

# 数字微镜器件动态红外景象投影技术

陈二柱, 梁平治

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 动态红外景象投影技术是硬件闭环仿真(HWIL)和成像系统测试及评估的关键技术, 随着数字微镜器件的研制成功, 应用动态红外景象技术已备受关注。描述了动态红外景象投影技术在仿真和红外成像系统测试中的应用, 具体介绍了数字微镜器件的工作原理, 讨论了动态红外景象投影系统的关键技术和国内外研究现状。

**关键词:** 数字微镜器件; 红外景象投影; 硬件闭环仿真

**中图分类号:** V448.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2003)04-0331-04

## DMD dynamic infrared scene projection technology

CHEN Er-zhu, LIANG Ping-zhi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In the evaluation and testing of the hardware-in-the-loop simulation and IR imaging systems, the dynamic IR scene projection is the key technology. With the successful development of the digital micromirror devices(DMD), close attention is paid to the dynamic infrared scene generation utilizing DMD. The application of dynamic IR scene projection to the simulation and testing of the IR imaging system are presented. The working principle of DMD is specified, and further discussion is also given to the core technologies and state-of-the-art of the DMD dynamic IR scene projection.

**Keywords:** Digital micromirror devices; IR scene projection; Hardware-in-the-loop simulation

### 1 引言

目前产生红外图像的物理方法可分为两类:一类是直接红外辐射法,另一类是红外辐射调制法。直接红外辐射法主要有:电阻阵列、激光二极管阵列和红

外 CRT;红外辐射调制法主要有:数字微镜器件(DMD)红外投影系统和红外液晶光阀。为了研制开发高帧频、高分辨率、大动态范围的动态红外景象产生器,许多国家都投入了大量的资金,如美国的 Honeywell 公司、Santa Barbara Infrared 公司、Hughes 公司和 Optical Sciences Corporation 公司(OSC)、英国

收稿日期:2002-10-21; 修订日期:2003-03-08

作者简介:陈二柱(1972-),男,陕西榆林人,博士生,主要从事动态红外景象产生器的研究工作。

的 British Aerospace Sowerby 研究中心等<sup>[1~4]</sup>。

DMD 动态红外景象投影技术是美国 OSC 公司研制开发的一种动态景象生成方法,称为微镜阵列投影系统(MAPS),其核心器件是 Texas 仪器(TI)公司生产的数字微镜器件。从原理上讲,该技术是对红外辐射进行反射调制而得到红外景象,利用这种投影技术可以在可见和紫外光波段产生逼真的动态景象,具有高分辨率、高帧频、无死像元和均匀性好等特点。目前,OSC 公司已开发出几种红外 MAPS 样机,如单片、双片 DMD 中红外投影仪,可以在二进制或脉宽调制(PWM)模式下工作<sup>[5]</sup>。目前,国内还没有相关研究的报道。

## 2 数字微镜器件

数字微镜器件是一种新型、全数字化的平面显示器件(空间光调制器),是应用微机电系统(MEMS)的工艺将反射微镜阵列和 CMOS SRAM 集成在同一块芯片上。DMD 的前身是可变形反射镜器件(Deformable Mirror Device),其英文简称也是 DMD,但二者的构造完全不同。可变形反射镜器件是由硅芯片上的存储阵列和每一存储器上方的可变形聚合物薄膜镜片组成,聚合物薄膜镜片是另外制造的,加工完毕后再和硅芯片上的存储阵列合成一体,混合结构的薄膜显示阵列制作过程复杂,很快被微机械加工的微镜器件所取代<sup>[6~8]</sup>。

### 2.1 数字微镜器件工作原理

DMD 是由成千上万个可倾斜的铝合金微镜组成的,其成像是靠微镜转动完成,每一个像素上都有一个可以转动的微镜,微镜的位置不同,反射光的出射角度就不同,因此每一个微镜相当于一个光开关。当光开关处于“开”态时,反射光可以通过投影透镜投到屏幕上,屏幕上出现亮态;当光开关处于“关”态时,反射光投不到屏幕上,屏幕上出现了暗态,根据需要控制微镜的开、关状态,从而实现显示。

如图 1 所示,像素微镜水平放置,投影透镜放置在像素微镜的中垂线上,如果入射光与微镜垂线之间的夹角为  $20^\circ$  时,则反射光与微镜中垂线之间的夹角也为  $20^\circ$ ,在这种情况下,反射光线不能进入投影透镜的光瞳,只有很少量的光透过透镜到达投影屏,一

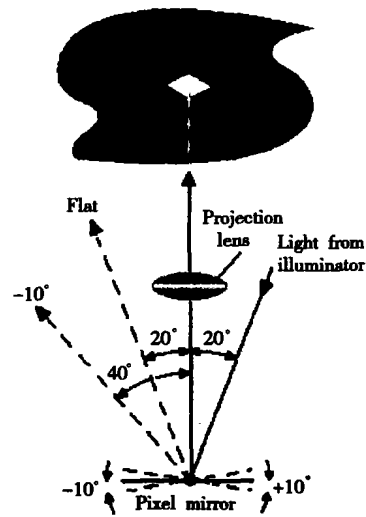


图 1 DMD 显示原理示意图

Fig. 1 DMD optical switching principle

般称这种状态为“平态”;在入射光线的入射方向和投影透镜的位置不变的情况下,当像素微镜顺时针方向旋转  $10^\circ$ (即  $+10^\circ$ )时,则出射光线与入射光线的夹角为  $20^\circ$ ,这时的出射光线正好是投影透镜的光轴方向,于是几乎全部通过投影透镜,并投射到投影屏上,出现亮态,称为“开”态;当像素微镜由水平位置逆时针方向旋转  $10^\circ$ (即  $-10^\circ$ )时,入射光方向和投影透镜的位置不变,则出射光线与入射光线的夹角为  $40^\circ$ ,这时的出射光线远离透镜光瞳,在投影屏上出现暗态,称为“关”态。微镜有  $\pm 10^\circ$  的转动角,能有效地控制入射光的开态和关态,以保证较高的对比度。

### 2.2 数字微镜器件灰度等级控制

DMD 实现全数字方式控制图像的灰度等级,称为二进制脉宽调制技术。DMD 根据驱动电路输入的二进制脉宽信号,通过控制其反射光进入出射光瞳的时间实现对像素灰度的数字控制。例如,一个长为 4 位的数据可以表示 16 级灰度。这 16 级灰度由像素点处于开态的持续时间的长短来实现。将视频的场时间分为 15 份,灰度 0000 就是  $0/15$ , 0001 =  $1/15$ ... 1111 =  $15/15$ ;而每一位则代表在一帧时间内不同的持续时间,0001 =  $1/15$ , 0010 =  $2/15$ , 0100 =  $4/15$ , 1000 =  $8/15$ 。通过对每一位 1 或 0 的控制来实现灰度控制,如图 2 所示。同理,可以实现更高的灰度级别,如 8 位、12 位等。灰度级别取决于两方面的因素:每帧图像的场时间和镜面转动的响应时间。第一

点由所应用的图像的帧频率决定,第二点则是由 DMD 的性能决定。

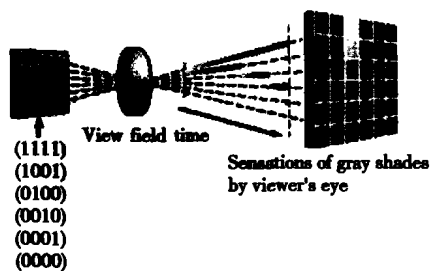


图2 二进制 PWM 控制像素灰度等级

Fig. 2 DMD binary-weighted pulsewidth modulation (4 bit, 16 gray-level).

### 3 微镜阵列投影系统

美国 OSC 公司从 1996 年开始研究 DMD 动态红外景象投影技术,于 1998 年研制出第一台样机。目前,OSC 公司生产的 DMD 红外景象产生器(分辨率为 VGA;800×600)已在美国陆军航空导弹司令部(AMCOM)的高级仿真中心(ASC)投入使用,正在研究高分辨率(XGA;1 024×768)的红外投影技术<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 微镜阵列投影系统的原理

MAPS 是基于 TI 公司的 DLP (Digital Light Processing) 投影仪技术而开发的红外投影仪,其基本原理如图 3 所示。由计算机图像生成器(CIG)产生图像数据,通过 DLP 视频处理电路和 DMD 驱动

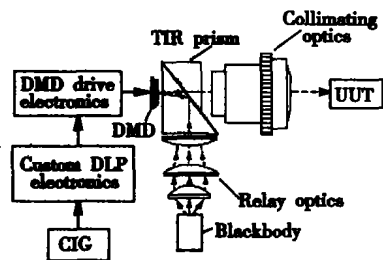


图3 DMD 动态红外投影系统示意图

Fig. 3 Schematic of DMD dynamic IR scene projection system

电路输入 DMD 器件;用黑体辐射源均匀照射器件,利用 DMD 反射调制入射辐射产生红外热图像。生成的红外景象通过准直光学系统投射到被测试单元(UUT)的人瞳处,使红外景象与真实目标和背景在

探测器上的像斑大小、辐射能量空间分布一致。这样用 DMD 产生的红外图像模拟真实目标和背景辐射,以达到评价制导系统性能的目的。

MAPS 有两种工作模式,即二进制和 PWM 模式。工作在二进制模式下时,DMD 每帧图像的像素单元仅由一位二进制数(0 或 1)来控制,所以 MAPS 可产生高帧频的投影图像,并且对测试系统的最小积分时间也没有要求;在一帧时间内,MAPS 占用 97% 的时间来投影显示图像,用 3% 的时间让微镜恢复到平态以防止铰链的机械记忆效应。工作在 PWM 模式下时,MAPS 可以通过改变 PWM 频率来满足探测器积分时间的要求,积分时间越长,越能得到高灰度等级的红外图像。

#### 3.2 微镜阵列投影系统的关键技术

由于 DLP 投影系统是为可见光投影和人眼观看图像而设计的,所以借用其作为红外景象投影显示就存在一些技术问题,如:PWM 可能产生短暂假信号、微镜衍射限制动态范围、出射光瞳的均匀照射以及 DMD 光学窗的光谱透射问题<sup>[6,10,11]</sup>。

将 DLP 投影系统应用于动态红外景象投影显示,最严重的问题是 PWM 所导致的短暂假信号。前面提到,PWM 技术通过控制在一帧时间内每一微镜处于开态的时间长短,实现像素灰度控制。具有长积分时间的探测器(相对于微镜的开关时间而言)可以察觉到微镜像素的灰度等级。目前,DLP 投影系统中的标准电路以 60~85 Hz 帧频产生 8 位的三种颜色数据,在约 5.5 ms 内产生一幅 PWM 图像,如果探测器积分时间小于 5.5 ms(如 InSb FPAs),就会察觉到短暂假信号,如图 4 所示。带有短暂假信号的红外图像(水平闪烁条纹)<sup>[11]</sup>。同样一个卷积积分的探测器也存在这种问题。为解决这一问题,OSC 公司设计了专用控制电路。

第二个问题是微镜衍射引起小动态范围。由于微镜尺寸与红外波长相差不多,所以微镜的衍射会导致图像对比度的下降。对于可见光,典型的对比度为 400:1,而对于中红外光,其对比度会降到 90:1。尽管对比度仅为 90:1,MAPS 仍有较好的表观温度范围。

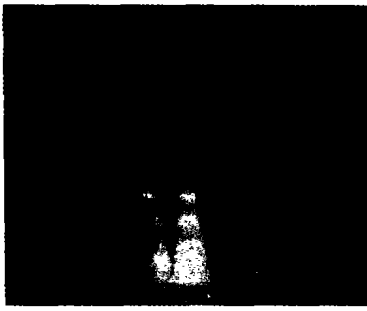


图 4 MAPS PWM 模式产生的红外图像(标准电路)

Fig. 4 Sample image from IR DMD projector under PWM mode (standard circuits)



图 6 WAPS PWM 模式产生的红外图像(专用电路)

Fig. 6 Sample image from IR DMD projector under PWM mode (customized circuits)

另一个重要的问题是 DMD 光学窗口的光谱透射,普通 DMD 上的光学窗口材料不能透过红外光,因此在 DMD 动态红外投影系统中必须使用更换过光学窗材料(红外光学窗)的 DMD。

### 3.3 微镜阵列投影系统的表现温度和产生的红外图像

MAPS 投影仪所显示图像的最大表现温度仅依赖于照射光源,并且可以通过增加辐射光源温度来提高表现温度。图 5 为像素处于开态和关态时的表现温度与照射光源温度间的关系曲线(3~5  $\mu\text{m}$ )。在 MAPS 中,当用高达 532 K 的光源照射 DMD 时,对比度约为 93 : 1 (MWIR)。图 6 是美国陆军航空导弹司令部的高级仿真中心(ASC)利用 DMD 动态红外景象产生器得到的红外图像;MAPS 工作模式为 PWM;图像的灰度级为 64(6 位),帧时间约 3 ms;摄像仪为 320×240 InSb FPA,工作在 60 Hz,积分时间约 3 ms<sup>[5]</sup>。

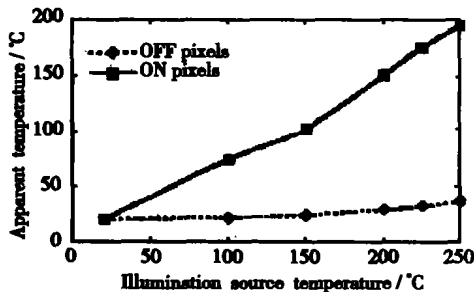


图 5 表现温度与照射光源温度的关系

Fig. 5 MAPS apparent temperature as a function of illumination source temperature

### 参考文献:

- [1] Beasley D B, Saylor D A. Application of multiple IR projector technologies for AMCOM HWIL simulations [A]. SPIE [C]. 1999, 3697, 223-231.
- [2] Beasley D B, Saylor D A. Current status of the laser diode array projector technology [A]. SPIE [C]. 1998, 3368, 88-96.
- [3] Mchugh S, Warner J, Pollack M, et al. MIRAGE dynamic IR scene projector overview and status [A]. SPIE [C]. 1999, 3697, 209-222.
- [4] Cole B, Higashi B, Holmen J, et al. Innovations in IR projector arrays [A]. SPIE [C]. 2000, 4027, 350-367.
- [5] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic IR scene projector based upon the digital micromirror device [A]. SPIE [C]. 2001, 4366, 96-102.
- [6] Hornbeck L J. Projection displays and MEMS; timely convergence for a bright future [A]. SPIE [C]. 1995, 2641, 2.
- [7] Hornbeck L J. From cathode rays to digital micromirrors; a history of electronic projection display technology [J]. Texas instruments technical journal, 1998, 15(3):7-46.
- [8] Hornbeck L J. Digital light processing for high-brightness, high-resolution applications [A]. SPIE [C]. 1997, 3013, 27-40.
- [9] Beasley D B, Saylor D A, Buford J. Overview of dynamic scene projectors at the US Army Aviation and Missile Command [A]. SPIE [C]. 2002, 4714, 147-157.
- [10] Saylor D A, Beasley D B, Braselton B, et al. Current status of IR scene projection at the US Army Aviation and Missile Command [A]. SPIE [C]. 2001, 4366, 147-157.
- [11] Beasley D B, Saylor D A. Advancements in dynamic scene projection technologies at the US Army Aviation and Missile Command [A]. SPIE [C]. 2000, 4027, 278-289.