

新型分体式星敏感器设计及其应用

钟红军, 卢欣, 李春江, 李玉明, 李晓

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 星敏感器是当前广泛应用于航天器姿态测量的高精度光学姿态敏感器。介绍了一种新型分体式星敏感器的总体设计、应用及验证情况, 其已成功应用于科学试验、通讯及地球观测等多种卫星平台, 共有 21 套产品在轨验证。根据在轨遥测数据分析, 全面验证了其关键技术指标: 探测灵敏度 5.7 Mv、数据更新率 8 Hz、测量精度 2.6"、阳光抑制角 28°、动态性能 1(°)/s 等。新型分体式星敏感器是国际上首个在轨飞行验证并引入控制系统闭环控制的 APS 星敏感器, 根据地面测试验证结果和 20 余套产品长达两年在轨数据的全面分析, 其在轨性能与地面测试性能一致, 在轨测试结果证明产品的测量精度、鲁棒性、可用性和可靠性等主要性能满足卫星使用要求。

关键词: 新型星敏感器; 分体式; 应用

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1278-06

Design and applications of novel separated type star tracker

Zhong Hongjun, Lu Xin, Li Chunjiang, Li Yuming, Li Xiao

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: Star tracker is current widely used optical sensor in spacecraft attitude control system which produces the most accurate measurements. The overall design description, application and qualification results of a novel separated autonomous miniature star tracker were introduced. The novel separated type star tracker successfully operated in-orbit on a large variety of different satellite platforms such as scientific experiment, telecommunication and earth observation. The novel star tracker has applied in-orbit with a total of 21 sets of products up to now. According to the real time telemetry data packages under real in-orbit conditions, the main qualification features are sensitivity 5.7 Mv, update rate 8 Hz, accuracy 2.6", sun exclusion 28°, tracking slew rate 1 (°)/s. The novel separated type star tracker was the first APS based star tracker ever flown which was adopted in AOCS closed loop control. A full analysis on ground qualification campaign was carried out successfully on the novel star tracker and an in-flight qualification was also achieved, with more than two years information from 20 other star trackers on different satellites. In flight results are in accordance with results obtained from ground night sky tests. The analysis results allow an almost complete validation of star tracker major requirements: accuracy, robustness, availability and reliability.

Key words: novel star tracker; separated type; application

0 引言

近年来,随着卫星技术的迅速发展,对其定位精度的要求也越来越高,作为保证卫星高姿态精度和高姿态稳定度的姿态测量敏感器的技术研究和也越来越迫切。星敏感器是卫星姿态控制系统中的重要测量部件,也是当前广泛应用的光学姿态敏感器;它以太空中的恒星作为姿态测量的参考源,输出敏感器光轴在惯性参考系中的指向。星敏感器具有姿态确定精度高、无可动部件、可靠性高等优点,可适用于各种轨道应用;其技术要求趋于向高精度、高数据更新率、微型化、低功耗、高动态、高可靠性等方向发展。

APS 为一种新型的图像传感器,比传统的 CCD 具有更高的性价比,在星敏感器应用中有着很好的前景。基于 CCD 图像传感器的星敏感器,质量约 5 kg、功耗约 12 W、数据更新率约 5 Hz。随着微电子技术的发展,基于 CMOS 工艺的 APS 图像传感器也逐渐成熟,其具有低功耗、高耐辐照、高集成度、接口简单等优点,是星敏感器的重要发展方向,目前国内外星敏感器主要研究机构都在积极研究 APS 图像传感器的应用。

北京控制工程研究所研制的基于 APS 图像传感器的新型分体式星敏感器,质量 3.5 kg、功耗 10 W、光轴指向精度优于 $3''(3\sigma)$ 、数据更新速率优于 8 Hz。其外形实物图如图 1 所示。

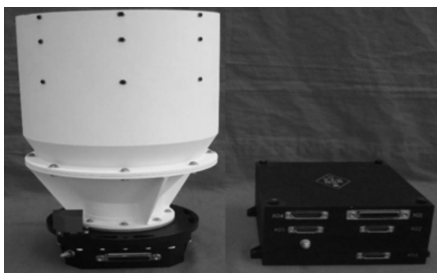


图 1 新型分体式星敏感器实物图

Fig.1 Outline of novel separated type star tracker developed by BICE

1 星敏感器工作原理及组成

星敏感器工作原理为:光学系统将恒星成像于图像传感器的光敏面上,并完成光电转换,输出模拟

信号经 AD 转换后送数据处理电路,对恒星位置进行提取,可确定视场中的恒星在星敏感器本体坐标系下的坐标和指向,利用惯性空间恒星在地心惯性坐标系下的观测矢量变化在卫星运行期间可以忽略不计的原理,将其与导航星表进行比对,完成星图识别,最终确定星敏感器光轴在惯性坐标系下的指向,并通过通讯接口将其传送到姿轨控计算机。通过星敏感器的安装矩阵,可确定卫星在惯性坐标系下的三轴姿态^[1-2]。

星敏感器系统由硬件和软件两部分组成。硬件主要由遮光罩、光学系统、机械结构、控制与数据处理电路(含二次电源电路)、图像传感器电路等构成。软件由系统软件、应用软件和星表软件三个部分组成。

2 新型分体式星敏感器技术设计

2.1 光学系统

新型分体式星敏感器光学系统总体参数为:视场 $20^\circ \times 20^\circ$ 、焦距 43.6 mm、通光孔径 36 mm、透过率 75%、弥散圆直径 15~45 μm 。

星敏感器光学系统与传统成像用光学系统不同,传统成像光学系统主要以 MTF 作为评价系统好坏的标准,而星敏感器光学系统属于定位系统(或角距测量系统),光学系统要保证星像在图像探测器上有一定的位置精度,并以弥散圆作为评价的基准,为了保证星像能量均匀性以及内插求中心的精度,要求弥散圆占 $2 \times 2 \sim 4 \times 4$ 个 APS 像元。另外须考虑并校正引起像点中心位置偏移和能量扩散不对称的像差,同时为了控制弥散圆范围,需校正色差、球差、像散、场曲等。

考虑轻量化要求,新型星敏感器光学系统采用双高斯对称型结构型式,对称结构可使垂轴像差如彗差、倍率色差、畸变得自动校正,轴向像差为半部的两倍。光学系统由 8 片组成,无胶合面,第一片透镜采用石英材料,以提高光学系统抑制空间辐照能力。

2.2 整机结构

星敏感器整机结构主要包括一体化结构和分体式结构两种。一体化结构优点为:结构紧凑,光学头部与处理电路距离近,可以避免信号通过长线传输带来的干扰;但需克服电磁兼容性及元器件等级要求高等问题。分体式结构优点为:由于光学探头与处理电路的分离,电磁兼容性问题不突出和线路盒元

器件等级要求低; 缺点为不利于减小星敏感器整机的体积质量急需克服长线传输给信号造成的干扰。

新型星敏感器采用分体式结构, 由 APS 探头和数据处理线路盒两部分组成。探头结构包含热敏电阻、致冷器、安装法兰盘、基准镜、光学系统等组件, 同时还需考虑地面试验用的吹氮进出气口、装配调试、加工装配精度等设计约束条件。线路盒结构采取四层插装结构, 方便调试和装配, 模块间的连接均设计搭接口, 提高搭接电阻、降低电磁泄漏和电磁干扰; 采用“顶丝”方式实现模块间拆卸。同时为了最小化整机的体积和质量, 整机所有内外接插件均采用小型化接插件, 无需焊线。探头与线路盒数据传输采用 LVDS 差分格式, 提高信号长线传输的抗干扰能力。

2.3 电路设计

2.3.1 APS 图像传感器电路设计

选用 Star1000 作为星敏感器的成像器件, 其具有较高抗辐照能力, 可适应复杂的空间环境, 可任意地址任意像元输出^[3]。采用高耐辐照 ASIC 生成 APS 驱动时序及控制信号。图像采集电路接收并存储 APS 输出的原始图像信息, 并完成存储器控制逻辑、星时计数、模拟量遥测 AD 转换、LVDS 星图发送及接收等功能。为了增加星敏感器的适应能力, 设置了 APS 积分时间 125~500 ms 可调。

充分考虑星敏感器积分时间、星图存储时间、观测星提取匹配时间、数据通讯时间等时间的并行关系, 合理安排流水线操作方式和深度, 确定了“三级流水”的设计方法, 采用光积分、图像存储、星图处理并行处理机制, 使星敏感器数据更新率达到 8 Hz。

2.3.2 高速数据处理电路设计

由于必须实时处理大量图像信息并完成高精度快速浮点运算, 因此选择基于 SPARC V7 高性能 RISC 作为图像数据处理器。其最大指令执行速度为 20 MIPS, 最大浮点处理速度为 5 MFLOPS。该 RISC 芯片具有较强的抗辐射能力, 同时具有 EDAC 和奇偶校验功能。

采用冗余备份软硬件设计方法, 星敏感器系统软件置于小容量、高耐辐照 PROM, 包括上电初始化、通讯协议等内容, 应用软件和星表置于大容量 EEPROM 中, 采用两片同容量 EEPROM 互为热备份; 加电初始化时将程序加载到高耐辐照的 SRAM 中运行, 提高数据处理速度, 同时在硬件上将大容量

SRAM 等量分为两部分, 互为备份, 提高可靠性。合理设计在轨数据下传和注入流程, 首次实现星敏感器在轨数据注入功能, 提高了星敏感器在轨可维护性和长寿命。

为了降低 APS 在较高温度时的输出噪声, 采用半导体致冷器方案, 稳定维持 APS 温度在 15℃左右, 扩大了星敏感器工作的温度范围、提高姿态精度和可靠性。线路盒内部设计有二次电源电路, 将一次电源电压转换为适合星敏感器线路工作的各种二次电源电压, 二次电源设计有过流保护电路、浪涌抑制电路、输入滤波电路、DC/DC 变换电路、输出稳压电路等。

2.4 算法及软件

由于星敏感器在整机轻小型化的同时, 需满足太阳光、地球散射光、星体杂散光等抑制要求, 需满足月亮进入视场后星敏正常工作的要求, 同时考虑处理算法鲁棒性要求等因素, 使星敏感器数据处理算法面临较多难点。

2.4.1 星图分区处理方法

由于 APS 图像噪声和杂光干扰等影响, 难以保证星图均匀背景。为了降低噪声及杂光对探测灵敏度的影响, 设计了星图分区计算其特性参数的方法。将整幅星图分为 A、B、C 三个区, 对各区图像分别计算背景均值和阈值, 可降低噪声影响, 提高视场各区域的灵敏度, 同时可提高星敏感器抗杂光干扰能力。

2.4.2 杂光抑制算法

星敏感器小型化使遮光罩尺寸受到约束, 整机杂光抑制能力需要通过杂光抑制算法来保证和提高^[4]。

通过星图杂光抑制算法消除杂散光引起的干扰, 在应用软件中进行数字图像滤波处理, 通过滤波将含有目标信息的像元从背景噪声中分离出来。新型分体式星敏感器采用一种新型数字滤波图像处理算法, 对非均匀杂光进行自主滤波, 处理得到背景均匀的图像, 该算法可根据像元位置及灰度的变化而自行调整滤波参数。在窗口跟踪模式下, 设计了小窗口计算局部阈值的算法, 避免因全图灰度出现梯度差异导致的阈值偏高的现象, 从而更有效地提取当前窗口的星点。

2.4.3 跟踪窗口预报算法

根据前两次姿态结果, 预估星敏感器在下一光积分中心时刻的姿态。根据此预估姿态搜索导航星

表,找到下一时刻应出现在视场中的导航星,并计算出其位置坐标。再依据这些坐标,在星图内选取若干窗口,在选定窗口内进行星点提取,计算每一颗被提取观测星能量重心的成像平面坐标。此算法在飞行器大角速度机动时,可大幅减少星图窗口存储及处理区域^[5-6]。

2.4.4 动态自适应和快速响应算法

星敏传感器以较高角速率运动旋转时,恒星在图像传感器上所成的星点图像拉长为细条状,即存在“拖尾”现象,星点的能量散布在较多的像元,导致星点变得模糊,信噪比降低,影响星敏传感器的探测灵敏度,并在一定程度上降低其精度和姿态有效率,有时甚至无法进行星点跟踪和姿态输出^[7]。

新型分体式星敏传感器设计了基于窗口的动态自适应算法。利用先验信息滤波预估当前帧角速度,以每个预测星点为中心,对窗口内星点进行信号能量增强,将被拉长的星点轨迹修正为均匀星点,提高星点信噪比,提高星敏传感器的动态条件下的探测及跟踪能力。

设计了适应更高角速度需求的快速响应算法,在快速机动过程中,利用卫星先验姿态等信息,使星敏传感器持续工作在窗口跟踪模式,并采用“大窗口-小窗口”星点提取相结合的算法,当机动结束时,星敏能快速持续输出有效姿态数据,有效提高机动过程中的姿态有效率,在姿态机动结束后可快速输出有效姿态。

2.5 星敏传感器测试标定

标定是对星敏传感器内部各种参数的估计,能有效减小星敏传感器系统误差,提高姿态输出精度^[8-9]。通常,光学系统视场越大其标定的误差也越大,新型分体式星敏传感器的视场为 20° ,要保证高的标定及测量精度,且需满足标定函数形式简单和运算速度快等要求,实现难度较大。在新型分体式星敏传感器标定试验中,采用高精度转台、单星模拟器及平行光管进行测试,并根据最优理论,设计了一种高精度误差校正标定模型,最终得到星点像面坐标与星光入射矢量之间的关系函数。经实测,星敏传感器的像面标定精度优于 $3''$ 。

研制了静态星模拟器、动态星模拟器、电子星图模拟器、杂光测试系统、图像采集分析系统、精密三轴转台、两轴摇摆试验台等试验设备,构建了新型分

体式星敏传感器的地面仿真测试验证系统。完成了精度测试、动态性能测试、杂光性能测试、处理时间测试、星图传输及性能测试等一系列测试,完成了星敏传感器在GNC分系统及整星中的各种综合测试。

3 在轨测试验证结果

2011年9月25日,新型分体式星敏传感器在轨加电工作,目前已成功应用于科学试验、通讯、地球观测、深空探测等多种卫星平台,截至2014年3月,已在轨验证21套产品,在轨无故障飞行时间达23周年,2014年将另有30余套产品在轨验证。对各产品在轨遥测数据进行分析,全面验证其主要技术指标。

3.1 探测灵敏度

通过测控弧段下传星点数据,对下传遥测包中星点信息与导航星信息进行分析,根据识别的导航星序号在星表中查找出该导航星星等,所有识别导航星中星等的最大值即为星敏传感器的探测灵敏度。

对125ms积分时间下的在轨星点数据进行统计,得到视场内识别的导航星及其星等信息如图2所示。

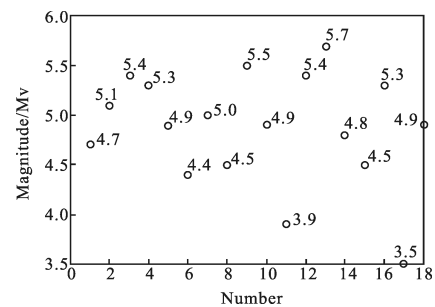


图2 星敏传感器视场内导航星星等信息

Fig.2 Magnitude of guide star in FOV of star tracker

由图2可以看出,视场内已识别导航星为18颗,且识别的导航星星等的最大值为5.7,即新型分体式星敏传感器的灵敏度达到5.7等,优于5.5等指标要求。另外上述数据仅分析了已识别恒星的最高灵敏度,由于下传通道原因未下传实际星图,新型分体式星敏传感器的实际灵敏度应比5.7等更高。

3.2 测量精度

由于没有更高精度的姿态参照基准且受平台运动等诸多因素的影响,星敏传感器在轨绝对测量精度无法直接获得,因此采用内符合法和互比对法对星

传感器在轨精度进行半定量评估。

内符合法对多轨星传感器光轴指向采用滑动窗口三次多项式拟合法获取其光轴指向拟合曲线,利用 3σ 原则剔除野值后,统计星传感器光轴指向测量曲线相对于拟合曲线的标准差。

互比对法获取同时段新型分体式星传感器与同卫星平台德国引进星传感器和其他国产 CCD 星传感器光轴指向的夹角,对星传感器进行岁差、章动和光行差修正,利用 3σ 原则剔除野值后,统计夹角误差及其相对于其趋势项的标准差。

星传感器测量精度的数据分析由卫星总体单位委托第三方高校负责完成,新型分体式星传感器在轨测量精度结果对比表如表 1 所示。

表 1 在轨测量精度结果对比表

Tab.1 Comparison table of accuracy in-orbit

Technical performance	Requirements	Comprehensive comparison results in-orbit	
Accuracy	3"	Novel separated APS star tracker	2.62"
		Coincidence method Jena ASTRO10 star tracker	5.61"
		Domestic CCD star tracker	8.78"
		APS - ASTRO10	4.16"
		Mutual alignment method APS-CCD	6.99"
		CCD - ASTRO10	7.23"

由表 1 可知,新型分体式星传感器的测量精度指标达到 2.62", 优于进口产品(其精度标称值为 5")。

3.3 杂光抑制角

根据轨道信息推算出星传感器光轴指向和太阳方向矢量的夹角,对卫星采取相应的机动,根据不同太阳抑制角下星传感器的姿态数据有效性,来判断杂光抑制角是否满足指标要求。

阳光入射角从 $41^\circ \sim 24.5^\circ$ 变化时星敏输出的姿态四元素变化情况如图 3 所示。

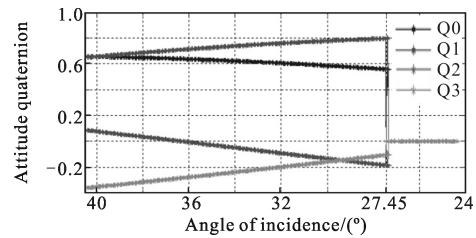


图 3 姿态四元素随阳光入射角变化($41^\circ \sim 24.5^\circ$)

Fig.3 Curves between data of attitude and angle of incidence (angle of incidence $41^\circ \sim 24.5^\circ$)

根据阳光入射角变化时,由星传感器输出的姿态数据有效性和姿态四元素可知,新型分体式星传感器的杂光抑制角为 27.5° , 优于 38° 的总体指标要求。

3.4 动态性能

星传感器的动态性能由其极限姿态输出角速度表征,定义为 APS 星传感器能成功输出姿态的最大允许角速度。动态性能主要由灵敏度、视场、积分时间、识别算法软件等共同决定。

为了进一步提高星传感器的动态性能,在 APS 图像探测器的标准配置电路基础上进行了设计改进,提高探测器复位效果,并通过采取积分时间自适应调整等手段,减小动态星点“拖尾”,提高动态情况下信噪比,从而提升星传感器动态性能。

在轨测试方法为:控制卫星在轨姿态机动,进行多次扫描,积累某一扫描速度下星传感器的试验数据,统计姿态数据有效率,判断动态指标是否满足要求。

经测试统计,新型分体式星传感器动态性能可达 $1^\circ/\text{s}$, 优于 $0.6^\circ/\text{s}$ 的设计要求。

3.5 初始捕获时间

初始捕获时间是星传感器响应通讯指令和全天恒星识别速度的综合反映,是指星传感器开始响应通讯指令至第一次输出姿态四元素的时间间隔。初始捕获时间由积分时间、像元读出频率、图像传感器像元数、CPU 数据处理能力、识别算法等因素共同决定。

记录星传感器开机加电时刻和第一次有效姿态输出时刻的控制计算机星时,计算可得新型分体式星传感器的全天捕获时间为 5s, 优于 10s 的指标要求。

3.6 数据有效率

数据有效率用于评估星传感器在轨数据稳定性。根据姿态四元素及数据有效性状态字,对长时段内星传感器输出姿态数据有效率进行统计,数据

有效率为姿态有效的采样点除以采样点总数。

以姿态四元素中的 Q_0 为例,新型分体式星传感器姿态输出四元素如图 4 所示。

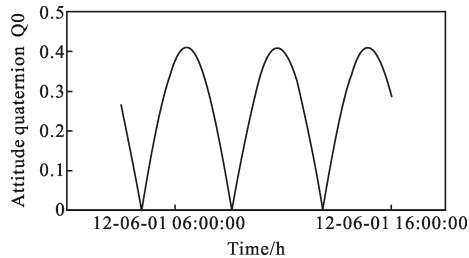


图 4 星传感器输出姿态四元素

Fig.4 Data of attitude of star tracker

经过长时间在轨数据分析,新型分体式星传感器的姿态有效率达 100%。当月亮进入视场时,星传感器仍可正常输出姿态,姿态有效率无明显下降。

4 结论

新型分体式星传感器是北京控制工程研究所的重点攻关项目之一,同时也是国际上首个在轨飞行验证并引入航天器控制系统闭环的 APS 星传感器。根据不同轨道、多颗卫星的遥测数据显示,新型分体式星传感器在轨工作正常,实现了预期的功能和性能。

新型分体式星传感器的成功研制和应用,极大地提高了我国星传感器的研制水平,将星传感器精度、杂光抑制角、数据更新率、工作寿命等关键指标提升到了一个新的台阶,达到了国际先进水平,有效填补国内目前卫星用长寿命、高精度星传感器产品的空白,实现了我国航天控制技术领域的又一重大突破。

参考文献:

- [1] Tu Shancheng. Attitude Dynamics and Control of Satellite(3) [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2003: 122-183. (in Chinese)
屠善澄. 卫星姿态动力学与控制(3) [M]. 北京: 宇航出版社, 2003, 122-183.
- [2] Liebe C C. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [3] Liebe C C, Dennison E, Hancock B, et al. Active Pixel Sensor(APS) based star tracker[J]. *IEEE*, 1998: 119-127.
- [4] Tang Yong, Lu xin, Hao Yuncai. Suppression and analysis of stray light in a star sensor [J]. *Aerospace Control*, 2004, 22(3): 58-61. (in Chinese)
唐勇, 卢欣, 郝云彩. 星传感器杂光抑制分析 [J]. 航天控制, 2004, 22(3): 58-61.
- [5] Li Baohua, Chen Xijun, Zheng Xunjiang, et al. Autonomous star tracking algorithm with high dynamic spacecraft [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 190-195. (in Chinese)
李葆华, 陈希军, 郑循江, 等. 星传感器高动态下自主星跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 190-195.
- [6] Jiang Jie, Zhang Guangjun, Li Xiao, et al. A fast star tracking algorithm for star sensor [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2006, 27(5): 913-916. (in Chinese)
江洁, 张广军, 李霄, 等. 一种快速的星传感器星跟踪方法研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 913-916.
- [7] Jin Yan, Jiang Jie, Zhang Guangjun. Star extraction method for high dynamic star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2281-2285. (in Chinese)
金雁, 江洁, 张广军. 高动态星体目标提取方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2281-2285.
- [8] Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration Method of Star Sensor[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(5): 1343-1348. (in Chinese)
钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星传感器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1343-1348.
- [9] Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Calibration of high-accuracy star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2779-2784. (in Chinese)
乔培玉, 何昕, 魏仲慧, 等. 高精度星传感器的标定[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2779-2784.