

# 免光纤式太阳光室内照明系统的设计

李英春<sup>1</sup>, 南艳子<sup>2</sup>, 艾春艳<sup>1</sup>, 张洗玉<sup>1</sup>

(1. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 咸阳市特种设备检验所, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 光纤式阳光输送机作为太阳光直接照明系统, 相对于普通的光-电-光方式已经使得太阳能利用率大幅度提高; 但是在工程实践中因为光纤传输损耗大、成本高又成为推广应用技术瓶颈。为此本文提出了一种免光纤式太阳光直接照明系统, 主要由聚光调光、导光、散光三部分构成。首先由聚光-调光器将平行太阳光汇聚后再调节成增强高亮度平行太阳光定点输出, 再由极坐标式导光镜结合光电跟踪将高亮度平行太阳光定向反射, 最后由处于光路上的漫反射镜均匀的散射至室内各个角落。本系统利用光路变换通过空气介质完成室内太阳光直接照明目标, 将其传输效率提高到 100%, 同时又使得成本下降为原来的 1/3, 为太阳能高效率推广应用提供了技术支持。

**关键词:** 光学设计; 室内照明; 聚光器; 定点输出; 信号采集器

中图分类号: TU113.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0150-05

## The design of free fiber type solar light indoor lighting system

LI Yingchun<sup>1</sup>, NAN Yanzi<sup>2</sup>, AI Chunyan<sup>1</sup>, ZHANG Xiyu<sup>1</sup>

(1. School of electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. Xianyang special equipment inspection institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** Compared with the ordinary light-electricity-light mode, the optical fiber type sunshine conveyor, which is of the sunlight direct lighting system, makes solar energy utilization rate increase significantly. But it is difficult to application for the optical fiber transmission loss and high cost in the engineering practice. This paper proposes a kind of optical fiber type free sunlight direct lighting system mainly composed of three parts: concentrating light, guiding light, scattering light. To begin with, the spotlight-dimmer gathers the parallel sunlight and then adjust it into the enhanced parallel sunlight, which is fixed output. Moreover, the enhanced parallel sunlight is directional reflected by the guiding light mirror with polar coordination. Finally, the diffusing light mirror in the light road will evenly scatter light into the indoor corners. This system achieves the indoor solar direct illumination target by using optical path conversion through air medium and the transmission efficiency is improved to 100%. At the same time, it makes the cost reduce by 1/3, providing the technical support for the generalization and application of solar energy with high efficiency.

**Key words:** optical design; indoor lighting; condenser; designated output; signal collector

自 1973 年发生第一次能源危机以来, 绿色可再生能源的使用开始逐渐进入能源领域。国际上和一些发达国家对照明节能特别重视, 并提出了照明节能的举措。美国环保局于 1991 年首度提出了绿色照明新理念, 而后开始大力推进绿色照明工程的实施。其使得世界上很多国家也开始相继制定照明节能政策和照明节能标准以及具体技术对策<sup>[1-2]</sup>。如今, 在一些国家中已取得了显著的效益。

我国也从 1993 年开始准备启动绿色照明工程,

并于 1996 年正式开始实施了《中国绿色照明工程实施方案》<sup>[3-5]</sup>。

绿色能源中的太阳能以其分布广泛、清洁无污染而成为研究热点。但到目前为止, 日常生活中人们对于太阳光的利用几乎还是停留玻璃窗、天窗的透射基础上。常用的太阳光照明方式有两种: 一是光伏发电后照明的方式(即光-电-光); 二是利用光纤、光导管传导照明。虽然这些方式设计结构简单, 但是对于太阳光的利用效率低、成本高等难以大量推广应用。为了解决实际应用问

题, 阳光电子研究所研制出了一种新型免光纤式太阳光直接照明系统。

## 1 免光纤式室内照明系统构成

在研究分析了国内外室内照明设施的基础上, 本文设计了一种新的照明系统, 即聚光—导光—照明系统(如图1所示), 主要由聚光调光、导光、散光三部分组成。本系统并未采用光纤、光导管等传输媒介, 而是直接通过光路变换利用空气介质作为传输途径。具体设计为: 利用共焦点、同光轴、面积成一定比例的两块正菲涅耳透镜1、2将太阳光汇聚成一束高亮度的平行太阳光S1, (且要始终保证菲涅耳透镜的光轴平行于太阳光(由配套1#信号传感器实现)), 此方式可以提高太阳光强度达10倍左右。然后将增强后的平行太阳光打到带极坐标式跟踪的导光镜上, 再经导光镜反射后结合信号采集器2定向投射到露天厂房、商场、室内农业房及病房等白天也需要太阳光光照的地方。而为了使室内照度均匀, 还可以利用散光装置将太阳光分散, 从而实现室内的直接照明。

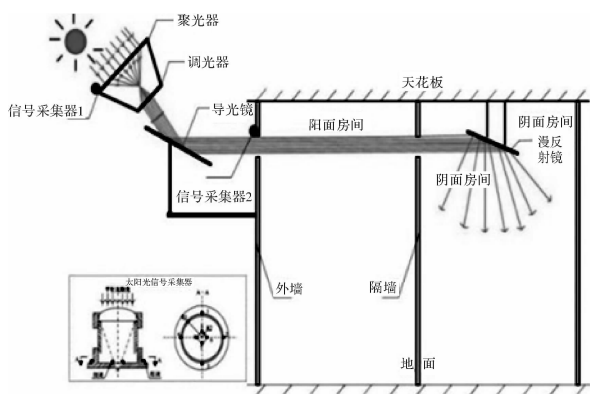


图1 系统原理图

Fig. 1 System Schematic

在室内照明系统设计中, 由于太阳光的不稳定和时变性, 使得直接利用太阳能照明效率低且无法满足要求。但为了达到满意照度就必须采取措施提高单位面积上的光通量。为此就必须对太阳光进行汇聚结合光路变换实现定向照明。

### 1.1 聚光调光设计

菲涅耳透镜具有透射效果好、成本低、厚度薄及侦测距离远等特点。所以本系统是利用正菲涅耳透镜来聚光, 增强光照度。在具体应用之中, 选取菲涅耳透镜1和菲涅耳透镜2的面积比例为3:1, 则根据照度公式可以得出:

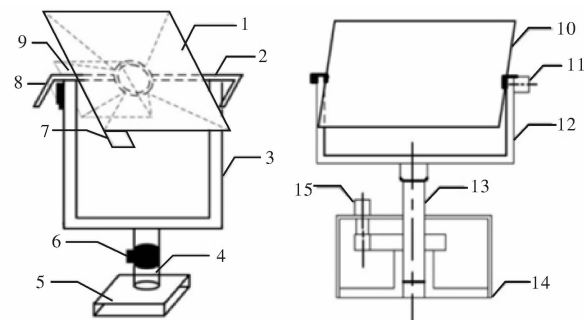
$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{1 \times 1}{0.3 \times 0.3} = 11.1 \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  为入射光通量, m;  $A$  为被照表面的面积,  $m^2$ 。

菲涅耳透镜1、菲涅耳透镜2汇聚调光之后, 可使太阳光亮度提高10倍左右。

考虑到聚光时太阳光时刻在变换方向, 对此所设计的机械调整结构应能满足三维立体转动。其中机械调整机构采用方位-俯仰跟踪方式, 由方位角调整机构和高度角调整机构组成, 以地平面作为参考面, 水平轴垂直于地面, 受底座支撑。垂直轴与水平轴垂直, 为一个类似于长方体形状的不锈钢架。机械调整机构的三维图如图2中(a)所示, 方位角调整机构固定在底座上, 高度角调整机构通过U型支架与水平轴连接, 支撑太阳光采集器和调光器的重量。方位角调整机构由东西方向步进电机、水平轴等组成, 步进电机安装在水平轴上, 通过输出轴驱动方位角变更。高度角调整机构由南北方向步进电机、垂直轴等组成, 步进电机安装在U型支架上, 利用输出轴驱动高度角变更。这种跟踪装置结构紧凑, 承载能力大, 调整方便, 能实现对太阳的方位角和高度角的跟踪。聚光部分采用不锈钢将聚光镜和调光镜封装固定在垂直轴上, 可防止尘埃进入透镜槽内影响聚光效果。底座由密度较大的不锈钢组成, 承受整套系统的重量, 并担负抵抗恶劣天气的能力。



1-聚光镜; 2-垂直轴; 3,12-U型支架; 4-水平轴; 5,14-底座;  
6,15-东西方向电机; 7-信号采集器1; 8,11-南北方向电机;  
9-调光器; 10-导光镜; 13-主轴

(a) 聚光器机械图

(b) 导光镜机械图

图2 系统机械结构设计

Fig. 2 Mechanical structure design of the system

### 1.2 导光设计

类似于聚光部分设计, 导光部分包括导光板本身, 信号采集器2, 极坐标跟踪<sup>[6]</sup>装置等。聚光部分的高亮度汇聚平行光实现定点输出到导光板上后, 导光板结合设定照明位置处的2#信号采集器, 调节自身使光线始终定向的传输。

导光板自动跟踪系统中,为了简化运算算法,精简硬件装置,减少成本,而采用立式转动跟踪装置,如图 2 中(b)所示.跟踪器机械结构为:通过固定在底座上的大齿轮与小齿轮啮合,且小齿轮与东西方向电机的输出轴连接,主轴与支撑轴承分别安装在底座的上面.将支架安装在主轴上方,南北方向电机的输出轴与通过导光镜中心的转动支架相互连接,实现南北方向角度调整.当太阳的光线发生偏离时,南北方向角度校正和东西方向相似.先从控制部分发出控制信号,然后驱动东西方向电机带动小齿轮的转动,从而达到东西方向的角度变更.

### 1.3 散光设计

本文散光设计是利用常见的凸面镜安装于天花板上,将导光镜输送过来的增强平行太阳光分散到室内空间.

光在传播过程中会发生反射、投射与吸收现象.室内的反射材料也会影响扩散反射的程度.用定向度表示为

$$D = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max}} \quad (3)$$

式中:  $D$  为定向度;  $L_{\max}$  为某一方向的最大亮度值;  $L$  为其它方向上的亮度值.当  $L = L_{\max}$  时,沿各个方向亮度均相等,则  $D = 0$ , 为纯漫反射.

当  $L = 0$  时,即只有一个方向上有亮度,其他方向均无亮度,则  $D = 1$ , 为纯定向反射.对于所有材料,其  $D$  值均在  $0 \sim 1$  之间,所以选择合适的室内墙壁材料,可以将光线以漫反射的方式找到屋子中,且光照均匀、绿色环保、健康.

表 1 材料有不同的反射率、透光率与吸收率

Tab. 1 Different reflectance, transmittance and absorption rate of different material

材料	透光率 $T/\%$	反射率 $\rho/\%$	吸收率 $\alpha/\%$
透明无色玻璃	89~91	8	1~3
墨玉大理石	0	8	92
灰砖	0	24	76
大白粉刷面	0	76	24
白色水磨石	0	70	30

从表 1 可以看出,大白粉刷面和白色水磨石可得到较高反射光,灰砖反射光很少,要产生一定的亮度就需较高照度<sup>[7]</sup>.其优化方式为:一是采用大白粉刷面,二是通过透明无色玻璃将光投射进室内.

## 2 控制系统设计

系统上电后 STC12C5A60S2 处理器开始初始

化操作,其操作主要包括:工作时钟设置初始化、系统实时时钟初始化、PWM 输出初始化等几个部分.

### 2.1 系统跟踪方案设计

太阳光直接增强照明系统的聚光器采用光电跟踪和视日运动轨迹跟踪<sup>[8]</sup>两种方法,如图 4 所示.

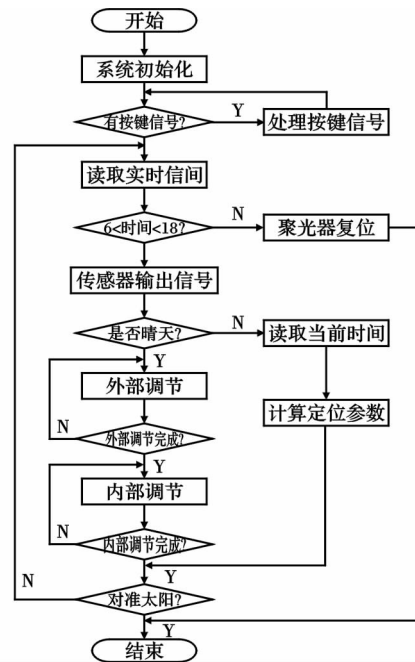


图 4 聚光跟踪控制流程图

Fig. 4 Flow chart of Condenser tracking controlling system

光电跟踪在阴天、雨天或者晚上的情况下系统停止工作.对于光电跟踪控制系统,只要天气正常且在系统工作的时间内,系统就会自动启动光电跟踪工作模式,其中太阳光信号采集器主要是由位于 4 个方向的内外总共 8 个光敏元件组成.其工作流程是:当系统上电之后,首先读取阳光传感器外部粗调单元东西方向太阳光信号差值,如果差值大于  $\Delta 1$  时,东向光敏电阻输出的值大于西向光敏电阻输出的 AD 值,则系统驱动聚光器向东动作相应的位移,否则聚光器向西动作相应的位移;东西向调节结束后,系统会读取阳光传感器的外部粗调<sup>[9]</sup>单元南北方向的差值进行进一步控制.如此该跟踪系统的外部粗调单元的控制结束<sup>[10]</sup>.同时,系统开始读取内部细调单元采集信号,其流程和外部粗调单元调节控制方式一致.

视日运动轨迹跟踪方法主要是基于当地实时时间与经纬度来确定,通过专用计算公式进行运算,那么聚光器动作角度就可以确定.

为了使导光镜能够将高亮度平行太阳光定向输送到需要照明的场所,其控制方式主要采取光

电跟踪和极坐标式跟踪。由于太阳在东西方向和南北方向上的运行变化规律相似,现以太阳光南北方向运行轨迹为例,当太阳的高度角发生变化时,为了得到定向的反射光线,导光镜的高度角和太阳的高度角之间成一定的关系。如图5所示。

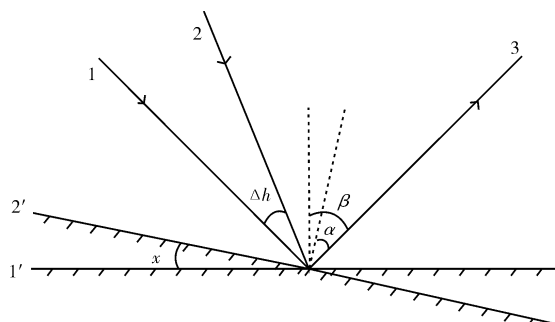


图5 导光板动作示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light guiding plate movement

图中当入射角为 $\beta$ 的高亮度平行太阳光由位置1变到入射角为 $\alpha$ 的位置2时,即前后角度变化为 $\Delta h$ 时,为了能够使反射光线仍然从位置3射出,则其导光镜就必须由 $2'$ 移动 $x$ 角度变到 $2'$ 。聚光器是实时跟踪太阳的,也就是其运动轨迹和太阳的运动轨迹相似,因此只要将导光板的角度调整为太阳高度角和方位角的 $1/2$ 再结合反射回路上的太阳光信号采集器2就可以实现定向输送。

2015年4月13日对面积为 $6 \times 6 \text{ m}^2$ ,高度为4 m的阴面实验室进行试验测量,得到了如图6所示的一组数据图表。以传统的36 W日光灯(6支)照度1年点灯4 380 h的用电电费(以使用时间365 d,每天点灯12 h,西安电费单价:0.56元/1度电)为614元。教室(阅览室)照明要求照度值300 LX,以14点为例,经聚光器汇聚太阳光可以照亮4个同样大小的实验室。尽管聚光器的初投资比较大,但运行费用低,每年电费要节省约400元,无论是在节能上还是在经济效益上,聚光器的优势均是显而易见的。

## 2.2 部分硬件电路设计

由于单片机是跟踪系统的核心,由它判断并输出执行,而经过实验证明,本文选取的单片机STC12C5A60S2完全满足跟踪及处理要求并出色的完成了任务。本实验为了调试方便,使用了MX232集成芯片,将标准RS232信号转换为TTL的RS232信号。时钟系统采用的芯片是DS1302,可提供秒、分、时、日、星期、月和年,一个月小于31 d时可以自动调整,且具有闰年补偿功能。工作电压宽达2.5~5.5 V。采用双电源供电(主电源和备用电源),可设置备用电源充电方式,提供

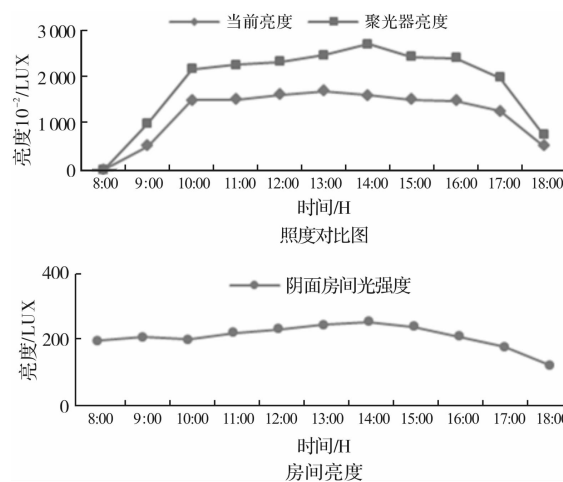


图6 实验数据图

Fig. 6 The experimental data of FIG

了对后背电源进行涪细电流充电的能力。LM7805作为电模块稳压芯片,电机驱动模块主要采用2片BTN7971组成一个完整的H桥驱动电路驱动直流电机,其中,OUT端分别接电机的两端;IS端接下拉电阻,用于配置IS端输出电压的范围;MOTOR\_PWM\_A与MOTOR\_PWM\_B,分别输出非零占空比的PWM和零占空比的PWM,保证左右半桥上下背各有一个导通,组成一个回路;通过MOTORCURRENT端间接采集并计算得到的电流,为通过左或右半桥上背P沟道MOSFET管的电流;SR引脚通过下拉电阻接地,用于调节MOSFET管开关频率,这里接5.1 k $\Omega$ 电阻,BTN7971的开/关时间分别为4.4/3.4  $\mu\text{s}$ 。另外,由于BTN7971内部没有光电隔离,故在与MCU接口时串联10 k $\Omega$ 电阻,防止驱动电路发生击穿等故障时损坏与其相连接的MCU等器件。

本系统的电路控制部分主要是通过信号采集器对当时的环境光照进行判断,若其光照条件适合光电跟踪,通过控制芯片与时钟模块的相互配合驱动电机,使得聚光器和导光器能够达到室内定向照明的目的。系统部分硬件电路设计图如图7所示。

## 3 结论

综上所述,可以得出以下结论:通过导光镜将光输送到预定的照明终端,是可以达到可靠且高精度的室内照明要求;利用空气介质作为传输媒介,免去了高成本的光纤材料,并提高了本系统的性价比;通过改进导光板的机械结构,已经可以实现小误差的太阳光定向传输;整体系统达到了照明效果好且绿色环保的要求。

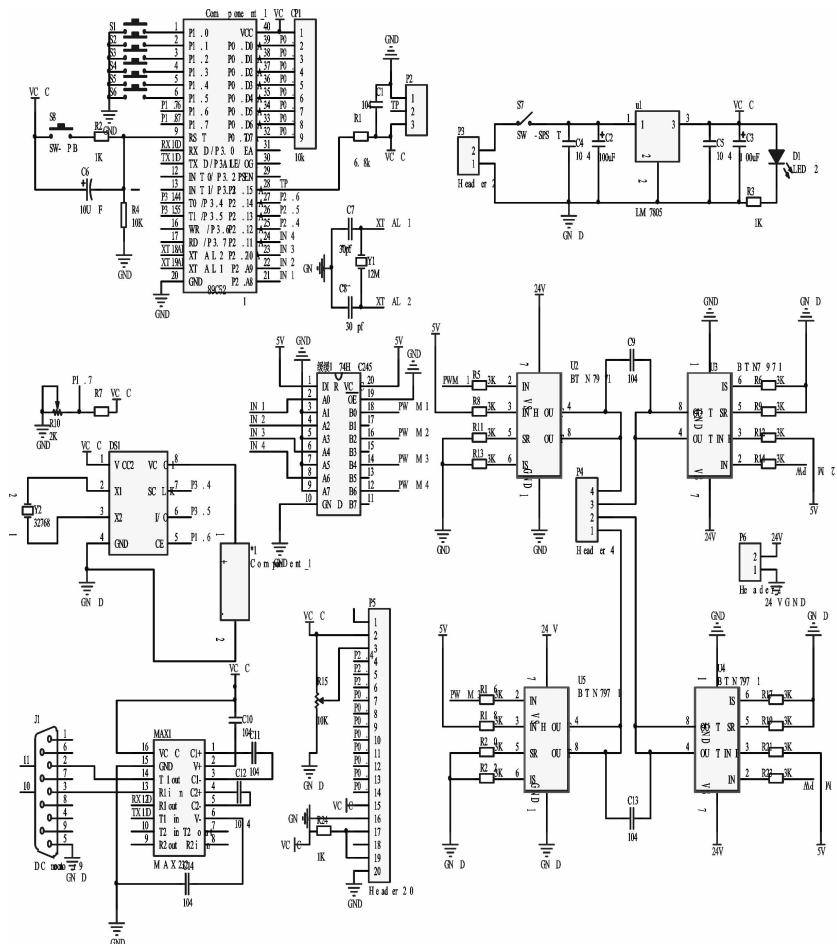


图7 部分硬件电路图

Fig.7 Part of the hardware circuit diagram

## 参考文献 References

- [1] 赵建平, 张绍纲, 李景色, 等. 推动绿色照明实施的重大举措: 国标《建筑照明设计标准》颁布实施[J]. 建筑电气, 2005(3):23-25.  
ZHAO Jianping, ZHANG Shaogang, LI Jingse, et al. The importance movement of pushing the green lighting implemented[J]. Building Electricity, 2005, (3):23-25.
- [2] 张绍纲. 实施绿色照明的技术政策[C]//第九届全国建筑物理学术会议: 绿色建筑与建筑物理, 南京, 2004:16-21.  
ZHANG Shaogang. The implementation of green lighting technology policy[C]//The 9th national conference on physical academic buildings: Green building and building physics, Nanjing, 2004:16-21.
- [3] 孟江红. 绿色照明的理念及应用[J]. 能源与节能, 2011, 31(8): 42-43.  
MENG Jianghong. Application and Idea of Green Illumination[J]. Energy and energy conservation, 2011, 31(8): 42-43.
- [4] 蔡文娜. 绿色照明理念设计[J]. 黑龙江科技信息, 2011, 14(27): 269-270.  
CAI Wenna. application and idea of green illumination [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011, 14(27):269-270.
- [5] 于甜甜. 高速公路隧道照明系统节能控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
YU Tiantian. Study on energy-saving control in the lighting system of highway tunnel[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [6] 宁铎, 姚娜, 姚君霞, 等. 极坐标跟踪式阳光输送机的研究与设计[J]. 工程设计学报, 2014, 21(4): 362-366.  
NING Duo, YAO Na, YAO Junxia, et al. Research and design of the sunlight conveyer with polar coordinate tracking[J]. J. of Engineering Design, 2014, 21(4):362-366.
- [7] 江予新. 建筑物泛光照明的应用条件和注意事项[J]. 光源与照明, 2001, 17(3):5-8.  
JIANG Yuxin. Building floodlighting application conditions and precautions[J]. Lamps and Lighting, 2001, 17(3): 5-8.
- [8] 喻龙昌. 太阳能自动跟随控制系统的设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.  
YU Longchang. Design of solar automatic tracking control system[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [9] 李斌. 碟式斯特林太阳能热发电系统中跟踪系统的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.  
LI Bin. Reserch of tracking system in dish stirling solar thermal power system[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2013.
- [10] 姚君霞, 宁铎. 公路隧道太阳光直接增强照明系统的设计[J]. 应用光学, 2014, 35(2):230-236.  
YAO Junxia, NING Duo. Design of sunlight direct-enhanced illumination system in highway tunnel [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2):230-236.

(编辑 吴海西)