

基于 PSD 的柔性机械臂末端振动特性测试与分析*

张玉玲¹, 谷勇霞¹, 赵杰亮², 吴嘉宁²

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院 北京, 100048) (2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京, 100084)

摘要 针对含谐波减速器柔性空间机械臂的臂杆刚度以及关节转速对机械臂末端振动的影响, 利用位置敏感探测器(position sensitive detector, 简称 PSD)对机械臂的振动特性进行了测试分析。通过改变臂杆刚度和关节转速中单一因素, 分别测量了机械臂在不同臂杆刚度和不同关节转速下的末端振动响应。研究表明, 随着臂杆拉力和机械臂关节转速的增大, 机械臂末端的振动幅度呈现上升趋势, 且机械臂关节转速的改变对机械臂末端振动的影响大于臂杆刚度所造成的振动影响。

关键词 臂杆刚度; 关节转速; 机械振动; 位置敏感探测器

中图分类号 TH113.1

引言

随着航天技术的发展和太空探索步伐的加快, 空间机械臂作为航天器上的重要维护工具, 可以完成释放、回收卫星以及空间站在轨装配等各种任务, 成为目前的研究热点之一^[1-2]。然而, 空间机械臂在运动过程中由于受到弹性变形和机械振动的影响, 机械臂末端的定位精度成为机械臂研究中的突出问题^[3-4], 严重限制机械臂执行高精度任务的能力和运行稳定性, 因此测试空间机械臂在运动过程中的振动特性具有重要意义。目前有些学者在研究机械臂动力学性能时, 不仅考虑了臂杆柔性, 还考虑了机械臂关节柔性、间隙、摩擦和驱动器等非线性因素, 这对于精确分析机械臂振动特性至关重要。付建宁等^[5]提出了一种非线性摩擦建模及补偿方法, 建立了机械臂关节的指数摩擦模型。Zhao 等^[6]分析了含谐波减速器的空间机械臂的动力学可靠性及参数灵敏性。文献[7-8]分析了不同间隙数目对航天器系统动力学特性的影响。

传统测量机械臂末端振动位移的设备主要是应变仪和加速度计, 但它们只能测量某一方向的位移, 要获得机械臂末端的全部振动信息, 必须在不同方向同时安装若干个应变仪或加速度计。Sakawa 等^[9]将三个加速度计安装在前臂末端来测量机械臂的振动位移。Li 等^[10]基于应变测量仪实现了梁的高精度振动位移的测量。

近年来, 激光作为一种高强度相干光源, 它的发展使得高精度、高速度的振动位移测试技术得以实现。另外, 基于机器视觉的振动测试研究也为柔性结构振动测量提供了技术支持^[11-12]。目前, 在激光振动测量方法中, 广泛采用电子散斑法、激光全息法及激光三角法等, 这些技术的使用提高了激光振动位移测量的分辨率或精度^[13-14]。Fu 等^[15]用激光全息干涉法测出微型物体的位移、速度及加速度。王荣林等^[16]基于 LabView 提出了一种采用激光测距传感器的非接触测量方法测振动位移。歹英杰等^[17]建立了基于双面阵 CCD 交汇测量技术的动态目标振动测试系统。季云峰^[18]设计了一种基于机器视觉的非接触式柔性臂振动测试系统。

PSD 具有分辨率高, 处理电路简单, 响应速度快, 性价比高的特点, 其位置输出与光点强度及尺寸无关, 只与其“重心”位置有关, 且由于光点可以小到 100 μm 左右, 因而测量结果精度高^[19]。笔者采用 PSD 位置敏感探测器测量了机械臂在不同臂杆刚度和不同关节转速下的振动位移, 并分析了臂杆刚度和关节转速对机械臂末端振动的影响。

1 实验平台设计及测试原理

以单自由度空间机械臂为研究对象, 整个实验装置(图 1)包括主体结构 and 基座两部分, 其中主体结构由机械运动机构、臂杆刚化调节机构、微重力模拟与测试机构、运动精度测试机构四部分组成。臂

* 国家自然科学基金资助项目(11272171)

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2015-09-18

杆刚化调节机构设置于机械臂运动机构的臂杆中,臂杆内置拉力传感器,通过调节机构中的螺栓可以调节臂杆内钢丝的拉力,即调节臂杆刚度进行测试。微重力模拟与测试机构设置于机械臂运动机构上方并连接臂杆,拉力传感器串联在悬吊绳索上,可以测试机械臂在运动过程中悬吊绳索的实时拉力。运动精度测试机构安装在机械臂臂杆的前端,它由 PSD 传感器和激光发生器构成,用于测量机械臂末端的柔性变形量。PSD 传感器固定于机械臂臂杆的前端,激光发生器固定在机械臂臂杆的另一端。整个机械臂机构通过基座固定在实验台上。

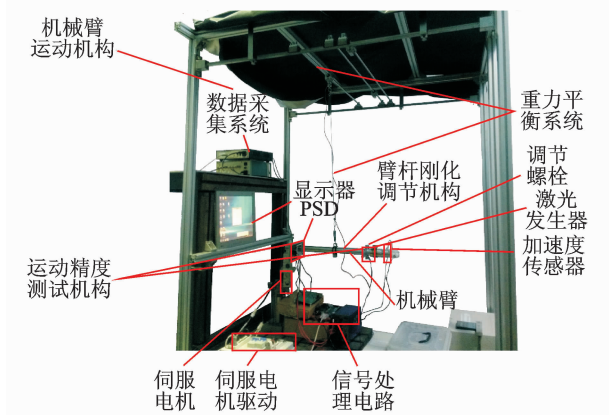


图1 机械臂末端振动实验装置图

Fig. 1 The diagram of experiment system of manipulator end vibration

主要设备参数如下:柔性机械臂结构尺寸为 $750\text{ mm} \times \Phi 50\text{ mm}$,弹性模量为 $2.1 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$,密度为 $2.78 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ 。PSD 灵敏波长为 $300 \sim 1150\text{ nm}$ 。根据测量精度要求,选用日本滨松公司的二维 PSD-1010,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 二维 PSD-1010 的主要性能参数

Tab. 1 The main performance parameters of the two-dimensional PSD-1010

参数/单位	数值
光敏面面积/ mm^2	10×10
光谱响应范围/ nm	$320 \sim 1100$
响应度/ $(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	$0.55 (\lambda = 920\text{ nm})$
位置分辨率/ μm	1.5
上升时间/ μs	$3.0 (V_R = 5\text{ V}, R_L = 1\text{ k}\Omega)$
结电容/ Pf	$80 (V_R = 5\text{ V}, f = 10\text{ kHz})$
暗电流/ nA	10
工作电压/ V	5
工作温度/ $^\circ\text{C}$	$-10 \sim 50$
位置检测误差/ μm	± 80

运动精度测试机构如图 2 所示,激光发生器发出的光束在 PSD 板面上形成一个尺寸足够小的光

点。当机械臂振动时,PSD 上的光点也随之变化,根据 PSD 上的光点位置,得到机械臂末端的振动位移。实验时分别调节臂杆内钢丝拉力和伺服电动机的转速,通过分析不同受力和运动状态下柔性空间机械臂的 PSD 信号分析机械臂的振动情况。

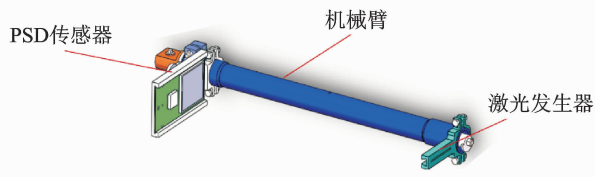


图 2 运动精度测试机构

Fig. 2 Testing organization of motion precision

2 数据处理方法

将 PSD 测试系统安装在机械臂关节的一端上,通过改变臂杆内钢丝的拉力和伺服电机的转速测得不同运转状况下机械臂末端的振动信号,用信号采集仪采集振动信号,传送至滤波放大器进行滤波、放大,最后采用信号处理软件对信号进行分析。

2.1 PSD 测试系统的数据采集

PSD 由在平面硅衬底上的 P,N,I 三层组成,其中 P 型层在表面,N 型层在另一面,I 层在它们中间。落在 PSD 上的入射光转换成光电子后由 P 型层上两端电极探测并形成光电流,电荷通过 P 型电阻层被电极收集,由电极收集到的光电流与入射点和电极间距成反比,原理如图 3 所示。

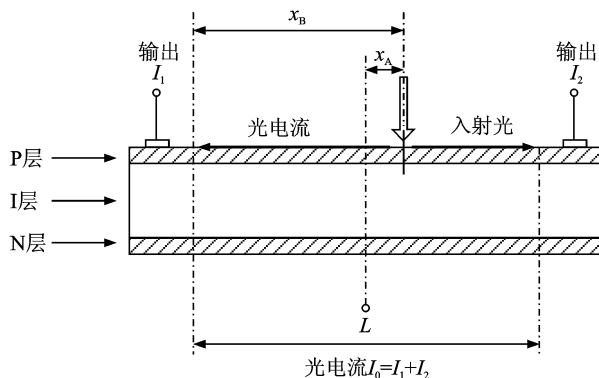


图 3 PSD 实验原理图

Fig. 3 The experimental principle diagram of PSD

假设 L 和 I_0 分别代表电极间距和总光电流, I_1 和 I_2 为电极的光电流, x_A 和 x_B 分别为入射点到 PSD 几何中心和 PSD 一端的距离。显然 $I_0 = I_1 + I_2$, I_1 和 I_2 的大小与光束照射到 PSD 光敏面上的

位置到两输出电极的距离成反比,当PSD一端设定为坐标原点时可得

$$I_1 = \frac{L - x_B}{L} I_0 \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{x_B}{L} I_0 \quad (2)$$

将式(1,2)进行变换,可得

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} = \frac{2x_B - L}{L} \quad (3)$$

在实际检测中,当机械臂在运动过程中产生振动时,必然引起机械臂末端的激光发生器与PSD板的距离发生改变。由式(3)可知,随着机械臂的振动,在PSD板上可以得到不同入射光点的位置,将PSD与数据采集系统相连接,可以测试机械臂在运动过程中机械臂末端的振动信号。

2.2 滤波处理

PSD在进行数据检测时,由于机械臂自身和外界条件的影响,会产生较多强弱噪声信号,为了减小实验误差,确保实验数据的准确可靠性,数据处理之前需要对噪声信号做相应处理。噪声大多数情况下服从高斯分布,一般平均值是0,因此可以采用同期叠加法来降低噪声^[20]。设 t 时刻接收到的信号为 $f(t)$,在 $f(t)$ 中包含原来的信号部分 $s(t)$ 和噪声部分 $n(t)$,即

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (4)$$

信号采集仪反复接收上述信号,将波形的时间起点取同期,将第 k 次收到的信号记为 $f_k(t)$,噪声信号在每个周期中都是随机的,记为 $n_k(t)$,对原来的信号部分 $s(t)$ 取同期,必然在 $f_k(t)$ 中保持相同,因此第 k 次接收到的信号可表示为

$$f_k(t) = s(t) + n_k(t) \quad (5)$$

对接收到的 N 次 $f_k(t)$ 信号取平均值,得

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{s(t) + n_k(t)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s(t) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N n_k(t) \quad (6)$$

如前所述,噪声信号取同期求均值后趋于0,因此叠加的结果为

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(t) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} s(t) \quad (7)$$

这样噪声部分减弱,原来的信号部分显现出来。上述平均滤波法对信号的平滑程度完全取决于 N 。采用加权平均滤波,以突出有用采样的效果,减弱噪声信号。

2.3 PSD测试实验结果

为了分析柔性空间机械臂在不同刚度下的振动特性,调节臂杆内钢丝的拉力,分别设置了0,1 000,2 000,3 000,4 000,5 000,6 000,7 000 g共8组实验。每组拉力条件下测得三组数据并取平均值,避免随机误差以提高实验的精确度。图4为驱动电机转速为100 r/min时,拉力分别为1 000,3 000,5 000 g条件下的PSD信号。

为了排除外界因素的干扰,对实验数据进行滤波处理,处理后的测试信号相对比较密集。对比图4可以发现,拉力为1 000 g时振动位置点最为集中,拉力为3 000 g相对比较分散,而且Y方向的位置点始终为负,说明机械臂在运动过程中Y方向始终向下偏离理想位置,X方向在0附近往复振动。由图4(a~c)可知,拉力分别为1 000,3 000,5 000 g时对应X方向的振动幅值约为-0.10~0.10 mm,-0.20~0.20 mm,-0.20~0.20 mm,Y方向的振动幅值约为-0.75~-0.65 mm,-0.80~-0.70 mm,-1.00~-0.90 mm。说明柔性机械臂在运动过程中随着拉力的增加,Y方向的振动幅度

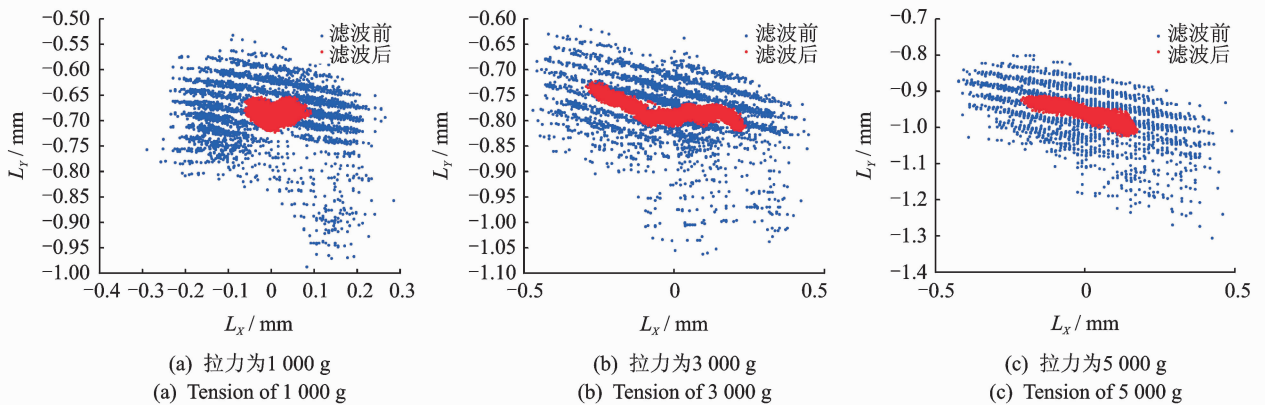


图4 不同拉力下的PSD信号

Fig. 4 The PSD signal under different tension

范围明显增加, X方向的振动幅度也有所增加并往复产生高频振动。

为进一步分析机械臂运动过程中刚度对臂杆末端振动的影响, 图5提取出对应速度下Y方向的振

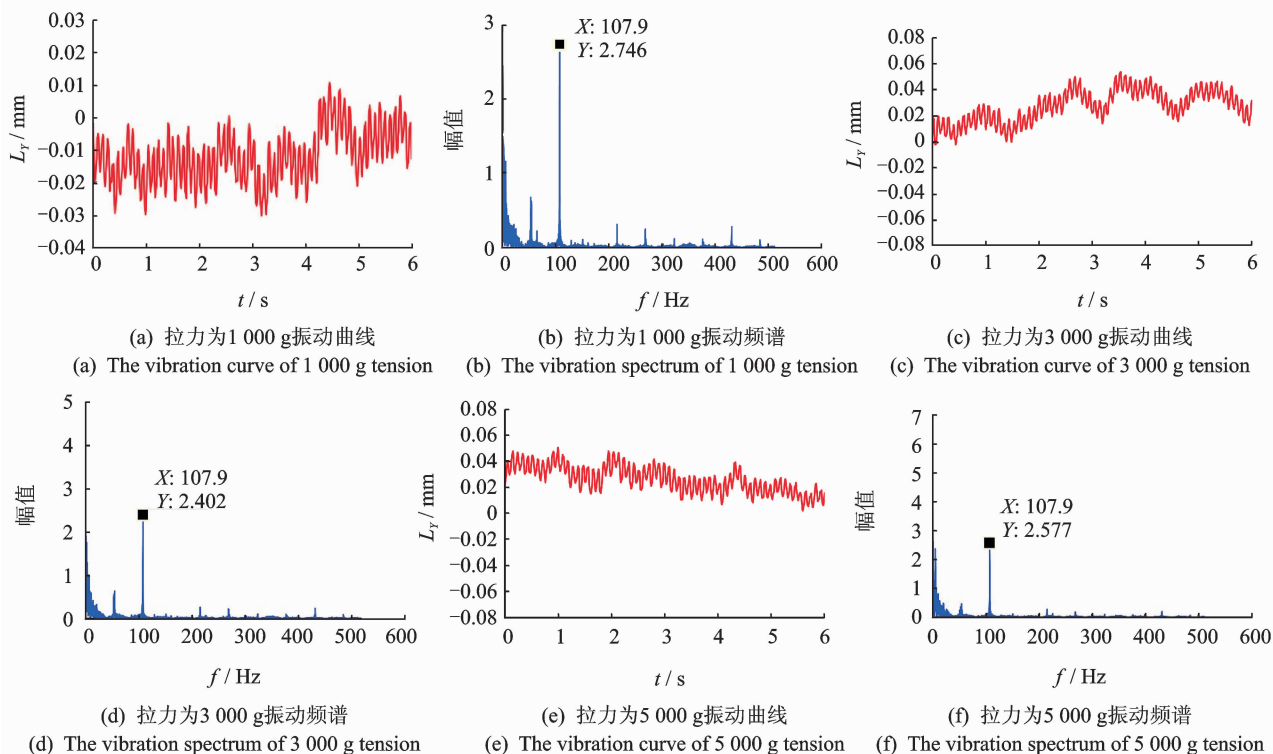


图5 机械臂Y方向振动曲线及其对应的频谱图

Fig. 5 The vibration curve of manipulator in the Y direction and the spectrum

动曲线并对其进行频谱分析。

由图5可知, 机械臂在不同拉力下, PSD检测到的Y方向的振动曲线都在平衡位置附近。柔性臂振动时, 振动特性主要由低阶模态决定。根据图5(b), (d), (f)可知, 机械臂一阶模态频率约为108 Hz, 振动能量在该频率处最大, 而且不同拉力下对应的振动幅值分别为2.764, 2.402, 2.577。从图5(a), (c), (e)可以看出, 拉力分别为1 000, 3 000, 5 000 g时对应Y方向的振动位移范围分别为 $-0.03 \sim 0.01$ mm, $0 \sim 0.04$ mm, $0 \sim 0.05$ mm, 其随着拉力的增加逐渐变大。由此可知, 随着机械臂臂杆刚度的增加, 一阶模态的振动幅值呈现减小趋势, 而Y方向的振动范围逐渐增加, 振动加强, 说明臂杆刚度增加, 低频成分减少, 高频成分增加, 可能产生高频振动。

2.4 PSD信号特征量提取

为了定量分析机械臂的振动情况, 需要对PSD信号进行特征量提取。PSD信号反映机械臂末端相对于机械臂前端的变形量, 因此PSD信号的幅度较好地反映了机械臂的振动情况。振动幅度 L 反映了机械臂在运动过程中振动的强弱程度。表2对机械臂不同拉力下的X和Y方向的振动幅度 L_X 和

L_Y 进行了分析(速度为100 r/min)。

表2 不同拉力下X和Y方向的振动幅度

Tab. 2 The vibration amplitude in the X and Y direction under different tension

拉力 /g	L_X /mm	L_Y /mm
0	$-0.185\ 9 \sim 0.163\ 9$	$-0.655\ 4 \sim -0.469\ 3$
1 000	$-0.060\ 3 \sim 0.092\ 8$	$-0.723\ 8 \sim -0.655\ 3$
2 000	$-0.110\ 4 \sim 0.098\ 7$	$-0.725\ 4 \sim -0.654\ 9$
3 000	$-0.290\ 9 \sim 0.237\ 5$	$-0.821\ 4 \sim -0.724\ 3$
4 000	$-0.298\ 9 \sim 0.244\ 9$	$-0.837\ 8 \sim -0.730\ 5$
5 000	$-0.211\ 6 \sim 0.174\ 0$	$-1.025\ 0 \sim -0.914\ 4$
6 000	$-0.157\ 4 \sim 0.130\ 9$	$-0.992\ 6 \sim -0.884\ 2$
7 000	$-0.142\ 4 \sim 0.113\ 4$	$-1.121\ 0 \sim -1.025\ 0$

实验结果表明, 不同拉力下机械臂在X和Y方向的振动情况不同。当拉力为1 000 g时, X方向振动幅度 L_X 的范围为 $-0.060\ 3 \sim 0.092\ 8$ mm, 说明机械臂末端X方向在0附近作小幅振动; 而Y方向振动幅度 L_Y 的范围为 $-0.723\ 8 \sim -0.655\ 3$ mm, 说明机械臂末端Y方向上在 -0.70 mm处作较大幅度的振动。当拉力为3 000 g时, L_X 和 L_Y 的变化范围为 $-0.290\ 9 \sim 0.237\ 5$ mm和 $-0.821\ 4 \sim -0.724\ 3$ mm, 分别在0.20 mm和 -0.70 mm附

近产生不同幅值的振动,而且与拉力为1 000 g情况相比, X 和 Y 方向的振动都有所增强。

2.5 振动特性评价

由于机械臂向着长度增加,质量较轻,精度较高的方向发展,因而机械臂的柔性必然导致机械臂的振动,影响机械臂的位置精度。机械臂完成不同的功能运动有不同的精度要求。当机械臂在运动过程中, X 和 Y 方向的振动幅度的变化范围在它所要求的精度范围内时,振动影响较小;当 X 和 Y 方向的振动幅度的变化范围在它所要求的精度范围外时,就要对机械臂的振动进行控制,以实现机械臂的精确定位。笔者研究机械臂处于空载情况下臂杆末端的振动特性。根据机械臂实际工况制定的精度要求, X 和 Y 方向的定位精度指标 L_X 和 L_Y 最大值分别为0.40 mm和1.00 mm,满足精度指标的最大误差不允许超过15%。

由表2可知,不同拉力下 X 方向的振动幅值 L_X 的最大值均在要求范围内。而拉力为5 000 g和7 000 g时 Y 方向的振动幅值 L_Y 的最大值超过要求范围,误差分别为2.5%和12.1%,小于15%,满足工作要求。其余拉力下 Y 方向的振动幅度范围均满足制定的精度指标。说明拉力对 Y 方向振动的影响大于 X 方向。

3 振动特性分析

柔性空间机械臂末端的振动不仅受到刚度变化的影响,也受到关节转速变化的影响。为研究关节转速变化对机械臂末端振动情况的影响,分别设置50,100,150,200,250,300,350,400,450,500 r/min共10组速度,每组速度条件下测得三组数据并取平均值,避免随机误差以提高实验的准确度。图6为拉力为3 000 g,速度分别为50,200,400 r/min时

机械臂末端位置坐标。

由图6对比分析可以发现:在拉力相同速度不同情况下,速度为50 r/min时振动位置点最为集中,其他速度下相对比较分散,而且 Y 方向的位置点始终为负,说明机械臂在运动过程中 Y 方向也始终向下偏离理想位置, X 方向在0附近往复振动。机械臂在运动过程中随着速度的增加, X 和 Y 方向的振动幅度 L_X 和 L_Y 范围都有所增加。将机械臂末端 X,Y 方向位置坐标变化范围列入表3中(拉力为3 000 g)。

表3 不同速度下 X 和 Y 方向的振动幅度
Tab.3 The vibration amplitude in the X and Y direction under different velocity

速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	L_X /mm	L_Y /mm
50	-0.106 5~0.094 4	-0.876 8~-0.809 4
100	-0.290 9~0.237 5	-0.821 4~-0.724 3
150	-0.305 7~0.191 9	-0.842 3~-0.770 3
200	-0.332 1~0.262 1	-0.895 3~-0.730 9
250	-0.335 9~0.310 6	-0.851 6~-0.709 5
300	-0.282 0~0.252 3	-0.825 7~-0.757 5
350	-0.377 7~0.273 4	-0.844 6~-0.747 1
400	-0.435 4~0.257 2	-0.902 2~-0.733 4
450	-0.297 8~0.298 1	-0.832 6~-0.739 8
500	-0.423 5~0.307 3	-0.891 8~-0.730 8

由表3可以看出,不同速度下机械臂在 X 和 Y 方向的振动情况不同,其中 X 方向的振动幅度呈现上升趋势。当速度为50 r/min时, L_X 的变化范围为-0.106 5~0.094 4 mm,说明机械臂末端 X 方向上在0附近作小幅振动;而 L_Y 的变化范围为-0.876 8~-0.809 4 mm,说明机械臂末端 Y 方向上在-0.80 mm处作较大幅度的振动。当速度为200 r/min时, L_X 和 L_Y 的变化范围为-0.332 1~0.262 1 mm和-0.895 3~-0.730 9 mm,分别在

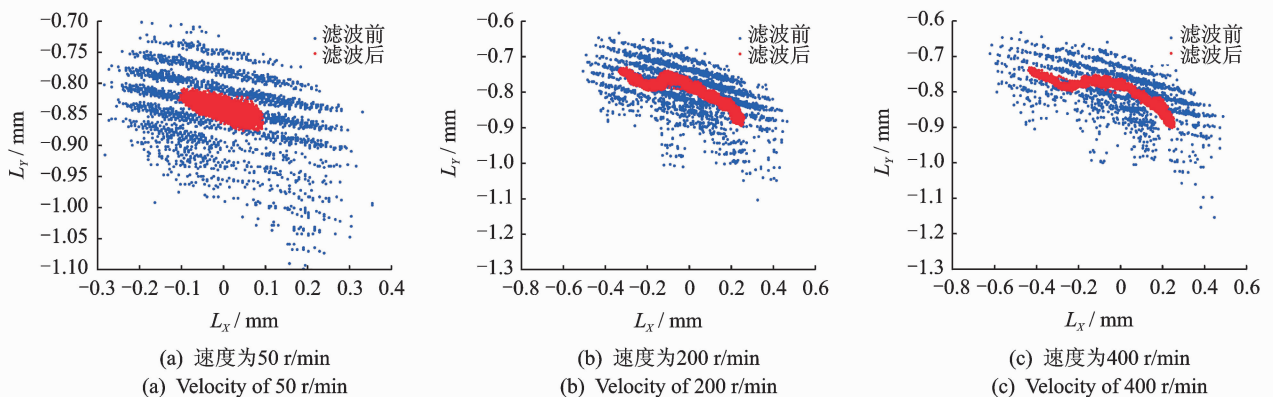


图6 不同速度下的PSD信号

Fig. 6 The PSD signal under different velocity

0.20 mm 和 -0.70 mm 附近产生不同幅值的振动,与速度为 50 r/min 情况相比, X 和 Y 方向的振动都有所增强。说明机械臂末端的振动不仅受臂杆刚度的影响,也受到机械臂关节转速的影响。

根据上述定位精度指标,不同速度下 Y 方向的振动幅值 L_Y 的最大值均在要求范围内。而速度为 400 r/min 和 500 r/min 时 Y 方向的振动幅值 L_Y 的最大值超过要求范围,误差分别为 8.85% 和 5.88%, 小于 15%, 满足工作要求。其他速度下 X 方向的振动幅度范围均满足制定的精度指标。说明速度对 X 方向振动的影响大于 Y 方向。

为进一步分析机械臂运动过程中关节转速对臂杆末端振动的影响,图 7 为对应速度下 X 方向的振动曲线并对其进行频谱分析。

由图 7 可知,机械臂在不同关节转速下,PSD 检测到的 X 方向的振动曲线都在平衡位置附近。柔性机械臂振动时,低频模态具有比较大的响应分量,其中以一阶模态振型为主。根据图 7(b), (d), (f) 可知,机械臂一阶模态频率约为 108 Hz, 振动能量主要集中在该频率处,而且不同速度下对应的振动幅值分别为 7.313, 4.876, 3.525。从图 7(a), (c), (e) 可以看出,速度分别为 50, 200, 400 r/min 时对应 X 方向的振动位移范围分别为 0~0.10 mm, -0.20~0 mm, -0.20~0.10 mm, 随着速度的增加逐渐变大。综上,随着机械臂运行速度的增加,一阶模态的振动幅值呈现减小趋势,而 X 方向的振动范围逐渐增加,振动加强,说明机械臂关节转速增加,低频成分减少,高频成分增加,甚至产生高频振动。

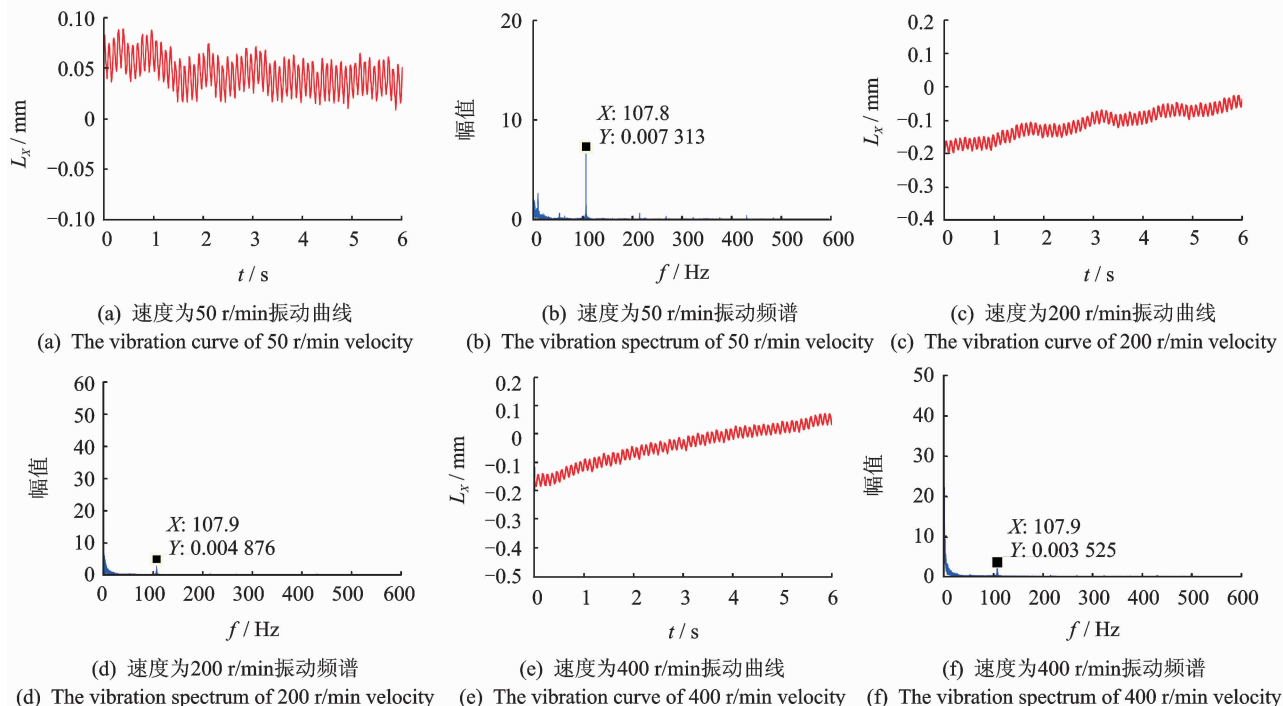


图 7 机械臂 X 方向振动曲线及其对应的频谱图

Fig. 7 The vibration curve of manipulator in the X direction and the spectrum

4 结束语

笔者利用 PSD 对柔性空间机械臂在运动过程中机械臂末端的振动进行了测试,并对实验数据进行了平均滤波处理,以排除噪声信号的干扰,保证实验数据的准确度。为分析机械臂臂杆刚度和机械臂关节转速变化对机械臂末端振动情况的影响,设计了考虑单一因素作用下的实验研究方案,即在拉力不变、速度变化或速度不变、拉力变化的情况下,分别测量机械臂末端的振动信号。研究结果表明,机

械臂末端的振动随着臂杆刚度和机械臂关节转速的增大逐渐增强。随着刚度和转速的增大,机械臂末端的振动幅度均呈现增大的趋势,而且 X 方向始终在 0 附近做小幅振动, Y 方向偏离平衡位置附近振动,且速度变化对机械臂末端的振动影响大于臂杆刚度。同时数据的不稳定性说明机械臂末端的振动不仅来自臂杆柔性,而且有来自关节柔性等非线性因素的影响。笔者采用 PSD 测试柔性空间机械臂的振动特性,设备简单,精度较高,有利于改善空间机械臂设计初期的动力学性能和运动精度,并提高空间机械臂在轨运行的稳定性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Wang Yifan, Gao Xin, Sun Hanxue, et al. Research on control method based on real-time operational reliability evaluation for space manipulator[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6:1-9.
- [2] Sabatini M, Gasbarri P, Monti R, et al. Vibration control of a flexible space manipulator during on orbit operations[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 73: 109-121.
- [3] Wang Yifan, Sun Hanxue, Chen Gang, et al. A precision compensation method for space manipulator trajectory planning based on particle filter[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 742: 485-490.
- [4] 邱志成, 谈大龙. 基于加速度反馈的柔性关节机械臂接触力控制[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(10):37-41. Qiu Zhicheng, Tan Dalong. On acceleration sensor-based feedback control for contact force of the flexible joint manipulator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(10): 37-41. (in Chinese)
- [5] 付建宁, 詹涵菁, 黄文康. 空间机械臂关节非线性摩擦建模及补偿[J]. *机械传动*, 2014, 38(12):28-33. Fu Jianing, Zhan Hanjing, Huang Wenkang. Modeling and compensation of non-linear friction for spatial robotic arm joint[J]. *Mechanical Transmission*, 2014, 38(12):28-33. (in Chinese)
- [6] Zhao Jieliang, Yan Shaoze, Wu Jianing. Analysis of parameter sensitivity of space manipulator with harmonic drive based on the revised response surface method[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 98:86-96.
- [7] Yang Tianfu, Yan Shaoze, Han Zengyao. Nonlinear model of space manipulator joint considering time-variant stiffness and backlash[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 341: 246-259.
- [8] 谷勇霞, 杨天夫, 郭峰. 考虑多间隙的帆板式展开机构动力学分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(1): 36-41. Gu Yongxia, Yang Tianfu, Guo Feng. Dynamic performance of a solar array deployable mechanism with multiple clearances[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(1): 36-41. (in Chinese)
- [9] Sakawa Y, Matsunob F, Ohsawac Y, et al. Modelling and vibration control of a flexible manipulator with three axes by using accelerometers[J]. *Journal of Advanced Robotics*, 1989, 4(2):119-137.
- [10] Li C J, Ulsoy A G. High-precision measurement of tool-tip displacement using strain gauges in precision flexible line boring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, 13(4): 531-546.
- [11] 李彦峰. 激光多普勒高速形变位移测量系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [12] 邱志成, 张祥通. 基于视觉的柔性振动测量及其控制[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(1):11-18. Qiu Zhicheng, Zhang Xiangtong. Vision-based vibration measurement and control of flexible structure[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(1):11-18. (in Chinese)
- [13] 霍成民, 杜少辉, 邱大明. 电子散斑测振技术在航空发动机上的应用[J]. *航空发动机*, 2008, 12, 34(4): 23-26. Huo Chengmin, Du Shaohui, Qiu Daming. Application of vibration measurement technology of electronic speckle on aeroengine[J]. *Aeroengine*, 2008, 34(4): 23-26. (in Chinese)
- [14] George N A, de Mul F F M, Qiu Qingjun, et al. Depth-kymography: high-speed calibrated 3D imaging of human vocal fold vibration dynamics[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(10): 2667.
- [15] Fu Yu, Shi Hongjian, Miao Hong. Vibration measurement of a miniature component by high-speed image-plane digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 1990-1997.
- [16] 王荣林, 倪文彬, 曲波. 基于 LabView 的激光振位移测试系统设计[J]. *中国制造业信息化*, 2012, 41(13):55-57. Wang Ronglin, Ni Wenbin, Qu Bo. Design of vibration displacement measuring system of laser radiation sensor based on LabView[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2012, 41(13): 55-57. (in Chinese)
- [17] 歹英杰, 汪伟, 陈海龙, 等. 基于双面阵 CCD 的动态目标振动测试研究[J]. *光学技术*, 2014, 40(5):470-475. Dai Yingjie, Wang Wei, Chen Hailong, et al. Research on vibration measurement of dynamic target based on double area array CCD[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(5):470-475. (in Chinese)
- [18] 季云峰. 结构动位移测试的计算机视觉方法实现[J]. *同济大学学报*, 2013, 41(11):1670-1674. Ji Yunfeng. Computer vision approach for structural dynamic displacement measurement [J]. *Journal of Tongji University*, 2013, 41(11): 1670-1674. (in Chinese)
- [19] 徐熙平, 张宁, 姜会林. 光电尺寸检测及应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 28-39.
- [20] 佐藤幸男. 信号处理入门[M]. 2版. 宋伟刚, 译. 北京: 科学出版社, 2000: 27-33.



第一作者简介:张玉玲,女,1989年6月生,硕士生。主要研究方向为机械设计及机械系统动力学、振动控制。
E-mail:shuibinya@163.com

通信作者简介:谷勇霞,女,1968年6月生,博士、副教授。主要研究方向为机械设计及机械系统动力学。
E-mail:guyx@th, btbu. edu. cn