

SINS/CNS 组合导航的导航星表构建方法*

马宝林, 吴杰, 张洪波

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 构建满足完备性、精简性和查询快速性的导航星表是实现捷联惯性/星光组合导航系统的重要前提和保证。以天文学中的 Tycho-2 星表作为导航星表的初始星表, 对球矩形分区方法进行了改进, 包括明确分区及子分区的划分方法, 提出了备选导航星的选择策略。实验结果表明, 采用改进型球矩形分区方法的备选导航星数量最多只占赤道带法导航星的 19.37%, 仅占全天遍历法导航星的 3.12%。因此, 改进型球矩形分区方法更加精准, 查询更快捷, 更适用于捷联惯性/星光组合导航系统。

关键词: 导航星表; Tycho-2 星表; 改进型球矩形法; 备选导航星选择策略

中图分类号: V448.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2016)03-061-07

Construction method of guide star catalog for SINS/CNS

MA Baolin, WU Jie, ZHANG Hongbo

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Building a guide star catalog which has the characteristics of completeness, simplicity and query rapidity is an important prerequisite and guarantee to realize the SINS/CNS (strapdown inertial navigation system/celestial navigation system). The Tycho-2 catalog in astronomy was selected as the initial catalog of the guide star catalog. The ball rectangle partition method was improved on the basis of the Tycho-2 catalog. It included how to divide the partition and the sub partition. The selection strategy of the alternative guide star was also creatively proposed. The experimental results show that the number of the alternative guide stars using the improved ball rectangle partition method most accounts for 19.37% of the guide stars used for the declination zone method and only accounts for 3.12% of the guide stars used for the traverse method. Therefore, the improved ball rectangle partition method is more accurate and rapid, and is more suitable for the strapdown inertial navigation system/celestial navigation system.

Key words: guide star catalog; Tycho-2 catalog; improved ball rectangle method; alternative guide star selection strategy

导航星表是在基本星表中挑选出一定亮度范围的导航星, 利用其亮度和位置信息编制而成的简易星表^[1]。导航星表是捷联惯性/星光组合导航系统 (Strapdown Inertial Navigation System/Celestial Navigation System, SINS/CNS) 中必不可少的组成部分, 是星图识别的唯一依据。研究适用于 SINS/CNS 的导航星表, 对于 SINS/CNS 技术的发展具有重要的意义。

近年来, 关于星表的研究主要集中于天文学和测量学领域: 王叔和等^[2-3]对比分析了依巴谷卫星和哈勃空间望远镜天体测量的结果; 陆配珍等^[4]对 FK5 (第 5 基本) 星表和依巴谷 (HIPparcos, HIP) 星表进行过比较研究; 凌兆芬等^[5-6]就第谷星表的特征和意义进行过系统的分析; Hynes 等^[7]和 Jimenez-Esteban 等^[8]分析了 Tycho-2 星表在天

文领域观测、识别的特性。而对于导航星表的研究多在航天应用领域: 田宏等^[9]采用 SAO (史密松) 星表构造了一个由 2510 颗恒星组成的导航星表; 陆敬辉等^[10]利用 SKYMAP2000 作为基本星表提出了一种弹载导航星表的设计方法; 宋来勇等^[11]利用 Tycho-2 星表编制了适用于数字天顶摄影仪的参考星匹配星表数据库; Shugarov 等^[12]介绍了“世界空间紫外天文台”项目的导航星表; Subramanian 等^[13]对适用于天文望远镜的导航星表进行了研究。

综合分析国内外研究成果, 星表与导航星表之间的交叉研究相对较少。所以, 关于哪种天文学星表更适合作为导航星表的初始星表、什么样的导航星分区存储方法和备选导航星选择策略更适用于 SINS/CNS 等问题近年来逐渐成为 SINS/

* 收稿日期: 2015-09-04

基金项目: 国家部委基金资助项目 (51309040101)

作者简介: 马宝林 (1983—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, E-mail: xiongmaofeizhu@163.com;

吴杰 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wujie_nudt@sina.com

CNS 领域研究的热点。

1 适用于 SINS/CNS 的导航星表条件分析

之前的导航星表多建立在满足惯性/星光组合导航系统(Inertial Navigation System/ Celestial Navigation System, INS/CNS)应用的基础上,但因 SINS/CNS 与 INS/CNS 之间在原理、器件上的差异,使得适用于 SINS/CNS 的导航星表与之前研究的星表有所区别:一是 SINS/CNS 将加表、陀螺和星传感器直接固联在飞行器上,与 INS/CNS 相比省去了惯性平台,这样测量器件将直接承受飞行过程中的冲击和振动,测量精度会受到一定的影响;二是 SINS/CNS 用飞行器自身携带的计算机对加表测量的信息进行实时导航计算,这对计算机的性能提出了很高的要求。针对上述特点,适用于 SINS/CNS 的导航星表必须具有较好的完备性,保证在测量含有一定误差时仍然具有足够数量的导航星进行星图识别;必须满足精简性要求,以降低对计算机内存的占用率;必须能够快速查询,以满足姿态解算实时性的要求。

1.1 完备性要求

采用不同算法进行星图识别和姿态计算,对导航星的需求各不相同。完备性的基本界定是:①必须包含能被星传感器所能敏感的足够数量的恒星。当星传感器观测方向指向高纬度地区时,恒星分布较为稀疏,需要扩大导航星的备选范围。②在已知星传感器所能敏感的极限星等后,需要适当提高星等的选择范围,以满足视场内恒星数量的需求。

1.2 精简性要求

在满足星图识别和姿态计算的前提下,应使所构建的导航星表尽可能地精简,这样不仅可以减少导航星表对计算机内存的占用,同时也可以降低冗余匹配的概率以提高星图识别的速度。精简性的要求为:①在满足识别要求的情况下,尽可能选择星等值小的亮星作为导航星;②当视场内满足要求的实际导航星数量较多时,可对分布密集处的恒星进行适当删减,以此提高导航星分布的均匀性,使其更利于星图识别。

1.3 查询快速性要求

飞行器星图识别的时间为毫秒量级,因此查询导航星表要求快速、方便。查询速度与导航星表的构成、分区存储方式以及查询算法等密切相关。本文将重点讨论导航星表的分区存储方法及备选导航星的选择策略。

2 初始星表的对比选择

天文学中的星表数量繁多、种类多样,20 世纪以来导航领域采用较多的星表主要有:SAO 星表,FK5 星表,HIP 星表,Tycho 系列星表等。其中,SAO 星表和 FK5 星表在不同的时期都曾作为标准星表被广泛使用。

自从 1989 年欧空局将依巴谷卫星送入太空后,人类进入了天基观测天体时代。根据依巴谷卫星的观测结果,经整理、计算后相继出版了依巴谷星表(Hipparcos catalog)和第谷星表(Tycho catalog)。相比于在地面观测得到的星表,它们具有更高的精度。

第谷系列星表来源于依巴谷计划,是依巴谷卫星对一百多万颗恒星在近 4 年的时间里在多个历元上进行多次观测获得的结果^[6],具有均匀的天空密度和测量精度,因而可以准确解算恒星的平均星等及亮度变化信息,测量结果科学可信。

如表 1 所示,Tycho-2 星表的优势主要在于:①Tycho-2 星表包含的恒星数量为 2 539 913 颗,总星数远多于其他星表;②Tycho-2 星表极限星等达到了 15.1 mag,虽然略低于 SAO 星表的极限星等,但星等 6.5 mag 以下可作为导航星的恒星数量众多,因此其在极限星等实用性上具有优势;③Tycho-2 星表天空平均恒星分布密度达到了 25 颗/平方度^[6],可最大限度保证星图捕获的概率;④构建导航星表之前,需要对星表进行预处理,一是处理双星,二是删除自行较大的恒星^[1]。Tycho-2 星表增加了对可能双星或聚星的测量,能辨识的双星或聚星系统达到了 23 000 余颗^[6];Tycho-2 星表中包含了详细的恒星自行信息,对自行较大的恒星能够较易识别。相比于其他星表,Tycho-2 星表在星表预处理过程中更加方便。

表 1 不同星表参数比较

Tab. 1 Comparison of different catalog parameters

	SAO 星表	FK5 星表	HIP 星表	TRC 星表	Tycho-2 星表
发表年份	1966	1988	1997	1998	1998
总星数/颗	258 997	1500	118 218	990 182	2 539 913
天空平均恒星 分布密度/ (颗/平方度)	未正式 发布	未正式 发布	3	25	25
极限星等/ mag	17.0	9.0	12.4	15.0	15.1

3 改进的导航星表球矩形分区方法

如果根据星敏感器视轴方向对全天星图进行一次遍历搜索则效率过低,因此,常把全天天区划分成若干分区,分区对导航星进行存储,以提升检索的效率。常用的星表分区方法有赤纬带法、圆锥法和球矩形法等^[1]。赤纬带法因为只利用赤纬的信息而忽略了赤经信息,这样构造的导航星表包含大量的冗余信息,无法满足精简性的需求;圆锥法需要构建大量的圆锥体对天球球面进行划分,需要占用弹载计算机较大的内存。球矩形法较之上述两种方法有先进之处,它既利用了赤经、赤纬信息,也降低了对内存的占用率。传统的球矩形法将每一分区按照经、纬度等分处理,划分为若干个球矩形,如图1所示。

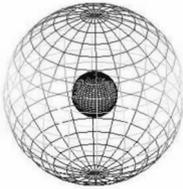


图1 天球的球矩形分区

Fig. 1 Ball rectangle partition of celestial sphere

在球矩形中,赤纬间隔基本保持不变,但赤经间隔会随着纬度向南北两极的递增而逐渐变小。传统的球矩形法选择导航星匹配的原则是依据星敏感器主光轴落入的分区内的恒星作为备选星库。但这种方法具有许多局限性,以极点地区为例,极点地区恒星数量稀少,许多分区内 6.5 mag 以下的恒星数量都少于3颗,无法满足星图识别的要求。基于此,提出改进的球矩形分区法:

第一步,将全天星球按经、纬度等分成若干个分区。分区间隔过大将会增加导航星的搜索范围;间隔过小,有可能出现视场内没有足够数量的导航星进行星图识别的情况。间隔多大为宜,需要根据星敏感器视场大小、弹载计算机的性能等因素权衡考虑。考虑球矩形纬度间隔的不变性及子分区划分方便等因素,设定圆形半视场角 r 与分区纬度带的间隔 H_{DE} 满足:

$$H_{DE} > 2r \tag{1}$$

因为星敏感器视场大小 FOV 与 r 之间满足关系式:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} FOV \tag{2}$$

所以将式(2)代入式(1)得:

$$H_{DE} > \sqrt{2} FOV \tag{3}$$

当给定星敏感器视场大小后,便可根据式(3)确定纬度带的间隔。根据等纬度、等经度间隔划分分区的原则,经度带的间隔 H_{RA} 可选择与 H_{DE} 相同,并可通过式(4)确定分区的数量 n :

$$n = \frac{180}{H_{DE}} \cdot \frac{360}{H_{RA}} \tag{4}$$

以 0° 赤经为基准,按照 H_{DE} 和 H_{RA} 划分赤纬、赤经,各分区编号命名规则如图2所示。

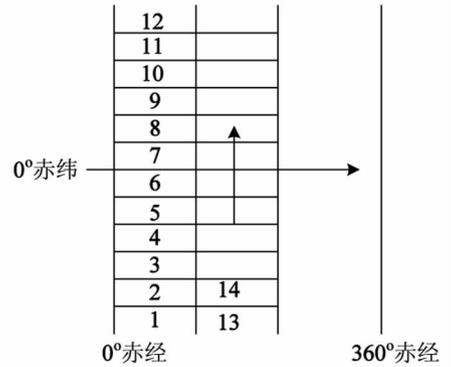


图2 分区编号命名规则

Fig. 2 Naming rule of partition code

第二步,在分区基础上进一步划分子分区。在低纬度地区,将1个分区按照经、纬度等间隔划分为4个子分区;在中、高纬度地区按照纬度等分为2个子分区。

4 备选导航星选择策略

导航星分区存储,主要是为了方便查询。如何准确、快速查询涉及备选导航星的选择策略问题。根据赤经、赤纬跨度求解方法^[14-15]和改进的分区方法^[16],针对星敏感器主光轴落入不同纬度地区的情况,提出备选导航星的选择策略:

首先,计算出星敏感器主光轴的指向,确定主光轴落在哪个分区、哪个子分区内。

第二,根据星敏感器主光轴指向的纬度值 δ 与已知的星敏感器圆形半视场角 r 、分区经度间隔 H_{RA} 可确定相应的约束关系:

$$\begin{cases} r < \frac{H_{RA}}{2} \cos\delta, & \text{situation 1} \\ \frac{H_{RA}}{2} \cos\delta < r < \frac{3H_{RA}}{2} \cos\delta, & \text{situation 2} \\ \frac{3H_{RA}}{2} \cos\delta < r < \frac{5H_{RA}}{2} \cos\delta, & \text{situation 3} \\ r > \frac{5H_{RA}}{2} \cos\delta, & \text{situation 4} \end{cases} \tag{5}$$

然后,确定备选导航星的选择策略:

$$\begin{cases}
 -\arccos\left(\frac{2r}{H_{RA}}\right) < \delta < \arccos\left(\frac{2r}{H_{RA}}\right) & \rightarrow \text{strategy 1} \\
 \arccos\left(\frac{2r}{H_{RA}}\right) < \delta < \arccos\left(\frac{2r}{3H_{RA}}\right) \text{ or } -\arccos\left(\frac{2r}{3H_{RA}}\right) < \delta < -\arccos\left(\frac{2r}{H_{RA}}\right) & \rightarrow \text{strategy 2} \\
 \arccos\left(\frac{2r}{3H_{RA}}\right) < \delta < \arccos\left(\frac{2r}{5H_{RA}}\right) \text{ or } -\arccos\left(\frac{2r}{5H_{RA}}\right) < \delta < -\arccos\left(\frac{2r}{3H_{RA}}\right) & \rightarrow \text{strategy 3} \\
 \arccos\left(\frac{2r}{5H_{RA}}\right) < \delta \text{ or } \delta < -\arccos\left(\frac{2r}{5H_{RA}}\right) & \rightarrow \text{strategy 4}
 \end{cases} \quad (6)$$

策略 1: 如图 3 所示, 根据星传感器主光轴落入子分区中的位置, 选择主光轴所在子分区相邻的 3 个分区, 与主光轴所在的分区一并作为导航星备选区域。

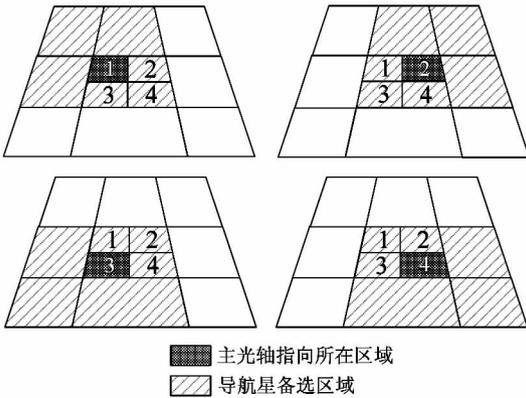


图 3 策略 1
Fig. 3 Strategy 1

策略 2: 如图 4 所示, 根据主光轴指向落入的子分区的位置, 选择与子分区相邻的 5 个分区, 与子分区所在的分区一并作为导航星备选区域。

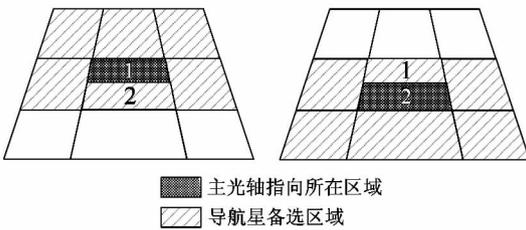


图 4 策略 2
Fig. 4 Strategy 2

策略 3: 如图 5 所示, 根据主光轴指向落入子分区中的位置, 选择与子分区相邻的 9 个分区, 与主光轴所在的分区一并作为导航星备选区域。

策略 4: 如图 6 所示, 考虑极点附近分区恒星数量偏少, 根据主光轴指向落入的子分区的位置, 选择以极点为顶点的全部分区内的恒星作为备选导航星。

另外, 如果星传感器主光轴落到子分区边缘, 该如何确定选择区域? 规定当主光轴落在子分区

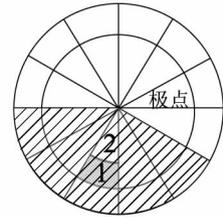


图 5 策略 3
Fig. 5 Strategy 3

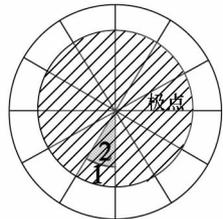


图 6 策略 4
Fig. 6 Strategy 4

左边界及下边界时, 按照星传感器主光轴在其右边、上边的子分区内计算, 如图 7 所示。

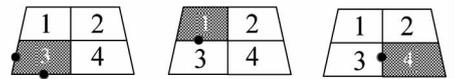


图 7 星传感器主光轴落在子分区边缘时的界定规则
Fig. 7 Defined rule of selection area when the optical axis of star sensor fall on the edge of the sub partition

5 实验验证

5.1 Tycho-2 星表和 TRC 星表的比较

经过星表预处理后, Tycho-2 星表和第谷参考星表 (Tycho Reference Catalog, TRC) 中适合作为导航星的恒星数量如表 2 所示。可见, 如果作为导航星表的基本星表使用, 相比于 TRC 星表, Tycho-2 星表在导航星数量上可以体现完备性的优势。

表2 TRC星表与Tycho-2星表可用导航星数量对比

Tab.2 Comparison of available navigation star number between TRC catalog and Tycho-2 catalog

星表	6.5 mag 以下	6 mag 以下
TRC	6848	3757
Tycho-2	7653	4169

5.2 基于Tycho-2星表的球矩形法分区情况

假设星敏感器视场大小为 $10^\circ \times 10^\circ$, 根据式(3)、式(4), 选择 15° 间隔即可满足条件, 这样全天星图可划分为 $12 \times 24 = 288$ 个分区。如表2所示, Tycho-2星表经过星表预处理后得到6 mag以下的恒星为4169颗, 这样每个分区内所含的恒星数量分布如图8所示。

图8中少于3颗恒星(6 mag以下)的25个

分区全部在高纬度地区(南北纬大于 60°), 分布情况如图9所示。

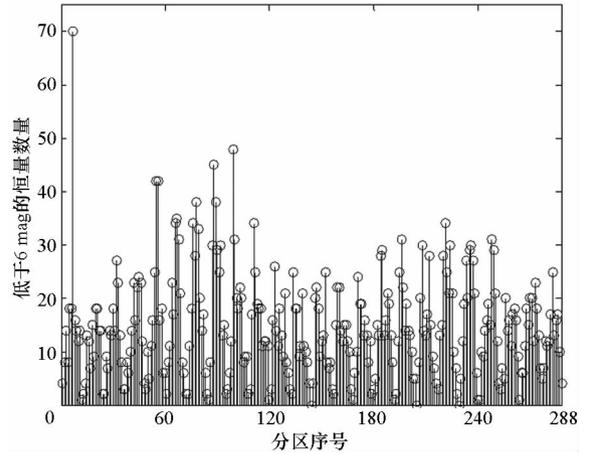


图8 分区恒星数量分布

Fig.8 Distribution of stellar number in each partition

75° N	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204	216	228	240	252	264	276	288	
60° N								95							179										
60° S																									
0° 赤经	1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169	181	193	205	217	229	241	253	265	277	

■ — 恒星(6 mag以下)数量少于3颗的分区

图9 恒星(6 mag以下)数量少于3颗的分区分布情况

Fig.9 Distribution of partition whose stellar number is less than 3 (under 6 mag)

5.3 改进的球矩形分区方法与其他导航星存储方法的比较

选取星敏感器主光轴指向随机落入低、中、高纬度地带的情况, 如表3所示。

改进的球矩形法与赤纬带法、全天星图遍历法的备选导航星数量如表4所示。

表3 星敏感器主光轴随机指向

Tab.3 Main axis random direction of star sensor

	星敏感器主光轴指向	
	赤纬	赤经
低纬度地区	5°	35°
中纬度地区	45°	30°
高纬度地区	80°	65°

表4 改进的球矩形法与其他星选方法结果对比

Tab.4 Comparison results of the modified ball rectangle method and other star selection methods

星敏感器主光轴指向	改进型球矩形法			赤纬带法			全天遍历法
	包含的子分区	所含恒星数	备选导航星数	包含纬度带	所含恒星数	备选导航星数	备选导航星数
低纬度地区 (5°, 5°)	7	70	130	0° ~ 15°	535	994	4169
	283	25		-15° ~ 0°	459		
	6	18					
	282	17					
中纬度地区 (45°, 30°)	21	18	115	30° ~ 45°	403	724	4169
	33	23		45° ~ 60°	321		
	45	24					
	22	14					
	34	13					
	46	23					

表 4(续)

星敏传感器 主光轴指向	改进型球矩形法			赤纬带法			全天遍历法
	包含的 子分区	所含 恒星数	备选 导航星数	包含 纬度带	所含 恒星数	备选 导航星数	备选 导航星数
高纬度地区 (80°, 65°)	47	12					
	59	6					
	71	6					
	83	6		60° ~ 75°	188		
	95	2	49			253	4169
	48	4					
	60	6		75° ~ 90°	65		
	72	2					
	84	2					
96	3						

当星敏传感器主光轴指向低、中、高纬度地区时,改进的球矩形分区法的备选导航星数量仅为赤纬带法导航星数量的 13.08%, 15.88% 和 19.37%; 与全天遍历法相比, 仅占其 3.12%, 2.76% 和 1.18%。实验结果表明, 当采用同一种星图识别算法时, 改进型球矩形法在精简性和查询快速性上具有明显的优势。

6 结论

1) 通过比较 SINS/CNS 与 INS/CNS 之间的区别可知适用于 SINS/CNS 的导航星表在完备性、精简性和查询快速性上有更高的要求。

2) 通过对比分析不同天文星表的参数, 发现 Tycho - 2 星表作为导航星表的初始星表具有明显的优势。

3) 提出改进的球矩形分区方法及其备选导航星选择策略。实验结果表明, 相对于其他传统分区方法, 该方法在满足完备性的基础上, 更加精简, 查询更加快速, 完全满足 SINS/CNS 组合导航的要求。

参考文献 (References)

[1] 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHANG Guangjun. Star identification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[2] 王叔和, 须同棋, 萧耐园, 等. 依巴谷天体测量卫星的阶段成果[J]. 天文学进展, 1994, 12(2): 142 - 149.
WANG Shuhe, XU Tongqi, XIAO Naiyuan, et al. Preliminary process in the Hipparcos astrometry [J]. Progress in Astronomy, 1994, 12(2): 142 - 149. (in Chinese)

[3] 王叔和, 须同棋, 金文敬, 等. 依巴谷卫星和哈勃空间望远镜的天体测量观测结果[J]. 天文学进展, 1996, 14(3): 161 - 174.

WANG Shuhe, XU Tongqi, JIN Wenjing, et al. Astrometric observational results of the Hipparcos satellite and the Hubble space telescope [J]. Progress in Astronomy, 1996, 14(3): 161 - 174. (in Chinese)

[4] 陆佩珍, 须同棋. FK5 星表和依巴谷星表的比较[J]. 天文学报, 1999, 40(1): 107 - 112.
LU Peizhen, XU Tongqi. A comparison between the FK5 and Hipparcos catalogues [J]. Acta Astronomica Sinica, 1999, 40(1): 107 - 112. (in Chinese)

[5] 凌兆芬. 修改后的依巴谷计划[J]. 时间频率学报, 1990, 13(1): 81 - 87.
LING Zhaofen. The revised Hipparcos project [J]. Journal of Time and Frequency, 1990, 13(1): 81 - 87. (in Chinese)

[6] 凌兆芬, 萧耐园. 依巴谷星表和第谷星表的特征和意义[J]. 天文学进展, 1999, 17(1): 25 - 32.
LING Zhaofen, XIAO Naiyuan. Characteristics and significance of Hipparcos and the Tycho catalogue [J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(1): 25 - 32. (in Chinese)

[7] Hynes R I, Wright N J, Maccarone T J, et al. Identification of galactic bulge survey X-ray sources with Tycho - 2 stars [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 761(2): 162 - 184.

[8] Jimenez-Esteban F M, Caballero J A, Dorda R. Identification of red high proper-motion objects in Tycho - 2 and 2MASS catalogues using virtual observatory tools [J]. Astronomy & Astrophysics Journal, 2012, 539: 86 - 88.

[9] 田宏, 林玲, 郝永杰, 等. 星敏传感器导航星表建立[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(3): 43 - 46.
TIAN Hong, LIN Ling, HAO Yongjie, et al. Build a navigation star catalogue for star tracker [J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(3): 43 - 46. (in Chinese)

[10] 陆敬辉, 王宏力, 文涛, 等. 弹载导航星表的设计与实现[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 1895 - 1901.
LU Jinghui, WANG Hongli, WEN Tao, et al. Design and implementation of missile guide catalog [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9): 1895 - 1901. (in Chinese)

[11] 宋来勇, 曾凡祥. 数字天顶摄影仪中星象匹配识别与匹

- 配星表编制[J]. 全球定位系统, 2014, 39(1): 46-51.
- SONG Laiyong, ZENG fanxiang. The recognize and match of CCD star image from digital zenith camera and establish matching starcatalogue data[J]. GNSS World of China, 2014, 39(1): 46-51. (in Chinese)
- [12] Shugarov A S, Chupina N V, Piskunov A E, et al. WSO-UV project guide star catalogue; experimental verification of its photometric system [J]. Astrophys Space Science, 2011, 335(1): 317-321.
- [13] Subramanian S, Subramaniam A, Simard L, et al. Generation of a near infra-red guide star catalog for thirty-meter telescope observations[J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2013, 34(2): 175-192.
- [14] 全伟, 房建成. 高精度星图模拟及有效性验证新方法[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 22-26.
- QUAN Wei, FANG Jiancheng. High-precision simulation of star map and its validity check [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(7): 22-26. (in Chinese)
- [15] 刘朝山, 刘光斌, 王新国, 等. 弹载星敏传感器原理及系统应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- LIU Chaoshan, LIU Guangbin, WANG Xinguo, et al. Principle and application of missile-borne star sensor [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 饶才杰, 房建成. 一种星图模拟中观测星提取的方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 129-135.
- RAO Caijie, FANG Jiancheng. A way of extracting observed stars for star image simulation [J]. Optics precision engineering, 2004, 12(2): 129-135. (in Chinese)