

文章编号:1007-6735(2012)06-0575-05

开关延迟对 Buck 变换器分岔的影响

金爱娟, 陈明, 李少龙

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 研究了电流模式控制 Buck 变换器由于开关延迟带来的分岔和混沌现象的变化. 首先给出 Buck 变换器的数学模型, 然后针对理想开关和 3 种典型开关延迟参数的情况, 以理想输入直流电压为变量, 通过计算机仿真得到不同的分岔和混沌现象, 并给出了庞加莱截面图、电流和电压波形图. 根据实验分析可知, 随着开关延迟时间的增加, 系统分岔现象将加剧, 甚至导致系统不稳定.

关键词: 混沌; 分岔; Buck 变换器; 非线性; 开关延迟

中图分类号: TM 46 **文献标志码:** A

Influence of Switching Delay on the Bifurcation of Buck Converter

JIN Ai-juan, CHEN Ming, LI Shao-long

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The phenomena of bifurcation and chaos in a current-mode controlled Buck converter with switching delay were explored. The mathematical model was developed. Using the ideal DC input voltage as a variable, diagrams of bifurcation and chaos were given in regard to the parameters of an ideal switch and three typical switching delay through computer simulation. The Poincare section and time-domain graphs about inductive current and capacitor voltage were provided. The experimental analysis shows that with the increase of switching delay time, the bifurcation will be intensified and even lead system to instability.

Key words: chaos; bifurcation; Buck converter; nonlinearity; switching delay

电力电子电路容易发生各种非线性现象, 如分岔、混沌等, 直接影响变换器的稳定性和可靠性^[1]. 国内外学者对 DC-DC 变换器的分岔和混沌现象已经作了大量的研究, 在变换器中发现存在分岔和混沌现象^[2-9], 已经建立了数学模型^[10-12], 并探讨了混沌的控制和反控制技术^[13-14]. 然而, 一般的文献都假设功率开关管工作在理想的开关状态下, 没有

考虑开关延迟对系统分岔和混沌的影响^[1-15]. 很多文献都将电路工作频率设定为几十千赫以下^[4-10], 这种情况下几微秒的开关延迟对电路的影响可以忽略. 但是, 为了提高系统的性能, 开关频率一般都工作在几百千赫以上, 在这种情况下, 开关延迟的影响不容忽视, 它的大小可能改变系统的分岔结构甚至稳定性. 本文通过大量的计算机仿真数据对一个典

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)

作者简介: 金爱娟(1972-), 女, 副教授. 研究方向: 电力电子非线性及其控制等. E-mail: ajjin@126.com

型 Buck 电路在开关延迟影响下的分岔和混沌现象进行分析,为变换器的研究和设计提供参考.

1 系统数学模型的建立

图 1 是电流模式控制 Buck 变换器的原理图. 用一个频率固定的时钟脉冲信号影响触发器的输出信号,从而改变开关状态,在每个时钟周期的起始时刻输出开关导通信号. 将电感电流与参考电流相比较,当电感电流达到参考电流值时,输出开关关断信号. 存在开关延迟时,触发器输出开关导通和关断信号以后,开关不能马上动作,存在滞后响应.

电感电流 i 和电容电压 v_c 设定为系统的状态变量. 假设 V_{in} 为理想直流电压. 导通和关断期间状态变量的关系可以通过线性微分方程组来描述.

开关导通期间

$$L \frac{di}{dt} = V_{in} - v_c, \quad i = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (1)$$

式中, L 为电感, C 为电容, R 为电阻.

开关关断期间,连续电流(CCM)模式下

$$L \frac{di}{dt} + v_c = 0, \quad i = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (2)$$

在理想开关和存在开关延迟的情况,导通和关断期间的方程组是一样的,所求解的微分方程的初始值和区间不同. 具体的工作状态可以参考后面的电感电流时域图.

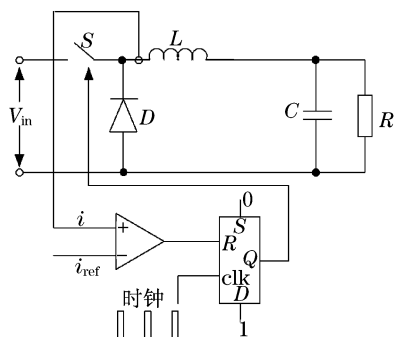


图 1 电流模式控制 Buck 变换器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of a current-mode controlled Buck converter

2 仿真结果

根据图 1 搭建 Matlab 电路仿真模型,参数取值:参考电流 $i_{ref} = 1$ A,电阻值 $R = 10 \Omega$,电感值 $L = 0.4$ mH,电容值 $C = 1$ mF,时钟频率为 200 kHz,输入电压直流分量的变化范围为 10~25 V. 假设开

关管的导通和延迟时间相同.

在文献[16]中,仿真计算使用的算法精度达到 10^{-10} ,但是,仿真出来的分岔图和庞加莱截面图存在异常数据,文献解释是由于计算机精度引起的计算误差. 文献[10]中也提到,由于 Buck 变换器工作模式的复杂性,它的分岔和混沌建模一直是一个困难的问题,微小差异的参数可能导致截然不同的分析结果,使得得出结论的真实性受到质疑. 为了提高数据的准确性和可靠性,本文在仿真计算中将精度提高到 10^{-13} ,从各种仿真数据图上可以观察到,没有出现异常的数据点,进一步提高计算精度后,混沌图没有变化. 本文所给出的混沌图中每一个输入电压值对应的周期采样电感电流值和庞加莱截面图中的数据点均是在系统完全稳定以后取出最后 500 个仿真数据点所形成的.

如图 2 所示,输入电压为 20 V,开关延迟时间 T_d 与时钟周期 T 的比值以 0.02 的步长增加时,周期采样电感电流 i_T 从稳定值到 2 倍周期、3 倍周期分岔变化,跳跃点发生在 0.14 和 0.38 处. 由图 2 可见,开关延迟时间增大会影响到系统的稳定性,甚至进入分岔和混沌状态. 由于实际器件的开关延迟时间不是一个稳定的参数,所以,在设计系统选择器件时必须适当考虑一定的安全系数.

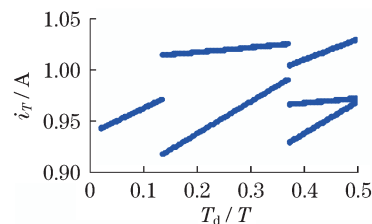


图 2 开关延迟时间对分岔结构的影响

Fig.2 Influence of switching delay on bifurcation structure

图 3 显示了开关延迟时间分别为 0, 0.5, 1, 2 μ s 这 4 种不同情况下,以输入直流电压作为变量的混沌图,输入电压值的步长为 0.1 V. 为了观察开关延迟时间对系统的影响,在图 3 中,分别对不同开关延迟时间的混沌图进行对比分析,在图 3(b)、3(c)和 3(d)中,仅仅改变开关延迟时间的大小,其它参数不变. 随着开关延迟时间的增大,混沌区域内的窗口有所变化,分岔结构发生了较大的改变,分岔周期数也在增加. 如图 3(d)所示,已经不是图 3(a)所示的标准倍周期分岔,而是 3 倍周期分岔.

对于其它电路参数的研究,选取图 3 个别输入电压对应的参数进行详细分析,其它的情况可以依

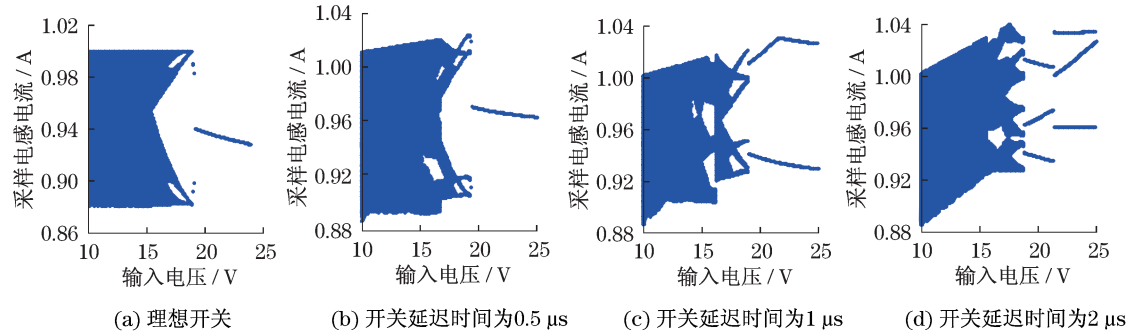


图3 以输入直流电压为变量的混沌图

Fig.3 Chaos diagrams with DC input voltage as a variable

此类推.

图4是在 $V_{in} = 24\text{ V}$, 开关延迟为 $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 时的一系列波形图. 由于存在 $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 的开关延迟, 导致图4(d)电感电流的最大值大于参考电流值, 图中的三角形数据是时钟脉冲对应的采样点. 在电路稳定以后的庞加莱截面图如图4(a)所示, 即使采用理想器件和高精度计算, 周期采样电感电流值也不是高精度稳定的.

图5是在 $V_{in} = 12\text{ V}$, 开关延迟为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 时的一系

列波形图. 在图5中, 系统在过渡期出现标准倍周期分岔, 稳定以后的周期采样电感电流呈现一种无序的混沌状态. 在图5(a)的庞加莱截面图中, 数据点的分布疏密不同, 但是, 在长期的行为中很难发现其规律. 从图5(d)可以看到变换器在不同区间开关的工作状态, 上升曲线是开关导通阶段, 下降曲线是开关关断的电流连续阶段, 没有出现电流不连续阶段. 电流不连续阶段只有在开关频率较低或开关延迟增加到一定时间以后才会出现.

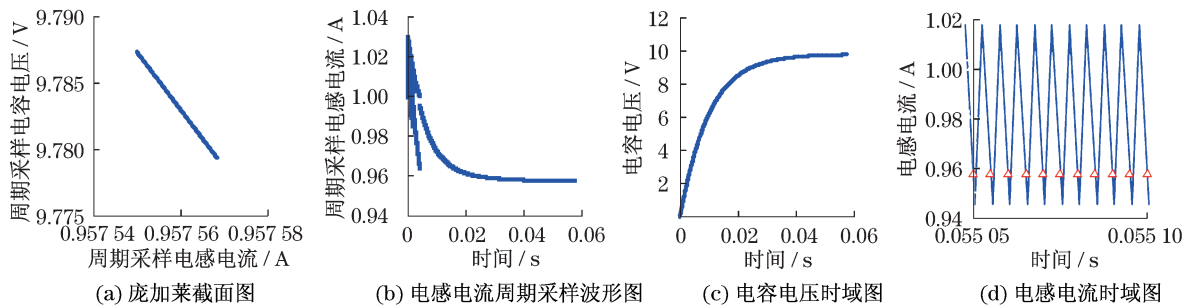
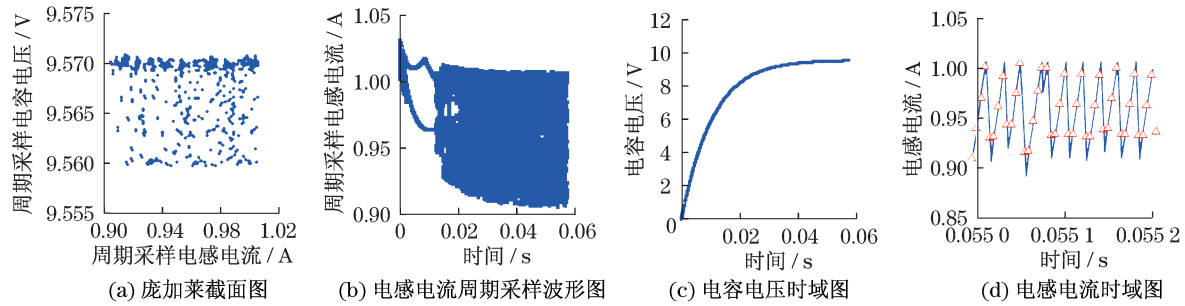
图4 $V_{in} = 24\text{ V}$, 开关延迟 $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 时的波形图Fig.4 Diagrams for $V_{in} = 24\text{ V}$ with $0.5\text{ }\mu\text{s}$ switching delay图5 $V_{in} = 12\text{ V}$, 开关延迟 $1\text{ }\mu\text{s}$ 时的波形图Fig.5 Diagrams for $V_{in} = 12\text{ V}$ with $1\text{ }\mu\text{s}$ switching delay

图6(见下页)是在 $V_{in} = 18\text{ V}$, 开关延迟为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 时的一系列波形图. 图6(a)的庞加莱截面图是左右两块形状相似的条形结构, 从左到右6条数据的点数是37, 125, 88, 37, 125和88. 系统处于分岔状态

时出现的庞加莱截面图可能是环形或其它结构, 有可能完全相同, 也有可能不同, 这取决于系统参数的变化. 图6(d)的三角形数据点是周期采样电感电流, 其数值范围如图6(a)和6(b)所示, 在 0.034 s 以

后倍周期分岔的每一分支产生3倍周期分岔,呈现出6分岔的结构,6个电流值在大范围内虽然存在一定的比例关系,但是,数据的出现没有严格的规

律,在小范围内则按照一定的频率比和次序有规律地轮流出现,在无序中呈现出有序.

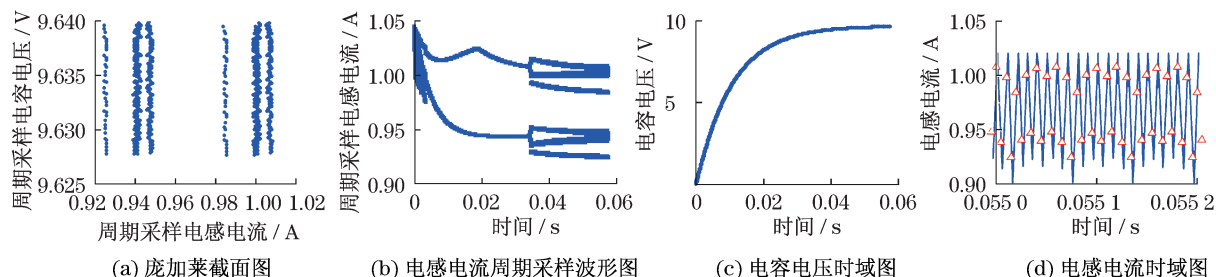


图6 $V_{in} = 18 \text{ V}$, 开关延迟 $1 \mu\text{s}$ 时的波形图

Fig.6 Diagrams for $V_{in} = 18 \text{ V}$ with $1 \mu\text{s}$ switching delay

图7是在 $V_{in} = 24 \text{ V}$, 开关延迟为 $1 \mu\text{s}$ 时的一系列波形图. 图7(a)的庞加莱截面图是两条对称的线结构. 稳定以后的电感电流每隔2个时钟周期重

复相同的轨迹, 周期采样电感电流值是一个标准的倍周期分岔结构, 两个不同的电流值轮流出现, 如图7(b)和7(d)所示.

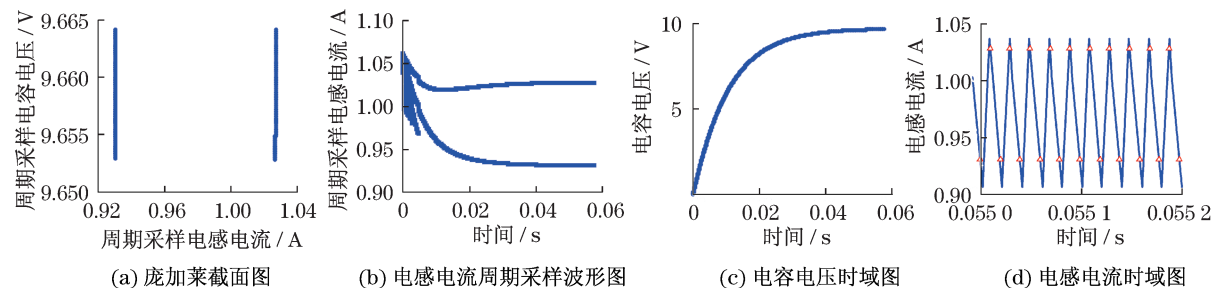


图7 $V_{in} = 24 \text{ V}$, 开关延迟 $1 \mu\text{s}$ 时的波形图

Fig.7 Diagrams for $V_{in} = 24 \text{ V}$ with $1 \mu\text{s}$ switching delay

从图4(c)、5(c)、6(c)和7(c)中可以发现, 不管电感电流处于稳定、分岔还是混沌状态, 电容电压在系统稳定后的值基本相等. 从这个现象来看, 在设计系统时, 可以根据实际情况将电感电流置于稳定、分岔或混沌状态, 对输出电压的影响不大.

3 结论

采用大量的计算机仿真实验数据对电流模式控制 Buck 变换器在理想开关和3种典型开关延迟的分岔和混沌图进行对比分析, 并针对不同的工作点, 通过庞加莱截面图、电流和电压波形图进行比较和分析. 当系统的开关频率较高且存在开关延迟或控制滞后时, 可能引起分岔结构较大的变化. 随着开关延迟的增加, 系统参数从稳定向倍周期和多倍周期分岔发展, 导致系统出现非预期的运动状态, 甚至不稳定. 本文的结论对其它拓扑结构的变换器在开关延迟或其它非理想电路参数的分析和研究上具有一

定的参考作用.

参考文献:

- [1] Yao Y, Fassinou F, Hu T. Stability and robust regulation of battery driven boost converter with simple feedback [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(9): 2614 - 2616.
- [2] 王学梅, 张波. H 桥直流斩波变换器边界碰撞分岔和混沌研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 22 - 27.
- [3] 周宇飞, 丘水生, 陈军宁. 滞环电流模式控制 Cúk 变换器的非线性现象研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 96 - 101.
- [4] 吴俊娟, 郭伟扬, 孙孝峰. 并联 Buck 变换器中的混沌研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 51 - 55.
- [5] 陈明亮, 马伟明. 多级并联电流反馈型 DC-DC 升压变换器中的分岔与混沌 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 67 - 70.
- [6] 马西奎, 刘伟增, 张浩. 快时标意义下 Boost PFC 变换

- 器中的分岔与混沌现象分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 61-67.
- [7] 周宇飞, 陈军宁. 电流模式控制 Boost 变换器中的切分叉及阵发混沌现象[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 23-26.
- [8] 刘伟增, 张浩, 马西奎. 基于频闪映射的 Boost PFC 变换器中的间歇性分岔和混沌现象分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 43-48.
- [9] 张波, 齐群. PWM Buck 变换器不同工作方式下的次谐波和混沌行为[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 18-21.
- [10] 张波, 曲颖. Buck DC/DC 变换器分岔和混沌精确离散模型及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 99-103.
- [11] 张波, 李萍, 齐群. DC-DC 变换器分叉和混沌现象的建模和分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 81-86.
- [12] 李虹, 张波. DC-DC 开关变换器中混沌映射的不变分布求解及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 54-60.
- [13] 杨汝, 张波. 开关变换器混沌 PWM 抑制 EMI 的机理和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 114-119.
- [14] 李志忠, 丘水生, 陈艳峰. 混沌映射抑制 DC-DC 变换器 EMI 水平的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 76-81.
- [15] Wang Yuanbin. Research on chaos in switching DC-DC converters[C]// Intelligent Computation Technology and Automation, 2009, 3: 91-94.
- [16] 朱雪丰, 徐冬亮, 舒秀发, 等. Buck 转换器中的分岔与混沌研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3387-3389.

(上接第 574 页)

4 结束语

针对高速列车提速对空调系统的影响, 建立了高速列车外部空气流场的数学、物理模型, 确定了该流场的定解条件. 通过模拟高速列车外部空气流场, 得到列车表面压力分布云图及列车表面各点压力值. 研究得出了高速列车提速对列车空调系统冷凝风量、冷凝温度、制冷系数等参数的影响情况. 该结果对高速列车空调系统的优化, 如采用有效方式控制提速对列车空调的影响, 更好地发挥空调装置的性能, 降低能耗和运行成本为旅客提供舒适的旅行环境, 提供了重要依据.

参考文献:

- [1] 张吉光, 杨晚生, 靳谊勇. 列车提速对空气调节系统的影响[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集, 珠海, 2002, 6: 734-737.
- [2] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [3] 梁习峰, 曾剑明. 高速列车表面压力分布的数值计算[J]. 铁道车辆, 1997, 5(3): 12-14.