

电子星模在卫星控制系统闭环测试中的应用

韩慧媛, 贯 顺

(北京轩宇空间科技有限公司, 北京 100190)

摘要: 针对电子星模在控制分系统闭环测试中的摆放误差引入的问题, 提出了一种补偿计算方法; 采用静态闭环反馈的方法, 静态估计出当前电子星模摆放偏差, 软件设计补偿安装矩阵, 并动态的将该补偿安装矩阵引入到系统闭环测试中; 当电子星模摆放位置不变时, 安装偏差保持不变, 系统处于闭环测试时, 根据当前地面动力学系统实时输出的动态星敏四元数进行实时补偿计算, 使电子星模能够接收到动态变化的补偿四元数, 而不是动力学直接输出的四元数, 使得电子星模接收到补偿后的四元数, 电子星模的输出接近目标值, 闭环测试中星敏采集到准确的星图; 通过实物在闭环回路仿真验证了上述方案的有效性, 并通过与传统非补偿方法闭环测试相比较, 显示了上述方案的可行性, 为工程技术人员进行类似的工程应用提供参考。

关键词: 控制系统; 电子星模; 闭环测试; 星敏

Application of Electronic Simulator in Loop Control System

Han Huiyuan, Guan Shun

(Beijing Sunwise Space Technology Company, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to improve the placed error in closed loop test when used electronic simulator, a compensation method is introduced. It introduced static calibration method, placed error is estimated, the software designed the compensated matrix, and put compensated matrix into the dynamic closed loop test. If we don't change the place, compensated matrix is not changed. When the system was in loop control, according to dynamic system's output to compute the quaternion, it makes the electronic simulator accessed the changed compensated quaternion. This method make the star sensor sampled the accurate image. The results show that the proposed method improves the output accuracy compared with the conventional piecewise linear correction method, and provided a reference for engineers and technicians in similar application.

Keywords: control system; electronic simulator; closed loop test; star sensor

0 引言

电子星模是一种常用的信号源, 其作用是向星敏提供星图, 主要用于对星敏的各种测试中^[1], 但这里的星图并不是一成不变的, 时常要根据实际的需要进行动态变化。例如为了更加充分的对控制系统星敏在轨工作情况进行全面的测试验证, 需要采用电子星模作为星敏的动态激励源^[2], 进行卫星控制分系统闭环测试^[3], 该方法可更真实的在地面测试阶段对控制分系统星敏的工作情况进行验证^[4], 但此方法在实际应用时对产品物理安装要求苛刻, 很难保证系统的实际安装满足闭环测试条件, 而星敏又是对姿态精确测量的敏感器, 因此需要需要精确校准, 为精确实现对星敏的动态激励与采集, 需要设计旋转支架对动态星模进行精确调整, 进而控制星模输出理想星图, 由此看出, 电子星模安装摆放的位置直接影响到星敏测量输出的控制系统能否正常工作, 提高星模输出星图的准确性直接关系到控制系统中星敏的测量精度, 影响控制分系统性能指标的实现^[5]。传统的方式是通过调整支架, 对星模输出进行标定。该方法实现起来费时费力且精度不高。

本文通过静态的方式建立星模安装补偿矩阵, 并通过动态补偿的方式完成闭环测试, 比起调整支架的方式闭环测试的精度更高。首先需要静态的将电子星模的光轴和星敏的光轴调整一致, 并且保证在整个测试中物理位置摆放保持不变, 地面动力学静态的输出固定的四元数, 通过电子星模输出星图, 星敏进行采集, 并将采集到的四元数反馈给控制计算机, 通过控制计算机遥测输出的星敏四元数与地面动力学设置输出的四元数进行比对, 计算出星敏的安装偏差矩阵, 将该矩阵引入到系统闭环测试中。

试验过程中提取了相应的试验数据并进行了分析计算。该测试方法在工程应用中具有优势。

1 测试系统设计

由于星敏是一种精确姿态测量敏感器, 对动态星模的星图输出必然要求很高, 本文涉及到某型号卫星控制分系统采用三星敏进行姿态确定, 且该型号中星敏是卫星姿态确定的唯一姿态敏感器, 星敏测量姿态的准确与否直接影响到卫星在轨工作情况, 因此采用电子星模对星敏在闭环系统的工作情况进行地面验证是十分必要的。本系统引入电子星模进行控制分系统星敏引入到闭环系统中验证^[6]。

1.1 系统组成

该测试系统由星上产品三只星敏、中心控制单元计算机简称 AOCC、地面动力学测试系统以及两台套电子星模

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-04-09。

作者简介: 韩慧媛(1981-), 女, 北京人, 硕士研究生, 主要从事卫星控制分系统测试方向的研究。

组成。其中电子星模包括线路、探头和上位机。电子星模线路将星图信息和四元数信息进行匹配处理，电子星模的探头输出光轴对准星敏感光轴，光轴的同轴性可通过调整电子星模探头支架保证，电子星模探头的供电由电子星模线路提供，上位机用来接收地面动力学通过网络按照约定的协议发送的四元数信息。AOCC 计算机和星敏之间由电缆连接，AOCC 计算机实时获取当前星敏采集到的姿态信息。AOCC 和地面系统之间通过 CAN 总线交换信息，以保证地面系统实时可获取星上计算机的各种遥测状态。地面系统之间以及地面系统和动态星模上位机之间通过网络进行信息交换。地面及星上系统连接如图 1 所示。

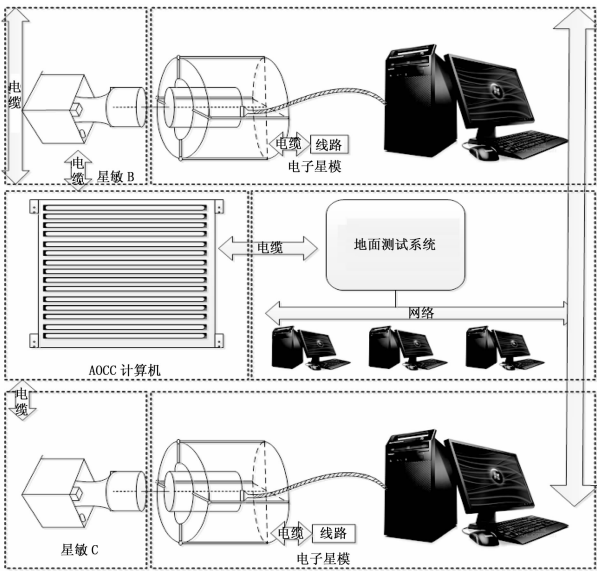


图 1 系统连接示意图

1.2 系统工作原理

地面测试系统运行实时操作系统，每个仿真周期都会模拟输出惯性四元数信息，电子星模根据输入的惯性姿态数据，实时生成与该姿态对应的星图，并将该星图转换为数字视频信号向星模探头输出，使星敏获得所需要的电子图像。地面动力学仿真周期 10 ms，每 10 ms 就会更新姿态输出数据，星敏的采样周期 200 ms，地面系统输出的姿态频率远远高于星敏采样频率，同时电子星模可为星敏提供不同工况下静态、动态图像供星敏识别，一方面可验证星敏在控制系统中工作情况，另一方面通过电子星模可模拟光学系统残差、暗电流、噪声、温度、杂光拖尾等因素的影响可验证星敏在轨工作性能^[7-8]。

2 电子星模在系统中的标定方法

星敏在控制系统应用中要对安装矩阵进行装订，地面动力学模拟星敏输出四元数也是按照预先设计的装订值进行设计输出。实际系统闭环测试时存在一个问题，动力学理论计算输出的四元数，通过网络传输给电子星模转换成电子图像，再由星敏采集计算出的四元数并不一致。主要原因是实际测试过程中星敏的摆放位置很难保证星敏的横

轴与电子星模的探头横轴完全重合，导致星敏实际采集的电子图像与理论电子图像存在角度上的偏差，因此星敏采集到的四元数存在偏差，在系统闭环测试过程中严重影响系统测量精度的实现。

如果要应用电子星模进行控制系统的闭环测试，就必须对系统内的偏差进行有效补偿。传统的方式可通过调整探头的方式，进行光轴对准，但此方法无法精确的保证光轴对准精度，为了解决此问题定义了所需要的变量，如表 1 所示。

表 1 变量表

	变量名	对应矩阵
动力学理论输出四元数	$q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]$	D_q
动力学补偿输出四元数	$q_x = [q_{x0} \quad q_{x1} \quad q_{x2} \quad q_{x3}]$	D_{q_x}
星敏输出四元数	$q_s = [q_{s0} \quad q_{s1} \quad q_{s2} \quad q_{s3}]$	D_{q_s}
偏差四元数	$\Delta q = [\Delta q_0 \quad \Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]$	$D_{\Delta q}$
四元数误差	$q_e = [q_{e0} \quad q_{e1} \quad q_{e2} \quad q_{e3}]$	D_e

鉴于计算补偿的方式具有接近理想模型^[9]且易于实现的优势，本文通过静态计算的方式实现，其中动力学理论输出四元数^[10-11]为 q ，动力学补偿输出四元数 q_x ，下面对模型的输入输出、确定模型参数、模型计算、数据的传递等具体设计进行详细介绍。

模型的输入输出。由于该模型的作用是为了计算星敏安装偏差，进而进行控制输出补偿，因而将模型设计为单输入单输出模型，其输入变量为动力学计算输出星敏理论四元数，输出变量为经过星敏采集图像计算输出的测量四元数，两者之间的差为星敏输出偏差估计值，估计值达到一定精度后，可利用该偏差估计值对控制输出进行按比例修正，即可得到理论的输出结果。

确定模型参数。设置地面动力学输出 50 组固定的惯性姿态数据 q ，通过该系统，星敏可以采集到 50 组固定的姿态数据 q_s ，每一次采集都会有对应的 Δq 产生， Δq 是电子星模输出 q 和星敏输出 q_s 之间的误差。而在实际计算时，由于每组四元数都对应着相应的转移矩阵，应用公式 (1) 可计算出 50 组四元数对应的 $D_{\Delta q}$ ，根据 $D_{\Delta q}$ 可计算输出 Δq 。

$$D_{\Delta q} = D_{q_s} / D_q \quad (1)$$

当系统的物理摆放位置不变时， Δq 的值保持不变，而在实际的试验过程当中存在采集误差、数据计算误差等被引入到系统中，这是不可避免的，因此在进行模型修正设计时，控制误差影响因子，是保证修正准确的前提条件。实际系统中计算出的 50 次样本误差值并不完全一致是由于系统存在计算误差造成的。为了提高模型的实现精度，我们将模型输出的 Δq 进行均方差计算，通过数学筛选的方式提取其中 80% 的数据，并计算出平均值作为系统的偏差矩阵。

在闭环测试中每个仿真周期内，都用偏差矩阵 $D_{\Delta q}$ 乘上动力学输出的理论值 D_q 得到 D_{q_x} ，即公式 (2)：

$$D_{q_x} = D_{\Delta q} \cdot D_q \quad (2)$$

转移矩阵 D_{qx} 推算出 q_x 。经过以上计算输出了补偿后的动态四元数 q_x 。利用该修正后的四元数可输出星图, 供星敏采集。

数据的传递。 q_x 值通过地面测试网络实时发送给电子星模控制计算机, 电子星模线路将测试计算机接收的星敏四元数实时转换成带有偏差修正的电子星图并输出, 星敏可通过电子星图识别出当前动力学输出四元数, 再通过星敏与 AOCC 的接口, 将当前四元数传递给 AOCC, AOCC 再通过遥测下传的方式, 将当前系统的姿态输出到遥测界面上, 我们通过对比转换出的姿态和地面动力学输出的姿态可确定该误差补偿的情况是否满足系统控制精度要求。

通过以上模型计算的方法可标定出地面动力学输出给电子星模的惯性姿态四元数, 经过标定后的四元数输出, 可保证星敏采集到地面动力学理论姿态四元数, 可保证卫星控制分系统地面闭环测试的精度。在星敏和电子星模探头摆放位置不变的情况下, 该补偿量不变, 系统每次加断电不需要重新进行系统标定。

3 测试软件设计

地面测试软件需要按照控制周期产生的四元数进行闭环测试, 因此要求产生的四元数满足实时性要求。以下将通过软件运行的环境, 设计实现机理, 数据流传输方向以及上位机软件的设计实现几个方面进行详细介绍。

考虑到星敏在控制系统中快速姿态确定的特点, 因此在设计地面动力学产生四元数到 AOCC 真正采集到四元数的过程要在 AOCC 的一个控制周期内完成。VxWorks 实时操作系统具有实时性好, 系统本身开销小的特点, 其进程调度、进程间通讯、中断处理等公用程序精炼而被广泛应用于各种实时性场景。VxWorks 提供多任务机制中对任务的控制采用优先抢占和轮转调度机制, 充分保证了可靠的实时性。基于 VxWorks 的以上优点, 地面测试系统运行 VxWorks 实时操作系统, 地面动力学运算每 10 ms 根据当前闭环激励, 产生一次敏感器输出。可通过上位机界面将标定后的误差四元数写入到动力学里, 动力学在每次输出四元数时自动引入误差四元数计算输出。底层软件通过网络转发的方式按照和电子星模事先约定好的协议进行数据打包发送。

网络输出四元数设计。VxWorks 内核通过设备驱动程序调用硬件网口输出, 动力学计算输出通过地址映射的方式写入网口输出缓存区。上位机软件和 VxWorks 操作系统之间通过 MultiProg 软件进行传递信息。其中 MultiProg 主要负责任务的调度、流程的实现以及相关数据的显示。VxWorks 主要负责驱动、模块的封装、算法的封装、与主控机间的通信、与数据库间的通讯。

模块算法层在 VxWorks 内运行动力学软件根据闭环系统力矩计算星敏姿态四元数的计算, 通过 Firmware 软件进行模块封装。调度层主要为与上位机软件通讯, 通过上位机写入的误差引入指令和误差四元数进行相关模块算法的

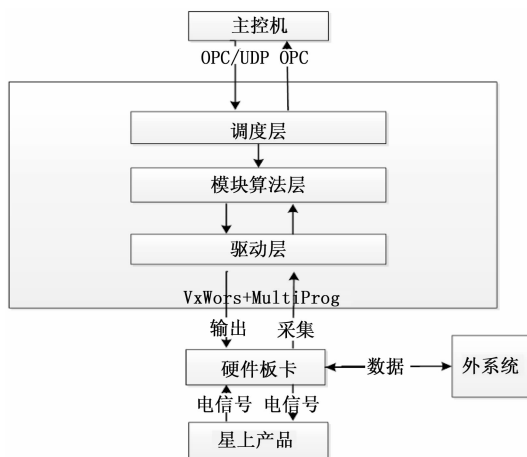


图 2 数据流图

调度。可将系统分为三层, 分别为: 驱动层、模块算法层、调度层。其中驱动层通过在 MultiProg 内对数据写内存进行写数据, 将写内存映射到 VxWorks 内, 然后再在 IO 驱动写中将数据写入到相应硬件输出口。

上位机软件界面采用 VC++ 设计, 示意图如图 3 所示, 界面上设置有开始标定按钮、计算误差四元数按钮、引入误差按钮、目标四元数、采样四元数、误差四元数。手动写入目标四元数, 通过开始标定按钮, 使系统通过总线读回星上遥测输出的采样四元数, 通过目标四元数和采样四元数计算输出误差四元数, 点击引入误差按钮, 将误差四元数写入系统动力学中。地面动力学设置有误差引入标志, 可通过上位机的引入误差按钮设置, 当该开关打开时, 误差四元数引入系统计算中, 动力学默认输出的四元数是和误差四元数组合计算后输出的四元数。最终我们通过验证此时地面动力学输出的姿态信息和星上解算出的姿态信息来验证。

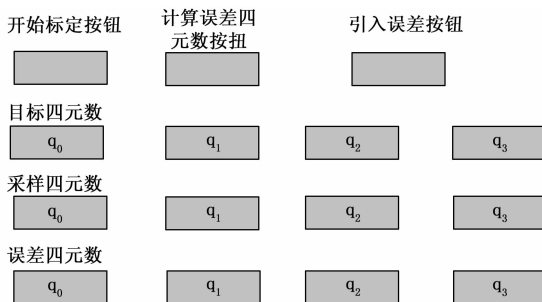


图 3 软件界面示意图

4 动态星模系统试验

在某卫星控制分系统地面测试设备中, 利用了上述模型对闭环控制系统进行静态标定, 在测试过程中截取一段时间内的地面动力学输出给星敏的理论数据和星敏采集到的姿态信息数据。

动力学设置输出 q :

$$q = [0.8426 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.4], \text{ 星敏输出 } q_s, q_s =$$

[0.8117 0.213 0.298 0.4546]，计算输出 D_{dq} ：

$$D_{dq} = \begin{bmatrix} 0.9918 & 0.1251 & -0.0266 \\ -0.1251 & 0.9921 & 0.0016 \\ 0.0266 & 0.0018 & 0.9996 \end{bmatrix}$$

将 D_{dq} 代入公式 $D_{qr} = D_{dq} \cdot D_q$ ，得到动态输出的 D_{qr} ，经 50 次标定后，对 D_{qr} 进行均值化处理，将 q_c 带入到带有电子星模的闭环测试中，如下列图所示，计算理论输出和采集的四元数之间的误差。

经过标定后采集值和理论值的误差曲线如图 4~7 所示， q_{e0} 代表动力学输出的四元数 q_0 和系统遥测输出的四元数之差，最大误差为 0.0007。 q_{e1} 代表动力学输出的四元数 q_1 和系统遥测输出的四元数之差，最大误差为 0.0006。 q_{e2} 代表动力学输出的四元数 q_2 和系统遥测输出的四元数之差，最大误差为 0.0004。 q_{e3} 代表动力学输出的四元数 q_3 和系统遥测输出的四元数之差，最大误差为 0.0004。通过误差曲线可以看出，经过标定后的星敏误差四元数的值最大为 0.0007，小于 0.07%，误差值接近于零。对于闭环测试系统姿态确定影响可忽略不计。通过以上修正方法将系统闭环测试中的误差计算出来并有效的消除，证明了该测试方法的实用性和有效性。

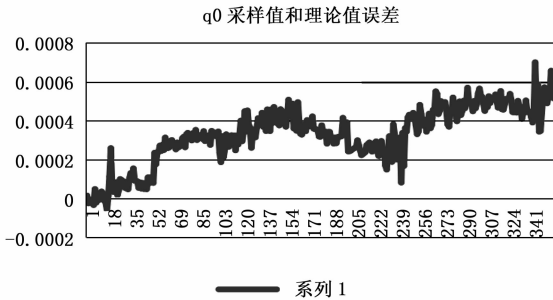


图 4 q_{e0}

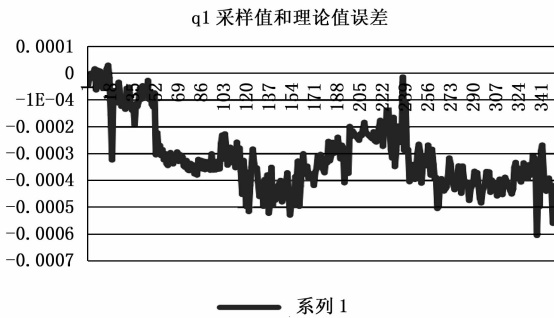


图 5 q_{e1}

5 结论

本文设计了电子星模标定数学模型，并以该模型为基础设计修正测量方法，利用模型估计出星模安装偏差，并按比例对安装偏差进行补偿。将电子星模应用于卫星控制分系统的闭环测试中，真实的在地面模拟了星敏在轨识别星图确定姿态的工作情况。消除了应用电子星模地面测试存

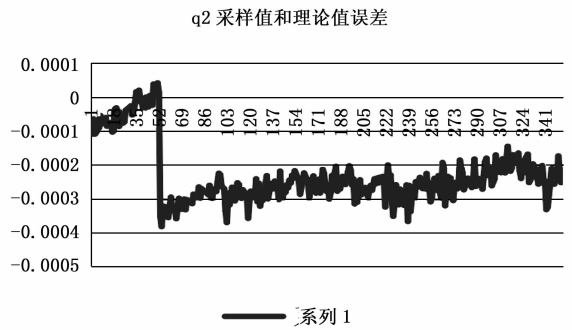


图 6 q_{e2}

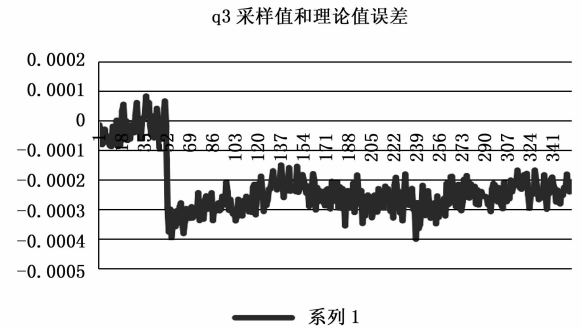


图 7 q_{e3}

在的误差，更充分验证某卫星控制系统方案的可行性提供了解决方法。该方法具有通用性，可广泛应用于控制系统闭环测试中。

参考文献：

- [1] 邢 飞，武延鹏，董 瑛，等. 微型星敏传感器实验室测试系统研究 [J]. 光学技术, 2004, 30 (6): 703-705, 709.
- [2] 孙高飞，张国玉，郑 茹，等. 星敏传感器标定方法的研究现状与发展趋势 [J]. 长春理工大学学报, 2010, 33 (4): 8-14.
- [3] 刘一武，陈义庆. 星敏传感器测量模型及其在卫星姿态确定系统中的应用 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (2): 162-167.
- [4] 杨 博，伍小洁，房建成. 一种用星敏传感器自主定位方法的精度分析 [J]. 航天控制, 2001, 19 (1): 12-16.
- [5] 鹿 瑞，武延鹏. 动态拖尾星图模拟算法研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2016, 8: 57-62.
- [6] 王健康，王雪涛，严 嵘，等. 基于 BP 神经网络的高精度陀螺恒流源补偿方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2015, 12: 47-51.
- [7] 徐明庚. 卫星姿态动力学与控制 (3) [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [8] 黄 博，马 杰，田金文. 振动模糊星图仿真技术研究 [J]. 计算机与数学工程, 2012 (4): 90-92.
- [9] 王海涌，费峥红，王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算 [J]. 光学精密工程, 2009 (17): 1673-1677.
- [10] 沈满德，张 敏，张法全. 离焦成像对面积测量的影响及误差修正 [J]. 光子学报, 2009, 38 (5): 1240-1244.
- [11] 贾晓艳，萧泽新，邓仕超. 基于聚焦评价函数的自动调焦方法的研究 [J]. 光学技术, 2007, 33 (s1): 7-9.