

一种模拟 3 V 锂电池供电的 DC-DC 设计

杜培德, 李晓露, 朱文锦, 周盛涛, 褚祝军, 李亚情

(北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 微光像增强器采用 3 V 锂电池供电, 随着电池电压下降, 直流工作点变化或调整可能引起其内部高压电源输出异常, 导致像管出现闪烁、熄灭或高亮等故障。通常使用具有“电池模拟功能”的直流电源进行供电特性验证, 该类设备功率大, 功能多, 价格也昂贵, 像增强器功率小, 若采用这种设备则利用率低以至于研发成本高。基于恒流源控制 LDO 输出, 设计一种模拟 1.4 V~3.4 V 锂电池充放电的 DC-DC 电路, 经仿真和实测试验, 输出电压能够线性上升或下降且速率可在数十毫秒至数小时内可调, 具备模拟电池供电功能, 该电路成本较低, 其改进线路还可用于其它领域功率产品作直流扫描分析验证。

关键词: 模拟电池供电; 恒流源控制; 直流扫描分析; 像增强器

中图分类号: TN22

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200299

中文引用格式: 杜培德, 李晓露, 朱文锦, 等. 一种模拟 3 V 锂电池供电的 DC-DC 设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 47-50.

英文引用格式: Du Peide, Li Xiaolu, Zhu Wenjin, et al. DC-DC design of simulating 3 V lithium battery power supply[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 47-50.

DC-DC design of simulating 3 V lithium battery power supply

Du Peide, Li Xiaolu, Zhu Wenjin, Zhou Shengtao, Chu Zhujun, Li Yaqing

(North Night Vision Technology Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: The image intensifier is usually powered by 3 V lithium batteries, as the battery voltage dropping, the change or adjustment of DC bias point may lead the internal high-voltage power supply output to be abnormal, which may cause the image tube to flicker, extinguish or highlight. Generally, the power supply characteristics of image intensifier is verified using a DC power supply with "Battery Simulating Function". This equipment has high power, multi functions and high price. The image intensifier needs little power, if the equipment is used, the utilization of the equipment will be so low that cause high cost of R&D. Based on the constant current source controlling LDO output, a DC-DC circuit which could simulate charging and discharging of 1.4 V~3.4 V batteries was designed. Software simulation and actual test results verified the output voltage can rise or fall linearly, and the rate could be adjusted in tens of milliseconds to hours. The function of simulating battery power supply is achieved. This circuit has low cost and its improved circuit can also be used for DC sweep analysis of power products in other applications.

Key words: simulating battery power supply; constant current source control; DC sweep analysis; image intensifier

0 引言

微光像增强器是将目标物体反射的极弱光线通过阴极光电转换、微通道板电子倍增和荧光屏光电转换实现图像再现和亮度增强的成像器件^[1], 主要由高压电源和像增强管构成, 具有体积小、重量轻、成像清晰易辨识等特点, 广泛用于观察镜、头盔、枪瞄等光电设备中。这类光电设备大多采用锂电池供电, 通常电压范围 1.4 V~3.4 V, 电池的特性是输出电压会随用电时间下降, 此时高压电源内部进行前端 DC-DC 稳压或线性稳压调整以稳定各路高压输出^[2]。由于直流工作点的变化或调整, 高压输出可能在某个输入电压点或范围时发生波动或自激, 可能导致像管出现闪烁、熄灭、高亮等异常现象。

因此, 研发产品时必须进行电池供电特性验证。

微光像增强器的功耗为数十毫瓦, 常规 AA 电池容量为数百至上千毫安时, 若使用电池验证则需数十小时, 耗时费力。在电池两端并联额外的负载可以加快放电, 但放电速率不易控制, 难以精确验证不同放电速率时的供电稳定性。目前, 具有“电池特性模拟”功能的直流电源能够设置输出阻抗, 可模拟电池充、放电特性, 输出功率大, 功能丰富, 但价格昂贵, 如 ITECH 公司的 IT6400 序列电源^[3]。微光像增强器所需功率很小, 若采购这类设备使用, 则其利用率低以至于研发成本很高。

本文基于恒流源控制线性稳压器(LDO), 设计一种输出电压线性上升或下降, 且速率能从数十毫秒至数小

微电子技术 Microelectronic Technology

时可调的 DC-DC 电路,能够模拟 1.4 V~3.4 V 电池充放电特性,电路构成相对简单,成本低,其改进线路还可用于其他功率大的电路进行直流扫描分析(DC Sweep)验证,实用价值明显。

1 电路结构与原理

1.1 锂电池放电特性

锂电池相对于碳性电池、碱性电池、镍氢电池具有重量轻、容量大、放电稳定等优点,非常适合像增强器这类便携低功耗器件使用,其放电特性和其他电池类似,即电压随放电时间分三个阶段变化,以松下的 CR123A^[4] 锂电池为例,如图 1 所示。

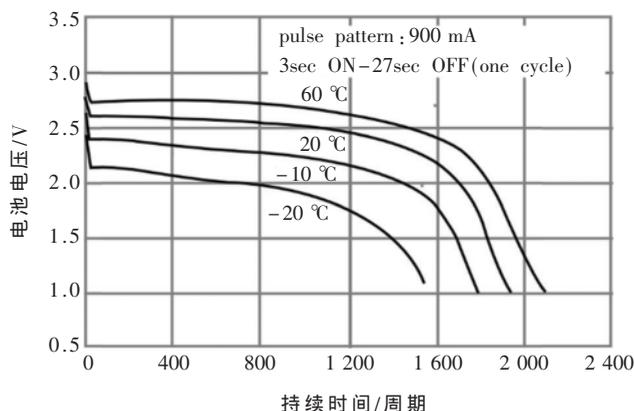


图 1 CR123A 锂电池放电特性

图 1 中每个放电周期 30 s,放电时间 3 s,放电电流 900 mA,初始阶段电池电压以指数规律快速下降,持续时间较短;然后进入线性阶段,电压平缓下降;最后进入电量耗尽阶段,电压急剧下降。由电池理论还可知不同放电电流的曲线形状相似^[5],即使很小的放电电流也会呈现三个阶段,各阶段下降速率、持续时间分别同电流成正比和反比。

1.2 模拟电池供电等效电路及功能要求

由于功耗较小,电池供电时各阶段电压下降速率相对较慢,三个阶段均可等效按 $V=kt$ 线性变化, V 为电池电压, k 为下降速率, t 为放电时间。因此,设计一个输出电压线性下降并可调整 k 的电路即可模拟电池供电。

为简化电路设计,调节 k_1 、 k_2 和 k_3 三种速率,分别使输出在 t_1 、 t_2 和 t_3 时间内均由 3.4 V 下降至 1.4 V,简化电路设计但加严了等效供电特性。

另外,像增强器可能应用于边充电、边工作的系统中,充电时电池电压是一个线性上升直至充满维持的过程,因此该电路还应能实现输出线性上升并最终恒压的功能,这样便可全面模拟验证电池正常平缓 and 异常快速充放电时像增强器的稳定性。

1.3 DC-DC 输出电压调整方式

输出可调即要求电路进行 DC-DC 变换,图 2 所示为常见的 PWM 调整和线性稳压调整方式。

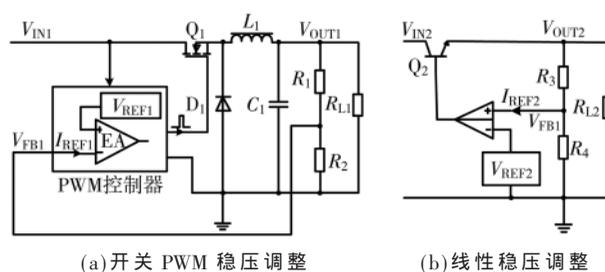


图 2 DC-DC 输出调整方式

图 2 这两种方式均是对输出电压 V_{OUT} 采样后和基准电压 V_{REF} 进行比较,以调整 PWM 驱动信号的占空比或晶体管的导通程度实现输出稳压。以图 2(b)为例,其 V_{OUT} 如式(1)确定。

$$V_{OUT2} = V_{REF2} \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) + I_{REF2} R_3 \quad (1)$$

式中 I_{REF2} 为基准电压源的基准电流,通常 V_{REF2} 固定不变,调整 R_3 或 R_4 即可改变 V_{OUT} 。要实现 V_{OUT} 自动调整,可采用数字电位器,编程选择 R_3 、 R_4 即可。另外,使用模数转换器(ADC)直接对 V_{OUT} 采样,对 ADC 编程;或采用单片机编程控制 PWM 输出的占空比亦可实现 V_{OUT} 自动调整。

1.4 模拟电池供电 DC-DC 结构及原理

本文使用图 2(b)的 DC-DC 方式,输出电压上升、下降速率自动调整则基于恒流源控制 LDO 输出,电路结构如图 3 所示。

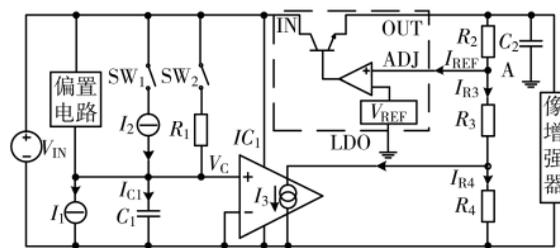


图 3 模拟电池供电电路结构框图

由电容的 $U-I$ 关系式 $I_C = CdU_C/dt$ 可知,如果充电或放电电流 I_C 为恒定直流,那么电容电压 U_C 将按线性变化,即 $U_C = (I_C/C)t$,变化斜率 $k = I_C/C$,改变 I_C 或电容量 C 的大小即可实现不同的 k ,符合上述 1.2 分析的功能要求。

为实现充放电功能,分别设置充电恒流源 I_2 和放电恒流源 I_1 。为简化设计,采样用同一个电容 C_1 充放电,即有 $I_2 = I_1 + I_{C1}$,取 $I_2 = 2I_1$,则电容充电电流 $I_{C1} = I_1$,这样实现充电和放电相同的 k 值。

基于图 2(b)控制设置反馈电阻 R_2 、 R_3 和 R_4 ,设计一个电压控制电流源 I_3 , I_3 跟随 C_1 两端的电压 V_{C1} 的变化,使 I_3 通过电阻 R_2 、 R_3 形成采样电压并和基准 V_{REF} 比较,最终控制 LDO 输出 V_{OUT} 按 V_{C1} 的变化规律输出,如式(2)所示。

$$V_{OUT} = (I_3 + I_{R4} + I_{REF}) R_2 + V_{REF} \quad (2)$$

如图 3 中 A 点所示,该点电压被钳位到 V_{REF} ,因此

微电子技术

Microelectronic Technology

式(2)可写为式(3)。

$$V_{OUT} = \left(I_3 + \frac{V_{REF} - I_3 R_3}{R_3 + R_4} + I_{REF} \right) R_2 + V_{REF} \quad (3)$$

电路要求模拟 1.4 V~3.4 V 电池电压,包括模拟 1.4 V 至 3.4 V 充电和 3.4 V 至 1.4 V 放电过程。假设最小电压 $V_{OUTmin}=1.4$ V 和最大电压 $V_{OUTmax}=3.4$ V, V_{OUTmin} 对应充电初始时刻和放电结束时刻,此时 I_3 均为零, V_{OUTmin} 可由式(4)限定。

$$V_{OUTmin} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4} \right) + I_{REF} R_2 \quad (4)$$

由于 A 点电压被钳位, I_3 虽受 V_C 控制但最大只能到 V_{REF}/R_3 , V_{OUTmax} 将由式(5)限定。

$$V_{OUTmax} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) + I_{REF} R_2 \quad (5)$$

因此,通过调整 R_2 、 R_3 和 R_4 即可改变 V_{OUTmin} 和 V_{OUTmax} 。另外, V_{OUTmax} 限制刚好使得电路实现了模拟电池充满电后电压维持恒压状态的功能,并避免异常情况下 V_{Cl} 失控导致 V_{OUT} 过高。

为简化控制设计,采用手动开关 SW_1 和 SW_2 控制模拟充电和放电。 SW_2 保持断开, SW_1 闭合, C_1 被 I_{Cl} 充电, V_{OUT} 线性上升直至 V_{OUTmax} 钳位,模拟电池充电过程; SW_1 断开, C_1 被 I_1 放电, V_{OUT} 线性下降直至 V_{OUTmin} , 模拟电池放电过程。当只需进行模拟电池放电时, R_1 选取很小的值, SW_1 保持断开, 闭合 SW_2 , C_1 被快速充电, V_{OUT} 快速建立并钳位; 断开 SW_2 , V_{OUT} 线性下降。

2 电路设计与仿真

2.1 电路设计

基于图 3 结构,本文设计的模拟电池供电电路如图 4 所示,各部分组成和功能如下所述。

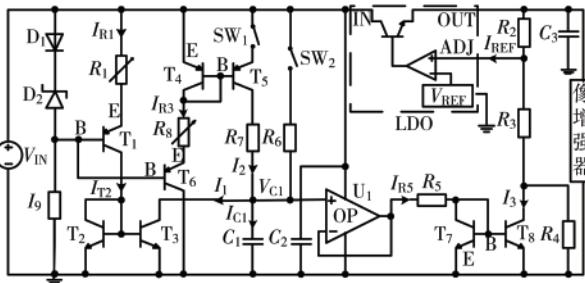


图 4 本文设计的模拟电池供电电路

放电恒流源 I_1 : 二极管 D_1 、稳压管 D_2 、PNP 管 T_1 和电阻 R_1 构成恒流源 I_{R1} ; NPN 管 T_2 和 T_3 构成镜像恒流源 I_{T2} , 即有 $I_1 \approx I_{T2} \approx I_{R1}$, 如式(6)确定。

$$I_1 \approx \frac{V_{D1} + V_{D2} - V_{EB-T1}}{R_1} \quad (6)$$

充电恒流源 I_{Cl} : 二极管 D_1 、 D_2 、电阻 R_8 、PNP 管 T_4 和 T_6 构成恒流源 I_{R3} ; PNP 管 T_4 和 T_5 构成镜像恒流源 I_2 , 即有 $I_{R3} \approx I_2$, 则 $I_{Cl} = I_2 - I_1$, 如式(7)确定。

$$I_{Cl} \approx \frac{V_{D1} + V_{D2} - V_{EB-T4} - V_{EB-T6}}{R_8} - I_1 \quad (7)$$

电压控制电流源 I_3 : I_{Cl} 和 I_1 对 C_1 充放电形成了电压 V_{Cl} , 采用运放 U_1 搭建跟随器进行信号隔离和加强驱动能力, 通过 R_5 转换成电流 I_{R5} , 并由 NPN 管 T_7 和 T_8 构成镜像恒流源 I_3 , 即有 $I_3 \approx I_{R5}$, 这样 I_3 将跟随 V_{Cl} 变化, 如式(8)确定。

$$I_3 \approx \frac{V_{Cl} - V_{EB-T7}}{R_5} \quad (8)$$

式(8)中, 充电时 $V_{Cl} = (I_{Cl}/C_1)t$, 放电时 $V_{Cl} = V_{Clmax} - (I_1/C_1)t$, 将式(8)代入式(3)即可计算出任意时刻的 LDO 输出电压 V_{OUT} 。

综上分析, 改变 $I_1(R_1)$ 、 $I_{Cl}(R_8)$ 、 $I_3(R_5)$ 、 C_1 均可改变充放电斜率。 I_3 虽受 V_{Cl} 控制但最大只能到 V_{REF}/R_3 , 调节范围有限; C_1 容量也不易调整; 因此将 R_1 和 R_8 设置可变电阻, 设置不同阻值旋调范围的电位器, 选取不同的 C_1 容量, 即可使电路输出上升时间 t_r 、下降时间 t_f 从数十毫秒至数小时可调变化, 方便模拟电池供电特性验证。

2.2 仿真分析

按图 4 设计, 以上升、下降时间约 30 000 s 为例仿真, $V_{IN}=3.6$ V, 设置 $t=0$ 时 SW_1 闭合, 直至 $t=50$ 000 s 时 SW_1 断开, 充放电关键波形如图 5 所示。

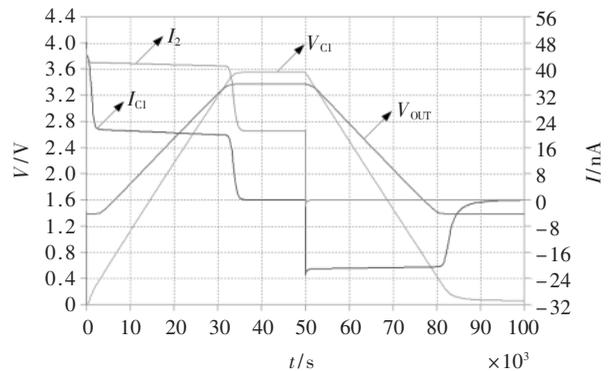


图 5 电路功能仿真图

充电过程: 0~34 000 s 内, C_1 被 $I_{Cl} \approx 20$ nA 恒流充电, V_{Cl} 线性上升, V_{OUT} 从 1.4 V 开始跟随上升; 直至 $t \approx 34$ 000 s 时, $V_{Cl} \approx V_{IN}$, C_1 充电结束, I_{Cl} 降至零, I_2 由 41 nA 降至 21 nA, V_{OUT} 钳位保持于 3.4 V。

放电过程: $t=50$ 000 s 时, 充电断开, I_2 降为零; C_1 被 $I_{Cl} \approx -21$ nA 恒流放电, V_{Cl} 线性下降直至为零, I_{Cl} 也为零, C_1 完全放电, V_{OUT} 钳位保持于 1.4 V。

仿真结果符合上述原理分析, V_{OUT} 跟随 V_{Cl} 线性上升和下降并能钳位保持, 实现了设计功能。

3 测试验证

按图 4 搭建电路, $V_{IN}=3.6$ V, 负载接像增强器, 设置 V_{OUT} 的上升时间、下降时间分别为数十毫秒、数十秒和数小时。对于变化速率快的验证, 采用示波器记录 V_{OUT} 、 V_{Cl} 波形, 如图 6 和图 7 所示。

对于上升、下降时间为数小时的波形, 由于示波器存储深度受限, 因此采用数据记录仪记录, 监测 V_{OUT} 和

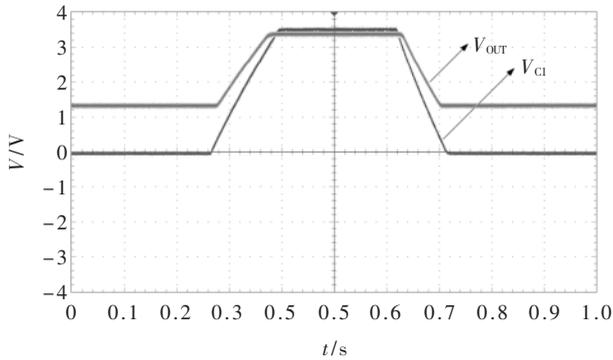


图6 上升、下降时间约 80 s 实测波形

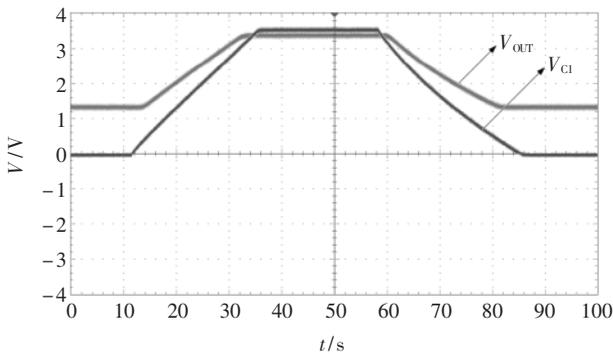


图7 上升、下降时间约 20 s 实测波形

I_{OUT} 的波形,如图 8 所示。

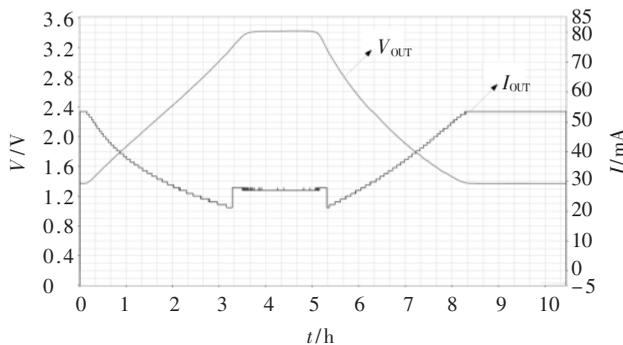


图8 上升、下降时间约 3.5 h 实测波形

图 6~图 8 验证了 V_{OUT} 速率能从数十毫秒至数小时可调; V_{OUT} 波形能跟随 V_{CI} 线性上升和下降并分别保持 3.4 V 和 1.4 V 钳位; 上升、下降时间基本相等。实测波形符合上述原理分析和软件仿真结果,说明该 DC-DC 电路已经具备“模拟电池供电”的功能,可全面模拟验证锂电池在不同充放电速率时的产品工作稳定性。

4 大电流改进方案

本文设计核心是控制 LDO 输出线性变化,当 V_{OUT} 处于较低电压时, LDO 两端的压差 $V_{IN}-V_{OUT}$ 较大,如果负载电流 I_{OUT} 较大,那么电路的功耗将十分明显,需要强制散热,因此 I_{OUT} 不能太大。

对于功率较大的应用,则可采用具备输入输出电压控制(VIOC)功能的 LDO,如 Linear 公司生产的 LT3045-1^[6],

再结合本文的控制电路设计,如图 9 所示改进方案功能框图。

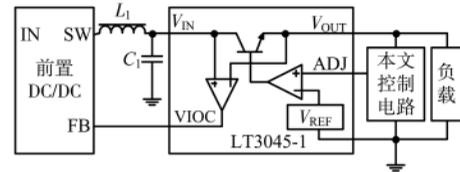


图9 改进方案电路原理框图

图 9 中 LDO 内部 VIOC 电路检测 LDO 两端的电压并控制前置 DC/DC 的输出(V_{IN}),当 V_{OUT} 变化时, V_{IN} 跟随变化, LDO 两端电压 $V_{IN}-V_{OUT}$ 始终等于 VIOC 电路所设置的差值电压 V_{VIOC} ,这样 LDO 的功耗将大大降低,能够用于电流较大的场合。结合本文对 V_{OUT} 线性控制的电路设计, V_{OUT} 能够以不同的速率线性上升和下降,因此可用于其他功率电路进行电池供电特性验证或者直流扫描分析(DC Sweep),以验证直流工作点是否正常。

5 结论

本文针对微光像增强器电池供电特性验证设备利用率低、研发成本高等问题,分析了锂电池的供电特性,提出了模拟电池供电的等效电路,基于恒流源对电容充放电形成线性控制电压再控制 LDO 输出,最终实现一种模拟 1.4 V~3.4 V 电池充放电,且电压变化速率能从数十毫秒至数小时可调的电路设计。经仿真和实测验证,该电路已具备“电池特性模拟”功能,其构成相对简单、成本低,非常适合小功率电路的电池供电特性验证。本文还针对功率大的应用提出了改进方案,基于本文设计,可以方便高效地进行 DC Sweep 分析。

参考文献

- [1] 汪贵华.光电子器件[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [2] DZHENKOV Y. Image intensifier power supply[C]. The 35th International Spring Seminar on Electronics Technology of IEEE, 2012: 292-296.
- [3] Itech Inc. equipment specifications-IT6400 Bipolar DC Power Supply/Battery Simulator[Z]. www.itech.sh, 2016.
- [4] Panasonic Inc. component datasheet-cr123a manganese dioxide lithium cylindrical batteries[Z]. www.panasonic.com, 2006.
- [5] 杨德才. 锂离子电池安全性:原理、设计与测试[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2012.
- [6] Linear Inc. Component datasheet-LT3045-1 linear regulator with VIOC control[Z]. 2017.

(收稿日期:2020-04-14)

作者简介:

杜培德(1986-),男,硕士,工程师,主要研究方向:微光像增强器 DC/DC 设计。

李晓露(1993),女,本科,工程师,主要研究方向:微光像增强器 DC/DC 设计。

朱文锦(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向:微光像增强器 DC/DC 设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所