

# 流控型 Buck 变换器的动力学行为分析

薛 雯, 闵富红, 步娇娇, 曹蕴藉

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 针对光伏发电系统中电流控制型 Buck 变换器, 利用不连续动力学理论分析了其非线性振荡行为. 通过调节控制电路的电压幅值和直流激励电源值, 给出碰撞边界的和时钟脉冲触发的参数分岔图, 获得了电流控制型 Buck 变换器从稳定的周期 1 到混沌状态的参数节点. 分别绘制周期和混沌运动的相轨迹和时序图, 分析各子域内具有不同映射结构的系统类型. 研究结果表明, 流控制型 Buck 变换器在参数变化时其运动行为丰富, 边界碰撞现象明显, 观测到倍周期分岔和阵发混沌. 通过分析映射类型, 说明其边界的非线性振荡行为.

[关键词] 非线性动力学, 电流控制, Buck 变换器, 切换边界, 分岔行为

[中图分类号] O415.5 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2024)01-0032-08

## Dynamic Behavior Analysis of Current Controlled Buck Converter

Xue Wen, Min Fuhong, Bu Jiaojiao, Cao Yunjie

(NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Based on the switching boundary of the current controlled Buck converter, its nonlinear oscillation behavior is analyzed using discontinuous dynamics theory. By adjusting the voltage amplitude of the control circuit and the DC excitation power supply value, the parameter bifurcation diagrams of the collision boundary and clock pulse triggering are given, and the parameter nodes of the current controlled Buck converter from stable period 1 to chaotic state are obtained. By drawing phase trajectories and time series diagrams of periodic and chaotic motion, the system types with different mapping structures in each sub domain are analyzed. The research results indicate that the flow controlled Buck converter has rich motion behavior when the parameters change, obvious boundary collision phenomenon, and period doubling bifurcation and Intermittency are observed. By analyzing the mapping type, the nonlinear oscillation behavior of its boundary is explained.

**Key words:** nonlinear dynamics, current control, Buck converter, switching boundaries, bifurcation

电力电子变换器在发电、储电、输电等诸多电能领域均有应用, 它供应的电能质量会对社会生产活动产生直接影响<sup>[1]</sup>. DC-DC 变换器<sup>[2-3]</sup>是电力电子变换器的重要分支, 担负着电能变换和传输的作用. 电流控制型 Buck 变换器是一个强非线性 DC-DC 变换器系统, 运行状态易受到电路参数的影响<sup>[4]</sup>, 形成多种非线性行为, 如: 边界碰撞分岔、鞍结分岔、混沌等. 众所周知, 非线性器件会使变换器电压电流不稳定、频率波动等, 甚至会导致设备无法正常运行<sup>[5-7]</sup>. 深入研究流控型 Buck 变换器边界处的非线性行为, 对于设计稳定的 DC-DC 变换器具有重要意义.

针对 DC-DC 变换器非线性行为的研究工作已有很多, 但大多集中于对变换器系统的混沌分岔行为分析, 而对系统的切换行为未进行充分研究. 文献[8-9]运用时序图、相图等可视化地研究了随参数变化时电路产生的非线性行为. 文献[10]研究了带压控恒阻负载的变换电路, 分析了一种滑模控制策略下的升压变换器出现的奇特分岔行为, 并给出了这种分岔出现的参数条件. 文献[11]提出了一种混沌控制方法实现了 Buck-Boost 变换器由混沌状态到周期态的转变. 文献[12]通过离散迭代映射法建立了变换器模型, 并根据指数优化通道实现了系统的反馈控制. 文献[13-14]分析了高频 Z 源变换器的分岔、混沌等非线性现象, 通过对不同参数进行实验获得使系统稳定运行的参数范围并考虑了二倍频纹波对其影响. 可见, 这些文献基于离散

收稿日期: 2023-04-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61971228).

通讯作者: 闵富红, 博士, 教授, 研究方向: 电路与系统. E-mail: minfuhong@njnu.edu.cn

迭代映射、混沌分岔行为分析等方法研究了 DC-DC 变换器的分岔、混沌等基本动力学行为,并提出了混沌控制方法,但对于 DC-DC 变换器切换边界处的运行方式和切换前后运动状态鲜有研究。

本文通过对流控模式下的 Buck 变换器进行系统研究,更精确地分析其在切换边界处的非线性行为。首先,利用不连续动力学理论,准确描述了系统运动状态的切换条件提出了具有相空间的边界和特定时间边界开关系统的映射结构类型。其次,通过对其分岔行为研究,确定了影响电流控制型 Buck 变换器稳定运行的参数区间。最后,根据绘制的时序图和相轨迹图,可视化地展示了变换器的运行趋势。引入映射结构,详细描绘了不同时间间隔与相空间边界间子系统的运动趋势,对变换器复杂运动进行了分析预测。

## 1 Buck 变换器工作原理

电流控制型 Buck 变换器原理图如图 1 所示,电路结构主要包含三个部分:一个电感电流控制的开关型降压变换器、一个电阻负载  $R_1$  和一个包含比例积分补偿器的外电压回路,其中电容电流电路作为内部控制回路。

在一个运行周期内,由控制电压  $V_{con}$  与感应电压  $V_g$  共同确定系统运行状态的切换,其中系统的碰撞边界为控制电压  $V_{con}$ 。反馈增益为  $ga=R_2/R_3$ ,电容电流为  $i_c(t)$ ,感应电压  $V_g$  由电阻  $R_s$  引出。将感应电压与控制电压  $V_{con}$  进行对比,当感应电压小于控制电压  $V_{con}$  时,MOS 管  $S$  导通,二极管  $D$  截止。当感应电压大于控制电压  $V_{con}$  时,MOS 管  $S$  截止,二极管  $D$  导通。

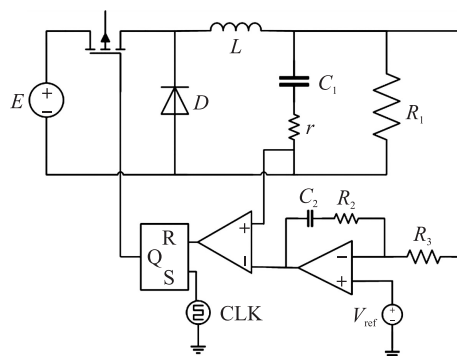


图 1 电容器电流控制的 Buck 变换器系统

Fig. 1 A Buck converter system controlled with capacitor current

$$V_g = i_c(t) \times R_s, \quad (1)$$

$$V_{con}(t) = (1+ga)V_{ref} - V_0(t) - \frac{1}{R_3 C_2} \int_0^t (V_0(t) - V_{ref}) dt. \quad (2)$$

其中,  $V_{ref}$  为参考电压。

电流控制的 Buck 变换器系统将分为 3 种运动状态,其动力学方程可以表示为,

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \varepsilon \left( -\frac{1}{L} v_0 + \delta \frac{1}{L} E \right), \\ \frac{dv_0}{dt} = \varepsilon \left( -\frac{Rr}{L} v_0 + \delta \frac{r}{L} \frac{R}{R+r} E + \frac{R}{(R+r)C} i_L \right) - \frac{1}{C(R+r)} v_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中,当 MOS 管  $S$  导通二极管  $D$  截止时,  $\delta=1, \varepsilon=1$ , 记为状态 1。当 MOS 管  $S$  截止  $D$  导通时,  $\delta=0, \varepsilon=1$ , 记为状态 2。电感  $L$  点位为 0 时,  $\delta=0, \varepsilon=0$ , 记为状态 3。

运动状态的切换边界为:

$$\begin{cases} V_0 = V_{con}, \\ t = T/P, \\ i_L = 0. \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $P$  为一个周期内脉冲的次数。

对流控 Buck 变换器数学模型进行归一化处理,提高数值精度:

$$x = v_0, y = i_L, \tau = RCt, \tau_T = T(RC)^{-1}, a = RCL^{-1}. \quad (5)$$

根据变换器系统模型所对应的电路方程(5),可得到数学模型为,

$$\begin{cases} \dot{x} = \varepsilon \left\{ \frac{R^2}{(R+r)} y - \frac{R^2 Cr}{L(R+r)} + \delta r \frac{R^2}{R+r} E \right\} - \frac{R}{R+r} x, \\ \dot{y} = \varepsilon (-ax + \delta a E). \end{cases} \quad (6)$$

## 2 不连续分析

在稳定的运动状态下,系统通过相空间边界和脉冲边界在时间域和相空间域内进行转换。为划分这

两种运动子域,将相空间边界前的区域记作  $\Omega_1$ ,将通过相空间边界转换后的区域记作子域  $\Omega_2$ ,每个子域内均遵从独立的连续的动力学方程进行描述,将这两种子域内运动方式定义为状态 1 和状态 2. 即  $\Omega_1$  内为运动状态 1,  $\Omega_2$  内为运动状态 2. 将相空间边界转换时间记作  $t_{2m-1}$ ,将脉冲边界对应时间记作  $t_{2m}$ . 选取一个初始时间点,则系统中可以将子域区间表示为,

$$\begin{cases} \partial\Omega_{\alpha\beta C} = \{(x, y) | \varphi(x, y) \equiv R_s(y - x/R) - v_{con} = 0\}, \\ \Omega_1 = \{(x, y) | \left(y - \frac{x}{R}\right) \times R_s \in (0, V_{con}) \text{ 且 } (\dot{y} - \frac{\dot{x}}{R}) > 0\}, \\ \Omega_2 = \{(x, y) | \left(y - \frac{x}{R}\right) \times R_s \in (0, V_{con}) \text{ 且 } (\dot{y} - \frac{\dot{x}}{R}) < 0\}. \end{cases} \quad (7)$$

在无限时间域内,系统子域划分情况为,

$$\begin{cases} \partial\Omega_{\alpha\beta T} = \{(x, y) | t = t_{2m-1}, m \in \mathbf{Z}_+\}, \\ \Omega_1 = \{(x, y) | t \in (t_{2m-1}, t_{2m}), m \in \mathbf{Z}_+\}, \\ \Omega_2 = \{(x, y) | t \in (t_{2m+1}, t_{2m+2}), m \in \mathbf{Z}_+\}. \end{cases} \quad (8)$$

在相空间边界与时间边界作用下,系统的运动区域示意图如图 2 所示.

将状态变量用  $\mathbf{X}$  表示,将系统的向量场用  $\mathbf{F}$  表示,其中  $\mathbf{T}$  表示横轴向量,  $\mathbf{f}$  代表纵轴向量,

$$\mathbf{X} = (x, y)^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{T}, \mathbf{f})^T. \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入系统方程,则方程可以写为如下形式,

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}_\lambda^{(k)}(\mathbf{X}, t), (k, \lambda \in \{0, 1, 2\}). \quad (11)$$

$\mathbf{F}_\alpha^{(\alpha)}(\mathbf{X}, t)$  表示在区域一内运用状态 1 的表达式,即  $\Omega_\alpha$  域的实矢量场.  $\mathbf{F}_\beta^{(\beta)}(\mathbf{X}, t)$  表示在区域二内运用状态 2 的表达式,即  $\Omega_\beta$  域的实矢量场. 在这两种情况下系统的子域与其公式呈对应关系.  $\mathbf{F}_\alpha^{(\beta)}(\mathbf{X}, t)$  表示在区域一内系统处于运动状态 2,即在  $\Omega_\alpha$  域中运用虚矢量场,实际由  $\Omega_\beta$  域的矢量场决定.  $\mathbf{F}_\beta^{(\alpha)}(\mathbf{X}, t)$  表示在区域二情况下系统处于运动状态 1,即在  $\Omega_\beta$  域中运用虚矢量场,其对应实矢量场为  $\Omega_\alpha$  域矢量场. 在这两种情况下系统的子域与其公式不对应.  $\mathbf{F}_0^{(0)}(\mathbf{X}, t)$  表示变换边界上的矢量场.

式中,

$$\mathbf{F}_\alpha(\mathbf{X}, t) = \begin{cases} -ax + aE, & \alpha = 1, \\ -ax, & \alpha = 2. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{T}_\alpha(\mathbf{X}, t) = \begin{cases} \frac{R^2}{(R+r)y} - \frac{R^2 Cr}{L(R+r)} + r \frac{R^2}{R+r} E - \frac{R}{R+r} x, & \alpha = 1, \\ \frac{R^2}{(R+r)y} - \frac{R^2 Cr}{L(R+r)} - \frac{R}{R+r} x, & \alpha = 2. \end{cases} \quad (14)$$

以时间为状态变量,绘制系统在两种子域内的转换集和映射情况,如图 3 所示. 相空间边界在本系统中为  $V_{con}(t)$ ,为表示图中所示比例积分补偿器运行后的对比值,可得电流边界,

$$y = x/R + V_{con}(t)/R_s. \quad (15)$$

假设不连续动力系统流的切换时刻为  $t_k$ ,那么第  $i$  个子域  $\bar{\Omega}_i$  所对应的第  $i$  个转换集可以定义为

$$\Sigma^{(i)} = \{\mathbf{X}_k^{(i)} | \mathbf{X}_k^{(i)} = \mathbf{X}^{(i)}(t_k), k \in \mathbf{Z}_+\}. \quad (16)$$

上式表示第  $i$  个子域  $\bar{\Omega}_i$  中包含的所有转换点时间点,将这些时间点构成的集合称为转换集. 不连续动力系统的运动可用多种映射的组合来描述,这种多种映射的组合被称为映射结构. 依据转换集对系统进行划分,可将系统分为连续和状态切换两部分,并构造域内映射和传输映射两类基本离散映射.  $P_{2m}$  表示区域内映射,  $P_0^{(2m-2, 2m-1)}$  表示转变时间点处的映射行为,则系统映射结构为

$$P = P_1 \circ P_0^{(1,2)} \circ P_2 \circ P_0^{(2,3)} \circ P_3, \dots, P_{2m-2} \circ P_0^{(2m-2,2m-1)} \circ P_{2m-1} \circ P_0^{(2m-1,2m)} \circ P_{2m} \dots \quad (17)$$

式中,“ $\circ$ ”表示映射结构之间的复合结构。

对于  $\forall m \in \mathbf{Z}_+$  而言,区域内  $P_{2m-1}$  映射均由状态 1 产生,即映射子域内系统运动趋势均是从脉冲边界到相空间边界,将此类子域映射记为  $P_1$ 。域内映射  $P_{2m}$  映射均由状态 2 产生,其映射子域内系统运动趋势均是由相空间边界到脉冲边界的映射,将此类子域映射记为  $P_2$ 。传输映射  $P_0^{(2m-2,2m-1)}$  都表示由子域 2 与子域 1 切换边界处的映射行为,将这样的区域内行为统称为  $P_0^{(2,1)}$ 。对于  $\forall m \in \mathbf{Z}_+$ ,传输映射  $P_0^{(2m-1,2m)}$  都表示由子域 1 与子域 2 交界处的映射行为,将这样的区域内行为统称为  $P_0^{(1,2)}$ 。因此,不连续系统的映射结构可以简化为

$$P = P_1 \circ P_0^{(1,2)} \circ P_2 \circ P_0^{(2,1)} \circ P_1, \dots, P_2 \circ P_0^{(2,1)} \circ P_1 \circ P_0^{(1,2)} \circ P_2 \dots \quad (18)$$

分析该 Buck 变换器系统的动力学行为可以发现,该系统无  $P_0^{(1,2)}$  与  $P_0^{(2,1)}$  这两种传输映射结构,因此本系统的映射结构可以记录为

$$P = P_1 \circ P_2 \circ P_1, \dots, P_2 \circ P_1 \circ P_2 \dots \quad (19)$$

可进一步将其记录成

$$P = (P_1 P_2)^n, n = \text{映射结构循环次数} \quad (20)$$

以  $(P_1 P_2)^3$  为例,以状态 2 为初始状态,此时映射为  $P_2$ ,当脉冲来临时,运动由子域 2 切换到子域 1,此时映射为  $P_1$ ,经历一段时间后,运动行为到达参考边界,运动由子域 1 切换到子域 2。经历 6 次子域的转换,运动回到初始状态,这种传输映射记为  $(P_1 P_2)^3$ ,其映射结构示意图如图 4 所示。

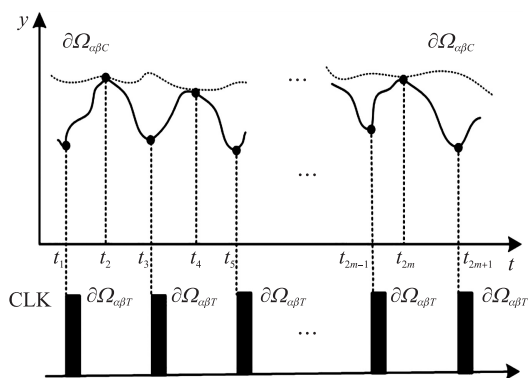


图 3 转换集和映射示意图

Fig. 3 Transformation set and mapping diagram

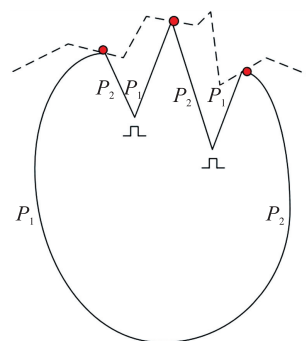


图 4  $(P_1 P_2)^3$  映射结构示意图

Fig. 4 A schematic representation of the mapping structure  $(P_1 P_2)^3$

### 3 仿真分析

由于控制电路模块的参考电压  $V_{\text{ref}}$  以及电源电压  $E$  便于调节,因此将其作为 Buck 变换器的控制变量。运用相图、时序图以及分岔图对其非线性行为进行可视化分析,通过调整参考电压  $V_{\text{ref}}$ 、电源电压  $E$  及电容器输出电阻  $r$  值对时序图波形及相图运行轨迹进行观察。系统参数如表 1 所示。

其中输入电压值为 15 V,电容  $C_1$  值为 50  $\mu\text{F}$ ,负载电阻值为 5  $\Omega$ ,电感值为 50  $\mu\text{H}$ ,开关周期  $T = 10 \mu\text{s}$ 。观察并列出随着参考电压  $V_{\text{ref}}$  和电源电压  $E$  变化时关键性的图示结果,并进行相关非线性行为分析,值得一提的是运用了映射结构对相轨迹图进行了细致的分类。

#### 3.1 分岔行为分析

为了更好地观察此电容器电流控制的 Buck 变换器随系统参数变化时在边界上的运动行为,绘制分岔图来划分各组电源电压和参考电压下,电容器电流控制的 Buck 变换器的运动类型。分岔图表示随着非线性系

表 1 电路器件型号及参数

Table 1 Model and parameters of circuit components

变量名称	取值	单位
输入电压( $E$ )	15	V
负载电阻( $R_1$ )	5	$\Omega$
电感( $L$ )	50	$\mu\text{H}$
电容( $C_1$ )	50	$\mu\text{F}$
参考电压( $V_{\text{ref}}$ )	5	V
补偿电阻( $R_2$ )	1	$\text{k}\Omega$
入端电阻( $R_3$ )	1	$\text{k}\Omega$
补偿电容( $C_2$ )	15	$\mu\text{F}$
电流传感器( $R_s$ )	1	$\Omega$
时钟脉冲周期( $T$ )	10	$\mu\text{s}$



统参量的变化,系统的稳定点数量的变化. 随着参数的变化,电容器电流控制的 Buck 变换器系统的运动趋势将会发生变化,出现由稳定到混沌状态或相反的运动趋势. 在变换过程中存在类似由周期一到周期二的分岔行为,称为倍周期分岔,记为 PD. 在混沌与混沌间存在周期窗的分岔行为,成为阵发混沌,记为 SN.

首先,随着  $E$  增大的分岔图将系统参数设置为  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=5\ \text{V}$ , 且参数初始状态均为 0. 绘制的关于  $E$  的分岔图情况如图 5 所示. 其中图 5(a) 表示由于触发脉冲的作用,变化范围为  $8\sim 16\ \text{V}$  的电源电压  $E$  所对应的状态转换点的负载电压值,图 5(b) 则是与相空间边界碰撞后,电源电压  $E$  所对应的状态转换点的负载电压值,其变化范围也为  $8\sim 16\ \text{V}$ . 在仿真过程中,  $E$  的取值每次以  $0.05\ \text{V}$  的大小逐步增加,系统在  $E$  变化时的映射结构分布情况如表 2 所示.

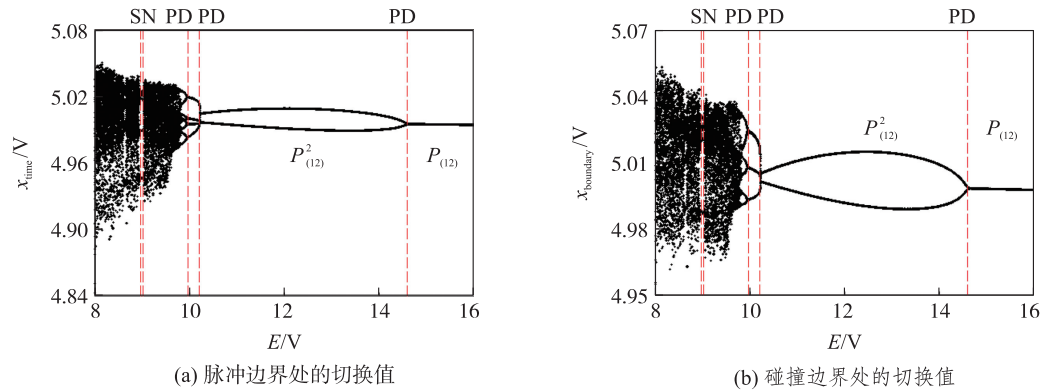


图 5  $E$  分岔图

Fig. 5 The bifurcation diagram of  $E$

表 2 给出了随着电源电压  $E$  参数的变化所对应的映射结构,可见随着  $E$  的增加运动行为由混沌通过倍周期分岔以及边界碰撞分岔进入了稳态. 在  $(14.979, 16]$  这一参考电压变化区域内,系统的映射结构为  $P_{(12)}$ , 类型 I. 随着输入电压的降低,映射结构将由周期 1 进入周期 2, 周期类型为 I 型. 当输入电压降低到  $10.2\ \text{V}$  时系统将进入混沌状态,在输入电压低于  $9.956\ \text{V}$  时,系统将无法划分. 但在参考电压达到  $9.015\ \text{V}$  时,系统会恢复一定的规律性,进入周期 4, 且在  $9.956\ \text{V}$  时系统发生了阵发混沌,形成一个周期 4 窗.

表 2 随  $E$  变化的映射结构表

Table 2 Table of mapping structures varying with  $E$

$E$	映射结构	转换周期
$(8, 8.969]$	$P_{(12)}^N$	
$(8.969, 9.015]$	$P_{(12)}^N (N=4)$	5 times/T
$(9.015, 9.956]$	$P_{(12)}^N$	
$(9.956, 10.2]$	$P_{(12)}^N (N=3)$	4 times/T
$(10.2, 14.479]$	$P_{(12)}^2$ I 型	2 times/T
$(14.479, 16]$	$P_{(12)}$ I 型	1 times/T

其次,随着  $V_{\text{ref}}$  增大的分岔图将系统参数设置为  $r=0.005\ \Omega$ ,  $E=15\ \text{V}$ , 且参数初始状态均为 0, 绘制的关于  $V_{\text{ref}}$  的分岔图情况如图 6 所示. 其中图 6(a) 表示由于触发脉冲的作用,参考电压  $V_{\text{ref}}$  变化范围为  $1\sim 12\ \text{V}$  时触发脉冲处的电感电流值,图 6(b) 则是参考电压  $V_{\text{ref}}$  在相空间边界处的电感电流值,其变化范围也为  $1\sim 12\ \text{V}$ .  $V_{\text{ref}}$  的步长为  $0.05\ \text{V}$ , 表 3 为系统在  $V_{\text{ref}}$  变化时对应的映射结构分布情况.

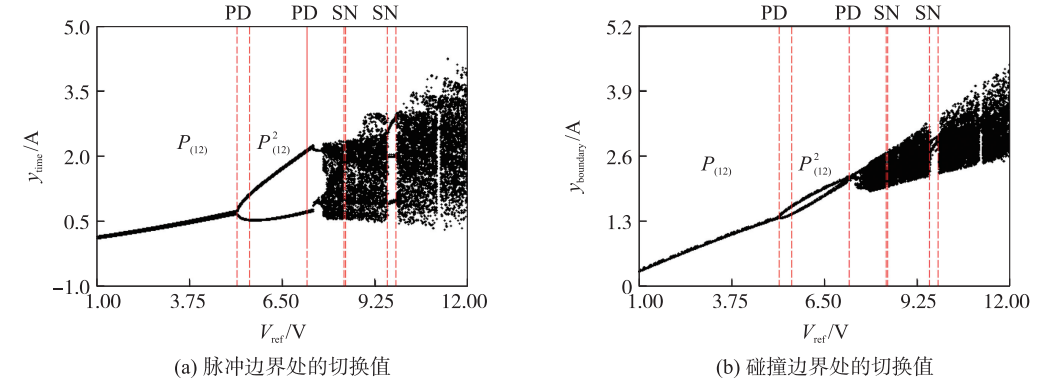


图 6  $V_{\text{ref}}$  分岔图

Fig. 6 The bifurcation diagram of  $V_{\text{ref}}$

表 3 给出了系统在  $V_{\text{ref}}$  变化时的映射结构,可见随着  $V_{\text{ref}}$  的增加系统经过相空间边界和脉冲边界切换,实现了倍周期分岔和边界碰撞分岔的演化. 随着参考电压的逐渐增大,电容器电流控制型 Buck 变换器在边界上的运动行为首先在 5.164 V 处发生倍周期分岔,其中,当参考电压低于 5.164 V 时,运行轨迹的映射结构为类型 I,当参考电压在 (5.164, 5.521] 之间时映射结构为类型 II. 当参考电压阻值继续增大时,映射结构为类型转变为  $P_{(12)}^2$  II 型. 然后在  $V_{\text{ref}} = 7.494$  处再次进行倍周期分岔后运动开始进入混沌状态,映射类型记为  $P_{(12)}^N$ ,且在混沌内存在着明显的周期窗口. 系统在  $V_{\text{ref}} = 7.635$  和 8.306 处存在鞍结分岔行为,边界处的运动轨迹从混沌状态转变为周期态. 在参考电压达到 9.6 V 时,系统也产生鞍结分岔,短暂恢复  $P_{(12)}^N$  ( $N=3$ ) 的映射结构,因此在 9.6 V 时发生阵发混沌,形成一个明显的 2 周期窗.

### 3.2 相轨迹及时域分析

根据  $V_{\text{ref}}$  的分岔图选取参数为  $r=0.005 \Omega, V_{\text{ref}}=0.5 \text{ V}$  与  $r=0.01 \Omega, V_{\text{ref}}=0.5 \text{ V}$ ,绘制出他们的相轨迹图和时序图. 相轨迹图能够表现出系统的运动行为和各点的运动趋势,时序图能够体现在强迫边界和相空间边界的双重作用下,系统 1 周期所需时间. 相空间边界以虚线绘制,时间节点碰撞点以空心圆点表示,相空间碰撞点以实心圆点标注. 以脉冲时长作为度量单位,可以将  $P_{(12)}$  映射结构划分为如下两种类型. 在  $r=0.005 \Omega$  的情况下,如图 7(a) 和图 7(b) 所示,时间边界处发生穿越运动会引起电容器的放电现象,  $i_c$  会向负方向运动,将这种情况定义为稳定类型 I. 当  $r=0.01 \Omega$  时,如图 7(c) 和图 7(d) 所示,时间边界处发生穿越运动仍会引起电容器的放电现象,但  $i_c$  会向正方向运动,将这种情况定义为稳定类型 II.

如图 7(a) 和图 7(c) 所示,以映射结构为  $P_1$  上一点为起始点,此时运行状态为状态 1,运行一段时间后,到达相空间边界,映射结构转换为  $P_2$ ,继续运行到脉冲触发时,运行轨迹回到初始状态,即映射结构为  $P_{(12)}$ ,此时系统稳定运行. 在这两组轨迹中,系统每个运行周期均需一个时间脉冲周期.

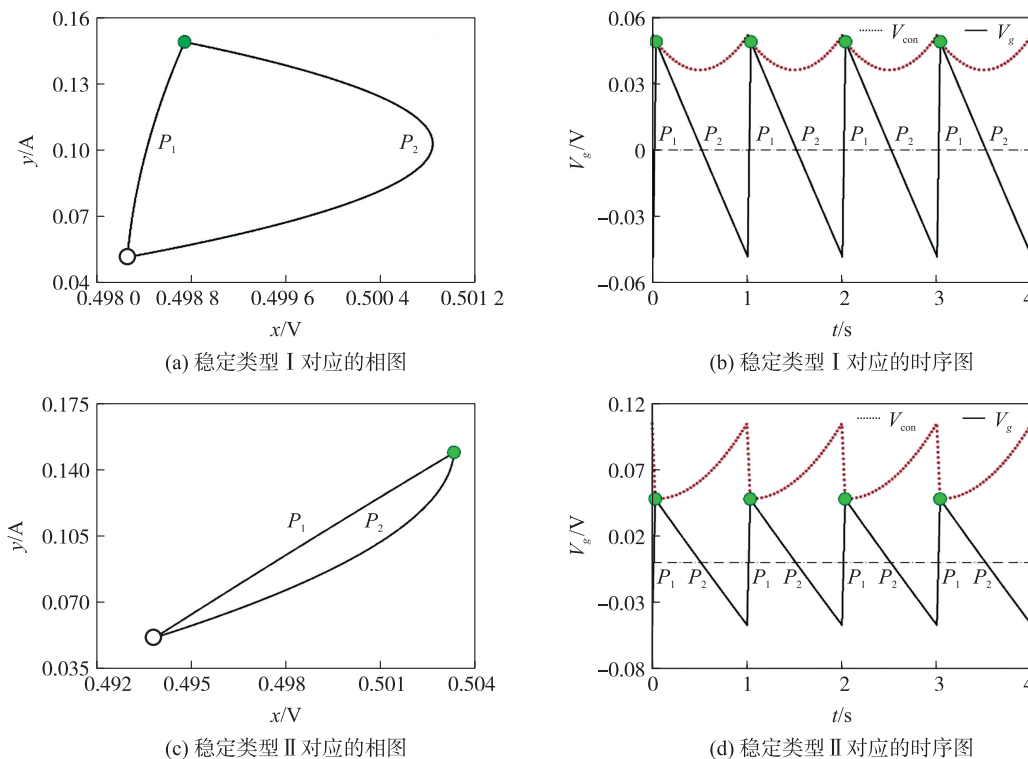


图 7  $P_{(12)}$  的相轨迹图和时序图对比

Fig. 7 Comparison of phase trajectory and timing diagrams of  $P_{(12)}$

参数设置为  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=5.3\ \text{V}$ ,  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=6\ \text{V}$  与  $r=0.01\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=6.2\ \text{V}$ , 绘制出他们的相轨迹图和时序图. 在  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=5.3\ \text{V}$  的情况下, 在时间边界进行交叉运动, 时间边界处发生穿越运动均会引起电容器的放电现象,  $i_c$  会向负方向运动, 将这种情况定义为稳定类型 I. 在  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=6\ \text{V}$  的情况下, 时间边界处发生穿越运动会引起电容器的充电现象,  $i_c$  会向正方向运动, 将这种情况定义为稳定类型 II. 在  $r=0.01\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=6.2\ \text{V}$  的情况下, 在时间边界进行交叉运动, 时间边界处发生穿越运动均会引起电容器的充电现象,  $i_c$  会向正方向运动, 将这种情况定义为稳定类型 III.

如图 8(a)、图 8(c) 和图 8(e) 所示, 以状态 1 为起点, 此时映射结构为  $P_1$ , 运行一段时间后, 到达相空间边界, 映射结构转换为  $P_2$ , 继续运行到脉冲触发时, 映射结构转换为  $P_1$ , 再经过两次映射结构切换后, 运行轨迹回到初始状态, 即映射结构为  $P_{(12)}$ , 此时系统稳定运行. 在这 3 组映射的运行轨迹中, 系统每个运行周期均需两个时间脉冲周期.

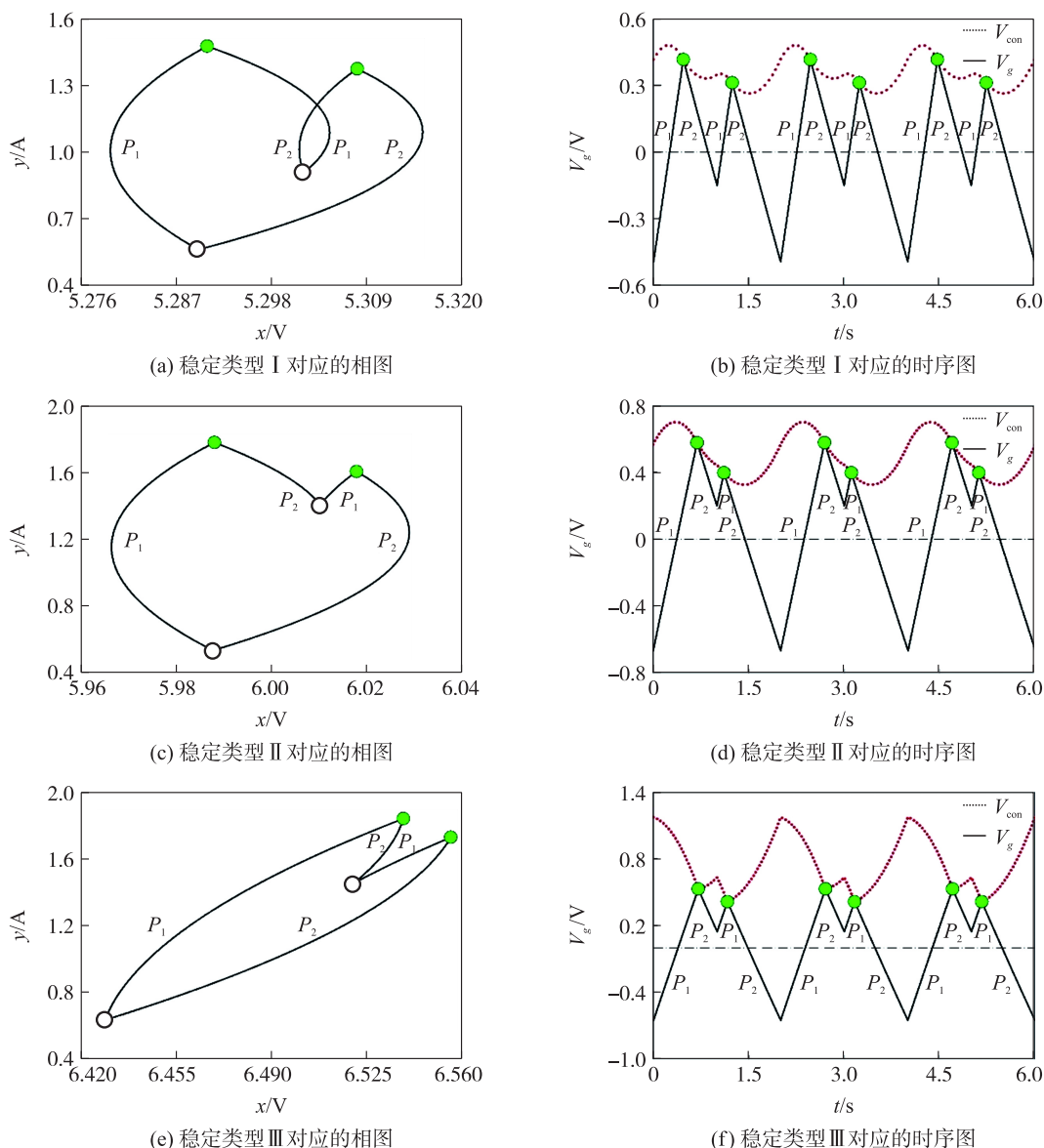
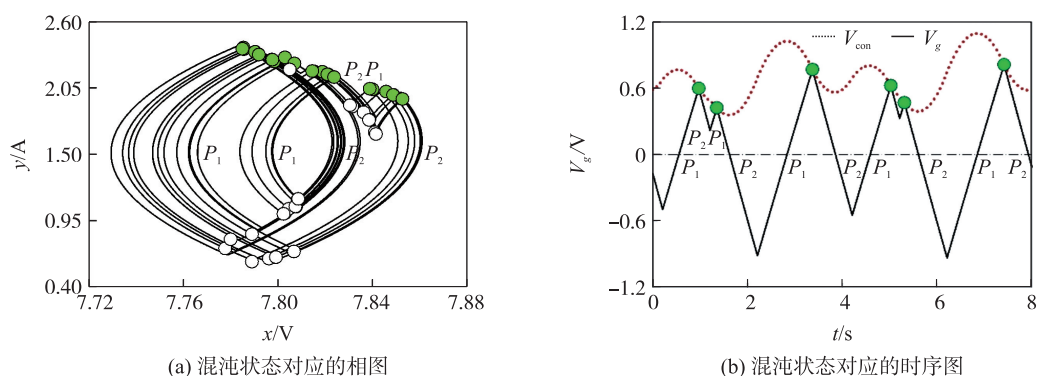


图 8  $P_{(12)}^2$  映射的时序图和相轨迹图对比

Fig. 8 Comparison of phase trajectory and timing diagrams of  $P_{(12)}^2$

参数  $r=0.005\ \Omega$ ,  $V_{\text{ref}}=7.8\ \text{V}$ , 绘制出他们的相轨迹图和时序图. 如图 9(a) 所示,  $V_{\text{ref}}=7.8\ \text{V}$  下的系统运动情况无闭合循环性. 将这些穿越过边界超过 3 次的复杂甚至无规则运动称为混沌. 在混沌的状态下, 两种映射结构多次切换后, 运行轨迹仍然无法回到初始状态, 系统无法稳定运行, 即此时映射结构为  $P_{(12)}^n$ . 在这类映射形成的轨迹中, 系统每个运行周期所需时间脉冲周期不固定.

图 9  $P''_{(12)}$  映射的时序图和相轨迹图Fig. 9 Comparison of phase trajectory and timing diagrams of  $P''_{(12)}$ 

## 4 结论

运用不连续理论深入研究电容电流控制型 Buck 变换器非线性动力学状态的演化过程. 通过改变电源电压和参考电压两种参数获得碰撞边界下的参数分岔图,从而观察到电容器电流控制型 Buck 变换器的稳定区间和倍周期分岔等丰富的分岔行为. 根据分岔图确定电压参数,分析了不同映射结构的相位图与时序图. 通过引入映射结构对系统运动趋势进行了类别划分,并给出明确的数值区间,完成了对系统周期与混沌运动的分析预测.

## [参考文献] (References)

- [1] 吴宁,许扬,陆于平. 分布式发电条件下配电网故障区段定位新算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):77-82.
- [2] XIE F, GENG X Y, LI G Z, et al. Dynamic behavior analysis of cascaded buck converter and boost converter system[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2023, 42(2): 655-672.
- [3] 肖朝霞,李盼,朱洪驰,等. 带恒功率负荷并联 Boost DC/DC 电压源组网系统稳定性分析[J]. 电力建设,2023,44(3):122-137.
- [4] GAO P Y, MIN F H, LI C B, et al. Dynamical analysis of boundary behaviors of current-controlled DC-DC buck converter[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 106(3): 2203-2228.
- [5] GUO Y H, WU Q L, WANG L, et al. Stability enhancement of one-cycle controlled buck-boost converters with a composite function embedded[J]. IEEE Transactions on Circuits System I: Regular Papers, 2020, 67(10): 3512-3520.
- [6] ABDELALI E A, NATALIA C E, MOHAMED D, et al. Nonlinear dynamics and stability analysis of a three-cell flying capacitor DC-DC converter[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1395.
- [7] 何圣仲,周国华,许建平. 谷值  $V^2$  控制 Boost 变换器的精确建模与动力学分析[J]. 物理学报,2014,63(17):79-89.
- [8] CRISTIANO R, PONCE E, PAGANO D J. On the Teixeira singularity bifurcation in a DC-DC power electronic converter[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96(2): 1243-1266.
- [9] LENG M, ZHOU G, ZHOU S, et al. Stability analysis for peak current-mode controlled buck LED driver based on discrete-time modeling[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 6(3): 1567-1580.
- [10] 周晓龙,马铭磷. 带忆阻负载的电流型 Cuk 变换器动力学分析及其混沌控制[J]. 电子元件与材料,2021,40(4):370-380.
- [11] 杨昌辉,陈艳峰,张波,等. 基于参数扰动的混沌控制方案在 Buck-Boost 变换器中的应用研究[J]. 电源学报,2018,16(2):32-37.
- [12] 马闯,高志强,郭帅朝,等. 改进无源延时反馈控制下 Buck 变换器分岔抑制研究[J]. 电工电气,2022,298(10):1-9.
- [13] 李山,崔森,陈艳,等. 高频 Z 源 DC/DC 变换器的非线性动力学行为分析[J]. 高电压技术,2017,43(10):3290-3299.
- [14] 曹益畅,丁新平,韦正怡,等. 改进型准 Z 源单相逆变器非线性动力学研究[J]. 太阳能学报,2022,43(11):60-67.

[责任编辑:陈 庆]