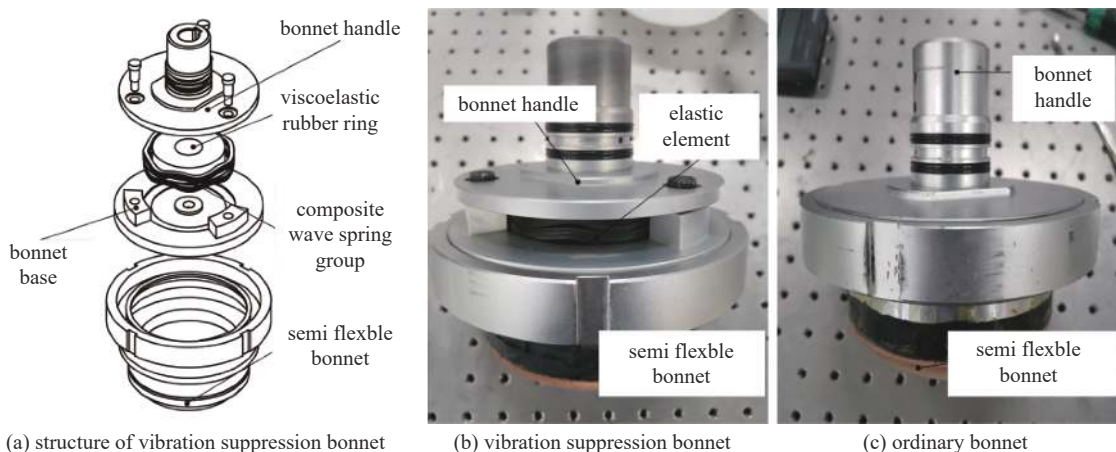


Fig. 9 Three-dimensional structure diagram of bonnet tool

图 9 气囊工具头立体结构图

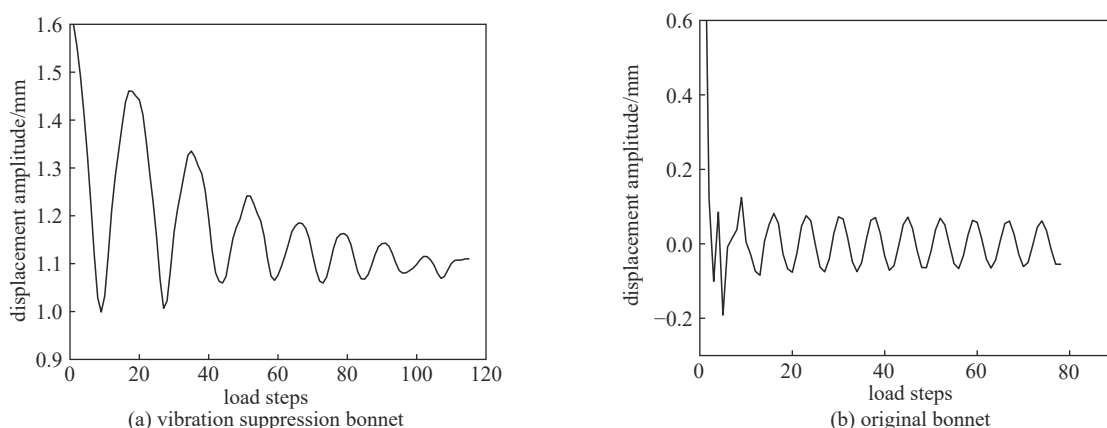


Fig. 10 Free vibration curves

图 10 自由振动衰减曲线

光对比实验,探究不同转速下,抑振气囊工具头与普通气囊工具头的抛光效果对比。气囊抛光实验参数设置如下:进动角: 20°,下压量 0.8 mm、充气压力 0.25 MPa、抛光驻留时间 2 min、四步离散进动。抛光转速拟定为 250 rpm、500 rpm、1000 rpm、1500 rpm、2000 rpm。

采用 Fizecam600 白光干涉仪测量定点抛光斑的粗糙度,结果如图 11 所示。在不同转速下,抑振气囊的抛光后粗糙度普遍小于普通气囊的抛光后粗糙度。

根据气囊抛光的卷积定理可知,抛光后表面的误差分布频谱为去除函数与驻留时间分别傅里叶变换的乘积^[12],中频误差卷积公式为

$$R(w) = F[g(x) \cdot t(x)] = G(w) * T(w) \quad (1)$$

其中, $R(w)$ 为误差残留的频谱分布, $g(x)$ 、 $G(w)$ 表示去除函数, $t(x)$ 、 $T(w)$ 为驻留时间函数, x 为位置量, w 为空间频率。

普通气囊头与抑振气囊头频谱如图 12 所示,实际工艺中,抛光间隔一般为 1 mm 以上,因此对比空间频率从 0~1 (mm^{-1}) 的抛光斑频谱。结果表明,在 1000 rpm 及其以下转速时,抑振气囊头的抛光频谱幅值是要显著小于普通气囊头抛光频谱幅值,且抑振气囊头带宽更小,修形能力也强于普通气囊头。然而随着转速进一步提升,到 1500 rpm 以上时,抑振气囊头的抛光频谱幅值逐渐接近普通气囊头抛光频谱幅值,即中频抑制效果降低。

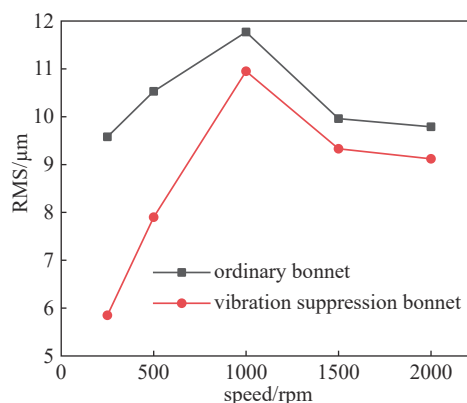


Fig. 11 Comparison of fixed-point polishing RMS between ordinary bonnet tool and vibration suppression bonnet tool

图 11 普通气囊与抑振气囊定点抛光 RMS 对比

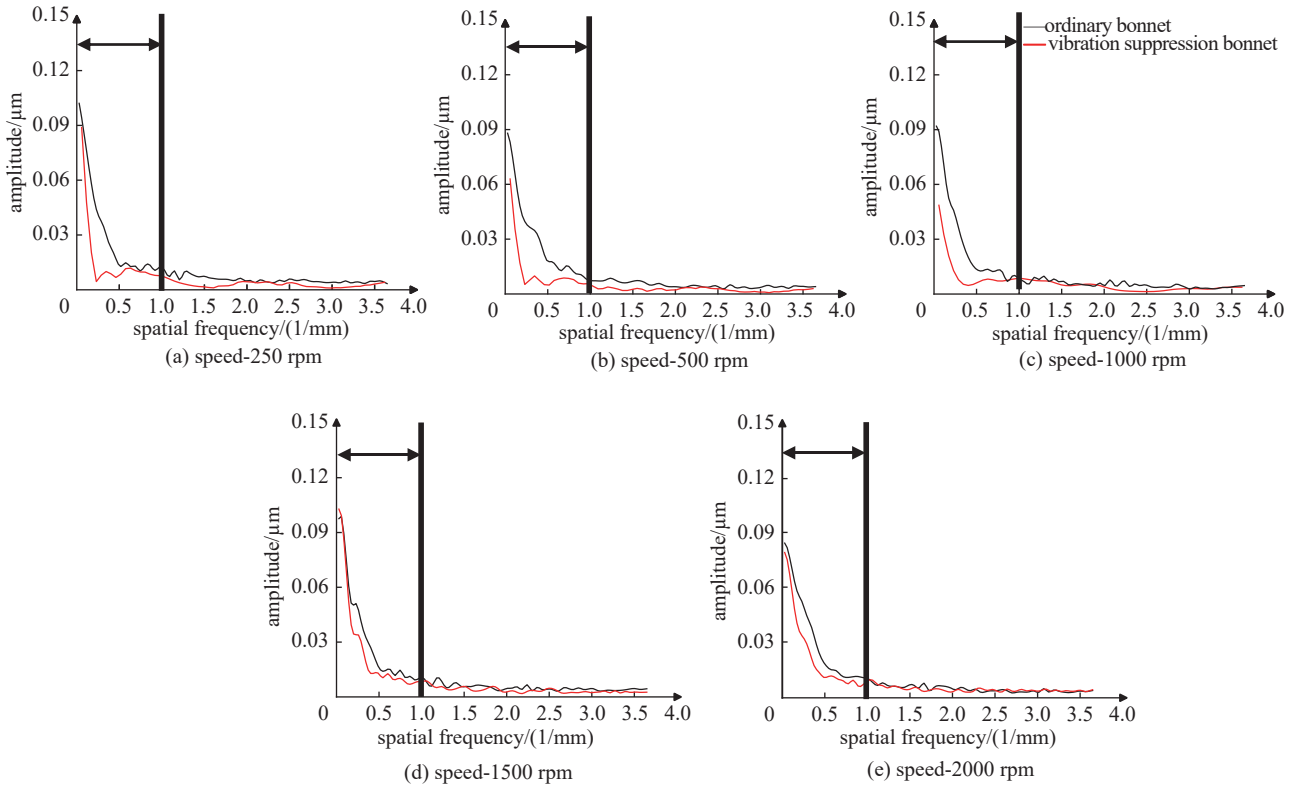


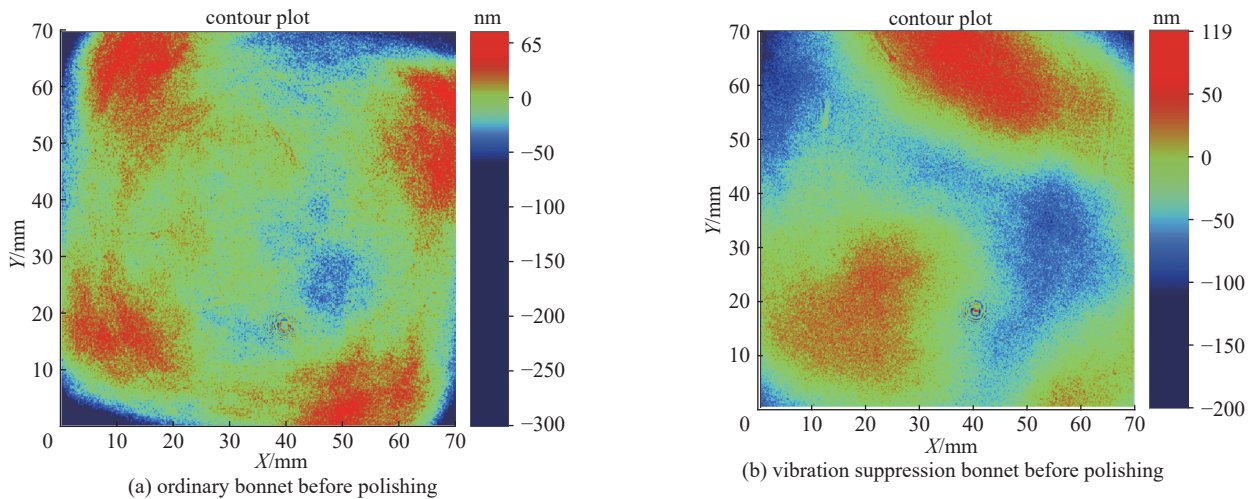
Fig. 12 Comparison of spectra of fixed-point polishing spots between ordinary bonnet tool and vibration suppression bonnet tool

图 12 普通气囊与抑振气囊定点抛光斑频谱对比

3.2 整面抛光实验对比

为进一步探究两种气囊在实际整面抛光中的效果对比,开展整面抛光效果对比实验。分别使用抑振气囊工具头与原始气囊工具头进行 200 mm×200 mm 的 SiC 元件完整面型抛光加工。其中, SiC 元件先由型号为 FD-910X 研磨机进行全口径研磨,去除 SiC 元件表面划痕,再展开气囊抛光实验。实验中保证气囊抛光工艺参数一致,采用常规抛光工艺:转速 1000 rpm、抛光路径间距 3 mm、下压量 0.6 mm、抛光时长 60 min。SiC 元件最终抛光效果可通过三个参数描述:低频误差 PV 值、中频误差 PSD 谱、高频误差 RMS 值。抑振气囊工具头与原始气囊工具头抛光效果对比如图 13、图 14、表 7 所示。

由图 13、图 14、表 7 可知:未抛光前, SiC 元件表面是不存在中频误差的。而在整面抛光对比实验中,采用抑振气囊抛光工具头抛光的 SiC 元件其 PV 值由 2.000 μm 降至 1.948 μm, RMS 由 395.562 nm 降至 382.256 nm,引入的中频误差为 187.5 mm·nm²;采用普通气囊抛光工具头抛光的 SiC 元件其 PV 值由 2.866 μm 降至 2.809 μm, RMS 由 540.773 nm 降至 534.043 nm,引入的中频误差为 316.9 mm·nm²。综合来看,相较普通气囊头,抑振气囊头引入的



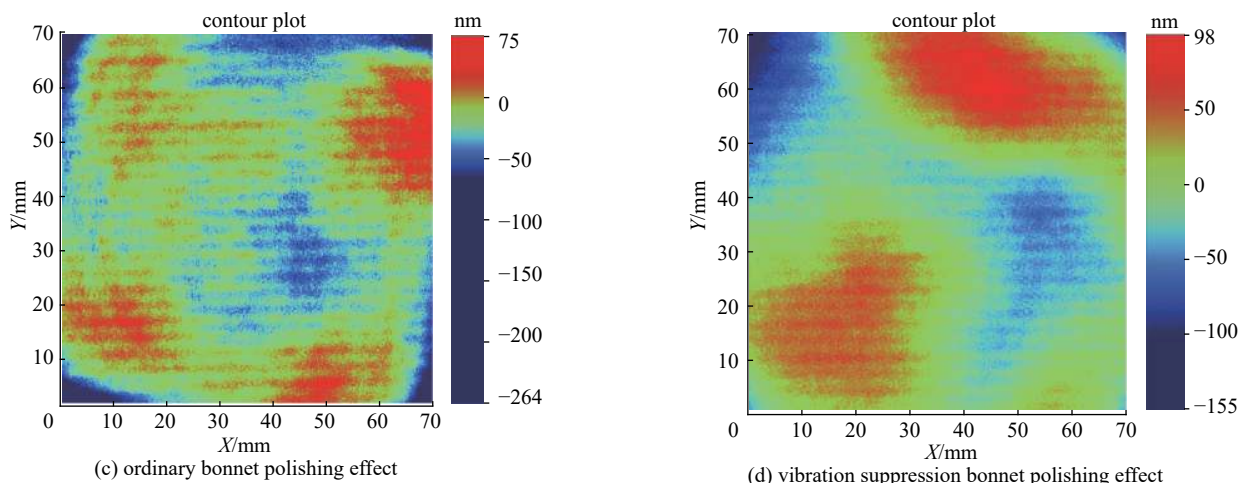


Fig. 13 Comparison of the polishing effect of the original bonnet tool and the vibration suppression bonnet tool

图 13 原始气囊工具头与抑振气囊工具头抛光效果对比

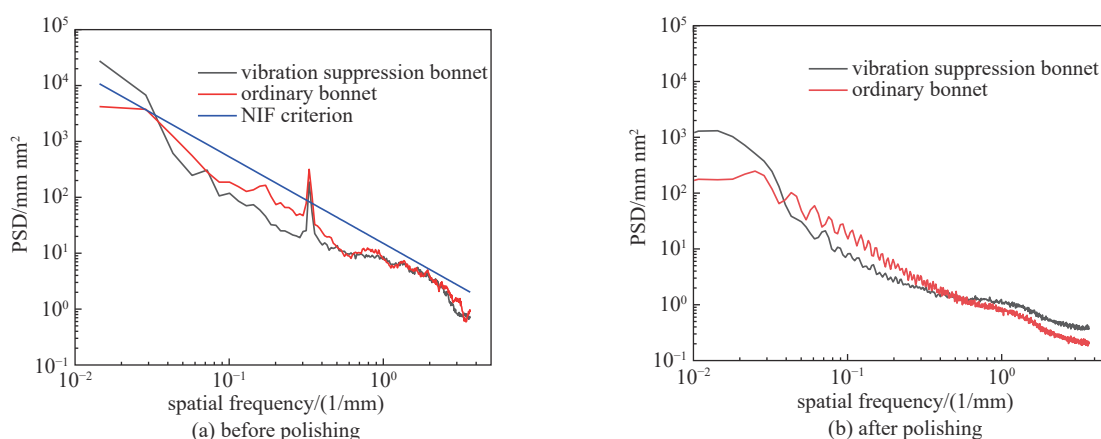


Fig. 14 Comparison of the Y-direction mid-frequency error between the whole surface polishing of the original bonnet tool and the whole surface polishing of the vibration suppression bonnet tool

图 14 原始气囊整面抛光与抑振气囊整面抛光 Y 向中频误差对比

表 7 原始气囊工具头与抑振气囊工具头抛光效果对比

Table 7 Comparison of the polishing effect of the original bonnet tool and the vibration suppression bonnet tool

comparison parameters		originary bonnet	vibration suppression bonnet	relative reduction rate
PV/ μm	before polishing	2.866	2.000	—
	after polishing	2.809	1.948	—
PSD/($\text{mm}\cdot\text{nm}^2$)	before polishing	—	—	40%
	after polishing	316.9	187.5	—
RMS/nm	before polishing	540.773	395.562	—
	after polishing	534.043	382.256	—

PSD 相对降低 40%。

4 结 论

本文基于 Ansys Workbench 建立工业机器人的有限元模型, 并展开相关模态实验, 实验与仿真结果共同表明: 在机器人气囊抛光系统在工况频带至少存在 5 阶模态, 且共振时机器人末端抖动最大幅值约为 1 mm, 且加工时工业机器人还会耦合工作台模态。可见, 机器人气囊抛光系统的动态特性较差, 其系统工况频带内适宜加工频率严重受限, 进而影响抛光质量。

基于阻尼耗能机理设计了一种抑振气囊工具头, 并构建有限元仿真模型, 其自由振动仿真曲线表明, 抑振气囊工具头阻尼比约为 0.05, 其耗能能力优于普通气囊工具头。并进一步展开抑振气囊工具头与普通气囊工具头的定

点抛光对比实验与整面抛光对比实验,实验结果表明,抑振气囊头抛光效果要优于普通气囊头。抑振气囊工具头可以显著降低气囊抛光时由于机器人振动、抛光卷积效应引入的中频误差,降幅可达40%,抛光优化效果显著。

参考文献:

- [1] Cheng Haobo. Independent variables for optical surfacing systems[M]. Heidelberg: Springer, 2014: 11-20.
- [2] 王振忠, 施晨淳, 张鹏飞, 等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23-56. (Wang Zhenzhong, Shi Chenchun, Zhang Pengfei, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 23-56)
- [3] 樊非, 徐曦, 许乔, 等. 大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47: 200135. (Fan Fei, Xu Xi, Xu Qiao, et al. Progress on ultra precision manufacturing technology of large-aperture high-power laser optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47: 200135)
- [4] 徐德衍. NIF的光学加工现状[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(12): 13-14,12. (Xu Deyan. Optical processing status of NIF[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(12): 13-14,12)
- [5] 计时鸣, 陈伟强, 金明生, 等. 气囊连续进动抛光运动模型的研究[J]. 机电工程, 2012, 29(4): 377-380,416. (Ji Shiming, Chen Weiqiang, Jin Mingsheng, et al. Research on motion model for gasbag polishing with continuous precession process[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(4): 377-380,416)
- [6] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6. (Ji Shiming, Jin Mingsheng, Zhang Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-form mold[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6)
- [7] 黄智, 周涛, 吴湘, 等. 机器人气囊抛光SiC光学元件加工特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 22-29. (Huang Zhi, Zhou Tao, Wu Xiang, et al. SiC optical element processing properties under robot bonnet polishing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 22-29)
- [8] 林泽文, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 机器人气囊抛光去除函数稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 051001. (Lin Zewen, Wang Zhenzhong, Huang Xuepeng, et al. Influence of robotic structural deformation on bonnet polishing removal function[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 051001)
- [9] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]//Proceedings of the SPIE 5341, Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory II: The National Ignition Facility. 2004: 84-101.
- [10] 李爱民. 计算机控制小工具研抛的去除特性及工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003: 21-30. (Li Aimin. Research on the removal characteristics and process of computer-controlled gadget polishing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003: 21-30)
- [11] 陈伟. 光学元件表面频谱分布影响因素的分析方法[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 967-970. (Chen Wei. Analysis of impact factors on frequency distribution of optic surface[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 967-970)
- [12] 姜涛. 气囊抛光机床精度及元件面形中频控制研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 25-35. (Jiang Tao. Research on the precision of bonnet polishing machine tool and the intermediate frequency control of the component surface[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 25-35)
- [13] Yu Guoyu, Walker D, Li Hongyu. Implementing a grolishing process in Zeeko IRP machines[J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6637-6640.
- [14] Dunn C R, Walker D D. Pseudo-random tool paths for CNC sub-aperture polishing and other applications[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 18942-18949.
- [15] Wang Chunjin, Wang Zhenzhong, Wang Quanjin, et al. Improved semirigid bonnet tool for high-efficiency polishing on large aspheric optics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5): 1607-1617.
- [16] 潘日. 大口径非球面高效可控气囊抛光技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014: 7-100. (Pan Ri. Research on polishing technology of large-aperture aspheric surface and high-efficiency controllable airbag[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014: 7-100)
- [17] 王春锦. 大口径光学元件的半柔性气囊高效抛光技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 20-50. (Wang Chunjin. Research on high-efficiency polishing technology for semi-flexible bonnet of large-aperture optical components[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 20-50)
- [18] Ahmadian H, Mottershead J E, James S, et al. Modelling and updating of large surface-to-surface joints in the AWE-MACE structure[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 868-880.
- [19] Pan Zengxi, Zhang Hui. Analysis and suppression of chatter in robotic machining process[C]//2007 International Conference on Control, Automation and Systems. 2007: 595-600.
- [20] 陈永刚, 樊开夫, 谭晶晶, 等. 工业六轴机器人末端抖动的研究[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 44-47. (Chen Yonggang, Fan Kaifu, Tan Jingjing, et al. Research on jitter of industrial six-axis robot terminal[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(12): 44-47)
- [21] 王战玺, 张晓宇, 李飞飞, 等. 机器人加工系统及其切削颤振问题研究进展[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 147-155,188. (Wang Zhanxi, Zhang Xiaoyu, Li Feifei, et al. Review on the research developments of robot machining systems and cutting chatter behaviors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(14): 147-155,188)
- [22] 方强, 李超, 费少华, 等. 机器人镗孔加工系统稳定性分析[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 727-737. (Fang Qiang, Li Chao, Fei Shaohua, et al. Stability analysis of robot boring system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 727-737)
- [23] Pan Ri, Zhao Wanying, Wang Zhenzhong, et al. Research on an evaluation model for the working stiffness of a robot-assisted bonnet polishing system[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 134-143.
- [24] Alberts T E, Dickerson S L, Book W J. On the transfer function modeling of flexible structures with distributed damping[J]. Georgia Institute of Technology, 1986.
- [25] 贺兴书. 机械振动学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985. (He Xingshu. Mechanical vibration[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1985)
- [26] 伍魏明. 环形橡胶—硅油组合式减振器刚度与阻尼特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 40-60. (Wu Weiming. Study on the stiffness and damping characteristics of annular rubber-silicone oil damper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 40-60)