

用于动态微粒场分析的离轴全息技术

朱竹林 黄公瑜

王 朋

(大连工学院物理系)

(山东轻工业学院)

提 要

本文描述了采用离轴全息方法测量柴油机动态油喷雾场的实验方法和原理,并讨论了油颗粒的半透明性以及判焦和密度限制等几方面的问题。

关键词: 动态微粒场; 离轴全息术。

一、引 言

为了研究柴油机的燃烧过程,我们在柴油机试验样机上,对汽缸中的油喷雾场进行了同轴全息的拍摄和再现工作之后,又进行了离轴全息的拍摄和再现工作。

离轴全息方法具有参考光不通过物场、参考光与物光的光强比任意可调的优点。这对于拍摄场深较大、颗粒密度较浓的柴油机油喷雾场是比较有利的。另一方面,离轴全息中的油粒再现像是暗斑,在再现像的聚焦面附近,油粒的半透明性反映明显,这对再现像的判焦是有帮助的。

二、半透明油粒的简化模型

采用离轴全息法拍摄的油雾再现像场中,观察某一油粒聚焦面附近的再现像,我们可以看到油粒的暗圆斑中部有一小亮斑,亮斑的大小和亮度随再现像离焦量的增加而迅速变化^[1]。

影响微粒全息重现像场结构的因素是很多的,例如有效孔径的衍射,往往是主要因素之一。而本文将着重讨论单个粒子的半透明性对像场分布的影响。

图1是用平面相干光照明的油粒,我们假定:记录时的全息胶片 H 为圆形;再现时的聚焦面位于油粒中心 $Z=0$ 的平面上; R 是油粒的半径,从图中可以看出,当 $R \gg \lambda$ 时,可以作如下近似分析,通过 $Z=0$ 的平面并能到达圆形全息图面的光波包括两部分,一部分是经油粒球体外部($r > R$)的空间到达全息图面的光波。另一部分是通过油粒内部靠近轴线区域的光波,受到球体介质的折射后到达全息图面的。

为了便于进行光传播的远场衍射计算,人们曾把不透明的球体简化成一个位于球中心平面上,半径 $r=R$ 的暗圆盘。从而把一个球面积分简化成一个平面积分问题^[2]。对于一个半透明球体,为了解释观察到的亮斑及其变化,情况要复杂得多。不过为了进行必要的衍

射计算, 我们仍然可以较粗略地把它简化成一个平面积分问题。那就是把一个半透明球体

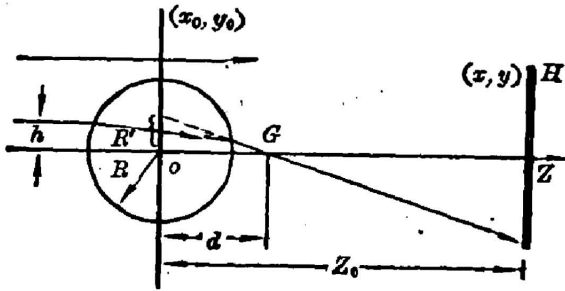


Fig. 1 A semitransparent oil particle is illuminated with a plane wave of coherent light
R—particle radius, *G*—Gauss focus,
H—hologram plane

看成为一个位于球中心平面上, 外半径 $r=R$ 的暗圆环, 它的中心透光孔半径 $R' < R$, R' 的量值可以如下确定: 把能够到达全息图面最外沿的光线, 在自由空间 ($n_0=1$) 中经透明球体的后高斯焦点 G 反向追踪, 投影到 $Z=0$ 的平面上得到。从高斯焦点 G 到球心 O 的距离由下式决定:

$$d = nR/2(n-1). \quad (1)$$

由于在 $Z=0$ 的平面上, 透光孔内任意一点 $r = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ 处的相位相对

于球心的相位超前 $k \cdot r^2/2d$, 另外, 光波通过折射率为 n 的球体介质, 受到两次球面的反射以及油介质的吸收, 从而透光孔面应具有透过率 $t (t < 1)$ 。此外, 如果通过前球面并能到达全息图面的光束半径为 h , 透光孔的半径为 R' , 则透光孔面上的光波振幅比原入射平面光振幅小 h/R' 倍。因此, 可以把受单位振幅平面光波照明的一个油粒, 简化成位于油粒中心 $Z=0$ 平面上的一张透明片。其振幅透过率可表示为:

$$\tau_0(x_0, y_0) = 1 - \text{circ}(r/R) + (h/R')t \text{circ}(r/R') \exp\{-ikr^2/2d\}, \quad (2)$$

其中

$$\text{circ}(r/R) = \begin{cases} 1 & (\text{当 } r \leq R \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } r > R \text{ 时}); \end{cases} \quad \text{circ}(r/R') = \begin{cases} 1 & (\text{当 } r \leq R' \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } r > R' \text{ 时}). \end{cases} \quad (3)$$

三、原 理

图 2 是离轴全息的拍摄原理图。设用单位振幅的平面波照明透过率片 τ_0 , 由菲涅耳衍射公式计算全息图面物光场的振幅分布:

$$U_0(x, y) = \frac{\exp(ikz_0)}{i\lambda z_0} \iint \tau_0(x_0, y_0) \exp\left[ik \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0}\right] dx_0 dy_0. \quad (4)$$

参考光为斜入射的平面波:

$$U_R = U_R \exp(ikx \cos \alpha), \quad (5)$$

全息图 (x, y) 平面上的总振幅分布为:

$$U(x, y) = U_0 + U_R. \quad (6)$$

总光强分布为:

$$I_0(x, y) = U \cdot U^* = |U_0|^2 + |U_R|^2 + U_0 U_R^* + U_0^* U_R. \quad (7)$$

用与原参考光共轭的平面波照明全息图, 可得到无像差的再现实像。设照明光波为:

$$U^* = U_R \exp[-ikx \cos \alpha]. \quad (8)$$

图 3 是离轴全息的再现原理图。如果我们仅对实像有兴趣, 则再现实像振幅为:

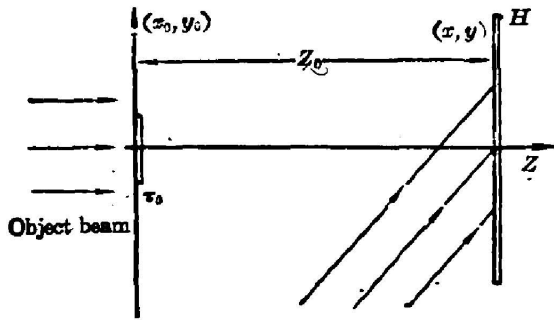


Fig. 2 Schematic diagram of off-axis recording arrangement

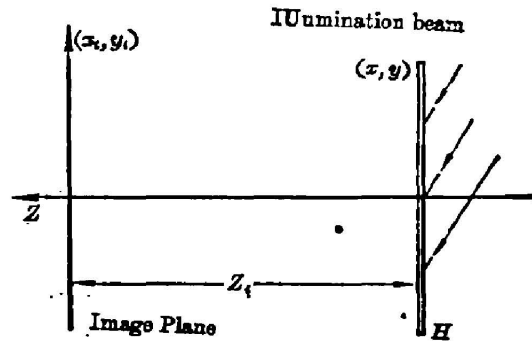


Fig. 3 Schematic diagram of off-axis reconstruction arrangement

$$\psi_R(x_i, y_i) = \frac{U_R^2}{i\lambda z_i} \iint U_0^*(x, y) \exp\left[ik \frac{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}{2z_i} \right] dx dy. \quad (9)$$

考虑到远场条件后得到^[2]:

$$\begin{aligned} \psi_R(x_i, y_i) &= \frac{U_R^2}{\lambda^2 z_0 z_i} \exp(-ikz_0) \iint \exp\left[-ik \frac{x^2 + y^2}{2z_0} \right] T_0^* \left(\frac{x}{\lambda z_0}, \frac{y}{\lambda z_0} \right) \\ &\quad \times \exp\left[ik \frac{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}{2z_i} \right] dx dy \\ &= \frac{U_R^2}{\lambda^2 z_0 z_i} \exp(-ikz_0) \exp\left[ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right] \iint \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_0} \right) \right. \\ &\quad \left. \times (x^2 + y^2) \right] T_0^* \left(\frac{x}{\lambda z_0}, \frac{y}{\lambda z_0} \right) \exp\left[-i2\pi \left(\frac{x_i}{\lambda z_i} x + \frac{y_i}{\lambda z_i} y \right) \right] dx dy. \end{aligned} \quad (10)$$

当

$$\frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_0} = 0 \quad (11)$$

时, 我们得到聚焦实像的振幅分布:

$$\begin{aligned} \psi_R(x_i, y_i) &= U_R^2 \exp\left[ik \left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} - z_0 \right) \right] v_0^*(x_i, y_i) \\ &= U_R^2 \exp\left[ik \left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} - z_0 \right) \right] \left\{ 1 - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{ht}{R'} \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R'} \right) \exp\left[ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2d} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

由(12)式的共轭自乘得到聚焦再现实像的光强分布:

$$\begin{aligned} I_i(x_i, y_i) &= U_R^4 \left\{ 1 - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R} \right) \right\}^2 + \left(\frac{ht}{R'} \right)^2 \cdot \left[\text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R'} \right) \right]^2 \\ &\quad + \frac{ht}{R'} \left[1 - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R} \right) \right] \cdot \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R'} \right) \\ &\quad \times \left[\exp\left(ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2d} \right) + \exp\left(-ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2d} \right) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

从上式可以看出:

1. 在 $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} > R$ 处, $I_i(x_i, y_i) = U_R^4$;

2. 在 $R \geq \sqrt{x_i^2 + y_i^2} > R'$ 处, $I_i(x_i, y_i) = 0$;
3. 在 $R > R' \geq \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 处, $I_i(x_i, y_i) = \left(\frac{ht}{R'}\right)^2 U_R^4$.

所以聚焦实像呈暗环状, 环的外半径 R 是油粒的半径, 环的内半径 R' 所决定的区域表示了油粒球体内折射光的贡献, 其强度较环外有所减弱。

四、实验装置

1. 拍摄装置

图 4 是拍摄实验装置框图。实验用脉冲红宝石激光器, 单模输出能量为 400 mJ, 脉宽 30 ns, 相干长度 1 m。我们选用的参物光能量比是 5:1, 参物光之间的夹角约 50° 。记录时用放大系统 L_1 标定放大 4 倍。全息胶片选用 Agfa 10E75 或 8E75。采用 D19 稀释显影。

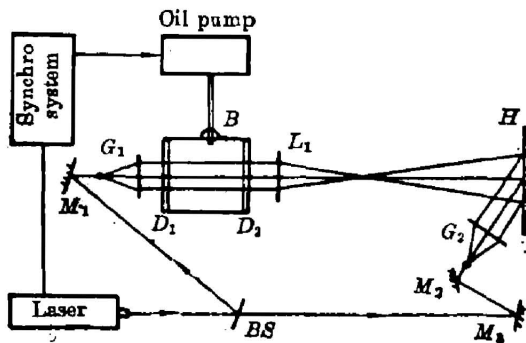


Fig. 4 Recording system

B—diesel cylinder; D—quartz window;
G—collimating lens; L—magnifying lens;
M—reflecting mirror; H—holographic
plate; BS—beam splitter

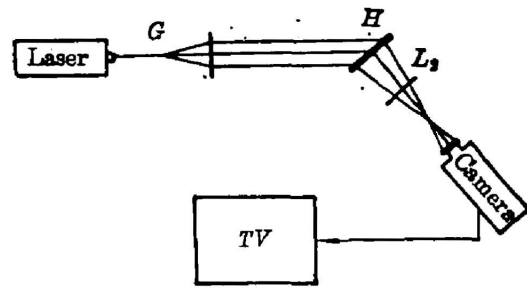


Fig. 5 Reconstruction system

G—collimating lens; L—magnifying lens;
H—hologram

2. 再现装置

图 5 是再现装置框图。再现实像由放大-摄像系统 (L_2-CA) 送入监视器中观察。调节再现系统中 L_2 与 CA 的距离, 以获得合适的放大倍率。一般地说, 包括记录时的放大在内, 总放大倍率约需 300 倍左右。调好之后可固定 L_2 与 CA 的相对位置, 使再现系统的放大倍率保持不变。将 (L_2-CA) 系统安装在三维微调节架上, 横向调节三维支架可观测到物场中同一层面上的油粒像, 它们具有相同的放大倍率。纵向调节三维支架, 便可观测到物场中不同层面上的油粒像, 不同层面上油粒的放大倍率一般是不同的。因此, 图像的数据处理系统应具有放大倍率校正功能, 使得各层面上的油粒像与标定层面上的油粒像有相同的放大倍数。

由 CA 输出的视频信号分别送给电视监视器和电子计算机的存储系统, 由计算机对图像的量化值作分析处理, 从而得到柴油机油喷雾场的各类统计数据。

我们拍摄的是一种燃烧效率较高的伞状油喷嘴的雾场, 喷油压力 270 kg/cm^2 , 喷油量 $16 \sim 32 \text{ ml}$, 200 times, 缸内压力为常压和 10 kg/cm^2 。对常压下的部分场区粗测结果, 最大几率粒子直径 $\sim 13 \mu\text{m}$, 平均密度 $\sim 120 \text{ Particles/mm}^3$ 。

图 6 分别给出 (a) 同轴, (b) 离轴全息的油粒再现像以及 (c) $40 \mu\text{m}$ 的标定丝。

图 7 中 (a)、(b)、(c) 为同一位置 (x, y), 不同层面 (z) 的离轴全息油粒再现像。由此我们可以清楚地看到空间的分层效果。

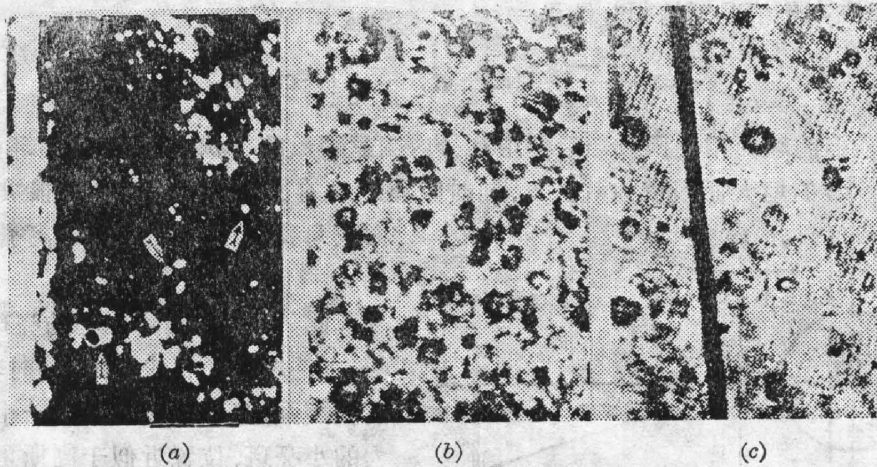


Fig. 6 Reconstructed image of oil particle
(a)—in line; (b)—off axis; (c)—calibrated string (40 μm)

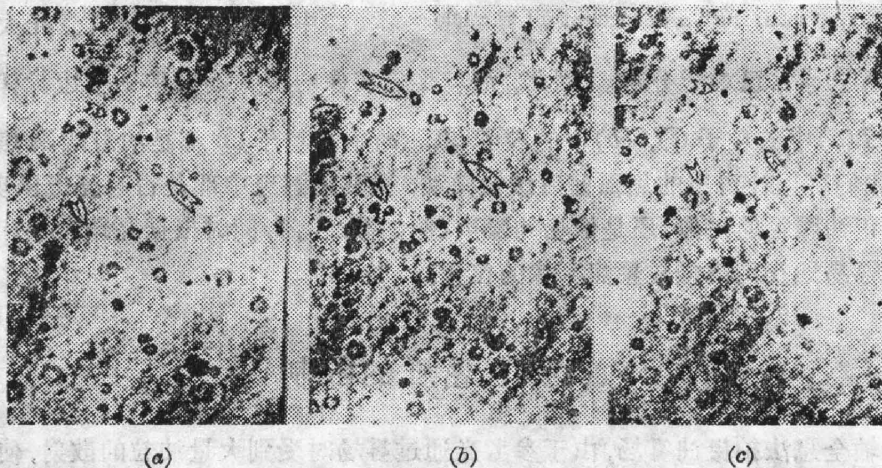


Fig. 7 Reconstructed images of different layers
(a), (b), (c) are the photos from same sampling region (x, y), but different layers (z)

五、离焦像

形成聚焦实像的条件是(11)式。如果油粒的位置移动一小距离 Δz , 使 z_0 变成 $z_0 + \Delta z$, 这时在 z_i 处的成像不再符合公式(11), 而是符合:

$$\frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_0 + \Delta z} = \Delta_0 \quad (14)$$

在 z_i 面上形成离焦像。用(14)式减去(11)式, 得到:

$$\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_0 + \Delta z} = \frac{\Delta z}{z_0^2} = \Delta_0 \quad (15)$$

图 8 表示了处在离焦位置上油粒内的折射光线。需要指出的是, 由于再现像面的位置

仍在 z_0 处, 所以聚焦物面也仍在 z_0 处。只是现在的 z_0 面已经不是油粒球体的中心平面了, 而是在球心平面后 Δz 处。因此, 在计算(10)式中圆盘函数的积分时, 考虑到(15)式的影响, 得到粒子外圆在离焦情况下的积分结果:

$$\frac{i}{\lambda z_0^2 \Delta} \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda z_0^2 \Delta} (x_0^2 + y_0^2)\right] \otimes \left[1 - \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right)\right]. \quad (16)$$

上式中, 前面的球面相位函数与后面中括号内圆盘函数的卷积, 使离焦像暗环外边缘随着粒子离焦量 Δz 的增大而很快弥散扩大, 同时暗环边缘的径向强度梯度随之很快减小, 从而成为我们区别聚焦像与离焦像的依据。

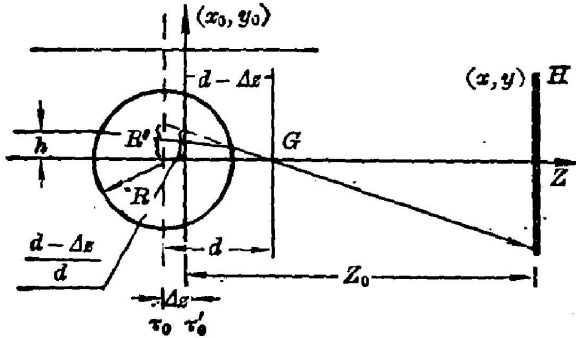


Fig. 8 Optic path through a defocused oil particle

此外, 由于暗环中心的亮斑孔径 R' 随 Δz 的增加而很快收缩, 同时其亮度也随之增强, 当 $\Delta z = d$ 时变成一个强度较大的小亮斑, 位置近似于高斯焦点处。当 Δz 继续增大时, 小亮斑又随之扩大, 强度迅速减弱。我们知道在 $\Delta z = 0$ 的聚焦实像中心, 其亮度较背景光大致减弱了

$\left(\frac{ht}{R}\right)^2$ 倍, 所以通常已难于分辨。因此, 油粒聚焦实像的视觉效果是一个边缘梯度较好的暗圆斑。图 7(a) 中的粒子 ①, (b) 中的粒子 ②, (c) 中的粒子 ③ 都是油粒的聚焦再现像。综上所述, 我们可以让观察的焦面前后缓慢微动, 视其暗圆斑中部是否有亮斑出现, 以辨别暗圆斑是真正油颗粒的图像, 还是像场的噪声(例如散斑等), 同时根据亮斑大小和强度的变化可以比较容易地找到油颗粒聚焦实像的位置。

六、颗粒密度的限制

利用同轴全息法拍摄油雾场, 由于参考光通过雾场时受到大量油粒的散射, 使得参考光强度减弱, 并且变得不均匀了。另一方面, 由于参考光与物光是同一入射光的两部分, 在油粒的大小和密度一定的情况下, 参物光束的能量比是难以调节的。这样, 在场深(如汽缸窗孔间的距离)已经确定的情况下, 能够拍摄的颗粒密度将受到一定的限制。拍摄一张较好的同轴全息图, 一般参考光至少需占入射光的 80%。假定油颗粒的大小均匀, 同时颗粒的空间排布使入射光只受到单次散射, 同时考虑颗粒衍射截面, 则物场的最大颗粒密度为:

$$\rho_m = 0.2/2\pi R^2 l, \quad (17)$$

这里 R 是颗粒半径, l 是物场深度。如果密度给定之后, 最大场深可由(17)式估算。由于柴油机汽缸中的油粒密度较大, 并且分布很不均匀, 在我们用同轴全息法拍摄时, 在某些高浓度区受到了颗粒密度的限制。

采用离轴全息法, 参考光不再通过物场, 从而提高了物场照明光的利用率, 颗粒对入射光的遮挡可高达 50%^[3]。由于物场内前后颗粒遮挡的相互干扰仍然存在, 所以离轴全息方法也不能完全排除颗粒密度的影响。

七、结 论

采用离轴全息方法进行动态微粒场的研究,具有可拍摄颗粒密度大,再现光场完全避开了零级光和共轭光的干扰,背景干净,粒子再现像边缘清晰等优点。另一方面,它也在存在着对全息干板分辨率及设备性能要求较高,光路调整较困难,数据处理较为复杂的不足之处。因此,我们认为,对密度较小,或是虽然密度不小,但分布均匀,能以较浅场深取样的物场,宜采用同轴全息方法。反之,对密度较大,又分布不匀,或是场深较大,且又已经给定的物场,则以采用离轴全息方法为好。

参 考 文 献

- [1] I. Prikryl and C. M. Vest; *Appl. Optics*, 1982, 21, No. 14, 2541~2547.
- [2] G. A. Tyler and B. J. Thompson; *Optics Acta*, 1976, 23, No. 9, 685~700.
- [3] W. K. Witherow; *Optical Engineering*, 1979, 18, No. 3, 249~255.

Off-axis holography for the analysis of dynamic particle field

ZHU ZHULING AND HUANG GONGYU

(Department of Physics, Dalian Institute of Technology)

WANG PENG

(Shandong Institute of Light Industry)

(Received 9 January 1987)

Abstract

The experimental method and principle for measuring the dynamic oil spray field of a diesel engine using off-axis holography are described, and the problems with regard to properties of semitransparent oil droplets, judgment for focusing and the limitation of particle density are discussed.

Key words: dynamic particle field; off-axis holography.