

文章编号: 1001-1455(2007)01-0045-05

测量脉冲大电流的双光路光学电流传感器技术*

邓向阳, 李泽仁, 彭其先, 刘俊, 王桂吉, 唐晓松

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 提出了双光路光学电流传感器检测方法及其数据处理方法, 即激光输出功率保持不变时, 可采用双光路结构和反正切函数处理方法求出待测脉冲大电流。采用双光路光学电流传感器和罗果夫斯基线圈对比测量了充电电压为 18 kV、电容为 31.8 μF 的电炮的短路电流, 两种测试方法的实验结果取得了较好的一致性, 证明了双光路光学电流传感器的有效性。

关键词: 爆炸力学; 光学电流传感器; 测量脉冲大电流; 线性双折射; 李萨如图形

中图分类号: O389; TN249 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引 言

光学电流传感器由 A. M. Smith^[1]于 20 世纪 70 年代首次提出, 经过不断的发展, 大致发展为四种类型: 全光纤型、块状玻璃型、光电混合型和磁场传感器型^[2], 具备电测方法难具有的抗强电磁干扰和耐高压等优点。然而传统结构的光学电流传感器测量范围小, 很难满足冲击大电流技术和脉冲功率技术(例如电磁加载下高能密度物理研究领域中的电炮加载技术^[3]、Z 箍缩的短路脉冲大电流测量^[4]等)中测量脉冲大电流的要求。作者在传统光学电流传感器的基础上提出了一种四光路光学电流传感器, 极大地提高了测量范围^[5], 但四路输出信号增加了系统的复杂性。而且在研究四光路光学电流传感器的数据处理方法时发现, 如果激光输出功率稳定性很好, 完全可用两路有 90°位相差的信号代替四路两两之间有 90°位相差的信号, 因此可用双光路光学电流传感器替换四光路光学电流传感器, 这样不仅可以简化系统结构, 便于工程化, 而且可减少成本。

本文中介绍双光路电流检测方法及其数据处理方法。为证明有效性, 采用双光路光学电流传感器与罗果夫斯基线圈对比测量了充电电压为 18 kV、电容为 31.8 μF 的电炮的短路脉冲电流。

2 双光路检测方法及其数据处理方法

双光路检测方法如图 1 所示, 光源发出的光由起偏器变成线偏振光, 经过磁光探头, 待测电流产生的磁场对线偏振光进行磁光调制, 受调制的线偏振光进入非偏振分束器被分成两束, 经过两个解偏器, 被解出光强变化, 最后, 进入两个光电二极管, 转换成相应的电信号。

起偏器光轴方向选为竖直方向, 并设为坐标系的 x 轴方向, 两个解偏器的光轴与起偏器的光轴的夹角分别为 0° 和 45° , 这里统一用 α 表示。 β 为磁光探头的固有线性双折射(由应力不均造成的双折射)产生的相位差, θ 为无双折射时线偏振光在磁场作

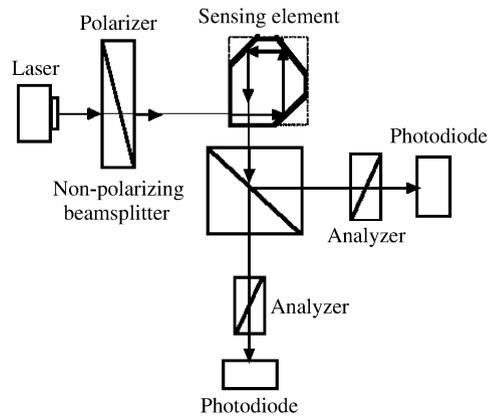


图 1 双光路光学电流传感器

Fig. 1 Optical current sensor with two paths

* 收稿日期: 2005-10-26; 修回日期: 2006-03-22

作者简介: 邓向阳(1975—), 男, 硕士。

用下通过磁光探头产生的偏转角。设入射激光的功率为 P_0 , 忽略整个传输过程中光强的损耗。

根据 Jones 矩阵可求出输出光的电场矢量^[6]

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{P_0/2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 表示输出光的电矢量振幅; $\begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix}$ 为磁光探头的传输矩阵^[7], $A = \cos \frac{\phi}{2} - i \frac{\beta}{\phi} \sin \frac{\phi}{2}$, $B = \frac{2\theta}{\phi} \sin \frac{\phi}{2}$, $\phi = \sqrt{4\theta^2 + \beta^2}$, A^* 为 A 的复共轭。 $\begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}$ 代表两个不同角度解偏器的 Jones 矩阵。

与式(1)相应的双路输出信号的功率 $P(\alpha)$ 可表示为^[6]

$$P(\alpha) = \frac{P_0}{2} \left[\cos^2 \frac{\phi}{2} \cos^2 \alpha + \left(\frac{2\theta}{\phi} \right)^2 \sin^2 \frac{\phi}{2} \sin^2 \alpha + \frac{\theta}{\phi} \sin \phi \sin(2\alpha) + \frac{\beta^2}{\phi^2} \sin^2 \frac{\phi}{2} \cos^2 \alpha \right] \quad (2)$$

将 α 分别等于 0° 和 45° 代入式(2), 并考虑到实际光路中的双路输出信号受到耦合效率、光电二极管的增益和 α 设置误差的影响(忽略了固有线性双折射, 这对脉冲大电流是一个很好的近似), 则双路输出信号为

$$P(0^\circ) = \frac{K_1}{4} P_0 [1 + D_1 \cos(2\theta + \eta_1)] \quad (3)$$

$$P(45^\circ) = \frac{K_2}{4} P_0 [1 + D_2 \sin(2\theta + \eta_2)] \quad (4)$$

式中: K_1 、 K_2 为与激光的耦合效率和光电二极管的增益有关的常数; D_1 、 D_2 为信号的调制对比度, 与光源的偏振度有关(对于高品质的起偏器, 可取为 1); η_1 、 η_2 为与偏振器件品质和 α 设置误差有关的常数(通常不会超过几度)。初始时刻由于无电流诱导磁场的存在, 偏转角 θ 为零。

对式(3)、(4)的信号进行相对运算, 即把式(3)除以该式的初始值的一半, 式(4)除以该式的初始值, 得到相应信号

$$S(0^\circ) = \frac{2}{1 + D_1 \cos \eta_1} [1 + D_1 \cos(2\theta + \eta_1)] \quad (5)$$

$$S(45^\circ) = \frac{2}{1 + D_2 \sin \eta_2} [1 + D_2 \sin(2\theta + \eta_2)] \quad (6)$$

再把式(5)减去该信号的初始值的一半, 式(6)减去该信号的初始值, 得到相应的信号

$$J(0^\circ) = A_1 \cos(2\theta + \eta_1) + c_1 \quad (7)$$

$$J(45^\circ) = A_2 \sin(2\theta + \eta_2) + c_2 \quad (8)$$

式中

$$A_1 = \frac{2D_1}{1 + D_1 \cos \eta_1}, \quad A_2 = \frac{D_2}{1 + D_2 \sin \eta_2}, \quad c_1 = \frac{1 - D_1 \cos \eta_1}{1 + D_1 \cos \eta_1}, \quad c_2 = -\frac{D_2 \sin \eta_2}{1 + D_2 \sin \eta_2}$$

可把 A_1 、 A_2 视为接近 1 的常数, c_1 、 c_2 视为接近零的常数。把式(7)、(8)不同时刻的 $J(0^\circ)$ 、 $J(45^\circ)$ 分别作为横坐标、纵坐标, 作李萨如图形, 得到一个与标准圆非常接近的椭圆, 其中心接近坐标系的原点, 长、短轴相对于坐标系有几度的旋转。利用相关公式可得不同时刻的偏转角^[8]

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{A_1}{A_2} \frac{1}{\cos(\eta_1 - \eta_2)} \frac{J(45^\circ) - c_2}{J(0^\circ) - c_1} + \tan(\eta_2 - \eta_1) \right] + \frac{m}{2} \pi \quad (9)$$

式中: $m = \pm 1, \pm 2, \dots$; $m\pi/2$ 为对应点 ($J(0^\circ)$, $J(45^\circ)$) 在跨越 y 轴时产生的角度突变。当点 ($J(0^\circ)$, $J(45^\circ)$) 逆时针跨越 y 轴时, m 将加 1, 反之则减 1。

把李萨如图形拟合的参数 A_1/A_2 、 (c_1, c_2) 和 $\eta_2 - \eta_1$ 代入式(9), 可求出偏转角 θ , 再代入公式 $\theta = Vi$, 就可以求出相应的电流, V 为磁光常数, i 为所测脉冲电流。

需要强调的是, 双光路光学电流传感器无法消除激光功率不稳定对电流测量精度的影响, 因此当激

光输出功率存在较大起伏时,为获得电流的更好测量精度,应采取四光路结构来消除激光输出功率的起伏对电流测量精度的影响。

3 电炮的短路冲击电流测量

为证明双光路光学电流传感器可有效地测量脉冲大电流,设计了一个电炮短路脉冲电流测量实验,采用罗果夫斯基线圈与双光路光学电流传感器对比测量脉冲电流。电炮的放电回路是一个 RLC 振荡电路,其充电电压为 18 kV,电容为 31.8 μF。

电流实验装置如图 2 所示,左边部分是磁光探头,右边部分是电炮的等效 RLC 放电回路,中间是一根让放电回路的短路电流穿过磁光探头的导电带。磁光探头采用 T. Sato 等^[9]提出的方形结构,即线偏振光从一个角垂直射入该传感头,在另外三个角中的每一个角经历两次 45°正交全反射(注:图 2 中没有画出每一个角的详细反射情况),通过四个传感臂形成一个近似闭合的光路,最后从入射位置处射出。磁光探头的尺寸为:100 mm × 100 mm × 30 mm,材料为 ZF6,磁光常数 V 在波长 532 nm 的值为 2.95×10^{-5} rad/A,材料的固有双折射引起的位相差 $\beta=0.28$ rad。

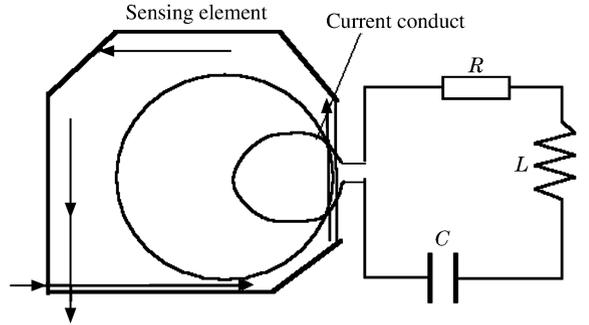


图 2 电炮放电电流测量装置

Fig. 2 The electrical gun's short current measurement device

图 3 是光学电流传感器输出的两路原始输出信号,将它们代入式(5)~(8)进行相对运算,得到两路量纲一归一化信号 $J(0^\circ)$ 、 $J(45^\circ)$,如图 4 所示。以 $J(0^\circ)$ 为横坐标, $J(45^\circ)$ 为纵坐标,作李萨如图形,如图 5 所示。运用软件^[10]对李萨如图形进行拟合,可得到具体的 A_1/A_2 、 (c_1, c_2) 和 $\eta_2 - \eta_1$ 三个参数,代入电流计算公式,即可求出脉冲电流,如图 6 所示。

从图 6 可以看出双光路光学电流传感器与罗果夫斯基线圈对比测量电炮的短路脉冲电流,除在第一个峰值存在一定差异外,其他部分能够很好地吻合。造成这个差异主要有两方面的原因:(1)罗果夫斯基线圈并不完全闭合,造成测量值比真实值偏小;另外电测信号的信噪比较差,造成信号较大的处理误差。(2)双光路光学电流传感器的电流测量精度受到磁光常数与线性双折射的影响,ZF6 在波长 532 nm 下的磁光常数是利用 ZF6 在 546 nm 的磁光常数,采用理论公式计算而确定,因此磁光常数存在一定的偏差度;线性双折射对脉冲大电流的影响较小,但很复杂,在数据处理时,没有考虑它对测量精度的影响,但其仍然存在,可大致认为是电流的衰减振荡函数^[5]。

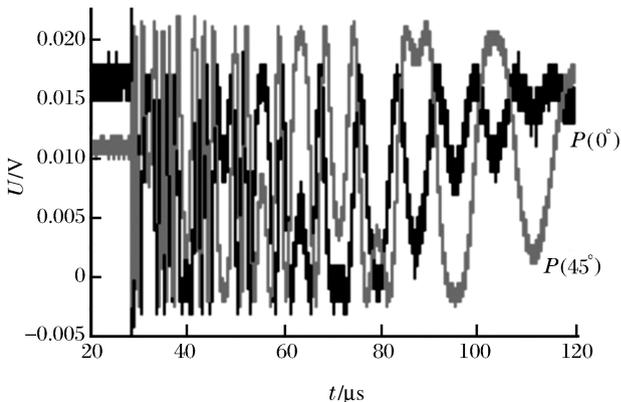


图 3 两路原始信号

Fig. 3 Two experimental original signals

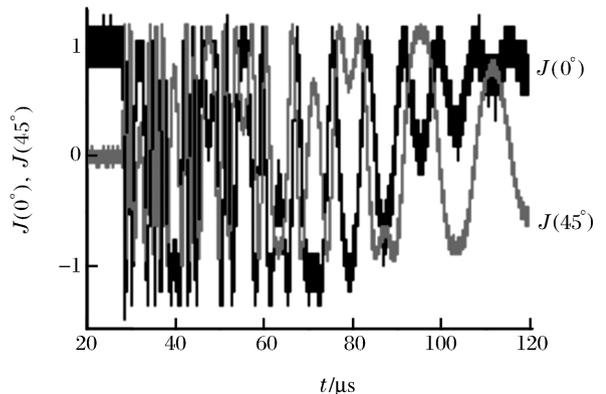


图 4 两路相对信号

Fig. 4 Two relative signals

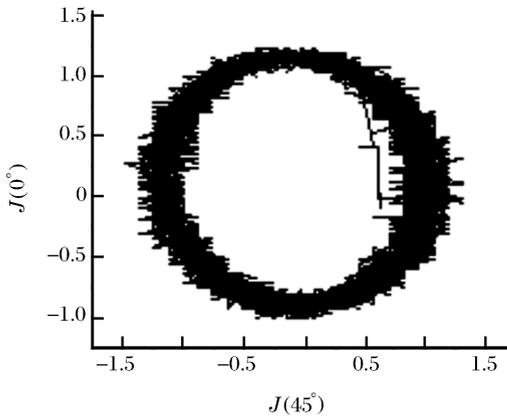


图5 两路相对信号的李萨如图形

Fig. 5 Lissajous figures of two relative signals

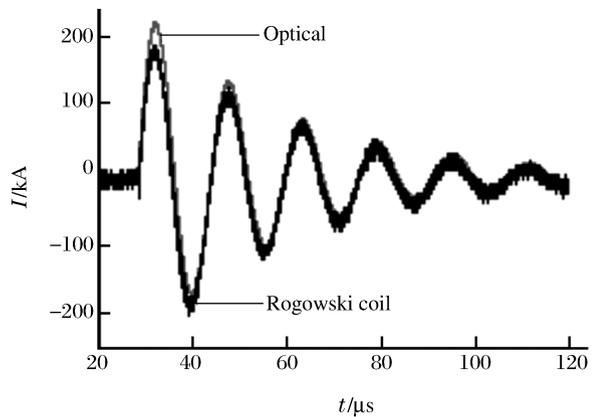


图6 两种不同方法所测的脉冲电流

Fig. 6 Pulse current measured with two different methods

采用理论计算短路脉冲电流的第一峰值电流与两者的第一峰值电流比较的办法可大致比较罗果夫斯基线圈和双光路光学电流传感器的测量精度。利用原始信号读出短路电流的周期和信号的第一峰值、第二峰值的值(计算第一峰值除以第二峰值的相对值),再利用充电电压和电容,就可计算出短路脉冲电流。光测、电测和理论计算得到的脉冲电流的第一峰值电流分别为 214、180 kA 和 210 kA,对比这几个数据可看出光侧值与理论值比较接近。但需要指出的是,理论计算方法存在一定的局限性,它把导带的电感看成了常数,实际上这仅是一个近似,由于电流之间的相互作用,导带的形状要发生改变,从而导致电感发生改变。因此要更准确地标定双光路光学电流传感器的测量精度,需要更高测量精度的电测方法或标准脉冲电流源。

4 结束语

在对比实验中,双光路光学电流传感器与罗果夫斯基线圈对比测量电炮的短路脉冲电流,除在第一个峰值存在一定差异外,其他部分能够很好地吻合,证明了当激光光源输出功率较稳定时双光路光学电流传感器可有效地测量脉冲大电流,在此条件下可完全代替四光路光学电流传感器。因此在选择光学电流传感器的结构时,可根据激光输出功率的稳定性来确定,如果激光器的输出功率有较大的起伏,又对电流的测量精度有较高的要求,则必须选择四光路结构,利用“和差除”相对运算来消除激光功率的起伏对测量精度的影响^[2];如果激光输出功率在电流测量时间内没有起伏,则可选择双光路结构,这样不仅可简化系统结构,便于工程化,又可以降低成本。需要指出的是,电流测量时间因待测电流而异,其范围从几十纳秒到几毫秒,在几十纳秒内要求激光的输出功率稳定具有很高的稳定性,对于光源来说,这是很高的要求。

参考文献:

- [1] Smith A M. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber[J]. Applied Optics, 1978,17(1): 52-57.
- [2] Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W. Recent progress in optical current sensing techniques[J]. Review Scientific Instruments, 1995,66(5):3097-3111.
- [3] Chau H H, Dittbenner G. Electric gun a versatile tool for high-pressure shock-wave research[J]. Review Scientific Instruments, 1980,51(2):1678-1681.
- [4] 杨礼兵,孙承纬,廖海东,等.电磁驱动固体套筒的内爆[J].爆炸与冲击,2000,20(2):156-159.
YANG Li-bing, SUN Cheng-wei, LIAO Hai-dong, et al. Implosion of solid liner driven by electro-magnetic force [J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(2):156-159.
- [5] 邓向阳,李泽仁,田建华,等.测量脉冲大电流的四光路光学电流传感器技术[J].强激光与粒子束,2005,17(9): 1303-1306.

- DENG Xiang-yang, LI Ze-ren, TIAN Jian-hua, et al. Optical current sensor with four paths for measuring high pulse current[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(9):1303-1306.
- [6] 高桦, 郭志忠. 光电式电流互感器法拉第旋光的线性双折射误差估计[J]. 应用光学, 1994,15(5):60-64.
- GAO Hua, GUO Zhi-zhong. The estimation of linear birefringence error of Farady optical rotation in photocurrent mutual inductor[J]. Applied Optics, 1994,15(5):60-64.
- [7] Papp A, Harms H. Magneto-optical current transformer 1: Principles[J]. Applied Optics, 1980,19(22):3729-3734.
- [8] 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001:137-148.
- [9] Sato T, Takahashi G, Inui Y. Method and apparatus for optically measuring a current[R]. European Patent; 0088419A1, 1983.
- [10] 陈光华, 李泽仁, 刘元昆, 等. VISAR 数据处理新方法及程序[J]. 爆炸与冲击, 2001,21(4):315-320.
- CHEN Guang-hua, LI Ze-ren, LIU Yuan-kun, et al. VISAR data reduction method and program[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(4):315-320.

Two-path optical current sensor for measuring high pulse current

DENG Xiang-yang^{*}, LI Ze-ren, PENG Qi-xian,

LIU Jun, WANG Gui-ji, TANG Xiao-song

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: Measuring technology and data processing method of two-path optical current sensor were proposed. High pulse current could be measured by two-path configuration and arc-tangential function processing method with the constant output power of laser. The electric gun's short current was contrastively measured by two-path optical current sensor and Rogowski coil at 18 kV voltage, 31.8 μF capacity. The experimental result of optical current sensor agreed well with that of Rogowski coil. It proves that two-path optical current sensor can be used to measure high pulse current effectively.

Key words: mechanics of explosion; optical current sensor; measure high pulse current; linear bi-refraction; Lissajous figure

* Corresponding author: DENG Xiang-yang
E-mail address: adson0001@163.com
Telephone: 86-816-2484178