

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.07

基于加速度计阵列的六自由度振动台测试方法研究

付强¹, 戴晓彬¹, 魏元²

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要: 目前多自由度振动台缺乏方便有效的多自由度振动测试手段, 通过探讨基于加速度传感器的六自由度振动测试方法, 提出基于 4 只三向加速度计的加速度计阵列构型, 依据六自由度运动系统方程对该构型的运动状态进行了理论推导, 并设计了具体的封装方法, 最后对封装的加速度计阵列构型进行了多自由度振动测试试验验证。试验结果表明: 所提出的基于 4 只三向加速度计的加速度计阵列构型能够对角加速度进行测试与还原, 简易可靠, 可以作为多自由度振动的测试手段。本文提出的加速度计阵列构型有望被推广应用于现场低频振动测量或校准工作中。

关键词: 六自由度振动; 加速度计阵列; 构型封装

中图分类号: TB934

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0028-06

Research on Measurement Method of Six Degrees of Freedom Vibration Table Based on Accelerometer Array

FU Qiang¹, DAI Xiaobin¹, WEI Yuan²

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: The multi-degrees-of-freedom vibration table lacks a convenient and effective method to measure the multi-degrees-of-freedom vibration at present. This article discussed the six degrees of freedom vibration testing method based on the acceleration sensor, and proposed an accelerometer array configuration based on four three-direction accelerometers. The motion state of the configuration is theoretically deduced according to the six degrees of freedom motion system equations, and the specific packaging method is designed. Finally, the encapsulated accelerometer array configuration is verified by the multi degrees of freedom vibration test. The test results show that the proposed accelerometer array configuration based on four three-direction accelerometers can test and restore the angular acceleration. The method is simple and reliable, and can be used for multi degrees of freedom vibration test. It is expected to be widely used in on-site vibration measurement and calibration.

Key words: vibration of six degrees of freedom; accelerometer array; configuration package

0 引言

多自由度振动试验系统的应用日益广泛, 在军工领域等试验要求较高的振动环境试验中发挥了重要作用。对于多轴振动系统的校准, 2008 年美国军用标准 MIL-STD-810G 中的 527A 部分制定了多自由度振动台的检验校准相关规范, 并以简要算法揭示了多自由度振动的检定校准算法, 可还原六自由度振动台的实际工作状况^[1], 我国在该方面的研究起步较晚, 缺乏统一规范^[2]。

目前常见的线振动测试可划分为机械式测量、电测法、光学法; 角振动测试方法可以分为光电编码器法与陀螺测试法。但两者均不能够在空间上完整且同

步地还原出发生空间六自由度振动时驱动点的运动情况。

针对多自由度振动测试方法仍以加速度计阵列测试的方法为主, 如无陀螺捷联惯导技术中提出的应用九只加速度传感器阵列配置^[3], 利用六个单向加速度传感器和三个角加速度传感器构成传感器阵列, 将封装后阵列应用于人体头部运动学的解算中, 但该方法存在着角速度解算精度不高的技术难题, 此外角加速度传感器的安装与使用都较为不便^[4-5]。另一种针对六自由度振动的测试校准方法为激光绝对法, 该方法通过三维同步的激光测振系统对多自由度振动进行三维同步测量, 获得振动测量数据传送到数据采集系统通过解耦算法对测量数据进行处理^[6], 该方法测量精

度较高且为激光测试方法，可溯源至长度与时间基本物理量，量值传递有保障，能够完整的针对六自由度振动台台面运动情况进行多频率段测试，通过算法复现振动台运动。但该方法较为复杂，对试验环境要求高、试验成本高，一般只能在实验室内完成。

综上所述，目前缺乏一种相对快速简易、可完整还原运动点六自由度运动状况、且可方便用于现场测试校准的加速度计阵列测试方法。本文提出基于4只三向加速度计的加速度计阵列构型，不再依赖角加速度计即可还原运动点角振动的运动状况，且该方法简单可靠，可推广应用于车辆、航天、惯导系统等六自由度振动环境的现场振动测试与校准中。

1 加速度计阵列通道数量分析

空间中某点加速度计测得加速度可以表示为

$$a_i = a_0 + \alpha r_i + \omega \omega r_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中： a_0 为参考点的加速度； α 和 ω 分别为刚体角加速度和角速度； ε_i 为非刚性效应(柔性)引起的误差。

一般情况下，构建还原驱动点加速度的真实运动情况需要对 a_0 (三个未知量)、 α (三个未知量) 和 ω (三个未知量) 共计九个未知量进行测试，因此，理论上所需传感器最小通道数量为9个。在十分理想的情况下，比如 $a_0 = 0$ 或被测对象完全满足刚体运动学关系 $\alpha = d\omega/dt$ ，所需传感器最小通道数可以减至6个。然而， a_0 不为构建运动信息所必要的条件在实际的振动测试环境中是难以实现的，并且考虑到广泛应用时被测对象不一定是刚体，最后在实际工作环境中和试验室条件之间将不可避免地存在机械阻抗失配的事实，因此实际应用仍需9个通道以上的传感器阵列构型。

通过综合考理论推导结果、实际结构封装以及使用方便程度等方面，提出基于4只三向加速度计阵列构型的六自由度运动姿态还原测试方法。12通道满足最低9通道的理论要求，同时采用立方体形状的三向加速度计方便封装，使用便利，符合现场测试的需求。

2 阵列构型与运动方程

4只三向加速度计阵列构型坐标系如图1所示。

按照阵列构型建立坐标系，以 a_i 表示第 i 个通道测得的加速度，其中 a_0 为移动坐标系中参考点加速度， $\alpha_{x,y,z}$ 和 $\omega_{x,y,z}$ 分别表示三个坐标轴方向对应的角加速度和角速度为目标量。

假设 $\vec{\alpha} = \alpha_x \vec{i} + \alpha_y \vec{j} + \alpha_z \vec{k}$ ， $\vec{\omega} = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$ 是在体固定框架中协调的角加速度和角速度，为了使

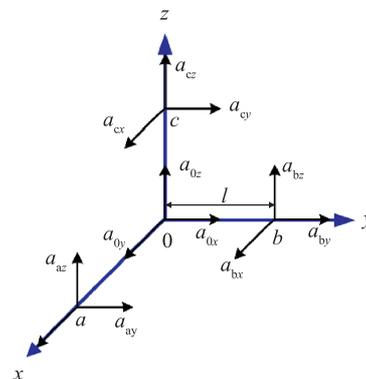


图1 阵列构型坐标系

等式便于计算，使用矩阵进行等效运算。由式(2)可得到载体上某点 i 的加速度为

$$a_i = a_0 + [\theta^T]([\alpha][L_i] + [\omega][\omega][L_i]) + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, 9) \quad (2)$$

式中： ε_i 为非刚性效应(柔性)引起的误差，忽略非刚性效应($\varepsilon_i = 0$)，则等式(2)中含有三个未知量(a_0, α, ω)； $[\theta]$ 为 i 点传感器在坐标系中敏感方向向量； $[L_i]$ 为 i 点在坐标系中的位置矢量(0点至 a, b, c 点距离相等，均为 l)。

$$[\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_z & \alpha_y \\ \alpha_z & 0 & -\alpha_x \\ -\alpha_y & \alpha_x & 0 \end{bmatrix},$$

式中： $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 与 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 分别为角速度和角加速度在 x, y, z 三轴向上的分量。将式(2)简化为

$$a_i = a_0 + [\theta^T]([\Omega][L_i]) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 9) \quad (3)$$

式中： $[\Omega]$ 为角运动对所测的线性加速度的贡献， $[\Omega] = [\alpha] + [\omega][\omega]$

$$= \begin{bmatrix} -(\omega_y^2 + \omega_z^2) & \omega_x \omega_y - \alpha_z & \omega_x \omega_z + \alpha_y \\ \omega_x \omega_y + \alpha_z & -(\omega_x^2 + \omega_z^2) & \omega_y \omega_z - \alpha_x \\ \omega_x \omega_z - \alpha_y & \omega_x \omega_y + \alpha_z & -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

建立加速度计阵列构型^[7]，则传感器安装位置在坐标系中位置矢量 $[L_i]$ 、敏感方向向量 $[\theta]$ 表示为表1形式。刚体的运动情况可以由坐标系三个轴向线加速度和三轴向对应的角加速度表示。将阵列构型加速度计安装位置、方向带入式(3)，具体复现线加速度及角加速度的计算方法为

表 1 阵列构型加速度计安装位置与方向

加速度计位置	安装位置矢量 [L _i] = [L _x L _y L _z] ^T	敏感方向向量 [θ _i] = [θ _x θ _y θ _z]
0 (a _{0x} , a _{0y} , a _{0z})	[0 0 0] ^T	[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]
a (a _{ax} , a _{ay} , a _{az})	[l 0 0] ^T	[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]
b (a _{bx} , a _{by} , a _{bz})	[0 l 0] ^T	[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]
c (a _{cx} , a _{cy} , a _{cz})	[0 0 l] ^T	[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]

以 a_{ay} 为例

$$a_{ay} = a_y + [\theta_y]^T([\Omega][L_a]) = a_y + [0 \ 1 \ 0]$$

$$\begin{bmatrix} -(\omega_y^2 + \omega_z^2) & \omega_x \omega_y - \alpha_z & \omega_x \omega_z + \alpha_y \\ \omega_x \omega_y + \alpha_z & -(\omega_x^2 + \omega_z^2) & \omega_y \omega_z - \alpha_x \\ \omega_x \omega_z - \alpha_y & \omega_x \omega_y + \alpha_z & -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ -0 \end{bmatrix}$$

$$= a_y + [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} -(\omega_y^2 + \omega_z^2)l \\ (\omega_x \omega_y + \alpha_z)l \\ (\omega_x \omega_z - \alpha_y)l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ -0 \end{bmatrix}$$

$$= a_y + (\omega_x \omega_y + \alpha_z)l \quad (5)$$

化简得

$$\alpha_z = \frac{a_{ay} - a_y}{l} - \omega_x \omega_y \quad (6)$$

a_{0x} 至 a_{cz} 表示为

$$\begin{cases} a_{0x} = a_x \\ a_{0y} = a_y \\ a_{0z} = a_z \\ a_{ax} = a_x + (-\omega_y^2 - \omega_z^2)l \\ a_{ay} = a_y + (\omega_x \omega_y + \alpha_z)l \\ a_{az} = a_z + (\omega_x \omega_z - \alpha_y)l \\ a_{bx} = a_x + (\omega_x \omega_y - \alpha_z)l \\ a_{by} = a_y + (-\omega_x^2 - \omega_z^2)l \\ a_{bz} = a_z + (\omega_x \omega_y + \alpha_z)l \\ a_{cx} = a_x + (\omega_x \omega_z + \alpha_y)l \\ a_{cy} = a_y + (\omega_y \omega_z - \alpha_x)l \\ a_{cz} = a_z + (-\omega_x^2 - \omega_y^2)l \end{cases} \quad (7)$$

通过消除式(7)中角速度项, 可以使用如下代数方程阵列构型的轴向线加速度及角加速度

$$\begin{cases} a_x = a_{0x} \\ a_y = a_{0y} \\ a_z = a_{0z} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{a_{0y} - a_{cy} - a_{0z} + a_{cz}}{2l} \\ \alpha_y = \frac{a_{0z} - a_{az} - a_{0x} + a_{cx}}{2l} \\ \alpha_z = \frac{a_{0x} - a_{bx} - a_{0y} + a_{ay}}{2l} \end{cases} \quad (9)$$

该方法位于 a, b, c 位置的加速度计布置可以由单向加速度替代。如果使用角加速度传感器测量角速度, 则可以直接得到角加速度, 也就是传统的六加速度计三角加速度计(6a3ω 方案)的构型方案。至此, 应用 4 只三向加速度传感器(可替代为 9 只单向加速度传感器)的阵列构型方案可以理论上实现与 6a3ω 方案相同功能, 且规避了角加速度计的工作条件限制。

表 2 列出了 6a3ω 以及本文加速度计封装方法解算路线。

表 2 6a3ω 以及本文加速度计封装方法解算路线

阵列组成	6a3ω (6 加速度计 + 3 角加速度计)	本文阵列构型 (9 单向或 4 三向 加速度计)
转换矩阵[A]	单次数值积分	两次数值积分
线加速度	代数方程	实测数值
角加速度	代数方程	代数方程
线速度	单次数值积分	单次数值积分
角速度	单次数值积分	单次数值积分
线位移	两次数值积分	两次数值积分
角位移	两次数值积分	两次数值积分

由表 2 可知, 应用 4 只三向加速度传感器的阵列构型方案 2 同样可以在理论上实现与传统 6a3ω 方案相同的功能, 且规避了角加速度计的工作条件限制, 角速度平方项可直接由加速度计测量值直接计算得到。

3 试验平台搭建与阵列构型封装

通过自行搭建三轴六自由度振动试验平台, 用来验证本文方法对六自由度振动测试的有效性。

三轴六自由度振动试验平台坐标系与实物图如图 2 与图 3 所示。依照图 4 给出的振动台面装配连杆序号, 说明其六自由度振动的实现过程。

1) x 方向轴向平移: x 方向激振器动作, 驱动 2#, 3#连杆, 同时带动位置 1#, 4#, 5#, 6#连杆小幅运动, 实现 x 方向轴向平移。

2) y 方向轴向平移: y 方向激振器动作, 驱动 1#连

杆,同时带动位置2#,3#,4#,5#,6#连杆小幅运动,实现y方向轴向平移。

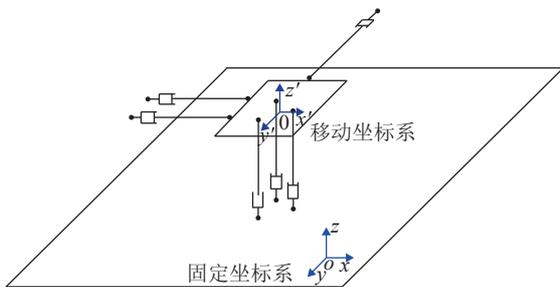


图2 三轴六自由度振动试验平台坐标系

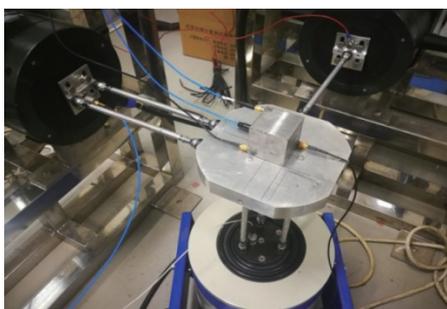


图3 三轴六自由度振动试验平台实物

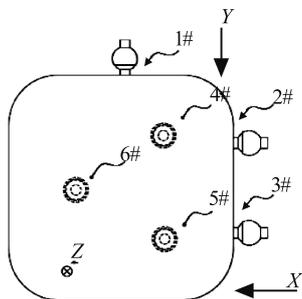


图4 振动台面装配连杆序号

3)z方向轴向平移:z方向激振器动作,驱动4#,5#,6#连杆,同时带动位置1#,2#,3#连杆小幅运动,实现z方向轴向平移。

4)x方向轴向旋转:y,z方向激振器动作,1#位置连杆驱动波形与4#,5#,6#位置连杆驱动波形有相位差,2#,3#位置连杆绕x轴做椭圆/圆周小幅运动,实现x方向轴向旋转。

5)y方向轴向旋转:x,z方向激振器动作,2#,3#位置连杆驱动波形与4#,5#,6#位置连杆驱动波形有相位差,1#位置连杆绕y轴做椭圆/圆周小幅运动,实现y方向轴向旋转。

6)z方向轴向旋转:x,y方向激振器动作,2#,3#位置连杆驱动波形与1#位置连杆驱动波形有相位差,4#,5#,6#位置连杆绕y轴做椭圆/圆周小幅运动,实现z方向轴向旋转。

封装方案如图5所示,从而建立以1只三向加速度传感器为坐标原点的0-x-y-z空间坐标系,另外4只三向加速度传感器敏感方向坐标轴方向一致,三向加速度传感器安装位置与坐标系原点距离均相等 $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6$ 。加速度计与封装工件采用粘接的封装方式,封装工件与六自由度振动台台面螺栓连接。加速度计阵列原点处加速度计尽量安装在振动传递路线上,本文安装在三轴交汇位置区域内。

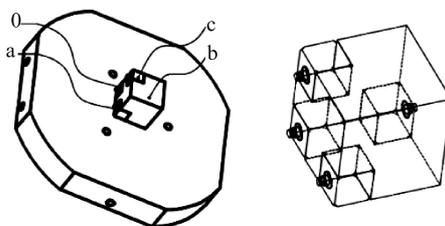


图5 三向加速度计阵列构型封装方案

4 试验验证

由于线加速度量在任何方法中都是用单向或三向加速度计直接测量,方法之间没有区别,无需验证。而本文方法着重点在于角加速度量测量时,用线加速度计代替角加速度计的可行性,因此试验目的是为验证本文加速度计阵列测试方法对角振动测试结果的准确性。验证方法采用本文方法结果与角加速度计直接测量结果对比验证的方式,若本文方法结果与直接采用角加速度计测量的结果一致,则证明本文方法的有效性。

1) 不同位置试验

使用3只角加速度计对本文方法x,y,z轴角加速度输出进行验证,每轴各1只,频率选取50 Hz,计算中滤波使用卡尔曼滤波器。

阵列构型试验所得的角加速度计算值时域波形及角加速度计同步采集波形的示意图如图6所示,但点数较密,较难以直观观察,因此截取其中一部分进行放大观察,如图7所示。可看出测试方法在不同位置测量并计算得到的时域波形与角加速度计直接测量波形基本一致,计算值与直接测量值的具体偏差数值如表3。

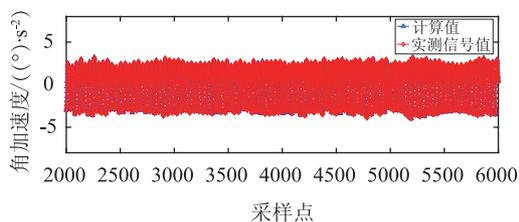
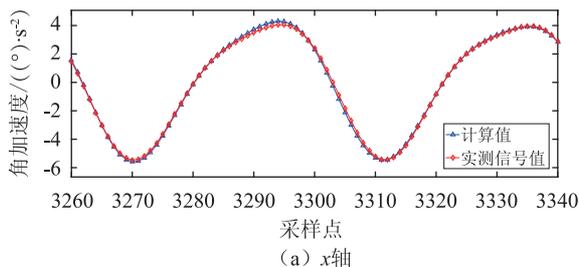
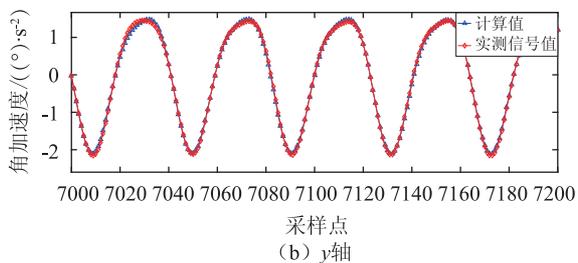


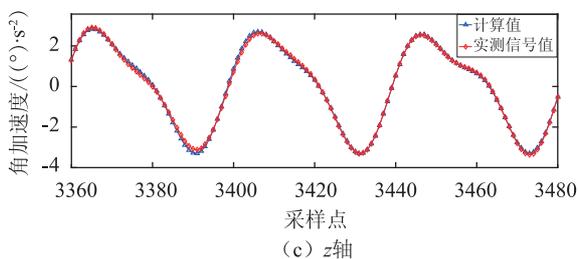
图 6 角加速度计算值时域波形及角加速度计同步采集波形示意图



(a) x轴



(b) y轴



(c) z轴

图 7 50 Hz 时不同位置角加速度计算值与实测值时域波形放大对比

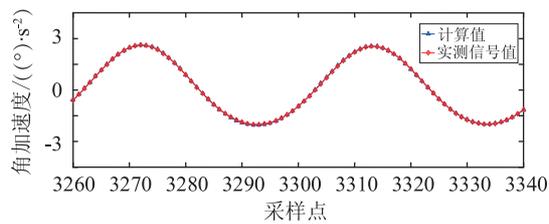
表 3 50 Hz 不同位置角加速度计算值与直接测量值的偏差

位置	绝对偏差最大值 /((°)·s ⁻²)	绝对偏差平均值 /((°)·s ⁻²)	相对偏差 最大值/%	相对偏差 平均值/%
x 轴	0.3703	0.1134	6.2	2.3
y 轴	0.1216	0.0422	6.6	2.7
z 轴	0.2182	0.0761	6.6	2.5

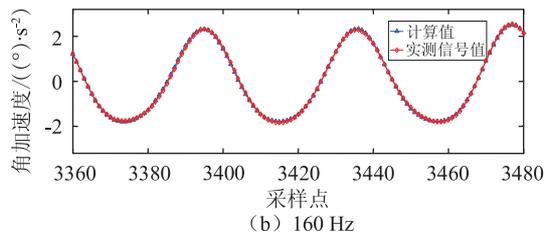
2) 不同频率试验

进一步选取 100, 160, 250 Hz 频率进行试验, 位

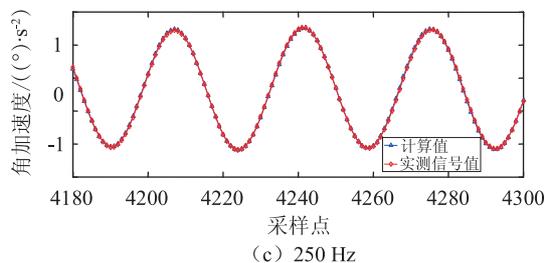
置选择 z 轴, 试验过程与数据分析步骤同上。波形放大对比如图 8 所示, 可看出不同频率下本文方法结果与直接测量的时域波形基本一致, 计算值与直接测量值的具体偏差数值如表 4。



(a) 100 Hz



(b) 160 Hz



(c) 250 Hz

图 8 z 轴不同频率角加速度计算值与实测值时域波形放大对比

表 4 z 轴不同频率角加速度计算值与直接测量值的偏差

频率 /Hz	绝对偏差最大值 /((°)·s ⁻²)	绝对偏差平均值 /((°)·s ⁻²)	相对偏差 最大值/%	相对偏差 平均值/%
50	0.2182	0.0761	6.6	2.5
100	0.1595	0.0633	5.5	1.9
160	0.1784	0.0603	6.7	2.1
250	0.1077	0.0384	5.9	2.0

5 结论

1) 提出基于 4 只三向加速度计的加速度计阵列构型, 依据六自由度运动系统方程对该构型的运动状态进行了理论推导, 建立了基于两种阵列构型的系统运动方程, 理论上实现了基于 4 只三向加速度计的阵列对六自由度振动的测试;

2) 设计了具体封装方法, 并搭建了多自由度振动试验平台, 对封装的加速度计阵列构型进行了测试试

验验证, 试验结果表明所提出的基于 4 只三向加速度计的加速度计阵列构型能够对最高 250 Hz 运动点角加速度进行测试与还原, 角加速度计算值相对与实际测量值的相对偏差平均值不超过 2.7%, 使用方便, 结果可靠, 且能够规避传统陀螺仪与角加速度计的使用限制, 能够作为多自由度振动系统的测试手段, 并期望推广应用于现场中低频振动测量或校准工作中。

参 考 文 献

[1] MIL-STD - 810G Environmental engineering considerations and laboratory tests[S]. America: United States Army, 2008.

[2] 许哲. 多轴振动台运动学及动力学分析与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[3] Kang Y S, Moorhouse K, Bolte J H. Measurement of six degrees of freedom head kinematics in impact conditions employing six accelerometers and three angular rate sensors (6aω configuration)[J]. J Biomech Eng, 2011, 133(11): 111007.

[4] Mathie M J, Coster A C F, Lovell N H, et al. Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement[J]. Physiological Measurement, 2004, 25(2): R1 - R20.

[5] Crisco Iii J J, Greenwald R M. System and method for measuring the linear and rotational acceleration of a body part : US ,

US 8554509 B2[P]. 2013.

[6] 潘栋成. 多维力传感器的信号采集与标定技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.

[7] Cardou P, Angeles J. Estimating the angular velocity of a rigid body moving in the plane from tangential and centripetal acceleration measurements[J]. Multibody System Dynamics, 2008, 19(4): 383 - 406.

[8] 汪伟, 歹英杰, 陈海龙, 等. 独立卡尔曼滤波器全加速度计复杂振动角速度解算[J]. 中国测试, 2017, 43(5): 105 - 109.

收稿日期: 2018 - 09 - 07

基金项目: 国防技术基础多轴向振动台校准技术研究 (JSJL2015205B009)

作 者 简 介

付强(1983 -), 男, 工程师, 主要从事振动与噪声计量测试等方面的研究。



人工智能已嵌入航空发动机产业全流程

人工智能(AI)是信息化时代进一步发展的新兴科技, 航空发动机则是传统工业“皇冠上的明珠”。近日, 国际发动机领军企业通用电气全球副总裁柯林·帕里斯宣称, 人工智能已经嵌入通用电气航空发动机产业全流程。

航空发动机是结构复杂的钢铁实体, 人工智能的核心则是一串串程序代码。一种名为“数字孪生”的技术可将发动机装进“计算机”, 通用电气先利用“数字孪生”技术为航空发动机构建一个数字“双胞胎”, 再与人工智能算法结合形成“智能模型”。一方面, 该模型可辅助工程师优化航空发动机设计方案: 智能“设计师”可先提供 4 - 5 个设计方案, 工程师再从中择优选择。另一方面, 该模型还能够实时预测发动机故障, 如压缩机受损或涂层腐蚀受损等, 优化发动机检测频率。

在发动机的制造上, 既可以通过智能制造技术直接提高生产速度, 例如借助机器视觉技术控制热障涂层喷涂; 又能使用智能算法优化生产线设计方案以达到最高的效率。在发动机的使用和维护上, 则使用智能算法优化航空发动机使用方案, 以最少的燃油达到最大的效率, 同时利用机器视觉技术来检测失效或断裂的部件。此外, 通用电气还研发了一种智能机器人, 用于叶片涂层的检测和修补。

帕里斯指出, 人工智能对传统航空发动机产业起到了颠覆性作用。智能检测技术将传统的发动机叶片检测时间从 20 h 缩短到 20 min, 大大节约了人力, 避免了人员操作误差。截至 2017 年, 通用电气已经进行了数百万个“数字孪生”项目, 帮助公司节约了数千万美元成本。

帕里斯表示, 新型航空发动机是未来通用电气主要聚焦领域之一, 公司计划未来 20 年在航空发动机和燃气轮机产业投资 2100 亿美元, 而积极应用人工智能技术有望给公司带来更大利润。同时, 通用电气将与英特尔、英伟达等公司深化合作, 开发新的智能软件和硬件。

(摘编自 计量测控)