

# 菲涅尔透镜间接阴影方法在自发光流场光学显示与测量中的应用

崔东明 冯海友

(南京理工大学 南京 210094)

**摘要** 介绍一种自发光流场显示与测量十分有效的方法——菲涅尔透镜间接阴影方法。根据该方法组成的光学显示与测量系统具有成像清晰度高,能排除自发光的影响,并且造价低,易于操作和使用,可广泛应用于弹道学、高速碰撞、燃烧和爆轰等领域。

**关键词** 光学测量 流场显示 间接阴影方法

**中图分类号** TB811 TB872

## 1 引言

伴随着爆炸与冲击的各种物理现象有很多本身自发光。例如爆炸、高速碰撞、枪炮发射、燃烧与爆轰等。这给光学显示与测量的各种方法带来了难以克服的困难。被拍摄物本身强烈地自发光会使照相底片二次曝光,淹没了底片上记录的全部信息。有些在其它领域中非常有效的光学测量方法,在自发光流场的光学显示与测量中都无能为力。菲涅尔透镜组成的光学系统以其自身的特点和独特的光路设计,能够有效地排除自发光的影响,获得清晰的照片,在弹道学、爆炸与冲击领域获得了广泛的应用。

## 2 菲涅尔透镜在自发光流场中的应用

### 2.1 菲涅尔透镜参数的计算及球差分析

菲涅尔透镜是将透镜分成若干个不同曲率的环带,使由轴上物点发出的光通过菲涅尔透镜后近似会聚在同一像点上。利用改变不同环带的曲率半径及环带宽度使之满足光学特性及象差要求。

根据使用要求选定初始参数,然后计算各环带的曲率和球心位置。菲涅尔透镜的初始参数为:通光孔径  $D_0$ 、透镜焦距  $f'$ 、透镜直径  $D$  及厚度  $d$ 。通光孔径  $D_0$  根据实际需要确定,焦距  $f'$  根据物象距(系统允许的安装空间)确定,透镜直径  $D$  及厚度  $d$  则从安装和刚度的要求确定。当初始参数确定后,可根据透镜材料的折射率  $n$  来计算各环带的曲率半径  $R$  及球心  $C$  的位置坐标  $CO_1$ ,具体计算公式为<sup>[1]</sup>:设点光源位于  $A_1$  点处,距第一面距离为  $-L$ ,经菲涅尔透镜成象在  $A'$  处,其象距为  $L'$ ,如图1所示。



球差值是无法校正的,而且其球差值与通光直径的平方成正比。因此,随着通光直径的增大,球差急剧增加。对于菲涅尔透镜来说,其球差主要取决于环带宽度,可以通过改变环带宽度来校正球差。例如,要满足物距为 $-2400$  mm,象距为 $1200$  mm,通光直径为 $240$  mm 的非涅尔透镜光学系统,分别取环带宽度为 $6$ 、 $12$ 、 $24$  mm,计算其边沿环带、中间环带和中心环带的球差值列于表 1。

表 1 不同环带的球差值

单位(unit):mm

Table 1 Spherical aberration of different round arens

$\Delta H$	$R = -426.187$ (边沿环带)				$R = -409.859$ (中间环带)				$R = -401.367$ (中心环带)			
	$H$	$\Delta l'$	$H - \Delta H$	$\Delta l'$	$H$	$\Delta l'$	$H - \Delta H$	$\Delta l'$	$H$	$\Delta l'$	$H - \Delta H$	$\Delta l'$
6	120.0	-0.479	114.0	11.017	72.0	-0.361	66.0	6.426	6	-0.045	0	0
12	120.0	-0.479	108.0	21.900	72.0	-0.361	60.0	12.616	12	-0.181	0	0
24	120.0	-0.479	96.0	41.848	72.0	-0.361	48.0	23.210	24	-0.361	0	0

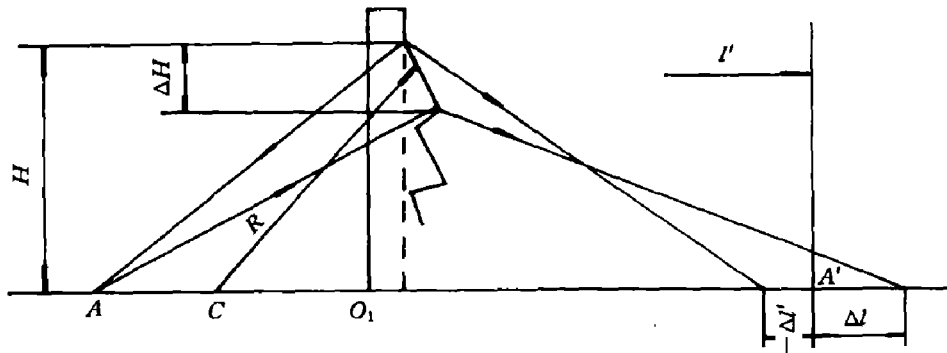


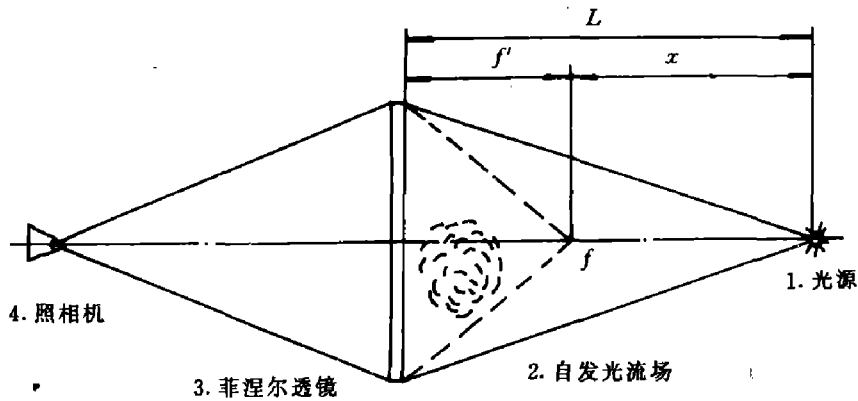
图 2 菲涅尔透镜球差分析计算简图

Fig. 2 Analysis and calculation diagram of spherical aberration in Fresnel lens

从分析计算中可知,菲涅尔透镜的球差与环带宽度有关。环带越宽,球差越大;同时与入射高度有关,越接近中心环带,球差越小。为了减小菲涅尔透镜的球差,一般尽可能地减小环带宽度。环带宽度减小,环带数增加,这给加工带来困难。近些年发展起来的一种密纹菲涅尔透镜,其环带用锥面代替球面,宽度仅 $0.5 \sim 1$ mm。

## 2.2 菲涅尔透镜间接阴影方法

利用菲涅尔透镜进行间接阴影照象,有两种最基本的光路设计:锥形光路和平行光路。为了能显示和测量自发光流场,通常采用锥形光路间接阴影方法。来自火花光源的光通过透镜聚焦在照相机上,而透镜焦距以内的自发光(被摄物体发出的光)大部分通过透镜后发散,只有平行于光轴的极少部分自发光进入照相机。因而,利用上述性质设计的如图 3 所示的菲涅尔透镜间接阴影光路,能有效地消除自发光的影响,获得清晰的图片。



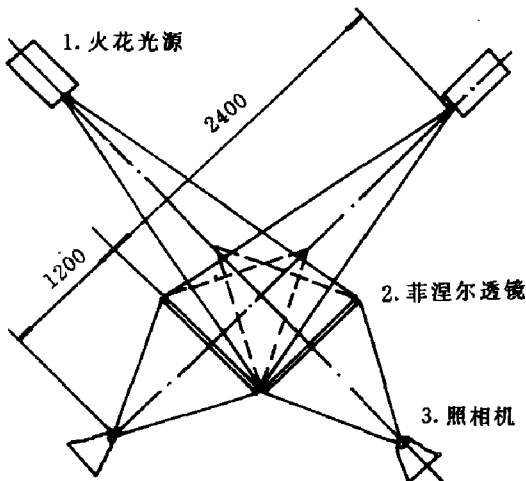
1. Light source; 2. Self-luminous flow fields; 3. Fresnel-lens; 4. camera

图3 菲涅尔透镜间接阴影锥形光路

Fig. 3 Indirect shadowgraphic taper optical path with Fresnel-lens

### 2.3 菲涅尔透镜间接阴影正交光路设计

脱壳穿甲弹出口后的飞行姿态和脱壳过程及其所受到的干扰和影响是中间弹道理论和试验研究的重要内容。众所周知,伴随火炮发射,炮口区产生强烈炮口焰,且持续时间比光源闪光时间长得多,造成底片多次曝光,淹没了照片上所记录的全部信息。因此,采用常规的显示测量方法几乎得不到有用的信息。国外通常在弹道靶道的炮口区都采用脉冲X光摄影方法,利用X光的穿透性,在经过遮挡的底片上记录脱壳穿甲弹的飞行姿态<sup>[2]</sup>。脉冲X光摄影方法除了图象清晰度不高外,主要问题是无法记录炮口流场的信息。采用菲涅尔透镜间接阴影所设计的正交光路(如图4所示)能够有效地消除炮口焰的影响,获得清晰的照片和流场结构<sup>[3]</sup>,实现对脱壳穿甲弹飞行姿态的定量测量和脱壳全过程显示。



1. Spark light source; 2. Fresnel-lens; 3. camera

图4 菲涅尔透镜间接阴影正交光路

Fig. 4 The indirect shadowgraphic orthogonal optical path with Fresnel-lens

根据拍摄对象,取菲涅尔透镜的焦距为  $f = 800 \text{ mm}$ ,  $L = -2400 \text{ mm}$ , 求出  $L' = 1200 \text{ mm}$ 。菲涅尔透镜的通光直径为  $480 \text{ mm}$ , 用  $10 \text{ mm}$  厚的航空有机玻璃制成。

利用上述设计的正交光路建成了我国第一条中间弹道靶道<sup>[4]</sup>, 所拍摄的高速脱壳穿甲弹炮口区飞行姿态照片如图5所示。

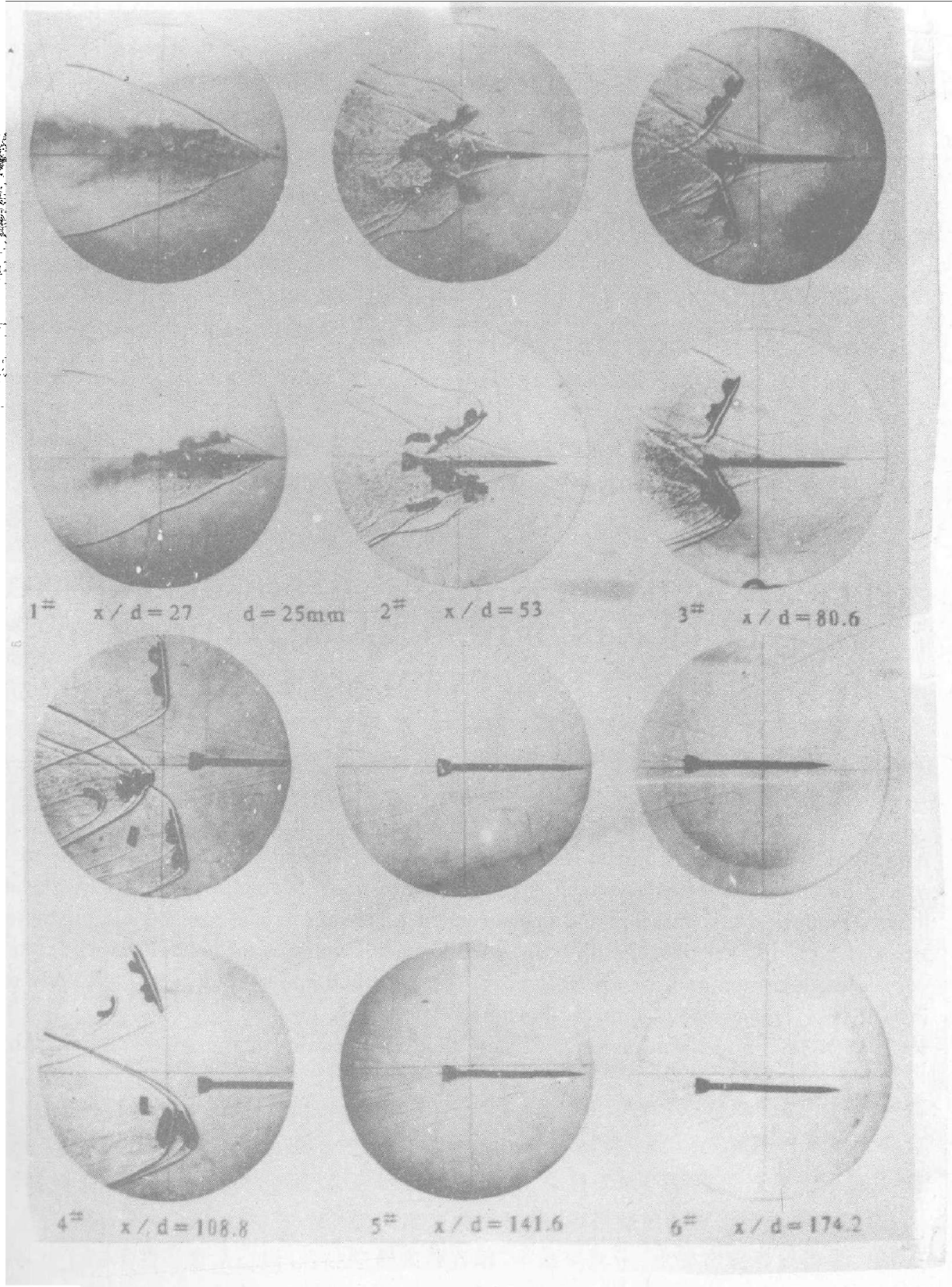


图 5 强炮口焰下拍摄的炮口区脱壳穿甲弹飞行姿态与脱壳过程的正交照片

Fig. 5 The orthogonal photos of the sabot discard process and flight attitude of a sabot discarding projectile in muzzle

### 3 结 束 语

自发光流场的光学显示与测量是光学显示与测量技术中的一个难题,又是研究爆炸与冲击现象经常遇到的一个问题。作者介绍的菲涅尔透镜间接阴影方法,已经多次使用,并将这些方法用于炮口流场、高速脱壳穿甲弹近炮口区显示与定量测量等领域,取得了满意的结果,是一种值得推广的方法。但菲涅尔透镜的光学质量比光学透镜低,对于要求比较高的流场显示与测量,菲涅尔透镜的使用就受到一定的限制。

#### 参 考 文 献

- 1 袁旭沧主编. 光学设计. 北京:北京理工大学出版社,1988. 255
- 2 Schmidt E M, Sheer D D. Aerodynamic Interference during Sabot Discard. *Journal of Spacecraft and Rocket*, 1978,15:162~167
- 3 李鸿志,崔东明,何正求,等. 尾翼脱壳穿甲弹近炮口区飞行姿态的显示. *兵工学报*,1992,(1):66~69
- 4 崔东明,李鸿志,管雪元,等. IB-12 中间弹道靶道及其应用. *弹道学报*,1991,(1):11~18

## APPLICATION OF THE INDIRECT SHADOWGRAPH WITH FRESNEL-LENS IN OPTICAL VISUALIZATION AND MEASUREMENT OF SELF-LUMINOUS FLOW FIELDS

Cui Dongming, Feng Haiyou

(*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094*)

**ABSTRACT** This paper introduces a method of optical visualization and measurement of self-luminous flow fields, which is the method of indirect shadowgraph with Fresnel-lens. The optical visualization and measurement according to this method has characteristics of high distinct photograph, can get rid of self-luminous influence, and the cost is very low, operation and use are very easy. This method and system can extensively use in Ballistics, hypervelocity impact, burn and detonation.

**KEY WORDS** optical measurement, flow field visualization, high-speed photograph