

# 基于 EKF 算法的锂电池 SOC 估算策略

崔耕韬, 江卫华, 涂 炜

(武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 443000)

**摘 要:** 在电池管理系统中, 电池荷电状态(SOC)的准确估算具有重要的地位, 其重要性不仅在于可以向使用者提示电池的剩余电量, 更在于它是电池充放电管理和均衡控制管理的基础。而 SOC 受许多因素的影响, 如温度以及电流的大小、方向等, 它的准确预测也较困难。提出了一种用扩展卡尔曼滤波(EKF)算法估计锂电池 SOC 的方法, 建立电池仿真模型, 通过混合动力脉冲能力特性(HPPC)试验进行了参数辨识。在恒流放电下模型的 SOC 估算误差约 2.1%, 说明该模型有效且易于应用。

**关键词:** 锂电池; EKF 算法; HPPC 试验; SOC 估算

中图分类号: TN06; TM912

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200607

中文引用格式: 崔耕韬, 江卫华, 涂炜. 基于 EKF 算法的锂电池 SOC 估算策略[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 36-39.

英文引用格式: Cui Gengtao, Jiang Weihua, Tu Wei. SOC estimation of lithium battery based on extended Kalman filter algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3): 36-39.

## SOC estimation of lithium battery based on extended Kalman filter algorithm

Cui Gengtao, Jiang Weihua, Tu Wei

(School of Electrical Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 443000, China)

**Abstract:** In the battery management system, the accurate estimation of State of Charge(SOC) has an important position, its importance is not only to the user prompt battery remaining power, more is that it is the basis of the battery charge and discharge management and balanced control management. And SOC is affected by many factors, such as temperature and current size, direction, etc, so it is difficult to predict it accurately. In this paper, an extended Kalman filter(EKF) algorithm is proposed to estimate the SOC of lithium battery. The battery model was established, and the parameter identification was carried out through the Hybrid Pulse Power Characteristic(HPPC) test. The SOC estimation error of the model is about 2.1% under constant discharge, it shows that the model is effective and easy to apply.

**Key words:** the lithium battery; EKF algorithm; HPPC test; SOC estimation

### 0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 锂离子电池以其高能量密度和优良的充放电性能而受到人们的关注, 它也从铅酸电池和镍镉电池中脱颖而出, 成为大量应用于各种微型、小型电子产品和电动车中的储能装置。因此, 对于锂电池的研究应该先建立其模型, 进行混合动力脉冲能力特性(Hybrid PulsePower Characteristic, HPPC)测试, 分析其充放电特性。

当前, 有多种经典的电池模型: 理想等效模型中各参数均为不变量, 因此精度较低; Thevenin 模型增加了电池极化的影响, 但不能反映各参数与荷电状态(State of Charge, SOC)之间的关系<sup>[1-3]</sup>; PNGV 模型对 Thevenin 模型进行了改进, 但精度仍较低; RC 模型能反映电池内阻、电流对 SOC 的影响, 具有较好的动静态特性。

目前, SOC 的估算主要有开路电压测量法、电量累积法、电化学积分法等<sup>[4-5]</sup>, 而卡尔曼滤波算法与其他方

法相比具有更高的估算精度, 且可以修正系统初始误差, 有效抑制系统噪声, 因此常用于估算电池的 SOC。本文提出一种扩展卡尔曼滤波算法, 并进行建模仿真, 具有很高的精度。

### 1 锂离子电池模型

本次实验采用的是二阶 RC 模型, 如图 1 所示, 用  $R_\Omega$  表示欧姆内阻, 用  $R_d$  和  $C_d$  分别表示电化学极化内阻、电容; 用  $R_k$  和  $C_k$  分别表示浓差极化电阻、电容;  $U_d$  是  $R_d$

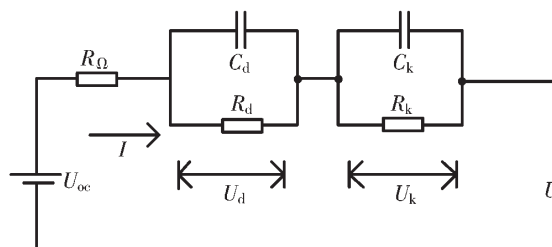


图 1 二阶 RC 电池模型

和  $C_d$  两端电压,  $U_k$  是  $R_k$  和  $C_k$  两端电压,  $U_{oc}$  是电池开路电压,  $U$  为电池端电压<sup>[6-7]</sup>。则由戴维南定理可以得到以下公式:

$$\frac{dU_d}{dt} = \left( -\frac{1}{R_d \cdot C_d} \right) U_d + \frac{1}{C_d} \cdot I \quad (1)$$

$$\frac{dU_k}{dt} = \left( -\frac{1}{R_k \cdot C_k} \right) U_k + \frac{1}{C_k} \cdot I \quad (2)$$

$$U = f(\text{soc}, t) - U_d - U_k - I \cdot R_\Omega + u \quad (3)$$

式中,  $I$  代表了电池电流,  $f(\text{soc}, t)$  代表了开路电压与 SOC 之间的关系。进一步可得到锂电池仿真的方程式:

$$U = f(\text{soc}, t) - I \cdot R_d (1 - e^{-t/\tau_1}) - I \cdot R_k (1 - e^{-t/\tau_2}) - I \cdot R_\Omega + u \quad (4)$$

式中, 时间常数  $\tau_1 = R_d \cdot C_d$ ,  $\tau_2 = R_k \cdot C_k$ ,  $u$  是计算中产生的测量噪声<sup>[8-9]</sup>。

## 2 锂离子电池充放电实验

### 2.1 电池的混合功率脉冲特性

HPPC 试验可以测试电池的脉冲能力以及充放电性能, 一方面主要用来计算电池内阻, 另一方面可以反映 SOC 与电池放电能力、回馈脉冲能力之间的关系。如图 2 所示, 在限压 5.2 V 时, 用 1 C 电流进行 HPPC 充电和放电, 从 0% SOC 每次充电 10% SOC~100% SOC, 中间静置电池 1 h, 使端电压恢复至接近开路电压; 后同样从 100% SOC 每次放电 10% SOC~0% SOC, 以探索如何用电池 SOC 表示开路电压和内阻。

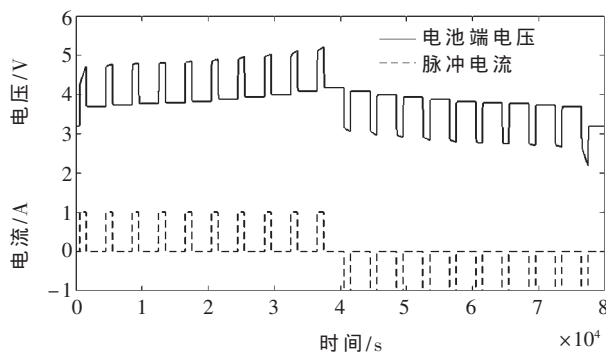


图2 脉冲电流充放电曲线

图3是电池充放电时的 SOC- $U_{oc}$  曲线, 反映了 SOC 与开路电压之间的关系, 曲线可以分成三部分。总体上, SOC 与电压呈非线性关系, 且  $U_{oc}$  随 SOC 的增大而增大; 在 0% SOC~10% SOC 内, 电池开路电压急剧增大, 之后经历一段平稳缓慢上升的过程; 在最后 90% SOC~100% SOC 时, 电压又较快上升。可见在曲线的前段和末段电压对 SOC 的敏感性高, 曲线中段 SOC 对电压的敏感性高。

### 2.2 电池模型的参数辨识

在脉冲放电中, 电压首先会急剧下降, 这一点的电压差是由欧姆内阻引起的。欧姆内阻可以描述为:

$$R_\Omega = (\Delta U_1 + \Delta U_2) / (2I) \quad (5)$$

式中,  $\Delta U_1$  表示电池充电时急剧变化电压差,  $\Delta U_2$  表示电

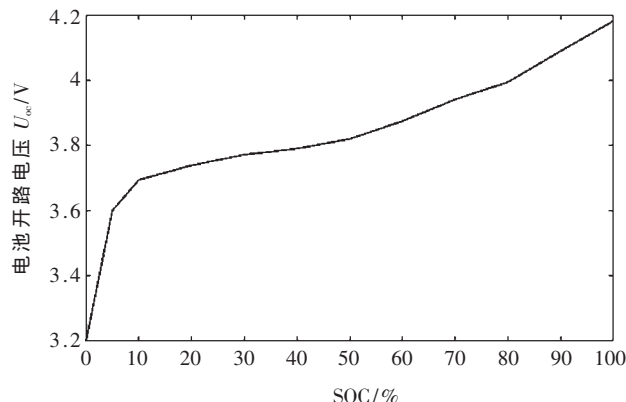


图3 电池充放电时 SOC- $U_{oc}$  曲线

池放电时急剧变化电压差,  $I$  表示脉冲电流。由于电池的极化现象, 欧姆内阻实际上也是变化的。

通过实验数据确定了 RC 模型在充放电周期内的各项参数, 并记录不同的 SOC 点下的不同参数, 然后用最小二乘法进行曲线拟合, 最后用查表法将电池各个参数应用于模型。根据图3, 取长时间放置的电池的端电压作为  $U_{oc}$ , 参考文献[10]、[11], 利用 1stOpt 软件, 拟合得到了电池荷电状态与  $U_{oc}$  之间的关系。需要指出的是 SOC 的最高项次数越高, 拟合精度就越高, 本次拟合最高次数为 8,  $\text{SOC} \in [0, 1]$ , 用  $X$  表示 SOC, 有:

$$U_{oc} = -548.9X^8 + 2286.1X^7 - 3944.0X^6 + 3655.4X^5 - 1976.6X^4 + 635.8X^3 - 118.7X^2 + 12.1X + 3.2 \quad (6)$$

图4是锂电池在充放电中极化内阻随 SOC 的变化过程图, 电池的内阻会随着 SOC 的减小而波动增加。这是因为电池的内部发生着化学反应, 导致电池中的材料变形, 导体和电极的腐蚀, 并使电解质减少, 从而导致内阻的增加。

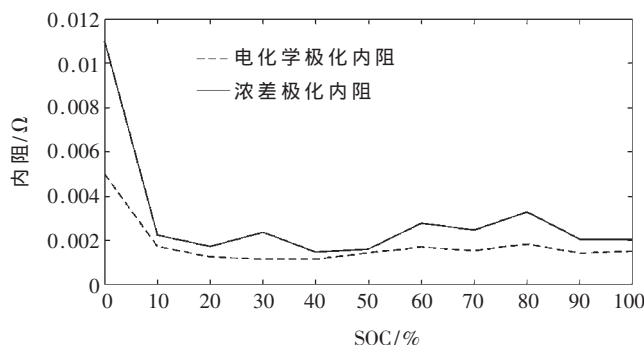


图4 充放电中极化内阻- $U_{oc}$  曲线

由图4, 用 SOC 表示  $R_d$  和  $R_k$  的函数关系式,  $\text{SOC} \in [0, 1]$ , 有:

$$R_d = 26.1X^9 - 112.6X^8 + 201.3X^7 - 192.9X^6 + 106.6X^5 - 33.7X^4 + 5.5X^3 - 0.26X^2 - 0.04X + 0.005 \quad (7)$$

$$R_k = 117.1X^9 - 524.2X^8 + 981.1X^7 - 994.1X^6 + 588.7X^5 - 204.3X^4 + 38.9X^3 - 3.3X^2 + 0.004X + 0.011 \quad (8)$$

### 3 扩展卡尔曼滤波算法

#### 3.1 扩展卡尔曼滤波原理

卡尔曼滤波的核心思想是利用系统观测到的输入数据和输出数据,对锂电池的真实状态作最小均方差的最优状态估计。它利用前一个值的估计值和实时测量值对下一个值进行估计,得到系统实时状态,并过滤掉观测数据中的噪声和干扰。而卡尔曼滤波仅适用于对线性系统的估计,对于锂离子电池的 SOC 预测需要用到扩展卡尔曼滤波算法。对于离散时间非线性系统,有:

$$X_k = F(X_{k-1}, U_{k-1}) + W_{k-1} \quad (9)$$

$$Z_k = H(X_k, U_k) + V_k \quad (10)$$

式中,  $F(X, U)$  和  $H(X, U)$  为非线性函数,  $X$  表示状态量,  $U$  表示控制量,  $Z$  表示观测量,  $W$  和  $V$  分别表示过程噪声和测量噪声<sup>[12]</sup>。在 EKF 中,通过一阶泰勒展开式对其线性化表示:

$$X_k = F(\tilde{X}_{k-1}, U_{k-1}) + W_{k-1} + \left. \frac{\partial F(X_{k-1}, U_{k-1})}{\partial X_{k-1}} \right|_{X_{k-1}=\tilde{X}_{k-1}} (X_{k-1} - \tilde{X}_{k-1}) \quad (11)$$

$$Z_k = H(\tilde{X}_k, U_k) + V_k + \left. \frac{\partial H(X_k, U_k)}{\partial X_k} \right|_{X_k=\tilde{X}_k} (X_k - \tilde{X}_k) \quad (12)$$

上式忽略了高阶项,  $\tilde{X}$  表示状态估计值,  $X - \tilde{X}$  表示状态预测误差值。图 5 是扩展卡尔曼滤波的结构。

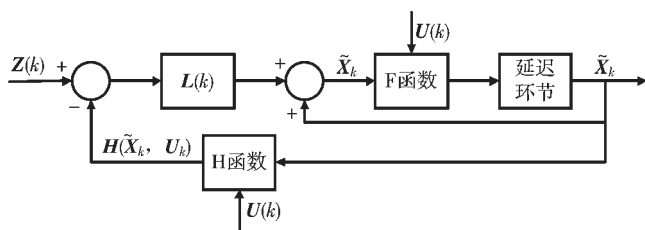


图 5 扩展卡尔曼滤波结构图

#### 3.2 扩展卡尔曼滤波与 SOC

扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)根据上一时刻的状态估计值和误差协方差对当前状态进行先验估计,得出先验估计值,再根据最新测量值对其校正,得出后验估计值<sup>[13-14]</sup>。结合二阶 RC 电池模型式(1)、式(2)、式(4),可得到离散化状态模型:

$$\begin{bmatrix} \text{SOC}(k) \\ U_{\Omega}(k) \\ U_d(k) \\ U_k(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_d C_d}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_k C_k}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{SOC}(k-1) \\ U_{\Omega}(k-1) \\ U_d(k-1) \\ U_k(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta \Delta T}{Q} \\ R_{\Omega} \\ R_d \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_d C_d}}\right) \\ R_k \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_k C_k}}\right) \end{bmatrix} \cdot I(k-1) + W(k-1) \quad (13)$$

式中,  $U_{\Omega}$  是欧姆内阻  $R_{\Omega}$  两端的电压,  $I$  是电流,  $U_{\infty}(\text{SOC}(k))$  是随  $k$  时刻 SOC 值变化的电池开路电压值,  $\Delta T$  是采样时间,  $Q$  是电池容量,  $\eta$  是库伦系数,  $k$  和  $k-1$  代表时刻。

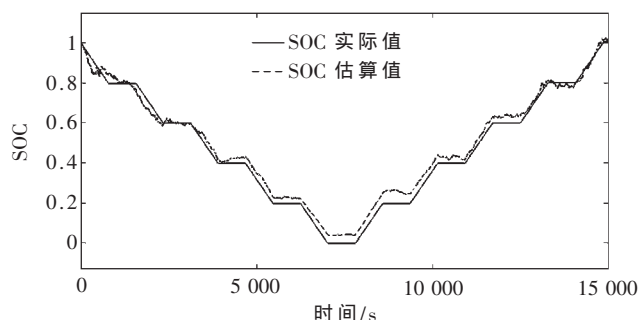
$$U_k(k) = U_k(k-1) \left(1 - \frac{\Delta T}{R_k C_k}\right) + \frac{\Delta T}{C_k} I(k-1) \quad (14)$$

$$U(k) = U_{\infty}(\text{SOC}(k)) - I(k) \cdot R_{\Omega} - U_d(k) - U_k(k) + V(k) \quad (15)$$

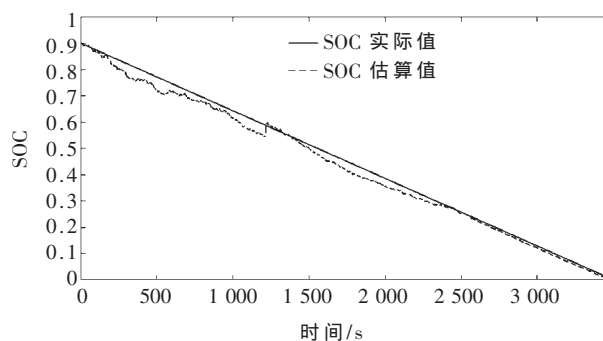
#### 4 锂电池 SOC 估算仿真与实验

本文根据 EKF 原理和相关公式以及电池的参数,建立了 SOC 估算模型。输入数据后,将用库伦计数法算得的 SOC 与用 EKF 算得的 SOC 相比较<sup>[15]</sup>。为检验模型的精确度,在 MATLAB 的 Simulink 模块下进行了仿真,使用的是标称电压 3.7 V、标称容量 2.6 Ah 的锂电池,实验条件为 25 °C。

图 6 所示是 SOC 估算图,图 6(a)是在脉冲电流下 SOC 随放电、充电时间而改变的曲线, SOC 初始值为 1;图 6(b)是在恒流放电下的 SOC 随时间而改变的曲线, SOC 初始值为 0.9。图 7 验证了在恒流放电时估算模型与电池实际荷电状态之间的误差。



(a) 脉冲电流下 EKF-SOC 曲线



(b) 恒定电流下 EKF-SOC 曲线

图 6 EKF-SOC 估算曲线与实际 SOC 曲线

图 6 将不同电流下的 SOC 估算值与 SOC 实际值进行了对比,图 6(a)放电 780 s,静置 780 s,每次放电量为 20% SOC;图 6(b)恒流放电 3 500 s。图 6(a)误差比图 6(b)误差略大,但在合理范围之内,表明改变电流会对 SOC 估算产生影响。

图 7 所示表明此模型的估算误差大多趋于  $[-0.04, 0.01]$ ,平均误差为 2.1%,最大误差仅为 5.7%,且在低于

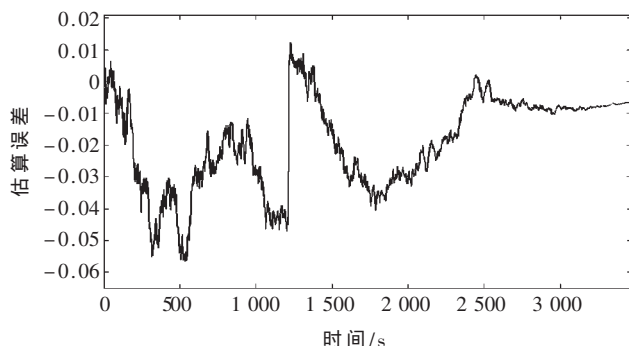


图7 SOC 估算误差曲线

30%SOC 时,估算误差显著降低。这验证了模型具有较高精度,且可以显著抑制噪声。但此模型未考虑温度对电池 SOC 估算的影响,同时改变电流大小对估算精度影响较大,因此模型可以继续优化改进。

## 5 结论

本文利用二阶 RC 电路模型来捕获锂电池的电特性,通过混合动力脉冲能力测试对电池参数进行辨识,探索了电池 SOC 与开路电压、内阻之间的关系。在此基础上,提出了一种基于扩展卡尔曼滤波算法(EKF)的 SOC 估算法。建立仿真模型并进行实验后,验证表明模型的误差值在 2.1% 左右,与一般的 SOC 估算法相比可明显提高精度。

## 参考文献

- [1] 孙立珍.锂离子电池 SOC 估计方法研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2019.
- [2] 颜湘武,郭玉威,王雨薇,等.基于 GNL 模型自适应无迹卡尔曼滤波的电动汽车荷电状态估计[J].科学技术与工程,2018,18(30):94-100.
- [3] 王党树,王新霞.基于扩展卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算[J].电源技术,2019,43(9):1458-1460.
- [4] 徐颖,沈英.基于改进卡尔曼滤波的电池 SOC 估算[J].北京航空航天大学学报,2014,40(6):855-860.
- [5] 刘艳莉,戴胜,程泽,等.基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J].电工技术学报,2014,29(1):

221-228.

- [6] 顾亚雄,张友近.基于双卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算[J].电源技术,2016,40(5):986-989.
- [7] 刘胜永,于跃,李昊,等.基于无迹卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算方法研究[J].电源技术,2018,42(1):40-42,45.
- [8] 潘海鸿,吕治强,李君子,等.基于灰色扩展卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算[J].电工技术学报,2017,32(21):1-8.
- [9] 吴红杰,齐铂金,郑敏信,等.基于 Kalman 滤波的镍氢动力电池 SOC 估算方法[J].北京航空航天大学学报,2007(8):945-948.
- [10] BESTER J E,HAJJAJI A E,MABWE A M.Modelling of Lithium-ion battery and SOC estimation using simple and extended discrete Kalman Filters for Aircraft energy management[C].Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,2015.
- [11] HAN K C,LIN Y H,LIU V T,et al.State of charge estimation of Lithium-Ion batteries by extended Kalman filtering[J].Advanced Science Letters,2012,8:332-336.
- [12] Zhang Lei,PAPAVASSILOU C,Liu Sheng,et al.Intelligent computing for extended kalman filtering SOC algorithm of Lithium-Ion battery[J].Wireless Personal Communications: An International Journal,2018,102(2):2063-2076.
- [13] 彭凯.基于改进 UKF 算法的锂离子电池 SOC 估计策略研究[D].天津:天津大学,2018.
- [14] 董俊松.基于扩展卡尔曼滤波的单目标跟踪算法研究[D].兰州:西北师范大学,2019.
- [15] 莫易敏,叶鹏,骆聪,等.基于改进的双卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估计[J].电源技术,2020,44(5):732-735.

(收稿日期:2020-07-02)

## 作者简介:

崔耕韬(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统与电力电子技术。

江卫华(1966-),男,硕士,教授,主要研究方向:电气测控自动化系统。

涂炜(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:电力电子与电机控制。

(上接第 35 页)

- 2016(10):152-157.
- [15] 古宇飞,陈少将,张利军,等.基于冷量阈值的整流罩空调控制策略研究[J].计算机测量与控制,2017,25(10):58-61.
- [16] 赵德政.基于 MAC 的 PLC 双机冗余方法及系统[J].电子技术应用,2017(8):81-84.

(收稿日期:2020-06-24)

## 作者简介:

刘雪飞(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向:工业软件、自动化控制系统、嵌入式软件系统。

刘红(1986-),女,硕士,工程师,主要研究方向:工控信息安全、工业控制系统测试。

蒯亮(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:计算机技术、指挥控制系统、嵌入式系统。

## 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