

离子推力器推力矢量偏角测试

唐福俊

(兰州物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要 研制了离子推力器推力矢量偏角测试系统,包括测试装置的设计、制造、测试处理软件的设计和调试。应用研制的测试系统对 20 cm 离子推力器的推力矢量偏角进行了测试。

关键词 离子推力器 推力矢量偏角 测试

中图分类号 V439+.4

文献标识码 A

文章编号 1006-7086(2009)02-0081-05

MEASUREMENT OF THRUST VECTOR OFFSET OF ION THRUSTER

TANG Fu-jun

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract : An instrument used for measurement of thrust vector offset of Ion thruster was developed. The design of the instrument and the design of the software used for measurement were discussed in detail respectively. The instrument was used in the measurement to determine the direction of the thrust vector of an 20 cm Ion thruster. The result were given as well.

Key words : Ion thruster; thrust vector offset; measurement

1 引 言

离子电推进系统以氙气作为工质,将电能转化为推力,其比冲比常规的化学推力器高一个量级,在提高卫星有效载荷比、延长卫星寿命方面具有明显的优势。经过几十年的研究和发展,离子电推进系统已经走向成熟,实现了在航天器上的大量应用。我国离子电推进系统发展已经取得了重要的技术突破,目前正在开展离子电推进系统在静止轨道卫星上应用方案的研究,在轨飞行验证也在同步开展。

离子推力器是离子电推进系统产生推力的核心部件,离子推力器工作时的推力矢量与推力器轴线存在一定的偏角,即推力矢量偏角。推力矢量偏角主要由推力器固有的制造和装配误差引起。由于推力器制造和装配精度的影响,推力矢量偏角存在很大的不确定性。此外,推力器从冷态到工作稳定状态,其热变形而引起推力矢量的短期漂移,由于离子溅射腐蚀作用,栅极孔的大小和形状发生改变,从而引起推力矢量长期漂移。这对离子推力器在航天器上的安装和定位带来一定的困难,安装要求是推力矢量经过航天器质心,如果安装关系不正确,会对航天器产生干扰力矩。

开展离子推力器推力矢量偏角测试具有重要意义。对于应用离子推力器的航天器,根据测试结果分析是否需要配置万向支架,并对万向支架性能提出要求;测试分析结果是推力器在航天器上安装调整的重要依据。由于离子推力器的推力为微小推力,对推力大小的测量本身存在很大的难度,要通过直接测试推力的径向分量的方法测试推力矢量偏角,技术和工程难度极大。目前国外离子推力器推力矢量偏角测试通常采用测试推力器束流中心的方法。测量推力矢量偏角的基本假设:

- (1) 推力矢量与束流中心重合;
- (2) 束流从推力器轴线上某一点发射出,即推力器束流可视为点源束流。

收稿日期 2009-04-20.

作者简介 唐福俊(1973-),男,甘肃省武山县人,工程师,从事电推进研究。

英国 T5 离子推力器推力偏角测试采用一种束流中心跟踪装置^[1, 2],其装置为 2 对双朗缪尔探针,探针安装在矩形框上。测试时,矩形框根据探针电流跟踪束流中心,保持水平和垂直方向的 2 对探针电流分别平衡。测试中矩形框跟踪移动,使矩形框的中心为束流中心。通过矩形框的位移和到推力器的距离计算推力矢量偏角。

美国 NSTRA-30 推力器在进行 8 000 h 寿命考核试验时,对推力器推力偏角进行了测试和监测^[3]。推力矢量探针由 16×16 个圆柱形石墨棒组成,石墨直径 9 mm,长 1.2 m。探针电流由电阻取样,计算机采集。推力矢量探针安装位置距推力器 6 m。数据处理时,垂直方向和水平方向分别计算,得出垂直和水平方向的偏移角度。

作者针对我国离子电推进系统应用需求,研制了一套推力矢量偏角测试系统,并应用研制的测试系统对兰州物理研究所研制的 20 cm 离子推力器的推力矢量偏角进行了测试。通过研制建立了离子推力器推力矢量偏角测试系统,对离子推力器的推力特性测试提供了重要的测试手段。

2 离子推力器推力偏角测试系统

2.1 测试方案及测试系统组成

参考国外测试方法,测试方案确定如下:采用“米”字形排列的 81 个法拉第探针测试束流的分布,通过分析计算确定推力矢量偏角。测试用法拉第探针布置见图 1 所示。

测试系统由测试装置、测试计算机数据采集和控制系统组成。测试装置用于完成对离子推力器羽流主束流等离子体中离子电流密度分布的测试,研制测试装置的重点是保证推力器的中心轴线与法拉第探针安装盘的中心重合,其定位精度非常高。测试计算机数据采集和控制系统用于对测试过程中的数据采集和测试后对数据的分析处理。

2.2 测试装置设计

测试装置如图 2 所示。推力器支架和法拉第探针支架固定安装在同一个底板上。2 个支架微量可调,便于在测试时调整,使推力器中心轴线经过法拉第探针安装盘的中心,推力器安装平面与法拉第探针安装平面平行。推力器中心轴线的确定以推力器安装面为基准。

测试用法拉第探针为裸露型探针。该法拉第探针在 20 cm 离子推力器束流密度分布测试中多次使用,结构简单可靠,性能稳定。法拉第探针的探针电流信号由电阻取样,供计算机采集处理。

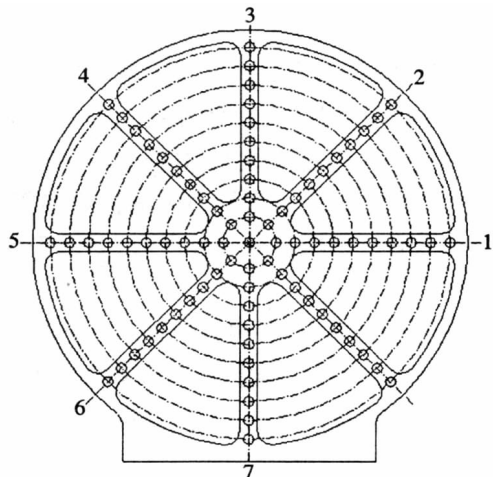


图 1 探针布置示意图

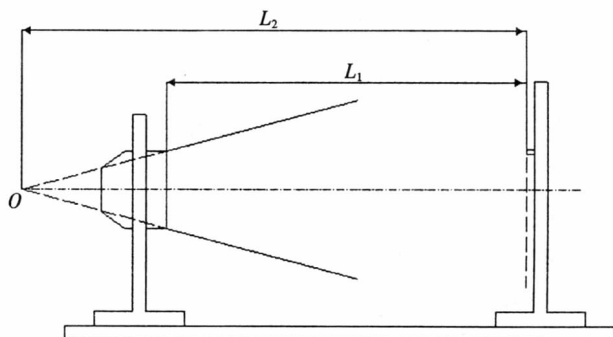


图 2 推力矢量偏角测试装置示意图

2.3 测试计算机数据采集和控制系统设计

(i) 数据采集和控制系统^[4]

测试采用工业控制计算机以实现数据的采集和控制。每个法拉第探针对应 1 路输入,AD 转换精度为 12 位。采集系统硬件用工业数据采集卡及端子板,测试用软件实现数据的显示、存储和分析计算。为了便于直观分析,测试数据同时用图形方式显示,测试软件界面见图 3 所示。

② 推力矢量偏角的计算

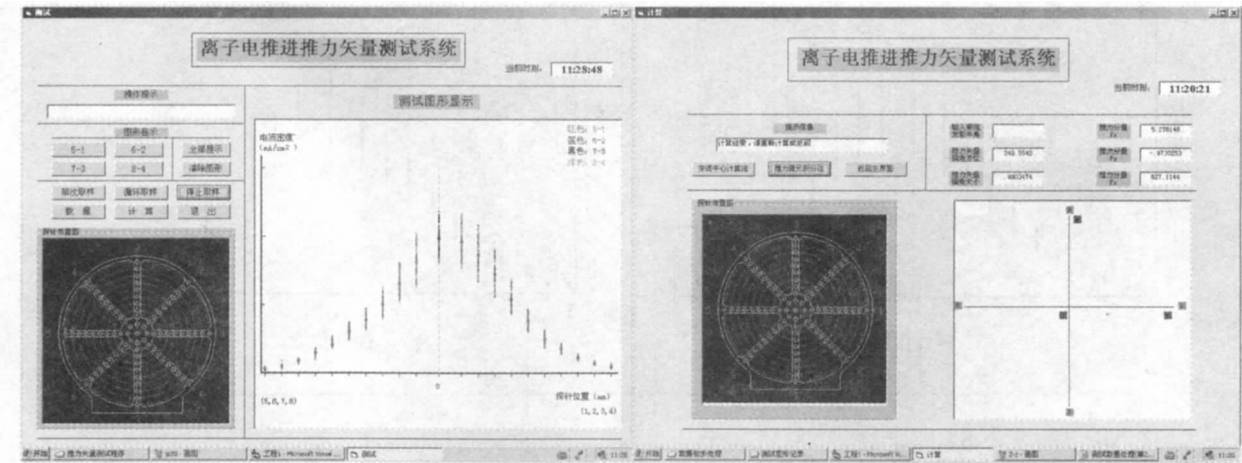


图 3 推力矢量偏角测试软件界面

为了便于分析对比,选择合适的分析计算方法,作者采用 2 种方法进行推力矢量偏角的计算。

- 第一种,由每个法拉第探针的测试值计算得到测试点的离子电流密度,并计算出其对应的小块测试区域束流值。视该股束流对应一个推力微元,用积分的方法计算径向和轴向的推力分量,用 2 个分量计算出推力矢量偏角。
 - 第二种,由每个法拉第探针的测试值计算得到测试点的离子电流密度,并计算出其对应的小块测试区域束流值,类似于求质心的方法,计算出束流中心在测试截面上的位置,再通过测试截面到推力器的距离计算出推力矢量偏角。
- 2 种计算方法都需要确定“束流源点”的位置,即认为束流从推力器轴线上一点发射出来。该点位置计算的几何关系如图 2 所示,用束流发散半角和图中距离 L_1 计算出图中的距离 L_2 , L_2 即为束流源点到测试截面的距离。根据假设条件,计算推力矢量偏角时,视推力矢量的方向由束流源点和测试截面上束流的中心点确定。

3 离子推力器推力矢量偏角测试结果及分析

3.1 离子推力器推力矢量偏角测试及分析

测试系统研制完成后,进行了测试试验。图 4 为研制的测试系统以及测试时的照片。测试中使用的离子推力器为兰州物理研究所研制的 20 cm 离子推力器。测试原始图形见图 5 所示。从图中可以看出,对应每一个测试点,离子电流密度值在一定范围内变化,越靠近束流中心,波动范围越大。这一现象在束流特性测试中同样存在。主要原因是离子推力器放电室和羽流等离子体本身固有的特性,即等离子体存在一定的震荡。测试中,由计算机快速连续地采集测试信号,取大量的数据后计算其平均值,用平均值计算推力矢量偏角。图 6 为测试点电流密度平均值的图形。本次测试共进行了 3 次,测试的图形和数据一致,图 5、图 6 仅给出了 1 组测试数据的图形,图形中的数据进行了归一化处理。图中每个图形表示探针安装盘上一组探针的测试图形,编号“5-1”、“6-2”、“7-3”、“8-4”,与图 1 中探针位置关系相对应。

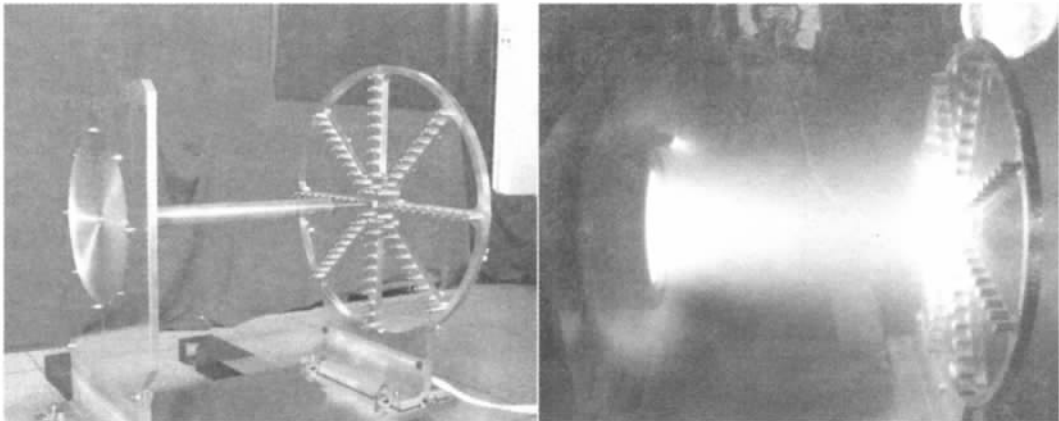


图 4 推力矢量测试装置及测试时的照片

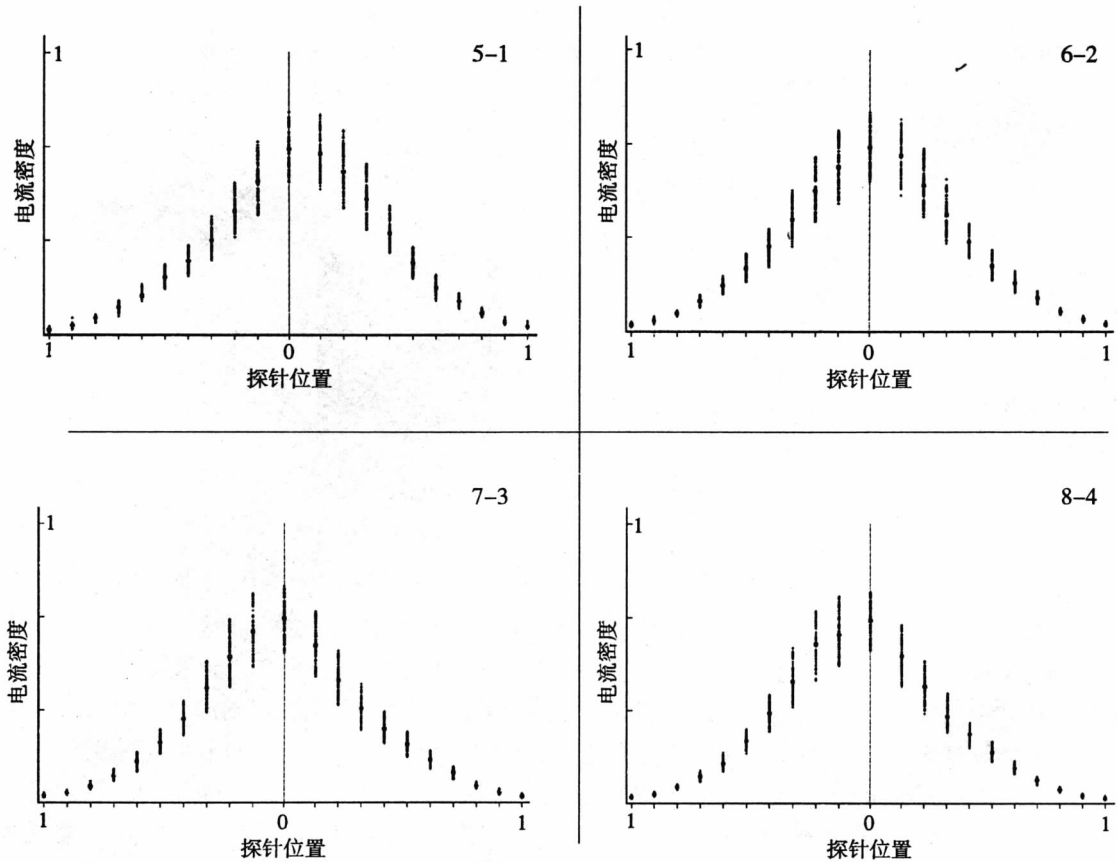


图 5 推力矢量偏角测试原始图形

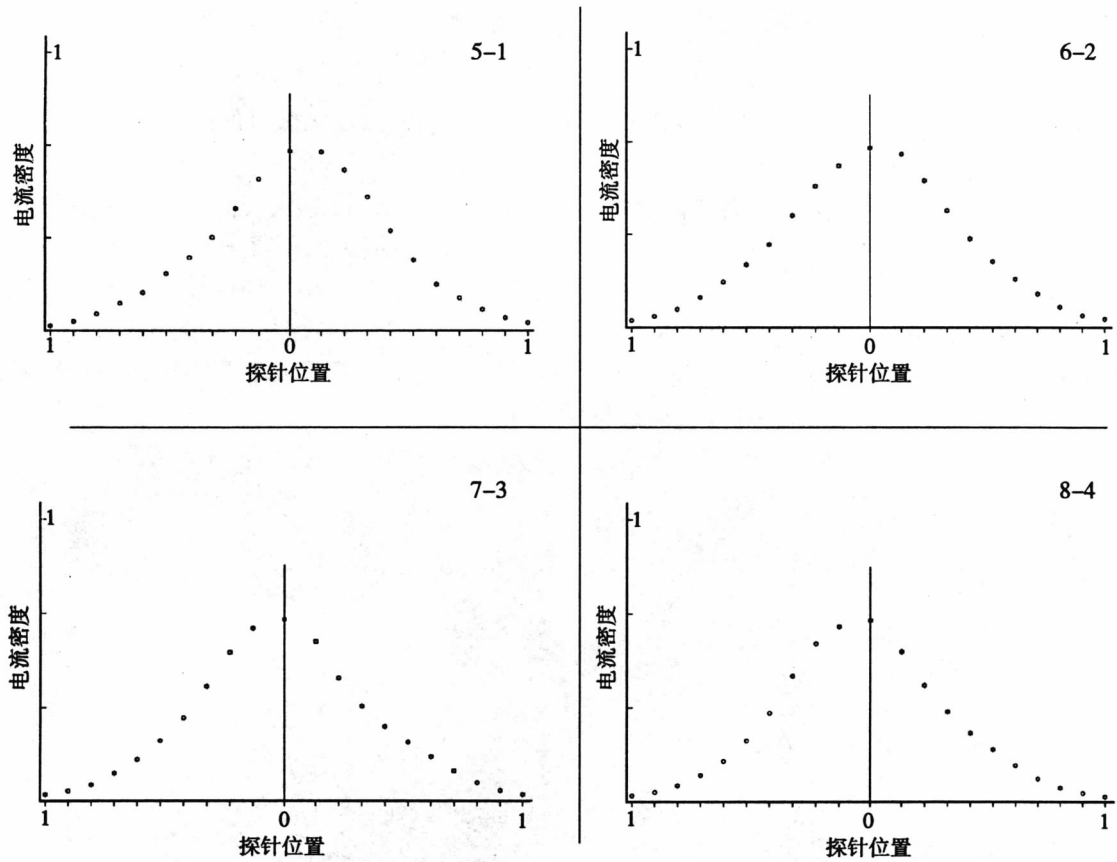


图 6 测试点探针电流的密度平均值

3.2 测试结果

对测试数据采用 2 种计算方法进行计算,计算结果见表 1 所列。从测试图形和计算结果可以看出,3 次测试结果一致性很好,表明离子推力器矢量偏角研制中选用的测试方案可行,研制的测试系统能够对离子推力器的推力矢量偏角进行测试。

表 1 初步测试计算结果

测试次数	推力矢量偏角/(°)		偏斜方位角/(°)	
	推力积分算法	束流质心算法	推力积分算法	束流质心算法
1	0.46	0.46	345.6	345.7
2	0.52	0.53	340.8	340.9
3	0.47	0.48	343.8	343.7

4 结 论

作者研制了离子推力器推力矢量偏角测试系统,应用该测试系统对兰州物理研究所研制的 20 cm 离子推力器进行了测试。测试结果为该离子推力器推力矢量偏角平均值 0.49°。测试共进行了 3 次,测试结果的一致性很好。

为了提高测试系统的性能和确定测试方法和规范,需要进一步开展的研究工作包括 进行大量的测试工作,通过分析对比,确定测试过程参数 提高系统的可靠性 对测试数据的分析和处理的深入研究。

参考文献：

[1] POLLARD JE,Plume Measurements with the T5 Xenon Ion Thruster[R]. AIAA 94- 3139,1994.
[2] POLLARD JE,WELLE RP. Thrust Vector Measurements with the T5 Ion Engine [R]. AIAA 95- 2829,1995.
[3] POLK J E ,ANDERSON JR,BROPHY JR. Behavior of the Thrust Vector in the NSTAR Ion Thruster[R]. AIAA 98- 3940,1998.
[4] 唐福俊,张天平.离子推力器羽流测量 $E\times B$ 探针设计及误差分析[J],真空与低温,2007,13 (2) :77~80.

《真空与低温》期刊关键词选择的规定

发表在《真空与低温》期刊中所有学术论文,必须在摘要后列出不少于 4 个关键词。这些关键词按以下顺序选择：

第一个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标 GB/T13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评论性学术论文等,此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文,此处不写被研究的方法名称,而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词中没有出现的,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

敬请作者积极配合,按以上规定标注关键词,以利于论文的出版、检索及文献的利用。