

doi: 10.3788/gzxb20144307.0723003

# 双进双出射流水冷大功率 LED 散热系统研究

王志斌, 刘永成, 李志全

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:**针对大功率 LED 存在的散热问题,提出了一种双进双出射流水冷散热器,将其与现有射流水冷散热器的散热效果进行对比,并设计了基于射流水冷的大功率 LED 散热系统实验平台.在散热系统全功率工作条件下,LED 底部温度分布均匀,并且保持在 32℃ 左右,表明散热系统具有良好的均温性能和散热性能,满足大功率 LED 的散热要求.利用极差分析法,得到了水泵和风扇对系统散热效果的影响权重,优化了散热系统的工作功率,得到一组较优的控制水泵和风扇功率的脉冲宽度调制信号.在该组控制信号下,降低了散热系统的功耗,同时保证了系统散热效果,达到了节能目的.

**关键词:**半导体器件与技术;水冷散热系统;大功率 LED;数值分析;射流冲击

中图分类号:TN312.8

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)07-0723003-6

## Analysis on High Power LED Cooling System Based on Double Inlet and Outlet Water Jet

WANG Zhi-bin, LIU Yong-cheng, LI Zhi-quan

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** For thermal problem existed in high power LED, a new heat exchanger based on double inlets and double outlets water jet was proposed. The different cooling effects between the radiator proposed and the current jet cooling radiator were discussed, an experimental platform of high power LED cooling system base on water jet was designed. Under the condition of full power output of the cooling system, the LED substrate's temperature is distributed and remained at 32℃ in experiment, which shows that the cooling system has excellent abilities in uniforming temperature and distributing heat which the LED produced. And the experiment proves that the system meets the thermal requirements of the high power LED. The effect weights of the pump and the fan were obtained and the consumption power of the cooling system was optimized by using extremum difference analysis. Besides, a set of optimum pulse width modulation signals controlling pumps and fans were obtained through the experiments and analysis. The power consumption of the cooling system was reduced and the energy was saved with these signals.

**Key words:** Semiconductor devices and technology; Water cooling systems; Light emitting diodes; Numerical analysis; Jets

**OCIS Codes:** 230.3670; 000.6850; 120.6780; 120.6810

## 0 引言

大功率 LED 作为一种新型光源,具有节能、环保、发光效率高、使用寿命长等优点<sup>[1-2]</sup>,有广阔的市场前景.但是 LED 在发光的同时近 70% 的能量会转化为热量<sup>[3-4]</sup>,对于当前普遍使用的大功率 LED,其发光面积

均在 1 mm<sup>2</sup> 以上,热流密度已经超过了 150 W/cm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,如果这些热量得不到及时发散,将会对发光器件造成严重的损坏,导致 LED 寿命降低、光的输出功率减小、光谱红移等严重后果<sup>[6-7]</sup>,因此控制 LED 结温具有重要意义,通常要求大功率 LED 工作时的结温不得高于 110℃.针对大功率 LED 散热,寇志海等<sup>[8]</sup>提出了一种

基金项目:国家自然科学基金(No. 61107039)和河北省自然科学基金(No. F2012203202)资助

第一作者:王志斌(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为大功率 LED 及其应用技术,智能仪器仪表设计. Email: wzb\_ysu@ysu.edu.cn

通讯作者:刘永成(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为大功率 LED 水冷散热技术. Email: 1013847345@qq.com

收稿日期:2014-03-13;录用日期:2014-06-04

<http://www.photon.ac.cn>

新型平板热管散热器,鲁祥友等<sup>[9]</sup>提出了一种新型结构的回路热管,均是利用热管强化了自然对流下的散热性能,保证LED的正常工作.在强制对流换热方面,袁柳林等<sup>[10]</sup>提出了一种微通道制冷技术,并通过软件模拟了其在不同参量下的散热效果;万忠民等<sup>[11]</sup>提出了一种多孔微热沉系统,并用SIMPLE算法研究了其散热性能.罗小兵等<sup>[12-13]</sup>提出一种微喷射流系统,通过软件仿真对散热器结构参量进行了优化,同时分别讨论了不同入口流量及散热风扇的开闭对系统散热性能的影响.

本文设计了一种异侧双进双出的射流水冷散热系统,将其同现有射流散热器做了散热性能对比,并通过实验得到大功率LED基板的升温特性.同时,利用极差分析法,优化了散热系统的消耗功率,讨论了散热系统中两个可控因素对系统散热效果的影响权重.

### 1 场协同分析

实验采用的是板上芯片(Chip On Board, COB)封装<sup>[14]</sup>的15 W大功率LED芯片,芯片结构如图1,COB封装将芯片直接在铝基板上绑定封装,导热性能优良.

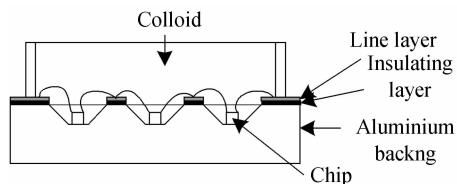


图1 COB封装LED模型

Fig. 1 The model of LED with COB encapsulation

对于散热系统,过增元等<sup>[15]</sup>提出了场协同理论,从流体速度矢量与温度梯度矢量二者的协同程度,分析了对散热效果的影响.二维稳态导热下的能量方程为

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为流体密度, $c_p$ 为流体比热容, $u$ 和 $v$ 分别为流体在 $x$ 和 $y$ 方向的流速, $k$ 为流体的导热系数, $T$ 为流体边界层温度.

将式(1)在论域中积分(忽略 $x$ 方向的导热)并引入无量纲变量,即

$$\bar{U} = \frac{U}{U_\infty}, \nabla \bar{T} = \frac{\nabla T}{(T_\infty - T_w)/\delta_t}, \bar{y} = \frac{y}{\delta_t} \quad (2)$$

式中 $U_\infty$ 为无穷远处液体流速, $T_w$ 为传热壁面温度,最终可得到方程(3),

$$Re_x Pr \int_0^1 \alpha_p (\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}) d\bar{y} = Nu_x \quad (3)$$

式中 $Re_x$ 为 $x$ 处雷诺数, $Pr$ 为普朗特数, $Nu_x$ 为局部努谢尔数.

式(3)中的积分因子 $\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}$ 可写为 $|\bar{U}| |\nabla \bar{T}| \cos \beta$ ,其中 $\beta$ 角为速度矢量和温度梯度矢量的夹角.减小速

度矢量和温度梯度矢量的夹角( $\beta < 90^\circ$ 时)或增大二者夹角( $\beta > 90^\circ$ 时)可提高散热系统的换热效果.

双进双出射流水冷散热器的单个射流孔流体流向和温度分布如图2,在驻点区附近,流体流向与等温线夹角近 $90^\circ$ ,即温度梯度与流速夹角 $\beta$ 接近 $180^\circ$ ,具有最佳的传热效率.由于壁面径向压力较小,使径向流对射流冲击的影响较弱,在两个射流孔之间形成了涡旋,在流体离开壁面时,流向与壁面近似垂直,同时垂直于等温线,速度场和温度梯度场之间的夹角 $\beta$ 接近 $0^\circ$ ,再次形成了较好的协同度,强化了换热.

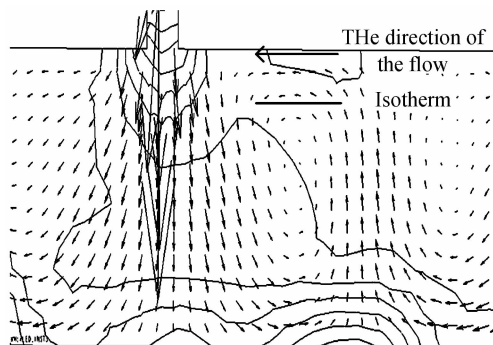


图2 射流孔温度-流向分布

Fig. 2 Temperature-flow direction of Micro jet

当单个入口体积流量为 $4.17 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,射流孔直径对散热效果的影响如图3,随着射流孔直径的增加,壁面对流换热系数呈减小趋势,换热效果逐渐降低.但是随着射流孔直径的不断减小,入射口的压强不断增大,压强变化如图4,即达到相同的体积流量需要的泵功率不断增大,综合上述两因素,选取射流孔直径为1.0 mm,此时壁面对流换热系数为 $5745.57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,入水口压强为 $115612.5 \text{ Pa}$ .

当射流孔直径为1 mm时,改变入水口入水的体积流量,如图5,随着入水流量的不断增大,壁面换热系数不断增大,换热得到强化,但进水口压强也随之增大,如图6,需要更大的泵功率.

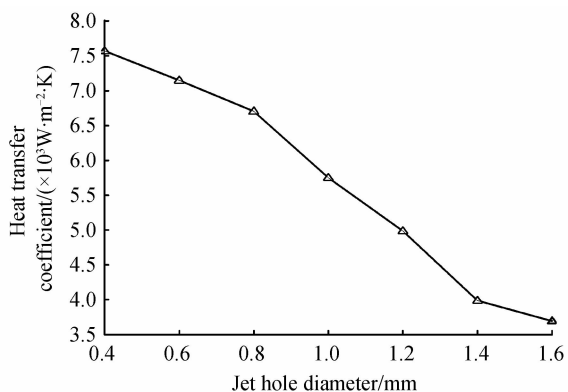


图3 射流孔直径-壁面换热系数关系

Fig. 3 Micro jet diameter-wall heat transfer coefficient graph

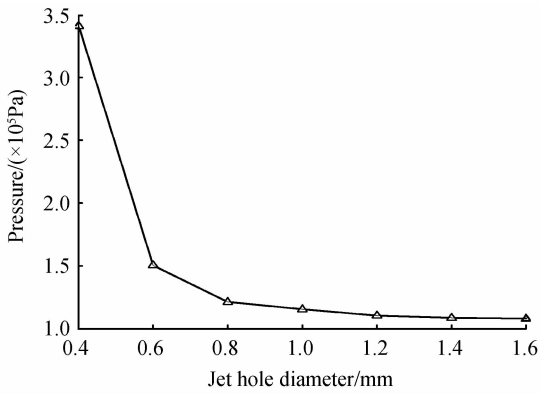


图4 射流孔直径-入口压强关系

Fig. 4 Micro jet diameter-inlet pressure graph

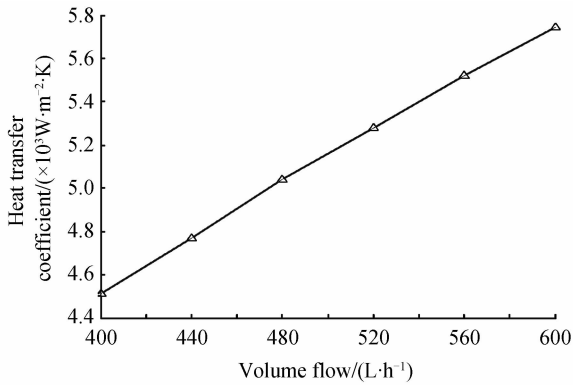


图5  $D=1$  mm 时入口流量-壁面换热系数关系

Fig. 5 Inlet volume flow-wall heat transfer coefficient graph when  $D=1$  mm

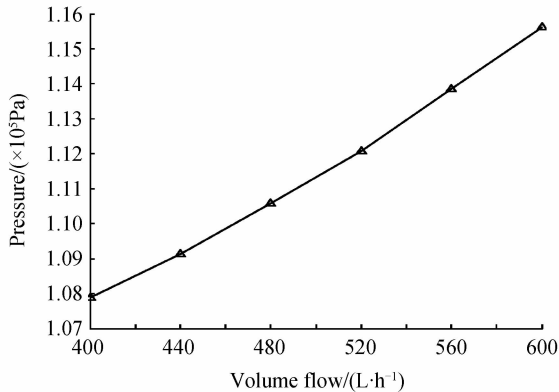


图6  $D=1$  mm 时入口流量-入口压强关系

Fig. 6 Inlet volume flow-inlet pressure graph when  $D=1$  mm

## 2 模型数值分析

目前的基于射流水冷的散热器模型为单侧进异侧出型,在  $20.05^\circ\text{C}$  环境温度、 $1.67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  的体积流与  $120 \text{ W}$  热源条件下,其射流流形分布云图如图 7,随着射流冲击壁面上的径向压力不断增大,射流冲击效果减弱,在近壁面上随着靠近出水口的距离越近,射流冲击作用越弱,最终壁面温度分布不均,如图 8,散热器壁面的平均对流换热系数为  $4740.98 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,局部峰值对流换热系数为  $76827 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

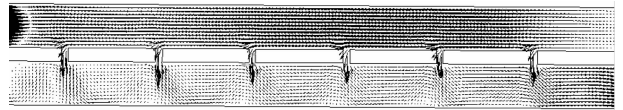


图7 普通射流水冷散热器流形分布云图

Fig. 7 Ordinary jet cooling radiator manifold distribution nephogram

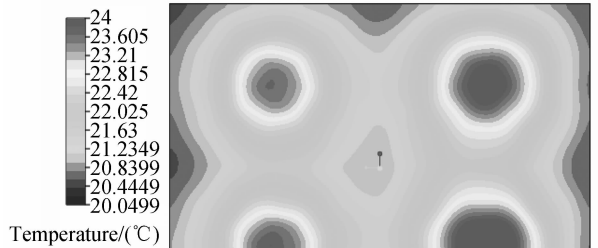


图8 普通射流水冷散热器温度分布

Fig. 8 Common jet cooling radiator temperature distribution

在与上述相同环境温度、热源、流体流速的条件下,双进双出射流水冷散热器的射流流形分布云图如图 9,各孔射流现象明显而且分布均匀,在两个射流孔之间的空间还出现了涡旋,进一步强化了传热,使系统温度略有降低,同时异侧双进双出结构也减小了壁面径向压力对射流冲击造成的影响,使散热壁面温度分布更加均匀,温度分布如图 10,散热器壁面的平均对流换热系数为  $5745.57 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,局部峰值对流换热系数  $97679.9 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,壁面温度分布均匀性及散热效率均有所提升。

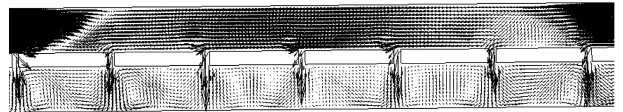


图9 双进双出射流水冷散热器流形分布云图

Fig. 9 Couple inlet and outlet water jet cooling radiator manifold distribution nephogram

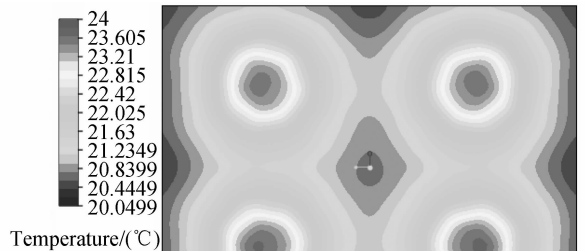


图10 双进双出射流水冷散热器温度分布

Fig. 10 Double inlet and outlet water cooling radiator temperature distribution

## 3 实验系统设计

### 3.1 系统组成

图 11 为双进双出射流水冷散热器结构,散热器顶

部可放置多片大功率 LED 芯片,位于散热器结构两侧下方的进水口分别接到两个微型水泵,上方的出水口分别接到两个风冷换热器,散热器内部为形成射流的孔板,水从下方进入散热器,在压力作用下,冷却水经孔板形成射流,与装有大功率 LED 的顶部进行换热后从两侧的出水口流出,进入循环水换热器,进行冷却换热。

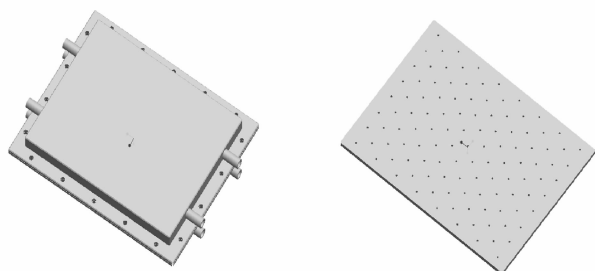


图 11 散热器结构

Fig. 11 The exchanger structure

经过冷却后的循环水进入微泵,再次与射流水冷散热器进行热交换.系统的实际连接图如图 12,原理框图如图 13.

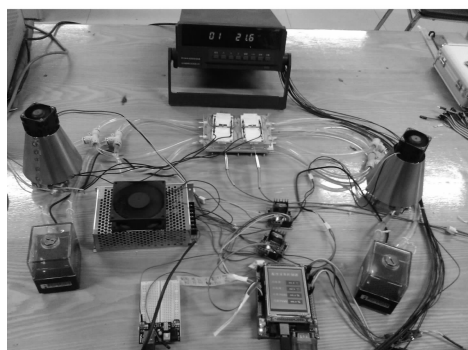


图 12 系统实际连接图

Fig. 12 Practical system connection graph

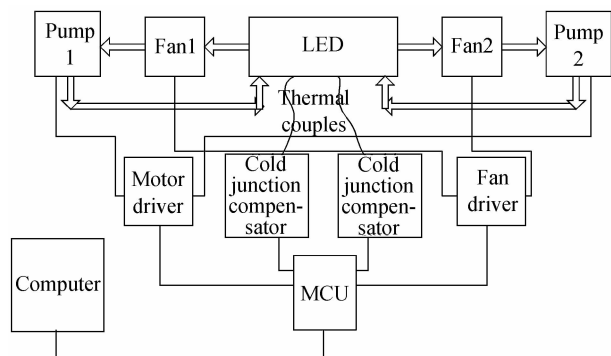


图 13 原理框图

Fig. 13 Functional block diagram

### 3.2 温度采集

温度采集为两路 WRNK191(K 型)热电偶,分别安装在两列 LED 芯片底部的凹槽内.冷端补偿器使用

的是 max6675 芯片,它集成了温度补偿、非线性校正、信号放大以及 AD 转化电路,能将采集到的温度模拟电压信号转化为 12 位的数字信号,分辨率为  $0.25^{\circ}\text{C}$ ,在  $0$  到  $700^{\circ}\text{C}$  范围内温度显示误差不大于  $2^{\circ}\text{C}$ .由于热电偶本身的差异性,会造成系统误差,在使用前需对两路热电偶的系统误差进行校正.校正设备为 TC1016 多路温度测试仪,采集传感器为铜/康铜(T 型)热电偶,准确度为  $\pm(0.05\%+0.02\%\text{FS})$ .采集点及对应温差如表 1.由表 1 可得热电偶 1 和热电偶 2 的系统误差分别为  $0.7^{\circ}\text{C}$  和  $0.6^{\circ}\text{C}$ .

表 1 热电偶误差测量( $^{\circ}\text{C}$ )

Table 1 The measurement of thermocouples' error ( $^{\circ}\text{C}$ )

TC1016	K1	Difference	K2	Difference
30	30.7	0.7	30.7	0.7
35	35.5	0.5	35.5	0.5
40	40.7	0.7	40.5	0.5
45	45.5	0.5	45.7	0.7
50	50.7	0.7	50.7	0.7
55	55.5	0.5	55.5	0.5
60	61.0	1.0	60.5	0.5
65	66.0	1.0	65.7	0.7
70	70.7	0.7	70.5	0.5
75	75.7	0.7	75.7	0.7

采集目标为 4 片 LED 芯片底部温度,其中每片大功率 LED 的额定功率为  $15\text{ W}$ ,4 片共计  $60\text{ W}$ .

系统控制器为意法半导体的 stm32f103zet6 芯片,能将两路热电偶采集的温度信号通过串口每  $2\text{ s}$  发送一次给上位机,还可以输出 4 路脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号,控制两个 l298n 模块,可分别控制两个水泵和两个风扇的输出功率.在进行数据采集、数据发送和系统控制的同时还能显示相关参量信息.

## 4 实验结果与分析

系统的循环工质为蒸馏水,实验环境温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ,LED 芯片与射流水冷散热器之间填充导热硅脂,导热系数为  $1.2\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ .散热风扇的额定功率为  $4\text{ W}$ ,散热水泵的额定功率为  $4\text{ W}$ .

### 4.1 无散热器

在不加装散热器条件下,开启 4 片大功率 LED,为防止温度过高导致芯片损坏,设定输出总功率为  $30\text{ W}$ ,测量 LED 芯片底部温度,温度随时间变化如图 14,在不加任何散热器条件下,大功率 LED 底部温度在短时间内就超过  $90^{\circ}\text{C}$ ,过高温度会造成 LED 的不可逆损伤,降低 LED 寿命,影响 LED 发光效率,造成光谱红移.

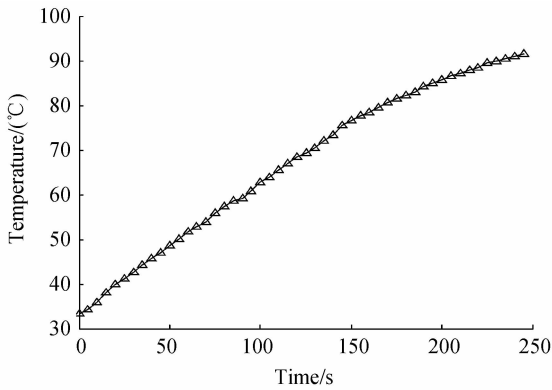


图 14 未加任何散热器时 LED 温度特性

Fig. 14 The temperature variation of the LED substrate without any cooling device

4.2 额定功率输出下,两路热电偶升温特性

在 4 片 LED 功率为 60 W、水泵和风扇均工作在额定功率条件下,图 15 是两路温度采集值随时间的变化.由图可知两路温度数据变化缓慢,经过 25 min 左右达到稳定状态,此时 LED 底部温度为  $32 \pm 2^\circ\text{C}$ ,表明射流水冷散热系统散热性能优良,能保证大功率 LED 的正常工作.温度数据的差值基本保持在  $\pm 3^\circ\text{C}$  以内,体现了良好的均温性能,在后面的实验中取两路热电偶输出的平均值表示 LED 的底部温度.

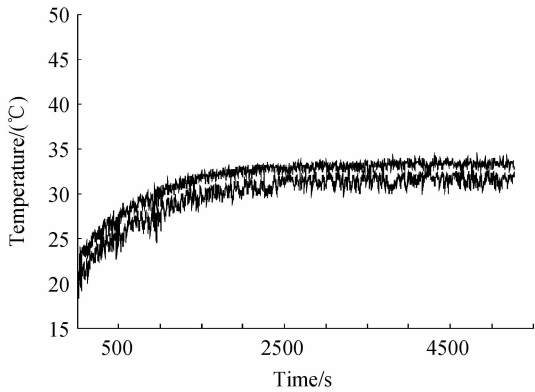


图 15 两路温度-时间关系

Fig. 15 Temperature-time graph of two thermocouples

4.3 散热系统消耗功率的优化

水泵和风扇的工作功率对系统散热效果造成影响,而水泵和风扇的工作功率是由控制器发出的 PWM 信号控制的,通过改变对应的 PWM 信号,可控制其工作功率.对散热系统的消耗功率进行优化,可通过讨论其功率控制信号,在保证散热效果的前提下,使散热系统消耗功率保持在较低水平.控制信号的频率过低会导致电机震颤,工作不稳定,频率过高导致负载能力降低.由于 1298n 的频率特性,最高频率不能超过 40 kHz,选取其典型工作频率 25 kHz.散热系统中标准的 PWM 信号是由 stm32 单片机产生,该单片机内含 PWM 信号输出模块,可根据设定参量,输出对应频率和占空比的 PWM 信号.两个参量的水平和因素如

表 2,实验安排与结果如表 3.

表 2 因素水平表

Table 2 Factors and levels

Number	PWM of pump	PWM of fan
Level 1	70	70
Level 2	80	80
Level 3	90	90
Level 4	100	100

表 3 实验数据表

Table 3 Experimental data sheet

Number	PWM of pump	PWM of fan	Temperature(°C)
1	70	70	35.9
2	70	80	36.1
3	70	90	36.0
4	70	100	36.0
5	80	70	35.4
6	80	80	35.4
7	80	90	35.3
8	80	100	35.1
9	90	70	34.3
10	90	80	34.2
11	90	90	34.2
12	90	100	33.8
13	100	70	34.4
14	100	80	34.1
15	100	90	32.8
16	100	100	32.5

设  $K_{jm}$  为第  $j$  个因素的因素水平  $m$  所对应的实验指标之和,  $\bar{K}_{jm} = K_{jm} / n$ , 其中  $n$  为因素  $j$  在水平  $m$  下所对应的实验次数,根据表 3 获取的数据进行数据处理,到两因素和指标温度的关系如图 16. 根据  $R_j = \max\{\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \bar{K}_{j3}, \dots\} - \min\{\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \bar{K}_{j3}, \dots\}$ , 其中  $R_j$  为因素  $j$  的极差,可得到控制水泵和风扇的 PWM 信号因素的极差分别为  $R_{\text{pump}} = 2.55$  和  $R_{\text{fan}} = 0.65$ ,水泵对散热系统的影响权重高于风扇,同时取水泵和风扇的控制信号占空比为 100% 和 70%. 在该组控制信号下,散热系统散热效果较优,同时散热系统功耗较低,系统功

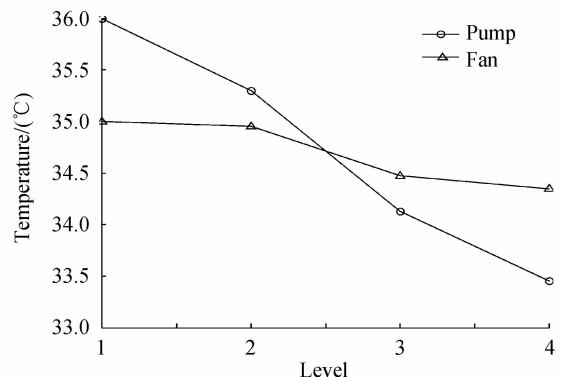


图 16 因素指标趋势

Fig. 16 Graph of Factors and Indicators

率为 13.6 W,比额定功率工作时节约了 2.4 W.

## 5 结论

将双进双出射流水冷散热与当前的单侧进异侧出射流水冷散热器做比较,双进双出射流水冷散热器具有良好的散热性能和均温性能.设计了基于射流水冷散热器和加装导流罩的换热器的散热系统,并进行性能测试,结果表明射流水冷散热系统具有良好的均温性能和散热性能.利用极差分析法讨论了散热系统自身的消耗功率,发现水泵对散热系统的影响权重大于风扇,为以后复杂环境温度下大功率 LED 散热系统的智能控制提供了主控对象,同时在室温条件下较优的散热系统功率为 13.6 W,其控制信号的占空比分别为 100%和 70%,能使系统在较低散热功耗下保持良好的工作.

### 参考文献

- [1] GOU Yu-jun, LIU Zhong-liang, ZHONG Xiao-hui. Experimental study of heat pipe exchanger for high power LED cooling system[J]. *Fluid Machinery*, 2011, **39**(9): 62-65.  
勾昱君, 刘忠良, 钟晓晖. 热管换热器用于 LED 冷却系统的试验研究[J]. *流体机械*, 2011, **39**(9): 62-65.
- [2] LI Hai-tao, ZHANG Su-juan, ZHANG Wei, et al. Optical design of LED automotive high-beam filled with liquid[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1327-1330.  
李海涛, 张苏娟, 张炜, 等. 液体封装 LED 汽车远光灯光学设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1327-1330.
- [3] LI Zhi, JIA Li, WEI Wen-Bo. Experimental study on natural convection cooling of LED based on plate pulsating heat pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(7): 1361-1364.  
李志, 贾力, 魏文博. 基于板式脉动热管的 LED 自然对流冷却实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, **34**(7): 1361-1364.
- [4] CHAI Wei-wei, CHEN Qing-hua, LI Lin-hong, et al. Heat dissipation analysis of high power LED connected to copper coated heat sink by soldering [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(11): 1171-1175.  
柴伟伟, 陈清华, 李琳红, 等. 大功率 LED 灯珠与散热器直焊结构散热效果分析[J]. *发光学报*, 2011, **32**(11): 1171-1175.
- [5] LI Yong, LI Peng-fang, ZENG Zhi-xin. Analysis of heat dissipation performance for typical high power LED secondly-heat sinks[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, **31**(5): 723-728.  
李勇, 李鹏芳, 曾志新. 大功率 LED 典型热沉结构散热性能分析[J]. *半导体光电*, 2010, **31**(5): 723-728.
- [6] YAN Yun-fei, ZHANG Li, PU Ge, et al. Optimization and heat dissipation analysis of high-power LED lamp package structure[J]. *Materials Review*, 2012, **26**(8): 156-160.  
闫云飞, 张力, 蒲炯, 等. 大功率 LED 灯具封装结构的散热分析及优化[J]. *材料导报*, 2012, **26**(8): 156-160.
- [7] CHEN Jian-long, WEN Shang-sheng, YAO Ri-hui, et al. Thermal analysis of high-power LED without aluminum substrate[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33**(12): 1362-1367.  
陈建龙, 文尚胜, 姚日晖, 等. 去除铝基板的大功率 LED 热分析[J]. *发光学报*, 2012, **33**(12): 1362-1367.
- [8] KOU Zhi-hai, BAI Min-li, YANG Hong-wu. Experimental investigation on a flat heat pipe radiator for cooling high power LEDs[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(4): 485-488.  
寇志海, 白敏丽, 杨洪武. 大功率 LED 冷却用平板热管散热器的实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2010, **21**(4): 485-488.
- [9] LU Xiang-you, CHENG Yuan-xia, LIU Mei-jing, et al. Experimental investigation on heat pipe heat sink for cooling high power LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(5): 651-654.  
鲁祥友, 程远霞, 刘美静, 等. 用于大功率 LED 冷却的热管散热器的实验研究[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(5): 651-654.
- [10] YUAN Liu-lin, LIU Sheng, CHEN Ming-xiang, et al. Thermal analysis of high power LED array packaging with microchannel cooler [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 712-716.  
袁柳林, 刘胜, 陈明祥, 等. 基于微通道致冷的大功率 LED 阵列封装热分析[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(6): 712-716.
- [11] WAN Zhong-min, CHEN Min, LIU Wei, et al. Research on porous micro heat sink for thermal management of high power LED[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(8): 109-113.  
万忠民, 陈敏, 刘伟, 等. 基于多孔微热沉的大功率 LED 冷却技术研究[J]. *机械工程学报*, 2010, **46**(8): 109-113.
- [12] LUO Xiao-bing, LIU Sheng. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2007, **30**(3): 475-484.
- [13] LUO Xiao-bing, LIU Sheng, JIANG Xiao-ping, et al. Experimental and numerical study on a micro jet cooling solution for high power LEDs[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2007, **50**(4): 478-489.
- [14] TIAN Chuan-jun, ZHANG Xi-yan, ZOU Jun, et al. Temperature effect on the photoelectric parameter of high-power LED illumination system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(1): 96-100.  
田传军, 张希艳, 邹军, 等. 温度对大功率 LED 照明系统光电参量的影响[J]. *发光学报*, 2010, **31**(1): 96-100.
- [15] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 2-18.