

一种星敏感器光学系统标定与引建的新方法

唐 君,李 伟,徐轩彬

(海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

摘 要: 星敏感器以星体映射在 CCD 像平面上的坐标作为输入信号,信号精度受到光学系统固有误差与 CCD 像平面安装误差的综合影响。基于恒星参考系的星敏感器光学系统标定与引建方法,无需转台与星模拟器等大型昂贵设备支撑,以天体信标于观测历元时的精确赤道坐标为基础依据,创新性地将星敏感器不可避免的 CCD 像平面安装误差问题,糅合至光学系统标定过程进行解决,应用简单、方便,经试验验证:标定与引建精度能够达到角秒量级。

关键词: 标定; 引建; 星敏感器; 恒星参考系; 坐标

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1610-06

New method of star sensor's calibration and leading building

Tang Jun, Li Wei, Xu Xuanbin

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: The coordinates on the CCD image plane is regarded as star sensor's input signals. The accuracy of the inputs is affected by the inherent errors of the optical system and the CCD installation error. The method of star sensor's calibration and leading building was based on star reference frame, and it didn't depend on large expensive equipment such as swivel table and star simulator. Based on the precise celestial equator coordinates of the star observing, this method had solved the problem of the CCD installation error and made it to be a part of the optical system calibration. In a word, it is a simple and efficient method about calibration and leading building. Above all, experimental results and analysis show that the method is able to achieve the high accuracy to arc second scale.

Key words: calibration; leading building; star sensor; star reference frame; coordinate

收稿日期:2014-09-10; 修订日期:2014-10-15

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAH36B03);海军大连舰艇学院科研发展基金

作者简介:唐君(1983-),男,讲师,硕士,主要从事天文导航方面的研究。Email: tjdegree@163.com

0 引言

星敏传感器通过光学系统获取观测数据,它的有效输入信号是自然星体在 CCD 平面上呈现的像平面坐标 (x_i, y_i) ^[1],其精度不可避免地受到光学系统固有误差的影响,必须进行标定校正。另外,星敏传感器的输出信号为 CCD 平面相对于地平坐标系的三轴姿态信息^[2],如要获得与星敏传感器相固联的载体姿态,就必须实现 CCD 平面到星敏传感器测量基座平面的转换,即星敏传感器 CCD 平面的引建。目前,国内星敏传感器光学系统的标定与引建过程,主要是在实验室内利用高精度转台与星模拟器来实现。显然,该方法的精度取决于转台的稳定度与星模拟器的精度,对硬件要求较高,标定设备造价昂贵,并且国内的星模拟器精度较低,国外对国内出口限制,因此,目前国内星敏传感器室内标定精度难以达到国际水准。此外,实验室标定无法考虑大气折光的影响,但这在星敏传感器近地面使用的情况下是客观存在的。

文中提出并实现一种基于恒星参考系的高精度星敏传感器光学系统标定与 CCD 平面引建方法。恒星参考系是目前唯一可测的惯性参考系,星体在天球惯性参考系下的坐标精度优于 $0.1''$,恒星视角径几乎为 $0(<0.01'')$,星光是最理想的平行光源,且覆盖整个地球,这是在地面人工条件下难以实现的。

1 标定方法与标定模型

1.1 基准坐标系的建立

星敏传感器光学系统标定首先要建立标定基准坐标系。如图 1 所示,星敏传感器的光学系统以心射切面投影方式将天球的一部分,即星敏传感器视场范围内的星空投影到 CCD 平面上。 C 是镜头中心,镜头光轴与天球相交于点 T ,与 CCD 平面相交于点 O ,过 T 点作切平面, M 是切点附近的一颗恒星,在切平面上的投影为 N ,在 CCD 平面的投影为 S ,显然, $\triangle OCS$ 和 $\triangle TCN$ 相似。通常认为天球为单位球,即天球半径 r 为 1。在切平面上,以 T 为原点建立平面直角坐标系 $\mu T\nu$, ν 轴指向天北极,赤纬增加的方向; μ 轴指向赤经增加的方向, $\mu T\nu$ 就是标定的基准坐标系。星敏传感器摄取星空图像,经处理获得星体在像平面坐标系中坐标 (x_i, y_i) ,该坐标即是标定的实测数据,包含

了光学系统的固有误差;而星体的基准坐标 (μ_i, ν_i) 是由该星体在天球惯性坐标系(即恒星参考系)下的坐标变换而来,能够计算获取,且精度优于 $0.1''$,是非常理想的标定的基准数据。

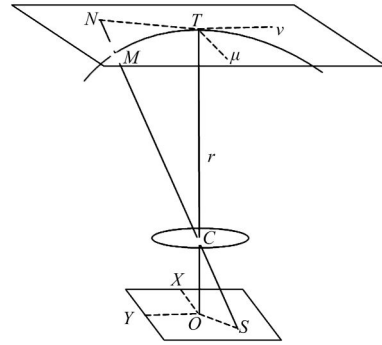


图 1 基准坐标系的建立

Fig.1 Established of reference coordinate system

1.2 标定基准数据的获取

星敏传感器任意视轴指向摄取一帧星空图像,对该星图进行星体辨识处理与视位置计算^[4],能够获得星图中各星体在观测历元时准确的赤道坐标^[5] $(\alpha_i, \delta_i)(i=1 \dots n$ 为天体序号)。但是,赤道坐标是一种球面坐标,而基准坐标为平面坐标,因此必须进行转换。

如图 2 所示, $O-XYZ$ 为赤道直角坐标系,原点 O 位于地心, X 轴指向春分点, Z 轴垂直于天赤道指向天北极, Y 轴在赤道面上,与 X, Z 轴构成右手直角坐标系。 T 为星敏传感器视场光轴与天球的交点,设该点赤道坐标为 (α_0, δ_0) 。将赤道直角坐标系绕 Z 轴逆时针旋转 α_0 ,再将坐标系绕旋转后的 Y 轴逆时针旋转 $(90^\circ - \delta_0)$,最后将经过两次旋转的坐标系的 X 轴反向,由此得到新坐标系 $\mu Z' \nu$,其中平面直角坐标系 $\mu T \nu$ 即为标定基准坐标系。则任意星体矢量 OS_i 由赤

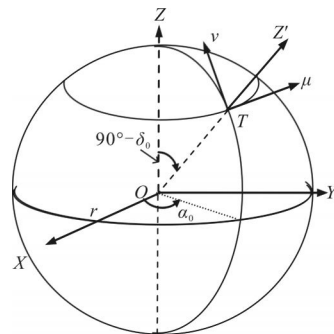


图 2 赤道坐标系与基准坐标系

Fig.2 Equatorial coordinate system and reference coordinate system

道直角坐标系至 $\mu Z'v$ 坐标系的转换过程为:

$$OS_i = P_x R_y(90^\circ - \delta_0) R_z(\alpha_0) \begin{pmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \cos \delta_0 \sin \delta_i \\ \cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0) \\ \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $R_x(\theta)$ 、 $R_y(\theta)$ 、 $R_z(\theta)$ 分别为以 X 、 Y 为轴的正向旋转矩阵和 X 轴反向矩阵。

由于天球通常看作单位球, 则 $Z' = \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i = 1$, 据此规范化 $\mu Z'v$ 坐标系中的矢量, 并获得在基准坐标系 $\mu T v$ 中的表达式:

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta_i + \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ v_i &= \frac{\cos \delta_0 \sin \delta_i - \sin \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta_i + \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 标定模型的建立与解算

星敏传感器光学系统标定的关键是找到同一星体像平面坐标(待标定坐标)与基准坐标间的对应关系, 建立待定参数方程。光学系统的固有误差对像平面坐标的影响主要体现在如下几个方面: 首先, 像平面坐标系与基准坐标系之间的平移和旋转, 平移量是由于视场光轴赤道坐标 (α_0, δ_0) 存在误差造成的; 其次, 像平面坐标系的两坐标轴未必正交; 另外, 像平面坐标系与基准坐标系的计量单位不同, 甚至, 像平面坐标系两坐标轴上的单位也未必相同。如图 3 所示。

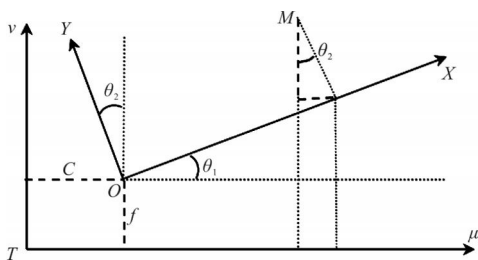


图 3 基准坐标系与像平面坐标系偏差示意图

Fig.3 Difference between reference coordinate system and image plane coordinate system

综合上述影响, 对于像平面系中任一点 $M(x, y)$, 在基准坐标系中的表达式为:

$$\begin{aligned} \mu &= mx \cos \theta_1 - ny \sin \theta_2 + c \\ v &= mx \sin \theta_1 + ny \cos \theta_2 + f \end{aligned} \quad (3)$$

式中: θ_1 为轴相对 μ 轴的旋转角; θ_2 为 Y 轴相对 v 轴

的旋转角; m, n 分别为像平面坐标系 X, Y 轴单位与基准坐标系 μ, v 轴单位之间的比例; c, f 为像平面坐标系 XOY 相对于基准坐标系 $\mu T v$ 的平移。上式即为星敏传感器光学系统标定的 6 参数模型。

1.4 光轴指向赤道坐标的获取

由公式(2)可知, 确定星敏传感器视场光轴指向的赤道坐标^[6] (α_0, δ_0) , 是解算星体基准坐标 (μ_i, v_i) 的前提。但在光学系统标定的初始阶段, 星敏传感器光轴指向的赤道坐标是未知量, 因此, 先以观测视场中距离光轴最近的天体的赤道坐标代替光轴指向的赤道坐标进行计算。采用该法计算误差在所难免, 但是, 上文所述的光学系统的参数 6 中, 平移量 (c, f) 反映的正是光轴指向赤道坐标 (α_0, δ_0) 的误差, 因此, 消除坐标平移量影响的光轴指向的赤道坐标 (α'_0, δ'_0) 可表示为:

$$\begin{aligned} \alpha'_0 &= \arctan \left(\frac{1}{\cos \delta_0 - f \sin \delta_0} \right) + \alpha_0 \\ \delta'_0 &= \arctan \left(\frac{f \cos \delta_0 + \sin \delta_0}{\cos \delta_0 - f \sin \delta_0} \cos(\alpha'_0 - \alpha_0) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

在标定计算过程中, 确定了星体的基准坐标后, 对公式(4)进行迭代计算^[7], 直到坐标平移量 (c, f) 规划到设定的阈值(阈值大小根据标定精度要求设置)范围内, 则获得了准确的光学系统标定参数。

2 CCD 平面的引建

星敏传感器的有效输出信号是与设备基座相固联的载体姿态, 而 CCD 平面装置于设备内部, 与设备基座底面存在一定的机械安装误差, 因此, 必须确立 CCD 像平面与星敏传感器设备基座平面间的转换关系, 即 CCD 平面的引建。为实现引建, 采用高精度 GPS 与电子水平仪人工建立站心地平基准面^[8]: 水平基准精度 $2''$, GPS 测量精度 2 cm , 方位基准精度 $4''$ 。

将星敏传感器放置于站心地平基准面上, 且校准设备基线与正北线重合, 此时, 星敏传感器的静态输出信号: 偏航角、纵摇角和横摇角应全部为 0。但是如图 4 所示, 由于安装误差难以避免, CCD 像平面坐标系 $x'o'y'$ 和星敏传感器基面坐标系 XOY 并不一致, 因此, 基于 CCD 像平面坐标系的星敏传感器输出三轴姿态信号存在偏差。校正该偏差的一般做法是, 通过测量像空间坐标系 $x'T'y'$ 与 XTY 之间旋转矩阵来实现, 但过程复杂, 步骤相对繁琐。前文所述的基于恒星参考系的星敏传感器光学系统标定理论和模型, 为

文中采用的开放天空条件下 CCD 平面引建方法提供了重要的理论启发和技术支撑。

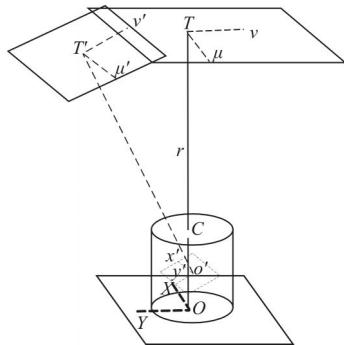


图 4 CCD 平面引建原理图

Fig.4 CCD leading building

基于恒星参考系的星敏传感器光学系统标定方法,本质是通过星体在天球切平面上的基准坐标,对其影射在星敏传感器 CCD 像平面上的包含光学系统固有误差的坐标值进行标定修正,以获得准确的输入信号。基于此理论,如图 4 所示,现以星体在基于天顶点 T 建立的 $\mu T\nu$ 坐标系中的坐标为标定基准,对其映射在 CCD 像平面坐标系 $x'o'y'$ 中的坐标进行标定。

在观测位置 (φ, λ) 与观测时间 T_z (区时) 已知的条件下,天顶点赤道坐标 (α_0, δ_0) 精确可求:

$$\alpha_0 = S \quad \delta_0 = \varphi \tag{5}$$

式中: S 为地方恒星时^[8], 与测者地方平时 m 的关系为:

$$S = S_0 + m + \mu(m \mp \lambda \frac{e}{w}) \tag{6}$$

式中: μ 为平太阳时间间隔化为恒星时间间隔的改正系数; λ 为当地经度; S_0 为当日世界时 0 时的格林恒星时:

$$S_0 = 100.460\ 618\ 37 + 360\ 007\ 700\ 536\ 0T + 0.000\ 387\ 933T^2 - T^3/387\ 100\ 00 \tag{7}$$

其中 T 为当日世界时 0 时的儒略世纪数, 测者地方平时 m 可根据测者经度 λ 和区时 T_z 换算获得:

$$m = T_z - (ZD \frac{e}{w} \pm \lambda \frac{e}{w}) \tag{8}$$

基于测者天顶点建立的标定模型, 不仅修正了光学系统的固有误差, 而且实现了星敏传感器 CCD 像平面坐标系 $x'o'y'$ 与基面坐标系 XOY 的转换。同时考虑 CCD 中心偏离、CCD 平面倾斜等因素的影响, 对公式(3)分别用两个二次曲面进行拟合:

$$\begin{aligned} \mu - x &= a_0x + a_1y + a_2 + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x(x^2 + y^2) \\ \nu - y &= b_0x + b_1y + b_2 + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6y(x^2 + y^2) \end{aligned} \tag{9}$$

采用最小二乘法对参数 $a_0 - a_6, b_0 - b_6$ 进行求解, 它反映的是星敏传感器初始观测信号与精确输入信号间传递函数, 其中包含了误差的标定校正和坐标转换过程。

3 标定与引建结果分析

2013 年 12 月 14 日 20^h00^m 左右, 于东经 121°23'40", 北纬 38°31'20" 进行星敏传感器光学系统标定与引建实验, 试验样机如图 5 所示。

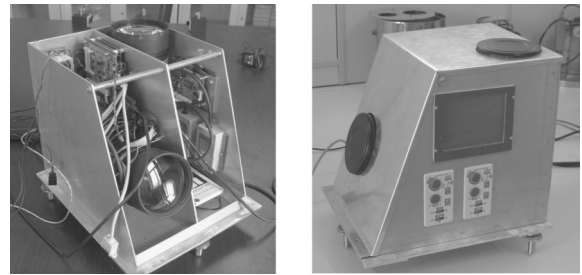


图 5 星敏传感器样机

Fig.5 Prototype of star sensor

样机采用小视场双通道的观测手段, 既保证了星敏传感器小视场 ($2^\circ \times 2^\circ$) 的观测精度, 又通过双通道摄取信息源, 拓展了观测范围。将星敏传感器放置于站心地平基准面上, 上通道摄取天顶点附近的待标定星如图 6 所示。

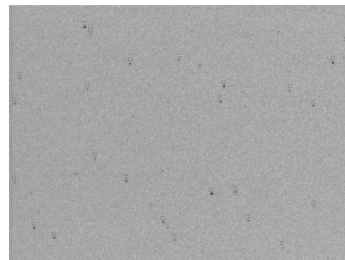


图 6 标定星图

Fig.6 Star images of calibration

图 7 为图 6 的星体识别标示图。

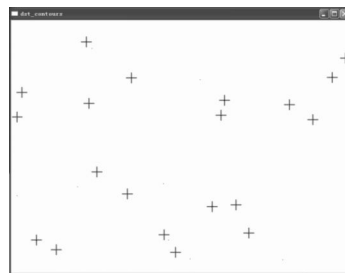


图 7 星体识别标示图

Fig.7 Star identification figure

采用最小二乘法计算获得标定参数:

- $a_0=145.393\ 138$ $b_0=209.870\ 119$
- $a_1=-1.993\ 554\ 5$ $b_1=0.056\ 470\ 97$
- $a_2=0.056\ 707\ 15$ $b_2=-0.000\ 751\ 6$
- $a_3=0.003\ 401\ 1$ $b_3=0.000\ 450\ 31$
- $a_4=-0.000\ 001\ 8$ $b_4=0.000\ 000\ 59$
- $a_5=0.000\ 002\ 268$ $b_5=-0.000\ 000\ 6$
- $a_6=-0.000\ 000\ 04$ $b_6=0.000\ 000\ 09$

上述参数不仅包含了光学系统的多项固有误差,还反映了星敏传感器 CCD 像平面与设备基准面的安装误差。为检验标定与引建精度,采用上述参数,对星敏传感器获取的星体像平面坐标进行校正,并转换得到标定后的星体赤道坐标 (α_b, δ_b) ,与观测历元时的天体赤道坐标 (α_i, δ_i) (真值)的比较结果如表 1 所示。 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\delta$ 分别表示标定获得的天体赤经、赤纬与各自真值之差,图 8、9 为天体赤经、赤纬的标定误差折线图。

表 1 标定误差分析表

Tab.1 Analysis of calibration errors

No.	$\alpha_b/(\circ)$	$\alpha_i/(\circ)$	$\Delta\alpha/(\prime)$	$\delta_b/(\circ)$	$\delta_i/(\circ)$	$\Delta\delta/(\prime)$
1	24.210 00	24.210 71	-2.6	38.452 70	38.453 35	2.3
2	24.383 88	24.383 59	1.1	38.516 10	38.516 19	0.4
3	22.541 80	22.542 77	-3.5	38.585 63	38.585 47	-0.6
4	22.860 18	22.859 63	2.0	38.766 47	38.767 12	2.4
5	22.652 48	22.652 36	0.4	38.779 29	38.779 39	0.4
6	23.600 60	23.599 44	4.2	38.845 73	38.845 73	0.0
7	21.980 49	21.981 37	-3.2	39.365 11	39.364 29	-0.3
8	24.583 90	24.582 69	4.4	39.354 65	39.354 88	0.8
9	22.789 10	22.788 32	2.8	39.390 39	39.390 26	-0.5
10	22.760 98	22.760 31	2.4	39.494 27	39.494 61	1.2
11	23.582 86	23.582 51	1.3	39.639 24	39.639 54	1.1
12	21.809 64	21.809 73	-0.3	39.653 56	39.654 36	2.9
13	23.986 31	23.985 37	3.4	39.881 36	39.881 72	1.3
14	22.246 18	22.246 35	-0.6	38.403 93	38.403 42	-1.8
15	23.175 11	23.174 97	0.5	38.450 90	38.450 22	-2.4
16	23.275 76	23.275 31	1.6	38.570 64	38.570 57	-0.3
17	21.977 27	21.976 79	1.7	38.680 75	38.681 69	3.4
18	24.564 84	24.564 89	-0.2	38.817 94	38.817 22	-2.6
19	23.872 02	23.873 19	-4.2	38.992 96	38.993 10	0.5
20	22.185 31	22.185 76	-1.6	39.466 06	39.465 32	-2.7

基于图 8、图 9、表 1 中数据分析可知:赤经最大标定误差 4.4",平均 2.1",赤纬最大标定误差 3.4",平均 1.5",赤经标定均方差 σ_α 为 1.4",赤纬标定均方差

σ_δ 为 1.1"。星敏传感器以观测瞬时天体在天球上的视位置为测量参考源,输出载体于惯性参考系中的姿态。基于上述标定误差分析,天体视位置标定均方差:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\delta^2} = \sqrt{(1.4'')^2 + (1.1'')^2} = 1.8'' \quad (10)$$

采用上述标定与引建方法,对任意视轴指向拍摄的 1000 帧星空图像进行试验,结果说明:基于恒星参考系的星敏传感器光学系统标定和引建精度可以稳定达到角秒量级,并且在试验中发现,当星空图像中天体分布均匀时,标定结果尤其理想,精度优于 2"。

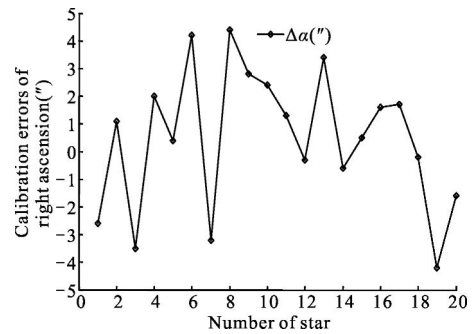


图 8 赤经标定误差

Fig.8 Calibration errors of right ascension

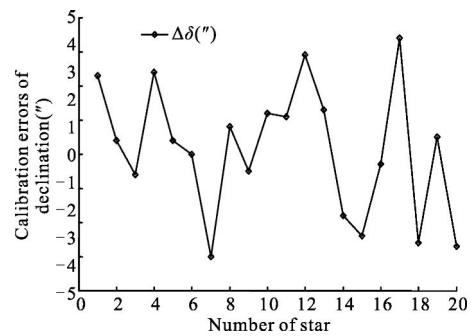


图 9 赤纬标定误差

Fig.9 Calibration errors of declination

针对标定参数的数量级进行分析,由于光学系统制作工艺和 CCD 像平面安装存在偶然误差,因此文中采用二次曲面拟合的标定精度要优于平面。如果采用三次曲面拟合,由于星敏传感器视场较小,参数量级较弱,对提高标定精度帮助不大,还会影响标定效率。

4 结 论

文中采用的基于恒星参考系的星敏传感器光学系统标定与引建方法,无需造价昂贵、控制精密的转台

和星模拟设备支撑,具有低投入、高精度、自主性强、适应性好等显著优点。并且创新性的将星敏感器不可回避的 CCD 像平面安装误差问题,糅合至光学系统标定过程进行解决,对近地面、开放性光学测量系统的精确标定与引建工作,具有一定的应用价值和实际意义。

参考文献:

- [1] Li Deliang, Ruan Jin. Method adapting to the star sensor's star extraction[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(12): 1348-1350. (in Chinese)
李德良, 阮锦. 一种适用于星敏感器的星点提取方法[J]. *激光与红外*, 2009, 39(12): 1348-1350.
- [2] Lie C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [3] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Zheng Ru, et al. Star sensor calibration research and development [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2010, 33(4): 8-14. (in Chinese)
孙高飞, 张国玉, 郑茹, 等. 星敏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.
- [4] Wang Anguo, Jia Chuanying, Sun Peng. Precise apparent position calculation of star in navigation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2004, 4(4): 117-120. (in Chinese)
王安国, 贾传荧, 孙鹏. 航用恒星视位置高精度计算[J]. *交通运输工程学报*, 2004, 4(4): 117-120.
- [5] Malak A Samaan, Daniele Mortari, John L Junkins. Nondimensional star identification for uncalibrated star cameras[J]. *J Astronautical Sci*, 2006, 54(1): 1-17.
- [6] Li Baohua, Chen Xijun, Zheng Xunjiang, et al. Autonomous star tracking algorithm with high dynamic spacecraft [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2012, 41(1): 190-194. (in Chinese)
李葆华, 陈希军, 郑循江, 等. 星敏感器高动态下自主星跟踪算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 190-194.
- [7] Wang Anguo, Wang Huabin, Tang Jun, et al. An accurate calibrating method of optical system based on the automatic identification of star map[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 575-578. (in Chinese)
王安国, 王华斌, 唐君, 等. 基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 575-578.
- [8] Tang Jun, Wang Anguo, Zhang Lei. The static test method in attitude measurement accuracy[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(5): 115-119. (in Chinese)
唐君, 王安国, 张磊. 高精度姿态测量技术静态检验方法[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(5): 115-119.