

# 弱刚性构件双机器人协同加工振动抑制方法\*

崔光裕<sup>1,2</sup>, 李波<sup>1</sup>, 乐毅<sup>3</sup>, 田威<sup>1</sup>, 廖文和<sup>1</sup>, 李明伟<sup>3</sup>

(1.南京航空航天大学机电学院 南京,210016)

(2.上海宇航系统工程研究所 上海,201109)

(3.北京卫星制造厂有限公司 北京,100094)

**摘要** 针对弱刚性航天器舱体壁板多任务并行加工的振动抑制需求,研究了弱刚性构件在切削激励作用下的振动产生、传播与耦合机理,提出了基于双加工激励相位差控制的弱刚性构件双机器人协同加工振动抑制方法,并以薄壁舱体壁板为对象进行了仿真与试验研究。结果表明,该方法能够有效实现振动抑制,验证了其正确性与有效性,为多机器人协同原位加工的复杂振动抑制难题提供了一种新思路。

**关键词** 振动抑制;双机器人;相位差;弱刚性构件;协同加工

**中图分类号** TH161;V465

## 引言

双机器人协同制造是实现航空航天大型弱刚性构件高质高效加工的有效途径,但多机器人协同作业会使构件产生复杂的加工振动,影响制造精度与质量。以工业机器人为核心的智能装配技术与装备是解决该难题的新途径<sup>[1-3]</sup>。文献[4-6]研制了飞机部件机器人装配系统。为进一步提升大尺寸构件的制造装配效率,多机器人协同加工的新模式被越来越多的应用。文献[7]开发了一套多机器人协同磨抛系统,使用直线地轨扩展磨抛机器人的工作空间,完成对大型风电叶片的磨抛任务。向勇等<sup>[8]</sup>开发了一套双机器人协同制孔/电磁铆接装备,能够在4个站位完成飞机部件的钻铆装配需求。

由于航天大型舱体构件壁厚薄、刚度弱,故在制孔、铣削等高材料去除率作业中受到切削作用力的激励,易产生振动,严重影响舱体的加工质量。因此,揭示弱刚性构件加工振动产生、传播与影响机理,研究弱刚性舱体在多源加工激励下的加工振动抑制方法,是提升加工质量的必要手段。

抑制加工振动可通过优化切削工艺参数、附加减振与隔振装置、振动主动控制等手段实现。李宏坤等<sup>[9]</sup>构建了不锈钢的铣削稳定性叶瓣图,通过优选工艺参数避免了铣削颤振。李亮等<sup>[10]</sup>研究了钛合金铣削的过程阻尼效应,优化减振后角实现抑制颤振。但是,上述方法均面向常规的切削加工,关于大

型弱刚性构件多加工单元并行作业过程中的协同加工振动抑制的相关技术与方法鲜有报道。

笔者提出了一种面向弱刚性构件加工的双机器人协同加工振动抑制方法,通过控制双机器人的切削时序,使双机器人产生的切削激励在各自的加工位置实现叠加消减的效果,将切削激励的相互干扰作用降至最低,实现多机器人原位加工振动抑制。

## 1 弱刚性构件加工振动机理与抑振方法

### 1.1 单激励下的振动产生与传播

当稳定的切削激励作用在薄壁构件上,构件会产生持续的振动,并从激励施加处由近及远传播,形成机械波。图1为单个激励时构件的振动响应示意图。图中: $P_1$ 点为激励施加处,即波源;实线圈表示机械波波峰所在位置;虚线圈表示波谷所在位置; $r$ 为 $P$ 点到 $P_1$ 点的距离。

$P_1$ 点会形成与外部激励同频同相的机械振动

$$y = A' \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

其中: $A'$ 为 $P_1$ 点的振幅。

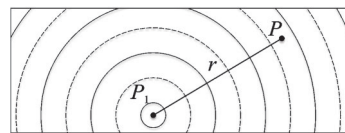


图1 单个激励时构件的振动响应示意图

Fig.1 Vibration response of component under single excitation

\* 江苏省优秀青年科学基金资助项目(BK20230092);国家自然科学基金资助项目(52375500,U22A20204,52075256)  
收稿日期:2021-11-24;修回日期:2022-03-11

构件上任一点  $P$  的振动响应为

$$y_P = crA' \cos \left[ \left( \omega t - \frac{\omega}{u} r \right) + \varphi \right] \quad (2)$$

其中:  $c$  为波的阻尼系数;  $u$  为波的传播速度。

### 1.2 多激励下的振动传播

当弱刚性构件同时受到多个外部激励的作用, 每个激励都会使其产生振动, 并形成以各自激励点为波源的机械波, 在各列振动波的相遇点, 其振动响应等于各列波单独传播时在该点引起的振动响应的和。

图2为2个激励下构件的振动响应示意图。弱刚性构件  $P_1, P_2$  点分别受到2个同频激励  $f = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), f = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$ , 在构件上形成以  $P_1, P_2$  点为波源的两列机械波。

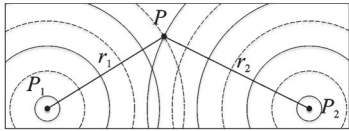


图2 2个激励下构件的振动响应示意图

Fig.2 Vibration response of component under two excitations

构件上任一点  $P$  的振动响应由  $P_1, P_2$  两点处的激励各自在  $P$  点的振动响应叠加形成, 即

$$y_P = cr_1 A'_1 \cos \left[ \omega t - \frac{\omega}{u} r_1 + \varphi_1 \right] + cr_2 A'_2 \cos \left[ \omega t - \frac{\omega}{u} r_2 + \varphi_2 \right] = A'' \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

其中:

$$A'' = \sqrt{(cr_1 A'_1)^2 + (cr_2 A'_2)^2 + 2c^2 r_1 r_2 A'_1 A'_2 \cos \Delta\varphi} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{\omega}{u} (r_2 - r_1) \quad (5)$$

### 1.3 双机器人协同加工振动抑制策略

弱刚性构件上任一点  $P$  的振动响应振幅取决于  $P_1$  和  $P_2$  点处2个切削激励在  $P$  单独引起的振动响应的相位差  $\Delta\varphi$ 。根据式(5)可知,  $\Delta\varphi$  由2个激励的相位差  $\varphi_2 - \varphi_1$  以及  $P$  点到2个激励源  $P_1$  点和  $P_2$  点的波程差  $r_2 - r_1$  决定。为实现双机器人协同加工振动抑制, 可采用以下2种方式: ①当弱刚性构件上2个激励源的位置确定时, 即确定了构件上任一点  $P$  到2个激励源位置的波程差  $r_2 - r_1$ , 可通过调整2个激励源的相位差  $\varphi_2 - \varphi_1$ , 实现加工振动的抑制; ②当弱刚性构件上2个激励源的相位差  $\varphi_2 - \varphi_1$  确定时, 通过调整2个激励源的位置, 调整目标位置到2个激励源位置的波程差  $r_2 - r_1$ , 实现加工振动抑制。

比较发现, 方案②中需要调整2个激励源的位置, 即要从加工任务规划方面入手, 通过规划机器人加工时序予以实现, 相较于方案①, 实施的成本大且流程繁琐。因此, 笔者选取方案①, 对双机器人并行作业下的弱刚性构件加工振动进行抑制。

由式(4)可知, 在外部激励的振幅一定的情况下, 即  $P_1$  和  $P_2$  点的2个切削激励在构件上任意一点  $P$  单独引起的振动响应振幅确定的情况下,  $P$  点的振幅取决于  $\Delta\varphi$  且存在。

$$|cr_1 A'_1 - cr_2 A'_2| \leq A'' \leq cr_1 A'_1 + cr_2 A'_2 \quad (6)$$

当  $\Delta\varphi = 2k\pi, k = 0, 1, \dots$  时,  $A''$  取最大值为  $cr_1 A'_1 + cr_2 A'_2$ ; 当  $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi, k = 0, 1, \dots$  时,  $A''$  最小值为  $|cr_1 A'_1 - cr_2 A'_2|$ 。因此, 为实现2个激励共同作用下的构件加工振动抑振, 应尽量控制  $\Delta\varphi$  接近  $\pi$  的奇数倍。

同理, 对于有  $n$  个激励源同时作用于弱刚性构件的情况, 在构件上  $P$  点产生的振动响应分别  $y_{P_1}, y_{P_2}, \dots, y_{P_n}$ , 可通过叠加所有响应求出  $P$  点的振动响应  $y_P$ , 再通过优化各激励的相位, 实现多源激励下的协同加工振动抑制。

## 2 数值仿真

为验证笔者提出的协同加工振动抑制方法的有效性与正确性, 建立了弱刚性薄壁舱体构件的试验样件。图3为某航天器舱体薄壁试验样件, 是圆心角为  $90^\circ$  的圆弧, 弧长为  $3\,000\text{ mm}$ , 直径为  $3\,820\text{ mm}$ , 高为  $1\,000\text{ mm}$ , 厚度为  $20\text{ mm}$ , 材料为5A06铝合金。

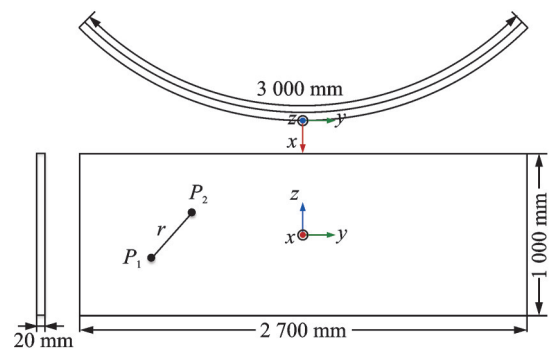


图3 某航天器舱体薄壁试验样件

Fig.3 A thin-wall test specimen of a spacecraft cabin

以壁板中心点  $O$  为原点, 沿半径方向垂直于纸面向外为  $x$  方向, 沿高度方向竖直向上为  $z$  方向, 根据右手螺旋定则确定  $y$  方向, 建立壁板样件坐标系  $Oxyz$ 。在壁板表面施加激励  $f = A \cos(250t + \varphi)$ , 假设该激励能够在激励点处产生振动位移幅值为  $y_0 = 100$  (无量纲) 的响应  $y = 100 \cos(250t + \varphi)$ , 在

振动产生的机械波由近及远传播的过程中存在阻尼,振幅 $y_{\max}$ 逐渐消减,振幅与传播距离 $x$ 满足

$$y_{\max} = -\frac{y_0}{3}x + y_0 \quad (7)$$

### 2.1 双激励下的壁板振动响应

$P_1$ 点单独施加激励 $f$ 时的壁板振动响应振幅分布如图 4 所示。在壁板上 $P_1$ 点(-348.6 mm, -1 100 mm, -200 mm)单独施加激励 $f$ ,为便于显示,图形坐标系相较于壁板坐标系沿 $x$ 负方向平移了

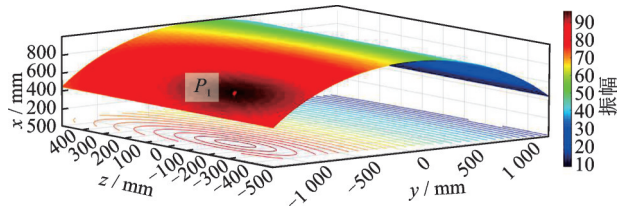


图 4  $P_1$ 点单独施加激励 $f$ 时的壁板振动响应振幅分布  
Fig.4 The vibration response amplitude of the wall panel when  $f$  is applied to  $P_1$

1 000 mm。从图中的等高线可以看出:壁板受到单个激励作用时,壁板上振动位移振幅最大处为激励施加点( $P_1$ 点),振幅最大值为 100;机械波从波源处由近及远传播,并在阻尼的作用下,沿振动传播方向各点振幅逐渐减小; $P_2$ 点(-255.3 mm, -900 mm, 200 mm)的振动位移的振幅为 84.6; $P_1, P_2$ 两点的中点 $P_3$ 点(-282.7 mm, -1 000 mm, 0 mm)的振动位移的振幅为 92.3。

在 $P_1$ 点与 $P_2$ 点同时施加激励 $f$ ,则壁板上任一点的振动响应为 $P_1, P_2$ 两点处的激励引起的机械波单独在此处引起的振动响应的叠加和,其振幅完全取决于 $P_1, P_2$ 两点处的激励相位差 $\Delta\phi$ 。不同相位差下两激励共同作用的壁板振动响应振幅分布如图 5 所示。两激励相位差在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化时,壁板的振动响应也随之变化。对于激励作用点 $P_1$ 与 $P_2$ ,其振动位移的幅值最大接近 185,为单激励作用时的 1.85 倍,最小仅为 15,较单点激励时的振幅降低 85%。这表明对弱刚性构件进行的加工振动抑制是必要的,也证明了笔者提出的抑振方法的有效性。

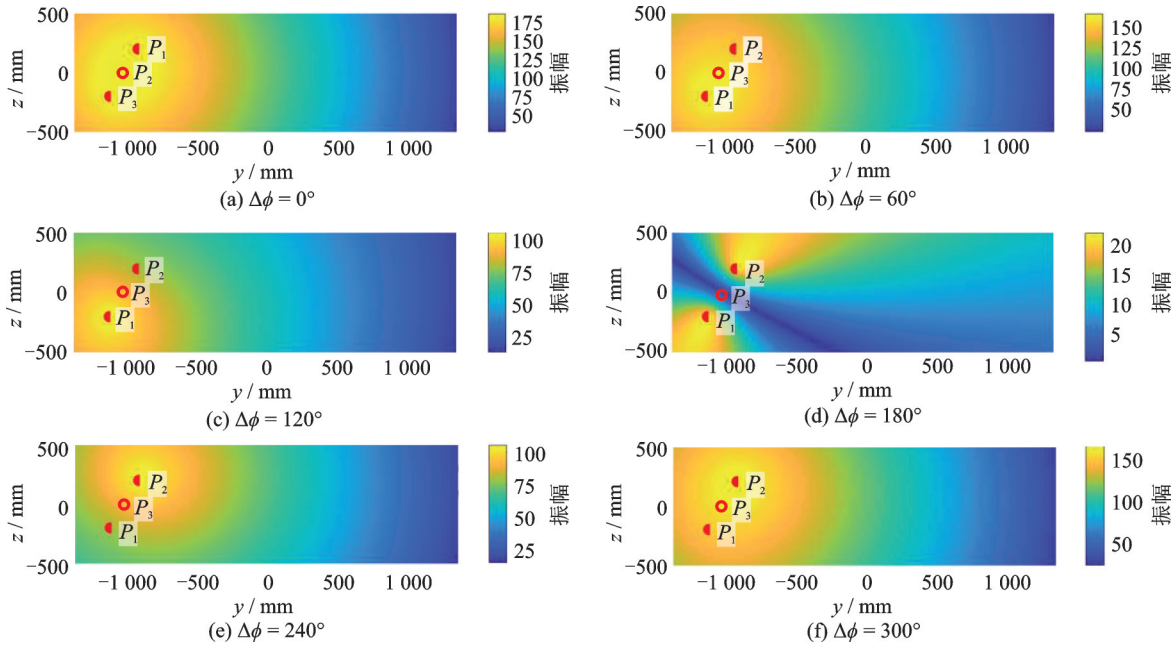


图 5 不同相位差下两激励共同作用的壁板振动响应振幅分布  
Fig.5 The vibration response amplitude of the wall panel under the combined action of two excitations with different phase differences

当 $\Delta\phi = 0^\circ$ 时,在 $P_1, P_2$ 两点施加的激励相位相同,在壁板上产生的振动相位也相同,此时, $P_1, P_2$ 两点处施加的激励在壁板上任意一点产生的振动响应干涉加强效应最为显著。对于 $P_3$ 点,当 $\Delta\phi = 0^\circ$ 时, $P_3$ 点的振幅最大,达到 184.6。随着相位差 $\Delta\phi$ 逐渐增大,振动响应干涉加强效应逐渐减弱,当 $\Delta\phi = 120^\circ$ 时, $P_3$ 点的振动响应不再叠加加强,其振幅与单个激励作用时一致,为 92.3。当相位差 $\Delta\phi$ 继续增

大, $P_1, P_2$ 两点施加的激励产生的两列机械波在 $P_3$ 点呈现相互抵消的效果, $P_3$ 点的振动位移幅值随着相位差的增大逐渐减小,当 $\Delta\phi = 180^\circ$ ,两列波在 $P_3$ 点完全抵消, $P_3$ 点的振幅为 0。相位差从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的过程 1 是 $P_3$ 点的振幅从最大逐渐减小至 0 的过程。当相位差 $\Delta\phi$ 从 $180^\circ$ 向 $360^\circ$ 增大的过程 2,与过程 1 关于 $\Delta\phi = 180^\circ$ 对称, $P_3$ 点的振幅从 0 逐渐增大至最大,为 184.6。 $P_3$ 点的振动位移幅值变化如图 6 所示。

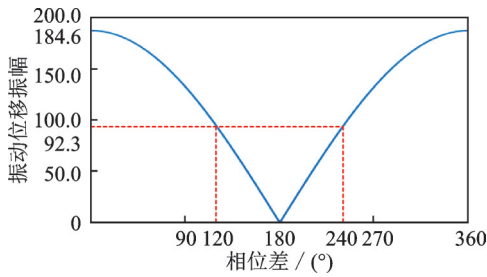


图6  $P_3$ 点的振动位移幅值变化

Fig.6 The history diagram of the change of the vibration displacement amplitude of point  $P_3$

$P_1$ 点和 $P_2$ 点的叠加振动振幅随两激励相位差的变化规律如图7所示。可以看出： $P_1, P_2$ 点的振动位移振幅无法同时取到最小，当两点激励源的相位差为 $181.3^\circ$ 时， $P_1$ 点的叠加振动振幅最小为15.4， $P_2$ 点的叠加振动振幅为16.23；当两点激励源的相位差为 $178.7^\circ$ 时， $P_2$ 点的叠加振动振幅最小为15.4， $P_1$ 点的叠加振动的振幅为16.23；当相位差为 $180^\circ$ 时， $P_1, P_2$ 的叠加振动响应相等，均为15.61，较单独受到激励时产生的振动振幅降低了84.39%，能够达到较为理想的振动协同抑制效果。

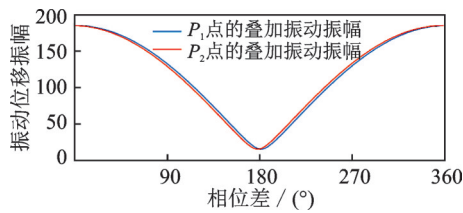


图7  $P_1$ 点和 $P_2$ 点的叠加振动振幅随两激励相位差的变化  
Fig.7 The variation law of the superimposed vibration amplitude of  $P_1$  and  $P_2$  with the phase difference between the two excitations

### 2.2 弱刚性壁板激励响应有限元仿真

图8为弱刚性舱体壁板有限元模型。壁板的4条边均为固支约束，以壁板对称中心 $O$ 为坐标原点建立壁板坐标系 $Oxyz$ 。在 $P_1, P_2$ 点分别施加不同工况的径向激励。工况1： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 0$ ；工况2： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 100\cos(250t)$ ；工况3： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 100\cos(250t + \pi)$ 。各工况下激励力的单位为N。

$P_1, P_2$ 和 $P_3$ 点在3种工况下的壁板振动位移响应如图9所示。 $P_1$ 点在3种工况下的振动位移响应振幅分别为 $6.8 \times 10^{-3}, 8.5 \times 10^{-3}$ 和 $4.9 \times 10^{-3}$  mm，工况3的振幅较工况1降低28%，较工况2降低42.4%。 $P_2$ 点在工况2,3下的振动位移响应振幅分别为 $8.5 \times 10^{-3}$ 和 $4.9 \times 10^{-3}$  mm，工况3的振幅较工

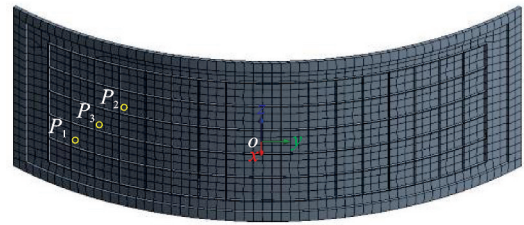


图8 弱刚性舱体壁板有限元模型

Fig.8 Finite element model of weakly rigid wall panel

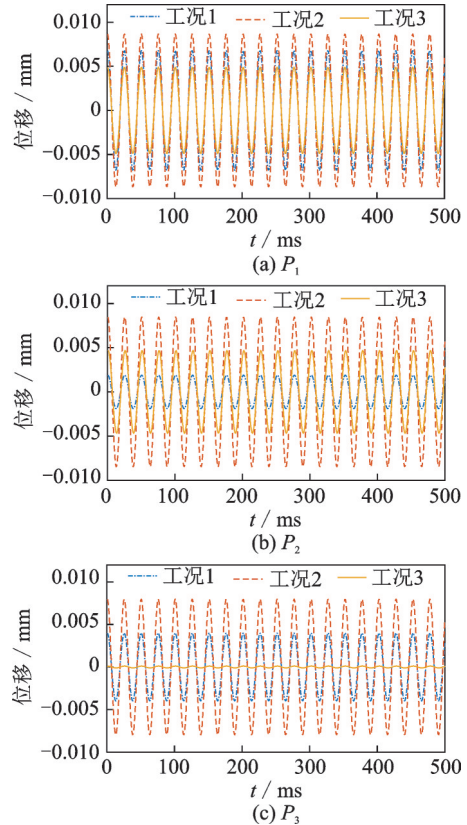


图9 3种工况下的壁板振动位移响应

Fig.9 Vibration displacement response of wall panel in three conditions

况2降低42.4%。 $P_3$ 点在3种工况下的振动位移响应振幅分别为 $4 \times 10^{-3}, 8 \times 10^{-3}$ 和 $5 \times 10^{-4}$  mm，工况2的振幅为工况1的2倍，工况3的振幅较工况1降低87.5%，较工况3降低93.8%。以上证明当 $P_1, P_2$ 的激励相位差为 $180^\circ$ 时，振动均得到了显著抑制。

修改壁板的材料属性，赋予壁板刚度更好的45钢材料的参数。同样的，在 $P_1$ 点与 $P_2$ 点分别施加不同工况的径向激励：工况1： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 0$ ；工况2： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 100\cos(250t)$ ；工况3： $f_{P_1} = 100\cos(250t), f_{P_2} = 100\cos(250t + \pi)$ 。各工况下激励力的单位为N。 $P_1, P_2$ 点在3种工况下的壁板振动位移响应如图10所示。可以看到， $P_1$ 点在3种工况下的振动位移响应振幅分别为 $4.5 \times 10^{-4}, 6.1 \times 10^{-4}$ 和 $2.9 \times 10^{-4}$  mm，较5A06铝合金材

质的壁板振动位移响应振幅降低一个数量级。同时,工况 3 壁板振动位移的振幅较工况 1 中  $P_1$  点单独施加激励降低 35%,较工况 2 双激励振动叠加增强时降低 52.5%。 $P_2$  点在 3 种工况下的振动位移响应振幅分别为  $1.6 \times 10^{-4}$ ,  $6.1 \times 10^{-4}$  和  $2.9 \times 10^{-4}$  mm。同样的,工况 3 双激励振动叠加相消时振动位移振幅较工况 2 双激励振动叠加增强时降低 52.5%, $P_1, P_2$  点两激励施加点处的振动均得到了显著抑制,进一步证明了笔者提出的通过控制双激励相位差实现加工位置减振方法的有效性。

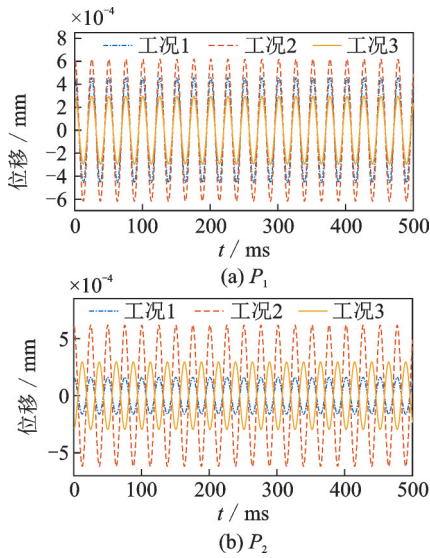


图 10  $P_1, P_2$  点在 3 种工况下的壁板振动位移响应  
Fig.10 Vibration displacement response of wall panel in three conditions of  $P_1$  and  $P_2$

### 3 试验验证

建立如图 11 所示的多源激励协同加工振动抑制试验平台来验证笔者提出方法的有效性。为保证壁板上施加的激励可知可控,采用 2 台东华测试 DH40100 激振器对壁板施加简谐激励,激振器与壁板连接处安装有东华测试 3A105 型力传感器,用于测量壁板受到的实际激励力,在  $P_1, P_2$  和  $P_3$  处分别安装东华测试 1A314E 型加速度传感器,用于测量该点的径向加速度响应。

对壁板进行了 4 组激励试验。试验 1: $P_1$  点处单独施加激励  $f_{P_1} = 100.5\cos(100t)$ ;试验 2: $P_2$  点处单独施加激励  $f_{P_2} = 102.3\cos(100t)$ ;试验 3: $P_1$  与  $P_2$  点处同时分别施加激励  $f_{P_1} = 100.5\cos(100t)$  与  $f_{P_2} = 102.3\cos(100t)$ ;试验 4: $P_1$  与  $P_2$  点处同时分别施加激励  $f_{P_1} = 100.5\cos(100t)$  与  $f_{P_2} = 102.3\cos(100t + \pi)$ 。各试验中激励力的单位为 N。

图 12 为 4 组试验中壁板的振动加速度响应。

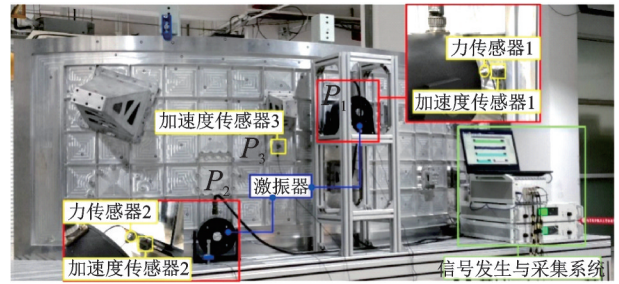


图 11 多源激励协同加工振动抑制试验平台  
Fig.11 The vibration suppression test platform of multi-source excitations collaborative processing

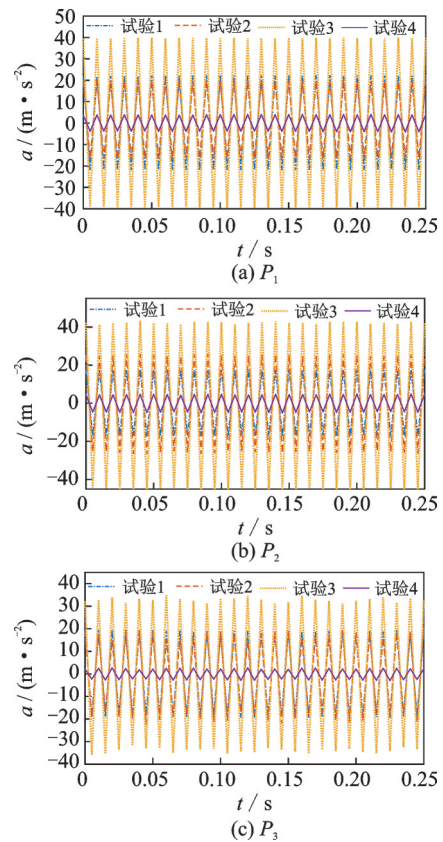


图 12 4 组试验中壁板的振动加速度响应  
Fig.12 Vibration acceleration response of wall panel in four tests

可以看到,  $P_1$  点的加速度响应振幅分别为 22.1, 19.7, 40.6 和 3.8  $m/s^2$ ;  $P_2$  点的加速度响应振幅分别为 17.6, 25.7, 43.25 和 4.7  $m/s^2$ ;  $P_3$  点的加速度响应振幅分别为 19.3, 19.5, 34.9 和 1.8  $m/s^2$ 。在试验 3 中,当  $P_1, P_2$  点处同时施加相位相同的激励时,壁板上各点的振动响应显著增大,2 个相位相同激励引起的振动叠加增强, $P_1, P_2$  和  $P_3$  点处的振幅均为试验 1 和试验 2 产生的加速度响应振幅的和。在试验 4 中,当  $P_1, P_2$  点处同时施加相位差为  $180^\circ$  的激励时,2 个相位相反的激励引起的振动相互抵消减弱,壁板上各点的加速度响应得到明显减弱, $P_1, P_2$  和  $P_3$  点处的振幅较单独施加激励时最大分别降低 82.8%,

81.7%和89.5%，较第3组试验中的振幅叠加增强情况降低90.6%，89.1%和94.8%。

图13为壁板在4组激励试验中的加速度振幅变化，证明所提出方法能够实现弱刚性壁板在受到多源激励下的振动抑制。

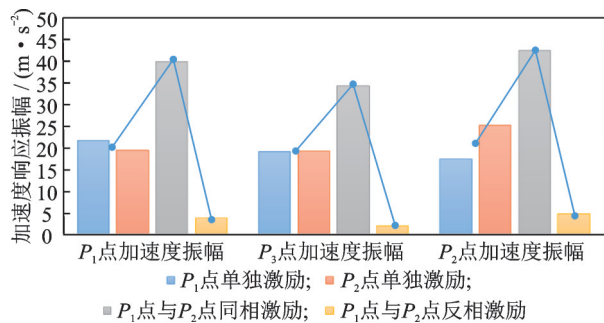


图13 壁板在4组激励试验中的加速度振幅变化

Fig.13 Changes of acceleration amplitude of wall panel in four excitation tests

## 4 结束语

针对弱刚性航天器舱体壁板多任务并行加工振动抑制需求，研究了弱刚性构件加工振动产生、传播与多激励共同作用下的振动耦合机理，提出了双机器人协同加工振动抑制方法。当2个切削激励同时施加在弱刚性构件上时，控制2个激励的相位差为 $\pi$ 的奇数倍，能够有效抑制切削位置的振动。仿真与试验证明了该方法的有效性，为多机器人协同原位高质量加工提供了一种新思路。

## 参 考 文 献

- [1] GARNIER S, SUBRIN K, AREVALO-SILES P, et al. Mobile robot stability for complex tasks in naval industries[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 297-302.
- [2] 张晋, 田威, 周敏, 等. 机器人自动钻铆系统集成控制技术[J]. 航空制造技术, 2017(9): 36-42, 49. ZHANG Jin, TIAN Wei, ZHOU Min, et al. Integrated control system of robot automatic drilling and riveting technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(9): 36-42, 49. (in Chinese)
- [3] LI B, TIAN W, ZHANG C F, et al. Positioning error compensation of an industrial robot using neural networks and experimental study[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(2): 346-360.
- [4] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.
- [5] MOELLER C, SCHMIDT H, KOCH P, et al. Real

time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 100-108.

- [6] 郭英杰. 基于工业机器人的飞机交点孔精镗加工关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [7] 丰飞, 严思杰, 丁汉. 大型风电叶片多机器人协同磨抛系统的设计与研究[J]. 机器人技术与应用, 2018(5): 16-24. FENG Fei, YAN Sijie, DING Han. Design and research of multi-robot cooperative grinding and polishing system for large-scale wind turbine blades [J]. Robot Technique and Application, 2018(5): 16-24. (in Chinese)
- [8] 向勇, 田威, 洪鹏, 等. 双机器人钻铆系统协同控制与基坐标系标定技术[J]. 航空制造技术, 2016(16): 87-92. XIANG Yong, TIAN Wei, HONG Peng, et al. Collaborative control and base coordinates calibration technology for dual-robot drilling and riveting system [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(16): 87-92. (in Chinese)
- [9] 李宏坤, 赵鹏仕, 李精忠, 等. FV520B 不锈钢铣削稳定叶瓣图的构建及实验[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4): 722-726. LI Hongkun, ZHAO Shipeng, LI Jingzhong, et al. Milling stability lobe diagram construction on FV520B stainless steel and experimental testing investigation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4): 722-726. (in Chinese)
- [10] 李亮, 赵威, 何宁. 过程阻尼效应在钛合金铣削加工中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1165-1172. LI Liang, ZHAO Wei, HE Ning. Application of process damping effect in milling of titanium alloy [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1165-1172. (in Chinese)



**第一作者简介:**崔光裕,男,1995年3月生,博士。主要研究方向为机器人动力学与加工振动抑制方法。曾发表《Dynamic modeling and vibration prediction of an industrial robot in manufacturing》(《Applied Mathematical Modelling》2022, Vol.105)等论文。

E-mail: cuiguangyu@nuaa.edu.cn

**通信作者简介:**田威,男,1977年8月生,教授、博士生导师。主要研究方向为航空航天智能装配技术与装备。

E-mail: tw\_nj@nuaa.edu.cn