2012年6月

文章编号:1000-7032(2012)06-0628-05

# LED 灯表面对流换热系数的测算研究

李劲松<sup>1</sup>,杨庆新<sup>1\*</sup>,牛萍娟<sup>2</sup>,张 献<sup>1</sup>,张建新<sup>2</sup>, 金 亮<sup>1</sup>.李 阳<sup>1</sup>.孙连根<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津 300387;

2. 天津工业大学 大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387)

**摘要:**提出了一种在第三类边界条件下,根据 LED 灯瞬态温度场的变化规律,通过对其表面温度的实际数值 测定来推算 LED 灯表面对流换热系数的快速测定方法。基于对流热平衡理论,设计了一种可以在较高表面 换热强度条件下进行测试的装置,通过实验测定 LED 灯上下表面的温度,结合曲线拟合对实测数据进行数理 分析,得到较宽范围内的表面对流换热系数。实验结果表明:该测试方法简单、实用,测试时间较短(实验准 备与数据测定大约需要 30 min),测试精度较高(数据拟合误差不高于 0.2%),可靠性强,可以用于工程热设 计等多种相关发热体表面对流换热系数的测定。

**关 键 词:**表面温度;表面对流换热系数;对流热平衡;曲线拟合;工程热设计 中图分类号:TN312.8 **文献标识码:**A **DOI**: 10.3788/fgxb20123306.0628

# Research on The Surface Convection Heat Transfer Coefficient of LED Lamp

LI Jing-song<sup>1</sup> , YANG Qing-xin<sup>1 \*</sup> , NIU Ping-juan<sup>2</sup> , ZHANG Xian<sup>1</sup>

ZHANG Jian-xin<sup>2</sup>, JIN Liang<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, SUN Lian-gen<sup>2</sup>

 Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. High Power Semiconductor Lighting Applications System Engineering Research Center of Ministry of Education,

Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

\* Corresponding Author, E-mail: qxyang@ tjpu. edu. cn

Abstract: This paper presented a rapid determination method, which was based on the variation of LED lamp transient temperature field and the third boundary condition. It used the surface temperature measured values of LED lamp to calculate its surface convective thermal transfer coefficient. Based on balance theory of convective heat, we designed test equipment that can work under a higher intensity of thermal transfer conditions of the surface. Experimental results show that the test method is simple and practical, the time is short ( $\sim 30 \text{ min}$ ), and the accuracy is high (< 0.2%) and reliable. It can be used for projects that related to surface thermal convection coefficient measurements.

Key words: surface temperature; surface convection thermal transfer coefficient; convection thermal balance; curve fitting; engineering thermal design

收稿日期: 2012-02-27;修订日期: 2012-04-10

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划(天津市自然科学基金)重点项目(10JCZDJC15400,12JCZDJC28600); 国家高技术研 究发展计划(863 计划)(2010AA03A1A7)资助项目

作者简介: 李劲松(1987 -), 男, 河南商丘人, 主要从事 LED 光电热磁相互作用机理特性分析结合无线电能传输技术综合研究。 E-mail: ljs13702070369@ hotmail.com

## 629

# 1引言

LED 光源的表面对流换热系数是工程热设 计与计算方面一种重要的物性参数,它对 LED 的 封装及散热优化设计有非常重要的参考价值。迄 今为止,国内外对表面对流换热系数的确定方法 已进行了大量研究,提出了多种实验仿真测定或 数值计算方法。文献[1]和[2]是基于温度场建 模仿真,利用热场与流场耦合分析,得到 LED 模 型测量点的温度,然后利用数值分析进行数据拟 合计算。但温度场建模仿真难度比较大,数据计 算比较复杂,并且物理参数多,必然会增大计算误 差。文献[3]和[4]提出了一种数值迭代方法,并 结合对流换热中的经验公式求解。虽然方法比较 简单,但得到的是 LED 表面的综合对流换热系数 不能很好地反映其表面的散热特性,在准确性方 面也有待考证。

本文提出一种利用 LED 灯表面实测温度值 直接推算出表面对流换热系数的快速测定方法, 待测物理量仅是 LED 表面温度。通过使用本文 设计的测试装置,不仅可使表面对流换热系数的 测定范围加宽,还能对其他低导热性能发热材料 的表面对流换热系数进行测定。

# 2 测试原理

设一单层平壁的厚度为 $\delta$ ,其高度和宽度的 尺寸很大,平壁的两侧表面分别维持均匀而一定 的温度,其四周及底面绝热<sup>[5-6]</sup>。LED 灯处在外 界温度为 $t_0$ 的环境中,其刚通电点亮时的表面初 始温度记为 $t_1$ 。测试开始后,随着点亮时间的增 加,由于温差的存在,LED 灯通过上表面与外界 进行热量交换,直至趋于稳定温度 $t_2$ 。设对流热 平衡时表面对流换热系数为 $h_c$ ,热扩散系数为k, 导热系数为常数 $\lambda$ 。如图1所示。

由于 LED 灯在对流热平衡状态下工作,各向 同性且导热系数为常数,则描述热迁移过程的定 解方程组<sup>[7]</sup>为:

微分方程:

$$\begin{split} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} &= k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (0 < x < \delta, t > 0), \\ \bar{\eta} \text{ bh here: } t &= 0, \ T = t_1, \\ \bar{\upsilon} \text{ Phere: } \end{split}$$

$$x = 0$$
:  $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0$   $(t > 0)$ ,

$$x = \delta: -\lambda \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\delta} = h_c T(\delta,t) \qquad (t > 0),$$

$$t = 0;$$
  $T(x,0) = t_1 - t_0$   $(0 \le x \le \delta),$ 

式中, $T(x,t) = t_x(x,t) - t_0$ 为过余温度。





Fig. 1 Schematic diagram of single flat wall heat conduction in the third boundary condition

利用分离变量法求解上述定解方程组,可以 得到 LED 灯无因次温度分布为:

$$\frac{T(x,t)}{T_0} =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin\omega_n}{\omega_n + \sin\omega_n \cos\omega_n} \cos\left(\omega_n \frac{x}{\delta}\right) \exp\left(-\omega_n^2 Q t\right),$$
(1)

其中, $T(x,t) = f\left(Fo,Bi,\frac{x}{\delta}\right), Q = k/\delta^2, \omega_n = f(Bi)$ 为特征值,满足下式:

$$Bi = \frac{h_c \delta}{\lambda} = \omega_n \tan \omega_n \quad (n = 1, 2, 3, \cdots),$$

(2)

Fo 表示傅立叶准则数, Bi 表示毕渥准则数。

经过 t 小时后,每平方米平壁在冷却(加热) 时所释放(吸收)的热量为:

$$\Phi_{x} = \rho c \int_{-\delta}^{\delta} [T_{0} - T(x,t)] dx =$$

$$\Phi_{0} [1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^{2} \omega_{n}}{\omega_{n}^{2} + \omega_{n} \sin \omega_{n} \cos \omega_{n}} \exp(-\omega_{n}^{2} Q t)],$$
(3)

因此,LED 灯上下表面处的温度变化规律为:

$$T_{\delta}(\omega_n, Q, t) = T_n \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2\omega_n}{\omega_n + \sin \omega_n \cos \omega_n} \exp(-\omega_n^2 Q t),$$
(5)

$$T_{0}(\omega_{n}, Q, t) =$$

$$T_{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \omega_{n}}{\omega_{i} + \sin \omega_{n} \cos \omega_{n}} \exp(-\omega_{n}^{2} Q t), \quad (6)$$

 $T_0 = [t_0(t) - t_0], T_{\delta} = [t_{\delta}(t) - t_0]$ 分别为 LED 灯 在 x = 0和  $x = \delta$ 处的温升,可实时测定。如果将 实测到的随时间变化的温升曲线  $T_{\delta}(t)$ 和  $T_0(t)$ 按(5)、(6)两式作最小二乘法拟合<sup>[8]</sup>,即可确定 *Bi*和 *Q* 的值,进而可以求得:

$$h_c = \overline{Bi} \,\overline{Q} \delta c \rho \,, \tag{7}$$

$$k = \overline{Q}\delta^2, \qquad (8)$$

式中, $\overline{Bi}$ 和 $\overline{Q}$ 分别为按上下表面温升曲线进行最 小二乘拟合得到的 $Bi_0$ 、 $Bi_8$ 和 $Q_0$ 、 $Q_8$ 的平均值;c和 $\rho$ 分别为 LED 灯封装底板的比热容和密度。

# 3 实验方法与技术

### 3.1 实验装置

基于上述基本原理设计实验测试装置,如图 2 所示。测试装置主要由调速风机和 2 个稳压室 组成。开始工作时,调速风机送出的气流经风管 进入有强制对流的测试装置,在稳压室 I 中稳压 后,从隔板与试样表面的间隙中掠过,进入稳压室 Ⅱ后从排气口排出。



Fig. 2 The experimental equipment

#### 3.2 实验设计

开始测试前,先将未点亮的 LED 灯试件放入 装置的恒温箱中。测试开始时,开启调速风机以 加快对流换热,最终使 LED 灯在气流温度为 t<sub>2</sub>、 表面对流换热系数为 h<sub>e</sub>的热平衡条件下稳定 工作。

为满足测试条件,保证 LED 散热是严格的一 维导热过程,LED 灯底部及侧面均需严格隔热。 气流的速度大小可根据测试对象的具体情况对风 机的转速进行必要的调整。

LED 灯表面的温度和气流温度由热电偶经

温度检测系统<sup>[9-10]</sup>进行测定。实验时,试件的上 下表面需要分别敷设 4~6 支并联热电偶。为了 避免冷端补偿问题,热电偶的冷端应当直接放置 在主气流中,这样测得的温度实际上即是过余温 度[ $t_0(t) - t_0$ ]和[ $t_s(t) - t_0$ ],从而简化了测试 系统。

本实验采用计算机直接对温度计时采样<sup>[11]</sup>, 可提高测试精度及计算速度,且可在同一时刻进 行多次采样。同时,计算机又可将数据的采集、处 理、测试时间的控制、曲线的拟合、计算结果的输 出等一并完成,大大提高了工作效率。

### 3.3 测试技术

#### 3.3.1 测试时间的确定

LED 灯上下表面的温度是 Bi、Q 和 t 的函数, 且数值模拟计算的结果表明,在一定范围内,不同 Bi 值的无量纲过余温度变化曲线清晰且不交叉, 变化明显。因此,从实验数据拟合的角度来看,应 使测试时间范围处于这一区域内,即 Fo = Qt,使 曲线拟合具有足够的分辨率<sup>[12-13]</sup>。由公式(1)、 (2)、(7)、(8)可得:

$$0.05 < Fo = \frac{kt}{\delta^2} \frac{\lambda t}{c\rho\delta^2} < 2, \qquad (9)$$

其中,导热系数 $\lambda$ 、比热容c和密度 $\rho$ 可事先查得,测试时间t的长短可由计算机自行控制。

3.3.2 测试范围的分析

根据文献[5]的公式  $h_e = 0.66k_f \sqrt{\frac{v}{v_f \delta}}$ (其中  $k_f$ 为空气对流换热系数,v 为风机的风速, $v_f$ 为运 动粘度系数, $\delta$ 为 LED 灯的厚度),通过调节风速 v 的大小,可以实现对 LED 灯表面的对流换热系 数的调节,使其从 5 W/(m<sup>2</sup> · K)以内提高到强制 对流时的 100 W/(m<sup>2</sup> · K)左右。在试件厚度  $\delta$ 相同的条件下,表面对流换热系数的测试范围可 以大大加宽。当风速达到最大值、试件厚度  $\delta$ 取 2 cm 时,表面对流换热系数可测到 20 W/(m<sup>2</sup> · K)以上,即使是一些低导热性能发热材料的表面 对流换热系数也可利用此法进行测定。

4 测试实例数据及影响因素分析

### 4.1 数据分析

根据上述测试原理、测试方法和技术,利用自制的测试装置对某型 LED 灯的表面对流换热系数进行了测定。每次测试实验进行 5 min,每 20 s

进行一次表面温度的测定,共15个测点。每个测 点采样6次,滤波取平均。

设定 LED 灯刚通电点亮时的表面初始温度  $t_1 = 20$  ℃,实测数据的坐标散点图如图 3 所示。



图 3 测定数据的坐标散点图

Fig. 3 Coordinate scatter plot of the measured data

对公式(2)作如下数学分析:离散值 $\omega_n$ 是下 列超越方程的根,称为特征值。

$$\tan(\omega_n \delta) = \frac{Bi}{\omega_n \delta}, \ n = 1, 2, \cdots, \quad (10)$$

其中 Bi 是以特征长度为 $\delta$ 的毕渥准则数。

由此可见,平壁中的无量纲过余温度 $\frac{T(x,t)}{T_0}$ 与3个无量纲的数有关:以平壁厚度 $\delta$ 为特征长度的傅立叶准则数、毕渥准则数及 $\frac{x}{8}$ ,即:

$$\frac{T(x,t)}{T_0} = \frac{t_x(x,t) - t_\infty}{t_0 - t_\infty} = f\Big(Fo, Bi, \frac{x}{\delta}\Big).$$
(11)

残差公式[8]:

$$\vartheta_i = y_i - y_i^*, \qquad (12)$$

其中 y<sub>i</sub>\* 为曲线拟合近似函数。

根据公式(5)、(6)、(7)、(8),利用最佳平方 逼近的近似函数求法,即曲线数据拟合的最小二 乘法,结合试件参数与公式(10)、(11),求得测试 结果如表1所示。为了使误差更小、结果更精确, 采用数据拟合计算时,所选数据为图3中100s 以后的稳定实测数据。结合公式(12),通过对实 测数据进行残差计算,可知图中所选各点的拟合 残差小于0.1%。

另外,还对水泥板及石膏板的表面对流换热 系数进行了测定。

Table 1         Specimen parameters and test results				
Size of test/ m <sup>3</sup>	Density∕ (kg • m <sup>-3</sup> )	Coefficient of thermal conductivity∕ (W ⋅ m <sup>-1</sup> ⋅ K <sup>-1</sup> )	Specific heat/ $(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Surface convection heat transfer coefficient∕ (W ⋅ m <sup>-2</sup> ⋅ K <sup>-1</sup> )
LED lamp encapsulation floor 0. 23 $\times$ 0. 14 $\times$ 0. 01	1 600	180	0.86	5.37
Floor slab 0. 16 × 0. 10 × 0. 02	2 280	1.5	0.82	88.4
Plasterboard 0. 18 × 0. 12 × 0. 03	1 150	0.5	0.88	81.6

表1 试件参数及测试结果

4.2 影响因素分析

在测试过程中, 被测 LED 灯封装底板的密度 和比热要已知,并且精度要足够高。在对 LED 灯 封装底板的厚度进行测量时,要采用游标卡尺进 行多点测量,取平均值作为测量厚度δ。温度的 测量误差对计算结果的影响很大,所以要用计算 机对试件进行自动计时测温、多点检测、多次采样 滤波取平均值。

测试结果表明,只要保证表面温度的测试精度较高,并严格按照上述方法进行实验与分析,拟

合误差一般不高于0.2%。

# 5 结 论

提出了一种在第三类边界条件下,根据 LED 灯瞬态温度场的变化规律,通过对其表面温度的 实际数值测定来推算 LED 灯表面对流换热系数 的快速测定技术,具有测试过程快捷、方法简易可 行、测定范围较宽的优点。测试结果表明:通过合 理地安排实验,本方法可以用于工程热设计等多 种相关发热体表面对流换热系数的测定,但测试 的准确程度还与发热体的其他一些几何与物性参数有一定关系。如何进一步提高测试精度,解决

对流平衡控制以及变物性物体表面对流换热系数 的测量问题,尚需进一步探讨与研究。

### 参考文献:

- [1] Gao Xingyong, Lu Yuxiang. Heating calculation of large-scale circular cylinder steel ingot under third boundary condition [J]. *Hot Working Technology* (热加エエ艺), 2011, 32(5):12-14 (in Chinese).
- [2] Dai Weifeng, Wan Jun, Li Yuesheng. Transient thermal analysis of high-power LED package [J]. Semiconductor Optoelectronics (半导体光电), 2008, 29(3):324-328 (in Chinese).
- [3] Bonda N R, Fang T, Kaskoun K, et al. Physical design and assembly process development of a multichip package containing a light emitting diode (LED) array die [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part B, 1997, 20(4):587-561.
- [4] Chai Weiwei, Chen Qinghua, Li Linghong, et al. Heat dissipation analysis of high power LED connected to copper coated heat sink by soldering [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2011, 32(11):1171-1175 (in Chinese).
- [5] Pang Bo. Thermal Field Analysis of Integrated LED Light Source [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [6] Wang Yutian, Shi Jinshan, Wang Litian. Analysis and calculation on junction LED thermal characteristics in engineering [J]. Semiconductor Optoelectronics (半导体光电), 2007, 15(2):143-147 (in Chinese).
- [7] Ning Zhi, Lu Yong, Sheng Shicheng. The third type of boundary conditions using the projected object surface temperature of the thermal conductivity of the experimental techniques [J]. *Hot Working Technology* (热加エエ艺), 1994, 15(1): 78-82 (in Chinese).
- [8] Ding Lijuan, Cheng Qiyuan. *Numerical Calculation Method* [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2006;143-149 (in Chinese).
- [9] Lv Qianhao. The Study of Array Processing Technology Based on The Vector-sensor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004 (in Chinese).
- [10] Gan Fangjian. Research on Some Problems of Dynamic Characteristics of Robot Based on Multi-axis Force sensor [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003 (in Chinese).
- [11] Jiang Hongmei. Computer control system in the sampling period to determine [J]. Industrial Control Computer, 2005, 11 (3):187-190.
- [12] Rohsenow W M, Hartnett J P, Ganić E N. Handbook of Heat Transfer Fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 1985:124-128.
- [13] Tian Chuanjun, Zhang Xiyan, Zou Jun, et al. Temperature effect on the photoelectric parameter of high-power LED illumination system [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2010, 31(1):96-100 (in Chinese).