

# 组合式 LED 自由曲面前照灯的近光配光设计与仿真

罗秉东 王亚军 宋宁亮 孙天锡

(厦门大学电子科学系; 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文从汽车用前照灯国标 GB25991—2010 出发, 在已知光源属性的前提下, 利用 RefCAD 设计了适用于高亮度白光 LED 的自由曲面反射器, 将多套反射系统组合成汽车前照灯, 并通过 TracePro 仿真模拟, 分析各测试点、区域的照度值, 其设计结果能较好地符合国标对近光的要求。该方法能更充分发挥 LED 的优点, 提高了光能利用率, 且大大优化和节省了设计空间。

**关键词:** 自由曲面; LED; 配光; TracePro; 近光灯

## The Optical Design and Simulation of Modular LED Freeform Reflector Dipped Headlight

Luo Bingdong Wang Yajun Song Ningliang Sun Tianxi

(*Department of Electronic Science, Xiamen University; Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Xiamen 361005*)

### Abstract

In this paper, a kind of car Head lamp integrating freeform reflectors for bright white LED is presented. Complying with the National Standard GB25991—2010 and considering light source properties known, at first, the freeform reflector is designed with RefCAD, and then several reflector models are integrated into a car head lamp model. The illumination values of the test points and regions are simulated with Tracepro. The simulation results show that it meets the requirement of low beam-GB. This design takes the advantage of LED, increases the utilization of optical energy, and greatly optimizes and saves the design space.

**Key words:** freeform reflector; LED; light distribution; TracePro; dipped headlight

## 1 引言

现代汽车车灯主要采用卤素灯、HID 灯等传统灯具, 这些灯虽然光效比较高, 但其能耗大、响应速度慢、光能利用率低的缺点不容忽视。与传统的照明光源相比, LED 具有许多优点, 由于它的发光原理, 使得它的工作寿命比卤素灯和 HID 灯都要长。此外, LED 在抵抗机械应力方面具有显著的优势, 在设计上 LED 可以做到结构紧凑, 可以实现灯

具的最优化设计, 减轻重量, 节省空间。在车灯应用上, 用 LED 取代传统光源是目前的主流趋势<sup>[1]</sup>。

通常实现前照灯的配光主要有两种方式: 反射式和投射式, 目前最新设计的灯具大多采用高光能利用率的自由曲面反射式系统近光灯<sup>[2]</sup>。自由曲面反射器的原理是将反射面分割成许多不规则形状小反射面, 每个小反射面都具有不连续的曲率, 贡献所需光照度分布的一部分, 把所有小曲面反射的照度分布叠加在一起即可达到最终所需要的光照度分布。由于自由曲面反射器无法用数学方程来描述,

基金项目: 福建省重大科技项目资助 (2006H0092)

因此, 我们利用光源映像法的思想, 合理地反射基础面进行划分和调整, 并最终得到符合国标要求的照度分布。

目前, 在车灯传统光源反射器的基础上, 国内许多研究小组对其进行了相关研究。比如, 杨良等提出了多曲面车灯设计流程及方法<sup>[3]</sup>, 苏胜君等通过计算机进行了反射镜曲面建模设计与仿真的研究<sup>[4]</sup>, 余桂英等对采用反射式自由曲面的 LED 汽车前照灯高效抛物反射器进行了研究<sup>[5]</sup>, 使 LED 逐渐向车灯制造产业渗透, 但总体上在 LED 车灯设计特别是在自由曲面反射灯的设计上还非常薄弱。本文基于国标规定光照度分布, 在自由曲面反射器方面开展了深入研究, 其中重点介绍了 LED 自由曲面反射器的设计组合步骤与技巧, 并利用软件进行建模及模拟仿真, 同时采取新型组合方式使设计兼顾性能提升和结构优化。

## 2 基础面和光源的选择

### 2.1 基础面

为了提高光能的利用效率, 基础反射面采用半面旋转抛物面, 将 LED 中心置于抛物面的焦点  $f$  上 (见图 1)。

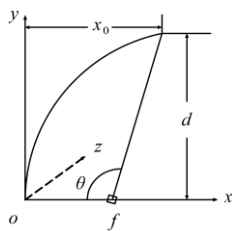
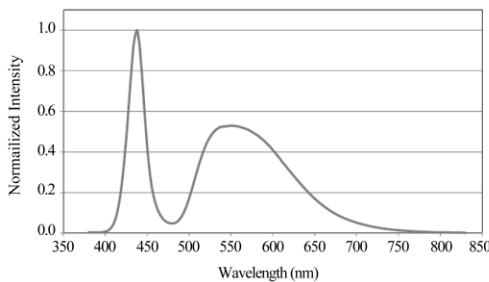


图 1 抛物面几何示意图

图 1 中旋转抛物面方程为  $y^2 + z^2 = 4fx$ ,  $d$  和  $\theta$  分别为反射镜的出光口径半高和抱角,  $x_0$  为反射面的深度, 则:



$$\begin{cases} d = \sqrt{y^2 + z^2} = 2\sqrt{fx_0} & (1) \\ \text{tg}\theta = d/(f - x_0) & (2) \end{cases}$$

选择光强分布为朗伯型的 LED 光源, 发光面法线方向光强最大为  $I_0$ , 光线与法线方向为  $\pi/2 - \varepsilon$  时光强为  $I_\varepsilon = I_0 \cos \varepsilon$ , 则其总光通量为:

$$\Phi_0 = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_0 \sin\beta \cos\beta d\alpha d\beta = \pi I_0 \quad (3)$$

被反射器反射的光通量为:

$$\Phi = \int_0^\varepsilon \int_\sigma^{2\pi-\sigma} I_0 \sin\beta \cos\beta d\alpha d\beta + \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_0 \sin\beta \cos\beta d\alpha d\beta \quad (4)$$

假设反射器的反射率为 1, 则其光能利用率  $\eta$  为经过反射器后出射的光通量与光源总光通量之比, 即

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(\theta - \sin\theta \cos\theta)}{\pi} \\ &= \frac{1}{2\pi} \left\{ 2\arctan\left(\frac{4df}{4f^2 - d^2}\right) - \sin 2\left[\arctan\left(\frac{4df}{4f^2 - d^2}\right)\right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

从理论上分析, 反射镜的抱角越大, 光源的利用率越高, 但会给反射镜的加工制造带来困难。当反射镜的抱角超过  $110^\circ$  时, 光能利用率并不会随着抱角的增大继续显著提高。将反射镜的抱角  $\theta$  限制于  $110^\circ$ , 既能得到较高的光能的利用率  $\eta$ , 又不至于使反射镜的加工制造过于困难<sup>[6,7]</sup>。由此可得到反射镜的出光口径半高与焦距的关系  $d = 2.856f$ , 当取  $f = 15\text{mm}$  时, 为方便起见, 取  $d = 45\text{mm}$ 。

### 2.2 光源

本文采用 Philips Lumileds 公司的大功率汽车前照灯 LED-LUXEON Altilon LED, 该光源为冷白光朗伯型 LED, 最大光通量达到 850lm。LUXEON Altilon 经过设计和测试, 可承受极端的温度条件, 并且能够简化光学设计、方便制造和装配。图 2 分别为其光谱和光强分布图。

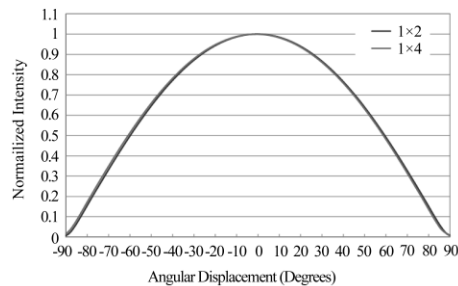


图 2 LUXEON Altilon 光谱和光强分布

### 3 近光灯设计

#### 3.1 近光灯的配光标准

前照灯的配光要求比较高，具有较高的设计难度，我国最近公布了 LED 前照灯配光标准

(GB25991—2010)<sup>[8]</sup>。国标规定，对近光灯来说，在 25m 外接收屏上要有明显的明暗截止线，V-V 线左侧应为水平直线，右侧为与水平线向上成 15° 的斜线 HV - H3，或与水平线向上成 15° 斜线至水平线垂直距 25cm 处转向水平的折线 HV - H1 - H2 - H4，如图 3 所示。

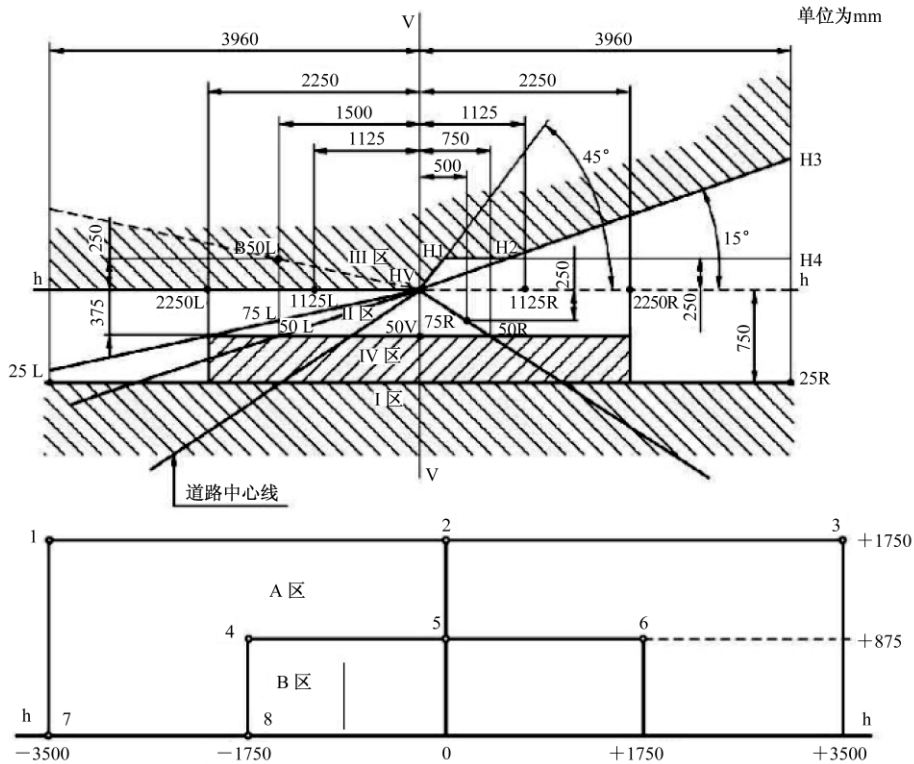


图 3 国标近光灯配光屏

#### 3.2 反射面组合及设计

由于 LED 是面光源，因此不能采取背向反射面的方法，而是将 LED 芯片发光面面向半反射面并旋转一定角度，使得反射效率达到最大。此外，由于反射面左右边缘 10mm 部分反射效率很低且浪费空

间，因此进行切除。为了达到足够的照明效果，本文利用 LED 小尺寸的优点，采用多套自由曲面组合来实现汽车前照灯中的近光功能。本文采用三套反射系统，并排组合。如图 4 所示。

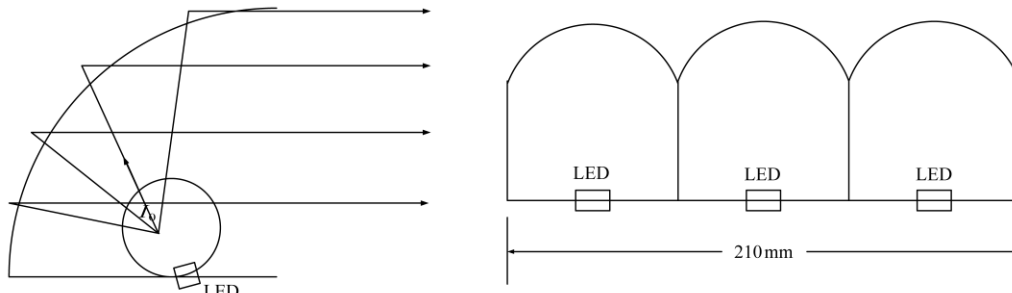


图 4 抛物面半反射面及并排组合示意图

其中左边一套反射系统将产生右 15° 截止线，右一加强左边水平截止线、左边区域及 50R 点的照

度, 中间反射系统产生均匀的光形以满足各点的照度要求。整体尺寸为 210mm × 45mm × 35mm, 利于加工制造。

利用上述得到的旋转抛物面数据在 RefCAD 中定义基础面和光源属性, 并对基础面进行分块操作, 根据反射定律和用户设定的光线在屏幕上的投向区

域, 来反求出相应的反射面, 并计算出每块反射面在屏幕上的投射光线。

在调整各子块光型的过程中, 要注意克服杂散光的影响, 尽量降低水平截止线以上的照度, 以免产生眩目光线<sup>[9, 10]</sup>。本文自由曲面的分块和三维模型如图 5 所示。

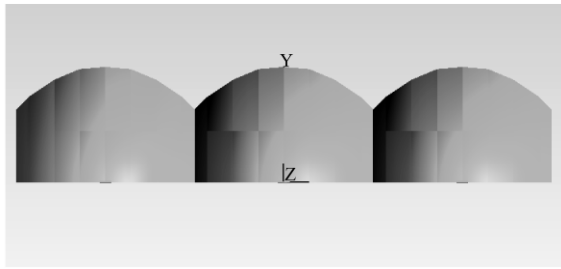
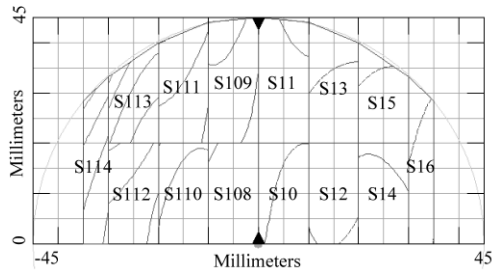


图 5 自由曲面的分块和三维模型

### 4 光学仿真

TracePro 是一套普遍用于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析的光线模拟软件。它可以精确地定义各种实际光源 (如发光二极管、白炽灯、弧光灯、卤素灯等) 的形状和发光特性, 利用其照明模块可实现蒙特卡洛法光线追迹, 以便确定某个指定表面上的光照度、强度或亮度。

自由曲面设计好之后, 导出为 IGES 格式, 将其导入到 TracePro 中组合成近光灯反射系统, 由于导入的模型只有几何属性, 还需设置其材料及光学属性, 本文定义反射器的材质为 PMMA, 表面的光学属性为光学镜面, 反射率为 85%, 并调用自建的光源模型进行仿真。图 6 为 LED 光源和导入的自由曲面的光线追迹图。

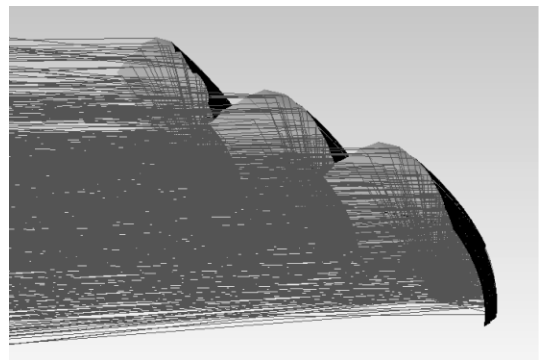


图 6 LED 光源和自由曲面的光线追迹

在光源正前方 25 米处设置接收面, 接收面的面

积为 15000 × 6000mm<sup>2</sup>, 首先分别追踪三组反射系统各自光源发出的光线, 仿真结果如图 7 所示。三个反射系统照度分布较为理想, 左边反射系统产生清晰 15°截止线, 中间反射系统使整体照度均匀分布, 右边反射系统加强了左边区域照度和 50R 点照度值。

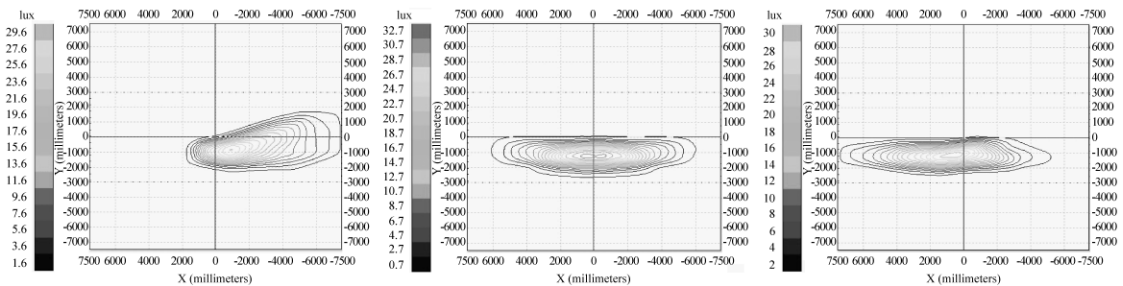


图 7 左、中、右三组反射系统模拟照度图

同时追踪三组系统光源发出的光线, 根据仿真的结果检查各测试点和测试区域是否符合国标规定,

对不达标的照度值, 在 RefCAD 重新调整子系统中各子块<sup>[11]</sup>, 再导入 TracePro 中进行模拟, 直至得到

符合要求的照度值。模拟实验最终追迹了五百万条光线，得到的接收屏上的照度分布如图8所示，水平和15°截止线十分清晰，整体照度无明显陡变，表1列出了各测试点及测试区域的照度值，能够较

好地符合国标规定。仿真最终结果总光通量为841.83lm，入射光线396.5万条，入射光通量与发射光通量之比即为系统光能利用率，达到79.3%，比传统投射式前照灯更高。

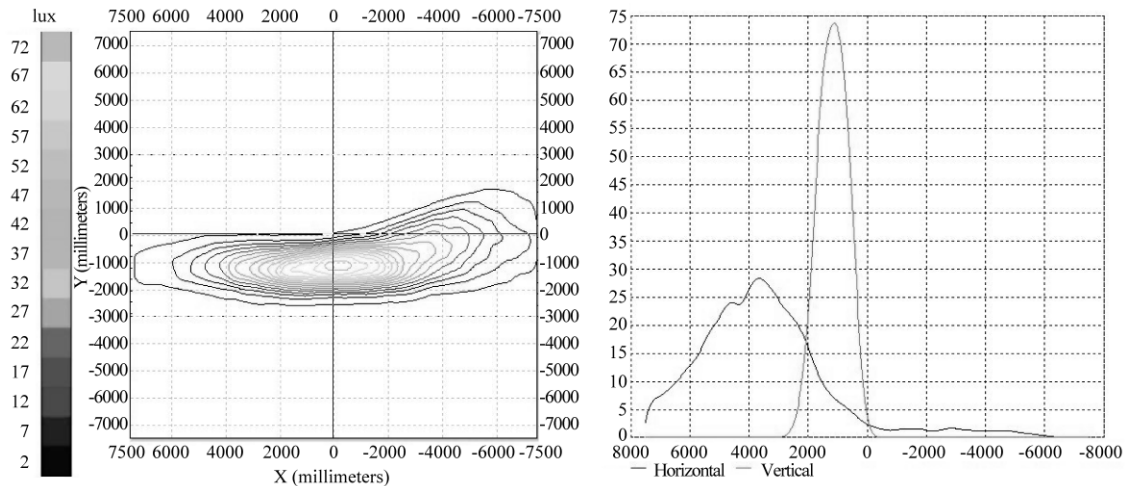


图8 组合后模拟得到的接收屏照度分布图

表1 近光配光国标要求及仿真结果

点、区域	水平距离 (mm)	垂直距离 (mm)	标准照度/ lx	模拟结果/ lx
B50L	L1500	U250	$\leq 0.4$	0.29
75R	R500	D250	$\geq 12$	24.34
75L	L1500	D250	$\leq 12$	9.36
50R	R750	D375	$\geq 12$	37.65
50L	L1500	D375	$\leq 15$	14.07
50V	0	D375	$\geq 6$	28.79
25L	L3960	D750	$\geq 2$	21.72
25R	R3960	D750	$\geq 2$	29.04
I区任何点	-	-	$\leq 2E_{50R}$	$\leq 73.13$
III区任何点	-	-	$\leq 0.7$	$\leq 0.52$
IV区任何点	-	-	$\geq 3$	$\geq 22.02$
点1、2、3	-	-	点1+2+3 $\geq 0.3$	0.44
点4、5、6	-	-	点4+5+6 $\geq 0.6$	1.12
点7	-	-	0.7 $\geq$ 点7 $\geq$ 0.1	0.48
点8	-	-	0.7 $\geq$ 点8 $\geq$ 0.2	0.56

## 5 结论

本文在已知光照度分布和光源特性的前提下，利用RefCAD构造出适合LED光源的自由曲面反射器，并利用TracePro软件组合模型，进行光线追迹，仿真的结果较好地满足GB25991—2010的对近光灯的配光要求，由于没有传统投射式的挡光板，因此该系统理论光能利用效率大大提高，达到79.3%。

当前LED汽车前照灯配光设计已不再单纯采取投射式或反射式，越来越多的设计采用两种形式交叉的复合结构，使得车灯在LED芯片光效没有明显提高的条件下具有较高的光能利用效率和更优化的设计空间，满足车灯日益提高的安全、审美和节能要求。本文采取的组合方式使设计更加紧凑合理，发挥了LED尺寸较小的优点，节省了设计空间，为未来LED应用于汽车车灯照明的配光设计提供了一个参考。

## 参考文献

- [1] K Eichhorn. LEDs in Automotive Lighting [J]. SPIE, 2006, 6134: 1~6.
- [2] 郑志军. 汽车前照灯近光灯系统的比较 [J]. 照明工程学报, 2006, 6: 45~47.
- [3] 杨良. 汽车前照灯反射器自由曲面的设计步骤和技巧 [J]. 照明工程学报, 2001, 12(4): 13~15.
- [4] 苏胜君, 陈祥熙, 施伟斌, 朱维涛. 基于大功率LED的汽车多椭球前照灯设计 [J]. 器件制造与应用, 2007, 8: 673~676.
- [5] 余桂英, 金骥. LED汽车前照灯高效抛物反射器的研究 [J]. 红外技术, 2009, 6: 367~370.
- [6] 谭晶, 孙胜, 赵振铎. 汽车前照灯反光镜拉深毛坯形状优化设计 [J]. 山东大学学报, 2002, 32(3): 246~249.
- [7] 黄佐贤. 现代汽车灯具 [M]. 北京: 长虹出版公

- 司, 2003.
- [ 8 ] 中国国家标准化管理委员会. 汽车用 LED 前照灯 GB25991—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [ 9 ] 胡尚斌, 高爱华, 何小庆, 陆治国. 自由曲面前照灯的近光配光设计 [J]. 灯与照明, 2011, 35 ( 1 ): 1 ~ 5.
- [10] Kong L B, Cheung C F, Jiang J B, To S, Lee W B. Characterization of freeform optics in automotive lighting systems using an Optical-Geometrical Feature Base Method [J]. Optik, 2011, 122 ( 4 ): 358 ~ 363.
- [11] 李志扬, 欧阳祥波. 多曲面汽车前照灯反射器的设计 [J]. 机电工程技术, 2004, 33 ( 12 ): 38 ~ 40.

## NDRC/UNDP/GEF 中国逐步淘汰白炽灯、加快推广节能灯项目 中国绿色照明发展战略研讨会——中国绿色照明发展战略研究 在北京隆重召开

2012 年 9 月 14 日, 由中国照明学会和北京能环科技发展中心主办的 NDRC/UNDP/GEF 中国逐步淘汰白炽灯、加快推广节能灯项目: 中国绿色照明发展战略研讨会——中国绿色照明发展战略研究在北京隆重, 会议目的旨在探讨在新的形势下国内外绿色照明的发展现状, 并提出中国绿色照明的发展方向。

国内有关部门领导及相关企业代表、业界专家及行业知名媒体代表 40 余人参加了此次会议。会议由中国照明学会理事长徐淮主持。

复旦大学张善端副所长作了“中国绿色照明发展现状和战略研究”的精彩汇报, 详细分析了中国绿色照明发展的战略, 并提出了“建立 LED 照明协同创新中心”、“发展照明专业人才”、“大幅增加 OLED 的投入”、“加大绿色照明宣传”等的建议。国家物资节能中心徐培新主任汇报了“小城市和农村地区节能灯推广项目监督评估及高效照明产品推广方案及政策体系研究”, 中国标准化研究院赵跃进研究员汇报了“自镇流荧光灯性能、能效标准修订情况分析”, 国家半导体照明工程研发与产业联盟王滨秋博士汇报了“中国半导体照明推广应用规划”。报告受到了与会专家的广泛认可, 专家及企业代表纷纷建言, 提出了非常宝贵的意见。

对于“中国绿色照明发展战略研究”, 此次会议达成如下共识:

- 1) 要突出中国绿色照明发展战略的目标;
- 2) 要强化中国绿色照明发展战略的地位;
- 3) 要突出中国绿色照明发展战略的作用;
- 4) 要区别中国绿色照明发展战略与规划;
- 5) 要充分吸纳“NDRC/UNDP/GEF 中国逐步淘汰白炽灯、加快推广节能灯项目”各子项目的优秀成果, 并将与会领导、专家、代表的宝贵意见融入其中。

### 关于参加中国逐步淘汰白炽灯主题宣传活动的通知

为了提高能效, 保护环境, 积极应对全球气候变化, 2011 年 11 月 1 日, 国家发改委与商务部、海关总署、工商总局、质检总局联合印发《关于逐步禁止进口和销售普通照明白炽灯的公告》, 决定从 2012 年 10 月 1 日起, 按功率大小分阶段逐步禁止进口和销售普通照明白炽灯。为进一步推动中国逐步淘汰白炽灯路线图落实, 积极调动全民参与, 组织策划了“告别白炽灯泡、点亮绿色生活”系列宣传活动, 包括政府在行动、城市在行动、农村在行动、流通领域在行动、微博接力等内容。2012 年 10 月 17 日在北京中国工程院综合楼将开展“告别白炽灯泡·点亮绿色生活”——政府在行动主题宣传活动, 国家发改委解振华副主任将出席会议并讲话。