0254-6124/2017/37(6)-729–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHENG Xiangzhi, ZHANG Aibing, GUAN Yibing, LIU Chao, TIAN Zheng, KONG Linggao, WANG Wenjing, DING Jianjing. Research on the calibration of ion drift meter aboard CSES (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(6): 729-737. DOI:10.11728/cjss2017.06.729

电磁监测试验卫星离子漂移计定标实验研究 *

郑香脂[1,2,3] 张爱兵[1,2] 关燚炳[1,2] 刘 超[1,2]
田 峥[1,2] 孔令高[1,2] 王文静[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)

摘 要 离子漂移计用于探测离子垂直轨道方向的漂移速度. 离子漂移计的定标实验包括电子学定标和等离子体环境定标. 通过对自行研制的电磁监测试验卫星离子漂移计的电子学定标方法研究, 测试得到离子漂移计的噪声、电流测量范围、增益和修正系数以及温漂等电子学定标参数. 测试结果表明, 离子漂移计的电子学性能优于设计要求, 满足科学探测需求. 此外, 借助于意大利 INAF-IAPS 等离子体测试实验设备模拟电离层等离子体环境, 对离子漂移计的等离子体环境定标问题进行了分析研究. 等离子体环境下的测试结果表明, 该离子漂移计在特征点处测量结果满足仪器指标要求, 能够正确探测离子横向速度, 且其相对精度满足设计要求.

关键词 等离子体分析仪, 离子漂移计, 定标实验, 电磁监测试验卫星, 离子漂移速度

中图分类号 P 352.7

Research on the Calibration of Ion Drift Meter aboard CSES

ZHENG Xiangzhi[1,2,3] ZHANG Aibing[1,2] GUAN Yibing[1,2]

LIU Chao[1,2] TIAN Zheng[1,2] KONG Linggao[1,2]

WANG Wenjing[1,2] DING Jianjing[1,2]

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

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

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

Abstract The scientific objective of Ion Drift Meter (IDM) is to measure ion drift velocity, which is perpendicular to the direction of the satellite flight on orbit. IDM calibration includes electronics calibration and plasma environment test. The measurement precision of velocity is validated through

* 国家科技重大专项项目资助 (Y26604AG90)
2016-11-02 收到原稿, 2017-04-02 收到修定稿
E-mail: zxz@nssc.ac.cn

testing electronics noise. The velocity measurement range is calibrated by testing the current measurement range. The method and results of gain and temperature drift of electronics circuit testing are introduced. The plasma environment test of IDM has been carried out in INAF-IAPS plasma environment test instrument. The experimental results show that the detector has good performances and will contribute much to the space plasmas parameters monitoring.

Key words Plasma Analyzing Package (PAP), Ion Drift Meter (IDM), Calibration experiment, Seismo-electromagnetic Satellite (CSES), Ion drift velocity

0 引言

地震电磁效应能够通过多种方式传播到电离层, 引起电离层和大气层的变化, 例如电子密度、离子密度、电子温度等的扰动 [1−7]. 电磁监测试验卫星等离子体分析仪用于监测电离层低能等离子体参数, 例如离子密度、离子温度、离子漂移速度、离子密度涨落以及离子成分等, 可发现震前电离层参数异常, 为电离层–地震耦合关系及电离层物理研究提供科学探测数据支持 [8−10]. 等离子体分析仪包含阻滞势分析器、离子漂移计和离子捕获计, 其中离子漂移计用于测量离子横向 (即垂直轨道方向) 漂移速度.

离子漂移计的性能指标包括: 离子横向漂移速度的范围 −3∼+3 km·s^{-1}, 离子横向漂移速度的测量精度为 ±20 m·s^{-1} (通常等离子体条件下).

中国电磁监测试验卫星规定，通常等离子体条件下，即 $65 \leqslant F_{10.7} \leqslant 200$ 时, 离子密度变化范围约为 3×10^3∼3×10^6 cm^{-3}, 离子温度变化范围约为 900∼1750 K.

地面测试定标是探测器成功进行科学探测的重要保障. 离子漂移计的地面测试定标主要包括电子学定标和等离子体环境下的整机定标, 两部分定标结果可以相互验证和补充. 本文围绕自行研制的中国电磁监测试验卫星离子漂移计的电子学定标问题进行研究, 并借助于意大利 INAF-IAPS 等离子体设备展开等离子体环境定标工作.

1 离子漂移计工作原理

如图 1 所示, 中国电磁监测试验卫星离子漂移计传感器内包含四个面积相等的收集极 A, B, C, D. 四个收集极的电流分别为 $I_{\rm A}$, $I_{\rm B}$, $I_{\rm C}$ 和 $I_{\rm D}$, 收集极 A, C 收集的电流叠加为 $I_{\rm AC}$, 收集极 B, D 收集的电流叠加为 $I_{\rm BD}$. 假设离子无热速度, 则 $+Y$ 方向的离子漂移速度 $V_{{\rm d}Y}$ 计算过程 [11−14] 如下.

已知两个电流的关系为

$$\frac{I_{\rm AC}}{I_{\rm BD}}=\frac{w-2h'\tan\alpha}{w+2h'\tan\alpha}. \tag{1}$$

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. α 以及 $+Y$ 方向的离子漂移速度 $V_{{\rm d}Y}$ 分别为

$$\alpha=\arctan\Big[\frac{w(1-I_{\rm AC}/I_{\rm BD})}{2h'(1+I_{\rm AC}/I_{\rm BD})}\Big], \tag{2}$$

$$V_{{\rm d}Y}=(V_{\rm r}^2-2e\phi/m_{\rm i})^{1/2}\tan\alpha=(V_{\rm r}^2-2e\phi/m_{\rm i})^{1/2}\frac{w(1-I_{\rm AC}/I_{\rm BD})}{2h'(1+I_{\rm AC}/I_{\rm BD})}. \tag{3}$$

式中: $V_{\rm r}$ 为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; $m_{\rm i}$ 为氧离子的质量.

设收集极 A, B 收集的电流之和为 $I_{\rm AB}$, 收集极 C, D 收集的电流之和为 $I_{\rm CD}$, 有

$$\frac{I_{\rm AB}}{I_{\rm CD}}=\frac{w-2h'\tan\theta}{w+2h'\tan\theta}. \tag{4}$$

式中 θ 为等离子体沿 $+Z$ 方向的入射角, 其计算公式为

$$\theta=\arctan\Big[\frac{w(1-I_{\rm AB}/I_{\rm CD})}{2h'(1+I_{\rm AB}/I_{\rm CD})}\Big]. \tag{5}$$

假设离子无热速度, 同理可得 $+Z$ 方向的离子漂移速度

$$V_{{\rm d}Z}=(V_{\rm r}^2-2e\phi/m_{\rm i})^{1/2}\tan\theta=(V_{\rm r}^2-2e\phi/m_{\rm i})^{1/2}\frac{w(1-I_{\rm AB}/I_{\rm CD})}{2h'(1+I_{\rm AB}/I_{\rm CD})}. \tag{6}$$

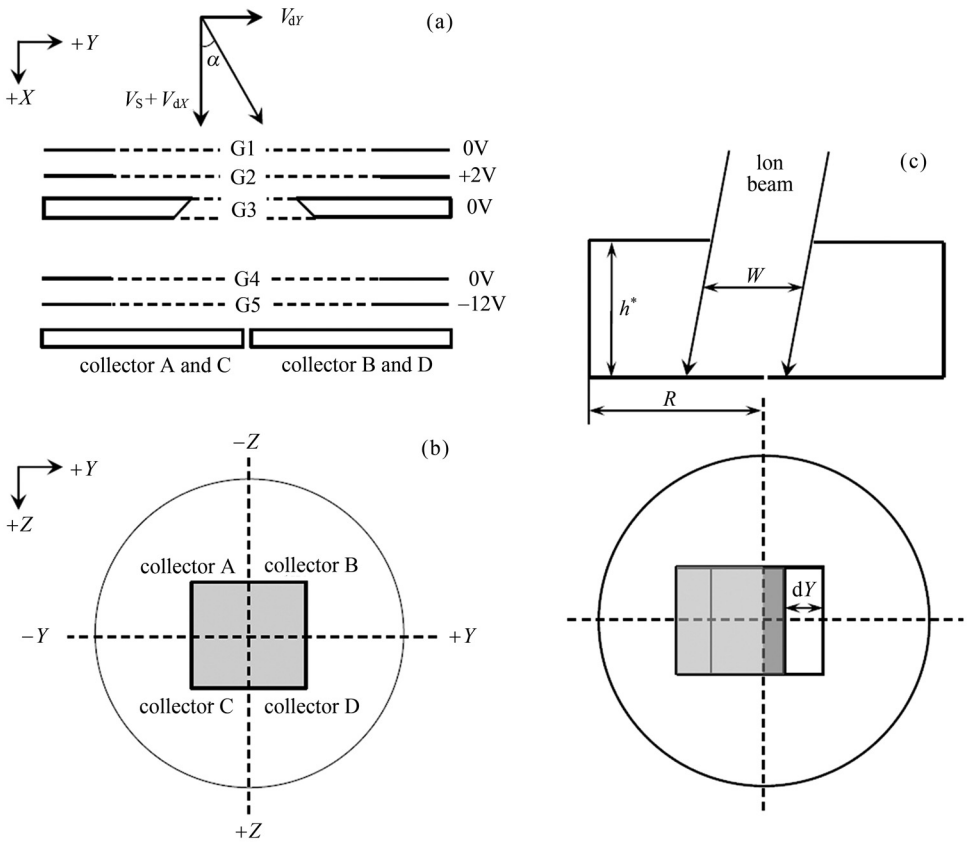

图 1　离子漂移计结构. (a) 栅网及收集极, (b) 离子入射

Fig. 1　Structure of Ion Drift Meter (IDM) (a) The grids and the collectors, (b) ion injection

式 (1)∼(6) 中传感器有效高度 h' 与几何高度 h 的关系为 [13]

$$h' = h - 2d\frac{\sqrt{V_r^2 + 2ad} - V_r}{a}2V_r. \qquad (7)$$

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

2　电子学性能定标实验

2.1　定标方法研究

离子漂移计电子学定标的基本方法是将离子漂移计放入屏蔽箱, 通过传感器上的测试孔给电子学加载标准电流输入信号 (标准电流源), 测定仪器输出, 其基本原理如图 2 所示. 电子学定标需要确定的参数包括电流测量范围、RMS 噪声水平、量程增益系数和温度漂移等. 由于离子漂移计传感器内部包含 4 个收集极, 实验中需要分别对 4 个收集极及其对应的电子学测量电路进行定标测试. IDM1, IDM2, IDM3 和 IDM4 分别对应传感器收集极 A, B, C 和 D.

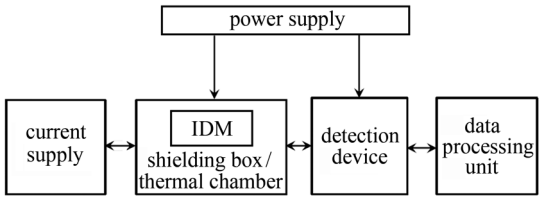

图 2　离子漂移计电子学定标基本原理

Fig. 2　Electronics calibration principle of IDM

(1) 离子横向漂移速度指标

在电磁监测试验卫星轨道的电离层环境中, 卫星速度为 $7.6\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$, 而横向漂移速度测量范围为 $\pm 3\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$. 考虑传感器窗口边长 w 和传感器有效高度 h', 栅网总透过率 K 为 31.85%, 根据离子漂移的工作原理计算得到离子密度 $5\times10^2\sim1\times10^7\,\mathrm{cm^{-3}}$ 对应的离子电流为 $4.0\times10^{-11}\sim2.4\times10^{-6}\,\mathrm{A}$. 可通过通用的电子学测试设备对离子漂移计电流范围进行试验测定, 从而对该指标加以验证.

(2) 离子横向漂移速度测量精度指标

离子横向漂移速度的相对测量精度由电流检测精度 (RMS 噪声) 通过式 (3) 和式 (6) 传递而来. 定标时需要首先对离子漂移计的电子学电流检测 RMS 噪声进行测定, 而后按照式 (3) 和式 (6) 误差传递理论进行计算, 从而得到横向漂移速度的相对测量精度 [15].

以 Y 方向的漂移速度为例, 忽略卫星电位, ΔV_X 为等离子体纵向速度精度, 收集极 A, C 收集的电流之和为 $I_{\rm AC}$, 收集极 B, D 收集的电流之和为 $I_{\rm BD}$, 其检测精度分别为 ΔI_1 与 ΔI_2, 假设电流比为 $t = I_1/I_2$, 则由误差传递理论推算得

$$\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 = \left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2, \tag{8}$$

$$\Delta\alpha = \Delta t\left|\frac{4wh'}{4h'^2(1+t)^2 + w^2(1-t)^2}\right|, \tag{9}$$

$$\Delta V_{\rm dY} = \left\{\left[\Delta t V_{\rm r}\left|\frac{w}{h'(1+t)^2}\right|\right]^2 + \left[\Delta V_x\frac{w(1-t)}{2h'(1+t)}\right]^2\right\}^{0.5}. \tag{10}$$

选取几组离子密度的典型值进行离子漂移计的误差传递计算. 由计算结果可知在通常等离子体条件变化范围内, 电流大于 184 pA 时, 要保证横向漂移速度的探测精度满足 $20\,{\rm m\cdot s^{-1}}$ 的指标要求, 要求电路各量程 RMS 噪声小于 1 mV. 由于离子漂移计电流测量采用分量程 (量程 00, 量程 01 和量程 10) 设计, 因此每个量程的探测精度都要进行 RMS 噪声测试. 量程 00 的电流测量范围是 20 pA~20 nA, 量程 01 的电流测量范围是 10 nA~0.33 μA, 量程 10 的电流测量范围是 0.2~6 μA. 相邻量程的交叠设计避免了电流处于临界值时量程频繁切换.

(3) 增益测试和修正系数

离子漂移计测量的收集电流 (电流 $I_{\rm in}$) 转换成电压值 (电压 $V_{\rm out}$) 输出, 输出值与测量值对应关系为 $I_{\rm in} = aV_{\rm out} + b$. 因此, 电子学定标需要测定仪器的增益系数 a 和修正系数 b.

(4) 温漂测试

将图 2 测量系统置于温控箱中, 可获得离子漂移计性能随温度变化的情况, 即输出 (电压 $V_{\rm out}$) 与输入 (电流 $I_{\rm in}$) 的对应关系中增益系数 a 和修正系数 b 随温度变化的情况.

2.2 实验内容及定标结果

离子漂移计电子学定标的内容列于表 1.

(1) 噪声测试

离子漂移计的横向漂移速度相对精度取决于仪器 RMS 噪声水平. 离子漂移计空载状态下可获得仪器的 RMS 噪声, 测量结果列于表 2. 结果表明, 仪器噪声水平优于设计值, 满足设计要求.

(2) 电流测量范围测试

离子漂移计横向漂移速度的测量范围对应其电流测量动态范围. 测量结果见表 3, 结果表明离子漂移计的测量动态范围均满足测量要求.

(3) 增益测试和修正系数测试

根据图 2 状态连接各测试设备, 定标测试结果如表 4 所示, 线性相关性均大于设计值 0.99, 线性度均小于设计值 0.01, 结果满足设计要求.

表 1 离子漂移计电子学定标的内容

Table 1 Electronics calibration items of IDM

直接测试内容	定标内容	判据
空载 RMS 噪声	离子横向漂移速度测量精度 $\pm 50\,{\rm m\cdot s^{-1}}$	测量电流 $>$ 184 pA 时优于 0.4% (等价于各量程噪声 $<$ 1 mV)
电流量程测量范围	离子横向漂移速度 $-3\sim+3\,{\rm km\cdot s^{-1}}$	$4.0\times10^{-11}\sim2.4\times10^{-6}$ A
定标参数	电子学的增益和修正参数	线性度 >0.99
定标参数的温漂	增益系数 a 和修正系数 b 随温度变化的情况	正常工作温度范围内小于 1%

表 2 离子漂移计电子学噪声测量结果

Table 2 Experiment results of electronics noise

IDM	要求值/V	量程/V		
		00	01	10
IDM1	$< 1\times10^{-3}$	1.47×10^{-4}	2.78×10^{-4}	1.24×10^{-4}
IDM2	$< 1\times10^{-3}$	1.62×10^{-4}	4.97×10^{-4}	1.16×10^{-4}
IDM3	$< 1\times10^{-3}$	1.49×10^{-4}	3.22×10^{-4}	1.21×10^{-4}
IDM4	$< 1\times10^{-3}$	1.47×10^{-4}	2.12×10^{-4}	1.54×10^{-4}

表 3 离子漂移计电子学电流测量范围测量结果

Table 3 Experiment results of current measurement range

测量电流范围	设计值/A		测试结果	
	最小值	最大值	最小值	最大值
IDM1	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6×10^{-6}
IDM2	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6×10^{-6}
IDM3	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6×10^{-6}
IDM4	4.0×10^{-11}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-11}	6×10^{-6}

表 4 离子漂移计电子学增益系数和修正系数测量结果

Table 4 Experiment results of gain and correction coefficient of IDM

名称	量程	增益	修正	线性相关性	线性度
IDM1	00	-2.1×10^{-9}	-2.2×10^{-12}	0.999	4.9×10^{-4}
	01	-3.4×10^{-8}	-1.4×10^{-11}	0.999	1.4×10^{-4}
	10	-6.6×10^{-7}	-5.2×10^{-10}	0.999	1.3×10^{-4}
IDM2	00	-1.9×10^{-9}	7.3×10^{-12}	0.999	4.1×10^{-5}
	01	-3.4×10^{-8}	7.3×10^{-12}	0.999	1.3×10^{-4}
	10	-6.7×10^{-7}	4.1×10^{-10}	0.999	6.1×10^{-5}
IDM3	00	-1.9×10^{-9}	8.4×10^{-12}	0.999	4.8×10^{-5}
	01	-3.3×10^{-8}	2.9×10^{-11}	0.999	1.3×10^{-4}
	10	-6.6×10^{-7}	1.2×10^{-9}	0.999	4.6×10^{-5}
IDM4	00	-1.9×10^{-9}	9.6×10^{-12}	0.999	3.0×10^{-5}
	01	-3.4×10^{-8}	-2.3×10^{-12}	0.999	1.3×10^{-4}
	10	-6.7×10^{-7}	5.3×10^{-10}	0.999	3.6×10^{-5}

(4) 温漂测试

将图 2 测量系统置于温控箱中, 可以获得离子漂移计性能随温度变化的情况, 如图 3 所示. 这里只给出 IDM1 的测量结果. 测量结果表明, 温度对 IDM 增益系数 a 的影响均小于 1%, 低于仪器噪声控制水平的要求; 修正系数 b 则是一个二级小量, 温度对其无根本影响. 因此, 在仪器正常工作温度范围 ($-15 \sim +50$°C) 内, 温度对测量结果的影响和仪

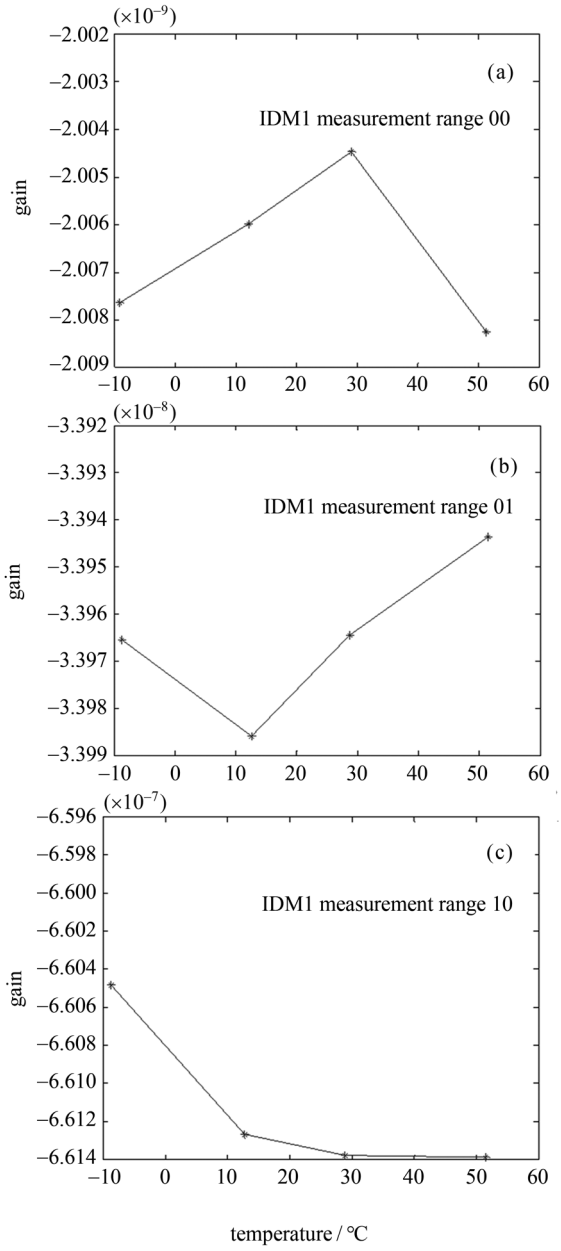

图 3 IDM 电子学温漂测量结果

Fig. 3 Experiment results of temperature drift

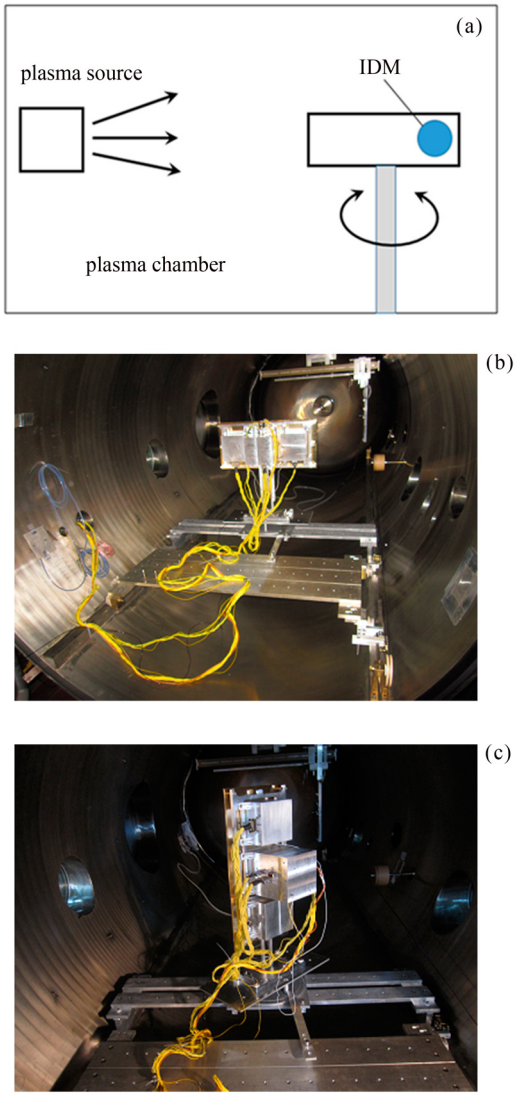

图 4 离子漂移计实验. (a) 安装示意, (b) 水平安装状态, (c) 竖直安装状态

Fig. 4 IDM in chamber. (a) Schematic of the erection, (b) horizontal erection, (c) vertical erection

器噪声控制水平处于一个量级, 可以忽略不计.

3 等离子体环境定标实验

3.1 定标方法研究

意大利 INAF-IAPS 拥有低能等离子体测试实验设备. 该设备可以模拟再现电离层等离子体环境并对其进行测量, 此外还具有测试或标定等离子体探测载荷等功能. 电磁监测试验卫星离子漂移计等离子体环境定标工作在意大利 INAF-IAPS 进行.

根据仪器的工作原理, 离子漂移计通过探测离子入射角推算离子横向漂移速度. 由于离子的横向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 IDM 相对于等离子体束流的入射方向, 可获得不同角度 (横向速度) 特征点下的测试结果. IDM 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. 试验中通过改变仪器安装状态实

现IDM水平和竖直两个方向的测试, 测试状态如图4所示. 此外, 由于INAF-IAPS转台误差约为 ±2° 左右, IDM 量程为 ±23°, 试验中测试点选取为 ±25°, ±20°, ±15°, ±10°, ±5°, 0°. 此外, IDM 在每个角度测量点均进行多次测量, 从而推算横向速度的精度.

3.2 实验内容及定标结果

3.2.1 离子漂移计 Y 方向漂移速度测试

测量 Y 方向漂移速度时, IDM 水平安装, 测试结果见表 5 和图 5. 由表 5 和图 5 可见, 横向速度测量结果的变化趋势与转台设定值变化趋势一致, 但与转台之间的差别超过了 2°. 这是由于等离子体源本身是一个点源, 离子从等离子体源发射出来具有一定的发射角, 且 IDM 水平安装时传感器开口位置与等离子体源中心轴有 0.16 m 的偏离, IDM 距离等离子体源约 2.5 m. 根据三角函数关系可以得出, 由于 IDM 偏离中心轴带来的角度系统误差约 3.6°. 将角度系统误差修正后, 横向速度测量结果与转台设定值变化基本一致.

此外, IDM 在每个角度测量点处均进行横向速度的精度测量, 等离子体源稳定时多次测量等离子体的入射角度, 从而推算出离子横向漂移速度. 离子横向速度的测量精度

$$\delta V_Y = \sqrt{\frac{\sum_j (V_{Yj} - \overline{V}_Y)^2}{n-1}}. \tag{11}$$

式中, V_{Yj} 为第 j 次测量得到的漂移速度, $\bar{V}_Y$ 为 Y 向漂移速度的平均值, n 为测量次数.

按照式 (11) 计算得到离子横向速度的测量精度. 计算结果列于表 5, 由表 5 可知, 横向速度测量精度远好于 20 m·s^{-1} 的指标要求.

3.2.2 离子漂移计 Z 方向漂移速度测试

测量 Z 方向漂移速度时, IDM 竖直安装, 测试结果见表 6 和图 6. 由表 6 和图 6 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, 与转台之间的差别基本在 2 ° 之内. 在每个角度测量点处

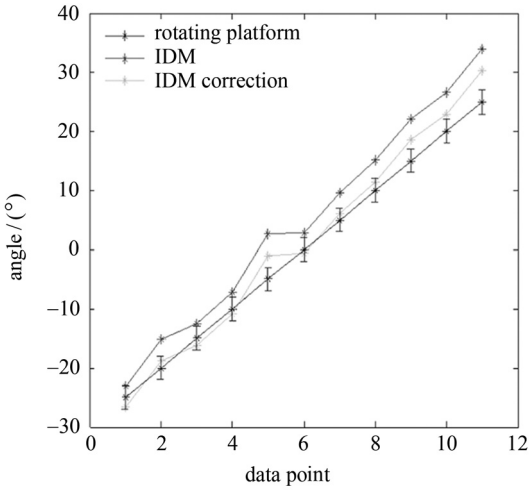

图 5 IDM 水平安装时测量结果

Fig. 5 Experiment results of horizontal erection

表 5 IDM 水平安装时特征点处定标结果

Table 5 Experiment results of horizontal erection

转台设定角度/(°)	IDM 测试结果	Y 向速度/(m·s^{-1})	Y 向速度精度/(m·s^{-1})
0	2.92	384.6	1.325
−5	2.56	340.4	0.982
−10	−7.2	−942	0.971
−15	−13	−1622	0.971
−20	−15	−1913	0.89
−25	−23	−2748	1.735
5	9.65	1290	1.429
10	15.1	1958	1.165
15	22.1	2854	1.297
20	26.5	3237	1.064
25	33.9	4034	7.661

表 6 IDM 竖直安装时特征点处测量结果

Table 6 Experimental results of vertical erection

转台设定角度/(°)	IDM 测试结果	Z 向速度/(m·s^{-1})	Z 向速度精度/(m·s^{-1})
0	−0.7	−86	2.6
−5	−7.1	−926	2.3
−10	−12	−1494	1
−15	−15	−1918	1.6
−20	−22	−2677	3.1
−25	−28	−3228	2.1
5	5.98	777	2.3
10	7.6	974	1.8
15	14	1644	1.5
20	21.5	2572	4.1
25	27.2	3021	4.8

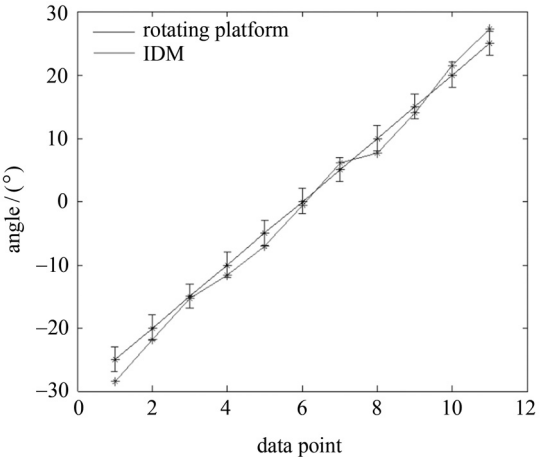

图 6 IDM 竖直安装时测量结果

Fig. 6 Experiment results of vertical erection

均测量了横向速度的精度, 方法与水平安装时一致, 结果列于表 6, 精度优于 20 m·s^{-1}, 满足指标要求.

4 结论

对自行研制的中国电磁监测试验卫星离子漂移计的定标问题进行了研究. 结论如下.

电子学定标测试得到了离子漂移计的噪声、电流测量范围、增益和修正系数以及温漂等定标参数. 定标结果验证了离子横向漂移速度的测量范围和精度优于设计要求, 满足科学探测需求.

在意大利 INAF-IAPS 利用转台改变 IDM 相对于等离子体束流的入射方向, 获得不同角度特征点下的测试结果. 从离子漂移计等离子体环境定标测试结果可以看出, 离子漂移计在特征点处测量值正确, 能够正确描述离子入射角度的变化趋势, 且离子横向速度的相对精度满足设计要求.

离子漂移计的测量数据有效, 对探测空间等离子体环境参数和震前预测具有重要的参考意义和实用价值.

参考文献

[1] PARROT M, BERTHELIER J J, LEBRETON J P, *et al*. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions [J]. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*, 2006, **31**(4-9): 486-495

[2] BROWN B. HF Propagation tutorial [OL]. [2004-03-06]. http://www.a-strosurt.com/luxorion/asl-hf-tutorial-nm7m3.htm

[3] XIONG Nianlu, TANG Cunchen, LI Xingjian. Introduction to the Physics of the Ionosphere [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997 (熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997)

[4] KAMIDE Y, CHIAN A C L. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2010 (KAMIDE Y, CHIAN A C L. 日地环境指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2010)

[5] CAI Juntao, ZHAO Guoze, ZHAN Yan, *et al*. The stu-

dy on ionospheric disturbances during earthquakes [J]. *Prog. Geophys.*, 2007, **22**(3): 695-701 (蔡军涛, 赵国泽, 詹艳, 等. 地震期间电离层扰动现象研究 [J]. 地球物理学进展, 2007, **22**(3): 695-701)

[6] LEONARD R S, BARNES JR R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake [J]. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**(5): 1250-1253

[7] SILINA A S, LIPEROVSKAYA E V, LIPEROVSKY V A, *et al.* Ionospheric phenomena before strong earthquakes [J]. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, 2001, **1**(3): 113-118

[8] SHEN Xuhui, ZHANG Xuemin. General framework and development on China Seismo-Electromagnetic Satellite projects [C]//The 2nd International Space Weather Symposium. Nanjing: The Earth Science Department of National Natural Science Foundation of China, 2009

[9] OUYANG Xinyan. Introduction to seismo-electromagnetic satellite's measurements [J]. *Recent Dev. World Seismol.*, 2007, (8): 54-58 (欧阳新艳. 地震电磁卫星观测物理量简介 [J]. 国际地震动态, 2007, (8): 54-58)

[10] FENG Yubo, WANG Shijin KONG Linggao. Simulation analysis of errors from ionosphere satellite-borne retarding potential analyzer [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2010, **53**(11): 2535-2543 (冯宇波, 王世金, 孔令高. 电离层星载阻滞势分析器的误差仿真分析 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(11): 2535-2543)

[11] RICH F J. Users Guide for the Topside Ionospheric Plasma Monitor (SSIES, SSIES-2 and SSIES-3) on Spacecraft of the Defense Meteorological Satellite Program [R]. Bedford, Massachusetts: Air Force Phillips Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1994

[12] HEELIS R A, HANSON W B. Measurements of thermal ion drift velocity and temperature using planar sensors [C]//Measurement Techniques in Space Plasmas: Particles. Washington, D C: American Geophysical Union Monograph, 1998

[13] FENG Yubo. The Design and Development of the Ionospheric Plasma Investigation Suite [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011 (冯宇波. 电离层等离子体分析仪的设计与研制 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011)

[14] FENG Yubo, WANG Shijin, KONG Linggao. A simulation analysis of systematic errors in ion arrival angle and drift velocity from the satellite borne ion drift meter [J]. *J. Adv. Space Res.*, 2011, **47**(11): 1958-1964

[15] SÉRAN E. Reconstruction of the ion plasma parameters from the current measurements: mathematical tool [J]. *Ann. Geophys.*, 2003, **21**(5): 1159-1166