

直流 - 直流开关变换器分段光滑系统带权 Lempel-Ziv 复杂度分析*

谢帆^{1)†} 杨汝²⁾ 张波¹⁾

1) (华南理工大学电力学院, 广州 510640)

2) (广州大学物理与电子工程学院, 广州 510006)

(2011年8月13日收到; 2011年10月27日收到修改稿)

利用直流 - 直流开关变换器分段光滑系统切换过程中电路拓扑结构改变的特点, 监测每个开关周期中的开关状态, 运用计算机逻辑运算中二进制转十进制的方法提出一种新型的开关模块概念, 并用其量化系统在单个开关周期中的复杂程度建立了分段光滑系统的符号时间序列. 根据 Lempel-Ziv (L-Z) 复杂度和由新型开关模块建立的符号时间序列进一步提出带权 L-Z 复杂度概念, 从单一变量符号时间序列中定性分析分段光滑系统的稳定性、非线性和复杂程度, 并且揭示出系统的运动规律和动力学结构. 最后, 以电流反馈型 buck 变换器为例具体说明新型开关模块时间序列的建立和带权 L-Z 复杂度的分析结果.

关键词: 直流 - 直流开关变换器, 开关模块, 符号时间序列, 带权 Lempel-Ziv 复杂度

PACS: 05.45.-a, 89.75.-k, 84.30.Jc

1 引言

开关变换器是开关电源的核心, 几乎所有的工业、民用开关电源都由其构成, 是目前高效率、高品质的二次电能变换和利用最重要的基础. 另一方面, 开关变换器中蕴含着丰富的非线性现象, 包括分岔、共存吸引子和混沌现象等, 其主要来源是电路中存在非线性开关元件 (电力二极管、电力场效应晶体管等) 和非线性控制方法, 如脉冲宽度调制 (PWM) 技术等. 目前, 对开关变换器设计工程师的培训只是强调传统的线性方法 (傅里叶和拉普拉斯变换、传递函数等), 这些方法不能洞悉电路的非线性现象而且预测价值极低^[1]. 开关变换器是一个典型开关切换系统, 也是一个包含逻辑和连续变量的混杂系统, 它可以用于描述一大类实际的电气系统, 研究它的稳定运行和非线性特性的描述方法, 将对全面了解这类电气系统提供理论基础, 由此提高电气设备的运行特性和可靠性, 也将为了解此类物理系统动力学特性提供一种定量或定性的分析

方法.

直流 - 直流 (DC-DC) 开关变换器是电力电子学科中一个最基本的变换器, 也是构建许多其他类型开关变换器的基本组成部分, 它广泛地应用于计算机电源、通讯电源、医疗电源中, 但对它的运行稳定性理论和非线性特性分析还是一个难题. 分维、李雅普诺夫指数和熵等在 DC-DC 开关变换器非线性系统的特征标志和分析诊断中具有很大的用途^[2,3], 但却存在各自的局限性, 不能全面分析非线性动力系统, 特别是分段光滑系统的稳定性和非线性程度^[4,5]. 基于 Lempel-Ziv (L-Z) 复杂度^[6-9]的 DC-DC 开关变换器非线性分析同样不能适用于分段光滑系统中^[10]. 目前除 Tse^[11] 提出迭代稳定判据 x_{n+1}/x_n 外, 还没有一个可以广泛适用的稳定判据和非线性程度分析方法, 这给 DC-DC 开关变换器参数设计带来一定的困难. 因此, 利用 DC-DC 开关变换器自身的特点提出一种计算简单并广泛适用的稳定判据和非线性特性量化方法, 将有助于实际 DC-DC 开关变换器及其他开关变换器电路的设计.

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50937001) 和国家自然科学基金 (批准号: 50777009) 资助的课题.

† E-mail: 263743433@qq.com

从蔡氏电路开始,分段光滑多卷波电路系统建立了混沌现象与非线性电路之间的联系,这对混沌非线性研究是一个里程碑式的贡献. Lü等^[12-15]的深入研究拓展了多卷波电路动力学系统的发生机理和电路类型,并被广泛运用于拓宽信号频带和通信安全、保密等领域. DC-DC 开关变换器混沌现象的研究滞后于多卷波电路,直到 20 世纪 90 年代才因工程上的需要开始为学术界所重视. DC-DC 开关变换器与多卷波电路的相同之处在于它们都是分段光滑系统^[16,17],两者都需通过判断变量所处区域空间而对动力学系统进行切换. 与多卷波电路不同之处则在于 DC-DC 开关变换器是一种通过 PWM 并利用半导体开关器件进行切换的离散迭代映射系统,从而无法产生多卷混沌态,其每一分段的电路拓扑结构一旦发生改变,电路结构复杂性发生改变. 而多卷波电路是一种微分分段动力系统,其每一分段的电路整体拓扑结构不变,电路结构复杂性不变. 因此,利用 DC-DC 开关变换器拓扑结构变化的特点研究其稳定性和非线性特性. 本文采用符号动力学方法,结合分析 DC-DC 开关变换器拓扑结构的改变,试图突破以往离散方程的研究方法,使 DC-DC 开关变换器分岔、混沌问题的研究有一个新的发展.

本文在 Tse 等^[18-20]提出的开关模块的基础上,通过监测 DC-DC 开关变换器分段光滑系统每个开关周期中的开关状态的变化,运用计算机逻辑运算中二进制转十进制的方法提出一种新型的开关模块概念,用以量化单个开关周期的复杂程序并建立其符号时间序列. 然后,根据符号时间序列和 L-Z 复杂度的意义,提出针对分段光滑系统的带权 L-Z 复杂度概念. 通过带权 L-Z 复杂度的改变定量描述系统工作模式的转换和工作状态的改变,并将其作为量度分析变换器的稳定性、非线性和复杂程度的工具,从而为工程设计人员提供直接可观的非线性特征量,帮助其设计出更为可靠稳定的开关变换器. 最后,以电流反馈型 buck 变换器为例,从时域波形和纹波谐波分量方面用带权 L-Z 复杂度分析系统特性.

2 基于 DC-DC 开关变换器的开关模块和符号时间序列

在 DC-DC 开关变换器中,如果开关器件(开关管和电力二极管等)的数量为 N ,那么将会有 2^N 种开关模式. 事实上,在变换器运行过程中,并不是

所有的开关模式都会被运用到,这取决于所用的控制方法和系统的传导方式^[18]. 开关变换器分段光滑系统所经历的一个完整周期必须包括吸收和释放能量过程,某些开关模式的作用是令系统的储能元件储存能量,另一些开关模式的作用则是使储能元件释放能量. 储存能量的开关模式总会在一个开关周期中优先出现,而后才会出现释放能量的开关模式^[1]. 根据开关变换器的这一特点,提出一种新型的开关模块概念. 下面以包含两个开关器件的 DC-DC 开关变换器为例进行说明.

buck, boost, buck-boost 和反激式变换器等的主电路(分别如图 1, 2, 3 和 4 所示)都只含有一个开关管 S 和一个二极管 D ,因此会出现 $2^2 = 4$ 种开关模式:

$$\begin{aligned} (S, D) &= (\text{on}, \text{on}), & (S, D) &= (\text{on}, \text{off}), \\ (S, D) &= (\text{off}, \text{on}), & (S, D) &= (\text{off}, \text{off}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 on 和 off 分别表示开关器件的导通和关断. 但是在变换器实际运行过程中,因为两个开关器件不能同时导通,开关模式 $(S, D) = (\text{on}, \text{on})$ 并不存在,只有后三种开关模式存在. 此种变换器的其他主电路元件为电源 E , 电磁元件 L (电感或变压器), 电容 C 和负载 R , 其中 L 和 C 是储能元件. 系统处于开关模式 $(S, D) = (\text{on}, \text{off})$ 时, 储存能量; 处于开关模式 $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$ 和 $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$ 时, 释放能量. 而且 $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$ 总处于 $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$ 之后, 因为只有等电磁元件完全释放完能量后, D 才会关断. 因此, 在一个开关周期中开关模式序列总是为 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{on}) \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{off})$, 如果前一个开关模式在一个开关周期不出现, 则必将会出现下一种开关模式, 并且此序列不会倒序出现. 一个开关周期中将最多出现三种开关模式, 用三位二进制编码 b_1, b_2 和 b_3 分别表示三种开关模式 $(S, D) = (\text{on}, \text{off})$, $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$ 和 $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$ 的出现情况, 其中 $b_i = 0$ 和 $b_i = 1$ ($i = 1, 2, 3$) 分别表示该开关模式在一个开关周期中不出现和出现. 运用方程

$$(b_1 b_2 b_3) = (B)_{10}, \quad (2)$$

将二进制序列转化为十进制开关模块 B . 例如, 在一个开关周期中, 对于开关模式序列 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{on}) \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{off})$, 说明三种开关模式都依次出现, 有 $b_1 = b_2 = b_3 = 1$, 因此开关模块为 $B = (111)_2 = 7$; 对于开关模式序列 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow$

$(S, D) = (\text{off}, \text{on}) \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{off})$, 第一种开关模式不出现而后两种开关模式依次出现有 $b_1 = 0, b_2 = b_3 = 1$, 因此开关模块为 $B = (011)_2 = 3$.

在此定义的开关模块概念能够清晰地说明变换器在每一个开关周期中的复杂程度和运转情况. 在每一种开关模式中, 系统元件参与工作的数目都会不同, 参与工作元件的数目越多, 说明该模式下系统运转越复杂, 反之亦然. S 参与电路的复杂性大于 D 参与电路的复杂性. 因为二极管只有两极, 并且只要加入正向电压就能使阴阳两极导通参与工作, 而开关管有三极, 需加外加电路触发触发极才能使之导通参与工作. 三种开关模式的复杂性分析为: 当系统处于开关模式 $(S, D) = (\text{on}, \text{off})$ 时, buck, boost, buck-boost 和反激式变换器等共有 E, S, L, C 和 R 五种器件参与工作 (分别如图 1(a), 图 2(a), 图 3(a) 和图 4(a) 所示), 复杂程度最高; 当系统处于开关模式 $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$ 时, buck, buck-boost 和反激式变换器等共有 D, L, C 和 R 四种器件参与工作 (分别如图 1(b), 图 3(b) 和图 4(b) 所示), boost

变换器有 e, D, L, C 和 R 五种器件参与工作 (如图 2(b) 所示), 但是此时参与工作的 D 比 S 复杂性低, 因此, 此开关模式下复杂度居中; 当系统处于开关模式 $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$ 时, buck, boost, buck-boost 和反激式变换器等都只有 C 和 R 两种器件参与工作 (分别如图 1(c), 图 2(c), 图 3(c) 和图 4(c) 所示), 复杂程度最低. 因此, (1) 式中 b_i 的排序已经代表了复杂程度的优先级.

综上所述, 开关模块数也代表着系统在一个开关周期中的复杂度. 如开关模块 $B = 7$, 说明在一个开关周期中共有三种开关模式出现, 并且发生两次开关动作, 复杂性最强; 开关模块 $B = 0$, 说明在一个开关周期中系统没有一种开关模式和开关动作出现, 即变换器不工作, 此时复杂性最弱. 同样, 在实际运行中开关模块 $B = 5$ 不会出现, 因为在电磁元件没传完能量前二极管不会关断, 即不可能出现开关模式序列 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow \overline{(S, D)} = \overline{(\text{off}, \text{on})} \rightarrow (S, D) = (\text{off}, \text{off})$.

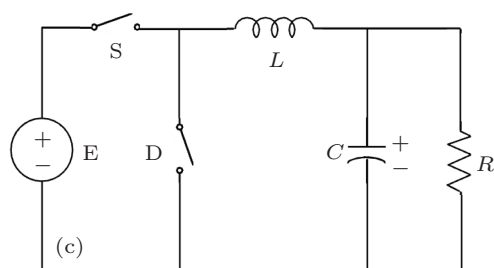
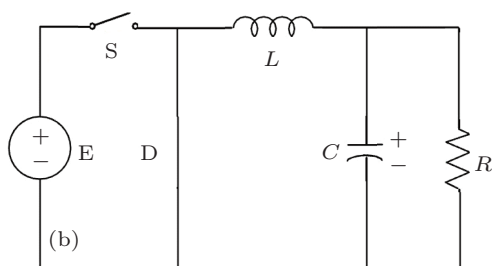
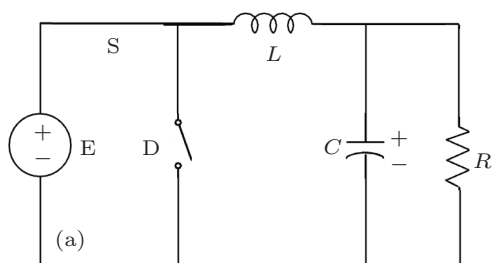


图 1 Buck 变换器 (a) $(S, D) = (\text{on}, \text{off})$; (b) $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$; (c) $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$

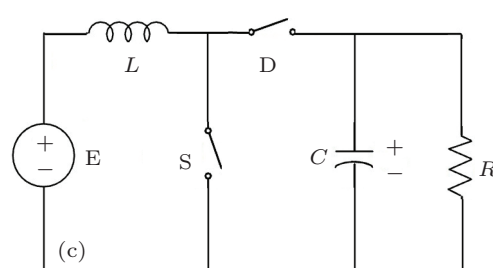
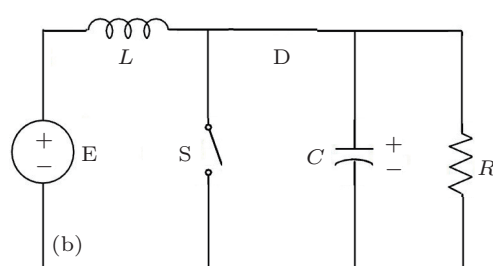
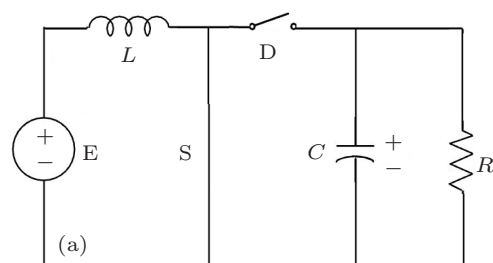


图 2 Boost 变换器 (a) $(S, D) = (\text{on}, \text{off})$; (b) $(S, D) = (\text{off}, \text{on})$; (c) $(S, D) = (\text{off}, \text{off})$

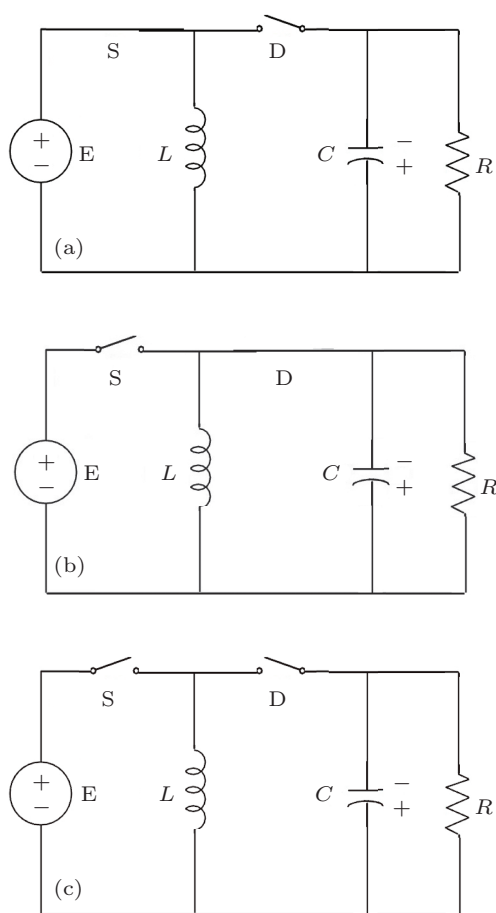


图3 Buck-boost 变换器 (a) (S, D) = (on, off); (b) (S, D) = (off, on); (c) (S, D) = (off, off)

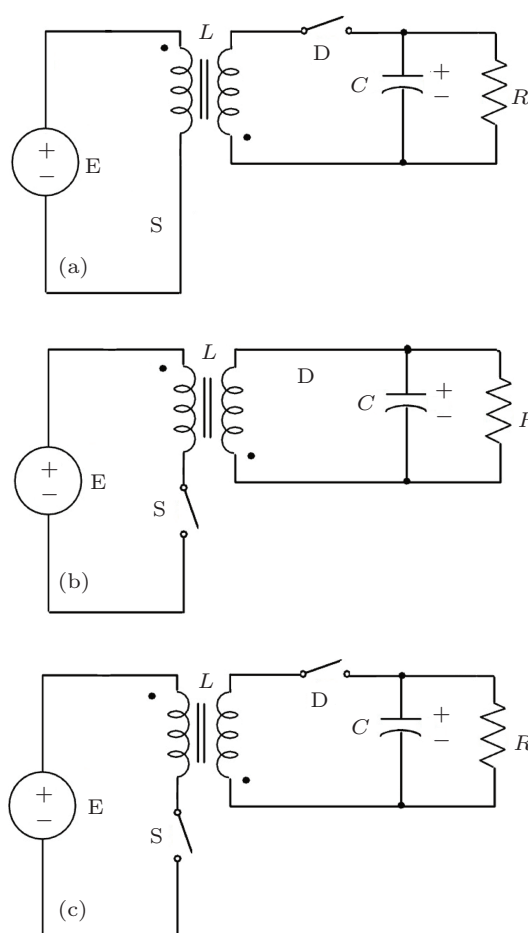


图4 反激式变换器 (a) (S, D) = (on, off); (b) (S, D) = (off, on); (c) (S, D) = (off, off)

运用类似频闪映射方法, 在系统的每一个开关周期中对变换器的开关器件进行状态监测, 得到开关状态序列并运用 (2) 式转化为开关模块. 随着系统的运转而得到一系列的开关模块, 将其作为字符按时间顺序组成符号时间序列

$$S = B_0 B_1 B_2 \cdots B_n \cdots, \quad (3)$$

其中, B_i 表示与第 i 个开关周期对应的开关模块. 因此, DC-DC 开关变换器分段光滑非线性动力系统的演化与符号时间序列 (3) 式形成拓扑共轭, 这使得动力系统特性的研究可以归于关于符号时间序列的研究. 符号时间序列的算法复杂度反映了其动力系统的算法复杂性 [7].

3 带权 L-Z 复杂度

L-Z 复杂度是对任意给定的有限长度符号序列复杂性的度量, 计算方便, 适用于短序列的研究, 因此被广泛运用于各个领域. 开关模块作为字符, 其

字符大小本身包含着系统在一个开关周期中的复杂程度, 这与以往只标志符号含义的符号时间序列字符不同, 所以 L-Z 复杂度不能完全说明分段光滑系统的复杂程度. 为此, 根据文献 [3] 在 L-Z 复杂度的基础上提出带权 L-Z 复杂度概念.

设由有限个符号组成的长度为 n 的符号时间序列

$$S = B_0 B_1 B_2 \cdots B_n, \quad (4)$$

令 πS 表示将 S 删去第一个字符所得到的字符串 (称为前 π 删除操作) 和 $S\pi$ 表示将 S 删去最后一个字符所得到的字符串 (称为后 π 删除操作), 即

$$\begin{aligned} \pi S &= B_1 B_2 B_3 \cdots B_n, \\ S\pi &= B_0 B_1 B_2 \cdots B_{n-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

从 S 的第 1 个字符开始与其后的每字符作比较, 如果第 1 个字符的字符大小比第 i ($i = 2, 3, 4, \dots$) 个字符的字符大小小, 则用前 π 删除操作删去 S 的前 $i - 1$ 个字符, 得到新的 S ; 从新的 S 的第 1, 2 个字符开始与其后每隔两个字符作比较, 如果第 1, 2

个字符的字符大小总和比其后的第 $2i-1, 2i$ ($i = 2, 3, 4, \dots$) 个字符大小之和, 则用前 π 删除操作删去 S 的前 $2i-2$ 个字符, 得到新的 S ; 如此反复再用 $3, 4, \dots$ 个字符作比较得到最后的 S . 在开关变换器的运行过程中, 开关模块比较大的 (如 7 和 6 等) 总会优先出现, 因为只有它们中才包含着储存能量的开关模式. 所以前 π 删除操作后 S 还是会包含着足够数量的字符量, 对算法复杂度的求解无影响. 将最后得到的 S 的字符序列重新定义为 $B_0, B_1, B_2, \dots, B_r, \dots$, 设 ε 是由 S 的前 r 个字符 B_0, B_1, \dots, B_r 组成的字符串, $\varepsilon = B_0B_1B_2 \dots B_r$, θ 是在后面新加的字符串或字符并摘自 S 的第 $r+1$ 个字符 B_{r+1} , 则将组成新的字符串

$$\varepsilon\theta = B_0B_1B_2 \dots B_rB_{r+1}. \quad (6)$$

对 $\varepsilon\theta$ 进行后 π 删除操作得到 $\varepsilon\theta\pi$. 令 $A(\varepsilon\theta\pi)$ 表示 $\varepsilon\theta\pi$ 中所有不同子字符串的集合. 如果 θ 与 $\varepsilon\theta\pi$ 中的全部子字符串都不相同, 即 $\theta \notin A(\varepsilon\theta\pi)$, 则称 θ 为添加, 添加时 θ 向后再取一个字符或字符串替代原来的 θ , 即 $\theta = B_{r+2}$. 同时, 在 ε 中加入原来的 θ , 并在两者中用符号 \cdot 隔开, 形成新子字符串, 然后重复以上步骤; 如果 θ 与 $\varepsilon\theta\pi$ 中某一个子字符串相同, 即 $\theta \in A(\varepsilon\theta\pi)$, 则称 θ 为复制, 复制时 θ 向后追加一个字符或字符串, 即 $\theta = B_{r+1}B_{r+2}$, 然后重复以上步骤; 如果 θ 仍然可以从 $\varepsilon\theta\pi$ 的某个子串复制得到, 则再考虑 $\theta = B_{r+1}B_{r+2}B_{r+3}$ 并重复上述操作. 可见, 经过上述步骤后, 符号时间序列 S 被符号 \cdot 分割为多个子字符串, 子字符串的个数称为符号时间序列 S 的 L-Z 复杂度 C . 针对开关模块作为符号代表复杂性不同的特点, 令由符号 \cdot 分割而成的不同子字符串中字符大小最大的字符作为该子字符串的加权系数, 并将各个子字符串的权系数相加称为系统的带权 L-Z 复杂度 C_w . 因此符号 \cdot 将符号时间序列分割成 C 个不同的子字符串, 设第 j 个子字符串的最大符号大小为 $B_{j \max}$, 则 S 的带权 L-Z 复杂度为

$$C_w = B_{1 \max} + B_{2 \max} + B_{3 \max} + \dots + B_{j \max} + \dots \quad (7)$$

对于符号时间序列 $S = 4747474 \dots$ 的带权 L-Z 复杂度可由以下步骤得到:

1) 先将 S 进行一系列的前 π 删除操作, 得到新的 $S = 74747474 \dots$; 2) 取 $\varepsilon = B_0 = 7$, $\theta = B_1 = 4$, $\varepsilon\theta = 74$, $\varepsilon\theta\pi = 7$, θ 不是 $\varepsilon\theta\pi$ 的子字符串, 即 $\theta \notin A(\varepsilon\theta\pi)$, 则 $\varepsilon\theta = 7 \cdot 4$; 3) $\varepsilon = B_0B_1 = 74$, $\theta = B_2 = 7$, $\varepsilon\theta = 747$, $\varepsilon\theta\pi = 74$, θ 为 $\varepsilon\theta\pi$ 的子

字符串, 即 $\theta \in A(\varepsilon\theta\pi)$, θ 是复制, $\varepsilon\theta = 7 \cdot 4 \cdot 7$; 4) $\varepsilon = B_0B_1 = 74$, $\theta = B_2B_3 = 74$, $\varepsilon\theta = 7474$, $\varepsilon\theta\pi = 747$, θ 为 $\varepsilon\theta\pi$ 的子字符串, 即 $\theta \in A(\varepsilon\theta\pi)$, θ 是复制, $\varepsilon\theta = 7 \cdot 4 \cdot 74$; 5) 以后几步都为重复 2) 和 3), 即都是复制, 得到 $S = 7 \cdot 4 \cdot 74747474 \dots$; 6) 整个符号时间序列被分为 3 段. 则 $C = 3$, $B_{1 \max} = 7$, $B_{2 \max} = 4$ 和 $B_{3 \max} = 7$. 所以 $C_w = 7+4+7 = 18$.

在 DC-DC 开关变换中, 带权 L-Z 复杂度是为了描述分段光滑系统运行过程中每个开关周期内开关状态序列变更的快慢程度和非线性程度而提出的. 带权 L-Z 复杂度越大, 说明系统的开关状态序列变更得越快, 开关序列新模式越多, 开关序列的重复性越差, 变换器运转的周期性能越弱, 非线性程度越强. 相反, 如果带权 L-Z 复杂度越小, 开关序列新模式越少, 开关序列的重复性能越好, 变换器运转的周期性越强, 非线性程度越弱. 因此, 计算 DC-DC 开关变换器的带权 L-Z 复杂度能够描述出系统的状态发生变化的情况, 可以用带权 L-Z 复杂度来描述 DC-DC 开关变换器分段光滑动力系统状态随时间的变化情况和非线性程度. 不过, 与 L-Z 复杂度相同, 这个描述虽然是从数量上进行分析, 但此数量并不是复杂度的确定值, 因此不能做定量描述, 只能做较为清晰的定性描述. 从稳定性方面看, 如果开关序列变更频繁, 变换器输出电压中纹波电压包含的谐波数就会增多, 系统就越不稳定, 反之亦然. 因此, 带权 L-Z 复杂度也可作为 DC-DC 开关变换器系统稳定程度的判别依据.

4 电流反馈型 buck 变换器带权 L-Z 复杂度分析

运用带权 L-Z 复杂度对电流反馈型 buck 变换器 (如图 5 所示) 进行分析, 此电路具体的控制分析可参考文献 [17]. 图 5 中 V_c 为电容电压, Q 为触发信号, I_{ref} 为参考电流. 由文献 [17] 可知, 电感电流 i_L 的状态可以监测系统开关器件的状态, 系统在开关模式 (S, D) = (on, off) 时, i_L 上升; 系统在开关模式 (S, D) = (off, on) 时, i_L 下降; 系统在开关模式 (S, D) = (off, off) 时, $i_L = 0$. 运用此电路的控制特性并利用电感电流与开关模式序列的关系可得如图 6 所示的电流反馈性 buck 变换器的三种开关模块 4, 6 和 7. 与参考文献 [17] 相同, 以 I_{ref} 为分岔参数, 其他电路参数为 $E = 20 \text{ V}$, $L = 3.3 \text{ mH}$, $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$, $R = 19 \text{ }\Omega$, 时钟脉冲的周期 $T = 400 \text{ }\mu\text{s}$ 作数值仿真, 监测每个开关周期的

开关模块并去掉瞬态过程后, 取 100 个周期的开关模块作为系统的符号时间序列. 然后根据带权 L-Z 复杂度的算法和 (4) 式求系统的 C_w , 得到结果如图 7 所示.

从图 7 可以看出, 参考电流 $I_{ref} \in (0.15 \text{ A}, 0.2779 \text{ A})$ 时, 系统的带权 L-Z 复杂度为 $C_w = 7 + 7 = 14$, 说明 I_{ref} 在此范围内系统处于开关模块为 7 的周期一状态. 在 $I_{ref} = 0.2779 \text{ A}$ 处, C_w 从 14 减少为 12, 说明分段光滑系统发生了边界碰撞现象, 由开关模块为 7 的周期一碰撞进入开关模块为 6 的周期一. 并且在 $I_{ref} \in (0.2779 \text{ A}, 0.9007 \text{ A})$ 的范围内系统都处于开关模块 6 的周期一中. 在 $I_{ref} \in (0.9007 \text{ A}, 1.1578 \text{ A})$ 的范围内, 带权 L-Z 复杂度从 $C_w = 6 + 6 = 12$ 上升到 $C_w = 7 + 6 + 7 = 20$, 说明系统在 $I_{ref} = 0.9007 \text{ A}$ 处进入由开关模块 7 和 6 共同组成的周期二中. 随着 I_{ref} 的增大, 系统的 C_w 在 $I_{ref} = 1.1578 \text{ A}$ 处减小为 18, 说明系统进入由开关模块 7 和 4 组成的周期二中. 在 $I_{ref} \in (1.1947 \text{ A}, 1.2625 \text{ A})$ 的范围内, $S = 7 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 47 \cdot 46474 \cdot \dots$ 和 $C_w = 7 + 4 + 6 + 7 + 7 = 31$

说明系统处于开关模块序列为 $7 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ 的周期四状态中. 在 $I_{ref} = 1.2625 \text{ A}$ 之后, 系统的带权 L-Z 复杂越来越大, 且处于无规则状态, 说明系统已经进入混沌状态. 因此, 带权 L-Z 复杂度能很好地表现出系统变化的非线性行为和运转的复杂程度, 这与文献 [17] 所得的实验结果相同.

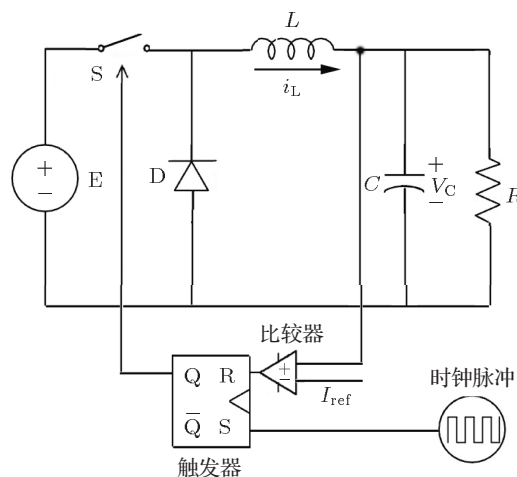


图 5 电流反馈型 buck 变换器

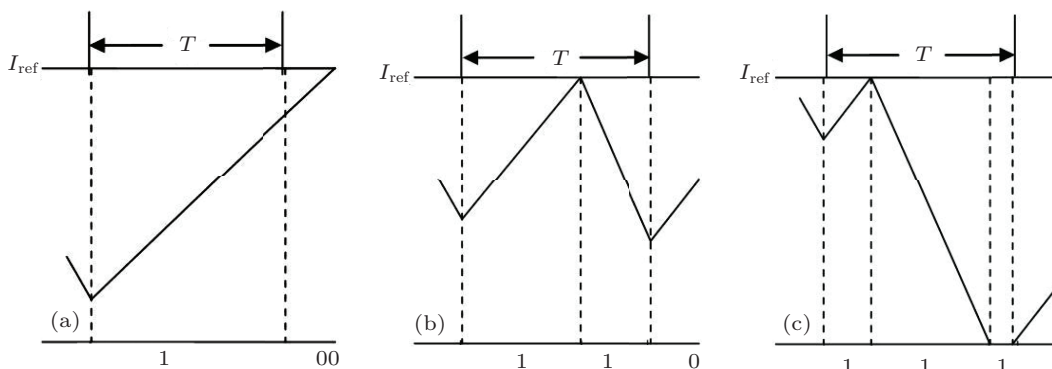


图 6 电流反馈型 buck 变换器的三种开关模块 (a) $B = (100)_2 = 4$; (b) $B = (110)_2 = 6$; (c) $B = (111)_2 = 7$

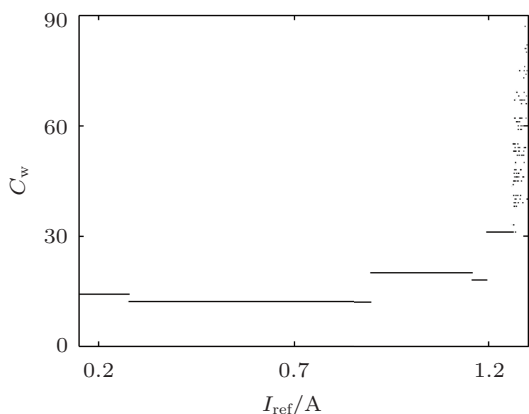


图 7 以 I_{ref} 为参数的电流反馈型 buck 变换器带权 L-Z 复杂度

为了具体说明带权 L-Z 复杂度对变换器工作复杂程度所具有的较强定性分析能力, 下面用图 7 所分析的 I_{ref} 的典型数值 ($I_{ref} = 0.2, 0.8, 1, 1.16, 1.2, 1.3 \text{ A}$) 从系统的电感电流时域波形 (图 8) 中分析变换器运转的复杂性和非线性. 根据时域波形图 8 和电感电流与开关模式的关系可知, 当 $I_{ref} = 0.2 \text{ A}$ 时, 系统只需一个开关周期时间便可完成最短重复开关模式序列 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow (\text{S}, D) = (\text{off}, \text{on}) \rightarrow (\text{S}, D) = (\text{off}, \text{off})$, 变换器的运转有较强的规律性和较好的稳定性. 当 $I_{ref} = 0.8 \text{ A}$ 时, 系统仍只需一个开关周期时间完成最短重复开关模式序列 $(S, D) = (\text{on}, \text{off}) \rightarrow (\text{S}, D) = (\text{off}, \text{on})$, 此时变换器重复开关动作最少, 规律性和稳定性都

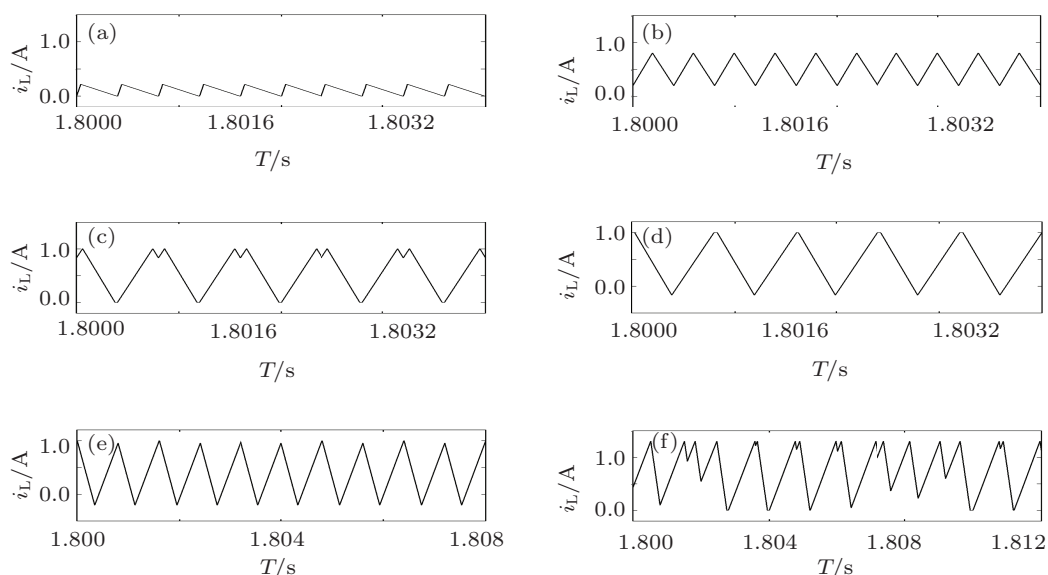


图 8 电感电流 i_L 时域波形图 (a) $I_{ref} = 0.2$ A; (b) $I_{ref} = 0.8$ A; (c) $I_{ref} = 1$ A; (d) $I_{ref} = 1.16$ A; (e) $I_{ref} = 1.2$ A; (f) $I_{ref} = 1.3$ A

达到最强状态. 当 $I_{ref} = 1$ A 和 $I_{ref} = 1.16$ A 时, 系统都需要两个开关周期时间分别完成最短重复开关模式序列 $(S,D) = (on,off) \rightarrow (S,D)=(off,on) \rightarrow (S,D)=(off,off) \rightarrow (S,D) = (on,off) \rightarrow (S,D)=(off,on)$ 和 $(S,D)=(on,off) \rightarrow (S,D) = (off,on) \rightarrow (S,D)=(off,off) \rightarrow (S,D)=(on,off)$, 并且前者完成序列的开关模式个数比后者大, 这在带权 L-Z 复杂度中都得到体现. 变换器在此两种状态下运转的规律性都比在 $I_{ref} = 0.2$ A 和 $I_{ref} = 0.8$ A 时弱, 而且复杂程度都有所增加. 当 $I_{ref} = 1.2$ A 时, 系统需要四个开关周期时间才能完成一个完整的开关模式序列, 变换器的规律性和稳定性都变得更弱而复杂性却有所增加. 当 $I_{ref} = 1.3$ A 时, 变换器的运转周期和开关模式序列都无规律可寻, 复杂程度最强, 系统处于混沌状态. 因此, 变换器在各种状态下的带权 L-Z 复杂度非常清晰地反映了分段光滑系统的动力学

特性. 带权 L-Z 复杂度较低时, 系统运转的重复开关模式序列较少, 规律性和周期性都较强; 带权 L-Z 复杂度较大时, 系统运转的重复开关模式序列较多, 规律性和周期性较弱, 这将能定性分析系统运转的复杂性和非线性程度.

图 9 和表 1 分别给出了图 8 中 I_{ref} 典型值的电容电压 V_c 纹波的傅里叶变换频谱和谐波分析, 其中表 1 中的 $f_0 = 1/T = 2500$ kHz 为变换器时钟脉冲的开关频率. 从图 9 和表 1 可知, 随着 C_w 的增大, 变换器的谐波数不断增多, 在含有相同谐波数的系统状态, C_w 大的其谐波幅值在纹波中所含的比例也大. 当 $I_{ref} = 1.3$ A 时, 谐波频率为 $0 \rightarrow +\infty$, 说明系统进入具有连续频谱的混沌状态. 谐波数的增加说明系统的稳定性能降低, 所以带权 L-Z 复杂度也能定性说明变换器的稳定性, C_w 越大稳定性越低, 越小稳定性越高.

表 1 I_{ref} 典型值电容电压纹波谐波分析

I_{ref}/A	C_w	纹波基波频率	谐波频率	谐波幅值/纹波幅值
0.20	14	f_0	$nf_0 (n = 1, 2, 3, \dots)$	0.5512
0.80	12	f_0	$nf_0 (n = 1, 2, 3, \dots)$	0.4854
1.00	20	$f_0/2$	$nf_0/2 (n = 1, 2, 3, \dots)$	0.4954
1.16	18	$f_0/2$	$nf_0/2 (n = 1, 2, 3, \dots)$	0.4864
1.20	31	$f_0/2$	$nf_0/4 (n = 1, 2, 3, \dots)$ 且 $n \neq 2$	0.5053
1.30	112	$f_0/2$	$0 \rightarrow +\infty$	0.8379

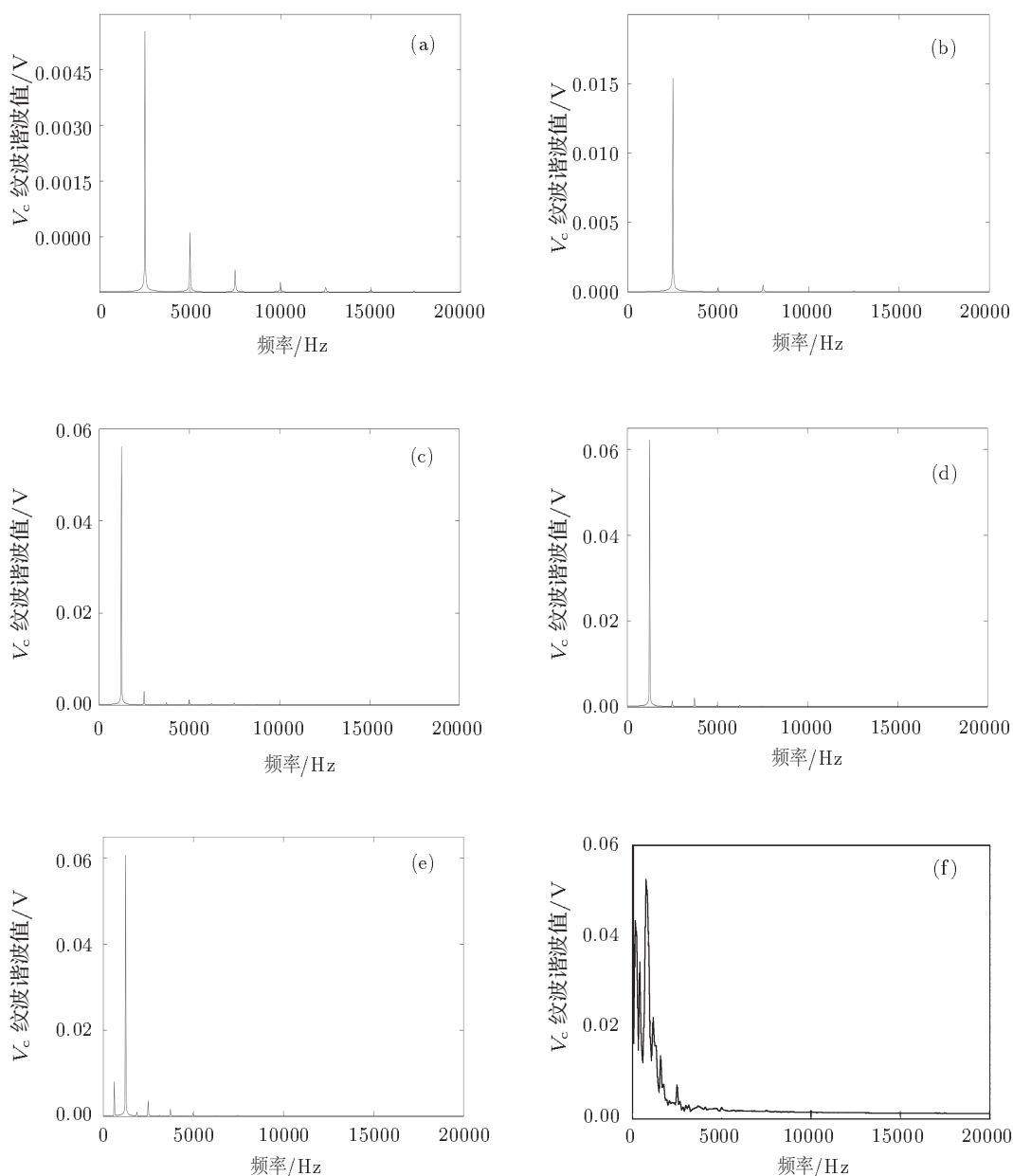


图9 电容电压 V_c 纹波的快速傅里叶频谱 (a) $I_{ref} = 0.2\text{ A}$; (b) $I_{ref} = 0.8\text{ A}$; (c) $I_{ref} = 1\text{ A}$; (d) $I_{ref} = 1.16\text{ A}$; (e) $I_{ref} = 1.2\text{ A}$; (f) $I_{ref} = 1.3\text{ A}$

5 结论

本文提出的新型开关模块概念首次量化了DC-DC开关变换器分段光滑系统在单个开关周期中的复杂程度. 开关模块数越小, 参与变换器运转的器件越少, 系统出故障的概率越低, 反之亦然. 基于开关模块建立的系统变量符号时间序列的带权L-Z复杂度较为清楚地反映了变换器运转的特征和工作状态的稳定性、复杂性: 带权L-Z复杂度值大, 说明变换器的运转复杂重复性能低, 稳定

性较弱; 带权L-Z复杂度值小, 说明变换器周期性能强重复性能高, 稳定性强. 电流反馈型buck变换器电感电流的时域波形和电容电压的纹波谐波分析充分说明了带权L-Z复杂度对DC-DC开关变换器分段光滑系统的非线性行为具有较强的定性分析能力. 符号时间序列易于通过监测变换器的开关状态获取, 而且带权L-Z复杂度计算方法简单易行, 因此在变换器的实际运行过程中运用此方法将有助于工程师定性分析系统的复杂性、稳定性和非线性, 从而更好地为工程技术服务.

- [1] Banerjee S, George C V 2001 *Nonlinear Phenomena in Power Electronics* (IEEE press) p4
- [2] Iu H H C, Tse C K 2000 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundam. Theory Appl.* **47** 913
- [3] Yang R, Zhang B, Chu L L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2770 (in Chinese) [杨汝, 张波, 褚利丽 2008 物理学报 **57** 2770]
- [4] Kaspar F, Schuster H G 1987 *Phys. Rev. A* **36** 842
- [5] Liu B Z, Peng J H 2004 *Nonlinear Dynamics* (Beijing: Higher Education Press) p430 (in Chinese) [刘秉正, 彭建华 2004 非线性动力学 (北京: 高等教育出版社) 第 430 页]
- [6] Zhu Y H, Dong Y J 2001 *Acta Math. Sci. A* **21** 527 (in Chinese) [朱勇华, 董亚鹏 2001 数学物理学报 A **21** 527]
- [7] Hou W, Feng G L, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3940 (in Chinese) [侯威, 封国林, 董文杰 2005 物理学报 **54** 3940]
- [8] Liu X F, Yu W L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2587 (in Chinese) [刘小峰, 俞文莉 2008 物理学报 **57** 2587]
- [9] Lempel A, Ziv J 1976 *IEEE Trans. Inform. Theory* **22** 75
- [10] Yang R, Zhang B, Zhao S B, Lao Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3756 (in Chinese) [杨汝, 张波, 赵寿柏, 劳裕锦 2010 物理学报 **59** 3756]
- [11] Tse C K 1994 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundam. Theory Appl.* **41** 16
- [12] Lü J H, Chen G R, Yu X H, Leung H 2004 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Reg. Papers* **51** 2476
- [13] Lü J H, Yu S M, Leung H, Chen G R 2006 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Reg. Papers* **53** 149
- [14] Lü J H, Chen G R 2006 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **16** 775
- [15] Lü J H, Han F L, Yu X H, Chen G R 2004 *Automatica* **40** 1677
- [16] Xie F, Yang R, Zhang B 2011 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Reg. Papers* **58** 2269
- [17] Xie F, Yang R, Zhang B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8393 (in Chinese) [谢帆, 杨汝, 张波 2010 物理学报 **59** 8393]
- [18] Tse C K, Dai D 2005 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **15** 2263
- [19] Dai D, Tse C K, Ma X 2005 *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Reg. Papers* **52** 1632
- [20] Dai D, Tse C K 2004 *International Workshop on Nonlinear Circuit Signal Process* Waikiki, USA, March 5–7, 2004 p519

Analysis of weight Lempel-Ziv complexity in piecewise smooth systems of DC-DC switching converters*

Xie Fan^{1)†} Yang Ru²⁾ Zhang Bo¹⁾

1) (*School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

2) (*School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China*)

(Received 13 August 2011; revised manuscript received 27 October 2011)

Abstract

A novel concept of switching block is presented via detecting the switching behavior of each switching period in piecewise smooth system of DC-DC switching converter, and logical arithmetic method of computer is used to obtain decimal system from binary system, so complex degree of the system during one switching period is quantized as switching block and the symbolic time sequence of the piece smooth system is established. Weight Lempel-Ziv (L-Z) complexity is derived based on the L-Z complexity and the symbolic time sequence, and the qualitative analysis of nonlinear and complex degree in piecewise smooth system from symbolic time sequence with single variable is carried out. The motion rule and the dynamics structure of the whole system are revealed. Finally, The present current mode controlled buck converter is studied as an example to establish symbolic time sequence and to illustrate the applications of weight L-Z complexity.

Keywords: DC-DC switching converter, switching block, symbolic time sequence, weight Lempel-Ziv complexity

PACS: 05.45.-a, 89.75.-k, 84.30.Jc

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50937001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50777009).

† E-mail: 263743433@qq.com