



木星系环境特征与航天器防护设计研究

王建昭, 邱家稳, 霍卓玺

Study on Environmental Characteristics of Jovian System and Spacecraft Protection Design

WANG Jianzhao, QIU Jiawen, and HUO Zhuoxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国月球及深空空间环境探测

The Lunar and Deep Space Environment Exploration in China

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(2): 105-118

一种通用的航天器在轨分离设计方法

A Universal Design Method for Spacecraft On-Orbit Separation

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(4): 392-396

基于在轨组装维护的模块化深空探测器技术进展与应用研究

Development and Application of Modular Deep-Space Probe Based on On-Orbit Assembly and Maintenance

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(6): 595-602

核动力航天器总体设计研究

Study on Overall Design of Nuclear Powered Spacecraft

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(5): 444-452

空间核电推进系统比质量优化建模及其木星探测应用分析

Specific Mass Optimization Modeling of Space Nuclear Electric Propulsion System for Jupiter Exploration Mission

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(4): 361-366

木星系探测及行星穿越任务轨迹初步设计

Preliminary Design for the Trajectories of Jovian and Planetary Mission

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(2): 189-194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

木星系环境特征与航天器防护设计研究

王建昭¹, 邱家稳², 霍卓玺¹

(1. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 木星系探测是中国未来深空探测的重要方向之一, 木星系环境极其复杂, 对其进行研究是探测任务重要的科学目标。此外, 木星系环境对探测器的影响更是制约任务设计的关键要素。从重力场、磁场、大气层/外逸层、电磁辐射、高能粒子、等离子体、微流星体等7个方面全面分析了木星系各环境要素的特征及研究现状。其中, 木星空间等离子体和高能粒子通量远高于地球空间, 其产生的多种辐射效应(如总剂量及内带电效应)是航天器设计中的防护重点。此外, 重力场模型是轨道和推进分系统设计的重要依据, 需构建冗余模型; 木星的强磁场对探测器控制分系统中高灵敏电磁设备的设计提出较高要求; 探测器所受电磁辐射的主要来源包括: 太阳直接辐射、木星/卫星反照太阳辐射、木星红外辐射等。此外, 木星卫星外逸层稀薄, 但存在多种原子; 微流星体来源包括行星际和木星系本身, 应避免微流星体与航天器碰撞产生的表面性能退化或击穿风险。

关键词: 木星系; 探测器; 空间环境

中图分类号: P185.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)05-0454-13

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210031

引用格式: 王建昭, 邱家稳, 霍卓玺. 木星系环境特征与航天器防护设计研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(5): 454-466.

Reference format: WANG J Z, QIU J W, HUO Z X. Study on environmental characteristics of Jovian system and spacecraft protection design[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(5): 454-466.

引言

木星是太阳系中体积与质量最大、磁场最强的行星, 对其进行探测有助于解决巨行星及太阳系的形成与演化等重大科学问题。木卫二(Europa)及木卫三(Ganymede)拥有地下海洋, 是潜在的宜居星球, 也是未来地外生命探测的重点^[1]。此外, 木星系探测还面临着重大技术挑战, 难点之一是恶劣的空间环境^[2]。其中, 木星磁矩是地球的 2×10^4 倍, 表面磁场强度比地球表面高20倍^[3], 磁层空间范围比地球大40倍^[4]; 木星轨道高能粒子能谱具有能量高、通量大、能谱硬的特点, 高能粒子能量及通量比地球轨道高1~2个数量级^[5]; 木星轨道所受电磁辐射仅为地球轨道的4%, 木星大气红外辐射近似于110 K的黑体, Europa和Ganymede表面温度范围分别为86~130 K和90~160 K。面对强磁场、强辐射、超低温的空间环境新特点, 需在任务设计与航天器设计全周期, 将空间环境与电源、热控、控制、结构等分系统进行耦合设计^[6-9], 确保任务顺利

实施。

在“伽利略号”(Galileo)之前, 木星探测以飞掠任务为主。1995年12月—2003年9月, Galileo在赤道面区域对木星及其卫星系统进行了详细探测^[10]。2016年7月至今, “朱诺号”(Juno)在极轨轨道对木星进行了全经纬度覆盖的详细探测^[11], 其近木点低至 $1.06 R_j$ ($R_j = 71\,492$ km, 为木星半径), 获得了大量高精度探测数据。此外, 未来的木星系探测将聚焦其卫星系统(尤其是Europa和Ganymede)的详查。其中, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的“冰月探测器”(Jupiter ICy moons Explorer, JUICE)^[12]计划于2022年发射, 将在2029年及之后的3年多次飞掠Europa、Ganymede、木卫四(Callisto), 并最终进入Ganymede轨道进行环绕探测。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的“欧罗巴快船”(Europa Clipper)任务^[13]计划于2023年发射, 到达木星系后用时约3.5 a实现覆盖Europa全经纬度的近距离探测, 为后续着陆和钻探任

收稿日期: 2021-04-26 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1731113)

务奠定基础。另外，随着中国航天水平的不断提高，木星探测也是中国未来深空探测的重点，目前已提出木星系环绕及行星际穿越探测任务概念，相关研究领域亟需得到提升。

本文拟从重力场、磁场、大气层/外逸层、电磁辐射、高能粒子、等离子体、微流星体等方面梳理木星系环境特征，并初步探讨和分析极端环境对航天器防护设计带来的影响。

1 重力场

各环境要素与工程设计约束之间的关系如表1所示。

表 1 木星系环境要素及对应的工程设计约束

Table 1 Environmental factors of Jovian system and the corresponding engineering design constraints

环境要素	探测方法	工程约束
重力场	射电雷达	轨道设计
磁场	磁强计	控制分系统、机械分系统
电磁辐射	光谱仪	热控分系统、电源分系统
大气层/外逸层	光学遥感、局地粒子探测	热控分系统、电源分系统
等离子体	局地带电粒子探测	载荷分系统、控制分系统
高能粒子	局地高能粒子探测	各分系统
微流星体	局地尘埃粒子探测	各分系统

木星及其主要卫星的重力场参数如表2所示。

表 2 木星及其主要卫星的重力场参数

Table 2 The coefficients of gravity field of Jupiter and its main moons

参数	木星	Europa	Ganymede	Callisto
质量/ 10^{27} kg	1.90×10^{27}	4.80	14.82	10.75
半径/km	赤道: 71 492 两极: 66 854	1 560.8	2 631.2	2 410.3
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 326	3 010	1 940	1 830
表面重力/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	23.12	1.31	1.43	1.24
逃逸速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	59.5	2.0	2.7	2.4
引力常数/($\text{km}^3 \cdot \text{s}^{-2}$)	1.27×10^8	3 202.7	9 887.8	7 179.3
$J_2/10^{-6}$	14 736	435.5	127.5	32.7

注：资料来源于<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>。

需要指出的是，木星无固态表面，半径定义为大气压力1 bar的高度。探测器在木星系所受的作用力包括：木星及其卫星质点引力、木星及其卫星非球形引力、其它天体（如太阳、土星）引力摄动、太阳及木星辐射压等。其中，非球形引力来自木星较差自转及内部大气环流，其引力势可表示为谐系数展开

$$U(r, \theta, \phi) = \frac{GM}{R_j} \sum_{l=0}^l \sum_{m=2}^l \left(\frac{R_j}{r}\right)^l [C_{lm} \cos(m\phi) + S_{lm} \sin(m\phi)] P_{lm}(\sin\theta) \quad (1)$$

其中： G 为万有引力常数； M 为木星质量； P_{lm} 为缔合勒让德多项式； C_{lm} 和 S_{lm} 为系数，目前最精确的木星重力场模型是由Juno经过多普勒跟踪得到的，相关系数详见文献[14]。

此外，对于木星卫星，受限于探测数据，重力场模型不够精确。由Galileo探测数据解算的重力场系数最高为2阶，高阶系数未知。根据理论，若为岩石星体，重力场高阶系数可由Kaula法则[15]计算

$$C_l^2 = A_k \frac{10^{-10}}{l^4}, C_l^2 = \frac{1}{2l+1} \sum_m C_{lm}^2 + S_{lm}^2 \quad (2)$$

其中：对于Ganymede， A_k 系数取为4。此外，当 A_k 分别取值为0.4和40时，对应为弱场和强场[16]，定义为反演参考重力场的 3σ 偏差，可用于航天器轨道的冗余设计。根据文献[16]，Ganymede平均场、弱场、强场的高阶重力场系数如图1所示。

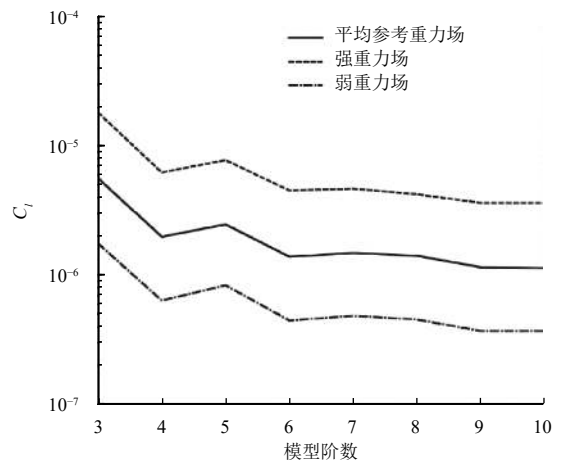


图 1 Ganymede的重力谱

Fig. 1 Ganymede's gravity power spectrum

在航天器设计中，弱场和强场模型分别给出了航天器轨道受Ganymede引力影响的最好和最差情况，涉及任务设计及推进剂消耗的计算时，需采用强场模型。此外，模型中对航天器轨道的影响主要来自 $J_3 \sim J_7$ 项，其数值影响探测器轨道倾角，若模型精确度不够，可能导致探测器撞击到Ganymede的表面。

2 磁 场

木星磁场的强度及范围都远超地球磁场，木星磁场与太阳风相互作用形成磁层，日侧磁层顶范围达

60~100 R_j , 夜侧磁尾范围可达200 R_j 。与地球不同,木星磁层的主要驱动源是行星转动动能,此外,木星卫星可吸收磁层内的高能粒子并成为等离子体源,对木星辐射带结构和动力学产生影响。木星磁层磁场的来源包括:行星发电机产生的内源场、磁赤道环电流、磁尾电流片、极区场向Birkeland电流、磁层顶电流等。一般将磁层分为3个部分,在内磁层(<10 R_j),木星磁场以发电机产生的内源场为主,内源场与偶极场近似,此外,木卫一(Io)频繁火山活动产生的中性粒子输运至磁层内并电离,在赤道面形成随木星自转的等离子体环^[17];在中磁层(10~40 R_j),赤道面环电流起主导作用,将磁力线向远离木星的方向拉伸^[18]使其偏离偶极场;在外磁层(>40 R_j),磁层形态取决于太阳风状态,太阳风压缩木星磁层形成磁层顶^[19],磁层顶电流体系使磁力线被限制于磁层内部。根据文献^[20],木星磁场位形如图2所示。

内源场可表示为矢量势的梯度: $B = -\nabla\Phi$, 矢量势可表示为球谐函数的多级展开

$$\Phi = R_j \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_j}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n P_n^m \cos(\theta) [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \quad (3)$$

其中: g_n^m 和 h_n^m 为系数。内源场建模始于“先驱者10号”(Pioneer 10)首次飞掠木星,但在Juno之前,受限于探测器轨道的纬度覆盖范围,模型最高仅为4阶。目前最精确的内源场模型是利用Juno前9圈磁场探测数据构建的JRM09模型^[21],该模型最高精度可至10阶,是除地球外最高精度的行星内源场模型。通过反演,该模型还揭示了木星复杂的发电机特征^[22],由JRM09模型得到的木星表面磁场强度分布如图3所示。

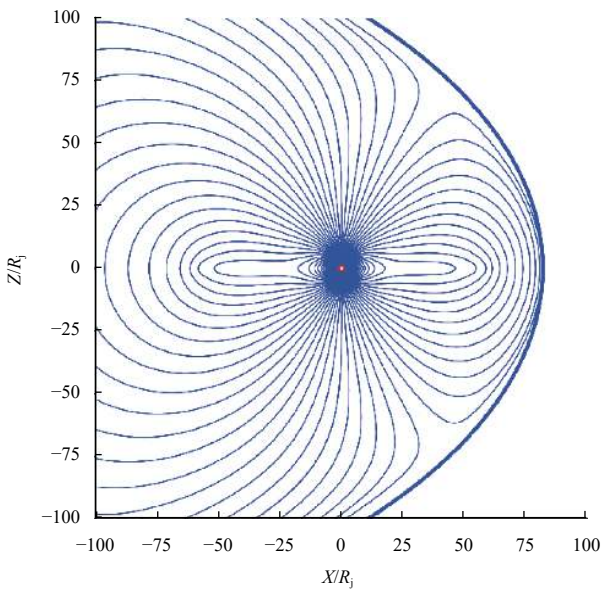


图2 木星磁层内的磁场位形

Fig. 2 The Jovian magnetic field in magnetosphere

木星发电机内源场以偶极场为主,其主要参数如表3所示。

表3 木星偶极场参数

Table 3 The coefficients of Jupiter's dipole field

参数	数值
偶极矩	4.28 G· R_j^3
磁轴/自转轴倾角	9.6°
倾角经度	201.7°
偶极子偏移距离	0.131 R_j

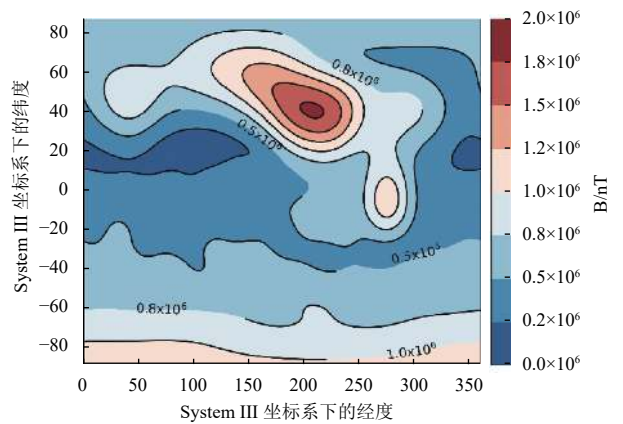


图3 木星表面磁场的强度分布

Fig. 3 Contour plot of the magnetic field magnitude on the surface of Jupiter

木星磁层外源场主要来自磁赤道环电流,一般认为,环电流是厚度一定的强度随径向距离减小的轴向传播的片状电流体系^[23]。以模型相对于实测数据的均方根残差为标准,目前精确度最高的是基于Juno前24圈磁场探测数据构建的CAN20模型^[24],该模型假设环电流平面与磁赤道呈一定倾角,且除轴向电流外还加入了径向电流,得到了相比Pioneer 10任务期间厚度更大、电流强度更小的环电流片结构。

此外,在木星卫星中,普遍认为Io和Ganymede有以偶极场为主的发电机磁场,而Europa和Callisto尚未发现存在磁场发电机的证据,只有被木星磁场磁化后产生的感生磁场,木星卫星磁场参数如表4所示。在木星卫星磁场建模的基础上,ESA基于Monte Carlo算法

构建了仿真程序 PLANETOCOSMICS-J^[25]，可计算带电粒子在卫星磁场中的输运。

表 4 木星卫星磁场参数^[26]

参数	Io	Europa	Ganymede	Callisto
偶极矩/(T·m ³)	8×10 ¹²	不确定	14×10 ¹²	不确定
最小/最大表面磁场/nT	1 300/2 600	120/240	750/1 500	<30
木星背景磁场/nT	1 800	420	120	35
磁轴旋转轴夹角/(°)	~180	135	170	80

在航天器设计中，木星磁场约束控制分系统中高灵敏电磁设备的设计，因为当航天器在强磁场中旋转时，导电材料内部会产生涡流^[27]，干扰控制分系统精密仪器正常工作。此外，磁场的精密测量需摆脱探测器本体剩磁的影响，常采用伸杆结构，因此也对结构设计提出较高要求。以Juno为例，磁强计利用伸杆安装在太阳帆板外侧距卫星本体10~12 m的最外侧位置^[28]。

3 电磁辐射

在航天器任务实施阶段所受的电磁辐射主要来源于3个方面：太阳电磁辐射、木星/卫星反照太阳电磁辐射、木星红外辐射，以下分别进行介绍。

3.1 太阳电磁辐射

太阳电磁辐射受到太阳自转（27 d）和太阳活动周（11 a）等周期的调节，其数值与太阳距离平方成反比。在木星近日点和远日点，太阳辐照度分别为55.7 W/m²和46.0 W/m²，平均辐照度为50.5 W/m²。此外，太阳辐照不确定度为0.2%。

另外，木星轨道各高能波段的辐照度如表5所示。其中，UV辐射主要用于评估航天器表面材料老化，太阳活动强度不同，近UV波段通量变化幅度可达50%，UV波段通量变化幅度可达2倍，太阳耀斑X射线通量变化幅度可达1个数量级。在航天器设计中，应采用最坏情况通量进行设计。

表 5 木星轨道高能波段太阳电磁通量

Table 5 High-energy solar electromagnetic flux in Jupiter's orbit

类型	波长/nm	平均通量/(W·m ⁻²)	最坏情况通量/(W·m ⁻²)
近UV	180~400	4.4	6.5
UV	100~150	8.5×10 ⁻⁴	1.7×10 ⁻³
EUV	10~100	7×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁴
X射线	1~10	2×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶
耀斑X射线	0.1~1	4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁵

3.2 木星及其卫星电磁辐射

由于内部有热源，木星是太阳系中唯一的内部释放的热能比接收的太阳辐射能量更大的行星，对于环绕探测器，木星反照压及红外辐射压更为显著。对于木星，其辐射总通量为反射太阳的电磁辐射和其本身产生的红外辐射的总和，根据文献^[29]，不同波段木星几何反照率如图4所示。对于工程设计而言，木星平均几何反照率为0.52，为评估木星红外辐射，其大气层可近似为110 K的黑体。

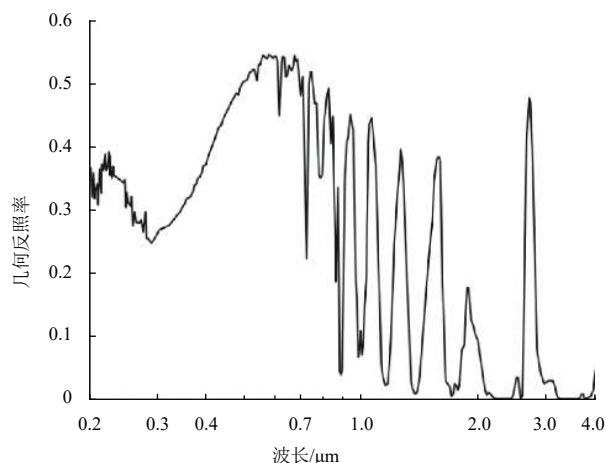


图 4 木星反射光谱

Fig. 4 Jupiter reflectance spectrum

根据文献^[30-31]，木星卫星平均反照率和表面温度范围如表6所示。反照率随卫星地形变化很大且和卫星表面性质有关，不同的物质可能会导致某些波段的吸收，并导致空间变化的光谱。

表 6 木星卫星平均反照率及表面温度范围

Table 6 The average albedo values and surface temperature ranges for the Galilean moons

参数	Europa	Ganymede	Callisto
反照率	0.68	0.44	0.19
表面温度/K	86~130	90~160	80~160

此外，根据文献^[29]，木星卫星的反射光谱如图5所示。相对而言，Io在可见光波段的斜率更陡，这一特征是由于Io的火山作用造成的。与Io相比，Europa的反照率在可见光范围内更高且几乎不反射红外辐射，1.5~5 μm范围内反照率特征主要是来自水冰的吸收。

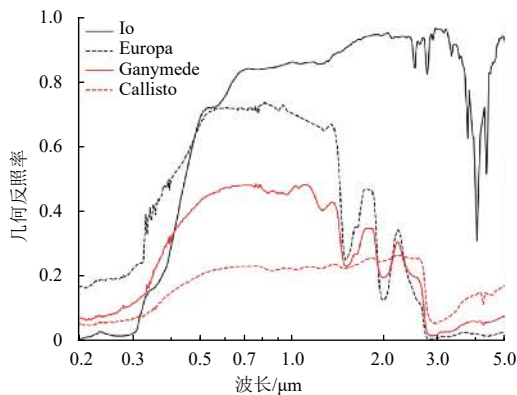


图5 木星卫星反射光谱

Fig. 5 Reflectance spectra of the Galilean moons

4 大气层/外逸层

木星卫星周围并没有发现存在稀薄大气层, 但在多种原子。这是由于木星磁层中充斥着高能粒子, 高能粒子轰击并侵蚀卫星表面, 原子被击出并形成稀薄的外逸层, 因此卫星表面大气压力很小, 根据文献[29], 数值如表7所示。

表7 木星卫星表面大气压力

Table 7 The surface pressure of the Galilean moons

参数	Io	Europa	Ganymede	Callisto
表面压力 /bar	$\sim 1 \times 10^{-9}$	$\sim 1 \times 10^{-11}$	$\sim 1 \times 10^{-12}$	$\sim 8 \times 10^{-12}$

相对而言, Io拥有较薄但较浓的外逸层, 主要来自强烈地质活动引发的火山爆发, 根据文献[29], 各卫星大气分子/原子含量如表8所示, 表中含量为垂直柱密度, 无数值表示目前尚未探测到。

表8 木星卫星外逸层各分子/原子含量

Table 8 The main chemicals found in the exospheres of the Galilean moons

种类	单位: cm^{-2}			
	Io	Europa	Ganymede	Callisto
SO ₂	5×10^{16}	—	—	—
S ₂	1×10^{16}	—	—	—
S	9×10^{12}	—	—	—
SO	$0.03 \sim 0.1 \times \text{SO}_2$	—	—	—
NaCl	$0.003 \sim 0.013 \times \text{SO}_2$	—	—	—
Na	4×10^{12}	4×10^9	$< 1 \times 10^8$	—
O ₂	—	5×10^{14}	5×10^{14}	3×10^{16}
CO ₂	—	—	—	8×10^{14}
O	5×10^{13}	$< 0.1 \times \text{O}_2$	—	$< 10^{13}$
K	5×10^8	1.6×10^8	—	—
C	—	—	—	2.5×10^{13}
H	2×10^{12}	—	2.4×10^{12}	—

另外, 以Ganymede为例, 考察氧元素相关分布。根据Galileo飞掠数据, 赤道及两极地区氧原子密度分别为 $5.6 \times 10^7/\text{cm}^3$ 和 $1.7 \times 10^6/\text{cm}^3$ [32]。此外, 根据动力学模型, 计算得到Ganymede赤道区域(10°)和极区(90°)氧元素随高度的分布[33], 如图6所示, 结果显示仿真所得数值比Galileo的测量值大。单个大气分子的速度分布于10 m/s~2 km/s, 对于原子氧, 200 km高度的入射速度约为1 km/s。对于航天器设计, 需要在飞掠和环绕木星卫星期间, 表面热控材料受到大气中的原子腐蚀产生的退化效应。

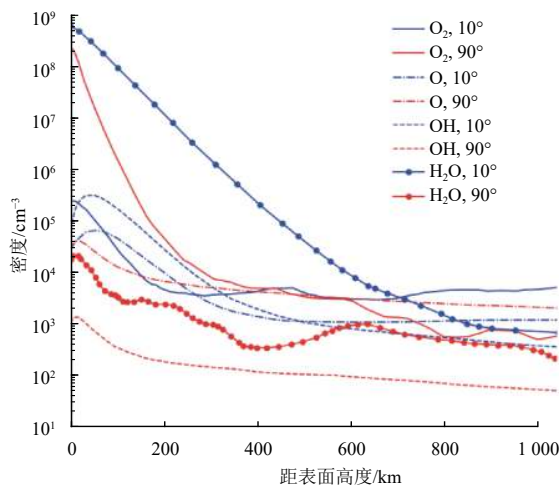


图6 Ganymede氧原子密度垂直分布

Fig. 6 Ganymede atomic Oxygen radial density distribution

5 等离子体

5.1 木星及其卫星轨道等离子体

在木星轨道, 等离子体来源主要包括太阳风和木星磁层。对于太阳风, 其速度范围为300~1 200 km/s, 一般太阳风速度为400 km/s, 高速太阳风一般发生在太阳活动低年, 速度可达700 km/s并有27 d周期, 在磁层顶以外区域, 可认为太阳风是空间均匀分布的, 木星轨道太阳风参数平均值如表9所示。在太阳风中, 质子典型能量为1 keV, He⁺⁺能量为4 keV。

表9 木星轨道太阳风参数

Table 9 Solar wind parameters in Jupiter's orbit

离子密度/cm ⁻³	速度/(km·s ⁻¹)	T _p /K	T _e /K	λ/m	N _α /N _p
0.32	468	1.2×10^5	1.0×10^5	38	0.047

注: T_p为质子温度, T_e为电子温度, N_α/N_p为α粒子与质子的数量比。

在木星磁层中, Io火山爆发在其轨道产生由气体和离子组成的环绕木星的环状结构, 木星的快速旋转使环内的冷等离子体加速并经离心力膨胀为圆盘, 木

星磁轴与自转轴的夹角导致给定位置等离子体参数随自转周期性变化。木星等离子体环境可分为3部分：冷等离子体（0~1 keV）、热等离子体（1~60 keV）、高能粒子（>60 keV），本节主要讨论前2种，高能粒子环境在后续章节讨论。

冷等离子体特点为密度高（可达 $2\,000/\text{cm}^3$ ）、能量低，采用DG83模型^[34]，赤道区域不同冷等离子体密度随径向距离的变化如图7所示。热等离子体中，电子（1 keV）和质子（30 keV）的密度随径向距离指数降低，由 $10\,R_j$ 内的 $5/\text{cm}^3$ 降至 $40\,R_j$ 外的 $10^3/\text{cm}^3$ ，共转速度（co-rotation velocity）由 $4\,R_j$ 的45 km/s增加到 $20\,R_j$ 的200 km/s。

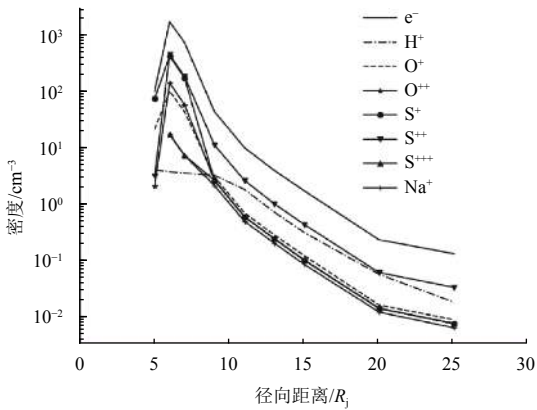


图7 赤道面冷等离子体平均密度随径向距离的分布

Fig. 7 Average equatorial electron density as a function of radial distance

DG83模型输出等离子体平均密度，但由于磁尾热等离子体频繁注入，等离子体密度变化很大。在1 a内，Galileo曾观测到100个热等离子体注入事件^[35]，这些事件主要集中在 $10\sim 20\,R_j$ 的 $15\sim 800\text{ keV}$ 能段并在 $12\,R_j$ 处达到峰值^[36]。和地球不同，木星热等离子体注入的可能机制是被拉伸的磁场中存储的旋转能量的释放，注入事件时间尺度为10 h，热等离子体通量约增加3~8倍。

对于木星卫星，以Ganymede为例，由于存在发电机磁场，Ganymede亦存在磁层且可阻止木星磁层中的等离子体注入，由于磁场屏蔽效应，Ganymede周围电子通量可降低50%~60%^[37]。此外，Europa和Callisto不存在发电机磁场和磁层结构，其对木星磁场内等离子体的影响主要来自尾迹的形成和溅射离子发射。

在航天器设计中，空间等离子体的主要危害是表面充电效应，电子在航天器裸露表面聚集，产生的电流使背阳面带负电荷，不同材料和表面可充至不同负

电位，可能导致致命的静电放电。对于载荷分系统，表面充放电产生的正负电压及光电子会干扰等离子体的测量。漂移的等离子体中会产生尾流并扰动局部等离子体介质，从而干扰电场和磁场的测量。此外，等离子体进入敏感探测器内也可引发潜在的充放电效应。若探测器采用电推进，还需考虑推进器产生的等离子体与空间等离子体之间的相互作用。

5.2 最恶劣充电环境

设计中常用最恶劣充电环境评估航天器充放电风险。对于电子，表面充电的极端情况下，二次电子产额低于1的热电子（~10 keV）通量比产额高于1的低能电子（<10 keV）的通量高。木星系中最恶劣电子环境对应形成木星极光的加速电子，经Maxwellian分布拟合的离散极光能谱如图8所示^[38]。

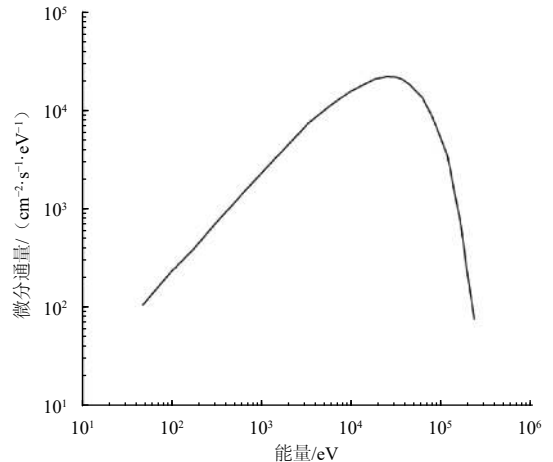


图8 离散极光电子能谱

Fig. 8 Discrete auroral electron spectrum

离子在表面充电过程中可降低负电压，氢和其它离子的密度和温度可从文献^[34]获得，在极光活动期间，周围的离子大大减少，因此在最恶劣充电评估中应使离子电流减小100倍。此外，由于尾流的产生，还应考虑离子的共转速度，这会导致离子密度进一步降低。

另外，可通过主动防护（如电子/离子枪）产生电子或离子，从而控制表面充电过程。其中，离子推进器是高通量离子枪。低能离子也可由污染气体的电离产生，在这一过程中，出气和溅射过程产生的原子被太阳光或电荷交换过程电离，产生10 eV以下的低能离子。这些离子可以被吸引到航天器带负电荷的表面，改变太阳电池盖片等的特性。此外，在航天器内部，残余气体可促进高压部件的静电放电。

6 高能粒子辐射

在木星轨道, 高能粒子辐射的来源包括木星辐射带、太阳质子和银河宇宙线。高能粒子与航天器相互作用产生的强辐射效应是木星探测任务设计的主要难点, 辐射效应包括但不限于: 电离总剂量效应导致的器件及系统失效、高能电子与绝缘介质相互作用产生的内部放电效应、高能粒子与元器件作用产生的单粒子效应、强辐射导致的表面热控涂层性能退化、低温低光照环境下位移损伤效应导致的太阳能电池片失效等, 这些效应对热控、控制、电源、轨道、结构等多个分系统的设计都产生了重要影响, 需在任务实施过程中综合考虑并反复迭代。

6.1 捕获质子与电子

一般而言, 木星辐射带高能粒子主要包括电子和质子, 在能量、通量、覆盖范围方面都远高于地球。目前, 存在多个木星辐射带数值模型, 其中应用最广泛的是NASA的GIRE2模型^[39]和ESA的JOSE模型^[40], 两者都基于Galileo探测数据建立。其中, GIRE2模型包括内、外辐射带2套坐标体系, 可较好地拟合观测数据, 并直接支撑了Juno的任务设计; JOSE模型利用平均通量和乘数因子, 构建了不同置信度下的木星磁层高能粒子通量模型, 可应用在探测器的冗余设计中, JOSE模型支撑了JUICE任务的设计。由GIRE2和JOSE模型得到的高能电子随径向距离的分布如图9所示, 两者在 $>10 R_J$ 区域符合较好而在 $<10 R_J$ 区域有一定差异, 这是因为JOSE模型在 $<10 R_J$ 时采用Salammbro理论模型^[41]而非Galileo探测数据。

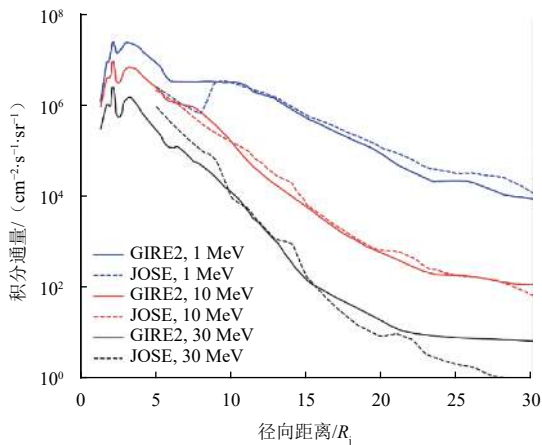


图9 赤道面高能电子积分通量随径向距离的变化

Fig. 9 Equatorial integral radial flux profiles of energetic electrons from the GIRE2 and the JOSE models

此外, 根据文献^[42], 对比地球GEO轨道和木星

赤道面 $4 R_J$ 处高能质子和电子的能谱, 如图10所示, 与地球相比, 木星轨道高能粒子通量比地球大2个数量级以上, 最大能量比地球高2个数量级, 且能谱更硬, 即相对而言木星系高能粒子更多。一般认为, 地球辐射带外边缘为 $7 R_e$ (R_e 为地球半径), 而木星辐射带边界可达 $17 R_J$ 。此外, 在地球空间, 质子主要存在于内辐射带而电子主要存在于外辐射带, 而木星系只存在单一的以电子为主的辐射带。因此, 木星系探测器的抗辐射设计要求很高。另外, 由于Europa和Ganymede的磁场屏蔽效应, 其周围高能电子通量相比木星磁层减小30%~50%^[43]。

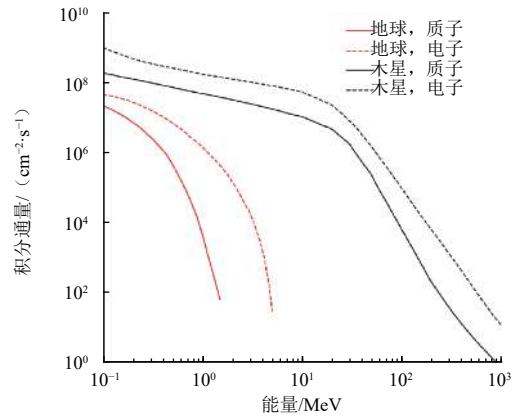


图10 木星与地球空间高能电子、质子积分通量能谱

Fig. 10 Electron and proton integral flux in orbits of Jupiter and Earth

6.2 重离子

木星轨道高能重离子主要来源是 C^+ 、 O^+ 、 S^+ , 其中: C^+ 来自于太阳; S^+ 来自于Io; O^+ 来自于太阳及木星卫星。目前最新的重离子通量模型为基于Galileo号探测数据构建的HIC模型^[44], 包括木星磁场捕获的重离子和银河宇宙线(CR)重离子, 该模型在Europa轨道输出的结果如图11所示, 当能量大于30 MeV/Nuc时, HIC模型通量与背景银河宇宙线通量接近, 即捕获离

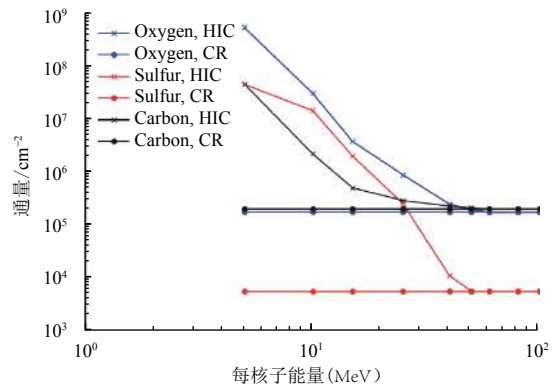


图11 Europa轨道高能离子通量

Fig. 11 Heavy ion fluence for a mission to Europa orbit

子的能量较小 ($< 50 \text{ MeV/Nuc}$)。

6.3 太阳质子与银河宇宙线

在太阳爆发期间，太阳高能质子通量急剧增加。太阳爆发活动在时间和强度方面都具有随机性，但主要发生在太阳活动高年，太阳活动低年发生概率很低。目前最新的太阳质子事件模型是根据40 a在轨数据构建的SAPPHIRE模型^[45]，该模型基于虚拟时间线方法，可在计算周期内随机产生虚拟的太阳质子事件，并给出多种置信度下的太阳高能粒子通量。然而，SAPPHIRE模型仅适用于地球轨道，在木星轨道，假设通量与距太阳距离的平方成反比，得到太阳活动高年木星轨道太阳质子通量，如图12所示。考虑到太阳质子相对于木星辐射带质子通量很小，故工程应用时可不考虑木星磁场对太阳质子的屏蔽作用。

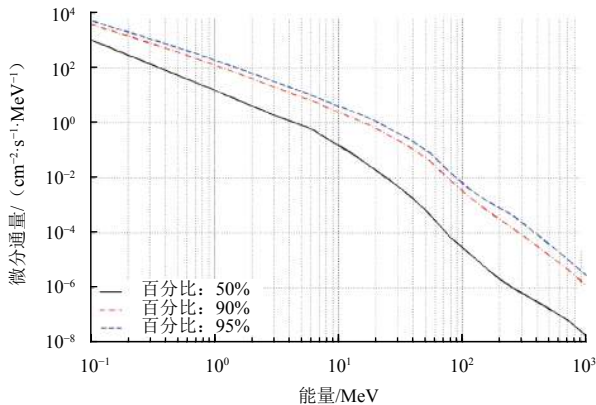


图12 木星轨道不同置信度太阳质子微分能谱

Fig. 12 The differential spectra of solar proton in Jupiter's orbit

此外，银河宇宙线中的高能离子可能与电子元器件相互作用产生单粒子效应，银河宇宙线强度与太阳活动强度反相关，工程中常用ISO 15390模型计算一定磁场和材料屏蔽后的银河宇宙线性能量传输 (LET) 能谱，用于单粒子效应的评估。根据ECSS-E-ST-10-04C标准^[46]，无需考虑银河宇宙线强度随与太阳距离变化的影响。

6.4 辐射效应

高能粒子与航天器相互作用可产生多种辐射效应，包括：电离总剂量效应、内部充放电效应、位移损伤效应、单粒子效应等。这些效应可对电子元器件、太阳能电池、材料等产生破坏。此外，高能粒子可以和光学载荷相互作用，产生虚假的无法和光学信号分辨的背景信号。以Galileo为例，在轨期间，其共经

历了20次在轨异常^[47]，实际所受总剂量超过设计值3倍，星敏感器任务期内噪音持续增高，任务末期经历了光学相机失效、电源总线漏电、系统重启等事故。

相对而言，木星探测中最难以防护的效应为总剂量效应和内部充放电效应。对于总剂量效应，对比不同木星探测任务及地球GEO轨道卫星的总剂量指标^[48]，如图13所示。木星任务所受总剂量水平显著大于地球轨道，尤其是未来聚焦木星内磁层卫星的探测，总剂量指标进一步提高，以JUICE任务为例，总剂量指标为地球GEO轨道卫星的50倍，因此总剂量防护设计非常重要。另外，定量计算了木星Europa轨道和地球GEO轨道平均状态总剂量指标，在2mm Al屏蔽下分别为 $1.3 \times 10^4 \text{ krad(Si)/a}$ 和 $1.7 \times 10^2 \text{ krad(Si)/a}$ 。

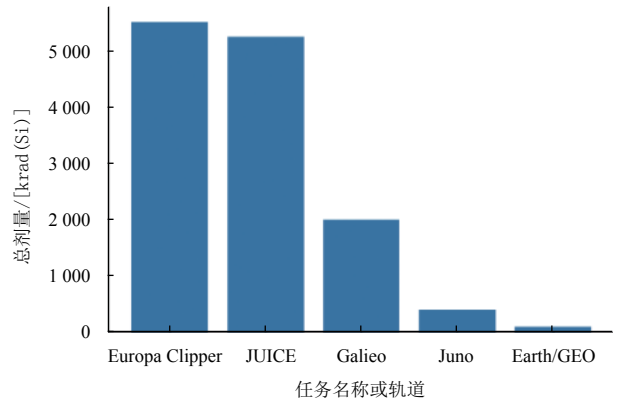


图13 不同木星探测任务的总剂量设计指标 (RDM=2)

Fig. 13 TIDs of all Jupiter missions (RDM=2)

针对木星探测总剂量效应的防护，NASA利用辐射屏蔽盒防护辐射敏感或关键的单机及元器件，ESA改进了原有总剂量评估工具SHIELDOSE2，构建的SHIELDOSE-2Q可评估更高能粒子通过多种屏蔽材料后在吸收体中沉积的剂量。此外，ESA还基于遗传算法构建了屏蔽优化工具GARSO，开发了高能电子输运仿真模型ELSHIELD用于屏蔽模型的评估，研制了轻量化辐射监测仪器RADEM^[49]。

此外，内部充放电效应也应重点关注，高能电子穿透航天器表层沉积到电缆、电路板或其他绝缘介质中，聚集的静电如超过阈值将引发内部放电并产生电磁干扰。木星轨道高能电子 ($> 2 \text{ MeV}$) 通量远大于地球轨道，1979年3月“旅行者号” (Voyager) 飞掠木星期间，24 h内就经历了42次内部放电引起的异常^[50]。针对内部充放电效应的评估，近年来发展了一系列仿真方法，如NASA的AF-NUMIT2^[51]和3-D NUMIT^[52]。在

木星探测中,应重点关注低温环境及大倾角/大偏心率轨道的内部充放电效应。此外,利用AF-NUMIT2工具定量计算了Fr4电路板在木星Europa轨道和地球GEO轨道的内部充电情况,在2 mm Al屏蔽下其充电电场分别可达到 2.1×10^4 V/cm和 8.5×10^2 V/cm。

对于单粒子效应,NASA的HIC模型结果显示捕获离子的能量小于50 MeV/Nuc,适当的屏蔽即可阻止其进入探测器内部,木星探测中单粒子效应防护重点应是银河宇宙线中的高能离子和木星辐射带中的高能质子,前者与地球相似,后者能量及通量均远大于地球轨道。

为了应对木星系的恶劣辐射,常将关键单机或元器件放入屏蔽盒中进行防护。其中,Galileo采用1 cm厚的钽质矩形屏蔽盒^[47];Juno采用1 cm厚的钛制屏蔽盒,重量达到180 kg^[6];在Europa Clipper中,屏蔽盒面板由铝和钛组成^[53],在屏蔽盒结构设计中,需要考虑可装配性、可扩展性、装配质量等多方面的要求。此外,在质量、机械强度、导电性能相当的前提下,多层金属材料的防护效果优于单一铝材料^[54],通过材料的优化设计及开展金属界面连接工艺研究,支撑中国未来深空探测(尤其是木星系探测)任务的实施。此外,屏蔽盒中的布局设计应以辐射效应为主要考虑因素,结合辐射环境模型、三维总剂量仿真方法、装配算法、遗传算法等,可得到最优的屏蔽盒布局设计方案^[55],即在屏蔽盒中所有单机任务期间都不因辐射而失效的前提下,屏蔽盒质量最小,从而最大化地为航天器减重。

7 微流星体

木星轨道微流星体主要来源包括:撞击卫星产生的喷发物、卫星羽流、木星尘埃环、尘埃环与卫星的相互作用。其中,木星尘埃环包括主环、晕环、Gossamer环3部分,广泛分布着由硅酸盐或碳质材料组成的 μm 级尘埃颗粒。针对行星际微流星体和木星系微流星体,ESA分别开发了IMEM模型和JMEM模型。

航天器与微流星体碰撞产生的损伤取决于撞击粒子的大小、密度、速度、方向。亚毫米颗粒撞击会造成航天器外表面的点蚀和凹坑并引发光学、电学、热学、密封或其它性能的退化,较大的颗粒会刺穿外表面,并可能通过穿透和剥落对结构或设备造成损坏。

IMEM模型和JMEM模型的输出结果如图14所示,

模型输出大于一定质量微流星体撞击随机翻滚平板(2π 视角)的通量。在IMEM模型中, μm 级尘埃通量来自Galileo、“尤利西斯号”(Ulysses)、“卡西尼号”(Cassini)的测量结果,直径更大的尘埃通量则来自仿真,因此该模型包含了较大的不确定性,故在结果中包含了3倍的安全系数,大于 10^{-5} g的尘埃粒子的平均撞击速度约为17 km/s;在JMEM模型中,微流星体主要来自卫星的喷发物,其结果由Galileo尘埃探测器的实测数据进行了验证,尘埃粒子平均撞击速度为4 km/s。此外,微流星体的密度范围为 $0.15 \sim 8.0$ g/cm³,航天器设计中可取 2.5 g/cm³。

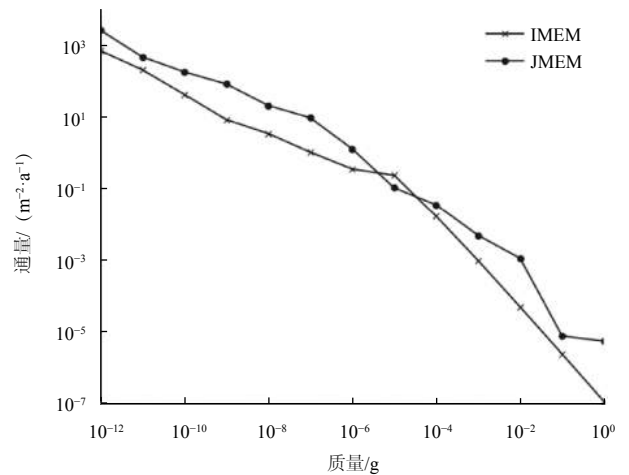


图14 木星轨道微流星体通量分布

Fig. 14 The distribution of meteoroid fluence in Jovian system

在航天器设计中,由微流星体产生的损伤需根据屏蔽、损伤标准、可靠性指标等进行定量评估,常用损伤方程进行评估

$$t = k_m m^{0.352} \rho^{0.167} v^{0.875}$$

其中: t 为金属板穿透的阈值厚度,单位cm,表示给定撞击粒子参数和破坏模式的屏蔽阈值; k_m 为材料特征参数,对铝材料取0.55; m 、 ρ 、 v 分别为微粒的质量、密度、撞击的法向速度分量。对于特定微流星体,当对应的 t 超过屏蔽厚度时将发生击穿。

8 结束语

在木星系探测中,针对未知环境要素进行设计是任务的重要难点之一,尤其是木星系内强磁场、强辐射、低温、低光照的环境特点为未来任务的成功实施提出了巨大挑战。本文系统分析了木星系内7种环境要素的特点,包括:重力场、磁场、电磁辐射、大气层/

外逸层、等离子体、高能粒子、微流星体。另外,探讨了木星系环境新特点对任务设计的影响。

木星的超强磁场(比地球大20倍)俘获了超高通量和能量(比地球大2个数量级)的高能带电粒子,这些高能粒子产生的多种辐射效应(如总剂量、内部充放电、单粒子、位移损伤等)是木星系任务设计的主要难点之一,对此,要创新性地发展精细化设计及优化设计方法,使用屏蔽盒对关键单机进行充分防护。

木星及其卫星的重力场直接关系任务的轨道设计,尤其在木星卫星重力场探测较少的限制下,根据现有低阶场推导高阶强场和弱场模型,用于轨道及其控制的冗余设计。在磁场方面,木星强磁场可在旋转导体中产生涡流,此外,木星卫星磁场与木星磁场高度耦合,但其模型发展还不完善。对于电磁辐射,除太阳辐射外,还需重点关注木星反射电磁辐射及其自身产生的红外辐射。此外,木星卫星反射光谱是研究其表面特性的重要手段。木星卫星大气稀薄但成分复杂,是磁层高能粒子和卫星表面相互作用的结果,应重点关注原子氧对探测器设计的影响。在等离子体方面,木星超强的极光等离子体可产生较强的表面充放电效应。木星系微流星体来源复杂且空间分布广泛,尤其在木星环及木星卫星附近,微流星体与航天器相互碰撞可能导致表面性能退化甚至击穿的风险,但目前相关微流星体模型还不完善,在设计中应充分做好冗余设计。

参 考 文 献

- [1] KIVELSON M G, KHURANA K K, RUSSELL C T, et al. Galileo Magnetometer measurements: a stronger case for a subsurface ocean at Europa[J]. *Science*, 2000, 289(5483): 1340-1343.
- [2] 王建昭, 张庆祥, 田岱, 等. 木星系粒子辐射环境效应及防护关键技术[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(5): 500-510.
WANG J Z, ZHANG Q X, TIAN D, et al. Radiation environmental effects of Jovian system and key technologies of radiation protection[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(5): 500-510.
- [3] SCHUBERT G, SODERLUND K M. Planetary magnetic fields: observations and models[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 187(1): 92-108.
- [4] BAGENAL F, ADRIANI A, ALLEGRINI F, et al. Magnetospheric science objectives of the Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 213(1): 219-287.
- [5] WANG J Z, ZHANG Q X, ZHENG Y Z, et al. TID and internal charging evaluation for Jupiter orbiting mission[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(2): 557-566.
- [6] KAYALI S, MCALPINE W, BECKER H, et al. Juno radiation design and implementation [C]// *IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA: IEEE*, 2012: 1-7.
- [7] 陈诗雨, 杨洪伟, 宝音贺西. 木星系探测及行星穿越任务轨迹初步设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(2): 189-194.
CHEN S Y, YANG H W, BAOYIN H X. Preliminary design for the trajectories of Jovian and planetary mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2): 189-194.
- [8] 王文强, 杨洪东, 杨广, 等. 太阳能电池阵深空探测适应性设计概论[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(1): 41-46.
WANG W Q, YANG H D, YANG G, et al. Solar cell array design for deep space exploration missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 41-46.
- [9] 周成, 吴延龙, 魏延明, 等. 空间核电推进系统比质量优化建模及其木星探测应用分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(4): 361-366.
ZHOU C, WU Y L, WEI Y M, et al. Specific mass optimization modeling of space nuclear electric propulsion system for Jupiter exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 361-366.
- [10] O'NEIL W J, AUSMAN N E, GLEASON J A, et al. Project Galileo at Jupiter[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 40(2): 477-509.
- [11] BOLTON S J, LUNINE J, STEVENSON D, et al. The Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 213(1): 5-37.
- [12] GRASSET O, DOUGHERTY M K, COUSTENIS A, et al. Jupiter ICy moons Explorer (JUICE): an ESA mission to orbit Ganymede and to characterize the Jupiter system[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 78(1): 1-21.
- [13] BAYER T, BITTNER M, BUFFINGTON B, et al. Europa clipper mission: preliminary design report [C] // *IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA: IEEE*, 2019: 1-24.
- [14] LESS L, FOLKNER W M, DURANTE D, et al. Measurement of Jupiter's asymmetric gravity field[J]. *Nature*, 2018, 555(1): 220-222.
- [15] BERTOTTI B, FARINELLA P, VOKROUHLICKY D. *Physics of the Solar System* [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.
- [16] CAPPUCCIO P, HICKEY A, DURANTE, et al. Ganymede's gravity, tides and rotational state from JUICE's 3GM experiment simulation[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 187: 104902.
- [17] BAGENAL F, DOLS V. The space environment of Io and Europa[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2020, 125(5): e2019JA027485.
- [18] COWLEY S W, NICHOLS J D, BUNCE E J. Distributions of current and auroral precipitation in Jupiter's middle magnetosphere computed from steady-state hill-pontius angular velocity profiles: solutions for current sheet and dipole magnetic field models[J]. *Planetary and Space*

- Science, 2002, 50(7): 717-734.
- [19] JOY S P, KIVELSON M G, WALKER R J, et al. Probabilistic models of the Jovian magnetopause and bow shock locations[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2002, 107(A10): SMP49717-1-SMP.
- [20] WANG J, HUO Z, ZHANG L. A modular model of Jupiter's magnetospheric magnetic field based on Juno data[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2021, 126: e2020JA029085.
- [21] CONNERNEY J E, KOTSIAROS S, OLIVERSEN R J, et al. A new model of Jupiter's magnetic field from Juno's first nine orbits[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 4702590-2596.
- [22] MOORE K M, YADAV R K, KULOWSKI L, et al. A complex dynamo inferred from the hemispheric dichotomy of Jupiter's magnetic field[J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 76-78.
- [23] CONNERNEY J E, ACUNA M H, NESS N F. Modeling the Jovian current sheet and inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 1981, 86(A10): 8370-8384.
- [24] CONNERNEY J E, TIMMINS S, HERCEG M, et al. A Jovian magnetodisc model for the Juno era[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2020, 125(10): e2020JA028138.
- [25] TRUSCOTT P, HEYNDERICK D, SICARD-PIET A, et al. Simulation of the radiation environment near Europa using the Geant4-based PLANETOCOSMICS-J model[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(6): 2776-2784.
- [26] SHOWMAN A P, MALHOTRA R. The Galilean satellites[J]. *Science*, 1999, 286(5437): 77-84.
- [27] KOTSIAROS S, CONNERNEY J E, MARTOS Y M. Analysis of eddy current generation on the Juno spacecraft in Jupiter's magnetosphere[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(7): e2019EA001061.
- [28] CONNERNEY J E, BENN M, BJARNO J B, et al. The Juno magnetic field investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 213(1): 39-138.
- [29] BAGENAL F, DOWLING T E, MCKINNON W B. Jupiter: the planet, satellites and magnetosphere [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 689-698.
- [30] SPENCER J R, TAMPPARI L K, MARTIN T Z, et al. Temperatures on Europa from Galileo photopolarimeter-radiometer: nighttime thermal anomalies[J]. *Science*, 1999, 284: 1514-1516.
- [31] SQUYRES S W, VEVERKA J. Color photometry of surface features on Ganymede and Callisto[J]. *Icarus*, 1982, 52(1): 117-125.
- [32] EVIATAR A, VASYLIUNAS V M, GURNETT D A. The ionosphere of Ganymede[J]. *Planetary and Space Science*, 2001, 49(3): 327-336.
- [33] MARCONI M L. A kinetic model of Ganymede's atmosphere[J]. *Icarus*, 2007, 190(1): 155-174.
- [34] DIVINE N, GARRETT H B. Charged particle distribution in Jupiter's magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 1983, 88(A9): 6889-6903.
- [35] MAUK B H, WILLIAMS D J, MCENTIRE R W. Energy-time dispersed charged particle signatures of dynamic injections in Jupiter's inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(23): 2949-2952.
- [36] MAUK B H, WILLIAMS D J, MCENTIRE R W, et al. Storm-like dynamics in Jupiter's inner and middle magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 1999, 104(A10): 22759-22778.
- [37] WILLIAMS D J, MAUK B H, MCENTIRE R W. Trapped electrons in Ganymede's magnetic field[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(23): 2953-2956.
- [38] GARRETT H B, EVANS R W, WHITTLESEY A C, et al. Modeling of the Jovian auroral environment and its effects on spacecraft charging[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 2008, 36(5): 2440-2449.
- [39] SANTACRUZ M, GARRETT H B, EVANS R W, et al. An empirical model of the high-energy electron environment at Jupiter[J]. *J Geophys Res:Space Phys*, 2016, 121(10): 9732-9743.
- [40] SICARD-PIET A, BOURDARIE S, KRUPP N. JOSE: a new Jovian specification environment model[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(3): 923-931.
- [41] SICARD-PIET A, BOURDARIE S, KRUPP N. Physical electron belt model from Jupiter's surface to the orbit of Europa[J]. *J Geophys Res:Space Phys*, 2004, 109(A02216): 1-13.
- [42] 王建昭, 田岱, 张庆祥, 等. 木星环绕探测任务中的内带电风险评估[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 264-570.
- WANG J Z, TIAN D, ZHANG Q X, et al. Internal charging evaluation in Jupiter exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 264-570.
- [43] PARANICAS C, MAUK B H, KHURANA K, et al. Europa's near-surface radiation environment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(L15103): 1-5.
- [44] GARRETT H, JUN I, EVANS R, et al. The latest Jovian-trapped proton and heavy ion models[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(11): 2802-2813.
- [45] JIGGENS P, HEYNDERICKX D, SANDBERG P, et al. Updated model of the solar energetic proton environment in space[J]. *Space Weather Space Climate*, 2018, 8(A31): 1-22.
- [46] ESA Requirements and Standards Division. ECSS-E-ST-10-04C, Space environment standard[S]. Netherlands: ESA, 2008.
- [47] FIESELER P D, ARDALAN S M, FREDERICKSON A R. The radiation effects on Galileo spacecraft systems at Jupiter[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 1791-1815.
- [48] SANTACRUZ M, GARRETT H B, EVANS R W, et al. The GIRE2 model and its application to the Europa mission [C]// *IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, Montana, USA: IEEE, 2016.

- [49] PINTO M, GONCALVES P, MARQUES A, et al. Development of a directionality detector for RADEM, the radiation hard electron monitor aboard the JUICE mission[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(7): 1770-1777.
- [50] LEUNG P, WHITTLESEY A C, GARRETT H B, et al. Environment-induced electrostatic discharges as the cause of voyager 1 power-on resets[J]. *J Spacecraft and Rockets*, 1986, 23(3): 323-330.
- [51] BEECKEN B P, ENGLUND J T, LAKE J J, et al. Application of AF-NUMIT2 to the modeling of deep dielectric spacecraft charging in the space environment[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2015, 43(9): 2817-2827.
- [52] KIM W, CHINN J Z, KATZ I, et al. 3-D NUMIT: a general 3-D internal charging code[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(8): 2298-2302.
- [53] SPAULDING M, EREMENKO A. Europa Clipper vault shielding optimization approach [C] // IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [54] 王建昭, 马继楠, 张庆祥, 等. 木星系探测中多层材料的辐射屏蔽优化设计方法[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 601-606.
- WANG J Z, MA J N, ZHANG Q X, et al. Optimization design of radioprotection by multilayer materials in Jovian system exploration missions[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 601-606.
- [55] WANG J Z, MA J N, QIU J W, et al. Optimization design of radiation vault in Jupiter orbiting mission[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(10): 2179-2187.

作者简介:

王建昭(1989-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 航天器总体设计、行星磁场与辐射环境建模。

通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话: 18610386802

E-mail: wangjianzhao@qxslab.cn

邱家稳(1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 真空技术与空间防护表面工程技术。

通讯地址: 中国空间技术研究员遥感卫星总体部(100094)

E-mail: qiujiu@mail@gmail.com

Study on Environmental Characteristics of Jovian System and Spacecraft Protection Design

WANG Jianzhao¹, QIU Jiawen², HUO Zhuoxi¹

(1. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. Institute of Remote Sensing Satellite, CAST, Beijing 100094, China)

Abstract: The Jovian system exploration is an important field of deep space exploration in China for the future. Environments in Jupiter's system are very complex and the exploration of them is an important scientific goal. Besides that, such rigorous space environment is also a demanding factor for mission design. In this study, the characteristics and research progress of gravity field, magnetic field, atmosphere/exosphere, electromagnetic radiation, high-energy particle radiation, plasma, and meteoroids in Jupiter's system are analyzed. The gravity field model is an important basis for the design of the orbit and propulsion subsystem and the redundant model needs to be built. Jovian strong magnetic field constraints the design of sensitive electromagnetic equipment in control subsystem. The main sources of electromagnetic radiation in Jupiter's orbit include solar radiation, Jupiter/Satellite reflection radiation, and Jupiter infrared radiation. The exospheres of Jupiter's moons are thin but include different kinds of atoms. The flux of plasma and high-energy particles in Jupiter's orbit is much higher than that in Earth's orbit. They can produce a variety of radiation effects. Among these the focus of protection is total dose and internal charging. The sources of meteoroids include interplanetary and Jovian system. The risk of surface degradation or breakdown caused by collision between meteoroids and spacecraft should be avoided.

Keywords: Jupiter system; spacecraft; space environment

Highlights:

- Seven aspects of environments in Jovian system are analyzed.
- The influences of these environments on spacecraft design are discussed.
- These results can be initially served as the constraints for mission design.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 刘勇]