

# 峰值/谷值电流型控制开关 DC-DC 变换器的 对称动力学现象分析\*

周国华<sup>1)†</sup> 许建平<sup>1)</sup> 包伯成<sup>2, 3)</sup>

1) (西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

2) (南京理工大学电子工程系, 南京 210094)

3) (江苏技术师范学院电气信息工程学院, 常州 213001)

(2009 年 6 月 24 日收到; 2009 年 8 月 18 日收到修改稿)

峰值电流和谷值电流控制开关 DC-DC 变换器在较宽的电路参数范围内具有对称动力学现象. 文中建立了峰值电流和谷值电流控制 buck, boost, 及 buck-boost 变换器的统一离散迭代映射模型, 并导出了统一的分段光滑迭代映射方程及特征值方程, 通过数值仿真得到了占空比变化时的正、逆分岔图和 Lyapunov 指数谱. 研究表明, 峰值/谷值电流型控制开关变换器的分岔图和 Lyapunov 指数具有关于点或轴对称的现象. 时域仿真结果验证了数值仿真结果, 并进一步表明, 随着占空比的变化, 峰值/谷值电流型控制开关变换器具有对称动力学现象、对称动力学现象和非对称动力学现象共存、非对称动力学现象.

**关键词:** 开关变换器, 迭代映射方程, 电流型控制, 对称动力学现象

**PACC:** 0545

## 1. 引 言

开关 DC-DC 变换器是一种典型的分段光滑系统和非线性时变系统, 存在降频、低频波动、倍周期分岔、Hopf 分岔、边界碰撞分岔、间歇和混沌等非线性动力学现象<sup>[1-11]</sup>. 非线性系统具有复杂的运动规律, 当系统参数变化时, 系统将从稳定态逐渐过渡到不稳定态, 出现多个工作状态, 即产生分岔现象; 系统参数的进一步变化将使系统出现非周期工作状态, 即所谓的混沌状态. 深入分析和研究开关 DC-DC 变换器的分岔和混沌等非线性现象, 研究开关变换器中混沌产生的方式、分析方法、混沌状态的控制, 以及研究电路参数变化对开关 DC-DC 变换器性能的影响, 对于开关变换器系统的设计具有十分重要的理论意义和应用价值.

对于开关 DC-DC 变换器, 常采用同步映射、异步映射和频闪映射等方式建立离散映射模型, 将其转化为分段光滑的离散时间映射<sup>[12, 13]</sup>. 通过建立离散映射模型, 已有不少文献研究了开关变换器电路

参数对分岔和混沌现象的影响<sup>[8, 12-15]</sup>.

电流型控制开关变换器是一类较早被作为研究非线性现象的功率变换电路, 在工业领域应用广泛. 电流型控制技术包括峰值电流控制、平均电流控制和谷值电流控制. 已有的研究成果主要是针对采用峰值电流控制的开关变换器<sup>[8, 15-20]</sup>, 而对谷值电流控制开关变换器的非线性现象的研究尚未见报道. 本文将对峰值电流控制和谷值电流控制开关变换器进行对比研究, 建立它们的统一离散迭代映射模型, 并揭示它们存在的对称分岔行为、对称 Lyapunov 指数、对称时域波形及对称相轨图等对称动力学现象.

## 2. 峰值/谷值电流型控制技术的对称

图 1(a) 和 (b) 所示分别为峰值电流控制 buck 变换器电路及稳态控制波形. 在每个开关周期  $T_s$  开始时, 时钟信号使锁存器输出电压  $V_p$  为“H”, 开关管  $S_1$  导通, 续流二极管  $S_2$  关断, 电感电流  $i_L$  由初始值开始近似线性增大, 当  $i_L$  增大到峰值参考电流  $I_{pk}$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50677056)、西南交通大学优秀博士学位论文培育项目和西南交通大学博士生创新基金资助的课题.

† E-mail: ghzhou-swjtu@163.com

时,比较器翻转,锁存器使  $V_p$  输出“L”, $S_1$  关断、 $S_2$  导通, $i_L$  近似线性减小,直到下一个时钟脉冲到来,开始一个新的开关周期.如果在整个时钟周期内,线性上升的  $i_L$  不能到达  $I_{pk}$ ,比较器不能复位锁存器,即开关管  $S_1$  一直处于导通状态,这时 buck 变换

器将处于混沌态.在开环控制方式下,峰值电流控制信号  $I_{pk}$  为恒值;在闭环控制方式下,检测的输出电压  $V_o$  与基准电压  $V_{ref}$  比较,其差值经误差放大器后生成  $I_{pk}$ .

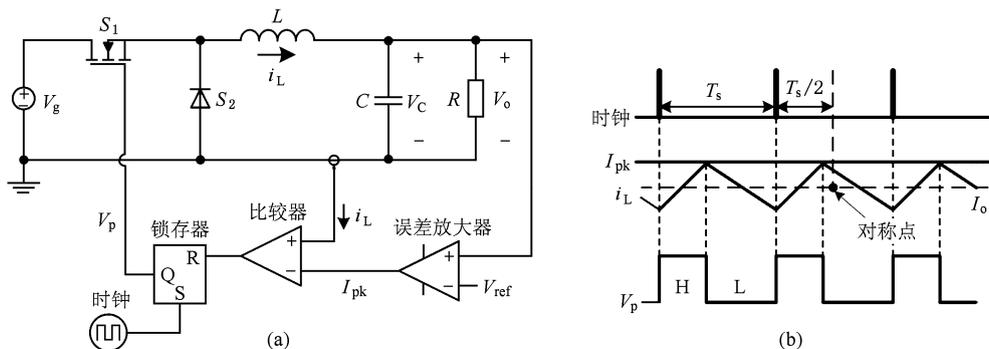


图1 峰值电流控制 buck 变换器 (a) 电路图, (b) 稳态控制波形图

图 2(a) 和 (b) 所示分别为谷值电流控制 buck 变换器电路及稳态控制波形. 在每个开关周期  $T_s$  开始时,时钟信号使锁存器输出电压  $V_p$  为“L”, $S_1$  关断、 $S_2$  导通, $i_L$  由初始值开始近似线性减小,当  $i_L$  减小到谷值参考电流  $I_{vy}$  时,比较器翻转,锁存器使  $V_p$

输出“H”, $S_1$  导通、 $S_2$  关断, $i_L$  近似线性增大,直到下一个时钟脉冲到来,开始一个新的开关周期.如果在整个时钟周期内,线性下降的  $i_L$  不能到达  $I_{vy}$ ,比较器不能置位锁存器,即开关管  $S_1$  一直处于关断状态,这时 buck 变换器也将处于混沌态.

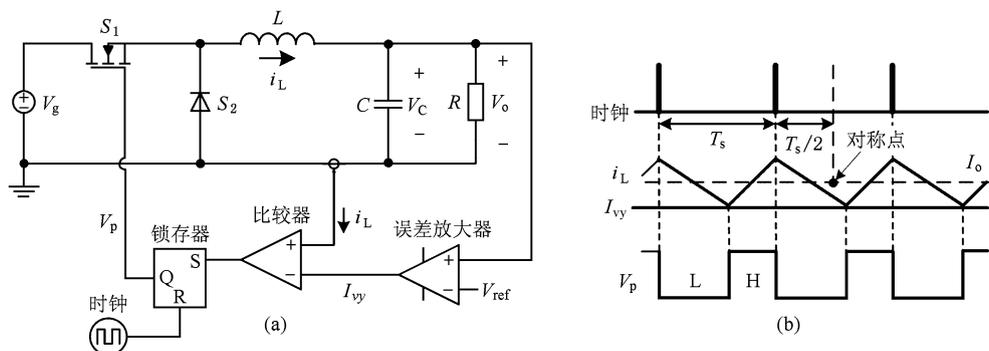


图2 谷值电流控制 buck 变换器 (a) 电路图, (b) 稳态控制波形图

对比图 1(b) 和图 2(b) 可知,每个开关周期内,峰值电流控制和谷值电流控制的  $i_L$  关于点  $(T_s/2, I_o)$  对称,其中  $I_o$  为电感电流平均值,此时  $I_o = (I_{pk} + I_{vy})/2$ . 因此,峰值电流控制技术与谷值电流控制技术具有对称性.

### 3. 离散迭代映射方程

对于开关 DC-DC 变换器电路,可以利用时钟周期同步采样获得离散迭代模型<sup>[12, 13]</sup>. 图 1 和图 2 所

示的 buck 变换器拓扑是一个由电感  $L$ 、电容  $C$ 、开关管  $S_1$ 、二极管  $S_2$  和负载电阻  $R$  组成的二阶电路. 如果时钟周期(即开关周期  $T_s$ )与  $RC$  时间常数相比足够小,输出电压可以认为恒定不变,输出部分可以用一个直流电压源  $V_o$  表示. 在这种情形下,开关变换器变成一阶电路,电感电流波形变成分段线性波形. 为了简化电路建模分析,本文只考虑开环控制方式,即认为参考电流  $I_{pk}$  和  $I_{vy}$  为恒值,在需要考虑  $I_{pk}$  和  $I_{vy}$  的变化时再采用闭环控制方式.

图 3 给出了峰值/谷值电流型控制 buck, boost,

及 buck-boost 变换器的统一离散迭代映射模型.

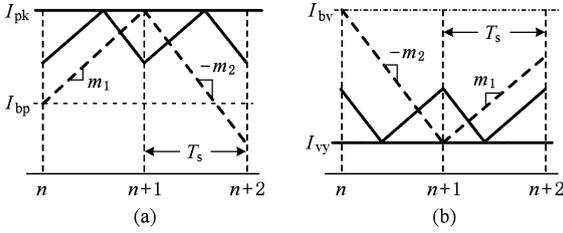


图 3 离散迭代映射模型示例 (a) 峰值电流控制, (b) 谷值电流控制

对于 buck, boost, 及 buck-boost 变换器, 电感电流斜率在开关管  $S_1$  导通和关断期间分别为

buck: 
$$m_1 = \frac{V_g - V_o}{L}, \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{V_o}{L},$$

boost: 
$$m_1 = \frac{V_g}{L}, \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{V_o - V_g}{L},$$

buck-boost: 
$$m_1 = \frac{V_g}{L}, \quad (3)$$

$$m_2 = \frac{V_o}{L}.$$

### 3.1. 峰值电流控制

设  $i_n = i_L(nT_s)$  是电感电流在时钟  $nT_s$  时刻的采样值;  $i_{n+1} = i_L[(n+1)T_s]$  是电感电流在下一个时钟  $(n+1)T_s$  时刻的采样值. 对于峰值电流控制的离散迭代映射方程, 已有较多文献报道. 根据文献 [8, 15], 可得峰值电流控制开关变换器的两段式一维离散迭代映射方程  $i_{n+1} = f(i_n)$  及相应的特征值方程  $\lambda$  分别为:

$$i_{n+1} = i_n + m_1 T_s \quad (i_n \leq I_{bp}),$$

$$i_{n+1} = \frac{m_1 + m_2}{m_1} I_{pk} - \frac{m_2}{m_1} i_n - m_2 T_s \quad (i_n > I_{bp}), \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{di_{n+1}}{di_n} = 1 \quad (i_n \leq I_{bp}),$$

$$\lambda = \frac{di_{n+1}}{di_n} = -\frac{m_2}{m_1} \quad (i_n > I_{bp}), \quad (5)$$

其中边界值  $I_{bp} = I_{pk} - m_1 T_s$ , 为电感电流在时钟周期结束时刚好上升到峰值参考电流  $I_{pk}$  时, 所对应的时

钟周期开始时的电感电流值, 如图 3(a) 所示.

开关变换器稳定工作于周期 1 时, 特征值  $\lambda$  必须位于区间  $(-1, 1)$  中, 当  $\lambda$  通过  $-1$  越出该区间, 则变换器将产生倍周期分岔<sup>[14]</sup>. 显然, 在稳定的周期 1 工作区间, 不会发生  $i_n \leq I_{bp}$  的情形. 因此, 变换器的稳定性只在  $i_n > I_{bp}$  的情形受到影响. 由稳态时电感电流的伏秒平衡原理可知:  $m_1 D = m_2 (1 - D)$ , 其中  $D$  为变换器的稳态占空比. 当  $i_n > I_{bp}$  时, 若  $\lambda = -m_2/m_1 \leq -1$ , 即  $D \geq 0.5$ , 变换器将由倍周期分岔过渡到不稳定状态.

### 3.2. 谷值电流控制

对于谷值电流控制, 与峰值电流控制相对应, 我们定义边界  $I_{bv}$  为电感电流在时钟周期结束时刚好下降到谷值参考电流  $I_{vy}$  时, 所对应的时钟周期开始时的电感电流值, 如图 3(b) 所示.

当  $i_n$  大于或等于边界值  $I_{bv} = I_{vy} + m_2 T_s$ , 则在整个时钟周期内, 开关管  $S_1$  一直工作于关断状态, 此时映射方程式为:

$$i_{n+1} = i_n - m_2 T_s. \quad (6)$$

当  $i_n < I_{bv}$ , 电感电流下降到  $I_{vy}$ ,  $S_1$  从关断状态进入导通状态.  $S_1$  导通后, 电感电流上升, 直到这个时钟周期结束, 其映射方程为:

$$i_{n+1} = \frac{m_1 + m_2}{m_2} I_{vy} - \frac{m_1}{m_2} i_n + m_1 T_s. \quad (7)$$

(6) 和 (7) 式所描述的离散映射方程的特征值  $\lambda$  分别为:

$$\lambda = \frac{di_{n+1}}{di_n} = 1 \quad (i_n \geq I_{bv}), \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{di_{n+1}}{di_n} = -\frac{m_1}{m_2} \quad (i_n < I_{bv}). \quad (9)$$

由 (8) 式可知, 当  $i_n \geq I_{bv}$  时, 特征值  $\lambda = 1$ , 表明变换器是不稳定的. 由 (9) 式可知, 当  $i_n < I_{bp}$  时, 若  $\lambda = -m_1/m_2 \leq -1$ , 即  $D \leq 0.5$ , 变换器将由倍周期分岔过渡到不稳定状态.

由图 3 及上述分析可知, 在两段式一维离散映射方程和特征值方程中, 峰值电流控制的边界值  $I_{bp}$  与电感电流下降斜率  $m_2$  无关, 即电感电流上升斜率  $m_1$  在峰值电流控制起着决定性作用; 而谷值电流控制的边界值  $I_{bv}$  与  $m_1$  无关, 即  $m_2$  在谷值电流控制起着决定性作用. 另一方面, 对比峰值电流和谷值电流控制变换器的特征值方程可以看出, 两者具有对称的稳定工作区和不稳定工作区.

## 4. 对称动力学现象分析

### 4.1. 分岔图与 Lyapunov 指数谱

对峰值电流及谷值电流控制开关变换器的离散映射方程和特征值方程(4),(5)及(6)–(9),下面将采用其分岔图和 Lyapunov 指数谱对变换器的稳定性进行分析,并揭示存在的对称动力学现象.

对于 buck 变换器,选取  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $T_s = 100 \text{ } \mu\text{s}$  及以下四组电路参数:(a)  $V_g = 12 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ ; (b)  $V_o = 8 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ ; (c)  $V_g = 12 \text{ V}$ ,  $I_{vy} = 0.6 \text{ A}$ ; (d)  $V_o = 8 \text{ V}$ ,  $I_{vy} = 0.6 \text{ A}$ . 含有  $I_{pk}$  的两组参数用于峰值电流控制,含有  $I_{vy}$  的两组参数用于谷值电流控制. 对

buck 变换器,有  $V_o = DV_g$ ,根据(1)式可得四组参数下电感电流斜率  $m_1$  和  $m_2$  的值. 选择占空比  $D$  为分岔参数,变化范围为 0.3–0.7,得到四组参数下 buck 变换器的分岔图如图 4 所示.

从图 4 可以看出,图 4(a)和(c)的分岔图具有对称性. 在四组参数中:若保持  $V_g$  不变、 $V_o$  变化,由(1)式可知  $m_1, m_2$  均可变化;若保持  $V_o$  不变、 $V_g$  变化,由(1)式可知  $m_1$  变化,  $m_2$  不变. 当电路参数满足  $m_1, m_2$  均可变化时,峰值、谷值电流控制 buck 变换器的正、逆分岔图会出现对称动力学现象. 于是,根据图(a)和(c)参数,可以得到 buck 变换器的对称分岔图及其相应的对称 Lyapunov 指数谱,如图 5 所示. 从图 5 中可以发现峰值/谷值电流型控制 buck 变换器具有复杂的动力学行为和对称动力学现象.

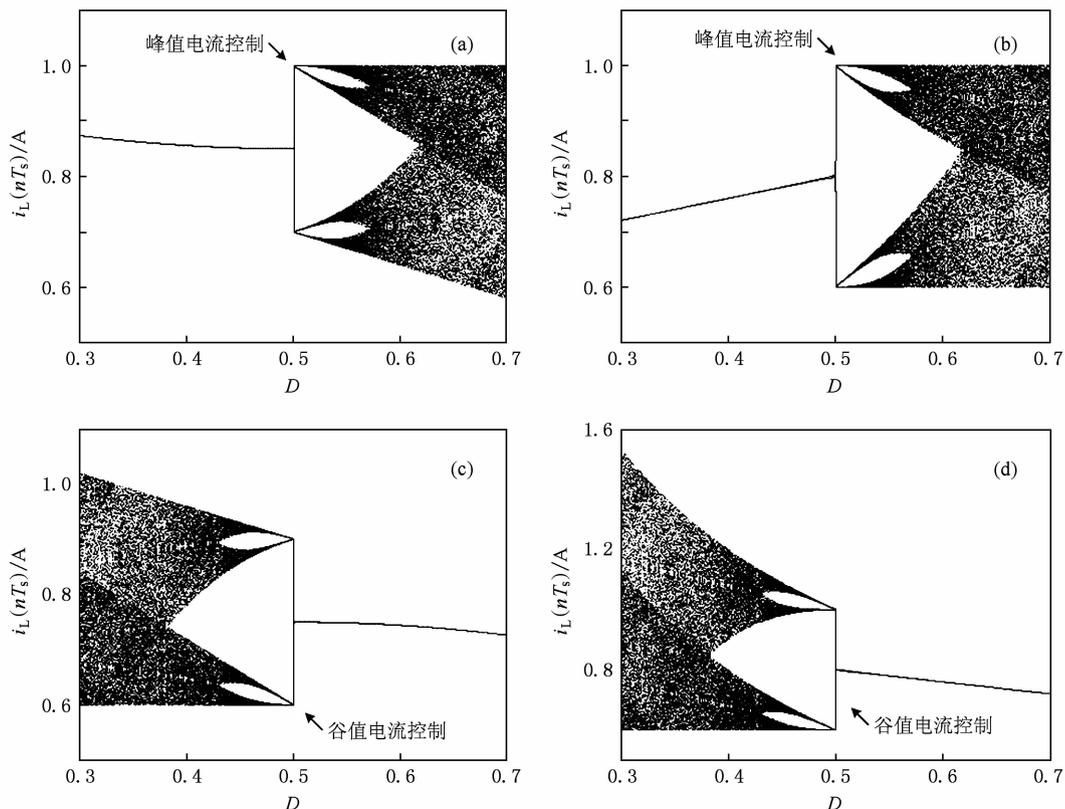


图 4 四组参数下 buck 变换器以  $D$  为参数的分岔图 (a)  $V_g = 12 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ , (b)  $V_o = 8 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ , (c)  $V_g = 12 \text{ V}$ ,  $I_{vy} = 0.6 \text{ A}$ , (d)  $V_o = 8 \text{ V}$ ,  $I_{vt} = 0.6 \text{ A}$

从图 5 可以看出:对于峰值电流控制,随着占空比的逐渐变大,变换器电路出现了第一次倍周期分岔并经过边界碰撞分岔通向混沌的道路. 当  $D = 0.5$  时,分岔图上发生了第一次倍周期分岔,这时

Lyapunov 指数刚好从负值上升到零. 随着占空比的进一步变大,电路经过边界碰撞后进入混沌态,混沌轨道不断扩展,随着占空比逐渐变大,分片的吸引子两两合并,最后连成了一片. 而 Lyapunov 指数

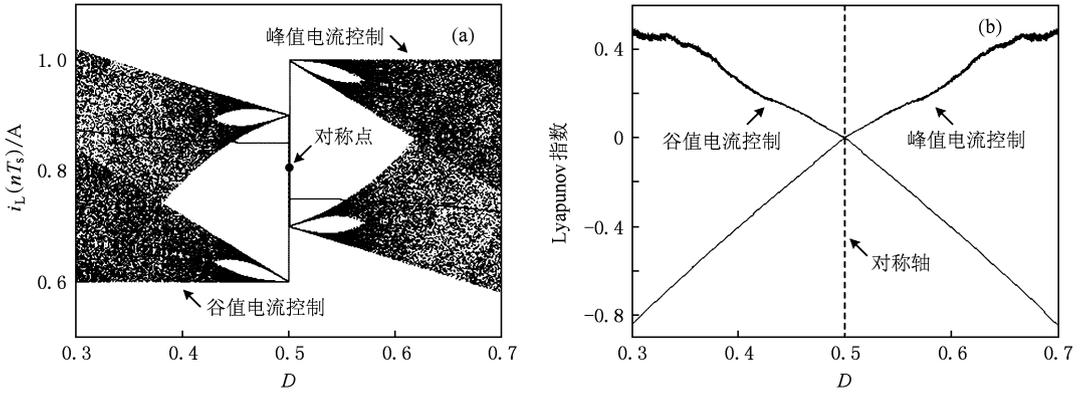


图5 buck 变换器以  $D$  为参数的对称分岔图及其对称 Lyapunov 指数谱 (a)分岔图,(b)Lyapunov 指数谱

穿过零变成了正值,同样表明了电路从稳定的周期态转变成了混沌态.

对于谷值电流控制,随着占空比的逐渐减小,电路也出现了第一次倍周期分岔并经边界碰撞分岔通向混沌的道路.第一次倍周期分岔发生在  $D = 0.5$ ,这时 Lyapunov 指数刚好从负值上升到零.随着占空比的进一步变小,变换器电路经过边界碰撞后进入混沌态,而 Lyapunov 指数穿过零变成了正值.

从图 5 还可以看出:峰值电流和谷值电流控制的分岔图是关于点  $(0.5, 0.8 \text{ A})$  对称的,该对称点由  $D = 0.5$  和  $i = (I_{pk} + I_{vy})/2$  相交生成;峰值电流和谷值电流控制的 Lyapunov 指数是关于轴  $D = 0.5$  对称的,该对称轴对应于分岔图上的对称点.在图 5(b)所示的对称 Lyapunov 指数中可以看出:当指数大于 0.4,两条指数曲线不再具有明显的对称性.这是因为混沌是非周期性的,非周期的两条指数曲线是不可能对称度量的.

对于 boost 变换器,选取电路参数为  $V_o = 16 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ ,  $I_{vy} = 0.4 \text{ A}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$  及  $T_s = 100 \mu\text{s}$ . 对

boost 变换器,有  $V_g = (1 - D)V_o$ ,根据(2)式可知电感电流斜率  $m_1$  和  $m_2$  均可变化.选择占空比  $D$  为分岔参数,得到此时 boost 变换器的对称分岔图及其相应的对称 Lyapunov 指数谱如图 6 所示.

同理从图 6 可以看出:随着占空比的逐渐变大(变小),峰值(谷值)电流控制 boost 变换器的正(逆)分岔图出现了第一次倍周期分岔并经边界碰撞分岔通向混沌的道路,同时 Lyapunov 指数从负值上升并穿过零变成了正值.此外,图 6(a)中的两个分岔图是关于点  $(0.5, 0.7 \text{ A})$  对称的,图 6(b)中的两条 Lyapunov 指数是关于轴  $D = 0.5$  对称的.

对于 buck-boost 变换器,选取  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $T_s = 100 \mu\text{s}$  及以下两组电路参数:(a)  $V_o = 6 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ ;  $V_g = 10 \text{ V}$ ,  $I_{vy} = 0.4 \text{ A}$ ;(b)  $V_g = 10 \text{ V}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ ;  $V_o = 6 \text{ V}$ ,  $I_{vy} = 0.4 \text{ A}$ . 对 buck-boost 变换器,有  $V_o/V_g = D/(1 - D)$ . 根据(3)式可知:对于图 7(a)参数,峰值电流控制的  $m_1$  和谷值电流控制的  $m_2$  均可变化;对于图 7(b)参数,两者均不变.选择占空比  $D$  为分岔参数,得到两组参数下 buck-boost 变换器的对称

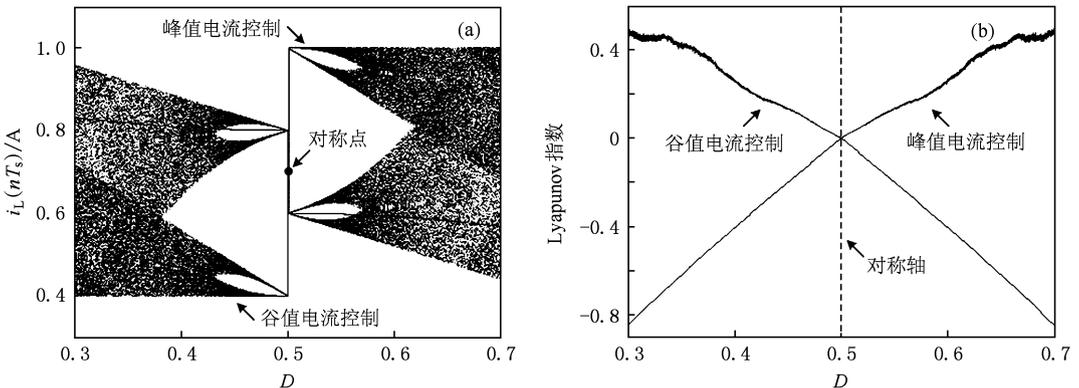


图6 boost 变换器以  $D$  为参数的对称分岔图及其对称 Lyapunov 指数谱 (a)分岔图,(b)Lyapunov 指数谱

分岔图如图 7 所示.

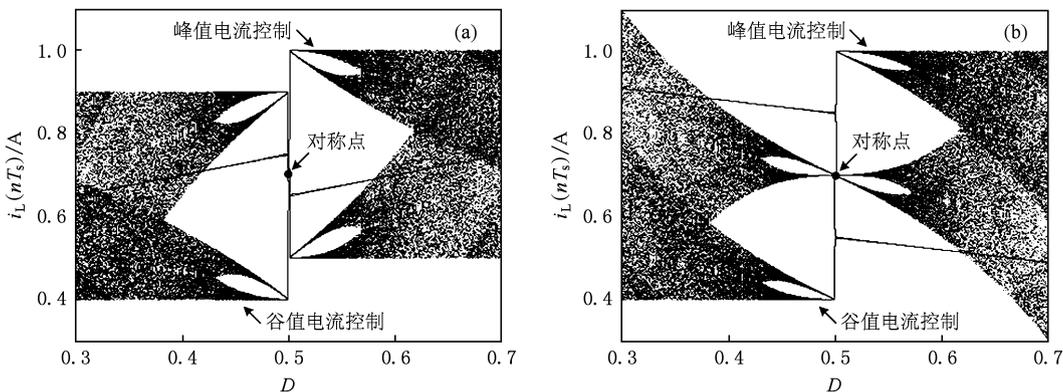


图 7 buck-boost 变换器以  $D$  为参数的对称分岔图 (a)  $V_o = 6$  V,  $I_{pk} = 1$  A;  $V_g = 10$  V,  $I_{vy} = 0.4$  A; (b)  $V_g = 10$  V,  $I_{pk} = 1$  A;  $V_o = 6$  V,  $I_{vy} = 0.4$  A

同理从图 7 可以看出:随着占空比的逐渐变大(变小),峰值(谷值)电流控制 buck-boost 变换器的正(逆)分岔图出现了第一次倍周期分岔并经边界碰撞分岔通向混沌的道路;图 7(a)和图 7(b)中的两个分岔图都是关于点(0.5, 0.7 A)对称的.

图 5—7 所示的结果表明:当电路参数满足峰值电流控制的  $m_1$  和谷值电流控制的  $m_2$  均可变化或均不变时,峰值/谷值电流型控制开关 DC-DC 变换器的分岔图及 Lyapunov 指数谱均会出现对称动力学现象.

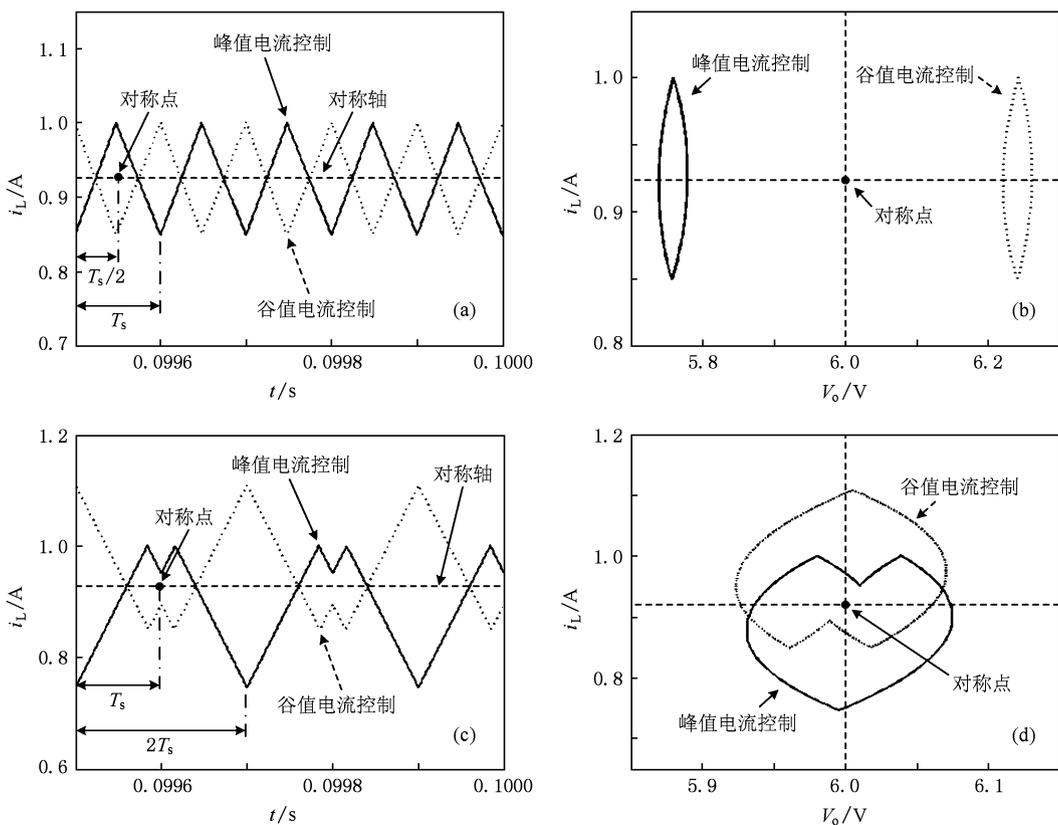


图 8 占空比变化时具有周期性的时域波形及其相轨图 (a) 周期 1 时域波形(峰值  $D = 0.48$ , 谷值  $D = 0.52$ ), (b) 周期 1 相轨图(峰值  $D = 0.48$ , 谷值  $D = 0.52$ ), (c) 周期 2 时域波形(峰值  $D = 0.52$ , 谷值  $D = 0.48$ ), (d) 周期 2 相轨图(峰值  $D = 0.52$ , 谷值  $D = 0.48$ )

## 4.2. 时域波形图与相轨图

对如图 1 和图 2 分别所示的峰值电流和谷值电流控制的 buck 变换器, 建立基于 Matlab/Simulink 的仿真模型, 并对其进行时域仿真. 根据其结果, 画出状态变量随时间的历经图(即时域波形图), 以及相空间中的轨迹图(即相轨图), 对比、分析和综合以确定电流型变换器的分岔、混沌和对称动力学现象. 为了验证离散映射模型数值计算的结果, 以占空比为变化量, 以 buck 变换器为研究对象, 选取图 5 分岔图中的部分相同电路参数进行仿真, 即:  $V_g = 12 \text{ V}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $T_s = 100 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $I_{pk} = 1 \text{ A}$ . 另外, 选择电容  $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$ .

其他参数可按下述方法进行设置: 若峰值电流控制的  $D = 0.48$ , 可解得电感电流峰值  $I_{pp} = m_1 D T_s = 0.15 \text{ A}$ ,  $I_{vy} = I_{pk} - I_{pp} = 0.85 \text{ A}$ , 电感电流平均值即负载电流  $I_o = (I_{pk} + I_{vy})/2 = 0.925 \text{ A}$ ,  $V_o = D V_g = 5.76 \text{ V}$ ,  $R = V_o/I_o = 6.23 \text{ }\Omega$ .

图 8 示出了占空比参数变化时所对应的具有周期性的电感电流波形图及相轨图. 从图 8 中可以观

测到, 在不同的占空比下, 变换器运行于不同的周期轨道. 当变换器工作于周期状态时, 时域波形表现出相应的周期性, 相轨图由有限个封闭曲线组成.

从图 8(a) 所示的周期 1 时域波形可以看出, 峰值电流和谷值电流控制的电感电流波形关于轴  $i_L = I_o$  对称, 且每个开关周期  $T_s$  内, 两个电感电流波形关于点  $(T_s/2, I_o)$  对称, 验证了对图 1 和图 2 的理论分析. 从图 8(b) 所示的周期 1 相轨图可以看出, 峰值电流和谷值电流控制的相轨图关于点  $(6 \text{ V}, 0.925 \text{ A})$  对称. 对称点为占空比等于 0.5 时对应的输出电压与电感电流平均值的交点.

从图 8(c) 所示的周期 2 时域波形可以看出, 峰值电流和谷值电流控制的电感电流波形关于轴  $i_L = I_o$  对称, 此时  $I_o = 0.925 \text{ A}$ ; 每一个  $2T_s$  周期内, 两个电感电流波形关于点  $(T_s, I_o)$  对称. 从图 8(d) 所示的周期 2 相轨图可以看出, 峰值电流和谷值电流控制的相轨图关于点  $(6 \text{ V}, 0.925 \text{ A})$  对称. 图 8 的仿真结果说明: 具有周期轨道的时域波形或相轨图, 都能找到对称轴或对称点.

图 9 为给定占空比所对应的混沌态电感电流波

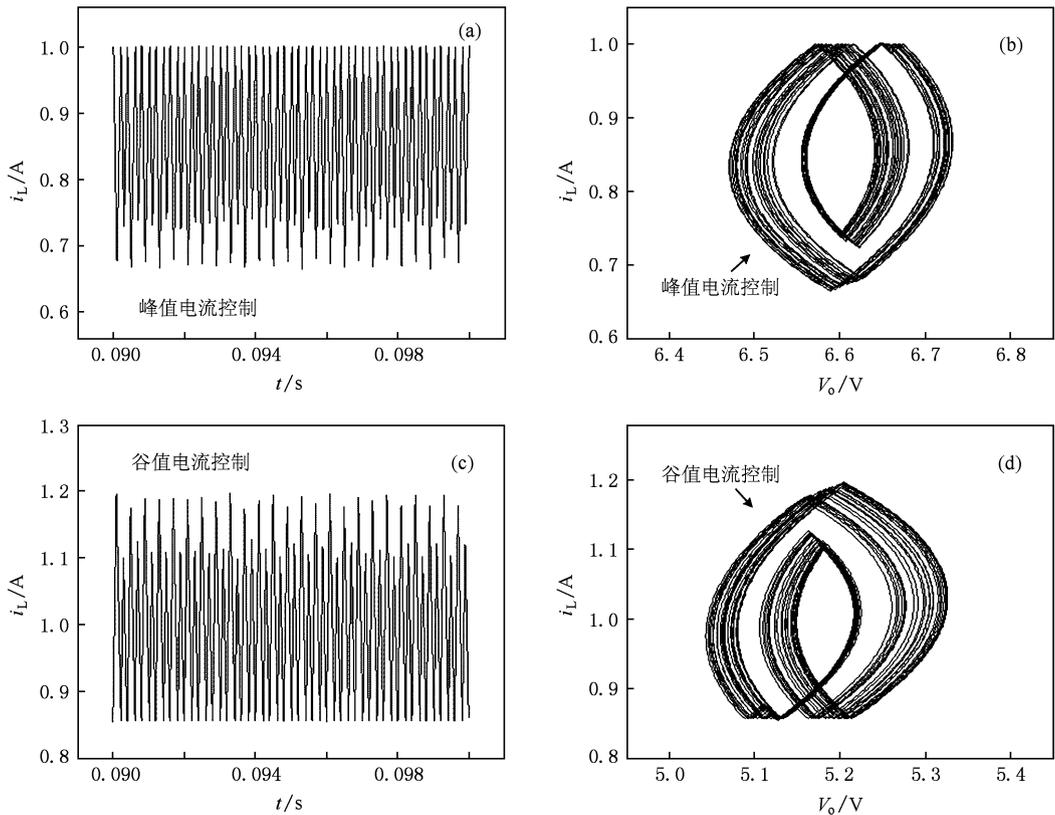


图 9 混沌态的时域波形及其相轨图 (a)混沌态时域波形(峰值:  $D = 0.6$ ), (b)混沌态相轨图(峰值:  $D = 0.6$ ), (c)混沌态时域波形(谷值:  $D = 0.4$ ), (d)混沌态相轨图(谷值:  $D = 0.4$ )

形图及相轨图. 当变换器工作于混沌状态时, 时域波形因失去周期性的规律而表现得杂乱无章, 相轨图由一定区域内随机分布的、不封闭的轨线组成. 对比图 9(b) 和图 9(d) 所示的相轨图可以看出: 混沌态中包含有限的周期轨道和无限非周期轨道, 两个相轨图中的周期轨道是关于点对称的, 而非周期轨道不具有对称性. 对于当前给定的一组占空比 (峰值  $D = 0.6$ , 谷值  $D = 0.4$ ), 对称动力学现象和非对称动力学现象共存于电流型 buck 变换器.

从图 8 和图 9 的仿真结果可以分析出: 在占空比  $D \leq 0.5$  ( $D \geq 0.5$ ) 时, 峰值(谷值)电流控制变换器具有周期轨道和对称动力学现象; 以占空比  $D = 0.5$  为分界点, 随着峰值(谷值)电流控制的占空比逐渐增大(减小), 变换器具有对称动力学现象、对称动力学现象和非对称动力学现象共存、非对称动力学现象. 不难看出, 基于 Matlab/Simulink 仿真模型的时域仿真结果与利用离散映射模型的数值仿真结果相一致.

## 5. 结 论

开关 DC-DC 变换器的峰值电流控制与谷值电流控制具有对称性. 通过建立峰值/谷值电流型控制 buck, boost, 及 buck-boost 变换器的统一离散迭代映射模型, 推导了统一的分段光滑迭代映射方程及特征值方程, 相应的数值仿真结果验证了本文理论分析的正确性, 同时也揭示了峰值/谷值电流型控制开关 DC-DC 变换器在较宽的电路参数变化区间内存在对称动力学现象. 基于 Matlab/Simulink 的时域仿真结果验证了数值仿真结果, 并揭示出: 具有周期轨道的时域波形或相轨图, 都能找到对称轴或对称点; 随着占空比的变化, 电流型变换器具有对称动力学现象、对称动力学现象和非对称动力学现象共存、非对称动力学现象. 对比研究峰值电流控制和谷值电流控制开关 DC-DC 变换器的分岔、混沌、对称等动力学现象, 对开关 DC-DC 变换器的设计具有十分重要的指导意义.

- 
- [1] Zhou Y F, Chen J N, Iu H H C, Tse C K 2008 *Int. J. Bifur. Chaos* **18** 121
- [2] Wang F Q, Zhang H, Ma X K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2842 (in Chinese) [王发强、张浩、马西奎 2008 物理学报 **57** 2842]
- [3] Wang F Q, Zhang H, Ma X K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1522 (in Chinese) [王发强、张浩、马西奎 2008 物理学报 **57** 1522]
- [4] Ma X K, Zhang H, Zhang X T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6174 (in Chinese) [马西奎、张浩、张笑天 2008 物理学报 **57** 6174]
- [5] Lu W G, Zhou L W, Luo Q M, Du X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6275 (in Chinese) [卢伟国、周维维、罗全明、杜雄 2007 物理学报 **56** 6275]
- [6] Zhao Y B, Luo X S, Fang J Q, Wang B H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5022 (in Chinese) [赵益波、罗晓曙、方锦清、汪秉宏 2005 物理学报 **54** 5022]
- [7] Donato C, Giuseppe G 2006 *Nonlinear Dynam.* **44** 251
- [8] Bao B C, Xu J P, Liu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2949 (in Chinese) [包伯成、许建平、刘中 2009 物理学报 **58** 2949]
- [9] Sajid I, Masood A, Suhail A Q 2007 *Int. J. Electric. Comput. Syst. Engng.* **1** 166
- [10] Wong S C, Tse C K, Tam K C 2004 *Int. J. Bifur. Chaos* **14** 1971
- [11] Iu H H C, Tse C K 2003 *IEEE Trans. Circ. Syst. - I* **50** 679
- [12] Bernardo M D, Vasca F 2003 *IEEE Trans. Circ. Syst. - I* **47** 133
- [13] Cheng K W E, Liu M, Wu J, Cheung N C 2001 *IEEE Ind. Electron. Conf.* 838
- [14] Banerjee S, Parui S, Gupta A 2004 *IEEE Trans Circ. Syst. - II* **51** 649
- [15] Bao B C, Xu J P, Liu Z 2008 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. Chin.* **37** 397 (in Chinese) [包伯成、许建平、刘中 2008 电子科技大学学报 **37** 397]
- [16] Dai D, Ma X K, Li X F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2729 (in Chinese) [戴栋、马西奎、李小峰 2003 物理学报 **52** 2729]
- [17] Zhou Y F, Chen J N, Tse C K, Ke D M, Shi L X, Sun W F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3676 (in Chinese) [周宇飞、陈军宁、谢智刚、柯导明、时龙兴、孙伟锋 2004 物理学报 **53** 3676]
- [18] Zhao Y B, Zhang D Y, Zhang C J 2007 *Chin. Phys.* **16** 933
- [19] Lu W G, Zhou L W, Luo Q M 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1837
- [20] Cheng W B, Guo Y N, Huo A Q, Kang S M, Tang N, Wang Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4439 (in Chinese) [程为彬、郭颖娜、霍爱清、康思民、汤楠、汪跃龙 2009 物理学报 **58** 4439]

# Analysis of symmetrical dynamic phenomenon of peak and valley current-mode controlled switching DC-DC converters \*

Zhou Guo-Hua<sup>1)†</sup> Xu Jian-Ping<sup>1)</sup> Bao Bo-Cheng<sup>2,3)</sup>

1) (School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

2) (Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

3) (School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China)

(Received 24 June 2009; revised manuscript received 18 August 2009)

## Abstract

Peak current and valley current controlled switching DC-DC converters show symmetrical dynamic phenomenon within a wide circuit parameter range. The unified discrete iterative map model of peak current and valley current controlled buck, boost, and buck-boost converters is established, and the unified piecewise smooth iterative map and their corresponding characteristic equations are also derived. The forward and inverse bifurcation diagrams and Lyapunov exponent spectrums with duty ratio as parameter are obtained by numerical simulation. The research results indicate that the bifurcation diagrams and Lyapunov exponent of peak and valley current-mode controlled switching converters show symmetrical dynamic phenomenon corresponding to a symmetrical point or a symmetrical axis. The numerical simulation results are verified by the time-domain simulation, which further indicates that with the duty ratio varying, the peak and valley current-mode controlled switching converter reveals a symmetrical dynamic phenomenon, or a symmetrical dynamic phenomenon accompanying an asymmetrical dynamic phenomenon, or an asymmetrical dynamic phenomenon.

**Keywords:** switching converters, iterative map, current-mode control, symmetrical dynamic phenomenon

**PACC:** 0545

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50677056), the Cultivation Project of Excellent Doctorate Dissertation of Southwest Jiaotong University and the Doctoral Innovation Foundation of Southwest Jiaotong University.

† E-mail: ghzhou-swjtu@163.com