

近地小行星 2016HO3 表面温度建模研究

贾晓宇¹, 杨晨², 王彤¹, 文毅²

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2.中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 2019年4月18日, 中国国家航天局(CNSA)公布了小行星探测计划, 将近地小行星 2016HO3 作为探测任务目标之一。主要梳理了 2016HO3 热环境分析的要素, 通过调研国际上目前观测数据, 得到 2016HO3 的初步环境参数, 使用近地小行星热模型(NEATM)与小行星热物理模型(TPM)开展了小行星 2016HO3 表面温度场建模与分析, 综合得出小行星温度上限为 412 K; 同时结合其可能的自转条件, 仿真分析了不同位置的昼夜温差变化特性, 发现 2016HO3 最大温差大约为 30 K。由于两个模型均不能直接处理极夜情况, 在 TPM 模型基础上采用对自转周期光照进行平均思路, 给出了极夜条件下的温度分析方法, 并获得小行星 2016HO3 的温度下限。

关键词: 近地小行星; 2016HO3; 热物理模型; 热环境; 仿真

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)05-0470-11

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.008

引用格式: 贾晓宇, 杨晨, 王彤, 等. 近地小行星 2016HO3 表面温度建模研究[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 470-480.

Reference format: JIA X Y, YANG C, WANG T, et al. Modeling of surface temperature for Near-Earth asteroid 2016HO3[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 470-480.

引言

2019年4月18日, 中国国家航天局(China National Space Administration, CNSA)公布了小行星探测计划: 其中探测器将开展对近地小行星 2016HO3 的绕飞探测, 随后择机附着在小行星表面并采集样品, 随后携带样品返回地球, 并通过返回器将样品送到地面。

小行星表面温度信息对于小行星探测载荷设计, 特别是有近地表操作的原位探测、样品采集的任务十分必要。相比于采用一触即走(Touch&Go)采样方式的“隼鸟号”(Hayabusa)、“隼鸟2号”(Hayabusa-2)^[1]与“欧西里斯-雷克斯号”(OSIRIS-Rex)^[2], 我国小行星探测将附着在小行星表面, 采集样品, 小行星表面热环境更为重要。

小行星表面热辐射所产生的净力与力矩会导致亚尔科夫斯基效应与YORP效应, 影响小行星轨道演化, 对于足够小的天体, 这两种效应更加显著^[3-4], 准确分析亚尔科夫斯基效应与YORP效应需要小行星温度分布信息。温度及其在小行星整个生命周期中的演变可以改变小行星的表面组成和性质^[5-6]。因此,

小行星表面温度信息对于研究小行星轨道与表面物质演化具有重要意义。

本文将结合小行星 2016HO3 的特征以及地面初步的观测数据, 开展小行星 2016HO3 温度分析, 获得其上下限, 并对其热特征进行初步总结。

1 目标小行星 2016HO3 基本信息

小行星 2016HO3 (编号 469219, 名称为 komo'oalewa) 是由位于夏威夷海勒卡拉山 1.8 m 口径的“泛星 1 号”小行星巡天望远镜 2016 年 4 月 27 日发现的。2016HO3 是一颗阿波罗型小行星。图 1 展示了 2016HO3 相对地球运动轨迹, 2016HO3 与地球以相同的周期共同绕太阳公转, 以地球角度看, 2016HO3 也在绕地球转动, 此类天体被称为地球准卫星(Earth Quasi-Satellite)。2016HO3 是目前发现的最稳定的地球准卫星, 至少未来 100 年内不会飞离地球^[7]。

目前地面观测未能直接得到 2016HO3 的类型与大小, 初步估计 2016HO3 可能是 S/Q/L 类小行星, 其绝对星等 $H_v = -24.3 \pm 0.5^{[8-10]}$, 反照率 $\alpha = 0.2^{[8]}$ (但该数据并非观测所得, 而是对 S 类小行星的估计值), 利用公式

$$D = 1329 \times 10^{0.2H} / \sqrt{\alpha} \text{ [km]} \quad (1)$$

可以计算出2016HO3的直径为41 m^[10]，而JPL的Agle根据雷达探测数据估计2016HO3的直径为40~100 m。本文在后续分析中将认为2016HO3的直径是40~100 m。

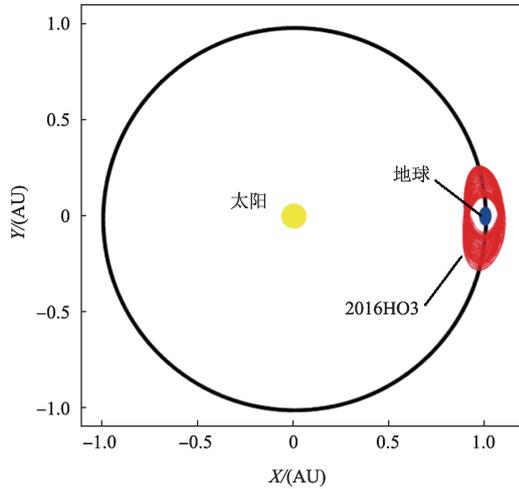


图1 2016HO3的轨道示意图^[7]
Fig. 1 Orbit of 2016HO3^[7]

表1 2016HO3的轨道参数^[8]

Table1 Orbital parameters of 2016HO3^[8]

| 参数 | 近日点 q /(AU) | 远日点 Q /(AU) | 轨道倾角 i /(°) |
|----|---------------|---------------|---------------|
| 值 | 0.897 | 1.105 | 7.776 |

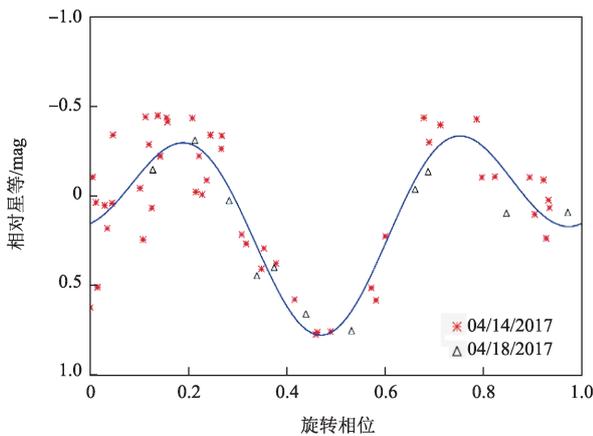


图2 2016HO3的光变曲线^[11]
Fig. 2 Light curve of 2016HO3^[11]

根据光变曲线（参见图2），目前可以得到2016HO3较为准确的自转周期为 0.467 ± 0.008 hr ($28'1.2'' \pm 28.8''$)^[10]。目前无法确定2016HO3自转轴的方向，甚至无法判定2016HO3是否存在稳定的自转轴。Burns（1973）曾经提出一个公式用于计算小天体自转轴趋于稳定所需时间尺度 τ_{damp} ^[12]

$$\tau_{\text{damp}} \sim \frac{\mu Q}{\rho K_3^2 R^2 \omega^3} \quad (2)$$

其中： Q 代表品质因子，即每圈转动所损失的能量； μ 代表物质硬度； ρ 是小天体的密度； ω 是小天体自转角速度； R 是小天体半径； K_3^2 是一个与天体形状相关的无量纲量，对于球状小天体， K_3^2 接近于0.01，对于长椭球状小天体， K_3^2 接近于0.1。

Harris（1994）给出一个更简化的公式计算小天体自转轴趋于稳定所需时间 τ_{damp} ^[13]

$$\tau_{\text{damp}} = \frac{P^3}{C^3 D^2} \quad (3)$$

其中： P 是小天体自转周期，单位为h； D 是小天体直径，单位为km， C 是一个无量纲量，取 17 ± 2.5 ； τ_{damp} 的单位是 10^9 年。则可以计算出2016HO3的 τ_{damp} 为 $2 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^7$ 年，如果2016HO3的自转轴不稳定，则意味着其自转轴需要数百万年甚至更长时间才能稳定，目前尚不清楚2016HO3演化历史，2016HO3的自转轴是否稳定无法判断。

小行星的热惯量是计算表面温度分布的关键参数，但是目前缺乏2016HO3热红外观测数据对其温度、热惯量进行直接分析。

热惯量与小行星表面的颗粒大小有关，小行星表面物质颗粒越大，热惯量也越大，如月球表面等土壤颗粒非常细小，其热惯量仅为 $40 \sim 50 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ ，小行星数量巨大，表面形态不同，热惯量的跨度较大，根据目前公布的数据，最小的可以到 $1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$ （10199 Chariklo），大的可以到数百^[14]。尽管根据“欧西里斯号”对贝努最新观测表明表面颗粒直径并非决定小行星表面热惯量唯一决定因素，但表面颗粒直径越大，小行星热惯量越大的结论仍然能够成

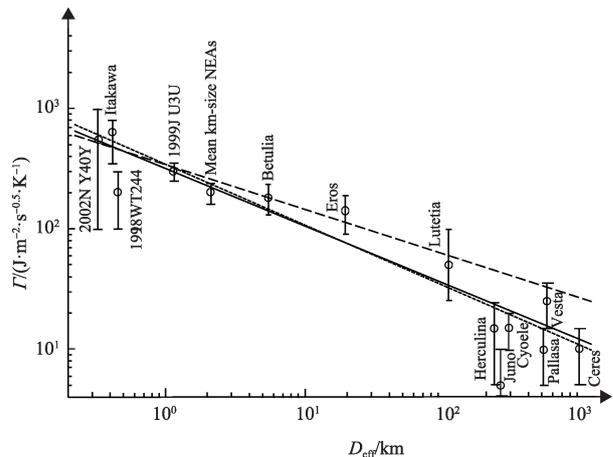


图3 小行星的直径与热惯量关系^[14]
Fig. 3 The relationship between the diameter and the thermal inertia of an asteroid^[14]

立^[15]。同时,小天体直径越小,其表面引力越微弱,则微小的风化层颗粒越难以保存在其表面上,因此小行星直径越大,其表面的热惯量也就越大。

Delbo 的研究给出了一个小行星直径 (D) 与热惯量 (Γ) 之间近似的拟合关系

$$\Gamma = d_0 D^{-\xi} \quad (4)$$

其中: $d_0 = 300 \pm 47 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$, $\xi = 0.48 \pm 0.04$ ^[14]。

2016HO3 的直径约在 40~100 m 之间,可以得到 2016HO3 的热惯量为 700~1 850 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ 。需要注意,该数据来源于公式 (4) 的外推,对于该数值应采取谨慎的态度。

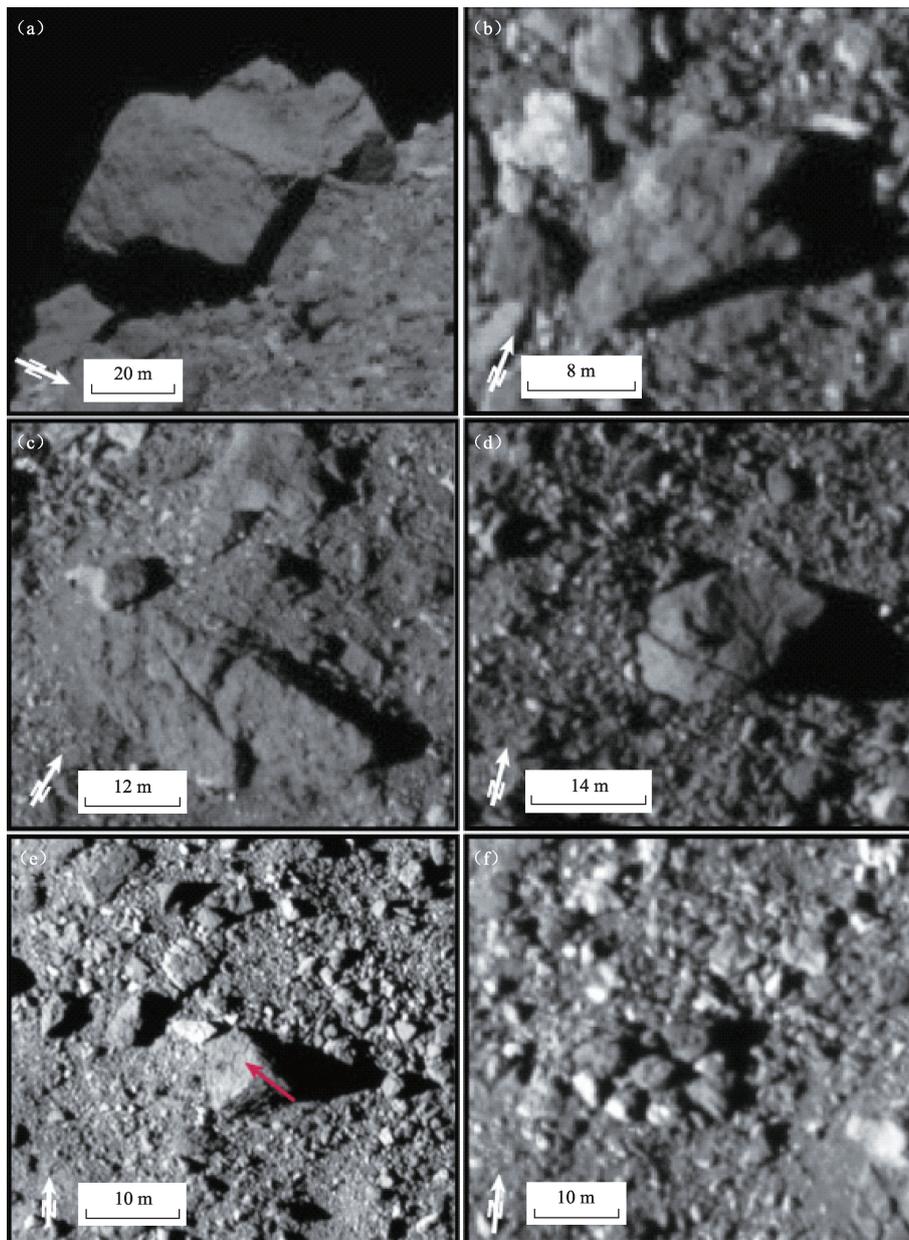


图4 高分辨率贝努表面照片^[18]

Fig. 4 High resolution photo for the surface of Bennu^[18]

根据近期“欧西里斯号”对直径约为 500 m 小行星“贝努”(Bennu)^[16]的探测结果可知,其表面无细微风化层的存在,几乎完全由石块构成。相比而言,2016HO3 直径仅有 40~100 m,且自转速度快,经计算发现其赤道处自转速度显著大于逃逸速度,实

际上 2016HO3 表面重力加速度方向是指向空间,而非地心,如图 5 所示。这意味着即便 2016HO3 表面存在细小的风化层颗粒,这些小颗粒也可能由于温度交变、太阳风与紫外线作用产生的静电等因素而松动,并由于高速自转的离开小行星表面,进入空间。因此

2016HO3 表面形态应当以较大石块为主，甚至不排除独石结构。可以推断，2016HO3 表面颗粒度大，热惯量高。

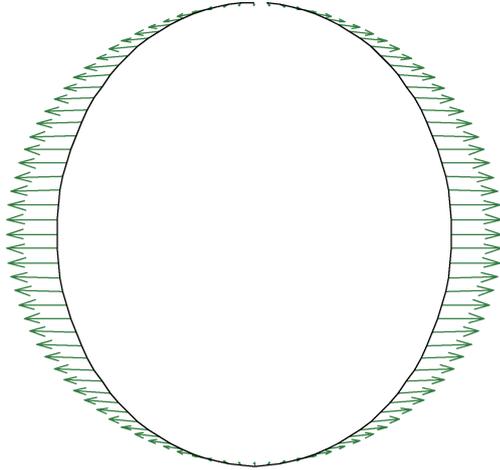


图5 考虑自转后2016HO3表面重力加速度方向
Fig. 5 The direction of the surface gravity acceleration with the rotation of 2016HO3

由于2016HO3 可能为S/Q/L类小行星，且其直径显著小于同为S类的小行星“丝川”(Itokawa)，可以推断2016HO3 热惯量很可能大于“丝川”的热惯量。“丝川”的热惯量为 $700 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ [17] 左右，本文取 $700 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ 作为2016HO3 热惯量的下限。同时，热惯量越高，小行星表面温度变化幅度越低，对附着采样时的工程设计更友好，因此本文分析中将取2016HO3 热惯量下限 $700 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ 进行后续分析，确保分析结果可覆盖最恶劣情况。

2 小行星的热建模方法

小行星热建模就是关于小行星表面和次表层的温度的计算，物理参数如反照率、热导率、热容量、发射率、密度和粗糙度，以及天体的形状，自转轴信息，乃至热历史都被考虑在内。粗略区分，热模型可以分成简化热模型和复杂热模型两类，其区别在于是否考虑小行星形状，是否忽略热传导（或简化其处理），是否处理表面粗糙度。小行星数据缺乏，简化热模型应用场景广泛，而随着红外观测数据以及小行星形状数据的增加，近10年来复杂热模型也得到广泛应用。本文将分别介绍两类热模型获得广泛应用的代表：近地小行星热模型与小行星热物理模型 [20]。

2.1 近地小行星热模型

近地小行星热模型 (Near Earth Asteroid Thermal Model, NEATM) [19] 通常用于小行星形状和旋转的

信息不足而无法使用小行星热物理模型的情况。通常，NEATM 允许对小行星直径和反照率进行初步而可靠的估计，但不提供热惯量或表面粗糙度的信息。典型的NEATM 获得直径的精度为15%，反照率约为30%。其他简化热模型有标准热模型 (STM)、快速旋转模型 (FRM)。STM 和FRM 大部分情况下已经不再应用 [20]。

NEATM 假设小行星为球形并且不直接考虑热惯量和表面粗糙度。表面温度由日照的瞬时热平衡给出，其与地表法线方向和太阳之间夹角的余弦成正比，而在夜间则取零。最高温度发生在日下点

$$(1 - A)S_{\odot}r^{-2} = \eta\sigma\epsilon T_{ss}^4 \quad (5)$$

其中： S_{\odot} 是1 AU处太阳辐射常量，取 1353 W/m^2 ； A 为几何反照率； r 是小行星到太阳的距离，单位为AU；参数 η 是考虑到粗糙表面引起的热发射增强效应，用于调整模型温度分布的参数， η 也称为发射参数，对于高热惯量小行星， η 值显著大于1（例如，1.5~3，理论最大值约为3.5 [21]），而对于低热惯量小行星， $\eta = 1$ ，小行星表面粗糙度增加倾向于降低 η 的值，例如，某个主带小行星 (MBA) 的 η 约为0.8，表明该小行星热惯量低，表面粗糙度大（最小理论值为0.6~0.7 [21]）； σ 是斯忒藩-波尔兹曼常量，数值为 $5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ； ϵ 是发射率。

近地小行星热模型给出了太阳直射处最高温度。该模型认为太阳直射处的表面瞬间达到了热平衡，完全不考虑热容、热惯量、表面形状等因素，只通过一个发射参数 η 对多种因素进行调整，因此必然带来一定的不确定性。另外该模型只适合对温度上限进行估计，无法对永久阴影区，或者极夜区的温度进行分析。

表2给出了式(5)中关键参数范围判断结果。其中 $S_{\odot}r^{-2}$ 代表了太阳能量的输入，这里分别分析了近地点和远地点之间的差异。由于2016HO3 几何反照率 A 与红外发射率 ϵ 无法获知，这里按照S类小行星典型数值0.15~0.25进行估算 [22]。发射参数 η 受到

表2 2016HO3的近地小行星热模型(NEATM)参数选择
Table 2 Parameter selection for the Near-Earth Asteroid Thermal Model (NEATM) of 2016HO3

| 参数 | 最小取值 | 最大取值 |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| $S_{\odot}r^{-2}$ | 1 108 W/m ² (远日点) | 1 681 W/m ² (近日点) |
| A | 0.15 | 0.25 |
| ϵ | 0.8 | 0.9 |
| η | 1.5 | 3 |

粗糙度与热惯量的影响,而目前认为2016HO3的热惯量大,粗糙度高,因此取 η 受范围1.5~3之间。

综合以上结果,可以计算2016HO3表面被太阳直射点的温度,见表3所示。而太阳直射点的温度代表了2016HO3温度的上限值,非太阳直射点处的温度可以用

$$(1 - A) \cos \theta S_{\odot} r^{-2} = \eta \sigma \varepsilon T^4 \quad (6)$$

来计算,这里 $\cos \theta$ 是太阳方向与所考虑平面夹角的余弦值。

表3 小行星2016HO3太阳直射点处温度分析
Table 3 Temperature range analysis of asteroid 2016HO3 under direct sunlight K

| 位置 | 太阳直射点温度 | |
|-----|---------|-----|
| | 最小值 | 最大值 |
| 近日点 | 301 | 380 |
| 远日点 | 271 | 342 |

2.2 小行星热物理模型

近地小行星热模型可以快速对温度上限进行估计,但是该模型过于简单,未考虑形状、发射面物理特性,未考虑热量的传输过程(纵向);且只能用于估计温度上限,不能分析温度下限,不能用于计算瞬态温度。因此根据月球以及一些小行星的数据发展了小行星热物理模型(Thermal Physics Model)。该模型考虑了更多要素,可以将形状、表面粗糙度、热惯量等因素考虑在内。

所有TPM都将小行星形状表示为(三角形)小平面的网格,该小平面围绕给定的自转轴旋转。一般而言,小行星的形状模型来自雷达观测或者光变曲线的反演,如果没有相应模型,则只能假设小行星为球形。具体每个平面可以选择不同的粗糙度模型,如图6所示,(b)代表陨石坑截面^[23], (c)代表高斯表面^[24], (d)代表分形表面^[23],选择合适的粗糙度模型可反映辐射表面多次辐射反射所导致对阳光吸收的增强以及再现热红外光束效应的方向性^[21]。

考虑自转因素后,小行星表面温度处于周期性交变状态,随着深度增加,温度变化幅度约越来越小。体现温度变化所影响深度参数被称为热特征尺度或者热肤深度,定义为

$$l_s = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho C \omega}} \quad (7)$$

其中: κ 是热导率; C 是表面材料比热容; ρ 是表面材料密度; ω 是自转角速度。对于高速自转的小行星,典型的热特征长度仅有几个厘米。

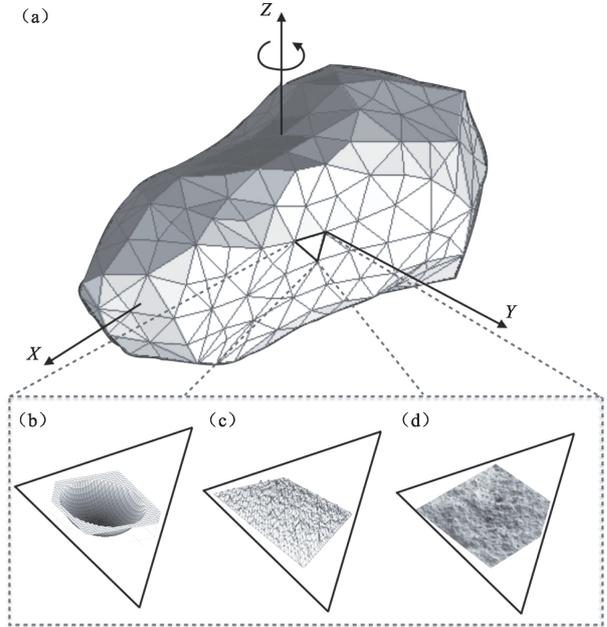


图6 小行星形状以及表面粗糙程度模型^[21]

Fig. 6 Asteroid shape and surface roughness model^[21]

通常小平面的尺度远远大于热特征尺度 l_s 的大小,在该条件下,对于小平面中心点处,表面输入的热流将主要向地下传导而非在地表横向传导。因此TPM模型通常忽略横向传热,仅考虑深度方向 z 上的一维热传导方程,其形式为

$$\rho C \frac{\partial}{\partial t} T = \kappa \frac{\partial^2}{\partial z^2} T \quad (7)$$

边界条件为

$$\frac{\partial}{\partial z} T \Big|_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (8)$$

$$(1 - A)(s_i \psi_i F_{\odot} + F_{scat}) + (1 - A_{th}) F_{red} = \varepsilon \sigma T^4 \Big|_{z=0} - \kappa \frac{\partial}{\partial z} T \Big|_{z=0} \quad (9)$$

其中: A 为几何反照率; F_{\odot} 太阳在小行星处辐射常数, $F_{\odot} = S_{\odot} r^{-2}$; $s_i \psi_i$ 是太阳光照角度,这里 ψ_i 是太阳光线与平面 i 法向量的余弦值, s_i 则代表太阳光是否照射到平面 i ,如果没有, s_i 为0,否则为1; F_{scat} 是来自其它表面太阳光散射项,对于一个凸多面体而言, $F_{scat} = 0$; F_{red} 是表面其它部位的红外辐射,对于一个凸多面体而言, $F_{red} = 0$; A_{th} 是热辐射反照率; ε 是小行星表面的辐射系数; κ 是表面物质的热导率; C 是表面物质的比热容; ρ 是表面物质的密度。

为了求解,对上述方程进行了一些简化^[21],即

$$x = z/l_s, \tau = \omega t, u = T/T_e \quad (10)$$

其中: l_s 是特征长度; ω 是小行星的自转角速度,为 $\omega = 2\pi/T$; T_e 是特征温度, $T_e = \sqrt[4]{\frac{1-A}{\varepsilon \sigma} F_{\odot}}$, T_e 相当

于NEATM中未经过发射参数 η 修正的太阳直射点下的温度。

上述方程简化为

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$u^4 \Big|_{x=0} - \Phi \frac{d}{dx} u \Big|_{x=0} = p_1 + p_2 + p_3 \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} u \Big|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (13)$$

其中：太阳光照角度项为 $p_1 = s_i \psi_i$ ；散射光项 $p_2 = \frac{1 - A_B}{\epsilon \sigma T_e^4} F_{\text{scat}}$ ；红外辐射项 $p_3 = \frac{1 - A_{\text{th}}}{\epsilon \sigma T_e^4} F_{\text{red}}$ ；无量纲的系数 $\Phi = \frac{\Gamma \sqrt{\omega}}{\epsilon \sigma T_e^3}$ ；热惯量 $\Gamma = \sqrt{\rho C \kappa}$ 。

若使用热物理模型，则至少需要获取2016HO3的形状、几何反照率、热惯量、密度、比热容、发射率、红外辐射、红外反照率以及粗糙程度等参数。

实际上，目前2016HO3先验知识相当缺乏，特别是，缺乏2016HO3的形状信息，只能初步假设2016HO3的形状是球体，由于球体的几何特性，球面上不同位置相互不可见，因此， F_{scat} 与 F_{red} 为0，还需要知道小行星的几何反照率、热惯量、密度、比热容、发射率等参数才能进行初步分析。

2.3 两种模型比较

对于观测信息缺乏的2016HO3而言，仅需要少量输入参数NEATM模型便可提供对表面温度上限的分析，且计算简便，适合于工程上对2016HO3表面温度上限进行初步分析，但是需要注意，NEATM提供的并不是精确结果，其更多被应用于对近地小行星的直径和反照率进行初步而可靠的估计。另外NEATM无法估计温度下限，特别是处于极夜的表面。

TPM考虑形状、表面粗糙度、热惯量等因素，考虑了纵向热传导过程，适合于分析昼夜温度，但是TPM模型是用于分析自转条件下热环境的，同样也无法直接用于分析极夜条件下的温度。TPM需要了解小行星更多基本参数，这恰是2016HO3目前所缺乏的，但是随着后续观测数据增加，TPM模型将提供对更加详细的热环境信息。

3 TPM模型计算与结果分析

3.1 TPM模型参数分析

2016HO3多数参数未知，但是可以进行合理估计。在初步模型中，由于缺乏小行星形状的信息，这里暂时不考虑散射光与其它面的红外辐射，即认为 p_2 、 p_3 为0。其相关参数信息见表4。

表4 2016HO3的TPM算例取值
Table 4 Parameters for the TPM of 2016HO3

| 参数 | 算例取值 | 说明 |
|-----------------|---|---|
| 角速度 ω | 3.737 3×10 ⁻³ /s | 周期为0.467 h, 来自自ALCDEF数据库 ^[8] |
| 反照率 A | 0.2 | 估计值, S类小行星平均反照率 ^[15] |
| 密度 ρ | 2.7 g/cm ³ | 估计值, S类小行星平均密度 ^[14] |
| 辐射系数 ϵ | 0.9 | 估计值 |
| 热惯量 Γ | 700 J·m ⁻² ·s ^{-0.5} ·K ⁻¹ | 估计值, 目前无地面观测, 仅知道其热惯量较大 |
| 比热容 C | 0.5 kJ·K ⁻¹ ·kg ⁻¹ | 估计值 |
| 特征长度 | 0.848 cm | 根据以上数值估算结果, 说明温度影响范围很浅, 在厘米量级 |
| 特征温度 | 393 K | 小行星的特征温度 |
| Φ | 13.8 | 系数, 决定归一化尺度下分布特征 |

小行星的自转周期来源于光变曲线测量结果，是确切知道参数；2016HO3的反照率 A 目前没有测量结果，目前只能按照S类小行星平均反照率进行估计；小行星的密度 ρ 同样来自于已知密度的S类小行星的平均值；热惯量分析详见第1节；比热容数值参考自小行星“贝努”；特征长度、特征温度与 Φ 均源于以上数据的推导。

3.2 TPM的数值计算方法

采用数值求解对TPM进行计算。数值解中不存

在 ∞ ，这里以 $x=10$ （10倍的特征长度）代替 ∞ 深处

$$\frac{\partial}{\partial x} u \Big|_{x=10} = 0 \quad (14)$$

其中： u 是 x 与 τ 的函数，以 $u_{i,j}$ 表示数据点； i 代表位置， j 代表时间。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j}}{\Delta x^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} u_{i,j} \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta \tau} \quad (16)$$

上述问题就变成了一个设定了边界条件的 $u_{i,j}$ 网

格的求解问题。这里需要注意的是， p_1 是 τ 的函数，这里存在一个自然的边界，即 u 从 τ 从0变化到 2π 后，对应小行星已经自转完一圈，应该恢复 $\tau = 0$ 的状态，利用该边界条件，不用再去设定温度的初始值了，上述差分方程的迭代本质上就是对一个4对角线矩阵的求解。但是考虑到该问题属于非齐次边界条件（热辐射正比于温度的四次方 T^4 ），这里只能采用迭代的方式进行计算。取后向差分格式，可以得到

$$\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta\tau} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j}}{\Delta x^2}$$

$$u_{i,j+1} = (1 - 2\frac{\Delta\tau}{\Delta x^2})u_{i,j} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2}(u_{i+1,j} + u_{i-1,j})$$

取 $a = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2}$ ，有

$$u_{i,j+1} = (1 - 2a)u_{i,j} + au_{i+1,j} + au_{i-1,j} \quad (17)$$

这里需要注意 $\Delta\tau$ 与 Δx 取值必须满足 $a < 1$ ，否则迭代将发散，对于边界条件，有

$$u_{n,j} = u_{n-1,j} \quad (18)$$

$$u_{0,j}^4 - \Phi \frac{u_{1,j} - u_{0,j}}{\Delta X} = p_1 \quad (19)$$

3.3 计算结果分析

假设2016HO3是球状，自转轴方向是影响小行星表面温度分布的关键参数。但是由于自转轴数据的缺乏，这里研究小行星位于1 AU处，自转轴相对于公转轨道面不同倾角下的小行星2016HO表面的温度分析，具体分布见图7。这里小行星经度与纬度采用小行星本体坐标系，由于缺乏小行星的形状信息，假设小行星是球体，图7是太阳直射 180° 经度时小行星表面全球瞬间温度分布；由于球体的对称性，图7也

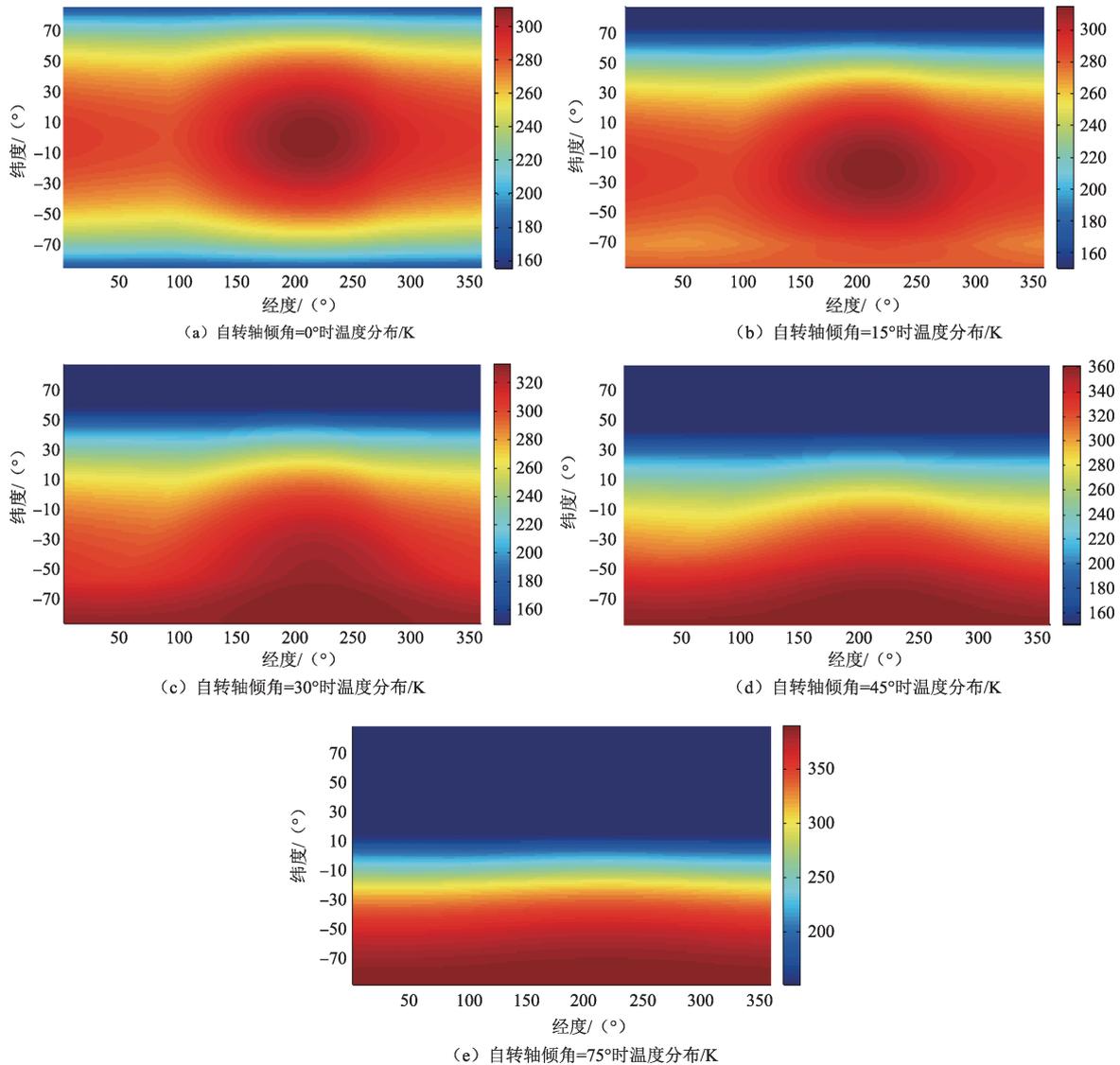


图7 不同自转轴倾角下温度分布
Fig. 7 Temperature distribution with different inclination angles of the rotation axis

可看作小行星不同纬度经历一个自转周期后的温度变化（需要把横坐标改为时间）。

图7中设定太阳直射180°经度处，APM模型计算出的表面温度最高点将出现在经度约210°处，即考虑热惯量后，小行星温度最高点相对太阳直射点有一定延迟。另外，小行星自转轴倾角越接近90°，则太阳直射点温度越高，最高甚至可以接近特征温度393 K，这较NEATM的分析结果更大，而小行星自转轴倾角越接近0°（或者180°），则最高温度将降低至310 K，因此自转轴对温度上线影响显著。同时需要注意，图7中极夜区温度数值并无使用价值，TPM模型无法计算极夜区温度分布。

另外，由于2016HO3自转速度快，小行星同一点处昼夜温度变化不大，本算例中最大值约为30 K左右。同时，由于高速自转，温差仅存在于表层，当深度超过8 cm，小行星温度几乎是一个恒定的值。

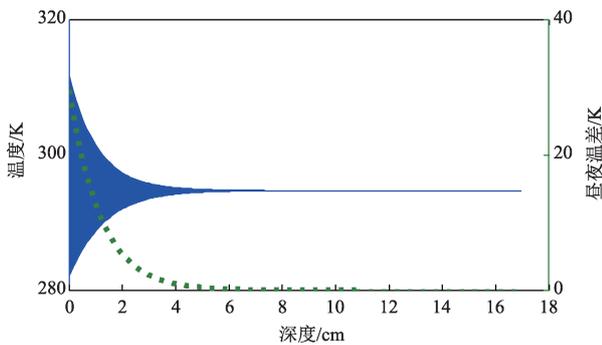


图8 温度/温差与深度关系

Fig. 8 Relationship between Temperature/Temperature difference and depth

公转轨道位置同样对2016HO3温度影响显著，由于2016HO3的偏心率到达0.1，近日点和远日点太阳辐射能量差距达到了40%，这将显著影响小行星的最高温度，具体计算结果见表6所示。这里需要注意，最高温差出现时自转轴倾角为0°，而最高温度出现时自转轴倾角为90°，两者不会同时出现。

表5的比较发现，自转轴是影响小行星表面最高温度以及温差关键要素。表7的比较发现，在2016HO3分析中，TPM可以反应自转轴对温度的影响，而由于没有使用自转轴这个参数，NEATM计算结果则介于自转轴两种极端情况中间。

表5 倾角与温差、最高温度的关系

Table 5 Relationship between inclination and temperature difference/highest temperature

| 倾角/(°) | 同一点温差/K | 最高温度/K |
|--------|---------|--------|
| 0 | 29.6 | 311 |
| 15 | 29.6 | 315 |
| 30 | 29.5 | 333 |
| 45 | 28 | 363 |
| 60 | 23.1 | 379 |
| 75 | 13.6 | 389 |
| 90 | 0 | 393 |

表6 公转轨道不同位置的最高温度与最大温差

Table 6 The maximum temperature difference/temperature at different positions of the orbit

| 日心距离/AU | 同一地点最大温差/K | 最高温度/K |
|---------|------------|--------|
| 1 | 29.6 | 393 |
| 1.105 | 28.03 | 372 |
| 0.897 | 31.1 | 412 |

表7 TPM模型与NEATM模型计算最高温度比较

Table 7 The highest temperature between TPM and NEATM

| 日心距离/AU | NEATM/K | TPM/K(自转轴倾角0°) | TPM(自转轴倾角90°) |
|---------|---------|----------------|---------------|
| 1.105 | 342 | 294 | 372K |
| 0.897 | 380 | 326 | 412K |

如果取自转轴倾角0°，TPM模型计算出的最高温度显著低于NEATM模型，这是由于2016HO3高热惯量、高转速有效平均了表面温度、降低了最高温度；NEATM模型则认为受晒表面已经达到瞬间热平衡，这个条件只有在低转速或者低热惯量条件下才能实现。而自转轴倾角90°时，TPM结果又显著高于NEATM，这是由于NEATM采用发射参数 η 对自转的效应进行了一定修正，而自转轴倾角90°时极区全天受照，等同于无自转，发射参数 η 在这种条件下又会降低对最高温度的预期。

4 极夜区的处理方式

上述计算仅适用于有能量输入的区域，即昼夜交替或者极昼的区域，而不适用于极夜区。不考虑横向热传导时，极夜区无外部能量输入，则达到平衡状态下表面温度是0 K，这显然不符合实际情况。实际上极区一个公转周期内经历的光照条件可以分为4个部分的循环：极昼→昼夜交替→极夜→昼夜交替→极昼，考虑热惯量后，便可计算出一个公转周期内极夜条件下最低温度。

2016HO3 公转周期为一年，自转周期仅有 0.467 h，两者相差了 4 个数量级；由于自转周期差别，热特征长度上也相差 2 个数量级[见公式 (7)]，因此自转和公转时热过程分析在时间、空间尺度上均有较大的差异，如果放到一块处理则由于时间、深度尺度不一，导致计算网格数量增加 6 个数量级，运算量过大，给计算带来困难。

自转和公转时热过程分析在时间空间尺度均有数量级的差别，两者可以分开进行处理。在处理公转问题时，可以将每个自转周期太阳光照提供的能量平均后作为公转分析时的输入，而在处理自转问题时，可以将公转计算得到的准稳态的地下的温度作为边界条件，叠加每日光照变化再计算表面温度，此时边界条件由原来的第二类边界条件式 (8) 变为第一类边界条件

$$u \Big|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow T_0 \tag{20}$$

阳光输入的平均值就是对昼夜效应进行平均，具体算法为

$$\bar{p}_1 = \frac{\int_0^\pi p_1(\tau) d\tau}{\pi} \tag{21}$$

$$p_1 = \begin{cases} 0 & \tau \in [0, \tau_0) \\ \sin\beta\sin\gamma\cos\tau + \cos\beta\cos\gamma & \tau \in [\tau_0, \pi) \end{cases}$$

$$\tau_0 = \arccos \left[\frac{\cos\beta\cos\gamma}{\sin\beta\sin\gamma} \right]$$

其中：小行星自转轴太阳光的夹角为 β ；所研究平面与自转轴夹角为 γ 。

图9给出了一个算例，即太阳光与自转轴夹角为 60° ，小行星的轨道的夏至点与近日点重合，小行星纬度为 70° 区域的光照变化情况：蓝色线代表每时刻光照情况，而红线代表了日均的光照，利用日均光照问题就可以计算出公转轨道上小行星日均温度随时间变化。

具体计算过程类似于 3.2 节中，参数可参见表 4，但是需要注意自转周期由 0.467 个小时变为了 366 天，假设太阳光与自转轴夹角为 60° ，小行星纬度为 70° 区域一年日平均温度变化如下：

可以得到极区纬度 70° 处最低温度在一年最冷一天为 137.9 K。

使用该方法可以解决极夜区温度的计算问题，但是同样需要注意该方法也存在一定缺陷：对于自转热分析，热特征深度仅有厘米量级，单元横向尺度远大

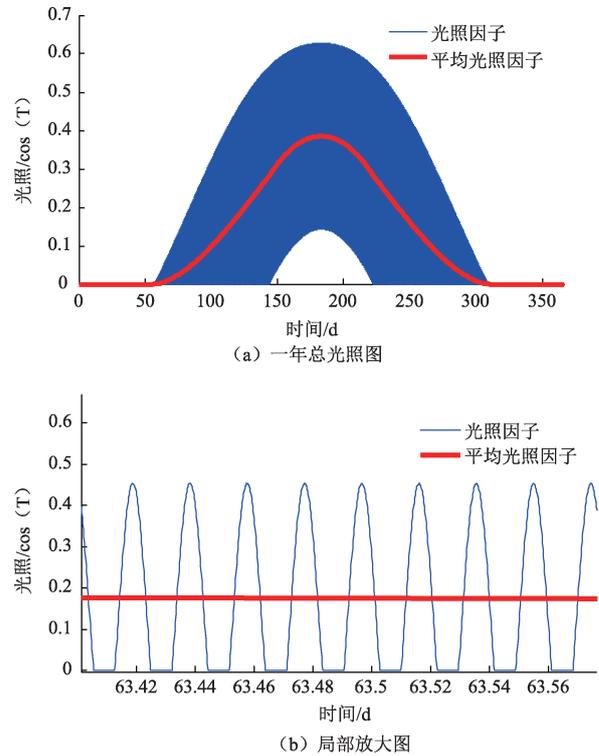


图9 公转后的平均光照因子
Fig. 9 Average illumination factor of the orbit

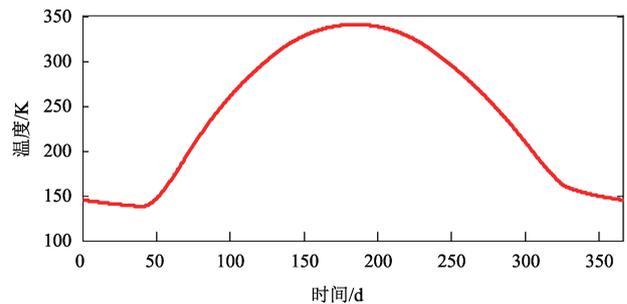


图10 极夜区一年日平均温度分布（纬度为 70° ）
Fig. 10 Average daily temperature for Polar zone (latitude 70°)

于热特征深度，不考虑横向热传导是合理的；对于极夜区处理，将日均光照平均后计算一年温度变化，热特征深度将达到 1 m，在这种条件下单元横向尺度与热特征深度接近，对于 2016HO3 这样的小目标，忽略横向传热不再合理，横向热传导起到的作用是降低小行星表面同一时刻的温差，因此该方法分析出极区温度最低值将比实际情况偏低，工程上可以用作最低温度下限值使用。

未知自转轴朝向的条件下，分析了不同纬度下一年内小行星表面日均温度的变化，如图 11 所示，极夜条件下日均温度就是其瞬时温度，因此使用该方法计算出 2016HO3 温度下限值为 115 K。

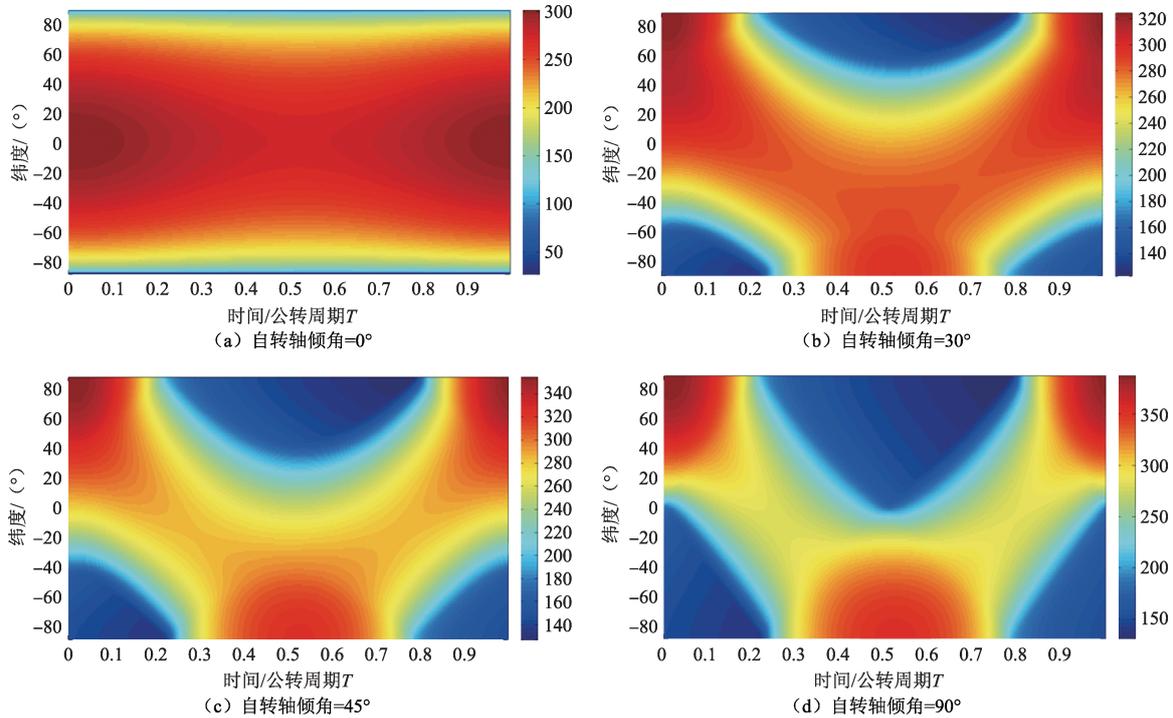


图11 不同自转轴倾角下不同纬年日均温度
Fig. 11 Daily average temperature at different latitudes with different inclination angles

5 结论

本文介绍了小行星的两个热模型：近地小行星热模型与小行星热物理模型，对2016HO3表面温度进行初步分析，得到主要结论：

1) 根据近地小行星热模型 (NEATM)，2016HO3的表面温度上限最高不会超过380 K (约100 °C)；根据小行星热物理模型 (TPM)，2016HO3的表面温度上限为412 K，但是仅发生在其自转轴倾角为90°且夏至点与近日点重合的条件；

根据小行星热物理模型计算，发现2016HO3表面不同位置温差虽大，由于高速自转效果，小行星表面同一点处的昼夜温差不会超过31 °C。

鉴于两个模型均无法处理极夜区的温度，本文在TPM模型基础上提出以年平均思路计算极夜区温度下限为115 K，该方法存在一定缺陷，计算结果较实际偏低，计算结果作为下限值可以为工程提供参考。

小行星表面温度分布以及温度范围的决定性因素之一是自转轴方向，而2016HO3的自转轴倾角目前尚未获知，导致目前分析2016HO3温度包络为115~412 K。需等待地面观测或者空间观测结果进行进一步分析，获得更加精确的结果。

由于两个热模型尚且无法分析极夜区温度，同时对于“极区”需要将公转要素考虑在内，最后本文在

TPM模型基础上提出以年平均思路计算极夜极区温度的分析方法，但是对于2016HO3尺寸仅有40~100 m的小行星仍有不足，后续需考虑横向传热因素影响，改进计算方法，获得更准确的温度下限估计。

参考文献

- [1] 李成方. 日发射“隼鸟”2小行星探测器[J]. 中国航天, 2015(2): 42-43.
- [2] LAURETTAD, BALRAM-KNUTSONS, BESHOREE, et al. OSIRIS-Rex: sample return from asteroid (101955) Bennu[J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1-2): 1-60.
- [3] 姜浩轩, 季江徽. 小行星热物理及Yarkovsky效应和YORP效应的研究进展[J]. 天文学进展, 2018, 36(3): 213-231.
- [4] BOTKE W F J, VOKROUHLICKÝ D, RUBINCAM D P, et al. The Yarkovsky and YORP effects: implications for asteroid dynamics[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2006, 34: 157-191.
- [5] DELBO M, HARRIS A W. Physical properties of near-Earth asteroids from thermal infrared observations and thermal modeling[J]. Meteoritics & Planet. Sci., 2001, 37: 1929-1936.
- [6] MARCHI S, DELBO M, MORBIDELLI A, et al. Heating of near-Earth objects and meteoroids due to close approaches to the Sun [J]. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2009, 400: 147-153.
- [7] DE LA FUENTE MARCOS C, DE LA FUENTE MARCOS R. Asteroid (469219) 2016HO3, the smallest and closest Earth quasi-satellite[J]. Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 2016, 462(4): 3441-3456.
- [8] 数据来源 NeoDy 数据库 [EB/OL]. [2019-7-10]. newton.spacedys.com/neody/index.php?pc=1.1.1&n=469219.
- [9] 数据来源 ALCDEF 数据库 [EB/OL]. [2019-7-10]. alcdef.org/PHP/

- alcdcf_GenerateALCDEFPage.php.
- [10] MPC. IAU minor planet center[EB/OL]. [2019-7-10]. minorplanet-center.net/db_search/show_object?object_id=469219.
- [11] REDDY. The Observation of 2016HO3 [C]// The observation of 2016HO3, USA: [s.n.], 2018.
- [12] BURNS J A, SAFRONOV V S. Asteroid nutation angles[J]. Mon. Not. R. Astron. Soc., 1973, 165: 403-411.
- [13] HARRIS A W. Tumbling asteroids[J]. Icarus, 1994, 107: 209-211.
- [14] DELBO M, HARRIS A W. Physical properties of near-Earth asteroids from thermal infrared observations and thermal modeling [J]. Meteoritics & Planet. Sci. 2002, 37: 1929-1936.
- [15] DELLAGIUSTINA D N, EMERY J P, GOLISHD R, et al. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. Nature Astronomy, 2019(3): 341-351.
- [16] LANDSMANA Z. The Physical properties and composition of main-belt asteroids from infrared spectroscopy[D]. USA: University of Centre Florida: Department of Physics, 2011.
- [17] THOMAS M, SUNAO H, FUMIHIKO U. (25143) Itokawa: the Power of radiometric techniques for interpretation of remote thermal observations in the light of the Hayabusa rendezvous results[J]. Astronomical Society of Japan, 2014, 66(3): 1-30.
- [18] WALSHK J, JAWIN E R, BALLOUZ R L, et al. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface[J]. Nature Geoscience, 2019, 12: 242-246.
- [19] HARRIS A W. A thermal model for near-Earth asteroids[J]. Icarus, 1998, 131: 291-301.
- [20] DELBO M, MUELLER M, EMERY J P, et al. Asteroid thermophysical modeling[J]. In Asteroids IV, 2015, 109: 11-16.
- [21] DELBO M, D'ORO A, HARRIS A W, et al. Thermal inertia of near-Earth asteroids and implications for the magnitude of the Yarkovsky effect[J]. Icarus, 2007, 190: 236-249.
- [22] BELSKAYA I, CELLINO A, GIL-HUTTON R, et al. Asteroid polarimetry[J]. In Asteroids IV, 2015: 151-163.
- [23] DAVIDSSON B, RICKMAN H, BANDFIELD J L, et al. Interpretation of thermal emission. I. The effect of roughness for spatially resolved atmosphereless bodies[J]. Icarus, 2015, 252: 1-21.
- [24] ROZITIS B, GREEN S F. Directional characteristics of thermal-infrared beaming from atmosphereless planetary surfaces — a new thermophysical model[J]. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2011, 415: 2042-2062.

作者简介:

贾晓宇(1989-),男,工程师,主要研究方向:小行星目标分析与建模。

通讯地址:北京空间飞行器总体设计部(100094)

电话:(010)18101050594

E-mail:jxy.162@163.com

杨晨(1981-),男,高级工程师。主要研究方向:航天器总体设计及项目管理。本文通讯作者。

通讯地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话:(010)68744964

E-mail: 385368@qq.com

Modeling of Surface Temperature for Near-Earth Asteroid 2016HO3

JIA Xiaoyu¹, YANG Chen², WANG Tong¹, WEN Yi²

(1. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: On April 18, 2019, the China National Space Administration (CNSA) published the plan of asteroid exploration, which would select the near-earth asteroid 2016HO3 as one of its targets. On this paper, the parameters of 2016HO3 for thermal environment analysis were discussed. By investigating the current international observation data, the environmental parameters of 2016HO3 are obtained preliminarily. Then the near-Earth asteroid thermal model (NEATM) and asteroid thermal physics model (TPM) were used to model and analyze the surface temperature of 2016HO3, and the upper boulder of the temperature was 412 K. Considering the spinning effect, the day and night temperature difference at different locations was simulated and analyzed, and the temperature analysis method under the polar night conditions was proposed, then the maximum temperature difference at any position was determined to be about 30 K. Last on the basis of TPM, by the idea of the average illumination during the rotation period, the temperature analysis method of the polar night was proposed, and lower limit of temperature of 2016HO3 was achieved.

Keywords: near Earth-asteroid; 2016HO3; thermal physics model; thermal environment; simulation

Highlights:

- The analysis shows that the maximum surface temperature of 2016HO3 would not exceed 380 K (107 °C) by NEATM; but it would not exceed 412 K (139 °C) by TPM, which only happens in the situation of which the inclination angle of the rotation axis is 90 degrees and the solstice point coincides with the perihelion point;
- Because of the high-speed rotation effect, the maximum temperature difference between day and night at any position on the surface of 2016HO3 would be about 30 K;
- On the basis of TPM, the lower limit of the temperature in the polar zone can be calculated, and the lowest temperature of 2016HO3 is 115 K.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]