

·光电器件与材料·

## 基于正交实验法的高亮度大功率LED仿真设计

陈肇飞, 范广涵, 章 勇, 严启荣

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)

**摘 要:**采用正交实验法分析反射碗和透镜两部件的各个因素对LED发光强度分布的影响,并仿真设计出优化参数后的高强度、窄光束大功率LED。这一设计方法对LED的一次光学系统设计具有一定的指导意义,并有助于提高大功率LED光学系统设计的效率,降低LED封装的试验成本。

**关键词:**正交实验法;大功率LED;光学仿真

中图分类号:TN312.8

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)03-0035-05

## Simulation Design of High-brightness LED Based on Orthogonal Experiment

CHEN Zhao-fei, FAN Guang-han, ZHANG Yong, YAN Qi-rong

(Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** The effect of the reflection bowl and lens on the luminous intensity distribution is analyzed by the orthogonal experiment method, and the high intensity, narrow beam and high-power LED with the optimized parameters is simulated. The design possesses guiding significance for LED optical system, and can help to improve the efficiency of the optical system and reduce the experiment cost of LED package.

**Key words:** orthogonal experiment; high-power LED; optical simulation

随着LED芯片技术和封装技术的发展,顺应照明领域对高光通量的LED产品的需求,大功率LED逐步走入市场,但大功率LED要真正取代白炽灯、荧光灯成为照明领域的主流光源,仍需要考虑光学和热学方面的设计。

LED光学系统属于一种非成像光学系统,不同于传统的成像光学系统,它注重于能量的分配而不是信息的传递。传统的LED光学系统的光学设计,通常是将产品做出来之后再去测量它的光强分布、发光角度等参数,达不到要求再去修改封装系统结构。依靠经验开模对LED封装进行优化,成本是极其巨大的。因此,用光学仿真软件设计性能优异的一次光学系统,对LED的封装意义重大,也是优化LED一次光学系统的重要途径,而LED封装的光学

结构模型由芯片(光源)、反射碗、封装环氧树脂与空气界面组成,光学工程师往往需要对上述光学模型的4个部件调整不同的参数来获得理想中的光学模型,这一不断调整参数并建立光学仿真模型需要花费大量的时间,也难以用直观的方法确定哪个参数是对仿真结果影响最大的要素。

参照实际常用LED的封装结构形式,主要考虑了反射碗和透镜两大部件的位置形状,设定反射碗、透镜的相关形状、位置参数,对所设计的结构进行非序列光线追迹,来模拟得到不同封装参数条件下的光能接收面的光亮度分布。利用正交实验法分析模拟结果,得出影响出光效率,中心光强和半强度角的主要因素,并综合得到该一次光学系统的一组优化结果。

收稿日期:2011-04-16

基金项目:广东省教育部产学研项目(2009B090300338);2011年省战略性新兴产业专项资金(2010A081002005)

作者简介:陈肇飞(1985-),男,广东汕头人,硕士研究生,主要从事LED光学设计。

## 1 大功率LED光学特征

### 1.1 LED光输出表示

LED光输出一般用辐射度学的光通量、光强表示。光通量是光源在单位时间发出的光量,它用于描述LED向外辐射能量的大小。总光通量表示LED向各个方向辐射光通量的总和,一般用符号 $\phi_V$ 表示,单位是流明(lm)。光强是光源在给定方向立体角内发出的光通量,它用于描述LED发出的光沿空间各方向的分布。光强一般用 $I_v$ 表示,单位是坎德拉(cd)。立体角表示为被照射面积与半径平方的比值,即 $\omega=A/R^2$ ,则某方向上的光强 $I_v = \phi_V/\omega = \phi_V \cdot R^2/A$ 。

### 1.2 大功率LED配光曲线

LED配光曲线用于描述光强在空间的分布,是将光强看成发光角度的分布函数得到的曲线。一般LED出光沿光轴对称,所以配光曲线可以简单地用相对光强沿空间角度二次函数来绘制。在LED的配光曲线中,常用来描述光强分布参量有半强度角,表示对应峰值光强一半时候的角度值,半强度角的两倍叫LED的发光角度,用 $2\theta_{1/2}$ 表示,如图1所示。

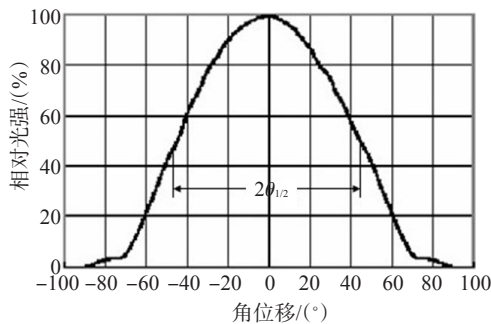


图1 配光曲线与半强度角

## 2 大功率LED光学结构模型

### 2.1 LED光学结构

高功率LED主要包括几个部分:支架、阴线、衬底(粘合剂)、发光芯片、反射碗、透镜等几部分,如图2所示。LED的出光特性主要由封装材料的折射率、透镜的几何形状、芯片与透镜的几何位置来决定<sup>[1]</sup>。

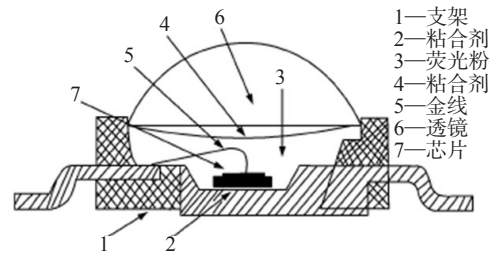


图2 大功率LED结构

### 2.2 LED光学模型的建立

LED光学模型比较复杂,芯片从各个方向发出的光线经过多次反射和折射,再从表面射出。忽略次要要素,抓住影响LED出光最重要的要素进行建模分析:(1)芯片的大小和位置;(2)反射碗的形状和尺寸;(3)透镜的形状和尺寸。

在建立LED光学模型时,做出几点假设:(1)光从芯片表面随机出射,满足Lambertian分布;(2)考虑光线反射与折射的时候,主要集中在芯片与反射碗、反射碗与树脂、树脂与空气接触面,其他不予考虑<sup>[2]</sup>。(3)分析光的传输的时候,除去光子的吸收、再循环、以及电性、温度的影响<sup>[3]</sup>。(4)反射碗表面的反射率在98%左右。(5)环氧中加入散射剂时当成体积散射处理。

根据以上LED光学模型的假设,运用光学仿真软件Tracepro建立了16组LED光学模型,并采用正交试验法对结果进行分析,其光学模型如图3所示。

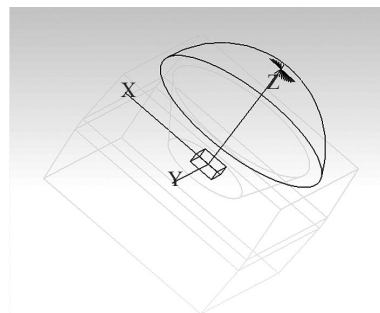


图3 大功率LED简化模型

## 3 大功率LED的光学仿真

对于大功率LED的光学结构模型,一般很难建立光强分布状态与各部件位置形状的函数关系,有时甚至还不清楚各部件参数影响光强分布状态的灵敏度。采用正交设计的方法,以数值模拟为工具,进行设计实验(design of experiment, DOE),从

而可以发现光强分布状态关于各部件参数的灵敏度,为设计优化大功率LED奠定基础。

文中要考虑的是高强度、窄光束大功率LED的仿真光分布状态,包括出光效率、中心光强、半强度角,为了获得高强度、窄光束大功率LED,要求其出光效率和中心光强要尽可能的大,半强度角要尽可能的小。

在正交实验法中,称影响试验指标的因素为因子,每个因子可能处的状态为水平。文中设定影响光强分布状态的因子有5个,如图4所示分别是锥形母线与高的夹角 $\theta_1$ ,反射碗高 $h$ ,锥形反射碗上底面半径 $b$ ,透镜的曲率半径 $r$ ,夹角 $\theta_2$ 。这5个因子各自有两个水平,具体取值见表1。

在这里忽略芯片的大小和位置(芯片尺寸为1 mm×1 mm,位置保持在反射碗底中心),仅考虑反射碗和透镜的形状和位置,对于反射碗的形状,可

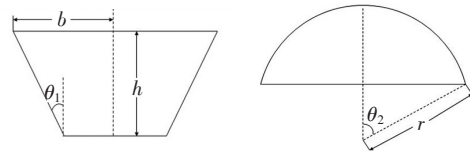


图4 反射碗和透镜的影响因素

表1 影响因素及水平取值

水平/因子	$\theta_1/(\circ)$	$h/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$\theta_2/(\circ)$
1	30	2	2	2.8	60
2	20	3	2.5	3	90

以采用锥体、半球体或抛物体。而其中以锥体反射碗在减小光出射角度、提高中心光强及出光效率上效果最为显著<sup>[4]</sup>。

表2所示为一水平数相等的正交表 $L_{16}(2^{15})$ ,其中 $L$ 代表正交表;16为表的行数,即试验方案数;2为水平数目,15为列数,即因子数目,在该正交表中

表2 正交表 $L_{16}(2^{15})$

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	各指标试验结果			
	$\theta_1$	$h$	$b$	$r$	$\theta_2$	$\theta_1 \times h$	$\theta_1 \times b$	$\theta_1 \times r$	$\theta_1 \times \theta_2$	$h \times b$	$h \times r$	$h \times \theta_2$	$b \times r$	$b \times \theta_2$	$r \times \theta_2$	出光效率 (%)	中心光强 (W/sr/kW)	半角弧度 ( $^\circ$ )	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	93.3	411.7	100.0	
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	96.0	390.5	92.0	
3	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	94.0	568.8	81.0	
4	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	95.3	299.4	125.0	
5	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	93.6	1338.9	90.0	
6	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	95.3	400.0	104.0	
7	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	93.6	537.0	77.5	
8	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	95.2	308.9	125.0	
9	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	93.9	537.7	85.0	
10	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	95.6	305.0	106.0	
11	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	93.7	370.6	106.8	
12	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	95.2	400.0	106.0	
13	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	93.7	1265.0	49.0	
14	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	95.2	300.0	126.0	
15	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	93.9	414.0	88.5	
16	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	95.7	390.0	106.8	
出光效率	$K_{1j}$	757	750	756	756	756	756	756	756.1	757	757	757	756	756	757				
	$K_{2j}$	757	764	757	757	757	757	758	757	757.1	756	756	757	757	757	756			
	$K_{ij}$	94.6	93.7	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	94.5	94.6	94.6	94.6	94.5	94.5	94.6			
	$K_{3j}$	94.6	95.4	94.6	94.6	94.7	94.7	94.7	94.6	94.6	94.5	94.5	94.6	94.6	94.7	94.5			
极差	0	-1.7	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0	-0.1	-0.2	0.1				
影响度排序		1																	
最优方案	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	95.2	391	108	
中心光强	$K_{1j}$	4949	5444	3288	4073	3749	4952	3300	3979	4251.4	3284	4039	4116	4255	3984	3295			
	$K_{2j}$	3289	2794	4950	4164	4489	3286	4938	4259	3986.1	4954	4198	4122	3982	4254	4943			
	$K_{ij}$	619	681	411	509	469	619	413	497	531.4	411	505	515	532	498	412			
	$K_{3j}$	411	349	619	521	561	411	617	532	498.3	619	525	515	498	532	618			
极差	208	331	-208	-11	-93	208	-205	-35	33.2	-209	-20	-0.8	34.1	-34	-206				
影响度排序	3	1	3	6	2	5	7			2					4				
最优方案	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	93.5	1481	46	
半强度角	$K_{1j}$	752	678	836	763	868	790	814	775	795.3	804	768	796	796	785	782			
	$K_{2j}$	820	894	736	809	703	782	758	797	776.3	768	803	776	776	786	790			
	$K_{ij}$	94	84.7	105	95.3	109	98.7	102	96.9	99.4	101	96	99.5	99.4	98.2	97.7			
	$K_{3j}$	103	112	92	101	87.9	97.7	94.7	99.6	97	96	100	96.9	97	98.3	98.7			
极差	-8.5	-27	12.5	-5.8	20.6	1	7.1	-2.7	2.4	4.5	-4.4	2.6	2.4	-0.1	-1				
影响度排序	4	1	3	6	2		5			7									
最优方案	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	93.7	1265	49	

注: $K_{ij}$ 为第 $j$ 列上水平号为 $i$ 的各实验结果之和; $k_{ij}=K_{ij}/s$ ,其中 $s$ 为第 $j$ 列上水平号 $i$ 出现的次数, $k_{ij}$ 表示第 $j$ 列的因素取水平 $i$ 时正交实验结果的平均值;极差是同一列中 $k_{1j}$ 和 $k_{3j}$ 所得的差,这里省略了 $K_{ij}$ , $k_{ij}$ 和极差的计算过程,仅将计算结果列入表2中。

前5列代表的是单因子列,其余13列是交互作用列。锥形母线与高的夹角 $\theta_1$ ,反射碗高 $h$ ,锥形反射碗上底面半径 $b$ ,透镜的曲率半径 $r$ ,夹角 $\theta_2$ ,这5个因子不仅独立地起作用,而且可能联合起来起作用,也就是说,不仅各个因子的水平改变对试验指标有影响,而且各因素的联合搭配对试验指标也有影响,因此在试验当中也考虑到因素A和因素B的交互作用对试验指标影响程度的大小,并记为A×B。

按照设定的数据表和正交表仿真出16个大功率LED模型,并得出相应的出光效率、中心光强和半强度角,见表2。一般来说,各列的极差绝对值是不相等的,这说明各因素在水平改变时对实验结果的影响是不相同的。极差绝对值越大,说明这个因素的水平改变时对试验指标的影响越大。极差绝对值最大的那一列,就是那个因素的水平改变时对试验指标的影响最大,那个因素就是要考虑的主要因素。通过极差绝对值大小可以得出,各因子对试验指标1(出光效率)的影响最大的是B( $h$ 反射碗的深度),从16个方案中可以看出,当 $B_2$ 变成 $B_1$ ,LED模型的出光效率从95%左右降到93%左右,说明为了取得95%以上的出光效率,因子B( $h$ 反射碗的深度)必须取第二水平(3 mm),而其他因子对试验指标1(出光效率)的影响不大。

挑选因素的最优水平与所要求的试验指标有关,对于出光效率,指标越大越好,所以要选取指标水平大的作为最优方案水平。由于 $K_{2A}>K_{1A}$ ,  $K_{2B}>K_{1B}$ ,  $K_{2C}>K_{1C}$ ,  $K_{2D}>K_{1D}$ ,  $K_{2E}>K_{1E}$ 。因此最优方案为 $A_2B_2C_2D_2E_2$ ,该方案设计出的LED模型出光效率为95.2%,由于因子A( $\theta_1$ )的极差绝对值最小,说明它水平的改变对出光效率的影响不大,为了进一步验证 $A_2B_2C_2D_2E_2$ 是否是出光效率最高的方案,比较了方案 $A_1B_2C_2D_2E_2$ 和方案 $A_2B_2C_2D_2E_2$ 得到LED模型的出光效率,发现出光效率最高的方案是 $A_1B_2C_2D_2E_2$ ,出光效率达到96%,即:锥形母线与高的夹角 $\theta_1=30^\circ$ ,反射碗高 $h=3$  mm,锥形反射碗上底面半径 $b=2.5$  mm,透镜的曲率半径 $r=3$  mm,夹角 $\theta_2=90^\circ$ 。

对于试验指标2(中心光强),各因子影响程度由主到次顺序为: $B \rightarrow FJ \rightarrow AC \rightarrow O \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H$ 。最大影响程度的因子是B( $h$ 反射碗的深度),A( $\theta_1$ 锥形母线与高的夹角)和C( $b$ 锥形反射碗上底面半径)对中心光强的影响也较大,同时还注意到交互作用列 $\theta_1 \times h$ ,  $\theta_1 \times b$ ,  $h \times b$ ,  $r \times \theta_2$ 也对中心光强有重要影响,说明中

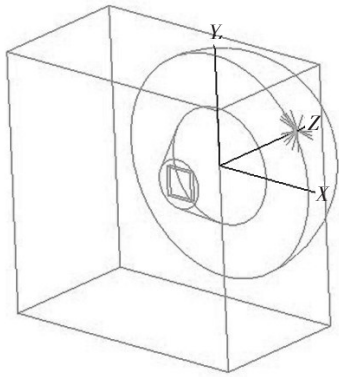
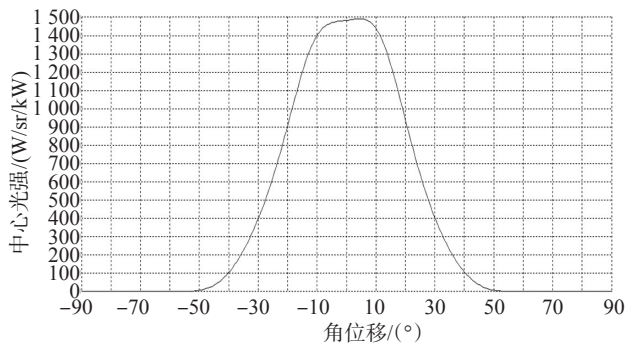
心光强的大小主要取决于反射碗的形状和位置的设计, $r$ (透镜曲率半径)的大小虽然对中心光强影响不大,但配合透镜角度 $\theta_2$ 也能对中心光强发生较大影响,从极差的大小也能说明透镜的角度 $\theta_2$ 比透镜的曲率半径 $r$ 更能决定中心光强的大小。

对于高强度、窄光束大功率LED的中心光强,指标越大越好,所以要选取指标水平大的作为最优方案水平。从正交表中看,由于 $K_{1A}>K_{2A}$ ,  $K_{1B}>K_{2B}$ ,  $K_{2C}>K_{1C}$ ,  $K_{2D}>K_{1D}$ ,  $K_{2E}>K_{1E}$ 。因此最优方案为 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 。该方案设计出的LED模型的中心光强为1 481 W/sr/kW,由于因子D( $r$ )的极差绝对值相对较小,它水平改变对中心光强影响不大,通过方案 $A_1B_1C_2D_1E_2$ 得到的LED模型中心光强1 265 W/sr/kW,说明方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 确实是取得最大中心光强的最佳方案,即:锥形母线与高的夹角 $\theta_1=30^\circ$ ,反射碗高 $h=2$  mm,锥形反射碗上底面半径 $b=2.5$  mm,透镜的曲率半径 $r=3$  mm,夹角 $\theta_2=90^\circ$ 。

对于试验指标3(半强度角),各因子影响程度由主到次顺序为: $B \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow J$ 。影响最大的因子是B( $h$ 反射碗的深度),其次是 $\theta_2$ ,说明半强度角大小主要取决于反射碗的高度和透镜的 $\theta_2$ ,反射碗 $b$ 也对半强度角也有一定影响,而5个因子交互作用对半强度角的影响并不明显。

对于高强度、窄光束大功率LED的半强度角,指标越小越好,所以要选取指标水平小的作为最优方案水平。从正交表中看,由于 $K_{2A}>K_{1A}$ ,  $K_{2B}>K_{1B}$ ,  $K_{1C}>K_{2C}$ ,  $K_{2D}>K_{1D}$ ,  $K_{1E}>K_{2E}$ 。因此最优方案为 $A_1B_1C_2D_1E_2$ ,该方案设计出的LED模型的半强度角为 $49^\circ$ 。由于因子D( $r$ )的极差绝对值相对较小,它水平改变对中心光强影响最小。对比方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 和方案 $A_1B_1C_2D_1E_2$ 得到LED模型半强度角大小,方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 得到半强度角为 $46^\circ$ ,因此方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 是取得最小半强度角的最佳方案,即:锥形母线与高的夹角 $\theta_1=30^\circ$ ,反射碗高 $h=2$  mm,锥形反射碗上底面半径 $b=2.5$  mm,透镜的曲率半径 $r=3$  mm,夹角 $\theta_2=90^\circ$ 。

从表2和上述3个试验指标的分析结果看,因子E( $\theta_2$ 透镜夹角)以取第二水平 $90^\circ$ ,也即是透镜曲率半径和底面半径相等时,试验指标均能取得最佳结果,出光效率最高,中心光强最大,半强度角最小,说明在设计高强度、窄光束大功率LED时透镜的曲率半径大于或者小于底面半径都不是最佳

图5 高强度、窄光束LED模型( $A_1B_1C_2D_2E_2$ )图6 大功率LED配光曲线( $A_1B_1C_2D_2E_2$ )

方案。

综上分析,为了得到高强度、窄光束大功率LED,除了要使中心光强尽可能大,半强度角尽可能小,并要保证一定的出光效率。如图5所示的LED模型为方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 设计得到,其中小光强最大,半强度角最小,虽然出光效率不是最高,但93.5%的

出光效率也能符合要求,因此方案 $A_1B_1C_2D_2E_2$ 是获得高强度、窄光束大功率LED的理想方案,其配光曲线如图6所示。

#### 4 结束语

在运用光学仿真软件 TracePro 设计大功率LED的过程中,用简化的模型替代LED复杂的出光模型,结合正交实验法分析出LED封装结构中的反射碗的深度 $h$ 对LED的出光效率、中心光强和半强度角非常重要,证实了在设计高亮度大功率LED时透镜的曲率半径等于底面半径是最佳方案。以设计高亮度大功率LED为例说明正交实验法的引入对光学设计师高效率设计符合特定配光曲线的LED有一定的参考意义。

#### 参考文献

(上接第13页)

#### 参考文献

- [1] 徐理德,孙文涛.基于Vega光电对抗视景仿真的研究与实现[J].微计算机信息,2009,25(7):201-203.
- [2] 张建,张建奇,邵晓鹏.基于Vega Prime的红外场景生成技术在成像制导仿真系统中的应用[J].红外技术,2005,27(2):124-128.

- [1] 夏勋力,余彬海,麦镇强.近朗伯光型LED透镜的光学设计[J].光电技术应用,2010,25(1):22-25.
- [2] 陈波,余彬海.大功率LED封装结构的仿真设计[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2006,24(1):29-31.
- [3] 林昭颖.发光二极管导光机构之研究[D].台北:台湾国立中央大学光电科学研究所,2000:52-60.
- [4] 钱雯磊,李筠,陈晓荣,等.用TracePro设计大功率LED[C]//中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集.合肥:《仪器仪表学报》杂志社,2007.
- [3] 郑小宝,王仕成,廖守亿,等.基于Creator和Vega的红外图像实时生成软件设计[J].红外技术,2008,30(10):575-579.
- [4] 彭亮,黄心汉.基于VC和Vega Prime联合开发的巡航导弹仿真系统研究[J].中南大学学报,2010,41(2):219-224.
- [5] 李阔,尹庆林,胡波.基于HLA的Vega光电视景仿真技术研究[J].光电技术应用,2010,24(3):81-84.

欢迎订阅! 欢迎刊登广告!  
欢迎使用 nloe@vip.163.com 邮箱投稿。