

# 开关功率变换器中的间歇现象 ——仿真与实验

周宇飞<sup>1</sup>, 陈军宁<sup>1</sup>, Chi K Tse<sup>2</sup>, 丘水生<sup>3</sup>, 柯导明<sup>1</sup>, 时龙兴<sup>4</sup>, 孙伟锋<sup>4</sup>

(1. 安徽大学计算机科学与信息工程学院, 安徽合肥 230039; 2. 香港理工大学电子与资讯工程学系, 香港;  
3. 华南理工大学电信学院, 广东广州 510640; 4. 东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

**摘要:** 文章从电路耦合滤波的角度考虑, 分析了一类间歇分谐波与间歇混沌现象产生的原理, 确定耦合电路传导和辐射干扰是产生该现象的根源, 并构造了一个开关变换器模型作为研究对象, 仿真与实验均得到了相似的非线性现象, 同时对不同的电路参数集, 讨论并分析了其对间歇现象产生所起的不同影响, 为变换器的稳定设计提供信息. 该方法也可推广到其他非线性电路系统的类似研究中.

**关键词:** 开关功率变换器; 耦合寄生信号; 分叉; 混沌; 分谐波; 间歇

**中图分类号:** TM17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0264-05

## Intermittency in Switching Power Converters: Simulation and Experiment

ZHOU Yu fei<sup>1</sup>, CHEN Jun ning<sup>1</sup>, TSE Chi K.<sup>2</sup>, QIU Shu sheng<sup>3</sup>, KE dao ming<sup>1</sup>, SHI Long xing<sup>4</sup>, SUN Wei feng<sup>4</sup>

(1. School of computer science and information engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China;

2. Department of Electronic & Information Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hongkong, China;

3. College of Electronic & Info. Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

4. Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** This paper studies the phenomena of intermittent subharmonics and chaos in DC-DC converters according to the consideration of coupling filter, consequently concludes that the origin of intermittency comes from conducted or radiated EMI. By constructing a circuit model of switching converter coupled with spurious signal, simulation can gain the same results as those from experiment. Furthermore the paper discusses the different effect on intermittency induced by different sets of parameters, thus provides the design consideration of reliability. The same research method can also be used to study the intermittency in other types of nonlinear circuits and systems.

**Key words:** switching power converters; spurious signal coupling; bifurcation; chaos; subharmonics; intermittency

### 1 引言

开关功率变换器是一类强非线性电路系统, 已有的研究表明其中可以产生各种非线性现象, 如分叉、混沌等. 国外从20世纪80年代初开始展开了开关功率变换器中非线性现象的研究, 取得了丰富的成果, 国内近几年也开始关注这一新兴的研究方向, 取得了一定的结果. 有关文献见[1, 2].

间歇混沌是非线性科学中的一个专业术语, 用来描述一类特殊的混沌现象<sup>[3]</sup>. 这里我们将之引申到间歇分谐波和间歇混沌, 用来描述分谐波或混沌以较长的固定时间间隔的有规律的发生, 这种间歇现象在一些物理学文献中有时也被称为呼吸<sup>[4]</sup> (breathing), 它是非线性系统中常见的一类非线性现

象, 在开关功率变换器的非线性现象研究中, 目前还没有明确的相关研究结果, 虽然在实际的电路设计中, 工程师一定会经常遇到类似现象, 但他们往往会忽略过去, 认为是电路结构设计上的问题, 或者是未知噪声, 通常可以通过改变电路参数来消除. 本文将从电路耦合滤波的角度考虑, 构造一个开关变换器模型作为研究对象, 该模型以弱周期源来模拟耦合干扰源, 研究表明当耦合干扰源比较微弱, 并且耦合干扰源的频率与开关功率变换器的开关频率有偏差时, 会出现间歇分谐波现象; 进一步提高耦合干扰源的强度, 会得到高阶的间歇分谐波现象; 最终当耦合干扰源的强度达到某一临界值后, 开始出现间歇混沌现象. 下面将详细介绍具体的研究过程, 包括相应的仿真、实验结果及参数效应, 有关分析研究结果将在下一篇文章

章中给出, 以从理论上验证该现象.

## 2 包含干扰源的简化开关变换器模型

在实际的开关变换器设计及应用过程中, 开关变换器往往会接受到外部的干扰信号, 一般来说, 这些干扰信号将经过耦合通道, 通过传导或辐射的方式传入<sup>[5,6]</sup>. 有时, 干扰源就在同一块电路板上, 或其它很近的地方, 图 1(a) 给出这种情况的简单图示.

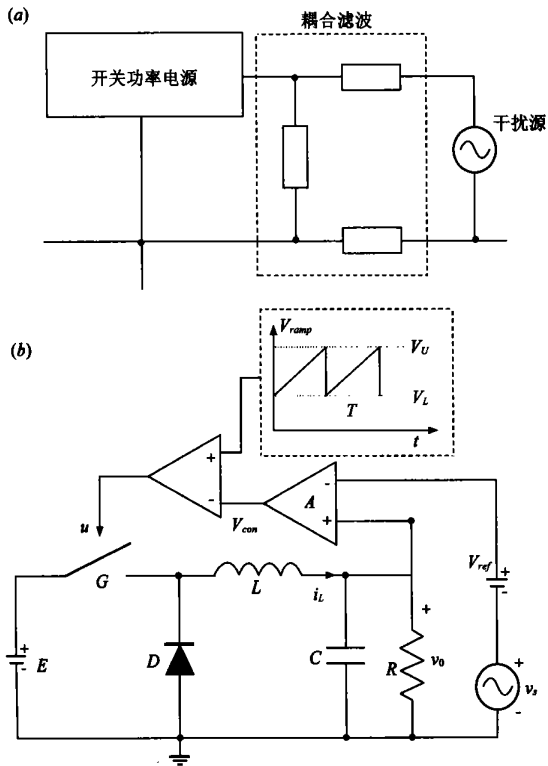


图 1 耦合寄生干扰信号的开关功率变换器 (a) 简化图示; (b) 具体的电压模式控制 Buck 变换器, 其中在参考电压上附加寄生干扰信号  $v_s$ .

为研究这些外部侵入的寄生干扰信号对原有电路的影响, 我们需要构造一个开关功率变换器, 其中将模拟假定的寄

生干扰源. 这里我们采用的开关变换器主电路是电压模式控制 Buck 变换器, 并将耦合过来的寄生干扰源直接加在参考电压上, 如图 1(b) 所示, 一般来说, 这些寄生干扰源是由附近的振荡器或脉宽调制器引起的. 为简便起见, 我们用  $\alpha$  来代表寄生干扰源的强度, 它是  $v_s$  的幅度与  $V_{ref}$  的比例, 即:

$$\alpha = \hat{v}_s / V_{ref} \quad (1)$$

其中  $\hat{v}_s$  是加在参考电压  $V_{ref}$  上的寄生干扰源的幅度. 下面我们将考察在耦合不同的寄生干扰源强度时, 变换器的运行状态如何变化.

## 3 间歇混沌

当  $v_s$  是正弦周期信号时, 其频率为  $f_s$ , 则参考电压可由下式的调制信号来表示:

$$V_{ref} \rightarrow V_{ref}(1 + \alpha \sin 2\pi f_s t) \quad (2)$$

当变换器处于射频环境等情况时, 这种耦合干扰信号很有可能产生. 假定变换器的开关频率为  $f_o$ , 并且  $f_s \neq f_o$ , 显然我们可以将干扰信号对变换器的影响映射到以间歇周期  $T_{int}$  为周期的反复循环过程:

$$T_{int} = 1/|f_s - f_o| \quad (3)$$

首先我们将简要描述这一类现象, 考虑图 1(b) 所示的 Buck 变换器, 当取不同的耦合干扰信号强度时, 变换器将产生不同的间歇现象, 即间歇分谐波或间歇混沌现象. 取电路参数为:  $L = 20\text{mH}$ ,  $C = 47\mu\text{F}$ ,  $R = 22\Omega$ ,  $f_o = 2500\text{Hz}$ ,  $E = 24\text{V}$ ,  $V_{ref} = 11.3\text{V}$ ,  $A = 8.4$ ,  $V_L = 3.8\text{V}$ ,  $V_U = 8.2\text{V}$ , 我们用 Matlab 的 Simulink 来构建变换器的精确开关电路模型, 当不存在寄生干扰信号时, 变换器处于规则状态(1 周期), 图 2 是其状态空间上的周期轨道; 当存在寄生干扰信号, 且频率  $f_s$  为  $2501\text{Hz}$  时, 变换器出现间歇现象, 如图 3 所示, 这里分别显示了干扰信号强度较弱时产生的间歇分谐波和干扰信号强度较强时产生的间歇混沌.

在电源工程师设计产品时经常会遇到这种间歇现象, 这里我们证明它是由于电路中耦合了寄生的干扰信号引起的, 并且间歇周期取决于寄生干扰信号的频率和变换器的开关频率之差, 即式(3), 在以上例子中间歇周期是 1s.

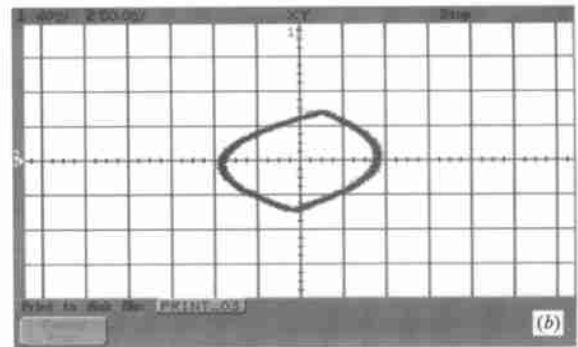
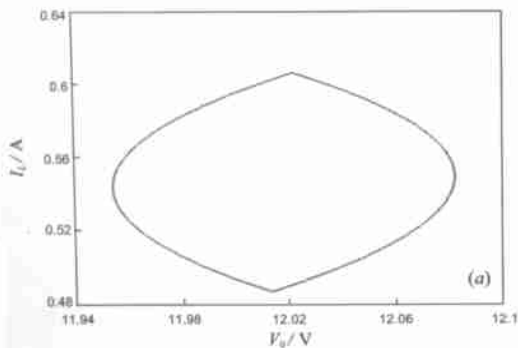


图 2 规则的 1 周期轨道 (a) 仿真相轨; (b) 实验相轨(x-轴: 输出电压 40mV/格; y-轴: 电感电流 50mA/格)

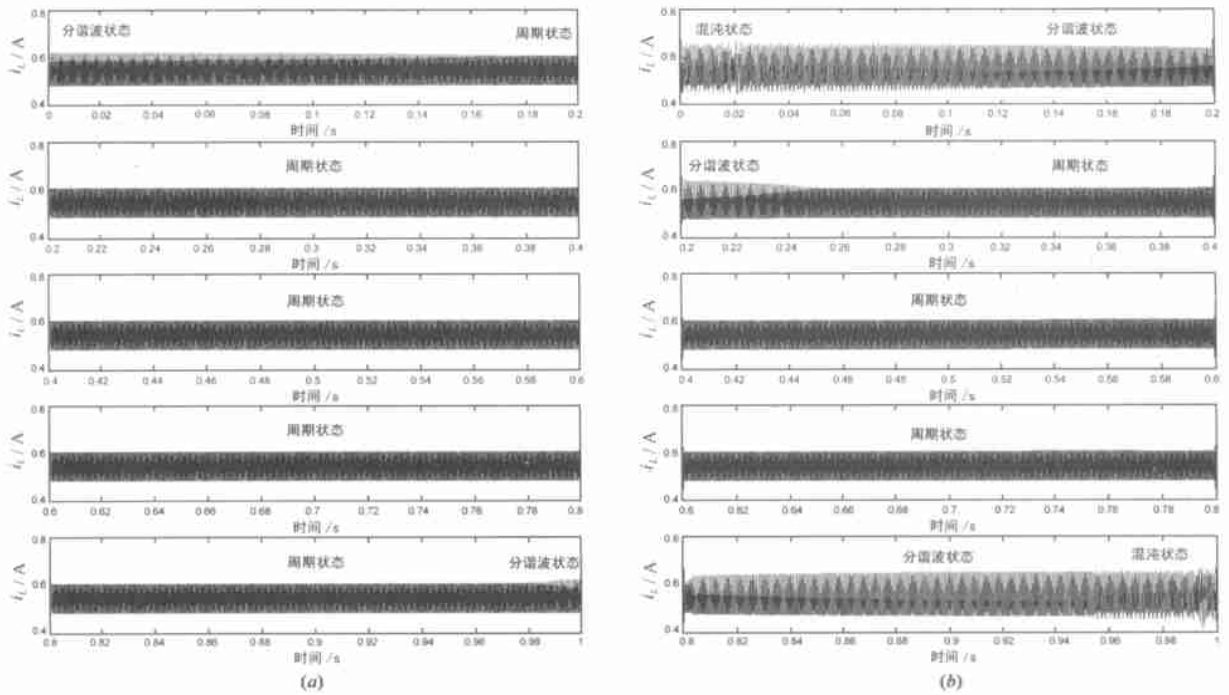


图 3 在寄生干扰信号影响下的 Buck 变换器的电感电流波形

(a) 干扰信号强度  $\alpha = 0.0003$ ; (b) 干扰信号强度  $\alpha = 0.0034$

### 4 干扰源强度变化对应时间分叉图

为对变换器的运行状态作一详细的研究,通常可以用采样点波形来观察,采样点是开关功率变换器的非线性现象研究中常用的一种方法,也称为频闪映射点或 Poincaré 截面点,它忽略开关纹波的细节,而只关注周期开关点瞬间波形的变化情况。我们可以在每个  $t = nT$  (其中  $T$  是开关周期,即  $T = 1/f_o$ ) 时刻对波形进行采样,这样就画出一幅分叉图,它与传统所说的分叉图不同,我们称之为时间分叉图,因为传统的分叉图是表示随参数变化得到的系统定性行为,而时间分叉图是表示随时间变化得到的系统定性行为。

我们以正弦干扰信号为例,由式(2)可得寄生干扰信号为:

$$v_s = aV_{rf} \sin 2\pi f_s t \tag{4}$$

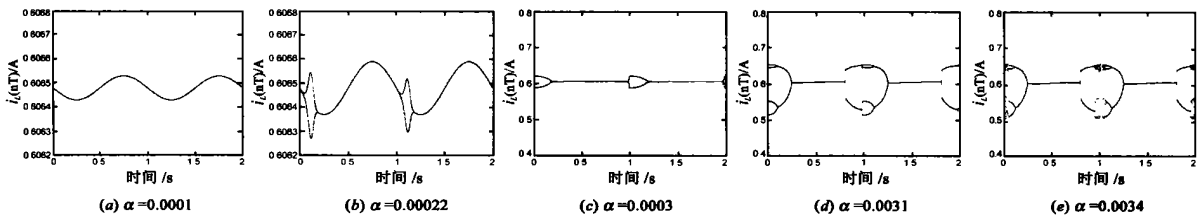


图 4 不同扰动信号强度  $\alpha$  下的采样电感电流波形(时间分叉图)

### 5 实验结果

我们设计了一个实验电路来对上述具有耦合效应的变换器作具体验证,电路参数与前面仿真过程中的指定是完全一

致的,耦合的寄生干扰信号是正弦波,如式(4),随着干扰信号强度的不断增加,可以依次观察到间歇分谐波和间歇混沌现象,其表现与前面仿真得到的情况完全一致,图5是一些电路状态变量的波形图,从中可明显观察到时间分叉的情况。这样

(1) 当寄生干扰信号强度较弱时,变换器仍能维持原有的规则状态,但周期开关点将会上下波动,其周期为间歇周期,干扰信号对变换器的影响不太明显,如图4(a)。

(2) 当寄生干扰信号强度增加时,变换器将间歇地交替经历规则和分谐波状态。首先会出现周期2分谐波与规则状态的交替,如图4(b, c);继续增加干扰信号的强度,会出现周期4分谐波、周期2分谐波与规则状态的交替,如图4(d)。

(3) 继续增加寄生干扰信号的强度,当强度增加到一定程度后,变换器会出现混沌、各次分谐波与规则状态的间歇交替,如图4(e)。

(4) 间歇周期等于  $1/|f_s - f_o|$ , 因此如果寄生干扰信号的频率与变换器的开关频率很接近时,变换器将花费较长的一段时间来历经一个间歇过程。

仿真的结果得到了印证. 图 5(a) 是干扰信号强度等于 0.001 的情况, 变换器表现为规则状态与周期 2 的间歇交替, 其中上部曲线为输出电压  $v_o$  (90mV/div), 下部曲线为电感电流  $i_L$  (100mA/div); 图 5(b) 是干扰信号强度等于 0.004 的情况, 其表现为规则状态、周期 2 与周期 4 的间歇交替, 其中上部曲线为输出电压  $v_o$  (150mV/div), 下部曲线为电感电流  $i_L$  (100mA/div); 图 5(c) 是干扰信号强度等于 0.0042 的情况, 其表现为规则状态、周期态与混沌状态的间歇交替, 其中上部曲线为输出电压  $v_o$  (250mV/div), 下部曲线为电感电流  $i_L$  (200mA/div).

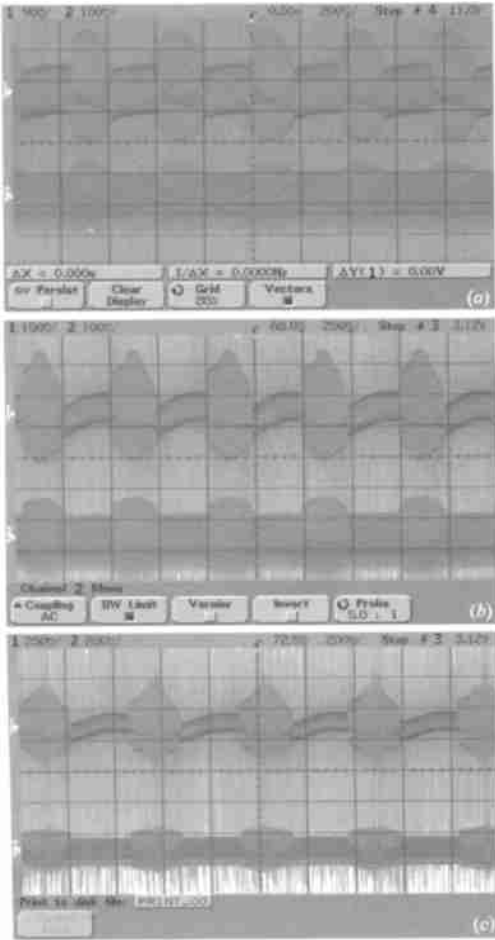


图 5 不同扰动强度  $\alpha$  下的实测时间分叉图波形(上: 输出电压; 下: 电感电流) (a)  $\alpha = 0.001$  时的间歇分谐波; (b)  $\alpha = 0.004$  时的间歇分谐波; (c)  $\alpha = 0.0042$  时的间歇混沌

### 6 参数变化对间歇混沌产生的影响

上面我们针对一组固定的参数, 从仿真和实验两方面考察了变换器中产生的间歇分谐波和间歇混沌现象. 然而不同的参数值对间歇现象的产生有着重要影响, 其变化使得较强或较弱的干扰信号强度  $\alpha$  就可以在变换器中引起间歇现象. 这里我们以变换器中的反馈增益  $A$  和输入电压  $E$  的变化为例, 分析其对引起间歇现象的有效  $\alpha$  阈值的影响.

通过一系列的仿真, 我们分别用表格 1 和 2 对引起间歇分谐波和间歇混沌的  $\alpha$  阈值作一总结, 其图形化表示见图 6.

其中上平面给出了产生间歇混沌所需的干扰信号强度  $\alpha$  的阈值, 下平面给出了产生间歇分谐波(周期 2)所需的干扰信号强度  $\alpha$  的阈值. 需要注意的是, 这些数据给出了针对某个变换器在特定参数下的运行结果, 而非绝对的电路设计准则, 但它们可以预测整个电路的运行状态的趋势. 这些数据清晰表明, 在 Buck 变换器中相对较高的反馈增益  $A$  或输入电压  $E$  可以使得变换器较易被耦合来的寄生干扰信号所影响, 即使得较弱的  $\alpha$  就可以导致在变换器中产生间歇混沌(分谐波)现象. 这是不难理解的, 因为较高的反馈增益  $A$  或输入电压  $E$  使得变换器更靠近运行状态的不稳定边界, 从而较弱的干扰信号强度  $\alpha$  就可以影响变换器的运行状态.

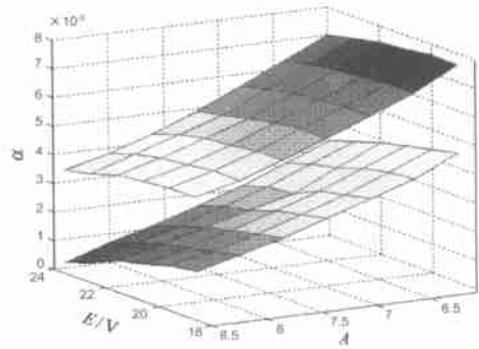


图 6 强度  $\alpha$  的阈值的图形化表示

表 1 对应间歇分谐波开始产生的寄生干扰信号强度  $\alpha$  的阈值

反馈增益 $A$	$E = 19V$	$E = 20V$	$E = 21V$	$E = 22V$	$E = 23V$	$E = 24V$
6.0	0.0045	0.0043	0.0041	0.0039	0.0036	0.0033
6.4	0.0038	0.0037	0.0035	0.0032	0.003	0.0027
6.8	0.0033	0.0031	0.0029	0.0025	0.0024	0.0021
7.2	0.0028	0.0026	0.0024	0.0021	0.0019	0.0016
7.6	0.0023	0.0021	0.0019	0.0017	0.0014	0.0011
8.0	0.0019	0.0017	0.0015	0.0013	0.0010	0.0007
8.4	0.0015	0.0014	0.0011	0.0009	0.0005	0.0002

表 2 对应间歇混沌开始产生的寄生干扰信号强度  $\alpha$  的阈值

反馈增益 $A$	$E = 19V$	$E = 20V$	$E = 21V$	$E = 22V$	$E = 23V$	$E = 24V$
6	0.0076	0.0076	0.0075	0.0074	0.0072	0.0070
6.4	0.0068	0.0068	0.0067	0.0066	0.0065	0.0063
6.8	0.0062	0.0062	0.0061	0.006	0.0058	0.0056
7.2	0.0056	0.0056	0.0055	0.0053	0.0051	0.0049
7.6	0.0050	0.0050	0.0049	0.0048	0.0046	0.0043
8	0.0045	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0038
8.4	0.0041	0.0041	0.0040	0.0039	0.0036	0.0034

### 7 结论

功率电子学是非线性系统的一类, 其间已经发现了各种丰富的复杂动态现象. 本文详细考察了一种可能经常会出现

的非线性现象,即间歇现象,并作出了合理的解释.在引用了一个简单的 Buck 变换器后,我们构造了其中耦合有寄生干扰信号的研究模型,在不同的干扰信号强度下,变换器表现出间歇分谐波和间歇混沌现象,同时作者证明了干扰信号的强度和频率对各种间歇现象的产生及间歇周期有着至关重要的影响.该研究方法同样也可推广到其它变换器的间歇现象研究中去,例如目前我们已经在电流模式控制 Boost 变换器中发现了类似间歇现象.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Tse C K, Bernardo M di. Complex behavior in switching power converters[ J]. Proceedings of IEEE, 2002, 90( 5): 768- 781.
- [ 2 ] Banerjee S, Verghese G. Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Attractors, Bifurcations, Chaos, and Nonlinear Control[ M]. New York: IEEE Press, 2001.
- [ 3 ] Ott E. Chaos in Dynamical Systems[ M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1993.
- [ 4 ] Qu Z, Hu G, Yang G, Qin G. Phase effect taming nonautonomous chaos by weak harmonic perturbations[ J]. Phys. Rev. Lett. 1995, 74( 10): 1736- 1739.
- [ 5 ] Ferreira J A, Willcock P R, Holm S R. Sources, paths and traps of conducted EMI in switch mode circuits[ A]. Proc. IEEE Ind. Appl. Confer-

ence[ C]. New Orleans, 1997. 1584- 1591.

- [ 6 ] Williams T. EMC for Product Designers[ M]. Oxford, England: Butterworth Heinemann Ltd. , 1994.

#### 作者简介:



周宇飞 男, 1973 年 1 月生于安徽郎溪, 1997 年在安徽大学电路与系统专业获工学硕士学位, 2001 年在华南理工大学电路与系统专业获工学博士学位, 现在安徽大学电子工程与信息科学系任教, 发表论文 10 余篇, 研究方向为非线性电路与功率电子学、控制理论.



陈军宁 男, 1953 年生于江苏南京, 1985 年、1993 年在东南大学分别获得工学硕士与博士学位, 1996 年从复旦大学 IC CAD 博士后流动站出站, 现为安徽大学电子工程与信息科学系教授、博士生导师, 主要研究方向为 VLSI 系统与设计、深亚微米 MOS 器件物理、高压功率器件和电路等.