

斜坡补偿 Buck 变换器工作状态域估计

包伯成^{1,2}, 许建平³, 刘 中¹

(1. 南京理工大学电子工程系, 江苏南京 210094; 2. 江苏技术师范学院电气信息工程学院, 江苏常州 213001;
3. 西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031)

摘 要: 通过建立含斜坡补偿的分段光滑迭代映射方程, 导出了电流控制型 Buck 变换器运行轨道状态发生转移时的两个分界线方程, 由此确定了其工作状态的区域. Buck 变换器参数空间映射图的仿真结果验证了由两个分界线方程估计其工作状态域的正确性. 开关变换器工作状态域的估计对电路参数的合理选择以及混沌的镇定控制有着实际的指导意义.

关键词: Buck 变换器; 斜坡补偿; 迭代映射方程; 分界线方程; 工作状态域

中图分类号: TM 17; TM219 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2787-05

Estimation of Operating State Regions for Buck Converter with Ramp Compensation

BAO Bo-cheng^{1,2}, XU Jianping³, LIU Zhong¹

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China;
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: With the variations of circuit parameters, the operating state of current mode controlled buck converter by utilizing compensating ramp current can shift between stable period-one region, robust chaos region in continuous conduction mode (CCM) and intermittent chaos region in discontinuous conduction mode (DCM). By establishing the piecewise smooth iterative map with ramp compensation, two borderline equations of the orbit states shifting of current mode controlled buck converter are derived, and the corresponding operating state regions are decided. The simulation results of the parameter space map of buck converter verify the estimated operating state regions by two borderline equations. The estimation of operating state regions for switching converter has practical guideline signification for selection of circuit parameters as well as stability control of chaos.

Key words: buck converter; ramp compensation; iterative map; borderline equation; operating state region

1 引言

近几年来, 利用非线性动力学研究开关 DG-DC 变换器的非线性行为一直是人们关注的热点^[1~13]. 通过分析和揭示开关 DG-DC 变换器中的非线性现象及其产生的机理, 不仅有利于设计更为可靠、合理的开关 DG-DC 变换器, 也为在一定条件下利用开关 DG-DC 变换器中这些固有的非线性现象来改善其工作特性提供了理论基础^[1]. 在实际的开关 DG-DC 变换器设计中, 其电路参数域和工作状态域的确定一直是工程设计人员十分关注的问题, 人们在开关 DG-DC 变换器设计的过程中, 通常是通过调整开关 DG-DC 变换器的某些参数使系统的某些性能得到提高, 但同时却可能带来其它一些性能的恶化. 斜坡补偿是一种直观有效、容易实施的稳定性

控制技术, 在开关 DG-DC 变换器电路设计中得到了广泛的应用^[14,15]. 通过在开关 DG-DC 变换器反馈电路中引入适当的补偿斜坡电流或电压, 既可以有效地拓宽系统的稳定范围, 也可以把系统的运行状态控制在所需要的区域. 因此, 系统地研究含有斜坡补偿的开关 DG-DC 变换器工作状态域的确定方法, 估计出各个区域之间的边界, 对开关 DG-DC 变换器的设计、运行及控制都有着重要的现实意义.

已有文献开展了开关 DG-DC 变换器的电路参数域预测的研究工作^[2,13], 确定了开关 DG-DC 变换器工作在稳定周期 1 所需要满足的参数条件, 但在较宽的电路参数范围内, 开关 DG-DC 变换器的工作状态域不仅有稳定周期 1 域和混沌域两个工作状态, 在混沌域内还存在着 CCM 模式的鲁棒混沌域和 DCM 模式的阵发混沌

域^[2], 因此, 在进行开关 DC-DC 变换器的混沌应用和混沌控制时, 需要对其整个工作状态域做出正确的估计。

本文利用非线性动力学理论研究电流控制型 Buck 变换器及其工作状态与电路参数之间的关系。首先, 对采用斜坡补偿电流的电流控制型 Buck 变换器, 建立了具有两个边界的三段光滑离散迭代映射方程, 在较宽的电路参数变化范围内对 Buck 变换器的动力学行为进行了分析, 并研究了发生工作状态转移的机理及边界碰撞分岔现象的形成原因; 然后, 导出了第一次倍周期分岔的分界线方程和 CCM-DCM 模式转移的分界线方程; 最后, 利用数值仿真得到了变换器三个主要参数的工作状态域分布, 并利用 Buck 变换器参数空间映射图验证了相应结果。

2 斜坡补偿 Buck 变换器的一维映射

2.1 采用斜坡补偿的 Buck 变换器

如图 1 所示为采用补偿斜坡电流的电流控制型 Buck 变换器的原理图, 其主电路拓扑是一个由电感、电容、开关管、二极管和负载电阻组成的二阶电路。在电感电流连续模式 (Continuous Conduction Mode, CCM), 电感电流始终为非零; 而在电感电流不连续模式 (Discontinuous Conduction Mode, DCM), 在开关管 S 关断期间, 电感电流下降到零值, 并保持到下一个时钟脉冲开始。

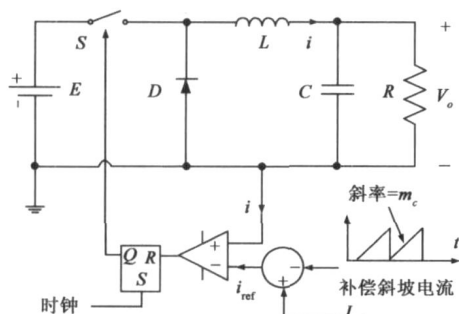


图1 采用斜坡补偿的电流模式控制Buck变换器

采用斜坡补偿的 Buck 变换器的电感电流波形如图 2 所示, 图中 I_{ref} 为未经补偿的参考电流, i_{ref} 为补偿后的参考电流, m_1 为电感电流上升阶段的斜率, m_2 为电感电流下降阶段的斜率, m_c 为补偿斜坡电流的斜率。

在图 1 中, 电感电流与补偿后的参考电流 i_{ref} 进行比较后, 通过与 RS 触发器构成的反馈电路控制开关管

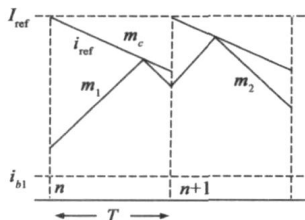


图2 斜坡补偿后的电感电流波形示例

S 的导通和关断工作状态。补偿后的参考电流 i_{ref} 与原参考电流 I_{ref} 有如下关系式:

$$i_{ref} = I_{ref} - m_c(t \bmod T) \quad (1)$$

式中 T 是开关周期, $(t \bmod T)$ 是 t 对 T 取模。当时钟脉冲开始时, 开关管 S 导通, 电感电流 i 线性上升, 当 i 增加至补偿后的峰值参考电流 i_{ref} 时, 比较器复位触发器, 开关管 S 关断, 电感电流 i 近似线性下降, 直至下一个时钟脉冲开始时, 开关管 S 再一次导通。

2.2 一维迭代映射方程

对于开关 DC-DC 变换器, 可以利用时钟周期同步采样以获得离散迭代模型。在图 1 中, 电容器用于平滑输出电压, 时钟周期与 RC 时间常数相比足够小, 输出电压可以认为恒定不变, 输出部分可以用直流电压源 V_o 表示。在这种情形下, 开关变换器变成一维系统, 电感电流波形变成分段线性波形。

设电流控制型 Buck 变换器的电感电流斜率在开关管导通或截止期间分别为:

$$m_1 = \frac{E - V_o}{L}; \quad m_2 = \frac{V_o}{L} \quad (2)$$

设 i_n 是电感电流在时钟 nT 时刻的采样值; i_{n+1} 是电感电流在下一个时钟 $(n+1)T$ 时刻的采样值。

工作于 DCM 模式的 Buck 变换器在离散状态空间中具有两个边界。定义第一边界 I_{b1} (以下简称边界 1) 为电感电流在时钟周期结束时刚好到达补偿后参考电流 i_{ref} 时, 时钟周期开始时的电感电流的值; 定义第二个边界 I_{b2} (以下简称边界 2) 为电感电流在时钟周期结束时刚好下降到 0 时, 时钟周期开始时的电感电流的值。按照两个边界的定义, 可以推导出以下关系式:

$$I_{b1} = I_{ref} - (m_1 + m_c)T \quad (3)$$

$$I_{b2} = \frac{(m_1 + m_2)I_{ref} - m_2(m_1 + m_c)T}{m_2 - m_c} \quad (4)$$

这样, 在两个相邻时钟 nT 和 $(n+1)T$ 时刻, 有三种类型的运行轨道, 分别表示为:

(1) $i_n \leq I_{b1}$ 时, 在整个时钟周期内, 开关管保持在导通状态, 此时映射方程式为:

$$i_{n+1} = i_n + m_1 T \quad (5)$$

(2) $I_{b1} < i_n < I_{b2}$ 时, 电感电流上升到 i_{ref} , 开关状态发生转换, 开关管从导通状态进入关断状态。关断后, 电感电流下降, 直到这个时钟周期结束, 其映射方程为:

$$i_{n+1} = -\frac{m_2 - m_c}{m_1 + m_c} i_n - m_2 T + \frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_c} I_{ref} \quad (6)$$

(3) $i_n \geq I_{b2}$ 时, 电感电流下降到 0 即变换器进入 DCM。因此, 在第 n 个时钟周期结束时, 映射方程为:

$$i_{n+1} = 0 \quad (7)$$

式(5)~(7)所描述的电感电流的迭代映射方程是一维离散动力系统, 容易验证该映射方程在两个断点处是连续的。

2.3 边界碰撞分岔分析

在电路参数变化时, 分段光滑系统会发生分岔到混沌的动力学行为。选取电路参数为: $V_o = 8\text{ V}$ 、 $I_{\text{ref}} = 1\text{ A}$ 、 $L = 0.7\text{ mH}$ 和 $T = 100\mu\text{s}$, 当没有斜坡补偿时, 以输入电压为分岔参数时 Buck 变换器的分岔图如图 3(a) 所示; 当输入电压 $E = 12\text{ V}$ 时, 以补偿斜坡电流斜率为分岔参数时 Buck 变换器的分岔图如图 3(b) 所示。从图 3 中可以发现 Buck 变换器具有十分复杂的动力学行为。

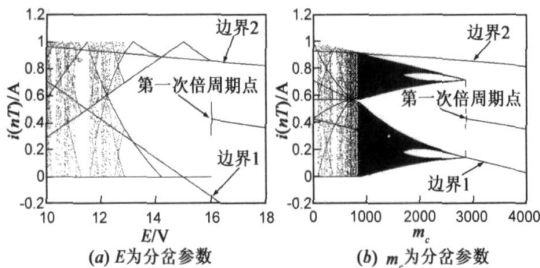


图3 Buck变换器的分岔图

随着输入电压 E 的减小, 系统出现了倍周期通往混沌的道路。图 3(a) 中第一次倍周期分岔发生在 $E = 16\text{ V}$ 时, 随即在同一个参数值处, 系统不稳定的周期 2 轨道与边界 2 相遇发生边界碰撞分岔, 周期 2 轨道直接进入 DCM 模式并折叠。随着输入电压 E 的进一步减小, 在 $E = 15\text{ V}$ 处与边界 1 发生边界碰撞分岔, 此参数值可由式(3)令 $I_{b1} = 0$ 得到, 其表达式为:

$$E = V_o + I_{\text{ref}}L/T \quad (8)$$

此时周期 2 非零值轨道再次折叠。折叠后非零值轨道在 $E = 14.22\text{ V}$ 处与边界 2 再次发生碰撞分岔, 产生了周期 4 轨道, 接着在 $E = 12.87\text{ V}$ 处又一次边界碰撞分岔后, 系统轨道经不稳定的周期 8 轨道进入 DCM 模式的混沌态。Buck 变换器进入 DCM 模式后, 分岔图上出现了多个周期窗, 并表现为弱混沌和强阵发性。不难观察出, 混沌区域中在不稳定的多周期轨道附近分布着高密度的混沌轨道点, 意味着在该混沌态中存在阵发周期行为。

从图 3(b) 中的分岔图可以看到, 随着补偿斜坡电流斜率的减小, Buck 变换器由稳定的周期 1 轨道直接进入 CCM 模式的鲁棒混沌态, 再转移到 DCM 模式的弱混沌态。图 3(b) 中第一次倍周期分岔发生在 $m_c = 2857$, 此时, 系统不稳定的周期 2 轨道与边界 1 发生边界碰撞分岔后直接进入 CCM 模式的鲁棒混沌区域; 而在 $m_c = 896.7$ 处, 混沌轨道与边界 2 发生边界碰撞分岔后, 系统工作模式由 CCM 转移到 DCM, 进入了强阵发的弱混沌态。

由以上分析可见, Buck 变换器的运行轨道与边界相遇引起边界碰撞分岔后, 其工作状态区域有以下三种情形的转移: (1) 在稳定的周期 1 域的周期轨道经与边界 1 发生碰撞分岔后, 其工作状态转移至 CCM 模式的鲁棒混沌域; (2) 在稳定的周期 1 域的周期轨道经与边界 2 发生碰撞分岔后, 其工作状态转移至 DCM 模式的弱混沌域; (3) 在 CCM 模式的鲁棒混沌域的混沌轨道经与边界 2 发生碰撞分岔后, 其工作状态则转移至 DCM 模式的弱混沌域。

3 分界线方程和工作状态域

3.1 两个分界线方程

明显地, 在稳定的周期 1 区域, 不会发生 $i_n \leq I_{b1}$ 的情形。因此, 变换器的稳定性只在 $I_{b1} < i_n < I_{b2}$ 的情形时受到影响。由式(6), 内部含有补偿回路的特征方程的特征根 λ 为:

$$\lambda = -\frac{m_2 - m_c}{m_1 + m_c} \quad (9)$$

对于变换器稳定周期 1 情况, λ 必须落在 -1 至 1 的区间内, 当 λ 通过 -1 越出该区间, 则变换器将产生倍周期分岔。特别地, 当 $\lambda = -1$ 时, 会发生第一次倍周期分岔。代入 $\lambda = -1$, 可以获得临界补偿斜率 M_c 为:

$$M_c = \frac{m_2 - m_1}{2} = \frac{2V_o - E}{2L} \quad (10)$$

式中 M_c 是为确保变换器电路处于周期 1 态所需引入的最小补偿斜坡斜率。

设 Buck 变换器补偿斜率为 m_{cb1} , 输入电压为 E_{b1} , 输出电压为 V_{cb1} , 则由式(9)代入 $\lambda = -1$ 后得到发生第一次倍周期分岔的分界线方程 1 为:

$$E_{b1} - 2V_{cb1} + 2m_{cb1}L = 0 \quad (11)$$

这里 Buck 变换器的电感 L 为一常数。式(11)表明斜坡补偿 Buck 变换器工作状态稳定与否, 只与输入电压、输出电压、电感值和补偿电流斜率四个电路参数有关。选择的电路参数使得式(11)大于 0 时, 表明 Buck 变换器工作在稳定的周期 1 态, 反之, 则工作在不稳定的混沌态。无斜坡补偿时, 有 $E_{b1} = 2V_{ob1}$, 即 Buck 变换器的临界占空比为 0.5。

发生 CCM 模式-DCM 模式转移时, 混沌轨道与边界 2 发生边界碰撞分岔, 此时在 $(n+1)T$ 时刻的电感电流 i_{n+1} 处于最大值 $i_{n+1, \max} = I_{\text{ref}} - m_c T$, 即满足

$$I_{b2} = i_{n+1, \max} = I_{\text{ref}} - m_c T \quad (12)$$

设 Buck 变换器发生模式转移时的补偿斜率为 m_{cb2} , 输入电压为 E_{b2} , 输出电压为 V_{ob2} , 因此由式(12)可得到 CCM-DCM 模式转移的分界线方程 2 为:

$$I_{\text{ref}} - m_{cb2}T = \frac{(m_1 + m_2)I_{\text{ref}} - m_2(m_1 + m_{cb2})T}{m_2 - m_{cb2}} \quad (13)$$

化简并代入式(2), 有:

$$m_{cb2}L^2(m_{cb2}T - I_{ref}) + (E_{b2} - V_{ob2})(V_{ob2}T - LI_{ref}) = 0 \quad (14)$$

这里参考电流 I_{ref} 、电感 L 和开关周期 T 均为常数值. 式(14)表明斜坡补偿 Buck 变换器混沌态是处于 CCM 模式还是 DCM 模式, 取决于所有电路参数的数学关系. 选择的电路参数使得式(14)小于 0 时, 表明 Buck 变换器工作在 CCM 鲁棒混沌态, 反之, 则工作在 DCM 阵发混沌态.

式(11)和式(14)所描述的两个分界线方程可以对 Buck 变换器的工作状态域进行清晰地划分, 并因此可以由确定的电路参数对开关变换器的工作状态作正确的估计.

选择输出电压值为 V_o , 由式(11)和式(14)得到 Buck 变换器工作状态域的输入电压与补偿斜率的关系式:

$$E_{b1} = 2V_o - 2m_{cb1}L \quad (15)$$

$$E_{b2} = \frac{m_{cb2}L^2(m_{cb2}T - I_{ref})}{II_{ref} - V_oT} + V_o \quad (16)$$

若选择输入电压值为 E , 则得到补偿斜率与输出电压的关系式:

$$m_{cb1} = (V_{ob1} - 0.5E)/L \quad (17)$$

$$m_{cb2} = \frac{I_{ref}}{2T} - \sqrt{\left(\frac{I_{ref}}{2T}\right)^2 + \left(\frac{E - V_{ob2}}{TL}\right)I_{ref} + \frac{V_{ob2}^2 - V_{ob2}E}{L^2}} \quad (18)$$

对于图 3(b) 补偿斜坡电流斜率为参数的分岔图, 根据已确定的电路参数 $V_o = 8V$ 、 $I_{ref} = 1A$ 、 $L = 0.7mH$ 和 $T = 100\mu s$, 由式(17)可计算得到第一次倍周期分岔点对应的参数值是 $m_{cb1} = 2857.1$, 由式(18)可计算得到 CCM 模式转移至 DCM 模式时所对应的参数值是 $m_{cb2} = 896.741$. 因此由两个分界线方程计算得到的参数值与图 3(b) 中所示参数值完全一致.

3.2 Buck 变换器工作状态域

由式(15)和式(16)所描写的分界线方程, 在输入电压与补偿斜率同时变化时, Buck 变换器的工作状态域分布如图 4(a) 所示. 这里, 输入电压与补偿斜率的参数区间为 $E = 9 \sim 16V$ 、 $m_c = 0 \sim 4000$, 选取电路参数 $V_o = 8V$ 、 $I_{ref} = 1A$ 、 $L = 0.7mH$ 和 $T = 100\mu s$.

图 4(a) 中第一条曲线为第一次倍周期分岔的分界线, 第二条曲线为 CCM-DCM 模式转移的分界线, 两条曲线把 Buck 变换器的工作状态域分割成了三个主要的区域: (1) 稳定的周期 1 区域; (2) CCM 鲁棒混沌区域, 以及 (3) DCM 阵发混沌区域. 需要说明的是, 在 CCM-DCM 分界线的右侧区域, 在第一次倍周期分岔线上, Buck 变换器轨道与边界 1 发生边界碰撞分岔; 而在 CCM-DCM 分界线的左侧区域, 在第一次倍周期分岔线上, Buck 变

换器轨道则与边界 2 发生边界碰撞分岔, 并直接过渡到 DCM 阵发混沌域.

可以利用 Buck 变换器的参数空间映射图来验证图 4(a) 由两个分界线方程分割的工作状态域, 即利用式(5)~(7)所描述的 Buck 变换器的离散迭代映射方程, 来研究在 E 和 m_c 的参数空间上的分岔模式. 利用图 4(a) 相同的电路参数, 可得到 Buck 变换器的参数空间映射图如图 4(b) 所示, 在图 4(b) 中, 根据周期数的大小使用相应的黑白灰度将该映射点在两参数平面中绘出, 白色区域代表低周期, 黑色区域代表混沌, 周期数越大则灰度越深.

比较图 4(a) 和 4(b), 不难看出, 由两个分界线方程分割的工作状态域分布, 与由 Buck 变换器的迭代映射方程获得的参数空间映射图所表示的结果完全一致.

选取电路参数: 补偿斜率 $m_c = 0 \sim 4000$ 、输出电压 $V_o = 6 \sim 12V$ 、 $E = 12V$ 、 $I_{ref} = 1A$ 、 $L = 0.7mH$ 和 $T = 100\mu s$, 由式(17)和式(18)所描写的分界线方程, Buck 变换器的工作状态域分布如图 4(c) 所示; 由式(5)~(7)所描述的三段光滑离散迭代映射方程, Buck 变换器的参数空间映射图如图 4(d) 所示. 显然图 4(c) 和图 4(d) 两者所表达的结果完全吻合.

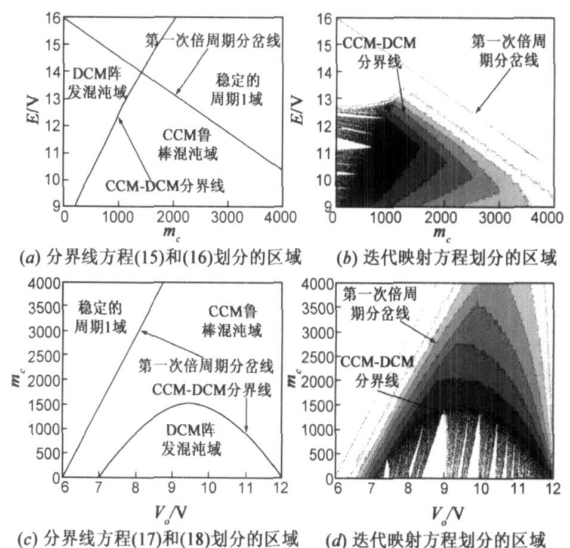


图 4 Buck 变换器的工作状态域分布

同时从图 4 中可以观察到, 通过对 Buck 变换器引入合适的斜坡补偿电流, 可以使得 Buck 变换器的工作模式从 DCM 模式控制转移到 CCM 模式, 也可以把 Buck 变换器的工作状态锁定在稳定的周期 1 态.

4 结论

在较宽的电路参数变化区间内, 由于开关变换器中开关管的周期性导通和关断, 电流控制型 Buck 变换器呈现出较为复杂的非线性物理现象. 在不同的工作状态域下, 其运行轨道与两个边界发生碰撞分岔后, 轨道将发

生稳定的周期 1 态、CCM 鲁棒混沌态和 DCM 阵发混沌态之间的状态转移。Buck 变换器的两个分界线方程分别表征了不同工作状态发生转移时所遵循的数学关系。本文通过建立含斜坡补偿的分段光滑迭代映射方程, 导出了 Buck 变换器运行轨道状态发生转移时的两个分界线方程, 由此确定了其工作状态域, 并利用参数空间映射图验证了 Buck 变换器工作状态域估计的正确性。

参考文献:

- [1] TSE C K, BERNARDO M D. Complex behavior in switching power converters[J]. Proceeding of IEEE, 2002, 90(5): 768–781.
- [2] 周宇飞, 等. 开关功率变换器中的间隙现象——仿真和实验[J]. 电子学报, 2004, 32(2): 264–268.
ZHOU Yue fei, et al. Intermittency in switching power converters simulation and experiment[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(2): 264–268. (in Chinese)
- [3] 周宇飞, 等. 电流模式控制 Boost 变换器中的呼吸现象[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 915–919.
ZHOU Yue fei, et al. Breathing in current mode controlled boost converter[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 915–919. (in Chinese)
- [4] 任海鹏. 平均电流控制型 PFC Boost 变换器中的低频分岔现象研究[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 784–789.
REN Hai peng. Investigation of low frequency bifurcation in average current controlled power factor correction boost converter[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 784–789. (in Chinese)
- [5] ZHAO Y B, et al. Study on bifurcation and stability of the closed loop current programmed boost converters[J]. Chinese Physics, 2007, 16(4): 933–936.
- [6] ZHOU Y F, et al. Complex intermittency in switching converter[J]. Int Journal of Bifurcation and Chaos, 2008, 18(1): 121–140.
- [7] ZHANYBAI T Z, et al. Quasi periodicity and border collision bifurcations in a DC-DC converter with pulsewidth modulation[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2003, 50(8): 1047–1057.
- [8] PARAG J, BANERJEE S. Border collision bifurcations in one dimensional discontinuous maps[J]. Int Journal of Bifurcation and Chaos, 2003, 13(11): 3341–3351.
- [9] WONG S C, et al. Intermittent chaotic operation in switching power converters[J]. Int Journal of Bifurcation and Chaos, 2004, 14(8): 1971–1978.
- [10] IU H H C, TSE C K. Study of low frequency bifurcation phenomena of a parallel connected boost converter system via simple averaged models[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2003, 50(5): 679–686.

- [11] BANERJEE S, et al. Dynamical effects of missed switching in current mode controlled dc/dc converters[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II, 2004, 51(12): 649–654.
- [12] PARUI S, BANERJEE S. Bifurcations due to transition from continuous conduction mode to discontinuous conduction mode in the boost converter[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2003, 50(11): 1464–1469.
- [13] 杨宇, 等. 电流型 Cuk 变换器稳定运行的参数域预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 78–84.
YANG Yu, et al. Forecast of stable parameter region for current Cuk converters[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(16): 78–84. (in Chinese)
- [14] 包伯成, 等. 开关 DC-DC 变换器斜坡补偿的稳定性控制研究[J]. 2008, 电子科技大学学报, 37(3): 397–400.
BAO Bo cheng, et al. Study on stability control of ramp compensation for switched DC-DC converter[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(3): 397–400. (in Chinese)
- [15] 王凤岩, 许建平. V^2C 控制 Buck 变换器分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 121–126.
WANG Feng-yan, XU Jian-ping. Modeling and analysis of V^2C controlled buck converter[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(2): 121–126. (in Chinese)

作者简介:



包伯成 男, 1965 年出生于江苏省常州市, 现为南京理工大学博士生, 江苏技术师范学院高级工程师, 从事功率电子学和系统动力学方面的研究工作。

E-mail: mervinbao@126.com; hbc@jstu.edu.cn



许建平 男, 1963 年出生于贵州省遵义市, 现为西南交通大学电气工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电力电子系统控制与电力传动系统。

E-mail: jpxu@swjtu@163.com



刘中 男, 1963 年出生于安徽省灵璧县, 现为南京理工大学信息与通信工程学科教授、博士生导师, 主要研究方向为信号处理和混沌信息动力学。

E-mail: eezliu@mail.njust.edu.cn