

基于 LabVIEW 的快速往复朗缪尔探针诊断系统

李雪松, 康小明, 张亚欧, 董 磊

(上海交通大学 机械与动力工程学院

机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 使用朗缪尔探针诊断法获得电推力器喷口位置等离子体的状态参数时, 探针在喷口位置停留时间过长造成探针被等离子体流烧坏。以 LabVIEW 为开发平台研制了一种精确定位的快速往复运动诊断系统。该系统能实现探针迅速推进到喷口位置, 停留极短时间保证探针能正常完成电流电压数据采集, 最后快速的退出到起始位置, 避免探针烧坏。与传统的朗缪尔探针诊断系统测量霍尔推力器羽流区等离子体状态相比, 该系统自动化程度高, 探针采集喷口位置的数据更能反映等离子体的真实状态。

关键词: LabVIEW; 直线电机; 精确定位; 朗缪尔探针

中图分类号: V439-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2014) 01-0081-06

Fast reciprocating Langmuir probe diagnostic system based on LabVIEW

LI Xue-song, KANG Xiao-ming, ZHANG Ya-ou, DONG Lei

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to obtain the parameters of plasma at thruster nozzle center position through the Langmuir probe diagnostic method, and avoid the probe staying at the spout for long time and being burned by plasma, a precise positioning and rapid reciprocating motion diagnostic system was developed by aid of LabVIEW. The system can make the probe arrive at the outlet of Hall thruster rapidly, fulfill current and voltage data acquisition in very short time, and then return to its starting location rapidly and avoid burning the probe. Compared to the data collected by conventional Langmuir probe, the data got by this system can reflect the true state of the plasma much better.

Keywords: LabVIEW; linear motor; precise positioning; Langmuir probe

收稿日期: 2013-08-07; 修回日期: 2013-10-15

作者简介: 李雪松 (1988—), 硕士生, 研究领域为推进理论和电推进技术

0 引言

随着人类太空活动的日益频繁,各种类型的卫星、探测器、空间站等航天器不断投入使用,人们对航天活动的热情一浪高过一浪。电推力器由于具有比冲高、质量轻和控制精度高等优点,被广泛应用于航天器的姿态控制、位置保持、深空探测和星际航行等任务,其研制和应用越来越受到世界航天大国的重视^[1],但同时电推力器也存在不少问题,比如推进剂供应系统复杂,特别是它们的羽流污染比普通的化学推力器更加严重,所以为了有效抑制等离子羽流的各种污染,改善其工作性能,有必要对电推力器羽流区的低温等离子体进行诊断^[2-3]。

在常见等离子体诊断方法中,朗缪尔(Langmuir)探针法由于其质量、小功耗低、获得信息丰富、结构简单且操作方便等优点已得到越来越多的应用^[4-5]。但传统的朗缪尔探针诊断方法测量周期长、抗干扰能力差、测量误差大,而且数据处理自动化程度低,影响了电推力器羽流区的各个物理参数的测量。针对上述问题,开发了基于 LabVIEW 平台测量霍尔推力器喷口处等离子体参数的朗缪尔探针诊断系统。

1 系统软硬件体系

1.1 硬件体系

所设计的快速往复朗缪尔探针诊断系统采用以工业控制计算机与可编程驱动器上下位机的双核体系结构,动力源为直线电机。相比于传统旋转电机,直线电机进给驱动的主要优点有结构简单、高加速度且适合高速直线运动。本系统选用 ACCEL SL180-135-500-A,速度 4~6 m/s,加速度 10 g,定位精度 20 μm 。如图 1 所示,在设计此运动系统时,依据速度快和定位精确的要求,工控机通过 RS232 直接与直线电机驱动器通信,驱动直线电机迅速运行到喷口位置。此时,驱动器输出 5 V 电压信号,驱动光电耦接器输出 24 V 电压 PLC 导通,PLC 通过 OPC 技术反馈探针到位信号给工控机,工控机开启数据采集表

Keithley2420 完成数据采集任务。

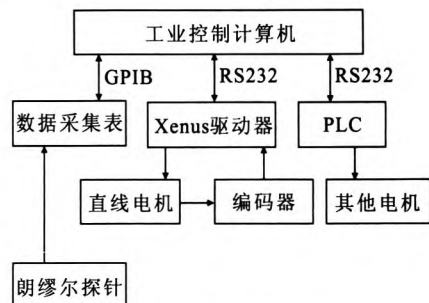


图 1 系统硬件体系

Fig. 1 Hardware architecture of system

1.2 软件体系

本系统的软件体系如图 2 所示。

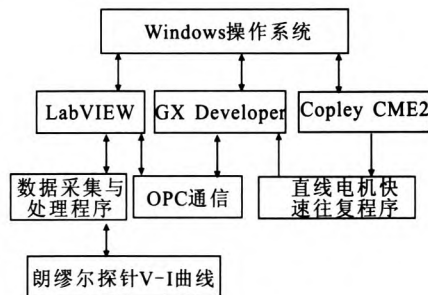


图 2 系统软件体系

Fig. 2 Software architecture of system

上位机编程软件为 LabVIEW。LabVIEW 是由美国国家仪器 (NI) 公司研制开发的图形化编程语言开发环境,图形化编程简单易学且与很多仪器设备的兼容性很好,可以直接调用仪器设备的软件驱动程序和功能模块,是虚拟仪器程序设计语言的代表^[6];GX Developer 是三菱 PLC 程序的开发环境;Copley CME2 是可编程直线电机的编程环境,可以配置直线电机初始化参数和快速往复编程。GX Developer 和 LabVIEW 之间通信的桥梁是 NI OPC Servers, OPC 全称是 Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control,它是现在工业控制和计算机技术结合的产物,广泛应用于工业控制领域。通过 OPC 技术 LabVIEW 可以和大量的工业设备(比如各种型号的 PLC)建立无缝连接。OPC 的出现为基于

Windows 的应用程序和现场过程控制应用建立了桥梁, 实现两者之间的变量共享, 完成通信, 提高了系统的开放性^[7]。本系统中 PLC 和 LabVIEW 之间的各种变量共享均由 NI OPC Servers 完成。

1.3 软硬件体系关键技术

1.3.1 快速往复运动

朗缪尔探针诊断过程中要防止探针被等离子体羽流烧坏, 探针初始位置距离喷射口 300 mm, 运行至喷射口处时间 100 ms, 停留采集数据时间 500 ms, 退至初始位置时间 100 ms。探针快速往复运动是以伺服驱动器和直线电机为硬件基础, 通过 CEM2 软件进行编程, 直线电机运动为位置环、速度环、电流环三环控制。三环分别采用 PID 控制方式, 可实现直线电机快速性和准确性, 通过 CAN 总线与直线电机实现实时通讯。通过运动轨迹规划, 可实现直线电机按照期望的运动方式运动, 配合数据采集仪器仪表完成喷射口处等离子体的 $V-I$ 数据采集 (见图 3 和图 4)。

1.3.2 数据采集的同步性

数据采集的同步性是关系到朗缪尔探针诊断准确性和防止探针烧坏的一个关键问题, 在朗缪尔探针运动到喷射口处后迅速反馈一个到位信号给上位机 LabVIEW, LabVIEW 启动数据采集程序, 保证朗缪尔探针能在停留极短的时间内采集准确的 $V-I$ 曲线数据并退至初始位置。

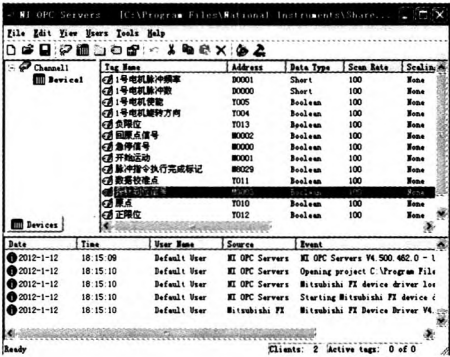


图 5 NI OPC Servers 界面
Fig. 5 Interface of NI OPC Servers

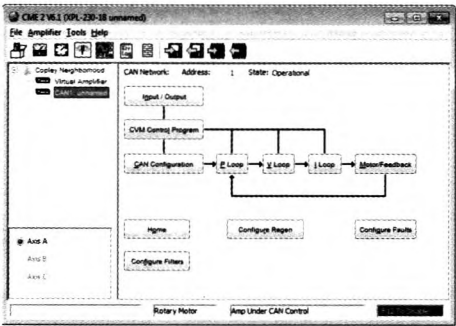


图 3 CME2 编程界面
Fig. 3 Programming interface of CME2

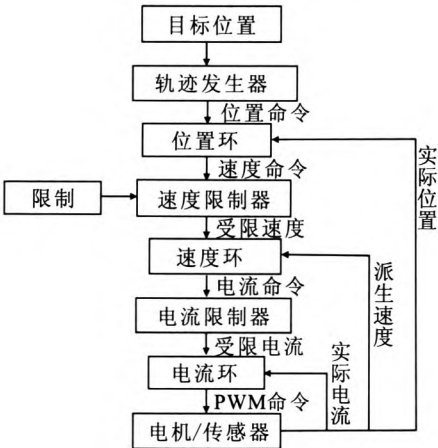


图 4 系统三环反馈
Fig. 4 Tricyclic feedback of system

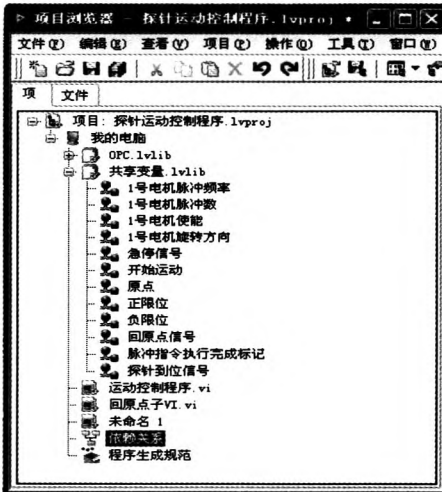


图 6 LabVIEW 项目浏览器界面
Fig. 6 Project browser interface of LabVIEW

由于直线电机的输出到位信号电压是 5 V, 而 PLC 输入电压 24 V, 为此设计采用光电耦将 5 V 转换成 24 V 电压信号导通 PLC。这里实现的数据通信任务是通过 LabVIEW 能够实时地读写现场 PLC 内部寄存器的数据。本系统采用最常用的 RS232 串口通信方式, 通过 NI OPC Servers 设置 OPC 服务器通道并且配置标签, 使 OPC 的标签

与 PLC 内部的寄存器一一对应, 这样我们读写 OPC 项如同直接读写 PLC 内部的寄存器一样方便^[8] (如图 5 所示)。另外, LabVIEW 先通过网络地址 (PSP URL) 把共享变量绑定到 I/O 服务器中的条目上, 然后通过 I/O 服务器访问 OPC 中的标签。图 6 所示为 LabVIEW 工程文件中的共享变量列表, 因此完成 LabVIEW 中的共享变量和 PLC 内部寄存器的间接通信, 从而实现电机到位后迅速启动数据采集程序。

2 朗缪尔探针原理与数据处理算法

2.1 朗缪尔探针基本原理

朗缪尔探针法是一种较为传统的等离子体测量方法, 其结构特点是传感器作为一个插入等离子体中“面积小得可忽略”的导电电极 (通常是一条线或一个盘), 其电位相对于等离子体可变^[9-10]。电极末端用以收集来自等离子体的电子或离子。收集到的是电子还是离子取决于探针相对于等离子体的电势^[11]。朗缪尔探针测试电路如图 7 所示。

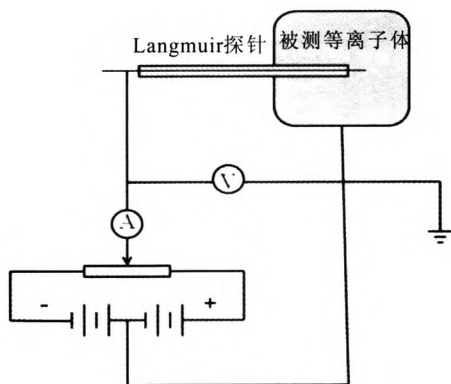


图 7 朗缪尔探针测试电路

Fig. 7 Testing circuit of Langmuir probe

调节电位器可使探针的电位由负变到正。假设在调节探针电位的过程中, 等离子体的状态保持稳定, 在探针电位由负到正变化的过程中, 记录下各个电位所对应的流过探针的电流值。取探针电压为横坐标, 探针电流为纵坐标, 可得探针 I - V 特性曲线^[12], 如图 8 所示。

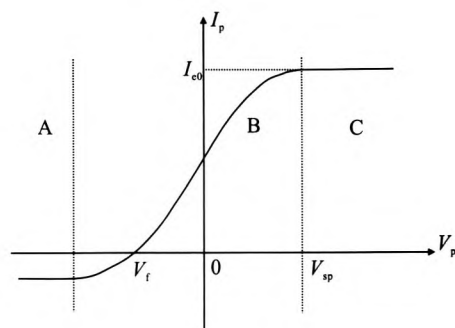


图 8 等离子体 V - I 特性曲线

Fig. 8 V - I characteristic curve of plasma

2.2 数据处理算法

朗缪尔单探针法得到的伏安特性曲线, 根据曲线的变化情况可分为 A 离子饱和区, B 过渡区和 C 电子饱和区^[13-14], 如图 8 根据伏安特性曲线的特性可以得到等离子体的悬浮电位和空间电位, 再由公式 (1-3) 求出电子温度, 离子 (电子) 数密度等物理参数。

$$kT_e = \frac{e(V_{p1} - V_{p2})}{\ln I_{p1} - \ln I_{p2}} \quad (1)$$

$$I_e = 2.7 \times 10^9 n_e A_p \sqrt{kT_e} \quad (2)$$

$$n_e = 3.7 \times 10^8 I_e / A_p \sqrt{kT_e} \quad (3)$$

式中: V_p 为采集到的电压值; I_p 为修正后的电流值, 即采集到的电流减去离子饱和电流; kT_e 为等离子体电子温度; A_p 为探针的表面积; k 为波尔兹曼常数; I_e 为电子饱和电流; n_e 为等离子体的电子数密度, 由等离子体的电中性可知, 等离子体的电子数密度与离子数密度相等, 故可得离子数密度^[15]。

如图 9 所示, 系统首先将采集到的结果进行滤波平滑处理提高抗干扰能力, 对滤波后的伏安曲线进行修正并取半对数, 得到修正后的半对数曲线, 半对数曲线经过一次微商计算出对应的导数曲线, 将所得导数曲线若干最高点做算术平均代入公式 (1), 求得等离子体的电子温度, 逐点跟踪导数曲线的变化, 半对数曲线中偏离线性增长的点即为所求的拐点, 从而得到等离子体的空间电位 V_{sp} 和电子饱和电流 I_e 。上述参数代入公

式 (3) 后得到等离子体电子数密度。考虑到分析方法差异会引起计算结果不同, 在求曲线拐点时引入修正因子, 可根据实际情况对系统进行标定与修正。此外, 在进行空间电位和电子饱和电流判断时, 系统 I - V 曲线窗口设有动态游标, 可以通过鼠标自由拖动, 试验中可以通过游标手动确定拐点位置, 数据处理前面板如图 10 所示。

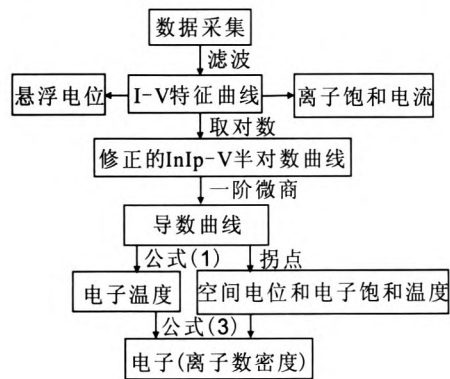


图 9 数据处理流程图

Fig. 9 Flow chart of data processing

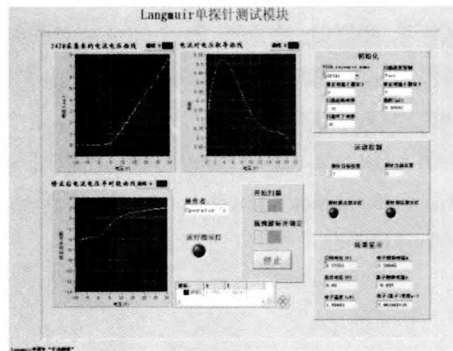


图 10 数据处理界面

Fig. 10 Interface of data processing

3 应用实例

本系统已经被中国航天空间推进研究所应用于技术改进项目, 通过本系统对霍尔推力器的羽流区进行了测试, 真空舱内压力约为 2×10^{-3} Pa, 测霍尔推力器放电电压为 100~300 V, 阳极放电电流 1.8~2.3 A。推力器工作达到稳定时推进剂流量为: 阳极 16 sccm; 阴极 1.6 sccm。经试验测得的试验数据和理论计算基本相符, 如下图所示。

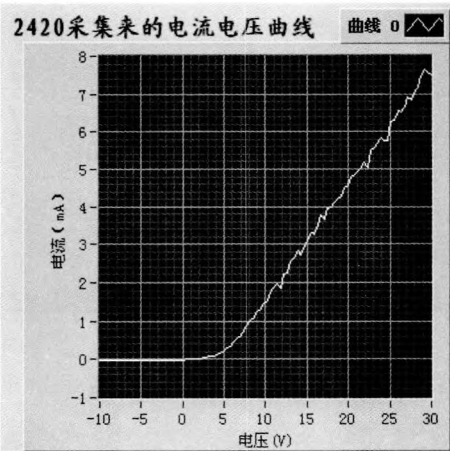


图 11 原始数据伏安曲线

Fig. 11 V - I curve of raw data

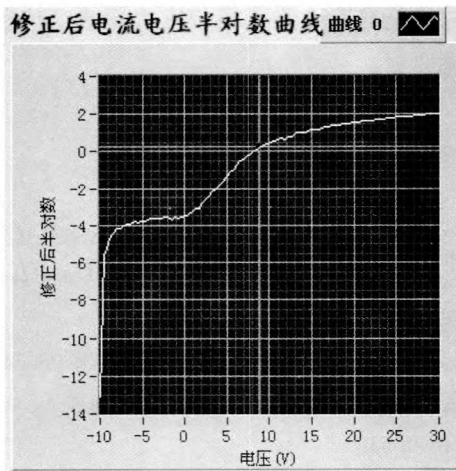


图 12 修正后电流电压半对数曲线

Fig. 12 Revised V - I semi-logarithmic curve

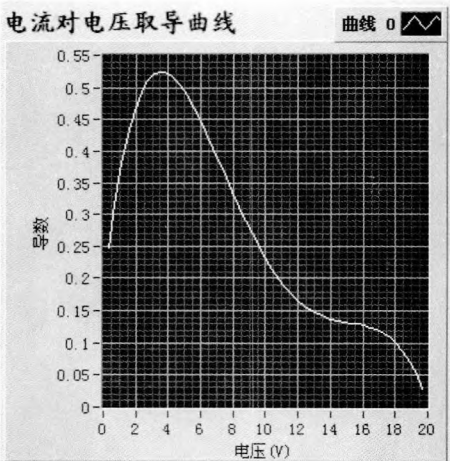


图 13 电流对电压取导曲线

Fig. 13 Derivative curve of V - I



图 14 试验结果

Fig. 14 Experimental results

基于 LabVIEW 为开发平台研制了一套采集周期短, 抗干扰能力强, 数据处理快, 自动化程度高, 界面友好, 操作方便的朗缪尔探针诊断系统, 并且能准确地测得霍尔推力器喷口位置的等离子体数据。

参考文献:

- [1] DUNNING J W, HAMLEY J A, JANKOVSKY R S, et al. An overview of electric propulsion activities at NASA, AIAA2004-3328[R]. USA: AIAA, 2004.
- [2] 一林. 电推进发展现状[J]. 国际太空, 2004 (6): 24-26.
- [3] 朱毅麟. 电推进的现状与展望[J]. 上海航天, 1998, 15 (003): 48-53.
- [4] 奥切洛, 弗拉姆. 等离子体诊断[M]. 郑少白, 译. 北京: 电子工业出版社, 1944.
- [5] MILNES K A, EHLERS K W, LEUNG K N, et al. A fast Langmuir probe sweeping circuit[J]. Transaction on Plasma Science. 1980, 8(2): 124-126.
- [6] 王磊, 陶梅. 精通 LabVIEW8.0[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [7] 乔毅, 栾矢艳, 袁爱进. 基于 LabVIEW 和 OPC 的数据通信的实现[J]. 控制工程, 2005, 12(2): 153-155.
- [8] 陈树学, 刘萱. LabVIEW 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [9] MITCHNER M, KRUGER C, FONTANESI M A. 400 kHz, fast-sweep Langmuir probe for measuring plasma fluctuations[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(6): 2681-2688.
- [10] HUDDLESTONE R H, LEONARD S H. Plasma diagnostic techniques[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [11] PRUVIS C K. Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effect[M]. USA: Scientific and Technical Information Branch of NASA, 1984.
- [12] 林榕, 毛根旺. 用 Langmuir 探针诊断 MPT 羽流[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(2): 149-152.
- [13] 张宝芳. 微波等离子体的静电探针测试系统的研究设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [14] 池凌飞, 林揆训, 姚若河, 等. Langumir 单探针诊断射频辉光放电等离子体及其数据处理[J]. 物理学报, 2001, 50(7): 1313-1317.
- [15] MAWARDI O K. Use of Langmuir probes for low-density plasma diagnostics[J]. American Journal of Physics, 1966, 34(2): 112-120.

(编辑: 陈红霞)