

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.09.024

基于 SPICE 设计的电流控制型 Boost 变换器分叉与混沌研究^①

闵国旗, 王丽丹, 段书凯, 夏思为

西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715

摘要: 以电流控制型 Boost 变换器的离散映射模型为基础, 得出变换器的电感电流随参考电流变化的分叉图, 并采用 Simulink 建立的状态空间模型对分叉图进行描述. 以此为基础, 研究一种基于 SPICE 设计的电流控制型 Boost 变换器, 分析了以参考电流为变化参数的分叉和混沌现象, 解释了系统分叉与混沌行为的成因. 一系列的仿真结果验证了理论分析的正确性, 为实际工程设计中避免 Boost 变换器的分叉、混沌行为提供理论依据.

关键词: 电流控制型 Boost 变换器; 分叉; 混沌; SPICE 设计

中图分类号: TN710.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)09-0157-08

功率变换器是现代电力电子设备的核心部件, 其在运行中出现了如次谐波振荡、分叉和混沌等一些非线性现象. 混沌^[1-2]是一种不稳定的现象, 导致无法预测系统的运行状态, 从而影响它的控制性能. 因此, 研究变换器的混沌产生方式与分析方法可为其在实际电路中避免混沌行为提供了理论基础.

80 年代以来, 研究者对开关功率变换器中的 Boost, Buck 与 Buck-Boost 变换器的混沌现象进行了深入研究^[3-7], 但并没有从系统的稳定性、可控性、可观测性、可靠性等角度研究其基本特征, 使其进一步应用受到限制. 学术界现有的开关功率变换器的分析仅限于时域内数学模型和离散迭代方程的建立^[3], 而且缺乏实际的电路设计和分析, 对混沌的建模相当困难, 在一定程度上也限制了功率变换器非线性混沌理论的研究. 本文从实际电路的角度提出了一种基于 SPICE 设计^[8]的电流控制型 Boost 变换器的方法, 描述了此种变换器分叉与混沌现象的条件, 一系列的仿真结果验证了所提电路的正确性与实用性, 避免在实际电路中出现类似的混沌现象提供了理论依据.

1 电流控制型 Boost 变换器的工作原理及状态方程

电流控制型 Boost 变换器的基本电路和工作波形见图 1^[3-4]. 此电路由电感 L 、电容 C 、开关管 S 、电感线圈内阻 R_L 、二极管 D 和负载电阻 R 组成, 其中电感电流为 i_L , 参考电流为 I_{ref} , 输入电压为 E , 输出电压为 U_o . 电路工作原理: 假设电路工作在电感电流连续模式下, 电感电流 i_L 与参考电流 I_{ref} 比较之后, 其信号与时钟信号通过触发器组成的反馈控制电路, 产生一个信号来控制开关管 S 关断和导通两种工作状态. 假定初始时刻电感电流 i_L 小于参考电流 I_{ref} , 比较器输出低电平, 当时钟脉冲周期开始后, 开关管 S 导通,

① 收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(教技函[2013]47号); 国家自然科学基金(61372139, 61571372, 60972155); 留学人员科技活动项目择优资助经费(国家级, 优秀类, 渝人社办[2012]186号); 重庆市高等学校优秀人才支持计划(渝教人[2011]65号); 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(渝教人[2011]65号); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2014A009, XDJK2013B011).

作者简介: 闵国旗(1988-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事非线性电路与系统的研究.

通信作者: 王丽丹, 教授, 硕士研究生导师.

二极管 D 反向偏置截止, 电感电流 i_L 近乎线性上升, 电能以磁能的形式存储在电感线圈中, 同时电容器放电, 直至电感电流 i_L 上升到参考电流 I_{ref} 时, 此时比较器输出高电平, 触发器复位, 开关管 S 关断, 二极管 D 导通, 电容充电, 电感 L 和负载电阻 R 、电容 C 将产生谐振^[9], 电感电流 i_L 将几乎线性下降, 直到下一个时钟周期到来后再次使 S 导通, D 截止, 变换器完成一个周期的相位切换。

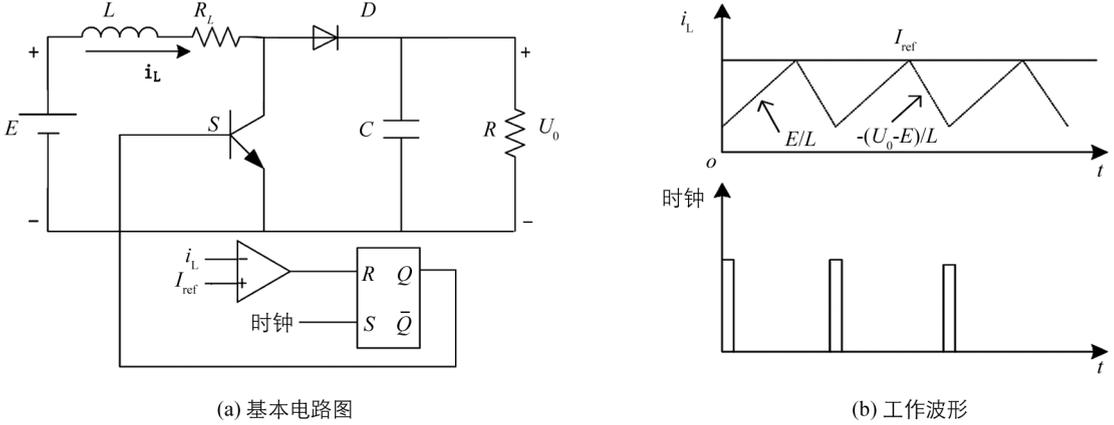


图 1 电流控制型 Boost 变换器电路^[3-4]

本研究考虑了电感线圈的内阻 R_L , 在连续模式下, 当开关管 S 导通时电流控制型 Boost 变换器的状态方程为:

$$\begin{cases} i'_L = -\frac{R_L}{L}i_L + \frac{E}{L} \\ u'_0 = \frac{-v_0}{RC} \end{cases} \quad (1)$$

当开关管 S 关断时, 状态方程为:

$$\begin{cases} i'_L = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{v_0}{L} + \frac{E}{L} \\ u'_0 = \frac{-v_0}{RC} + \frac{i_L}{C} \end{cases} \quad (2)$$

2 电流控制型 Boost 变换器离散映射模型及分叉图

2.1 电流控制型 Boost 变换器离散映射模型的推导

本文采用在 DC-DC 变换器离散时间映射中广泛使用的频闪映射方法来获取电流控制型 Boost 变换器离散映射模型^[4], 在每个时钟周期开始时刻, 对该系统的电感电流和电容电压这 2 个状态变量进行定期采样. 假定电感电流 i_L 、电容电压 v_0 的初始值为 $i_L = i_n$, $v_0 = v_n$, 而且开关切换条件 $i_L = I_{ref}$ 发生在 t_n 时刻(图 2)。

由图 2 可知, 当开关管 S 导通, 设 $t = 0$, 二极管 D 关断, 可得出方程(1)的解为:

$$t_n = \frac{L(I_{ref} - i_n)}{E}, v_0(t_n) = v_n \times e^{-t_n k}, k = 1/2RC \quad (3)$$

当开关管 S 关断时, 二极管 D 导通, 可解出方程(2)的解为:

$$i_L(t) = e^{\alpha t} [c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t] + \frac{E}{R + R_L}, \omega = \sqrt{\frac{(R + R_L)}{RLC} - \alpha^2}, \alpha = -\frac{RR_L C}{2RLC} \quad (4)$$

由初始条件: $v_0(0) = v_n e^{-mk}$, $i_n = I_{ref}$. 可得:

$$c_1 = I_{ref} - \frac{E}{R + R_L} \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{\omega \left[(R + R_L)(v_n e^{-tk} + (I_{ref} - \frac{E}{R + R_L})L\alpha - E) + ER_L + R_L(R + R_L)e^{at} (I_{ref} - \frac{E}{R + R_L})\cos\omega t \right]}{-R_L(R + R_L)(1 + R_L\omega e^{at} \sin\omega t)} \quad (6)$$

根据(3)式可知 i_n 与 t_n 相关, 由图 3 可知 $t_m = T[1 - (t_n/T) \bmod 1]$, 当电流控制型 Boost 变换器工作在连续模式下, 令 $i_{n+1} = i_L(t_m)$, $v_{n+1} = v_o(t_m)$ 可得其离散映射模型为:

$$i_{n+1} = e^{at_m} [c_1 \cos\omega t_m + c_2 \sin\omega t_m] + \frac{E}{R + R_L} \quad (7)$$

$$v_{n+1} = E - R_L e^{at_m} [c_1 \cos\omega t_m + c_2 \sin\omega t_m] + \frac{ER_L}{R + R_L} - Le^{at_m} [(c_1\alpha + \frac{c_2}{\omega})\cos\omega t_m + (\alpha c_2 - \frac{c_1}{\omega})\sin\omega t_m] \quad (8)$$

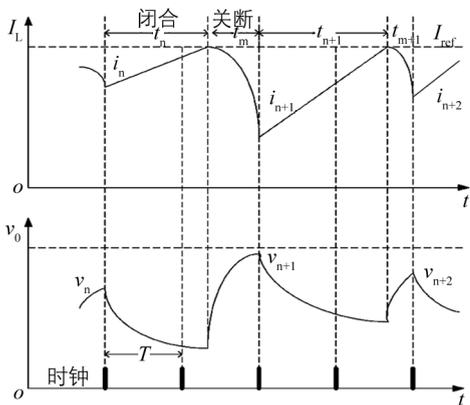


图 2 电感电流和电容电压变频映射的采样示意图^[3]

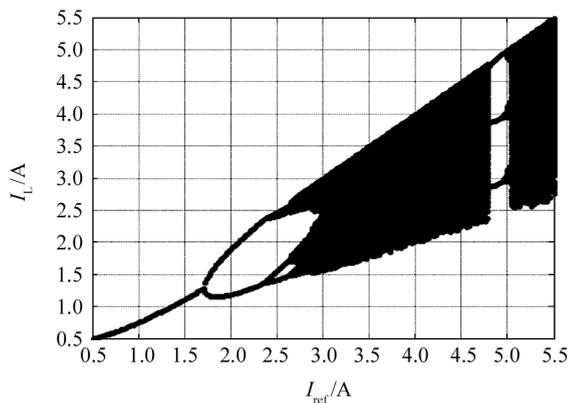


图 3 电流控制型 Boost 变换器的电感电流 i_L 随参考电流 I_{ref} 变化的分叉图

2.2 电流控制型 Boost 变换器的分叉图

分叉图是研究系统参数变化引起系统状态失稳产生混沌现象的工具. 由于建立了变频映射模型, 在分叉图中以变频法表示系统的状态: 系统的周期稳态表示为一个或几个周期点, 而混沌态的采样点是分布在一定区域内的密集点, 并且具有层次结构的特点^[10].

根据电流控制型 Boost 变换器工作在连续模式下的离散映射模型^[4], 即(7)、(8)式, 由这两个式子编写 MATLAB 仿真程序得到该变换器中电感电流 i_L 随参考电流 I_{ref} 变化的分叉图^[3-4, 11-16], 其分叉图如图 3 所示. 选取电流控制型 Boost 电路参数为: $E = 10 \text{ V}, C = 12 \mu\text{f}, L = 1 \text{ mH}, R = 20 \Omega, R_L = 0.02 \Omega, f_s = 10 \text{ kHz}, I_{ref} = 0.5 \text{ A} - 5.5 \text{ A}$.

从图 3 中看出, 当参考电流 $I_{ref} < 1.7 \text{ A}$ 时, 变换器工作在单周期状态; 当参考电流 $1.7 \text{ A} < I_{ref} < 2.3 \text{ A}$ 时, 变换器工作在 2 倍周期状态; 当参考电流 $2.3 \text{ A} < I_{ref} < 2.8 \text{ A}$ 时, 变换器工作在 4 倍周期状态, 然后演变成混沌状态, 在参考电流 $4.7 \text{ A} < I_{ref} < 5.1 \text{ A}$ 时出现 6 倍周期状态, 随后又演变成混沌状态. 为了验证本文的分析方法, 以下采用电流控制型 Boost 变换器的 Simulink 仿真模型和 SPICE 电路设计对分叉图进行描述和分析.

3 电流控制型 Boost 变换器的 Simulink 仿真模型

电流控制型 Boost 变换器工作在连续模式时, 对电流控制型 Boost 变换器进行数值计算求解, 由状态方程(1)、(2)及其工作原理, 利用 Simulink 构造其状态空间模型^[5, 14], 同时采用龙格-库塔的算法^[6]对该模型进行仿真(图 4).

根据图 4 状态空间模型^[5, 14]的 Simulink 仿真图, 以参考电流 I_{ref} 为参数, I_{ref} 的值分别为 1.25, 1.8, 2.5, 5, 5.2 A 时, 电流控制型 Boost 变换器的电感电流和电容电压的相图^[4, 12-16]分别为单周期稳定运行、2 倍周期稳定运行、4 倍周期稳定运行、6 倍周期稳定运行和混沌运行状态^[14-18](图 5).

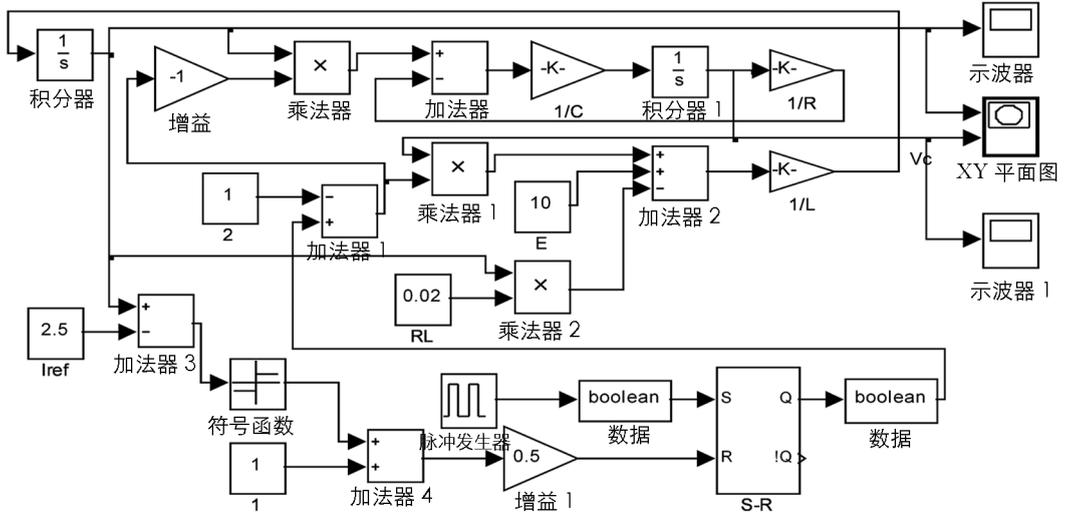


图 4 电流控制型 Boost 变换器的 Simulink 仿真

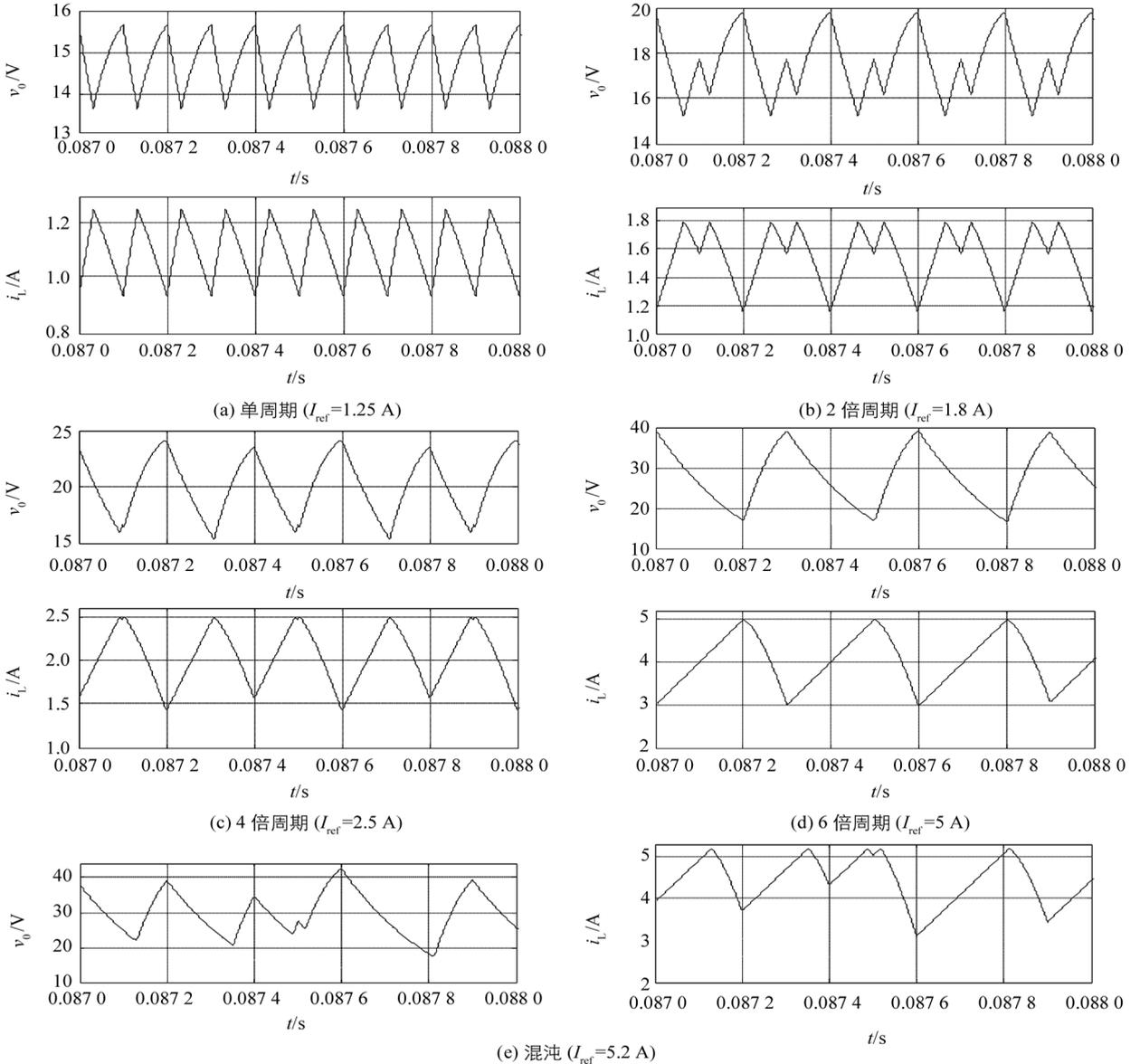


图 5 电感电流与输出电压的时域波形图

由图 5 和图 6 可知, 电流控制型 Boost 变换器随 I_{ref} 的变化, 电感电流和电容电压的时域波形和相图呈现不同的状态, 当 $I_{\text{ref}}=1.25 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于单周期稳定运行状态; 当 $I_{\text{ref}}=1.8 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于 2 倍周期稳定运行状态; 当 $I_{\text{ref}}=2.5 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于 4 倍周期运行状态, 当 $I_{\text{ref}}=5 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于 6 倍周期运行状态, 当 $I_{\text{ref}}=5.2 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于混沌状态. 由此可知, 电流控制型 Boost 变换器的工作状态与分叉图(图 3)所描述的运行状态完全一致, 这说明建立离散映射模型可以有效揭示电路的运行状态及参数 I_{ref} 对电路运行状态的影响, 验证了理论分析的可靠性.

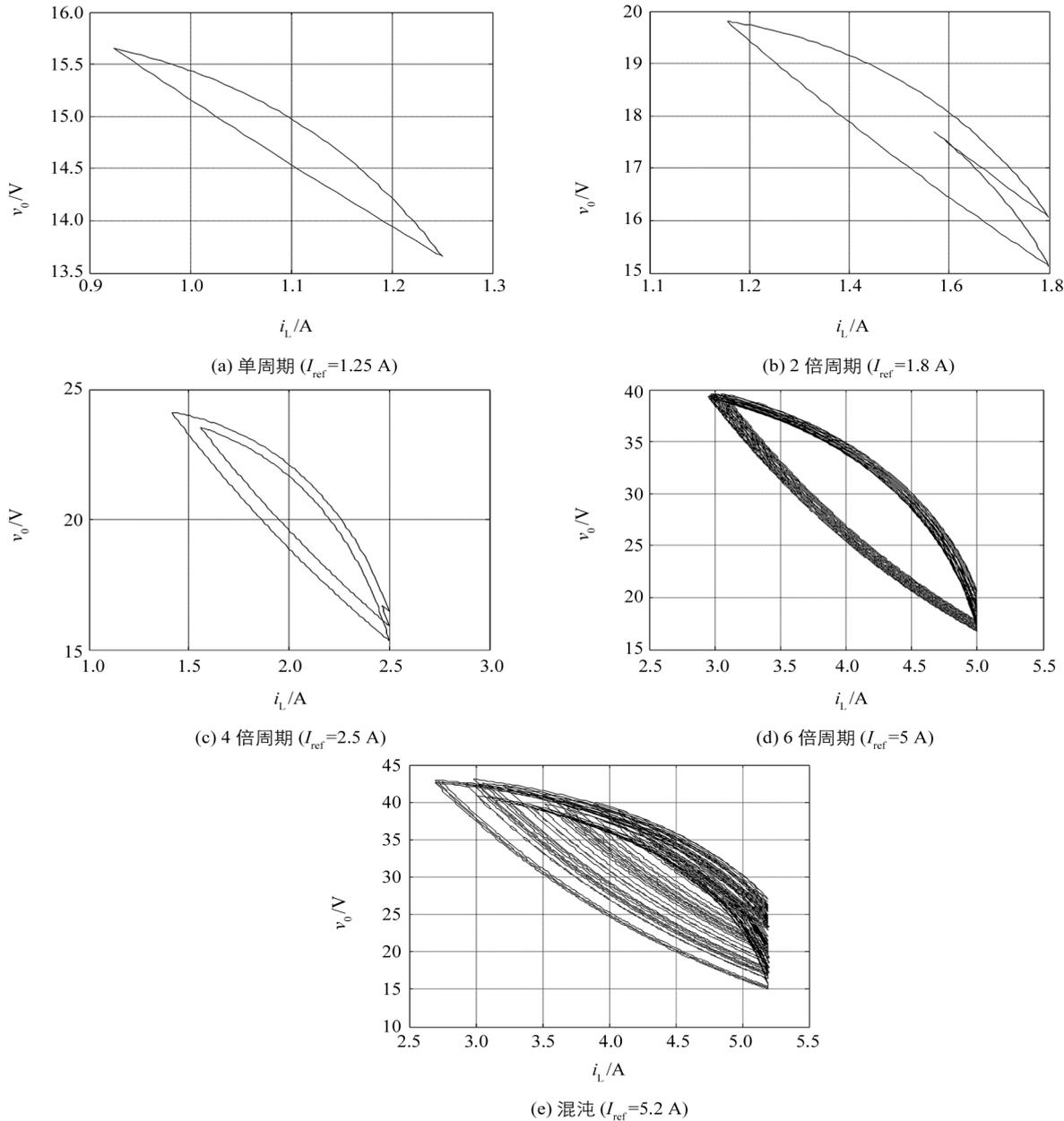


图 6 相 图

4 基于 SPICE 设计的电流控制型 Boost 变换器

根据电流控制型 Boost 变换器电路图(图 1), 采用 SPICE 设计出电感电流随参考电流变化的电路图^[6](图 7), 电路参数设置为: $E=10 \text{ V}$, $C=12 \mu\text{f}$, $L=1 \text{ mH}$, $R=20 \Omega$, $R_L=0.02 \Omega$ 和 $f_s=10 \text{ kHz}$, 参考电流 I_{ref} 为可变参数. 该电路由误差比较放大电路、功率开关管、三极管放大电路与 RS 触发器等几部分组成.

对电路图(图 7)进行仿真, 改变电阻 R_{12} 的阻值, I_{ref} 也随之改变, 得出 I_{ref} 逐渐增大的电感电流、输出电压和相图的时域波形图(图 8—9).

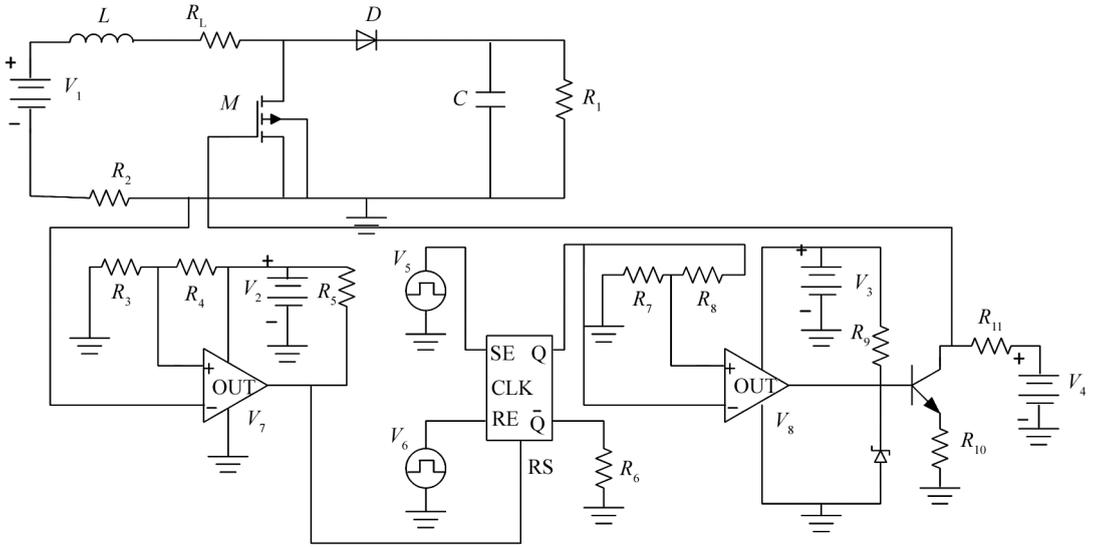


图 7 电流控制型 Boost 变换器的 SPICE 电路图

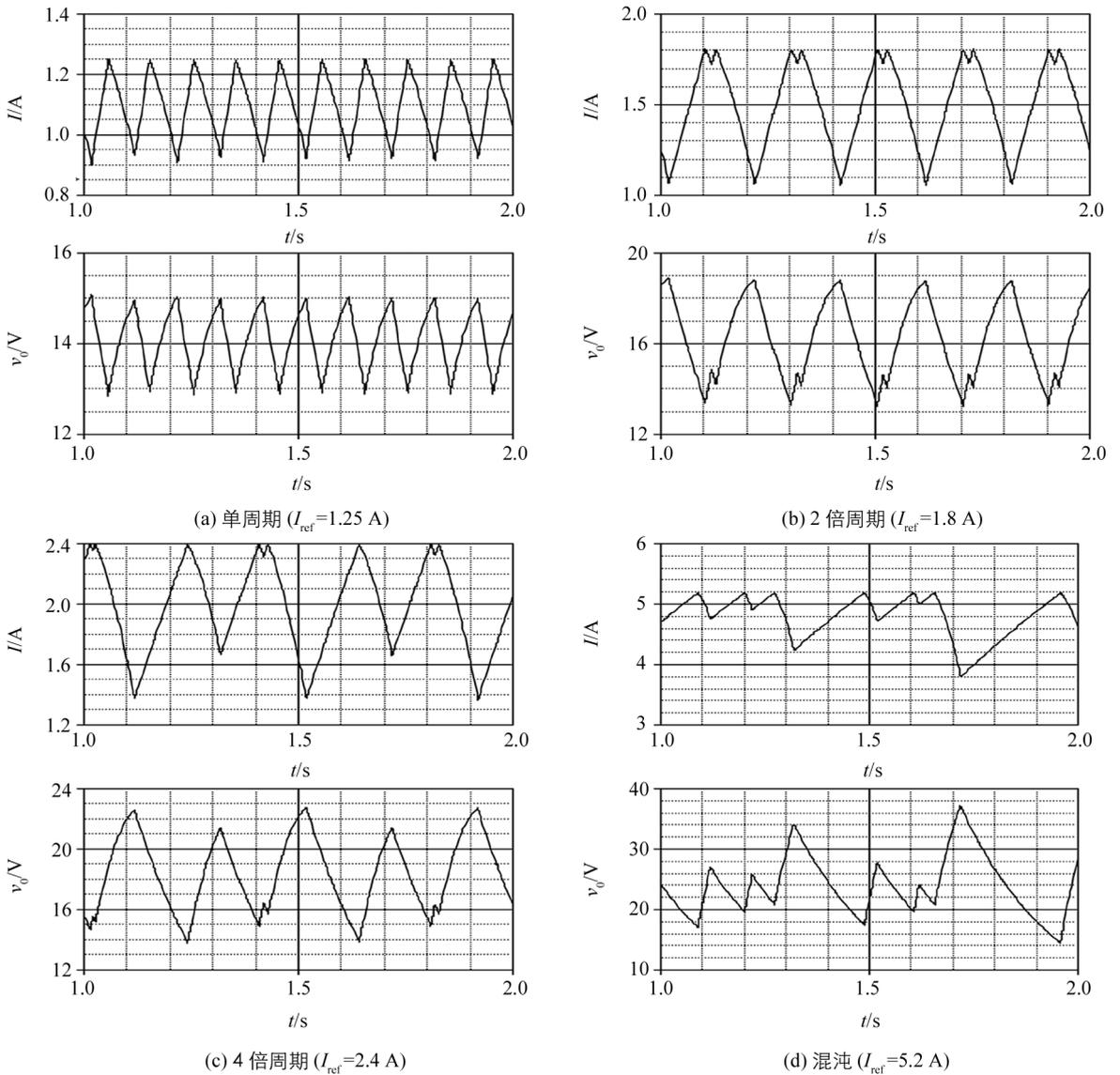


图 8 电感电流与输出电压的时域波形图

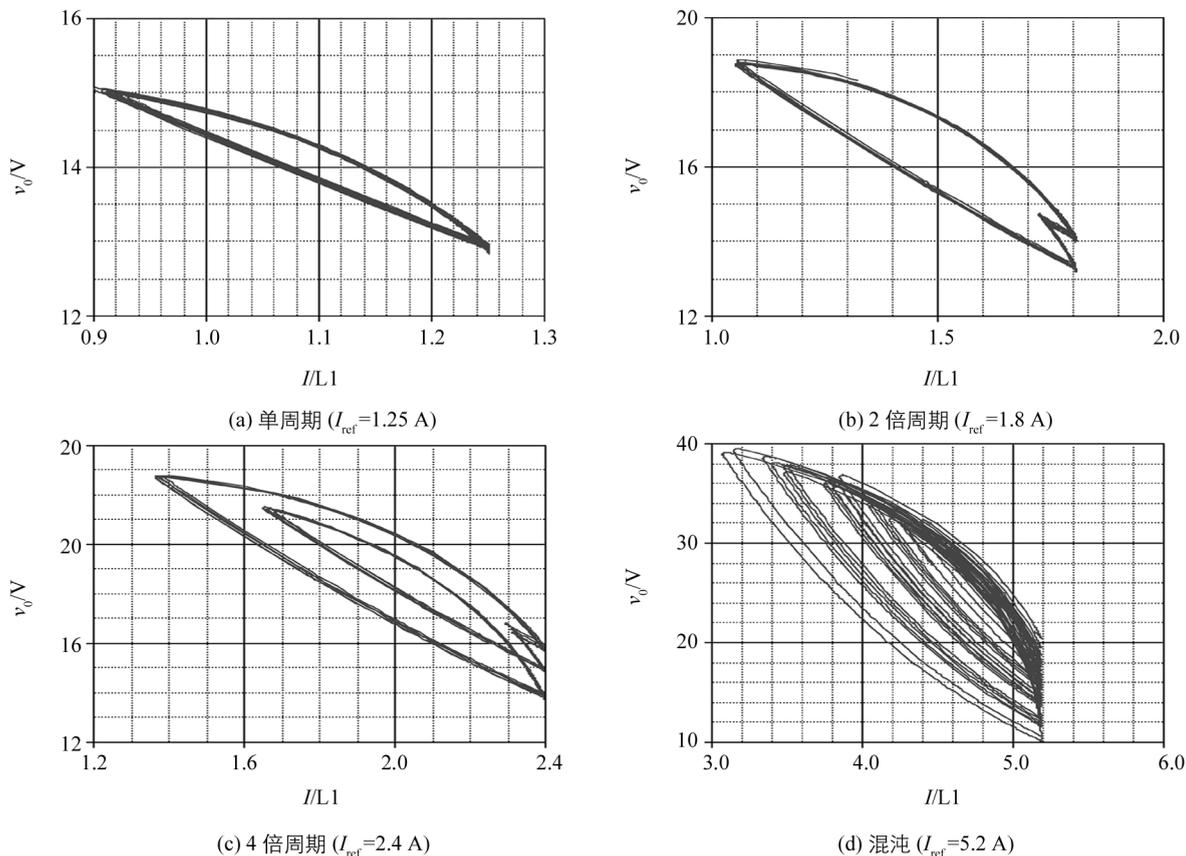


图 9 相 图

根据图 8 和图 9 可知, 在参考电流 I_{ref} 取不同值时, 系统运行状态发生了变换. 当 $I_{\text{ref}}=1.25 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器处于单周期稳定运行状态(图 8(a)和图 9(a)); 当 $I_{\text{ref}}=1.8 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器的电感电流、电容电压和相图的时域波形在开关的每个周期是不同的, 但在 2 个周期内是周期性的, 这说明随着敏感参数(I_{ref})的变化, 系统逐渐由周期态向 2 倍周期态转化, Boost 变换器发生了分叉(图 8(b)和图 9(b)); 当 $I_{\text{ref}}=2.4 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器的电感电流、电容电压和相图的时域波形在开关的每个周期是不同的, 但在 4 个周期内是周期性的, 这说明随着敏感参数(I_{ref})的变化, 系统进一步分叉, 过渡到了 4 倍周期, 系统逐渐再失去稳定(图 8(c)和图 9(c)); 当 $I_{\text{ref}}=5.2 \text{ A}$ 时, 电流控制型 Boost 变换器的电感电流、电容电压和相图的时域波形在开关的每个周期是不同的, 是随机的, 最终随着敏感参数(I_{ref})的变化, 系统进入混沌状态, 失去稳定性(图 8(d)和图 9(d)). 由此可知, 电流控制型 Boost 变换器的工作状态与分叉图(图 3)所描述的运行状态是完全一致的, 这说明建立离散映射模型的方法可以有效揭示电路的运行状态及参数 I_{ref} 对电路运行状态的影响, 也进一步说明电流控制型 Boost 电路存在分叉和混沌现象. 此外, 电路仿真结果表明, 随着参考电流 I_{ref} 的增加, 电流控制型 Boost 变换器的工作状态经历了单周期、2 倍周期、4 倍周期和混沌等动力学行为.

5 结 论

本文通过 Simulink 搭建电流控制型 Boost 变换器的仿真模型, 并研究了一种基于 SPICE 设计的变换器模型, 通过两种途径得到电感电流和电容电压的时域波形和相图, 从而描述了该变换器的电感电流 i_L 随参考电流 I_{ref} 变化的分叉图, 解释了系统分叉与混沌现象的成因, 并提出避免该现象的解决方案. 研究表明: 在变换器电路首次出现分叉之前, 电路处于稳定的单周期运行状态, 此时可以通过调节变换器的参考电流, 以输出稳定电压, 从而避免变换器电路出现分叉和混沌现象. 本研究为电力电子技术的工程应用提供理论分析依据, 同时, 对功率变换器电路的进一步研究也具有指导意义.

参考文献:

- [1] 徐昌进. Arneodo 混沌动力系统的时滞反馈控制 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(3): 1-8.
- [2] 黄 汛, 张 鹏, 赵卫峰. 一个新的四翼超混沌系统及其 FPGA 实现 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 127-130.
- [3] DEANE J H B. Chaos in a Current-Mode Controlled Boost dc-dc Converter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I: Fundamental Theory and Applications, 1992, 39(8): 680-683.
- [4] CHAN W C Y, TSE C K. Study of Bifurcations in Current-Programmed DC/DC Boost Converters: from Quasiperiodicity to Period-Doubling [J]. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on, 1997, 44(12): 1129-1142.
- [5] 袁 雷, 沈建清, 肖 飞. 电流模式控制 Buck-Boost 变换器建模及非线性现象仿真 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 972-979.
- [6] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 杨 亮. DC-DC 开关变换器混沌现象的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [8] HAMILL D C, DEANE J H B, JEFFERIES D J. Modeling of Chaotic DC-DC Converters by Iterated Nonlinear Mappings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(1): 25-36.
- [9] 刘松山. 对谐振电路品质因数定义的再认识 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 39(9): 200-204.
- [10] 罗晓曙, 陈关荣. DC-DC buck 变换器的分岔行为及混沌控制研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(1): 12-17.
- [11] YANG Ning-ning, LIU Chong-xin, and WU Chao-jun. Modeling and Dynamics Analysis of the Fractional-Order Buck-Boost Converter in Continuous Conduction Mode [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(8): 080503.
- [12] 戴 栋, 马西奎, 李小峰. 一类具有两个边界的分段光滑系统中边界碰撞分岔现象及混沌 [J]. 物理学报, 2004, 52(11): 2729-2736.
- [13] DONGALE T D. Simulative Study of Nonlinear Dynamics in Single Stage Boost Converter [J]. International Journal, 2013, 2(3): 59-66.
- [14] NATSHEH A N, KETTLEBOROUGH J G, NAZZAL J M. Analysis, Simulation and Experimental Study of Chaotic Behaviour in Parallel-Connected DC-DC Boost Converters [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 39(5): 2465-2476.
- [15] BERNARDO M D, VASCA F. Discrete-Time Maps for the Analysis of Bifurcations and Chaos in DC/DC Converters [J]. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on, 2000, 47(2): 130-143.
- [16] NATSHEH A N, KETTLEBOROUGH J G, JANSON N B. Experimental Study of Controlling Chaos in a DC-DC Boost Converter [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 40(5): 2500-2508.
- [17] BANERJEE S, CHAKRABARTY K. Nonlinear Modeling and Bifurcations in the Boost Converter [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1998, 13(2): 252-260.
- [18] CAFAGNA D, GRASSI G. Experimental Study of Dynamic Behaviors and Routes to Chaos in DC-DC Boost Converters [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 25(2): 499-507.

Study of Bifurcation and Chaos of a SPICE-Based Current-Mode Controlled Boost Converter

MIN Guo-qi, WANG Li-dan, DUAN Shu-kai, XIA Si-wei

School of Electronics and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Based on the discrete mapping model of current controlled Boost Converter, a bifurcation diagram of inductor current of converter changing with the reference current is drawn in this paper. We describe the bifurcation diagram with the state space model established by Simulink. On this basis, we research a kind of current controlled Boost converter based on the SPICE design, and then analyze the phenomenon of bifurcation and chaos which takes the reference current changing as a parameter as well as explain the causes of the bifurcation and chaotic behavior of the system. A series of simulation results verify the theoretical analysis, and provide a theoretical basis for avoiding the bifurcation and chaotic behavior of Boost Converter in the practical engineering designing.

Key words: current controlled Boost converter; bifurcation; chaos; SPICE design

责任编辑 潘春燕

