

六维加速度传感器的结构模型及虚拟仪器设计

尤晶晶^{1,2}, 田苏辉¹, 周为¹, 王进¹, 殷子臻¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏南京 210037; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要:针对传统六维加速度传感器输出信号失真的问题,设计了一种可预紧的、12条支链的并联式六维加速度传感器模型。通过在外壳上增设副板、预紧螺钉、锁紧板,实现了所有支链的预紧和防松功能;虚拟试验结果显示,预紧后,支链的轴向力均为正压力,表明该方案是有效的。从解耦特点出发,确定弹性铰链的材料为65 Mn,最小直径为 $\varnothing 1.5$ mm;经计算,工作时受到的最大应力为388.31 MPa,最大变形量为0.009 mm。最后,设计了虚拟仪器,包括数据采集和数据处理两大模块,为传感器的后续试验提供了软件支撑。

关键词:结构模型;预紧装置;信号仿真;数字滤波;平滑处理

中图分类号:TP311

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.011

Design of Structure Model and Virtual Instrument of Six-axis Accelerometer

YOU Jingjing^{1,2}, TIAN Suhui¹, ZHOU Wei¹, WANG Jin¹, YIN Zizhen¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineer, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of distortion of the output signal of the traditional six-axis accelerometer, a 12-branched and preloaded six-axis accelerometer model with parallel mechanism is designed in this paper. By adding sub-plates on the shell, preloading screws, locking plates, the preload and anti-loose function of all the branches are realized. The results of the virtual test show that the axial forces of the branch are positive pressure after the pre-load, indicating that the scheme is effective. From the decoupling characteristics, the elastic hinge material is determined to be 65Mn and its minimum diameter is $\varnothing 1.5$ mm. By calculating, the maximum stress is 388.31 MPa, and the maximum deformation is 0.009 mm at operating. Finally, the design of the virtual instrument, including data acquisition module and data processing module, provides a software support for the follow-up test of the sensor.

Key words: structure model; preload device; signal simulation; digital filtering; smoothing processing

0 引言

六维加速度传感器在机器人、航天航空、虚拟现实、生物医疗等领域都有着广阔的应用前景^[1-3]。如机器人在抓取物体时,为了消除惯性力的影响,需要检测手爪上的六维加速度信息并反馈给控制系统。然而,由于多输入、多输出量的解耦难度与传感器的构型复杂度之间存在矛盾,目前,六维加速度传感器的研究还仅停留在原理性探索阶段,很多关键科学问题还有待解决。

Vladimir Chapsky 等提出了一种弹簧光电型六维加速度传感器^[4],孙治博等提出了一种基于Gough-Stewart 机构的六维加速度传感器^[5]。他们

的不足之处都是在解耦过程中忽略了质量块与载体系的相对运动,给六维加速度的解算精度带来很大的影响。考虑到台体型并联机构具有结构紧凑,动态特性好,各向同性好等^[6]优点,尤晶晶设计了一种9-SPS 台体型冗余并联机构^[7],并用其充当六维加速度传感器的弹性体构型,建立了系统的动力学模型。然而,该方案存在无法沿支链轴线方向施加初始预紧力的问题,当支链受较大拉力时,敏感元件的输出信号会失真,进而影响到最终的解耦精度。

因此,本文提出了一种十二支链预紧式并联六维加速度传感器的结构模型,解决了信号失真的问题,并进行了零件校核和虚拟验证。此外,在 Lab-

收稿日期:2017-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405237);江苏省高校自然科学基金资助项目(14KJB460020);江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金资助项目;南京林业大学大学生创新训练计划基金资助项目(201510298110X,2015sjcx051);江苏高校品牌专业建设工程基金资助项目(PPZY2015A062)

作者简介:尤晶晶(1985-),男,江苏南通人,讲师,硕士生导师,博士,主要从事并联机器人及六维加速度传感器方面的研究,已发表学术论文20余篇,获得授权发明专利5项。E-mail: youjingjing251010@126.com。通信作者:田苏辉(1993-),男,安徽阜阳人,主要从事过程装备与控制工程的研究。

VIEW^[8]平台上设计了六维加速度传感器的虚拟仪器,用于控制传感器的数据采集及处理。

1 结构模型设计

1.1 结构模型及工作原理

所设计的新型六维加速度传感器的机构简图及结构模型分别如图 1、2 所示,该结构支链的一端由二重复合铰链固联于质量块棱边的中点,另一端与外壳体上的副板相联。

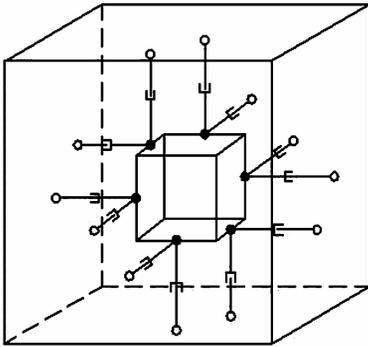


图 1 预紧式并联六维加速度传感器的机构简图

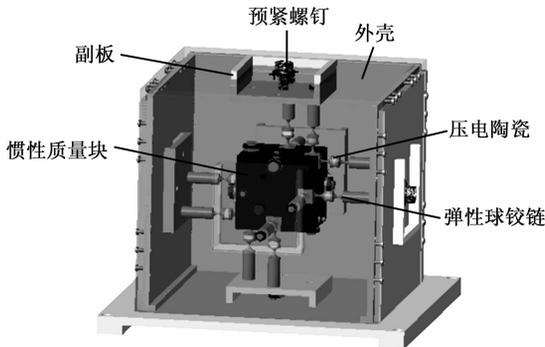


图 2 预紧式并联六维加速度传感器的结构模型

预紧式并联六维加速度传感器在实际工作时,外壳刚性固定在待测载体上一起做变速运动,在惯性力的作用下,质量块会拉伸或压缩支链,由于正压电效应,压电陶瓷的两端会产生电荷,且电荷量的大小和方向与待测加速度密切相关。

首先,测量出所有压电陶瓷两端的电荷量,并将其换算成支链的变形量;然后,运用并联机构的运动学理论,求得质量块相对于外壳的运动参量;最后,将质量块相对于外壳和外壳相对于惯性系的运动参量转化成质量块相对于惯性参考系的运动参量,并通过建立、求解系统的动力学方程解耦得到待测物体三维角加速度和三维线加速度。

1.2 重要零件设计

1.2.1 预紧及防松装置

为了保证压电陶瓷一直保持压缩的状态^[9],设计了预紧及防松装置,如图 3 所示。

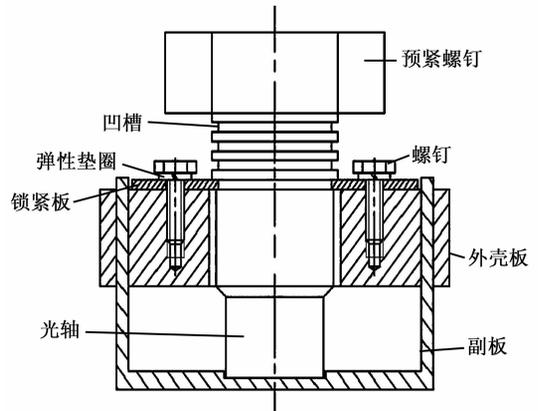


图 3 预紧及防松装置

传感器外壳中部设有螺纹孔,外壳与预紧螺钉通过螺纹连接,光轴与副板接触,凹槽的两侧设置有锁紧板,锁紧板的下表面与外壳通过螺钉固定连接并使用弹簧垫圈进行防松。通过拧紧或旋松预紧螺钉,使得副板对支链进行挤压或拉伸,可达到支链预紧的效果。将 2 块锁紧板中部拨进凹槽中,同时拧紧 4 个螺钉,可以达到支链防松的效果。预紧及防松装置的解锁状态如图 4 所示。

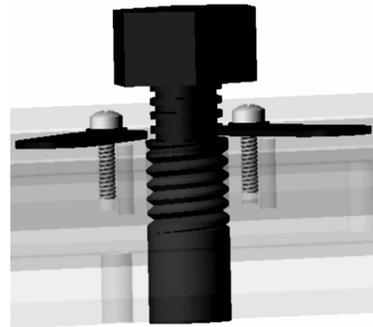


图 4 预紧及防松装置的解锁状态

1.2.2 复合铰链设计及校核

新型传感器的每条支链由两个弹性球铰链和一组压电陶瓷串联而成,且压电陶瓷和弹性球铰链之间用环氧树脂胶粘牢固定^[10],如图 5 所示。



图 5 六维加速度传感器的支链结构

预紧式并联六维加速度传感器的结构较复杂,受力过程中各零件的变形在所难免,故需要对弹性球铰链进行校核。考虑到六维加速度传感器的应用场合及解耦特点,弹性球铰链选材为 65Mn,材料的屈服强度 $\sigma_s = 785 \text{ MPa}$,最小直径为 $\varnothing 1.5 \text{ mm}$,故

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为弹性球铰链最大应力; F 为弹性球铰链所受压力; A 为弹性球铰链的最小横截面积; $[\sigma]$ 为许用应力; $n=2$ 为安全系数。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{785}{2} = 392.5 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

计算最大压力:

$$F_{\max} = A[\sigma] = \frac{785 \times 10^6 \times 3.14}{2} \times (0.75 \times 10^{-3})^2 = 693.253 \text{ 1(N)} \quad (3)$$

利用 Ansys 仿真软件,对弹性球铰链进行有限元分析。约束施加在支链杆上,力沿着杆的轴向方向,大小取上述理论计算的最大压力值。分析结果如图 6、7 所示。



图 6 弹性球铰链的等效应力

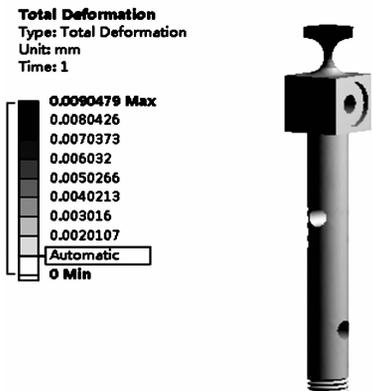


图 7 弹性球铰链的变形

结果表明,当施加最大轴向力时,弹性球铰链上

的最大应力为 388.31 MPa ,小于许用应力 392.5 MPa ,另外,弹性球铰链的最大变形量为 0.009 0 mm ,满足预紧式并联六维加速度传感器的工作和解耦要求^[11]。

2 虚拟样机算例验证

ADAMS 是美国 MDI 公司开发的虚拟样机分析软件,其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法^[12],具有计算精度高、通用性强等优点。在 ADAMS 中建立新型传感器的虚拟样机,如图 8 所示。其中,质量块的边长为 42 mm ,由密度公式求得质量块质量为 0.58 kg 。

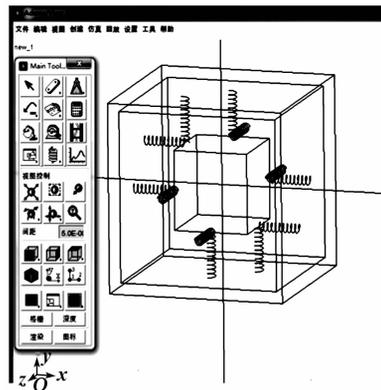


图 8 预紧式并联六维加速度传感器的虚拟样机

在外壳上施加六维驱动,使其沿 $(0.758 \text{ 1}, -0.379 \text{ 0}, -0.530 \text{ 7})$ 方向平移,同时沿 $(0.655 \text{ 4}, 0.491 \text{ 5}, -0.573 \text{ 5})$ 方向旋转;线运动函数和角运动函数分别为: $T=20 \times \cos(10t) - 20, \varphi=0.523 \text{ 6} \times \cos(10t) - 0.523 \text{ 6}$,其中, t 为时间。

设置采样步长为 1 000 ,仿真终止时间为 2 s ,仿真结束后,测量 12 条支链的轴向力。不失一般性,十二条支链的预紧力大小分别取: $10 \text{ N}, 2 \text{ N}, 3 \text{ N}, 1 \text{ N}, 2 \text{ N}, 3 \text{ N}, 2 \text{ N}, 9 \text{ N}, 2 \text{ N}, 2 \text{ N}, 4 \text{ N}, 1 \text{ N}$ 。未施加预紧力和施加预紧力的 ADAMS 计算结果图如图 9、10 所示。

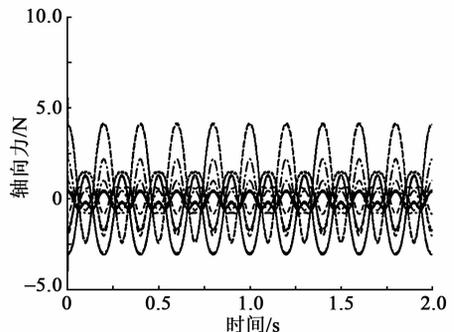


图 9 未施加预紧力时 ADAMS 计算结果图

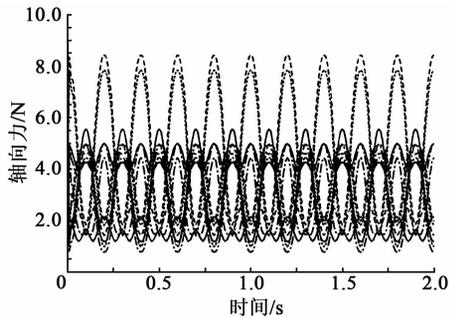


图 10 施加预紧力时 ADAMS 计算结果图
结果显示,所有支链的轴向力均保持为正压力,

表明通过施加初始预紧力以改善六维加速度传感器输出信号失真现象的方案是有效可行的。

3 虚拟仪器设计

在 LabVIEW 平台上设计六维加速度传感器的数据采集模块,如图 11 所示。设计数字滤波模块,如图 12 所示。其中,滤波类型共有低通(lowpass)、高通(highpass)、带通(bandpass)、带阻(bandstop)4种模式可供选择。程序框图左上部分是整个系统程序的核心控制部分,可根据需求设置采样频率、截止频率和阶数的数值。

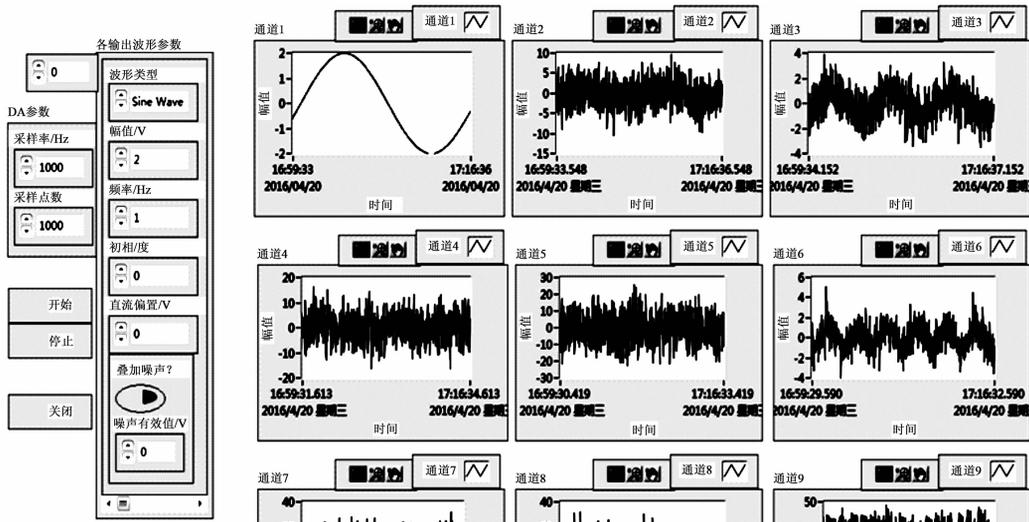


图 11 六维加速度传感器的数据采集模块

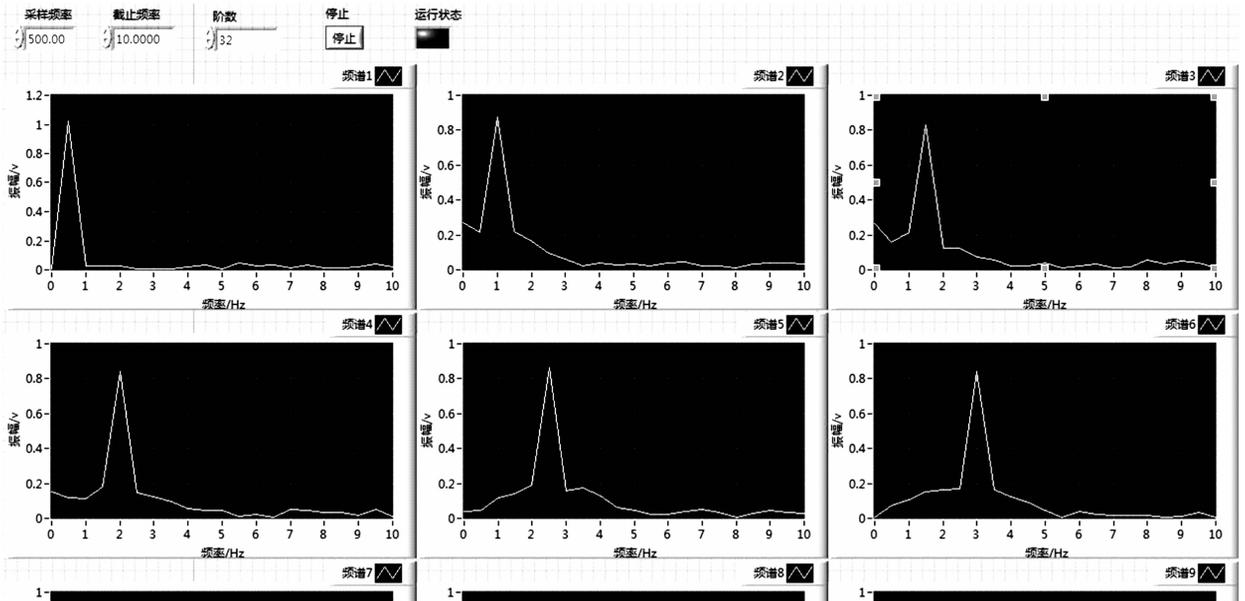


图 12 六维加速度传感器的数字滤波模块

在图像的获取和传输过程中原始图像会受到各种噪声的干扰,使图像质量下降^[13]。为了改善图像质量,要对图像进行平滑处理,进而减少或消除噪声对数据分析处理的影响。这里运用 MATLAB 中的

smooth 函数处理滤波后存储的数据。试验原始信号、滤波后信号、平滑处理后信号曲线分别如图13~15 所示。

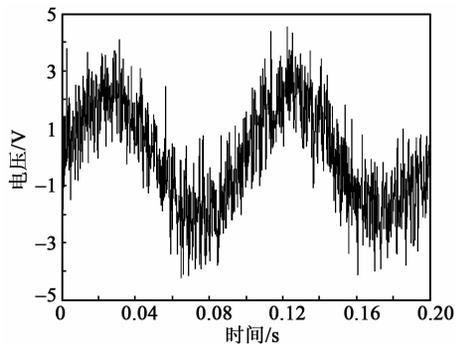


图 13 原始信号曲线图

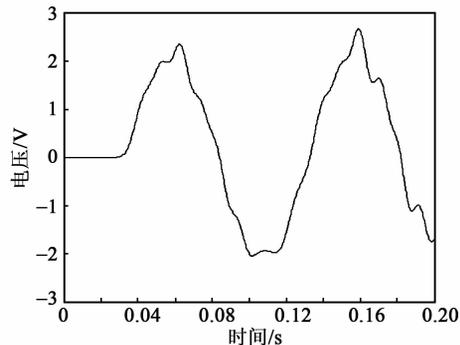


图 14 数字滤波后信号曲线图

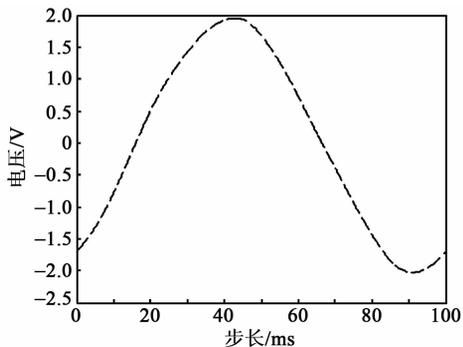


图 15 平滑处理后信号曲线图

4 结束语

从六维加速度传感器的应用场合及工作特点出发,设计了一种新的构型,与传统构型相比,增加了预紧、防松装置以及二重复合弹性球铰链。复合铰链上的最大应力为 388.31 MPa,小于许用应力;最大变形量为 0.009 mm,满足解耦算法的要求。在 ADAMS 中进行了虚拟试验,结果显示,通过在支链上施加初始预紧力,敏感元件的输出轴向力始终为正压力,表明本文的方案解决了传统方法中信号失真的不足。最后,通过设计六维加速度传感器的虚拟仪器,实现了试验信号的采集和预处理功能,为后续实物样机的试验提供了保障。

参考文献:

[1] AHMED M, ABDUL-WAHED. Vibratory ring six-axis motionsensor [J]. *Micro-system Technologies*,

2015,21 (10):2133-2144.

- [2] BLAKE A P, OLOUGHLIN C D, MORTON J P, et al. Insitu measurement of the dynamic penetration of free-fall projectiles in soft soils using a low-cost inertial measurement unit[J]. *Geot-echnical Testing Journal*, 2016, 39(2):235-251.
- [3] IBARRA M N, ESCAMILLA P J, RAMIREZ J M. Attitude estimation using a Neuro-Fuzzy tuning based adaptive Kalman filter [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2015, 29(2):479-488.
- [4] CHAPSKY V, PORTMAN V T, SANDLER B Z. Single-mass 6-DOF isotropic accelerometer with segmented PSD sensors[J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2007, 135(2):558-569.
- [5] 孙治博,刘晋浩,于春战. 一种六维加速度传感器的测量属性分析[J]. *仪器仪表学*, 2016, 37(2):467-473. SUN Zhibo, LIU Jinhao, YU Chunzhan. Research on measuring characteristic for a six-axis accelerometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(2):467-473.
- [6] WEI Feng, WEI Shimin, ZHANG Ying, et al. Al-ggebraic solution for the forward displacement analysis of the general 6-6 Stewart mechanism[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1):56-62.
- [7] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛. 并联式六维加速度传感器的哈密顿动力学研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(15):9-17. YOU Jingjing, LI Chenggang, WU Hongtao. Research on hamiltonian dynamics of parallel type six-axis accelerometer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15):9-17.
- [8] 王宁,尤晶晶,李成刚. 基于 LabVIEW 的六维加速度传感器测量系统设计[J]. *机电一体化*, 2011, 11(1):76-79. WANG Ning, YOU Jingjing, LI Chenggang. Design of six-axis acceleration sensor testing system based on LabVIEW [J]. *Mechatronics*, 2011, 11(1):76-79.
- [9] 刘丽欢. 大量程柔性铰并联六维力传感器结构设计[D]. 河北:燕山大学,2009.
- [10] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛. 六维加速度传感器的性能建模及结构优化[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(3):380-389. YOU Jingjing, LI Chenggang, WU Hongtao. Performance modeling and structure optimizing of six-axis accelerometer[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(3):380-389.
- [11] 尤晶晶. 基于冗余并联机构的压电式六维加速度传感器研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [12] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛. 基于并联机构的六维加速度传感器的方案设计及建模研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(6):658-666. YOU Jingjing, LI Chenggang, WU Hongtao. Research on scheme design and modeling of six-axis accelerometer based on parallel mechanism[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(6):658-666.
- [13] 孙苗钟. 基于 MATLAB 的振动信号平滑处理方法[J]. *电子测量技术*, 2007, 30(6):55-57. SUN Miaozhong. Smooth processing methods of vibration signal based on MATLAB[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(6):55-57.