

文章编号 1004-924X(2013)10-2627-12

并联式六维加速度传感器的参数辨识

尤晶晶^{1,2*}, 李成刚^{1,2}, 吴洪涛^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

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:针对六维加速度传感器的输入、输出量较多,且其动力学方程的解耦参数难以辨识的问题,提出了“四步法”对并联式六维加速度传感器的 25 个解耦参数实施分组辨识。设计并加工了基于双曲柄滑块机构的标定平台,为参数辨识提供外部激励;在 LabVIEW 平台上开发了虚拟仪器,为参数辨识提供软件支持。在静态情况下对预处理后的采集数据求均值得到“零值漂移”,完成第一组参数辨识;将传感器安装在标定平台上做 1~2 Hz 的纯线性运动,使动力学模型简化成关于“刻度质量比”的线性代数方程,运用最小二乘法完成第二组参数的辨识;做 1~2 Hz 的纯角运动,将动力学模型简化成关于“惯性质量比”的线性代数方程,完成第三组参数的辨识;做 4~5 Hz 的纯线性运动,通过关于“刚度质量比”的一维搜索完成第四组参数的辨识。试验结果表明:运用辨识后的参数对六维加速度实施解耦,最大误差为 7.479%,比参数辨识前的解耦误差降低了 1 个数量级。结果验证了基于“四步法”实现并联式六维加速度传感器的参数辨识是有效、可行的。

关键词:六维加速度传感器;参数辨识;标定平台;虚拟仪器;最小二乘法

中图分类号:TH825;TP212.17 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2627

Parameter identification of parallel type six-axis accelerometer

YOU Jing-jing^{1,2}, LI Cheng-gang^{1,2}, WU Hong-tao^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

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

* Corresponding author, E-mail: youjingjing251010@126.com

Abstract: The parameter identification of a six-axis accelerometer is a difficult problem due to its higher input and output volumes and linear dynamic equation. According to this, a four-step method was proposed to identify the 25 decoupling parameters of a parallel type six-axis accelerometer. A calibration platform based on double slider-crank mechanisms was designed and processed to provide the external stimulation and a virtual instrument based on LabVIEW was developed to provide the software support for the parameter identification. The first sets of parameters were identified by averaging pre-treatment data in static state. By putting the sensor on the platform to do a pure line movement with the frequency of 1–2 Hz, the dynamic equations were simplified to linear algebraic equations, then the second set of parameters were identified by using the least square method. Similarly, the third set

收稿日期:2013-05-07;修订日期:2013-06-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175263);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(No. CX-LX11-0176);江苏省高校优势学科建设工程资助项目

of parameters were identified when the sensor did a pure angular movement with the frequency of 1—2 Hz. The fourth set of parameters were identified by one-dimensional searching about stiffness to mass ratio when the sensor did the pure line movement with the frequency of 4—5 Hz. Experimental results indicate that the maximum relative error is 7.479% after using the identified parameters to decouple the six-axis acceleration, which reduces a magnitude compared to that before parameter identification. Above results verify that the proposed four-step method is correct and feasible.

Key words: six-axis accelerometer; parameter identification; calibration platform; virtual instrument; least square method

1 引言

视觉系统是移动机器人的一个重要组成部分,用于执行识别、导航、跟踪等基本功能,精确获取环境信息是机器人实现自主决策的前提。然而,视觉系统所获影像容易受到外界抖动的干扰而产生模糊,势必会影响到机器人后续的决策。因此,有必要检测镜头与物体之间的相对运动,将运动信息反馈给控制系统并通过执行器对视觉系统实施抖动补偿^[1]。移动机器人一般做 6 自由度的空间运动,因此六维加速度传感器无疑是最适合于视觉系统抖动检测的仪器,然而目前国内外该类传感器的研究还处于探索阶段,与之相关的技术问题还没有很好地解决^[2-4],这间接制约了移动机器人的智能化程度。此外,六维加速度传感器在机器人动力学控制、生物医疗等领域都有着广泛的应用前景^[5-6]。

六维加速度传感器的研究受到了越来越多的关注。文献[7]提出了一种基于 6 只共面的压电式单轴加速度计的六维加速度传感器,在忽略载体角速度的前提下给出了加速度解耦算法。考虑到并联机构具有精度高、承载能力强、结构紧凑等优点^[8-9],本文作者提出了一种基于 9-SPS 并联机构的六维加速度传感器设计方案,通过引入辅助角速度并运用改进的欧拉算法求解系统的牛顿-欧拉方程,实现了六维加速度的完全解耦^[10]。上述解耦工作需要两个前提条件:一是采集到敏感元件的输出电压数据,二是预先辨识出传感器实物样机的解耦参数。前者在文献[11]中进行了研究,本文的工作主要是围绕后者展开的,即六维加速度传感器的参数辨识。

针对单输入单输出类传感器的参数辨识,已经有学者对此进行过研究^[12];然而针对六维加速

度传感器这类多输入多输出传感器的参数辨识,能够检索到的相关文献还很少,作者认为主要难点有两个:一是六维加速度传感器系统的动力学方程强非线性耦合,而且系统的解耦参数较多,直接将输入、输出量代入动力学方程得到的多元高次代数方程组难以求解;二是尽管不少学者已经对驱动平台展开过研究,且取得了喜人的成果^[13-16],但由于六维加速度传感器自身结构以及工作原理的特殊性^[10],现有平台还不能被直接用来进行六维加速度传感器的参数辨识。针对第一个难点,本文在进一步深入分析加速度解耦算法的基础上提出了一种适用于并联式六维加速度传感器参数辨识的“四步法”,也即通过 4 个步骤对解耦参数进行分组辨识;针对第二个难点,本文在分析了传感器参数辨识数学模型的基础上将 2 个曲柄滑块机构通过齿轮齿条机构巧妙地组合在一起,设计并加工了基于双曲柄滑块机构的六维加速度传感器标定平台。为了验证本文所提出的参数辨识方法的有效性,文章将并联式六维加速度传感器实物样机安装在上述标定平台上进行标定试验,并对由辨识出的解耦参数计算得到的加速度与标准传感器测量得到的加速度进行了对比。

2 传感器参数辨识的数学模型

2.1 加速度解耦算法

用一种特殊构型的具有 9 条 SPS 支链的并联机构充当弹性体结构,作为并联机构移动副的圆柱状压电陶瓷同时充当敏感元件,这样就构成了一种并联式六维加速度传感器^[10],其三维模型和实物样机分别如图 1、图 2 所示。

每条支链由一个压电陶瓷和 2 个弹性球铰链^[17]串联而成,如图 3 所示,考虑到压电陶瓷质量较轻,支链可近似视作二力杆。将压电陶瓷的

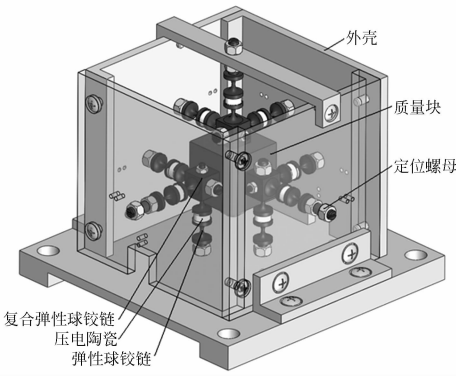


图 1 六维加速度传感器的三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of six-axis accelerometer

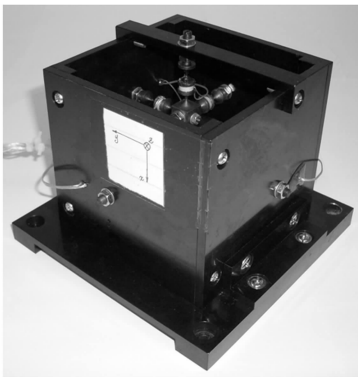


图 2 六维加速度传感器的实物样机

Fig. 2 Physical prototype of six-axis accelerometer

实测电压值换算成作用在支链上的轴向力需要放大一个确定的倍数^[10], 然而, 由于压电陶瓷的压电系数以及电荷放大器的转换比例会受温度等环境因素的影响, 上述“确定的倍数”在不同的使用场合是不确定的。因此, 传感器实际测量过程中必须在实测轴向力的基础之上乘以相应的刻度因子, 如式(1)所示。

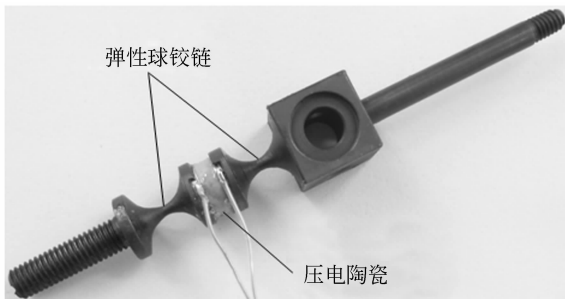


图 3 六维加速度传感器的支链

Fig. 3 Branched chain of six-axis accelerometer

$$f_i = s_i \tilde{f}_i \quad (i=1 \sim 9), \quad (1)$$

式中: f_i, \tilde{f}_i 分别为第 i 条支链轴向力的真实值和去除零值漂移后的实测值; s_i 为第 i 条支链对应的刻度因子。

在忽略支链阻尼力以及将 9 条支链的刚度系数都近似视作相等的前提下, 支链的长度与其轴向力之间满足关系式(2)。

$$l_i = L + f_i/k = L + (f_i/m)/(k/m), \quad (2)$$

式中: l_i, L 分别为支链的实际长度和初始长度; k 为支链的等效刚度系数; m 为质量块的质量。

分别在质量块、外壳以及参考地面上固结坐标系 $\{2\}, \{1\}, \{0\}$, 以便于描述它们三者之间的相对运动关系。初始状态下 3 个坐标系的原点重合, 位于质量块的质心。运用牛顿-欧拉法, 建立六维加速度传感器系统的动力学方程, 如式(3)、(4)所示。

$${}^0_1 \mathbf{a} + {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{a} + {}^0_1 \dot{\boldsymbol{\omega}} \times {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{r} + {}^0_1 \boldsymbol{\omega} \times ({}^0_1 \boldsymbol{\omega} \times {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{r}) + 2 {}^0_1 \boldsymbol{\omega} \times {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{v} - \mathbf{g} = {}^0_1 \mathbf{R} \left(\sum_{i=1}^9 (f_i/m)^1 \mathbf{e}_i \right), \quad (3)$$

$${}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{R}^2 \mathbf{I} (\frac{1}{2} \mathbf{R})^T ({}^0_1 \mathbf{R})^T ({}^0_1 \dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \boldsymbol{\varepsilon} + {}^0_1 \boldsymbol{\omega} \times {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \boldsymbol{\omega}) + ({}^0_1 \boldsymbol{\omega} + {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \boldsymbol{\omega}) \times ({}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \mathbf{R}^2 \mathbf{I} (\frac{1}{2} \mathbf{R})^T ({}^0_1 \mathbf{R})^T ({}^0_1 \boldsymbol{\omega} + {}^0_1 \mathbf{R}_2^1 \boldsymbol{\omega})) = {}^0_1 \mathbf{R} \left(\sum_{i=1}^9 f_i^1 \mathbf{t}_i \times {}^1 \mathbf{e}_i \right), \quad (4)$$

式中: ${}^1_2 \mathbf{r}, {}^1_2 \mathbf{R}, {}^1_2 \mathbf{v}, {}^1_2 \boldsymbol{\omega}, {}^1_2 \mathbf{a}, {}^1_2 \boldsymbol{\varepsilon}$ 分别表示坐标系 $\{2\}$ 相对于 $\{1\}$ 的位置矢量、姿态矩阵、线速度矢量、角速度矢量、线加速度矢量和角加速度矢量; ${}^0_1 \mathbf{R}, {}^0_1 \boldsymbol{\omega}, {}^0_1 \mathbf{a}, {}^0_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}$ 分别表示坐标系 $\{1\}$ 相对于 $\{0\}$ 的姿态矩阵、角速度矢量、线加速度矢量和角加速度矢量, 其中后 2 个矢量组成了传感器待测的六维加速度; ${}^1 \mathbf{e}_i, {}^1 \mathbf{t}_i$ 分别表示第 i 条支链的方向矢量和轴向力作用点对质量块质心的矢径在坐标系 $\{1\}$ 中的投影, 这两组矢量在初始时刻的元素构成分别如式(5)、式(6)所示; ${}^2 \mathbf{I}$ 为在坐标系 $\{2\}$ 中描述的质量块的惯性张量, 是由 9 个元素组成的二阶对称张量, 其中仅 6 个元素独立; \mathbf{g} 为重力加速度。上述矢量或矩阵中左上标为“1”的量, 作者在文献[10]中已经详细推导过, 均是关于 l_i 的解析表达式, 这里不再重复; 正上标为“ \cdot ”的量表示对应矢量或矩阵对时间的一阶导数。

$$({}^1 \mathbf{e}_1)^0 ({}^1 \mathbf{e}_2)^0 \dots ({}^1 \mathbf{e}_9)^0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} ({}^1t_1)^0 ({}^1t_2)^0 \cdots ({}^1t_9)^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -n & -n & -n \\ 0 & 0 & 0 & -n & -n & -n & 0 & 0 & 0 \\ -n & -n & -n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: n 表示质量块的半边长。

将角速度矢量 ${}^0\boldsymbol{\omega}$ 投影在坐标系 $\{1\}$ 中,得到辅助角速度矢量 ${}^0\boldsymbol{\omega}^*$,显然它们之间满足关系式(7)。

$${}^0\boldsymbol{\omega} = {}^0\mathbf{R}^0 \boldsymbol{\omega}^*. \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)中,并将等号两边同时除以 m ,整理后可得:

$${}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^* = (\mathbf{I}^*)^{-1} \left(\sum_{i=1}^9 (f_i/m) {}^1t_i \times {}^1\mathbf{e}_i - ({}^0\boldsymbol{\omega}^* + {}^1\boldsymbol{\omega}) \times (\mathbf{I}^* ({}^0\boldsymbol{\omega}^* + {}^1\boldsymbol{\omega})) \right) - {}^1\boldsymbol{\varepsilon} - {}^0\boldsymbol{\omega}^* \times {}^1\boldsymbol{\omega}, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{I}^* = \frac{1}{2}\mathbf{R}^0(\mathbf{I}/m)(\frac{1}{2}\mathbf{R})^T$ 。

另外,辅助角速度矢量与姿态矩阵之间还满足关系式:

$$\dot{{}^0\mathbf{R}} = \overbrace{{}^0\mathbf{R}^0 \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{R}^0}^{\cdot} \mathbf{R}, \quad (9)$$

式中: \cdot 表示与矢量相对应的反对称矩阵。

这样,式(8)和式(9)就构成了系统动力学模型中的 2 个一阶常微分方程组,欧拉算法、亚当斯算法、龙格库塔算法等递推方法均可对此实施解算。将数值计算结果代入式(3)、(7)、(8)中,即可得到 ${}^0\mathbf{a}$ 和 ${}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 在各采样时刻的数值,实现六维加速度的完全解耦。

2.2 参数辨识“四步法”

六维加速度传感器在实际工作时,9个压电陶瓷两极均需通过导线连接前置放大器的输入端进行信号放大和阻抗变换处理,前置放大器的9个输出端再分别连接数据采集卡的9个通道进行模数转换。由于前置放大器、数据采集卡等仪器设备内的电容、电阻这类电子元器件容易受到温、湿度等环境因素的干扰,9个通道的输出电压中不可避免地存在零值漂移,直接影响到后续六维加速度的解耦运算,甚至会造成加速度的严重失真。因此,为了提高传感器的测量精度,在解耦算法中必须考虑输出电压的零值漂移,将其视为六维加速度传感器的第一组解耦参数,它与去除零值漂移后支链轴向力的实测值之间满足如下关系:

$$\tilde{f}_i = c_i(u_i - d_i), \quad (10)$$

式中: c_i 为第 i 个压电陶瓷输入轴向力与输出电压之间的比例系数^[10]; u_i 为数据采集卡第 i 个通道采集到的电压值; d_i 为第一组解耦参数,也即第 i 个通道输出电压的“零值漂移”。

系统解耦方程式(3)等号右边存在一组解耦参数,结合式(1)和式(10),可知其满足如下关系:

$$f_i/m = (s_i/m)c_i(u_i - d_i). \quad (11)$$

将式(11)中的参数 s_i/m 视为六维加速度传感器的第二组解耦参数,并将其命名为“刻度质量比”。系统解耦方程式(8)等号右边除了存在上述第二组解耦参数外,还存在参数 I/m ,将其视为第三组解耦参数,并命名为“惯性质量比”。考虑到文中左上标为“1”的量均是关于 l_i 的解析表达式,结合式(2)可知, l_i 中还存在参数 k/m ,将其视为第四组解耦参数,并命名为“刚度质量比”。另外,将包括支链初始长度、质量块边长在内的结构“尺寸参数”视为第五组解耦参数。根据 2.1 节构建的解耦算法可知,只有预先确定了这五组解耦参数,才能够将数据采集卡 9 个通道采集到的电压值换算成各采样时刻待测加速度的 6 个分量值。

第五组解耦参数是关于传感器机械结构的几何量,一般不会随着传感器的工作时间和工作场合的变化而变化,且在加工阶段通过选择合适的公差和工艺能够将真实尺寸和设计尺寸控制在一定的误差范围内。然而,其它四组解耦参数会随着环境等因素的变化而变化,也即在不同的时间、不同的场合表现出不同的数值,另外,由于存在装配误差、材料性能变化等不确定的因素,这四组参数的设计值和真实值之间的偏差很难通过提高加工精度等人为措施来保证。综上考虑,本文仅对前四组解耦参数进行辨识,而第五组参数的真实值直接用设计值($L=25.5$ mm, $n=21$ mm)来代替。

在静态条件下,也即传感器外壳的运动参量均为 0 时,综合式(1)、(3)、(4)、(10)并且考虑到压电陶瓷不具备静态效应,可知数据采集卡 9 个通道的输出电压理论值均为 0。然而,由于存在零值漂移,实际输出电压值并非零,此电压值正是传感器实物样机的第一组解耦参数。实际辨识过程中,对静态下长时间采集到的电压值进行适当地统计处理,并将统计值作为对应通道的零值漂移量,这样就实现了第一组解耦参数的辨识。

前文提到了左上标为“1”的量,它们是用来描

述传感器中质量块相对于外壳运动的参量。进一步分析可知,这些参量的产生原因是外壳做非匀速运动导致质量块在惯性力和惯性力矩的作用下相对于外壳产生了运动,而且参量大小与外壳运动位移的幅值和频率有关。当幅值确定时,参量数值会随着频率的减小而减小。综合考虑敏感元件的性能等因素,本文假设当相对线加速度、相对角加速度分别小于 0.01 mm/s^2 、 $0.01(^{\circ})/\text{s}^2$ 这 2 个小量时,质量块相对于外壳的运动参量可以近似视为 0。将上述两个小量统称为“阈值”,所对应的运动频率分别称为“线阈频”和“角阈频”。在参数辨识之前,确定某一运动位移幅值所对应的“线阈频”和“角阈频”,还只能首先借助于软件仿真技术获得其估算值,进而根据经验做适当调整,最后通过试验对此进行校验。

当传感器外壳做线阈频以下的纯线运动时,系统动力学方程式(3)可以简化成:

$${}^0_1 \mathbf{a} = \sum_{i=1}^9 (s_i/m) \tilde{f}_i ({}^1 \mathbf{e}_i)^0, \quad (12)$$

式中:

$$(\tilde{f}|_{\text{line}}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\tilde{f}_3|_1 & 0 & 0 & -\tilde{f}_6|_1 & 0 & 0 & \tilde{f}_9|_1 \\ 0 & -\tilde{f}_2|_1 & 0 & 0 & \tilde{f}_5|_1 & 0 & 0 & -\tilde{f}_8|_1 & 0 \\ \tilde{f}_1|_1 & 0 & 0 & -\tilde{f}_4|_1 & 0 & 0 & -\tilde{f}_7|_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tilde{f}_3|_2 & 0 & 0 & -\tilde{f}_6|_2 & 0 & 0 & \tilde{f}_9|_2 \\ 0 & -\tilde{f}_2|_2 & 0 & 0 & \tilde{f}_5|_2 & 0 & 0 & -\tilde{f}_8|_2 & 0 \\ \tilde{f}_1|_2 & 0 & 0 & -\tilde{f}_4|_2 & 0 & 0 & -\tilde{f}_7|_2 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -\tilde{f}_3|_{\lambda} & 0 & 0 & -\tilde{f}_6|_{\lambda} & 0 & 0 & \tilde{f}_9|_{\lambda} \\ 0 & -\tilde{f}_2|_{\lambda} & 0 & 0 & \tilde{f}_5|_{\lambda} & 0 & 0 & -\tilde{f}_8|_{\lambda} & 0 \\ \tilde{f}_1|_{\lambda} & 0 & 0 & -\tilde{f}_4|_{\lambda} & 0 & 0 & -\tilde{f}_7|_{\lambda} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$\lambda(>3)$ 表示标定试验的次数。

基于最小二乘法,给出方程(13)的封闭解,如式(14)所示,这样就实现了第二组解耦参数的辨识。

$$\begin{pmatrix} s_1/m \\ s_2/m \\ \vdots \\ s_9/m \end{pmatrix} = (\tilde{f}|_{\text{line}})^+ \begin{pmatrix} {}^0_1 \mathbf{a}|_1 \\ {}^0_1 \mathbf{a}|_2 \\ \vdots \\ {}^0_1 \mathbf{a}|_{\lambda} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

式中: $(\cdot)^+$ 表示矩阵的加号逆。

当传感器外壳做角阈频以下的纯角运动时,

由式(12)可知,理论上当确定了传感器外壳的 3 组线性无关的线加速度矢量 ${}^0_1 \mathbf{a}|_1$ 、 ${}^0_1 \mathbf{a}|_2$ 、 ${}^0_1 \mathbf{a}|_3$ 以及对应的去除零值漂移后支链轴向力的实测值 $\tilde{f}_i|_1$ 、 $\tilde{f}_i|_2$ 、 $\tilde{f}_i|_3$ 之后,可以通过求解 9 元 1 次方程组得到传感器系统的 9 个“刻度质量比”。

实际标定试验时,将全部性能参数都已知的标准传感器和待标定传感器同时安装在同一个标定平台上感应相同的运动,并将前者的测量值作为后者的输入值。考虑到式(12)中输入、输出量都不可避免地存在误差,为了提高参数辨识精度,标定试验的次数必须多于 3 次。将式(5)代入式(12)中,为了更加清晰地描述待标定传感器的输入值、输出值以及解耦参数三者之间的数学关系,将其整理成矩阵形式:

$$(\tilde{f}|_{\text{line}}) \begin{pmatrix} s_1/m \\ s_2/m \\ \vdots \\ s_9/m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0_1 \mathbf{a}|_1 \\ {}^0_1 \mathbf{a}|_2 \\ \vdots \\ {}^0_1 \mathbf{a}|_{\lambda} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

系统动力学方程式(8)可以简化成:

$$({}^2 \mathbf{I}/m) {}^0_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}^* + {}^0_1 \boldsymbol{\omega}^* \times ({}^2 \mathbf{I}/m) {}^0_1 \boldsymbol{\omega}^* = \sum_{i=1}^9 (s_i/m) \tilde{f}_i ({}^1 \mathbf{t}_i)^0 \times ({}^1 \mathbf{e}_i)^0, \quad (15)$$

其中:矩阵 ${}^2 \mathbf{I}/m$ 以及矢量 ${}^0_1 \boldsymbol{\omega}^*$ 的元素构成分别如式(16)、(17)所示。

$${}^2 \mathbf{I}/m = \begin{pmatrix} ({}^2 \mathbf{I}/m)_1 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_4 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_5 \\ ({}^2 \mathbf{I}/m)_4 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_2 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_6 \\ ({}^2 \mathbf{I}/m)_5 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_6 & ({}^2 \mathbf{I}/m)_3 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$${}^0_1 \boldsymbol{\omega}^* = (\boldsymbol{\omega}_x^* \quad \boldsymbol{\omega}_y^* \quad \boldsymbol{\omega}_z^*)^T. \quad (17)$$

考虑到 ${}^2\mathbf{I}/m$ 具有 6 个独立元素,由式(15)可知,理论上确定 2 组线性无关的辅助角速度矢量 ${}^0\boldsymbol{\omega}^*|_1, {}^0\boldsymbol{\omega}^*|_2$, 同时刻对应的辅助角加速度矢量 ${}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^*|_1, {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^*|_2$, 以及对应的去除零值漂移后支链轴向力的实测值 $\tilde{f}_i|_1, \tilde{f}_i|_2$ 之后, 可以通过求解 6 元 1 次方程组得到传感器系统的 6 个“惯性质量比”。

为了提高参数辨识精度, 标定试验的次数必须多于 2 次, 同样将标准传感器测量及数值微分得到的角运动信息作为待标定传感器的输入值。将式(5)、式(6)、式(16)、式(17)代入式(15)中, 并

式中:

$W =$

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_x^*|_1 & -(\omega_y^*|_1)(\omega_z^*|_1) & (\omega_y^*|_1)(\omega_z^*|_1) & \dot{\omega}_y^*|_1 - (\omega_x^*|_1)(\omega_z^*|_1) & \dot{\omega}_z^*|_1 + (\omega_x^*|_1)(\omega_y^*|_1) & (\omega_y^*|_1)^2 - (\omega_z^*|_1)^2 \\ (\omega_x^*|_1)(\omega_z^*|_1) & \dot{\omega}_y^*|_1 & -(\omega_x^*|_1)(\omega_z^*|_1) & \dot{\omega}_x^*|_1 + (\omega_y^*|_1)(\omega_z^*|_1) & (\omega_z^*|_1)^2 - (\omega_x^*|_1)^2 & \dot{\omega}_z^*|_1 - (\omega_x^*|_1)(\omega_y^*|_1) \\ -(\omega_x^*|_1)(\omega_y^*|_1) & (\omega_x^*|_1)(\omega_y^*|_1) & \dot{\omega}_z^*|_1 & (\omega_x^*|_1)^2 - (\omega_y^*|_1)^2 & \dot{\omega}_x^*|_1 - (\omega_y^*|_1)(\omega_z^*|_1) & \dot{\omega}_y^*|_1 + (\omega_x^*|_1)(\omega_z^*|_1) \\ \vdots & & & & & \\ \dot{\omega}_x^*|_\mu & -(\omega_y^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & (\omega_y^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & \dot{\omega}_y^*|_\mu - (\omega_x^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & \dot{\omega}_z^*|_\mu + (\omega_x^*|_\mu)(\omega_y^*|_\mu) & (\omega_y^*|_\mu)^2 - (\omega_z^*|_\mu)^2 \\ (\omega_x^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & \dot{\omega}_y^*|_\mu & -(\omega_x^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & \dot{\omega}_x^*|_\mu + (\omega_y^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & (\omega_z^*|_\mu)^2 - (\omega_x^*|_\mu)^2 & \dot{\omega}_z^*|_\mu - (\omega_x^*|_\mu)(\omega_y^*|_\mu) \\ -(\omega_x^*|_\mu)(\omega_y^*|_\mu) & (\omega_x^*|_\mu)(\omega_y^*|_\mu) & \dot{\omega}_z^*|_\mu & (\omega_x^*|_\mu)^2 - (\omega_y^*|_\mu)^2 & \dot{\omega}_x^*|_\mu - (\omega_y^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) & \dot{\omega}_y^*|_\mu + (\omega_x^*|_\mu)(\omega_z^*|_\mu) \end{pmatrix}$$

$\mu(>2)$ 表示标定试验的次数。

$$\begin{pmatrix} ({}^2\mathbf{I}/m)_1 \\ ({}^2\mathbf{I}/m)_2 \\ ({}^2\mathbf{I}/m)_3 \\ ({}^2\mathbf{I}/m)_4 \\ ({}^2\mathbf{I}/m)_5 \\ ({}^2\mathbf{I}/m)_6 \end{pmatrix} = W^+ \begin{pmatrix} (-n\tilde{f}_2|_1)(s_2/m) + (n\tilde{f}_4|_1)(s_4/m) \\ (n\tilde{f}_3|_1)(s_3/m) + (-n\tilde{f}_7|_1)(s_7/m) \\ (-n\tilde{f}_6|_1)(s_6/m) + (n\tilde{f}_8|_1)(s_8/m) \\ \vdots \\ (-n\tilde{f}_2|_\mu)(s_2/m) + (n\tilde{f}_4|_\mu)(s_4/m) \\ (n\tilde{f}_3|_\mu)(s_3/m) + (-n\tilde{f}_7|_\mu)(s_7/m) \\ (-n\tilde{f}_6|_\mu)(s_6/m) + (n\tilde{f}_8|_\mu)(s_8/m) \end{pmatrix} \quad (19)$$

当传感器外壳做线阈频以上的纯线运动时, 包括辅助角速度在内的外壳的转动参量大小均为 0, 也即动力学方程式(8)解算出的辅助角速度的模理论值为 0。由于还剩第四组参数未辨识, 因此给定不同的“刚度质量比”, 解算出的辅助角速度的模将会不相等。显然, 在其它解耦参数均已辨识的基础上, “刚度质量比”的真实值所对应的辅助角速度的模最小, 如式(20)所示。

$$k/m = \{ (k/m) | \min \{ |{}^0\boldsymbol{\omega}^*| (k/m) \} \} \quad (20)$$

基于该思想, 下面给出第四组解耦参数的辨识方法。首先, 借助于三维建模软件 SolidWorks 中的测量工具测得图 1 所示并联式六维加速度传

感器模型中“刚度质量比”的设计值, 并将设计值朝大、小 2 个方向作适当的扩展, 形成“刚度质量比”的约束区间; 接下来, 设定一个步长, 将解耦参数“刚度质量比”从区间的下限逐渐增大至上限, 并解算出每一个参数值所对应的辅助角速度的模; 最后, 分别以辅助角速度的模、“刚度质量比”为因变量和自变量, 通过一维搜索法获取最小因变量所对应的自变量的值, 即为辨识出的第四组解耦参数。

至此, 已经给出了并联式六维加速度传感器 25 个解耦参数的辨识方法, 其基本流程如图 4 所示。考虑到本文提出的参数辨识方法是通过 4 个

步骤将解耦参数进行分组辨识, 也即每一步能且仅能辨识出一组解耦参数, 而且后一步参数的辨识需要在确定了前几步参数的基础上进行, 作者将该方法形象地命名为“四步法”。值得指出的是, 四个步骤之间具有严格的先后顺序, 而且前几步的辨识误差会直接影响到后一步的辨识精度,

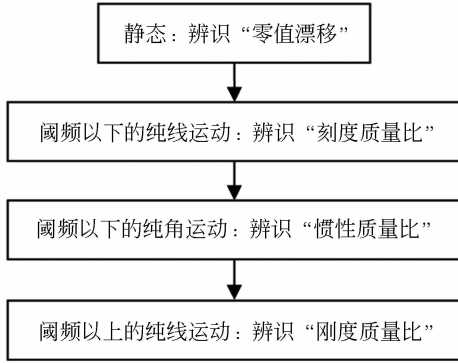


图 4 参数辨识“四步法”

Fig. 4 Four-step method of parameter identification

关于各步骤之间的辨识误差传递关系将另文研究。

3 六维加速度传感器的标定平台

从文章第 2 节建立的加速度解耦算法以及参数辨识“四步法”来看, 六维加速度传感器的标定平台需要满足如下 6 个基本要求:

- (1) 能够输出多种方式的运动, 包括纯线运动、纯角运动以及线运动和角运动的复合运动;
- (2) 输出运动加速度的大小和频率能够连续变化且可控, 方向能够灵活调节;
- (3) 能够方便安装标准传感器和待标定传感器, 且保证它们能够感应到相同的加速度值;
- (4) 输出运动平稳、无抖动, 且能够长时间稳定工作;
- (5) 频繁的启、停对传感器及平台本身所造成的影响和破坏尽可能地小;
- (6) 平台与传感器彼此之间的包括静电、磁场在内的干扰尽可能地小。

参考以上 6 个基本要求, 作者研制了六维加速度传感器的标定平台, 其机构原理和实物样机分别如图 5、图 6 所示。两台电机各驱动一个曲柄滑块机构, 曲柄与电机之间通过减速器和一对锥齿轮连接。控制电机匀速转动时, 滑块沿安装

于基座上的平行导轨以正余弦函数规律做直线往复运动。滑块 1 上通过两对轴承安装一对齿轮, 且齿轮轴线平行; 滑块 2 上通过调隙机构安装一根齿条, 调隙机构用于实现齿轮、齿条的啮合和分离状态。标准线加速度计安装在滑块 1 上, 其敏感方向与滑块 1 的运动方向平行; 标准陀螺仪通过法兰安装在一根齿轮轴的轴端, 其敏感轴与齿轮轴线平行; 试验时, 待标定传感器通过法兰安装在另一根齿轮轴的轴端, 且通过在传感器和法兰之间安装倾角斜块来改变加速度的敏感方向。选用的标准线加速度计和标准陀螺仪的测量误差均小于 1%, 灵敏度分别为 200 mV/g 和 10 mV · (°)⁻¹ · s⁻¹, 带宽分别为 18 000 Hz 和 10 Hz。

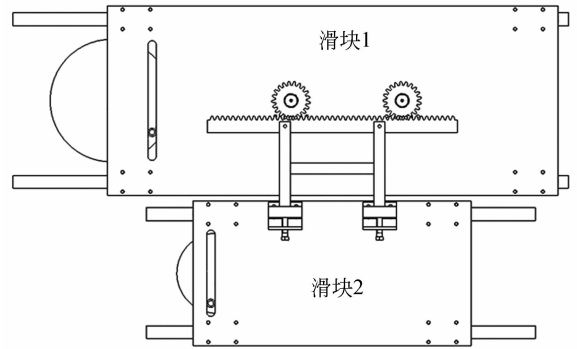


图 5 六维加速度传感器标定平台的机构原理图

Fig. 5 Mechanism principle diagram of calibration platform of six-axis accelerometer

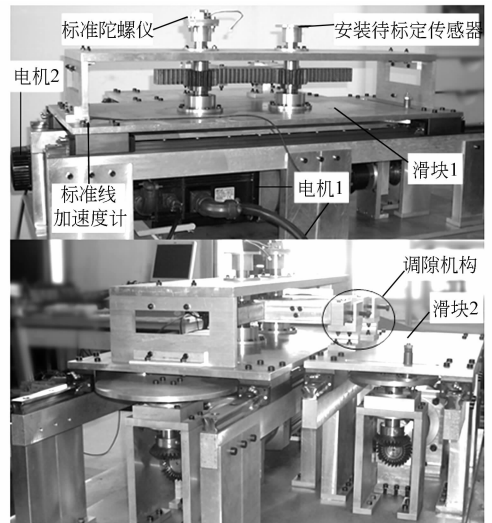


图 6 六维加速度传感器标定平台的实物样机

Fig. 6 Physical prototype of calibration platform of six-axis accelerometer

当齿轮、齿条处于分离状态时,电机 1 做匀速转动,电机 2 抱闸,标定平台输出纯线运动,且通过控制电机 1 的转速可以连续改变线运动参量的幅值和频率。该工作模式下,待标定传感器外壳的辅助角速度、辅助角加速度均为 0,而感应到的线加速度与标准线加速度计的测量值相等。

当齿轮、齿条处于啮合状态时,电机 1 抱闸,电机 2 做匀速转动,标定平台输出纯角运动,且通过控制电机 2 的转速可以连续改变角运动参量的幅值和频率。该工作模式下,待标定传感器外壳的线加速度为 0,而感应到的辅助角速度与标准陀螺仪的测量值相等。

当齿轮、齿条处于啮合状态时,电机 1 做匀速转动,电机 2 抱闸,标定平台输出线运动和角运动的复合运动,且通过控制电机 1 的转速可以连续改变复合运动参量的幅值和频率。该工作模式下,待标定传感器外壳感应到的线加速度和辅助角速度分别与标准线加速度计和标准陀螺仪的测量值相等。

由此可见,通过控制齿轮、齿条的啮合、分离状态、2 个电机的转、停状态以及电机的转速,图 6 所示的标定平台可以为六维加速度传感器的参数辨识提供所需的运动激励。该平台能够输出的最大线加速度为 $9.36g$,最大角速度为 $3142.86(^{\circ})/s$,最大角加速度为 $98735.80(^{\circ})/s^2$,最高频率为 5 Hz 。

为获得标定平台输出位移幅值所对应的六维加速度传感器的“线阈频”和“角阈频”,将图 1 所示的三维模型导入虚拟样机分析软件 ADAMS 中,给传感器外壳施加驱动并进行动力学仿真。位移函数的幅值设定为标定平台中滑块的行程,

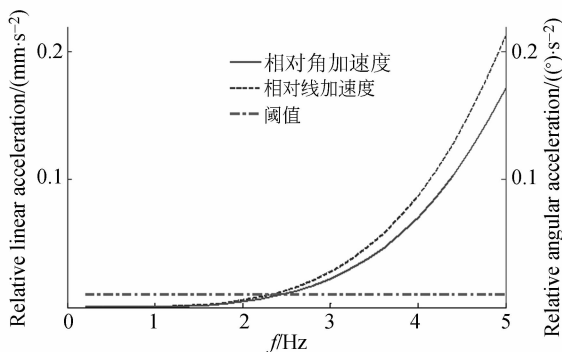


图 7 相对加速度与频率的关系

Fig. 7 Relationship between relative acceleration and frequency

驱动频率从 0.1 Hz 逐步增大至 5 Hz ,测量每一个频率所对应的质量块相对于外壳的加速度值,测量结果如图 7 所示,曲线上直接读取“线阈频”和“角阈频”分别为 2.3 、 2.5 Hz 。考虑到传感器仿真模型与实物样机的结构参数之间存在偏差,为了尽量减小由此产生的辨识误差,对上述频率作适当的调整,将“四步法”中第二步、第三步、第四步的工作频带分别设定为 $1\sim 2\text{ Hz}$ 、 $1\sim 2\text{ Hz}$ 和 $4\sim 5\text{ Hz}$ 。

4 标定试验与结果

4.1 虚拟仪器设计

以第 2 节建立的数学模型及其求解算法为理论基础,在 NI 公司的 LabVIEW 8.6 平台上开发出并联式六维加速度传感器测量及标定系统虚拟仪器,其主界面如图 8 所示,用于直接控制传感器的测量、参数辨识过程,以及显示和保存数据、曲线等相关结果。

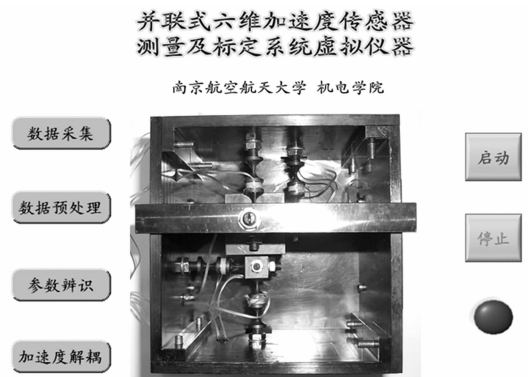


图 8 虚拟仪器主界面

Fig. 8 Main interface of virtual instrument

开发的虚拟仪器包括数据采集、数据预处理、参数辨识、加速度解耦四大模块。其中,数据采集模块用于控制数据采集卡按照测量要求实施信号采集、保存等功能;数据预处理模块用于对采集到的数字信号实施数字滤波、去趋势项、剔除野值等预处理功能;参数辨识模块是将 2.2 节的“四步法”用 G 语言形式表达出来,用于控制由标定试验输出数据计算待标定传感器的解耦参数;加速度解耦模块是将 2.1 节的解耦算法用 G 语言形式表达出来,用于控制基于预处理后的 9 组电压数据以及辨识出的 25 个参数对待测六维加速度实施解耦。

4.2 试验过程及辨识结果

图 9 所示为六维加速度传感器试验过程中的照片,其中,直流电源用于对标准传感器进行供电。打开电荷放大器等仪器设备的开关,预热后连续采集 10 min 的数据,在虚拟仪器中对预处理后的电压值进行求均值处理,完成“零值漂移”的辨识。在 1~2 Hz 中选择 10 组频率分别驱动标定平台,使传感器外壳做纯线运动,并通过更换不同的倾角斜块来改变加速度的方向。运用式(14)将待标定传感器的输出电压值以及标准线加速度计的测量值转换成待标定传感器的“刻度质量比”,也即完成第二组解耦参数的辨识。在 1~2 Hz 中选择 10 组频率分别驱动标定平台,使传感器外壳做多组大小、多组方向的纯角运动,并运用式(19)完成“惯性质量比”的辨识。前三组解耦参数的设计值以及辨识值分别如表 1、表 2、表 3 所示。

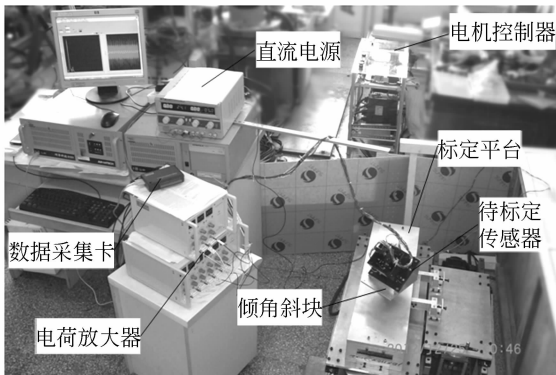


图 9 六维加速度传感器试验相关设备
Fig. 9 Testing equipment of six-axis accelerometer

表 1 第一组解耦参数的设计值与辨识值

Tab.1 Design and identification values of the first group parameters

解耦参数	设计值/mV	辨识值/mV
d_1	0	-12.3
d_2	0	16.8
d_3	0	-15.5
d_4	0	-10.1
d_5	0	-4.7
d_6	0	-16.6
d_7	0	-11.7
d_8	0	-8.3
d_9	0	-10.9

表 2 第二组解耦参数的设计值与辨识值

Tab.2 Design and identification values of the second group parameters

解耦参数	设计值/kg ⁻¹	辨识值/kg ⁻¹
s_1/m	5.347 6	5.089 2
s_2/m	5.347 6	3.550 1
s_3/m	5.347 6	6.119 9
s_4/m	5.347 6	3.230 8
s_5/m	5.347 6	4.876 3
s_6/m	5.347 6	7.090 9
s_7/m	5.347 6	3.689 6
s_8/m	5.347 6	3.162 4
s_9/m	5.347 6	3.183 8

表 3 第三组解耦参数的设计值与辨识值

Tab.3 Design and identification values of the third group parameters

解耦参数	设计值/mm ²	辨识值/mm ²
$(^2I/m)_1$	238.76	191.084 6
$(^2I/m)_2$	250.71	236.490 0
$(^2I/m)_3$	252.588	326.538 9
$(^2I/m)_4$	0.051 2	0.080 4
$(^2I/m)_5$	-0.029 5	-0.379 4
$(^2I/m)_6$	0.554 4	1.579 9

在 4~5 Hz 中选择 10 组频率分别驱动标定平台,使传感器外壳做纯线运动,同样通过更换倾角斜块来改变线加速度的方向。考虑到“刚度质量比”的设计值为 $3.1 \times 10^8 (s^{-2})$, 将其扩展成区间 $[1.0 \times 10^8 (s^{-2}), 10.0 \times 10^8 (s^{-2})]$ 。在区间上每隔 $0.1 \times 10^8 (s^{-2})$ 取一个值,从小到大依次计算该参数所对应的 10 组试验中辅助角速度的

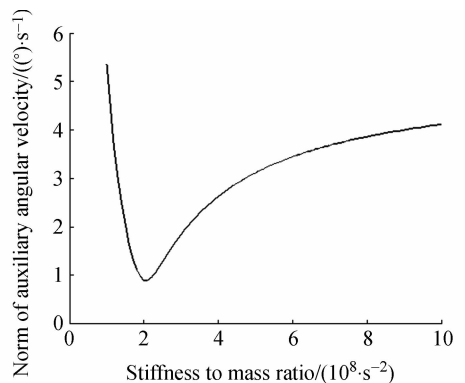


图 10 辅助角速度的模与刚度质量比的关系

Fig.10 Relationship between norm of auxiliary angular velocity and stiffness to mass ratio

模的平均值,结果如图 10 所示。在曲线上读取最低点的横坐标为 $2.0 \times 10^8 (\text{s}^{-2})$,此值即为第四组解耦参数的辨识值。至此,在“四步法”的指导下通过标定试验辨识出了图 2 所示并联式六维加速度传感器的 25 个解耦参数值。

4.3 算例验证

为了验证本文提出“四步法”的有效性以及据此辨识出的解耦参数的精确性,在齿轮、齿条处于啮合状态时,分别以频率 1 Hz、3 Hz 和 5 Hz 驱动标定平台,使传感器外壳做线运动和角运动的复合运动。运用 2.1 节中构建的解耦算法,分别基于解耦参数的设计值和辨识值求解待标定六维加速度传感器外壳加速度的 6 个分量,并将其与标准传感器的测量值进行对比,计算相对误差,对比结果如表 4、表 5、表 6 所示。

需要说明的是,参数辨识后的误差主要由噪声干扰及信号调理产生的误差、弹性球铰链与理想球铰链不完全等效而造成的建模误差等几部分构成。欲进一步提高传感器的测量精度,可以从数字信号处理、弹性铰链运动学及力学性能等方面展开研究。

表 4 驱动频率 1 Hz 时参数辨识前、后的解耦误差对比

Tab. 4 Decoupling errors before and after parameter identifications with 1 Hz driving frequency

	目标加 速度	辨识前 误差/(%)	辨识后 误差/(%)
x 向线加速度	0.15g	39.841	5.058
y 向线加速度	0.15g	77.004	7.428
z 向线加速度	0.30g	50.986	6.017
x 向角加速度	$1\ 612.35(^{\circ})/\text{s}^2$	40.587	5.017
y 向角加速度	$1\ 612.35(^{\circ})/\text{s}^2$	69.031	7.387
z 向角加速度	$3\ 224.70(^{\circ})/\text{s}^2$	55.897	7.477

表 5 驱动频率 3 Hz 时参数辨识前、后的解耦误差对比

Tab. 5 Decoupling errors before and after parameter identifications with 3 Hz driving frequency

	目标加 速度	辨识前 误差/(%)	辨识后 误差/(%)
x 向线加速度	1.38g	70.005	6.899
y 向线加速度	2.75g	71.801	6.990
z 向线加速度	1.38g	62.901	7.470
x 向角加速度	$14\ 511.10(^{\circ})/\text{s}^2$	55.260	6.382
y 向角加速度	$29\ 022.30(^{\circ})/\text{s}^2$	76.358	7.089
z 向角加速度	$14\ 511.10(^{\circ})/\text{s}^2$	39.881	7.184

表 6 驱动频率 5 Hz 时参数辨识前、后解耦误差对比

Tab. 6 Decoupling errors before and after parameter identifications with 5 Hz driving frequency

	目标加 速度	辨识前 误差/(%)	辨识后 误差/(%)
x 向线加速度	7.64g	60.112	7.479
y 向线加速度	3.82g	75.584	7.108
z 向线加速度	3.82g	55.368	5.984
x 向角加速度	$0\ 617.40(^{\circ})/\text{s}^2$	52.687	7.061
y 向角加速度	$0\ 308.70(^{\circ})/\text{s}^2$	72.879	6.148
z 向角加速度	$0\ 308.70(^{\circ})/\text{s}^2$	41.589	5.742

为了验证“四步法”中第二步、第三步、第四步工作频带选择的合理性,以上限频率 2 Hz 驱动标定平台输出纯线运动,由试验输出电压值以及参数辨识值计算出的质量块相对于外壳的线加速度值小于阈值 $0.01 \text{ mm}/\text{s}^2$;以上限频率 2 Hz 驱动标定平台输出纯角运动,计算出的相对角加速度值小于阈值 $0.01^{\circ}/\text{s}^2$;以下限频率 4 Hz 驱动标定平台输出纯线运动,计算出的相对线加速度值大于阈值 $0.01 \text{ mm}/\text{s}^2$ 。可见,试验结果与理论分析完全吻合。

5 结 论

由于并联式六维加速度传感器的输入、输出量较多,且动力学方程强非线性耦合,其解耦参数的辨识仍未得到很好的解决。本文针对该现状,在深入分析加速度解耦算法的基础上,提出了一种可对 25 个解耦参数进行分组辨识的“四步法”。通过设计并加工出基于双曲柄滑块机构的标定平台,以及在 LabVIEW 平台上开发出虚拟仪器,分别为“四步法”的实施提供了硬、软件条件。所设计的标定平台能够输出的最大线加速度为 $9.36g$ 、最大角速度为 $3\ 142.86(^{\circ})/\text{s}$ 、最大角加速度为 $98\ 735.80(^{\circ})/\text{s}^2$ 、最高工作频率为 5 Hz。所开发的虚拟仪器具有控制数据采集、数据预处理、参数辨识、加速度解耦的四大功能。通过仿真和试验确定了“四步法”中后三步的工作频带分别为 $1\sim 2 \text{ Hz}$ 、 $1\sim 2 \text{ Hz}$ 和 $4\sim 5 \text{ Hz}$ 。标定试验表明:基于“四步法”,依次通过数据求均值处理、两次运用最小二乘法求解关于部分待定参数的线性代数方程以及执行关于最后一个待定参数的一维搜索操作,能够辨识出系统的所有解耦参数。分别以

频率 1 Hz、3 Hz 和 5 Hz 驱动标定平台,使其输出复合运动,运用辨识后的解耦参数以及传感器 9 个通道的输出电压对六维加速度进行了解耦运算,最大相对误差为 7.479%,相比于参数辨识前

的最大误差降低了将近 1 个数量级,有力验证了本文提出的“四步法”是有效可行的。值得一提的是,对“四步法”进行适当的扩展或修正,还可以用于指导其它类型六维加速度传感器的参数辨识。

参考文献:

- [1] TZUU H, CHING CH CH, YU T S. Optical image stabilizing system using fuzzy sliding-mode controller for digital cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012,58(2):237-245.
- [2] LIN P CH, LU J CH, TSAI CH H, *et al.*. Design and implementation of a nine-axis inertial measurement unit [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012,17(4):657-668.
- [3] 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 J J, LI C G, WU H T. Research on Hamiltonian dynamics of parallel type six-axis accelerometer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012,48(15):9-17. (in Chinese)
- [4] ZUMER J, REYNAERTS D, BOLTEZAR M. An advanced nonlinear model of a low-g MEMS accelerometer for a computer pen [J]. *Measurement*, 2012,45(3):459-468.
- [5] PETER S, HUBERT G. State estimation on flexible robots using accelerometers and angular rate sensors [J]. *Mechatronics*, 2012(22):1043-1049.
- [6] 毕树生,宗光华. 用于生物工程的微操作机器人系统的若干问题[J]. *仪器仪表学报*,2000,21(6):560-565.
BI S S, ZONG G H. Some issues on bio-micromanipulator system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000,21(6):560-565. (in Chinese)
- [7] WANG D H, YUAN G. A six degree of freedom acceleration sensing method based on six coplanar single axis accelerometers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011,60(4):1433-1442.
- [8] 赵磊,刘巍,巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. *光学精密工程*,2011,19(12):2954-2962.
ZHAO L, LIU W, GONG Y. Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(12):2954-2962. (in Chinese)
- [9] 侯雨雷,曾达幸,姚建涛,等. 超静定并联式六维力传感器动力学[J]. *光学精密工程*,2009,17(7):1594-1601.
HOU Y L, ZENG D X, YAO J T, *et al.*. Dynamics of hyperstatic parallel six-component force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1594-1601. (in Chinese)
- [10] 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 J J, LI C G, WU H T. Study on the scheme design and modeling of six-axis accelerometer based on parallel mechanism [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012,25(6):658-666. (in Chinese)
- [11] 尤晶晶. 基于 6-SPS 并联机构的压电式六维加速度传感器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
YOU J J. *Research on a piezoelectric six-axis accelerometer based on 6-SPS parallel mechanism* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)
- [12] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. *光学精密工程*,2010,18(8):1766-1772.
GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(8):1766-1772. (in Chinese)
- [13] 魏强,张承进,张栋,等. 压电陶瓷驱动器的滑模神经网络控制[J]. *光学精密工程*,2012,20(5):1055-1063.
WEI Q, ZHANG C J, ZHANG D, *et al.*. Neural network control for piezo-actuator using sliding-mode technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(5):1055-1063. (in Chinese)
- [14] 陶俊勇,刘彬,陈循. 气动式振动台激振器低温失效机理研究及结构改进[J]. *机械工程学报*,2012,48(2):50-56.
TAO J Y, LIU B, CHEN X. Study on performance and optimal design of pneumatic vibrator of

repetitive shock machine on cold soak temperature [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(2):50-56. (in Chinese)

- [15] 胡俊峰, 张宪民. 3 自由度精密定位平台的运动特性和优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(12): 2686-2695.

HU J F, ZHANG X M. Kinematical properties and optimal design of 3-DOF precision positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2686-2659. (in Chinese)

- [16] 崔继文, 刘雪明, 谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(9): 1960-

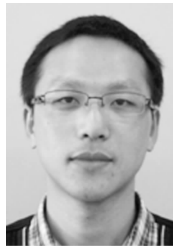
1966.

CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1960-1966. (in Chinese)

- [17] 李成刚, 尤晶晶, 吴洪涛. 椭圆型弹性球铰链转动性能及疲劳强度研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(2):231-234.

LI C G, YOU J J, WU H T. Study on rotation capability and fatigue strength of elliptical flexure spherical hinge [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(2):231-234. (in Chinese)

作者简介:



尤晶晶(1985—), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 2010 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 主要从事六维加速度传感器和并联机器人这两方面的研究。E-mail: youjingjing251010@126.com



李成刚(1975—), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 硕士生导师, 2001 年于吉林大学获得硕士学位, 2004 年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事机器人技术、机电控制及自动化、六维加速度传感器等方面的研究。E-mail: lichenggang@nuaa.edu.cn

导师简介:



吴洪涛(1962—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 1985 年于天津大学获得硕士学位, 1992 年于天津大学获得博士学位, 主要从事多系统动力学、并联机器人等方面的研究。E-mail: mehtwu@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)