

·测试、试验与仿真·

红外烟幕干扰性能动态测试方法研究

周利存, 马丽娟

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要:对于红外成像制导导弹, 红外烟幕是一种效费比较高的干扰手段。为实现有效干扰, 红外烟幕的干扰性能必须满足一定的要求。文中分析了红外烟幕的干扰有效性, 对烟幕的透过率、消光系数、悬浮性能、分散性能、流动性等动态测试方法进行了分析, 并给出了一些实例, 为红外烟幕的测试和评估提供技术支持。

关键词:红外烟幕; 干扰性能; 测试方法

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0055-06

Research on Dynamic Testing Method of Infrared Smoke Jamming Performance

ZHOU Li-cun, MA Li-juan

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: For infrared imaging guidance missile, infrared smoke is a kind of jamming method with higher efficiency cost ratio. For realizing effective jamming, the jamming performances of the infrared smoke must meet the requirements. The jamming effectiveness of the infrared smoke is analyzed. The dynamic testing methods for transmittance, extinction coefficient, levitation performance, dispersion and fluidity are analyzed. Some examples are presented, which can provide technical supports for infrared smoke test and evaluation.

Key words: infrared smoke; jamming performance; testing method

红外成像制导技术诞生于20世纪70年代, 经过几十年的发展, 取得了长足的进展, 为精确制导武器打击精度的有效提升提供了手段, 成为当今世界精确制导技术发展的主要方向之一^[1-2]。红外烟幕作为一种有效的光电对抗手段, 通过衰减被保护目标的红外辐射来干扰对方的侦察、跟踪及精确打击, 已成为对付红外制导武器的重要手段^[3]。目前, 主要在野外条件下进行干扰装备(系统)最终干扰性能的测试评价^[4]。针对野外条件下烟幕干扰性能测试复杂、成本高, 且易受气象条件影响等难题, 提出了利用内场准动态测试红外烟剂的消光系数、悬浮时间、流动性、分散性等参数, 表征红外烟幕的干扰性能, 为提

升红外烟幕的作战效能提供依据。

1 红外烟幕对抗红外成像制导系统的机理分析

红外热成像制导系统通过探测目标的热辐射来发现、识别和跟踪目标。红外成像制导导弹的典型工作过程为弹上探测器获取目标区域场景, 摄取目标及背景的红外图像并进行预处理, 得到数字化目标图像。经图像处理 and 图像识别后, 区分出目标及背景信息, 识别出要攻击的目标并抑制噪声信号。跟踪处理器形成的跟踪窗口的中心按预定的

收稿日期: 2018-09-04

作者简介: 周利存(1985-), 男, 山西大同人, 工学硕士, 主要研究方向为光电技术; 马丽娟(1988-), 女, 辽宁朝阳人, 理学硕士, 主要研究方向为光电技术。

跟踪方式跟踪目标图像,并把误差信号送到探测器跟踪系统,控制探测器继续瞄准目标。同时,向导弹的控制系统发出导引指令信息,控制导弹的飞行姿态,使导弹飞向选定的目标。红外热成像制导系统正常工作必须具备下列四个条件:

(1)适合成像探测器接收足够强的红外辐射,即入射的辐射波长应与探测器的工作波长相匹配,且入射的辐射能量要足够强;

(2)目标和背景之间应有一定的辐射对比度;

(3)待观察的目标应有足够的宽度;

(4)目标及背景在导引头视场停留足够的时间。

由此可见,如果能够改变目标和背景的辐射特性,减少两者之间的对比度,或者大幅度地衰减进入导引头红外成像探测器系统的辐射强度,都可以使红外成像导引头系统受到干扰。烟幕是由许多固体的和液体的微粒悬浮于大气中所形成的气溶胶体系,布设在目标和红外成像导引头之间,降低目标的红外辐射特性,减少目标和背景的辐射对比度,使导引头无法探测、识别、跟踪目标。

2 红外烟幕干扰性能表征参数研究

2.1 红外烟幕干扰有效性研究

(1)对红外成像导引头探测能力的干扰

红外导引头的探测能力主要受大气噪声和光学系统噪声的限制,可以利用信噪比表征红外导引头系统的探测能力,当信噪比大于某个数值时,导引头才能可靠地探测和跟踪目标^[6]。信噪比的定义如下

$$S/N = \frac{E_T}{NEFD} \quad (1)$$

式中, S/N 为信噪比; $NEFD$ 为噪声等效通量密度; E_T 为目标在红外导引头光学系统口径上的光谱辐照度。红外成像导引头远距离探测目标时,假设目标在导引头视场内为不可分辨的点源目标,则目标在导引头光学孔径上产生的光谱辐射照度 E_T 为

$$E_T = \frac{I \times T_a}{R^2} \quad (2)$$

式中, T_a 为大气光谱透过率; R 为目标至红外导引头的距离; I 为目标的红外辐射强度。当在目标与红外导引头之间布设烟幕后,目标红外辐射强度的变化符合 Lambert-Beer 定律,有下式

$$I = I_0 \exp[-\alpha C_m L] \quad (3)$$

式中, α 为烟剂材料的消光系数; C_m 为烟幕浓度; L 为目标红外辐射在烟幕中的传输距离(光程)。

通过分析,烟幕对红外成像导引头探测能力的干扰主要与烟剂材料的消光系数、烟幕浓度、目标红外辐射在烟幕中的传输距离等有关。

(2)对红外成像导引头识别能力的干扰

红外成像导引头通过提取目标的物理特征进行目标识别,而烟幕的存在直接影响目标的特征提取及特征选择过程。在目标与导引头之间布设烟幕后,改变了目标的图像特征,如图像的灰度值。进行目标特征提取时首先要进行图像分割,其中一种简单有效的方法是直方图分割中的最大距离法,在直方图的取值范围内,用某一灰度级将直方图分为左右两部分,使得这两部分的灰度均值与总体的灰度均值相差最大,并取该灰度级为分割门限对图像中的像点进行分割,图像中凡是灰度值小于分割门限的像点,均认为是背景中的点,加以滤除;反之则认为是潜在目标区域中的点,予以保留。当有烟幕存在时,目标及背景图像的灰度值整体减小,尤其当烟幕的面积足够大,烟幕的透过率低到一定程度时,目标与背景的灰度值趋于一致,此时根据上述原则就无法分割图像,进而无法完成目标的特征提取及匹配,实现对红外成像导引头识别能力的干扰^[6]。根据 Lambert-Beer 定律,则有

$$\tau = e^{-\alpha C_m L} \quad (4)$$

式中, α 为烟幕粒子的消光系数; C_m 为烟幕浓度; L 为目标红外辐射在烟幕中的传输距离(光程)。

通过分析,烟幕对红外成像导引头识别能力的干扰主要与烟幕面积、烟剂材料的消光系数、烟幕浓度、目标红外辐射在烟幕中的传输距离等有关。

(3)对红外成像导弹跟踪能力的干扰

红外成像导弹采用距心跟踪模式时,导弹所跟踪的目标距心的位置与目标图像区域的辐射能量有关。如果改变导引头视场内的目标距心位置,使其发生偏转,即可实现有效干扰。当烟幕存在时,对目标的辐射能量产生严重的不均匀变化,使得导引头视场内目标的距心位置发生变化,引起红外成像导弹的系统跟踪误差。

红外成像导弹对目标进行相关跟踪的前提,是

在实时图像矩阵中找出预先获取的目标基准图像矩阵最相似的子矩阵,改变红外导引头视场内目标的图像匹配特征即可实现有效干扰。当烟幕存在时,在目标与红外导引头之间形成具有一定持续时间、一定遮蔽面积的烟幕云团,破坏了导引头跟踪视场内目标的红外辐射分布,甚至将目标的红外辐射湮没,使导引头所观察到的目标大小、方位、辐射强度等发生变化,尤其当烟幕发生不均匀变化时,烟幕的扰动引起相关跟踪所用的匹配模板与匹配图像的差异随机变化,加大了红外成像导弹的系统跟踪误差,从而达到有效干扰目的。

2.2 红外烟幕干扰性能表征参数

通过分析红外成像导弹的工作过程,研究烟幕对红外成像导弹的有效性干扰原理,红外烟幕的作战效能与烟幕的施放时机、烟幕的透过率、烟幕面积、干扰持续时间等有关。在烟幕施放载体相同的情况下,烟幕的作战效能主要取决于烟剂材料的性能。烟剂材料的选择应重点把握的原则^[7]:一是衰减性能最好原则;二是悬浮性能最好原则,采用机械分散方式成烟时烟剂材料还需要优异的流动性。

(1)衰减性能。烟剂材料的衰减性能越好,则成烟后对目标的红外辐射能量衰减越强,如果面积足够大,目标和背景在导引头视场内可实现融合,难以探测、识别出目标。烟幕对红外辐射的衰减是烟剂材料微粒对入射的红外辐射产生吸收和散射作用,红外能量遭到衰减。红外消光系数是评定烟幕对红外衰减性能的基本依据,它的数值愈大,衰减红外辐射效果愈佳^[8]。

(2)悬浮性能。烟剂材料的悬浮性能好,表现为空中悬浮时间长,且稳定性好,即抗风能力强。烟剂材料的悬浮时间越长,则成烟后可长时间停留在目标上方区域,持续降低或改变目标的红外辐射特征,使导引头难以发现目标或持续跟踪目标;烟剂材料的抗风能力越强,烟幕使用环境适应性越强。影响烟剂材料悬浮性能的主要因素包括粒子的形貌、密度、分散性等。

(3)流动性能。烟剂材料的流动性能主要影响烟剂材料在输料管路或通道内的输送效率,进而影响成烟效率。一般而言,超细粉体的流动性取决于粉体内部颗粒间的摩擦性质和内聚性质。

对于微米级的烟剂材料,粉体流动性是颗粒间摩擦性质和内聚性质共同作用的结果,而内聚性质起主导作用。

3 红外烟幕干扰性能准动态测试方法

3.1 红外消光系数测试

红外消光系数的测试原理是 Lambert-Beer 定律,首先测出烟幕的透过率,然后根据烟幕的浓度、光程得到烟幕的质量消光系数。基于热像仪利用双黑体电平差值法测试烟幕的透过率^[9],在内场烟箱中采用专用喷撒装置喷撒烟幕材料形成烟幕,利用红外热像仪测试烟幕的衰减率,测试系统布局图如图1所示。

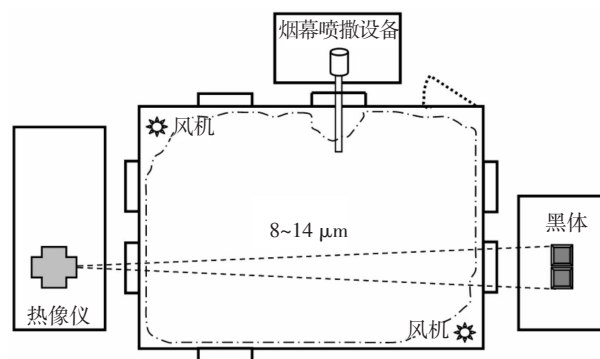


图1 烟箱测试系统布局图

在热像仪视场内布设两个黑体,一个黑体设置为高温黑体,另一个设置为低温黑体。烟幕施放前,热像仪采集的高温黑体和背景的电平值为 DL_{m1} , 低温黑体和背景的电平值为 DL_{m2} ; 烟幕施放后,热像仪采集的高温黑体、背景以及烟幕的电平值为 DL_{c1} , 热像仪采集的低温黑体、背景以及烟幕的电平值为 DL_{c2} 。

烟幕的透过率 τ 定义为

$$\tau = \frac{DL_{c1} - DL_{c2}}{DL_{m1} - DL_{m2}} \quad (5)$$

根据式(4),红外消光系数为

$$\alpha = \frac{1}{C_m L} \ln \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

因此,根据烟幕的透过率、质量浓度和光程,可以计算烟剂材料的平均质量消光系数。

采用双黑体电平差值法测得的红铜粉在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的透过率曲线如图2所示。

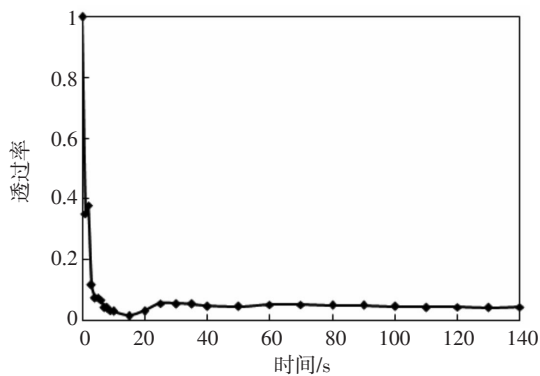


图2 红光铜粉的红外透过率曲线(8~14 μm波段)

根据质量浓度、光程,计算得到某型红光铜粉在8~14 μm波段的平均质量消光系数为 $0.78 \text{ m}^2/\text{g}$ 。南京理工大学刘国生等人测得的红光铜粉的质量消光系数为 $0.75 \text{ m}^2/\text{g}^{[10]}$,测试结果较一致,表明该方法可以用于烟剂材料红外消光系数的测试。

在烟箱中测试红外消光系数时,为保证测试的准确性,需要在相同浓度的条件下进行,由于烟剂材料喷撒的方法可能造成箱内浓度的不一致,因此需要多次测量,且测试间隔时间和测试次数要合理确定。

3.2 悬浮性能测试

(1) 悬浮时间测试

悬浮时间是指烟幕有效干扰的持续时间,即烟幕的透过率小于一定值的持续时间。悬浮时间测试可以通过烟箱测试得到的烟幕透过率曲线获得。烟幕的悬浮时间定义为

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (7)$$

式中, Δt 为烟幕的悬浮时间; Δt_2 为烟幕的透过率降低至不满足要求的时刻; t_1 为烟幕的透过率达到要求的时刻。烟箱测得的不同样品的透过率曲线如图3所示。

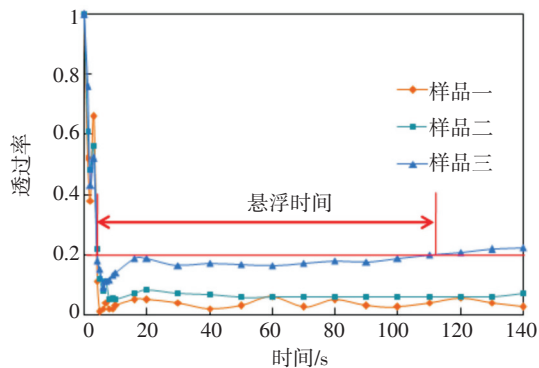


图3 不同样品的红外透过率曲线(8~14 μm波段)

测试的样品一、样品二为轻质型烟剂材料,在烟箱中悬浮时间较长,可达135 s(以透过率小于0.2考核),样品三为常规烟剂采集材料,在烟箱中悬浮时间约105 s(以透过率小于0.2考核)。同时,从测试曲线可以看出,样品一成烟后稳定性较差,受气流影响显著。通过试验测试,烟剂材料质轻,可有效提高烟幕的悬浮时间,但同时需要兼顾烟幕的稳定性。

(2) 分散性测试

分散性是指粉体在空气中分散的难易程度,以分散度来表征,体现烟剂材料的成烟性能。由于烟剂材料的粒子尺寸处于微米级,在空气中下落时容易分散。分散性测试的原理是将一定量的烟剂材料从某一高度落下后,测量沉降至接料器的试样质量,然后计算得到分散度。烟剂材料的分散度 D 定义为^[11]

$$D = \frac{m - m'}{m} \times 100\% \quad (8)$$

式中, m 为烟剂材料的试验总质量; m' 为接料盘收集的烟剂材料质量。分散度与材料的分散性、漂浮性和飞溅性有关。

在实验室内可以采用简单的方法判定烟剂材料的分散性能。采用天平称取一定量的样品(一般为20~30 g),通过漏斗将试验样品从一定高度处施放,测试底部接料盘的样品质量,然后计算得到烟剂材料的分散度。试验装置如图4所示。

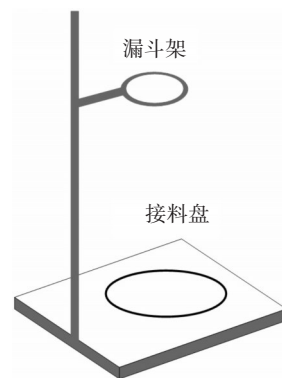


图4 烟剂材料分散度测试试验装置示意图

试验时,将漏斗放置在漏斗架上,漏斗正下方放置接料盘,将称取的试验样品通过漏斗进行施放,然后测试接料盘内样品的质量,计算得到试验样品的分散度。利用该方法测试得到分散剂添加比例与烟剂材料分散度的曲线,如图5所示。

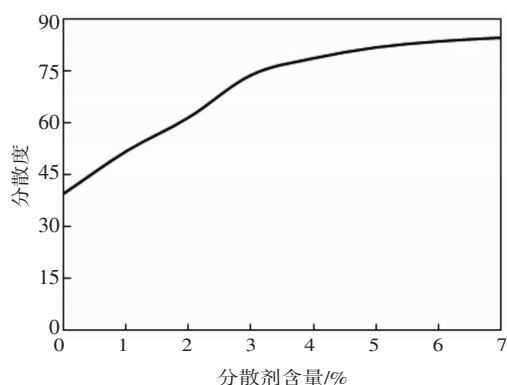


图5 烟剂材料分散度测试曲线

烟剂材料的分散性也可以使用粉末物理特性测试仪器获得,粉末物理特性测试仪器测试分散度的原理是将10g试样从一定高度落下后,测量接料盘外试样占试样总量的百分数。

3.3 流动性测试

(1)质量流率测定方法(通过时间测定方法)

质量流率法适用于可自由通过漏斗的粉剂材料测试,即流动性优异的材料,如金属化的烟剂材料。该方法参考了GB/T1482-2010(用标准漏斗法测定金属粉末的流动性)的测试原理。

测试原理是通过测试50g的烟剂材料流过标准尺寸漏斗孔所需的时间。试验所需仪器设备为标准漏斗、漏斗支架、天平、秒表等,试验时将测试样品放入漏斗,用手指堵住漏斗出口,确保试验样品充满漏斗底部,当打开漏斗孔时,启动秒表,当漏斗中的样品全部流尽,终止秒表,记录样品通过时间。为保证测试的准确性,至少测试三次,然后取平均值,得到试验样品的通过时间。

(2)通过率测定方法

对于流动性能一般的烟剂材料,由于无法全部自由通过漏斗,可根据通过标准尺寸漏斗孔的质量与试验样品总质量的比值来测定烟剂材料的流动性。测试原理是把一定时间内通过漏斗的样品质量与样品总质量相比来判定粉体流动性的方法。烟剂材料的通过率 T 定义为

$$T = \frac{m''}{m} \times 100\% \quad (9)$$

式中, m 为烟剂材料的试验总质量; m'' 为通过漏斗的样品质量。测试时,一般样品量选取30g,且只有烟剂材料的通过量和滞留量之和大于总质量的95%时,测试数据才有效。图6为烟剂材料通过率

测试曲线。

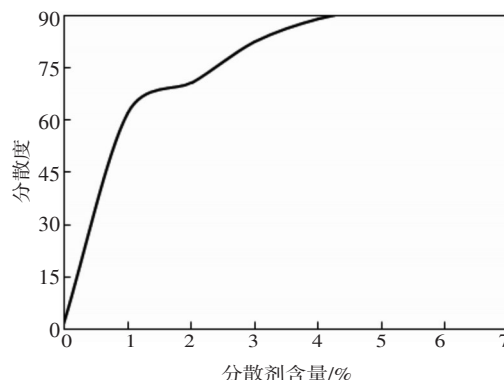


图6 烟剂材料通过率测试曲线

(3)综合指数判定法

基于卡尔指数法,通过测试材料样品的松装密度、振实密度、休止角、平板角等参数,然后对休止角、平板角、压缩度等参数按指定方式加权求和,得到表征材料样品的流动性指数。其中,压缩度定义为

$$C = \frac{P-A}{P} \times 100\% \quad (10)$$

式中, C 为压缩度; A 为松装密度; P 为振实密度。

流动性指数定义为:流动性指数=休止角指数+平板角指数+压缩度指数

(4)流动函数测定方法

粉体流动函数是一个测量粉体从零剪切力下保持的强度到一个指定的应力水平下发生固结的强度。测试原理为驱动一个环形剪切单元的压缩盖垂直向下进入粉体样品内,粉体样品具有确定的体积和质量,通过对粉体施加压实应力,环形剪切单元在特定的转速下旋转,测量粉体对抗的扭矩力。图7为无机盐粉剂材料的流动性函数曲线。

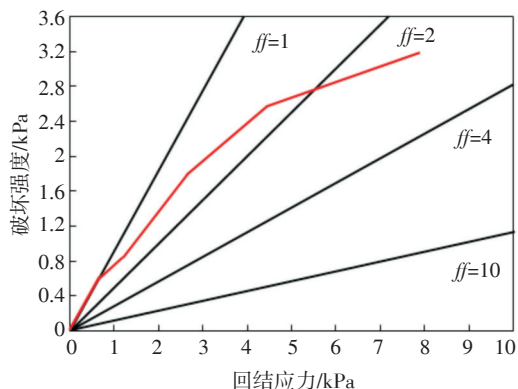


图7 无机盐粉剂材料流动性函数曲线

从图中可以看出,无机盐粉剂材料的流动性较差,作为烟剂材料使用时需要进行表面处理,改善其流动性能。图7中, ff 为流动因子,流动因子越大,则粉体的流动性越好。当 $ff=1$,表示粉体不流动;当 $1 < ff < 2$,表示粉体很粘结;当 $2 < ff < 4$,表示粉体粘结;当 $4 < ff < 10$,表示粉体容易流动;当 $10 < ff$,表示粉体自由流动。

4 结 论

烟幕干扰对抗形式简单,使用方式灵活,干扰设备通用性强、价格低廉,便于大量装备使用,是对抗精确制导武器的重要手段。在目标和红外成像导弹之间布设烟幕,通过降低目标的红外辐射特性,减少目标和背景的辐射对比度,使红外导引头无法探测、识别、跟踪目标。通过开展烟幕的干扰机理及干扰有效性研究,选择合适的烟幕施放时机和布设载体,筛选红外消光能力、悬浮性能、分散性能以及流动性能优异的烟幕材料,可大幅度提升红外烟幕的作战效能。

参考文献

[1] 罗海波,史泽林.红外成像制导技术发展现状与展望[J].

- 制导与引信,2010,31(1):1-3.
- [2] 陈玉波,陈乐,曲长征,等.红外制导技术在精确打击武器中的应用[J]. 红外与激光工程,2007(36):35-38.
- [3] 时家明,路远.红外对抗原理[M]. 北京:解放军出版社,2002.
- [4] 刘宝刚.红外干扰弹干扰性能参数及测试方法[J]. 红外技术,2006,28(11):648-650.
- [5] 张晓宏,龚文平.红外导引头测量目标信号的数学仿真[C]//99全国仿真技术学术会议论文集,1999:57-61.
- [6] 邱继进,胡红波,梅建庭.烟幕对红外成像型制导武器的干扰研究[J]. 光电技术应用,2005,20(3):28-31.
- [7] 陈兵,李澄俊,徐庆红.红外烟幕消光性能及选材途径分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2004,5(6):58-61.
- [8] 阎俊宏,高磊,闵江.烟幕红外消光系数的热像仪测试[J]. 光电技术应用,2012,27(2):79-81.
- [9] 周利存,李斌.基于红外成像探测器的烟幕遮蔽率测试方法研究[J]. 光电技术应用,2018,33(3):70-73.
- [10] 刘国生,关华,吕惠平,等.微米铜粉对红外、10.6 μm 激光的衰减性能研究[J]. 红外技术,2009,39(6):598-601.
- [11] 周遵宁,潘功配,关华,等.纳米 SiO_2 对复合碳粉发烟剂性能的影响[J]. 含能材料,2004,12(2):113-115.

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。

《光电技术应用》期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等,现向有关专业技术人员征集相关优秀稿件。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号;邮政编码:300308;联系电话:022-59067938;联系人:朱编辑 牛编辑;投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部