

用莫尔计算机层析技术诊断三维电弧温度场*

高益庆 龚勇清

(南昌航空工业学院, 南昌 330034)

摘 要 结合光栅 Talbot 效应和莫尔技术, 利用有限角计算机层析算法, 借助电弧等离子体物理方程, 对自由电弧三维温度场进行了诊断研究。

关键词 莫尔偏转术, 计算机层析技术, 电弧温度场。

1 引 言

用干涉法诊断电弧温度场, 迄今多限于研究轴对称电弧。然而在实际情况下很难做到这种对称性, 考查三维电弧在某些情况下亦非常必要。三维折射率场的重建技术表明, 可以由多方向光学投影数据, 通过计算机数值反演算法, 计算出非对称场的折射率分布。康琦和高益庆等人用多方向全息干涉技术诊断了非对称电弧温度场, 但观察角过小, 且不是一次获得干涉数据^[1]。莫尔偏转术是用光束偏转角作为投影数据, 而偏转角的计量并不象干涉法中光程差的计量那样需要参考光束, 对装置稳定性的要求也不象干涉法那样苛刻, 在实际应用中更便于现场测试。不少作者用莫尔偏转术研究了三维密度场^[2, 3], 但在电弧诊断的实际场合, 试验数据的采集不可避免地受到测试装置的限制。这种有限角($< 180^\circ$)重建, 其精度低且易受数据噪声的影响。为了尽可能提高精度和压缩这种影响, 一方面要在实验技术上尽可能获得大观察角范围的数据, 另一方面则是寻求更为有效的重建算法。本文利用计算机模拟研究方法, 考查数据噪声和观察角对重建算法的影响; 在实验安排上, 设计了五路探测光束, 从而获得了 120° 视角范围内五个观察方向的莫尔偏转角数据, 结合电弧折射率场的物理知识, 由代数重建法(ART), 获得了电弧折射率场的三维空间分布, 再由电弧等离子体的状态方程、沙哈方程和准中准方程求出了三维温度分布。

2 基本原理

如图 1 所示, 当平行相干光照射周期为 p 的光栅 G_1 , 在其后距离为:

$$x'_q = 2qp^2/\lambda, \quad q = 1, 2, \dots \quad (1)$$

处的 G_2 上, 可形成 G_1 的 Talbot 像, G_2 与 G_1 同周期, 且彼此平行, 刻线成一小夹角 θ 。在 G_2 后的光屏上呈现周期为 w 的莫尔直条纹:

* 江西省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996-11-11; 收到修改稿日期: 1997-05-13

$$w = p/2 \sin (\theta/2) \quad (2)$$

当波长为 λ 的平行光通过待测的电弧温度场后，光线会发生偏转，使得 G_1 的像发生变化，从而导致莫尔条纹位移。若光线偏转角为 φ ，则其相应的位移量为：

$$\Delta z' = x'_q w \varphi / p \quad (3)$$

只要测出条纹位移量 $\Delta z'$ ，就可以求出光线偏转角 φ 。

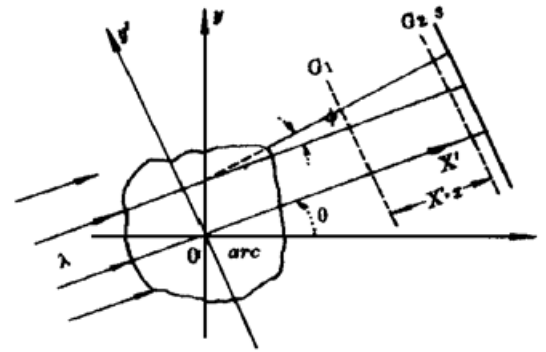


Fig. 1 Coordinate systems

若电弧温度场某一截面上的折射率差为 $f(x, y) = n_0 - n(x, y)$ ， n_0 为环境气体折射率， $n(x, y)$ 为待测电弧温度场的折射率分布。平行探测光线经过温度场后，其偏转角很小，可近似表示为：

$$\varphi(y', \theta) = \frac{1}{n_0} \int_{s_j} \frac{\partial f}{\partial y'} ds \quad (4)$$

只要知道各个方向 (θ) 的光线偏转角数据，就可以通过上式反演出电弧场的折射率。

电弧场中部分电离等离子体的折射率应为各种粒子折射率之和^[1]：

$$n - 1 = C_a N_a + C_i N_i + C_e N_e \quad (5)$$

N_a 、 N_i 和 N_e 分别为原子、离子和电子的粒子数密度， C_a 、 C_i 和 C_e 可通过相应的常数给出。

假定电弧等离子体处于局部热平衡状态，且只考虑一次电离效应，据电弧等离子体有关热力学方程有

$$P = (N_a + N_i + N_e) K T \quad (6)$$

$$N_e \approx N_i \quad (7)$$

$$N_i N_e / N_a = (2Z_i / Z_a) (2\pi m_e K t / h^2)^{3/2} \exp(-\omega_1 / K T) \quad (8)$$

式中 P 为压力， K 为玻耳兹曼常数， h 为普朗克常数， T 为热力学温度， m_e 为电子质量， ω_1 为一次电离能， Z_i 和 Z_a 分别为离子和原子的配分函数。若 P 近似按环境压力处理，一旦确立了折射率 n ，就可由(5) ~ (8) 式算出 T 、 N_i 、 N_e 和 N_a 。

3 计算机模拟研究

由(4)式重建折射率差场欲获得较好的重建精度则必须选择合适的重建算法。把重建场区分成 $M \times N$ 个网格，其间隔为 l_x 和 l_y ，再将折射率差按内插函数 b_{mn} 展成下列级数：

$$f(x, y) = \sum_m \sum_n f_{mn} b_{mn}(x, y) \quad (9)$$

则光束偏转角应为：

$$\varphi(y', \theta) = \sum_m \sum_n f_{mn} \frac{1}{n_0} \int_{s_j} \frac{\partial b_{mn}}{\partial y'} ds \quad (10)$$

设

$$A_{mn}(y', \theta) = \frac{1}{n_0} \int_{s_j} \frac{\partial b_{mn}}{\partial y'} ds \quad (11)$$

则有

$$\varphi(y', \theta) = \sum_m \sum_n f_{mn} A_{mn}(y', \theta) \quad (12)$$

若 b_{mn} 选择为 sinc 函数，即

$$b_{mn}(x, y) = \text{sinc} [(x - ml_x) / l_x] \text{sinc} [(y - nl_y) / l_y] \quad (13)$$

则由(11)式不难得出:

$$A_{mn}(y', \theta) = \begin{cases} \frac{l_x}{n_0 l_y \cos^2 \theta} \operatorname{sinc}^{(1)}\left(\frac{ml_x \operatorname{tg} \theta + y'/\cos \theta - nl_y}{l_y}\right), & 0 \leq |\operatorname{tg} \theta| \leq \frac{l_y}{l_x} \\ \frac{l_y}{n_0 l_x |\sin \theta| \sin \theta} \operatorname{sinc}^{(1)}\left(\frac{ml_x \operatorname{tg} \theta + y'/\cos \theta - nl_y}{\operatorname{tg} \theta l_x}\right), & \frac{l_y}{l_x} < |\operatorname{tg} \theta| < \infty \\ \frac{l_y}{n_0 l_x} \operatorname{sinc}^{(1)}\left(\frac{y' + ml_x}{l_x}\right), & \operatorname{tg} \theta \rightarrow \pm \infty \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\operatorname{sinc}^{(1)}(u)$ 为 $\operatorname{sinc}(u)$ 的一阶导数。

对于不同的观察角 θ (j_2 个观察角) 和不同的径向值 y' (每一个观察方向有 j_1 个数据) 可得出 $I = j_1 \times j_2$ 个光束偏转角, 于是(12)式构成一组关于未知数 f_{mn} 的线性方程组:

$$\Phi = A f \quad (15)$$

式中 Φ 为 I 个偏转角数据组成的向量, f 为 $J = M \times N$ 个未知折射率差数据组成的向量, A 为 $I \times J$ 个系数组成的矩阵。如果总观察角小于 180° , 则(15)式成为一病态方程组。实际计算中, 常采用迭代法求解。使用迭代法可以方便地结合待测场的物理知识, 比如在温度场以外, 折射率差值为零, 在场区内, 折射率差值不小于零等。本文采用代数重建算法:

$$f^{(0)} = A^Z \Phi \quad (16)$$

$$f^{(k+1)} = \begin{cases} f^{(k)} & \sum_j^{MN} A_{ij} = 0 \\ f^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{\varphi_{i_k} - \sum_j^{MN} A_{ij} f_j^{(k)}}{(\sum_j^{MN} A_{ij})^2} A_{i_k}, & \sum_j^{MN} A_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 A^Z 为转置矩阵, k 为迭代次数, A_{i_k} 是矩阵 A 中的第 i_k 行元素构成的矢量, φ_{i_k} 是相应的光线偏转角, $\lambda^{(k)}$ 为松弛参数, $i_k = k \pmod I + 1 = k - \operatorname{Int}(k/I)I + 1$ 。

模拟运算中取电弧温度分布为

$$T_D(x, y) = \begin{cases} T_0 + 1.3 \times 10^4 xy \exp[1 - 4.5(x^2 + y^2)], & 0 \leq x, y \leq 1 \\ T_0 & \text{其它} \end{cases} \quad (18)$$

考虑到本实验中模拟研究的对象是氩气保护的自由电弧, 除中心区域温度较高, 呈现部分电离等离子体外, 周围温度急剧下降。为此把电弧温度场分为三个区域: 中心区即高温电离区; 次外支即氩气保护区; 外层即空气区。对于高温电离区的折射率可由(5)~(8)式算出; 对于空气区, 由下式计算折射率差:

$$f(x, y) = [1 - T_0/T_D(x, y)](n_0 - 1) \quad (19)$$

同理, 对于氩气保护区, 可由下式计算:

$$f(x, y) = [1 - T_0/T_D(x, y)](n_{0r} - 1) \quad (20)$$

式中 n_{0r} 和 n_0 为室温 T_0 时氩气和空气折射率, 可由经验公式得出^[4]。通过计算在不同温度下氩气一次电离等离子体、氩气和空气的折射率, 发现它们在大气压下某些温度范围内比较接近, 从中选择三个区域的温度转换点。

模拟温度场的折射率差分布求出后, 再计算光线偏转角 $\varphi(y', \theta)$ 。为了考查噪声影响, 使用加法噪声模型

$$\Phi' = \Phi + aE\Phi \quad (21)$$

式中 a 为一个常数, E 为三角矩阵, 其元素为高斯白噪声。

重建的平均误差和最大误差由下式表示:

$$T_{er} = \sum_m \sum_n [|T_{mn} - T'_{mn}| / T_{\max} MN] \quad (22)$$

$$T_{erm} = |T_{mn} - T'_{mn}|_{\max} / T_{\max} \quad (23)$$

上两式中, T_{mn} 为原始温度, T'_{mn} 为重建的温度, T_{\max} 为最高温度。

模拟运算结果见表 1(每个方向的采样数 $j_1 = 17$, $M \times N = 5 \times 7$)。

Table 1. Reconstructing Errors/(%)

noise α	parameter λ	viewing range	viewing directions (j_2)	Term	Ter
0	1	90°	19	5.8	2.7
		90°	5	5.9	2.8
		120°	5	4.9	2.1
		180°	5	3.9	1.6
0.01	0.025	90°	19	8.1	4.2
		90°	5	7.9	3.8
		120°	5	6.3	3.2
		180°	5	4.7	2.5

模拟运算结果表明: 观察角范围愈大, 重建精度愈好; 对于噪声数据, 90°视角范围, 5 个观察方向的重建精度稍优于 19 个观察方向。对于噪声数据, 重建误差达最小值后迭代会发散, 取松弛参数 $\lambda = 0.025$, 能有效地抑制发散。

4 氩气电弧温度的测试

光路设计如图 2 所示。共有五路探测光, 观察视角范围达 120°, 每路探测光路上均有平行放置的同周期光栅, 其刻线方向各与弧场纵向轴线成一小角 $\theta/2$, 调整两光栅间距 x_k 与夹角 θ , 使莫尔水平参考条纹清晰且条纹间距适当。透镜焦平面上的滤波小孔是为了除去莫尔条纹中不必要的高频项, 使条纹更加清晰并减弱弧光的影响。当点燃电弧时, 就可在漫射屏上实时观察莫尔条纹的变化, 在屏的位置上安置记录底片或 CCD 摄像机, 就可记录莫尔条纹。测试的对象是一双气通道 Tig 焊弧。该焊枪有同心两层喷嘴。内喷嘴喷出的氩气起冷却电极、增强电弧热收缩作用; 外层喷嘴喷出的氩气起保护熔池及热影响区的作用。实验中要尽可能做到气流周向均匀, 钨极锥度要好, 铜极表面光洁, 内部通水冷却适宜。阴阳两极中心稍偏离, 以获得非对称电弧折射率场。

实验中使用的栅周期 $P = 0.1 \text{ mm}$, 两光栅间距 $x_k = 23.6 \text{ cm}$, 环境温度 $T_0 = 295 \text{ K}$ 。环境压力为 10^5 Pa 。实验中测试的双气通道电弧, 其电流为 40 A, 电压为 18.5 V, 内喷嘴直径为 5 mm, 喷出的氩气流量为 1.5 L/min, 外喷嘴直径为 12 mm, 喷出的氩气流量为 4.5 L/min, 弧长为 1.4 cm。

通过以上光路一次获得五个方向的莫尔条纹图, 测出同一水平线上的条纹位移量 $\Delta z'(y', \theta)$, 由

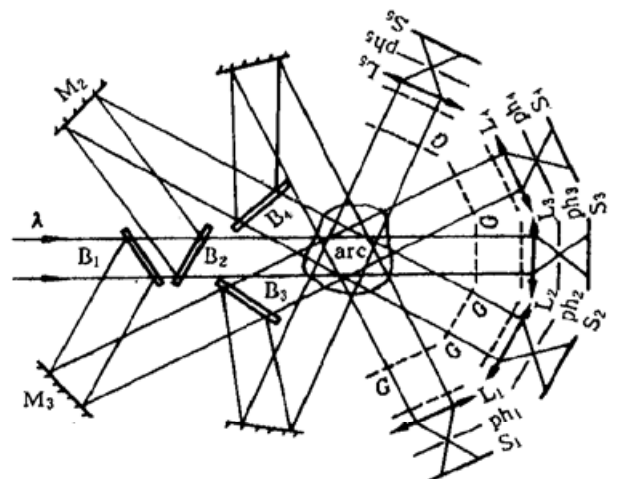


Fig. 2 Optical arrangement for diagnostics of arc

(3) 式可获得电弧温度场中相应水平截面上的光线偏转角 α_y', θ), 通过代数重建算法重建出该截面上的折射率, 再由(9)式计算出折射率分布。同理可算出其它截面上的折射率, 直至算出整个电弧场中的折射率分布。折射率算出后由(5)~(8)式联解出高温区的温度和粒子数密度, 由(20)式和(19)式算出氩气保护区和空气区的温度。将电弧温度场分成 12 个水平截面, 计算出了各个截面上的折射率、粒子数密度和温度分布。表 2 为距铜极 0.66 cm 的截面上高温电离区诊断出的温度, 其中最高温度为 1.41×10^4 K, 最大电子数密度为 $1.61 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。表 3 为距铜极 0.99 cm 的截面上诊断出的温度, 其中最高温度为 1.49×10^4 K, 最大电子数密度为 $1.78 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

Table 2. Temperature distribution of the arc field $T(x, y, z_6)$ /K

5100	5300	5500	5700	5600	5200	5000
5200	6500	8100	8300	7800	6400	5100
5300	7200	9700	10200	9200	7600	5200
5600	8200	10700	14100	9800	7900	5400
5400	7500	9100	9400	8700	7300	5300
5200	6300	7200	7500	7100	6100	5100
5000	5100	5200	5400	5300	5100	5000

Table 3. Temperature distribution of the arc field $T(x, y, z_9)$ /K

4200	4300	4800	5000	4900	4200	4100
4300	5300	6800	7900	7100	5200	4200
4500	6800	10800	11500	9900	6700	4300
5400	8100	10900	15800	11100	7700	5300
4400	6700	10200	10400	9700	6500	4400
4200	5400	6500	7700	6800	5300	4300
4100	4200	4700	4900	4800	4100	4000

参 考 文 献

- [1] Qi Kang, Yiqing Gao, Hanquan Ding *et al.*, Study on 3-D arc plasma fields with holographic interferometry. *Chin. J. Lasers (E.E)*, 1992, **1**(3): 269~ 276
- [2] G. W. Faris, R. L. Byer, Three-dimensional beam-deflection optical tomography of a supersonic jet. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24): 5200~ 5212
- [3] 阎大鹏, 贺安之, 用大口径高灵敏度莫尔偏折法测量高超音速激波风洞中非对称流场. *光学学报*, 1990, **10**(6): 533~ 539
- [4] C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*. London, Athlone Press, 1963

Diagnostics of 3-D Arc Temperature Fields by Moire CT Technique

Gao Yiqing Gong Yongqing

(Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

(Received 11 November 1996; revised 13 May 1997)

Abstract The diagnostics of 3-D arc temperature fields by the Talbot effect-Moire technique and limited-angle tomography algorithm has been studied on the basis of arc plasma physics.

Key words Moire deflectometry, computed tomography, arc temperature.