

文章编号: 1000-582X(2012)12-040-06

有源纹波补偿 BUCK 型 LED 驱动电源

唐治德¹, 王官涛¹, 杨红¹, 张正茂¹, 陶凛²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市电力公司, 重庆 400014)

摘要: 驱动电源是发光二极管(light-emitting diode, LED)照明的重要组成部分。针对因电解电容自身特性导致的驱动电源寿命与 LED 的长寿命不匹配这一问题, 提出了一种有源纹波补偿降压(BUCK)型拓扑结构。该拓扑充分结合了开关电源和线性电源的特点, 用辅助有源电路补偿电感纹波电流来取代传统电解电容滤波。文中详细分析了该拓扑的结构组成及工作原理, 并且通过仿真和实验验证了该拓扑的结构有效性。理论分析和实验结果均表明, 采用有源纹波补偿的拓扑结构可将电感纹波电流完全补偿, 使得电路输出为直流。

关键词: 发光二极管; 驱动电源; 电解电容; 使用寿命; 纹波电流检测; 有源补偿

中图分类号: TM461

文献标志码: A

The power supply based on BUCK with active ripple compensation for LED

TANG Zhide¹, WANG Guantao¹, YANG Hong¹, ZHANG Zhengmao¹, TAO Lin²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Electric Power Corp, Chongqing 400014, China)

Abstract: Power supply is an important component of LED lighting. Considering the power supply's lifespan didn't match LED's long lifespan by the electrolytic capacitor's own feature, we propose a step-down transformer topology structure of active ripple compensation based on BUCK circuit. This topology took full advantage of the characteristics of switching power supplies and linear power supplies to replace the traditional electrolytic capacitor filter with the auxiliary active circuitry compensation inductor ripple current. We analyzed the structure and the operation principle of the new topology and confirmed the validity of the new topology. The theoretical analysis and experimental results show that using the topological structure of active ripple compensation can completely compensate inductance's ripple current, so that the circuit output is DC.

Key words: LED; power supply; electrolytic capacitor; service life; ripple current detection; active compensation

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877082); 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 2009 年度研究项目(2007DA10512709303)

作者简介: 唐治德(1958-), 男, 重庆大学教授, 主要从事大功率 LED 驱动控制、X 光机高压电源技术的研究, (E-mail) tangzhide@cqu.edu.cn。

由于新型材料和制造工艺技术的发展,高亮度 LED 作为新型光源,在工程应用和学术研究中,引起了人们的广泛关注。随着研究的不断深入,LED 取代传统白炽灯、卤素灯及荧光灯已成为可能^[1-3]。由于 LED 自身的电气特性,驱动电源是 LED 照明不可缺少的部件。虽然 LED 针对传统光源有着诸多优点,但是在大规模应用之前有诸多问题有待于进一步解决,其中之一就是驱动电源与 LED 的长寿命难以匹配^[4]。

传统 BUCK 电路采用 LC 滤波来减小电路的纹波,电解电容因能量密度大,价格低等优点,是滤波电容的首选。电路稳态工作时,输出电压由微小的纹波和较大的直流分量组成。当驱动 LED 时,纹波电压将引起较大的纹波电流,引起 LED 发光不稳定,导致 LED 过早光衰^[5-7]。增大电容容量可减小 LED 的纹波电流。但是电容容量的增大将导致电源体积和重量增加,影响电源的小型化和集成化^[8],更重要的是,电解电容成为限制 LED 驱动电源寿命的主要因素。在 LED 照明应用环境下,电解电容的寿命不超过 10 000 h,与 LED 的长寿命(100 000 h 左右)难以匹配^[4]。在开关电源的平均无故障时间(MTBF)分析时,电解电容的性能直接决定了电路的可靠性,在设计电源驱动器的时候应该有针对性地减少电解电容的使用^[9-10]。电解电容的有效工作寿命,在很大程度上取决于环境温度以及通过等效串联阻抗(ESR)上的纹波电流导致的温升^[11-14]。温度过高致使电解电容电解质逐渐耗尽,导致其性能下降。

针对上述问题文中提出一种有源纹波补偿 BUCK 型拓扑结构。该拓扑结构无需使用大容量电解电容,利用有源补偿技术抑制输出纹波电流。由于取消电解电容的使用,使电路寿命长、稳定性高、易于集成和小型化。

1 有源纹波补偿 BUCK 电路拓扑结构及工作原理

电路如图 1 所示。电路结构以 BUCK 电路为主,取消电解电容滤波,用辅助线性有源补偿电路对电感纹波电流进行补偿。图中由开关管 K、电感 L、LED 灯组、续流二极管 D 组成主电路;三极管 T 为辅助补偿电路。

设主电路电感电流 i_L 和三极管 T 的集电极电流 i_C 分别为

$$\begin{aligned} i_L &= I_L + i_r, \\ i_C &= I_C + i_c. \end{aligned}$$

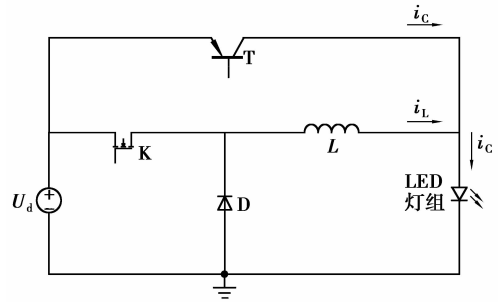


图 1 有源纹波补偿 BUCK 电路拓扑

式中: I_L 和 I_C 分别是电感电流和三极管 T 的集电极电流的直流分量、 i_r 和 i_c 分别为它们的交流分量(纹波电流)。

当 $i_c = -i_r$ 时,电路输出电流为

$$i_o = i_L + i_c = I_L + I_C = I_o. \quad (1)$$

通过 LED 的电流 i_o 为恒定直流,如图 2 所示,实现了对电感纹波电流的全补偿。图中:

$$I_L = \frac{1}{2}(I_P + I_G),$$

$$I_{Cmin} = \frac{1}{2}(I_P - I_G).$$

式中 I_P 和 I_G 分别是电感电流的峰值和谷值。

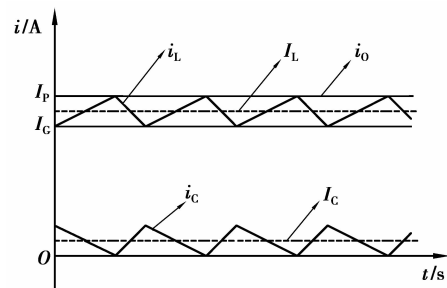


图 2 电感电流补偿示意图

LED 灯组为大功率 LED 的串联连接, $U_o = nU_F$ 为 LED 灯组压降, n 为串联 LED 的个数; U_F 为单个 LED 的导通压降。

三极管 T 的损耗为

$$P_{LOSS} = \overline{i_C} U_{CE} = (1-D)U_d I_C. \quad (2)$$

假定开关管 K、二极管 D、电感 L 均为理想器件,经过补偿后该电路的输出效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_{LOSS} + P_o}.$$

其中 P_o 为电路输出功率

$$P_o = U_o I_o = DU_d(I_L + I_C).$$

有源纹波补偿 BUCK 电路的效率为

$$\eta = \frac{D}{D + 0.5(1-D)\left(1 - \frac{I_G}{I_P}\right)}.$$

在电感电流峰值 I_P 和占空比 D 一定的情况下,设计电路时尽量使得电感电流谷值 I_G 接近 I_P (即尽量减小电感纹波电流),可有效提高电源输出效率。在后续实验中,该补偿电路的输出效率为 97.6%。

2 电感纹波电流检测与补偿实现

2.1 电感纹波电流检测

根据电感元件电压与电流的关系

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{di_r}{dt},$$

$$i_r = \frac{1}{L} \int u_L dt.$$

可以通过观测电感两端的电压来检测纹波电流,如图 3 所示。图 3 中检测电路由运算放大器 A_1 、电阻 R 、电容 C 组成差分积分形式。假设各元件均为理想元件则

$$U_{o1}(s) = -\frac{1}{sRC}(U_1(s) - U_2(s)) = -\frac{1}{sRC}U_L(s).$$

即

$$u_{o1}(t) = -\frac{1}{RC} \int u_L dt = -\frac{L}{RC} i_r. \quad (3)$$

由式(3)可以看出, u_{o1} 是与电感纹波电流成正比的函数,比例系数为 $-\frac{L}{RC}$ 。

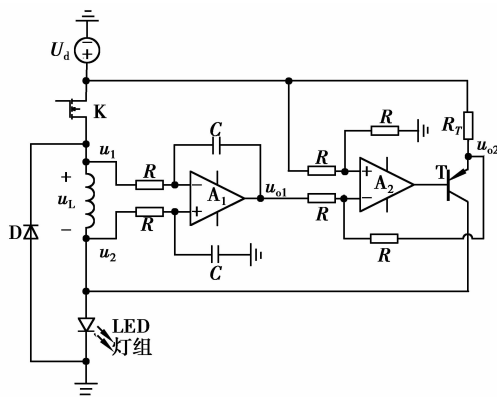


图 3 纹波电流检测补偿原理图

为简化电路结构, A_1 、 A_2 采用单电源供电, $u_{o1} \geq 0$, 在纹波电流为正峰值时 $u_{o1} = 0$ 有

$$u_{o1} = U_{o1} - \frac{L}{RC} i_r.$$

其中 $U_{o1} = \frac{L}{2RC}(I_P - I_G)$ 。

所以

$$u_{o1} = \frac{L}{RC} \left(\frac{1}{2}(I_P - I_G) - i_r \right). \quad (4)$$

2.2 纹波电流补偿实现

由于电源电压 U_d 可能因外界因素波动,所以由

A_2 组成减法电路消除因 U_d 变化引起的 i_c 变化,根据电路可知

$$u_{o2} = U_d - u_{o1}.$$

从而三极管 T 的补偿电流为

$$i_c = \frac{U_d - u_{o2}}{R_T} = \frac{u_{o1}}{R_T}. \quad (5)$$

将 u_{o1} 代入 i_c

$$i_c = \frac{L}{R_T RC} \left(\frac{1}{2}(I_P - I_G) - i_r \right). \quad (6)$$

设定比例系数为 $k = \frac{L}{RR_T C}$ 。

若选择电路元件参数使得 $k=1$, 则 $i_c = -i_r$, 实现了电感纹波电流的全补偿。

3 电路输出电流计算

当 $k=1$ 时,三极管 T 补偿电流为

$$i_c = \frac{1}{2}(I_P - I_G) - i_r.$$

电感电流为

$$i_L = \frac{1}{2}(I_P + I_G) + i_r.$$

所以电路输出电流为

$$i_o = i_L + i_c = I_P. \quad (8)$$

因此,补偿电流将电感纹波电流完全补偿,通过 LED 的电流为直流,其值为 I_P 。

4 仿真分析与实验验证

4.1 电路参数设置

采用 PSIM 软件对所提出的纹波补偿电路进行仿真实验,根据以上分析仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置表

| 参数 | U_d/V | $L/\mu H$ | $R/k\Omega$ | $C/\mu F$ | R_T/Ω |
|----|---------|-----------|-------------|-----------|--------------|
| 数值 | 12 | 100 | 10 | 0.01 | 1 |

LED 采用欧司朗半导体照明公司生产的额定功率 $P_w = 5 W$ 的大功率 LED;其导通压降为 3.0~3.6 V,典型驱动电流为 1.4 A,灯组采用 3 个大功率 LED 串联连接。单个 LED 仿真模型如图 4 所示,其中 D 为理想二极管, D_z 为理想齐纳二极管,

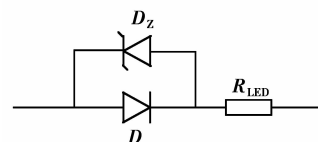


图 4 大功率 LED 模型图

R_{LED} 为 LED 等效串联阻抗^[15]。仿真中设定齐纳二极管 D_z 两端电压为: $U_D = 3.0 \text{ V}$, $R_{LED} = 0.35 \Omega$ 。

控制电路采用传统峰值电流控制, 设定参考电压 $U_r = 10.5 \text{ V}$, 电压采样系数 $k_u = 0.8$, 电流采样系数为 $k_i = 1$, 误差放大器放大倍数为 1。时钟频率 $f_s = 100 \text{ kHz}$ 、占空比为 0.1。该电路占空比 $D > 0.5$, 需要斜坡补偿。根据斜坡补偿原则: 所选定斜坡上升斜率 $m > -\frac{1}{2}m_2$, 其中 m_2 为电感电流下降斜率; 选定锯齿波幅值为 0.8 V 、频率为 100 kHz 。

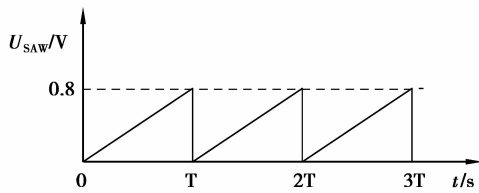


图 5 斜坡补偿波形示意图

根据以上参数设置可得到电感峰值电流为 $I_p = 1.4 \text{ A}$, 输出电压 $U_o = 10.5 \text{ V}$ 。仿真电路图如图 6 所示。

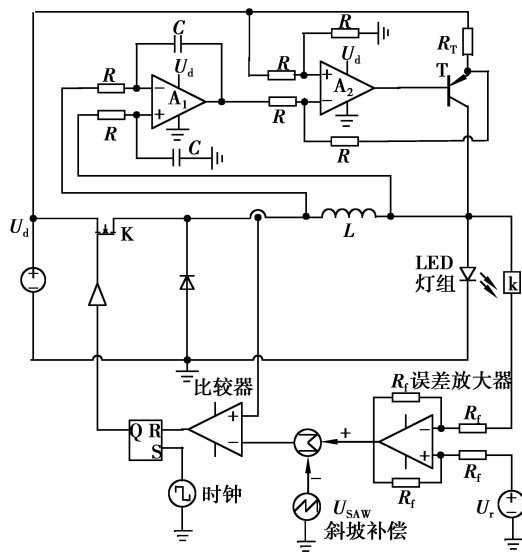


图 6 仿真实验图

4.2 仿真结果分析

图 7 为仿真结果波形图: 根据电感电流 i_L 波形可以看出电感电流峰值 $I_p = 1.4 \text{ A}$, 验证了控制电路参数设置的正确性。电感电流谷值为 $I_G = 1.26 \text{ A}$, 从而可以得到电感电流直流分量为 $I_L = 1.33 \text{ A}$ 。对比 u_{o1} 和 i_L 波形可以看出: A_1 在单电源供电的情况下 u_{o1} 的直流分量 $U_{o1} = 0.07 \text{ V}$, 纹波电流为正峰值时 $u_{o1} = 0$, u_{o1} 与电感纹波电流比例系数为 -1 , 验

证了 2.1 对 u_{o1} 的理论分析是正确的。由 i_L 和 i_C 波形可以看出 $i_C = -i_r$, 补偿电流将电感纹波电流完全补偿, 通过 LED 的电流为 $i_o = I_L + I_C = I_p = 1.4 \text{ A}$, 为恒定直流, 验证了公式(8)。若电路不采用纹波补偿电路, 则通过 LED 电流为电感电流, 纹波电流峰峰值为 0.14 A , 会引起 LED 发光不稳定。

忽略其他元件损耗的情况下计算电路经纹波补偿后的输出效率为 99.2% , 补偿电路损耗为 0.8% , 补偿电路上的损耗可以忽略。

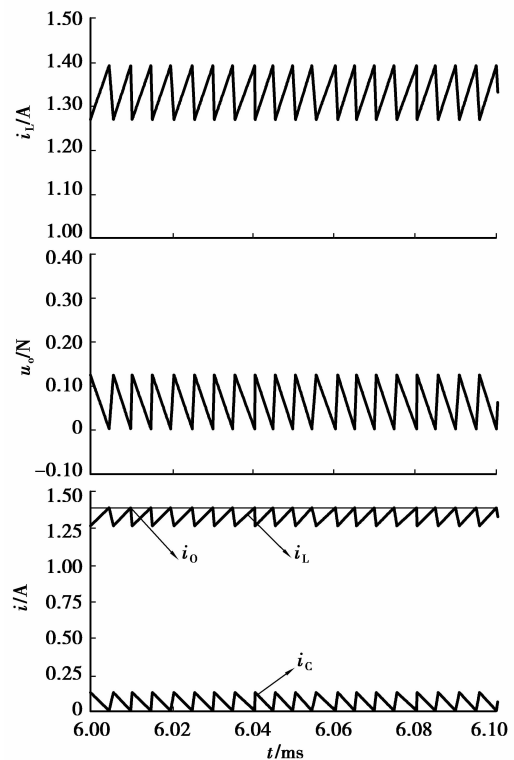


图 7 仿真结果波形图

4.3 实验验证

经过以上的电路分析与计算设计了有源纹波补偿电路的电路实验。实验元件参数按照表 1 进行选择, 控制电路采用峰值电流控制芯片 UC3843 控制, 负载采用了 3 个额定功率 $P_w = 3 \text{ W}$ 的大功率 LED 串联连接, 每一个 LED 的驱动电压范围为 $3.0 \sim 3.5 \text{ V}$, 驱动电流范围为 $0.6 \sim 1 \text{ A}$ 。电路设计输出 10.5 V , 输出电流 0.7 A 。实验如图 8 所示。

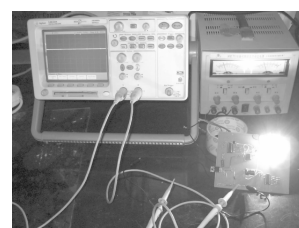


图 8 实验线路图

图 9 是电感电流 i_L 和补偿电流 i_c 波形,图 10 为电路输出电流 i_o 波形,所测电流经过 0.5 欧姆的电阻进行采样。实验中,经测量得到:输入电压为 $U_d = 12\text{ V}$,输出电压为 $U_o = 10.47\text{ V}$,补偿电流 i_c 的直流分量为 $I_c = 125\text{ mA}$,实际输出电流为 $i_o = 730\text{ mA}$,在补偿电路上的损耗 $P_{\text{LOSS}} = 0.191\text{ W}$,电源输出 $P_o = 7.643\text{ W}$,在不考虑其他元件损耗的情况下电源输出效率为 $\eta = 97.6\%$ 。根据图 9 和图 10 可以看出补偿电路将电感纹波电流完全补偿,电路输出为直流。可见实验结果与理论分析基本一致,对于有源纹波补偿 BUCK 型拓扑的结构有效性得到了验证。

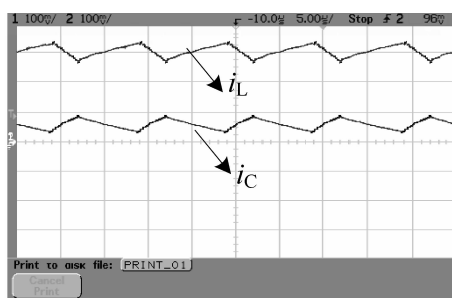


图 9 电感电流、补偿电流波形图

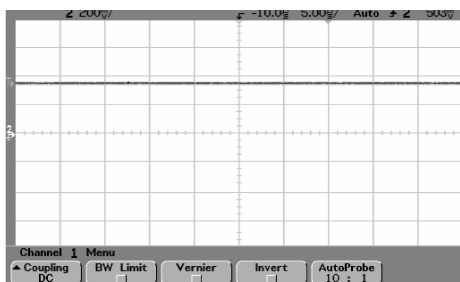


图 10 电路输出电流波形图

5 结 论

针对传统用于 BUCK 电路滤波所采用的电解电容体积大,不稳定易导致电源故障,且其自身寿命与 LED 的长寿命难以匹配等问题,提出了一种有源纹波补偿的电路拓扑结构,对该拓扑结构进行了分析说明,最后通过仿真和实验验证了该拓扑结构的有效性。该拓扑结构简单、易于实现,补偿电路与开关管、控制电路可以集成一体,能够避免电源因电解电容元件而引发的故障、提高电路稳定性,有利于延长 LED 驱动电源的寿命,利于 LED 照明的发展。

参考文献:

[1] 廖志凌,阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2006,21(9):106-111.

LIAO Zhiling, RUAN Xinbo. Present status and developing trend of the semiconductor lighting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):106-111.

[2] Heffernan B, Frater L, Watson N. LED replacement for fluorescent tube lighting[C]// Proceedings of the 2007 Power Engineering Conference, December 9-12, 2007, Perth, WA. Piscataway: IEEE Press, 2007:1-6.

[3] 陈仲林,翁季,胡英奎. 道路照明常用光源的司辰视觉发光效率[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(12):51-54.

CHEN Zhonglin, WENG Ji, HU Yingkui. Luminous efficiencies of common road lighting sources [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(12):51-54.

[4] Qin Y X, Chung H S H, Lin D Y, et al. Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor [C] // Proceedings of the 34th Industrial Electronics Annual Conference, November 10-13, 2008, Orlando, USA. Piscataway: IEEE Press, 2008:1968-1973.

[5] 裴倩,王正仕,陈辉明. 大功率 LED 驱动电源对光效的影响研究[J]. 电力电子技术,2010,44(3):55-56.

PEI Qian, WANG Zhengshi, CHEN Huiming. Luminous efficiency of ripple current power driving high power LED [J]. Power Electronics, 2010, 44(3):55-56.

[6] Muthu S, Schuurmans F J, Pashley M D. Red, green, and blue LED based white light generation: issues and control [C] // Proceedings of the 37th Annual Conference of IEEE Industry Applications Society, October 13-18, 2002, Pittsburgh, USA. [S. l.]: IAS, 2002:327-333.

[7] Muthu S, Gaines J. Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design [C] // Proceedings of the 38th Annual Conference of IEEE Industry Applications Society, October 12-16, 2003, Salt Lake City, USA. [S. l.]: IAS, 2003:515-522.

[8] Fu C M S, Lu D D C, Sathikumar S. A novel method to reduce the operating temperature of high power light-emitting diodes [C] // Proceedings of the 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, December 14-17, 2008, Sydney, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2008:1-6.

[9] 孙凤艳,王友仁,崔江,等. 功率变换电路电解电容器故障预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(1):29-33.

SUN Fengyan, WANG Youren, CUI Jiang, et al. Research on failure prediction method of electrolytic

- capacitor used in power conversion circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1):29-33.
- [10] 刘成印,严仰光. 高频开关电源系统可靠性指标 MTBF 的计算方法[J]. 电工技术杂志,2001(12):3-5.
LIU Chengyin, YAN Yangguang. The method of calculating for reliability parameter MTBF of high-frequency switch power supply system [J]. Electrotechnical Journal,2001(12):3-5.
- [11] PANG H M, Pong B M H. A method to analysis and design for long life power converter[C]// Proceedings of the 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 21-25, 2010, Palm Springs, CA. Piscataway: IEEE Press, 2010:1857-1864.
- [12] 杨柏禄,王书堂,陈永真. 电解电容器的发热分析与冷却措施[J]. 元器件应用,2008(7):67-70.
YANG Bailu, WANG Shutang, CHEN Yongzhen. Heating analysis of electrolytic capacitors and cooling measures[J]. Elements Application,2008(7):67-70.
- [13] Ma H, Wang L G. Fault diagnosis and failure prediction of aluminum electrolytic capacitors in power electronic converters[C]// Proceedings of the 31st IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society, November 6-10, 2005, Raleigh, USA. Piscataway: IEEE Press, 2005:842-847.
- [14] Riz A, Fodor D, Klug O, et al. Inner gas pressure measurement based life-span estimation of electrolytic capacitors[C]// Proceedings of the 13th International Conference of Power Electronics and Motion Control, September 1-3, 2008, Poznan, Poland. Piscataway: IEEE Press, 2008:2096-2101.
- [15] 沈海平. 大功率 LED 可靠性预测机制研究[D]. 杭州: 浙江大学信息学院, 2008.

(编辑 张小强)

(上接第 20 页)

- [4] Hill R M. Batching policies for linearly increasing demand with a finite input rate [J]. International Journal of Production Economics, 1996, 43 (2/3): 149-154.
- [5] Hsieh C H. Optimization of fuzzy production inventory models[J]. Information Sciences, 2002, 146(1/2/3/4): 29-40.
- [6] Chen S H, Chang S M. Optimization of fuzzy production inventory model with unrepairable defective products[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 113 (2):887-894.
- [7] Goyal S K. A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor: a comment [J]. Decision Sciences, 1988, 19(1):236-241.
- [8] Potamianos J, Orman A J, Shahani A K. Modelling for a dynamic inventory-production control system [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 96(3): 645-658.
- [9] Rau H, OuYang B C. An optimal batch size for integrated production-inventory policy in a supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(2):619-634.
- [10] 齐二石,张颖. 基于控制理论的连续生产库存管理[J]. 工业工程, 2007, 10(6):10-12.
- QI Ershi, ZHANG Ying. Inventory management of continuous production based on control theory[J]. Industrial Engineering Journal, 2007, 10(6):10-12.
- [11] 夏海洋,黄培清. 随机需求下提前期可控的生产-库存联合优化模型[J]. 控制与决策, 2008, 23(6):631-636.
XIA Haiyang, HUANG Peiqing. Integrated production-inventory model with stochastic demand and controllable lead time [J]. Control and Decision, 2008, 23 (6): 631-636.
- [12] Okubo B. Reserve production capacity in a production inventory system [J]. International Journal of Production Economics, 1996, 44(1/2):159-166.
- [13] Hui I K, Lau H C W. A dynamic inventory-production scheduling model for small scale organization [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22(1/2):89-100.
- [14] 施於人,邓易元,蒋维. eM-Plant 仿真技术教程优技 [M]. 北京:科学出版社,北京希望电子出版社,2009.
- [15] 李国朝, MATLAB 基础及应用 [M]. 北京:北京大学出版社, 2011.

(编辑 张小强)