

# 中国星官边界与天球像素映射—非结构环境 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 Unstructured Environment 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( $N_{\text{side}}=64/256$ 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。

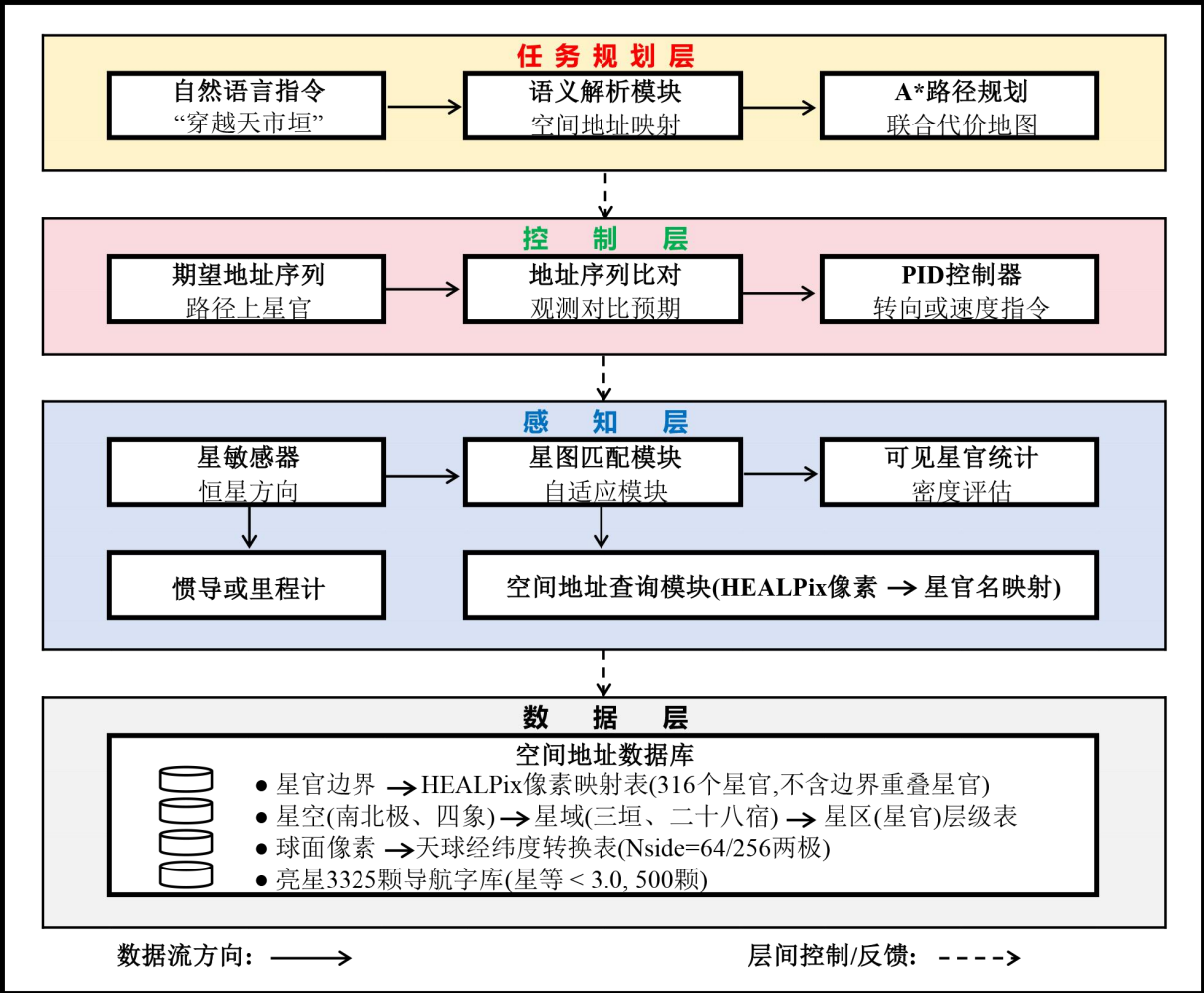


图 1 基于星官边界的移动装置自适应导航系统架构

### 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。

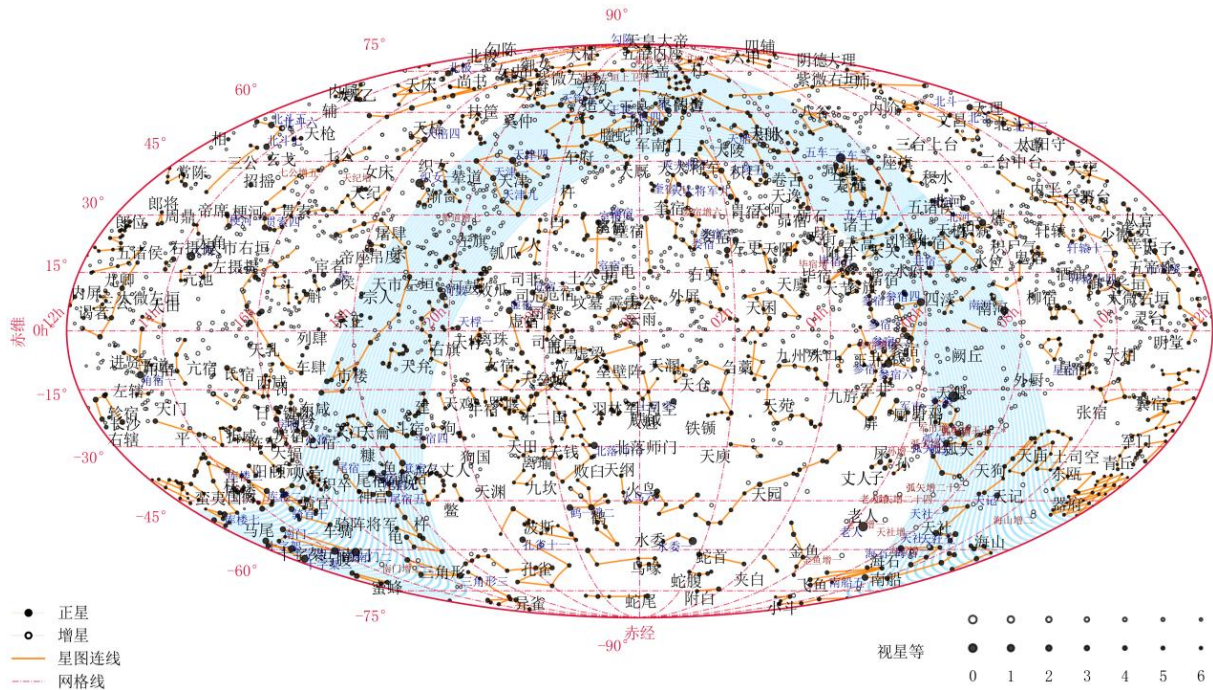


图2 中国星官全图 (Mollweide 投影)

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。

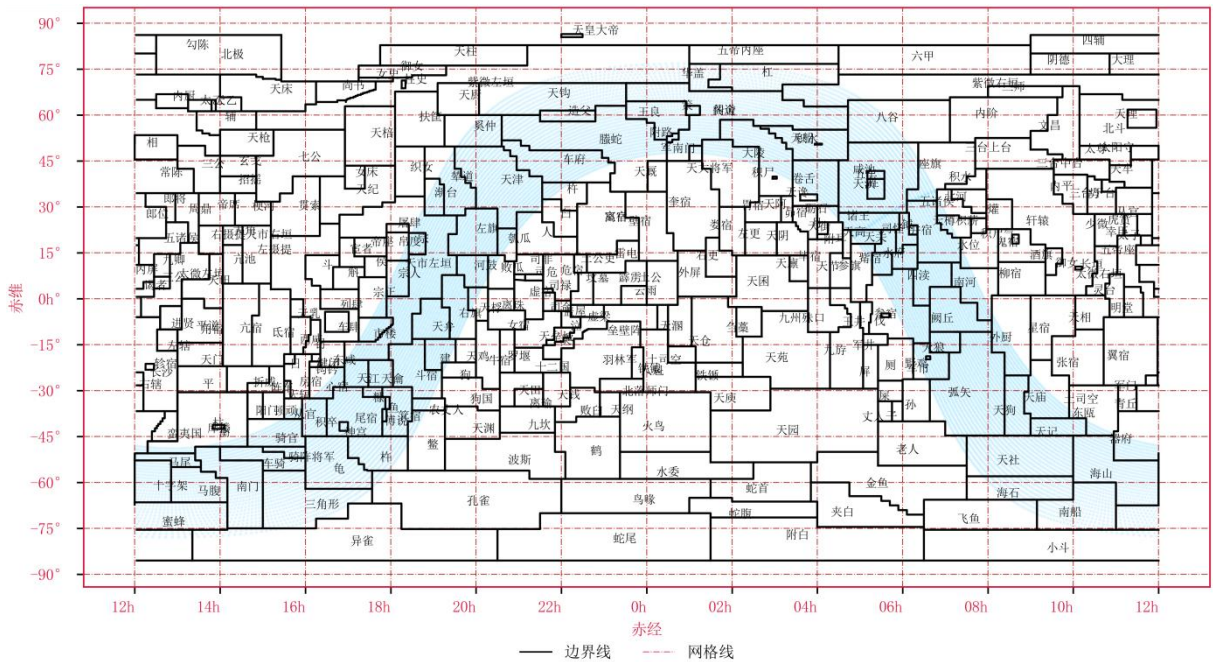


图3 中国星官边界全图 (Rectilinear 投影)



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  $\mu\text{m}$ ) 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  $N_{\text{side}} = 256$  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  $N_{\text{side}}$  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  $N_{\text{side}} = 256$ ),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 $\rightarrow$ 地理坐标系(经纬度) $\rightarrow$ 当地水平系 $\rightarrow$ 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。

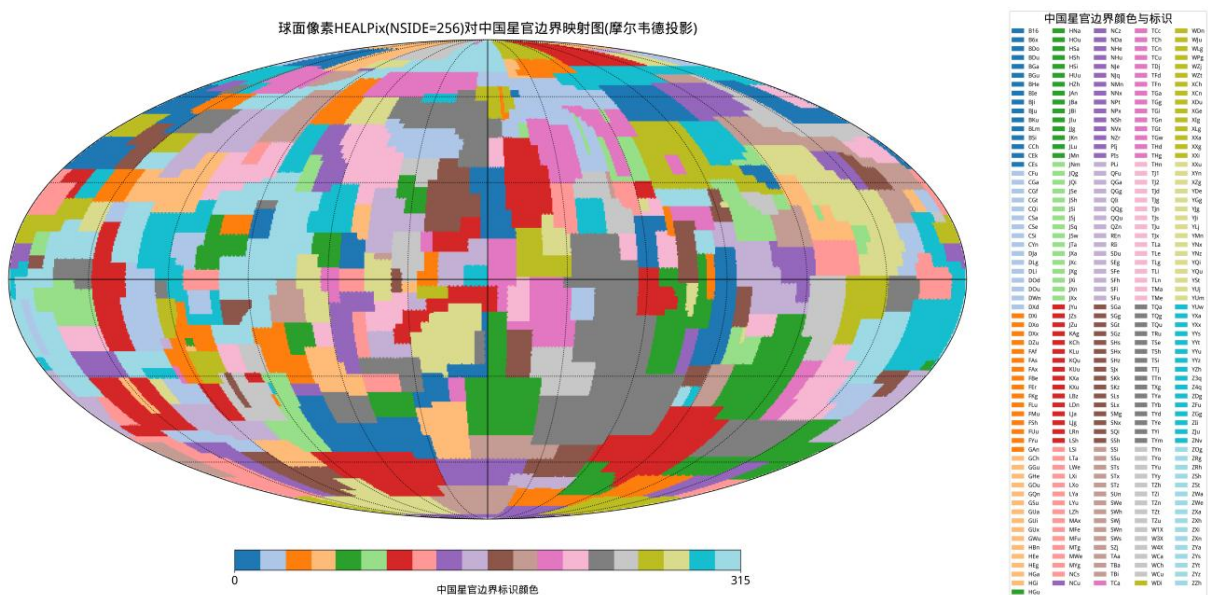


图 4 球面像素对中国星官边界映射全图(786432 像素 $\rightarrow$ 316 星官 $\rightarrow$ 359 边界 $\rightarrow$ 空间地址 $\rightarrow$ Mollweide 投影)

表 1 中国星官边界自动导航罗曼索引数据表 (Roman Table)

| RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | 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)

| RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | RAu      | Decl     | Name |
|----------|----------|----------|------|----------|----------|----------|------|----------|----------|----------|------|
| 10.32787 | 10.50000 | 40.00000 | STz  | 5.03282  | 5.85816  | 29.21519 | ZHb  | 21.82000 | 22.37000 | 20.25000 | JJu  |
| 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 | TJl  |
| 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 | JJu  | 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)

| RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | RAu      | Decl     | Name | RAI      | 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  | Qli  |
| 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)

| RAI      | RAu      | Decl      | Name | RAI      | RAu      | Decl      | Name | RAI      | 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  |
|          | 23.92500 | -15.85000 | BKu  | 17.47500 | 18.05000 | -28.82950 | TYo  | 18.40000 | 18.50000 | -40.00000 | JXi  |
|          | 21.57500 | -16.00500 | TLe  | 18.05000 | 18.50000 | -28.82950 | DXo  | 5.42500  | 5.75000  | -40.05000 | ZRh  |
|          | 22.29500 | -16.15000 | LBz  | 22.20385 | 22.78098 | -29.05000 | YLj  | 5.75000  | 6.00000  | -40.05000 | Zli  |
|          | 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 | PJj  | 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 | Rli  | 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)

| RAI      | RAu      | Decl      | Name | RAI      | RAu      | Decl      | Name | RAI      | 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： $C_{total} = w1 \times C_{terrain} + w2 \times C_{sky} + w3 \times C_{obstacle}$ ，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。

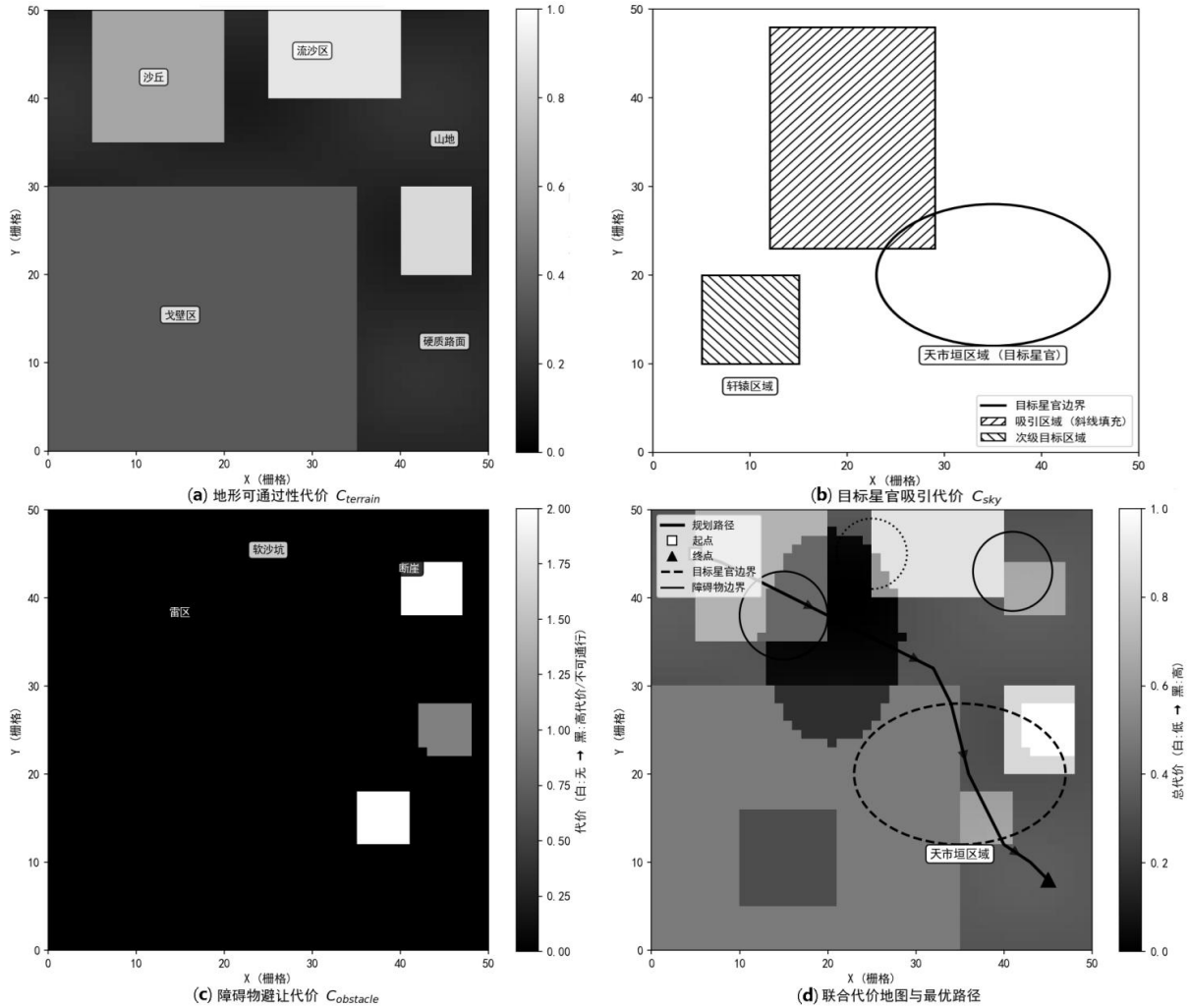


图 5 星官边界与地形联合代价地图及路径规划示例

## 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     | $\delta_{max}$ | 30    | deg              |
| 最大加速度     | a_max          | 3     | m/s <sup>2</sup> |
| 最大减速度     | b_max          | 5     | m/s <sup>2</sup> |
| 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9(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。

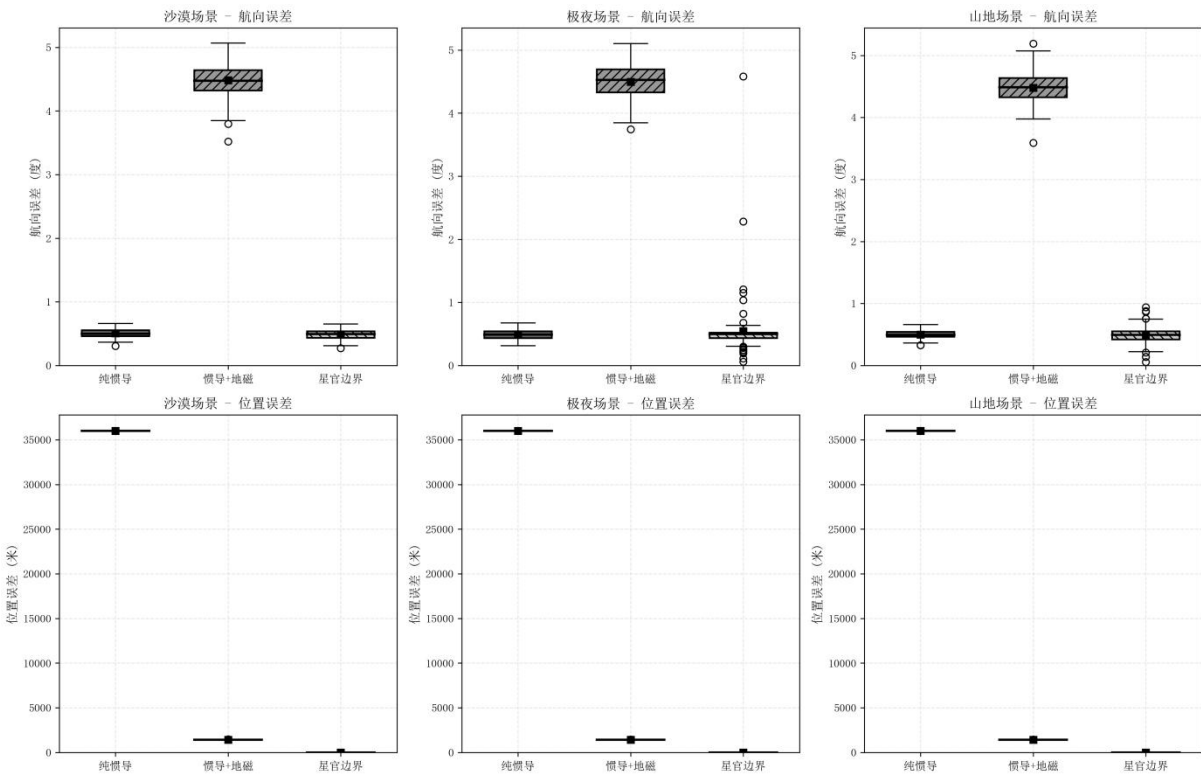


图 6 蒙特卡洛仿真结果 (n=100 次/配置，总 900 次)

## 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 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.*. Gns-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. 仪象考成绩编 [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. Veröffentlichungen 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