doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.01.001

# 关于北斗G2卫星的溯往追终\*

#### 林厚源1,2†

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210023)

**摘要** 2022年1月, 失效的北斗G2卫星被实践21号卫星从地球静止轨道拖入了坟墓轨道. 为了这项捕获任务的 安全实施, 需要预先确定北斗G2的旋转状态. 基于过去10 yr的测光观测数据展示了北斗G2卫星自转的演化过 程. 根据北斗G2的自转速度和轨道的演化, 确认了在过去的10 yr里发生的6次异常事件. 据推测, 2012年的小碎 片碰撞事件, 是随后几年燃油泄漏的导火索. 2017年之后剩余燃油完全释放, 再也没有出现转速异常. 将2014年 太阳能帆板损坏和2016年的解体事件后建立的旋转动力学模型外推1 yr, 转轴的标准偏差小于3°, 转速标准偏 差为0.11°·s<sup>-1</sup>, 能够有效地满足捕获任务时刻旋转状态的精度要求.

关键词 天体力学, 航天器, 方法: 数据分析, 技术: 光度 中图分类号: P173; 文献标识码: A

## 1 引言

北斗G2卫星(BeiDou-G2/Compass G2)是北 斗二代导航系统的第2颗卫星,也是北斗二代 中第1颗位于同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)的G系列卫星.它与其他北斗一、二代导航 卫星一样是基于东方红三号卫星平台,其两侧搭载 了太阳能帆板.它于2009年由长征三号丙火箭(CZ-3C)从西昌卫星发射中心发射上天,但1 yr后便失 效,随后在同步轨道带(GEO-Belt)<sup>[1]</sup>开始了大范 围漂移.GEO是气象、通信和地面监测的重要空 间,一个漂移的卫星对所有在GEO上的卫星都是巨 大的威胁.为此,在2022年1月,北斗G2被实践21号 卫星捕获并拖进了坟墓轨道.实践21号卫星发射 于2021年,主要用于空间碎片减缓技术试验验证. 这次行动展示了我国继Northrop Grumman公司 的Mission Extension Vehicle (MEV)系列卫星<sup>1</sup>之 后同样具有近距离操作、对接和机动的能力,从 而能够实现空间碎片的有效清除.但与MEV和卫 星Intelsat的对接不同的是,北斗G2是颗废弃的卫 星.为了能够安全地实现捕获,必须要提前知道该 捕获对象的旋转状态,从而采取正确的策略和操 作.当前学者们还挣扎于如何拟合和反演空间碎片 的旋转状态,尚未有人有效实现空间碎片的旋转状 态外推计算,因此北斗G2卫星的旋转状态预估是 个很大的挑战.

在2010—2019年的10 yr里, 基于由中国科学院 紫金山天文台牵头运行的中国最大的空间碎片光 学观测网, 我们采集到了北斗G2卫星共计2964个弧 段的光度数据, 其中922条可提取出可靠的自转频 率. 此外, Graz卫星激光测距站额外提供了15条单

<sup>2022-05-31</sup>收到原稿, 2022-08-26收到修改稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(12073083、12293035、11533010)和中国科学院青年创新促进会(2018353)资助

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>linhouyuan@pmo.ac.cn

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>https://space.skyrocket.de/doc\_sdat/mev-1.htm/.

光子计数器的光度观测结果<sup>[2]</sup>,填补了2015年5月 到10月期间由于卫星星下点向西漂移超出中国观 测范围而出现的数据空白.我们期望基于这些数 据建立足够高精度的旋转运动模型,从而实现北 斗G2卫星未来旋转状态的预测.

### 2 北斗G2卫星姿轨演化的不同阶段

图1展示了北斗G2卫星过去10 yr里自转速度 的变化. 从图1 (a)可以看出其转速呈振荡上升 的趋势,而在转速的每月变化趋势(图1 (b))中可 以发现,北斗G2卫星转速的振荡存在明显的周 年效应,其中12-5月为减速阶段,6-11月为加速 阶段.可推测太阳辐射作用是引起这种变化的 主要因素.对此我们以辐射力矩模型<sup>[3]</sup>为核心 建立了动力学模型并进行数值拟合和动力学参 数求解<sup>[4]</sup>.在拟合中我们评估了各种额外的可 能引起转速变化的作用因素,见表1,其中只有 重力梯度力矩和中心卫星主体受到的力矩需要 被考虑.由于无法找到满足整个10 yr演化的统 一参数,因此我们采用分段拟合,最终把可拟 合的数据段命名为S1-S6,其中S6段由于时间跨 度太长影响计算效率,被分为S6a和S6b分别拟合 (见图1 (c)-(f)).而其他无法被拟合的异常段,结合 轨道根数,可以确定共计6次异常变化,命名为A1-A6 (见图1 (a)).由于错误的分段无法使拟合残差 降低到噪声水平<sup>[4]</sup>,从而确保了分段的可靠性.

表 1 数值模拟中各因素对北斗G2卫星转速影响的相对变化量级 Table 1 The order of magnitude of the relative deviation caused by each factor for BeiDou-G2 in its variation of rotational speed from the numerical simulation

Factor	Order of magnitude
Gravity-gradient torque <sup>[5]</sup> /yr <sup><math>-1</math></sup>	$10^{-2}$
Provided by the satellite's central symmetric-box	Around $10^{-3}$
(including center of mass and reflection coefficient offsets)	
Earth's radiation <sup>[6]</sup> /yr <sup><math>-1</math></sup>	$10^{-4}$
Self-shadow $effect/yr^{-1}$	$10^{-5}$
Eddy current torque <sup>[7]</sup> /yr <sup><math>-1</math></sup>	$10^{-5}$
Third-body gravity-gradient torque/yr <sup><math>-1</math></sup>	$10^{-7}$ (Moon) and
	$10^{-8}$ (Sun)
Atmospheric density gradient torque <sup>[8]</sup>	None

这些无法由数值模型拟合的异常段显示了北 斗G2在过去10 yr里过得并不安稳,这会使得未来 旋转状态的预测成为很大的挑战,因此我们必须弄 清楚曾经发生了什么.在图1 (a)中将自转频率数据 与轨道半长径和偏心率重叠,可以看到在异常段 中,除了A1以外可以分为两类: A3、A4和A6持续 大约100 d,自转频率快速增加,同时偏心率也大幅 增加,而半长径几乎没有异常变化;而A2和A5持续时间大约1个月,期间半长径发生过抖动,而偏心率和自转频率没有明显异常.这些异常变化显然是存在额外且持续的动力作用,其中燃料泄漏是最可能的因素之一.而这两不同的变化类型疑似是来自不同的因素,如不同部位的泄漏,或燃料、气囊等不同类型的泄漏.



图 1 北斗G2卫星自转速率过去10 yr的历史演化和拟合与外推结果. (a)北斗G2卫星自转速度(蓝红,右轴)以及半长径(青,左一轴)、偏心率(灰, 左二轴)变化趋势. 自转数据从紫金山天文台和Graz观测的光度数据中提取,轨道数据源于TLE. 可拟合的正常转速被分为了S1-S6b共7段用蓝色 标记,而其中间隔的红色标记的A1-A6为转速或轨道根数异常段. 据推断,在A1处发生了一次碰撞,在A4段发生了帆板损坏,而在A6段的起始处发 生了解体事件. (b)北斗G2卫星自转速度每月变化趋势. 下面4图为拟合以及外推结果,其中(c) S1和S2段; (d) S3, S4和S5段; (e) S6a段; (f) S6b段. 各图底部为带权重的拟合残差. (c)图中的紫色标记为将S1和S2旋转状态的拟合结果外推到56128 d+12.05 h时刻的结果.

Fig. 1 Evolution of the rotation speed of the BeiDou-G2 satellite in the past 10 years and the fitting and propagating results.
(a) The BeiDou-G2 satellite's rotation speed (blue-red, right ordinate), semi-major axis (green, left, first ordinate), and eccentricity (gray, left, second ordinate). The rotation data were extracted from the photometric data that Purple Mountain Observatory and Graz observed, and the orbit data were derived from the two-line element set. The blue dots, which represent the normal rotational speeds that could be fitted, are divided into seven segments, S1–S6b; and the red dots named A1–A6 are in the intervals with abnormal rotational speeds or orbital elements. It was inferred that a collision was included in A1, one solar panel was damaged in A4, and fragmentation occurred at the beginning of A6. (b) Monthly changes of the rotation speed of the BeiDou-G2 satellite. The lower four panels show the results of fitting and propagation in (c) segments S1 and S2; (d) segments S3, S4, and S5; (e) segment S6a; and (f) segment S6b. The bottoms of the four panels are the fitting residuals with weights. The purple in panel (c) of this figure marks the time when the fitting results of the rotation states of S1 and S2 were propagated to 56128 d+12.05 h.

# 3 自转加速的导火索:碰撞?

A1段的变化与其他异常段都不相同. 北斗G2 的偏心率在A1处的变化很突然. 虽然缺少当时的转 速数据,但S1和S2的旋转状态不一样(即无法合并 在一起拟合). 这种变化理论上可能是一次控制机 动. 但是从结果来看轨道和姿态没有发生本质变化, 从时间来看离它最后一次机动控制(官方公布失 效)已经过去了2 yr,而且前后也没有类似事件,最 关键一点是A1段时候卫星正处于非洲上空,超出了 中国的可视范围,没有理由选在这个时间进行一次 主动控制.因此我们深度怀疑这是遭受了一次撞击. 我们通过MJD在56128-56132时间内对前后两组双 行根数(Two-Line Element, TLE)进行轨道外推, 确定了撞击时刻为56128 d+12.05 h,最近距离为 1.5 km, 该距离差在高轨目标误差范围内, 同时 可以得到速度变化 $\Delta v = (0.764, -0.628, 0.171)$ m·s<sup>-1</sup>. 由于卫星主要部件都为刚体, 该碰撞可以 看作完全弹性碰撞,则基于同步轨道目标的分布可 以估算得到撞击物的质量大概率是一个小于10 kg 的空间碎片<sup>[4]</sup>. 将S1和S2旋转状态的拟合结果外推 到A1位置,则可以进一步确认撞击细节<sup>[4]</sup>.撞击部 位可能位于头部或者尾部(对称解).

从图1 (a)-(b)中观察发现, 异常事件都发生在 自转加速段(从6月到9月开始), 而且自撞击事件后 到2017年之前每年都会发生, 那么A1处的撞击则 可能是后续5次异常事件的导火索. 一种可能的推 测是, 这次撞击位于尾部燃料箱附近, 在每年的自 转加速段的几个月时间里, 在其中一个对称性解 中<sup>[4]</sup>太阳长时间照射尾部, 持续的加热引发受损区 域的材料结构变化从而造成燃料泄漏. 而在2017年 之后, 由于残留的燃料已完全释放, 再也没有发生 过转速异常. 我们可以预期在即将到来的任务之前 不会再发生类似的加速事件.

#### 4 最终的演化模型

除了A1外,在A4和A6也发生了特殊事件.图2 展示了北斗G2帆板参数的所有反演结果.在图2 (a)中,由S4和S5段反演得到的帆板正面总反射率 相比之前陡然下降,而反面与正面的反射率比 值(ratio of Back-to-Front, B/F ratio)与之前相比 并没有太大变化,这反映出目标所受到的力矩 效应减弱,但整体构型没有太大改变.一种可能 的情况是在A4段目标的帆板受到了损坏. 我们通 过在S4和S5段中用单侧帆板缺损25%的模型来反 演,得到的正面总反射率与S1-S3的相当,且得到 了与无损模型同样的帆板角度和B/F ratio, 验证 了我们的推测.这种损坏大概率来自目标快速旋 转造成的解体. 在图2 (b)中也能看到该事件造成 帆板角度分布的巨大间隔.此外,在A6段的起始 处,即2016年6月29日(MJD = 57568), NASA (National Aeronautics and Space Administration)公 布称北斗G2解体<sup>[9]</sup>,并分裂出至少5块(后续报道 改为3块),但这些碎片至今没有进TLE编目库. 图2 (a)中可以看出S6a和S6b的B/F ratio已经发生 了较大改变,说明卫星确实发生了结构性变化, 比如其最大惯量主轴可能已不再沿着原体轴方 向. 理论上可以通过增加求解参数来确认损坏程 度. 但我们认为在图1 (e)-(f)中现有模型对S6a和 S6b拟合后的外推结果与观测数据都已有非常好的 吻合度,新增参数可能会产生过拟合,所解出来结 果的可靠性也不高. 我们以S6b段反演得到的旋转 状态为参考标准,将所建立的旋转运动模型从S6a 外推到S6b,并考虑了二者的不确定度,外推结 果的标准差为转轴赤经0.5°,转轴赤纬2.5°,转 速3.1×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>即0.11°·s<sup>-1</sup>. 如果未来不再发生 任何异常事件,该计算模型和计算参数能够满足对 接时刻的旋转状态精度需求.最终,实践21号顺利 完成了任务.

致谢 The author thanks Graz SLR station for providing photometry observation data in 2015. The author wish to thank Dr. Nilda Oklay, editor of *Nature Communications*, for her useful comments and efforts for this manuscript. 感谢李龙华老师为本文赐名. 感谢中科院DAN&NS小组对本文撰写的帮助. 谨以此文纪念爱子林泽瑜在本课题研究期间与我的相伴时光.



图 2 北斗G2卫星关于帆板的参数在不同段的反演结果. (a)帆板正面总反射率(Front total reflection coefficient, 蓝)和反面与正面反射率比 值(ratio of back-to-front (B/F) reflection coefficients, 红). 黑色为用S4和S5段在单侧帆板缺损25%的模型来反演得到的正面总反射率. 需要 注意该反射率包含了模型求解中的多种因素,并不是真实反射系数<sup>[4]</sup>.虚线标注了3次异常事件的时间.(b)两个帆板角度δ<sub>1</sub>和δ<sub>2</sub>的解的分布.截取拟 合残差小于 $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> (S1-S5)和 $1.3 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> (S6a和S6b)的结果.

2020

Fig. 2 Estimation results of parameters for the BeiDou-G2 satellite's solar panels in all segments. (a) The front total reflection coefficient (blue) and the ratio of back-to-front (B/F) reflection coefficients (red). The black data represented the front total

reflection coefficient estimated from the model with 25% of one solar panel being damaged in segments S4 and S5. The estimated reflection coefficient included various factors in the model simulation and was not the actual reflectivity or albedo<sup>[4]</sup>. The dashed lines indicate the times of three abnormal events. (b) The distributions of panel angles  $\delta_1$  and  $\delta_2$  results. The fitting

residuals of the results shown in this panel were less than  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> (for S1–S5) and  $1.3 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> (for S6a and S6b).

#### 参考文献

- [1] Zhao C Y, Zhang M J, Yu S X, et al. Ap&SS, 2016, 361: 196
- [2] Kirchner G, Koidl F, Steindorfer M, et al. Light Curve Measurements with Single Photon Counters at Graz SLR. Proceedings of 2015 ILRS Technical Workshop, 2015: 1
- [3] McInnes C R. Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications. London: Springer Praxis, 1999
- [4] Lin H Y. arXiv:2204.09258

145

150

155

160

 $\delta_1/^{\circ}$ 

165

170

175

180

- [5] Lin H Y, Zhao C Y, Zhang M J. AdSpR, 2016, 57: 1189
- [6] Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. BAM-S, 1996, 77: 853
- [7] Lin H Y, Zhao C Y. Ap&SS, 2015, 357: 167
- [8] Lin H Y, Zhu T L, Liang Z P, et al. EP&S, 2019, 71: 16
- [9] National Aeronautics and Space Administration. Orbital Debris Quarterly News, 2016, 20: 2

0.1

2011

2012

2013

2014

2015

Year

2016

2017

2018

2019

# BeiDou-G2: Past and Present

LIN Hou-yuan<sup>1,2</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023) (2 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

**ABSTRACT** In January 2022, the defunct satellite BeiDou-G2 was pulled out of geostationary orbit by Shijian-21 to a graveyard orbit. For safe docking and operation, it was necessary to determine the rotation state in advance. In this paper, we show the evolution of the rotation of the BeiDou-G2 satellite based on the photometry observation data for the past 10 years. The rotational speed of BeiDou-G2 was found to be annual oscillation, mainly due to the solar radiation. Based on the evolution of BeiDou-G2's rotation speed and its orbit, we confirmed that in the last 10 years, the satellite had six abnormal events. These abnormal events were mainly due to the increase in the rotation speed caused by suspected fuel leakages. Additionally, the abnormal events included one collision in 2012, which was inferred to be the trigger of the fuel leakages in the following years. No rotational speed abnormalities occurred again after 2017, probably due to the complete release of the residual fuel. The parameters and the propagating models after one incidence of solar panel damage in 2014 and one fragment in 2016, with the standard errors for propagating over 1 year of the rotational axis less than 3° and rotational speed being  $0.11^{\circ} \cdot s^{-1}$ , were believed to be able to satisfy the accuracy requirements of the rotation state well at the moment of docking.

Key words celestial mechanics, space vehicles, methods: data analysis, techniques: photometric