

高强太阳光无线能量传输能量 供给平台设计

田少平¹, 李运泽¹, 刘 佳², 钟铭亮¹, 张红生¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 中国东方红卫星股份有限公司, 北京 100094)

摘 要: 为了满足微小卫星群落编队飞行技术快速发展的需要,设计了一种能量供给平台.该平台中菲涅尔透镜(太阳能聚集装置)收集空间太阳光,并将聚焦光能耦合进光纤束(柔性转向装置)以进行传输和换向.由 3 个薄透镜组成的透镜组(二次发射装置)将出射光线整合成高强平行光束进行光能传输,将光能以高强太阳光形式无线传输至航天器群落,实现能量供给.该能量供给平台能量收集传输效率可达到 70% 以上,在提高效率、降低成本方面具有一定的优越性.

关 键 词: 高强太阳光; 无线能量传输; 能量供给平台; 菲涅尔透镜; 光纤束; 透镜组;
能量收集传输效率

中图分类号: V1; TK512

文献标志码: A

Energy supply platform design of wireless power transmission based on intensive sunlight

TIAN Shao-ping¹, LI Yun-ze¹, LIU Jia²,
ZHONG Ming-liang¹, ZHANG Hong-sheng¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Spacesat Company Limited,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China)

Abstract: An energy supply platform was designed to meet the needs of rapid development of micro-satellites formation flying technology. In this configuration, Fresnel lens (solar energy gathering device) collected space sunlight and coupled the focusing light into fiber bundles (flexible steering device); then a lens group composed of three thin lens (secondary emission device) collimated the intensive sunlight for energy transmission, powering formation flying wirelessly in the form of intensive sunlight. The power collection and transmitting efficiency of the platform was up to 70%, and the qualitative evaluation of the application, the advantages and disadvantages of the platform has finally been conducted.

Key words: intensive sunlight; wireless power transmission; energy supply platform; Fresnel lens; fiber bundles; lens group; power collecting and transmitting efficiency

收稿日期:2015-01-25

基金项目:中国空间技术研究院 CAST 创新基金项目(524990)

作者简介:田少平(1989-),女,湖北襄阳人,硕士生,主要研究方向为航天器热控制.

随着微小卫星群落编队飞行技术^[1-2]的发展, 对高效无线能量传输技术提出了更高的要求, 其关键技术之一就是建立统一的能量供给平台实现集中供能. 美国最早提出了利用无线能量传输技术设计微小卫星群落集中的能量供给平台的思路^[3], 以降低其研发、发射及运行、维护成本, 并提高其生存能力和可靠性. 目前的空间能量收集、无线传输、接收及转换技术主要有两种技术途径, 分别是基于微波和激光的无线能量传输方式^[4-10]. 美国佐治亚理工学院的学者们设计了一种基于微波技术微小卫星间的无线能量传输方案, 传输距离高达 740 m, 传输功率为 200~1000 W, 电-电效率可达 15%, 但其工作频率高达 35~100 GHz, 需要研发专门的配套电子器件, 一定程度上制约了其实际的工程应用. 石德乐等人设计了一套可行的激光能量传输系统获得了激光无线能量传输 100 m 距离和高达 17% 的电-电效率, 但其传输功率约为 20 W, 不能满足航天器间百瓦级的功耗需求. 据此设计了一种基于高强太阳光的空间无线能量传输能量供给平台, 该平台利用高效的光学聚集传输系统使光能以高强太阳光形式无线传输至航天器群落, 向微小任务航天器群落集中供能, 能量聚集传输效率可达到 70% 以上, 传输功率为 894.71 W, 传输距离为 100 m.

1 系统总体设计

1.1 系统设计思路

基于高强太阳光的空间无线能量传输系统, 由能量供给平台和任务航天器能量接收转换利用群落组成, 其工作原理如图 1 所示.

能量供给平台中的太阳能聚集装置收集空间太阳光, 并将收集的太阳光耦合进柔性转向装置以对聚焦光能进行传输和换向, 再传输至二次发射装置, 而后再将光能以高强太阳光形式无线传输至任务航天器群落, 实现能量供给. 任务航天器群落中的高强太阳光接收装置接收来自能量供给平台发射的太阳光, 能量转换装置进行能量转换, 能量存储及配送系统对转换后的能量进行存储并为微小任务航天器群落的负载配送供能, 实现能量的传输转化及利用.

1.2 技术方案构建

能量供给平台即光能聚集传输系统包括作为太阳能聚集装置的高倍聚光系统、作为柔性转向装置的光纤束和作为二次发射装置的光能会聚准直系统, 如图 2 所示.

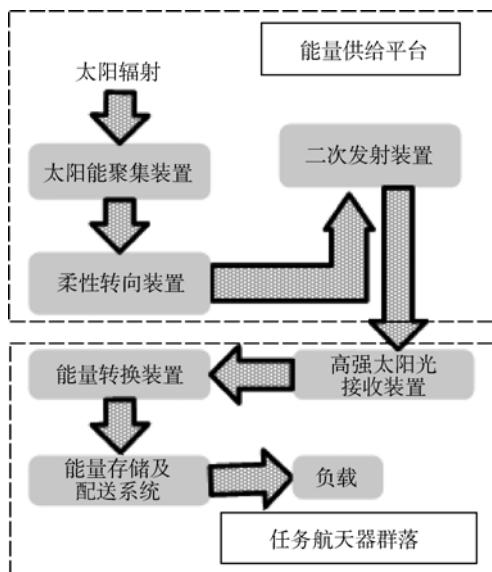


图 1 高强太阳光无线能量传输系统原理图

Fig. 1 Schematic of wireless power transmission system based on intensive sunlight

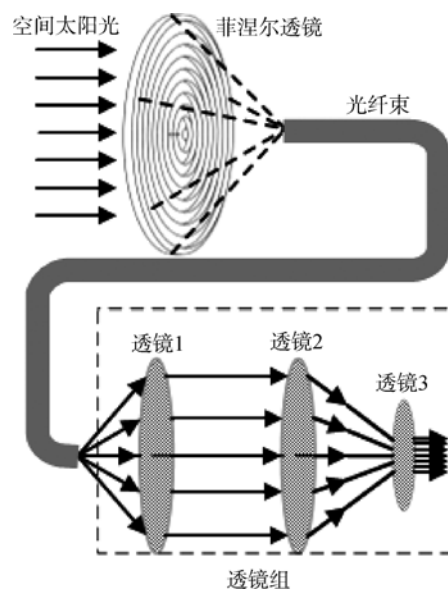


图 2 能量供给平台组成结构

Fig. 2 Components of energy supply platform

太阳能聚集装置是作为太阳辐射收集和会聚的部件, 按照聚光方法可以分为反射式聚光系统和透射式聚光系统, 本文选用透射式聚光系统, 利用菲涅尔透镜实现太阳能聚集. 柔性转向装置依靠光纤束来实现, 由于低损耗光纤的出现, 用光纤可以将光能传输很远的距离, 利用光纤束传输光能具有效率高、柔性大的特点. 二次发射装置依靠透镜组实现光能会聚准直, 光纤束将菲涅尔透镜聚集的高强太阳光进行全反射传输及柔性转向后, 其出射光线被 3 个薄透镜组成的透镜组整合

成高强平行光束进行光能无线传输,从而实现向任务航天器集中供给能量。

2 数学分析模型

2.1 菲涅尔透镜

2.1.1 结构设计

在菲涅尔透镜聚光系统中,平面菲涅尔透镜按照其平面一侧的朝向不同可分为平面朝内菲涅尔透镜和平面朝外菲涅尔透镜,在空间环境光学聚集系统中,一般选用平面朝外菲涅尔透镜,其聚光示意图如图 3 所示^[11-13]。

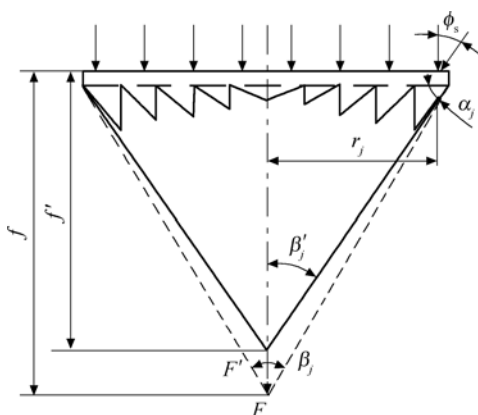


图 3 菲涅尔透镜聚光示意图

Fig. 3 Light gathering schematic of Fresnel lens

如图 3 所示,设菲涅尔透镜第 j 个环带的半径为 r_j ,透镜设为等环距,每环间距为 1 mm,第一倾角为 α_j ,出射光线与光轴夹角 β_j 也是出射光线偏移角,透镜焦距为 f ,焦点为 F ,菲涅尔透镜折射率为 n ,则满足

$$n \sin \alpha_j = \sin(\alpha_j + \beta_j) \quad (1)$$

$$\beta_j = \arctan(r_j / f) \quad (2)$$

其中菲涅尔透镜由 PMMA (polymethyl methacrylate) 材料制成, $n = 1.49$, 该材料质量轻, 密度小, 有利于提高该空间能量系统的功率/质量比。

实际上太阳光为非平行光, 以 $\phi_s = 16'$ 的锥角入射到菲涅尔透镜平面一侧, 而后经菲涅尔透镜折射后的偏移角(出射光线与菲涅尔透镜光轴夹角) β'_j 聚焦光斑将发生偏移, 移至点 F' 处, 此时焦距为 f' , 满足

$$\beta'_j = \arcsin\{n \sin[\arcsin(\sin \phi_s / n) + \alpha]\} - \alpha \quad (3)$$

$$f'_j = r_j \cot \beta'_j \quad (4)$$

当 f 取值不同时 α 及 β' 随环带半径的变化如

图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知在焦距一定时, 菲涅尔透镜 α 及 β' 都随着透镜环带半径的增加而增大, 且 β' 呈线性递增; 在同一透镜环带半径时, 焦距越大, α 和 β' 反而越小。

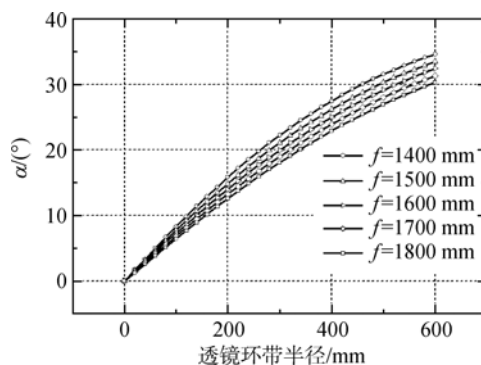


图 4 α 随透镜环带半径变化规律

Fig. 4 Variation laws of α with endless belts' radiuses of lens

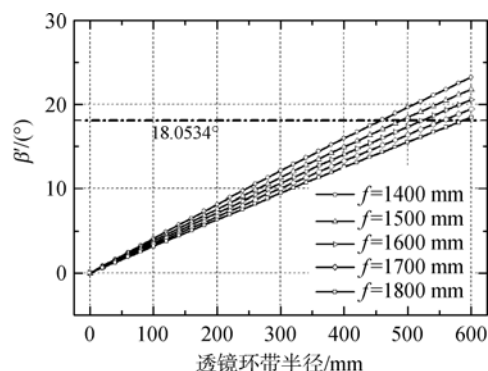


图 5 β' 随透镜环带半径变化规律

Fig. 5 Variation laws of β' with endless belts' radiuses of bens

2.1.2 效率分析

作为太阳能聚光透镜, 菲涅尔透镜的光学效率是一个非常重要的评价指标, 透镜的光学效率可以定义为透镜中透射光的总能量与入射到透镜上的光能量之比。光学损失大致可以分为反射损失、吸收损失、工艺性损失以及结构损失。其中工艺性损失是考虑到透镜成型轮廓的不理想而导致部分光线发散引起的光学损失, 它可以通过精密加工技术减小; 结构损失是由于菲涅尔透镜采用棱镜元组成的不连续曲面取代一般透镜的连续球面而导致部分光线发散引起的光学损失。

太阳光经过菲涅尔透镜的透过率为

$$T_1 = (1 - R_{11})(1 - R_{12})(1 - X_s)^{G_c} \quad (5)$$

式中 T_1 是非涅尔透镜透过率; R_{11} 是入射界面反射率; R_{12} 是出射界面反射率; X_s 是透镜材料对太阳光谱的吸收率; G_c 从入射面到出射面的光程。

菲涅尔透镜反射率 R_1 满足

$$R_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (6)$$

其中 θ_1 和 θ_2 分别为界面的入射角和出射角。

对于入射界面有

$$\theta_{1in} = \phi_s = 16' \quad \theta_{2in} = \arcsin \left(\frac{\sin \theta_{1in}}{n} \right) \quad (7)$$

对于出射界面有

$$\theta_{1out} = \theta_{2in} + \alpha \quad \theta_{2out} = \arcsin(n \sin \theta_{1out}) \quad (8)$$

太阳电磁辐射中 99.9% 的能量集中在红外区、可见光区和紫外区。结合太阳光谱^[14], 菲涅尔透镜材料对太阳光谱的吸收非常小, 可以忽略不计。故得则第 i 楞镜元的透过率可以表示为

$$T_{1i} = (1 - R_{11i})(1 - R_{12i}) \quad (9)$$

菲涅尔透镜总的光学效率 η 为透过各楞镜元的太阳光的能量总和与入射到透镜表面能量之比

$$\eta = \sum (Q_i T_{1i}) / \sum Q_i \quad (10)$$

$$Q_i = I_i S_i a_i \quad (11)$$

其中 Q_i 为第 i 楞镜元入射光的能量; T_{1i} 为第 i 楞镜元的入射光的透过率; I_i 为第 i 楞镜元入射光能流密度; S_i 为第 i 楞镜元的面积; a_i 为第 i 楞镜元的面积修正系数, 假定在理想加工水平下, 有 $a_i = 1$ 。由于透镜入射太阳光为均匀正入射, 则 $I_i = I$, $I = 1353 \text{ W/m}^2$ 为太阳常数, r 为菲涅尔透镜的半径, 得

$$\eta = \frac{\sum (I S_i T_{1i})}{\sum (I S_i)} = \frac{\sum (S_i T_{1i})}{\pi r^2} \quad (12)$$

2.2 光纤束

2.2.1 光纤选型

在利用光纤束传输光能时^[15-17], 选择光纤类型很关键, 在这里选择大芯径阶跃折射率的 HCS (hard clad silica) 石英光纤。HCS 石英光纤具有较高的损伤阈值, 可传输较高的能量, 不足之处是数值孔径 (单位为“1”) 较小, 在 0.3 左右。由于传输光能为高强太阳光, 故选择多模光纤组成的光纤束来传输光能, 光纤选型如表 1 所示。

表 1 HCS 光纤参数

Table 1 Parameters of HCS fiber

结构	材料	折射率	直径/ μm
纤芯	高纯二氧化硅	1.4673	62.5
包层	掺氟二氧化硅	1.4342	125

光纤束位于空间环境中, 光纤芯折射率设为 n_1 , 包层折射率设为 n_2 , 这两个参数决定了光纤的最大光线入射接收角, 设为 $\theta_{\max}$ 。光纤的数值孔径 N_a (numerical aperture) 满足:

$$N_a = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (13)$$

代入表 1 中数据, 得 $N_a = 0.3099$ 。

光束由菲涅尔透镜入射到光纤束端面时, 有部分光发生反射, 反射的损失和光束入射角度有关, 最大光纤入射角即为菲涅尔透镜出射光线的偏移角, 需满足 $\beta' < \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.3151 \text{ rad}$, 即 18.0534° , 则光纤的最大入射接收角为 18.0534° 。

光纤越长, 损耗越大, 效率越低。对一般的高透过率光纤, 在可见光的中心波段, 衰减系数设为 ω , 满足 $\omega = 0.25 \text{ m}^{-1}$ 。设光纤传能效率为 η' , 有 $\eta' = e^{-0.25L} \times 100\%$, 其中 e 为自然底数, L 表示光纤的长度。当光纤长度小于 0.4 m 时, 光纤传能效率大于 90.48%, 这可以后面光纤束传能效率研究计算的尺寸选取依据, 即选定光纤束长度为 0.4 m。

2.2.2 光纤束传能效率

光纤束是用来传输光能的, 因此光纤束必须具有较高的光能透过率。影响光纤束光能透过率的因素很多, 主要因素为光纤束的端面反射损失、弯曲损耗、纤芯材料吸收、纤芯与包层界面全反射损失以及光纤束的填充系数等。

1) 端面反射损失

光线无论从介质入射光纤还是由光纤出射到介质, 都会产生同样的反射损失。此时, 光纤透过率为 τ_1 , 有

$$\tau_1 = (1 - R_2)^2 \quad (14)$$

$$R_{\text{transverse}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin^2[\beta - \arcsin(n_1 \sin \beta)]}{\sin^2[\beta + \arcsin(n_1 \sin \beta)]} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\tan^2[\beta - \arcsin(n_1 \sin \beta)]}{\tan^2[\beta + \arcsin(n_1 \sin \beta)]} \quad (15)$$

其中 $R_{\text{transverse}}$ 为光纤反射率。

光纤透过率和反射率随光纤入射角变化规律

如图6所示,当光纤入射角从 0° 增加到 18.0534° 的时候,光能透过率 τ_1 从92.95%减小到90.06%,在后面的计算中取平均值91.51%.

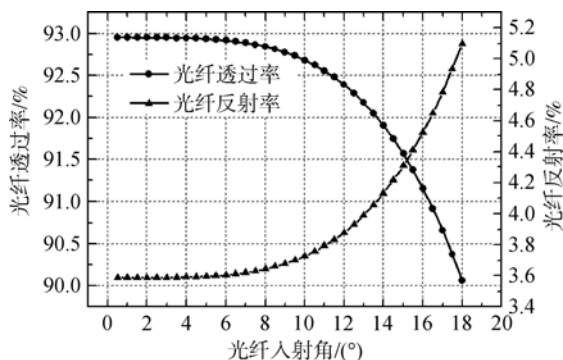


图6 光纤透过率和反射率随光纤入射角变化规律
Fig. 6 Curves of the transmittance and reflectivity changing with incident angle for optical fiber

2) 弯曲损耗

光纤的弯曲损耗有两类:宏弯损耗和微弯损耗.当光纤弯曲半径大于临界弯曲半径时,损耗很小;但是一旦小于临界值,光纤损耗按指数规律增加.对于长度为0.4m,直径为0.1m的光纤束,弯曲损耗不可忽略,取光能透过率 $\tau_2=98\%$.

3) 吸收损耗

光纤材料的吸收损耗对光纤透过率的影响由下式决定

$$\tau_3 = e^{-\frac{\gamma L}{\cos \varphi}} \quad (16)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\sin \beta'}{n_1} \right) \quad (17)$$

其中光纤的吸收系数 $\gamma=0.01$ dB/km,即 $4.343 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$.

光纤材料的吸收损耗对光纤透过率的影响不大,当光纤长度为0.4m时,光纤光能透过率 τ_3 为99.9982%.

4) 光纤纤芯与包层界面全反射损失

在光纤加工过程中,不可能保证纤芯和包层界面为理想的光学反射面,存在光纤纤芯与包层界面的全反射损失,在其影响下的光能透过率

$$\tau_4 = (1 - A)^{\frac{L \tan \varphi}{2r_c}} \quad (18)$$

其中 A 为纤芯包层界面全反射损失系数, r_c 为纤芯半径.设 $A=10^{-5}$, $L=0.4$ m,则 $\tau_4=98.7605\%$.

5) 填充系数

光纤束是由多根光纤紧密黏结而成的,除了

胶层占有一定空间外,光纤的排列间隙也占有光纤束的截面空间,这些空间是不能传递光能的,传递光能的只有光纤的纤芯.把光纤束中光纤的纤芯截面积的总和称为有效传光面积,它与光纤束端面面积之比称为光纤束的填充系数.光纤束的填充系数设为 K ,其与光纤的外径以及光纤束的排列方式有关.假设 $K=97\%$.

综上,光纤束传能效率设为 η ,满足

$$\eta = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 K \quad (19)$$

2.3 透镜组

透镜组的设计结构^[18-19]如图2所示,设计参数见表2.光纤束出射的光线经透镜1~透镜3会聚成一束高强平行光,平行光束直径与光纤束直径一致,均为0.1m.

表2 二次发射系统光学结构参数

Table 2 Optical parameters of second emission system

透镜	半径/m		光焦距/ m^{-1}
	第一曲面	第二曲面	
透镜1	0.05	0.1	5
透镜2	0.05	0.1	5
透镜3	0.05	0.0303	-6.25

透镜组的光学效率与3块透镜均有关,由于每块透镜结构相似、产生损耗的机理相同,下面对透镜1的透过率进行分析

$$T_{31} = (1 - R_{31})(1 - R_{32})(1 - \xi) \quad (20)$$

其中 T_{31} 为透镜1的透过率, R_{31} , R_{32} 分别为透镜1入射界面和出射界面的反射率, ξ 为透镜材料对光谱的吸收损耗.

从式(20)可以看出,透镜透过率主要取决于每个界面的反射率,故在每个透镜曲面上镀一层增透膜,使每个透镜曲面的反射率均为 $R_3=0.005$.同时由于实际的薄透镜存在工艺损失和结构损失,故对实际透光面积进行修正,修正系数均为 k_1 ,则二次发射系统的光学效率为

$$\eta = k_1 (1 - R_3)^3 (1 - \xi)^3 \quad (21)$$

3 计算结果分析及讨论

3.1 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜效率与聚焦光功率随透镜半径的变化如图7所示.

由2.2.1节中分析,菲涅尔透镜出射光偏移

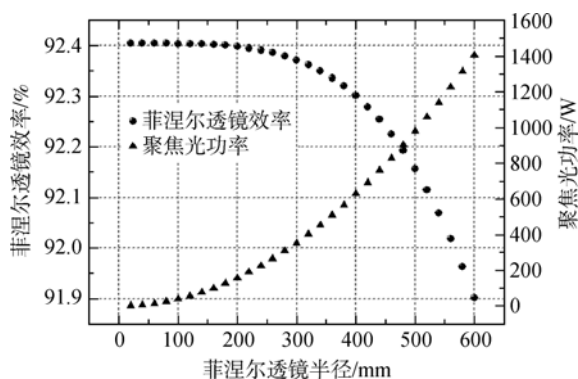


图 7 菲涅尔透镜效率与聚焦光功率随菲涅尔透镜半径的变化

Fig. 7 Variation laws of efficiency and focusing light power for Fresnel lens

角需满足 $\beta' \leq 18.0534^\circ$, 再结合图 5, 当 $f = 1.7$ m, 菲涅尔透镜半径 $r \leq 542$ mm 时有 $\beta' \leq 18.0257^\circ$, 不妨取 $r = 540$ mm, 此时 $\beta'_{\max} = 17.9639^\circ$, $f' = 1.666$ m, 菲涅尔透镜效率为 91.97%, 聚焦光功率为 1139.95 W.

3.2 光纤束

对于长度为 0.4 m, 直径为 0.1 m 的光纤束, $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 分别为 91.51%, 100%, 99.9982%, 98.7605%, 填充系数 $K = 97\%$, 即柔性转向装置的传能效率为 $\eta_p = 85.91\%$.

3.3 透镜组

取实际透光面积的修正系数 $k_1 = 0.99$, 透镜材料对光谱的吸收损耗 $\xi = 0.01$, 可以得到光纤束的光学效率 η_p 为 91.36%.

3.4 能量供给平台的效率及输出功率

设能量供给平台的效率为 η_{fv} , 则有

$$\eta_{fv} = \eta \eta_p \eta_b \quad (22)$$

在空间环境中, 当菲涅尔透镜半径为 r 时, 能量供给平台输出功率 P , 满足

$$P = \eta \pi r^2 I \quad (23)$$

输出能流密度设为 I_{out} , 满足

$$I_{out} = \frac{4P}{\pi d_{fiber}} \quad (24)$$

其中 d_{fiber} 为光纤束直径.

根据上述内容, 能量供给平台的设计参数和计算结果见表 3.

能量供给平台输出的光能以 1.139×10^5 W/m² 的能流密度平行传输至任务航天器群落再由任务航天器上的光能接收转换利用系统转化成为其需要的能量形式.

表 3 能量供给平台设计参数及计算结果

Table 3 Design parameters and calculation results for energy supply platform

参数		数值
菲涅尔透镜	半径/m	0.54
	焦距/m	1.666
	效率/%	91.97
光纤束	直径/m	0.1
	长度/m	0.4
	效率/%	85.91
透镜组	透镜 1 第一曲面半径/m	0.05
	透镜 1 第二曲面半径/m	0.1
	透镜 2 第一曲面半径/m	0.05
	透镜 2 第二曲面半径/m	0.1
	透镜 3 第一曲面半径/m	0.05
	透镜 3 第二曲面半径/m	0.0303
效率/%		91.36
系统总效率/%		72.18
传输距离/m		100
输出功率/W		894.71
输出能流密度/ 10^5 (W/m ²)		1.139

4 结 论

本文设计了一种适用于微小任务航天器群落的空间无线能量传输系统的能量供给平台, 具有以下几个特点:

1) 以高强太阳光为载体进行能量收集和传输, 不需要经过特殊的能量转换手段, 简化了系统, 降低了能量损耗;

2) 采用菲涅尔透镜作为聚光装置, 口径小、质量轻、成本低、装置简单;

3) 利用光纤束可实现系统光能传输的柔性转向;

4) 利用透镜组来实现光线会聚和准直, 结构简单、可模块化设计、可应用性强.

该能量供给平台输出光功率为 894.71 W, 光能收集及传输效率为 72.18%, 输出能流密度为 1.139×10^5 W/m², 虽然在效率计算时考虑到一些不确定因素, 但为以后的试验验证提供了一定的理论支撑, 理论效率可达到 70% 的水平. 该系统在提高效率、降低成本方面具有一定的优越性,

且能够满足航天器间百瓦级的功耗需求,可以作为未来微小任务航天器群落之间、空间站与任务航天器之间的一种有效的能量供给方式.然而该系统虽然传输效率较高,但传输功率不够大,若提高传输功率能流密度则需以增加系统的光能聚集装置的尺寸或减小光能接收装置的尺寸为代价,与提高空间能量系统的功率/质量比的设计需求相冲突,且其研究尚在理论阶段,对其真正投入应用有一定的限制.

参考文献:

- [1] 苟亮,魏迎军,申振,等.分离模块航天器研究综述[J].飞行器测控学报,2012,31(2):7-12.
GOU Liang,WEI Yingjun,SHEN Zhen,et al. Research on fractionated spacecraft[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology,2012,31(2):7-12. (in Chinese)
- [2] Brown O,Eremenko P. Fractionated space architectures: a vision for responsive space[R]. AIAA-RS4-2006-1002, 2006.
- [3] Turner A E. Power transfer for formation flying spacecraft[R]. AIAA-2006-7493,2006.
- [4] Mazal L, Gurfil P. Cluster flight algorithms for disaggregated satellites[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2013,36(1):124-135.
- [5] 马海虹. 航天器间微波无线能量传输技术研究[J]. 空间电子技术,2013(3):57-60.
MA Haihong. Microwave wireless energy transmission technology research between spacecraft[J]. Space Electronic Technology,2013(3):57-60. (in Chinese)
- [6] Mespadden J O,Mankins J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology[J]. IEEE Microwave Magazine,2002,3(4):46-57.
- [7] Matsumoto H. Space solar power station (SSPS) and microwave power transmission (MPT)[R]. Honolulu, US: Wireless Communication Technology,2003.
- [8] 杨业伟,李小将,张东来. 基于分离模块航天器的激光输能技术研究[J]. 激光与红外,2014(2):126-130.
YANG Yewei,LI Xiaojiang,ZHANG Donglai. Research on laser energy transmission technology based on fractionated spacecraft[J]. Laser and Infrared,2014(2):126-130. (in Chinese)
- [9] 申景诗,程坤,马波,等. 激光无线能量传输在轨应用方法[J]. 航天器工程,2015,24(1):25-30.
SHEN Jingshi,CHENG Kun,MA Bo,et al. Application method of laser power transmission in orbit[J]. Spacecraft Engineering,2015,24(1):25-30. (in Chinese)
- [10] 何滔,杨苏辉,张海洋,等. 高效激光无线能量传输及转换实验[J]. 中国激光,2013,40(3):247-252.
HE Tao,YANG Suhui,ZHANG Haiyang,et al. Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers,2013,40(3):247-252. (in Chinese)
- [11] SHUAI Yong,XIA Xinlin,TAN Heping. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. Solar Energy,2008,82(1):13-21.
- [12] 余随渐,吴晗平,熊衍建,等. 太阳能采集用 1000 mm 口径菲涅耳透镜设计[J]. 光电技术应用,2010,25(5):35-38.
YU Suixi,WU Hanping,XIONG Yanjian,et al. Design of 1000 mm diameter Fresnel lens for collecting solar energy[J]. Electro-Optic Technology Application,2010,25(5):35-38. (in Chinese)
- [13] 李鹏,吴贺利,杨培环,等. 菲涅尔聚光透镜的一般设计方法及效率分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(6):62-66.
LI Peng,WU Heli,YANG Peihuan,et al. General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2010,32(6):62-66. (in Chinese)
- [14] Sonneveld P J,Swinkels G L A M,Tuijl B A J V,et al. Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses[J]. Solar Energy,2011,85(3):432-442.
- [15] Jaramillo O A,Rio J A D. Optical fibres for a mini-dish/Stirling system:thermodynamic optimization[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2002,35(11):1241-1250.
- [16] Jaramillo O A,Rio J A D,Huelsz G. A thermal study of optical fibres transmitting concentrated solar energy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,1999,32(9):95-102.
- [17] 王加强. 光纤通信工程[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2003.
- [18] 王之江,顾培森. 实用光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [19] 韩军,刘钧. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

(编辑:陈 越)