第15卷 第1期 空间科学学报 Vol. 15, No. 1
1995 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1995

空间等离子体导致高电压太阳阵的电流收集*

古士芬 师立勤 宋 利 田葆宁
(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

摘 要

给出一种能方便计算空间等离子体引起高电压太阳阵 (HVSA) 电流收集的理论统计模式. 通过对物理过程分析认为空间等离子体致 HVSA 的功率损耗对 HVSA 的设计是不应忽视的.

关键词 空间等离子体,高电压太阳阵,电流收集

一、引 言

随着航天器尺度的不断增大,使命的扩大,其对电源功率要求亦不断增加. 未来空间站将需要高达 200kW 的电源. 为了减轻结构重量、减少欧姆损耗以及供电电流与地磁场间相互作用影响, 就必须提高太阳电池阵的工作电压. 称工作在 100V 以上的太阳阵为高电压太阳电池阵,简记为 HVSA.

许多军事目的的航天器、载人飞船和空间站等都运行在 250—500 km 高度的低地球轨道 (LEO) 上. 该区间的天然等离子体环境是由高密度 ($\geq 10^9 el \cdot m^{-3}$) 的电离层等离子体以及低能 ($< 100keV$) 的沉降等离子体组成. HVSA 在这样的环境中运行所发生的相互作用是非常复杂的, 其中重要的作用之一是 HVSA 电流收集,又名电流泄漏. 等离子体的高导电性使 HVSA 上的裸露导体部分与之构成并联回路, 从而造成电源电流泄漏而损耗有功功率. 由于在电子温度与离子温度近似一样的条件下, 电子的迁移率要比离子高得多,故该效应主要表现为 HVSA 对周围等离子体之电子电流收集.

HVSA 的电流收集研究主要是由美国宇航局的几个研究中心在地面模拟实验室中进行的,还有两次空间飞行实验 (PIX-1, 2). 但受限于设备尺度及边缘效应、等离子体源的不同及其参量的不确定性等,不仅相互间结果不完全一致,所进行的模拟与真实空间情况相差亦甚远. 在理论计算方面所得的结果相差悬殊. 故了解太阳阵中基本等离子体收集过程仍有相当的工作要做[1,2].

我们对 HVSA 的电流收集问题进行理论研究,给出了一种理论模式.

* 国家自然科学基金资助项目.
本文于 94 年 2 月 24 日收到.

二、二维计算机模拟模式

我们利用固定表面导体盘二维 Poisson-Vlasov 问题的混合迭代数值程序，采用 $\Phi = e\phi/T_e(\mathrm{eV})$，$J_e = j_e/j_{e0}$ 等进行无量纲运算。ϕ 为表面电位，T_e 为环境电子温度，j_{e0} 为环境电子热随机电流密度。

对不同数值计算，选取各自计算得到的最靠近冲压方向表面 ($0.005r_0$) 处的电流密度，建立起一个统计逼近关系式：

$$\bar{J}_e = a + b\Phi^x. \tag{1}$$

利用程序运行所得数据 Φ:10,52,100,150 相应的 $\bar{J}_e$: 0.38, 0.52, 0.64, 0.70 构成 4 个 (1) 方程，两两组合成 5 组方程组，分别求出 a, b, x 值，取最逼近参量组 $a = 0.2$, $b = 0.046$, $x = 0.49$，从而给出该计算机模拟构成的电流收集模式：

$$I_c = j_e A_+ = A_+ j_{e0}\bar{J}_e = A_+ j_{e0}\left(0.2 + 0.046\left|\frac{e\phi}{T(\mathrm{eV})}\right|^{0.49}\right). \tag{2}$$

收集电流引起 HVSA 功率损耗 Δp(W) 为

$$\Delta p = I_c\phi = A_+ j_{e0}\left(0.2 + 0.046\left|\frac{e\phi}{T(\mathrm{eV})}\right|^{0.49}\right)\phi, \tag{3}$$

式中 A_+ 为电子收集面积，依据到 HVSA 上的等离子体净电流为零的条件：

$$I_c^e = j_e \cdot A_+ = I_c^i = j_i \cdot A_-, \tag{4}$$

可导得在 LEO 冲压面离子有漂移速度 $M = \left(\frac{m_i v_i^2}{kT_i}\right)^{1/2}$ 影响下，并且 $n_e = n_i$, $T_e = T_i$ 条件下有

$$\frac{A_+}{A_-} = \frac{j_i}{j_e} \approx RAM\left(\frac{m_e}{m_i}\right)^{1/2}, \tag{5}$$

$$RAM = \exp(-M^2) + \sqrt{\pi}\,(1 + \mathrm{erf}M). \tag{6}$$

特在 $v_i = 7\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$，离子为氧离子条件下，$M \approx 6.4$，$RAM \approx 23$。此时 $A_+/A_- = 0.134$，$A_+ + A_- \approx A_p$ (阵面积) 有

$$A_+ \approx 0.12A_p, \tag{7}$$

$$j_{e0} = en_e\left(\frac{kT_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2} = 2.7\times 10^{-14} n_e[T_e(\mathrm{eV})]^{1/2}. \tag{8}$$

显然只要给定环境等离子体条件 n_e, T_e，及高电压太阳阵参量 A_p, ϕ，就可联合利用 (2),(3),(7),和(8)式求出我们模式给出的 HVSA 收集电流及其致电源功率损耗。

三、模式的可用性

为了确定我们所建立模式的可用性就必须将之与其它模式进行比较，为了比较及讨论空间等离子体所引起的 HVSA 电流收集功率损耗，我们选用如下典型参量值：

$n_e = n_i = 10^{12}\cdot\mathrm{m}^{-3}$，$T_e = T_i = 0.2\mathrm{eV}$，离子为氧离子，这是 300—400km 高度区

的典型电离层等离子体特征值. $P = 30\text{kW}$, $A_p = 300\text{m}^2$ 这是未来空间站第一阶段所需太阳电池阵功率的典型值. 阵工作电压选取 100,150,200,250,300, 400, 500 和 600V 进行计算. 此时利用(7)式给出 $A_+ = 36\text{m}^2$, 利用 (8) 式给出 $j_{e0} = 1.2 \times 10^{-2}\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$. 由 C-L 二分之三次方律[3]

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{q}\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{1}{l_i^2}\phi^{3/2}, \tag{9}$$

再用 $j_e \cdot A_+ = j_i \cdot A_-$ 之(4)式易利用 A_+/A_- 关系计算出

$$\phi_+/\phi_- \approx 0.125 \quad 或 \quad \phi_+ \approx 0.11\phi. \tag{10}$$

有了如上关系后, 我们就可对 Viswanathan 等[2]基于地面实验室数据给出的电流收集式:

$$\phi_+ \leqslant 100\text{V}, \quad I_e = j_{e0}A_p(1.25 \times 10^{-3})\left(1 + \frac{e\phi_+}{T_e(\text{eV})}\right); \tag{11a}$$

$$\phi_+ > 100\text{V}, \quad I_e = j_{e0}A_p(0.25)\left(1 + \frac{e(\phi_+ - 100)}{T_e(\text{eV})}\right); \tag{11b}$$

$$\phi_- \leqslant 0\text{V}, \quad I_e = j_{i0}A_p(1.25 \times 10^{-2})\left(1 + \frac{e|\phi_-|}{T_i(\text{eV})}\right). \tag{11c}$$

对我们给出条件进行计算, (11 a) 式 $\phi j_{e0}A_p(1.25 \times 10^{-3}) = 4.5 \times 10^{-3}\text{A}$, 其结果示于表 1.

表 1 Viswanathan 等电流收集模式计算结果

ϕ(V)	100	150	200	250	300	400	500	600
ϕ_+(V)	11.0	16.5	22.0	27.5	33.0	44.0	55.0	66.0
$e\phi_+/T_e$	55	82.5	110.0	137.5	165.0	220.0	275.0	330.0
I_c(A)	0.25	0.37	0.50	0.62	0.74	0.99	1.24	1.48
ΔP(W)	25	56	100	155	222	396	620	891
$\Delta P/P$(%)	0.09	0.19	0.33	0.52	0.74	1.32	2.07	2.97

利用我们的模式计算如表 2 所示.

表 2 二维计算机模拟统计模式结果

ϕ(V)	100	150	200	250	300	400	500	600
I_c(A)	0.50	0.60	0.68	0.74	0.81	0.91	1.01	1.09
ΔP(W)	50	90	135	185	243	364	505	654
$\Delta P/P$(%)	0.17	0.30	0.45	0.62	0.81	1.21	1.68	2.18

将表 1, 表 2 进行比较,不难看出,我们的模式与基于地面实验数据综合加工之模式, 结果是非常相近的, 尤其是阵工作电压在 200V 以上时两者相差不大. 也就是说我们的模式是可用的. 我们的模式在使用上比之 Viswanathan 等的模式更方便,省去计算 ϕ_+ 等过多手续,而所得结果一样可用.

四、结果讨论及结论

由于真实的 HVSA 自身结构、材料、发电效应与实验所用有区别；另一方面真实的空间环境比地面模拟的要复杂的多，不仅有天然环境被运动所扰的变化，而且还有空间系统诱发(污染)环境迭加在一起，故已有的地面实验和两次空中飞行实验结果不足以做高电压太阳电池阵设计的完全可靠依据。

我们认为无论是已有的实验数据模式还是象我们给出的理论模式，它们对空间等离子体所引起的 HVSA 电流收集致功率损耗的计算，都可能是偏低的，其主要原因有二：(1) HVSA 放电引起的电流泄漏，目前还难以估算，没有计入各已有模式中。(2) 太阳电池之复层介质对电流收集的影响没计入模式中。带正电导体将收集来自周围相邻介质的二次发射电子，显然当有高的二次电子发射时，其必增加导体金属互连片的收集电流[4]，它是收集电流中出现 'snapover' 现象的原因。snapover 现象是在 HVSA 处于某一正电压时，收集电流急剧增加的现象，该电压是空间等离子体环境、HVSA 结构、材料及其运行状态的复杂函数，目前还无明确的关系，是一个应该研究的问题。

空间等离子体 HVSA 的电流收集所带来的电源功率损耗到底对设计是不是一个重要因素的问题，目前国际上观点尚不一致。我们依据下面三点理由，认为它是 HVSA 设计必须考虑的一个重要因素：

(1) 本地夜时阵处黑暗中，这时电源断开并冷却，其一旦重新进入日照中，冷却的阵将需产生 2 倍额定电压直至其温度达正常值。尽管这过程只发生在几分钟内，但这种加倍电压效应是不可忽视的。例如原设计电压为 200V 时，等离子体致功率损耗仅 0.45%，则 2 倍电压为 400V 时损耗增至 1.21%。

(2) 前面已指出模式计算值比真实的可能要低，并且空间等离子体环境随太阳活动、地磁活动有着复杂变化。

(3) 长期在 LEO 运行的 HVSA，为使其后期仍符合预期的功率需求，其初始工作期所要产生的功率能力要大得多，Viswanathan 等指出，正常需 70kW 的阵设计要其开始能供 200kW，这自然使阵面积增大很多而使收集电流致功率损耗更大。

综上我们得出如下结论：

(1) 我们给出的理论模式是简单可用的。

(2) 空间等离子体所引起 HVSA 电流致电源功率损耗在 HVSA 设计中是应该考虑的。

(3) 空间等离子体所引起 HVSA 电流收集过程还需进一步深入研究，应涉及放电导致电流泄漏致功率损耗以及周围介质对金属互连片电流收集的作用。

(4) 高电压系统的空间等离子体电流收集，不仅对 HVSA 有意义而且对等离子体开关、系留系统是有应用意义的。

参　考　文　献

[1] Stevens, N. J., NASA-CR-180231.

[2] Viswanathan, R., G. Barbay and N. J. Stevens, NASA-CR-174922.
[3] 卡普佐夫,电子学,北京,人民教育出版社, p. 132, 1957.
[4] Hastings, D. E., N89-27720.
[5] Nagendra Singh and B. I. Vashi., AIAA-91-1472-CP.

THE CURRENT COLLECTION BY HIGH VOLTAGE SOLAR ARRAY FROM THE SPACE PLASMA

Gu Shi-fen Shi Li-qing Song Li Tian Bao-ning
(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, a theoretic model of current collection is developed. the model makes it easier to calculate the current collected by high voltage solar array (HVSA) from the space plasma. Through analysis of the physical process we suggest that plasma coupling power loss for HVSA designing should not be neglected.

Key words Space plasma, High voltage solar array, Current collection