

文章编号: 1004-4353(2017)03-0247-05

# 基于数值序列关联性的 CCM Boost 变换器非线性特性研究

罗艳, 鲍强, 张淳一, 徐红梅\*

( 延边大学工学院 电子信息通信学科, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 针对电压电流双环反馈控制的电感电流连续型 Boost 变换器模型, 在一定参数范围内利用数值分析和 MATLAB 仿真方法研究了电感、电流反馈系数和输出电压 3 个参数对 Boost 变换器工作状态的影响. 研究表明, 在特定参数下数值分析与系统分岔图所反映的系统特性一致.

**关键词:** Boost 变换器; 双环控制; 数值关联性; 非线性特性

**中图分类号:** TN914.42

**文献标识码:** A

## Nonlinear characteristic study of CCM Boost converter based on numerical sequence correlation

LUO Yan, BAO Qiang, ZHANG Chunyi, XU Hongmei\*

( Department of Electronic and Communication Engineering, College of Engineering,  
Yanbian University, Yanji 133002, China )

**Abstract:** For the inductor current continuous Boost converter model with voltage and current double loop feedback control, the influence of three parameters of inductance, current feedback coefficient and output voltage on the working state of Boost converter is studied by numerical analysis and MATLAB simulation in a certain parameter range. The results show that the numerical analysis is consistent with the system characteristics reflected in the system bifurcation diagram under the specific parameters.

**Keywords:** Boost converter; double loop control; numerical correlation; nonlinear characteristic

## 0 引言

Boost 变换器又称升压变换器, 广泛应用于通信、军事、计算机和仪器仪表等领域<sup>[1]</sup>. Boost 变换器主要由三极管、二极管、电感和电容等元器件组成, 采用 PWM 等控制方式进行工作, 表现出强烈的非线性特性<sup>[2]</sup>. 现有数值分析和实验表明, 开关变换器中存在切分岔<sup>[3]</sup>、低频振荡<sup>[4]</sup>、混沌<sup>[5]</sup>等非线性现象, 这些现象不仅影响开关变换器的正常工作, 甚至影响整个电路系统的稳定性; 因此, 电子工程师们一直在探索 Boost 变换器拓扑结构变换和提高其工作性能的有效控制方法. 文献[6]研究了电压反馈系数  $K$  与 Boost 变换器分岔稳定性的关系, 确定了  $K$  的稳定工作范围. 文献[7]指出了 Buck-Boost 变换器参数变化对不动点失稳情况的影响, 运用仿真和实验两种方法对系统稳定性进行了分析验证, 两种方法所得结果一致. 文献[8]在数值分析的基础上利用参数共振微扰法对系统参数的混沌控制进行了研究, 得到了变换器稳定工作的条件.

在现有研究中,对 CCM Boost 变换器电路参数变化时数据序列与非线性特性之间关联性的分析较少,基于此本文将采用 CCM Boost 变换器的系统分岔图与数值序列关联性分析相结合的方法,研究 Boost 开关变换器参数变化时表现出的非线性动力学特性,为提高开关变换器的稳定性和可靠性提供切实可行的方法.

1 CCM Boost 变换器离散建模

CCM Boost 变换器将输入电流反馈作为内环控制,将输出电压反馈作为外环控制,其原理图如图 1 所示. CCM Boost 电路工作过程可描述为:当  $Q_1$  导通,  $D_5$  截止时,电感  $L_1$  处于充电状态,电容  $C_2$  为负载电路提供能量;当  $Q_1$  截止,  $D_5$  导通时,电感  $L_1$  与输入电压串联,共同向电容  $C_2$  充电且对负载放电.

由图 1 可得系统的离散方程

$$i_{n+1} = \begin{cases} i_n + \frac{u_i - U_o}{L}T, & e_n \in (-\infty, 0]; \\ i_n + \frac{u_i - U_o(1 - e_n)}{L}T, & e_n \in (0, 1); \\ i_n + \frac{u_i}{L}T, & e_n \in [1, +\infty). \end{cases} \quad (1)$$

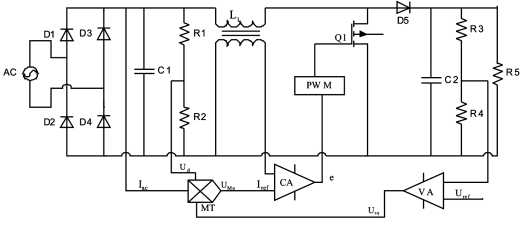


图 1 CCM Boost 电路原理图

根据一阶 Boost 变换器系统收敛稳定性判据  $|di_{n+1}/di_n| < 1$  可知,系统稳定范围为  $0 < K < \frac{2L}{U_o T}$ .

2 数值序列关联性分析

设一维数据序列为  $\{x_n\}$ ,采用滑模块方法取长度为  $k$  的子序列,运用式(2) 计算相邻子序列间的欧式距离值:

$$d_i = \|X_{i+1} - X_i\| = (\sum_{j=0}^{k-1} (x_{i+1+j} - x_{i+j})^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式(2) 中  $i=1, \cdots, n-k, j=0, \cdots, k-1, X_i=\{x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+k-1}\}, X_{i+1}=\{x_{i+1}, x_{i+2}, \cdots, x_{i+k}\}$ . 计算时,首先依次计算各个相邻子序列间欧式距离值  $d_i (i=1, 2, \cdots, n-k)$ ,即将原始数值序列转化为距离值序列,然后再计算距离值序列的均值和标准差. 对于多个一维数据序列产生的距离值序列,运用公式(3) 计算其内部相邻数据间的变化率,运用公式(4) 计算相邻数据变化幅度,以此得到数据内部隐含的动力学特性:

$$p_{r+1} = |d_{r+1} - d_r|/d_r, \quad (3)$$

$$q_{r+1} = |d_{r+1} - d_r|, \quad (4)$$

其中  $r=1, \cdots, m, m$  为相邻距离均值序列的长度. 将计算得到的相邻的变化率和变化幅度组成新的序列,再结合距离均值序列和标准差序列,即可得到非线性系统内部的混沌特性.

3 升压电感对电路的影响

在 CCM Boost 电路工作过程中,升压电感受到温度、频率、噪声等干扰时,其电感值会发生变化,而电感作为升压电路中的重要元件,其储能能力的改变会对整体升压电路产生重大影响. 因此,本文以升压电感  $L$  为变量,得到图 2 所示的升压电感敏感性分岔图,并以此分析升压电感  $L$  对系统混沌行为的影响. 由图 2 可知:① 在放大系数  $K=1.6$  或者  $K=2.5$  时,随着升压电感的减小,系统从稳定状态经过光滑倍周期分岔进入混沌;② 当放大倍数  $K$  从 1.6 增大到 2.5 时,分岔点处的电感值  $L$  逐渐增大,并满足式(2) 所表达的稳定条件.

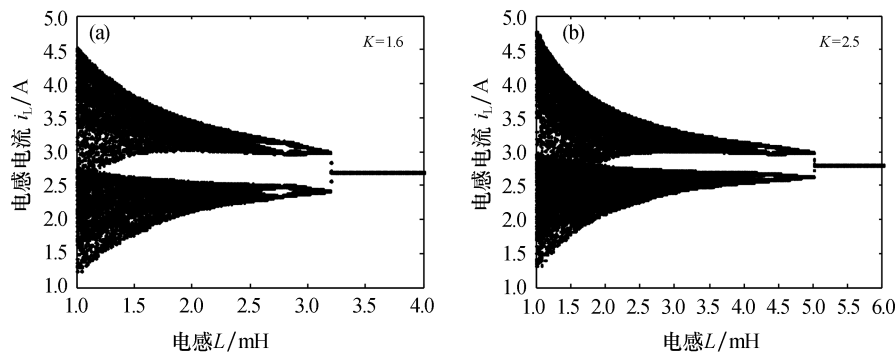


图 2 CCM Boost 电路混沌行为对升压电感敏感性仿真

4 电流放大系数对电路的影响

实验中以电流放大系数  $K$  为变量,其余参数设置如下: $u_i=220\text{ V}$ ,  $I_{\text{ref}}=3\text{ A}$ ,  $i_L=0.1\text{ A}$ ,  $U_o=400\text{ V}$ ,  $T=0.000\text{ 1 s}$ ,  $L=0.002\text{ H}$ .  $\frac{2L}{U_o T}=1$ ,由式(2) 知系统的稳定范围为  $0 < K < 1$ .

将系统参数代入系统离散方程式(1) 对系统进行仿真分析,得到 CCM Boost 变换器电感电流  $i_L$  随放大倍数  $K$  变化的分岔图,如图 3 所示.由图 3 可知:当  $K < 1$  时,每个开关周期内的电感电流值都呈稳定状态,此时系统电感电流  $i_L$  随放大倍数  $K$  的增大而微量增加;当放大系数  $K=1$  时,系统由稳定工作状态进入倍周期分岔状态;当放大系数  $K > 1$  时,电感电流  $i_L$  随着  $K$  的增加而迅速增加,且最终进入混沌.

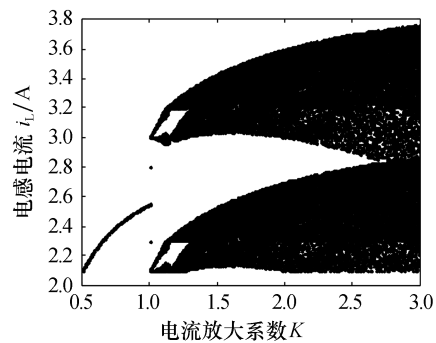


图 3 Boost 电路  $K-i_L$  迭代分岔图

图 4 是 CCM Boost 电路相邻距离序列数值变化的曲线图.由图 4 可知:当  $K=1$  时,数值序列相邻距离的均值发生突变,距离序列标准差接近 0,这表明在  $K=1$  时系统由倍周期分岔迅速进入混沌;在  $K=1.1$  时,数值序列相邻距离的均值接近 0,而标准差略有上升,由对应的迭代分岔图可知该点为周期 4 状态; $K > 1.1$  时,距离序列的均值与标准差均开始上升,表明系统开始进入混沌.此变化过程与 CCM Boost 变换器的分岔图所呈现的结果一致,由此表明可以通过标准差的大小量化混沌状态的强弱.

图 5 为 CCM Boost 变换器相邻距离均值序列中相邻点变化率的曲线图.由图 5 可知:当  $K=1$ ,初始时相邻距离均值序列变化率的初值和变化幅度的初值均大于 0,然后迅速下降,这表明系统快速进入混沌.在  $K=1$  时,相邻点变化率和相邻点变化幅度发生突变,表明系统从稳定状态经倍周期分岔快速进

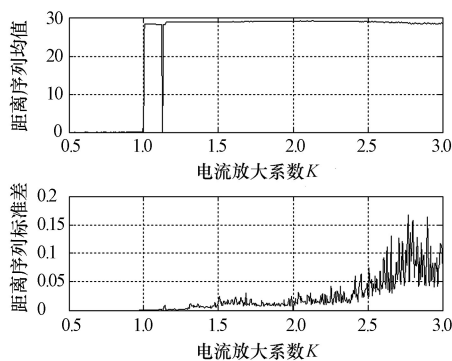


图 4 相邻距离序列数值变化曲线

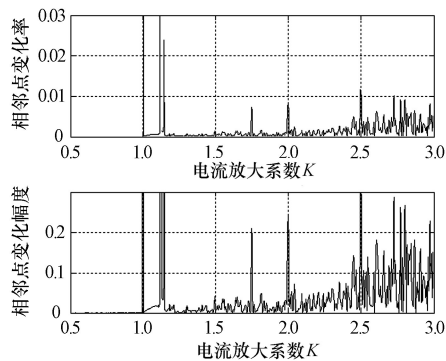


图 5 相邻距离均值序列数值变化曲线

入混沌. 在  $K = 1.1$  时, 收敛为周期为 4 的周期态, 而后直接进入混沌. 当  $K > 1.1$  时, 随着  $K$  值增大, 相邻点幅度发生明显变化, 此变化能够量化系统的混沌特性.

5 输出电压对电路的影响

当电路负载发生变化时, Boost 变换器输出的电压会产生一定的幅度波动, 从而引起电路系统不稳定. 为分析输出电压变化对电路稳定性的影响, 本文分别取 3 个不同  $K$  值( $K = 1.6, 2.0, 2.8$ ), 并设输出电压变化范围为  $220 \sim 1\,200\text{ V}$ , 步长为  $0.2\text{ V}$ , 离散迭代序列长度为 5 000. 去掉暂态不稳定的 500 个数据后, 仿真得到的输出电压与电感电流变化关系的分岔图如图 6 和图 7 所示.

图 6 为  $K = 1.6$  时, 输出电压变化与系统混沌特性之间的关系: ① 当  $U_o$  增大到  $250\text{ V}$  附近时,  $i_L$  经由稳定状态进入分岔状态, 但随着  $U_o$  的增大系统很快进入混沌; ② 当  $U_o = 450\text{ V}$  时, 系统由混沌转为周期 2 的周期态; ③ 当  $U_o$  继续增大时, 电感电流未经过周期分岔, 而是以非光滑方式通过边界碰撞分岔直接进入混沌; ④ 当  $U_o$  达到  $660\text{ V}$  时, 混沌收敛为周期 3 的周期态, 此后继续以边界碰撞分岔进入混沌, 并以此重复, 系统整体表现为周期性的间歇性分岔行为.

图 7(a)、(b) 分别为  $K = 2.0$  和  $K = 2.8$  时系统混沌特性随输出电压变化的特征: ① 当输出电压  $U_o = 220\text{ V}$  时, 系统直接进入混沌; ② 当  $U_o = 330\text{ V}$  时, 系统收敛为周期为 3 的周期态, 然后直接进入混沌; ③ 当  $U_o = 430\text{ V}$  时, 系统收敛为周期为 2 的周期态, 之后进入混沌. 此后系统变化特征与图 6 相似, 由此可知系统通向混沌的道路为: (稳定—边界碰撞分岔—混沌—周期 3)→(边界碰撞分岔—混沌)→(周期 2—边界碰撞分岔—混沌—周期 5)→(边界碰撞分岔—混沌)→(周期 3—边界碰撞分岔—混沌—周期 7), 即出现周期性的间歇性分岔行为.

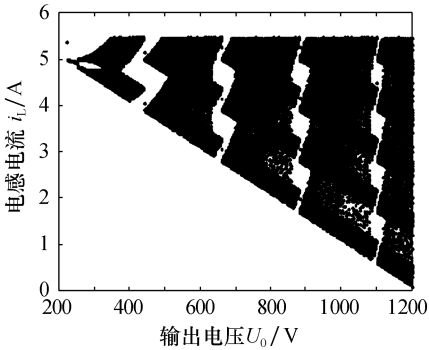


图 6  $K = 1.6$  时 CCM Boost 电路混沌行为对输出电压敏感性的仿真结果

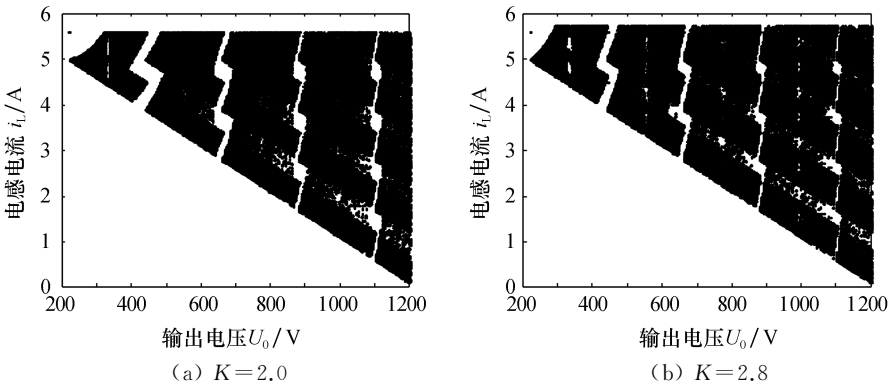


图 7 CCM Boost 电路混沌行为对输出电压敏感性的仿真结果

当  $K = 2.8$  时, CCM Boost 电路相邻距离序列数值表现出依赖性, 如图 8(a) 所示. 由图 8(a) 可知: 相邻距离序列的均值和标准差在输出电压为  $220\text{ V}$  时开始增加, 表明此时系统已经进入不稳定状态; 随着输出电压的增大, 电感电流的不稳定范围逐渐增大, 相邻距离序列的均值和标准差整体呈增加趋势. 在距离序列均值曲线中, 当某点附近发生较为明显的增加时, 标准差的值在图像中的某些特定区域下降明显, 出现一些谷值, 此时对应的系统处于周期 3、周期 5 等周期态.  $v$  距离均值序列相邻点变化曲线, 在相邻点变化率曲线和相邻点变化幅度曲线中, 有较多的峰谷值, 其中谷值点对应的是周期 3、周期 5

等周期特征.

结合图 5、图 7 系统相图和图 4、图 5、图 8 数值序列分析可得,CCM Boost 变换器通向混沌的方式为周期性的间歇性分岔行为,并且可以对该行为进行较好的量化分析.

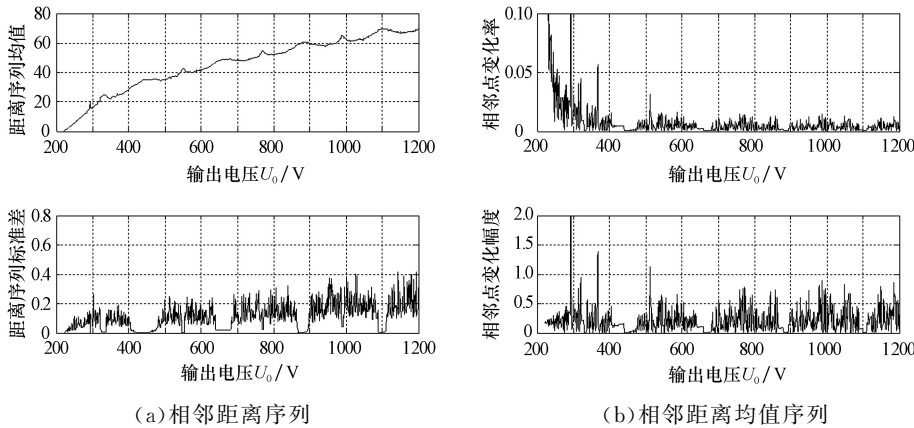


图 8 CCM Boost 电路相邻距离序列数值依赖性分析

## 6 结束语

本文通过数值分析及仿真实验研究了升压电感、电流放大系数和输出电压 3 个参数对 Boost 变换器工作状态的影响.在特定参数范围内,数值分析与系统分岔图所反映的系统特性一致.在本文的研究中,系统参数的取值存在一定的局限性,因此今后将进一步扩大取值范围,以期得到更加准确的实验结果.

## 参考文献:

[1] 曲子君. 电力电子技术在开关电源中的应用研究[J]. 化工管理, 2016(3):129.

[2] 胡维,许亚武,张方樱. 滞环电流控制 Buck 变换器分岔行为机理分析[J]. 广州大学学报, 2015, 14(2):71-75.

[3] 李峰,王广柱,刘汝峰. 模块化多电平矩阵变换器低频控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2):127-133.

[4] 张勇,徐瑞东,李涛,等. 恒功率负载下 DC-DC 双向变换器分岔现象研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(2):61-66.

[5] 张黎明,董戈,汝晓鹏. Buck 开关变换器混沌和分岔现象研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(8):1531-1535.

[6] 张立森,王立志. PWM 型开关电容 DC-DC 变换器的非线性动力学行为研究[J]. 电子学报, 2008, 36(2):266-270.

[7] 王礼辉,陶彩霞,田莉. 多级串联电流型开关电感变换器的非线性现象研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(11):62-67.

[8] 田莉,王礼辉,陶彩霞. 电流型开关电感变换器的混沌及其控制研究[J]. 机车电传动, 2017(4):1-5.