

木星不规则卫星区域内的尘埃轨道动力学演化特性

叶安琪^{1,2}, 蔡梓哲^{1,2}, 陈正涵^{1,2}, 刘晓东^{1,2}

(1. 中山大学·深圳 航空航天学院, 深圳 518107; 2. 中山大学·深圳 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 深圳 518107)

摘要: 木星的不规则卫星在行星际流星体的撞击下, 表面会喷发出大量的尘埃粒子。考虑多种摄动力并存的复杂木星系空间环境, 采用解析法和数值仿真法相结合的方式, 研究了起源于木星系不规则卫星的尘埃粒子在木星不规则卫星区域的轨道动力学演化特性。通过对描述尘埃长期运动演化的轨道平均模型中有效哈密顿守恒量及相图进行分析, 可以得到源于顺行卫星的尘埃更多分布在远离太阳的一侧, 而源于逆行卫星的尘埃则更多分布在朝向太阳的一侧。对尘埃演化的长期数值仿真可以发现, 源于顺行卫星的尘埃轨道比逆行卫星的尘埃轨道更为稳定, 并且较大的尘埃颗粒的轨道稳定性更高。

关键词: 轨道动力学; 深空探测; 不规则卫星; 木星探测; 尘埃动力学

中图分类号: P185.8

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)01-0090-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230096

引用格式: 叶安琪, 蔡梓哲, 陈正涵, 等. 木星不规则卫星区域内的尘埃轨道动力学演化特性[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(1): 90-99.

Reference format: YE A Q, CAI Z Z, CHEN Z H, et al. Orbital dynamics of dust particles in the region of the Jovian irregular moons[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(1): 90-99.

引言

迄今为止, 已知木星具有95颗卫星, 包括8颗规则卫星与87颗不规则卫星, 其中木星的规则卫星是指具有距离木星较近的顺行轨道, 并且具有较小的轨道倾角和偏心率的天然卫星, 包括4颗内圈卫星与4颗伽利略卫星。木星的不规则卫星是指尺寸较小, 并且具有较远的木心距离、较大的轨道倾角和偏心率的卫星^[1]。不同于规则卫星是原生的, 不规则卫星通常被认为是木星引力场捕捉到的小行星碰撞而成^[2]。

这些木星卫星是木星系统中存在的大量尘埃粒子的起源母体。木星系统中的尘埃主要包括以下组成部分^[3]: ①木星尘埃环, 包括主环、Halo环, 以及两个薄纱环(其中外侧的薄纱环有延伸结构), 主要由4颗内圈规则卫星受行星际流星体撞击后喷出; ②由4颗伽利略规则卫星受行星际流星体撞击后喷射产生的尘埃; ③木卫一(伽利略规则卫星)火山喷发产生的高速尘埃流; ④伴随木卫二(伽利略规则卫星)的羽流喷泉喷射出的尘埃; ⑤由木星的不规则卫星受行星际流星体撞击后溅射并逃逸的尘埃。木星系尘埃携带了母体卫星的形成、动力学演化等信息, 具有重要的研究意义。木星系尘埃可以通过航天器搭载的尘埃载荷进行

探测, 其中对于尘埃分布密度较高的木星环, 也可以通过航天器搭载的相机, 以及地面和空间望远镜进行探测。

本文主要关注由木星的不规则卫星受行星际流星体撞击后产生的尘埃。木星的不规则卫星主要分为4个族群, 分别是Himalia群、Ananke群、Carme群和Pasiphae群。根据环绕木星运行的不同轨道倾角又可分为顺行卫星和逆行卫星, 其中顺行卫星为轨道倾角小于 90° 的卫星, 逆行卫星为轨道倾角大于 90° 的卫星。在木星的不规则卫星族群中, Himalia群是顺行卫星族群, Ananke群、Carme群和Pasiphae群都是逆行卫星族群。除了上述4个族群外, 木星的不规则卫星还有3个被认为是孤立状态的顺行卫星Themisto、Valetudo和Carpo。木星不规则卫星的轨道分布如图1所示, 图中横轴为不规则卫星轨道半长轴, 单位为木星半径 R_J (71 492 km), 纵轴为卫星的轨道倾角, 单位为角度。这些卫星在行星际流星体的撞击下, 表面会喷发出尘埃粒子。迄今为止, 木星系尘埃的动力学研究大部分集中于木星尘埃环, 而对不规则卫星尘埃的研究相对较少。2002年, Krivov等^[4]证明了木星的不规则卫星是“伽利略号”(Galilei)尘埃探测器在距离木星约50~300个木星半径的区域探测到的尘埃的主要来源母

收稿日期: 2023-06-21 修回日期: 2023-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(12002397, 12311530055, 62388101), 深圳市科技计划(ZDSYS20210623091808026)

体。2013年, Bottke等^[5]研究了木星的不规则卫星相互碰撞之后产生的碎片在Poynting-Robertson拖曳力的作用下往内迁移并沉降到伽利略卫星上的过程。

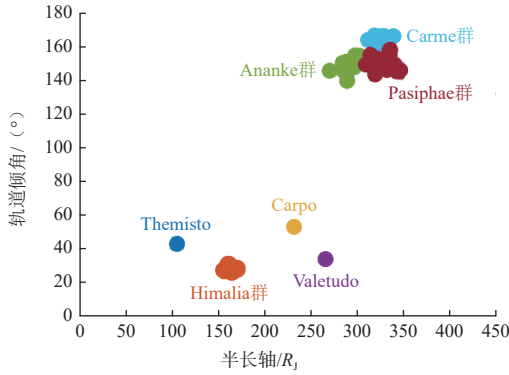


图1 木星的不规则卫星的分布

Fig. 1 Distribution of Jupiter's irregular moons

本文工作结合了国内外木星探测的背景, 对起源于木星系不规则卫星的尘埃进行了动力学建模。通过解析法对尘埃运动的守恒量及相图进行分析, 得到了尘埃运动在轨道平均模型下的演化规律。同时, 建立了木星的不规则卫星尘埃的动力学仿真模型, 对尘埃的迁移进行数值模拟, 得到尘埃的轨道根数 (orbital elements) 演化规律。

1 尘埃动力学建模

起源于木星系不规则卫星的尘埃会受到多个摄动力的影响, 其中包括木星的 J_2 项、太阳引力、伽利略卫星引力、太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力、电磁力和等离子体拖曳力等, 尘埃的动力学方程表示为

$$\ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{r}}_G + \ddot{\mathbf{r}}_{SP} + \ddot{\mathbf{r}}_L + \ddot{\mathbf{r}}_{PL} \quad (1)$$

其中: \mathbf{r} 表示尘埃粒子在木星赤道惯性坐标系中的位置向量; $\ddot{\mathbf{r}}_G$ 表示天体引力引起的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_{SP}$ 表示太阳光压引起的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_L$ 为尘埃所受电磁力引起的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_{PL}$ 为等离子体拖曳力引起的加速度。

尘埃受到的引力摄动包括木星的 J_2 项、太阳引力和四颗伽利略卫星引力。即

$$\ddot{\mathbf{r}}_G = \ddot{\mathbf{r}}_{GJ} + \ddot{\mathbf{r}}_{GS} + \ddot{\mathbf{r}}_{Galilean} \quad (2)$$

木星引力引起的加速度表示为

$$\ddot{\mathbf{r}}_{GJ} = -\frac{GM_J}{|\mathbf{r}|^5} \left\{ \left[|\mathbf{r}|^2 - \frac{3}{2} J_2 R_J^2 (5 \sin^2 \delta - 1) \right] \mathbf{r} + 3 J_2 R_J^2 r_z \hat{\mathbf{e}}_z \right\} \quad (3)$$

其中: G 为万有引力常数; M_J 为木星的质量; R_J 为木星半径; J_2 为二阶带谐项系数; δ 表示尘埃的赤纬并且

满足 $\sin \delta = \frac{r_z}{|\mathbf{r}|}$; $\hat{\mathbf{e}}_z$ 为指向木星自转轴的单位矢量。

太阳引力加速度可以描述为

$$\ddot{\mathbf{r}}_{GS} = -Gm_s \left(\frac{\mathbf{r}_{ds}}{|\mathbf{r}_{ds}|^3} + \frac{\mathbf{r}_s}{|\mathbf{r}_s|^3} \right) \quad (4)$$

其中: m_s 为太阳的质量; \mathbf{r}_{ds} 为从太阳指向尘埃粒子的相对位置矢量; \mathbf{r}_s 为从木星指向太阳的位置矢量。

伽利略卫星的引力加速度可以表述为

$$\ddot{\mathbf{r}}_{Galilean} = \sum_{i=1}^4 Gm_{Gi} \left(\frac{\mathbf{r}_{dGi}}{|\mathbf{r}_{dGi}|^3} - \frac{\mathbf{r}_{Gi}}{|\mathbf{r}_{Gi}|^3} \right) \quad (5)$$

其中: $i = 1 \sim 4$ 分别对应木卫一到木卫四; m_{Gi} 为卫星的质量; \mathbf{r}_{dGi} 为从尘埃粒子指向卫星 i 的相对位置矢量; \mathbf{r}_{Gi} 为从木星指向卫星 i 的位置矢量。

太阳光压是一种辐射压力。Poynting-Robertson拖曳力则是太阳光压在沿着尘埃运动切向的分量。太阳光压和Poynting-Robertson拖曳力引起的加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{SP}$ 表示为^[6]

$$\ddot{\mathbf{r}}_{SP} = \frac{3Q_s Q_{pr} AU^2}{4(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)^2 \rho_g r_g c} \left\{ \left[1 - \frac{(\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_s) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{sd}}{c} \right] \hat{\mathbf{r}}_{sd} - \frac{(\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_s)}{c} \right\} \quad (6)$$

其中: Q_s 代表距离太阳一个天文单位 (AU) 处的太阳辐射能量通量; Q_{pr} 为太阳辐射压力效率系数, 其值与尘埃粒子的尺寸和材料相关; $\hat{\mathbf{r}}_{sd}$ 为入射光子束方向的单位矢量; \mathbf{r}_s 为从木星指向太阳的位置矢量; c 为光速。

来源于木星的不规则卫星的尘埃粒子在木星磁场中运动时会受到电磁力的作用。由电磁力引起的加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_L$ 描述为

$$\ddot{\mathbf{r}}_L = \frac{1}{m_g} \frac{Q}{c} (\mathbf{v}_{rel} \times \mathbf{B}) \quad (7)$$

其中: m_g 为尘埃粒子的质量; Q 为尘埃粒子所携带的电荷量, $Q = 4\pi\epsilon_0 r_g \varphi$; ϵ_0 为真空介电常数; r_g 为尘埃粒子半径; φ 为尘埃粒子表面电势; \mathbf{v}_{rel} 为考虑了木星的自转后尘埃粒子相对于木星磁场的运动速度; \mathbf{B} 为磁场强度, 本论文采用了VIPAL^[7]木星磁场模型。

目前, 木星系等离子体的全局分布模型主要有两个。首先是DG1模型^[8], 主要数据来源是“先驱者10号” (Pioneer 10)、“先驱者11号” (Pioneer 11)、“旅行者1号” (Voyager 1)和“旅行者2号” (Voyager 2) 航天器回传的探测数据。DG2模型^[9]在DG1的基础上加入了“旅行者号”探测器所回传的新数据以及后续木星探测器“伽利略号”所返回的探测数据, 是目前最新的木星全局等离子体分布模型。在DG2模型下的等离子体

拖曳力引起的加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{\text{PL}}$ 可以表示为

$$\ddot{\mathbf{r}}_{\text{PL}} = - \sum_{H=1}^{N_H} \frac{3\rho_H m_H |\mathbf{v}_{\text{gr}}|}{4\rho_g r_g} \mathbf{v}_{\text{gr}} \quad (8)$$

其中： N_H 为木星等离子体环境中金属重离子的种类数； ρ_H 为金属重离子的数密度； m_H 为金属重离子的质量； \mathbf{v}_{gr} 为尘埃粒子相对于等离子体的运动速度。

Hamilton和Krivov^[10]引入了描述上述摄动力强度的无量纲参数，这些参数的值主要取决于尘埃粒子到木星的距离和粒子尺寸，这些值有助于理解每个摄动力的相对量级大小。

2 尘埃运动的守恒量及相图分析

1996年，Hamilton等^[10]将尘埃在空间中的运动简化为平面二维问题，即忽略了木星绕太阳运动的轨道面、木星赤道面和尘埃运动平面之间的夹角，同时忽略了Poynting-Robertson拖曳力、等离子体拖曳力等耗散力作用，给出了适用于任意初始偏心率轨道的尘埃在不同摄动力下的轨道平均模型（orbit-averaged model）。从该模型中可推导出一个守恒量，其称之为“有效哈密顿量”（effective Hamiltonian）。利用该守恒量，可以解析地分析尘埃偏心率以及近心点方向的演化，从而进一步了解尘埃在空间中的分布情况。在本节中，将利用该轨道平均模型对起源于木星的不规则卫星的尘埃运动进行解析分析，探索该起源尘埃在空间中的分布情况。

值得注意的是，本节中的此方法是基于平面二维假设的轨道平均模型得出的，并且忽略了耗散力作用，可以对尘埃在木星不规则卫星区域的分布进行定性研究，并且有助于对本文第3节和第4节中的直接数值仿真的结果进行定性分析与解释。

2.1 尘埃的轨道平均模型及守恒量

考虑到尘埃在木星的不规则卫星区域中运动时，太阳引力和太阳光压为主要的摄动力，即太阳引起的摄动为主要摄动，为更方便地分析尘埃相对于太阳的分布情况，因此在此处引入太阳角 Φ_{sun} 的概念。如图2所示，太阳角指的是木星到尘埃粒子的近心点的连线和木星-太阳连线之间的夹角，其中 x 轴和 y 轴位于赤道平面内， x 轴指向J2000时刻木星春分点， y 轴垂直于 x 轴， O 为木星， P 为近地点。在平面二维问题中定义如下

$$\Phi_{\text{sun}} = \Omega + \omega - \lambda_{\text{sun}} \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{sun}} = n_{\text{sun}} t \quad (10)$$

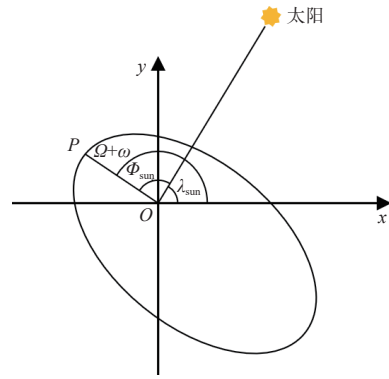


图2 太阳角示意图

Fig. 2 Sketch of solar angle

其中： Ω 和 ω 分别为尘埃轨道的升交点赤经和近心点幅角； λ_{sun} 为太阳的经度，随时间 t 线性变化； n_{sun} 为木星绕太阳的平均速度，各个角度如图2所示。

通过引入太阳角，并且将问题假设为平面二维问题，尘埃的轨道平均方程可以写成如下半正则形式^[10]

$$\frac{de}{d\lambda_{\text{sun}}} = - \frac{\sqrt{1-e^2}}{e} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \Phi_{\text{sun}}} \quad (11)$$

$$\frac{d\Phi_{\text{sun}}}{d\lambda_{\text{sun}}} = \frac{\sqrt{1-e^2}}{e} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial e} \quad (12)$$

其中： \mathcal{H} 为简化的轨道平均模型下存在的守恒量，也就是有效哈密顿量； e 为偏心率。在本节，首先近似地只考虑主要摄动力，即太阳引力和太阳光压。在引入太阳角之前，太阳光压和太阳引力作用下的轨道平均方程可分别参见文献[11]和[12]。在引入太阳角之后，“有效哈密顿量” \mathcal{H} 的具体表达如下^[13]

$$\mathcal{H} = \sqrt{1-e^2} + C e \cos \Phi_{\text{sun}} + \frac{1}{2} A e^2 [1 + 5 \cos(2\Phi_{\text{sun}})] \quad (13)$$

其中， A 、 C 是无量纲常数，分别反映了太阳的引力与辐射压力的强度。

当尘埃粒子来源于逆行卫星时，由于轨道倾角的改变引起三角函数值的变化，有效哈密顿量 \mathcal{H} 的表达式则变为^[13]

$$\mathcal{H} = -\sqrt{1-e^2} + C e \cos \Phi_{\text{sun}} + \frac{1}{2} A e^2 [1 + 5 \cos(2\Phi_{\text{sun}})] \quad (14)$$

因此，根据有效哈密顿量守恒这一性质，通过式(13)和式(14)，可以得到任意给定初始偏心率 e 和初始太阳角 Φ_{sun} 的尘埃轨道随后的偏心率 e 和太阳角 Φ_{sun} 的演化。并可在 $(e \cos \Phi_{\text{sun}}, e \sin \Phi_{\text{sun}})$ 坐标下的相图绘制有效哈密顿量，对尘埃的偏心率和太阳角的演化进行直观分析，并进一步得到尘埃在空间中相对于太阳的分布情况。

在使用解析法得到尘埃守恒量及相图的同时, 我们同样只考虑主要摄动力太阳引力和太阳光压的作用, 对平均化之前的动力学方程进行了数值积分 (参见式 (4) 和 (6)), 得到了尘埃在空间中的运行轨迹, 转化为轨道根数后绘制在相平面 ($\text{ecos}\Phi_{\text{sun}}$, $\text{esin}\Phi_{\text{sun}}$) 内, 并将数值结果与解析解进行对比。

2.2 起源于顺行卫星的尘埃运动的相图分析

为了研究出发于木星顺行不规则卫星的尘埃运动规律, 本节选取了顺行卫星 Themisto 作为代表性母体卫星。图 3 描绘了仅考虑太阳光压和太阳引力条件下, 从顺行卫星 Themisto 喷出的不同尺寸尘埃 (半径分别为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$) 的相图。图中曲线 (等高线) 代表了不同偏心率 e 和太阳角 Φ_{sun} 初始条件下尘埃的偏心率及太阳角的演化, 等高线上的数值为哈密顿守恒量的值, 黄色的圆点代表相同条件下使用数值仿真得到的结果。

观察图 3 中 $2\ \mu\text{m}$ 尘埃的相轨迹可以发现, 在轨道平均模型下, 出发于顺行卫星 Themisto 的尘埃轨迹在当太阳角 $\Phi_{\text{sun}} = 0$ 的时候, 偏心率 e 达到最大值。尘埃运动轨道的近地点 r_p 与远地点 r_a 可以表示为

$$r_p = a(1 - e) \quad (15)$$

$$r_a = a(1 + e) \quad (16)$$

轨道半长轴 a 不变的情况下, 当偏心率 e 达到最大值时, 近地点 r_p 达到最小值, 远地点 r_a 达到最大值。因此, 尘埃在太阳角 $\Phi_{\text{sun}} = 0$ 时偏心率达到最大值意味着尘埃轨迹是在太阳-木星方向被拉长, 并朝着远离太阳的方向分布。

对比图 3 中不同尺寸的尘埃粒子所画出的相图可以看出, 尘埃的尺寸越小, 尘埃轨迹在太阳-木星方向被拉长且朝着远离太阳的方向分布的动力学特征越明显。这是因为尘埃轨道的最大偏心率 e_{max} 随着太阳光压参数 C 的增大而增大^[10], 即随着太阳辐射压力强度的增强而增大, 而尘埃半径 r_g 与太阳光压参数 C 成反比关系。也就是说, 当尘埃尺寸变小时, 尘埃受到的太阳辐射压力的摄动作用更大, 能达到更大的最大偏心率 e_{max} 。同时, 在相同半长轴 a 下, 有越大的偏心率 e 的尘埃更可能撞击木星或者逃离木星影响球, 这意味着小粒子的轨道更不稳定, 也更容易结束寿命。

2.3 起源于逆行卫星的尘埃运动的相图分析

为研究源于逆行卫星的尘埃轨道根数变化规律, 本节选取逆行卫星 Ananke 作为代表性母体卫星。与图 3 一样, 图 4 描绘了尘埃在仅考虑太阳光压及太阳引力

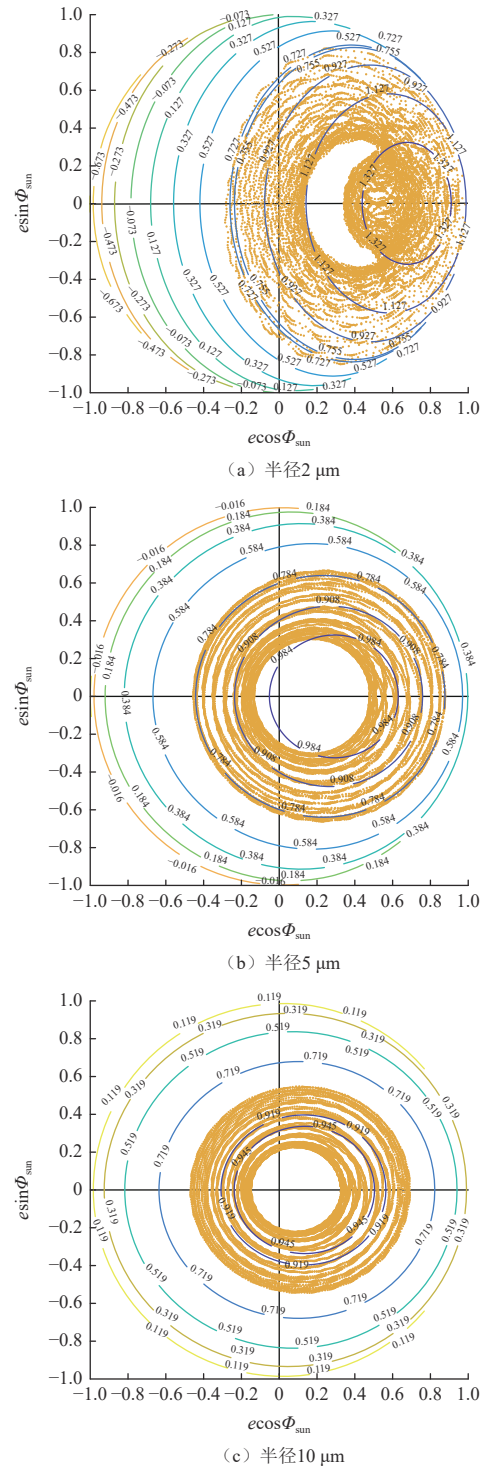


图 3 顺行卫星 Themisto 喷出的不同尺寸尘埃的相图
Fig. 3 Phase portraits of dust of different sizes ejected from the prograde moon Themisto

条件下不同尺寸尘埃 (半径分别为 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$) 的运动情况。图中曲线 (等高线) 代表了不同偏心率 e 和太阳角 Φ_{sun} 初始条件下尘埃的偏心率及太阳角的演化, 等高线上的数值为哈密顿守恒量的值, 黄色的圆点代表相同条件下使用数值仿真得到的结果。

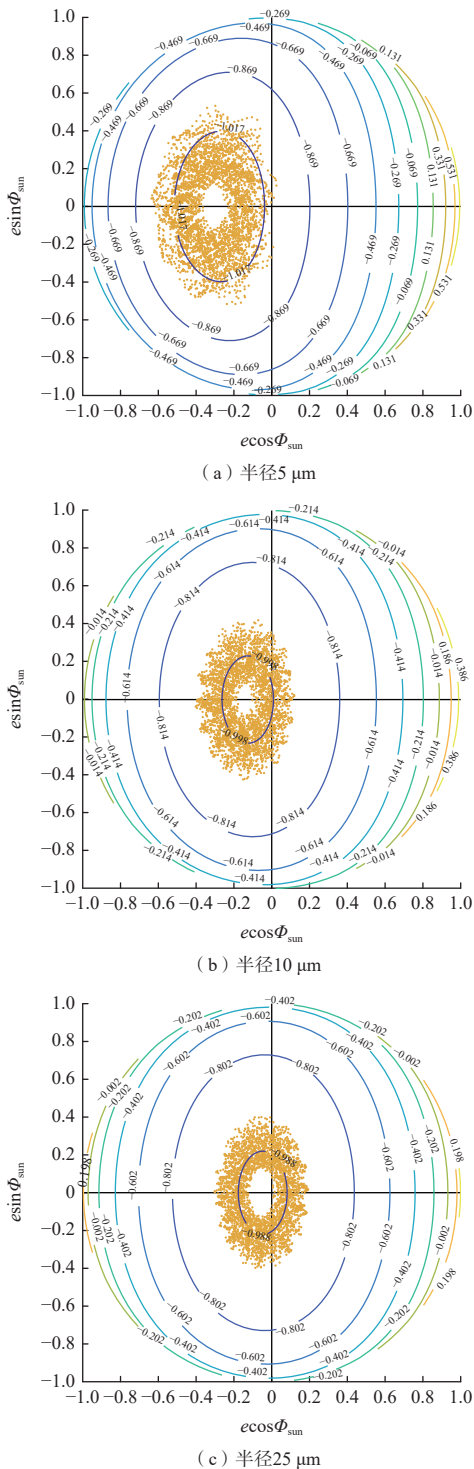


图4 逆行卫星Ananke喷出的不同尺寸尘埃的相图

Fig. 4 Phase portraits of dust of different sizes ejected from the retrograde moon Ananke

如图4所示, 来源于逆行卫星Ananke的尘埃粒子动力学特征如下: 当太阳角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时, 得到最大偏心率 e_{\max} 。因此, 尘埃粒子的轨迹在垂直于太阳-木星方向上被拉长, 并且当最大偏心率出现在太阳角靠近 180° 时, 其运动轨迹是朝着靠近太阳的方向分布的。

与出发于顺行卫星的尘埃粒子轨道演化规律相似的是, 尘埃尺寸越小, 受到的太阳光压越大, 尘埃的轨道越不稳定。

但与出发于顺行卫星的尘埃不同的是, 本节算例中尘埃粒子采用的最小半径为 $5 \mu\text{m}$ 。因为在上一节中, 源于顺行不规则卫星的半径为 $2 \mu\text{m}$ 的尘埃轨道运动较为稳定, 可以使用轨道平均法得到对应的尘埃守恒量及相图。而本节中源于逆行不规则卫星的同样半径为 $2 \mu\text{m}$ 的尘埃, 由于受到强烈的摄动影响, 会很快离开木星的引力影响球(Hill sphere), 以至于轨道平均法失效。由此可知, 出发于逆行卫星的尘埃轨道比出发于顺行卫星的尘埃轨道更不稳定。

3 太阳光压对逆行卫星尘埃轨道倾角的影响

在远离木星的不规则卫星区域, 太阳光压为重要的摄动力, 并且逆行卫星的轨道倾角较大。根据考虑太阳光压的轨道平均动力学模型^[6], 当倾角较大时, 倾角的时间变化率也较大, 因此太阳光压会对起源于逆行不规则卫星的尘埃的轨道倾角产生明显的影响。为了更具体更直观地得到太阳光压对起源于逆行卫星的尘埃轨道倾角的影响, 本节以轨道倾角作为研究对象, 以数值仿真的方法研究其他所有摄动力并存的条件下, 有无太阳光压对源于逆行卫星的尘埃轨道倾角的影响。

本节以起源于大轨道倾角的逆行卫星Carme(轨道倾角约为 165°)的尘埃粒子为例, 选取了 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 这3个相差较大的粒子半径, 使用数值仿真的方法, 模拟了尘埃颗粒在20个地球年内的运动, 得到的结果分别如图5~7所示。黑实线均代表20个地球年内尘埃颗粒受到所有摄动力作用下倾角的演化, 红虚线均代表尘埃颗粒受到除太阳光压以外所有摄动力的倾角演化情况。

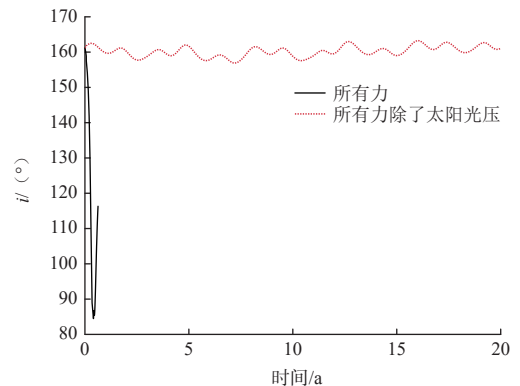


图5 太阳光压对 $0.1 \mu\text{m}$ 尘埃的轨道倾角的影响

Fig. 5 Influence of solar pressure on the orbital inclination of $0.1 \mu\text{m}$ dust

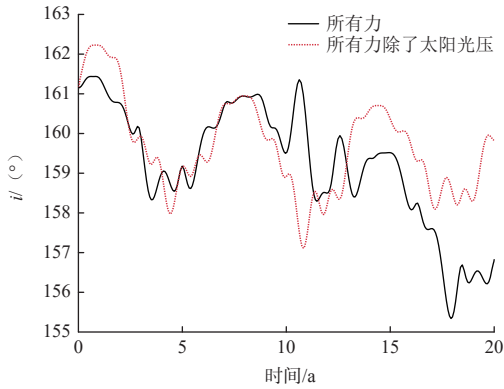


图6 太阳光压对5 μm尘埃的轨道倾角的影响

Fig. 6 Effect of solar radiation pressure on the orbital inclination of 5 μm dust

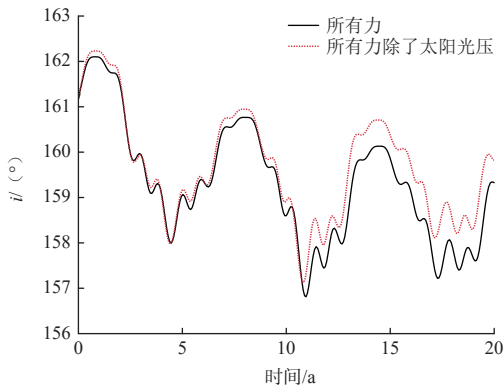


图7 太阳光压对25 μm尘埃的轨道倾角的影响

Fig. 7 Effect of solar radiation pressure on the orbital inclination of 25 μm dust

如图5所示, 在受到所有摄动力的情况下, 由于摄动力中包含太阳光压的作用影响, 源于逆行卫星 Carme (卫星轨道倾角约为 165°) 的半径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃颗粒会在3个地球年内很快地逃离木星影响球而消亡。对比之下, 受到除太阳光压以外所有摄动力的尘埃颗粒轨道倾角的演化较为平缓, 可以在这20地球年的时间尺度中存活下来。

把图5中的尘埃半径增大为 $5 \mu\text{m}$, 得到图6的结果, 会发现不管是否受到太阳光压的作用, 都可以在20个地球年间存活下来。但是, 从图6中黑色实线的走势上, 还是可以明显地看出受到所有摄动力的尘埃轨道倾角呈现明显的下降趋势, 而不受太阳光压作用的尘埃轨道倾角下降趋势不明显, 总体趋于平稳。

在图7中, 把从同一颗卫星起源的尘埃颗粒的半径从图6的 $5 \mu\text{m}$ 增大为 $25 \mu\text{m}$, 可以看出, 在这20个地球年间, 考虑所有摄动力作用的尘埃轨迹与考虑除太阳光压以外所有摄动力作用的尘埃轨迹非常接近。但是随着时间的推移, 两者的尘埃轨迹逐渐发生分离。

由以上3个不同尘埃尺寸的轨道倾角演化图可以看出, 太阳光压会对起源于逆行不规则卫星的尘埃的轨道倾角产生明显的影响。对比 $25 \mu\text{m}$ 的尘埃轨道倾角演化图(图7)与 $0.1 \mu\text{m}$ (图5)和 $5 \mu\text{m}$ (图6)的倾角演化图可以发现, 随着尘埃尺寸的增大, 太阳光压对尘埃粒子的轨道倾角的影响逐渐减小。在仅没有太阳光压影响, 其它力保持一致的情况下, 轨道倾角都是属于一个比较平稳的状态。

4 尘埃的轨道根数演化规律

本节通过对起源于木星的不规则卫星的尘埃动力学演化进行长期数值仿真, 研究在多种摄动力的作用下, 尘埃粒子在不规则卫星区域的动力学演化规律。

4.1 顺行卫星的尘埃轨道根数演化规律

对源于顺行卫星 Himalia 的尘埃进行数值仿真的结果如图8所示, 其中包括了半径为 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的尘埃粒子在1万个地球年间, 受到木星引力、太阳引力、伽利略卫星引力、太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力、电磁力和等离子体拖曳力在内的7种摄动力时, 轨道根数的演化情况。值得注意的是, 为方便展示, 图8(a)、8(b)和8(c)3幅图的横轴时间尺度为100个地球年。而半径为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的尘埃颗粒的寿命在1万个地球年后仍在轨运行, 这里展示了前1万个地球年的演化。

可以发现, 图8(a)的版面几乎为空白, 这是因为 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃半径很微小, 受到太阳光压摄动作用很强。所以, 在太阳光压的强烈摄动作用之下, 半径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃粒子被迅速驱离木星影响球而消亡, 寿命非常短。在图8(b)中, 尺寸较小的 $1 \mu\text{m}$ 的尘埃也因为受到的摄动力作用强, 所以轨道不稳定, 具体表现为运动了30几个地球年后尘埃轨道的半长轴锐减导致尘埃颗粒撞击木星而消亡。同样, 对于 $2 \mu\text{m}$ 的尘埃(图8(c))而言, 因为轨道不稳定, 在运动到接近20个地球年后轨道半长轴跳增, 尘埃粒子被驱离木星系空间而消亡。

由图8(d)和(e)可以看出, 对于半径为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的尘埃粒子来说, 它们可以在1万个地球年间生存下来, 而其半长轴因为受到Poynting-Robertson拖曳力的影响均有缓慢减小的趋势。而偏心率 e 和轨道倾角 i 在太阳光压的主导作用下表现出振荡行为, 振荡幅度主要与尘埃尺寸相关。对于偏心率 e , 尘埃尺寸越小, 太阳光压作用越明显, 偏心率 e 振荡也越明显。同样的, 尘埃尺寸越小, 太阳光压对轨道倾角 i 的扰动就越强。

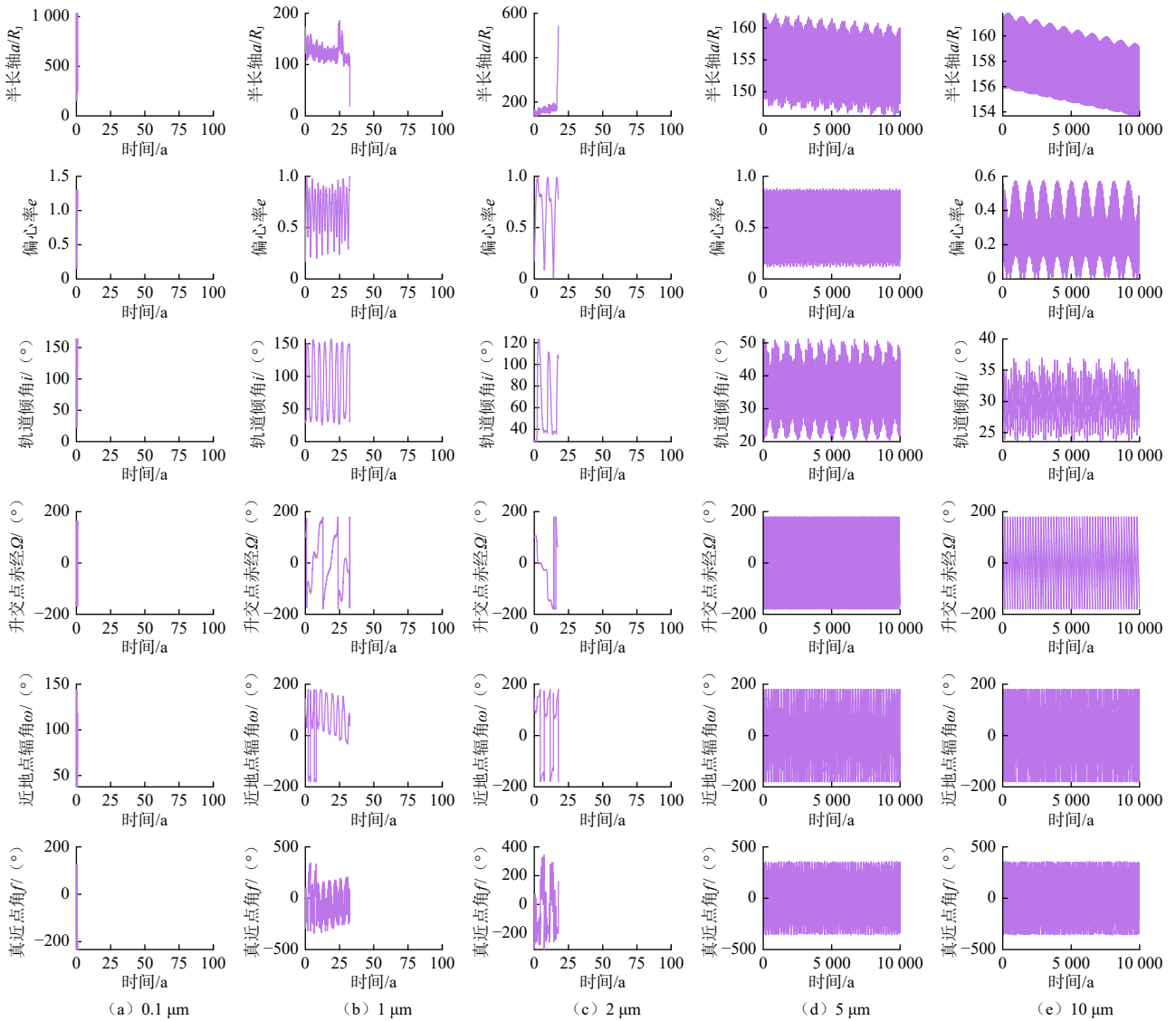


图8 源于顺行卫星Himalia不同尺寸尘埃的轨道根数演化

Fig. 8 Evolution of orbital elements of dust of different sizes from the prograde satellite Himalia

4.2 逆行卫星的尘埃轨道根数演化规律

本节以源于逆行卫星Ananke的尘埃为例, 计算得到不同尺寸尘埃粒子在受到木星引力、太阳引力、伽利略卫星引力、太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力、电磁力和等离子体拖曳力在内的7种摄动力时, 轨道根数的演化情况, 结果如图9所示。所有尘埃运动的数值模拟时间均为1万个地球年, 为了方便展示, 0.1 μm 、1 μm 和2 μm 半径的图例横坐标的跨度为100个地球年, 5 μm 和10 μm 的图例横坐标的跨度为1万个地球年。

与木星系中的顺行卫星不同, 逆行卫星的特点是离木星距离很远, 具有很大的偏心率和轨道倾角。在离行星较远的地方, 太阳引力和辐射压力的摄动作用更强^[10]。因此, 尘埃从逆行卫星上喷射出发后, 更容

易不稳定而导致消亡。因此, 代表半径为0.1 μm 、1 μm 和2 μm 的尘埃粒子的图9 (a)、(b)和(c) 3张图版面几乎为空白。因为这3个半径的尘埃颗粒从Ananke出发后, 很快就会逃离木星影响球, 而其中2 μm 的尘埃颗粒相对另外两个半径的尘埃较大, 所以运动了约5个地球年后才被驱离木星系。

在图9 (d)和图(e)图中, 半径为5 μm 和10 μm 的尘埃粒子都在10 000个地球年间稳定运行, 而其半长轴因为受到Poynting-Robertson拖曳力的影响均有缓慢减小的趋势。与4.1节类似, 由于太阳光压的主导摄动作用, 偏心率 e 和轨道倾角 i 表现出振荡行为。

5 结论

以往对木星系尘埃的研究多集中于木星环, 而对

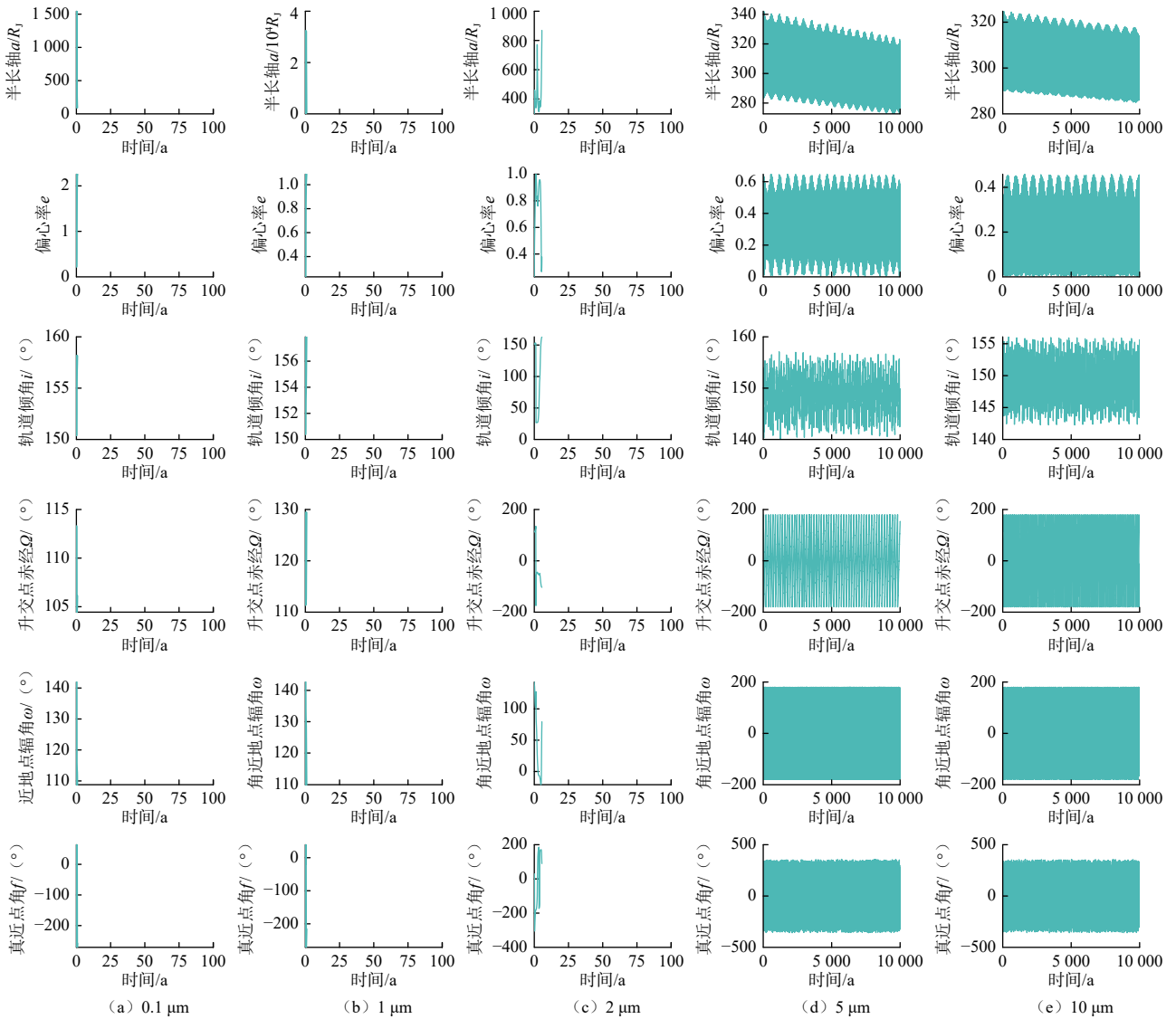


图 9 源于逆行卫星Ananke尘埃的不同尺寸尘埃轨道根数演化

Fig. 9 Evolution of orbital elements of dust of different sizes from the retrograde satellite Ananke

起源于不规则卫星的尘埃研究较少。本文主要使用解析法和数值法, 探索了起源于不同不规则卫星的不同尺寸的尘埃粒子在木星系空间内的运动规律和分布情况。

根据轨道平均模型中守恒量的表达式, 分别得到源于具有代表性的顺行卫星Themisto和逆行卫星Ananke的尘埃守恒量的相图。从相图中可以定性地理理解尘埃的轨道演化, 揭示起源于顺行和逆行卫星的尘埃具有不同的演化规律, 即源于顺行卫星的尘埃会在太阳角 $\Phi_{\text{sun}} = 0$ 的时候, 偏心率 e 达到最大值, 其轨迹沿着背离太阳的方向扩散; 而源于逆行卫星的尘埃则在 $90^\circ < \Phi_{\text{sun}} < 180^\circ$ 时, 偏心率 e 达到最大值, 其轨迹更多分布在朝向太阳的一侧。

利用数值仿真的方法, 分析得到了太阳光压对尘

埃轨道倾角的影响。可以发现, 尺寸越小的粒子受到太阳光压的作用越明显。特别的, 源于Carne的 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃轨道倾角在不考虑太阳光压时在初始值附近波动; 而在考虑太阳光压时则从 160° 左右变化到 80° 左右。对起源于顺行、逆行不规则卫星的尘埃粒子在多种摄动力并存的复杂木星空间环境中的运动进行数值仿真, 得到不同尺寸尘埃粒子的轨道根数的演化规律。综合考虑了木星引力、太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力、电磁力和等离子体拖曳力这7种摄动力, 研究了在1万个地球年间, 起源于顺行卫星Himalia和逆行卫星Ananke的5个不同尺寸的尘埃轨道根数演化情况, 并从中分析出尘埃运动的规律, 从尘埃尺寸与尘埃轨道根数演化的关系中, 发现尘埃尺寸越小轨道越不稳定。

参 考 文 献

- [1] JEWITT D, HAGHIGHIPOUR N. Irregular satellites of the planets: products of capture in the early solar system[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2007, 45(1): 261-295.
- [2] BOTTKE W F, NESVORNY D, VOKROUHLICKY D, et al. The irregular satellites: the most collisionally evolved populations in the solar system[J]. *Astronomical Journal*, 2010, 139(3): 994-1014.
- [3] LIU X, SCHMIDT J. Dust in the Jupiter system outside the rings[J]. *Astrodynamic*, 2019, 3: 17-29.
- [4] KRIVOV A V, WARDINSKI I, SPAHN F, et al. Dust on the outskirts of the Jovian system[J]. *Icarus*, 2002, 157(2): 436-455.
- [5] BOTTKE W F, VOKROUHLICKY D, NESVORNY D, et al. Black rain: the burial of the Galilean satellites in irregular satellite debris[J]. *Icarus*, 2013, 223(2): 775-795.
- [6] BUEMS J A, LAMY P L, SOTER S. Radiation forces on small particles in the solar system[J]. *Icarus*, 1979, 40(1): 1-48.
- [7] HESS S, BONFOND B, ZARKA P, et al. Model of the Jovian magnetic field topology constrained by the Io auroral emissions[EB/OL]. (2011)[2023-06-21]. <https://doi.org/10.1029/2010JA016262>.
- [8] DIVINE N, GARRETT H B. Charged particle distributions in Jupiter's magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, 88(A9): 6889-6903.
- [9] GARRETT H B, KIM W, BELLAND B, et al. Jovian plasma modeling for mission design: JPL-Publ-15-11[R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.
- [10] HAMILTON D P, KRIVOV A V. Circumplanetary dust dynamics: effects of solar gravity, radiation pressure, planetary oblateness, and electromagnetism[J]. *Icarus*. 1996, 123(2): 503-523.
- [11] BROUCKE R A. Long-term third-body effects via double averaging[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2003, 26(1): 27-32.
- [12] HAMILTON D P. Motion of dust in a planetary magnetosphere: orbit-averaged equations for oblateness, electromagnetic, and radiation forces with application to Saturn's E ring[J]. *Icarus*, 1993, 101(2): 244-264.
- [13] TAMAYO D, MARKHAM S R, HEDMAN M M, et al. Radial profiles of the Phoebe ring: a vast debris disk around Saturn[J]. *Icarus*, 2016, 275: 117-131.

作者简介:

叶安琪(1998-),女,硕士,主要研究方向:木星不规则卫星区域内尘埃演化。

通信地址:深圳市光明区公常路66号,中山大学深圳校区,航空航天学院(518107)

刘晓东(1985-),男,博士,教授,主要研究方向:深空探测动力学、空间尘埃/空间碎片/卫星星座轨道动力学等。**本文通信作者**。

通信地址:深圳市光明区公常路66号,中山大学深圳校区,航空航天学院(518107)

E-mail: liuxd36@mail.sysu.edu.cn

Orbital Dynamics of Dust Particles in the Region of the Jovian Irregular Moons

YE Anqi^{1,2}, CAI Zizhe^{1,2}, CHEN Zhenghan^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: A lot of dust particles are ejected from the surfaces of the Jovian irregular moons by the impact of interplanetary meteoroids. In this paper, the dynamics of dust particles originating from the irregular satellites in the complicated Jupiter system with various perturbation forces were studied, using both the analytical method and the numerical simulation method. By analyzing the conserved effective Hamiltonian quantity and phase portraits in the orbit-averaged model that describes the long-term evolution of motion of dust, it is concluded that dust particles originating from the prograde satellites tend to be distributed in the direction away from the Sun, while dust particles originating from the retrograde satellite are predominantly distributed in the direction towards the Sun. With long-term numerical simulation, it is found that the orbits of particles originating from prograde satellites are more stable than those of particles originating from retrograde satellites, and the orbital stabilities of large-size dust particles are greater than those of small-size particles.

Keywords: orbital dynamics; deep space exploration; irregular moon; exploration of Jupiter; dust dynamics

Highlights:

- The conserved quantities and phase portraits of dust originating from the Jovian irregular moons in the orbit-averaged model are analyzed by combining the analytical method and numerical simulations, to reveal different evolutionary patterns of dust originating from the prograde and retrograde irregular moons.
- The effect of solar radiation pressure on the orbital inclinations of dust originating from the Jovian irregular satellites is investigated using numerical simulations with all other perturbations.
- Long-term evolution of the orbital elements of dust particles originating from the Jovian irregular satellites is obtained by numerical simulations of their motion in the complicated Jovian space environment, with various perturbation forces.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]