

电磁监测试验卫星离子漂移计探测技术

郑香脂 张爱兵 关燧炳 刘超 孙越强 王文静 田峥 孔令高 丁建京

Ion drift meter aboard China seismo-electromagnetic satellite

Zheng Xiang-Zhi Zhang Ai-Bing Guan Yi-Bing Liu Chao Sun Yue-Qiang Wang Wen-Jing Tian Zheng Kong Ling-Gao Ding Jian-Jing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 209401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.209401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.209401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电磁监测试验卫星阻滞势分析器探测技术

[Research on retarding potential analyzer aboard China seismo-electromagnetic satellite](#)

物理学报.2017, 66(7): 079401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.079401>

电磁监测试验卫星朗缪尔探针电离层探测技术

[The ionosphere measurement technology of Langmuir probe on China seismo-electromagnetic satellite](#)

物理学报.2016, 65(18): 189401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.189401>

火箭尾焰对高频回波的影响及其频域能量凝聚检测方法

[Effect of rocket flame on high-frequency echo and its frequency energy agglomerated detection method](#)

物理学报.2014, 63(11): 119401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.119401>

空间微小碎片超高速撞击诱发的等离子体特性研究

[Study on plasma characteristics from hypervelocity impacts by small space debris](#)

物理学报.2014, 63(1): 019401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.019401>

电磁监测试验卫星离子漂移计探测技术*

郑香脂^{1)2)3)†} 张爱兵¹⁾²⁾ 关焱炳¹⁾²⁾ 刘超¹⁾²⁾ 孙越强¹⁾²⁾ 王文静¹⁾²⁾
田峥¹⁾²⁾ 孔令高¹⁾²⁾ 丁建京¹⁾²⁾

1)(中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2)(天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年5月2日收到; 2017年6月7日收到修改稿)

依据电磁监测试验卫星的任务要求, 自主研发了等离子体分析仪, 用于探测电离层等离子体的离子密度、温度、成分、漂移速度和密度的涨落. 等离子体分析仪由阻滞势分析器、离子漂移计和离子捕获计组成, 其中离子漂移计用于探测离子垂直轨道方向的漂移速度. 通过分析电离层等离子体的离子漂移速度特性, 确定仪器的性能指标. 离子漂移计传感器采用多层栅网压紧结构, 栅网材料选用铍铜, 各层栅网之间采用聚酰亚胺绝缘. 依据技术指标, 详细设计了离子漂移计传感器的窗口尺寸、传感器几何高度和收集极半径. 在电子学电路设计时通过前放电路三个可调量程的设计, 保证了电路测量范围和精度, 并通过实验进行验证. 在此基础上, 借助意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所的地面等离子体环境, 完成了离子漂移计的等离子体环境测试. 测试结果表明, 离子漂移计垂直轨道方向漂移速度测量结果的变化趋势与转台设定值变化趋势一致, 且测试精度指标满足设计要求, 能够满足电磁监测试验卫星的任务需求.

关键词: 等离子体分析仪, 离子漂移计, 电磁监测试验卫星, 离子漂移速度

PACS: 94.80.+g, 94.20.Fg, 07.87.+v

DOI: 10.7498/aps.66.209401

1 引言

目前, 国内外已利用卫星数据发现了大量地震与电离层等离子体参数相互耦合的事例. 特别是法国 Demeter 卫星发射以来, 电离层等离子体参数扰动已被大量探测结果所证实, 通常表现为震前几日等离子体密度、温度和成分的异常扰动^[1-9]. 地震引起电离层参数扰动的幅度一般为15%—30%, 但一些大震前可能超过100%^[10].

地震孕育和发生过程中, 电磁场和地壳构造等都会出现不同程度的变化, 这些变化会对震源区周围的岩石圈造成不同程度的影响, 这种影响通过大气圈最终引起电离层扰动^[11]. 除应力变化引起压磁、压电效应外, 还可能通过感应磁效应、动电磁效

应以及热磁效应等产生地震电磁前兆异常^[10]. 虽然目前对岩石圈—大气层—电离层耦合机理还没有形成统一的观点, 但是已经出现了一些耦合模型. 地震可能通过化学途径、声学途径和电磁途径等传播途径引起电离层扰动^[11].

利用卫星技术进行地震相关的空间电磁现象的观测, 具有覆盖全面、时间连续和效率高等特点, 对地震的反应更加灵敏^[12]. 电磁监测试验卫星(CSES)是我国地震立体观测体系的第一个专用天基平台, 主要用于监测与地震相关的空间电离层电磁异常. 等离子体作为电磁监测试验卫星轨道的核心要素, 其观测数据是地震-电离层耦合关系研究及地震预报的基础^[13].

等离子体分析仪是电磁监测试验卫星的主要载荷之一, 由阻滞势分析器(RPA)、离子漂移计

* 国家科技重大专项(批准号: Y26604AG90)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zxz@nssc.ac.cn

(IDM) 和离子捕获计 (ICM) 组成, 用于测量电离层等离子体中的离子成分、离子密度、离子温度、离子漂移速度以及离子密度涨落等^[14]. 其中, 离子漂移计主要用于探测等离子体的整体垂直轨道方向漂移速度, 其数据可用于研究电离层的能量输运过程、大尺度电场等, 对地震-电离层耦合的研究具有重要意义.

2 指标分析

低端离子漂移速度约为几十米每秒, 高端速度约有 1.5 km/s. 电离层极区扰动时漂移速度可能变化范围为 10—100 m/s. 此外, 赤道超声速等离子体泡的漂移速度可能会更高, 超过 2 km/s^[15]. 因此, 中国电磁监测试验卫星离子漂移计指标确定如下: 离子垂直于轨道方向的漂移速度测量范围为 -3—3 km/s; 通常等离子体条件下漂移速度相对测量精度为 ± 20 m/s. 中国电磁监测试验卫

星离子漂移计性能指标与法国 Demeter 卫星^[15] 以及美国 DMSP 卫星^[16] 同类仪器的性能指标对比如表 1 所示.

中国电磁监测试验卫星通过对电离层特性的分析提出以 F107 作为等离子体条件的划分依据, 并规定 F107 在 65—200 之间为通常等离子体条件. 在通常等离子体条件下, 500 km 轨道高度上电子密度变化范围约为 $3 \times 10^3—3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 离子温度变化范围约为 900—1750 K. 根据等离子体的电中性特点 (电子密度等于离子密度), 通常等离子体条件下离子密度变化范围为 $3 \times 10^3—3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$. 这些参数范围涵盖了 500 km 电离层可能出现的绝大多数情况. 电磁监测试验卫星等离子体分析仪指标要求离子漂移计在通常等离子体条件下的相对测量精度优于 ± 20 m/s, 且要求等离子体分析仪密度探测范围为 $5 \times 10^2—1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ^[14], 所以离子漂移计的测量动态范围应设计有足够的余量.

表 1 电磁监测试验卫星离子漂移计指标和国际同类仪器对比
Table 1. Performance comparison among CSES and similar international instruments.

仪器	电磁监测试验卫星 离子漂移计	Demeter 卫星 离子漂移计	美国 DMSP 卫星 离子漂移计
离子垂直于轨道方向漂移速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	-3—3	-2—2	-2.7—2.7
离子垂直于轨道方向漂移速度相对测量精度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	± 20	± 15	± 50

3 离子漂移计工作原理

中国电磁监测试验卫星离子漂移计内部结构如图 1 所示^[17], 传感器入口栅网 G1 处为地电位, 安装时与同一电位的导体扩展板齐平, 保持传感器开口处的电场均匀, 且屏蔽传感器内部电压对等离子体的干扰. 由于 H^+ 离子质量小, 热速度大, 进入传感器后会影响探测精度, 所以栅网 G2 保持 +2 V 电位, 阻止 H^+ 进入传感器. 双层栅网 G3 和栅网 G4 处都为地电位, 保证离子有足够的漂移距离. 抑制栅网 G5 保持 -12 V 偏压, 阻止等离子体中的电子到达收集极, 同时防止收集极上的二次电子和光电子逃逸. 传感器内还包含 4 个面积相等的收集极 A, B, C 和 D. 4 个收集极电流分别为 I_A , I_B , I_C 和 I_D , 收集极 A, C 收集的电流叠加为 I_{AC} , 收集极 B, D 收集的电流叠加为 I_{BD} .

电流 I_{AC} 和 I_{BD} 满足如下关系:

$$\frac{I_{AC}}{I_{BD}} = \frac{w - 2h^* \tan \alpha}{w + 2h^* \tan \alpha}, \quad (1)$$

式中 w 为传感器窗口的边长, h^* 为传感器的有效高度; α 为等离子体沿 +Y 方向的入射角. +Y 方向的离子漂移速度 V_{dY} 计算公式为^[18-20]

$$\begin{aligned} V_{dY} &= (V_r^2 - 2e\phi/m_i)^{1/2} \tan \alpha \\ &= (V_r^2 - 2e\phi/m_i)^{1/2} \frac{w(1 - I_{AC}/I_{BD})}{2h^*(1 + I_{AC}/I_{BD})}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 V_r 是离子整体的纵向移动速度, 由阻滞势分析器探测得到; e 为电子电荷; ϕ 为卫星电位; m_i 为氧离子的质量.

设收集极 A, B 收集的电流之和为 I_{AB} , 收集极 C, D 收集的电流之和为 I_{CD} , 则

$$\frac{I_{AB}}{I_{CD}} = \frac{w - 2h^* \tan \theta}{w + 2h^* \tan \theta}, \quad (3)$$

式中 θ 为等离子体沿 +Z 方向的入射角. 同理, +Z 方向的离子漂移速度 V_{dZ} 计算公式为

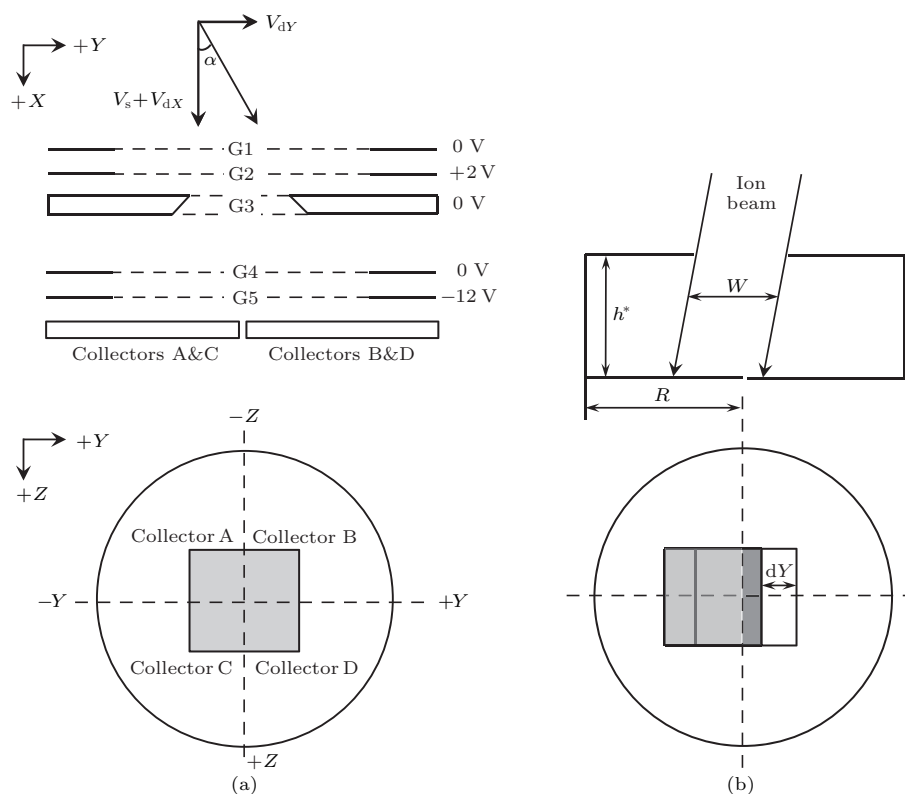

 图1 离子漂移计结构示意图^[17] (a) 栅网及收集极示意图; (b) 离子入射示意图

 Fig. 1. Structural diagram of ion drift meter^[17]: (a) Diagram of gratings and collectors; (b) diagram of ion incidence.

$$V_{dz} = (V_r^2 - 2e\phi/m_i)^{1/2} \tan \theta$$

$$= (V_r^2 - 2e\phi/m_i)^{1/2} \frac{w(1 - I_{AB}/I_{CD})}{2h^*(1 + I_{AB}/I_{CD})}. \quad (4)$$

此外, 传感器有效高度 h^* 与传感器几何高度 h 之间的关系为^[19]

$$h^* = h - 2d + 2V_r \frac{\sqrt{V_r^2 + 2ad} - V_r}{a}, \quad (5)$$

式中 $a = -U_{G5}e/(dm_i)$, U_{G5} 为栅网 G5 的偏压; d 为 G4, G5 以及收集极之间的距离.

4 传感器设计

4.1 传感器栅网设计

离子漂移计的传感器采用多层栅网压紧结构, 栅网材料选用铍铜, 并采用镀金的方法增加表面功函数和抗原子氧腐蚀能力. 各层栅网之间采用聚酰亚胺绝缘. 阻栅网设计方案如图2所示, 网孔设计为蜂窝状正六边形小孔, 网丝间距设计为 (1 ± 0.01) mm, 网丝宽度和厚度均设计为 (0.1 ± 0.01) mm, 栅网单层正面透过率设计为 $82.64\% \pm 1.4\%$. 6层栅网总透过率为单层栅网透过率的6次方^[14].

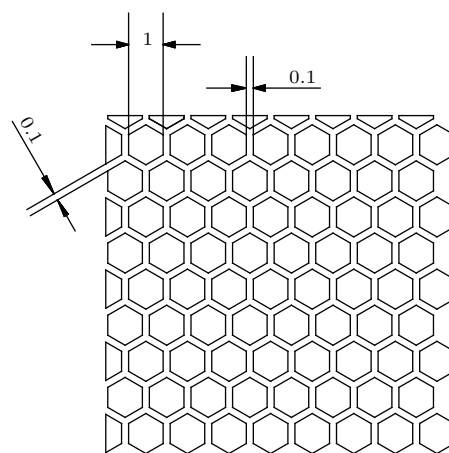


图2 栅网设计示意图

Fig. 2. The diagram of grid.

4.2 传感器几何尺寸设计

离子漂移计传感器几何尺寸设计的主要依据是仪器的性能指标. 根据离子漂移速度 $-3 \sim 3$ km/s 的探测范围, 要求离子漂移计的视场角满足

$$\arctan\left(\frac{w}{2h^*}\right) \geq \arctan\left(\frac{3}{7.6}\right). \quad (6)$$

此外, 由离子漂移计探测原理可知, 离子入射角的测量精度由电流检测精度决定. 根据离子漂移速度的探测精度指标 (20 m/s), 并依照 (2) 式和 (4) 式进行误差传递, 计算得到电流检测相对精度优于 0.4%. 因此, 离子漂移计传感器设计的另一个重要依据就是要满足量程低端的精度要求. ΔI 为电子学电路的实际电流检测精度, 为保证信噪比, ΔI 取值为 2 pA. 同时考虑在通常等离子体密度低端 ($3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$), 离子以较大的漂移速度进入传感器时, 离子漂移计的几何结构需要满足

$$w \left(0.5w - \frac{3000}{7600} h^* \right) \times 3 \times 10^9 K V_s e \geq \frac{\Delta I}{0.4\%}, \quad (7)$$

式中 K 为 6 层栅网的总透过率, e 为单位电荷, V_s 为卫星运动速度 (对电磁监测试验卫星, $V_s = 7600 \text{ m/s}$), h^* 为传感器有效高度. 结合 (6) 式和 (7) 式的限定条件, 考虑到卫星平台资源, 离子漂移计传感器窗口边长 w 和传感器几何高度 h 的设计值分别为 40 和 20 mm, 相应的传感器有效高度 h^* 为 17.6 mm, 传感器内壁半径 R 的设计值为 50 mm.

在通常等离子体条件下, 由于 G2 栅网的阻挡作用, 只有 O^+ 能进入传感器. 考虑到空间环境较为极端的情况, 当离子温度为 3000 K 时对应 O^+ 的热速度为 1.8 km/s, 结合离子漂移速度指标上限 3 km/s, 则 O^+ 离子的最大入射角为 $\arctan \frac{1.8 + 3}{7.6} = 32.3^\circ$. 而在当前设计尺寸下, 离子若要到达传感器内壁, 入射角至少为 $\arctan \frac{R - 1.414w/2}{h^*} = 51^\circ$. 因此, $R = 50 \text{ mm}$ 可以满足设计要求, 且留有充分的余量.

5 电子学电路设计

等离子体分析仪三个传感器独立工作, 每个传感器的前放板安装在圆筒形传感器外壳内, 并通过外壳底板进一步屏蔽, 最后作为整体安装在机箱中. 如图 3 所示, 阻滞势分析器和离子捕获计传感器分别对应一个前放板, 离子漂移计包括两块前放板. 阻滞势分析器传感器和电子学箱为一体化设计, 电子学箱分别通过电缆与离子漂移计和离子捕获计连接.

离子漂移计前放电路直接测量的参数是电流信号. 根据等离子体分析仪离子密度测量指标 ($5 \times 10^2 - 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$)、传感器几何尺寸和栅网

透过率, 计算得到离子漂移计的电流测量范围至少覆盖 $4 \times 10^{-5} - 2.4 \mu\text{A}$. 离子漂移计的精度指标则要求通常等离子体条件下电流检测相对精度优于 0.4%. 为满足电流相对测量精度指标, 要求电路测量噪声小于 1 mV. 电磁监测试验卫星离子漂移计电流测量动态范围很宽, 低端电流非常微弱, 且电流测量精度要求很高. 鉴于此, 电磁监测试验卫星离子漂移计采用分量程 (量程 00、量程 01 和量程 02) 的设计思路, 每个量程对应不同增益, 并通过软硬件结合的方法实现宽动态电流的高精度测量. 在低端信号弱时, 采用高增益放大; 在高端信号强时, 降低增益, 避免饱和. 此外, 通过现场可编程门阵列 (FPGA) 软件算法设计实现自动增益调整. 表 2 为离子漂移计量程划分和测量精度要求. 为防止电流在两个量程临界处变化而引起量程频繁切换, 相邻量程存在交叠设计.

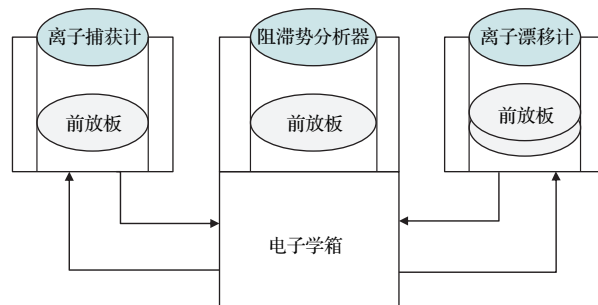


图3 等离子体分析仪组成框图

Fig. 3. The diagram of plasma analyzer.

表2 离子漂移计量程划分

Table 2. The three ranges of ion drift meter.

参数	量程 00	量程 01	量程 02
测量范围	0.02—20 nA	0.01—0.33 μA	0.2—6 μA
测量精度	大于 500 pA 时优于 0.4%		

电子学箱中 FPGA 控制采集电路按照时序采集离子漂移计前放板输出的电压信号, 而后对采集的数据进行阈值比较, 根据阈值比较的结果选择合适的量程, 再将采集的电压信号及其量程信息通过科学数据包下传. 离子漂移计采样频率为 200 Hz, 仪器工作模式分为详查模式和巡查模式. 详查模式下每 0.5 s 产生一个科学数据包, 巡查模式下每 1 s 产生一个科学数据包.

离子漂移计装配完成后, 通过测试针引入电流, 测得离子漂移计电子学电流测量范围如表 3 所示, 电子学电路噪声测试结果如表 4 所示. 测试结

果表明, 仪器电流测量范围满足要求, 仪器噪声水平小于 0.25 mV, 电流检测精度优于 0.2%, 满足设计要求.

表 3 离子漂移计电流测量范围测量结果

Table 3. The results of current test range of ion drift meter.

参数	设计值/A		测试结果/A	
	Min	Max	Min	Max
I_A	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6.0×10^{-6}
I_B	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6.0×10^{-6}
I_C	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6.0×10^{-6}
I_D	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6.0×10^{-6}

表 4 电子学噪声测量结果

Table 4. The results of electronic noise.

参数	测试结果/V		
	量程 00	量程 01	量程 02
I_A	1.86×10^{-4}	2.04×10^{-4}	2.00×10^{-4}
I_B	1.99×10^{-4}	1.97×10^{-4}	2.09×10^{-4}
I_C	1.89×10^{-4}	2.10×10^{-4}	2.00×10^{-4}
I_D	1.84×10^{-4}	2.07×10^{-4}	1.82×10^{-4}

6 等离子体环境下的测试分析

2016年6月, 使用根据以上方案自主研发的电磁监测试验卫星等离子体分析仪正样产品, 在意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所 (INAF-IAPS) 进行了等离子体环境下的定标测试实验.

INAF-IAPS 的等离子体实验设备中, 氩气 (Ar) 为工作介质, 等离子体源安装在真空罐的一端, 产生的等离子体环境在真空罐内的分布存在一定梯度^[21,22], 即离子密度大小随着与等离子体源距离的增加而减小, 如图 4 所示.

根据仪器的工作原理, 离子漂移计通过探测离子入射角进而推算得到离子垂直轨道方向的漂移速度. 由于离子垂直轨道方向的漂移速度等价于离子的入射角度, 在 INAF-IAPS 进行等离子体环境定标测试时, 利用转台改变离子漂移计相对于等离子体束流的入射方向, 可获得不同角度特征点下的测试. 离子漂移计要测量两个垂直方向 (Y 方向和

Z 方向) 的离子漂移速度, 而 INAF-IAPS 转台只有一维转动, 因此, 实验中通过改变仪器安装状态实现离子漂移计水平和竖直两个方向的测试. 离子漂移计在真空罐内的水平安装如图 5 所示.

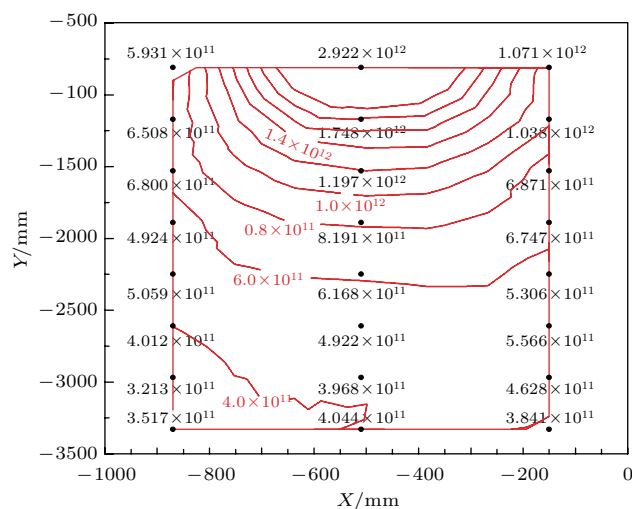


图 4 IAPS 等离子体真空罐内的密度分布梯度

Fig. 4. Ion density distribution in IAPS plasma vacuum tank.

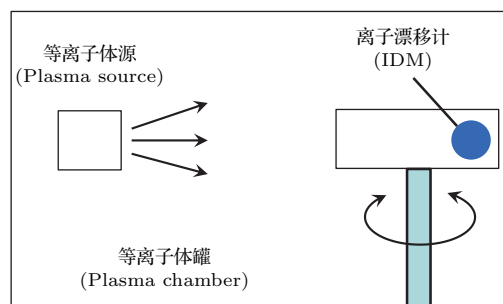


图 5 离子漂移计安装示意图

Fig. 5. The diagram of ion drift meter in the vacuum tank.

在模拟的等离子体环境下, 等离子体状态稳定时可认为离子漂移速度为定值, 根据多次测量后的均方差可以获得离子速度相对精度. 实验中分别在每个测量角度处多次测量等离子体的漂移速度并计算均方差, 从而得到测量精度. 均方差计算公式为

$$\delta V_x = \sqrt{\frac{\sum_j (V_{xj} - \bar{V}_x)^2}{n-1}}, \quad (8)$$

式中 V_{xj} 为第 j 次测量得到的漂移速度; $\bar{V}_x$ 为测量得到的漂移速度的平均值; n 为测量次数.

此外 IAPS 转台的误差约为 $\pm 2^\circ$, 仪器的量程为 $\pm 23^\circ$, 测试时转台角度应大于仪器的量程.

6.1 离子漂移计 Y 方向漂移速度测试

如图 6 所示, 测量 Y 方向漂移速度时, 离子漂移计水平安装, 测试结果如表 5 和图 7 所示. 由测量数据可知, 漂移速度测量结果的变化趋势与转台设定值变化趋势一致, 但与转台设定值之间的差值超过了 2°. 这是由于等离子体源本身是一个点源, 理论上离子从等离子体源发射时有一定的发射角, 而离子漂移计与等离子体源的中心轴有 0.16 m 的偏离. 离子漂移计与等离子体源间的距离约为 3 m, 根据三角函数关系可得, 离子漂移计偏离中心轴所带来的角度几何偏差为 3.05° (角度修正后结果如表 5 所示); 此外, 离子从等离子体源发射时的锥角本身可能存在一定的偏差, 这两者共同构成了离子漂移计和转台间的系统偏差. 将偏离中心轴角度偏差修正后, 漂移速度测量结果与转台设定值变化趋势一致, 误差基本小于 2°. 此外, 从表 5 数据可知, 漂移速度测量精度远好于 20 m/s 的指标要求.

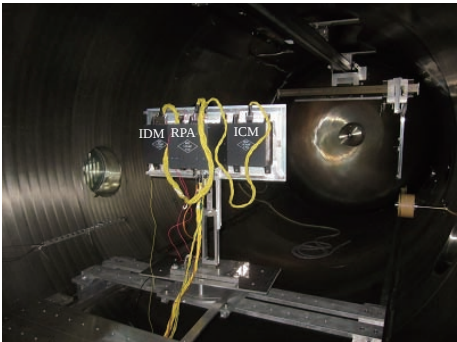


图 6 离子漂移计水平安装状态

Fig. 6. Mounting ion drift meter on the rotating platform horizontally.

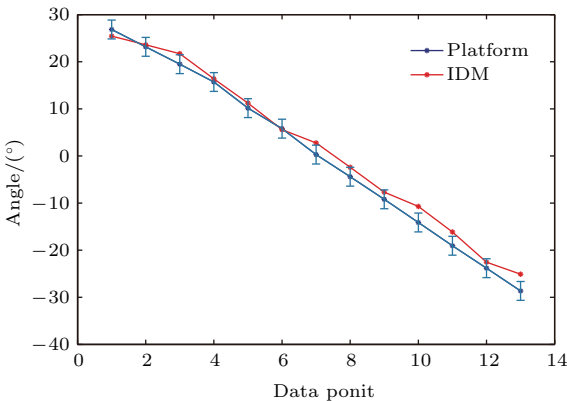


图 7 离子漂移计水平安装时的测量结果

Fig. 7. Experiment results for horizontally mounted ion drift meter.

表 5 离子漂移计水平安装状态下的测试结果

Table 5. Experiment results for horizontally mounted ion drift meter.

转台 角度/(°)	角度 修正/(°)	测试 结果/(°)	漂移 速度/m·s ⁻¹	漂移速度 精度/m·s ⁻¹
26.84	23.79	22.05	2628.59	1.09
23.16	20.11	20.21	2412.50	1.33
19.48	16.43	18.31	2265.69	1.33
15.70	12.65	12.97	1640.85	1.40
10.16	7.11	7.82	1012.21	1.48
5.80	2.75	2.20	285.64	1.74
0.30	-2.75	-0.63	-82.07	1.34
-4.40	-7.45	-5.80	-761.29	1.38
-9.20	-12.25	-11.10	-1454.00	1.64
-14.12	-17.17	-14.10	-1823.50	1.46
-19.06	-22.11	-19.50	-2475.70	1.52
-23.82	-26.87	-25.90	-3256.30	1.17
-28.64	-31.69	-28.50	-3444.20	1.91

6.2 离子漂移计 Z 方向漂移速度测试

如图 8 所示, 测量 Z 方向漂移速度时, 离子漂移计竖直安装, 测试结果如表 6 和图 9 所示, 可见 Z 向速度测量结果的变化趋势与转台设定值变化趋势一致. 同样, 离子从等离子体源发射时的锥角本身存在一定偏差, 造成离子漂移计和转台之间的系统偏差. 在每个角度测量点处均测量漂移速度的精度, 结果如表 6 所示, 精度优于 20 m/s, 满足指标要求.

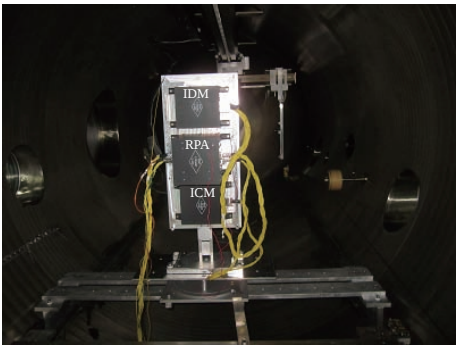


图 8 离子漂移计竖直安装状态

Fig. 8. Mounting ion drift meter on the rotating platform vertically.

表6 离子漂移计竖直安装状态下特征点处的测量结果
Table 6. Experiment results for vertically mounted ion drift meter.

转台设定 角度/(°)	IDM测试 结果/(°)	漂移 速度/m·s ⁻¹	漂移速度 精度/m·s ⁻¹
27.50	24.21	2908.70	0.83
24.20	20.56	2466.42	2.43
20.65	16.58	2043.88	0.98
16.15	13.15	1655.45	2.32
10.48	7.19	922.30	0.81
6.43	4.94	640.95	0.88
0.98	-1.95	-250.98	2.02
-3.75	-6.01	-780.60	0.66
-8.75	-10.40	-1337.90	0.84
-14.33	-15.30	-1934.70	0.63
-18.65	-18.80	-2346.50	0.81
-23.88	-24.80	-2972.00	0.88
-28.33	-27.30	-3184.10	0.75

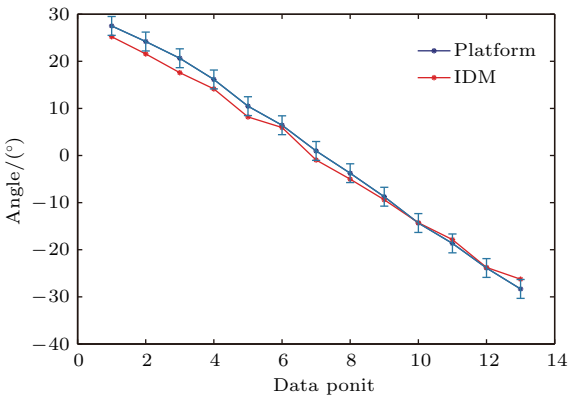


图9 离子漂移计竖直安装时的测量结果
Fig. 9. Experiment results for vertically mounted ion drift meter.

7 结 论

依据电磁监测试验卫星的任务要求, 本文详细设计了离子漂移计的探测技术方案, 并自主完成了离子漂移计的研制工作. 在此基础上, 我们借助意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所的等离子体环境, 进行了离子漂移计的地面环境测试. 测试结果表明该离子漂移计的性能指标满足设计要求.

电磁监测试验卫星等离子体分析仪的研制将使我国首次实现电离层等离子体原位探测. 作为等离子体分析仪的重要组成部分, 离子漂移计获得的

电离层等离子体的垂直轨道方向漂移速度, 对研究电离层扰动特征和大震短临预测新方法都有重要的意义, 同时可为深入探究电离层-地震耦合关系及实现地震预报的突破提供科学数据.

参考文献

[1] Liu J, Huang J P, Zhang X M, Shen X H 2013 *Acta Seismol. Sin.* **35** 72 (in Chinese) [刘静, 黄建平, 张学民, 申旭辉 2013 地震学报 **35** 72]

[2] Yan R, Wang L W, Hu Z, Liu D P, Zhang X G, Zhang Y 2013 *Acta Seismol. Sin.* **35** 498 (in Chinese) [颜蕊, 王兰炜, 胡哲, 刘大鹏, 张兴国, 张宇 2013 地震学报 **35** 498]

[3] Sarkar S, Choudhary S, Sonakia A, Vishwakarma A, Gwal A K 2012 *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **12** 671

[4] Yao L 2011 *Postdoctoral Research Report* (Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration) (in Chinese) [姚丽 2011 博士后研究报告 (北京: 中国地震局地球物理研究所)]

[5] Zhang X M, Liu J, Shen X H, Parrot M, Qian J D, Ouyang X Y, Zhao S F, Huang J P 2010 *Chinese J. Geophys.* **53** 567

[6] Jiao Q S, Yan R, Zhang J F 2011 *Earthquake* **31** 68 (in Chinese) [焦其松, 颜蕊, 张景发 2011 地震 **31** 68]

[7] Zhu R 2007 *M.S. Thesis (Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration)* (in Chinese) [朱荣 2007 硕士学位论文 (北京: 中国地震局地球物理研究所)]

[8] Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J 2014 *Chinese J. Geophys.* **57** 364 (in Chinese) [闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉 2014 地球物理学报 **57** 364]

[9] Liu J, Wan W X 2014 *Chinese J. Geophys.* **57** 2181 (in Chinese) [刘静, 万卫星 2014 地球物理学报 **57** 2181]

[10] Ding J H, Shen X H, Pan W Y, Zhang J, Yu S R, Li G, Guan H P 2006 *Chin. J. Radio Sci.* **21** 791 (in Chinese) [丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 张晶, 余素荣, 李纲, 关华平 2006 电波科学学报 **21** 791]

[11] Nilupar T, Zhang Y X 2012 *Earthquake* **32** 103 (in Chinese) [尼鲁帕尔·买买吐孙, 张永仙 2012 地震 **32** 103]

[12] Zhao G Z, Chen X B, Cai J T 2007 *Progress in Geophysics* **22** 667 (in Chinese) [赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛 2007 地球物理学进展 **22** 667]

[13] Wang L W, Shen X H, Zhang Y, Zhang X G, Hu Z, Yan R, Yuan S G, Zhu X H 2016 *Acta Seismol. Sin.* **38** 376 (in Chinese) [王兰炜, 申旭辉, 张宇, 张兴国, 胡哲, 颜蕊, 袁仕耿, 朱兴鸿 2016 地震学报 **38** 376]

[14] Zheng X Z, Zhang A B, Guan Y B, Liu C, Wang W J, Tian Z, Kong L G, Sun Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 079401 (in Chinese) [郑香脂, 张爱兵, 关隼炳, 刘超, 王文静, 田峥, 孔令高, 孙悦强 2017 物理学报 **66** 079401]

[15] Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F 2006 *Planet. Space Sci.* **54** 487

- [16] Rich F J 1994 *Research Report of Massachusetts: Air Force Phillips* Hanscom AFB 1994-06
- [17] Feng Y B 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [冯宇波 2011 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [18] Stoneback R A, Davidson R L, Heelis R A 2012 *J. Geophys. Res.* **117** A08323
- [19] Heelis R A, Hanson W B 1998 *Measur. Tech. Space Plasmas Geophys. Monogr. Ser.* **102** 61
- [20] Heelis R A, Hanson W B, Lippincott C R, Zuccaro D R 1982 *Research Report of Space Science Instrumentation* NASA-CR-166795
- [21] Vannaroni G, Michele D S, Giammaria F, Bruno R, Parisi M 2010 *Research Report of INAF/IFSI* INAF/IFSI-2010-6
- [22] Vannaroni G, Bruno R, Giammaria F, Pietropaolo E, Parisi M 2009 *Research Report of INAF/IFSI* INAF/IFSI-2009-18

Ion drift meter aboard China seismo-electromagnetic satellite*

Zheng Xiang-Zhi^{1)2)3)†} Zhang Ai-Bing¹⁾²⁾ Guan Yi-Bing¹⁾²⁾ Liu Chao¹⁾²⁾
 Sun Yue-Qiang¹⁾²⁾ Wang Wen-Jing¹⁾²⁾ Tian Zheng¹⁾²⁾
 Kong Ling-Gao¹⁾²⁾ Ding Jian-Jing¹⁾²⁾

1) (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 2 May 2017; revised manuscript received 7 June 2017)

Abstract

A lot of electromagnetic anomalies observed by satellites before earthquakes indicate that there is interrelation between earthquake and ionosphere. China seismo-electromagnetic satellite (CSES) is the first Chinese space-based platform of three-dimensional earthquake monitoring system. The scientific payload of plasma analyzing package (PAP) aboard CSES is designed to study the possible influence of the seismic activity on the ionospheric plasma and thereby to monitor the earthquakes from space. The PAP is made up of three sensors, retarding potential analyzer (RPA), ion drift meter (IDM), and ion capture meter (ICM). The main objective of IDM is to detect the ion bulk velocity from -3 to 3 km/s with a precision better than ± 20 m/s, perpendicular to the sensor-look direction.

The IDM sensor consists of six-layer grids and a collector. The grid is made of beryllium copper, plated with gold. Polyimide is used to achieve electrical insulation between grids. The grid transmission rate of signal layer is designed to be 82.64%, and total transmission rate of six layers is 31.85%. To ensure the performance of IDM, the side length of the square aperture and the depth of the sensor are designed to be 40 and 20 mm, respectively. The radius of segmented planar collector is 50 mm. The arrival angle of the ions is determined by measuring the ratio between the currents from the different electrically isolated collector segments. Accordingly, velocity perpendicular to the sensor-look direction is calculated, based on arrival angle and ion velocity parallel to the sensor-look direction which is measured by the RPA.

In addition, a wide-range and high-precision current measurement circuit is designed to measure the current of IDM. The preamplifier circuit has three measurement ranges, providing different amplification factors. The right measurement range is chosen automatically by the field programmable gate array (FPGA). The test results show that the circuit provides a total measuring dynamic range from 20 pA to 6 μ A with an accuracy better than 0.4%.

Finally, the method of testing in the plasma environment and the measurement results are discussed. The plasma environment test of the IDM flight model is carried out in the Institute for Space Astrophysics and Planetology, National Institute of Astrophysics (INAF-IAPS). Since the plasma source is fixed to a large volume vacuum tank, the arrival angle of the plasma with respect to the sensor-look direction is changed by horizontally or vertically mounted IDM on the rotating platform in the vacuum tank. As the platform rotates, the performance of IDM is proved by testing different ion arrival angles in vacuum tank. The ion velocities along the Y and Z axes of the spacecraft are validated by testing the horizontal arrival angle and the vertical arrival angle respectively. The IDM test data are consistent with those obtained under the setting angle of the rotating platform. The experimental results show that the detector has good performance and will fulfill the mission goal of monitoring the bulk velocity of ion, perpendicular to the sensor-look direction.

Keywords: plasma analyzing package, ion drift meter, seismo-electromagnetic satellite, ion drift velocity

PACS: 94.80.+g, 94.20.Fg, 07.87.+v

DOI: 10.7498/aps.66.209401

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. Y26604AG90).

† Corresponding author. E-mail: zxz@nssc.ac.cn