

## CCD 摄像机在瞬变喷雾可视化中的应用

王德忠 黄震 童澄教 大圣泰弘\*

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海, 200030)

**摘要:** 结合作者近年来在早稻田大学和上海交通大学的研究工作, 介绍了高速 CCD 摄像机在柴油机喷雾测试中的应用。重点论述了利用红宝石激光器和 CCD(电荷耦合器件) 视频摄像机的特点实时采集瞬变燃油喷雾图像的技术, 并讨论了其中的关键问题。

**关键词:** 红宝石激光器 CCD 摄像机 柴油机喷雾 实时采集图像

## Visualization of transient spray by means of CCD video camera

Wang Dezong, Huang Zhen, Tong Chengjiao, Daisho Yasuhiro\*

(School of Power and Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

**Abstract:** Based on the research that was done in Waseda University and Shanghai Jiaotong University, the application of high speed video camera to diesel spray was introduced. Using the characteristics of pulse ruby laser and CCD video camera, the technique of real time grabbing instantaneous diesel spray image was developed, and some key problems were discussed.

**Key words:** ruby laser CCD video camera diesel spray real time grabbing image

### 引 言

高速运动图像的实时采集技术在燃烧学、航空动力学等领域的研究中具有重要的意义。如对高速运动的内燃机喷雾、航空发动机液体燃料的燃烧、燃煤锅炉中煤粉颗粒的运动以及子弹飞行轨迹的研究, 无一不涉及高速运动图像的采集。

传统上常采用高速摄影法, 即用连续光作光源, 用高速摄影机将某一运动过程记录到底片上<sup>[1,2]</sup>。目前, 常用的高速摄影机每秒能拍摄几千张图像, 更好一些的能达到几万张, 即以万分之一秒的速度拍摄, 但成本很高。

另一种是采用单脉冲或多脉冲红宝石激光器作光源, 将高速运动图像记录至底片<sup>[3]</sup>。上述两种方法的共同特点是先将信息记录到底片上, 然后通过对底片的处理和分析得到所需结果。每次处理底片的条件不同, 势必会影响分析的结果, 而且工作量也较大。

将 CCD 用于燃油喷雾图像的研究, 实现了喷雾图像的实时采集, 虽然有较多优点, 但并不意味着 CCD 完全可以取代干板记录图像。用干板记录图像的空间分辨率比 CCD 高, 在某些场合, 比如研究图像的细微结构, 还必须采用干板记录图像。所以, 高速摄影和激光全息方法在以往的燃烧和流动测量等科学领域中发挥了巨大的作用, 在今后仍将发挥其重要作用。

随着微电子和 CCD 视频摄像机的进步, 使得实时采集高速运动图像技术成为现实, 近年来, 其在燃油喷雾研究领域的应用得到了飞速发展。

\* 日本早稻田大学教授——Professor of Waseda University

## 1 CCD 特性的研究

CCD 是 70 年代初发展起来的新型半导体器件。近年来,随着微电子技术的进步,CCD 的研究取得惊人的进展。目前,它已成为现代测试技术中最活跃、最富有成果的新兴领域之一,尤其在像感器方面发展迅速。

本系统采用 Philips 1101CCD 摄像机采集图像,其光敏面由  $795 \times 596$  个光敏像素组成,光谱响应范围在  $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,最低敏感光照度为  $0.02 \text{ lx}$ 。因此,可在暗光条件下拍到较清晰的图像。光强信号直接由 CCD 接收,并将测得的信号经图像板转换成 8bit 数送至计算机进行处理。

CCD 摄像机通过连续不断地向图像系统传送图像来实现实时显示图像的特点,其传送一帧图像的速度是  $40\text{ms}$ ,每一帧图像都由两场图像组成,即由奇数场和偶数场组成,每场采集图像的时间是  $18.4\text{ms}$ ,传送信号的时间是  $1.6\text{ms}$ ,通常称之为消隐期。如果以脉冲激光作光源,发光期正好落在消隐期上,则 CCD 采集不到任何信号。设红宝石激光器发出激光的脉冲宽度  $t = 30\text{ns}$ ,则误采率  $P = (t + 1.6) / 20 = 8.15\%$ ,即采中图像的几率在 90% 以上,一般来说,误采率小于 10% 对实验过程影响不大。

此外,CCD 的不同增益有不同的光强响应特性。在低增益时存在一截止区,即光强很小且不能达到光电耦合阈值时,CCD 响应为零。在高增益时,暗电流被放大,即使输入光强为零,CCD 也有较大的本底信号。CCD 的响应信号只有在灰度值为  $10 \sim 220$  时,输出值  $E$  与光强  $I$  之间才有较好的线性关系,而且,不同的增益系数对应不同的增益曲线,这些结果对实验研究具有重要意义。

## 2 红宝石激光器和普通视频摄像机的应用

### 2.1 脉冲红宝石激光器

脉冲红宝石激光器是该测量系统的光源,单脉冲激光的能量为  $700\text{mJ}$ ,相干长度大于  $1\text{m}$ ,时间同步控制精度在  $\pm 1\mu\text{s}$  以内,触发方式分为内触发和外触发,在燃油喷雾的研究中通常采用外触发方式。对单脉冲 Q 开关系统而言,用于振荡和放大的闪光灯必须先于光电开关点火,激励红宝石棒工作,光电开关在主同步脉冲触发后点火。由于红宝石激光器输出激光的脉冲宽度为  $30\text{ns}$ ,而柴油机每次喷雾的持续时间是毫秒量级,因此,可以“冻结”喷雾图像。

值得注意的是,在实验中要控制好红宝石激光器的光强,光强太大会造成 CCD 饱和,严重时还会烧坏 CCD 的靶面,所以,在实验中可适当地对激光光强进行衰减。

### 2.2 图像板的工作原理

图像板是该系统的关键部分,本系统采用的是 P540 图像板,它通过不断对摄像机的靶面场扫描来实现图像的灰度量与存储,并将结果显示在监视器上。图像板的工作方式分为内同步和外同步,即由自身或摄像机提供的同步信号采集图像。P540 主要技术参数为:图像采集速度:  $25 \text{ 帧/s}$ ; A/D, D/A 转换:  $100\text{MHz}$ , 8bit; 扫描制式:  $625 \text{ 行/}50\text{Hz}$  或  $525 \text{ 行/}10\text{Hz}$ ; 存储容量:  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  图像一帧; 输出查找表:  $3 \times 256 \times 8\text{bit}$ 。

### 2.3 微机同步控制系统

实时采集高速运动喷雾的图像时,必须保证脉冲激光器和计算机图像处理系统按规定的时序同步工作,为此,作者设计了一套由微机控制的同步装置。其特点是:时间响应快、工作可

靠、同步精度高( $< \pm 1\mu\text{s}$ ), 延时时间可通过编程控制。

我们的研究工作是在 135 柴油机上进行的。由于柴油机喷雾是周期性的瞬变过程, 因此, 探测其喷雾的初始信号对实时采集喷雾图像至关重要。采用切光方式, 即在喷雾开始前, 用一束 He-Ne 激光穿过喷嘴出口照射到一个高灵敏度的光敏器件上, 喷雾开始时, 该光信号被切断, 光敏器件立刻产生一响应电信号, 以此作为同步装置的触发信号。

同步装置得到初始信号后, 经过延时到预定的时刻分别触发脉冲激光器和计算机图像处理系统。光信号在 CCD 摄像机靶面上有一短暂的停留<sup>[4]</sup>, 同步装置要在发出激光后  $2\mu\text{s}$  触发图板, 时序控制过程如图 1 所示。

由于脉冲激光器有自己的电源系统, 在测量时, 为避免激光器和计算机系统的电源相互干扰, 我们采用 TIL 113 光电隔离器作为同步电路与激光器电路的耦合, 这样, 激光器与计算机之间没有电信号联系, 只有光信号联系, 增加了控制系统的抗干扰能力。

## 2.4 实验结果

在应用激光 CT 技术测量柴油机喷雾浓度分布和实现喷雾内部构造可视化时, 作者开发一套喷雾测试系统<sup>[5]</sup>, 并在该测试系统上对 135 柴油机冲突喷雾进行了试验研究。其中, 柴油机的转速为  $750\text{r}/\text{min}$ , 喷嘴的孔径为  $0.35\text{mm}$ , 挡板离喷嘴的距离为  $20\text{mm}$ , 环境温度为  $26^\circ\text{C}$ , 燃油喷射开始后, 在  $0.9\text{ms}$  时刻对喷雾图像进行实时采集。图 2 给出了经计算机图像处理后的燃油喷雾照片。

由图 2 可以看出, 在燃油喷雾撞击挡板后, 燃油与挡板的接触部位燃油浓度较大, 随着离撞击点距离的增加, 燃油浓度逐渐减弱, 这主要是由于燃油在此有一积累过程造成的。此外, 燃油撞击挡板后向四周扩散, 在弹起油雾的边缘浓度又有所增大, 这可能是由于空气的卷吸作用引起的。

## 3 高速视频摄像机的应用

CCD 成像技术在 90 年代以来得到了飞速的发展。而高速 CCD 摄像机则是近几年在 CCD 研究基础上发展起来的高速连续采集图像的器件。它将 CCD 记录下来的图像以极高的速度一帧一帧地存储于内存中, 然后再将内存中的图像通过视频设备转换到录像带或其它存储设备中。作者采用 FASTCAM-ultima 高速摄像机对柴油机喷雾进行了研究。FASTCAM-ultima 是一种较新型的高速摄像机, 它采集图像的速度从  $30\text{幅}/\text{s}$  到  $40500\text{幅}/\text{s}$  不等。记录图像的时间为  $0.40\text{s}$  到  $2.02\text{s}$ 。随着采集图像速度的不同, 采集图像的大小也不同。比如, 以  $4500\text{幅}/\text{s}$  的速度采集图像时, 采到图像大小为  $256 \times 256$ ; 而以  $40500\text{幅}/\text{s}$  的速度采集图像时, 采到图像的大小为  $64 \times 64$ , 使图像的空间分辨率降低。高速摄影技术则不存在此类问题, 不管拍摄速度如何变化, 底片的分辨率都很高且保持不变。

柴油机喷雾是一个周期性的循环过程, 每个循环的喷雾持续期有几个毫秒。燃油喷雾是将燃油在高压下通过喷嘴喷射后形成的, 其速度达到每秒几百米。针对柴油机喷雾的这一特点, 在试验中根据具体要求来设定摄像机采集喷雾图像的速度。选择高速度可以更好地得到“冻结”图像的效果, 但要降低一些分辨率。高速摄像机可以在燃油喷射开始前启动, 因为它比

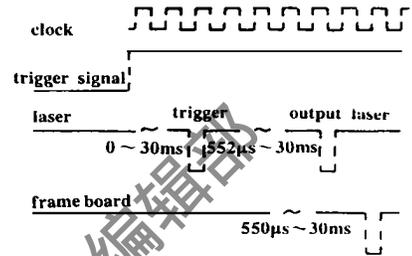


Fig. 1 Time serial of synchronization system

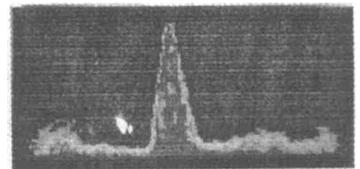


Fig. 2 Impinging spray grabbed by CCD video camera

柴油机在一个循环内喷雾持续时间长得多。图 3 是在常温常压下拍摄的, 将采集图像的速度设在 40500 幅/s 的条件下采集的喷雾图像。供油泵由电机带动, 燃油通过高压油管流向柴油机喷嘴。试验中, 电机转速为 515rpm, 喷嘴是单孔的, 启喷压力为 25MPa, 喷孔直径为 0.5mm, 环境温度为 24℃。由图 3 可清楚地看到燃油喷雾的形成过程。

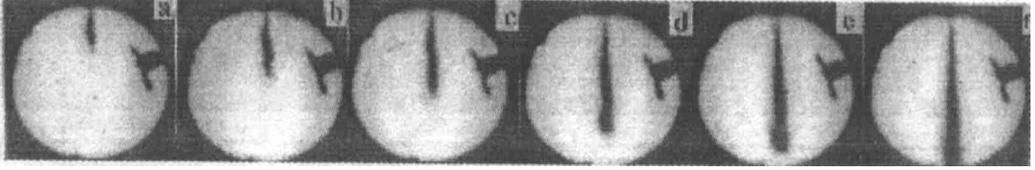


Fig. 3 Diesel spray image brabbed by high speed video camera

## 4 结 论

通过上述研究可以得出以下结论:

(1) 利用红宝石脉冲激光器和 CCD 摄像机的特性, 将运动图像“冻结”在数字图像处理系统上, 从而实现了高速运动图像的实时采集, 该技术对发动机和锅炉的燃烧、多相流的研究具有重要意义。

(2) 实时采集图像的技术不仅简化了实验过程, 而且也为定量研究浓度和温度等物理量提供了基础。

(3) 目前, 国产的高脉冲闪光灯脉冲宽度可达微秒量级, 且发出的光波在 CCD 响应范围内。如果以此代替红宝石激光作光源, 可使测试系统的成本大大降低。

(4) 由于 CCD 本身特性决定了该技术每次只能采集一幅图像, 无法拍摄一个运动过程。

(5) 将 CCD 用于燃油喷雾图像的研究并实现了喷雾图像的实时采集, 虽然有较多优点, 但并不意味着 CCD 完全可以取代干板记录图像。用干板记录图像的空间分辨率比 CCD 高, 在某些场合, 比如研究图像的细微结构, 还必须采用干板记录图像, 以满足高分辨率的要求。

部分工作曾得到早稻田大学硕士研究生姜高植, Iw ashiro, W atanabe 的帮助, 作者在此向他们表示衷心地感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Winterbone D E. Advances in Photographic Studies of Spray and Diesel Combustion. International Symposium Advanced Spray Combustion, Hiroshima, 1994
- 2 史绍熙, 赵奎翰, 姚春德. 内燃机学报, 1986; 14(3): 202~ 210
- 3 黄 震, 张连方, 李渤仲 *et al.* 内燃机工程, 1991; 12(4): 58~ 63
- 4 王庆有. CCD 原理及其应用. 天津: 天津大学出版社, 1992
- 5 王德忠, 黄 震, 张连方 *et al.* 激光技术, 1997; 21(3): 167~ 170

\* \* \*

作者简介: 王德忠, 男, 1962 年 10 月出生。副教授。现从事激光和计算机图像处理技术在流场可视化中应用研究。

收稿日期: 1998-08-24 收到修改稿日期: 1998-10-16