

# 磁洁净太阳能电池电路技术进展与关键技术分析

赵文祺, 杨 宁, 梁一林, 肖少龙, 于振海, 徐 军

(空间电源全国重点实验室, 上海空间电源研究所, 上海 200245)

**摘 要:** 随着重力、电磁场等科学探测任务需求的日益增强, 对航天器整器的磁洁净度要求日益严格, 尤其是光照条件下太阳能电池电路的磁洁净度。本文基于国内外重大科学探测型号任务, 梳理了国内外磁洁净太阳能电池电路技术的发展历程、实现方式以及型号应用情况, 并从正面布局、背面线缆以及基板厚度方向等方面系统分析了实现磁洁净太阳能电池电路的关键技术: 选用低磁材料、镜像对称布局与自由端线缆控制、补偿电缆, 为后续磁洁净太阳能电池电路技术的进一步突破提供参考。

**关键词:** 剩磁; 磁洁净; 太阳能电池电路; 技术进展; 关键技术分析

**中图分类号:** V 11      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.04.009

## Technical Progress and Key Technique Analysis of Magnetic Cleanliness Solar Arrays

ZHAO Wenqi, YANG Ning, LIANG Yilin, XIAO Shaolong, YU Zhenhai, XU Jun

(State Key Laboratory of Space Power Sources, Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

**Abstract:** With the increasing demand for scientific exploration missions such as gravitational fields and electromagnetic fields, the requirements for the magnetic cleanliness of spacecraft integrators are becoming increasingly stringent, especially for solar arrays under illumination conditions. Based on the major scientific detection model missions at home and abroad, in this paper, the development history, implementation methods, and model applications of magnetic cleanliness solar array techniques are outlined. The techniques for realizing magnetic cleanliness solar arrays are systematically analyzed from the aspects such as front layout, rear cable direction, and substrate thickness direction, from which the key techniques of low magnetic material selection, mirror-image symmetrical layout, free-end cable control, and compensation cables are obtained. It provides a reference for further breakthroughs in the subsequent magnetic cleanliness solar array techniques.

**Key words:** residual magnetism; magnetic cleanliness; solar array; technological progress; key technology analysis

## 0 引言

地球的重力、电磁场及其变化反映了地球物质与结构的分布与运动, 实时监测地球的重力与电磁场变化对于灾害预测、资源探测以及基础科学进步具有重大意义。为此, 国内外先后发射挑战性小卫星有效载荷卫星 CHAMP(德国, 2000 年)<sup>[1]</sup>、重力恢复和气候实验卫星 GRACE(美国/德国, 2002 年)<sup>[2]</sup> 及其后继卫星 GRACE-FO(美国/德国, 2018 年)<sup>[3]</sup> 等卫星进行重力场探测, 以及地震区电磁发射发射

卫星 DEMETER(法国, 2004 年)<sup>[4]</sup>、电磁监测试验卫星张衡一号 CSES(中国, 2018 年)<sup>[5]</sup> 等进行电磁场探测。此外, 电磁场等物理场探测也是行星探测的必要任务的研究内容之一, 包括火星全球探勘者 MGS(美国, 1996 年)<sup>[6]</sup>、萤火一号火星探测器 YH-1(中国, 2011 年)<sup>[7]</sup>、木星冰月探测器 JUICE(欧空局, 2023 年)<sup>[8]</sup> 等。

在航天器在轨运行期间, 航天器平台、载荷以及太阳能电池阵等均存在电流流动, 因电磁感应必

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-06-06

基金项目: 上海市科技创新行动计划启明星项目(23YF1428000)

作者简介: 赵文祺(1996—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间太阳能电池与阵列设计。

通信作者: 杨 宁(1993—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间太阳能电池与阵列设计。

然产生磁场扰动,这些低频电磁辐射虽然并不影响航天器的姿态控制,但严重影响重力、电磁场等空间环境磁场探测,即重力场探测、电磁场探测要求航天器具备高磁洁净度。对于航天器剩磁分布,根据“地球空间探测双星计划”地面测试磁场波动分析仪探测数据,光照期航天器太阳电池阵光生电流产生的电磁辐射是整个航天器电磁辐射的主要来源,约占整个航天器电磁辐射的 87%(低频段  $<100\text{ Hz}$ ) 和 94%(高频段  $>100\text{ Hz}$ )<sup>[9]</sup>。因此,光照条件下实现磁洁净太阳电池电路对于重力场探测与电磁场探测航天器至关重要。

针对磁洁净太阳电池电路技术,本文介绍了国内外航天器磁洁净太阳电池电路技术发展与应用情况,并阐述了实现磁洁净太阳电池电路的关键技术及解决途径,为后续我国重力、电磁场以及引力波探测航天器磁洁净太阳电池电路设计、研制与应用提供参考。

## 1 磁洁净太阳电池电路技术进展

航天器在轨工作时,要使太阳电池电路表面及电缆回路网周围的磁场减少到最低程度,并使可磁化的部件产生的感应磁力矩达到最小,才能使航天器在运行的过程中尽可能的少受带电低能粒子及其他因素的干扰和影响。在笛卡尔坐标系中,在导体元素(太阳电池电路中主要是指太阳电池元素)中  $dl$  的长度上流过电流为  $I$  时产生的磁矩  $dB$  为:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空空间的导磁率;  $r$  为电流元素  $Idl$  到某点坐标为  $(X, Y, Z)$  处的矢量。

通过将所有的电流元素积分即可得到总的磁矩  $B$ 。在实际设计和计算中很少用上述的办法。传统和简化的磁矩计算方法是设定电路中通过的电流为  $I_i$ , 电路所围的面积为  $S_i$ , 则该电路所产生的剩磁矩为

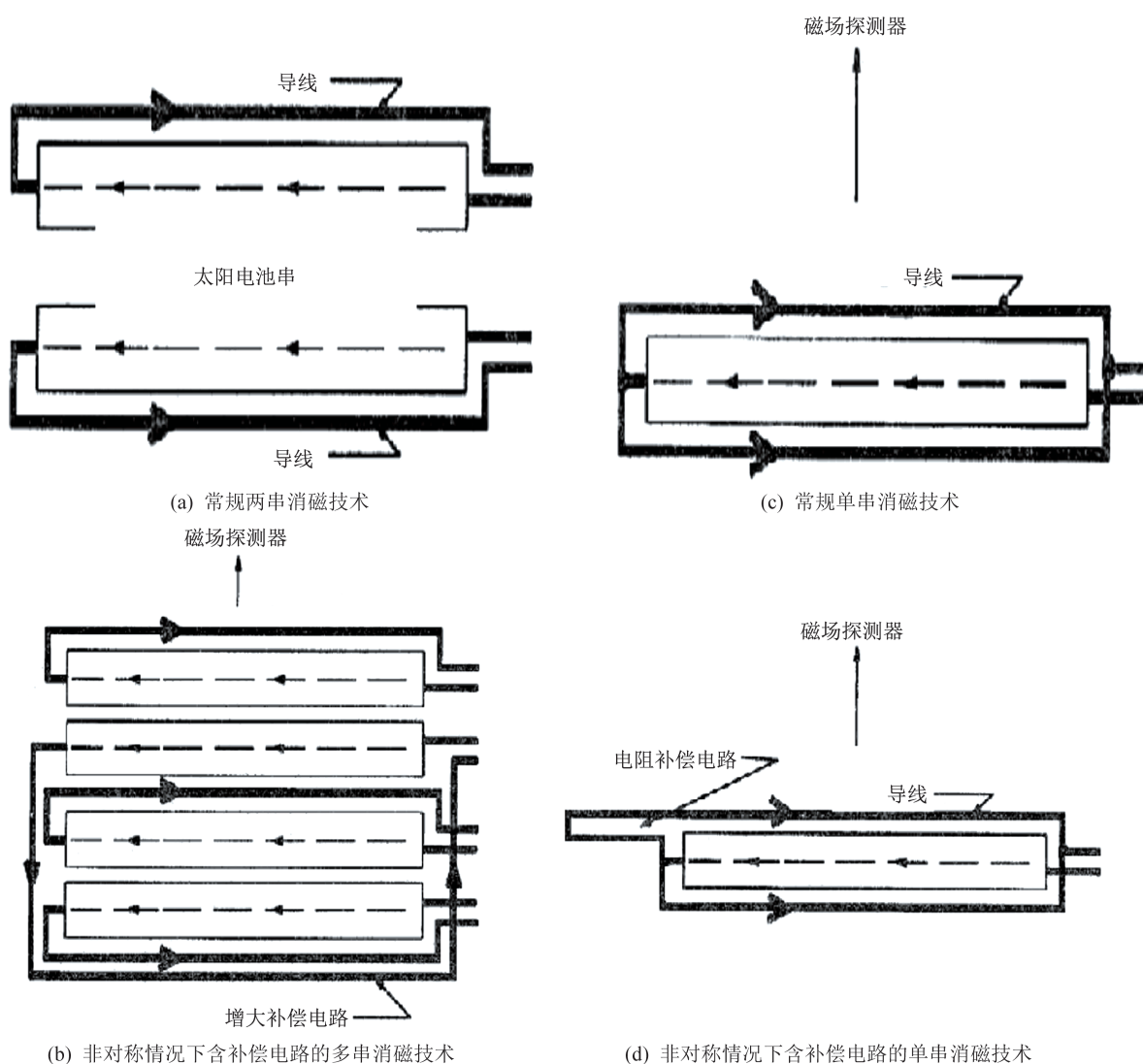
$$B_i = I_i \times S_i \quad (2)$$

在航天器太阳电池电路设计中,必须充分考虑消磁设计。目前常用的消磁方法为通过“镜像映射法”,使相邻和相对的电路组件设计电流值相同或近似,电路电流所通过的面积也要相同,也就是电路的串并联间隔要求相同和等距,收集电流的方式也完全相同,进而使每个电路产生的磁矩与相邻、

相对电路的磁矩相抵消,实现降低剩磁矩的目标<sup>[10]</sup>。

但是,在实际航天器太阳电池电路设计中,太阳翼基板尺寸及机械结构往往使太阳电池电路设计中存在无法进行镜像对称的太阳电池组件及导线,尤其在考虑厚度方向消磁的情况下。为此,国内外研究人员进行了大量研究,并应用于 MGS、JUICE、TC-1、TC-2、GRACE、GRACE-FO、CSES 等航天器中。1996 年 11 月,美国 NASA 研制的 MGS 发射入轨,其任务之一是探测火星磁场,因此要求极高的整器磁洁净度,其磁场探测器安装在太阳翼外板边缘。MGS 太阳翼由双翼共 4 块尺寸为  $1.70\text{ m} \times 1.85\text{ m}$  的太阳电池板组成,外板采用 14.6% 效率的 Si 太阳电池,内板采用 18.9% 效率的 GaAs/Ge 太阳电池<sup>[6]</sup>。为降低太阳电池电路剩磁矩, MGS 通过在太阳电池串旁边设计相反电流方向的平行导线进行消磁, MGS 镜像消磁途径如图 1(a) 所示。但是,由于两串太阳电池串距离磁场探测器距离不同,距离磁场探测器较近的太阳电池串回路在磁场探测器处产生的剩磁大于其相邻太阳电池串回路产生的剩磁,因此在距离磁场探测器较远的太阳电池串设计增大补偿电路,通过增大电流回路面积以实现补偿消磁,如图 1(b) 所示。对于距离磁场探测器较远的单串太阳电池组件,可以通过在太阳电池串两侧引出相反电流走向的平行导线进行消磁,如图 1(c) 所示,太阳电池串两侧回路因与磁场探测器距离细微差异产生的剩磁微乎其微;但是对于距离磁场探测器 60 cm 之内的单串太阳电池组件,距离磁场探测器较近的回路在磁场探测器处产生的剩磁大于太阳电池串另一侧回路产生的剩磁,因此通过增大距离磁场探测器较近回路的导线长度进而增大其回路电阻,即通过降低距离磁场探测器距离较近的回路剩磁以实现补偿消磁,如图 1(d) 所示<sup>[11]</sup>。通过上述消磁方法, MGS 太阳电池电路光照情况下在磁场探测器位置剩磁矩测试为 0.6 nT。

2002 年 3 月,美国 NASA 与德国 DLR 联合研制的 GRACE 双星发射入轨,其主要任务是分析和绘制地球重力场及其随时间的变化,两颗卫星在相距 220 km 的同一轨道运行,需时刻精确测量星间距离,以保证重力场模型的高精度,因此需要特别关注太阳电池电路相关的磁干扰。GRACE 卫星初始

图1 MGS太阳电池电路消磁技术<sup>[11]</sup>Fig. 1 Magnetic field cancellation techniques for the MGS solar array<sup>[11]</sup>

轨道高度约为490 km,寿命末期轨道高度降至约330 km。卫星整体构型为梯形结构,在顶板和2个侧板采用体装式太阳翼结构,顶板尺寸为3 120 mm×691 mm,两个侧板尺寸为3 120 mm×969 mm,太阳电池电路选用2PR/200型Si太阳电池。根据GARCE研制经验<sup>[12]</sup>,其主要通过2个方面实现磁洁净:一方面选用无磁材料,避免铁磁材料的磁化。综合考虑高磁洁净度要求与高剂量原子氧剂量,GRACE卫星太阳电池间选用金材料进行互连。另一方面是通过镜像对称和线缆绞合进行剩磁抵消,对于正面无法实现对称消磁的太阳电池组件回路,则通过在基板背面铺设相反电流方向的线缆进行抵消。2018年5月,GRACE的后续任务GRACE-FO发射升空,其将GRACE采用的Si电池更新为

28%效率的三结GaAs电池,太阳电池电路磁洁净设计方面则基本保持一致<sup>[13]</sup>。

此外,2023年4月发射的JUICE探测器同样进行了磁洁净太阳电池电路设计。JUICE探测器采用双翼结构,太阳翼面积为85 m<sup>2</sup>,寿命末期在木星轨道附近仍可提供730 W以上的输出功率<sup>[14]</sup>。除镜像对称消磁外,为了降低磁场探测器附近太阳电池电路的剩磁,每条组件均在基板背面进行了补偿电缆设计,并在正、负线重合区域进行了绞合处理<sup>[15]</sup>。

国内自从与中欧政府合作空间项目“地球空间探测双星计划”<sup>[16]</sup>开始,进行了系统的磁洁净太阳电池电路技术研究。探测双星为圆筒构型,采用体装式太阳电池电路。TC-1卫星任务轨道为

79 000×480 km 大椭圆轨道,于 2003 年 12 月发射,通过 TC-1 卫星的磁强计和磁场波动分析仪在轨观察到信号周期约 4 s(卫星自旋速率为 15 r/min)的干扰信号,其主要是由于太阳电池电路正、负母线在探测器位置产生的磁场未能完全抵消,同时分流控制引起电路布局从对称变为不对称,从而产生非对称干扰,通过变更电缆位置和电缆安装工艺,使得太阳电池电路的准正弦干扰信号降低。2004 年 7 月发射入轨的 TC-2 在轨测试数据显示,在卫星表面磁强计伸杆 2.5 m 处卫星的剩磁干扰信号降为 0.5 nT<sup>[17]</sup>。特别地,探测双星太阳电池电路采用“8”字型连接的镜像对称进行正面电路消磁,如图 2 所示。太阳电池电路分阵回线焊接于太阳电池壳内壁的环氧覆铜布电缆表面,正母、负母、充电母、涓流和分流线等 5 条线缆迭层粘贴,使电缆正、负线产生的磁场抵消;对于分流态无法自身抵消的太阳电池组件回路,通过在太阳电池壳内壁铺设电流方向相反的补偿电缆进行消磁<sup>[18]</sup>。

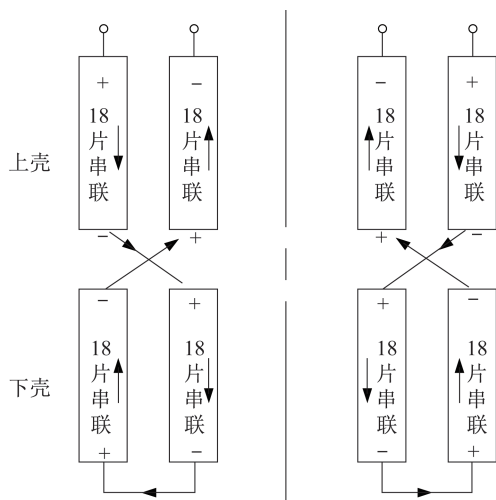


图 2 探测双星太阳电池电路正面双镜面对称布局<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Front double-mirror symmetrical layout of the solar cell array of TC-1 and TC-2 satellites<sup>[18]</sup>

萤火一号探测器是我国独立研制的第一颗火星探测器,其采用整星低剩磁控制技术。太阳翼总贴片面积 4.92 m<sup>2</sup>,双翼结构,包括 6 块展开式太阳电池板和探测器顶部 2 块体装式太阳电池板,均采用 26.8% 效率的 GaInP<sub>2</sub>/InGaAs/Ge 太阳电池<sup>[19]</sup>。为避免太阳电池电路光生电流引入的杂散剩磁,太阳电池电路除常规镜像对称外,电缆走线布成扁 S 形,沿帆板与磁传感器连线走向尽可能长,垂向尽

可能短;同时利用背面铺线将电流的返回导线直接布于太阳电池背面,以抵消流出电流。即使电池阵中某部分元件损坏,其磁场也不会显著改变<sup>[20]</sup>。经实际测试,太阳电池电路剩磁矩小于 0.06 A·m<sup>2</sup>。

作为我国第 1 颗专业进行电离层电磁扰动监测的卫星,张衡一号于 2018 年 2 月发射入轨,轨道高度 507 km,太阳翼采用单翼三块板结构<sup>[21]</sup>。太阳电池电路正面采用“8”字布片,背面线缆进行绞合并基于中轴线进行镜面对称布局。考虑太阳电池电路分阵工作状态,各分阵采用分流级分布同样沿太阳翼中轴线镜面对称,尽可能降低太阳电池电路子阵工作状态切换引起的剩磁。此外,张衡一号通过磁试验模拟件进行了磁试验。经测试,在太阳翼法线方向上,距离 1 m 处的杂散磁场最大为 0.96 nT;在太阳翼同一个平面上,距离模拟件边缘 1 m 处的杂散磁场最大为 1.4 nT。由此推算,在轨太阳光垂直入射情况下,在高精度磁强计位置产生的杂散磁场小于 0.011 nT。根据在轨测试结果,张衡一号卫星本体磁洁净度达到 0.33 nT<sup>[22]</sup>,满足不大于 0.5 nT 的要求。

## 2 磁洁净太阳电池电路关键技术分析

通过对磁洁净太阳电池电路发展进行分析,识别出实现磁洁净太阳电池电路的关键技术主要包括:选用低磁材料、镜像对称布局与自由端线缆控制、补偿电缆。从太阳电池电路正面布局、背面线缆走向以及基板厚度方向这 3 个方面综合考虑,进行太阳电池电路的三维消磁。

### 2.1 选用低磁材料

太阳电池电路主要包括太阳电池、互连片、导线和电连接器等,其中,太阳电池大部分为 Si 电池或 GaAs 电池,导线大部分为铜镀银材料,因此太阳电池电路所用大多数材料为无磁材料,可能存在铁磁或顺磁性的材料主要为互连片。目前国外主流的太阳电池互连片包括可伐互连片和钼互连片<sup>[23-24]</sup>,由于可伐互连片中包含铁、镍等铁磁材料,因此对磁洁净度要求较高的航天任务,可以选用钼互连片代替可伐互连片。在不可避免需应用少量磁性材料的情况下,应对材料进行消磁处理以最大限度地减少残余磁场。10 cm 处的可伐互连片和钼互连片的磁性测量结果见表 1,尽管钼互连片表面

可能含有少量的用于增强表面可焊性的镍镀层,但其并没有显示出明显的剩磁。可伐互连片的磁性可以通过消磁处理实现消磁,但仍存在材料被重新磁化的风险。

表1 可伐互连片和钼互连片10 cm距离处的磁性测量结果<sup>[25]</sup>

Tab.1 Magnetism at the distance of 10 cm between the kovar and molybdenum interconnectors<sup>[25]</sup>

| 互连片类型 | 测量结果  | 消磁处理后 |
|-------|-------|-------|
| 可伐    | 3 nT  | 0 nT  |
| 钼     | <1 nT | 0 nT  |

需要注意的是:可伐材料为软磁材料,其本身不带磁性,当外磁场强度低于10 000 G(1 T)以下时,可伐材料的磁化率恒定为220。在地球低轨低磁环境下,太阳能电池电路可伐互连片感生磁矩不超过 $9.9 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ,远小于一般航天器剩磁指标要求。除可伐互连片外,在电连接器选用方面,建议选用低磁型电连接器,如J36W等。

## 2.2 镜像对称布局与自由端线缆控制

在太阳能电池电路设计中,为实现磁洁净目标,应遵循镜像对称布局设计,包括正面太阳能电池组件布局、背面线缆走向、电连接器处线缆引线和分阵布局等。太阳能电池电路正面组件布局应遵循电流走向镜像对称设计的原则,且应尽量缩短正、负极引出线的距离,减小引线环路面积,同时保证引出线电流方向对称。在太阳能电池电路背面线缆走向设计时,应保证线缆走向对称设计,尤其对于二极管板区域、负极汇流银片区域等应在对称设计的前提下尽量缩短二极管、汇流银片等引出线的距离。对于分阵正、负引线,应布置于同一线缆束中。

在太阳能电池电路正面组件布局、背面线缆布局设计中,应整体考虑电流走向,在基板厚度方面电流环路进行对称设计,实现太阳能电池电路厚度方向的剩磁抵消。在太阳能电池电路连接器区域,一般情况下,为提高可靠性同时降低工艺实施难度,常采用正负极性接点物理隔离排布,形成较大的正、负线间开口面积。为减小正、负线在电连接器上产生的电流环路面积,可进行正、负极性接点镜像对称设计,使得正、负接点距离产生的剩磁相互抵消<sup>[26]</sup>。

此外,考虑太阳能电池电路分阵在轨工作状态,避免因分阵工作模式调整引起的剩磁变化,在太阳

电池电路布局设计时,应充分考虑分阵布局,进行分阵对称布局设计,并顺序控制分阵工作模式切换。

## 2.3 补偿电缆设计

在实际航天器太阳能电池电路设计中,太阳翼基板尺寸及机械结构通常使太阳能电池电路设计中存在无法进行镜像对称的太阳能电池组件,为此,可在正面无法消磁组件的基板背面位置设置与正面组件电流方向相反的补偿线缆进行剩磁抵消,补偿线缆位置应与正面组件中心线保持一致。出于可靠性考虑,对于双线设计太阳能电池电路,补偿电缆应沿正面组件中心线对称走线,无论两根导线在中心位置铺设或间隔一段距离铺设,均可实现剩磁抵消<sup>[25]</sup>。

但是,补偿电缆通常会在基板厚度方面引入新的剩磁,针对此问题,可在基板正面进行两折组件布局设计,此时,基板厚度方向两个电流环路方向相反,理想情况下,剩磁完全抵消。此外,通过预埋电路也可解决基板厚度方向消磁问题。

## 3 结束语

本文基于MGS、GRACE、GRACE-FO、探测双星、萤火一号、张衡一号等国内外重力、电磁场科学探测型号任务对国内外磁洁净太阳能电池电路技术的发展历程、实现方式以及型号应用情况进行了介绍,并从正面布局、背面线缆走向以及基板厚度方向等方面,系统分析了太阳能电池电路三维消磁的关键技术,包括选用低磁材料、镜像对称布局与自由端线缆控制、补偿电缆,为后续磁洁净太阳能电池电路技术的进一步突破提供参考。

## 参考文献

- [1] ZAGLAUER A, PITZ W. Champ-the first flexbus in orbit[J]. Acta Astronautica, 2003(52): 747-751.
- [2] DAVIS E S, DUNN C E, STANTON R H, et al. The GRACE Mission: meeting the technical challenges [J]. NASA Technical Reports Server (NTRS), 2000.
- [3] KAYALI S, MORTON P, GROSS M. International challenges of GRACE follow-on [C]//2017 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2017:1-8.
- [4] PARROT M. The micro-satellite DEMETER [J]. Journal of Geodynamics, 2002(33):535-541.
- [5] 袁仕耿,朱兴鸿,黄建平.电磁监测试验卫星(张衡一

- 号)系统设计与关键技术[J].遥感学报, 2018(S1):7.
- [ 6 ] STELLA P M , ROSS R G , SMITH B S , et al. Mars global surveyor (MGS) high temperature survival solar array, in: conference record of the twenty fifth ieee photovoltaic specialists conference-1996, [J]. IEEE, 1996, 283-288.
- [ 7 ] 衡岗,侯建文,陈昌亚,等.萤火一号火星探测器研制经验总结[J].上海航天,2013(30):6-11.
- [ 8 ] GRASSET O, DOUGHERTY M, COUSTENIS A , et al. Fletcher, jupiter icy moons explorer (JUICE): an ESA mission to orbit ganymede and to characterise the jupiter system [J]. Planetary and Space Science, 2013 (78):1-21.
- [ 9 ] 曹晋滨,杨俊英,袁仕耿,等.卫星低频电磁辐射在轨探测研究[J].中国科学,2009(9):1544-1550.
- [10] 郭显鑫,郭祖佑,王卫国.空间电源功率调节技术综述[J].上海航天,2010,27(3):10.
- [11] ACUNA M H , SCHEIFELE J L, STELLA P ,et al. Magnetic field cancellation techniques for the Mars global surveyor solar array [C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference.IEEE, 1996.
- [12] TOLSTOJ M. Analysis of disturbance torques on satellites in low-earth orbit based upon GRACE[M]. Aachen, North Rhine-Westphalia, Germany: RWTH Aachen, 2017.
- [13] KORNFIELD R P, ARNOLD B W, GROSS M A, et al. GRACE-FO: The gravity recovery and climate experiment follow-on mission[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(3):931-951.
- [14] KROON M, BONGERS E, CAVEL C, et al. Low-intensity low-temperature (LILT) power prediction of JUICE solar array [C]//2019 European Space Power Conference (ESPC).IEEE, 2019.
- [15] KROON M, BONGERS E, BUBECK K .Magnetic tests and analysis of JUICE solar array [C]//2019 European Space Power Conference (ESPC).2019.
- [16] 刘振兴.地球空间双星探测计划[J].地球物理学报, 2001(44):573-580.
- [17] 王鸿芳,刘元默,黄才勇,等.双星电源分系统在轨性能分析[C]//中国宇航学会首届学术年会.中国宇航学会,2005.
- [18] 金海雯,吕伟,崔新宇,等.地球探测双星太阳阵表面等电位及剩磁控制[C]//中国宇航学会学术年会.中国宇航学会,2005.
- [19] 瞿炜烨,陶建秋,周明中,等.萤火一号火星探测器电源分系统技术[J].上海航天,2013,30(4):105-107.
- [20] 陈昌亚,方宝东,曹志宇,等.YH-1火星探测器设计及研制进展[J].上海航天,2009,26(3):6.
- [21] XUHUI S, XUEMIN Z, SHIGENG Y, et al. The state-of-the-art of the china seismo-electromagnetic satellite mission [J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(5):634-642.
- [22] 张勇,赵颖,刘元默.太阳电池阵磁洁净度设计及试验验证[J].电源技术,2020,353(2):87-90.
- [23] ALURRALDE M, BARRERA M, BOLZI C G, et al. Development of solar arrays for argentine satellite missions[J].Aerospace Science & Technology, 2013, 26(1):38-52.
- [24] DU J, CHEN X, JIA X, et al. Microstructure and properties of metallurgical bonding Mo/Pt/Ag laminated metal matrix composites [J]. Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Misrostructure and Processing, 2019 (743):743.
- [25] STERN T, DELAPP S. Techniques for magnetic cleanliness on spacecraft solar arrays [C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference, 2004: 5581.
- [26] 张勇,刘元默,巩巍.一种剩磁控制设计的展开式卫星太阳翼及试验验证方法:CN201510050633.8[P]. CN104699072A[2023-07-11].