

文章编号:1007-6735(2013)03-0299-03

电流型 Buck-Boost DC-DC 变换器的分岔与混沌

金爱娟¹, 尹鹏鸿¹, 夏震¹, 李少龙²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要: 推导了电流模式 Buck-Boost 变换器的迭代映射模型, 在该模型的基础上研究了以输入电压、参考电流和负载电阻为电路变化参数的分岔现象. 利用 Matlab 仿真得到分岔图, 从图中可以得知分岔变量可能影响到系统的状态, 在设计中可以利用此规律选择最优参数.

关键词: 升降压变换器; 分岔; 混沌; Matlab 仿真
中图分类号: N 941.7 **文献标志码:** A

Bifurcation and Chaos of Current-Mode Buck-Boost DC-DC Converter

JIN Ai-juan¹, YIN Peng-hong¹, XIA Zhen¹, LI Shao-long²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

Abstract: The iterative mapping model of current-mode Buck-Boost converter was deduced. On the basis of the model, bifurcation phenomena were studied with input voltage, reference current and load resistance as variable parameters. Bifurcation diagrams were obtained by Matlab simulation, and it can be seen from the figures the effects of bifurcation parameters on system states. In designs, optimal parameters may be chosen in the light of the rules summarized in the paper.

Key words: Buck-Boost converter; bifurcation; chaos; Matlab simulation

对分岔与混沌进行研究有助于分析电路参数对电路工作状态的影响. 电力电子工程师在设计中期望对电路参数进行选择, 以获得最佳性能. 如果能够深入掌握非线性的知识, 就能对分岔与混沌现象进行有效的控制. 近年来, 对 DC-DC 变换器的分岔与混沌的研究已经取得一定的进展. Buck-Boost 变换器是一种应用广泛的重要变换器, 本文对电流型 Buck-Boost 变换器的分岔与混沌进行了研究. 目前

已发表的文献给出了在 20 kHz 或更高的开关频率下的研究结果^[1-3]. 本文是在 20 kHz 下获得的研究结果, 并与现有文献[4-6]的仿真结果进行对比分析.

1 系统描述和状态方程

电流模式控制下的 Buck-Boost 变换器如图 1

收稿日期: 2012-02-06

基金项目: 上海市教委科研创新资助项目(09YZ214); 国家自然科学基金资助项目(61074016)

第一作者: 金爱娟(1972-), 女, 副教授. 研究方向: 电力电子非线性及控制. E-mail: ajjin@126.com

所示. 将电感电流 i_L 与参考电流 I_{ref} 进行比较, 利用 RS 触发器的输出信号控制功率开关管 S 的通断. E 为电源, R, C, L 分别为电阻、电容、电感, D 为二极管, Q, S, R 为 RS 触发器端口.

电感电流和电容电压的波形如图 2 所示. 选择恰当的电感和开关周期等参数可以使变换器工作在连续电流模式 (CCM) 下. 因此, 根据开关的状态, 有两种电路结构. 开关管 S 在每个周期开始都是闭合的, 电感电流线性上升, 直到 $i_L = I_{\text{ref}}$, 此时 S 断开, 且保持断开状态直到下一时钟脉冲来临, S 才再次闭合.

采用在 DC-DC 变换器离散时间映射中广泛使用的频闪映射来获取离散模型, 即在 nT , $(n+1)T$, $(n+2)T$, ... 时刻对电感电流、电容电压进行周期性采样, 如图 2 所示. 其中, v_C 为电容两端的电压, v_n, i_n 为 nT 时刻的电压值和电流值, t_n 为导通时间, t'_n 为关断时间, n 为采样同期数, T 为开关周期, i 为电流, t 为时间.

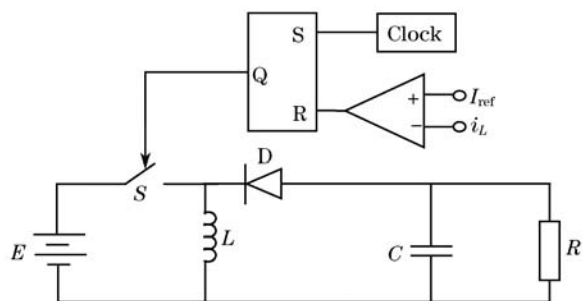


图 1 Buck-Boost 变换器的工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Buck-Boost converter

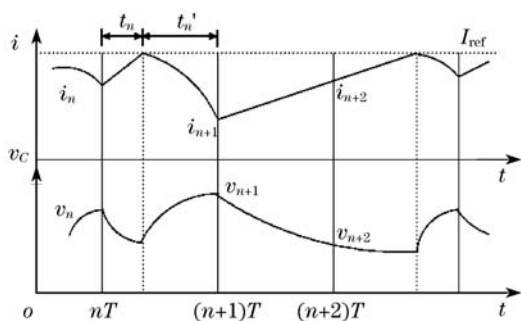


图 2 电感电流和电容电压波形

Fig. 2 Waveforms of Inductor current and capacitor voltage

当开关闭合时, 状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{E}{L} \\ \frac{dv_C}{dt} = -\frac{1}{RC}v_C \end{cases} \quad (1a)$$

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{1}{L}v_C \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}i - \frac{1}{RC}v_C \end{cases} \quad (1b)$$

当开关断开时, 状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{1}{L}v_C \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}i - \frac{1}{RC}v_C \end{cases} \quad (2a)$$

其中, 忽略电感和电容的寄生效应, 以简化离散模型的推导.

2 Buck-Boost 变换器离散模型的推导

用频闪映射来获取系统的离散模型, 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^[7]. 令 (i_n, v_n) 为开关闭合时在一个时钟脉冲内的电感电流和电容电压.

由图 2 可知, 变换器在电感电流 i 达到参考电流 I_{ref} 时, 开关 S 断开, 导通时间 t_n 可由式 (1a) 计算得到.

$$t_n = \frac{L}{E}(I_{\text{ref}} - i_n) \quad (3)$$

$$v_C(t_n) = v_n e^{-\frac{t_n}{RC}} \quad (4)$$

Buck-Boost 变换器的迭代模型可以根据 $t_n \geq T$ 和 $t_n < T$ 两种情况推导出来.

情况 1 $t_n \geq T$, 变换器的开关 S 闭合. i_n 和 v_n 在下一个时钟时刻的值 i_{n+1} 和 v_{n+1} 可以用 i_n 和 v_n 来表达

$$\begin{cases} i_{n+1} = i_n + \frac{E}{L}T \\ v_{n+1} = v_n e^{-\frac{T}{RC}} \end{cases}$$

情况 2 $t_n < T$, 开关 S 在一个开关周期 T 内从闭合变为断开. i_n 和 v_n 在下一个时钟时刻的值 i_{n+1} 和 v_{n+1} 可以通过式 (2) 并以 I_{ref} 和 $v_n e^{-\frac{t_n}{RC}}$ 作为初值求得.

3 Buck-Boost 变换器的分岔与混沌实验

从理论上讲, 任何电路参数都可以作为分岔参数. 现研究当一个参数 (如输入电压 E 、负载电阻 R 或参考电流 I_{ref}) 改变时 Buck-Boost 变换器所发生的变化. 在仿真实验中, 对于组成部件的数值选择, 理论上要确保变换器能在连续模式下工作.

a. 输入电压 E 作为分岔参数.

E 以 0.1 V 的间隔从 7 V 变化到 45 V, 其它参

数为 $I_{\text{ref}} = 4 \text{ A}$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $R = 20 \text{ } \Omega$, $C = 4 \text{ } \mu\text{F}$, $T = 50 \text{ } \mu\text{s}$. 变换器的分岔图如图 3 所示.

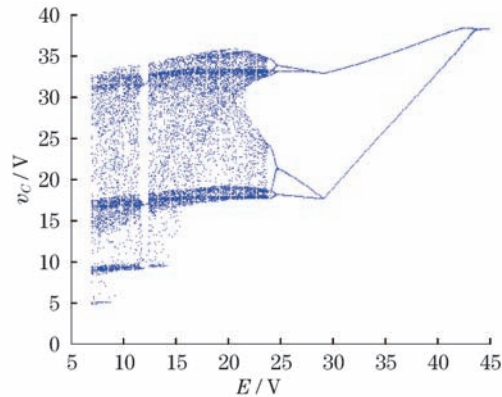


图 3 以输入电压为变量的 Buck-Boost 变换器分岔图
Fig. 3 Bifurcation in the Buck-Boost converter with input voltage as variable parameter

b. 参考电流 I_{ref} 作为分岔参数.

I_{ref} 以 0.01 A 的间隔从 0.8 A 变化到 4.5 A , 其它参数为 $E = 12 \text{ V}$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $R = 20 \text{ } \Omega$, $C = 4 \text{ } \mu\text{F}$, $T = 50 \text{ } \mu\text{s}$. 变换器的分岔图如图 4 所示.

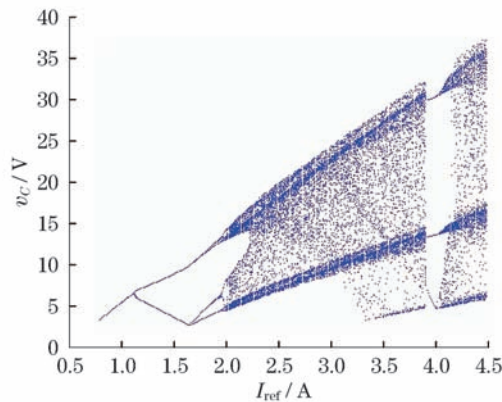


图 4 以参考电流为变量的 Buck-Boost 变换器分岔图
Fig. 4 Bifurcation in the Buck-Boost converter with reference current as variable parameter

c. 负载电阻 R 作为分岔参数.

R 以 $0.05 \text{ } \Omega$ 的间隔从 $1 \text{ } \Omega$ 变化到 $25 \text{ } \Omega$, 其它参数为 $I_{\text{ref}} = 4 \text{ A}$, $E = 12 \text{ V}$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $C = 4 \text{ } \mu\text{F}$, $T = 50 \text{ } \mu\text{s}$. 变换器的分岔图如图 5 所示.

由图 3 可知, Buck-Boost 变换器在 E 从 45 V 变化到 7 V 的过程中经历了周期 1、周期 2、周期 4 和周期 8, 如此发散下去, 并最终表现为混沌. 稳定的周期 1 分岔出现在 $E = 43.3 \text{ V}$, 然后变换器进入稳定的周期 2 区域. 当输入电压持续下降到 29.0 V 时, 变换器分岔到周期 4. 进而在 $E = 24.4 \text{ V}$ 时经

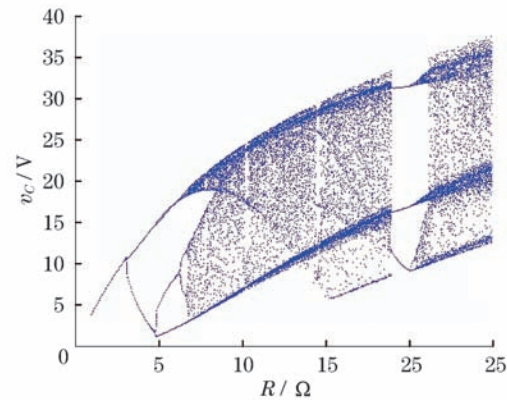


图 5 以负载电阻为变量的 Buck-Boost 变换器分岔图
Fig. 5 Bifurcation in the Buck-Boost converter with load resistance as variable parameter

历了从周期 4 分岔到周期 8 的变化. 因此, 变换器经过倍周期轨迹进入到混沌. 在图 3 中可以观察到一个有趣的小周期窗口, 它也表现出了倍周期的层叠, 然后进入到混沌区域中. 在该周期窗口, 在输入电压 E 从 12.4 V 变化到 11.8 V 的过程中, 变换器经历周期 3~6 分岔的变化.

由图 4 可知, 在 I_{ref} 从 0.8 A 变化到 4.5 A 的过程中, Buck-Boost 变换器经历了周期 1、周期 2、周期 4 和周期 8, 且最终表现为混沌. 第一次分岔发生在 $I_{\text{ref}} = 1.1 \text{ A}$, 且变换器进入稳定的周期 2 区域. 当电流随着参考电流连续增加到 1.6 A 时, 变换器的分岔进入到周期 4, 进而在 1.9 A 时, 经历了由周期 4 分岔进入到周期 8 的变化. 因此, 变换器通过倍周期轨迹进入混沌. 在图 4 中可以观察到一个有趣的小周期窗口, 它也表现出了倍周期的层叠, 然后进入混沌区域中. 在该周期窗口, 在参考电流 I_{ref} 从 3.8 A 变化到 4.1 A 的过程中, 变换器经历周期 3~6 分岔的变化.

由图 5 可知, 在 R 从 $1 \text{ } \Omega$ 变化到 $25 \text{ } \Omega$ 的过程中, Buck-Boost 变换器经历了周期 1、周期 2、周期 4 和周期 8, 并且最终进入混沌. 当电阻 R 从 $1 \text{ } \Omega$ 变化到 $2.9 \text{ } \Omega$ 的过程中, 观察到稳定的周期 1, 第一次分岔发生在 $R = 3.0 \text{ } \Omega$ 时, 且变换器进入稳定的周期 2 区域. 当电阻 R 持续增加到 $4.8 \text{ } \Omega$ 时, 变换器分岔到周期 4, 进而在 $R = 6.2 \text{ } \Omega$ 时, 经历了由周期 4 分岔进入到周期 8 的变化. 因此, 变换器通过倍周期轨迹进入混沌. 在图 5 中可以观察到几个有趣的小周期窗口, 它也表现出了倍周期的层叠, 并且进入混沌区域中. 在最大的周期窗口中, 在电阻从 $18.9 \text{ } \Omega$ 变化到 $21.2 \text{ } \Omega$ 的过程中, 变换器经历了从周期 3 到周期 6 分岔的变化.

(下转第 306 页)

再生混合料抗剪性能的必要性.

3 结 论

通过 ANSYS 有限元对泡沫沥青混合料再生路面面层及基层内最大剪应力进行计算分析,得出以下结论:

a. 基层模量是影响泡沫沥青再生基层路面面层和基层内最大剪应力的重要因素之一,基层模量增加,面层剪应力降低而基层剪应力提高.当基层模量达到 2 500 MPa 时,基层内最大剪应力与面层内的最大剪应力相当.可见,研究泡沫沥青再生混合料抗剪性能是必要的.

b. 面层厚度增加,基层面层内最大剪应力都显著降低.

c. 当剩余原路面当量回弹模量高于 150 MPa 时,基层面层内最大剪应力受原路面回弹模量影响很小.若 E_0 由 150 MPa 减低至 50 MPa 时,基层和面层内剪应力大大增加.

d. 基层厚度的变化对基层面层内最大剪应力

的影响很小.

e. 当胎压增加 75%,荷载超载 150% 时,面层及基层内最大剪应力均增加了近一倍.

参考文献:

- [1] Jenkins K J, van de Ven M F C, Molenaar A A A, et al. Performance prediction of cold foamed bitumen mixes [C] // Ninth International of Conference on Asphalt Pavement. Copenhagen, 2002.
- [2] He G P, Wong W G. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (8): 1809 - 1819.
- [3] 胡小弟. 轮胎接地压力分布实测及沥青路面力学响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [4] Marquis B, Bradbury R L, Coloson S, et al. Design, construction and early performance of foamed asphalt full depth reclaimed (FDR) pavement in maine [C] // The 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC, 2003.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 301 页)

4 结 语

研究了在电流模式下 Buck-Boost 变换器的分岔与混沌现象,在该模型的基础上,研究了以输入电压、参考电流和负载电阻为电路变化参数的分岔现象. 仿真结果表明, Buck-Boost 变换器呈现出一个大范围的非线性行为. 当分岔参数发生变化时,系统通过倍周期分岔轨迹进入混沌. 而且,多倍的周期叠加会发生在倍周期轨迹中. 还可以看到,在一个定性系统中,即使没有随机输入,系统方程的解也表现出随机性行为. 同时也发现,当使用正常的电路参数时,分岔与混沌现象也会发生. 在 Buck-Boost 变换器中,丰富的非线性现象表明,线性方程导致了这种复杂的行为,并且在不同系统中具有类似行为. 尽管并没有在本文中列出实验结果,但实际上,上述的仿真结果已经起到验证的目的.

参考文献:

- [1] 金爱娟, 陈明, 李少龙. 开关延迟对 Buck 变换器分岔的

影响[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(6): 575 - 579.

- [2] Hamill D C. Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1992, 7(1): 25 - 36.
- [3] Yuan G H. Border-collision bifurcation in the buck converter[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I, Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(7): 707 - 716.
- [4] Tse C K. Chaos from a current-programmed cuk converter[J]. Int J Circuit Theor Appl, 1995, 23(3): 217 - 225.
- [5] Deane J H B. Chaos in a current-mode controlled boost DC-DC converter [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Applications, 1992, 39(8): 680 - 683.
- [6] Bemardo M D. Discrete-time maps for the analysis of bifurcations and chaos in DC-DC converters[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(2): 130 - 143.
- [7] Deane J H B. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1990, 5(3): 260 - 268.

(编辑: 石 瑛)