0254-6124/2010/30(6)-562–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhou Bin, Zhao Hua, Li Lei. Fast data processing algorithm of the retarding potential analyzer for electric propulsion plume diagnoses. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(6): 562-566

电推进羽流诊断中阻滞势分析器的快速处理算法

周 斌 赵 华 李 磊

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 介绍了一种基于统计方法分析阻滞势分析器响应曲线的数据处理算法. 该算法可以在电推进诊断中快速提取待测粒子的环境参数. 通过对阻滞势分析器测量得到的 *U-I* 响应曲线物理性质的分析, 推导出以曲线中所有测量值为基础提取粒子温度和密度的统计处理算法. 以具体卫星电推进诊断中对阻滞势分析器的测量要求以及工程参数为例, 设计并进行了仿真模拟实验. 在设计要求的测量范围内, 利用本文算法得到的离子密度的平均误差为 6.62%, 粒子温度的平均误差为 7.45%. 通过分析算法运算量, 在实际工程中采用 12 MHz 主频的 8031 处理器可以在 0.5 s 内完成本算法全部处理过程.

关键词 电推进诊断; 阻滞势分析器; 数据处理

中图法分类号 V 44

Fast Data Processing Algorithm of the Retarding Potential Analyzer for Electric Propulsion Plume Diagnoses

ZHOU Bin ZHAO Hua LI Lei

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract This paper presents a data processing algorithm for the Retarding Potential Analyzer (RPA) to retrieve real time parameters of single ion for the electric propulsion plume diagnoses. By analyzing characteristics of response curves of RPA under different conditions, a statistical method is established to derive particle temperature and density through the *U-I* measurements. A numerical experiment is carried out to simulate an onboard observation with specific requirements on the measurement. Results show that the averaged error in derived ion density is 6.62%, while the averaged error in ion temperature is 7.75%. The processing time of one curve is 0.5 s by using the 12 MHz 80C31 microprocessor.

Key words Electric propulsion plume diagnoses, Retarding potential analyzer, Data processing

---

2009-07-02 收到原稿, 2010-05-14 收到修定稿

E-mail: zhoubin@cssar.ac.cn

1　引言

阻滞势分析器 (Retarding Potential Analyzer, RPA) 是一种用于探测低能带电粒子的仪器, 主要用于测量能量小于 100 eV 带正电的离子. 从 20 世纪 60 年代, 一些国家已开始在空间和地面上的各种等离子体实验中应用这一仪器 [1−8], 随后以阻滞势分析器基本原理为基础, 发展了很多精度更高、针对性更强的粒子探测仪器. 无论在空间环境的科学探测领域, 还是在航天工程应用领域, 阻滞势分析器都有广泛的应用价值. 为了得到准确的测量结果, 对阻滞势分析器的测量数据进行处理的一般方法是, 将测量曲线下传到地面, 根据粒子分布模型, 参考其他相关工程参数, 进行数据分析后得到测量结果 [1]. 这要求较大的数据传输量和处理时间. 而在电推进诊断的应用中, 环境中待测粒子只有一种并占据主要地位, 阻滞响应曲线相对简单, 此时要求实时快速得到一个近似结果, 这就需要一种误差较小的快速处理算法. 本文的研究目标就是要解决这一问题.

2　阻滞势分析器的基本原理

阻滞势分析器的基本结构是一个法拉第杯, 再配合若干栅网电极, 达到对带电粒子阻滞分析的测量目的, 结构如图 1 所示.

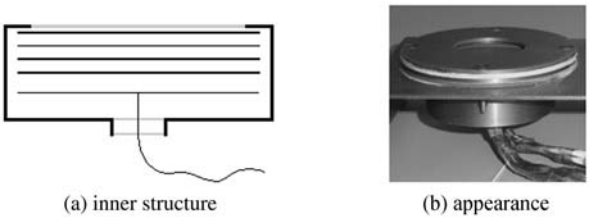


图 1　阻滞势分析器结构及实物

Fig. 1　Structure and practicality of RPA

栅极按照功能可划分为进入栅极、阻滞栅极、屏蔽栅极和抑制栅极 4 种 [8], 其中阻滞栅极起到关键的作用. 阻滞势分析器调节阻滞栅极的电势, 制造不同的阻滞电场, 用以阻滞对应能量的带电粒子. 未被拦截的带电粒子最终在收集器上产生的电流, 收集不同阻滞电势下的电流, 可以绘制出它们之间的关系曲线, 即阻滞势分析器的响应曲线. 最终通过对曲线的数据分析获取带电粒子的特性.

阻滞势分析器的测量条件是要求阻滞势分析器与待测带电粒子之间有一定的相对速度. 例如, 一般在测量空间稳定的等离子体环境时, 将传感器固定在卫星运行方向的顶端, 利用卫星的速度将粒子送入传感器, 而在电推进诊断应用中利用带电粒子本身的相对于卫星具有的速度将粒子送入传感器. 假设在带电粒子运动坐标系下, 粒子的速度分布满足麦克斯韦分布, 只考虑空间中有单一种类的带电粒子的情况, 那么在阻滞势分析器的坐标系下, 带电粒子的矢量速度分布如图 2 所示.

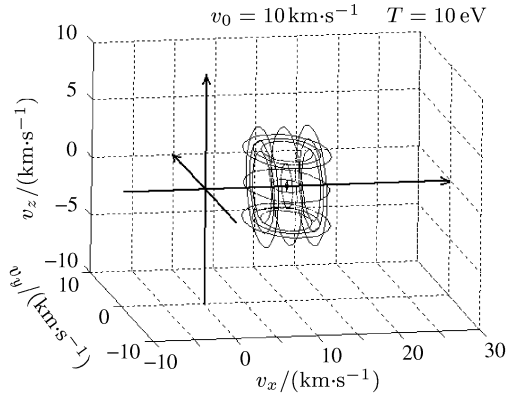


图 2　阻滞势分析器粒子与传感器相对速度矢量分布

Fig. 2　Charged-particle distribution in velocity vector relative to RPA

进入平面 $v_x = \sqrt{\dfrac{2qU}{m}}$ 与 Oyz 平面平行, 表示能够进入传感器粒子能量边界, 进入平面正 x 方向的所有带电粒子都可以进入传感器. 只考虑单一种类粒子, 粒子质量就是一定的, 所以阻滞势分析器的阻滞电压越小, 则进入平面越接近 Oyz 平面. 根据粒子速度分布的假设, 可以推导出理想阻滞势分析器阻滞能量与电荷通量的关系, 有 [8]

$$\phi(E) = \frac{N}{2} v_0 \Big[1 + \mathrm{erf}(\beta f) + \frac{1}{\sqrt{\pi}\beta v_0} \exp(-\beta^2 f^2)\Big]. \quad (1)$$

其中, $E = qU$ 表示阻滞能量, U 表示阻滞栅极相对于空间等离子体的电势差; $\beta = \sqrt{\dfrac{m}{2kT}}$ 表示最大概率速率的倒数; $f = v_0 - \left(\dfrac{2E}{m}\right)^{1/2}$ 表示阻滞后的平均速率; v_0 为粒子相对于阻滞势分析器探头的相对速度.

由式 (1) 可以推导出粒子密度和温度的公式:

$$T = \frac{1}{4k\pi E_0} \Big[\frac{\phi(0)}{\phi'(E_0)}\Big]^2, \quad (2)$$

$$N=\phi(E_0)\sqrt{\frac{m}{2U_0}}. \tag{3}$$

其中, E_0 满足 $\phi''(E_0)=0$

式 (2) 和式 (3) 中所有的未知量都可以在响应曲线中直接或间接进行测量, 因此带电粒子密度和温度理论上均可用阻滞势分析器测量得到.

3 基于阻滞势分析器快速数据处理算法的设计

由式 (2) 和式 (3) 直接推导得到的粒子密度和温度, 其中的变量虽然均可测量, 但其是由于量化和信号干扰产生的, 即使进行了滤波等信号处理, 从测量曲线中准确获取这些变量也是非常困难的. 因此利用式 (2) 和式 (3) 计算粒子温度和密度从准确性和实时性来说均不理想. 下面通过分析响应曲线的物理意义, 利用统计方法来计算粒子的温度和密度.

3.1 带电粒子的密度

将阻滞势的 U-I 响应曲线变换为 $U-\dfrac{\Delta I}{\Delta U}$ 曲线. 这条曲线表示了不同能量的带电粒子通过传感器的数量, 能量的分辨率是 ΔU. 因此可以得到离子能量分布 $\rho(E)$. 带电粒子能量正比于速度的平方, 通过数学变换, 可以得到带电粒子在阻滞势分析器轴向速度的速度分布 $\rho(v)$. 根据速度分布函数, 可以计算离子的平均速度, 有

$$\bar{v}=\sum v\rho(v). \tag{4}$$

当阻滞能量为 0 时, 带电粒子形成的电流与阻滞势分析器探头入口面积、平均速度、粒子密度和电荷电量有关, 这些参数中只有粒子密度未知, 因此离子密度可以表示为

$$N=\frac{I(0)}{Sq\bar{v}}. \tag{5}$$

3.2 带电粒子的温度

带电粒子的温度与粒子平均动能有关, 阻滞势分析器只能感应测量垂直于阻滞势分析器入射平面速度的粒子, 对于粒子其他方向上的速率, 只能借助于理论模型进行估计. 在粒子运动坐标系中, 粒子速度分布为 $f(v,\theta)$, 那么平均动能表示为

$$\bar{E}=\iint\frac{1}{2}m\big[(-v\cos\theta+v_0)^2+(v\sin\theta)^2\big]f(v,\theta)\mathrm{d}v\mathrm{d}\theta. \tag{6}$$

假设粒子运动坐标系中, 粒子符合麦克斯韦分布, 那么对式 (6) 进行计算可以得到

$$\bar{E}=\frac{1}{2}mv_0^2+\frac{3kT}{2}. \tag{7}$$

式 (7) 右边第一项为粒子与阻滞势分析器传感器相对运动速度的动能, 第二项表示粒子运动坐标系下粒子平均动能.

如果在阻滞势分析器的应用中需要计算粒子的热力学温度 T_t, 那么 $T_t=T$. 根据粒子符合麦克斯韦分布的特点, 则速度分布满足正态分布 $u\Big(v_0,\dfrac{kT}{m}\Big)$, 因此 T_{t} 可由 $\rho(v)$ 计算得出, 有

$$T_{\mathrm{t}}=\frac{m}{k}\sum(v-v_0)^2\rho(v). \tag{8}$$

如果需要计算粒子的动力学温度 T_{d}, 那么可以利用 $\rho(E)$ 直接计算平均动能, 再转换为温度.

$$T_{\mathrm{d}}=\frac{1}{k}\sum E\rho(E). \tag{9}$$

4 数值模拟实验

模拟一个工程应用环境, 验证上述算法的可行性并分析算法误差. 以某具体型号卫星的一个电推进诊断任务为例, 测量目标粒子主要是氙离子, 测量范围是, 离子密度 $10^4\sim10^8\,\mathrm{cm^{-3}}$, 精度要求平均小于 10%, 离子温度动力学温度范围为 1~100 eV, 精度要求平均小于 15 %. 根据设计要求, 考虑到工程上的限制, 电流采集精度为 8 位, 阻滞电压范围为 0~300 V, 步长为 1 V. 以此为基础并假定离子相对于传感器以 12 km/s 的速度入射进行数值模拟, 若要用相同精度进行电流采集, 8 位 AD 采样是远远不够的, 所以必须采用牺牲精度的方法扩展测量范围, 这就会增大量化噪声产生的误差. 为了节约载荷的重量和功耗, 不进行梯度测量, 而是通过响应曲线计算梯度.

图 3 是离子密度为 $10^5\,\mathrm{cm^{-3}}$, 离子温度为 10 eV 时, 理论与模拟 8 位 AD 采集的阻滞势分析器响应曲线和 $\rho(v)$ 曲线. 为了验证前面算法的准确度, 同时为了满足实时性要求, 模拟的数据未经过任何滤波变换, 直接应用本算法进行数据处理. 计算可得, T_{d} 和 N_{i} 与实际相比误差分别是 0.56% 和 6.55%, 其中误差计算遵循公式

$$E=\frac{(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{t}})}{T_{\mathrm{t}}}\times100\%. \tag{10}$$

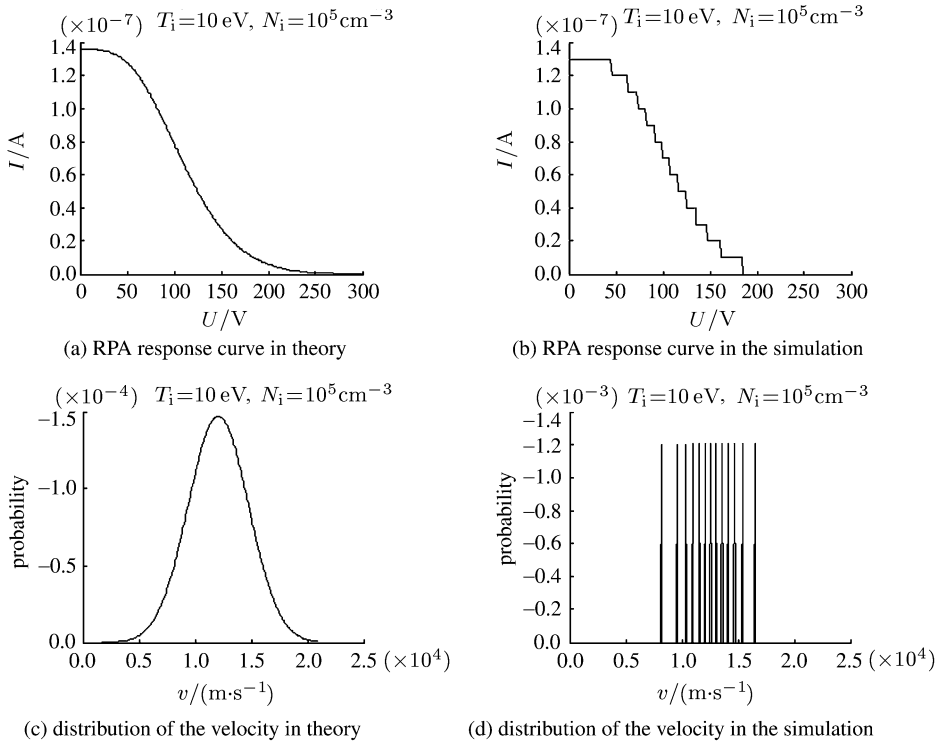


图 3　理论曲线与模拟曲线的对比

Fig. 3　Contrast between theory curve and simulation curve

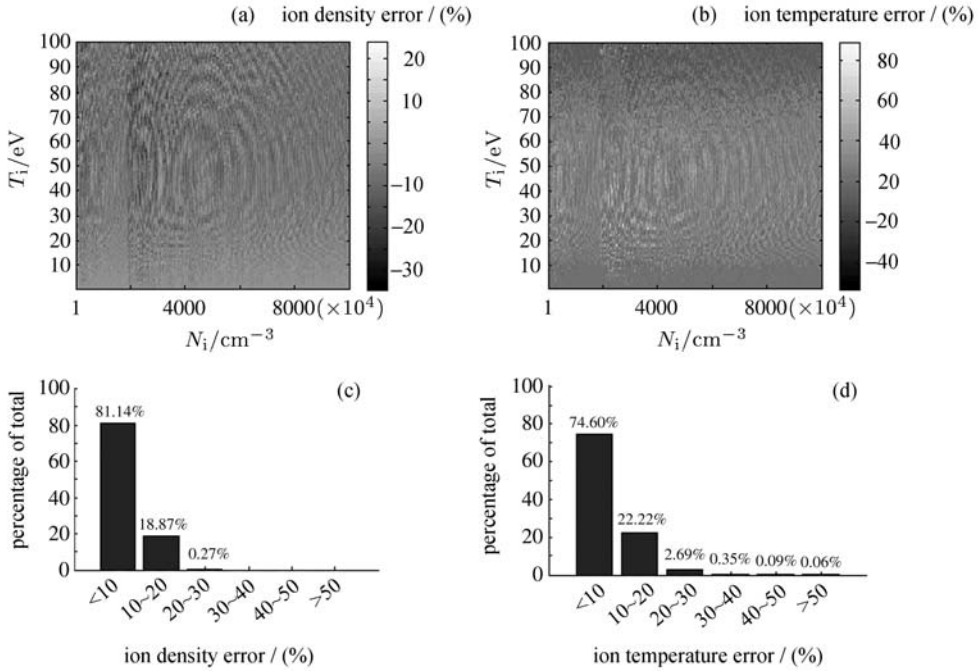


图 4　完整测量范围内测量误差分布

Fig. 4　Measurement errors distribution in the measurement range

表 1 数值实验离子密度和温度算法误差指标

Table 1 Error indicators of ion density and ion temperature in the numerical experiment

	离子密度 (N_i)	离子温度 (T_i)
平均误差绝对值/(%)	6.62	7.45
最大误差绝对值/(%)	34.52	68.57
误差绝对值小于 10% 的概率/(%)	81.14	74.60

遍历所有测量范围, 可得如图 4 所示的误差分布.

统计整个测量范围内, 离子密度和温度的误差情况 (见表 1) 可以看出, 这种基于统计方法的阻滞势分析器数据处理算法的准确度是符合设计要求的. 如果不考虑实时性要求, 配合信号滤波等数据处理手段将得到更高的算法精度.

对优化后的算法运算量进行统计, 平均每个采样点要进行 16 位定点数的 3 次加法、3 次乘法和 1 次除法运算以及若干寻址、逻辑判断等运算. 即使采用 12 MHz 的 8031 处理器, 也可以在 0.5 s 内完成数据处理, 这证明本算法符合快速处理的要求.

5 结论

提出了一种基于统计的阻滞势分析器数据处理算法, 这种算法的特点是, 易于在实际工程中实现, 适应航天器在轨实时处理的要求. 本算法是对所有测量点进行统计运算, 在一定程度上消除了单点测量噪声的影响, 因此对单点测量值精度要求较低, 整体测量精度较好.

本算法适应于待测带电粒子相对于其他粒子占据主导地位的条件, 无法适应于阻滞势分析器在粒子分辨方面的应用, 非常适合在电推进诊断上进行星上的实时处理. 如果能结合地面数据分析处理, 对阻滞势分析器的响应曲线进行有针对性地科学分析, 那么本算法将使阻滞势分析器的应用更加灵活和广泛.

参考文献

[1] Knudsen W C. Evaluation and demonstration of the use of retarding potential analyzers for measuring several ionospheric quantities [J]. *J. Geophys. Res.*, **71**:4669-4678

[2] Wei P S P, Cho A Y, Caldwell C W. Instrumental effects of the retarding grids in a LEED apparatus [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1969, **40**:1075-1079

[3] William C Knudsen, Karl Spenner, Jack Bakke, Vit NovaK. Pioneer venus orbiter planar retarding potential analyzer plasma experiment [C]//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensin G, 1980, **GE-18**:54-59

[4] Hanson W B, Zuccaro D R, Loppincott C R, Sanatani S. The retarding potential analyzer on atmosphere explorer-C [J]. *Radio Sci.*, 1973, **8**:333

[5] Matticari G, Matucci A, Noci G, Mattavelli M, Borie D. Electric propulsion diagnostic packages for the characterization of thruster plume-spacecraft interactions [R]//Second European Spacecraft Propulsion Conference, Noordwijk. 1997

[6] Hanson W B, Sanatani S, Zuccaro D, Flowerday T W. Plasma measurements with the retarding potential analyzer on Ogo 6 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**:5483-5501

[7] Partridge J, Gatsonis N. Optimization of a micro-retarding potential analyzer for high-density flowing plasmas [R]// The 33rd IEEE International Conference on, 2006. 13

[8] King Lyon B, Gallimore Alec D, Marrese Colleen M. Transport-property measurements in the plume of an SPT-100 Hall thruster [J]. *J. Prop. Power*, 1998, **14**:327-335

[9] Jiao Weixin. Space Exploration [M]. Beijing: Peking University Press, 2002. in Chinese (焦维新. 空间探测 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002)