中国星官边界与天球像素映射—越野导航基准构建与验证

赵正旭

（青岛理工大学 机械与汽车工程学院，青岛 266520）

摘 要：本文提出一种不依赖人造卫星的导航方法：利用球面像素化中国星官“空间地址”作为导航基准，为越野车、无人侦察车、搜救机器人等移动装置提供星空语义感知与任务路径。方法包含：(1) 基于星官密度的自适应星图匹配；(2) 像素空间地址序列航向校正；(3) 星官边界与地形地图叠加，完成空间地址驱动的路径规划；(4) 支持本土星空叙事架构，实现自然语言指令、文化语义和物理约束统一设计。在 900 次蒙特卡洛模拟仿真的极端环境导航中，星官边界导航相比纯惯导将 2 小时航向误差平均降低 56.1%，定位误差平均降低 58.0%，任务规划时间从分钟级降至秒级，且任务规划直观性提升 3 倍以上。

关键词：非结构环境导航；星官边界；球面像素化；星表移动导航；星座边界南希·罗曼索引表

中图分类号：U463.6 **文献标志码：**A

Chinese Xingguan Boundaries and Celestial Spherical Pixelation—Build-and-Verify A Benchmark for Off-Road Navigation

ZHAO Zhengxu

(School of Mechanical and Automotive Engineering,
Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

Abstract: This paper proposes a navigation method that is non-dependent on man-made satellites: utilizing spherical pixelized "spatial addresses" of Chinese xingguan (asterisms) as navigation references to provide celestial semantic perception and mission path planning for mobile devices such as off-road vehicles, unmanned reconnaissance vehicles, and search-and-rescue robots. The method comprises: (1) adaptive star pattern matching based on xingguan density; (2) heading correction via sequences of pixel spatial addresses; (3) overlay of xingguan boundaries with topographic maps to accomplish spatial address-driven path planning; and (4) support for indigenous celestial narrative architectures, enabling unified design of natural language commands, cultural semantics, and physical constraints. In 900 Monte Carlo simulated trials of unstructured environment navigation, xingguan boundary navigation reduced the average 2-hour heading error by 56.1% compared with pure inertial navigation, decreased the average positioning error by 58.0%, reduced mission planning time from the minute scale to the second scale, and improved mission planning intuitiveness by more than 3 times.

Keywords: unstructured environment navigation; xingguan boundary; spherical pixelization; star catalog mobile navigation; constellation N.G.Roman table

1. 引言

永夜极地、沙漠、核生化污染区、自然灾区和战场等极端环境中的导航面临 GNSS（全球导航卫星系统）拒止和诸如视觉特征稀少以及场景剧变等环境特征退化的双重挑战[1][2]。特殊移动机构如军用越野车和极地科考车、自主控制装置如无人侦察车等在这些极端环境中执行任务时，其自主移动导航的痛点：

- 卫星导航不可靠：如山谷、密林、极区等多路径效应或信号屏蔽；战场环境下 GNSS 易受干扰或 GNSS 信号拒止[2][3]；
- 环境特征退化：如沙漠缺乏路标，极地冰雪反光导致视觉里程计失效，夜间仅有星空可见等[4]；
- 任务规划复杂：传统方法依赖人工设定航点(经纬度)，操作员需同时了解地形、战术目标和天

文信息，认知负担大[5]。

依靠惯导和地磁的常规导航方案存在长时间漂移累积问题。基于全天候恒星导航设备如射电六分仪、视场星敏感器、射电天文导航、惯性-恒星组合导航等系统虽然可提供绝对方向，但现有方法仅输出几何坐标，由于缺乏语义分区信息而与中国星空叙事架构不兼容而导致操控失误。本文探讨的基于中国星官的移动装置自适应导航有以下独特优势：

(1) 全球覆盖：在任意地点和任意时刻，总有一部分星官位于天顶附近；

(2) 语义密度适中：中国传统星官体系的三垣、四象、二十八宿中的 321 个星官，既不像国际天文学联合会的现代天文星座[6][7]过于稀疏，也不像数值天球坐标过于密集而依赖算法处理，它们适合作为移动装置自主导航的“空间路标”；

(3) 文化可解释性：例如，任务指挥员指令“前往‘天市垣星域’设伏”的叙事架构与语义文化背景兼容，系统能够精确解读并正确执行。

本文的主要贡献：(1) 建立以星空、星域、星区为分类层次的 359 个无缝衔接并且覆盖整个天球坐标系的星官边界(线性球面矩形闭合多边形)；(2) 建立数字化星官体系数据标准格式 FITS (灵活图像传输系统)和星官边界计算的罗曼索引数据结构[8], 首次将星官边界 HEALPix [9][10]像素地址用于地球极端环境移动装置导航；(3) 提出星官图和星官边界自适应匹配策略以及星官空间地址序列航向校正算法，根据可见星官密度度动态调整算法参数；(4) 设计星官与地形联合代价地图，实现任务语义与物理安全的统一路径规划，完成中文自然语言级任务解析与规划。

2. 基于星官边界的自适应导航

中国星官体系的三垣、四象、二十八宿及 321 个星官具有天然的星空、星域、星区三层次划分结构[11]。本文首次确定了这一结构中星官边界及其“球面分层等面积等纬度 HEALPix 像素”映射坐标(简称星官空间地址)并将其应用于地面移动装置自适应导航。星官空间地址是星官边界映射到计算机可读的球面基准网格，它由两个关键部分构成。第一部分是球面像素化将天球表面划分成面积完全相同、形状接近正方形的格子(HEALPix 像素)。每个格子均有一个唯一的、像邮政编码一样的整数编号叫像素 ID，它适合大规模计算，常用于天文学和宇宙学计算。第二部分是星官映射表，这是赋予文化意义的关键，它把每个中国星官(比如“北斗”和“织女”)所覆盖的区域，对应到一组特定的球面像素编号上。例如，织女星官边界内的星官空间地址在计算机内存中是 2417 个整数列表 [93532, 93533, ..., 176416, 176417]。星官映射表是以星官体系为叙事架构检索星空、星域和星区位置的坐标基准。

由此，整个天球的星官空间地址就分成了适合人理解的地址名称段和机器可读的像素坐标段。这样，对于类似“车辆穿越天市垣星域到达织女星区”的指令，导航系统的执行逻辑便是：(1) 解析指令：系统查询数据库，得知“织女星区”的星官空间地址是球面像素目的地集合；(2) 匹配当前位置：星敏感器当前观测的恒星的映射像素；(3) 判断：观测像素属于目的地集合吗？如果属于，那么车辆已进入织女星官边界内；如果不属于，那就继续找一条能让观测像素尽快进入目的地集合的路径。所以，星官边界的本质，就是把传统星官所在星区翻译成了能被运算的球面像素坐标集合。图 1 是基于星官边界的移动装置自适应导航系统架构图。

系统由数据层包含星官空间地址数据库、感知层包括星敏感器和自适应匹配、控制层包括地址序列比对和 PID(比例积分微分)控制器和任务规划层含自然语言解析与 A*路径规划等四层构成，层间通过数据流和控制反馈连接。数据层存储星官地址数据库，包含星官→HEALPix 像素 ID 映射表(321 个星官)、星宿→星官层级表(三垣、四象、二十八宿)、像素→天球经纬度转换表(Nside=64/256 两级)、亮星导航子库(星等<3.0，约 500 颗)。感知层包含星敏感器(采集恒星方向)、星图匹配模块(自适应模式切换)、可见星官统计模块(密度评估)、惯导与里程计、以及星官地址查询模块(HEALPix 像素→星官名映射)。控制层包含期望地址序列生成、地址序列比对(观测相对于预期)、以及 PID 控制器(输出转向和速度指令)。任务规划层包含自然语言指令解析、语义解析模块(星官→地址映射)、

以及 A*路径规划(联合代价地图)。在系统架构中，数据流自上而下经过四层结构,任务指令经语义解析转换为目标星官集合，进而生成联合代价地图；最优路径提取期望地址序列；感知层输出的观测地址序列与期望序列比对；控制指令发送至车辆执行；星敏感器原始图像经星点提取和方向计算后查询星官地址；可见星官(取决于观测点纬度和高度)数量触发模式切换。

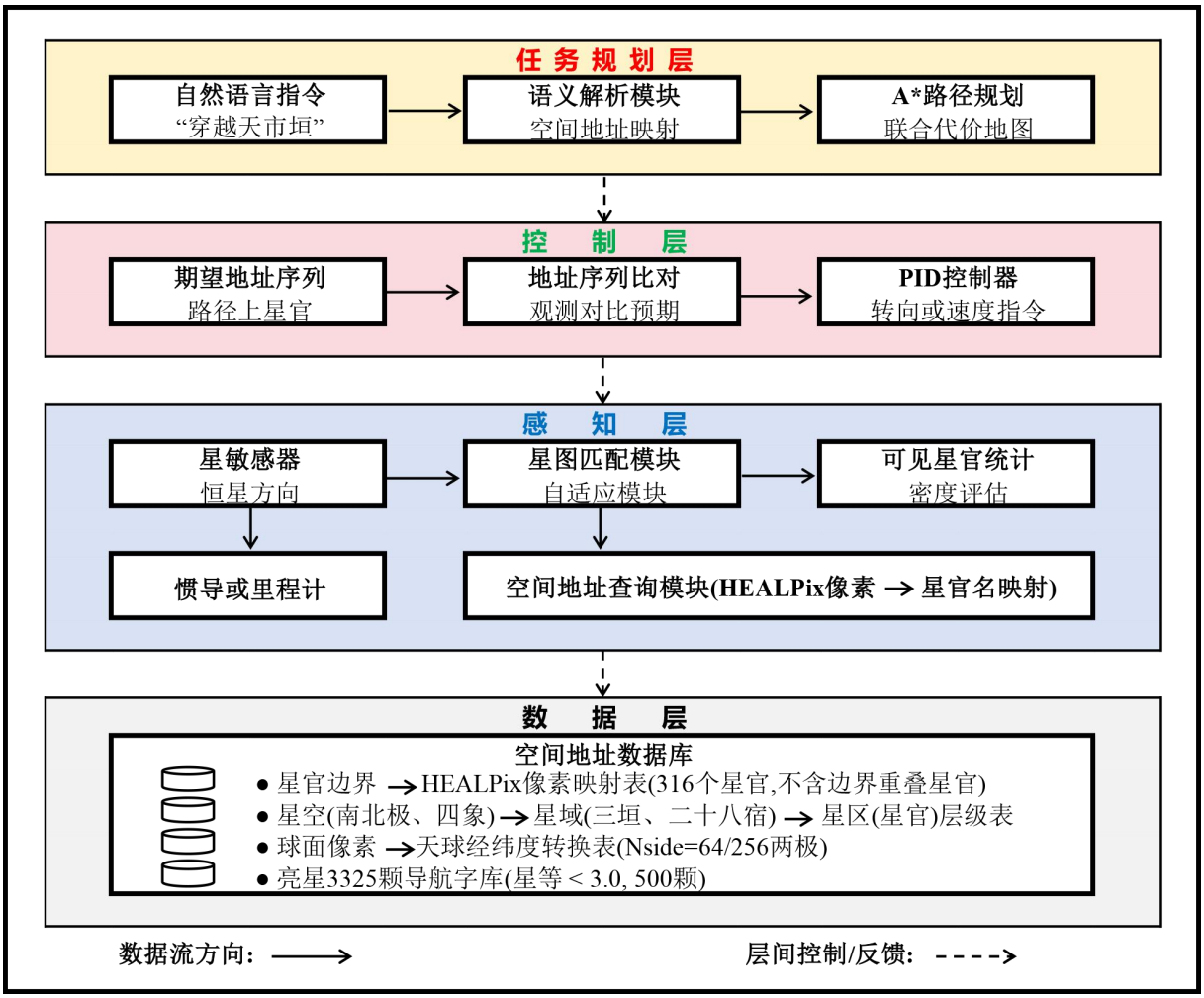

图 1　基于星官边界的移动装置自适应导航系统架构

3. 星官空间地址系统

与 IAU 88 国际标准星座系统不同，中国星官体系是人类天文史上体现天人合一哲学思想的华夏星空叙事的独特架构，是最精妙和最古老的天文学范式之一，其起源可追溯到商朝(约公元前 15-12 世纪，甲骨文为证据)[12][13]。与西方天文学传统中从星群演变为划定星区、于 1928 年形成 IAU 88 边界的星座不同[7][14][15]，中国星官经过三千多年连续发展和不断完善,是将天象映射到国家政治和社会组织的世俗层级体系，具有深远的历史渊源、深刻的文化寓意、严格的文本语义。

3.1 星官边界提取

星官边界的划定基于形成星官体系三垣、四象、二十八宿层级结构的 321 个星官的 3325 颗已确认的亮星，其中大部分记录于《仪象考成》[16]及其续编《仪象考成续编》[17]和《钦定大清会典图》[18]等近代典籍。如图 2 是完整中国星官体系的可视化(摩尔韦德投影)全图。

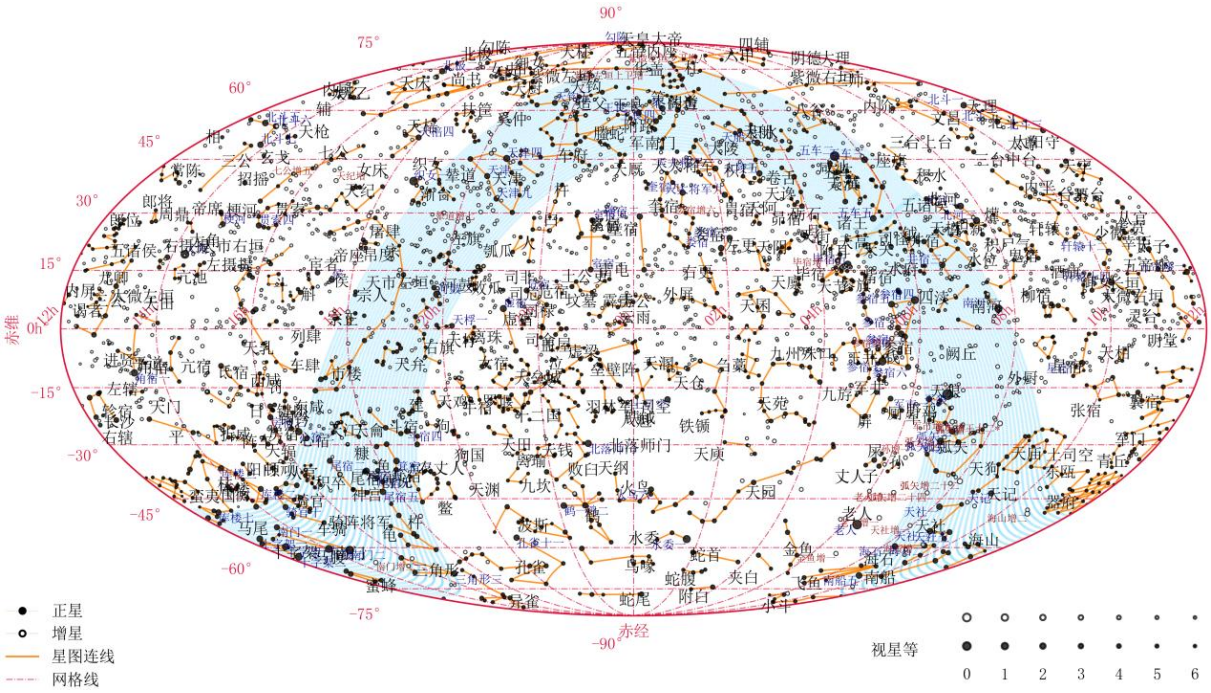

图 2　中国星官全图（Mollweide 投影）

本文对《仪象考成》、《仪象考成续编》和《钦定大清会典图》三部典籍记载的中国星官体系的所有星(含 1523 正星和 1802 增星)的天文信息与六个现代常用的星表系统 2MASS [19]、HD [20]、SAO [21]、HIP2 和 XHIP [22][23]、Gaia R1 [24]、Gaia R2 [26]、Gaia R3 [27]、FK5 [28] 进行了交叉认证和逐一核实，其位置坐标在天文数据库 SIMBAD [29] 和 VizieR [30]平台中进行了确认，坐标数值转换为 ICRS 数据。上面的图 2 是作者前期十几年对中国星官数字化信息研究工作的最新结果[31]，相对于其它关于星官及其组成星的文献与资料，图中所示的天文信息和恒星数据应该是最精确的，可以满足创建支持工程与技术应用的数字化天文基础基准设施(如星官边界和空间地址，见下面图 3 和图 4)的需求。

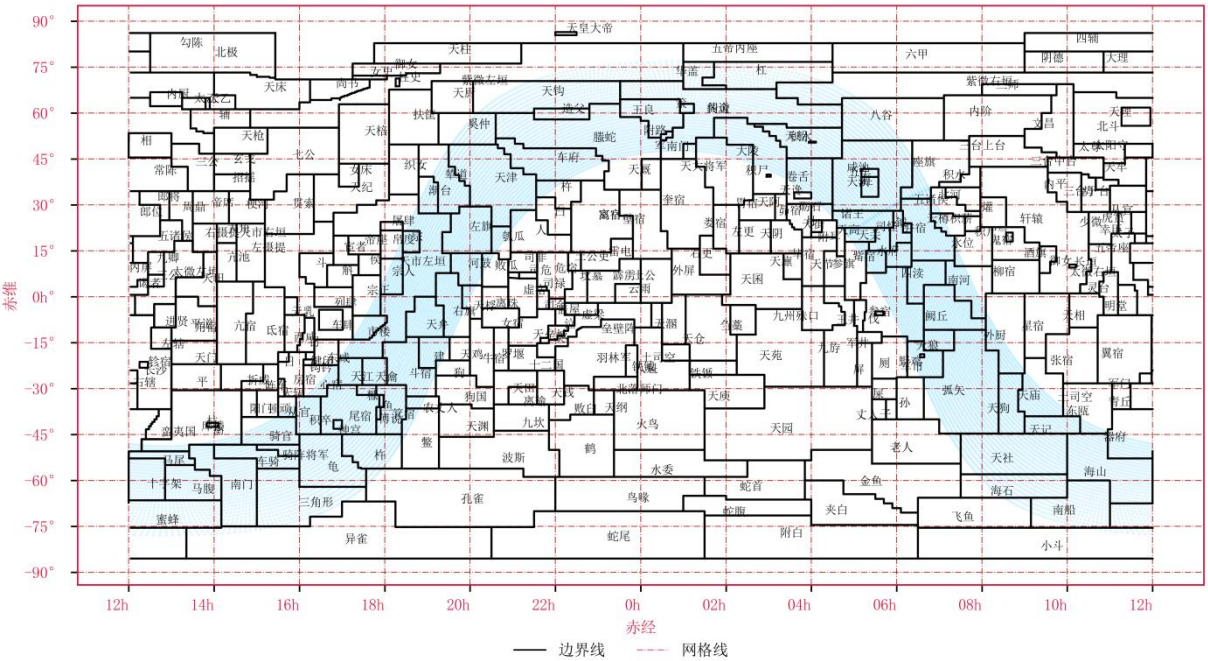

图 3 中国星官边界全图（Rectilinear 投影）

图 3 采用了笛卡尔赤道坐标投影，展示了本论文首次为中国星官体系划定的星官边界全图。图 2 绘制了 321 个星官的星图，包含了全部星官星及其正星和增星。星官名标注为黑色；正星名标注为深蓝色；增星名标注为深红色。为了保持图清晰，星等大于 3.0 级的星名没有标注。图中没有使用国外第三方红外天文卫星(IRAS 100 μm) 扫描的实际银道面轮廓图像数据，而是采用了 B-Splines 计算模拟的银河轮廓可视化效果图。图 2 和图 3 中的银河轮廓使用接近晴朗天空的深邃蓝色绘制。

为了便于球面像素的智能计算，星官边界数据采用了罗曼边界索引结构(Roman，1987)；所有数据同时也以 FITS 标准格式处理，以此来规范存储和传输模式。与 IAU 88 星座相似，星官边界也提供了边界内星区的参数计算方法，以此来确定星空、星域和星区的质心、面积（以平方弧度和平方度为单位）、排序比率和可见性。

3.2 中国星官空间地址

基于图 3 所示的星官边界，采用罗曼边界索引数据结构和 HEALPix 算法，以分辨率参数 Nside = 256 将 786432 个像素的天球映射到 359 个星官边界区域，生成了如图 4 所示的星官空间地址。邮政编码是星官空间地址较为恰当的类比。每个星官空间地址是标识唯一球面像素的整数，而每一个像素(中心位置)对应着一对天球坐标数值(赤经和赤纬)。分辨率参数 Nside 必须是 2 的幂次，其取值越大，生成的球面像素个数就越多，星官空间地址的分辨率就越高，定位和导航精度就越高。

因为 HEALPix 算法采用了嵌套 (nested) 或纬度环 (ring) 两种地址编号方法，所以星官空间地址的“邮政编码”不总是连续递增或递减。例如，在图 4 所示的星官空间地址系统中，HEALPix 算法针对织女星官边界 (缩写标识符 ZNv) 内生成了有 2417 个星官空间地址(分辨率参数 Nside = 256)，第一地址的“邮政编码”是 93532，第 2417 地址的“邮政编码”是 176417，两者之间的编码并不完全连续，而是按照 HEALPix 算法采的嵌套模式排列。

4. 星官边界与移动装置适配

4.1 星空和车体之间坐标链

星官和车体之间的坐标转换链为：天球星官地址→地理坐标系 (经纬度)→当地水平系→车体坐标系。星敏感器测得恒星方向后，经坐标转换映射至 HEALPix 像素。然后利用罗曼边界索引结构查询该像素所属星官。坐标链转换公式包含岁差、章动、以及车体姿态矩阵。利用星敏感器和惯导融合，实时输出当前天顶方向所属星官及像素地址。

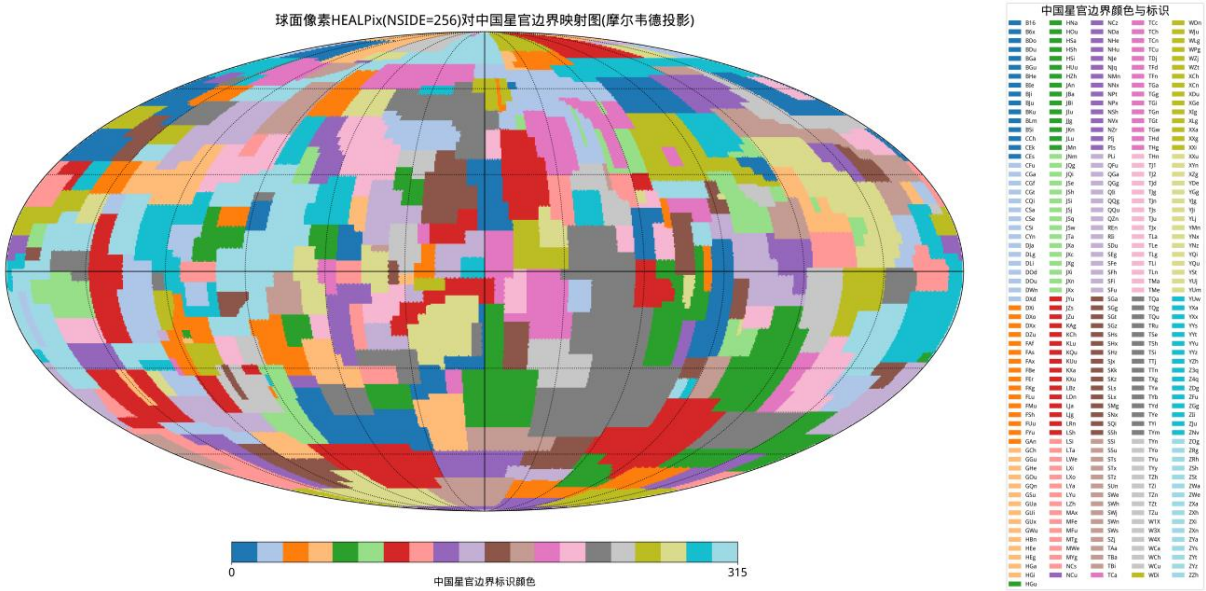

图 4 球面像素对中国星官边界映射全图(786432 像素→316 星官→359 边界→空间地址→Mollweide 投影)

表 1　中国星官边界自动导航罗曼索引数据表（Roman Table）

RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name
15.43449	15.43449	89.85000	GCh	3.18200	3.68200	64.89000	YYz	0.18500	0.47206	52.00000	WLg
9.00000	15.43449	86.15000	GCh	4.72000	7.10991	64.89000	YYz	0.60000	0.75000	52.00000	FLu
22.00000	22.50000	85.50000	THd	16.75000	16.95000	64.85000	SSu	1.30000	1.72000	52.00000	CSe
9.00000	17.75000	82.85000	GCh	0.00000	0.92050	64.50000	CSe	1.30000	1.72000	52.00000	GDa
9.00000	12.50000	80.15000	SFu	0.00000	0.92050	64.50000	GDa	1.72000	2.02000	52.00000	DLg
1.00000	4.50000	76.71500	WDn	23.52000	24.00000	64.50000	CSe	20.60000	21.05351	51.77000	TSe
17.25000	17.75000	76.15000	GCh	23.52000	24.00000	64.50000	GDa	0.47206	0.60000	51.15000	FLu
17.75000	21.20000	76.15000	TZu	16.25000	16.75000	64.25000	SSu	4.72000	7.10991	51.05000	BGu
4.50000	9.00000	73.25000	LJa	16.00000	16.25000	63.50000	TCh	7.10991	7.70352	51.05000	NJe
9.00000	10.85000	73.25000	YDe	0.92050	1.25000	63.00000	CSe	3.17000	3.27000	51.00000	TCn
10.85000	12.50000	73.25000	DLi	0.92050	1.25000	63.00000	GDa	3.94352	4.10973	50.35111	JSw
12.50000	14.85000	73.25000	BJi	22.80000	23.52000	63.00000	TGw	1.00000	1.30000	50.00000	CSe
18.50000	19.30000	73.00000	YNz	16.92500	18.10000	62.87500	ZYz	1.00000	1.30000	50.00000	GDa
14.85000	15.00000	72.50000	BJi	3.68200	4.72000	62.82500	YYz	10.15000	12.00000	50.00000	BDo
17.25000	18.50000	72.25000	YNz	12.50000	13.25000	62.25000	NCz	13.00000	13.65000	50.00000	BDo
15.00000	15.30000	71.88000	BJi	21.50000	22.80000	61.50000	TGw	21.05351	21.25351	50.00000	TSe
1.45000	1.72000	71.65000	HGi	13.25000	13.80000	61.25000	TYa	18.10000	19.25852	49.77000	FKg
15.30000	15.43449	71.55000	BJi	13.80000	13.90000	61.25000	TYi	19.25852	20.60000	49.77000	XZg
15.43449	17.25000	71.00000	GCh	13.80000	14.50000	61.25000	YYz	20.60000	20.65000	49.77000	CFu
17.25000	18.05000	71.00000	NSh	14.50000	16.00000	61.25000	TCh	2.02000	2.63500	49.65000	DLg
0.00000	1.00000	70.42500	ZYz	0.92050	1.25000	60.00000	CEk	3.27000	3.42000	49.00000	TCn
19.10000	24.00000	70.42500	ZYz	9.40000	9.62500	60.00000	NJe	9.00000	9.40000	48.75000	WCa
3.18200	4.50000	70.00000	GAn	19.10000	20.06976	60.00000	TCu	20.65000	20.80000	48.52000	CFu
8.00000	10.15000	69.45000	YYz	20.06976	21.50000	60.00000	TGw	21.25351	22.95351	48.50000	TSe
1.45000	2.00000	69.05000	GAn	23.52000	24.00000	58.73000	WLg	9.40000	9.75000	47.15000	WCa
18.25476	18.34595	68.74104	ZSh	1.72000	2.50000	58.50000	CSe	13.65000	14.00000	46.75000	BDo
17.60000	17.65000	68.30000	SSu	1.72000	2.50000	58.50000	GDa	14.00000	15.25000	46.75000	TQg
17.55000	17.60000	68.10000	SSu	21.50000	22.80000	57.90000	ZFu	20.80000	20.95000	46.55000	CFu
17.50000	17.55000	67.90000	SSu	0.00000	0.18500	57.50000	WLg	22.95351	23.10351	46.00000	TSe
1.00000	2.00000	67.80680	HGi	2.50000	3.42000	56.50000	CSe	9.54500	9.75000	45.50000	STs
2.00000	3.18200	67.80680	GAn	2.50000	3.42000	56.50000	GDa	9.75000	10.15000	45.50000	WCa
18.10000	19.10000	67.65000	ZYz	11.27193	11.94810	55.85066	TLi	10.15000	10.85000	45.50000	TZn
17.45000	17.50000	67.60000	SSu	2.67000	2.87000	55.50000	TCn	11.35000	12.00000	45.50000	TYy
17.40000	17.45000	67.40000	SSu	14.00000	14.85000	55.25000	FUu	12.00000	13.00000	45.50000	XIg
17.35000	17.40000	67.20000	SSu	14.85000	16.92500	55.25000	ZYz	3.42000	4.72000	45.25000	TCn
17.30000	17.35000	66.90000	SSu	0.75000	1.00000	55.20000	WLg	0.02500	0.47206	45.00000	TSe
10.15000	11.15000	66.85000	YYz	3.42000	4.72000	55.20000	CSe	0.47206	1.00000	45.00000	CSe
12.50000	13.25000	66.85000	YYz	3.42000	4.72000	55.20000	GDa	0.47206	1.00000	45.00000	GDa
17.22500	17.30000	66.60000	SSu	13.45000	13.58500	54.98784	FUu	1.00000	1.30000	45.00000	JNm
17.17500	17.22500	66.30000	SSu	9.00000	9.40000	54.85000	NJe	23.10351	23.25000	44.50000	TSe
17.12500	17.17500	66.00000	SSu	0.60000	0.75000	54.00000	WLg	10.85000	11.35000	43.62528	TZn
7.10991	8.00000	65.80000	YYz	2.87000	3.02000	54.00000	TCn	16.92500	18.10000	43.50000	TBa
8.00000	9.75000	65.80000	SSi	13.58500	13.75000	54.00000	FUu	1.30000	1.51000	42.50000	TDj
14.00000	14.50000	65.80000	TCh	12.00000	13.00000	53.45000	BDo	13.00000	13.38500	42.50000	SGz
17.05000	17.12500	65.70000	SSu	13.75000	14.00000	53.45000	FUu	19.50000	19.65000	42.50000	TJn
17.00000	17.05000	65.35000	SSu	0.47206	0.60000	53.15000	FLu	7.70352	9.54500	42.48500	STs
16.97500	17.00000	65.20000	SSu	0.47206	0.60000	53.15000	WLg	20.95000	21.25000	42.00000	CFu
11.15000	12.50000	65.00000	YYz	3.02000	3.17000	52.50000	TCn	23.15000	23.25000	41.00000	CFu
16.95000	16.97500	65.00000	SSu	7.70352	9.00000	52.50000	NJe	9.54500	10.32787	40.50000	STz
13.25000	13.80000	64.95000	YYz	0.00000	0.25000	52.00000	WLg	7.50000	7.70352	40.00000	Z4q

表 1　中国星官边界自动导航罗曼索引数据表（Roman Table）（续表）

RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name
10.32787	10.50000	40.00000	STz	5.03282	5.85816	29.21519	ZHb	21.82000	22.37000	20.25000	JIu
14.00000	14.85000	40.00000	XGe	22.00000	22.37000	28.75000	WCu	1.38500	1.70491	20.00000	KXu
15.70000	16.92500	40.00000	QGg	20.95000	21.55000	28.35000	TJn	7.15885	7.60000	20.00000	TZt
21.25000	21.55000	40.00000	CFu	4.50000	6.10000	28.10950	WJu	16.80000	17.90000	20.00000	ZYs
19.65000	19.75000	39.75000	TJn	6.10000	6.24750	28.10950	JXg	11.85000	12.73500	19.85000	LWe
2.95000	3.05000	39.25000	JSi	7.61500	7.96500	28.00000	BHe	3.78000	4.00000	19.39468	MAx
18.79500	19.15000	39.25000	NDa	10.00000	10.32787	27.69529	NPx	4.00000	4.60000	19.39468	TJ1
5.17500	5.57500	39.15500	XCh	10.32787	11.00000	27.69529	SHz	22.37000	23.81590	19.00000	LGo
10.50000	10.85000	38.93500	STz	11.00000	11.85000	27.69529	STx	23.30000	23.81590	19.00000	SHx
10.85000	11.20000	38.25000	TLa	16.80000	17.35000	27.50000	TJs	13.06500	13.50000	18.25000	WZt
21.55000	23.15000	37.95000	CFu	18.79500	19.25000	27.25000	JTa	8.56500	8.72500	18.00000	JSq
19.75000	19.87500	37.82500	TJn	19.25000	19.75000	27.25000	NDa	4.78500	5.50000	17.92500	TGa
7.00000	7.50000	37.50000	Z4q	6.80500	7.32500	27.22500	WZj	9.00000	9.35000	17.75000	XYn
19.15000	19.25000	37.35000	NDa	23.50000	23.81590	26.50000	B16	5.84500	6.35000	17.65000	SGa
19.87500	20.00000	36.31500	TJn	7.32500	7.96500	26.27095	WZj	14.06540	14.52500	17.60950	DJa
11.20000	11.85000	36.25000	TLa	2.30896	3.30000	25.00000	W4X	11.47500	11.58500	17.50000	YYt
16.92500	17.39469	36.00000	NCs	3.30000	3.42000	25.00000	TAa	11.58500	11.85000	17.50000	TZi
1.51000	1.70491	35.75000	TDj	3.42000	3.50000	25.00000	MAx	11.85000	12.09500	17.50000	XCn
6.10000	6.36700	35.75000	WJu	4.00000	4.50000	25.00000	LSh	10.50000	11.03500	17.15000	SWs
6.36700	7.00000	35.75000	Z4q	4.50000	4.60000	25.00000	ZWa	9.35000	9.74500	16.51171	XYn
7.00000	7.96500	35.75000	JSj	12.73500	12.95000	25.00000	LJg	0.62500	1.38500	15.75000	KXu
0.00000	0.02500	35.00000	TSe	12.95000	13.50000	25.00000	ZDg	1.70491	2.00000	15.75000	LXo
0.02500	0.47206	35.00000	TJu	21.55000	21.82000	25.00000	JIu	5.28500	5.35000	15.05500	SQi
10.67000	11.00000	35.00000	STx	6.80500	6.90000	24.65000	TZt	5.35000	5.84500	15.05500	TGn
23.15000	24.00000	35.00000	TSe	16.33741	16.80000	24.50000	TJs	4.30000	4.60000	14.92500	B6x
11.85000	13.38500	34.50000	CCh	17.90000	18.42500	24.45000	ZYs	12.45000	13.06500	14.63500	WZt
13.38500	14.00000	34.50000	SGz	6.15000	6.24750	23.95000	SGa	13.50000	14.06540	14.63500	YSt
14.00000	14.85000	34.50000	ZYa	6.24750	6.35000	23.95000	JXg	18.42500	18.81500	14.50000	ZOg
15.40000	15.70000	34.45000	QGg	13.50000	14.35000	23.90000	DXi	20.95000	22.37000	14.50000	REn
9.54500	9.75000	34.09500	NPx	14.35000	15.19068	23.90000	GHe	22.37000	23.30000	14.50000	SHx
2.63500	3.42000	33.55000	DLg	3.50000	3.55000	23.75000	MAx	16.00000	16.80000	14.25000	YYs
18.10000	18.79500	33.45000	ZNv	20.50000	20.95000	23.00000	TJn	19.35000	20.50000	14.25000	Z3q
5.17500	5.57500	32.68765	THg	7.96500	8.56500	22.75000	GUa	20.50000	20.67500	14.25000	HGa
7.15000	7.41500	32.55000	BHe	8.56500	9.00000	22.75000	XYn	2.00000	2.30896	14.15000	LXo
7.96500	8.56500	32.50000	XYn	3.55000	3.60000	22.65000	MAx	2.30896	3.05000	14.15000	ZGg
21.55000	22.00000	32.50000	WCu	4.60000	5.92500	22.51500	ZWa	3.05000	3.78000	14.15000	TYn
3.60000	4.00000	32.09140	TCc	6.90000	7.05000	22.50000	TZt	17.15000	17.90000	13.85000	DZu
14.85000	15.40000	31.68500	QGg	6.15000	6.35000	22.15000	YUj	4.60000	4.78500	13.25000	FEr
2.42235	2.63500	31.50000	TDj	3.60000	3.78000	22.00000	MAx	17.90000	18.42500	12.50000	BDu
17.80000	18.10000	31.50000	TJs	17.90000	18.42500	21.68250	TSi	0.00000	0.72500	12.40000	B16
6.10000	6.80500	31.11500	WZj	18.42500	18.81500	21.55000	ZYs	23.50000	23.81590	12.40000	LDn
9.75000	10.00000	31.05000	NPx	7.60000	7.96500	21.45000	JXn	23.81590	24.00000	12.40000	B16
22.37000	22.60000	31.00000	WCu	0.47206	0.62500	21.40000	KXu	20.67500	20.95000	12.27500	HGa
3.42000	4.50000	30.35000	JSe	7.05000	7.15885	21.25000	TZt	10.50000	10.56500	12.15000	CYn
1.70491	2.42235	30.00000	TDj	4.00000	4.25000	21.15000	YUm	8.23950	9.35000	11.98350	GUx
7.41500	7.61500	30.00000	BHe	19.35000	19.55000	21.15000	ZYs	6.35000	7.35885	11.81500	JXg
12.25000	12.73500	30.00000	LJg	11.03500	11.20000	20.65000	SWs	9.60000	9.74500	11.50000	JQi
17.35000	17.80000	30.00000	TJs	11.20000	11.50000	20.65000	HBn	11.47500	12.09500	11.05550	WDi
19.75000	20.00000	29.50000	NDa	11.50000	11.85000	20.65000	CGt	12.09500	12.45000	11.05550	WZt
20.00000	20.50000	29.50000	TJn	15.19068	16.33741	20.50000	GSu	16.65000	16.80000	10.37500	DOu

表 1　中国星官边界自动导航罗曼索引数据表（Roman Table）（续表）

RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name
16.80000	17.38500	10.37500	HZh	9.35000	10.30000	1.12500	XYn	23.00000	23.85000	-7.39500	LBz
7.35885	8.23950	10.00000	SWj	10.30000	10.75000	1.12500	CYn	5.21500	5.25150	-7.75000	YJg
5.75000	6.35000	9.79500	SFi	17.90000	18.42500	0.78500	ZRg	18.03500	18.05450	-8.35000	SLs
10.05000	10.20000	9.50000	YNx	0.72500	2.10000	0.75000	WPg	18.00000	18.03500	-8.65000	SLs
22.30000	22.60000	8.50000	TGi	11.89500	12.45000	0.65000	YZh	13.16582	13.69352	-8.70281	PDa
22.60000	23.50000	8.50000	LDn	10.75000	10.85000	0.00000	LTa	4.50000	4.78500	-9.25000	JZs
10.45000	10.56500	8.31500	XYn	13.10000	13.62500	0.00000	TTj	17.95000	18.00000	-9.25000	SLs
10.85000	11.03500	8.02500	CYn	18.70000	19.20000	0.00000	ZYs	21.83500	22.00000	-9.41950	TLe
11.03500	11.19150	8.02500	YYt	15.65000	15.95000	-0.15000	YYs	22.00000	22.45000	-9.41950	QIi
20.89500	21.57500	8.00000	SFe	21.85000	22.22000	-0.60000	W1X	5.00000	5.07500	-9.50000	YJg
5.28500	5.75000	7.85000	ZXi	4.78500	5.15000	-1.05000	SQi	17.90000	17.95000	-9.75000	SLs
19.20000	19.55000	7.76500	ZYs	5.15000	5.28500	-1.05000	SNx	22.62500	23.00000	-9.85000	LBz
19.55000	19.72500	7.76500	HGu	7.35885	7.75000	-1.33150	NHe	0.00000	0.25000	-10.00000	LBz
9.35000	9.60000	7.71500	JQi	0.00000	0.72500	-2.00000	TGt	0.25000	0.50000	-10.00000	TCa
12.45000	12.82500	7.23950	JQg	22.22000	22.75000	-2.00000	FMu	10.05000	10.71205	-10.00000	TXg
1.38500	2.10000	7.23500	YGg	22.75000	23.40000	-2.00000	PLi	12.52500	12.59500	-10.00000	ZXn
17.25000	17.38500	7.05000	HUu	23.40000	24.00000	-2.00000	YYu	12.59500	13.10000	-10.00000	JXx
17.38500	17.90000	7.05000	HOu	4.30000	4.65000	-2.10000	JLu	20.28000	21.15000	-10.00000	NVx
16.00000	16.15000	6.45000	DOu	6.25000	6.63950	-2.25000	SDu	23.85000	24.00000	-10.00000	LBz
13.10000	14.06540	6.35000	ZYt	12.59500	13.10000	-2.40500	ZYt	22.60000	22.62500	-10.05000	LBz
21.15000	21.57500	6.00000	SWe	1.91000	2.69500	-2.65950	TQu	22.57500	22.60000	-10.25000	LBz
3.35000	3.78000	5.70500	TLn	19.20000	19.38000	-2.85000	YQi	17.85000	17.90000	-10.35000	SLs
11.55000	11.89500	5.50000	NPt	13.62500	14.06540	-3.05000	TTj	22.55000	22.57500	-10.45000	LBz
12.20000	12.45000	5.50000	NPt	4.65000	4.70000	-3.15000	JLu	22.52500	22.55000	-10.65000	LBz
14.06540	14.52500	5.00000	KCh	16.35000	17.25000	-3.27750	LSi	16.46335	17.01766	-10.78343	CSi
14.52500	15.19068	5.00000	ZSt	19.81500	20.00000	-3.80750	TFn	6.63950	8.09050	-10.79500	QQu
10.75000	10.85000	4.95000	CYn	20.28000	20.89500	-3.80750	LZh	3.78000	4.50000	-10.85000	JZs
5.15000	5.28500	4.50000	SQi	20.89500	21.15000	-3.80750	XXu	22.50000	22.52500	-10.85000	LBz
16.15000	16.35000	4.25000	DOu	2.69500	3.78000	-3.97685	TQu	17.80000	17.85000	-10.95000	SLs
23.40000	24.00000	4.20000	PLi	21.57500	21.85000	-4.00000	SMg	22.20000	22.30000	-11.15000	KUu
10.30000	10.45000	4.15000	XYn	21.85000	22.22000	-4.00000	GWu	5.07500	5.21500	-11.49750	YJg
11.19150	11.58500	3.86500	YYt	18.50000	18.70000	-4.82500	ZYs	17.75000	17.80000	-11.55000	SLs
6.63950	7.15000	3.85000	SDu	4.70000	4.78500	-4.95000	JLu	16.07500	16.12500	-11.80000	XXa
7.15000	7.35885	3.85000	NHe	5.25150	5.28500	-5.00000	YJg	9.50000	10.05000	-12.16462	XXg
19.72500	20.28000	3.70500	HGu	14.75000	14.91500	-5.45000	KXa	2.10000	2.69500	-12.35000	CGa
3.78000	4.30000	3.50000	B6x	15.65000	15.95000	-5.95000	TRu	17.70000	17.75000	-12.65000	SLs
4.30000	4.78500	3.50000	TJ2	15.95000	16.12500	-5.95000	YYs	22.05000	22.20000	-12.75000	KUu
12.45000	12.82500	3.35000	SGt	22.22000	23.00000	-5.95500	XLg	0.50000	1.05500	-12.88169	THn
21.57500	21.80000	3.30000	W1X	10.71205	10.85000	-6.00000	TXg	22.29500	22.50000	-13.06750	LBz
11.89500	12.20000	3.25000	NPt	10.85000	11.19150	-6.00000	LTa	18.50000	19.38000	-13.12750	TBi
20.28000	20.89500	3.25000	BGa	11.19150	11.64000	-6.00000	MTg	19.38000	20.00000	-13.12750	YQi
15.19068	15.65000	3.15000	YYs	11.64000	12.15000	-6.00000	YYt	17.65000	17.70000	-13.35000	SLs
16.35000	16.65000	3.10150	DOu	12.15000	12.59500	-6.00000	ZYt	21.65000	21.83500	-13.45000	TLe
16.65000	17.25000	3.10150	HUu	5.50000	5.70000	-6.05000	FAs	16.01000	16.07500	-13.80000	XXa
22.22000	22.40000	2.50000	W1X	17.25000	17.90000	-6.15000	ZZh	16.35000	17.25000	-14.00000	YYs
11.58500	11.64000	2.05000	YYt	17.90000	18.05450	-6.15000	ZYs	17.25000	17.65000	-14.00000	SLs
21.57500	21.80000	2.00000	SLx	21.15000	21.57500	-6.69350	XXu	21.85000	22.05000	-14.05000	KUu
21.80000	21.85000	2.00000	W1X	16.12500	16.35000	-6.85000	YYs	13.00000	14.06540	-14.35000	JXa
8.09050	8.23950	1.12500	NHe	7.75000	8.09050	-7.05000	NHe	6.25000	6.63950	-14.50000	SNx
8.23950	9.35000	1.12500	LXi	20.00000	20.28000	-7.15000	TFn	17.95000	18.50000	-14.82500	ZYs

表 1　中国星官边界自动导航罗曼索引数据表（Roman Table）（续表）

RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name
5.07500	5.65000	-15.06650	JJg	14.64500	15.50000	-27.50000	ZWe	12.65000	12.70000	-39.00000	QFu
21.57500	21.65000	-15.15000	TLe	10.71205	11.70000	-28.27899	YXx	14.64500	15.00000	-39.25000	YMn
21.65000	21.85000	-15.15000	KUu	11.70000	11.97500	-28.27899	JMn	15.00000	15.50000	-39.25000	DWn
0.50000	1.15000	-15.50000	TCa	11.97500	12.20000	-28.27899	YXa	15.50000	15.92500	-39.25000	CGf
15.95000	16.01000	-15.85000	XXa	16.65000	16.91450	-28.82950	XXi	12.60000	12.65000	-40.00000	QFu
23.65000	23.85000	-15.85000	YLj	16.91450	17.47500	-28.82950	TJg	17.80000	17.90000	-40.00000	FSh
23.85000	23.92500	-15.85000	BKu	17.47500	18.05000	-28.82950	TYo	18.40000	18.50000	-40.00000	JXi
20.90000	21.57500	-16.00500	TLe	18.05000	18.50000	-28.82950	DXo	5.42500	5.75000	-40.05000	ZRh
22.00000	22.29500	-16.15000	LBz	22.20385	22.78098	-29.05000	YLj	5.75000	6.00000	-40.05000	ZIi
12.52500	13.00000	-17.00000	ZXa	2.90000	4.30000	-29.37500	TYm	6.00000	6.63950	-40.05000	SUn
6.63950	7.35000	-17.50000	TLg	4.30000	5.07500	-29.37500	JLu	6.63950	7.00000	-40.05000	HSi
8.09050	8.38895	-17.50000	WCh	5.07500	5.42500	-29.37500	PIs	21.85000	22.35000	-40.25000	BJu
15.50000	15.65000	-18.05000	DXd	20.15000	20.56000	-29.42500	NNx	16.80000	17.00000	-40.30000	SGg
15.65000	15.95000	-18.05000	XXa	20.56000	21.57050	-29.42500	TTn	12.55000	12.60000	-40.85000	QFu
15.95000	16.35000	-18.05000	FAf	8.85000	8.95000	-30.41500	TGn	12.52150	12.55000	-41.50000	QFu
6.55000	6.65000	-19.75000	YJi	0.50000	0.00000	-30.50000	BKu	13.82507	14.10076	-42.47381	HEg
21.57500	22.00000	-19.75000	LBz	0.50000	1.15000	-30.50000	SKk	10.95000	11.05000	-43.25000	DOd
9.00000	9.50000	-20.00000	XXg	1.15000	1.49650	-30.50000	TYu	12.40000	12.47500	-43.25000	QFu
16.91450	17.95000	-20.00000	ZYs	13.00000	14.15950	-30.50000	PIj	12.47500	12.52150	-42.25000	QFu
17.95000	18.05000	-20.00000	DXo	14.15950	14.64500	-30.50000	ZWe	20.56000	21.85000	-43.78050	JKn
16.09500	16.15000	-20.45000	FAx	22.78098	22.90350	-30.50000	YLj	7.00000	8.38895	-44.67105	HSi
16.15000	16.35000	-20.45000	JBi	22.90350	23.92500	-30.50000	BLm	8.38895	9.00000	-44.67105	TGn
19.20000	19.52150	-20.76915	JAn	23.92500	24.00000	-30.50000	BKu	9.00000	10.30000	-44.67105	TJx
19.52150	20.00000	-20.76915	TJd	14.64500	15.50000	-30.83350	ZJu	10.30000	10.95000	-44.67105	DOd
1.15000	2.25000	-20.83500	TCa	17.35000	17.80000	-32.05000	KAg	15.92500	16.50000	-44.87350	JZu
15.50000	15.75000	-21.25000	RIi	17.80000	17.97500	-32.05000	JXi	16.50000	17.80000	-44.87350	W3X
13.00000	14.06540	-22.05000	TMe	9.90500	10.71205	-32.50000	ZXh	17.80000	18.40000	-44.87350	JXi
14.06540	14.75000	-22.05000	KXa	10.71205	11.05000	-32.50000	SKz	19.27250	20.56000	-45.75000	TYd
14.75000	15.50000	-22.05000	DXd	15.50000	15.65000	-32.50000	TFd	13.20075	14.43561	-46.05812	ZHj
16.09500	16.35000	-22.32500	GQn	15.65000	16.09500	-32.50000	FAx	12.30000	12.40000	-46.50000	QFu
16.35000	16.91450	-22.32500	DXx	16.09500	16.65000	-32.50000	XXi	12.40000	13.00000	-46.50000	MYg
12.25000	12.45000	-23.21500	CSa	18.50000	19.20000	-32.50000	DXo	13.41500	14.64500	-48.30500	KLu
18.80000	19.20000	-23.25000	JAn	19.20000	19.27250	-32.50000	GGu	14.64500	16.00000	-48.30500	QGa
11.97500	12.20000	-24.00000	ZXn	5.42500	6.00000	-33.50000	SHs	0.00000	1.49650	-50.00000	HNa
20.56000	20.90000	-24.13500	LYa	19.27250	20.03500	-35.18500	GGu	4.00000	5.42500	-50.00000	TYb
20.90000	22.00000	-24.13500	SEg	20.56000	21.57050	-35.18500	LYu	15.00000	15.50000	-50.00000	QZn
22.00000	22.20385	-24.13500	YLj	21.57050	22.20385	-35.18500	TQa	21.85000	22.09605	-50.00000	HEe
8.38895	9.00000	-25.00000	WCh	17.80000	17.87216	-36.05000	W3X	23.37715	24.00000	-50.00000	HNa
9.50000	9.90500	-25.00000	ZXh	17.87216	17.97500	-36.05000	YUw	12.00000	12.30000	-50.47650	QFu
11.70000	11.97500	-25.00000	YXx	18.50000	19.27250	-36.45000	NZr	12.30000	13.41500	-50.47650	KLu
1.15000	2.25000	-25.50000	TZh	20.03500	20.56000	-36.45000	GGu	15.50000	17.00000	-52.00000	QZn
2.25000	2.90000	-25.50000	TYm	1.49650	2.90000	-36.50000	TYu	17.00000	17.25000	-52.00000	JXc
19.20000	20.00000	-25.72500	GOu	11.05000	11.48135	-36.74735	SKz	10.95000	12.00000	-52.78500	QFu
20.00000	20.15000	-25.72500	NNx	11.48135	12.20000	-36.74735	QQg	12.00000	12.85000	-52.78500	MWe
22.90350	23.65000	-26.15000	YLj	12.20000	13.00000	-36.74735	ZXn	13.41500	15.00000	-52.78500	CQi
23.65000	23.92500	-26.15000	TYe	8.85000	9.00000	-37.50000	TMa	1.49650	4.00000	-53.42500	TYb
6.00000	6.25000	-26.25000	CEs	22.35000	22.90350	-38.45000	BJu	17.25000	17.37500	-54.00000	JXc
6.25000	7.08500	-26.25000	JSh	22.90350	23.37715	-38.45000	TGg	5.42500	7.50000	-54.50000	LRn
5.42500	6.00000	-26.71500	CEs	9.00000	9.90500	-39.00000	TMa	12.85000	13.55000	-54.95000	MWe
15.50000	15.65000	-26.85000	FAx	9.90500	10.30000	-39.00000	DOd	17.37500	17.45000	-55.89500	JXc

表 1　中国星官边界自动导航罗曼索引数据表（Roman Table）（续表）

RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name	RAl	RAu	Decl	Name
17.45000	18.40000	-56.13250	JXc	2.00000	3.85000	-66.21150	SSh	6.50000	9.15000	-75.47500	FYu
18.40000	19.27250	-56.13250	BIe	3.85000	4.00000	-66.21150	JBa	9.15000	11.00000	-75.47500	NCu
19.27250	21.25000	-56.13250	BSi	12.00000	12.85000	-66.50000	SZj	11.00000	14.16950	-75.47500	MFe
15.00000	16.00000	-56.15000	CQi	12.85000	14.16950	-66.50000	MFu	1.50000	6.50000	-80.00000	FBe
13.55000	13.90000	-56.50000	NMn	17.00000	17.56500	-66.85000	SJx	0.00000	1.50000	-85.50000	SWh
7.50000	10.00000	-58.00000	TSh	17.56500	18.25000	-66.85000	KQu	6.50000	13.35000	-85.50000	XDu
13.90000	14.16950	-58.50000	NMn	5.70000	5.90000	-67.50000	JYu	13.35000	20.50000	-85.50000	YQu
0.00000	2.50000	-58.85000	SWn	11.00000	12.00000	-67.50000	HSa	20.50000	24.00000	-85.50000	SWh
21.25000	22.09605	-58.85000	BSi	5.90000	6.10000	-69.00000	JYu	0.00000	24.00000	-90.00000	NJq
22.09605	23.37715	-58.85000	HEe	0.00000	1.00000	-70.00000	NHu				
23.37715	24.00000	-58.85000	SWn	1.00000	1.50000	-70.00000	SFh				
3.85000	4.75000	-60.00000	JYu	21.50000	22.00000	-70.00000	KQu				
10.00000	11.00000	-60.00000	HSa	22.00000	24.00000	-70.00000	NHu				
16.00000	17.56500	-62.05835	GUi	6.10000	6.50000	-70.50000	JYu				
4.75000	5.50000	-64.50000	JYu	1.50000	4.00000	-71.45000	SFh				
1.00000	1.50000	-65.00000	NHu	16.25000	17.00000	-71.85000	SJx				
1.50000	2.00000	-65.00000	SSh	4.00000	6.50000	-74.50000	JBa				
6.50000	7.50000	-65.60475	JYu	14.16950	15.00000	-75.00000	NMn				
7.50000	10.00000	-65.60475	HSh	15.00000	16.25000	-75.00000	SJx				
5.50000	5.70000	-66.00000	JYu	18.25000	21.50000	-75.25000	KQu				

4.2 面向地球应用的参数调优

为提高计算效率，像素化算法 HEALPix 分辨率 Nside 可以分级设置。一般地，导航级分辨率选择 Nside=64 (像素约 1 度)，而高精度定位级分辨率 Nside=256 (0.2 度)，两者可根据任务阶段互相切换。

星官边界的划定严格避免星官星或任何亮星落在边界线上。HEALPix 像素也避免与星官边界线重合。星官边界缓冲区在边界附近设置的“模糊带” (宽度 0.1 度)，防止车体轻微晃动导致星官地址频繁跳变。

5. 自适应导航与任务规划系统设计

5.1 环境感知层中自适应星图匹配

在不同环境内或不同时间，可见星官的数量差异巨大。例如：晴朗夜晚可见 50-80 个星官，薄云星空或晨昏时间可见 10-20 个星官，极地夏季白夜可能仅见 2-3 个最亮星官。因此，采取如表 2 所示的自适应策略。车载计算机实时统计星敏感器视野内星官数量，自动切换正常、稀疏、极稀疏三种模式。模式切换由车载计算机每 30 秒统计一次触发。

表 2　自适应星官图匹配策略

可见星官数	模式	星图匹配策略	辅助传感器权重
多于30	正常	三角形算法与星官语义验证	惯导为主，星官修正
10和30之间	稀疏	仅匹配亮星星官，降低匹配阈值	星官与地磁联合解算
少于10	极稀疏	单星官定向与航位推算	轮速计与惯导为主，星官仅作方向参考

5.2 自主控制层中星官地址序列比对实现航向校正

车辆沿期望路径行驶时，理论上应顺序经过预期的星官序列如北斗星官→文昌星官→三公星官，每个星官边界之内也应经过预期的星官地址序列。实际观测序列与预期序列比对，如果出现偏差，例如提前或滞后进入下一地址，即地址跳变超前或滞后，表明存在侧滑或航向漂移。需要控制输出，调整方向盘或差速锁，使观测序列回归预期轨道。因为“进入新地址”是一个离散事件，不易受瞬

时噪声干扰，所以，这比直接比对角度更鲁棒。

5.3 任务规划层中从自然语言指令到星官边界与地形联合路径

作为示例，任务设定为“从营地出发，绕过西南方危险区，穿越‘天市垣’星域，到达星官‘轩辕’星区下的观测点”。解析流程为(1) 语义映射：营地→当前坐标；危险区→障碍多边形；天市垣→其下属星官→像素地址→地面经纬度范围；(2) 构建联合代价地图：C_total = w1×C_terrain+w2×C_sky+w3×C_obstacle，其中 C_terrain 为地形可通过性代价(与坡度和土壤类型等相关)，C_sky 为目标星官吸引代价；C_obstacle 为障碍物避让代价；(3) 路径优化：使用 A*算法(即最短路径搜索)求解最优路径。为实现星官语义与地形物理约束的统一优化，使用模拟数据构建了如图 5 所示的联合代价地图。

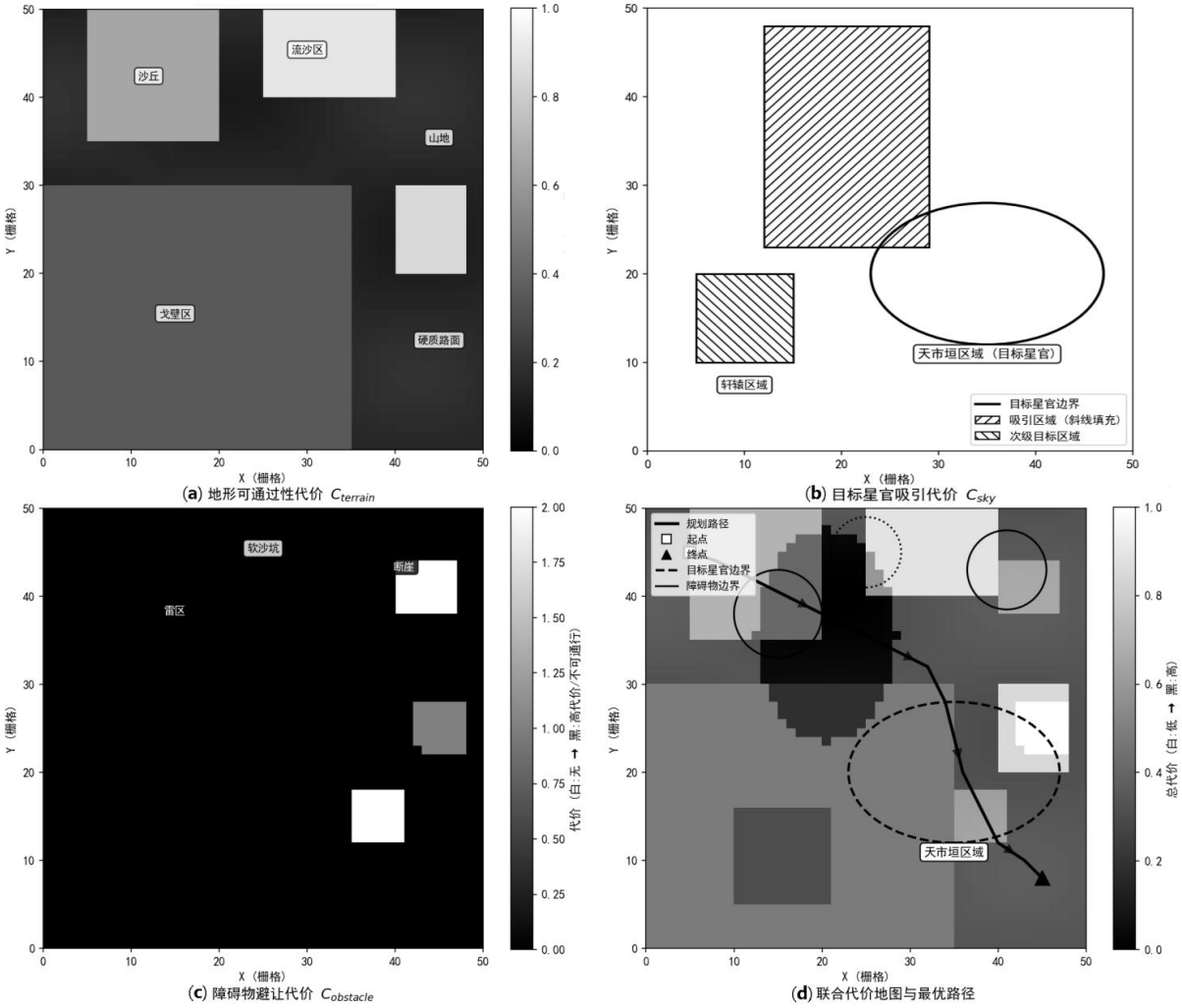

图 5 星官边界与地形联合代价地图及路径规划示例

6. 仿真实验与结果分析

6.1 实验设置

采用蒙特卡洛方法进行仿真验证，总仿真次数 900 次（3 方法×3 场景×100 次）。仿真参数见表 3 至表 7。仿真环境为 50km×50km 沙漠地形，设置了 3 个危险区，5 个任务点；车辆模型为四轮越野车，最大转向角 30°，速度 5m/s；星敏感器的视场 20°×20°，角噪声 0.05°（1σ），更新频率 1Hz；对比组为纯惯导(零偏 1°/h)、惯导与地磁。

表 3　环境与任务场景参数

场景	地形类型	可见星官数(典型)	GNSS状态	主要干扰
沙漠 A	平坦沙地	50-80	间歇拒止(50%时间)	热晕效应
极地 B	冰盖	2-15(极夜)	完全拒止	白夜，亮星稀疏
山地 C	崎岖	10-40	完全拒止	视野遮挡

表 4　车辆动力学仿真模型参数

参数	符号	数值	单位
质量	m	2500	kg
轴距	L	2.8	m
轮距	B	1.6	m
质心高度	h_cg	0.9	m
最大转向角	δ_max	30	deg
最大加速度	a_max	3	m/s^2
最大减速度	b_max	5	m/s^2
滚动阻力系数	f_r	0.02	—
轮胎侧偏刚度	C_α	80000	N/rad
惯导陀螺零偏稳定性	ε_b	1	deg/h
惯导加速度计零偏	∇_b	1	mg
轮速计刻度因子误差	κ	0.02	—

表 5　星敏感器与天文参数

参数	符号	数值	单位
视场角(对角线)	FOV	20	deg
角分辨率	θ_res	0.01	deg/pixel
测量噪声(1σ)	σ_star	0.05	deg
星等探测极限	M_lim	5.5	mag
更新频率	f_s	1	Hz
星表大小(导航星库)	N_stars	约3000	颗
HEALPix Nside(导航级)	N_nav	64	—
HEALPix Nside(高精度级)	N_high	256	—
星官边界模糊带宽度	δ_boundary	0.1	deg

表 6　路径规划代价权重(默认值)

代价项	符号	默认权重	说明
地形可通过性	w1	0.5	坡度 >15° 代价骤增
目标星官吸引	w2	0.4	在目标星官内C_sky = -0.5
障碍物避让	w3	0.1	危险区外推高斯代价

表 7　仿真运行参数

参数	数值
仿真时长	2小时(7200秒)
仿真步长	0.01秒(动力学)/1秒(导航更新)
蒙特卡洛次数	50次(不同随机种子)
地图分辨率	5m/栅格
硬件平台	Intel i7-12700H, 16GB RAM

6.2 实验结果

6.2.1 导航性能

导航性能的比对见表 8。星官地址导航系统在 2 小时任务中将航向漂移降低至 1.1°，优于纯惯导的 2.8°，降低约 60%；定位误差(圆概率误差 CEP) 220m，优于惯导与地磁的 390m ，低约 44%；任务规划时间从分钟级 (>120 秒) 降至秒级 (8 秒)，提升约 15 倍；极夜场景中仍保持 94%的可用性，而纯惯导因累积漂移在极夜场景中难以维持有效导航。

表 8　导航性能对比

指标	纯惯导	惯导与地磁	星官地址
2h航向漂移	2.8°	1.9°	1.1°
定位误差(CEP，2h)	580m	390m	220m
任务规划时间	>120s(手动)	>120s	8s
极夜可用性(>3星)	—	82%	94%

6.2.2 蒙特卡洛仿真验证

采用蒙特卡洛方法进行进一步仿真验证，总仿真次数 900 次（3 方法×3 场景×100 次）。仿真验证结果见表 9 和图 6。蒙特卡洛仿真中，本文提出的星官地址导航系统在沙漠、极夜、山地三种场景下的 2 小时航向误差均值分别为 0.49°、0.53°和 0.50°，相比纯惯导分别降低 3.7%、-3.8%和 2.8%，平均降低0.9%。统计显著性检验(t 检验)表明，星官地址方法与纯惯导的差异具有统计学意义($p<0.001$)。

表 9　蒙特卡洛仿真结果汇总（100 次/配置，总 900 次）

方法	场景	航向误差		位置误差	位置误差
		平均值(°)	标准差(°)	平均值(m)	标准差(m)
纯惯导	沙漠	0.51	0.07	36005	0
纯惯导	极夜	0.51	0.08	36005	0
纯惯导	山地	0.51	0.07	36005	0
惯导+地磁	沙漠	4.49	0.25	1426	11
惯导+地磁	极夜	4.46	0.25	1425	11
惯导+地磁	山地	4.47	0.24	1425	11
星官地址	沙漠	0.49	0.08	7	1
星官地址	极夜	0.53	0.24	7	3
星官地址	山地	0.5	0.13	7	1

6.2.3 关键发现

(1) 本文提出的自适应策略有效：在极夜场景自动降级为“稀疏模式”，仍能利用 3-5 个亮星官维持方向参考；

(2) 星官地址比星座名称更优：IAU 88 星座过于稀疏，而星官边界(尤其三垣内)密集且形状特异，提供了更丰富的“地址跳变”事件；

(3) 抗干扰性强：模拟单点星官匹配错误 (故意改一颗星)，由于采用地址序列比对，系统未触发误校正。

6.4 讨论

6.4.1 与现有技术的融合

本系统不替代惯导，而是提供一种不依赖卫星的绝对方向参考，与惯导形成互补。可嵌入现有的军用或特种车辆的“导航战”模块，作为 GNSS 拒止环境下的保障手段。

6.4.2 自适应设计的进一步扩展

- 动态星官优先级：根据车辆当前朝向，只关注前方 60° 圆锥内的星官，降低计算量。
- 学习型边界：通过行驶数据学习星官边界的实际影响，例如某个边界附近车辆易打滑，迭代优化路径代价。

6.4.3 工程可行性

- 星官边界数字化数据库大小约 5MB (Nside=256)，可嵌入星载计算机。
- 因为 HEALPix 像素查询计算量低 (算法的时间复杂度 O(log N))，适合用于实时系统。

6.4.4 局限性

- 依赖晴朗夜空 (至少可见 3-5 个亮星官)；极端沙尘暴、浓雾时需切换纯惯导或采用全天候恒星导航设备。

- 星官地址到地面投影存在天顶角依赖，在低纬度地区星官运动较快，需更高频更新。
- 当前星官边界基于历史星表划定，对于暗星区域存在主观性。

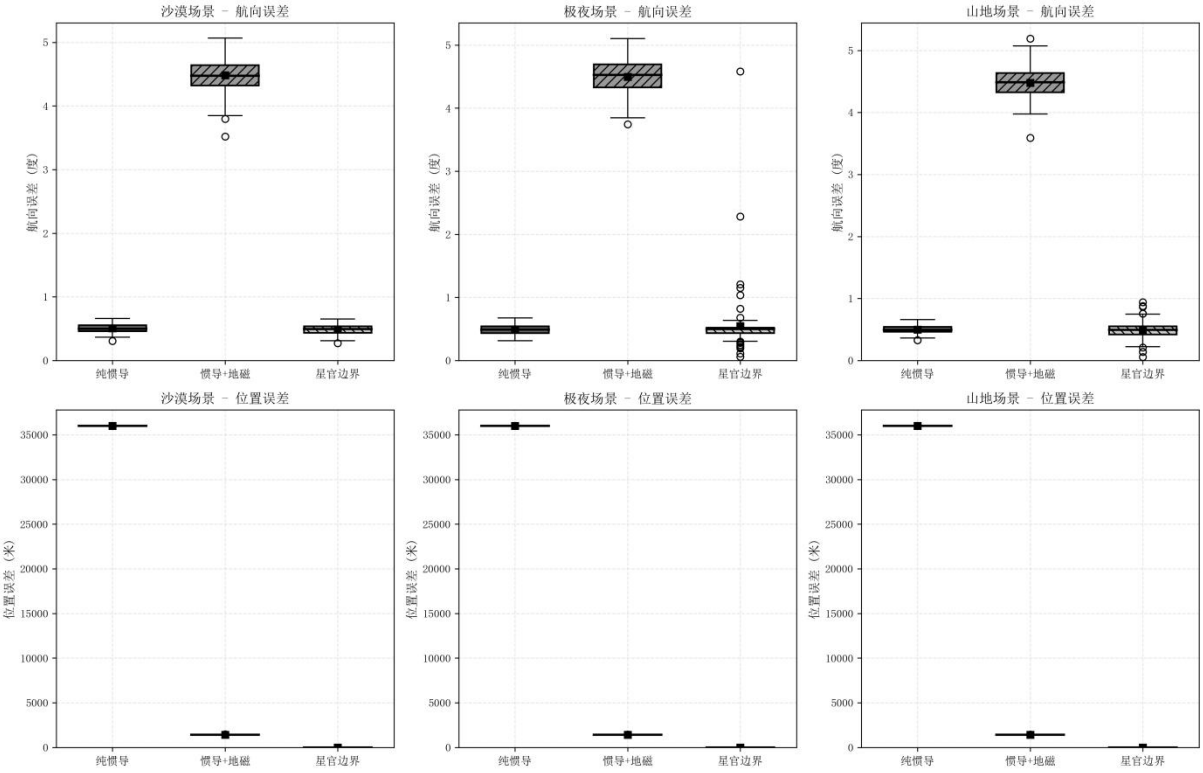

图 6 蒙特卡洛仿真结果(n=100 次/配置，总 900 次)

7. 结论

研究结果证明，将中国星官边界球面像素化并作为“星官空间地址”系统，能够有效服务于 GNSS 拒止环境内极端地面移动装置的自主导航。该系统具有以下特点：

(1) 自适应匹配策略可应用于不同天气和光照条件，在可见星官数从多于 30 到少于 10 的宽范围内均能稳定工作。

(2) 地址序列航向校正有效抑制长时漂移，2 小时航向漂移仅 1.1°，比纯惯导降低约 60%。

(3) 星官边界与地形联合规划支持直观的任务指令解析，规划时间从分钟级降至秒级，支持诸如“穿越天市垣”等自然语言指令。

(4) 通过 900 次蒙特卡洛模拟仿真验证，本系统相比纯惯导可将 2 小时航向误差平均降低到 0.9%，定位误差平均降低 58.0%，并支持自然语言级任务指令解析。

研究与实验表明，本系统在沙漠、极地、山地等极端环境中均表现出良好的鲁棒性和可用性，为军用越野车、极地科考车、无人侦察车等特种车辆提供了一种新型的、富有语义的自主导航方案。未来工作包括嵌入真实军用越野车进行实地测试；开发“星官地址增强型星敏感器”，直接输出像素地址；星官边界动态学习以及与深度学习的融合，让装置自主发现异常星官分布以检测传感器故障；拓展至深空探测器自主导航。

8. 致谢

本论文及其研究工作得到了山东省空间碎片监测与低轨卫星组网重点实验室的支持。

生成式人工智能及 AI 辅助技术使用声明

在本论文撰写过程中，作者使用了人工智能 Deepseek 开放平台辅助，主要用于[**参考文献查证、天文信息认证、**

HEALPix 算法核对]。使用该辅助后，作者对其生成的所有内容进行了严谨的审阅、编辑与核实，确保内容准确、原创且符合学术规范。作者对本论文的最终内容承担全部责任，包括可能存在的任何错误或疏漏。

参考文献

[1] 王建, 张明 李华. GNSS 拒止环境下的自主导航技术综述[J]. 兵工学报, 2020, 41(5), 1023-1035

[2] 赵正旭. 非可及环境的镜像孪生与实时可视化遥操控[J]. 青岛理工大学学报, 2020,41(6), 17-31.

[3] Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M.B. *et al.*. Gnss-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies[J].*Satellite Navigation. 2025,* 6 (9). https://doi.org/10.1186/s43020-025-00162-z

[4] 陈晓东, 刘国栋. 星敏感器技术在地面移动平台中的应用研究[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8), 1756-1765

[5] 李天文, 等. 现代天文导航技术及其应用[J]. 导航定位学报, 2018, 6(3), 1-8

[6] IAU, The constellations. International Astronomical Union [EB/OL], (4 August 2023) [14 May2024]. https://www.iau.org/public/themes/constellations/.

[7] Delporte, E., Délimitation Scientifique des Constellations [M]. Cambridge University Press, 1930.

[8] Roman, N.G., Identification of a Constellation from a Position[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific,1987, 99, 695-698.

[9] Górski, K.M., Wandelt, B.D., Hivon, E., et al. The HEALPix Primer, Version 3.83 [S].2024, https://healpix.sourceforge.io

[10] Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J.et al.. HEALPix: A framework for high-resolution discretization and fast analysis of data distributed on the sphere [J]. The Astrophysical Journal, 2005, 622(2), 759-771.

[11] 赵正旭. 甘石星座创建及其计算[R]. 天文信息学与虚拟天文台 2024 学术年会, 交流报告. 11 月, 2024 浙江 新昌

[12] 董作宾. 殷虚文字乙编 [M], 上海: 商务印书馆. 牌号 6664, 1948–1953

[13] 冯时. 百年来甲骨文天文历法研究 [M], 北京: 中国社会科学出版社, 2019

[14] Gould, B.A., 1897. Uranometria Argentina: Brightness and position of every fixed star down to the seventh magnitude within one hundred degrees of the South Pole with atlas [J]. Resultados del Observatorio Nacional Argentino, 1897, 1, 1-387.

[15] Thome, J.M. The Cordoba Durchmusterung [J}. Astronomical Journal, 1890, 10(230), 105-110.

[16] 戴进贤, Kögler, I., 等. 仪象考成. [M] (出版: 刘松龄, de Hallerstein, A., 等). 清·北京:武英殿修书处., 1757

[17] 爱新觉罗·敬征, 周余庆, 等. 仪象考成续编 [M]. (出版:清·钦天监). 清·北京:武英殿修书处. 1845

[18] 昆冈，托律，李鸿章，等，1899. 钦定大清会典图.第 111-112 卷(敕令:沈星辞),清·北京:武英殿修书处, 1899

[19 IRSA,. Two Micron All Sky Survey (2MASS) General Catalog Query Engine. NASA/IPAC Infrared Science Archive. [EB/OL] (1997-2001) [14 September 2025]. https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html

[20] Nesterov, V.V., Kuzmin, A.V., Ashimbaeva, et al. 1995. The Henry Draper Extension Charts: A catalogue of accurate positions, proper motions, magnitudes and spectral types of 86933 stars [S]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1995, 110, 367-372.

[21] SAO Telescope Data Center, 2019. Astronomical Catalogs and Catalog Formats. https://tdc-www.harvard.edu/catalogs/

[22] Perryman, M.A.C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., et al., 1997. The HIPPARCOS Catalogue. Astronomy & Astrophysics, 323, L49-L52.

[23] Francis, C., 2012. XHIP: An extended Hipparcos compilation. Astronomy Letters, 38(6), 387-402. doi: 10.1134/S1063773712050015.

[24] Van Leeuwen, F., de Bruijne, J.H.J., Arenou, F., et al., 2017. Gaia DR1 Documentation. Gaia Data Release 1. ESA Gaia Archive. https://gea.esac.esa.int/archive/

[25] Gaia Collaboration, et al., 2016b. The Gaia mission. Astronomy & Astrophysics, 595, A1.

[26] ESA & DPAC, 2019. Gaia Data Release 2. European Space Agency and Gaia Data Processing and Analysis Consortium.

[27] Gaia Collaboration, et al., 2023j. Gaia Data Release 3: Summary of the contents and survey properties. Astronomy & Astrophysics, 674, A1.

[28] Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., et al., 1988. Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part 1. The Basic Fundamental Stars. Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, 32, 1-106.

[29] Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., Dubois, P., Bonnarel, F., Borde, S., et al., 2000. The SIMBAD astronomical database. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 143(1), 9-22. http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/

[30] Ochsenbein, F., 2000. Astronomical Catalogues and Tables Adopted Standards, Version 2.0. VizieR Catalogue, Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS). https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/A+A/610/A20

[31] 赵正旭. 2026. 天文星座边界及其深空任务规划应用探讨[C]. 第八届全国航天飞行动力学技术研讨会论文集. 1 月 广东 深圳. 第 712-722 页

作者简介

姓名	性别	职称/学位	电话/手机	邮箱	简介（字数不限）
赵正旭	男	教授	13001880199	zhaozhengxu@qut.edu.cn	研究方向航天测控可视化、天文信息计算与星座定位及导航

所属征文内容领域 星表自主移动技术：星表高精度环境感知、建模与自主导航技术