

文章编号: 1000-8055(2002) 0-0263-05

电弧加热发动机温度和速度的测量

陈黎明, 赵文华, 党道远
(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘要: 本文着重介绍光谱辐射法、激光诱导荧光法、静电探针法等接触式和非接触式测量技术在电弧加热发动机(Arcjet)参数测量中的应用。讨论了电子温度、重粒子温度、羽流速度等参数的测量,并对一些结果进行了分析与论证,指出非热力学平衡态下不同的测量技术测量的是不同的温度指标。从测量技术的发展来看,激光测量技术将成为参数测量的主导技术。

关键词: 电弧加热发动机; 羽流; 等离子测量

中图分类号: V439.4

文献标识码: A

Temperature and Velocity Measurements in Arcjets

CHEN Li-ming, ZHAO Wen-hua, DANG Dao-yuan

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this work some diagnostic techniques are introduced, including emission spectroscopy, laser induced fluorescence, and electrostatic probe. These measurements can be broadly divided into two categories: intrusive and non-intrusive. The measurements of electronic temperature, heavy particle, and plume velocity are described and some of the results are analysed. It is emphasized that different diagnostic techniques will produce different results of temperature measurement and the relationships of temperature to techniques are given. It can be seen that laser techniques can investigate the detail of flow properties and will become the main technique for the measurement of Arcjets' properties.

Key words: Arcjet; plume; plasma diagnostics

1 电弧加热发动机特点和 工作机理^[1]

电弧加热发动机(Arcjet)多用于卫星南北位置保持、轨道提升、转移及轨道维持。Arcjet 比冲高,是化学推进比冲的 2~5 倍,可以明显的节省推进剂质量,减轻发射的重量,提高有效载荷比,增加卫星的生命周期;与离子发动机相比,它的结构和所需的电源都很简单,运行电压低(100~300 V),极大的降低了造价,同时提高了运行的安全

性和可靠性。正因其具有重量轻、体积小、成本低、性能高等特点,它已被成功应用到许多卫星上。Arcjet 技术现在正逐步成为应用的热点,国外对它的研究到目前为止已经相当成熟,而我国对它的研究刚刚起步。

Arcjet 通过电弧加热推进剂,使其从喷管高速喷出形成推力。发动机通道基本形式和内部工作过程如图 1 所示。

部分推进剂旋转着通过由阳极与阴极构成的通道并被形成于轴线附近的高温电弧所加热,然

收稿日期: 2001- 04- 07; 修订日期: 2001- 06- 11

基金项目: 清华大学机械工程学院基金(985)

作者简介: 陈黎明(1974-),男,河北昌黎人,清华大学工程力学系博士生。

后经过由阳极围成的喷管膨胀后高速喷出形成推力,一部分推进剂被中心电弧的高温电离成等离子体以维持该中心电弧。电弧中心温度可达 20000 K 以上,大大高于化学火箭发动机内部工作温度,推进剂可以获得很高的比焓,发动机得到较大的比冲。

2 电弧加热发动机参数的测量

为了建立 Arcjet 性能的可靠模型,将其作为新一代推进器的设计工具,人们在实验上和理论上做了大量的工作。在实验上,采用气动方法、静电方法、光谱方法以及激光方法等获得了内部及外部(羽流)流动过程的多种综合参数和流场参数;在理论上,也已建立了能初步反映化学不平衡、热力学不平衡等较为复杂物理过程的数值模型,为全面认识电弧喷射推力器内部工作过程机制提供了有效的手段。用理论分析模型所预测的喷管轴线上的电子温度、电子数密度等参数的轴向分布与实验结果能够定性吻合,并达到一定程度的定量吻合。这说明当前理论分析水平已能在相当程度上揭示实际过程机制,有关分析模型已用在工程设计计算中。然而,理论分析要达到指导电弧加热发动机的优化设计的目标还相距甚远。随着 Arcjet 数学模型的不断改进,通过实验来校验这些模型已变得越来越重要。

实验中为得到 Arcjet 的宏观参数,如比冲、推进效率,就需要对推进剂流量、推力、电压、电流等进行测量。要研究内部流动,就需要对羽流中速度分布、电子数密度、各种重粒子数密度、电子温度、重离子温度、压力等进行测量^[2]。其采用的主要测量和测量技术包括皮托管探针,光谱的辐射

吸收法,激光诱导荧光法,静电探针等方法。下面介绍 Arcjet 两个主要参数(温度和速度)的测量。

3 测量温度

等离子羽流中包含电子、原子、离子、分子等各种成份,它们可能处于热力学平衡态,也可能处于热力学非平衡态。平衡态时,可用统一的温度参数描述;非平衡态时,对它们状态的描述有不同的指标,如电子温度,重粒子温度(激发温度,振动温度,转动温度等)。确定这些指标对确定等离子体的状态,如平衡态,非平衡态,偏离平衡态的程度以及相应的物理过程具有重要意义。

3.1 静电探针测量电子温度^[2~6]

静电探针或 Langmuir 探针是一种接触式测量方法,常用于测量 Arcjet 羽流的电子温度、电子数密度等。静电探针所要求的测量装置非常简单,只要用一根金属丝,再配上可调电压源与测量探针电流表就可以了。它的使用如图 2 所示。



图 1 Arcjet 工作原理示意图
Fig. 1 Principle schematic of Arcjet



图 2 静电探针实验简图
Fig. 2 Experimental schematic of the langmuir probe

朗缪探针理论假定在很薄的鞘层内,离子和电子收集过程无碰撞,这就要求电子和离子的平均自由程远远大于德拜长度($\lambda_e > \lambda_D, \lambda_i > \lambda_D$),该要求在很多条件下是满足的。探针的电子电流 I 随着加在探针上的偏置电压 V_p 变化, $V_p < 0$ 时:

$$I = \frac{1}{4} en_e \overline{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \exp \left[- \frac{eV}{kT_e} \right] A_p - I_s \quad (1)$$

其中: e 是基元电荷量, n_e 是电子数密度, k 是玻尔兹曼常数, T_e 是电子温度, A_p 是探针收集电子电流的面积, I_s 是离子饱和电流, $-V = V_p - V_{\text{等离子体}}$, 即探针相对于当地等离子体的电位差。作 $\ln I$ 对 V_p 的变化关系图,从其斜率可计算出电子温度 T_e 。

Rodney 等人使用 14 个微小单静电探针进行测量,得到的参数包括浮动电位、鞘层电位、电子数密度、电子温度、探针电流密度。这些测量结果

有助于校验阳极附近的数学模型,可引导这些模型更精确的描述这些近阳极的物理过程,对于了解电弧附着和阳极加热非常重要。除上述应用外,静电探针还可用于测定羽流速度。

3.2 玻尔兹曼图解法测量等离子温度^[2,7,8]

玻尔兹曼图解法属于辐射光谱法测温,是一种非接触测量方法。它是通过观测同种粒子不同能态跃迁的特征谱线,利用玻尔兹曼图确定等离子温度。Ruyten 等人观测了氢原子巴尔末线系的 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 谱线,它们的光谱强度与参考光谱强度有如下关系: $S_i^* \propto S_i^\infty \exp(-E_i/kT_e)$ (2) $S_i^* = S_i/\eta_i$ 是对光谱强度测量值 S_i 的修正, η 是和波长相关的探测效率。由上式可知 S_i^*/S_i^∞ 的对数形式是跃迁上能态 E_i 的线性函数,从直线的斜率可以求出电子温度 T_e ,如图 3 所示。他们测量

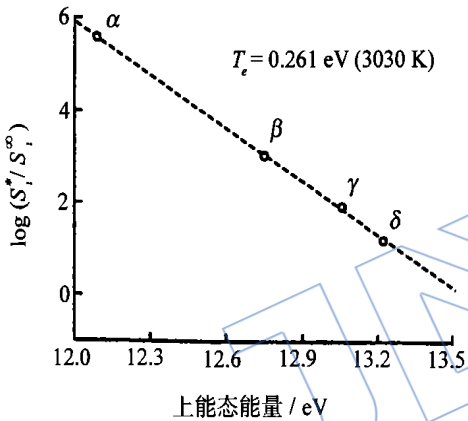


图 3 喷口出口平面,氢原子巴尔末线系玻尔兹曼图谱
Fig.3 Boltzmann plot for the hydrogen balmer lines data were recorded in the exit plane of nozzle

的实际上是等离子体中重粒子激发温度,在热力学平衡的情况下,该温度与等离子体中的电子温度相同。在非热力学平衡的情况下,电子温度与重粒子温度有可能是不同的,所以笼统的讲这一方法测出的温度是电子温度是不恰当的。在热力学非平衡的情况下,图 3 中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 的 4 个点可不在同一条斜线上,它们对该斜线的偏离也在一定程度上表征了等离子体偏离热力学平衡态的程度。若只用两条谱线的相对值确定温度,称作相对强度法。只用一条谱线的谱线强度也可以确定等离子体羽流中的温度,此时必须知道发射该谱线粒子的数密度。这种方法也被称为谱线绝对强度法。

3.3 激光诱导荧光法测量激发温度^[2,5,6,8~12]

激光诱导荧光法(LIF)是一种非接触测量方

法,它是从激光荧光光谱的形状来确定重粒子的温度。入射激光聚焦到羽流的某一空间位置,调整入射激光频率,使该空间位置的粒子因共振吸收由低能态跃迁到高能态,高能态的粒子跃迁回低能态时产生荧光,在垂直于入射光路的方向接受该空间位置发出的荧光。获得的荧光强度信号随波长的变化而变化,这种变化是多种增宽机理作用的结果。根据相应的增宽机理,可确定激发温度。Liebesking 等人采用激光诱导荧光法,在其它增宽机理可忽略的情况下,根据多普勒增宽机理确定了氢原子的温度。多普勒增宽机理为:

$$\Delta\nu = \nu_0(8kT \ln 2/mc^2)^{1/2}$$
 (3)

其中: ν_0 是荧光信号的中心频率, $\Delta\nu$ 是荧光信号的谱线宽度, m 为氢原子质量, c 是光速。根据测量的谱线宽度 $\Delta\nu$,可计算出氢原子温度 T 。如图 4 所示。

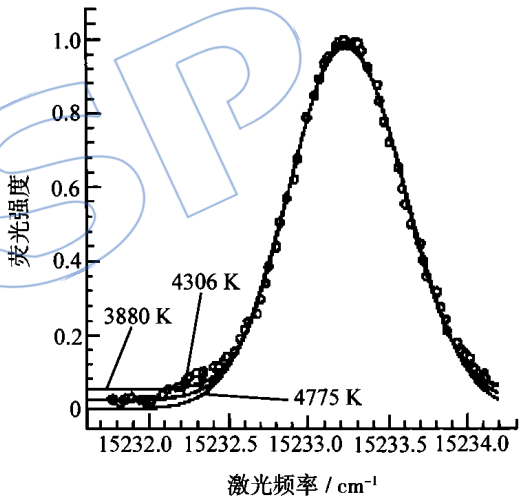


图 4 多普勒增宽机理测量氢原子激发温度
Fig.4 The excited temperature of hydrogen atoms determined by doppler broadening mechanism

入射激光聚焦到不同的空间位置,就可获得温度的空间分布。与辐射光谱法相比,激光探针可聚焦在羽流中一个直径很小的空间位置,而且信噪比很高,从而获得较高的空间分辨率;另一个优点是不用进行阿贝尔转换。其缺点是谱线宽度的确定将存在一定的误差。从荧光谱线中心频率相对于参考光谱中心频率的移动,还可以决定速度的空间分布。实践证明激光诱导荧光法是一种理想的测量方法,而且已得到了越来越广泛的应用。

3.4 辐射光谱法测量分子转动温度^[2,7]

辐射光谱法测量分子转动温度的技术是通过研究同一能级上发生的转动跃迁来确定分子的转

动温度,是一种非接触测量方法。Ruyten 等人研究了 Arcjet 羽流中 NH 分子的转动光谱,探测范围是(0- 0)谱带的 $c^1\Pi \rightarrow b^1\Sigma^+$ 分子跃迁,波长 450~474 nm。线状谱线强度和转动温度的关系由下式确定:

$$S^*(J) \propto S_{JJ} \exp[-E(J)/kT_{ROT}] \quad (4)$$

其中: $S^*(J)$ 是转动量子数为 J 的线状谱强度(经过光学探测效率修正), S_{JJ} 是 Honl-London 线强度因子; $E(J)$ 是上转动能级能量。NH 分子转动光谱有 3 个分支, P 支、 R 支、 Q 支,对应的 S_{JJ} 分别为 $1/2J'$, $J' + 1/2$, $1/2(J' + 1/2)$ 。将实验结果表示成玻尔兹曼图谱的形式,即 $\ln[S^*(J)/S_{JJ}]$ 随 $E(J)$ 的变化关系,从拟合直线的斜率可求出转动温度 T_{ROT} 。如图 5 所示。从图中 P ,

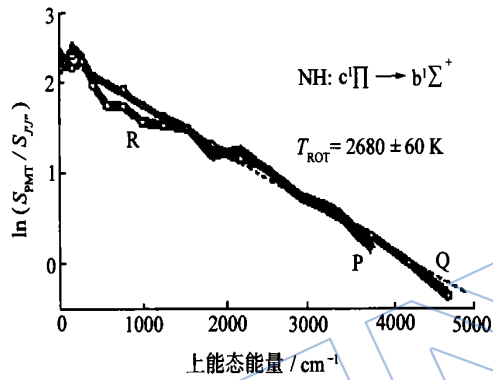


图 5 NH 分子转动谱线玻尔兹曼图谱(包括 P, Q, R)
Fig.5 Boltzmann plot for the rotational lines of the NH radical. Triangular, round, and square data points represent P, Q , and R -branch transitions, respectively determined by doppler broadening mechanism
 Q, R 支的相似结果可以看出,等离子体接近于热力学平衡态。

4 速度测量

羽流速度的测量为人们了解羽流特性,校验模型提供了重要参考。目前人们常采用发射光谱技术、激光诱导荧光技术和静电探针技术进行速度测量。

4.1 发射光谱多普勒频移速度测量^[2, 7, 8]

发射光谱多普勒频移技术是利用特征光谱因多普勒效应产生的频移来确定羽流的速度。多普勒频移和速度的关系由下式确定:

$$v = (\Delta\lambda/\lambda) \times (c/\cos \alpha) \quad (5)$$

其中: $\Delta\lambda$ 为多普勒频移, λ 光波波长, V 为平行于羽流轴线方向的速度。测量时,光谱仪和羽流成一

定角度接受信号,同时测量未发生频移的参考信号,从这两个信号可以确定多普勒频移,计算出流动速度。这种方法测量的是一个横截面的信号

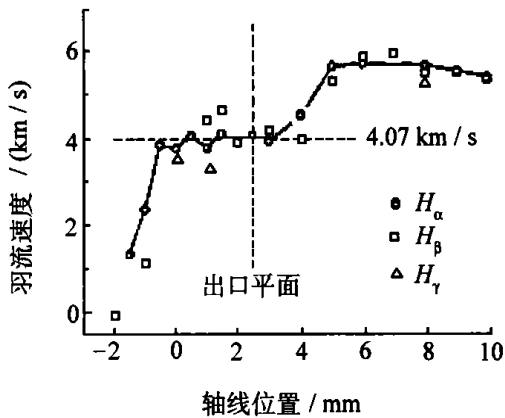


图 6 由巴尔末 α, β, γ 谱线多谱勒频移计算羽流轴向速度

Fig.6 Values of plume velocities calculated from the doppler shifts of the hydrogen balmer alpha, beta, gamma lines

积分强度,得到的速度是截面的平均速度。Ruyten 等人用此法测量了氢 Arcjet 不同中线位置截面的平均速度。如图 6 所示。

4.2 激光诱导荧光多普勒频移速度测量^[2, 6, 10, 11, 13]

激光诱导荧光多普勒频移速度测量技术使用

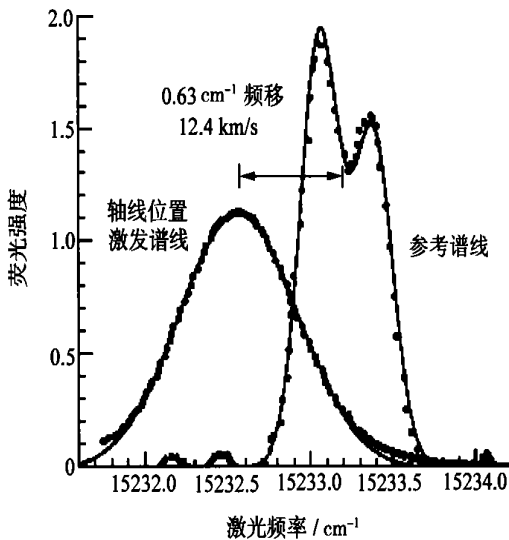


图 7 由激光多普勒频移计算羽流轴向速度
Fig.7 Axial velocity of plume determined by laser doppler shifts

的实验设备与激光诱导荧光多普勒测温设备相同。测温是根据谱线的线型,按照增宽机理确定温

度;测速是根据多普勒频移确定速度。它的原理也可用式(5)式表示。不同的是它测量的速度是空间分辨的,即它提取的信号是空间的一个点产生的,而不是截面的积分信号,因此它可测出速度的空间分布,而且信噪比很高。在 Liebeskind 等人的工作中,测量了氢 Arcjet 的速度。如图 7 所示。

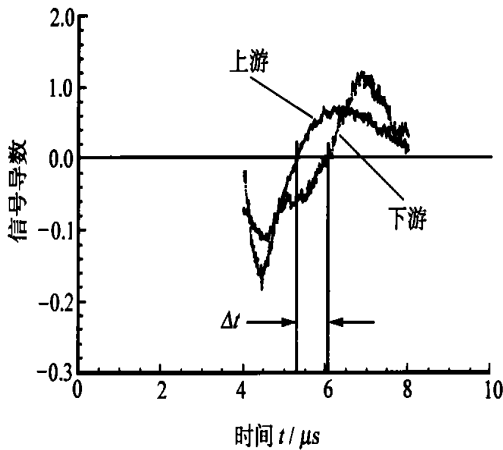


图 8 双探针捕获信号延迟,用于计算羽流速度
Fig. 8 Dual-probe captures signal's delay, used for calculating plume velocity

4. 3 静电探针速度测量^[2~4]

静电探针速度测量技术是一种接触式测量方法,将相隔一定距离的两个静电探针沿中线方向放置在羽流中,在 Arcjet 稳定工作时,两个探针获得的信号是相似的。若供电系统产生一个电压信号的脉冲变化,该变化将被两个探针先后捕获,从这个时间间隔和探针的距离就可计算出流速。Bufton 等人用这种方法测量了流速。如图 8 所示。

5 结 论

目前,测量电弧加热发动机(Arcjet)性能和羽流流动特性的工作中已经有许多技术可以利用,它们是了解 Arcjet 的工作机理和校验理论模型的重要手段。需要强调的是,在测量过程中,要注意辨别 Arcjet 羽流是否处于热力学平衡态。在热力学非平衡态下,要非常小心的选择温度的测量方法。因为不同的方法测得的温度是不同的,它们只表征着不同粒子和不同物理过程所表征的温度值。

接触式测量技术的缺点是它会对流场造成干扰,但它能给出流动特性的非常有用的信息,在一些参数测量中(如电子温度),它还是主要的测量手段。非接触式的光谱测量技术已成为 Arcjet 的主要测量手段,特别是激光技术的应用,为准确了

解流动过程的细节提供了可能。由于它具有高的空间分辨率、高的信噪比,并且可以具体到测量每一种粒子的信息,因此它的应用越来越广泛。随着相关理论和技术的发展,激光技术将成为 Arcjet 测量的主导技术。

参考文献:

[1] 廖宏图,吴铭岚,江南豪. 电弧喷射推力器内部工作工程研究综述[J]. 推进技术, 1999, 20(3): 107- 112.

[2] Carl D Scott. Survey of Measurement of Flow Properties in Arcjets[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1993, 7(1): 9- 24

[3] Bufton S A, Burton R L, Krier H. Measured Plasma Properties at the Exit Plane of a 1 kW Arcjet[R]. AIAA 95- 3066, 31st JPC, 1995.

[4] Burton Rodney L, Krier Herman. Overview of Arcjet Thruster Research at the University of Illinois[R]. AIAA 96- 3296, 32nd JPC, 1996.

[5] Cappli M A, Walker Q E, Storm P V. Doppler-Free Absorption Measurements of Stark Broadening in a Flowing Hydrogen Plasma[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2000, 66: 343- 361.

[6] Walker Q E, Hargus W, Cappelli M A. Characterization of a Low-Power Helium Arcjet[R]. AIAA 98- 3636, 34st JPC, 1998.

[7] Ruyten W M, Burtner D, Keefer D. Spectroscopic Investigation of a Low-Power Arcjet Plume[R]. AIAA 93- 1790, 29th JPC, 1993.

[8] Storm P V, Cappelli M A. High Spectral Resolution Emission Study Of A Low Power Hydrogen Arcjet Plume [R]. AIAA 95- 1960, 26th JPC, 1995.

[9] Olejniczak Joseph, Fletcher Douglas G. An Experimental and Computational Study of the Freestream Conditions in an Arc-Jet Facility [R]. AIAA 2000- 2567, 31st PLC, 2000.

[10] Walker Q E, Cappli M A. Laser-Induced Fluorescence Measurements of a Helium Arcjet Flow[R]. AIAA 99- 3603, 30th PLC, 1999.

[11] Liebeskind John G, Hanson Ronald K, Cappelli M A. Laser-Induced Fluorescence Diagnostic for Temperature and Velocity Measurements in a Hydrogen arcjet plume [J]. APPLIED OPTICS, 1993, 32(30): 6117- 6126.

[12] Storm P V, Cappelli M A. Stark Broadening Corrections to Laser-Induced Fluorescence Temperature Measurements in a Hydrogen Arcjet Plume [J]. APPLIED OPTICS, 1996, 35(24): 4913- 4918.

[13] Crofton M W, Welle R P, Janson S W, et al. Temperature, Velocity and Density Studies in the 1 kW Ammonia Arcjet Plume by LIF [R]. AIAA 92- 3241, 28th JPC, 1992.