

# 交叉双环 LED 驱动电源的研究\*

李舒然, 陈 鸣

(中山大学太阳能系统研究所//广东省光伏技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘 要:** LED 是一种非常敏感的半导体照明器件, 故需要性能优越的驱动电源。该文针对 LED 的特性, 提出了创新的交叉双环 LED 驱动电源, 该设计利用双运放 LM358 芯片进行电流电压交叉控制以达到优秀的输出特性。文章首先分析了电路的原理, 然后利用 Matlab 软件对控制策略的幅频特性和相频特性进行了分析, 证明所提出设计的稳定性, 并论述了相关优点及参数计算。电路采用 BUCK 拓扑结构, 以及 LM358 芯片实现交叉双环控制, 可精确控制 LED 驱动电源的输出电压和电流。Simulink 仿真结果及实验结果验证了此电路的可行性和可靠性。

**关键词:** LED; 驱动电源; 交叉双环控制; 恒流稳压驱动

**中图分类号:** TN36 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)02-0014-06

## Study on Alternate Double Loops LED Driver

LI Shuran, CHEN Ming

(Solar Energy System Research Institute//Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** LED is a very sensitive semiconductor lighting device that needs an advantageous driver. A new alternate double loops LED driver based on LM358 (which integrates two operational amplifiers) in line with the characteristics of LED is proposed. The driver demonstrates excellent output characteristics through both current and voltage control. The principle is discussed first and a Matlab simulation is conducted to analyze the control scheme in its amplitude frequency and phase frequency characteristic, verifying the stability of the scheme. Also its advantages and parameters calculation are discussed. The proposed scheme adopts buck topology and achieves alternate double loops control through LM358 which can accurately control the driver's output voltage and current. The Simulink simulation and experiment verify the availability and reliability of the proposed scheme.

**Key words:** LED; driver; alternate double loops control; CC/CV (constant current/constant voltage) driver

传统的照明设备存在发光效率低、寿命短、能耗大等缺点, 而 LED 光源则是高效、环保、长寿命的新型光源, 目前已越来越广泛地应用于家庭、户外、医疗设备、仪器仪表及特种照明等方面, 并将成为未来照明的发展趋势<sup>[1]</sup>。但是, LED 对电源的稳定性要求较高, 需要驱动电源配合才能达到

较高的发光效率和良好的使用效果。由 LED 的电气特性可知, 正向电压与电流成指数关系, 电压小幅增加可导致电流大幅增加, 而工作温度的变化也会对电学特性有重大影响, 且 LED 的 PN 结结温又将直接影响 LED 的出光效率、器件可靠性和器件寿命<sup>[2-5]</sup>, 因此 LED 是一种非常敏感的照明器件。

\* 收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61376014)

作者简介: 李舒然(1990年生), 女; 研究方向: LED 驱动技术; 通讯作者: 陈鸣; E-mail: chenming108@126.com

LED 驱动电源对 LED 照明的重要性主要体现在以下三个方面：第一，影响照明系统效率，第二，影响灯具寿命，第三，影响整个照明系统的寿命。所以，必须采用良好的驱动方案提高 LED 照明的稳定性<sup>[6]</sup>。

目前，LED 驱动电源多采用开关电源，其控制策略主要为恒流、恒压。但在实际应用中，只采取恒流或恒压控制的 LED 驱动电源并不能满足实际应用需要。如果工作环境或 LED 自身的温度发生变化，此时要在相同工作电压下使 LED 维持同等亮度，那么其对应工作电流也会有所变化，因此，如 LED 驱动电源只具备恒压功能，则无法维持同等亮度<sup>[7]</sup>。同样，如驱动电源只具备恒流功能，那么多路灯串并联工作的场合中，若某一路或几路 LED 模组出现故障，而总电流仍保持不变，则其他模组将会被烧毁，从而影响整个 LED 照明系统的运作<sup>[8]</sup>。

因此，本文针对 LED 的工作特性，提出基于 LM358 的 LED 恒流稳压驱动电源，采用 BUCK 拓扑电路实现高效率的能量变换，并利用电流电压双环检测实现峰值电流电压交叉控制，可为一路或多路 LED 模组供电，有所创新，具有重要的现实意义。

## 1 驱动电源结构及原理

驱动电源主要结构如图 1 所示，电路由 DC/DC 变换部分、LED 负载、恒流稳压控制及 PWM 调节模块组成。主拓扑部分采用 BUCK 电路，输入电压为 60 V，开关频率为 50 kHz，输出电压为 23.5 V，输出电流为 340 mA，可驱动 7 颗功率为 1 W 的高亮度白光 LED 灯珠。驱动电源也可以采用其他拓扑结构，设计不同的输入、输出电压及电流，以灵活适应不同照明功率的应用场合。

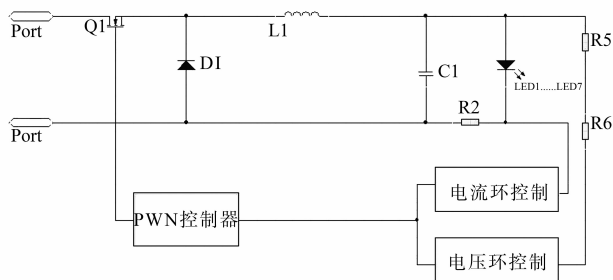


图 1 电路主结构

Fig. 1 Main circuit structure

### 1.1 交叉双环控制方案

交叉双环控制电源即恒压/恒流输出式开关电源，属于恒流稳压电源<sup>[9-10]</sup>。其特点是同时具备电压控制环路及电流控制环路，可根据电路状态选择其中一个环路作为控制环路。当输入电压突然升高，通过 LED 的电流将增大，此时进入电流环控制，使输出电流恒定；当多路 LED 中有一路或几路烧毁时，LED 等效电阻变大，输出电流变小，此时电压环工作，电路具有稳压特性，使输出电流大小符合仍在工作的 LED。这种控制结构可起到过载保护及短路保护的作用，非常适用于 LED 驱动电源<sup>[11]</sup>。

本设计采用 LM358 及双二极管实现恒压/恒流交叉双环控制方案，具体电路如图 2 所示。LM358 内部有两个独立、高增益及具备内部频率补偿的运放<sup>[12]</sup>，一个用作电压比较，一个用作电流比较，分别将电压及电流两个采样值与 TL431 所提供的恒定参考电压进行比较。当输出电压或电流满足一定条件时，相应的环会被选中作为反馈环路。电路具体工作时，实际上两个环路均处于工作状态中，通过 LM358 内两个放大器的输出进行比较，电压较大的一个所连接的二极管被钳位，从而将该运放支路接入整个系统中，而另一个环路此时不起作用。输出信号通过光耦由 PWM 控制器调节 MOSFET 的开关，从而达到对输出电压/电流的控制。

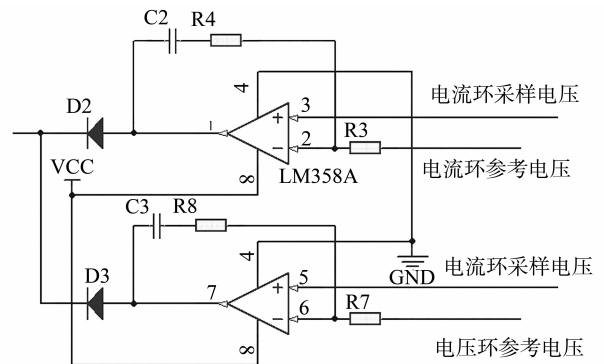


图 2 交叉双环控制部分原理图

Fig. 2 Alternate double loops controller schematic

### 1.2 驱动电源稳定性分析

图 3 为交叉双环 LED 驱动器的控制框图。下面通过电路传递函数对其稳定性进行分析。在 CCM（电流连续）情况下，BUCK 主电路输入（占空比  $D$ ）到输出（输出电压  $V_{out}$ ）的小信号传输函数及反馈控制环节传递函数分别为式 (1) 和式 (2)<sup>[13]</sup>：

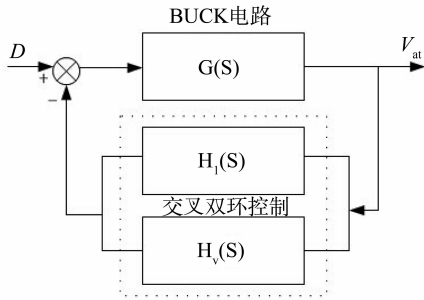


图 3 驱动电源控制框图

Fig. 3 Block diagram of the proposed scheme

$$G_{vd}(s) = V_{in} \frac{1 + \frac{s}{\omega_z c}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad (1)$$

$$H(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, Q = \frac{1}{\omega_0 \left[ \frac{L}{R} + (R_L + R_C)C \right]}, \omega_{zc} =$$

$\frac{1}{R_c C}$ 。在实际设计中各参数如表 1 所示。

表 1 BUCK 电路主要参数

Table 1 Buck converter variables

$V_{in}/V$	$L/\mu H$	$C/\mu F$	$R_L/\Omega$	$R_C/\Omega$	$R/\Omega$
60	600	2 000	0.001	0.037 5	66

将上表数据代入式 (1) 得

$$G_{open}(s) = \frac{1.73 \times 10^{-3}s + 60}{3.4 \times 10^{-7}s^2 + 7.35 \times 10^{-6}s + 1} \quad (3)$$

根据传递函数利用 Matlab 可计算得出其穿越频率为 7.7 kHz, 相位裕度为 30.5°, 系统不够稳定, 需要加入补偿。

根据 (2) 式, 控制环路电流环及电压环的传递函数分别为 (参数经计算及仿真优化后得出):

$$H_1(s) = \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_2 C_2}{s} = \frac{2.5s + 0.1}{1s} \quad (4)$$

$$H_v(s) = \frac{R_s}{R_7} + \frac{R_7 C_3}{s} = \frac{3s + 1}{1s} \quad (5)$$

根据开环传递函数和控制环路传递函数, 可推导出电路的闭环传递函数:

$$G_{fb}(s) = \frac{G_{open}(s)}{1 + G_{open}(s)H(s)} \quad (6)$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (6) 可得电流环控制时的系统闭环传递函数为

$$G_{fb1}(s) = \frac{1.73 \times 10^{-3}s + 6.0s}{3.4 \times 10^{-7}s^3 + 4.332 \times 10^{-3}s^2 + 151s + 6} \quad (7)$$

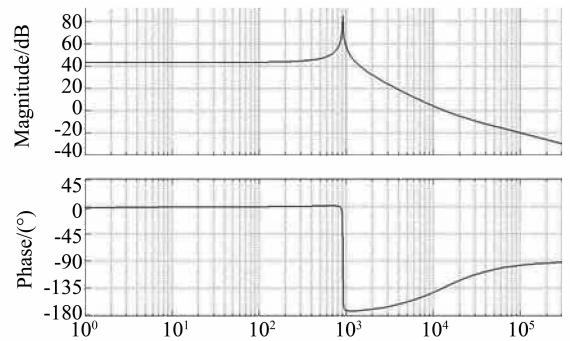


图 4 电流环控制闭环波特图

Fig. 4 Closed loop response bode plot (CC loop activated)

根据式 (7) 可计算出此时穿越频率为 13.8 kHz, 相位裕度为 55°, 如图 4 所示。

将式 (3) 和式 (5) 代入式 (6) 电压环控制时的系统闭环传递函数为:

$$G_{fb2}(s) = \frac{1.73 \times 10^{-3}s + 60s}{3.4 \times 10^{-7}s^3 + 5.197 \times 10^{-3}s^2 + 181s + 6} \quad (8)$$

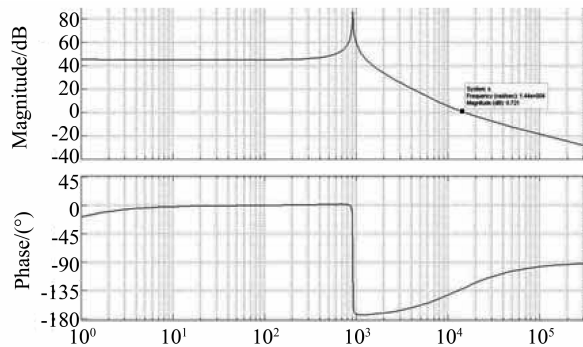


图 5 电压环控制闭环波特图

Fig. 5 Closed loop response bode plot (CV loop activated)

根据式 (8) 可计算此时穿越频率为 14.4 kHz, 相位裕度为 50°, 如图 5 所示。

计算结果显示, 交叉双环 LED 驱动电源在两个控制环路的情况下其相位裕度均比开环时有所提高, 拥有良好的稳定性。

## 2 系统仿真与结果分析

本设计利用 Matlab Simulink 对电路进行了仿真, 以进一步确定部分参数并模拟、优化电路性能。

BUCK 电路参数与表 1 基本一致。LM358 部分采用常数模块、加减模块及 PI 控制器组合替代,

二极管部分采用选通开关进行模拟，选通信号后直接通过 PWM 产生器产生 PWM 波。LED 负载部分采用恒定电阻代替，数值为 LED 正常工作状态下的等效电阻，仿真设计为两路 LED 并联，以检测电源控制效果。仿真模型和控制环路见图 6、7。

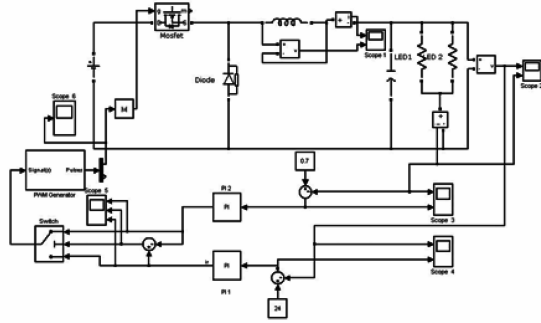
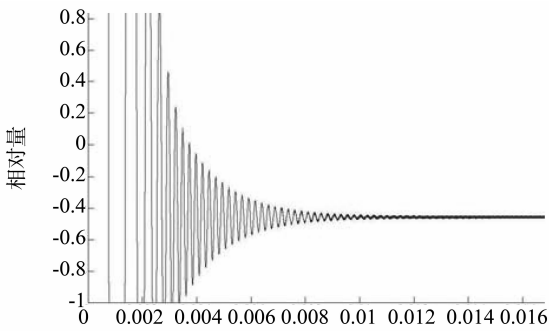
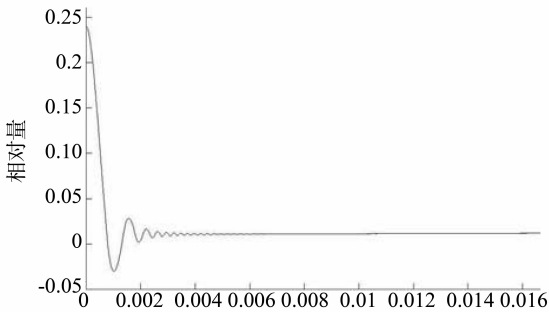


图 6 Simulink 仿真电路图

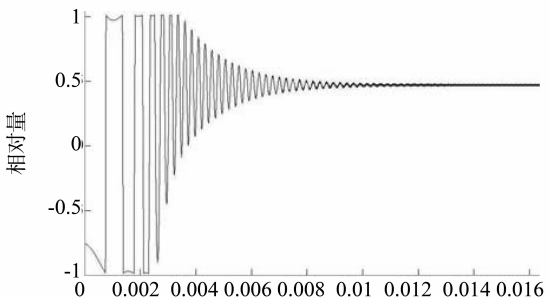
Fig. 6 Simulink simulation of the proposed schematic



(a) 电流环PI输出曲线 t/s



(b) 电压环PI输出曲线 t/s



(c) 选通的PI曲线 t/s

图 7 PI 控制曲线

Fig. 7 PI controller response curves

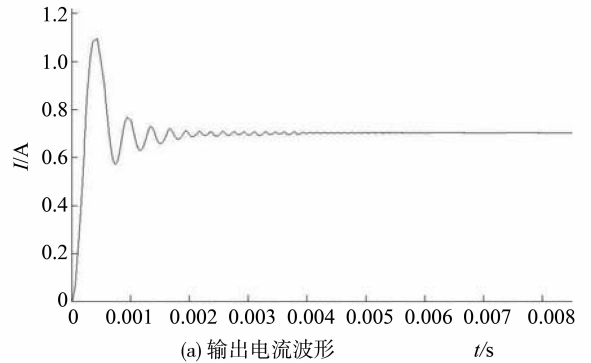
### 2.1 PI 参数整定

控制环路中的电压环和电流环各采用一个 PI 控制器代替，经过调试，电压环 PI 控制器参数为： $p = 2.5, i = 0.1$ ；电流环 PI 控制器参数为： $p = 3, i = 1$ 。由此可确定实际电路中 LM358 两个运放的输入输出端之间的电容电阻值。电流环参数为： $R_a = 10 \text{ k}\Omega, R_4 = 25 \text{ k}\Omega, C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ ；电压环参数为： $R_7 = 100 \text{ k}\Omega, R_8 = 300 \text{ k}\Omega, C_9 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ 。

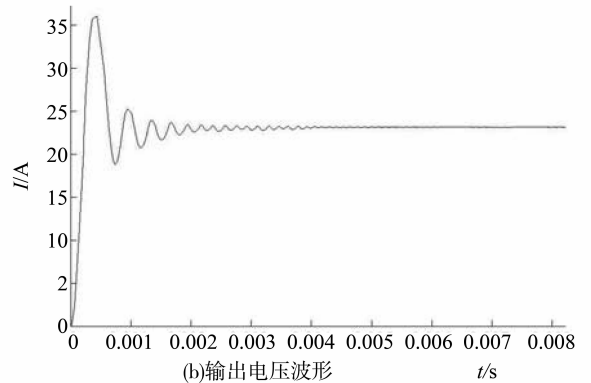
由图 7 可见，控制环路将自动根据电路工作情况在电压环及电流环之间选择其一，最终两个控制环路均达到稳定状态。

### 2.2 输出特性

从图 8 的仿真电流电压输出特性显示交叉双环 LED 驱动电源最终具有稳定的输出。从中可计算出驱动器电流精度为 0.3%，性能良好。



(a) 输出电流波形 t/s



(b) 输出电压波形 t/s

图 8 输出特性仿真波形

Fig. 8 Simulation of output characteristics

图 9 是模拟某一路 LED 故障断路时的输出电流波形。可见此时恒流环不再起控制作用，电路快速进入恒压环，稳定电压，拉低总电流至 340 mA。

### 3 实验验证

根据所提出方案，制作了交叉双环 LED 驱动电源实验装置。电路参数与上述参数基本一致，采

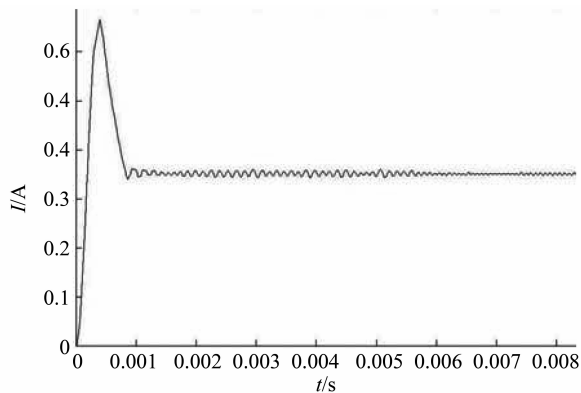
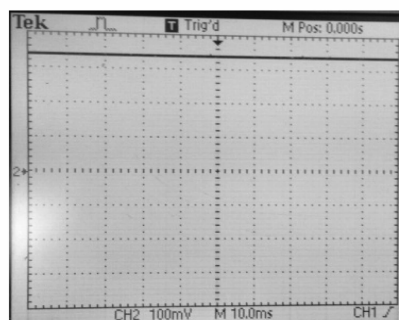


图 9 模拟某路 LED 断路时的输出电流

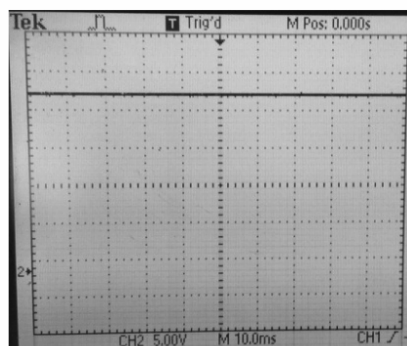
Fig. 9 Output current when certain branch (s) of LEDs break down

用 SG3525 电压型 PWM 芯片产生 PWM 信号控制 BUCK 电路开关通断。以下为实验结果。

由图 10 可见, 交叉双环 LED 驱动器可使输出电流稳定在 340 mA, 正常工作状态下每颗 LED 灯珠的电压稳定在 3.3 V, 体现了驱动电源优秀的输出特性。



(a) 示波器输出电流波形图



(b) 示波器输出电压波形图

图 10 实验驱动器输出特性

Fig. 10 Output characteristics of the test driver

为模拟某颗灯珠出现短路的情况, 用六颗灯珠串联代替原来的七颗灯珠, 此时电路进入电流环控制状

态, 使工作电流维持不变, 而输出电压降低至 19.8 V, 如图 11 所示。

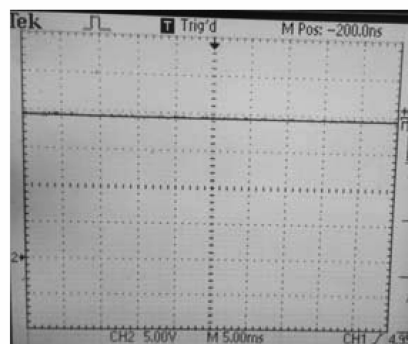


图 11 模拟某颗灯短路时输出电压波形

Fig. 11 Output voltage when a certain LED is short-circuited

在系统工作一段时间后, LED 模组温度上升, 根据 LED 的温度特性, 在相同电压下正向电流将升高, 而在本系统中, 由于电流环的控制, 工作电流稳定不变, 其工作电压也得到了很好的控制。以上情况均体现了驱动器优秀的控制性能。

## 4 结 论

本文提出了一种采用交叉双环控制策略的创新 LED 驱动电源, 对其稳定性进行了理论分析。该方法通过检测 LED 工作电压和电流, 采用恒流/恒压控制方式控制驱动电源, 能在 LED 模组出现升温、短路或断路的故障情况下最大限度地保障系统正常工作, 可有效地稳定 LED 的工作电流电压和起到保护作用。仿真结果证明了该控制策略稳定可靠, 实验结果证明了方案的可行性。

## 参考文献:

- [1] 沙占友. LED 照明驱动电源优化设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 陈海燕, 赵光华. 大功率白光 LED 的结温与发光光谱特性研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(3): 37-40.
- [3] 陈维, 沈辉. 太阳能 LED 路灯照明系统优化设计[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(2): 95-98.
- [4] 胡成龙. 基于 DC-DC 开关变换器的 LED 驱动技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [5] 宋香容, 舒杰. 双环控制 LED 驱动电源设计[J]. 电源技术, 2010, 35(11): 1418-1420.
- [6] 李环平. LED 驱动电源的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

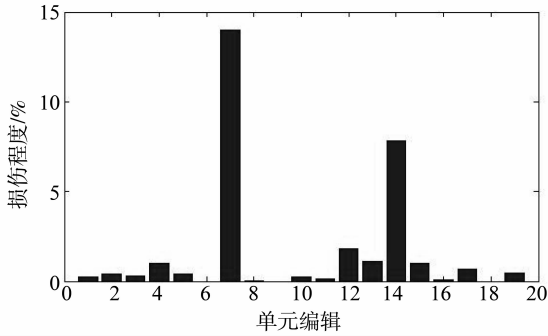


图 4 多损伤检测 (5% 噪音水平)

Fig. 4 Identification of multiple damages (with 5% noise)

谱, 就能成功检测出弦结构的局部损伤。

2) 对损伤程度的检测可以达到很好的精度要求, 且计算量小、检测速度快, 有望应用于幕墙拉索结构的损伤检测。

3) 对测量噪声不敏感, 具有工程实用价值。

#### 参考文献:

[1] 张毅刚. 建筑索结构的类型及其应用[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 8-12.

[2] 张连飞, 区彤, 谭坚. 拉索幕墙在建筑工程中的应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(S1): 371-376.

[3] 刘济科, 李雪艳. 基于灵敏度分析的机械系统损伤识别方法[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(3): 456-459.

[4] 杨秋伟, 刘济科. 结构损伤识别的柔度灵敏度方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(1): 16-19.

[5] 吕中荣, 王文洁, 徐伟华, 等. 基于振动响应的耦合杆系统损伤识别[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(5): 31-35.

[6] 吕中荣, 徐伟华, 刘济科. 基于振动响应的耦合弦系统损伤检测[J]. 应用力学学报, 2009, 26(4): 657-661.

[7] LU Z R, LAW S S. Identification of system parameters and input force from output only [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(5): 2099-2111.

[8] 陈伟欢, 吕中荣, 陈树辉, 等. 高耸结构建造阶段环境振动测试与模态分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(5): 34-40.

[9] 刘喜平, 余龙. 基于含误差测量结果的 Lamb 波损伤检测[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(6): 75-80.

[10] BATHE K J. Finite element procedures in engineering analysis [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1982.

[11] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[12] TIKHONOV A M. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization [J]. Soviet Mathematics, 1963, 4: 1035-1038.

[13] HANSEN P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561-580.

(上接第 18 页)

[7] 巢时斌. LED 驱动方式分析及性能比较[J]. 电气应用, 2011, 30(14): 40-45.

[8] 郝玢鑫. 多路输出高降压恒流 LED 驱动电源[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 178-183.

[9] 徐志宇. 驱动恒流负载的 DC-DC 变换器的能控性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 44-49.

[10] 邓则名, 高军礼. 多闭环调速系统电压内环“最佳”设计的探讨[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000, 39(5): 40-43.

[11] 唐治德. 一种新颖的 BUCK 型 LED 驱动电路[J]. 电

气应用, 2011, 30(6): 45-48.

[12] NARENDHAN N, GU Y. Life of LED-based white light sources[J]. Display Technology Journal, 2005, 1(1): 167-171.

[13] BADDELA S M, ZINGER D S. Parallel connected LEDs operated at high frequency to improve current sharing [C]// Industry Applications Conference, 2004 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE, 2004, 3: 1677-1681.