

六维加速度的测量研究

钱朋安^{1,2} 葛运建² 吴仲城¹

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科技大学自动化系, 合肥 230026)

摘 要:通过六轴加速度计或全加速度计组合等方法,能够获取空间运动物体的六维加速度信息。在分析几种典型的六轴加速度计的结构、测量原理的基础上,以电阻应变式六轴加速度计为例,提出以加速度计质量块坐标系为参考坐标系,由已知六个相互线性独立的加速度组成输入矩阵,相应的测量输出值组成输出矩阵,经矩阵运算来获取传感器特性矩阵;并进行了理论分析与论证。结果表明,这种方法能够实现传感器的标定。

关键词:六维加速度; 六轴加速度计; 测量; 标定

A Study on Measuring Six-axis Acceleration

Qian Peng'an Ge Yunjian Wu Zhongcheng

(1. Institute of Intelligent Machines, CAS, Hefei, 230031

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: The six-degree of freedom (DOF) acceleration of an object can be measured with six DOF accelerometer, or all-accelerometer, etc. Based on analyzing the structure and the measuring principle of several six DOF accelerometers, this paper gave a method of six DOF accelerometer's calibration, which the characteristic matrix of the sensor could be obtained by matrix calculation of an input matrix and output matrix in the seismic-mass reference frame. The input matrix consisted of six linear independence acceleration vectors, and the output matrix consisted of the corresponding measuring output. This method was testified with the analysis of a kind of double E-type structure monolithic six DOF accelerometer. The result indicated the method is feasible.

Keywords: six-axis acceleration; six-axis accelerometer; measuring; calibration.

1 引 言

在许多领域,特别在航空航天、军事、医疗、体育与文化艺术、机械工程等方面,涉及到对三维空间物体运动状态信息的获取与分析。

理论上,描述一个物体在三维空间中运动状态,需要六个独立参量,即三个描述质心运动的参量和三个描述绕质心转动的参量。对这六个参量信息的获取,需要借助于一定的测量仪器设备和技术才能得以实现。

实际应用上,如在惯性导航方面,一种无陀螺捷联惯导系统,就是采用加速度计组件,来实现三维空

间运动物体的六维加速度(质心三维线加速度、绕质心转动三维角加速度)测量与状态描述^{[1][2][3]}。

而在重力场梯度、物体运动测量等领域,可由特别设计的六轴加速度计来实现六维加速度的测量,以描述、分析重力场梯度和物体状态。日本 JR3 公司^[4]报道了采用集成电路法实现加速度补偿的一种十二维力传感器,其能测量作用在正交轴上的三维力、三维力矩及六维加速度;且信号处理电路,包括放大器、模数转换器、EEPROMS(含校准系数)、RS485 总线驱动等部分,都集成在传感器的本体中,所测线加速度达 $5g$ (g : 重力加速度值),角加速度达 1000 弧度/ s^2 (s : 秒)。

文献[5]也设计了一种量程 $12.5\mu g$ 、灵敏度

本项目为“十五”国家 863 基金项目(2001AA423180)。

本文于 2003 年 9 月收到。钱朋安:讲师,博士;葛运建:教授,博士;吴仲城:副研究员

1ng、带宽 0.1Hz 的静电悬浮式六轴加速度计;并较详细论述了电容位移检测、微弱加速度检测原理。通过适当的电极配置设计、六路差分电容输出的线性组合,探讨了该六轴加速度计检测功能,进行了静电悬浮支承系统的振动学分析,为研制高精度多轴加速度计提供了重要的参考价值。

当然还有采用光位置测量方式的。但是这些关于六轴加速度计的文献,均未能较为详细描述相关的测量原理、可能结构形式等。对此,本文将结合实际研究及有关文献,重点对较为典型的微机械电容式、超导体、电阻应变式六轴加速度计的结构、测量原理、标定等进行探讨和研究。

2 多加速度计组合法测量六维加速度

这种方法是利用多个线加速度计的组合,如六个、九个等单维线加速度计的组合,来实现对载体六维加速度的测量。如在全加速度计式惯导系统与重力场梯度测量中,要有三个加速度计测量线加速度、三个测量角加速度、六个用于重力场梯度测量^[1]。

而在无陀螺捷联惯导系统中,加速度计总数选择、配置方式也有多种形式。如文献[2]对选用加速度计个数、配置方式及适用场合做了介绍,并给出适于近程战术导弹使用的六加速度计配置方式,即可采用在正方体每个面的中心安装加速度计,加速度计敏感轴沿每个面对角线方向,或其他方式的配置。且为了测量绕质心的转动,认为加速度计必须安装在载体的非质心处,一般地加速度计安装点离质心越远,测量精度越高。

在无陀螺捷联方案的基础上,还可以结合单陀螺与多加速度计的捷联,通过角速度与加速度间的解算等,提高系统的精度^[3]。

3 几种典型设计的六轴加速度计

3.1 微机械电容式六轴加速度计

一种微机械电容式六轴加速度计,由质量块、电容器、基体等组成,质量块由弹性悬臂梁支撑着而悬浮于立体空腔中,悬臂梁一端固定于基体上的。其中电容有定极和动极组成,动极随质量块一起移动,定极制在基体上。待测物体的加速度,可由质量块、结构体的位置变化经电容转换器的转换测量来获

得。

图 1 是电容式六轴加速度计测量原理简图,为检测六个方向的加速度矢量,采用七个测量电容,即质量块外侧电容 1、6、7,下端电容 2、3、4、5;相应地,图中给出在取质量块质心为坐标原点时,质量块在 xyz 轴方向上平动/转动的一阶振型形状^[6]。

而在单方向、单位线加速度 a 或角加速度 α 作用下,经电容测量、输出处理,可得加速度值与测量值之间的关系。假定此方向下相关线/角加速度输出值为 δ 或 λ (可取为电压),即有: $\delta_x = \frac{1}{2}(d_6 + d_7)$, $\delta_y = d_1$, $\delta_z = \frac{1}{4}(d_2 + d_3 + d_4 + d_5)$, $\lambda_x = \frac{1}{2}(d_3 - d_5)$, $\lambda_y = \frac{1}{2}(d_2 - d_4)$, $\lambda_z = \frac{1}{2}(d_6 - d_7)$, d_i ($i = 1 \dots 7$) 是相应电容测量输出的平均值;则能实现对传感器的标定,从而实现六维加速度/角加速度的测量。

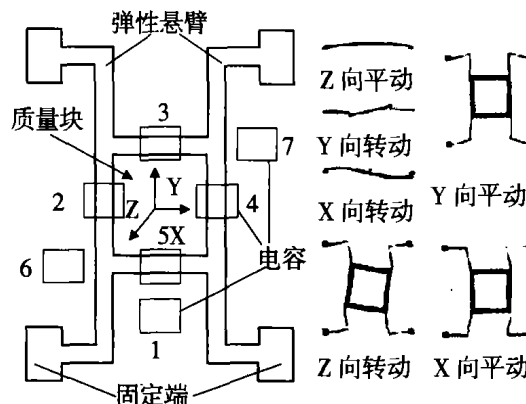
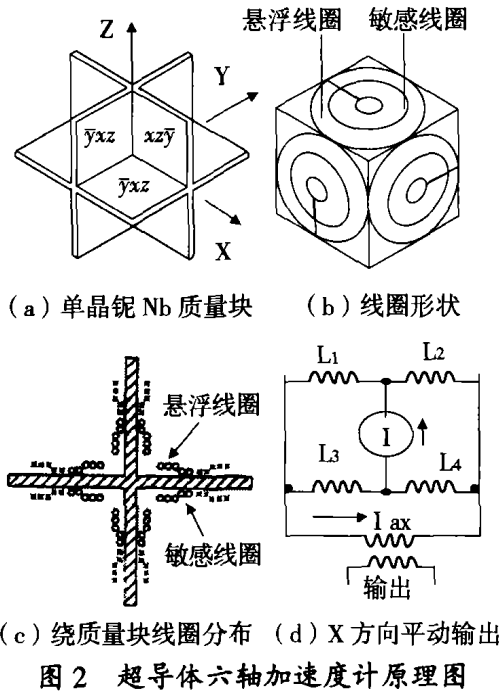


图 1 微机械电容式六轴加速度计原理图

3.2 超导体六轴加速度计

将一特定形状的超导材料质量块,悬浮于通电的超导线圈设备上,似由一个定常弹性系数的弹簧体支撑着。而此质量块的位移对邻近螺旋导线的电磁感应系数进行了调制,经过电感桥路的不平衡输出,则能测量出质量块的小位移/绕质心的转动。

图 2 是一种超导六轴加速度计结构原理图,其由一个机架、内装超导质量块单晶铌组成,质量块结构形状为(a),此质量块是磁悬浮于机架内,通过检测质量块相对于机架的六维运动,能确定施加在机架上的六维加速度^[7]。这里,加速度计的附着机架为一可容纳此质量块的空腔体,腔体上有 8 个与质量块的立方角成一定间隙的立方体,每个立方体相对于质量块有 3 个面,面的标识是依据右手定则,如 \overline{xzy} , \overline{yxz} , \overline{zyx} 见图 2(a),共记为: \overline{xyz} , \overline{yzx} , \overline{zxy} , \overline{xzy} , \overline{yxz} , \dots , \overline{xzy} , \overline{yxz} , \overline{zyx} 24 个面。每个面上各绕有两个扁平螺旋形超导线圈,即内外环超导线圈,计

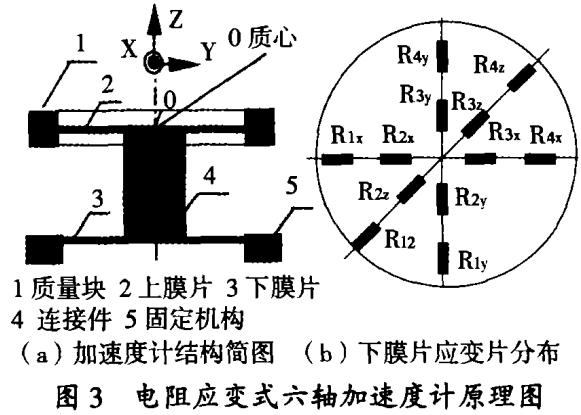


(c) 绕质量块线圈分布 (d) X 方向平动输出
图 2 超导体六轴加速度计原理图

24 对,如图 2(b)示,质量块周围线圈分布见图 2(c)。24 个外环线圈分别通以相应的恒定电流,提供六维悬浮力来支撑质量块。24 个内环线圈为敏感线圈,可写成 $L_{xyz}, L_{yxz}, L_{xyx}, L_{xzy}, L_{yzx}, \dots, L_{zyx}, L_{yzy}$; 其中对角分布的 4 个敏感线圈组成 1 个惠斯通电桥,例如 $L_{yxz}, L_{zyx}, L_{yzy}, L_{zyz}$ 线圈组成一电桥,此电桥由电流源 I 供电,见图 2(d)所示,图中 L_1, L_2, L_3, L_4 相对应于上述线圈,其输出为 x 轴方向平动的加速度信号 $I a_x$ 。依据这样方法,共组成 6 个电桥,输出的 6 个信号对应于六自由度平动/转动加速度,从而实现六维加速度的测量。

3.3 电阻应变式六轴加速度计

专利^[8]设计研制了一种双 E 型圆膜片十字梁结构电阻应变片式六轴加速度计,结构简图见图 3。此种加速度计主要有上、下圆形弹性膜片、中央连接件及粘贴其上的电阻应变片,圆环形质量块,固定机构等组成,可以上膜片中心 O 为坐标原点,建立坐标系,见图 3(a)示。在上、下膜片敏感面上粘贴电阻应变片,下膜片上应变片感应三维平动、上膜片应变片感应三维转动,通过一定的应变片电阻组桥,来实现六自由度平动/转动加速度的测量。因涉及专利,这里仅给出下膜片 3 敏感面上电阻分布见图 3(b)^[9]。图中 $R_{1x}, R_{2x}, R_{3x}, R_{4x}$ 组成一惠斯通直流电桥,其输出对应于线加速度 a_x ; 同样地 $R_{1y}, R_{2y}, R_{3y}, R_{4y}$ 组桥,输出线加速度 a_y 值; $R_{1z}, R_{2z}, R_{3z}, R_{4z}$ 组桥,输出线加速度 a_z 值。



1 质量块 2 上膜片 3 下膜片
4 连接件 5 固定机构
(a) 加速度计结构简图 (b) 下膜片应变片分布
图 3 电阻应变式六轴加速度计原理图

4 六轴加速度计标定

标定是指在明确了输入/输出变换对应关系的前提下,利用某种或标准的器具对传感器进行标度的一种过程。

对于六轴加速度传感器,以电阻应变片式六轴加速度计^[8]为例,就是要获得其输出读数 v 与对应作用在传感器坐标原点上的加速度向量 a 之间的关系,这里可以用式(1)表示:

$$v = K \cdot a \quad (1)$$

其中 $a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]^T$, 为加速度向量,6 个分量的前 3 个是对应传感器坐标系 3 个坐标轴 X、Y、Z 轴线加速度分量,后 3 个则是角加速度分量。

$v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6]^T$ 是 6 个直流电桥输出读数值列向量。

在取质量块坐标系为参考坐标系下,见图 3,考虑到所设计弹性体即圆形弹性膜片等,在测量范围内,输入 a (线/角加速度)和输出(应力应变)之间保持着较好的线性关系;粘贴在弹性体上的电阻应变片电阻值变化与应变亦呈良好的线性关系,再有直流电桥的输出 v 与电阻值变化线性关系,可得 v 与 a 呈线性变换关系。故而描述 v 与 a 之间关系的 K 是一个 6 阶常系数矩阵,亦是传感器本身的特性矩阵。另一方面,考虑维间耦合,即沿轴向的加速度分量对输出读数 v 的影响,此 K 矩阵可表示为:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为解出此矩阵中所有的 36 个元素 $K_j (i, j = 1, 2 \dots 6)$, 要先给传感器施加 6 个线性独立的加速度向量, 并读取 6 个对应的读数列向量。由这 6 个加速度向量构成一个 6×6 加速度矩阵 A 、6 个对应的读数列向量构成一个 6×6 读数矩阵 V , 进而(1)式可写成(3)式:

$$V = K \cdot A \quad (3)$$

根据理论力学^[10], 在空间作任意运动的刚体可分解为质心的平动(3 个独立变量)与绕通过质心的某直线的定点转动(3 个独立变量), 即此 6 个独立变量用于描述刚体在空间的位置状态。在图 3 所示的笛卡儿坐标系中, 可将质量块作为刚体来考虑, 选择其质心为坐标原点, 则根据线加速度与角加速度向量的定义, 沿 xyz 各轴方向施加的线加速度:

$$[b_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$[0 \ b_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$[0 \ 0 \ b_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

及转动角加速度、 $[0 \ 0 \ 0 \ b_4 \ 0 \ 0]^T$ 、

$$[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_5 \ 0]^T,$$

$$[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_6]^T$$

是相互线性独立的 6 个加速度向量, 这里 $b_i (i = 1, \dots, 6)$ 为不等于零的常量。

由此 6 个加速度向量作输入, 组成加速度矩阵 A , 由相应读数输出向量组成矩阵 V , 根据矩阵运算求解^[11]和公式(3), 可求得系数矩阵 K 及其逆矩阵 K^{-1} , 得式(4):

$$a = K^{-1} \cdot v \quad (4)$$

完成对六轴加速度传感器的标定。

相应地, 对于微机械电容式六轴加速度计、超导六轴加速度计等, 可通过类似方法进行标定的研究。

5 结 语

上述关于六轴加速度计的标定, 是以加速度计质量块坐标系为参考坐标系来进行的。为此要确保施加的单位加速度矢量的方向与质量块参考系取得一致, 以减小标定带来的误差。

而在应用中, 还因涉及到被测物体平动/转动的多自由度问题; 以及至少涉及三个参考系, 即惯性参考坐标系、加速度计机架参考坐标系、质量块参考坐

标系, 故此必须根据动力学知识, 进行坐标变换等。在后续的研究中, 将重点针对电阻应变片式六轴加速度计的实际应用来展开。

参考文献:

- [1] Alan H. Zorn. A merging of system technologies: all-accelerometer inertial navigation and gravity gradiometry [J]. Position Location and Navigation Symposium, 2002 IEEE, 15 - 18, April 2002 Page(s):66 - 73.
- [2] 史震. 无陀螺捷联惯导系统中加速度计配置方式 [J]. 中国惯性技术学报, Vol. 10 No. 1 2002(2):15 - 19.
- [3] 周百令, 黄胜华, 王寿荣等. 一种新型的单陀螺多加速度计捷联惯导系统 [J]. 中国惯性技术学报, Vol. 10 No. 1 2002(2):6 - 9.
- [4] 2003, <http://www.JR3.com/>
- [5] 唐富荣, 薛大同. 六轴加速度计的结构原理与阻尼振动设计 [J]. 传感技术学报, 2002(4):287 - 293.
- [6] Jean-Pierre Alfano and Oren Masory. Design of a MEMS six DOF accelerometer. <http://www.cimmar.mae.ufl.edu/fla99/session6/masory-mems.pdf>
- [7] E. R. Canavan, H. J. Paik and J. W. Park. A superconducting six-axis accelerometer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, March 1991:3253 - 3256.
- [8] 戈瑜, 吴仲城, 葛运建等. 一种双 E 型圆膜片十字梁结构的六轴加速度传感器 [P]. 中华人民共和国发明专利:2137897.5, 2003 年 3 月公开.
- [9] 吴仲城, 戈瑜, 虞承端. 基于厚膜技术 E 型三维加速度传感器的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2001(9):3 - 5.
- [10] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(I) [M]. 北京:高等教育出版社, 2002 年 8 月.
- [11] 同济大学数学教研室. 工程数学 线性代数(第三版) [M]. 北京:高等教育出版社, 1999 年 6 月.

作者简介:



钱朋安

钱朋安:男, 1966 年出生, 安徽无为, 中国科技大学博士研究生、合肥工业大学教师, 现在中国科学院合肥智能机械研究所从事研究工作。研究领域为传感器技术、信息获取与处理。

葛运建:男, 1948 年出生, 博士, 中国科学院合肥智能机械研究所教授, 博士生导师。主要研究方向为机器人控制, 信息获取与处理, 智能仪表。