

PWM调光LED路灯驱动电源的设计

LED路灯驱动电源要求有高效率、高功率因数、低谐波失真及高可靠性,且PWM调光技术也是其重点研究的问题。在此采用PFC+LLC谐振变换器的结构,选用LLC谐振变换器控制芯片UCC25710,分析了PWM调光的工作原理,给出了150 W单路输出有PWM调光功能的LED路灯驱动电源具体电路的设计流程。实验结果表明,驱动电源具有很高的技术性能指标和优良的PWM调光性能。

任志山 王祝华/龙岩学院机电工程学院

0 引言

LED是以半导体管芯作为发光材料的一种电子发光器件,具有发光效率高、功耗小、寿命长、光污染小和光线质量高等优点^[1],近年来越来越多地被应用于通用照明领域。尤其在道路照明方面,其优势更为明显,LED路灯与高压钠灯相比,可省电50%以上。LED路灯的输出功率一般都大于75 W,需要大功率的恒流直流电源驱动,要求驱动电源有高转换效率,高的功率因数,低电流谐波失真(THD),输出电流恒定等高性能指标,及有过电压、欠电压及过电流等多种保护功能,以确保驱动电源的可靠性与使用寿命,这样才能最大限度地发挥LED的优势。同时,为了追求节能环保,调光成为了LED照明中另一项必不可少的技术,LED路灯驱动电源若有PWM调光功能与接口,则可满足智能照明的需求。在此采取了PFC+LLC的两级变换方案,设计了一款性能优良并有PWM调光功能的最大输出功率150 W

LED路灯驱动电源,并通过实验验证了方案设计的正确性。

1 驱动电源的方案

LED路灯驱动电源要有高的转换效率,必须采用工作频率很高的开关电源。开关电源有个突出的缺点,就是会产生较强的电磁干扰。主要的解决措施是在电路的输入端接入EMI滤波器^[2]。对于大功率的LED路灯驱动电源,电路的输入端就得接入二级EMI滤波器。同时为了降低LED驱动电路所产生的谐波,减小对供电系统的污染,开关电源电路就必须采用功率因数校正(PFC)控制技术。一般60 W及以下的LED灯具,驱动电源可采用单级PFC结构。而对于功率普遍大于60 W的LED路灯来说,单级PFC电路难以同时兼顾PFC和电路输出恒流调整性能,容易产生较大的纹波电压^[3],这时需要采用两级电路架构实现这一目标,即PFC+DC/DC两级结构。

功率因数校正电路根据电路采用的器件类型不同,可分为无源和有源两种类型。而有源功率因数校正(APFC)电路结构较为复杂,设计比较复杂,成本较高,但具有输入电压范围宽、输出电压比较稳定、电流谐波小、功率因数改善好和效率高等优点^[4]。因此,功率大于25 W的开关电源,大都采用APFC电路。L6562是业内较为普遍使用的一款性能优良的PFC控制芯片,L6562a是其改进型,本设计就是选用L6562a,采用以Boost升压电路为主拓扑结构设计APFC电路。具体电路设计参见文献[5]。



任志山/副教授

关键词/Keywords

LED路灯·
驱动电源·
PWM调光·
LLC谐振变换器·

福建省科技厅重点项目(2014H01010213)。

为充分发挥LED高效节能、体积小的优势,DC/DC变换器必须尽可能地提高电源转换效率及功率密度,降低开关噪声。半桥LLC谐振变换器在全电压范围内、全负载条件下能够实现一次侧开关管的零电压开关(ZVS)和二次侧整流管零电流开关(ZCS),大大提高了开关效率;且具有开关管与整流管电压应力低、开关损耗低、开关频率高、整流管无反向恢复损耗、允许输入电压范围宽、效率高、EMI噪声小和功率密度大等优点^[6],使得目前半桥LLC谐振变换器在大功率LED驱动电源中成为倍受青睐的热门拓扑选择。TI公司推出了业内首个多路输出能准确控制的半桥LLC驱动芯片UCC25710,采用闭环LED串电流控制以保持输出电流恒定,并具有能提供高准确度的PWM调光及模拟电压调光的接口,并具备过电压、欠电压、输入过电流保护和自动再启动等功能^[7],成为本方案设计的选择。本方案设计的150 W可调光LED驱动电源的电路结构如图1所示。



图1 驱动电源的电路结构

2 LLC谐振变换器的设计

半桥LLC谐振变换器电路图如图2所示。两个占空比为50%互补驱动的开关管 Q_A 、 Q_B 构成半桥结构,谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 和变压器的励磁电感 L_m 构成LLC谐振网络,变压器二次侧由整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 构成全桥整流电路。

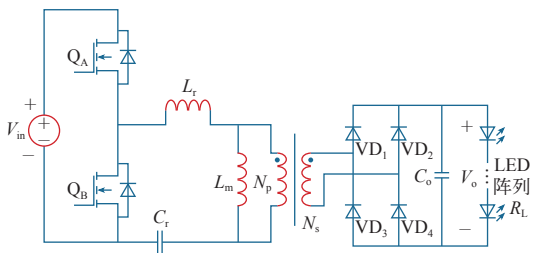


图2 半桥LLC谐振变换器电路

LLC谐振变换器有两个谐振频率,当变压器二

次侧整流二极管导通时, L_m 被变压器二次电压钳位,仅 L_r 、 C_r 参与谐振,谐振频率为 $f_r = (2\pi\sqrt{L_r C_r})^{-1}$;当二次侧整流二极管截止时,变压器不向二次侧传递能量, L_r 、 L_m 与 C_r 共同参与谐振,谐振频率为: $f_m = [2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}]^{-1}$ 。变换器的电压增益为^[8]

$$M_{dc} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{2n} \frac{1}{\sqrt{[1 + 1/K - 1/(Kf_n^2)]^2 + Q^2(f_n - 1/f_n)^2}} \quad (1)$$

式中, $Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{eq}$ 为谐振电路的品质因数; $f_n = f/f_s$ 为归一化频率; f 为开关频率; $K = L_m/L_r$ 。

$$R_{eq} = 8n^2 R_L / \pi^2$$

式中, R_{eq} 为二次侧等效负载折算到变压器一次侧所得到的交流等效负载电阻; R_L 为负载电阻; n 为变压器一、二次匝数比。

所设计的大功率LED驱动电源的负载为150个1 W的LED,按15串10并阵列排列,输出电压 $U_o = 47$ V,输出电流 $I_o = 3.2$ A,可得出负载电阻 $R_L = 14.7 \Omega$ 。设整流二极管导通压降 $U_r = 0.6$ V,LLC谐振变换器的输入电压 $U_{in} = 400$ V,取LLC谐振变换器的效率 $\eta = 0.95$,谐振频率 $f_r = 100$ kHz,考虑到二次漏感的影响,在谐振频率点变换器的增益一般在1.1~1.2之间,取 $M_{dc} = 1.15$ ^[9]。则变压器的实际匝数比为

$$n = M_{dc} \frac{U_{in}/2}{U_o + U_r} = 4.8 \quad (2)$$

根据式(1)可绘出LLC谐振变换器 K 、 Q 变化所得到的电压增益曲线,进行分析。 Q 值是传导损耗、开关损耗和驱动电流之间的平衡值,其选取原则是:在满足最低输入电压且满载的直流增益时,尽可能选取大的值。同样,电感系数 K 也需要在损耗和增益之间做一个折中的选择,工程上一般选取 K 值在5~10之间^[10]。经过对电压增益曲线分析,选取 $Q = 0.3$, $K = 7$ 。

由 $R_L = 14.7 \Omega$,得到交流等效负载 $R_{eq} = 274.5 \Omega$,则谐振电容的大小为

$$C_r = \frac{1}{2\pi Q f_r R_{eq}} = 28.99 \text{ nF} \quad (3)$$

这里取 $C_r = 30$ nF,从而得到谐振电感 L_r 和励磁电感 L_m 分别为

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} = 84.4 \mu\text{H}$$

$$L_m = KL_r = 590.8 \mu\text{H}$$

3 UCC25710控制电路的设计

TI公司推出的UCC25710是一款能准确控制的半桥LLC谐振变换器控制芯片，其内部包含了实现半桥LLC谐振变换器所必须的功能模块：通用电流放大器、压控振荡器（VCO）、基准调节器、软启动、调光占空比的补偿、OV和UV保护、电流限制及热关断。其起动电流及工作电流低，VCO的最小与最大由所外接电阻所确定，准确度高（3%~6%），LED串电流采用闭环控制，使得输出恒流准确度高。此外还带有PWM调光接口，芯片内部具有调光期间减少音频噪声和提供加快LED电流的上升与下降时间等附加功能。UCC25710引脚图如图3所示。该芯片主要是为多变压器、多串LED架构的LED电视背光源而设计的^[7]，但其优秀的性能对于需要PWM调光接口、输出变压器仅有一个的LED路灯驱动电路也是一个很好的选择。在此主要介绍本设计主要相关控制电路及参数的设计，其他的通用外围电路及参数的设计参照TI公司的芯片介绍。



图3 UCC25710引脚图

3.1 PWM调光电路

图4为基于UCC25710的LLC谐振LED驱动器的PWM亮度调节的功能原理图。UCC25710的

DIM引脚输入低频的PWM调光控制信号，该信号控制与LED负载串联的开关管 Q_C 的导通与断开，同时还与芯片内部压控振荡器（VCO）输出的MOSFET驱动控制信号一起控制LLC谐振变换器的开关管 Q_A 、 Q_B 。各点的工作波形如图5所示^[11]。

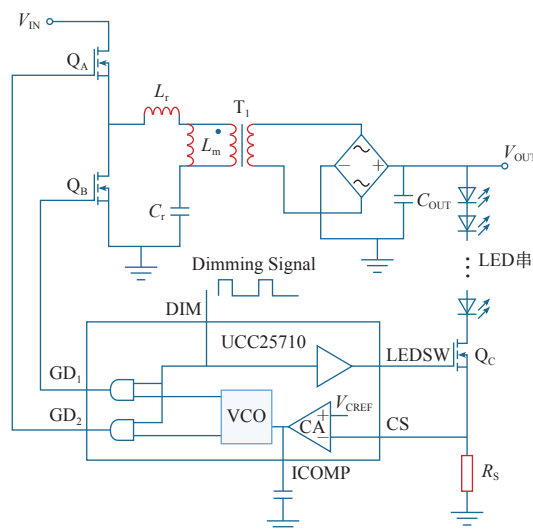


图4 PWM亮度调节功能原理图

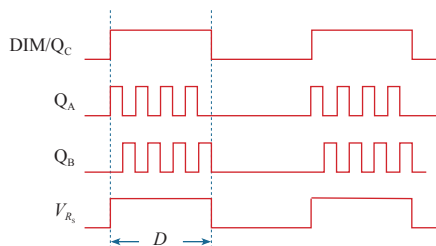


图5 PWM调光时的各点工作波形

当DIM输入的PWM信号为高电平时，LLC谐振变换器正常工作，负载LED串的电为： $I_L = U_o / (R_{LED} + R_s)$ ，采样电阻 R_s 上的电压 $V_{R_s} = I_L R_s$ ，该电压通过与ICOMP放大器的 V_{CREF} 电压参考值比较以调节压控振荡器（VCO）的控制信号电压，VCO频率与VCO控制信号成反比，LLC谐振变换器的功率又与VCO的频率成反比。因此，当流过 R_s 的峰值电流 I_{Lm} 超过设定值，就会导致LLC谐振变换器的输出功率下降，从而使 I_{Lm} 回到设定值；反之当 I_{Lm} 小于设定值，同样会导致LLC振荡器的输出功率增大，从而确保LED负载峰值电流 I_{Lm} 为一恒定值。而当DIM变为低电平， Q_A 、 Q_B 和 Q_C 立即关闭，负载LED停止导电。这样，通过改变DIM

脚输入的PWM信号的占空比为 D ，就可以实现流过LED负载平均电流 I_L 的调节，其关系式为： $I_L = I_{Lm}D$ ，从而实现对负载LED亮度的调节。并且由于在LLC振荡器正常工作时，负载值为 R_{LED} 固定不变，避免了设计复杂化。

图4中采样电阻 R_S 的取值为

$$R_S = \frac{V_{CREF}}{I_{Lm}} \quad (5)$$

V_{CREF} 是CREF引脚的电压，允许范围为0.6~2.7 V，它可由引脚VREF提供的5 V基准电压经分压得到，这里取值为1.6 V，则采样电阻 R_S 值为0.5 Ω 。

UCC25710的6脚LEDSW的输出是用来控制与LED串与采样电阻之间的调光开关管 Q_C 的，但由于LEDSW的输出驱动能力弱，驱动电流的最大值仅为2 mA，因此用2N2222和2N2907组成互补驱动电路。 Q_C 与LED串相串联，所流过的最大电流为3.2 A，而在其断开时要能够承受66.5 V的电压，为保证LED串电流的准确度要求导通电阻尽可能小。因此选用N沟道MOSFET管STP80NF10，其导通电阻仅为12 m Ω 、耐压100 V、最大漏极电流51 A的。调光驱动电路如图6所示。

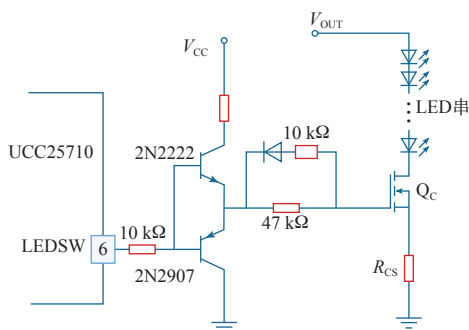


图6 PWM调光驱动电路

3.2 LLC谐振变换器开关管的驱动电路

LLC谐振变换器开关管 Q_A 、 Q_B 选用K13A65U，其源漏击穿电压650 V，最大导通电流大于13 A，导通电阻小于0.38 Ω ，属N沟道增强型MOSFET。K13A65U的 Q_g 在 $V_{DS} = 400$ V时为28 nC，开关管导通时间为95 ns，取0.1 μs ，则其驱动电流应大于280 mA。

UCC25710的栅极驱动输出端 GD_1 （2脚）、

GD_2 （3脚）输出2个输出信号相位180°、固定死区时间500 ns的栅极驱动信号。在UCC25710芯片介绍中，建议 GD_1 、 GD_2 脚串联一小电阻后接脉冲变压器的二次侧，通过脉冲隔离变压器驱动LLC振荡器开关管 Q_A 、 Q_B 。然而栅极驱动输出端输出高电平为3.0 V，驱动电流仅为20 mA，实际使用时无法驱动 Q_A 、 Q_B 。

为提高 GD_1 、 GD_2 的驱动能力，设计将 GD_1 、 GD_2 的输出端连接一个双路高速低侧电源MOSFET驱动器UCC27324，接入后匝数比为1:1:1。脉冲隔离变压器的一次侧，脉冲隔离变压器的二次侧接入开关管 Q_A 、 Q_B 。UCC27324的输出端OUTA、OUTB的输出高、低电平分别随输入端INA、INB的输入电平变化，最高输出电平约为 V_{CC} 值，最大输出驱动电流可达4 A^[12]，可满足实际需求。具体LLC谐振变换器开关管的驱动电路如图7所示。

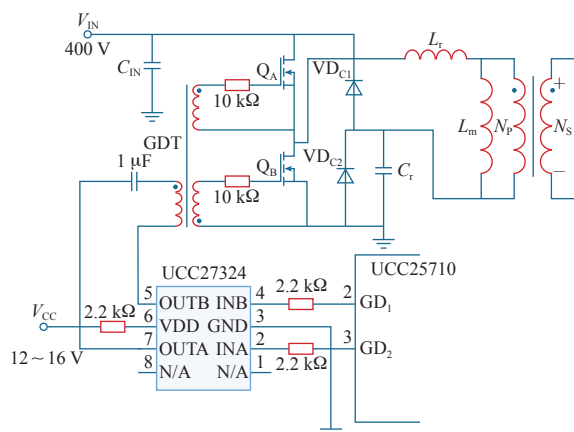


图7 基于UCC25710的开关管驱动电路

3.3 保护电路

控制芯片UCC25710具有输出过电压、欠电压和输入过电流保护等多种保护功能，并能够在故障消除后，经10 ms启动复位延时后，开启LLC振荡器软启动。

3.3.1 输出过电压与欠电压保护电路

保护电路如图8所示。LLC振荡器输出电压经 R_{OV1} 、 R_{OV2} 分压后，送入UCC25710的过电压检测脚OV进行检测。OV阈值为2.6 V，即当OV脚检测到的采样电压大于2.6 V，为过电压故障。取

$R_{OV1} = 15\text{ k}\Omega$, $R_{OV2} = 330\text{ k}\Omega$, 则LLC谐振变换器输出过电压保护值为59.8 V。

将LLC振荡器输出电压经 R_{UV1} 、 R_{UV2} 分压后, 送入UCC25710的UV脚进行检测。UCC25710的欠电压检测脚UV的阈值为2.4 V, 当UV检测到的电压值低于2.4 V, 为欠电压故障。取 $R_{UV1} = 33\text{ k}\Omega$, $R_{UV2} = 510\text{ k}\Omega$, 则LLC谐振变换器输出欠电压保护值为39.7 V。

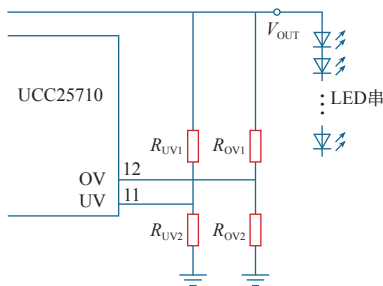


图8 输出过电压与欠电压保护电路

3.3.2 输入过电流保护电路

UCC25710的13脚（CL）用于平均峰值输入电流检测。它通常是采用一个电流互感器（CT）串联在LLC谐振变换器变压器的二次侧, 通过电流互感器、整流电路及电阻 R_{sp} , 将电流互感器一次侧的平均电流转化为电阻 R_{sp} 两端的电压, 送入UCC25710的CL脚, 电路如图9所示。当CL超过0.95 V时, LLC谐振变换器开关管的栅极驱动器被禁用, LEDSW变为低电平; 当CL的电压降低到475 mV时, LLC谐振变换器软起动周期开始工作。取电流互感器电流比 n_1 为100, 取输出电流值 $I_o = 3.2\text{ A}$ 的150%为输出电流的过电流值, LLC振

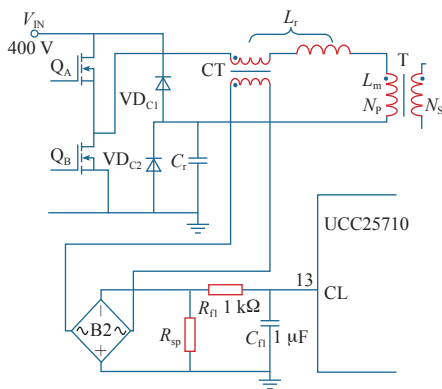


图9 输入过电流保护电路

荡器效率 η 为95%, 则LLC振荡器一次电流的过电流为 I_{S_max} 与电阻 R_{sp} 的取值公式为

$$I_{S_max} = 1.5I_o/(n\eta) \tag{6}$$

$$R_{sp} = 0.95\text{ V}/[I_{S_max}(1/n_1)] \tag{7}$$

得到电阻 R_{sp} 的值为90.47 Ω , 取91 Ω 。图9中电阻 R_{f1} 和 C_{f1} 为截止频率为159 Hz的低通滤波器。

4 实验测试

根据以上的原理分析和参数设置, 设计了15并10串连接方式的150 W可PWM调光的LED路灯驱动电源。PWM信号占空比为100%时, 通过改变输入电压, 所测得的驱动电源的输出电流、功率因数PF、总谐波失真THD及效率如下表所示。从表中数据可看出, 在110~260 V的宽输入电压范围内, 输出电流均保持在3.20 A左右, 有很好的恒流效果; 整机的工作效率大都在90%以上, PF值在0.98以上, THD小于12%, 有很高的技术性能指标。

表 测试结果

输入电压/V	输出电流/A	效率(%)	功率因数PF	THD(%)
120	3.188	89.86	0.9941	6.3
180	3.194	91.54	0.9903	7.8
220	3.198	92.15	0.9864	9.1
260	3.201	92.35	0.9817	11.8

图10为LED路灯输入电压220 V、在UCC25710的DIM脚（9脚）输入频率为200 Hz时的不同占空比与输出功率的关系曲线, 从中可看出驱动电源能实现占空比从1%到100%的调光, 其线性性能优良, 实现了平稳调光。

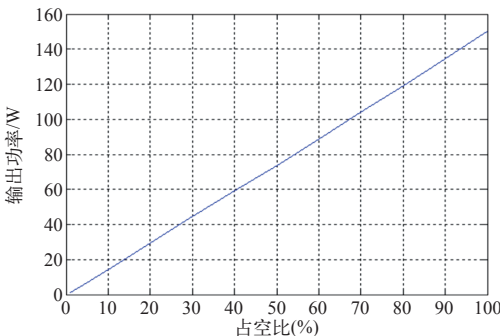


图10 PWM信号占空比与输出功率关系图

(下转第68页)

作为一名电气设计者，对于BIM的发展，希望能够在实现二维绘图的基础上拓展开三维绘图优势，提高设计者绘图效率，并且能够建造出一个名副其实的建筑物信息模型。

4 结束语

本文主要讨论了BIM在电气设计中应用情况。三维绘图方式的出现为电气设计者提供了一个很直观的设计平台，三维协同设计也使各专业之间能够更加及时高效的沟通；但是由于二次开发欠

缺等问题导致三维绘图在电气设计应用过程中出现一些新问题。为了克服三维绘图的一些缺点，现阶段需要带动BIM在整个建筑周期各阶段的发展，建立比较完整、符合要求的族库，制定BIM行业及绘图标准并实施，加快二次软件的开发，那么BIM在设计院的普及也就指日可待。

参考文献

[1] GB 50034—2014 建筑照明设计标准[S].

(收稿日期：2015—09—10) **EA**

(上接第24页)

此外，LED路灯经电磁兼容、传导干扰测试系统仪器EMC500测试，所测得的性能指标完全符合GB 17743—2007国家电磁兼容强制性认证标准及NE 55015（2013）欧盟灯具设备电磁兼容标准的要求。

5 结束语

本文提出了一种PWM调光150 W LED路灯驱动电源。电路采用二级EMI滤波 + PFC + LLC振荡器的结构。并选用TI公司专为多变压器、多串LED架构的驱动电源所开发的LLC振荡器控制芯片UCC25710，将其应用在单变压器输出的采用15串10并阵列连接方式的单路150 W LED路灯驱动电源上。通过对具体调光驱动电路、振荡器开关管驱动电路及保护电路的设计，电源具有高效率、高功率因数和高可靠性等高技术性能指标及优良PWM调光性能，有效地节省了外围电路，很好地满足室外大功率智能照明及其他大功率调光LED照明的需求。

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.
- [2] 王丽，陈杨，张小青．开关电源EMI滤波器的设计[J]．电气时代，2006(9)：131-133.
- [3] Zhang Bo, Yang Xu, Xu Ming, et al. Design

of boost-flyback single-stage PFC converter for LED power supply without electrolytic capacitor for energy-storage [C]. IEEE, 2009: 1668-1671.

- [4] 倪海东，蒋玉萍．开关电源专用电路设计与应用[M]．北京：中国电力出版社，2008.
- [5] STMicroelectronics. L6562a transition-mode PFC controller datasheet [EB/OL]. (2007) [2011-08]. <http://www.st.com>.
- [6] 任凌，王志强．不对称半桥谐振变换器[J]．电力电子技术，2006，40(1)：68-69.
- [7] Texas Instruments. UCC25710 98-W LLC resonant half-bridge 4-string LED driver design review [EB/OL]. [2011-05-07]. <http://www.ti.com.cn>.
- [8] 邓翔，李大伟，杨善水．LLC变换器中谐振元件的设计[J]．电力电子技术，2013，47(2)：7-9.
- [9] 高海生，雷宝．基于LLC谐振的150 W LED驱动电源设计[J]．华东交通大学学报，2014，31(1)：124-129.
- [10] 张振银，秦会斌，刘琦，等．基于LLC的半桥谐振变换器设计[J]．电子器件，2010，33(5)：587-590.
- [11] Michael O'Loughlin. LLC LED驱动器简化设计[J]．中国电子商情(基础电子)，2012(3)：44-46.
- [12] Texas Instruments. UCC27324 Dual 4-A peak high-speed low-side power-MOSFET drivers [EB/OL]. [2013-05-29]. <http://www.ti.com.cn>.

(收稿日期：2015—09—01) **EA**