

· 光学设计 ·

## 登陆舰光学引导系统发散角的分析

刘典宏, 张晓晖

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

**摘要:** 为了使登陆艇驾驶员不丢失引导灯光信号并快速进舱, 需要光学引导系统的横纵向发散角都满足一定要求。将船舶运动理论应用于登陆舰光学引导系统发散角的分析, 根据5级海况下登陆舰的偏荡运动, 确定满足条件的横向发散角 $\alpha$ 不大于 $14^\circ$ , 根据5级海况下登陆舰的摇荡运动, 确定满足条件的纵向发散角 $\beta$ 不小于 $15^\circ$ 。研究结果可为相关工程应用提供一定参考。

**关键词:** 兵器科学与技术; 光学引导系统; 船舶运动; 发散角

中图分类号: TJ83

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0001-05

## Analysis of Divergence Angle of Optical Guidance System on Landing Ship

LIU Dian-hong, ZHANG Xiao-hui

(Ordnance Engineering Department, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to ensure the driver of landing boat to go into landing ship quickly by tracking the optical guidance signal all the time, the divergence angle of the optical guidance system must meet some requirements. Ship motion theory is applied to analyze the divergence angle of the optical guidance system on landing ship. Based on the yawing motion of landing ship under the fifth sea state level, we ascertain the lateral divergence angle  $\alpha$  must be not more than  $14^\circ$ . Based on the swaying motion of landing ship under the fifth sea state level, we ascertain the longitudinal divergence angle  $\beta$  must be not less than  $15^\circ$ . Research results can provide some references for applying in engineering.

**Key words:** ordnance science and technology; optical guidance system; ship motion; divergence angle

登陆艇是实施登陆作战的重要工具<sup>[1]</sup>, 为了能迅速完成登陆任务, 需要登陆艇在海上能够快速进舱。在白天能见度较好时, 可以通过目视观察实现快速进舱。但是在夜间或白天能见度低时, 则需要登陆舰光学引导系统的指引。登陆舰后方的登陆艇驾驶员, 通过引导系统的灯光信号快速、准确地完成进舱操作。

登陆艇入舱时登陆舰在海面上有两种状态: 低速航行状态和锚泊状态。实际的海面战场会存在不同的海况, 在一定的海况等级下, 登陆舰和登陆艇在航行时会出现横摇、纵摇运动<sup>[2]</sup>。而当登陆舰锚泊时, 又会出现偏荡运动<sup>[3]</sup>。这些运动会导致光学

引导系统的引导区域发生偏移, 影响进舱顺利完成。为了使驾驶员在高海况下不丢失引导灯光信号并快速进舱, 需要光学引导系统的横纵向发散角都满足一定要求。基于高海况下登陆舰和登陆艇的运动情况, 分析符合条件的横纵向发散角, 可为相关工程应用提供一定参考。

### 1 光学引导系统工作机理

光学引导系统利用高指向性引导光源, 将登陆舰后方 2 000 m 内以矩形光场照明, 如图 1 所示。在登陆舰后方的登陆艇驾驶员, 能够通过目视观察到

光学引导系统的灯光信号,快速准确地完成进舱操作。

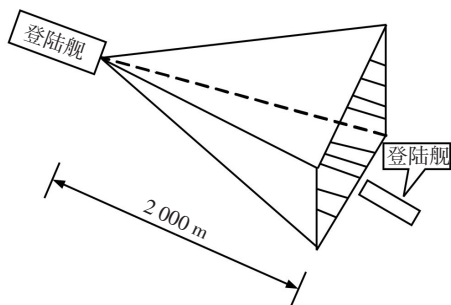


图1 2 000 m距离内矩形照明光场

由于是矩形照明光场,引导系统的光束具有一定的横向发散角 $\alpha$ 和纵向发散角 $\beta$ ,如图2所示。发散角 $\alpha$ 和 $\beta$ 必须要满足一定条件:在5级海况下,登陆艇始终处于矩形光场内,同时保证登陆艇在引导下能顺利进入狭窄的坞舱艙门。

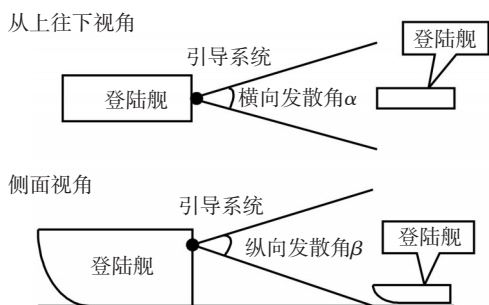


图2 引导系统发散角

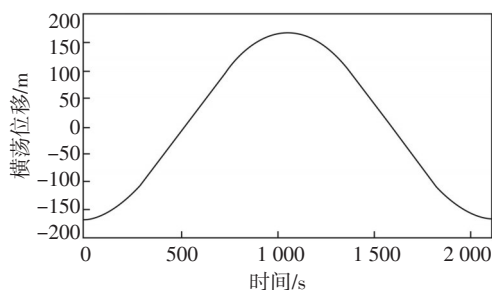
在5级海况下,如果登陆舰处于锚泊状态,会出现偏荡运动,两船相对运动在水平方向幅度大。为了保证登陆艇顺利入舱,需要确定满足条件的横向发散角 $\alpha$ 。如果登陆舰处于低速航行状态,横摇和纵摇幅度较大,两船相对运动在纵向上幅度大。为了保证登陆艇始终处于光场内,需要确定满足条件的纵向发散角 $\beta$ 。

## 2 横向发散角 $\alpha$ 分析

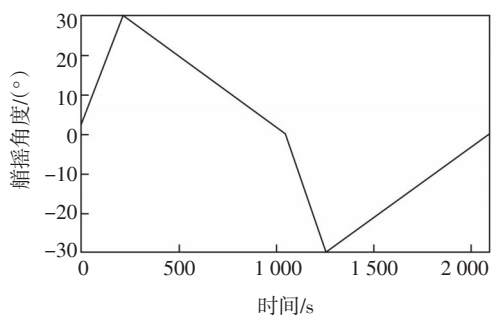
下面通过登陆舰锚泊时两船运动情况分析光学引导系统横向发散角 $\alpha$ 。

在5级海况下,海面风速大约为10 m/s<sup>[2]</sup>。登陆舰锚泊时会出现偏荡运动,主要是以横荡和艙摇运

动。横荡幅度约为0.8倍船长,最大艙摇角度约为30°,偏荡周期约为2 100 s<sup>[3]</sup>。目前大型登陆舰长度为200 m左右<sup>[1]</sup>,横荡幅度约为160 m。由于船舶的偏荡是一个周期运动,不同船舶具有相似的运动规律。通过对偏荡时横荡位移和艙摇角历时曲线<sup>[4]</sup>的简化,可以获得一周期内登陆舰的横荡位移和艙摇角历时曲线,如图3所示。



(a)横荡位移历时曲线



(b)艙摇角度历时曲线

图3 横荡和艙摇历时曲线

其横荡位移 $L(t)$ 和艙摇角 $A(t)$ 在一个周期内可以表示为

$$L(t) = -160 \cos\left(\frac{2\pi}{2100}t\right) \quad (1)$$

$$A(t) = \begin{cases} t/7 & 0 < t < 210 \\ (1050 - t)/28 & 210 < t < 1050 \\ (1050 - t)/7 & 1050 < t < 1260 \\ (t - 1260)/28 & 1260 < t < 2100 \end{cases} \quad (2)$$

由于登陆舰坞舱艙门的宽度有限,登陆艇入舱时航向需要保持和登陆舰艙摇角度几乎一致才能顺利入舱。此外光学引导系统需要保证处在光场边缘的登陆艇能够快速顺利入舱。同一位置出发,登陆艇行驶路径越长,调整空间越大,越能顺利入舱。当发散角 $\alpha$ 能保证处在光场边缘的登陆艇以定常回转恰好行驶入舱,则能保证其他路径也能顺利入舱,如图4所示。

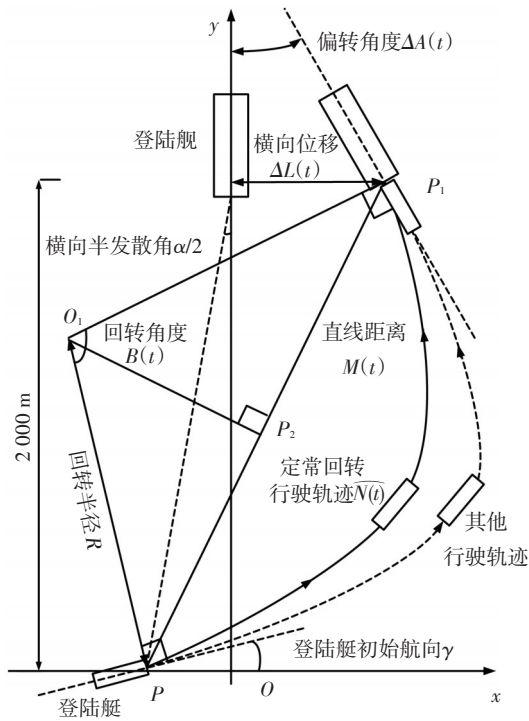


图4 登陆艇入舱

下面以图4登陆艇在登陆舰左后方,而登陆舰向右侧偏荡为例,分析登陆艇经过时间 $t$ 后恰好入舱的情况。特别指出的是登陆舰尾部的横向位移近似为横荡位移。

经过时间 $t$ 后,登陆舰存在横向位移 $\Delta L(t)$ 和偏转角度 $\Delta A(t)$ 。此时登陆艇出发点与登陆舰尾部之间的直线距离 $M(t)$ 满足下式

$$M(t) = \sqrt{2000^2 + (2000 \tan(\alpha/2) + \Delta L(t))^2} \quad (3)$$

定常回转行驶轨迹 $\overline{N(t)}$ 为圆弧。登陆艇初始点 $P$ 坐标为 $(-2000 \tan(\alpha/2), 0)$ ,经过时间 $t$ 后到达 $P_1$ 点坐标为 $(\Delta L(t), 2000)$ ,航向为 $(-\sin(\Delta A(t)), \cos(\Delta A(t)))$ , $P_2$ 为 $PP_1$ 中点。由于登陆艇行驶方向与回转半径方向相切,回转路径圆心 $O_1$ 满足下式

$$\overline{O_1P_2} \cdot \overline{PP_1} = \overline{O_1P_1} \cdot (-\sin(\Delta A(t)), \cos(\Delta A(t))) = 0 \quad (4)$$

待求得 $O_1$ 坐标后,回转角度 $B(t)$ 可以由下式求得

$$B(t) = \arccos\left(\frac{\overline{O_1P} \cdot \overline{O_1P_1}}{|\overline{O_1P}| \cdot |\overline{O_1P_1}|}\right) \quad (5)$$

行驶轨迹 $\overline{N(t)}$ 可以表示为

$$\overline{N(t)} = B(t) \times \frac{M(t)}{2 \sin(B(t)/2)} \quad (6)$$

则在时间 $t$ 内的平均速度 $v_0$ 可以表示为

$$v_0 = \overline{N(t)}/t \quad (7)$$

$v_0$ 由横向发散角 $\alpha$ 、登陆艇在一个登陆舰偏荡周期中的出发时刻 $t_0$ 及行驶时间 $t$ 决定。由于登陆艇的最大航速约为 $20 \text{ m/s}$ <sup>[5]</sup>,从 $2000 \text{ m}$ 外到入舱的时间至少大于 $120 \text{ s}$ ,同时登陆艇行驶速度一般不小于 $4 \text{ m/s}$ ,所花时间应该小于 $480 \text{ s}$ 。当登陆艇出发时刻 $t_0$ 一定,引导系统有不同发散角 $\alpha$ 时 $v_0$ 随行驶时间 $t$ 的变化规律如图5所示。

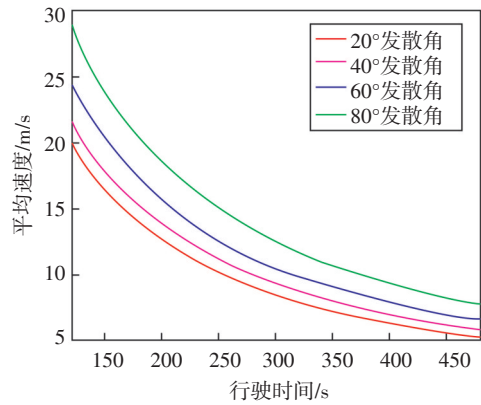


图5 不同发散角 $\alpha$ 时 $v_0$ 随行驶时间 $t$ 的变化

由图可知,同样横向发散角条件下,行驶时间越长,登陆艇的平均速度越慢,入舱的时间为 $120 \text{ s}$ 时平均速度最大;此外,同样的行驶时间,发散角越大,登陆艇的平均速度越大。

当登陆艇行驶时间为 $120 \text{ s}$ ,引导系统有不同发散角 $\alpha$ 时 $v_0$ 随出发时刻 $t_0$ 的变化规律如图6所示。

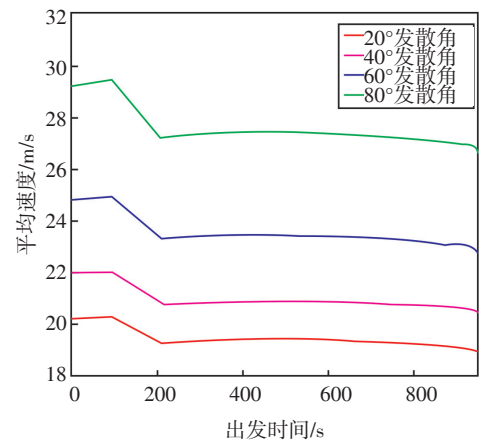


图6 不同发散角 $\alpha$ 时 $v_0$ 随出发时刻 $t_0$ 的变化

特别指出的是,下面讨论的是登陆艇在登陆舰左后方为例,故只需要分析半个周期,另外半个周期

规律一样。由图可知,不同横向发散角条件下,平均速度有相同的变化规律,在出发时刻为90 s时平均速度都最大;此外,发散角越大,登陆艇的平均速度越大。

只要保证当登陆艇行驶时间为120 s,出发时刻为90 s时登陆艇的平均速度不大于登陆艇的实际最大速度,就能保证登陆艇顺利入舱。此时登陆艇的平均速度随发散角变化规律如图7所示。

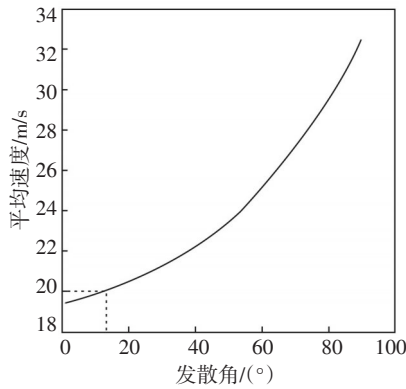


图7  $t=120$  s,  $t_0=90$  s时  $v_0$ 随 $\alpha$ 的变化

由图可,知当横向发散角 $\alpha$ 不大于 $14^\circ$ 时,登陆艇的平均速度不大于20 m/s,可保证登陆艇顺利入舱。

### 3 纵向发散角 $\beta$ 分析

下面通过登陆舰低速航行时两船运动情况分析光学引导系统纵向发散角 $\beta$ 。

在5级海况下,登陆舰和登陆艇都会出现横摇、纵摇运动。船舶在海浪中有频率响应函数<sup>[6]</sup>

$$W(i\omega) = \frac{K}{-\Lambda^2 + 2i\mu\Lambda + 1} \quad (8)$$

其中, $\omega$ 为波浪频率; $K$ 为波倾角修正系数,一般小于1。 $\Lambda=\omega/\omega_0$ 为调谐因数; $\mu$ 为无因次衰减系数。

沿海海域的波浪统计特征推荐的波能谱<sup>[6]</sup>为

$$S_S(\omega) = \frac{0.74}{\omega^5} \exp\left(-\frac{g^2}{U^2 \omega^3}\right) \quad (9)$$

其中, $U$ 为风速; $g$ 为重力加速度。

波倾角能量谱密度函数<sup>[7]</sup>为

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S_S(\omega) \quad (10)$$

船舶的摇荡能谱密度函数 $S_y(\omega)$ 与波能谱密度函数 $S_\alpha(\omega)$ 之间满足下式

$$S_y(\omega) = |W(i\omega)|^2 S_\alpha(\omega) = |W(i\omega)|^2 \frac{\omega^4}{g^2} S_S(\omega) \quad (11)$$

当船舶以航向角 $\gamma$ 和航速 $v$ 前进时,遭遇频率 $\omega_e$ 满足下式

$$\omega_e = \omega + \omega^2 v \cos \gamma / g \quad (12)$$

根据船舶耐波性理论<sup>[2]</sup>,船舶的横摇角可表示为

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i^2}{g} \sqrt{2 \frac{1}{(1-\Lambda_\varphi^2)^2 + 4\mu_\varphi^2 \Lambda_\varphi^2} S_S(\omega_i) \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_e t + \varepsilon_i) K_\varphi \sin \gamma \quad (13)$$

船舶的纵摇角可表示为

$$\theta(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i^2}{g} \sqrt{2 \frac{1}{(1-\Lambda_\theta^2)^2 + 4\mu_\theta^2 \Lambda_\theta^2} S_S(\omega_i) \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_e t + \varepsilon_i) K_\theta \cos \gamma \quad (14)$$

其中, $\omega_i$ 为能量较高的均匀采样波浪频率,取值范围为 $[0.1 \text{ rad/s}, 20 \text{ rad/s}]$ 。 $\mu_\varphi$ 为0.055–0.07; $\mu_\theta$ 为0.3–0.5<sup>[2]</sup>; $K_\varphi$ 一般为0.6–0.7<sup>[8]</sup>; $K_\theta$ 为0.5<sup>[6]</sup>。取 $\mu_\varphi$ 为0.055; $\mu_\theta$ 为0.4; $K_\varphi$ 为0.7; $K_\theta$ 为0.5。

假设登陆艇在登陆舰静态坐标系<sup>[9]</sup>下坐标为 $(x_1, y_1, z_1)$ ,当登陆舰存在横摇角 $\varphi(t)$ ,纵摇角 $\theta(t)$ 时,登陆艇在登陆舰坐标系下坐标 $(x_2, y_2, z_2)$ 满足下式

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) & 0 & -\sin(\varphi(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi(t)) & 0 & \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta(t)) & \sin(\theta(t)) \\ 0 & -\sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由于横浪时( $\gamma=90^\circ$ )风浪对船舶的横摇幅值影响最大,顶浪时( $\gamma=0^\circ$ )风浪对纵摇幅值影响最大,海面环境复杂多变,设定登陆舰5级海况下最极端情况为风浪对两种幅值同时都影响最大,如图8和图9所示。

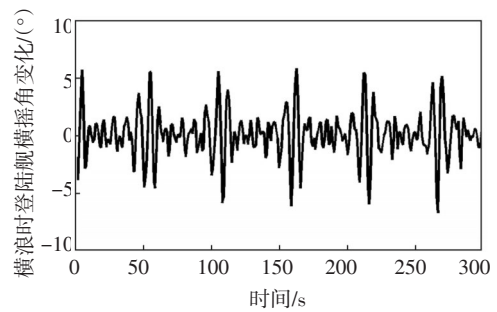


图8 5级海况下横浪时横摇角变化

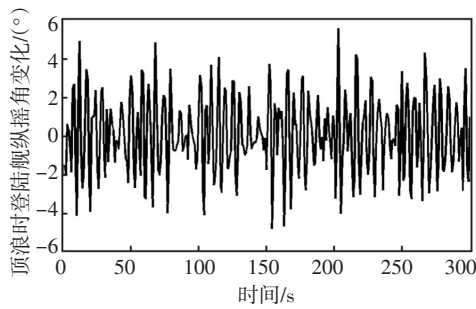


图9 5级海况下顶浪时纵摇角变化

基于此,最极端情况可以得到登陆艇处于登陆舰 2 000 m 正后方时的纵向方位角  $\frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1}$  的变化,如图 10 所示。由于登陆艇摇荡运动对方位角变化基本没有影响,故不作考虑。

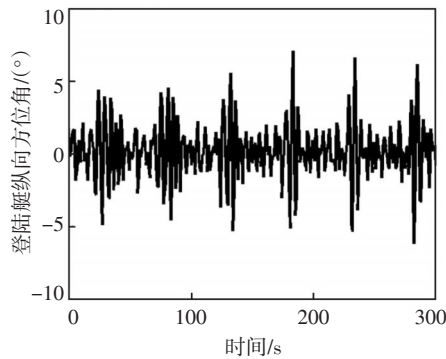


图10 登陆艇纵向方位角随时间的变化

为了不丢失引导光信号,必须保证在最极端情况任意时刻登陆艇都在登陆舰光学引导系统的光场内,纵向半发散角必须不小于登陆艇纵向方位角的最大绝对值,即要保证有下式

$$2 \arctan \left| \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \right| \leq \beta \quad (16)$$

基于此,可以得到登陆艇在登陆舰后方不同区域所需要的最小发散角,如图 11 所示。

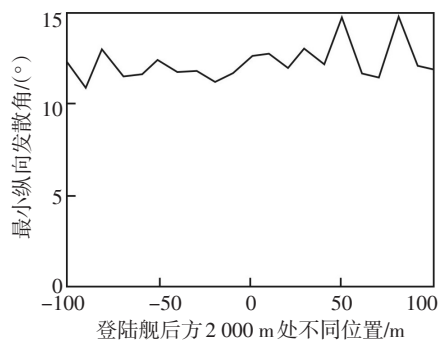


图11 最小纵向发散角随位置的变化

由图可知,所需最小纵向发散角在不同位置区域变化比较小,为了保证登陆艇在所有区域都始终在光场内,纵向发散角 $\beta$ 必须不小于 $15^\circ$ 。

## 4 结 论

基于 5 级海况下登陆舰的偏荡运动和摇荡运动分析登陆舰光学导引系统的横纵向发散角。如果登陆舰处于锚泊状态,为了保证登陆艇顺利入舱,确定了满足条件的横向发散角 $\alpha$ 不大于 $14^\circ$ 。如果登陆舰处于低速航行状态,为了保证登陆艇始终处于光场内,确定了满足条件的纵向发散角 $\beta$ 不小于 $15^\circ$ 。文中的研究结果可为相关工程应用提供一定参考。

## 参考文献

- [1] 陈光文.以海制陆的急先锋-世界各国新型两栖战舰的发展[J].现代兵器,2009(4):27-33.
- [2] 李积德.船舶耐波性[M].北京:国防工业出版社,1981:1-81.
- [3] 古文贤.单锚泊船的偏荡运动[J].世界海运,1996(4):51-54.
- [4] 裴景涛.风中单锚泊船偏荡运动及走锚过程的仿真研究[D].大连:大连海事大学,2010.
- [5] 凌翔.水上坦克-登陆舰艇[J].现代兵器,2000(6):34-36.
- [6] 吕锋.六自由度并联船舶运动模拟器的设计及其控制系统设计[D].江苏:江苏科技大学,2012.
- [7] 关晓光.船舶横摇运动仿真及减摇鳍系统控制研究[D].大连:大连海事大学,2007.
- [8] 杨存国,邵宜峰.减摇装置及效能[J].船舶设计通讯,2004(2):45-50.
- [9] 刘盛韬.灯光助降系统稳定平台的建模及仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [10] 孙明璇,王健,吴重庆,等.全光纤高速模拟信号偏振态测量系统的研究[J].光电技术应用,2015,30(2):17-22.
- [11] 龚豪,邸旭,薛常喜.空气间隙对多层衍射光学元件衍射效率的影响[J].光电技术应用,2015,30(6):22-25.
- [12] 程伟宁,孙宏宇.基于 AOTF 的光学系统设计[J].光电技术应用,2016,31(2):1-4.
- [13] 王铎.基于形态学和邻域差值的红外小目标检测算法[J].光电技术应用,2016,31(2):19-21.
- [14] 刘典宏,张晓晖.实现小发散角圆形照明的 TIR 透镜设计[J].2016,31(3):13-16.