

## 傅里叶描述符法提取DC-DC变换器信号特征值

钟 洁, 于盛林, 刘守生

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

**【摘要】**对DC-DC变换器进行有效的反馈控制,避免进入混沌态的前提是能根据变换器输出信号的特性,对变换器的工作行为做出正确的判断,并采取相应的控制措施。该文以PWM型BUCK变换器为研究对象,对其在不同电路参数下的输出信号进行分析研究,提出并证明用傅里叶描述符法提取输出信号特征值来作为判断变换器工作行为的依据。为实现用神经网络对变换器工作行为进行智能化监控奠定了基础。

**关键词** DC-DC变换器; 周期轨道;  $v-i$ 相空间图; 傅里叶描述符  
**中图分类号** TM46 **文献标识码** A

## Extraction of Signal Characteristics of DC-DC Converter Based on Fourier Descriptor

ZHONG Jie, YU Sheng-lin, LIU Shou-sheng

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016)

**Abstract** The output signal of the PWM BUCK converter under different circuit parameters has been analyzed. The Fourier descriptor method to extract output signals characteristics is put forward to identify and classify the behavior of the DC-DC converter. This method shows a way to watch and control DC-DC converter intelligently by using neural network.

**Key words** DC-DC converter; periodic orbits;  $v-i$  phase space; Fourier descriptor

DC-DC变换器是一个强非线性系统,电路参数的变化可使系统工作行为发生改变,输出信号不稳定,因此必须对变换器进行有效的控制,有关此方面的研究较多。如DC-DC变换器传递函数比例因子自调整的模糊控制方法<sup>[1]</sup>;建立双线性模型应用Lyapunov方法对DC-DC变换器采用状态反馈控制<sup>[2]</sup>。它们的控制目标仅在于变换器的输出信号,对变换器处于何种工作状态并不关心。研究发现DC-DC变换器在某些特定的参数下系统工作行为可从稳态进入混沌态,输出信号从周期-1经历一系列的倍周期分岔进入混沌态<sup>[3-4]</sup>。而对变换器的仿真、实验结果表明:进入混沌态的变换器,其输出性能处于一种恶化趋势,输出纹波电压峰值升高达到输出平均电压的10%。近几年来,对DC-DC变换器混沌行为控制的研究也不少,如采用参数扰动法及改变开关动作时间来控制混沌行为<sup>[5]</sup>,其研究目的在于DC-DC变换器出现混沌现象后,设法使之脱离混沌态进入稳态。但如果变换器在工作中其行为能被监控并及时识别、判断,就能采取更加有效的反馈控制,避免系统进入混沌态。输出信号得到有效控制,也提高了变换器的工作效率。要实现对变换器的控制,首先必须对变换器输出信号进行检测、识别从而判断变换器的工作行为,而信号识别的关键是能否正确提取信号特征值。目前有关信号特征值提取的方法很多,如采用自适应权向量法提取信号特征值<sup>[6]</sup>;基于小波变换提取信号特征值等<sup>[7]</sup>。本文以如何能正确提取DC-DC变换器输出信号特征值为研究目标,对变换器在不同参数下的输出信号进行了分析、研究。

### 1 DC-DC变换器输出信号的分析

以脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)型控制的Buck变换器为研究对象,在稳态情况下,DC-DC

收稿日期:2003-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59677021)

作者简介:钟洁(1968-),女,博士,主要从事混沌型DC/DC变换器,数字信号处理方面的研究。

变换器输出电压含有周期性纹波, 在  $v-i$  相空间上表现为存在周期性轨道<sup>[4]</sup>, 即对于任意  $N \geq 1$  ( $N$  为正整数), 如果系统满足:

$$\begin{cases} v(NT) = v(0) \\ i(NT) = i(0) \end{cases} \quad (1)$$

那么, 在  $v-i$  相空间图上就表现为系统具有一个周期- $N$  的轨道, 即系统从初始状态 ( $v_0 = v(t_0), i_0 = i(t_0)$ ) 出发, 经过  $N$  个周期, 状态轨迹又回到初始状态。  $N$  是满足式(1)的最小正整数。

当电路中元件参数由于外在的原因发生变化, 变换器的工作行为会发生相应的改变, 如滤波电容的减小或输入电压的增加都会导致变换器的输出电压经历一系列的倍周期分叉, 由稳态进入混沌态。以输入电压的改变为例, 图1的输出电压分叉图充分说明了这一现象: 输出电压随着输入电压增加, 经历了一系列的倍周期分叉, 周期-1, 周期-4, 周期-8, ... 直至进入混沌。表现在  $v-i$  相空间图上为一系列不同形状的周期轨道, 如图2所示。

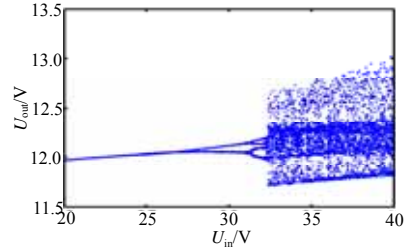


图1 输出电压分叉图

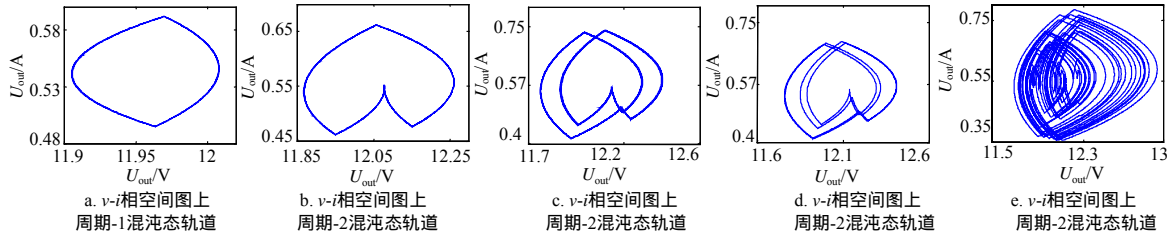


图2  $v-i$ 相空间图上周期-1,-2, -4, -8,混沌态轨道( $U_{in}$ 分别取值为20 V, 28 V, 32 V, 32.35 V, 40 V)

从图2可知, 系统进入混沌态前, 输出电压皆为周期性波形, 表现在  $v-i$  相空间上为具有周期性的轨道, 且随着周期数的增加, 周期轨道的形状发生变化。因此周期轨道的形状与系统的工作行为构成了一个映射关系。对周期轨道信号的识别, 可帮助判断变换器的工作行为, 及时有效地控制变换器, 避免进入混沌态。

## 2 采用傅里叶描述符法提取信号特征值

DC-DC变换器输出信号进入混沌态前具有周期性, 在  $v-i$  相空间上表现为具有周期性的轨道。因此, 对于周期轨道边界上某一固定的起始点, 沿边界曲线上的一个起始点的坐标变化就是一个周期函数, 通过规范化, 该周期函数可展开为傅里叶级数。傅里叶级数中的一系列系数与边界曲线形状直接有关, 可作为形状的描述。当取的系数从低阶到高阶足够多时, 可将形状信息完全提取出来。反之通过这些系数还可重构图形, 这样傅里叶系数与曲线之间就建立了一个映射关系。

对上述论点进行证明: 设有一个闭合曲线, 如图3所示, 其复数曲线函数:

$$u(l) = x(l) + jy(l) \quad (2)$$

式中  $l$  为从给定起始点  $p_0$  到曲线上任一点  $p$  的弧长;  $x(l), y(l)$  为  $p$  点的坐标。设曲线全长为  $L$ , 则:

$$u(l + nL) = u(l), \quad n = \dots -1, 0, 1, 2 \dots \quad (3)$$

式(3)表明, 复数函数  $u(l)$  是一个周期为  $L$  的周期函数。因此  $u(l)$  可以扩展为傅里叶级数:

$$u(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp[(j2\pi nl) / L] \quad (4)$$

式中

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^L u(l) \exp[-j2\pi nl / L] dl \quad (5)$$

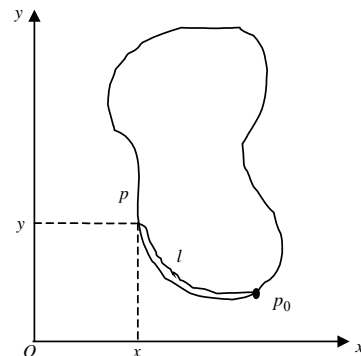


图3 闭合曲线

所考虑的曲线为平滑的，系数  $C_n$  当  $n$  增加时会迅速以  $1/n^2$  的速度衰减，因此式(4)可近似为有限级数<sup>[8]</sup>：

$$u(l) = \sum_{n=-M}^M C_n \exp[(j2\pi nl)/L] \quad (6)$$

实际上，函数  $u(l)$  是被采样的，可用离散点来表示。所以用  $M$  多边形近似代替曲线，如图4所示， $V_0, V_1, \dots, V_{m-1}$  为其顶点，这样可以求傅里叶系数<sup>[8]</sup>

$$C_n = \frac{L}{4\pi^2 n^2} \sum_{k=1}^m (b_{k-1} - b_k) \exp\left(\frac{j2\pi nl_k}{L}\right) \quad (7)$$

式中  $l_k = \sum_{i=1}^k |V_i - V_{i-1}|$ ； $b_k = (V_{k+1} - V_k) / (|V_{k+1} - V_k|)$ ； $k > 0$ ； $l_0 = 0$ 。

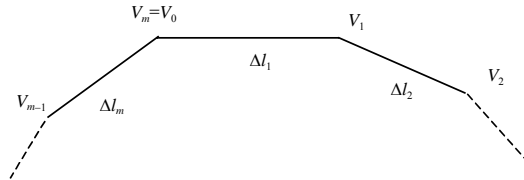


图4 用多边形接近光滑曲线

复系数  $C_n$  随着曲线的转换和起始点的不同而不同。对于DC-DC变换器，在某些情况下，电路参数的变化还不足以改变其工作行为，只是输出信号在数值上发生了变化，输出信号的变化规律没有发生变化，表现在  $v-i$  相空间图上为周期轨道尺寸放大或缩小了一个比例因素，但其形状没有改变。随着计算机采集数据计时起点的不同，周期轨道上起始点也会发生相应的变化。因此，希望所提取的信号特征值与周期轨道的大小及位置无关， $C_n$  不能作为信号的特征值，傅里叶描述符能满足这一要求。定义傅里叶描述符<sup>[8]</sup>

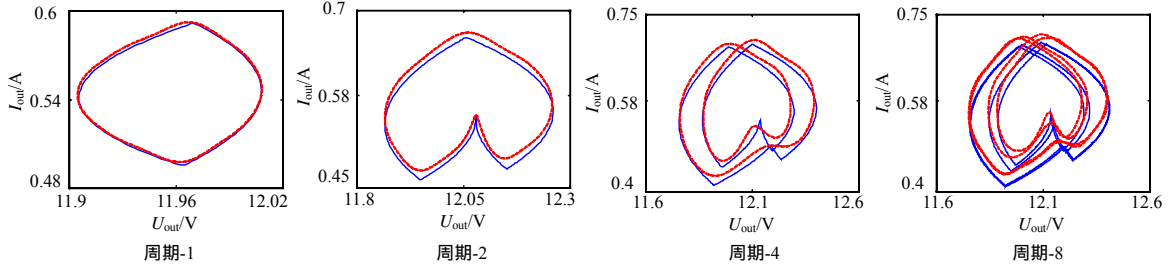
$$p_n = (C_{1+n} C_{1-n}) / C_1^2 \quad n \neq 1 \quad (8)$$

式中  $p_n$  是傅里叶系数  $C_n$  的函数，它只对曲线形状敏感，不随曲线的旋转、平移、尺寸变换、起始点的选择变化而变化。这一点可证明如下：设有2个完全相同的闭合曲线  $r$  和  $r'$ ，且  $r'$  为  $r$  旋转  $\varphi$  后所得，尺寸放大因素为  $S$ ，起始点沿顺时针方向移动  $\tau$  弧长单位，那么可得：

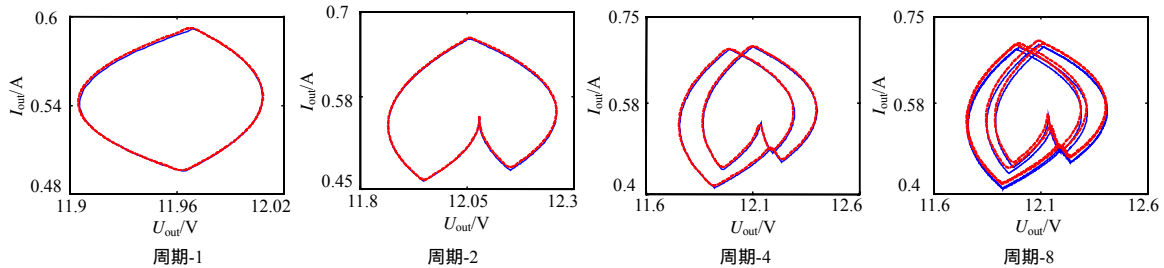
$$C'_n = S \exp(j2\pi n\tau) / L \exp(j\varphi) C_n \quad -\infty < n < \infty, n \neq 0 \quad (9)$$

式中  $C_n$  和  $C'_n$  分别是  $r$  和  $r'$  的傅里叶系数。 $r'$  的傅里叶描述符为：

$$p_n = (C'_{1+n} C'_{1-n}) / C_1'^2 = C_{1+n} S \exp[(j2\pi(1+n)\tau) / L] \exp(j\varphi) C_{1-n} S \exp[(j2\pi(1-n)\tau) / L] \times \exp(j\varphi) / [C_1 S \exp[(j2\pi\tau) / L] \exp(j\varphi)]^2 = (C_{1+n} C_{1-n}) / C_1^2 \quad (10)$$



a. 8个傅里叶描述符



b. 30个傅里叶描述符

图5 由傅里叶系数重构的周期轨道(原曲线 ——，重构曲线 - - - - -)

式(10)表明, 曲线  $r$  和  $r'$  的傅里叶描述符  $p_n$  是相等的, 这就可证明  $p_n$  在曲线旋转、平移、尺寸变换和起始点变化时是不变的。因此可以由傅里叶描述符 ( $n=2, 3, \dots, (N+1)$ ) 组成一个  $N$  维特征矢量作为DC-DC变换器输出信号在  $v-i$  相空间图上周期轨道的特征值。选用傅里叶描述符作为特征向量还有一个优点, 利用式(4), 可由傅里叶系数重构周期轨道。图5所示为分别取8、30个傅里叶描述符时重构的周期-1, 2, 4, 8轨道。

由图5可知重构曲线随着傅里叶系数数目的增加而越来越逼近原曲线。傅里叶描述符数目取30个时, 重构图与原图很逼近。因此, 可以认为这30个傅里叶描述符包含了原信号形状的绝大部分信息, 这样与构成原图的几千上万个数据相比, 大大缩小了数据量。可以将这30个傅里叶描述符作为DC-DC变换器输出信号特征值并据此对变换器工作行为进行识别。

### 3 结论

用傅里叶描述符法提取信号特征值, 只是提取了信号的形状信息与信号大小、位置及旋转无关。DC-DC变换器输出信号周期轨道的形状随着输出信号周期数的不同而不同。因此可以用傅里叶描述符法提取周期轨道特征值用以判断变换器的工作行为, 这样可以大大缩小数据量, 实现用人工神经网络识别DC-DC变换器输出信号, 为今后实现DC-DC变换器智能化控制, 避免系统进入混沌态提供一种新方法。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈维, 李敏远. BUCK变换器的一种新型模糊控制方法[J]. 电气开关, 2000, 38(2): 10-13.
- [2] Chen F, Cai X S. Design of feedback control laws for switching regulators based on the bilinear large signal model[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1990, 5(2): 236-240.
- [3] Deane J H B, Hamill D C. Analysis, simulation and experimental study of chaos in the Buck converter[A]. In: M. Ehsani, Eds. IEEE Power Electronics Specialists Conf.[C]. New York: IEEE Service Center, 1990: 491-498.
- [4] Enric F, Gerard O. Study of chaos in the Buck converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems- : Fundamental Theory and Applications, 1996, 43(1): 13-25.
- [5] Poddar G, Chakrabarty K, Banerjee S. Control of chaos in DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems- :Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(6): 672-676.
- [6] 董大群, 曾南. 从噪声中提取瞬态信号-自适应权向量法[J]. 西北工业大学学报, 1994, 12(3): 347-353.
- [7] 吴森, 张海燕. 超声检测缺陷分类的小波分析与神经网络方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 239-243.
- [8] Udpa S S, Lord W. A Fourier descriptor classification scheme for differential probe signals[J]. Materials Evaluation, 1984, 42(8): 1136-1141.

编辑 漆蓉

· 科研成果介绍 ·

#### 多媒体安全监控系统

多媒体安全监控系统是一个基于PC机和Microsoft Windows 95中文版操作系统的软件产品。其目标是为配合M系列音视频矩阵切换器的使用, 通过计算机与M系列音视频矩阵切换器的通讯, 在计算机上控制各种监控设备, 接收各种监控设备发出的报警信息, 并记录下来。由计算机软件的方便性和灵活性, 为用户提供界面友好、使用方便、功率完善的操作方法。

· 文 争 ·