

·测试、试验与仿真·

## 导弹紫外辐射特性模拟方法研究

张建新, 张宝军

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

**摘要:** 为了对导弹在飞行时产生强烈的紫外辐射进行模拟, 对导弹紫外动态辐射特性行了分析, 并对适合作为辐射源的人工紫外光源原理、特点与应用进行了描述与比较, 最后对飞行特征几种控制方式与适用的光源进行阐述与比较。

**关键词:** 导弹辐射特性; 人工紫外辐射源; 模拟控制方式

中图分类号: TN23

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0090-05

## Research on Simulation Method of Ultraviolet Radiation Characteristic for Missile

ZHANG Jian-xin, ZHANG Bao-jun

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

**Abstract:** For simulating the strong ultraviolet (UV) radiation of the missile in flight, UV dynamic radiation characteristics of the missile are analyzed. And the principle, characteristics and applications of manual UV light source suitable to be radiation source are described and compared. Control modes of missile flight features and applicable light source are introduced and compared finally.

**Key words:** missile radiation characteristic; manual ultraviolet (UV) radiation source; simulation control mode

导弹飞行时, 由于火箭燃料的燃烧会在其尾部形成一个相对于背景强烈的紫外辐射源, 产生散射而开成一个较大的辐射环, 为紫外探测系统提供信号源。紫外探测系统于20世纪80年代中期开始研制、发展到今天已经在多个国家多种平台上装备。通过研究分析导弹紫外辐射特性, 并采用不同调制方式的人工紫外辐射源, 可以模拟导弹的紫外辐射特性及其逼近的过程。

### 1 导弹紫外动态辐射特性分析

#### 1.1 导弹羽烟辐射机理

导弹通常采用固体推进剂, 其羽烟产生紫外辐射的机理如下:

(1) 热辐射。导弹羽烟的温度高达2 000 K左右, 根据黑体辐射定律, 可以产生一定量的紫外辐

射, 其辐射的连续谱同一般灰体发射的谱相似, 尤其含铝的推进剂的尾气流中, 大量的高温 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒子会产生强烈的紫外辐射。

(2) 化学荧光。化学荧光是由化学动力学过程导致的非平衡自由辐射, 羽烟中一些未燃尽燃料产生的化学反应导致了紫外辐射。此外, 还有热滞后的粒子发射、分子电子发射等, 这些因素的共同作用使导弹羽烟在中紫外区呈现连续谱特征, 如图1所示。羽烟中 $\text{AlCl}_3$ 粒子在263 nm处产生一明显的吸收峰<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 导弹逼近动态特征

导弹向被保护平台逼近过程中, 紫外辐射在探测器的辐照度是动态变化的。

目标(导弹或飞机)与探测器之间的距离为 $L$ , 光学系统照度公式如下

$$E = \frac{\pi}{4} \frac{I}{S} G \tau_1 \tau_2 \tau_a m^2 / L^2 \quad (1)$$

式中,  $I$  为目标的紫外辐射强度;  $S$  为目标的面积;  $G$  为像增强器的放大系数;  $\tau_1$  为紫外透镜的透过率;  $\tau_2$  为紫外滤光片的透过率;  $\tau_a$  为大气的透过率;  $m$  为光纤光锥的放大倍数。

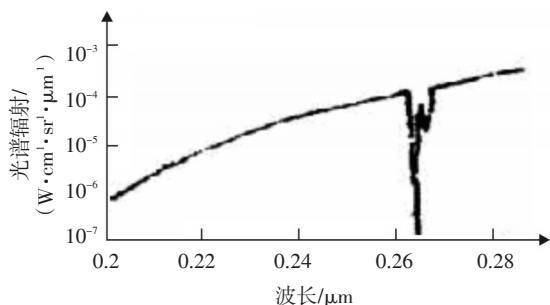


图1 导弹羽烟的光谱辐射特性

导弹在向目标运动过程中,其紫外辐射在目标处产生的辐照度动态变化,辐照度值与距离平方成反比,与大气透过率成正比。辐照度值与距离的关系如下

$$E = I \times \tau_a / L^2 \quad (2)$$

式中,  $I$  为目标的紫外辐射强度;  $\tau_a$  为大气透过率。

距离与大气透过率的关系如下

$$\tau_a = e^{-\alpha \times L} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为大气衰减系数。

由式(2)、式(3)可推导出,导弹运动至任意一时刻,其在目标处(即告警传感器处)产生的照度值为

$$E = \frac{I}{L^2} e^{-\alpha \times L} \quad (4)$$

式中,  $E$  是  $L$  的一元函数,并由此可作出导弹逼近时目标处紫外传感器输出的动态时间的响应<sup>[2]</sup>。

## 2 人工紫外辐射源

紫外辐射源一般分为两部分:一类是天体、地面景物、大气等自然辐射源;另一类是飞机、导弹和人工专门制作的人工辐射源,还包括人类活动产生的紫外光学杂波,比如城乡环境、工业区、战场及火源等。人工紫外辐射源按发展年代分,首先是气体放电灯,最早期常用的有汞灯、氙灯、之后是氙灯和氩灯等;20世纪60年代,随着激光的发明,各种紫外激光器也很快发明出来;此外高温黑体也是一种不错的紫外源;紫外发光二极管是一种新型的紫外光源,特点是电功

率小,光电转换效率高,波段单色性好,工作与控制方式简单实用,具有极大的发展与应用空间<sup>[3]</sup>。表1为人工紫外辐射源特点及应用<sup>[4]</sup>。

表1 人工紫外辐射源特点及应用

类别	特点	应用
汞灯	光源效率高,寿命长,但汞对环境造成威胁	医疗保健,水处理,光固化,超大面积光刻,工农业生产
氙灯	能量高,光谱特性好	标准灯,汽车照明,投影显示系统;紫外分光光度计,液相色谱仪及各种紫外检测器,光谱仪器,色谱仪器
氙灯	高亮度,辐射光谱接近太阳,可瞬间启动	模拟光源,电影放映光源,医用光源,蓝色光源,红外应用光源,水质分析仪,土壤养分测定仪
激光器	准分子激光器占地面积大,能耗高,倍频激光器发射率大	通讯,军事干扰,医用光源,加工光谱分析,光刻技术与光盘读取技术,模拟光源
二极管	电光转换效率高,体积小控制简单,成本低,功耗低,波段单色性好	水处理,空气净化,表面处理,医用光源,诊断学,分光光度计,传感器,生物分析
卤钨灯	光效率高,功率集中,显色性能好,节省电能,	大型场所照明,定标光源,汽车照明,模拟光源,光学仪器,印刷制版照明

## 3 控制方式

导弹紫外辐射模拟从应用的距离上可分为室内与室外,室外又分为近场与远场,室内的模拟源应用距离一般约为10 m以内,近场一般为5~50 m左右,而远场一般指大于0.5 km。常用的控制方式与所用光源有关系,控制方式可分为:光学控制方式、机械控制方式与电控制方式,详见图2。

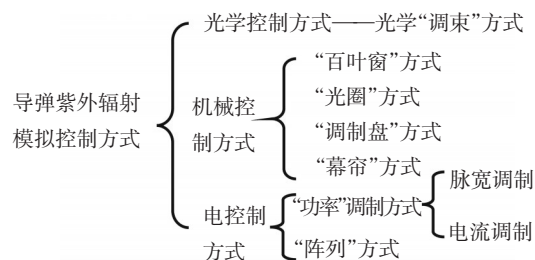


图2 控制方式分类

### 3.1 光学控制方式

光学控制方式就是通过光学镜头在光路中的移动,使得光输出的束散角产生连续的变化,从而达到模拟导弹紫外辐射强度的连续变化过程。

光学控制方式最常见的是光学调束方式,如图3所示。采用机械结构调节束散角。透镜组由透镜组成,通过调节透镜组与激光器或紫外二极管出光口的相对位置对束散角进行调节。从图3中可以看出,随着距离的增大,束散角变大,能量密度变小,且都是单调变化的。

光学调束对光源的要求比较高:方向性强、均匀性好、亮度高。光学调束式适用于激光器及紫外二极管。特点是结构相对比较复杂,可应用于内场、近场与远场。

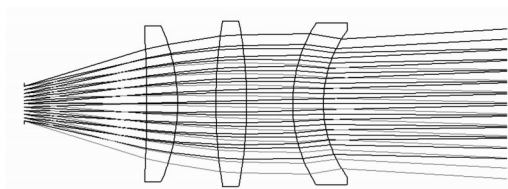


图3 调节束散角的透镜组示意图

### 3.2 机械控制方式

机械控制方式就是对红外辐射源的有效辐射面积进行有效的物理遮挡,随着遮挡面积的线性变大或变小,实现模拟导弹紫外信号变化的过程。但机械控制方式有一个共同的缺点是:用于遮挡的叶片工作时间长,容易产生二次辐射,对于测试精度产生一定的影响。

通过物理遮挡方式可以改变辐射源的尺寸、面积,来实现导弹逼近特性,前提条件是光源经过汇聚后输出一个辐射近似均匀的面源。适合用于物理遮挡方式的光源有氙灯、卤钨灯、氙灯、黑体。机械控制方式有很多方法,下面就其中几种典型的机械控制方式进行介绍。

#### 3.2.1 百叶窗控制方式

第一种物理遮挡方式是采用百叶窗式叶片结构,以实现叶片间的完全重叠互压,在理论上可以实现对光路的完全遮蔽,通过直流步进电机来控制光栏叶片的开合。可较大幅度提高设备的动态范围指标。为了避免机械光栏变化时出现视场内能

量变化不均匀的问题,在设计时可采用左右或上下对称结构,在辐射器中心两侧分别布置机械光栏,两光栏转动方向相反,可有效抵消能量不均匀现象。或者采用单向光栏的遮挡方式,如图4所示。在国外的相关报道中可以看到以色列及美国的模拟器采用的是这种方式。

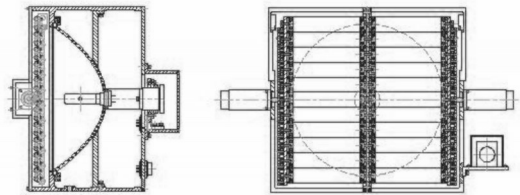


图4 百叶窗控制方式示意图

与之相配合的光源以气体放电光源与卤钨灯和黑体,比较适用于远场。特点是叶片同步性差,不能实现面积大小变化,而且对于传动部分的装配精度要求比较高。

#### 3.2.2 光圈控制方式

第二种物理遮挡方式是采用照相机“光圈”式机械光栏控制辐射窗口的大小(如图5所示),以达到对模拟器的辐射强度的控制。步进电机可以细分至每转几千步,这可以保证辐射源辐射强度接近于连续变化。利用步进电机的高精度、连续性来控制机械扇叶的开合大小及快慢,用以精确控制模拟器,可以实现要求的红外辐射有效面积和强度调节的功能。

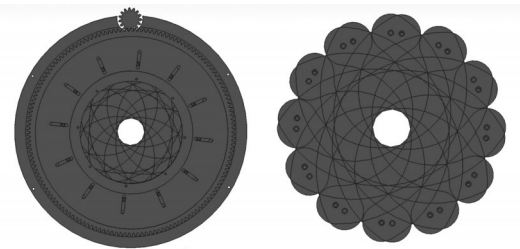


图5 光圈控制方式示意图

光圈控制方式适合的光源是气体放电光源、卤钨灯和黑体,比较适合应用于远场。优点是变化连续可控,可实现辐射面积大小的变化,但是对于叶片的加工精度要求非常高,而且装配与调试比百叶窗的控制方式还要难。由于工作本身的特点所决定,叶片需经常涂覆润滑脂进行保养。

### 3.2.3 调制盘控制方式

第三种物理遮挡方式是采用调制盘方式的可变光栅,如图6b所示。图中在一圆形的光栅上切出一个“月牙”。“月牙”的光栅在辐射源前方以一定的速度转动,遮挡的辐射源的面积产生了连续的变化,也就是辐射强度连续变化的过程。根据要求不同,“月牙”的形状与大小也有不同,相应产生不同的辐射强度变化。

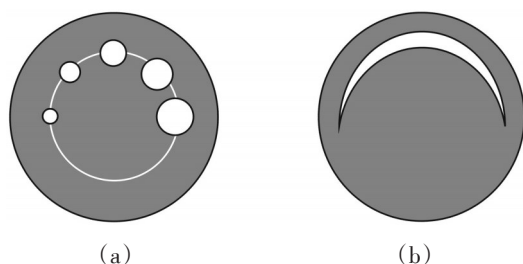


图6 调制盘控制方式示意图

最适合应用于调制盘方式的光源是黑体或者是辐射均匀性较好的光源,在实验室内较为常见,用于调试及测试用。此类方式的模拟源搭建比较容易,成本低,尤其是更换调制盘比较方便灵活,使之在实验室内应用非常适合。

### 3.2.4 幕帘控制方式

第四种物理遮挡方式是采用幕帘方式。如图7所示。相比于前几种机械控制方式要简单一些。无论是卷帘门方式,还是推拉门方式,都会产生连续的变化过程,但由于光源及反光镜的外形,辐射强度的变化过程不是一个线性的变化。

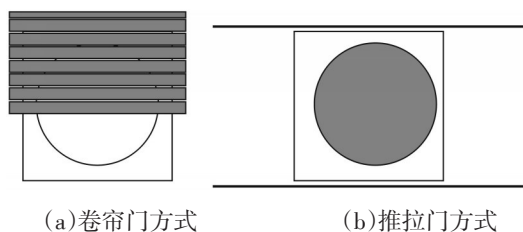


图7 幕帘控制方式

适合幕帘方式的光源是气体放电光源、卤钨灯和黑体,应用于远场。幕帘控制方式原理简单,实现起来比较容易。

## 3.3 电控制方式

前两大类的控制方式中都有电路的控制,但其原理是改变光学束散角或者改变物理遮挡面积才导致辐射强度发生渐变的。而真正的电控制是指由于光源所消耗的电功率增加或减小导致辐射强度的变化。

电控制方式相比于前两种控制方式没有了传动机构,设备的体积、质量有很大的优化,使用电控制方式的前提是光源对电功率的变化反应时间比较短。适用于电控制方式的光源有气体放电灯、卤钨灯、二极管和激光器等。

### 3.3.1 功率调制方式

功率控制方式是最简单直观的控制方式之一,容易计算,控制电路实现比较容易,模拟出的辐射强度的变化线性度最好。气体放电灯及卤钨灯都属于启动快,且随外加电功率的变化辐射强度比较迅速。

#### 3.3.1.1 脉宽调制方式

脉宽调制方式适合于电热光源,比如卤钨灯。控制加在灯两端的占空比可调制电源信号,实现其电功率由小到大的变化,如图8所示,即可实现电光转换后的紫外辐射强度变化过程。

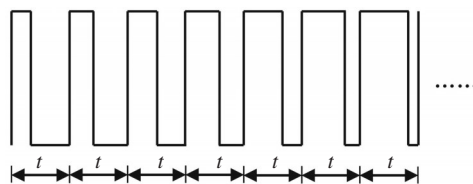


图8 占空比变大的方波信号

对于连续激光器可以采用信号发生器来控制,产生频率及占空比可控的方波信号,用来控制激光器的输出能量变化的过程,对于激光器的控制可以归纳为脉宽调制方式。

#### 3.3.1.2 电流调制方式

此类调制方式适用于氙灯、汞灯、氖灯与卤钨灯,是因为这几种光源随加在光源两端的电功率的增加,其辐射强度也会相应的产生变化,而且反应比较快。另一个原因是这几种光源可以工作在直

流状态。

### 3.3.2 阵列方式

紫外光源比较多的情况下,做成阵列,紫外光源依次点亮,微观上能量虽不连续,仍能达到能量越来越大,宏观上达到能量渐增的效果,得以实现

导弹逼近的过程。因为二极管反应是时间快,所以紫外二极管适合阵列方式<sup>[5]</sup>。

### 3.4 控制方式比较

表3列出了三种控制方式的特点适用光源及应用。

表3 控制方式比较

一级分类	二三级分类	特点	适用光源	应用	
光学控制方式	光学调束方式	能量变化连续、结构相对复杂	激光器、二极管	内场、近场、远场	
机械控制方式	百叶窗控制方式	实现完全遮蔽、叶片同步性差,不能实现面积大小变化	氙灯、卤钨灯、氙灯	远场	
	光圈控制方式	可实现辐射源面积大小的变化、加工装调有一定难度	氙灯、卤钨灯、氙灯	远场	
	调制盘控制方式	操作简单,可实现完全遮蔽、只适用于面源黑体与辐射均匀性好的辐射源	面源黑体、气体放电灯	内场、近场	
	幕帘控制方式	操作简单,可实现完全遮蔽、变化非线性	氙灯、卤钨灯、氙灯	内场、外场	
电控制方式	功率调制方式	脉宽控制方式	控制简单、功耗大	卤钨灯、激光器	内场、近场、远场
		电流控制方式	控制简单、功耗大	氙灯、汞灯、氙灯、卤钨灯	近场、远场
	阵列控制方式		控制简单,低功耗、电光转换效率高、二极管的一致性不好	紫外二极管	近场、远场

## 4 结束语

导弹紫外辐射特性技术的研究是为实现导弹紫外辐射模拟,为紫外探测系统调试、试验、检测服务,而且优点突出:可重复使用、现场编程、节省大量的试验经费、人力资源与时间。文中的各种控制方式也仅是简单的分类,很难囊括所有的紫外模拟器。随着人工紫外辐射源的发展,模拟控制方式也会越来越多,最终模拟的导弹紫外辐射特性效果也会越来越逼真。

### 参考文献

- [1] 许强,金伟其.导弹逼近紫外动态辐射特性分析及物理仿真[J]. 红外与激光工程,2007,36(3):338-341.
- [2] 方超,肖立志,马翔.导弹逼近紫外辐射特征[J]. 舰船电

子对抗,2009,32(6):51-54.

- [3] 许强.军用紫外探测技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:17-27.
- [4] 孙旭,王昌龙.人工紫外辐射源发展现状及研究进展[J]. 光电技术应用,2012,27(6):8-15.
- [5] 赵欢,许文海,芦永军.LED阵列型紫外因化光源系统[J]. 光电子·激光,2007,18(11):1314-1316.
- [6] 娄颖,白廷柱.紫外告警系统探测距离的估算[J]. 光学技术,2005,31(3):473-475.
- [7] 阮宁娟,苏云.国外紫外空间探测器发展综述[J]. 航天返回与遥感,2008,29(3):71-78.
- [8] 于远航,王文生,王海燕,等.基于日盲紫外的导弹模拟系统研究[J]. 光学仪器,2011,33(5):48-51.
- [9] 李炳军,梁永辉.紫外告警技术发展现状[J]. 激光与红外,2007,37(10):1033-1035.
- [10] 张宝妮,王益军,张玉叶.紫外探测技术的新发展[J]. 价值工程,2010(17):3-4.