

## 红外成像目标模拟器的应用探索

高 辉, 赵松庆

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 红外成像目标模拟器是红外成像制导半实物仿真的核心组成部分, 随着制导半实物仿真对目标真实度要求的不断提高, 模拟器也在不断改进以适应新的试验要求。当前的模拟器无法满足多样化的仿真需求, 而更新一代模拟器的研制难度较大, 投入也更高。基于现有的红外成像模拟器, 讨论了通过对目标模拟器的改造与扩展, 拓展了其应用范围, 使其更符合半实物仿真的需求。

**关键词:** 红外目标模拟器; 半实物仿真; 电阻阵

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2014)05-0409-06

## Exploration of Applications of IR Image Simulator

GAO Hui, ZHAO Song-qing

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** IR image simulator is the key part of the HWIL simulation system and is being developed to adapt to the new demand of the HWIL simulation experiment, because of the higher requirements of the reality of the target simulation. The present simulators can't satisfy the variety of requirements of the simulation, and the research of the next generation of the IR image simulator is much more difficult and expensive. The alterations of the IR image simulator are discussed to expand the applications.

**Key words:** IR image simulator, HWIL simulation, resistor array

### 0 引言

最近几十年来, 半实物仿真测试已成为制导武器系统的一种关键的实验室评价工具。制导系统半实物仿真从以往的试验验证手段, 现已发展为设计、验证和优化平台, 贯穿制导武器研制全过程<sup>[1-2]</sup>。

半实物仿真以信息理论、控制理论等为基础, 以仿真器或其他物理效应设备为工具, 利用半实物环境检测系统, 并根据获取的数据信息, 通过对结果进行分析, 进而做出判断的一种实验方法。在红外半实物仿真测试中, 利用仿真系统为红外制导系统提供与实际工作状况相似的环境<sup>[3]</sup>, 需要构建的环境如下:

- 1) 为弹体提供三维运动环境;
- 2) 为红外导引系统提供目标和背景的红外辐射环境;
- 3) 为舵机提供力矩环境。

上述三种环境分别由五轴转台、红外目标模拟器和负载模拟器提供。此外, 还需要仿真计算机和仿真

总控台, 并且以光纤网络作为整个半实物仿真系统的集成基础, 各个设备之间通过光纤进行数据通讯, 仿真系统的时序逻辑控制由产品控制台完成, 目标、干扰的运动学模型计算由仿真计算机完成, 目标生成控制由目标模拟器的控制器完成。硬件半实物仿真的典型架构如图1所示。

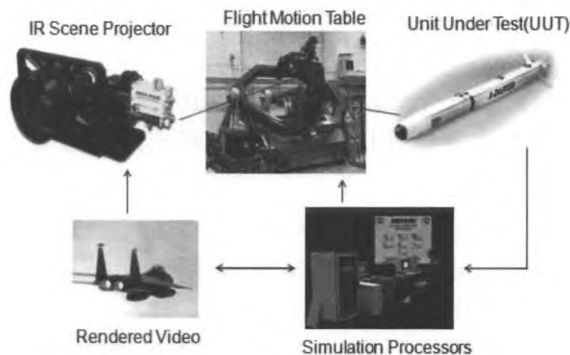


图1 半实物仿真系统的典型架构

Fig.1 Typical structure of the HWIL simulation system

收稿日期: 2013-12-19; 修订日期: 2014-02-09.

作者简介: 高辉 (1985-), 男, 山西文水人, 硕士, 助工, 主要从事红外制导系统仿真红外目标模拟方面的研究工作。E-mail: gaohuialex@163.com.

通信作者: 赵松庆 (1964-), 男, 河南洛阳人, 硕士, 高工, 主要从事红外制导系统仿真红外目标模拟方面的研究工作。

图1中,红外目标模拟器是红外仿真系统的核心部分之一,它将计算机图像生成器产生的图像数据转换为红外物理辐射,并通过光学系统投射到被试系统的光学入瞳处,用以模拟系统工作时的红外场景,供被测系统进行探测和识别,进而对系统的捕获跟踪能力和抗干扰能力等进行测试。成像目标模拟器应该具有以下的能力:

- 1)模拟目标类型:战斗机、武装直升机、坦克,并可进行后续扩展;
- 2)模拟目标辐射部件:机身、发动机、尾气流;
- 3)模拟目标飞行高度范围及距离;
- 4)模拟目标状态:巡航、加力等其他可能状态;
- 5)模拟背景:模拟各种季节及类型的地物、天空、海面背景;
- 6)模拟干扰种类:高温点源干扰、伴飞干扰、烟雾干扰、喷油干扰、礼花型干扰、拖曳型干扰等;
- 7)模拟干扰数量:任意;
- 8)模拟干扰投放方式:视场穿越、目标分离、目标伴随及任意人工指定轨迹;

## 1 目标模拟器的现状

自从1980年法国的 Vincent Bly 成功研制出世界上第一个动态红外目标模拟器以来,各种基于不同原理的此类产品的发展极为迅速,包括电阻阵、数字微镜器件(DMD)、激光二极管阵列、红外CRT、红外液晶光阀等多种红外目标模拟器均得到了应用。美国陆军航空和导弹司令部(AMCOM)所属的高级仿真中心(ASC)、埃格林空军基地(Eglin AFB)的空军研究实验室(AFRL)、陆军试验鉴定司令部(ATEC)所属的红石技术试验中心(RTTC)、美国休斯公司、英国宇航公司、法国军事电子技术中心等代表欧美武器系统仿真领域的最高技术水平的仿真实验室均投入巨资开展红外目标模拟器技术的研究。

国内也对红外目标模拟器的相关技术进行了跟踪研究,但受限于工艺水平、资金情况,始终与国外有着不小的差距。并且国外在这方面也对中国进行了技术封锁。国内的中科院上海技物所成功研制了 $256 \times 256$ 的微桥电阻阵,并开展了 $512 \times 512$ 规模的研制工作,同时,该单位也在进行下一代更高占空比的悬浮薄膜型电阻阵研制工作。昆明物理所成功研制出红外CRT目标模拟器,并在2000年前后将其用于红外成像制导仿真系统。哈尔滨工业大学和长春光机所都对基于DMD的红外目标模拟器进行了研究并投入了使用。

红外目标模拟器有以下几项基本技术指标,如阵

列规模、辐射光谱波段、灰度等级、温度分辨率、帧频等,不同的红外探测系统,对投射器在上述指标的要求也有很大的不同,因此并不存在某种器件可以适应所有应用场合的情况,而是不同的场合可能需要采用不同种类的器件。并不是所有类型的器件都具备良好的发展潜力,事实上,由于性能和制造工艺等多方面因素,很多目标器在红外仿真技术的进化过程中已逐渐被淘汰或者冷落。

当前使用的红外目标模拟器技术可以分为两类:其中一类是直接红外辐射法,另一类是红外调制法,分别以电阻阵和DMD为代表。

### 1.1 电阻阵

电阻阵的工作原理就是通过电流加热电阻单元从而产生红外辐射,利用微电子技术和CMOS工艺,可以在硅片上制造大规模的微型电阻阵列,每个电阻单元构成一个像素点,可以被单独选址并施加不同的驱动电流。同时,每个电阻单元在设计上都尽量与周围的单元进行隔热化处理,并且芯片辅以半导体制冷器件和水冷装置进行散热,这样,通过控制不同电阻单元的驱动电流就能产生动态的,温度可变的红外图像。电阻阵的发展经历了三代,分别是薄膜电阻阵、桥形电阻阵和悬浮薄膜电阻阵<sup>[4-6]</sup>。

最新的悬浮薄膜电阻阵采用三维工艺,突破了前两代在一个平面内加工电阻单元和电路的理念,将薄膜结构的发热单元架空并悬浮在电路的上方,仅通过细长的腿与电路接触,称之为悬浮薄膜结构,这样微桥和电路分别处于两个层面,互不干扰,极大地提升了占空比的同时也大大提高了电阻阵的性能。图2是美国SBIR公司研制的基于电阻阵的目标模拟器。



图2 美国SBIR公司研制的电阻阵

Fig.2 Resistor array manufactured by SBIR, America

电阻阵的红外辐射强度随时间的变化是阶跃式,每个像元的温度在没有被驱动电流驱动的时候始终保持不变,只有施加驱动电流才会产生热辐射,同时,

由于散热装置的存在，电阻单元会达到一个热平衡状态。一旦驱动电流停止，热量会迅速被带走；电流发生改变时电阻单元会重新达到一个热平衡状态从而产生另一种不同强度的辐射。由于采用加热后辐射红外线的工作原理，电阻阵列是一种从工作方式上最接近真实物体产生红外辐射的器件，从仿真的角度而言，电阻阵这种直接红外辐射型地器件比其它原理的器件更符合仿真概念。

国外目前电阻阵列的水平已达到相当高的水准，单片器件规模已发展到  $1024 \times 1024$  像元，输出波段范围达到了  $2 \sim 14 \mu\text{m}$ ；灰度等级可以达到 16 bit；输出的等效黑体温度目前达到了 650 K，帧频达到 200 Hz。电阻阵列的缺点一是阵列规模还不够大，二是在目前它的帧频最高只能达到 200 Hz，原因是电阻元的热时间常数 5 ms 限制了帧频的进一步提高。

1.2 DMD

数字微镜器件 (DMD) 是一种新型、全数字化的平面显示器件，其本质就是一个半导体光空间分布调制器，最初由美国德州仪器公司研发成功，用于可见光投影领域。它是应用铝溅射工艺在半导体硅片上生成的微米量级 ( $13.8 \mu\text{m}$ ) 的方形微镜面，数以百万计的微镜面用铰链结构建造在由硅片衬托的 CMOS 存储器芯片上，通过静电驱动微反射镜转动来调制红外辐射分布。工作时有一束入射光照射到器件表面，器件的成像是靠微镜转动完成，每个可以转动的微镜就是一个像素。微反射镜偏转角度为  $\pm 12^\circ$ ，分别对应开态和关态，微反射镜水平放置时为平态，投影光学系统光轴与平态时微反射镜中垂线重合。微反射镜偏转  $+12^\circ$  时，反射光线几乎全部通过投影光学系统；微反射镜偏转  $-12^\circ$  时，入射光线被偏转无法进入投影系统光线，如图 3 所示。

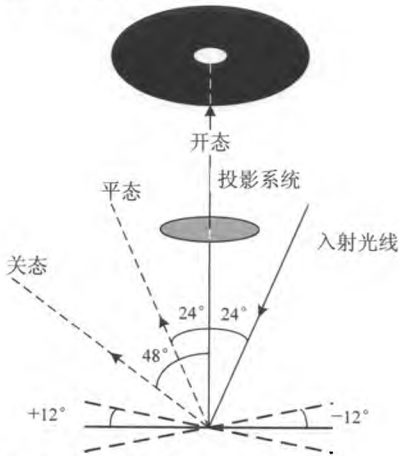


图3 DMD 工作原理示意图 Fig.3 Theory of DMD

DMD 采用脉宽调制技术实现灰度等级调制，即在积分时间内，DMD 通过调节微镜面处于“开态”

的时间所占百分比实现对相应像素亮度的数字控制。为避免光电探测器测试过程中由于积分不同步而出现虚假信号的现象，需要使用同步信号。DMD 灰度等级取决于红外成像制导系统的积分时间和 DMD 芯片的性能。成像制导系统的积分时间决定了 DMD 进行一帧脉宽调制的时间，而 DMD 的性能决定了在一帧脉宽调制周期内可以完成多少次微镜偏转<sup>[7-9]</sup>。

由于微镜单元的中心距为  $17 \mu\text{m}$ ，单元大小比较接近红外光的波长，衍射现象将大大降低图像的对比度，而且由于衍射极限的存在它在长波红外领域的应用受到限制。

2 红外目标模拟器的使用扩展

成像模拟器是伴随着成像制导武器的需求而不断进步的，随着红外制导武器的不断进步，目标模拟器的发展也应该满足不断提高的红外制导武器的仿真需求。目标模拟器追求的是更高的分辨率，更高的帧频，更逼真的目标/干扰/背景红外特性以及更多样化的目标信息。在现有的目标模拟器未能有飞跃式发展的情况下，采取多种方式扩展其应用是一个较为理想的选择。

2.1 扩展更高的分辨率

随着制导武器探测器的像元数不断提高，探测能力不断加强，对模拟生成的目标细节就提出了更高的要求，而制约模拟生成的红外图像精细度的主要因素就是模拟器的阵列规模。现阶段国内应用最成熟的红外目标模拟器是电阻阵，工程经验已比较丰富，但目前国内使用的  $256 \times 256$  规模的电阻阵为  $128 \times 128$  以下规模像元的制导武器提供仿真目标还勉强可用，但对分辨率更高的红外成像制导武器来说，已远远不能满足试验要求。因此，使用多块同样的小规模模拟器拼接为一块大规模的模拟器是一种可行的方案。

2.1.1 通过分光镜合束方式进行拼接

使用四块电阻阵和三块分光镜完成拼接，通过调整电阻阵的空间位置，使其在空间上形成  $2 \times 2$  的分布，其拼接光学原理如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，左侧的电阻阵 1 和电阻阵 2 构成  $2 \times 2$  拼接的第一列，下方的电阻阵 3 和电阻阵 4 构成第二列，4 块电阻阵的芯片表面都位于投射物镜的焦面位置，即等效于一个水平和垂直方向分辨率均为原先两倍的电阻阵。

该方案主要是控制 4 个电阻阵在空间的位置分布来进行拼接，思路比较简单直接，但造成整套系统的结构非常复杂，4 个分支光路要首先分别调校，保证芯片位于物镜焦面位置，同时还要在焦面上适当微调

每个芯片的位置，让他们以合适的方式排列，首先需保证拼接交接位置不能重叠，也不能间距过大，必须与两个像素的间距相同；其次还要保证每个芯片无倾斜，无旋转。装调难度非常大。此外由于采用分光镜进行合束，对每个电阻阵芯片发出的能量衰减较大。经过每个分光镜就损失 50% 的能量，最终到大投影物镜时能量已经只剩下原来的 1/4。这样会造成整个系统的能量利用率过低，降低了模拟目标的等效黑体温度，对仿真试验带来不利影响。

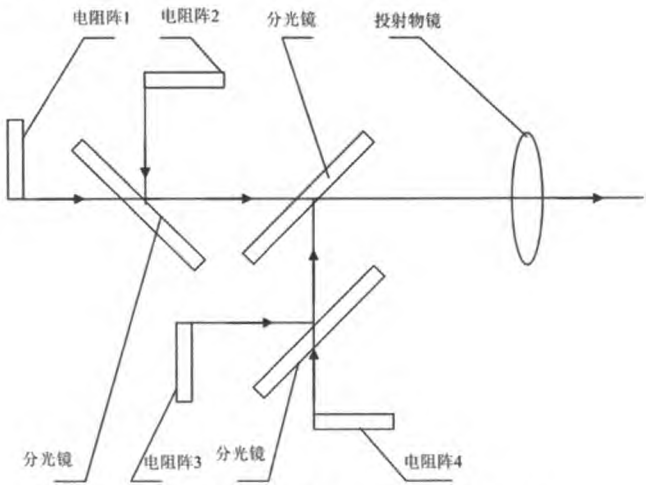


图 4 采用分光镜光学拼接总体方案原理图

Fig.4 Scheme of the mosaic image using the spectroscop

此外，用于拼接的 4 个电阻阵的非均匀性也要做整体校正。由于每个电阻阵的非均匀性都有所不同并且其辐射系数也不一样，因而仅仅简单地将 4 块电阻阵拼接在一起会造成拼接的图像各处不均匀，或是在分界处有明显的痕迹，极大地影响了生成的图像的清晰度和逼真度。因此，需要对四个电阻阵做整体的非均匀性修正。

2.1.2 采用楔形镜分视场拼接

如图 5 所示，用一个楔形镜来完成两块电阻阵的拼接，该楔形镜只有朝下方的一面能够反射光线，另外一面不能反射光线。该楔形镜一方面遮挡了电阻阵 1 的一半视场，同时将电阻阵 2 的一半视场进行反射，最终将两个半视场进行拼接，组合为一个全视场，方法非常巧妙。图 5 中两个电阻阵放置的时候各自偏向光轴的一侧，经楔形镜反射后两光路的光轴重合，完成拼接<sup>[10]</sup>。

从图 5 中可以看出，两路子光路是关对于楔形镜的反射面对称的，就相当于光轴上、下部分的物面被分开，其中有一路被折转。很显然，这种拼接方案对楔形镜的要求非常高，尤其是楔形边缘的质量，要求边缘需要十分尖锐，否则将会在拼接处形成一个明显的痕迹。拼接边缘的间距应恰好等于电阻阵两个像素

的间距（约为 65 μm），对楔形镜边缘部位的加工提出了相当高的要求。

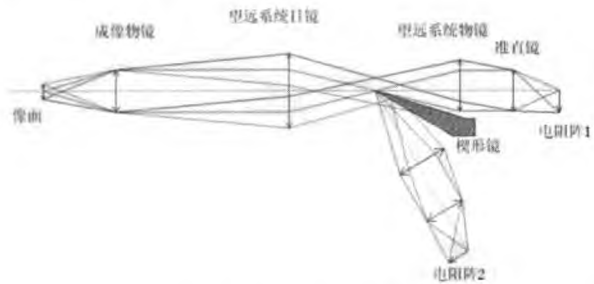


图 5 采用楔形镜拼接原理图

Fig.5 Scheme of the mosaic image using the wedge mirror

其次，楔形镜的面型要求也比较高，否则经过反射后电阻阵 2 的成像会发生扭曲，从而影响拼接后的效果。楔形镜表面需镀高反膜，以减小经一次反射后两块电阻阵的温度差异。再次，由于楔形镜的存在，电阻阵发出的红外光在楔形镜的边缘会产生衍射，衍射光线通过后续光学系统会产生杂散光，对拼接形成的图像带来不利影响。同时，由于衍射的存在，也会导致拼接附近位置像素的辐射能量减小。

在调校过程中也需要保证拼接处间距恰为两个像素的间距，且无倾斜，无旋转，行、列像素对齐。此外，用于拼接的电阻阵也需要整体做非均匀性修正以保证生成的红外图像的质量。

这种拼接方法无需经过分光镜，减少了光能量的损耗。但只能一次形成一列 1×2 的拼接，无法直接形成 2×2 的拼接，想要形成 2×2 的拼接就需要三组这样的系统将两个 1×2 拼接为一个 2×2，如图 6。每组 1×2 的拼接都要额外生成一个二次像，这样会导致系统异常复杂，拼接难度巨大。

2.2 扩展更逼真的红外特性

现有的电阻阵的红外辐射可以看作是灰体辐射，而 DMD 的辐射源就是黑体，两者的辐射能量都受到温度的限制，而中/短波双色成像制导武器需要对中、短波能量进行对比从而计算出目标或干扰的温度，一般来说干扰弹的温度远远大于飞机尾焰的温度，以美军的 F16 为例，其尾喷等效温度不超过 900 K，飞机蒙皮温度更低，而干扰弹的等效温度可达 2000 K 至 2300 K。在实验室中模拟如此高温是不现实的。只有采用相对模拟的方式，即只模拟短/中波能量比，而不去模拟绝对的中、短波能量值。对电阻阵来说目前最高等效黑体温度只达到 600 K 左右，这时短/中波的能量比不到 0.1，而干扰的短/中波能量比达到 4 倍左右。因此需要采用一定的手段衰减中波，让短/中波双色达到双色成像制导武器可以分辨目标/干扰的程度。

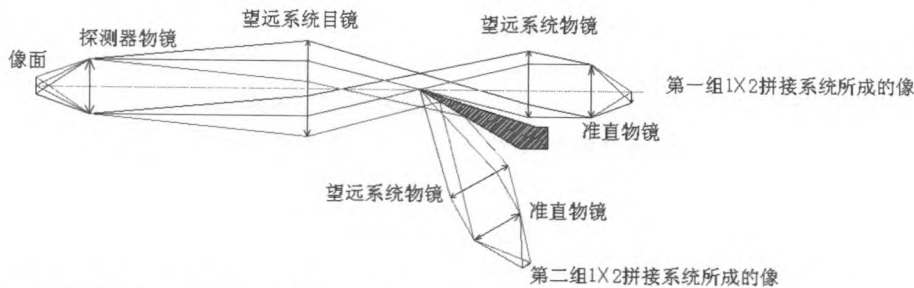


图 6 采用楔形镜进行 2×2 拼接原理图

Fig.6 Scheme of the 2×2 mosaic image using the wedge mirror

2.2.1 采用中波衰减镜对中波进行衰减

可以在红外目标模拟器的投射物镜前加装一个对短波增透，对中波增反的衰减镜来使生成干扰的短、中波的能量比达到要求。首先应对电阻阵的短、中波能量进行标定，确定需要衰减的中波能量比例，通过对衰减镜镀膜实现所需的透过率。这种方法简单有效，不足之处是对中波衰减过多，降低了中波的动态范围，对目标和干扰由远及近的能量变化模拟造成一定的失真。

2.2.2 采用双电阻阵器合成

采用双电阻阵同时生成红外景象，不同的是一个电阻阵前加装只透中波的滤光片，另一个电阻阵前加装只透短波的滤光片，通过两者的组合产生合适的双色比，如图 7 所示。这种方法需要在装调时将两块电阻阵的像素一一对应，同时，在图像生成的控制上需要两个电阻阵生成同样的图像，但各自的驱动电压不同。应通过预先标定确定两电阻阵的驱动电流和中/短波辐射能量的关系，保证合成后的图像双色比不发生大的跳变。

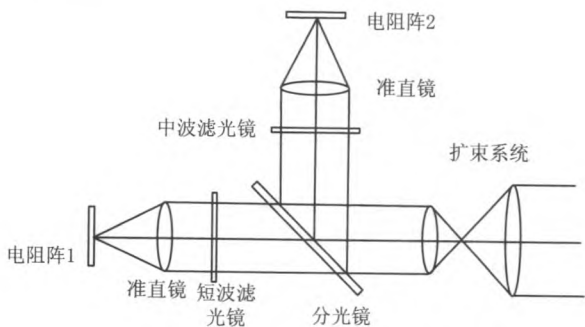


图 7 双电阻阵方式模拟双色红外目标

Fig.7 Bicolor target simulation using two resistor arrays

2.3 扩展更丰富的目标信息

偏振是光的基本特性之一，任何目标在反射和发射电磁辐射的过程中都会表现出由他们的自身特性和光学基本定律所决定的偏振特性。目前大多数探测器包括人眼都是只能感觉到光波的波长和强度,却忽略了光的偏振信息。偏振成像模拟可以模拟目标

的偏振态信息，为探测、制导系统提供具有偏振信息的仿真目标<sup>[11]</sup>。

目前的偏振探测系统一般有利用旋转偏振片分时探测，也有采用多探测器同时进行探测，如图 8 和图 9 所示。

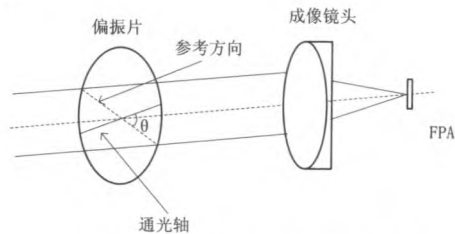


图 8 旋转波片对偏振信息进行探测

Fig.8 Polarization imaging detective by rotating polaroid

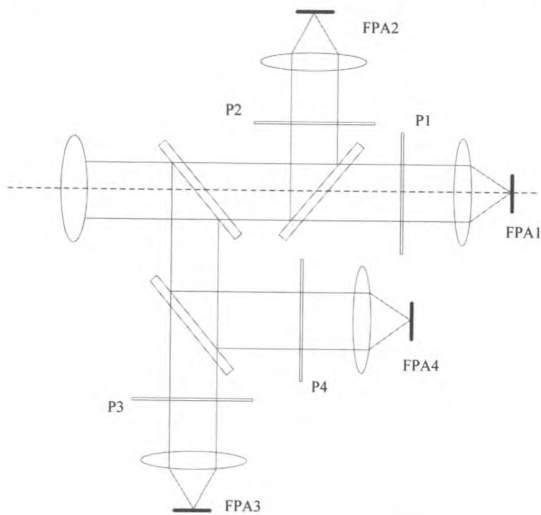


图 9 多探测器对偏振信息进行探测

Fig.9 Polarization imaging detective using multi detectors

旋转偏振片探测目标偏振信息是利用多次步进旋转偏振片，得到多个偏振方向上的光强大小，由此计算斯托克斯矢量，得到目标的偏振信息。而多探测器的方法是采用多个通光方向不同的偏振片同时成像，由此来计算斯托克斯矢量<sup>[12-13]</sup>。

2.3.1 分时模拟偏振信息

基于旋转偏振片分时采集计算斯托克斯矢量的系统，也可以采用分时生成相应的红外辐射以供探

测。但与制导探测系统不同,分时偏振模拟不需要旋转偏振片,只需要每一步的辐射能量进行控制即可。因为探测器本身是对偏振无响应的,对偏振的识别完全是依靠探测器前端的偏振片,通过对透过偏振片光辐射的响应来判断某一偏振态的光强大小。因此,只要不断改变模拟器输出的光强,虽然仍是非偏振光,但也能在每次旋转偏振片后偏振制导探测系统的焦平面上得到光能量发生变化,以此来模拟不同偏振态能量。此种方法无需其他附加结构,但是需要光强改变与偏振探测系统的步进严格一致,否则将会使制导探测系统接收到的光强发生紊乱,影响斯托克斯矢量的解算。同时,在图像生成的控制上,必须对每帧图像的能量进行预先的计算,采用一定的算法来模拟不同偏振态的能量,算法会比较复杂。此外同步会对模拟器的帧频提出更高要求,若探测器以四个步进来解算斯托克斯矢量,那么模拟器的帧频应为偏振制导探测系统的四倍。依据目前电阻阵的帧频 200 Hz,那么其最多满足帧频为 50 Hz 的偏振成像制导系统的仿真需求。以分时的方式进行偏振仿真只能为以步进方式旋转偏振片的偏振制导探测系统提供目标,但对同时成像的偏振探测系统不适用。

### 2.3.2 实时模拟偏振信息

同时模拟偏振信息固然也可以采用多个探测器加装不同透光方向的偏振片分别模拟多个偏振信息,但由于偏振探测或偏振制导系统最终要做的是通过偏振图像的融合来对目标进行增强,而且自然状态下圆偏振分量非常小,可以忽略不计,其得到的斯托克斯矢量最终还是转化为图像进行图像处理和融合,得到图像和背景的差异信息,主要是将置于在背景之上的物体的边缘进行增强,而并不是通过计算偏振度的值等信息来确认目标。因此,在模拟偏振图像的过程中,只要适当控制目标辐射红外光的偏振态,让其偏振度与背景光有足够的差异即可。此外,由于探测器对偏振是不敏感的,同时也对光相位不敏感,对偏振态的解析完全是通过偏振片及波片产生的。经研究发现,在实际的偏振探测中,圆偏振分量非常小,几乎可以忽略不计,所以不少偏振探测系统往往只求取前三个斯托克斯矢量。因此在偏振模拟的时候只对具有部分线偏振的目标及背景进行模拟即可。那么,整个偏振模拟系统就可以简化为两部分,一是对部分线偏振目标辐射的模拟,另一部分是对自然的背景辐射模拟,如图 10 所示。模拟器 B 模拟自然背景及目标物体的非偏振图像,模拟器 A 配合偏振片 M 模拟目标物体的线偏振图像,两者合成以后,目标物体的红外辐射会具有一定的偏振态供制导探测系统接收。该系统不可能模拟出所有复杂偏振态的情况,不能模拟所有的斯托克斯是矢量。但对于仅仅从偏振图像处理角度

来区分目标和背景的制导探测系统来说是完全适用的。整个系统中不存在需要转动的部件,由于仿真是相对仿真,偏振方向完全可以通过制导武器系统的旋转来改变其探测到的偏振角。只需要在装调时保证两块模拟器像素的一一对应。

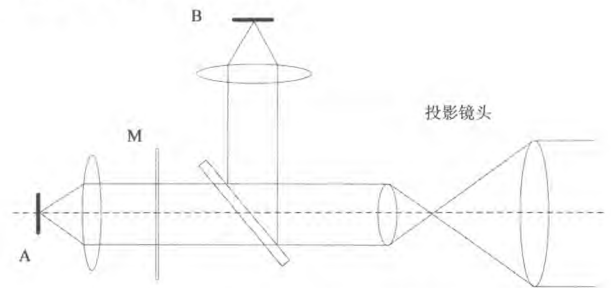


图 10 实时模拟目标偏振信息

Fig.10 Real time polarization imaging simulation system

## 3 结论

红外目标模拟器是红外制导半实物仿真系统的核心装置,随着制导武器需求的不断提高,在未能出现更新更先进的模拟器的情况下,对现有模拟器的改造升级以适应新需求是一种非常有效的方法。本文探索了几种对现有模拟器进行扩展应用的技术,通过这些改造,可以使现有的目标模拟器的性能有所提高,可以适应更加多样性的仿真要求。

## 参考文献:

- [1] 李卓,李平. 动态红外图像生成技术综述[J]. 红外与激光工程, 2006, 35:283-294.
- [2] 高教波,王军,骆延令,等. 动态红外场景投影器研究新进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 351-354.
- [3] 张建忠. 红外双波段视景仿真器光学系统的研究[D]. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- [4] 程正喜,马斌,刘强,等. 薄膜转移工艺制备的 128×128 规模高架桥式电阻阵[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 559-562.
- [5] 马斌,程正喜,翟厚明,等. 国产电阻阵列技术的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2314-2322.
- [6] 肖云鹏,马斌,梁平治. 国产电阻阵列动态红外景象投影器研制进展[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 266-270.
- [7] 张二磊,祁鸣. 基于 DMD 的动态红外场景生成系统[J]. 电子科技, 2011, 24(7): 140-143.
- [8] 蔡建荣,严高师,刘昌松,等. 基于 DMD 的红外动态图像生成技术[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 338-341.
- [9] 康为民,李延彬,高伟志. 数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 753-756.
- [10] M. Thomas, D. Moore, R. Hendrick, and etc. high resolution dynamic infrared scene projection using a reflective mosaic image combiner[C]//Proc SPIE, 1997, 3084: 179-189.
- [11] 汪震,洪津,乔延利,等. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 196-201.
- [12] 徐参军,赵劲松,蔡毅,等. 红外偏振成像机理概述[J]. 红外技术, 2007, 29(7): 381-385.
- [13] 都安平. 成像偏振探测的若干关键技术研究[D]. 西北工业大学, 2006.