

文章编号: 1004-4353(2015)02-0153-03

电感电流不连续模式 Boost 变换器 多尺度熵分析

徐红梅¹, 刘嘉琪¹, 王奥博²

(1. 延边大学工学院 电子信息通信学科, 吉林 延吉 133002;

2. 哈尔滨工业大学 电子信息工程系, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 提出一种运用多尺度熵分析开关变换器工作特性的方法. 首先给出电感电流不连续模式 Boost 开关变换器的迭代映射函数; 其次通过符号动力学理论得到开关变换器的离散时间序列, 并运用熵理论对开关变换器的符号序列进行分析; 最后通过对比分析得到电感电流不连续模式 Boost 开关变换器的混沌特性.

关键词: Boost 变换器; 多尺度熵; 混沌特性; 符号动力学

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

Multiscale entropy analysis of the discontinuous inductor current mode Boost switching converter

XU Hongmei¹, LIU Jiaqi¹, WANG Aobo²

(1. *Department of Electronic and Communication Engineering, College of Engineering, Yanbian University,*

Yanji 133002, China; 2. Department of Electronic Information Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: The method that using multiscale entropy to analyze the working characteristic of Boost switching converter is proposed. Firstly, we provide iterative mapping function of the discontinuous inductor current mode Boost switch converter; then the discrete time series of the switch converter is obtained through symbolic dynamic theory, and use entropy theory to analyze the symbolic series of switch converter; finally, we obtain the chaos character of the discontinuous inductor current mode Boost switch converter through contrastive analysis.

Key words: Boost converter; multiscale entropy; chaos character; symbolic dynamic

Boost 变换器又称升压变换器, 在低电压、便携式电子产品中得到广泛应用. 在开关电源设计中, 由于 Boost 变换器的功率开关管一端与电源共地, 驱动电路设计更加容易^[1], 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^[2]. 根据 Boost 变换器中电感电流的工作方式, 可将其分为电感电流连续模式 (CCM) 和电感电流不连续工作模式

(DCM). 目前, 关于这两种类型变换器的研究已取得了一些成果, 例如: 文献[3]研究了 Boost 变换器的能量传输模式和输出纹波电压与电感数值大小的关系; 文献[4]对 Boost 变换器中参数斜坡共振控制能力进行了研究, 得出不同共振电压幅值时参数斜坡共振的控制能力及其稳定参数; 文献[5]研究了电感电流连续模式下 Boost 变换器的分数阶建模; 文献[6]研究了电压模式控制下不

收稿日期: 2015-04-22

作者简介: 徐红梅(1975—), 女, 副教授, 研究方向为混沌动力学.

基金项目: 吉林省教育厅科研项目(吉教科合字[2015]第 11 号); 延边大学科技发展项目(延大科合字[2014]第 15 号); 延边大学博士启动基金资助项目(602014093)

连续传导模式 Boost 变换器中的切分岔现象。

近年来,随着开关变换器研究方法的深入,信息论中的相关理论已被运用到变换器控制方法的研究中^[7]。本文提出基于多尺度熵分析 Boost 变换器工作特性的方法:首先通过建立 Boost 变换器处于电感电流不连续状态的模型,然后运用符号动力学理论和滑模块方法得到 Boost 变换器的离散时间序列,并且运用多尺度熵理论分析电感电流不连续模式 Boost 变换器的混沌动力学特性,从而验证了本文所提出方法的正确性和可行性。

1 多尺度熵理论

设一个离散时间序列 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$, 将该时间序列进行尺度变换后,得到新序列:

$$y_j^{(\tau)}=\frac{1}{\tau}\sum_{i=(j-1)\tau+1}^j x(i),$$

(1)

式中 τ 为尺度因子,则进行尺度变换后得到的新时间序列的长度为 n/τ 。当尺度因子 $\tau=1$ 时,新时间序列与原时间序列相同,以下为不同尺度因子时的序列变化:

$$\tau=2\text{ 时},\underbrace{x_1\ x_2}_{y_1}\ \underbrace{x_3\ x_4}_{y_2}\ \cdots\ \underbrace{x_i\ x_{i+1}}_{y_j=\frac{x_i+x_{i+1}}{2}}\ \cdots;$$

$$\tau=3\text{ 时},\underbrace{x_1\ x_2\ x_3}_{y_1}\ \underbrace{x_4\ x_5\ x_6}_{y_2}\ \cdots$$

$$\underbrace{x_{i-1}\ x_i\ x_{i+1}}_{y_j^{(\tau=3)}=\frac{x_{i-1}+x_i+x_{i+1}}{3}}\ \cdots.$$

其中,不同尺度因子 τ 对应的数值序列统计分布情况如下:原数值序列长度为 n ,尺度因子为 τ ,则新数值序列的长度为 $L=N/\tau$,每个数值区间内元素的个数为 $m_i(i=1,2,\cdots,N,N$ 为数值区间的个数),每个数值区间内序列个数的概率为 $p_i=m_i/L$,且有 $\sum_{i=1}^N p_i=1$ 。多尺度熵计算公式如下:

$$\begin{cases} H^{(\tau)}(P)=-\sum_{i=1}^N P(x_i)\log P(x_i); \\ \tau=3,4,5,6,7. \end{cases}$$

(2)

2 DCM Boost 变换器建模

本文利用 Tse^[8] 提出的分析开关变换器的建模方法,对 DCM Boost 变换器进行多尺度熵分析。根据 Boost 变换器原理图 1,设 E 为输入电压,

X 为期望的稳态输出电压, D 为稳态占空比, k 为反馈比例增益,变换器的工作状态可用如下迭代映射方程近似描述:

$$x_{n+1}=f(k,x_n)=\alpha x_n+\frac{\beta h(d_n)^2 E^2}{x_n-E},$$

(3)

其中 x_n 代表第 n 次迭代电感电流为 0 时刻的电容电压,其他参数如下:

$$\alpha=1-\frac{T}{RC}+\frac{T^2}{2R^2C^2},$$

(4)

$$\beta=\frac{T^2}{2LC},$$

(5)

$$h(d_n)=\begin{cases} 0, & d(x_n)<0; \\ 1, & d(x_n)>0; \\ d(x_n), & \text{其他}, \end{cases}$$

(6)

$$d(x_n)=D-k(x_n-X).$$

(7)

变换器中的参数值见表 1。

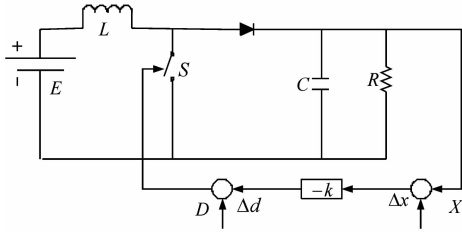


图 1 电压反馈型 DCM Boost 变换器的原理图

表 1 Boost 变换器的参数

参数	数值	参数	数值
开关周期 $T/\mu\text{s}$	333.33	占空比 D	0.287 4
电容 $C/\mu\text{F}$	222	电感 $L/\mu\text{H}$	208
负载 R/Ω	12.5	α	0.887 2
β	1.2		

以反馈比例增益 k 为变量(取 0.01 到 0.14 中的 100 个数),初值 x_0 从 23.7 到 29.8 取值 99 次,得到 DCM Boost 变换器的分岔图,如图 2 所示。

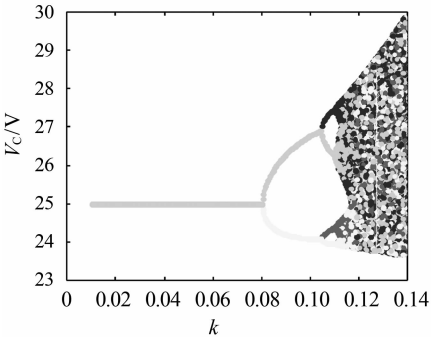


图 2 电压反馈型 DCM Boost 变换器的分岔图

3 DCM Boost 变换器的多尺度熵

设原始数据长度 $L = 256$, 根据式(2) 和式(3), 取相同初值, 反馈比例增益分别取 0.120 3 和 0.131 5, 通过计算可得到对应的序列及多尺度熵值, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出: 随着尺度因子的增大, 序列的多尺度熵值总体呈现下降趋势, 表明序列的复杂度在降低; 当初值和尺度因子相同时, 不同反馈比例增益对应的多尺度熵值明显不同, 而且熵值随着增益的增大而增大, 说明当反馈比例增益增大时, 序列的数值变化范围增大, 进而导致多尺度熵值增大.

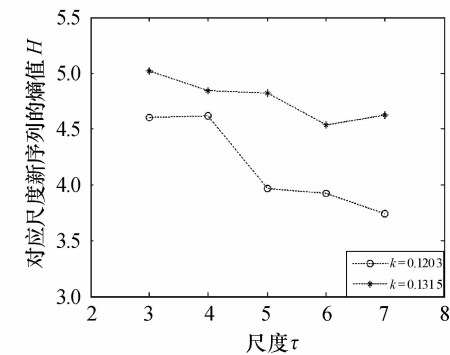


图 3 初值 $x_0=23.7$ 时不同反馈比例增益的多尺度熵

由图 2 可知, 当反馈比例增益 $k=0.120\ 3$ 时变换器已经处于混沌状态, 初值按递增关系取 5 个随机值, 根据式(2) 和式(3) 计算可得到多尺度熵值, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 在反馈比例增益相同时, 对于同一初值, 序列多尺度熵值随着尺度因子的增大总体呈现下降趋势; 当初值取最小值时, 多尺度熵值的变化范围大, 反之, 多尺度熵值的变化范围小. 多尺度熵值随初值的变化规律与混沌系统的初值敏感性相吻合.

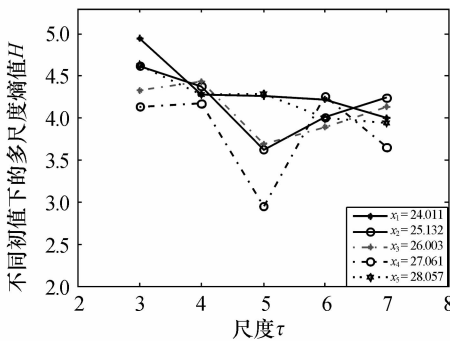


图 4 $k=0.120\ 3$ 时不同初值对应的多尺度熵

当取反馈比例增益 $k=0.131\ 5$ 时, 开关变换器系统处于各态历经的完全混沌状态, 初值取 5 个随机值, 根据式(2) 和式(3) 计算可得到多尺度熵值, 如图 5 所示. 由图 5 可知, 此时的多尺度熵值呈现明显的下降趋势, 而且每个初值对应的多尺度熵值的变化范围明显变小.

综合图 3—图 5 可知: DCM Boost 变换器处于混沌状态时, 不同初值对应不同的多尺度熵值, 但是在相同的反馈比例增益下的不同初值所对应的多尺度熵值的变化范围大致相同, 而且同一初值在不同反馈比例增益下的多尺度熵值范围不同. 根据这一结果, 可以将 DCM Boost 变换器的不同工作状态区分开来, 为变接器的利用和控制提供依据.

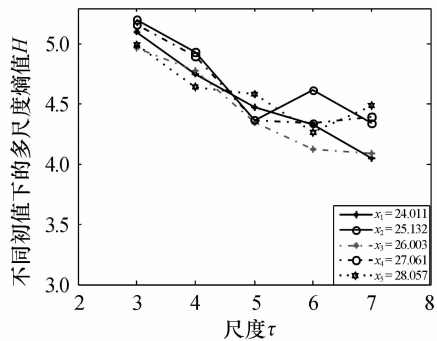


图 5 $k=0.131\ 5$ 时不同初值对应的多尺度熵

4 结束语

本文以电感电流不连续模式的 DCM Boost 变换器为例, 运用多尺度熵理论分析了不同初值、反馈比例增益和变换尺度因子下的多尺度熵值分布规律. 分析结果表明: 多尺度熵值能够反映 DCM Boost 变换器的非线性动力学特性, 从而证明了本文方法的有效性. 将本文结论应用于开关变换器的设计中, 将会提高其可靠性和稳定性.

参考文献:

[1] 张波, 曲颖. 电压反馈型 Boost 变换器 DCM 的精确离散映射及其分岔和混沌现象[J]. 电工技术学报, 2006, 17(3): 43-46.

[2] Wang Xuemei, Zhang Bo, Qiu Dongyuan. The quantitative characterization of symbolic series of a Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(8): 2101-2105.

效应变速率随切削速度的变化趋势. 由图 8 可知, 随着切削速度的增加, 切削温度随之升高. 由图 8 中的虚线可知, 提高切削速度, 应变速率加快, 即工件变形速度加快, 单位时间内的工件变形量加大, 进而变形功也增大, 产生的热量增多, 热量的流失相对减少, 因此热效应及温度效应越发突出; 同时, 因为切屑流速加快, 切屑与刀具前刀面发生激烈的摩擦而产生大量的切削热, 使得切削温度升高.

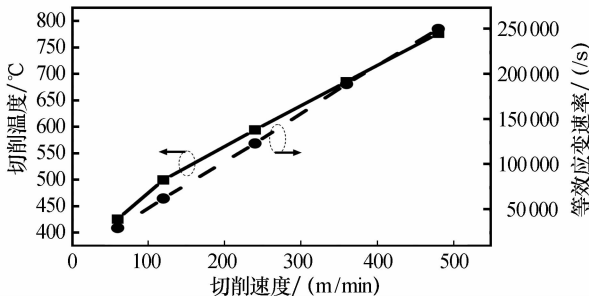


图 8 切削温度、等效应变速率随切削速度的变化

3 结论

本文应用有限元方法建立了 42CrMo 的正交切削有限元模型, 并进行了切削加工的仿真模拟. 仿真结果表明: 在 42CrMo 合金结构钢切削加工过程中, 在起始阶段最大等效应力分布在切削刃处; 当切削加工进入稳定状态时, 最大等效应力由切削刃处逐渐转移到第一变形区. 同时切屑底层的应变持续增加, 当切屑将要离开刀具前刀面时, 应变才得到松弛. 在切削加工过程中, 工件的最高

切削温度位于切削刀上方的刀屑接触面上, 切削速度加快则切削温度及等效应变速率随之上升; 此外, 切削力随刀具前角增大而下降. 本文在有限元分析过程中, 对一些参数及模型进行了简化, 所得结果的精确度与实际切削加工虽然还存在一定的误差, 但本文方法对合金钢等难加工材料的切削加工仍然具有很好的仿真预报功能.

参考文献:

[1] 李春胜, 黄德彬. 金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 252-253.

[2] 黄绍华, 贺凤宝, 张伟, 等. 提高铣刀铣削 42CrMo 寿命的试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 6: 127-129.

[3] 图仕捷, 李宇智, 徐技伟. 42CrMo 合金结构钢的干切削和近干切削研究[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(4): 168-170.

[4] 刘克铭, 刘波, 马壮, 等. 干磨和湿磨对 42CrMo 钢磨削强化的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 65-67.

[5] 朱振国, 李旗号. 切削淬硬合金钢 42CrMo 的 PCBN 刀具磨损机理研究[J]. 工具技术, 2011, 45(7): 26-28.

[6] Arrazola P J, Arriola I, Davies M A. Analysis of the influence of tool type, coatings, and machinability on the thermal fields in orthogonal machining of AISI 4140 steels[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2009, 58: 85-88.

[7] Mathias Agmell, Aylin Ahadi, Jan-Eric Stahl. The link between plasticity parameters and process parameters in orthogonal cutting[J]. 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), 2013, 8: 224-229.

(上接第 155 页)

[3] 刘树林, 刘健, 杨银玲, 等. Boost 变换器的能量传输模式及输出纹波电压分析[J]. 中国机电学报, 2006, 26(5): 119-124.

[4] 程为彬, 郭颖娜, 康思民, 等. Boost 变换器中参数斜坡共振控制能力研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4439-4448.

[5] 王发强, 马西奎. 电感电流连续模式下 Boost 变换器的分数阶建模与仿真分析[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 070506-1-070506-8.

[6] 谢玲玲, 龚仁喜, 卓浩泽, 等. 电压模式控制不连续传导模式 Boost 变换器切分岔研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 058401-1-058401-7.

[7] 程为彬, 康思民, 汪跃龙, 等. 功率因数校正 Boost 变换器中快时标不稳定的形成与参数动态共振[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 020506-1-020506-8.

[8] Tse C K. Flip bifurcation and chaos in three-state Boost switching regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 41(1): 16-23.