

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.08

弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量单元在线校准技术研究

倪博, 翁俊, 罗晓平

(上海精密计量测试研究所, 上海 201109)

摘要: 分析研究了弱撞击式对接机构对接性能试验台在线校准技术, 针对试验台六维力测量单元工作原理和试验台结构特点, 开展试验台六维力测量单元在线校准方法研究。基于伺服电机控制器和行星丝杠结构的传力机构设计结构紧凑的高精度标准力源加载机构, 并研制轻便可控、准确定位的六分量力计量工装来解决试验台六维力在线校准中平稳施力和基准同一的技术难点, 研制六维力测量单元在线校准装置, 实现对弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量的量值溯源。

关键词: 六维力; 在线校准; 标准力源; 六分量力计量工装

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0031-05

Study of In-situ Calibration of Six-dimension Force Measurement Units for LIDM Docking Performance Test-bed

NI Bo, WENG Jun, LUO Xiaoping

(Shanghai Precision Measuring & Testing Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In this paper, in-situ calibration technology of six-dimension force measurement units for the low impact docking mechanism (LIDM) docking performance test-bed is studied. According to the working principle of the six-dimension force measurement unit and test structure characteristics of the test-bed, the research of in-situ calibration method for the measurement unit is carried out. The high-precision standard force loading mechanism is designed based on servo motor controller and force transmission mechanism of planetary screw structure, and a six-dimension force measuring tooling with portability, fine tuning and accurate positioning is built to solve the technical difficulties about smooth loading and benchmark consistency for the in-situ calibration. The research and implementation of the in-situ calibration device for the six-dimension force measurement unit can realize the traceability of six-dimension force parameter of LIDM docking performance test-bed.

Key words: six-dimension force; in-situ calibration; standard force; six-dimension force measuring tooling

0 引言

弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力传感器用来测量试验过程中对接机构进行对接碰撞时产生的多分量力, 并将测量信号经过调理后传送到数据处理系统, 根据所建立的航天器动力学模型实时解算对接过程中两航天器的相对运动, 再由驱动机构控制主、被动模拟器来模拟对接、保持、分离过程的运动情况。

因此, 六维力测量数据的准确性将直接影响到对接机构试验结果的正确性。由于弱撞击式对接机构对

接性能试验台结构复杂, 六维力测量的关键设备——六维力传感器安装定位精度要求非常高, 为保证试验台的系统特性固定不变, 传感器在一次安装后不宜轻易地重新进行拆装^[1]。因此, 为了更好地反映出弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量的准确度, 必须对试验台六维力测量单元采取在线校准, 使得六维力传感器在校准和试验时具有相同的受力条件^[2-4]。利用研制的标准力发生装置对六维力测量单元的各个分量施加标准力, 与六维力传感器的测量数据进行比较, 完成现场校准, 确保试验台测量数据的真实性。

1 试验台六维力测量单元在线校准方法研究

1.1 工作原理

弱撞击式对接机构对接性能试验台对六维力的测

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJL2014203B012)

作者简介: 倪博(1986-), 男, 上海人, 工程师, 博士, 从事力学计量与动态测试研究。

量是通过对接(性能试验台重要测量元器件之一的)压电式六维力传感器来实现的,六维力传感器能实时将对接机构对接与分离全过程中的力信息转化为相应的电荷量进行输出,经电荷放大器调理放大转化为电压输出,由主动件控制单元进行 A/D 转换,并通过无线传输方式发射到数据处理单元进行处理与显示,结合对接机构的位姿信息,对机构的性能评判提供可靠的数据。

航天器对接过程是刚性的碰撞和连接,对接机构受力的大小和状态是相同的,因此弱撞击式对接机构对接性能试验台采用单一六维力传感器,装在主动端模拟器前端,在对接机构的后面,弱撞击式对接机构对接状态图如图 1 所示。

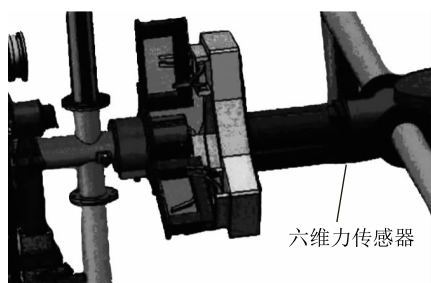


图 1 弱撞击式对接机构对接状态图

1.2 在线校准方法

弱撞击式对接机构对接性能试验台的六维力测量单元在线校准的方法是在保持测量单元的六维力传感器不移动的情况下,传感器安装原位置沿着其受力方向并借助特殊加工的计量工装安装自行研制的标准力发生装置;利用标准力发生装置采用阶梯加载方法在压电式六维力传感器的受力轴线方向施加标准力/力矩;通过比较标准力/力矩与六维力测量单元各个通道测得的数据,完成对六维力测量单元六维力传感器计量特性的在线校准。

由图 2 力值/扭矩校准时标准力作用点示意图可知,标准力发生装置产生的标准力 F 沿着六维力传感器的定位坐标轴线施加到传感器的受力面上;标准力发生装置通过施加距离 L 且平行坐标轴线的标准力完成对六维力传感器各个方向标准力矩的加载。标准力矩的值 $M = F \times L$ 。

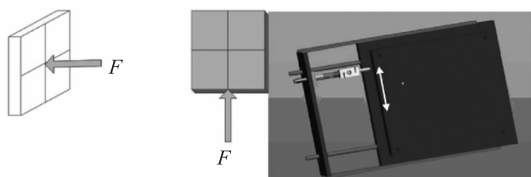


图 2 力值/扭矩校准时标准力作用点示意图

为简化校准装置,采用标准力/力矩与被校传感器测量数据比对的测量方法,对试验台六维力传感器的每一个分量进行单独校准。利用研制的标准力发生装置安装在被校准的六维力测量单元的受力轴线方向,采用阶梯式驻点加力的手段进行标准力/力矩加载,同时,记录标准力发生装置产生的标准值和六维力传感器的测量数据。当某个方向的全部校准点完成后,将标准力发生装置调整到另一个受力轴线,并重复上述步骤进行校准,直到完成全部分量的力/力矩的校准^[5]。

在线校准原理框图如图 3 所示。校准时,标准力发生装置能够产生一定的推力传递到前端的标准力传感器,并最终传递到六维力传感器上,标准力传感器可以准确读取标准力发生装置产生的力值,并以此作为标准值,与被校的六维力传感器测量数据进行比对,从而完成对试验台六维力测量单元沿 X, Y, Z 轴三个方向的力值和绕 X, Y, Z 轴三个方向的扭矩测量数据的校准。

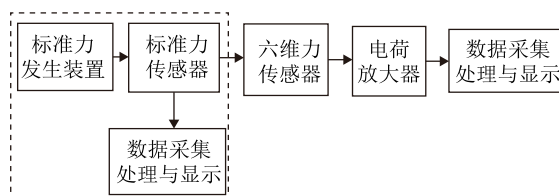


图 3 在线校准原理框图

2 试验台六维力测量单元在线校准装置研制

用于弱撞击式对接机构对接性能试验台的六维力在线校准装置由测量单元(标准传感器和测量系统)、标准力发生装置、六分量力计量工装组成,采用叠加式加载方式,通过加载机构将力作用在标准力传感器和被校准力传感器上。在力值校准时,以标准力传感器的输出作为标准,与试验台测得的力相比较,得到试验台六维力测量系统各个方向力值测量准确度。在扭矩校准时,以标准力传感器测量的力值乘已知臂长得到的力矩量值为标准,与试验台测到的扭矩值相比较。

2.1 研制在线校准装置的标准力发生装置

弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量范围纵向横向最大均为 5000 N,并不是很大,因此研制标准力发生装置采用内置行星齿轮螺旋丝杆组件和电动机组合的方案,可以做到体积小、重量轻,满足在弱撞击式对接机构对接性能试验台特殊结构下的六维

力参数在线校准需求。

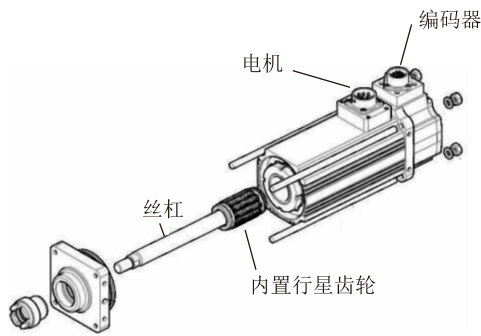


图 4 伺服电动缸结构示意图

2.2 研制在线校准装置测量单元

六维力在线校准装置测量单元由标准力传感器和多通道高精度测量仪组成。配合加载机构和相应的结构框架组成整个六维力测量单元在线校准装置。多通道高精度测量仪采集 X 、 Y 、 Z 各个方向的标准力传感器输出的测量信号，调理并显示测量结果。多通道高精度测量仪由德国的控制器和高精度调理模块组成，如图 5 所示。为更好的进行电机伺服控制，控制器采用工业用紧凑型 PC 控制器，并采用基于 EtherCAT 的现场总线模式。

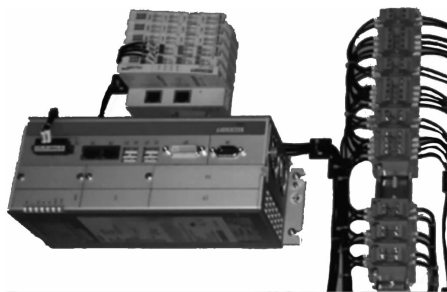


图 5 多通道高精度测量仪

加载过程中，通过控制器控制伺服电机驱动器，驱动伺服电动缸后端的伺服电机转动，通过伺服电机带动丝杠转动，结合内置行星齿轮的螺旋丝杆将旋转运动转化为直线平动，通过安装在丝杆前端的标准力传感器对六维力传感器加力，基于高精度信号调理模块对标准力传感器得到的力值信号进行反馈控制来实现对加载速度的精确控制，从而实现对六维力传感器安全平稳地施加负载。

2.3 研制在线校准装置计量工装

对六维力测量单元的六分量力参数进行在线校准，必须确保校准过程中的“基准同一”，即确保被校的六维力传感器的坐标系轴线基准与施加标准力/力矩的坐标系轴线基准重合。如果不能保证在线校准的“基准同

一”（即坐标轴线倾斜不重合），会在校准中产生一定的分力，引起较大的校准误差。由于弱撞击式对接机构对接性能试验台的六维力传感器安装在主动模拟器的对接机构安装法兰后面，看不见其工作面，侧面的可操作空间也较狭小，如何将标准力正确施加到六维力传感器各个受力轴线上成为在线校准要研究解决的技术难点。

针对弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力传感器的实际安装状态，根据试验台本身的特点和弱撞击式对接机构对接性能试验台结构与接口特点，设计研制了与之配套的带有微调机构的校准装置计量工装。计量工装是校准装置的一个重要组成部分，安装在弱撞击式对接机构对接性能试验台主动飞行模拟器上，在结构上与试验台相连接，三个加载机构安装在计量工装上分别对准试验台六维力传感器的 X 、 Y 、 Z 三个受力方向^[6]，通过工装的加工精度和微调功能使得标准力发生装置的施力方向与被校六维力传感器各个坐标轴线保持一致，从而实现在线校准。

X 向力加载示意图如图 6 所示。首先，将 2 个支撑架固定在六维力传感器安装基座上；然后，将 X 向加载板固定在支撑架上；接着，将定位球设置在六维力传感器测量中心上；最后，将 10 kN 加载测量系统设置在 X 向计量工装加载板上，并通过伺服电动缸向定位球施加作用力，实现对六维力传感器 X 向力的在线校准。

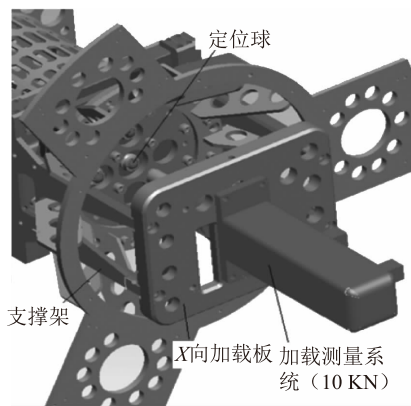


图 6 X 向力加载

Y/Z 向力矩加载示意图如图 7 所示。首先，将 2 个支撑架固定在六维力传感器安装基座上；然后，将 X 向加载板固定在支撑架上；接着，将定位球设置在 Z/Y 方向距六维力传感器测量中心 70 mm 的测量点上；最后，将 10 kN 加载测量系统设置在 X 向计量工装加载板上，并通过伺服电动缸向定位球施加作用力，实现

对六维力传感器 Y/Z 向力矩的在线校准。

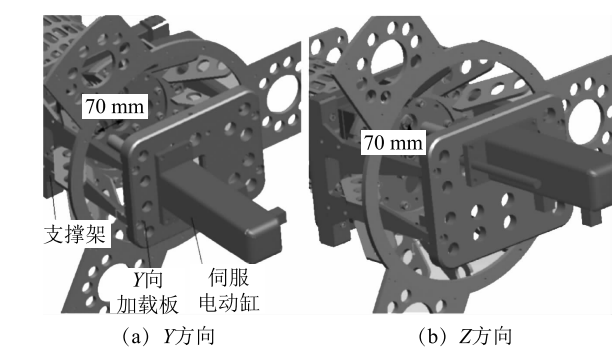


图 7 Y, Z 向力矩加载

X 向力矩加载示意图如图 8 所示。首先, 将 2 个支撑架固定在六维力传感器安装基座上; 然后, 将 Y 向加载工装固定在支撑架上; 接着, 将定位球设置在六维力传感器测量侧面中心偏距 100 mm 的位置上; 最后, 将 5 kN 加载测量系统设置在 Y 向计量工装上, 并通过伺服电动缸向定位球施加作用力, 实现对六维力传感器 X 向力矩的在线校准。

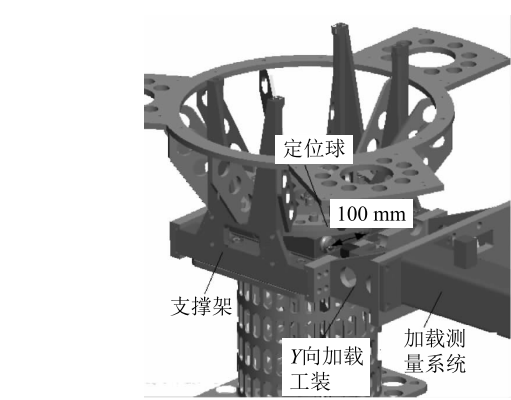


图 8 X 向力矩加载

Y/Z 向力加载示意图如图 9 所示。首先, 将 1 个支撑架固定在六维力传感器安装基座上; 然后, 将 Z 向

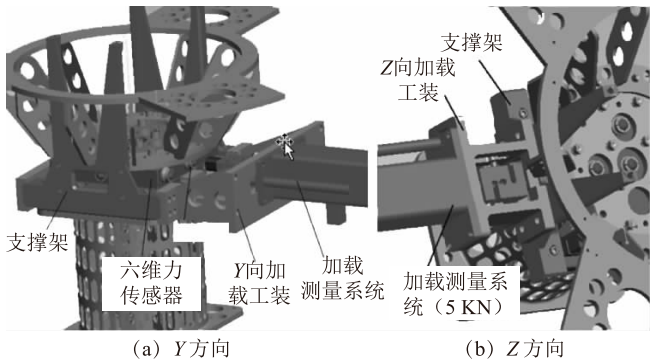


图 9 Y, Z 向力加载

加载板固定在支撑架上; 接着, 将定位球设置在六维力传感器测量侧面中心上; 最后, 将 5 kN 加载测量系统设置在 Y/Z 向计量工装上, 并通过伺服电动缸向定位球施加作用力, 实现对六维力传感器的在线校准。

3 校准装置测量不确定度评估

校准装置对力的测量不确定度主要由计量在线校准装置的力标准机的力值测量误差、在线校准装置数据显示部分的显示分辨力、校准装置由于安装等原因导致加载轴线偏差及校准装置测量重复性引入的不确定度分量组成^[1]。校准装置对扭矩的测量不确定度主要由校准装置对力的测量误差引入的不确定度分量和对力臂测量误差引入的不确定度分量组成。通过对各分量的分析计算, 汇总数据如表 1、2 所示。

根据上述评估结果, 在线校准装置的力值和扭矩的扩展不确定度分别为 0.06% 和 0.08%, 满足设计要求的不大于 0.3% 的技术指标要求。

表 1 力值测量不确定度一览表

不确定度来源	概率分布	相对标准不确定度/%
由力标准机引入的相对标准不确定度分量	$\sqrt{3}$	0.02
校准装置重复性引入相对标准不确定度分量	/	0.02
校准装置显示分辨力引入相对标准不确定度分量	$\sqrt{3}$	0.001
校准装置加载轴线偏差引入相对标准不确定度分量	$\frac{10}{3}$	0.001
合成标准不确定度	/	0.03
扩展不确定度 ($k=2$)	/	0.06

4 结论

对弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量单元在线校准方法进行了详细分析研究, 并提出多力源正交方向独立校准的解决方案, 设计出基于内置行星齿轮伺服电动缸结构的标准力发生装置, 并针对弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力测量单元的安装结构研制了与之匹配的计量校准工装, 最终建立六维力在线校准装置。通过对校准装置不确定度评估, 该校准装置结构紧凑、校准方便、准确度高, 满足了弱撞击式对接机构对接性能试验台六维力的在线校准需求, 可以开展后续的在线校准工作。

表2 扭矩测量不确定度分量一览表

不确定度来源	概率分布	相对标准 不确定度/%
校准装置力值测量引入相对标准 不确定度分量	/	0.03
力臂测量重复性引入相对标准不 确定度分量	/	0.025
数显卡尺示值误差引入的相对标 准不确定度分量	$\sqrt{3}$	0.008
数显卡尺显示分辨力引入相对标 准不确定度分量	$\sqrt{3}$	0.005
温度变化引入相对标准不确定度 分量	$\sqrt{3}$	0.0017
合成标准不确定度	/	0.04
扩展不确定度($k=2$)	/	0.08

参 考 文 献

[1] 罗晓平, 武博, 倪博. 空间对接机构缓冲试验台多分量力
在线校准技术的实现 [J]. 计测技术, 36(S1): 109 –
113, 117.

[2] 李彦刚. 压电多维力传感器的静态标定系统研究 [D].
重庆: 重庆大学, 2010: 5.

[3] 杨敏, 申飞. 一种大量程六维力传感器标定方法 [C]//第
22 届全国结构工程学术会议, 乌鲁木齐, 2013.

[4] 张众. 大载荷六维力传感器及其标定技术研究 [D]. 大连:
大连理工大学, 2011: 6.

[5] JJF 1560 – 2016 多分量力传感器校准规范 [S]. 北京: 中国
标准出版社, 2016.

[6] 赵继亮, 李洪波, 张涛, 等. 性能台六维力传感器在线校
准加载装置设计与研究 [J]. 机械与电子, 2017, 35(2):
13 – 16.

(上接第 26 页)

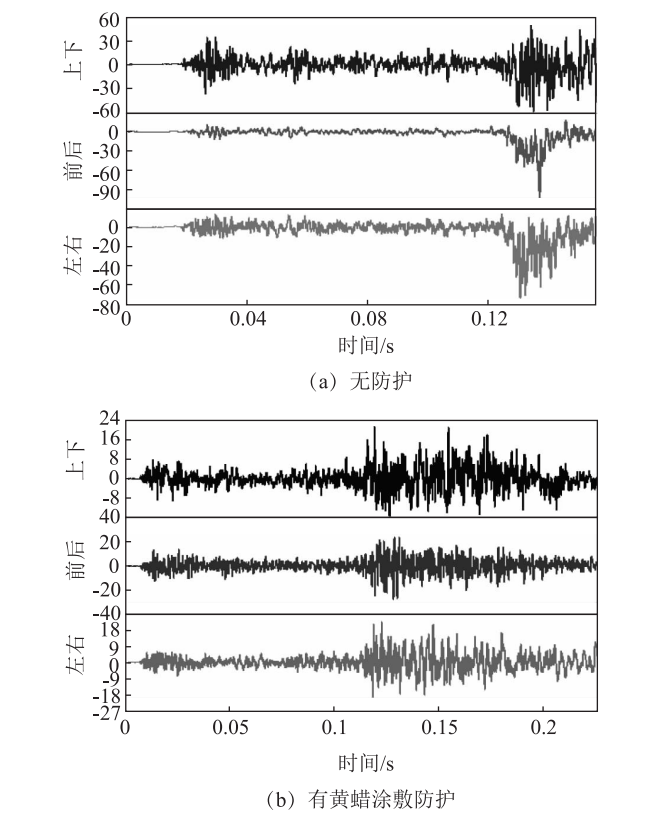


图8 有、无防护的加速度测试曲线对比

的加速度计所测得的信号与采用黄蜡涂敷防护的加速度信号，每个测点同时测量三个正交方向的加速度。虽然发射架的结构不完全一样，但对同一种型号的导弹，两组曲线在加速度量级上相差 3 ~ 4 倍，可见未防

护的加速度计所测得的信号存在很大误差。

4 结 论

通过实验室实验及靶场测试，可以得到如下结论：
暴露在高速气流中的加速度计无法真实测试其安装基座所遭受的实际振动冲击，必须对加速度计进行防护或者将其安装在设备背面，避开高速气流；应对信号线进行很好的固定防护，且线缆的固定不宜采用透明胶带，否则高速火焰气流会将透明胶带烧成一硬团挂在线缆上，增大了线缆在高速气流中的受力面积，通常会将线缆拽断；推荐使用石蜡或黄蜡对传感器防护并对线缆进行固定，其在实际使用中的效果较为理想。

参 考 文 献

[1] 高雨晶, 周新宇, 李革非. 电子产品正弦机械振动试验 [J]. 信息技术, 1995(4): 37 – 40.

[2] 季馨, 王树荣. 电子设备振动环境适应性设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 115 – 121.

[3] 杨平. 电子信息设备抗振动冲击防护理论与技术研究现状和展望 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(13): 1163 – 1170.

[4] 满强. 电子装备爆炸振动损伤模拟方法研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2007.

[5] 谢官模. 振动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 69 – 72.

[6] 张洪润. 传感器技术大全 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 734 – 806.