

# 研究快速现象的高速干涉摄影系统

夏生杰 王春奎 傅裕寿 吴宝根

(中国科学院力学研究所)

**提要** 我们研制了一种用于诊断 TEACO<sub>2</sub> 脉冲激光与物质相互作用, 以及其它流场中快速现象的高速干涉摄影系统; 解决了这一技术中的时间同步、高速摄影机与激光平晶错位干涉仪的光学匹配; 提出了逆程序运转方案, 将连续输出的 He-Ne 激光改成了时间可控的脉冲光源; 用这一技术拍出了一系列相互作用过程的微秒级高速干涉照片, 以及超音速风洞中流场照片。这种技术也能广泛用于其它快速现象及流场显示领域中。

## 前 言

在强激光与物质相互作用的研究中, 涉及的物理过程非常复杂, 要观察并分析这些过程就需要适当的诊断手段。目前发展了许多诊断术, 包括了光学、电学、光谱及 X 射线等等<sup>[1,2,3]</sup>。光学诊断术用得较多, 也是所有技术中最直观的一种, 在微微秒、毫微秒及微秒诊断上都有很大发展。

为了研究 10.6 微米波长的脉冲激光与物质的相互作用, 我们需要发展一种光学方法, 用它来诊断相互作用时产生的一些现象。从已发表的一些文献来看, 在实验方面, 多数是用条纹或分幅的高速摄影机, 对自发光现象, 如等离子体生长等作一维及二维的诊断。近些年来, 也采用变象管高速摄影机, 如 Imacon 系列<sup>[4]</sup>等, 对不同波长的光源和较弱亮度现象作到了微微秒及毫微秒的诊断, 包括了条纹纪录及分幅纪录。但是, 对于非自发光现象, 弱亮度及相互作用周围的介质扰动现象, 如相互作用引起的空气冲击波、靶材受激光辐照后的强烈汽化等, 还未见有更好的记录。特别是连续分幅的高速干涉摄影记录不多。由于连续分幅的高速干涉摄影记录, 对时间和空间均能作出定性及定量的分析, 为此, 我们研制了高速干涉摄影装置。

在研制中使用了连续输出 1 毫瓦的 He-Ne 激光器作干涉仪光源, 研究双放电 CO<sub>2</sub> 脉冲激光与物质相互作用; 用可控型转镜扫描分幅超高速摄影机作记录, 并需要配以与相机同步的脉冲光源。虽然 He-Ne 激光具有单色性好、小巧灵活、亮度适当的优点, 但是, 至今没有见到脉冲型式运转的<sup>[5]</sup>。我们利用它的优点及运转特性, 提出了逆程序运转方案, 成功地把它改造成可控的脉冲型光源。我们完善了这一技术, 从而拍出了大量高速干涉照片。

## 研制中的技术环节

用 TEACO<sub>2</sub> 脉冲激光器<sup>[5]</sup>, 输出波长 10.6 微米, 在大气压下每个脉冲约 4 焦耳的能

本文于 1979 年 3 月收到,

量,调节气压和气比,可使输出脉宽在 1—100 微秒范围内可调。使用不同焦距的透镜聚焦光束,可得到不同的功率密度。用它来研究激光辐照物质所发生的物理现象,再用高速干涉诊断系统来作记录。实验装置见图 1。

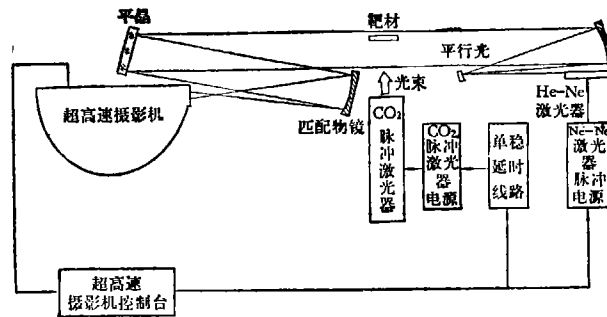


图 1 实验装置

1. 对快速过程的诊断,在时间上是微秒量级。要作出准确诊断,首先必须在这短的时间内“抓住”被研究现象。所有诊断环节必须在时间上同步。时间愈短,同步环节愈多,给同步带来的困难也将愈大。

2. 从空间上讲,要在这样短的时间间隔中,作一维或二维信息记录。必须解决好光源的亮度及对现象记录的速率。

3. 全部装置是处在高压放电的环境中。空气有击穿、电离现象,并有强电磁波干扰。例如,CO<sub>2</sub> 脉冲激光器的放电电压 40—50kV,高速摄影机控制台输出 40—50kV 触发脉冲。这严重地影响仪器和电路的正常运转,给实验研究带来了困难。

4. 为了诊断非自发光现象,透明介质中击波的传播及透明汽化物的运动,必须使用显示装置。显示装置的光源既要相干性好,也要满足高速摄影的要求,也就是必须同时具备相干性、高亮度及按脉冲方式工作,以防止底片上重复曝光。

5. 光学匹配。干涉仪和高速摄影机是两类仪器,联合运转时,在光学上必须匹配,否则无法使用。

### 技术环节的解决

1. 时间同步: 所用 CO<sub>2</sub> 脉冲激光器的输出光脉冲时间为 1 微秒,峰值半宽为 100 毫微秒,激光器是用电容充电的,通过触发球隙放电而出光。从球隙击穿到出光的时间延迟约为微秒量级。可控式高速摄影机输出触发信号的提前时间,靠转镜的提前角来调节。但提前时间只在转镜旋转一周的时间内。这样,研究现象的出现与转镜的位置是同步的。但在特殊情况下,还可以让转镜在给出触发信号之后延时数转的工作位置上出现研究现象。如果仅仅是高速摄影机和 CO<sub>2</sub> 脉冲激光器的联合运转,同步是容易的,只要由摄影机去触发球隙即可。但是,当加入另一需要同步的环节,而这一环节也是一个短过程时,就比较复杂了。我们选用了相干性好,器件及电源都很小巧的 He-Ne 激光器作干涉仪光源。He-Ne 激光器是没有脉冲运转的<sup>[1]</sup>。该器件从获得触发信号到出光,有较大的延时,时间分散性很大,约 20 毫秒,触发信号有很大的超压时也是如此,线路易受干扰,为了获得准确同

步及获得可控的脉冲光源, 而采用触发信号去点燃 He-Ne 激光器的方案, 就无法实现时间上的同步. 我们提出了逆程序运转的新方案. 利用 He-Ne 激光器的运转特性, 当施加电流小于工作电流时, 激光器不起辉; 当施加电流大于工作电流一定值时, 激光器点燃, 但不出光. 如果预先使激光器短时过电流工作, 此时无光输出. 当同步信号输入后, 由电子线路控制, 使过电流迅速降至工作电流, 此时瞬时出光并延迟一定时间断电, 形成一个时间分散性小而延时稳定的单个光脉冲. 在电路上用了可控硅作为 He-Ne 激光管的开关. 可控硅导通时, 调整为过电流运转, 外来信号使可控硅关断时, He-Ne 激光管靠滤波回路中电容器储存电能放电, 管中电流指数下降, 至工作电流时, 激光器出光, 至某阈值电流时熄灭. 这一方案的采用, 把原来 20 毫秒以上的时间同步精度压低至 10 微秒量级. 连续输出的 He-Ne 激光器变成了可控的、时间同步精度高的单脉冲型光源. 配合了转镜扫描超高速摄影机, 解决了二者间的时间同步.

2. 光源亮度: 作为高速摄影的光源, 由于曝光时间短, 必须有一定亮度才能在底片上产生正常曝光. He-Ne 激光器输出的 6328 埃可见光, 能对红光灵敏的底片产生  $10^{-2}$  尔格/厘米<sup>2</sup>的能量<sup>[7]</sup>. 所用平晶型激光错位干涉仪, 如果干涉元件是一块两面不镀膜层的平晶, 则光效率只有 8%. 这样低的效率对高速摄影是很不利的. 这时最小曝光时间按下式计算:

$$\tau = \frac{SA}{P} \times 10^{-7} \text{ (秒)}^{[7]}$$

式中  $\tau$  为曝光时间(秒);  $S$  为底片灵敏度(尔格/厘米<sup>2</sup>);  $A$  为照明面积(厘米<sup>2</sup>);  $P$  为激光光源功率(瓦).

例如, 采用 1 毫瓦 He-Ne 激光光源, 用不镀膜平晶干涉仪, 照明面积  $\phi 10$  毫米时, 最小曝光时间为:

$$\tau = 39.3 \times 10^{-6} \text{ 秒}$$

为了适应更高拍摄频率的摄影, 缩短最小曝光时间, 我们采用了两面各镀适当反射率膜层的平晶干涉元件, 光效率可提高 5 倍, 可以得到  $7.8 \times 10^{-6}$  秒的最小曝光时间. 实践证明, 在现有光学系统中, 由于存在着许多光学元件, 而产生了损耗, 但用航微-II 型胶片, 对于 5 微秒以上的曝光时间, 均能在底片上得到正常的密度. 图 3.4 所示高速干涉照片曝光时间为  $8 \times 10^{-6}$  秒. 若采用大功率的器件, 无疑可得到更短的最小曝光时间. 10 毫瓦的器件可得到  $7.8 \times 10^{-7}$  秒的最小曝光时间. 如果用瓦级的氩离子激光器还能得到  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  秒的最小曝光时间.

3. 干扰的抑制: 为了屏蔽强电磁波干扰, 采用了强信号大衰减的措施, 甚至连 He-Ne 激光管也要加以屏蔽. 因为, 强电干扰信号加在正在出光的 He-Ne 管两端, 会使管子熄灭或使光强在短时间内突然下降. 通过这些措施, 干扰得到了抑制.

4. 高速干涉摄影中的光学匹配: 高速摄影机与干涉仪是两个独立的光学仪器. 在它们联合运转时, 必须解决好光学匹配问题. 要将干涉仪的有效视场充分地按摄影机所规定的尺寸, 成象在摄影机底片上. 这样, 可以充分利用干涉仪视场. 为此, 必须在光路中设附加镜组, 使高速摄影机与干涉仪在光学上匹配. 干涉仪输出口径为  $\phi 120$  的平行光, 对于与单透镜高速摄影机的联合运转是容易的. 只需将摄影机物镜卸下, 换上适当焦距

的大口径物镜(口径必须大于光束直径),调节镜头,使底片上得到大小适当而清晰的图象即可。一般大口径物镜很难得到,常用大口径凹球面反射镜来代替,效果是很好的。干涉仪与单物镜高速摄影机的匹配,并拍摄出激光辐照下蒸汽羽的成长及超音速风洞中激波的高速干涉照片见文[6,8]。干涉仪与转镜扫描分幅型超高速摄影机的联合运转就比较复杂。因为,转镜扫描型相机的光学系统<sup>[1]</sup>,是多镜头组合的仪器。其场镜及排镜在设计及制造时已严格校准并固定。因此,这种光学系统与输出大口径平行光的干涉仪匹配,就需要解决好场镜与排镜以前的附加光组。我们的具体条件是:平晶干涉仪输出 120 毫米直径平行光;成象后底片上的象必须有 10 毫米直径;此外,仪器中所有镜头都不能截去光束的任何部分,即各镜头处的光斑尺寸应小于镜头的有效孔径;排镜光栏处的光斑不能太大,否则曝光时间太长,画幅间曝光的重迭部分过多;机械快门和转镜处的光斑尺寸必须分别小于快门口径及转镜在工作位置的投影尺寸。只有满足了以上各条件后,才能在底片上得到干涉仪的全视场。要设计适当焦距的大口径物镜并作适当光路安排。在设计中选用了大口径反射式物镜。物镜为焦距 980 毫米的球面反射镜,令其焦点处在场镜之前 200 毫米处的光轴上(图 2)。已知场镜焦距 110 毫米,相对孔径 1:4.5。排镜焦距 56.3 毫

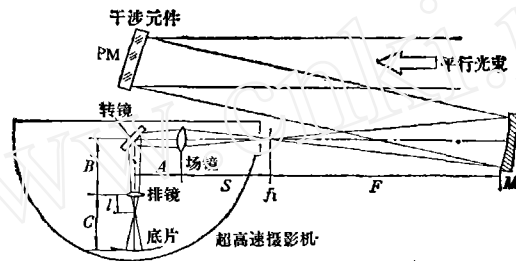


图 2 转镜扫描型超高速摄影机与干涉仪的光学匹配

米,排镜光栏宽 3.6 毫米,图 2 中  $A = 53$ ,  $B = 159$ ,  $C = 80$ 。计算如下:

平行光经凹镜  $M$  聚焦后,成象在场镜前 200 毫米处,再经场镜成象于距场镜  $S'$  处的位置上

$$S' = \frac{Sf_{\text{物}}}{S - f_{\text{物}}} = 244.2 \text{ 毫米}$$

式中,  $S$  为 200 毫米,  $f_{\text{物}}$  为场镜焦距。

距排镜的位置为

$$l = S' - A - B$$

各透镜及光栏处光斑尺寸为:

$$(1) \text{ 场镜处的光斑尺寸: } d_{\text{场}} = \frac{SD}{F}$$

$$(2) \text{ 反射镜上光斑尺寸: } d_{\text{镜}} = \frac{(B + l)d_{\text{场}}}{A + B + l}$$

$$(3) \text{ 排镜处的光斑尺寸: } d_{\text{排}} = \frac{ld_{\text{场}}}{A + B + l}$$

由于有排镜的存在,第二焦距距排镜的距离比无排镜存在时要近,实际上

$$l_{*} = \frac{-lf_{*}}{-l-f_{*}}$$

由上知,底片上成像尺寸为

$$d_{*} = \frac{(C-l_{*})d_{*}}{l_{*}}$$

将所有数据代入各式中得: 场镜光斑  $\phi 24.5$ ; 镜面光斑  $\phi 15.9$ ; 排镜光斑  $\phi 3.21$ ; 底片上光斑  $\phi 9.4$ , 全部符合要求。凹面反射式物镜直径大于 120 毫米, 实际装配后, 测得尺寸与计算相符。

转镜扫描型光学系统在使用通常光源摄影时, 由于场镜、排透镜和前置光栏的存在, 大大降低了仪器的光通量。为了获得正常曝光, 对光源亮度要求极高。特别在超高速摄影范围内更加显著。但是, 在现有装置中, 由于场镜及排透镜镀有增透膜, 光路设计中没有截去光束的任何部分, 光通量基本上没有损耗。所以, 提高了仪器的光效率, 曝光时间的估计不受仪器结构型式的影响, 用低功率光源(毫瓦级)就能实现超高速摄影。

## 结 语

以上技术环节解决后, 用上述装置拍下了一系列激光与靶材相互作用的照片。图版 I 照片 1 为 TEACO<sub>2</sub> 脉冲激光束聚焦于焦点上产生空气击穿并引起冲击波运动的照片, 图版 I 照片 1b 为球面击波在球面反射镜上反射回来的平面波。每幅曝光 8 微秒。脉冲 He-Ne 激光器功率 1.5 毫瓦。图版 I 照片 2 为脉冲 CO<sub>2</sub> 激光辐照固体靶面引起击穿及强烈汽化物冲出的照片。用同样光源, 每幅曝光 5.2 微秒。现在已经用上述光源作到了每幅曝光 1.3 微秒的高速干涉摄影。这些记录无疑为研究激光与物质相互作用提供了定性定量的依据。

实验结果还证明了这一诊断技术可以成功地用于更多的高速流场显示中, 例如激波管风洞、爆炸、燃烧、等离子体等等。图版 I 照片 3 就是本装置对气动激光器光腔流场作出的诊断, 可以判断出喉道产生激波的位置及对输出光束质量的影响。图版 I 照片 4 为  $M = 2.5$  风洞中模型周围的流场照片。上二幅照片用连续输出 1 毫瓦的 He-Ne 激光光源, 每幅曝光时间分别为 0.5 及 1 毫秒。

## 参 考 文 献

- [1] John, F. Ready, *Effects of High-power Laser Radiation*, (1971).
- [2] Helmut, J. Schwarz, *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* (1971).
- [3] Lieber, A. J., et al., 11th H. S. P., 1974.
- [4] Huston, A. E., *High-speed photography and photonic recording*, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 11 (1978).
- [5] 傅裕寿, 双放电 CO<sub>2</sub> 激光器的应用, *激光*, 3, 6 (1976).
- [6] 刘建邦、夏生杰、平晶型激光错位干涉仪及其在流场测量中的应用, *力学学报*, 4 (1978).
- [7] Holland, T. E., *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. IV, Part 1, p211.
- [8] 周光地, 夏生杰等, 激光辐照下蒸汽羽的形象及其成长, *激光*, 5, 5-6 (1978), 21.
- [9] G., Lunn, A general survey of high speed photographic technique, *J. SMPTE*, 71, 12(1962).

## A SYSTEM OF HIGH-SPEED INTERFEROGRAPH FOR INVESTIGATING FAST PHENOMENA

Xia Sheng-jie Wang Chun-kui Fu Yu-shou Wu Bao-gen

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*

### Abstract

A system of high-speed interferograph for investigating the interaction of TEA CO<sub>2</sub> pulsed laser with matter and other fast flow phenomena has been constructed and applied successfully. Problems of the time synchronization and the optical match between high-speed camera and interferometer have been solved. We operated inversely an ordinary CW He-Ne laser to obtain a time-controllable pulsed light source. Several series of high-speed interference photographs of laser-matter interaction and the flow-field in supersonic wind-tunnel have been obtained. This technique may be used in other fast phenomena and flow-field visualization.

www.cnki.net

www.cnki.net