

峰值电压反馈 Superbuck 变换器中分岔与混沌的实验研究

毕 闯 张 千 向 勇* 冯雪松

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054)

(电子科技大学能源科学与工程学院 成都 611731)

摘 要: 该文针对太阳能光伏发电系统中一种重要的拓扑结构 Superbuck 变换器进行非线性动力学研究。根据变换器的状态方程,采用频闪映射方法得到变换器的离散映射模型,然后以参考电压为分岔参数得到电感电流的分岔图。最后通过建立实验电路来研究变换器的非线性动力学行为,验证系统从稳定到倍周期分岔直至混沌态的演化过程,同时通过分析电感电流的功率谱图,证明应用混沌技术可以有效地降低系统的电磁干扰(EMI)。

关键词: Superbuck 变换器; 混沌; 分岔; 功率谱图; 电磁干扰(EMI)

中图分类号: TP333.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2261-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01732

Experimental Study of Peak Voltage Feedback Superbuck Converter in Bifurcation and Chaos

Bi Chuang Zhang Qian Xiang Yong Feng Xue-song

(State Key Lab of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The nonlinear dynamics of Superbuck converter is investigated because Superbuck converter is a kind of important topology in the solar photovoltaic power generation system. The discrete mapping model of Superbuck converter is derived by stroboscopic mapping method, based on state equation of the converter. Then the bifurcation diagram of the inductor current is got with the reference voltage as the bifurcation parameter. Finally, the nonlinear dynamics of Superbuck converter is studied by setting up the experimental circuit to verify the whole evolution from stable state to the period-doubling bifurcation state until the chaotic state. On the other hand, ElectroMagnetic Interference (EMI) of the system is effectively reduced through the application of chaos theory by analyzing the power spectra of the inductor current.

Key words: Superbuck converter; Chaos; Bifurcation; Power spectra; ElectroMagnetic Interference (EMI)

1 引言

电力电子系统非线性动力学的研究始于 20 世纪 80 年代,之后工程师们发现 DC-DC 变换器中普遍存在准周期、倍周期分岔、边界碰撞分岔、切分岔、环面破裂分岔、非混沌奇怪吸引子、共存吸引子、间歇性分岔和阵发混沌等丰富的非线性现象^[1-6]。近 10 多年,人们应用非线性动力学的理论、数值模拟和电路实验等方法研究了 DC-DC 变换器中复杂的非线性动力学行为,揭示了其中非线性现象的特点及其产生机理。在 DC-DC 变换器的设计

过程中合理应用这些理论研究成果,对于提高产品质量和性能具有十分重要的意义。

Superbuck 变换器在太阳能光伏发电系统中是一种重要的拓扑结构,它是一种具有电流源输入的 Buck 变换器,这种拓扑可以连续地跟踪从太阳能电池方阵输出的最大功率点,在太阳能光伏发电系统中获得了广泛的应用^[7-12]。Superbuck 变换器采用简化的 Boost 变换器和 Sepic 变换器并联组成^[7]。文献[7]建立了 Superbuck 变换器的小信号数学模型,分析了电路的特性,验证了这种拓扑具有连续的输入输出电流。文献[10-12]采用线性化模型分析了 Superbuck 变换器的动力学行为以及最大功率跟踪的效果。

本文以工作在连续运行模式下的 Superbuck 变

2012-12-31 收到, 2013-03-22 改回

电子薄膜与集成器件国家重点实验室基础研究开放创新基金(CXJJ2010001)资助课题

*通信作者: 向勇 dryxiang@gmail.com

换器为研究对象,采用 KVL 和 KCL 定律推导出变换器状态变量的分段线性微分方程组。根据电感电流的分岔图,详细研究了变换器的非线性动力学特性。最后,建立了 Superbuck 变换器的实验电路,通过电路实验验证了系统从稳态到被周期分岔态以及混沌态的演化过程,同时根据电感电流的功率谱图,表明应用混沌技术可以有效地解决系统的电磁兼容(EMC)问题,为工程应用提供一种新的思路。

2 Superbuck 变换器的状态方程

峰值电压反馈型 Superbuck 变换器的原理图,如图 1 所示。该变换器是由双电感组成的四阶变换器。在开关管 S 导通期间,二极管关断,电源 E 通过电感 L_1 和电容 C_1 通过电感 L_2 同时给电容 C_2 和负载电阻 R 提供能量,所以通过开关管的电流为通过电感 L_1 和电感 L_2 的电流之和。在开关管 S 关断期间,二极管导通,电源 E 通过电感 L_1 给电容 C_1 充电,同时和电感 L_2 给电容 C_2 和负载电阻 R 提供能量,所以通过二极管的电流在此阶段同样为通过电感 L_1 和电感 L_2 的电流之和。Superbuck 变换器的静态和动态性能非常类似于传统的 Buck 变换器,但是其中存在独特的动态特性,使得变换器的输出电压 C_2 获得连续的充电电流,在太阳能光伏发电系统中得到了实际应用。

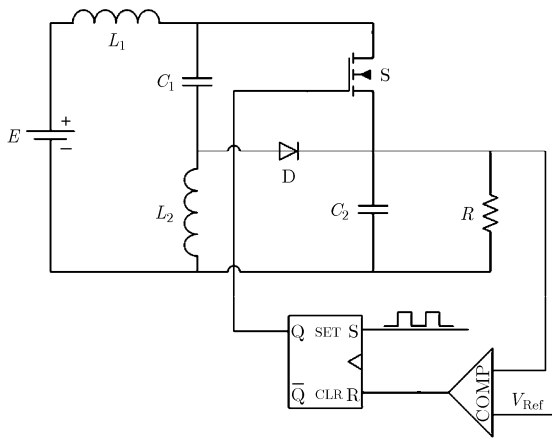


图1 峰值电压反馈型Superbuck变换器

利用 KVL 和 KCL 定律,可得图 1 所示 Superbuck 变换器中开关管 S 导通期间的状态空间方程为

$$\left. \begin{aligned} di_{L_1} / dt &= -V_{C_1} / L_1 + E / L_1 \\ di_{L_2} / dt &= V_{C_1} / L_2 - V_{C_2} / L_2 \\ dV_{C_1} / dt &= i_{L_2} / C_1 \\ dV_{C_2} / dt &= i_{L_1} / C_2 + i_{L_2} / C_2 - V_o / (RC_2) \\ V_o &= V_{C_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

开关管 S 截止期间的状态空间方程为

$$\left. \begin{aligned} di_{L_1} / dt &= -V_{C_1} / L_1 - V_{C_2} / L_1 + E / L_1 \\ di_{L_2} / dt &= -V_{C_2} / L_2 \\ dV_{C_1} / dt &= i_{L_1} / C_1 \\ dV_{C_2} / dt &= i_{L_1} / C_2 + i_{L_2} / C_2 - V_o / (RC_2) \\ V_o &= V_{C_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

本文考虑变换器工作于连续电流模式,将状态方程式(1)~式(2)改写成如下形式:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{X} + \mathbf{B}_1 E \quad (\text{S 导通, D 截止}) \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{X} + \mathbf{B}_2 E \quad (\text{S 截止, D 导通}) \quad (4)$$

式(3),式(4)中, \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 分别为系统的参数矩阵; \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 分别为系统的输入矩阵, $\mathbf{X} = [i_{L_1} \ i_{L_2} \ V_{C_1} \ V_{C_2}]^T$ 为状态变量, E 为输入电压。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由线性系统状态方程的求解方法可得方程式(3)和式(4)的解为

$$\begin{aligned} X(t) &= f_i(X(t_{i-1}), t) \\ &= e^{A_i(t-t_{i-1})} \left\{ X(t_{i-1}) + \int_{t_0}^t e^{A_i(t_{i-1}-\tau)} \mathbf{B}_i E d\tau \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

采用频闪映射的方法,将状态方程式(3)和式(4)离散化,即每个周期进行一次状态采样,可以得到 X_n 到 X_{n+1} 离散映射:

$$X_{n+1} = f_2(f_1(X_n, t_1), t_2) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= e^{A_2 t_2} e^{A_1 t_1} X_n + e^{A_2 t_2} \int_0^{t_1} e^{A_1(t_1-\tau)} \mathbf{B}_1 E d\tau \\ &\quad + \int_{t_1}^T e^{A_2(T-\tau)} \mathbf{B}_2 E d\tau \quad (7) \end{aligned}$$

由以上推导可以得到 Superbuck 变换器的离散映射关系如下:

$$X_{n+1} = e^{A_2 t_2} e^{A_1 t_1} X_n + e^{A_2 t_2} (e^{A_1 t_1} - I) A_1^{-1} B_1 E + (e^{A_2 t_2} - I) A_2^{-1} B_2 E \quad (8)$$

其中 t_1 为开关管 S 的导通时间, t_2 为开关管 S 的截止时间, T 为开关管 S 的开关周期, D_n 为第 nT 到 $(n+1)T$ 周期内的占空比, $t_1 = D_n T$, $t_2 = (1 - D_n) T$ 。

3 Superbuck 变换器非线性动力学的数值仿真

为了研究 Superbuck 变换器的非线性动力学性质, 我们讨论其工作在电流连续模式下的非线性动力学性质。在此节研究中, Superbuck 变换器的参数值分别选取为: $E=10$ V, $L_1=10$ μ H, $L_2=82$ μ H, $C_1=2.2$ μ F, $C_2=1$ μ F, $R=18$ Ω , $T=10$ μ S。在峰值电压反馈型 Superbuck 变换器中, 参考电压 V_{ref} 对变换器的非线性动力学特性具有较大的影响, 此部分以参考电压 V_{ref} 为分岔参数做出电感 L_1 中电流 i_{L_1} 的分岔图, 所得分岔图如图 2 所示。

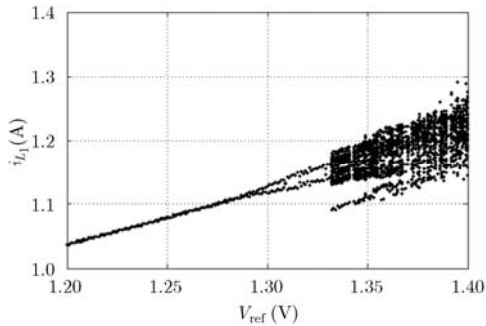


图2 V_{ref} 为分岔参数时 i_{L_1} 的分岔图

从图 2 中可以看出: 在参考电压 $V_{ref} \approx 1.289$ V 时, 电感电流 i_{L_1} 从周期 1 状态分岔进入周期 2 状态, 此处为周期 1 到周期 2 的分岔点。当参考电压 V_{ref} 小于此分岔点的值时, 系统运行于周期 1 状态。根据李雅普诺夫稳定性理论可知, 当参考电压 V_{ref} 在分岔点时, 系统失稳。当参考电压 V_{ref} 大于此分岔点的值时, 系统运行于周期 2 状态。随着参考电压 V_{ref} 继续增大, 当参考电压 $V_{ref} \approx 1.338$ V 系统不是经过倍周期分岔进入周期 4 状态, 而是突然由边界碰撞分岔进入混沌态, 如图 2 所示。

4 Superbuck 变换器非线性动力学的实验研究

本节通过观察电感电流 i_{L_1} 和滤波电容电压 V_{C_2} 的时域波形图, 电感电流 i_{L_1} 和滤波电容电压 V_{C_2} 的相图, 以及电感电流 i_{L_1} 的功率谱图, 对 Superbuck 变换器的非线性动力学性质进行实验研究。

本实验研究中选取的主要电路参数与数值仿真选取的电路参数一致。实验电路中功率开关管选用 MOSFET(IRFZ44), 功率二极管分别选用 1N5822 和 1N4148。控制回路由比较器 LM393, RS 触发器和 MOSFET 驱动 IR2110 组成, 实验电路的开关频率为 100 kHz, 实验原理图如图 3 所示。

根据图 2 中以参考电压 V_{ref} 为分岔参数电感电流 i_{L_1} 的分岔图, 我们选取相应的实验参数来验证理论分析的正确性。当 $V_{ref} < 1.289$ V 时, Superbuck 变换器工作于周期 1 状态, 实验中我们选取 $V_{ref} = 1.25$ V, 由图 4 中变换器的实验波形图可以看出, 变换器稳定地工作于周期 1 状态。图 4(a) 是滤波电容电压 V_{C_2} 和电感电流 i_{L_1} 的时域波形图, 从图中可以看出其中含有周期性谐波。图 4(b) 是电感电流 i_{L_1} 和滤波电容电压 V_{C_2} 的相图, 表明变换器稳定地工作于周期 1 状态。

随着参考电压 V_{ref} 的增加, 图 2 中电感电流 i_{L_1} 的分岔图显示系统通过倍周期分岔进入周期 2 状态, 参考电压 $V_{ref} \approx 1.289$ V 为周期 1 到周期 2 的分岔点。当参考电压 $V_{ref} > 1.289$ V 时, 系统运行于周期 2 状态。实验中当我们选取 $V_{ref} = 1.3$ V 时, 由图 5 中变换器的实验波形图可以看出, 变换器稳定地工作于周期 2 状态。由图 5(a) 中滤波电容电压 V_{C_2} 和电感电流 i_{L_1} 的时域波形图可以看出, 其中含有周期性二次谐波。图 5(b) 中电感电流 i_{L_1} 和滤波电容电压 V_{C_2} 的相图表明变换器稳定地工作于周期 2 状态, 相图中存在两个稳定的周期轨道。

根据图 2 中电感电流 i_{L_1} 的分岔图可知, 当参考电压 $V_{ref} \approx 1.338$ V 时系统突然由边界碰撞分岔进入混沌态, 实验中我们选取 $V_{ref} = 1.35$ V, 由图 6 中变换器的实验波形图可以看出, 变换器进入混沌状态。图 6(a) 中滤波电容电压 V_{C_2} 和电感电流 i_{L_1} 的时域波形图显示其中含有各种谐波信号, 这些谐波信号具有无序性和不可预测性等特点。图 6(b) 中电感电流 i_{L_1} 和滤波电容电压 V_{C_2} 的相图显示变换器不存在稳定的周期轨道, 而是存在多个周期轨道, 这些周期轨道不再重合, 表明变换器工作于混沌状态。

我们知道周期信号的功率谱为离散谱, 非周期信号的功率谱为连续谱, 噪音信号的功率谱是连续谱, 而且比较平滑。混沌信号是非周期信号, 其功率谱是连续谱, 同时还会出现许多峰值谱线, 这些峰值谱线主要是由于在进入混沌态的过程中由分岔所形成的。所以, 通过功率谱分析, 我们可以比较和区分噪音信号、周期信号和混沌信号。

电感电流 i_{L_1} 的功率谱图如图 7 所示。当参考电压 $V_{ref} = 1.25$ V 时, 图 4 的实验波形图显示变换器稳

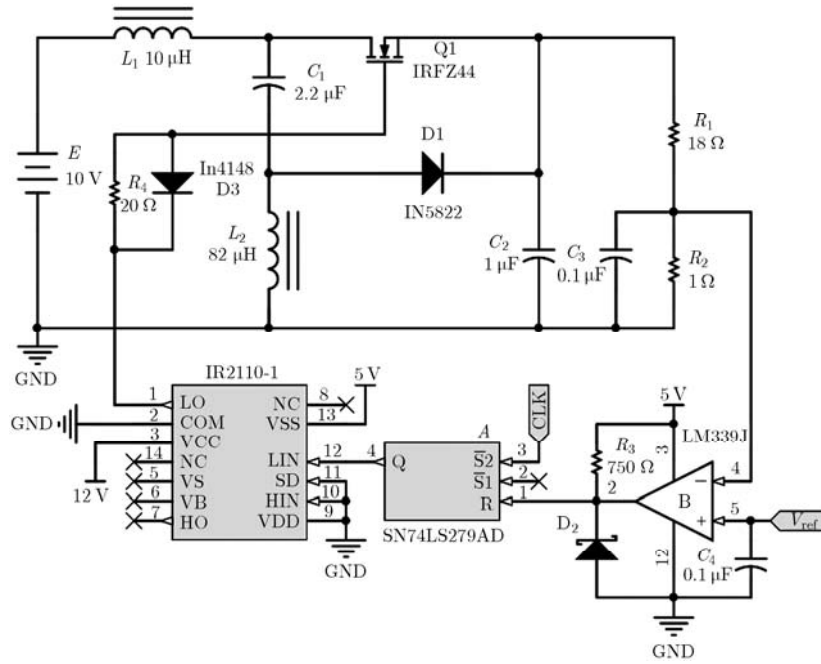
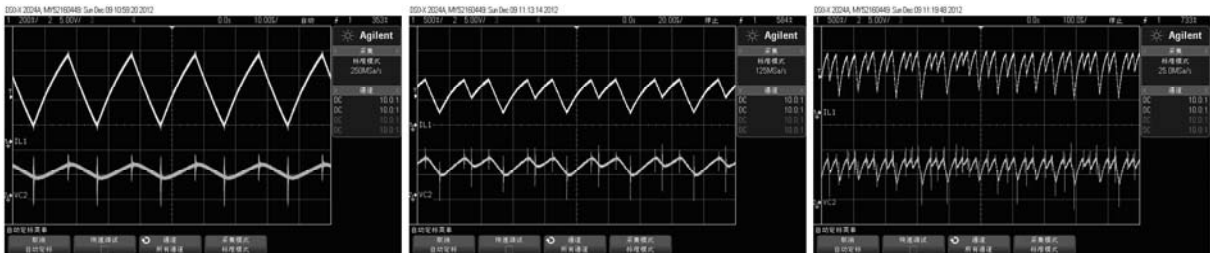
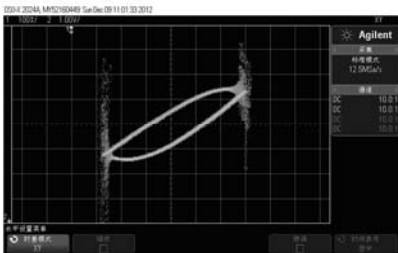


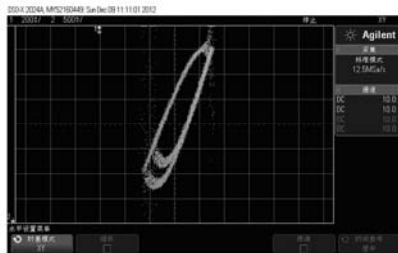
图 3 Superbuck 变换器的实验原理图



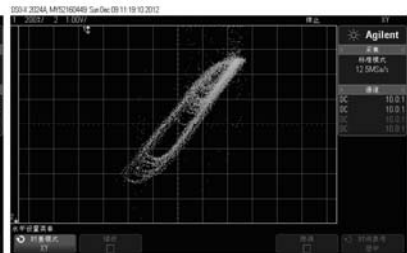
(a) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的时域波形图 (a) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的时域波形图 (a) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的时域波形图



(b) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的相图



(b) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的相图

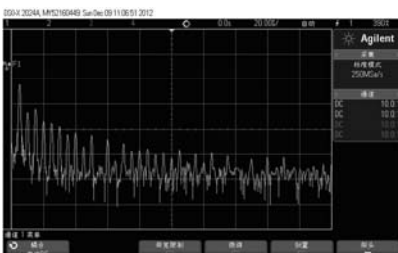


(b) 电感电流 i_{L1} 和滤波电容电压 V_{C2} 的相图

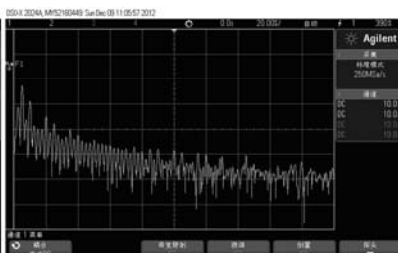
图 4 $V_{ref}=1.25\text{ V}$ 时 Superbuck 变换器的实验波形图

图 5 $V_{ref}=1.3\text{ V}$ 时 Superbuck 变换器的实验波形图

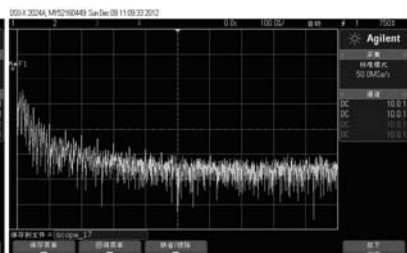
图 6 $V_{ref}=1.35\text{ V}$ 时 Superbuck 变换器的实验波形图



(a) $V_{ref}=1.25\text{ V}$ 时电感电流 i_{L1} 的功率谱



(b) $V_{ref}=1.3\text{ V}$ 时电感电流 i_{L1} 的功率谱



(c) $V_{ref}=1.35\text{ V}$ 时电感电流 i_{L1} 的功率谱

图 7 电感电流 i_{L1} 的功率谱图

定地工作于周期 1 状态, 图 7(a)为此时电感电流 i_{L_1} 的功率谱, 在开关频率处具有各次谐波, 其谐波峰值非常明显。当参考电压 $V_{ref}=1.3\text{ V}$ 时, 图 4 的实验波形图显示变换器稳定地工作于周期 2 状态, 图 7(b)为此时电感电流 i_{L_1} 的功率谱, 在开关频率处仍存在各次谐波, 其谐波峰值均有一定程度的降低。当参考电压 $V_{ref}=1.35\text{ V}$ 时, 图 4 的实验波形图显示变换器工作于混沌状态, 图 7(c)为此时电感电流 i_{L_1} 的功率谱, 在开关频率处的各次谐波明显得到了拓宽, 其谐波峰值进一步降低, 基本看不到谐波尖峰的存在, 随着谐波阶次的增加, 在较高次的谐波功率谱得到了有效的抑制, 谐波尖峰没有明显区分。实验结果表明, 当系统工作于混沌态时, 每个开关周期都在变化, 引起输出纹波稍微增加, 但是通过应用混沌技术来降低系统 EMI 噪音的效果非常明显, 是解决开关变换器 EMI 问题的一种新技术。

5 结束语

本文对太阳能光伏发电系统中一种重要的拓扑结构 Superbuck 变换器进行了分析, 得到了变换器的状态方程, 然后采用频闪映射方法得到变换器的离散映射模型。基于以参考电压为分岔参数的电感电流的分岔图详细分析了变换器的非线性动力学行为。然后, 通过电路实验验证系统从稳定到倍周期分岔直至混沌态的演化过程, 同时通过分析电感电流的功率谱图, 证明应用混沌技术可以有效地降低系统的 EMI, 具有实际应用前景。通过研究 Superbuck 变换器的非线性动力学行为可以为变换器的设计提供重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 温伟刚, 郭辉, 魏学业, 等. 基于多尺度分析的混沌态 Boost 电路的分形研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 1150-1152. Wen Wei-gang, Guo Hui, Wei Xue-ye, *et al.* Study on the fractal of chaos signal in boost circuit based on multi-scale analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(6): 1150-1152.
- [2] 毕闯, 王京梅. 电压反馈型正激变换器中分岔与混沌现象的研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6585-6588. Bi Chuang and Wang Jing-mei. Investigation of bifurcation and chaos in voltage-fed forward converter[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(20): 6585-6588.
- [3] 李娅妮, 杨银堂, 朱樟明, 等. 基于前馈电流控制斜坡补偿的 Boost 功率因数校正零交越失真研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2237-2242. Li Ya-ni, Yang Yin-tang, Zhu Zhang-ming, *et al.* Design of zero-crossing distortion of Boost power factor correction(PFC) based on feedforward current control slope compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2237-2242.
- [4] 马伟, 王明渝, 聂海龙. 单周期控制 Boost 变换器 Hopf 分岔控制及电路实现[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 7-14. Ma Wei, Wang Ming-yu, and Nie Hai-long. Control of Hopf bifurcation in the one-cycle controlled boost converter and its experimental implementation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 7-14.
- [5] 谢玲玲, 龚仁喜, 卓浩泽, 等. 电压模式控制不连续传导模式 boost 变换器切分岔研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 479-485. Xie Ling-ling, Gong Ren-xi, Zhuo Hao-ze, *et al.* Investigation of tangent bifurcation in voltage mode controlled DCM boost converters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 479-485.
- [6] 谢帆, 杨汝, 张波. 电流反馈型 Buck 变换器二维分段光滑系统边界碰撞和分岔研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8393-8406. Xie Fan, Yang Ru, and Zhang Bo. Study on border collision and bifurcation of two-dimensional piecewise smooth systems in current mode controlled Buck converter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8393-8406.
- [7] Weaver W and Krein T. Analysis and applications of a current-sourced buck converter[C]. Proceedings of Applied Power Electronics Conference, Anaheim, 2007: 1664-1670.
- [8] Karppanen M, Suntio T, and Sippola M. PCM-controlled superbuck converter with super performance and surprises[C]. Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 2008: 3206-3212.
- [9] Suntio T, Leppaaho J, and Huusari J. Issues on solar-generator-interfacing with voltage-fed converter[C]. Proceedings of 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, 2009: 595-600.
- [10] Karppanen M, Arminen J, Suntio T, *et al.* Dynamical modeling and characterization of peak-current-controlled superbuck converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(3): 1370-1380.
- [11] Leppaaho J, Huusari J, and Suntio T. Dynamic analysis of PCM-controlled coupled-inductor superbuck converter[C]. Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009: 1-10.
- [12] Leppaaho J and Suntio T. Dynamic characteristics of current-fed superbuck Converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(1): 200-209.

毕 闯: 男, 1983 年生, 讲师, 研究方向为电力电子技术及其非线性动力学。

张 千: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为电力电子技术。

向 勇: 男, 1977 年生, 教授, 研究方向为电力电子技术。