

红外照射条件下目标和背景的亮度融合

唐 聪^{1,2,3}, 殷松峰^{1,2,3}, 凌永顺^{1,2,3}, 王一程^{1,2,3}, 杨 星^{1,2,3}, 徐 凯^{1,2,3}

- (1. 电子工程学院, 安徽 合肥 230037;
2. 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 从目标和背景亮度对比度的角度出发, 构建了红外照射条件下目标和背景的亮度融合模型, 得出了亮度融合的条件。针对红外探测中不同组合的目标和背景, 探究了红外照射条件下亮度融合的适用对象, 并进行了仿真验证。结果发现: 通过红外照射的方式实现目标与背景亮度融合的方法, 适用于与背景相比具有高发射率的亮目标和低发射率的暗目标, 特别地, 对于温度与背景相等的目标, 实现某波段上与背景亮度融合的辐射照度等于温度为 $T(T=T_t=T_0)$ 的黑体在该波段上的辐射出射度。最后, 通过红外照射系统照射不同组合的目标和背景(亮目标和暗目标), 一定程度上实现了中红外波段目标和背景的亮度融合, 验证了理论的有效性。

关键词: 亮度融合; 红外照射; 亮度对比度; 融合条件

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-3883-06

Luminance fusion of target and background with infrared irradiation

Tang Cong^{1,2,3}, Yin Songfeng^{1,2,3}, Ling Yongshun^{1,2,3}, Wang Yicheng^{1,2,3}, Yang Xing^{1,2,3}, Xu Kai^{1,2,3}

- (1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;
2. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei 230037, China;
3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: On the basis of the luminance contrast between target and background, the model of luminance fusion under the condition of infrared irradiation was established and then the condition of luminance fusion was obtained. According to different combinations of target and background in infrared detection, the applicable objects under the condition of infrared irradiation were studied and the conclusion was verified through the simulation of different combinations. The results show that the method of realizing the luminance fusion by infrared irradiation is suitable for bright objects with higher emissivity and dark objects with lower emissivity than background. Especially, when target's temperature is equal to background's, the infrared radiation realizing the luminance fusion on one band is equal to the radiation remittance of blackbody with the same temperature on the same band. In the end, the experiments were

收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-05-20

基金项目: 安徽省自然科学基金(1408085QF131)

作者简介: 唐聪(1989-), 男, 硕士生, 主要从事红外定向照射技术等方面的研究。Email: tangcong_eei@163.com

导师简介: 凌永顺(1937-), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电工程等方面的研究。Email: lys@126.com

carried out with real infrared irradiating system irradiating different combinations of target and background, including bright target and dark target. Experimental results show that the luminance fusion of target and background has been realized on the middle infrared band to a certain extent, illustrating the effectiveness of the proposed method.

Key words: luminance fusion; infrared irradiation; luminance contrast; fusion condition

0 引言

红外制导武器的发现、识别和目标跟踪过程中,一般利用的是目标和周围环境红外辐射的亮度对比度特征^[1-2]。通过采用红外光源照射目标和背景区域,能够有效改变目标和周围环境红外辐射的亮度对比度特征,在一定程度上实现目标和背景的亮度融合,达到对目标红外隐身的目的,从而对目标的红外成像探测和跟踪造成干扰^[3-4]。文中将重点分析在红外照射条件下实现目标与背景亮度融合的条件,讨论照射条件下亮度融合的适用对象,并开展相应的实验,验证该方法的可行性,从而为红外隐身、红外干扰等技术的研究提供参考,具有重要的理论和实用价值。

1 照射条件下目标与背景的亮度融合模型

1.1 照射条件下目标和背景的亮度对比度

对于目标和背景亮度对比度的定义,存在多种定义方法^[4-6],为便于下面分析照射对亮度对比度的影响时在数值上有一个直观的概念,文中采用参考文献[4]中的定义,对目标和背景的亮度对比度作归一化处理,将目标和背景的亮度差与两者亮度的最大值的比值作为目标和背景的亮度对比度:

$$C = |L_t - L_b| / \max(L_t, L_b) \quad (1)$$

式中: L_t 和 L_b 分别为目标和背景的亮度。

将目标和背景视为朗伯辐射体,则目标和背景的亮度对比度:

$$C = |M_t - M_b| / \max(M_t, M_b) \quad (2)$$

式中: M_t 和 M_b 分别为目标和背景的辐射出射度。

$$C_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\left| \left[(1-\varepsilon_t) \cdot E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_t} d\lambda \right] - \left[(1-\varepsilon_b) E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_b} d\lambda \right] \right|}{\max \left(\left[(1-\varepsilon_t) \cdot E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_t} d\lambda \right], \left[(1-\varepsilon_b) E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_b} d\lambda \right] \right)} \quad (5)$$

可以看出,目标和背景在照射波段上的亮度对

若采用红外光源对目标和背景进行照射,目标和背景的红外辐射特征将发生改变,使得目标和背景的亮度对比度发生变化。照射模型如图 1 所示。

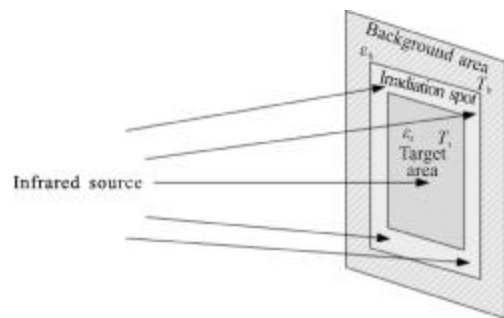


图 1 红外照射条件下目标和背景的照射模型

Fig.1 Irradiation model under the condition of infrared irradiation

假定红外光源在目标和背景上进行等照度的均匀照射,则目标和背景在照射波段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)上的有效辐射出射度分别为:

$$\begin{aligned} M_{t(\lambda_1-\lambda_2)} &= (1-\varepsilon_t) E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_t} d\lambda \\ M_{b(\lambda_1-\lambda_2)} &= (1-\varepsilon_b) E_{\lambda_1-\lambda_2} + \varepsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_b} d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ε_t 和 ε_b 分别为目标和背景的发射率; $E_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为照射到目标和背景上的照度; $M_{\lambda, T}$ 为温度 T 时的黑体光谱辐射出射度^[7]

$$M_{\lambda, T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (4)$$

式中: $c_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 / 15 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; $c_2 = hc/K_B = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

由公式(2)和公式(3)可知,红外照射条件下目标和背景的亮度对比度为:

对比度与目标的温度 T_t 、发射率 ε_t 、背景的温度 T_b 、发

射率 ϵ_b 以及光源在目标和背景上的照度 $E_{\lambda_1-\lambda_2}$ 有关。

1.2 照射条件下目标和背景亮度融合的条件

仿真温度为 300 K 的朗伯型的目标($\epsilon_t=0.9$)和背景($\epsilon_b=0.4$)在不同照度(3~5 μm 波段)条件下的表现亮度,如图 2 所示。

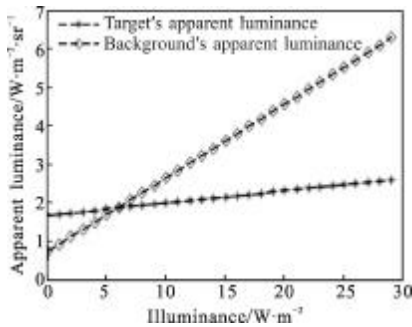


图 2 照射条件下目标和背景的表现亮度曲线

Fig.2 Apparent luminance curves under the condition of infrared irradiation

从图 2 中可以看出,目标表现亮度随着照度增大的增大速率与背景表现亮度的增大速率存在差异,从而使得目标和背景的表现亮度差随着照度变化而变化。在某一照度条件下,目标和背景的表现亮度相等,此时,目标和背景的表现亮度对比度为 0。因此,实现照射条件下目标和背景的亮度融合的关键在于选用合适的照度对目标和背景进行照射。

为使得目标和背景实现亮度融合(对比度 $C_{\lambda_1-\lambda_2}=0$),根据公式(5),红外照射条件下目标和背景上的照度应为:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\epsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_t} d\lambda - \epsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_b} d\lambda}{\epsilon_t - \epsilon_b} \quad (6)$$

由于红外照射的照度只能是正值,因此, $E_{\lambda_1-\lambda_2} > 0$ 。

根据公式(6),可以得到:

$$(\epsilon_t - \epsilon_b) \left(\epsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_t} d\lambda - \epsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_b} d\lambda \right) > 0 \quad (7)$$

公式(7)则为红外照射条件下实现某一波段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)上目标和背景亮度融合时目标和背景应满足的条件。可以发现,目标和背景能否实现亮度融合最终是由目标和背景的发射率及温度之间的关系决定的。

2 照射条件下目标和背景亮度融合的运用对象及仿真

2.1 红外探测中目标和背景的分类

在红外探测的过程中,目标和背景的红外辐射

特性主要由自身的温度和发射率决定。通常情况下,目标和背景的温度既可以相同也可以不同,但发射率往往不同,因为两者的材料一般不同。因此,红外探测中,目标与背景在温度和发射率上存在以下 6 种组合,如表 1 所示。

表 1 不同温度和发射率条件下的目标和背景组合
Tab.1 Combinations of target and background with different temperatures and emissivities

	$T_t > T_b$	$T_t = T_b$	$T_t < T_b$
$\epsilon_t > \epsilon_b$	Combination 1	Combination 2	Combination 3
$\epsilon_t < \epsilon_b$	Combination 4	Combination 5	Combination 6

组合 1、4 针对的是热目标,比如经过长时间机动的目标,此时目标的温度高于背景的温度;组合 2、5 针对的是零温差目标,比如无机动、静止条件下的目标,此时目标和背景的温度相等;组合 3、6 针对的是冷目标,比如夜间条件下的坦克,同一照度条件下的大比热容目标和小比热容背景,此时目标的温度低于背景的温度。上述 6 种组合根据探测器的响应又可以分为两类:(1) 亮目标,目标的亮度大于背景的亮度;(2) 暗目标,目标的亮度小于背景的亮度。

2.2 照射条件下亮度融合的运用对象

根据 1.2 节中得到的照射条件下目标和背景亮度融合的条件,在上述 6 种组合中探究满足公式(7)的目标和背景的组合。

由公式(4)可知,黑体光谱辐射出射度是温度 T 的单调递增函数,因此,可以假设:

$$M_{\lambda,T_t} = k M_{\lambda,T_b} \quad (8)$$

其中, $k > 1$ 时, $T_t > T_b$, 代表正温差目标; $k = 1$ 时, $T_t = T_b$, 代表 0 温差目标; $k < 1$ 时, $T_t < T_b$, 代表负温差目标。

公式(7)中,当 $\epsilon_t > \epsilon_b$ 时,

$$\epsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_t} d\lambda - \epsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_b} d\lambda > 0 \quad (9)$$

此时,目标为亮目标。

由公式(8)和公式(9)得:

$$(\epsilon_t - \epsilon_b)(k\epsilon_t - \epsilon_b) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T_b} d\lambda > 0 \quad (10)$$

求解公式(10), $k > \epsilon_b / \epsilon_t$ 。

同理,当 $\varepsilon_1 < \varepsilon_b$ 时,目标为暗目标,且 $k < \varepsilon_b / \varepsilon_1$ 。

将亮度融合条件公式(7)的解集在坐标轴上标出,并根据 k 值与目标和背景温差的对应关系标定出目标和背景温差的种类,如图 3 所示。

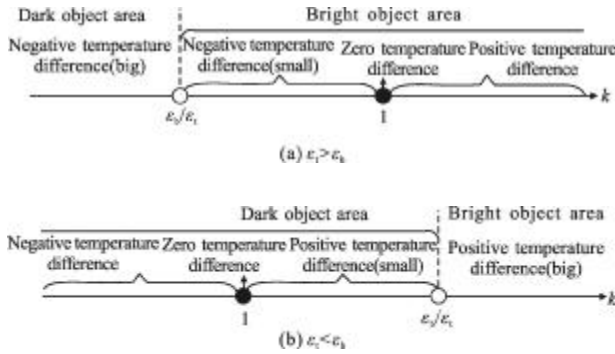


图 3 亮度融合条件的解集

Fig.3 Solution sets of inequality of luminance fusion

从图 3 中可以看出,照射条件下实现目标和背景的亮度融合的适用对象为:(1) 相比于背景具有高发射率的亮目标,包括高发射率的正温差目标、0 温差目标和小负温差目标;(2) 相比于背景具有低发射率的暗目标,包括低发射率的负温差目标、0 温差目标和小正温差目标。

特别地,对于温度与背景相等的目标,该方法均适用,且对目标和背景的发射率没有要求。这是因为,当 $T_1 = T_b = T$,根据公式(6),红外照射条件下目标和背景亮度融合的照度为:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\varepsilon_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_1} d\lambda - \varepsilon_b \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T_b} d\lambda}{\varepsilon_1 - \varepsilon_b} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, T} d\lambda \quad (11)$$

这意味着当目标和背景的温度相同时,实现不同发射率条件下目标和背景的亮度融合的照度值均等于温度为 $T(T = T_1 = T_b)$ 的黑体在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 波段的辐射出射度,而与目标及背景的发射率无关。

将满足亮度融合条件的目标和背景的组合与表 1 中对红外探测中目标和背景的分类相结合,对 6 种目标和背景的组合能否实现亮度融合进行归类,如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,在 6 种目标和背景的不同组合中,通过照射的方式,其中 4 种组合(组合 1、2、5、6)全部可以实现目标和背景的亮度融合,另外两种组合(组合 3、4)中,只有部分可以实现目标和背景亮度的融合。

表 2 红外探测中 6 种组合亮度融合的归类

Tab.2 Classification of six combinations in infrared detection judging by luminance fusion

Combination	Serial name	Luminance fusion
Positive temperature difference ($T_1 > T_b$)	1	Yes
Positive emissivity difference $\varepsilon_1 > \varepsilon_b$	Zero temperature difference ($T_1 = T_b$) 2	Yes
Negative temperature difference ($T_1 < T_b$)	Small	Yes
	Big	No
Negative emissivity difference $\varepsilon_1 < \varepsilon_b$	Positive temperature difference ($T_1 > T_b$) Small	Yes
	Big	No
Zero temperature difference ($T_1 = T_b$)	5	Yes
Negative temperature difference ($T_1 < T_b$)	6	Yes

2.3 照射条件下不同目标和背景组合的亮度融合仿真分析

针对上述 6 种目标和背景的组合,选择一组正发射率差和一组负发射率差的目标和背景: $\varepsilon_1 = 0.7$, $\varepsilon_b = 0.4$ 和 $\varepsilon_1 = 0.4$, $\varepsilon_b = 0.7$,进行照射条件下不同温差的目标和背景($T_b = 300$ K)的亮度对比度仿真,结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,随着照度的逐渐增加,图 4(a)中温差为 20°C , 10°C , 0°C , -10°C 的目标和背景和图 4(b)中温差为 10°C , 0°C , -10°C , -20°C 的目标和背景,其亮度对比度曲线出现了零点,这意味着这些组合的目标和背景通过照射的方法实现了亮度融合。这些目标与背景分别属于组合 1、2、5、6 及组合 3 中的小负温差目标和组合 4 中的小正温差目标。但并不是所有目标都能通过额外红外光照射的方法实现亮度融合,如图 4(a)中温差为 20°C 和图 4(b)中温差为 -20°C 的目标和背景,对应的则是组合 3 中的大负温差目标和组合 4 中的大正温差目标。通过仿真,验证了 2.2 节中关于照射条件下亮度融合适用对象的结论。

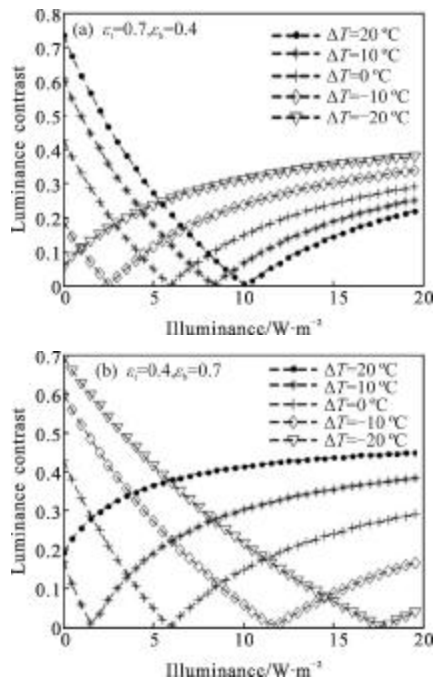
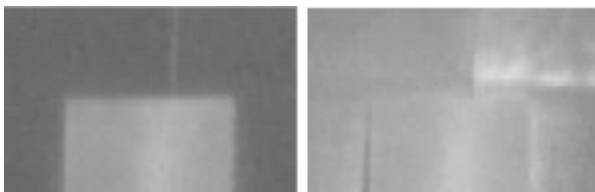


图 4 不同目标和背景组合的亮度对比度与照度的关系曲线
Fig.4 Relationship between luminance contrast and illuminance for target and background with different temperature differences and different emissivity differences

3 实验

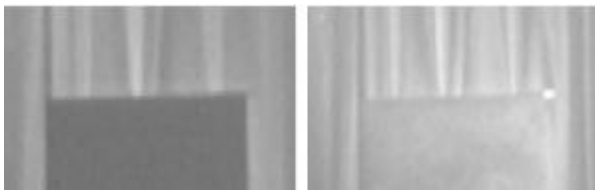
在实验室模拟自然环境中的亮目标和暗目标, 并进行红外照射系统的照射实验, 得到照射前后的两组图片, 如图 5 和图 6 所示。实验将红外热像仪拍



(a) 无红外照射 (b) 有红外照射
(a) Without infrared irradiation (b) With infrared irradiation

图 5 亮目标的红外图像

Fig.5 Infrared images of bright object



(a) 无红外照射 (b) 有红外照射
(a) Without infrared irradiation (b) With infrared irradiation

图 6 暗目标的红外图像

Fig.6 Infrared images of dark object

摄的红外图像的灰度值作为目标和背景的亮度值(目标和背景均视为灰体), 计算两组实验图像中目标和背景的亮度对比度。

通过计算, 图 5 所示的亮目标在未加光照之前, 目标和背景的亮度对比度为 0.324, 加光照以后, 亮度对比度降为 0.058。图 6 所示的暗目标在未加光照之前, 目标和背景的亮度对比度为 0.256, 加光照以后, 亮度对比度降为 0.014。实验结果显示, 通过红外照射目标和背景可以达到降低目标和背景亮度对比度的目的, 在一定程度上实现二者的亮度融合。

同时可以看出, 目标和背景并没有实现完全的亮度融合, 主要有以下两个原因: 一是目标或背景的表面不是完全的漫反射, 产生了部分镜面反射, 如图 5(b) 中的背景右上部分的亮块和图 6(b) 中的目标右上角的亮点, 均因为表面光滑出现了强反射; 二是目标(背景)上有纹理结构, 使得目标(背景)产生非均匀反射, 如图 6 中背景有一定程度的空间褶皱, 并非是一个平面结构, 从而使得均匀照射条件下的表观亮度不均匀。因此, 文中方法适合于漫反射条件下目标和背景的亮度融合, 可以通过照射降低目标和背景的亮度对比度, 但是难以消除因目标和背景的纹理特征带来的影响。

4 结论

通过对不同组合的目标和背景的亮度融合仿真, 得出了照射实现目标和背景亮度融合的适用对象: 相比于背景, 具有高发射率的亮目标和低发射率的暗目标, 特别地, 当目标和背景的温度相同时, 任意发射率组合的目标和背景均适合。红外照射实验表明: 目标和背景的亮度对比度较照射前明显降低, 在一定程度上实现了亮目标和暗目标与背景在中红外波段的亮度融合, 验证了以红外照射为手段进行目标和背景亮度融合的有效性。

文中的仿真和实验均基于目标和背景上的红外照度相等的前提下, 采用等照度照射目标和背景的方式实现目标和背景的亮度融合, 在红外探测的 6 种常见组合中有 4 种完全适用, 2 种部分适用。对于适用条件以外的目标和背景, 可以通过采取以不同照度分别照射目标和背景的方法来解决。目前, 可以利用自由曲面的方法实现对目标和背景分区域^[8-9]不同照度的照射, 从而扩展该方法实现目标与背景亮

度融合的适用范围,同时,采用自由曲面的方法将能够进一步提高照射区域的均匀度^[10],更利于目标和背景的亮度融合。这也为下一步照射条件下进行目标和背景的亮度融合研究指明了方向。

参考文献:

- [1] Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu, et al. Infrared radiation contrast between ground target and background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2002-2007. (in Chinese)
娄和利, 吕相银, 周园璞, 等. 地面目标与背景的红外辐射对比度特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2002-2007.
- [2] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Analysis and application of the contrast of object and background [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(3): 48-50. (in Chinese)
刘必鏊, 时家明, 赵大鹏, 等. 目标与背景的对比度分析及其应用[J]. *航天电子对抗*, 2008, 24(3): 48-50.
- [3] Li Junshan, Chen Xia, Li Jianhua. Infrared radiation characteristics contrast between target and background on different grounds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 424-428. (in Chinese)
李俊山, 陈霞, 李建华. 不同地面背景下目标和背景红外辐射对比特性[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 424-428.
- [4] Du Shiming, Lv Xiangyin, Zhang Wei, et al. Analysis on contrast of ground targets and backgrounds irradiated by artificial infrared illuminator [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(1): 161-163. (in Chinese)
杜石明, 吕相银, 张伟, 等. 对人工红外光照射时目标与背景对比度分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(1): 161-163.
- [5] Lillesaeter O. Complex contrast, a definition for structured targets and backgrounds [J]. *JOSA A*, 1993, 10(12): 2453-2457.
- [6] Jin Weiqi, Gao Shaoshu, Wang Jihui, et al. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1552-1556. (in Chinese)
金伟其, 高绍姝, 王吉晖, 等. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1552-1556.
- [7] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
张建奇, 方小平. *红外物理* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [8] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces [J]. *JOSA A*, 2002, 19(3): 590-595.
- [9] Wu Rengmao, Xu Liang, Liu Peng, et al. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge-Ampère equation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 229-231.
- [10] Li Denggao, Yin Songfeng, Ling Yongshun, et al. A feedback design method of freeform reflector for uniform illumination with extended sources [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0422001-1-0422001-5. (in Chinese)
李登高, 殷松峰, 凌永顺, 等. 用于扩展光源均匀照明的自由曲面反馈设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0422001-1-0422001-5.