

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.06.001

X射线脉冲星计时导航应用模式与空间试验进展

石永强, 李连升, 左富昌, 陈建武, 梅志武

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要:结合国家导航体系发展与工程应用迫切需求,主要讨论了X射线脉冲星计时导航的应用模式,并介绍了国内外空间试验进展。总结了脉冲星计时地基射电与空间X射线观测的特点和发展现状,阐释了脉冲星时研究与发展的重要意义;总结并归纳了X射线脉冲星导航的应用特点和现有水平,讨论了X射线脉冲星导航的技术优势和典型应用场景;总结了国内外X射线脉冲星计时导航的空间试验进展。根据国内外的空间试验结果,脉冲星时稳定度可达 10^{-14} 量级,脉冲星导航精度可达到km量级,初步具备在轨应用价值。因此,加快推进国内脉冲星计时导航技术的在轨演示验证与工程应用具有重要意义。

关键词:X射线脉冲星; 计时导航; 应用模式; 空间试验进展; 综述

中图分类号:V447

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2023)06-0001-09

Application mode and space experiment progress of X-ray pulsar timing and navigation

SHI Yongqiang, LI Liansheng, ZUO Fuchang, CHEN Jianwu, MEI Zhiwu

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

Abstract: The application mode of X-ray pulsar timing navigation is discussed and the progress of space experiments based on the development and application requirements of the national navigation system is introduced. Firstly, the characteristics and current development status of ground-based radio and space X-ray observations on pulsar timing are summarized, and the significance of pulsar timing research and development is explained. Secondly, the application characteristics and current levels of X-ray pulsar navigation are summarized, and the technical advantages and typical application scenarios of X-ray pulsar navigation are discussed. Thirdly, the progress of space experiments on X-ray pulsar timing navigation at home and abroad is summarized. According to the results of space experiments, the timing stability of pulsars can reach the order of 10^{-14} , and the navigation accuracy of pulsars can reach the order of kilometer, which has preliminary value for in orbit applications. Therefore, accelerating the in-orbit demonstration and engineering application of pulsar timing navigation technology in China is of great significance.

Key words: X-ray pulsar; Timing and navigation; Application mode; Progress in space experiments; Review

收稿日期:2023-08-28;修订日期:2023-09-16

基金项目:国家自然科学基金(42327802)

作者简介:石永强(1988-),男,博士,高级工程师,主要从事脉冲星计时导航与空间X射线探测方面的研究。

通信作者:梅志武(1970-),男,研究员,主要从事空间光电探测方面的研究。

0 引言

脉冲星是恒星大部分核燃料已经耗尽时通过爆发形成的致密天体^[1]。1967年,英国剑桥大学的 T. Hewish 教授及其学生 J. Bell 博士发现首颗射电脉冲星。1976年,美国天文观测卫星 Ariel-5 首次观测到脉冲星的 X 射线辐射信号^[2]。脉冲星能够沿磁极方向发射辐射波束,如图 1 所示,由于其自转轴与磁极方向不一致,脉冲星的转动带着辐射波束在宇宙中扫过一个巨大的锥形。当辐射波束扫过安装在地面或航天器上的探测设备时,探测设备随即接收到一个脉冲信号,犹如海上为船舶导航的灯塔。

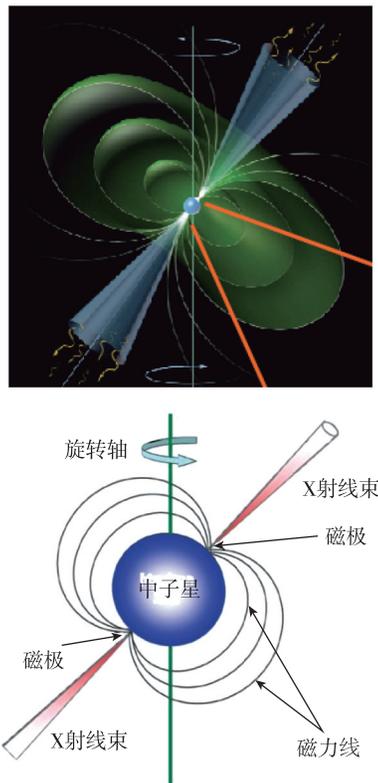


图 1 脉冲星及其辐射波束示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulsar and its radiation beam

由于脉冲星具有极其致密和稳定的结构,因此其自转周期非常稳定。尤其是毫秒脉冲星理论上自转周期变化率达到 $10^{-19} \sim 10^{-21}$,被誉为自然界最稳定的天体时钟^[3]。目前,脉冲星最好的脉冲到达时间测量残差达到约 50 ns (J0437-4715)^[4]。由于 X 射线毫秒脉冲星在 X 射线波段上辐射信号,X 射线光子探测设备易于小型化,但难以穿过地球的稠密大气层,在宇宙空间中利用 X 射线脉冲星进行

导航与计时成为可能^[5]。

1 X 射线脉冲星计时

目前广泛应用的原子时由氢钟、铯钟以及新型钟等多台原子钟组成分布式守时钟组并通过时间比对产生。原子钟受环境影响存在频率漂移特性,理想的原子钟离开大地水平面其频率会发生变化,长期稳定性不足。例如,全球卫星导航系统(GPS)星载原子钟存在长期漂移,星座整体时间会迅速偏移,30 天后星地钟差可达 $10 \mu\text{s}$ 以上。

脉冲星具有稳定的自转周期^[6],有可能成为有实用价值的、作为时间标准的脉冲星时(pulsar timing, PT)。单个脉冲星时受各种噪声(原子时、行星历表、引力波以及自身不稳定性)影响,稳定度不够好。综合脉冲星时类似于综合原子时,由多个脉冲星综合得到,来消除独立噪声源的影响^[7]。

通常,脉冲星的射电信号比较强,是首选的计时分析波段。国际上通过脉冲星计时阵(pulsar timing array, PTA)对于建立精确的脉冲星时间模型已经做了大量工作,主要包括北美引力波天文台脉冲星计时阵(north american nanohertz observatory for gravitational waves, NANOGrav)、澳大利亚 Parkes 脉冲星计时阵(Parkes pulsar timing array, PPTA)以及欧洲 5 个射电望远镜联合组成的脉冲星计时阵(European pulsar timing array, EPTA),获得了持续多年的脉冲星计时观测数据^[8]。目前毫秒脉冲星射电观测单个脉冲到达时间(time of arrival, TOA)最好的计时精度约为 50 ns,远低于原子钟计时精度,但原子时的长期稳定度不如脉冲星时。

英国的 Jodrell Bank 天文台自 1988 年以来对脉冲星 B0531+21 进行持续观测,并且每月发布最新的脉冲星时间模型。利用国际脉冲星计时阵(international pulsar timing array, IPTA) J1713+0743 跨度 19.4 年和 J0437-4715 跨度 14.8 年的观测数据,时间自主保持精度分别可达 $3 \mu\text{s}$ 和 $1 \mu\text{s}$ ^[9]。2012 年, G. Hobbs 等^[10]利用澳大利亚 Parkes 脉冲星计时阵中 19 颗毫秒脉冲星历时约 17 年的观测数据,分析得到脉冲星时比国际原子时(temps atomique international, TAI)具有更高的精度。2019 年 G. Hobbs 等^[11]利用国际脉冲星计时阵(IPTA)48 颗毫秒脉冲星长期计时观测数据分析得到脉冲星时,再次证明了其比国际原子时具有更高的精度。未来,随着观测设备对脉冲星 TOA 观测精度的不断提高和脉冲

星计时观测数据时间跨度的增加,综合脉冲星时的短期和长期稳定度可望得到进一步提高。

由于射电望远镜口径大、天线质量与体积大,大部分只能建立在地面,可观测天区与选址相关,还受到星际介质的干扰^[12]。在 X 射线波段,脉冲星的空间观测几乎不受星际介质的影响,观测约束少,设备易于小型化。但是毫秒脉冲星的 X 射线辐射信号弱,需要长时间观测才能获得比较准确的计时参数。传统上,脉冲星 TOA 空间观测精度水平明显低于地面射电观测水平。近年来,随着国际空间站 X 射线计时与导航在轨实验项目(NICER/SEXTANT)的在轨应用,空间 X 射线脉冲星计时得到了快速发展,取得了丰硕成果。空间 X 射线脉冲星计时观测接近了地面射电观测水平,并证明了其应用价值。

2019 年, J. S. Deneva 基于国际空间站 X 射线计时与导航在轨实验项目(NICER/SEXTANT)空间 X 射线脉冲星观测数据发现,利用 1 年观测数据脉冲星 B1937+21 时间稳定度可达 3×10^{-14} ^[13],如图 2 所示。

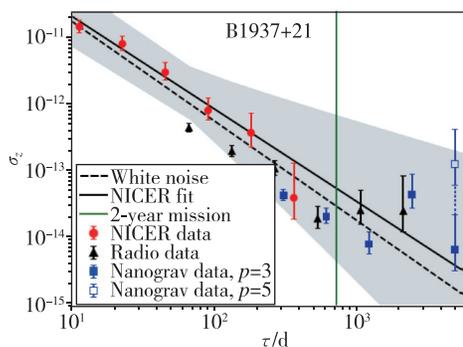


图 2 脉冲星 B1937+21 的时间稳定度(NICER)^[13]

Fig. 2 Timing stability of pulsar B1937+21(NICER)^[13]

2018 年,西安电子科技大学孙海峰等^[14]提出了一种不依赖于初始射电模型参数的 X 射线脉冲星计时模型。2023 年,孙海峰等^[15]分析了 NICER 对脉冲星 B1937+21 5 年的观测数据,通过数据筛选进一步提高了 TOA 的准确性,分析得到 B1937+21 旋转稳定度为 1.7×10^{-14} ,其精度与 NANOGrav 地面射电数据相当。

2023 年,中国科学院国家授时中心童明雷等^[16]利用 XPNAV-1 卫星观测的 Crab 脉冲星数据研究了驾驭星载原子钟频率的方法,利用 Crab 脉冲星 1 个月的观测数据,对 10^{-10} 、 10^{-11} 和 10^{-12} 量

级的仿真星载钟相对频率偏差校准的相对误差分别为 0.3%、42% 和 113%。后续,利用 1 年的 Crab 观测数据,对 10^{-12} 量级的仿真星载钟相对频率偏差校准的相对误差达到 2%,利用 Crab 脉冲星 1 年观测数据的时间稳定度可达 10^{-12} ^[17]。

由于脉冲星时与原子时具有长短期时间稳定度优势互补的特点,结合二者优势可以建立一种新型的高精度综合时间尺度,具有重要意义:

1) 脉冲星自转稳定性很高,时频长期稳定性显著优于原子时,可以弥补原子时长期稳定性不足的缺陷。

2) 脉冲星时是与原子时物理机制不同的时间尺度,可以改变目前时频体系单一依赖原子钟的格局,进而提高当前原子时频体系的可靠性和稳定性。

3) 脉冲星钟在非常时期可以提供独立的自然溯源标准,提高当前守时系统的可靠性和安全性。

4) 脉冲星时在整个太阳系内都可适用,可为深空飞行器提供时间服务。

2 X 射线脉冲星导航

X 射线脉冲星导航通过毫秒脉冲星自然天体提供导航信息,精确确定航天器位置^[18]。X 射线脉冲星导航(X-ray pulsar navigation, XNAV)的主要制约因素是有限的观测信噪比和复杂的计时噪声缺乏物理模型。

X 射线毫秒脉冲星辐射极其微弱,一般为 10^{-5} ph/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$)量级。同时,由于脉冲星观测设备自身噪声和空间辐射带来的环境本底,需要观测很长时间才能得到一个较高信噪比的脉冲轮廓。脉冲星导航信号有限的观测信噪比既限制了导航精度,也导致了脉冲星导航的信息更新较慢,难以像 GPS 或北斗导航系统一样实现瞬时导航。

此外,即使是自转周期相对稳定的毫秒脉冲星,当前现实观测条件下经过现有计时模型对观测数据处理后也存在振幅为 μs 级的白噪声,从而限制了导航精度为 km 量级。目前,国内外通过 X 射线脉冲星在轨实测数据显示,脉冲星导航在太阳系定位精度为 km 量级。从导航精度方面考虑,与当前广泛应用的无线电测定轨方法相比,脉冲星导航技术在木星轨道之外空间才具有显著的精度优势。

基于脉冲星导航当前可实现的精度水平和导航信号更新速度,人们将脉冲星导航与其他导航方式进行组合以获得兼具精度与实时性的更具实用

意义的组合导航系统^[19]。目前,常用于与脉冲星导航进行组合的导航方式包括惯性导航和天文/光学导航,利用脉冲星导航绝对定位信息对惯性导航误差进行修正,利用星光角距、星光多普勒信息等与脉冲星导航组合提升导航精度和更新率。

综合考虑,X射线脉冲星导航在航天器导航中存在三大特殊优势。一是相对传统依赖于地基无线电测控网的导航方式,脉冲星导航可提供脱离地面支持的无延时的航天器自主导航定位服务;二是脉冲星导航系统可在全太阳系大尺度空间内实现其他导航方式难以比拟的 km 级自主导航精度;三是脉冲星导航应用约束条件较少,适用范围广,不受“日凌”太阳干扰、行星遮挡、观测目标可见性及目标距离等因素的影响。

因此,X射线脉冲星导航在以下两种应用场景具有特殊优势,一是深空自主导航^[20],降低对地面设施的依赖和运行成本,弥补地基深空测控导航网和深空天文光学导航的应用限制和不足^[21],尤其是在 10 AU 以外的远深空、太阳近距轨道等特殊场景下;二是增强已有卫星系统的生存能力,在无地面站或人为支持情况下,为近地轨道卫星提供持续一定时间的导航与授时服务^[22-23]。

3 X射线脉冲星计时导航空间试验进展

X射线脉冲星辐射的脉冲信号具有高稳定周期特性和高稳态轮廓特征,能够为航天器提供外部时空基准。国内外航天部门制定了一系列的发展计划,推动核心关键技术研究,积极开展空间演示验证试验。

(1)RXTE 卫星^[24]

对 X 射线脉冲星进行精密计时观测的航天器首先是美国的 RXTE X 射线计时卫星,如图 3 所示。RXTE(Rossi X-ray timing explorer)卫星于 1995 年 12 月 30 日发射入轨,轨道高度 600 km,倾角 23°,质量 3 000 kg。RXTE 搭载的正比计数器阵列(programmable counter array, PCA)探测能谱范围 2~60 keV,总探测面积 6 250 cm²,视场为 1.2°。RXTE 卫星观测数据具有 1 μs 的时间精度,在国内外脉冲星计时导航理论研究中获得大量应用,其观测 Crab 脉冲星轮廓常被作为标准轮廓。根据 RXTE 卫星数据分析,脉冲星导航精度可达到 16.3 km^[25]。

(2)USA 试验^[26]

美国海军研究实验室(naval research labora-



图 3 正在组装中的 RXTE 卫星

Fig. 3 RXTE satellite under assembly

tory, NRL)设计了非常规恒星特征(unconventional stellar aspect, USA)试验,如图 4 所示,主要验证利用掩星法实现空间 X 射线源定轨、定姿及定时技术。1999 年 2 月,USA 试验装置随美国空军先进技术研究全球观测卫星(ARGOS)发射至 840 km 高度的太阳同步轨道上。USA 试验采用两台准直型气体正比计数器,探测 X 射线能量范围为 1~15 keV,能量分辨率为 1 keV@5.9 keV,探测器有效面积为 0.1 m²,视场为 1.2°×1.2°,质量约 245.2 kg,功耗约 50 W,时标精度为 32 μs。

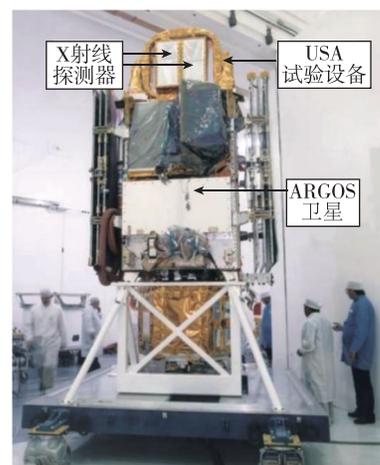


图 4 ARGOS 卫星

Fig. 4 ARGOS satellite

试验期间,ARGOS 卫星的 GPS 接收机为 USA 试验光子标记提供高精度时间参考,同时可提供精确的外部校准轨道信息。Sheikh 博士对 USA 试验的 Crab 脉冲星观测数据进行处理,比较了预测与实测的脉冲到达时间,采用误差修正方法,得出 Crab 脉冲星视线方向上航天器的位置精度约为 2 km。

(3)NICER/SEXTANT 项目^[27]

2011 年,NASA 启动了“X 射线计时与导航技术的空间站在轨验证试验”(NICER/SEXTANT)项目,如图 5 所示。NICER/SEXTANT 是第一次在轨演示观测 X 射线毫秒脉冲星验证导航技术的项目。通过对多个毫秒脉冲星序贯观测,验证仅依靠 XNAV 技术的航天器实时轨道确定水平。试验早期使用地基射电天文台得到的脉冲星计时模型,之后任务使用 NICER 增强计时模型,XNAV 系统的性能由导航结果与星载 GPS 导航结果比较确定。NICER/SEXTANT 主要技术指标如表 1 所示。

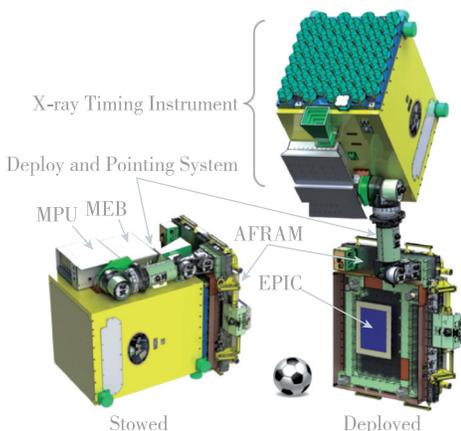


图 5 搭载国际空间站 (ISS) 的 NICER/SEXTANT
Fig. 5 NICER/SEXTANT on the International Space Station (ISS)

表 1 NICER/SEXTANT 技术指标

Tab. 1 Technical specifications of NICER/SEXTANT

序号	项目	指标
1	能段	0.5~10 keV
2	视场	15'×15'
3	有效面积	1 800 cm ² @ 1.5 keV
4	时间精度	≤1 μs
5	能量分辨率	160 eV@5.9 keV
6	质量	372 kg
7	尺寸	1 000 mm×1 000 mm×1 100 mm

如图 6 所示,NICER 在轨观测毫秒脉冲星 B1937+21,曝光时间为 8 000 s,共收集到约 2 500 个光子,其中噪声光子约 1 600 个,有效光子约 900 个。在 NICER 的工作能段内,B1937+21 辐射流强约为 6.25×10^{-5} ph/(cm²·s)。这表明,NICER 在轨观测 8000 s 的灵敏度已经优于 10^{-5} ph/(cm²·s)量级。经过计算,NICER 在上述观测 B1937+21

时的 TOA 的测量精度约为 5 μs。

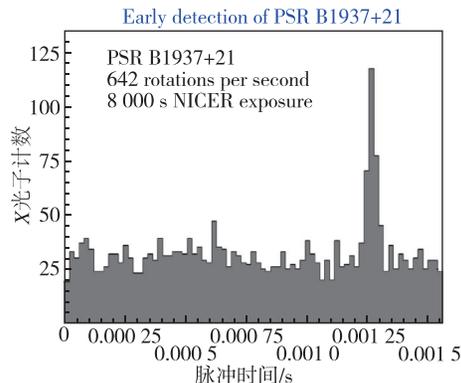


图 6 NICER 在轨观测 B1937+21 的脉冲轮廓
Fig. 6 Pulse profile of B1937+21 obtained by NICER

NICER 于 2017 年 11 月开展了脉冲星自主导航在轨验证试验。其中,在轨自主导航期间,8 h 后数据收敛至 10 km 以内,如图 7 所示。后续使用 2 天的观测数据进行地面导航仿真试验,如图 8 所示,在 2 天内位置导航精度可以收敛至 5 km 以内,速度误差收敛至 5 m/s 以内^[28]。

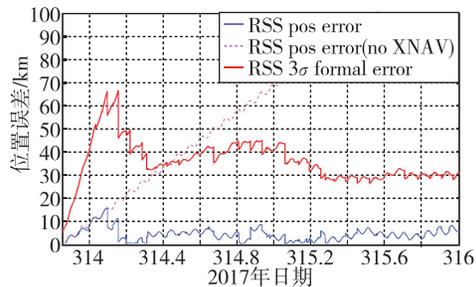


图 7 NICER 在轨实时自主导航试验^[28]
Fig. 7 In orbit real-time autonomous navigation test results of NICER^[28]

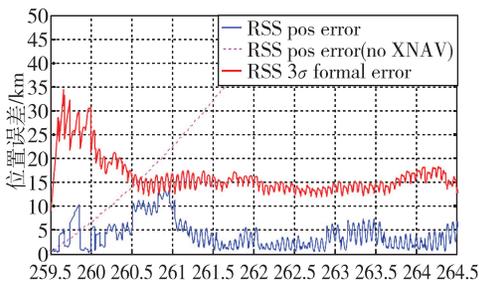


图 8 NICER 利用在轨数据的地面导航试验^[28]
Fig. 8 Ground navigation test results using in orbit data of NICER^[28]

(4)ESA BepiColombo MIXS^[29]

BepiColombo 是 ESA 和 JAXA 联合研制的水

星探测器,于2018年发射,预计2025年到达水星,由行星轨道器(Mercury planetary orbiter, MPO)和磁层轨道器(Mercury magnetospheric orbiter, MMO)两颗卫星组成,用于研究水星的磁场、内部和表面结构等。行星轨道器的载荷包括X射线成像谱仪(MIXS)。

MIXS包括准直型和聚焦型两种探测器,如图9所示。准直型探测器具备大面积、宽视场水星表面巡视探测功能,聚焦型探测器具备小视场高分辨率水星表面成像功能。MIXS被认为是脉冲星导航的探路者,质量10 kg,有效面积大约 50 cm^2 ,预计导航精度 $4.4\text{ km}@5\,000\text{ s}$ 观测时间。

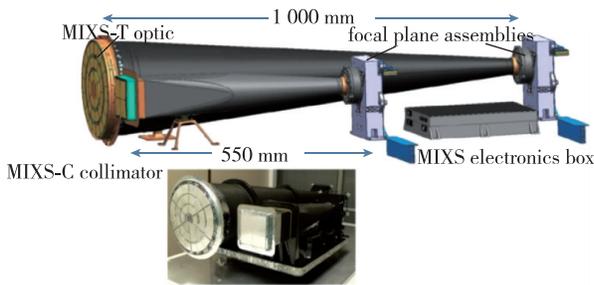


图9 BepiColombo X射线成像谱仪(MIXS)

Fig. 9 X-ray imaging spectrometer(MIXS) of BepiColombo

(5) NASA CubeX^[30]

CubeX是集成一台X射线成像谱仪(X-ray imaging spectrometer, XIS)和一台软X射线太阳监视器(solar X-ray monitor, SXM)的12 U立方星,如图10所示,将运行在 $4\,000\text{ km}\times 6\,000\text{ km}$ 的环月轨道,用于验证X射线脉冲星的深空导航可行性与性能,实现深空自主导航并降低自主导航成本。CubeX将利用Crab和B1937+21实现差分校准导航,通过按顺序观测不同的脉冲星实现绝对导航性能的评估。

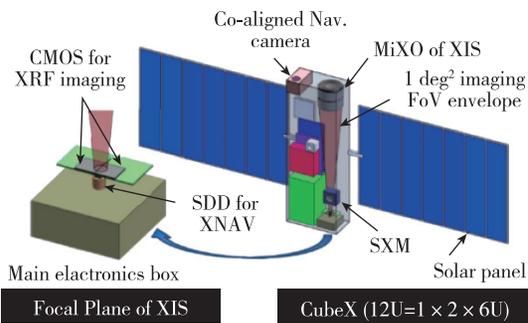


图10 NASA CubeX卫星及其X射线成像谱仪(XIS)

Fig. 10 X-ray imaging spectrometer(XIS) of NASA CubeX

Cube X卫星预计于2023—2027年发射,将演示使用X射线毫秒脉冲星开展深空导航。在未来大量卫星进行行星际探索的新时代,X射线脉冲星自主导航变得至关重要。

(6) 脉冲星导航试验卫星(XPNAV-1)

2013年底,中国航天科技集团五院确定了自主研制我国首颗脉冲星导航试验卫星的任务目标。由北京控制工程研究所研制的掠入射聚焦型脉冲星探测器(TSXS)是X射线脉冲星导航试验卫星上的主要导航载荷,如图11所示。2016年11月卫星发射入轨并完成在轨测试,成为我国首颗开展X射线脉冲星在轨精密计时观测以及脉冲星导航技术验证的卫星系统。脉冲星导航试验卫星掠入射聚焦型脉冲星探测器的主要技术指标如表2所示。

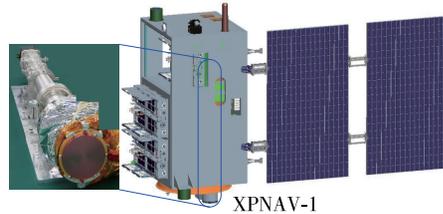


图11 X射线脉冲星导航试验卫星

Fig. 11 X-ray pulsar navigation test satellite

表2 掠入射聚焦型脉冲星探测器技术指标

Tab. 2 Technical specifications of TSXS

序号	项目	指标
1	能段	0.5~10 keV
2	视场	15'×15'
3	有效面积	30 cm ² @ 1.5 keV
4	时间精度	≤1 μs
5	能量分辨率	≤160 eV@5.9 keV
6	质量	16 kg
7	尺寸	100 mm×100 mm×1 200 mm

XPNAV-1开展了一系列在轨测试、标定和试验,国内首次在轨验证了高灵敏X射线聚焦探测技术,实现了针对X射线脉冲星的空间长时间高精度凝视观测,获得了大量脉冲星观测数据。首次利用我国自主数据获得了Crab脉冲星X射线(0.5~10 keV)计时模型^[31]。

在脉冲星导航试验卫星在轨飞行试验中,由国防科学技术大学、钱学森空间技术实验室分别独立完成了脉冲星观测数据处理以及导航精度的分析工作,脉

冲星在轨导航精度可收敛至 20 km 以内^[32]。

(7) 中国慧眼卫星 (HXMT)

2017 年,中国科学院利用采用准直方案的慧眼卫星 (HXMT)^[33] 和搭载天宫二号的天极望远镜 (POLAR)^[34] 科学载荷也开展了脉冲星导航的研究。慧眼卫星总质量 2 700 kg,采用准直型探测方案,有效载荷包括高能 X 射线望远镜 (HE)、中能 X 射线望远镜 (ME) 和低能 X 射线望远镜 (LE),如图 12 所示。综合利用卫星所有望远镜 5 天的观测数据,定位精度可以达到 10 km。

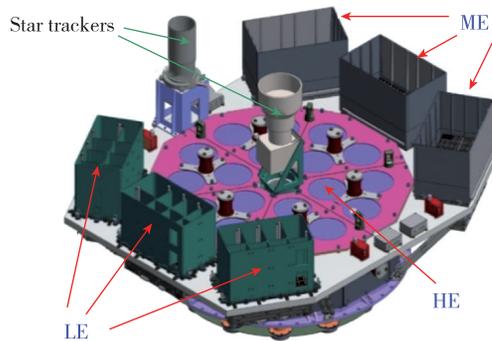


图 12 慧眼卫星

Fig. 12 HXMT satellite

综上所述,美国等航天强国在 X 射线脉冲星计时导航技术研究中处于领先地位,在理论研究、方案实现、在轨演示验证等方面均已取得了突破性进展。目前 ESA 启动了“PulChron”计划,旨在利用欧洲脉冲星计时阵 (EPTA) 的观测数据来定期 (每月一次) 校准伽利略导航卫星时钟。美欧已在水星探测和地月空间导航中将脉冲星导航技术投入工程实际应用。

当前我国也在积极推进脉冲星计时导航技术的发展。通过科技部、国家自然科学基金等研发项目在 X 射线脉冲星计时导航、脉冲星光学与探测等领域突破相关关键技术。国内通过 XPNAV-1 和 HXMT 等卫星载荷研制已具备了脉冲星计时导航载荷的工程研制能力。为早日将脉冲星计时导航技术投入实际应用,缩短与欧美航天强国的差距,需尽快在轨部署新一代高性能 X 射线脉冲星观测与计时导航载荷,在轨开展导航数据库构建和实时导航验证。

4 结论

本文讨论了空间 X 射线脉冲星计时与导航两

大应用模式。

X 射线脉冲星计时可用于建立长期稳定性优于原子时的脉冲星时间;充分发挥脉冲星时长期稳定性的优势,构建原子时-脉冲星时优势互补的新型时间体系;同时观测脉冲星射线和 X 射线信号,实现针对同一天然目标的天地时间溯源,构建基于自然基准的天基时间体系;在非常时期提供独立的自然溯源标准;提高时频体系的稳定性、可靠性和安全性。

X 射线脉冲星导航的主要制约因素是有限的观测信噪比和复杂的计时噪声缺乏物理模型,在当前现实观测条件下导航精度为 km 量级。可构建融合脉冲星导航的组合导航系统,具备大尺度空间下脱离地面支持的无延时无约束自主高精度导航能力,应用于深空自主导航和近地自主导航备份增强两种典型场景。

根据国内外的空间试验结果,脉冲星时稳定度可达 10^{-14} 量级,脉冲星导航精度可达到 km 量级,初步具备在轨应用价值。近年来,国外脉冲星计时导航技术已进入工程实际应用阶段。加快国内脉冲星计时导航技术的在轨演示验证与工程应用具有重要意义。

参考文献

- [1] SMITH F G. Pulsars astronomy[M]. 4th Edition. Cambridge:Cambridge University Press, 2012.
- [2] MITCHELL R J, CULHANE J L, DAVISON P J N. Ariel 5 observation of the X-rays spectrum of the Perseus cluster [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1976, 175(1): 29-34.
- [3] TAYLOR J H. Millisecond pulsars: nature's most stable clocks [J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 1054-1062.
- [4] HOBBS G, DAI S, MANCHESTER R N, et al. The role of FAST in pulsar timing arrays [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(2): 20.
- [5] CHESTER T J, BUTMAN S A. Navigation using X-ray pulsar[R]. Telecommunications & Data Acquisition Progress Report, 1981: 22-25.
- [6] BRITTON M C, VAN S W, BAILES M. High precision timing of PSR J0437-4715 [J]. International Astronomical Union Colloquium, 2000, 177: 73-76.
- [7] 杨廷高, 高玉平, 童明雷, 等. 综合脉冲星时研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 54-70.
YANG Tinggao, GAO Yuping, TONG Minglei, et

- al. Review on research progress of ensemble pulsar time-scale[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(3): 54-70(in Chinese).
- [8] 闫林丽, 葛明玉, 度攸隶. 5颗导航用X射线脉冲星计时分析[J]. *航空学报*, 2023, 44(3): 170-185.
YAN Linli, GE Mingyu, TUO Youli. Timing analysis for five navigation X-ray pulsars [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(3): 170-185(in Chinese).
- [9] PETIT G, TAVELLA P. Pulsars and time scales [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 308(1): 290-298.
- [10] HOBBS G, COLES W, MANCHESTER R N. Development of a pulsar-based time-scale [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 427(4): 2780-2787.
- [11] HOBBS G, GUO L, CABALLERO R N. A pulsar-based time-scale from the international pulsar timing array [J]. *MNRAS*, 2020, 491: 5951-5965.
- [12] LEE K J, BASSA C G, JANSSEN G H. Model-based asymptotically optimal dispersion measure correction for pulsar timing [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 441(4): 2831-2844.
- [13] DENEVA J S, RAY P S, LOMMEN A. High-precision X-ray timing of three millisecond pulsars with NICER: stability estimates and comparison with radio [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 874(2): 160.
- [14] SUN H F, SUN X, FANG H Y, et al. Building X-ray pulsar timing model without the use of radio parameters [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 155-162.
- [15] SUN H, YAO D, SHEN L, et al. Estimating 5-year rotation stability of PSR B1937+21 using NICER observations [J]. *Acta Astronautica*, 2023, 210: 141-150.
- [16] 童明雷, 韩孟纳, 杨廷高, 等. 利用 Crab 脉冲星 X 射线观测校准星载原子钟频率[J]. *航空学报*, 2023, 44(3): 526-566.
TONG Minglei, HAN Mengna, YANG Tinggao, et al. Correcting frequency of a spaceborne atomic clock using X-ray observations of Crab pulsar [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(3): 526-566 (in Chinese).
- [17] HAN M, TONG M, LI L. Frequency steering of spaceborne clocks based on XPNV-1 observations [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(6): 266-278.
- [18] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S. Spacecraft navigation using X-ray pulsars [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(1): 49-63.
- [19] 郑伟, 王禹淞, 姜坤, 等. X 射线脉冲星导航方法研究综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(3): 19-35.
ZHENG Wei, WANG Yusong, JIANG Kun, et al. Overview of X-ray pulsar-based navigation methods [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(3): 19-35 (in Chinese).
- [20] CENTINELLO III F J, ZUBER M T, SMITH D E. Orbit determination of the dawn spacecraft with radiometric and image data [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 52(5): 1331-1337.
- [21] GRAVEN J P, COLLINS J, SHEIKH S. XNAV for deep space navigation [C]//Breckenridge: 31th Annual AAS Guidance and Control Conference, 2008.
- [22] RAQUET W D, RACCA J F, ROBERT A. Use of X-ray pulsars for aiding GPS satellite orbit determination [C]// Cambridge: Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2005: 476-486.
- [23] XIONG K, WEI C L, LIU L D. The use of X-ray pulsars for aiding navigation of satellites in constellations [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(4): 427-436.
- [24] JAHODA K, SWANK J H, GILES A B. In orbit performance and calibration of the Rossi X-ray timing explorer (RXTE) proportional counter array (PCA) [J]. *Proc SPIE*, 1996, 2808: 59-70.
- [25] SUN H, SU J, DENG Z. Grouping bi-chi-squared method for pulsar navigation experiment using observations of Rossi X-ray timing explorer [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(1): 386-395.
- [26] WOOD K S, KOWALSKI M, LOVELLETTE M N. The unconventional stellar aspect (USA) experiment on ARGOS [C]//Washington DC: AIAA Space 2001 Conference and Exposition, 2001: 28-30.
- [27] KEITH C G, ZAVEN A, PHILLIP W A. The neutron star interior composition explorer (NICER): design and development [C]//Edinburgh: Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, 2016, 9905: 1-16.
- [28] MITCHELL J W, WINTERNITZ L B, HASSOUNEH M A. Sextant X-ray pulsar navigation demonstration: initial on-orbit results [C]//Breckenridge: 41st Annual AAS Rocky Mountain Section Guidance and Control Conference, 2018, 164: 1229-1240.
- [29] FRASER G W, CARPENTER J D, ROTHERY D A. The mercury imaging X-ray spectrometer (MIXS) on bepicolombo [J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(1-2): 79-95.
- [30] SUZANNE R, RALPH K, KEITH G. CubeSat X-ray telescope (CubeX) for lunar elemental abundance map-

- ping and millisecond X-ray pulsar navigation [C]//Pasadena: 42nd COSPAR Scientific Assembly, 2018.
- [31] 姜坤, 焦文海, 郝晓龙, 等. 脉冲星试验 01 星科学试验与成果[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 90-99.
JIANG Kun, JIAO Wenhai, HAO Xiaolong, et al. Scientific experiments and achievements of XPNAV-1 [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(3): 90-99 (in Chinese).
- [32] 张大鹏, 王奕迪, 姜坤, 等. XPNAV-1 卫星实测数据处理与分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(4): 411-417.
ZHANG Dapeng, WANG Yidi, JIANG Kun, et al. Measured data processing and analysis for XPNAV-1 [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(4): 411-417 (in Chinese).
- [33] ZHENG S J, ZHANG S N, LU F J. In-orbit demonstration of X-ray pulsar navigation with the Insight-HXMT satellite [J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 2019, 244(1): 1-18.
- [34] 郑世界, 葛明玉, 韩大伟, 等. 基于天宫二号 POLAR 的脉冲星导航实验[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(9): 120-128.
ZHENG Shijie, GE Mingyu, HAN Dawei, et al. Test of pulsar navigation with POLAR on TG-2 space station [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(9): 120-128 (in Chinese).

(编辑: 孟彬)