

基于 RLS 的 Boost 转换器在线多参数辨识研究

陈 晨, 童乔凌, 闵 闰, 吕 典

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为了消除电感和电容变化对 Boost 转换器控制性能的影响, 提出了一种基于递推最小二乘法 (recursive least squares method, RLS) 的在线多参数辨识算法. 首先介绍了 Boost 转换器在线多参数辨识系统, 通过小幅度改变参考电压为电感和电容在线辨识提供必要的瞬态过程. 然后分析了一个开关周期内 Boost 转换器的电感电压和电容电流特性, 推导出精确的电感和电容辨识模型, 进一步应用 RLS 算法, 得到电感和电容的最优估计方法. 最后对提出的多参数辨识算法进行了仿真验证. 仿真结果表明, 该算法可以在瞬态条件下, 精确快速地估计电感和电容值, 且具有良好的鲁棒性.

关键词: Boost 转换器; 递推最小二乘法; 参数辨识; 数字控制

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)05-0100-04

Study of RLS-Based Online Multiparameter Identification for Boost Converter

CHEN Chen, TONG Qiao-ling, MIN Run, LV Dian

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to eliminate the effect of inductance and capacitance variations on control performance of boost converter, this paper proposed a RLS based online multiparameter identification algorithm. Firstly, the online multiparameter identification system for boost converter was introduced. By changing the reference voltage with small amplitude, an essential transient for online identification of inductance and capacitance can be obtained. Then the characteristics of inductor voltage and capacitor current in a switching cycle were analyzed and a precise model for inductance and capacitance identification was deduced. Further, by applying RLS, an optimal method for inductance and capacitance estimation was derived. Finally, the validity of the proposed algorithm was demonstrated by simulation. The simulation results show that the algorithm can estimate the inductance and capacitance precisely and rapidly, and has good robustness.

Key words: Boost converter; recursive least squares method; parameter identification; digital control

1 引言

数字控制 DC-DC 转换器具有对系统噪声和模拟元器件变化低敏感性、能够实现复杂控制算法和易于与其他数字系统集成等优点. 近年来, 其已经成为国内外学术界的研究热点^[1-5]. 常用的控制方式有电压模式控制和电流模式控制两种. 前者控制方法简单, 但瞬态响应速度慢; 后者在前者的基础上, 增

加了电流反馈控制, 瞬态响应速度较快. 无论何种控制, 它们的设计均依赖于精确的电感和电容值. 而实际应用中, 电感和电容值会随着温度、老化和负载水平等的变化而变化. 因此需要对其进行在线参数辨识, 以跟踪参数的变化, 进而提高 DC-DC 转换器系统控制性能.

针对 DC-DC 转换器的在线参数辨识问题, 许多文献进行了研究^[6-9]. Chang 等提出了一种适用于临

界导通模式下 DC-DC 转换器的在线参数整定技术,解决了电感变化和输入电压漂移对控制的影响^[6]. Jesús 提出了一种针对负载和输入电压的代数参数辨识算法^[7]. 根据辨识出的参数,广义比例积分自适应控制器可以在线做出相应调整. Abdennadher 研究了一种实时监测 Boost 转换器电容和其等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)的方法^[8]. 基于电容电流和纹波电压采样,通过 Kalman 滤波器可以获得电容参数. 接着, Yao 等提出了一种不需要电流传感器的电容和其 ESR 的在线辨识算法^[9],只需要在开关周期的特定时刻增加一次电压采样. 以上这些文献,提供了输出电压、负载、电感、电容和其 ESR 的在线辨识方法,然而并没有一种算法可以同时辨识电感和电容.

本文针对 Boost 转换器提出了一种基于 RLS 的在线多参数辨识算法,可以在瞬态条件下同时准确估计电感和电容两个参数. 通过在 Simulink 中搭建相应的仿真模型,充分验证了利用递推最小二乘法在线辨识 Boost 转换器电感和电容值的可行性.

2 Boost 转换器在线多参数辨识系统

基于 RLS 的 Boost 转换器在线参数辨识系统结构图如图 1 所示. 其中, v_g 为输入电压, v_o 为输出电压, L 是电感, C 是电容, R 是负载, MOSFET 为开关管, Diode 为二极管. $\hat{L}$ 和 $\hat{C}$ 分别为电感和电容估计值. 虚线框内为 Boost 转换器的数字控制部分,数字控制器用来保证系统的稳定运行,可以根据用户需要采用电压模式控制或电流模式控制等任何一种控制方式. 由于稳态辨识电感和电容存在发散问题,这里通过小幅度改变参考电压 V_{ref} 为转换器提供一个瞬态过程,为在线参数辨识算法提供必要条件. 根据采样输入输出电压和电感电流,基于 RLS 的在线参数辨识可以同时估计出电感和电容值. 实际应用中,系统参数的变化比较缓慢,参数估计可以每秒进行一次.

3 基于 RLS 的在线多参数辨识

为了准确估计电感和电容值,首先要对 Boost 转换器进行精确建模. 该部分详细分析了一个开关周期内,Boost 转换器的电感电压和电容电流特性,推导出适用于 RLS 算法的多参数辨识模型. 并在此基础上,利用 RLS 算法辨识电感和电容两个参数.

3.1 多参数辨识模型

开关导通时,Boost 转换器电感电压和电容电

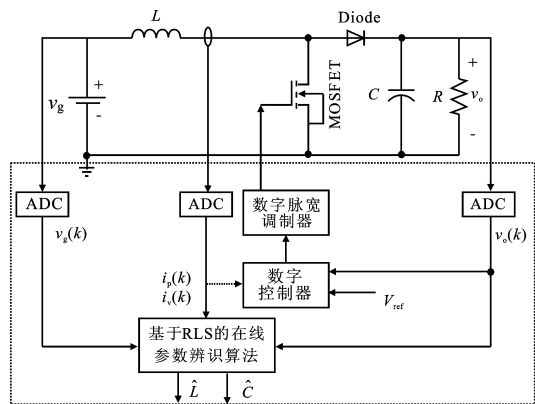


图 1 基于 RLS 的 Boost 转换器在线参数辨识系统结构图

流方程为

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_g(t) \quad (1)$$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)}{R}$$

开关关断时,电感电压和电容电流方程为

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_g(t) - v_o(t) \quad (2)$$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R}$$

式中, $i_L(t)$ 为电感电流. 在导通时间 $0 \sim dT$ 和关断时间 $dT \sim T$ 内,分别对式(1)和(2)进行积分,积分后相加并除以开关周期 T ,得到 Boost 转换器的平均状态方程:

$$\begin{aligned} \frac{L}{T} i_L(t) \Big|_0^T &= \tilde{v}_g(t) - d'(t) \tilde{v}_o(t) \Big| d' \\ \frac{C}{T} v_o(t) \Big|_0^T &= d'(t) \tilde{i}_L(t) \Big| d' - \frac{\tilde{v}_o(t)}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tilde{v}_g(t)$ 和 $\tilde{v}_o(t)$ 分别为一个开关周期内平均输入电压和平均输出电压, $\tilde{v}_o(t) \Big| d'$ 和 $\tilde{i}_L(t) \Big| d'$ 为开关关断时间内的平均输出电压和电感电流.

通常情况下,Boost 转换器输出电压纹波很小,因此 $\tilde{v}_o(t) \Big| d' \approx \tilde{v}_o(t) \approx v_o(t)$. 结合后缘 PWM 调制方式,得到离散状态方程:

$$\begin{aligned} L \frac{i_v(k+1) - i_v(k)}{T} &= v_g(k) - d'(k) v_o(k) \\ C \frac{v_o(k+1) - v_o(k)}{T} &= d'(k) \tilde{i}_L(k) \Big| d' - \frac{v_o(k)}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $i_v(k)$ 为第 k 开关周期起始时刻采样的电感电流谷值; $v_o(k)$ 为第 k 开关周期起始时刻输出电压采样值; $\tilde{i}_L(k) \Big| d'$ 为第 k 开关周期开关关断时间内的

平均电感电流,表示为

$$\tilde{i}_L(k) | d' = \frac{i_v(k) + i_p(k)}{2} \quad (5)$$

式中, $i_p(k)$ 为第 k 周期峰值电感电流,在开关关断时刻采样得到。

整理式(4)得到 Boost 转换器多参数辨识模型,如式(6)和(7)所示。

$$[v_g(k) - d'(k)v_o(k)] \frac{T}{L} = i_v(k+1) - i_v(k) \quad (6)$$

$$\left[d'(k) \tilde{i}_L(k) | d' - \frac{v_o(k)}{R} \right] \frac{T}{C} = v_o(k+1) - v_o(k) \quad (7)$$

式(6)和(7)分别为电感和电容辨识模型。在此基础上,分别采用递推最小二乘法可以估计出电感和电容。由于两式均为一维模型,在进行参数辨识时,避免了矩阵求逆运算,运算量较小。

3.2 RLS 算法

最小二乘法广泛应用于系统参数估计,包括最小二乘法、递推最小二乘法和增广最小二乘法等几类。其中递推最小二乘法具有计算速度快,计算量小且收敛速度快的特点,适用于系统在线参数估计。

为了应用递推最小二乘法获得参数的最优估计,将式(6)和(7)改写为最小二乘格式:

$$y(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta} + \xi(k) \quad (8)$$

式中, $\xi(k)$ 为模型残差。

对电感辨识而言,

$$\begin{cases} y(k) = i_v(k+1) - i_v(k) \\ \boldsymbol{\varphi}^T(k) = v_g(k) - d'(k)v_o(k) \\ \boldsymbol{\theta} = T/L \end{cases} \quad (9)$$

对电容辨识而言,

$$\begin{cases} y(k) = v_o(k+1) - v_o(k) \\ \boldsymbol{\varphi}^T(k) = d'(k) \tilde{i}_L(k) | d' - \frac{v_o(k)}{R} \\ \boldsymbol{\theta} = T/C \end{cases} \quad (10)$$

RLS 算法递推公式如下:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \\ & K(k)[y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ K(k) &= \frac{P(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)P(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \\ P(k) &= \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)]P(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

根据第 k 开关周期观测矩阵 $\boldsymbol{\varphi}^T(k)$ 和测量值 $y(k)$ 对上一个开关周期的参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 进行修正。以此类推,逐次引入新的观测数据,不断修正

参数估计值,直到达到满意的精确程度为止。由于 T 为开关周期是已知量,根据最优 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 即可得到电感和电容估计值。

式中, $K(k)$ 为增益矩阵; $P(k)$ 为协方差矩阵,其初始值 $P(0) = 10^3 \mathbf{I}$, 其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, β 一般取较大的正整数。 λ 为遗忘因子,取值在 0 到 1 之间。 λ 取值越小,对参数的跟踪能力越强,但辨识精度会降低,而 λ 取值越接近于 1,辨识精度越高。考虑到本文的参数辨识在瞬态进行,时间很短,而电感和电容变化缓慢,在辨识时间内可以看作是定值,因此取 $\lambda = 1$ 。

4 仿真结果

为了验证基于 RLS 的在线电感和电容辨识算法的可行性,以 Boost 转换器为例,在 Matlab/Simulink 中搭建转换器系统模型,电路参数为: $v_g = 6$ V, $v_o = 12$ V, $f = 100$ kHz, $L = 50$ μ H, $C = 56$ μ F, $R = 24$ Ω 。其中, f 为开关频率。

注入参考电压波形及相应的输出电压响应波形如图 2 所示。为了在瞬态辨识电感和电容,将参考电压由 12 V 增加为 12.24 V (2% 的变化量),并且持续 20 μ s。随即输出电压发生瞬态响应,并在约 300 μ s 的时间内恢复稳态,同时本文提出的算法可以在这段时间内完成电感和电容辨识。从图 2 中可以看出,小幅度参考电压变化引起的输出电压变化小于额定输出电压的 1%,因此该参考电压变化对输出电压的影响很小,可以看作 Boost 转换器一直工作在稳态。

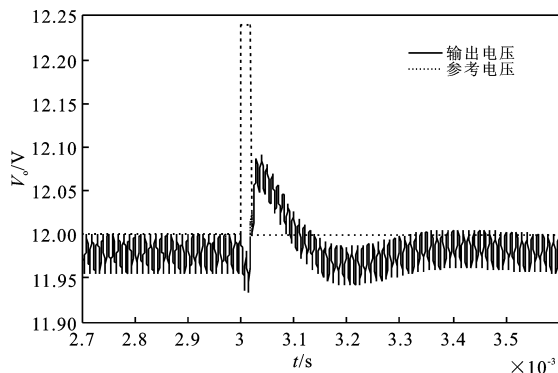


图 2 注入参考电压和输出电压波形

图 3 和图 4 所示为瞬态时间内电感和电容辨识结果。参考电压脉冲注入的同时,AD 转器开始采样所需的输出电压和电感电流,用于估算电感和电容值。由图 3 可知,电感辨识结果在第 6 次递推后收敛,电感估计值为 49.74 μ H,与实际值 50 μ H 之间的误差为 0.52%。由图 4 知,电容辨识结果在第 4

次递推后收敛,电容估计值为 56.13 μF ,与实际值 56 μF 十分接近,误差仅为 0.23%.

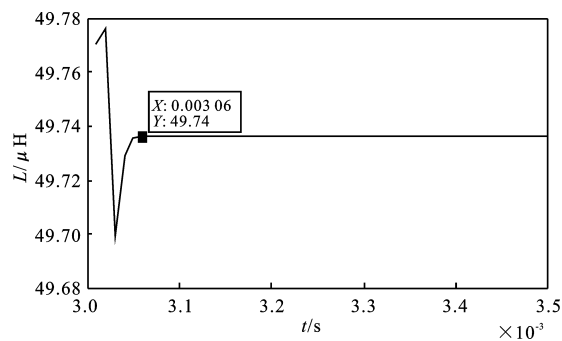


图 3 电感辨识结果

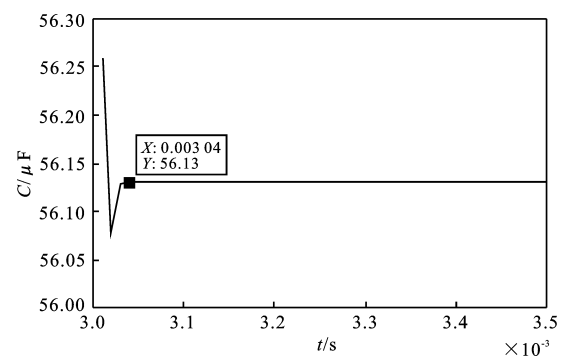


图 4 电容辨识结果

为了验证提出算法的鲁棒性,将输入电压从 6 V 变化到 7 V,观察在线参数辨识结果. 输入电压变化下的电感和电容辨识结果如图 5 和图 6 所示. 从两图中可知,提出算法下,电感和电容辨识结果分别在第 16 次和第 8 次递推后收敛,辨识结果分别为 49.71 μH 和 56.13 μF ,与实际值 50 μH 和 56 μF 之间的估计误差均小于 0.6%.

从以上仿真结果中可以看出,基于 RLS 的在线多参数辨识算法可以精确且快速地估计电感和电容值. 小幅度改变参考电压引起的输出电压变化很小,且收敛速度快,因此 Boost 转换器可看作平稳运行.

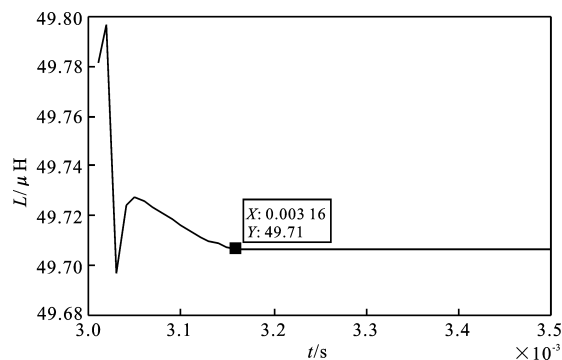


图 5 输入电压变化下的电感辨识结果

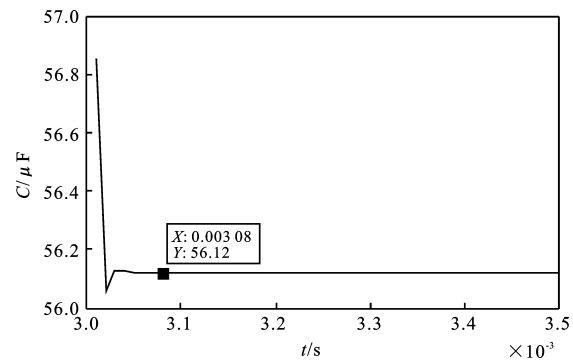


图 6 输入电压变化下的电容辨识结果

5 结束语

本文针对 Boost 转换器设计了基于 RLS 的在线多参数辨识算法. 详细分析一个开关周期内 Boost 转换器的工作状态,推导出得到电感和电容辨识模型,进一步应用递推最小二乘法,得到电感和电容的最优估计方法. 仿真结果表明,基于 RLS 的在线多参数辨识算法可以在瞬态条件下精确且快速的估计电感和电容值,计算复杂度低且易于数字实现,具有很好的理论和实际应用价值.

参考文献:

[1] Feng G, Meyer E, Liu Y F. A new digital control algorithm to achieve optimal dynamic performance in DC-to-DC converters[J]. IEEE Trans. Power Electron. , 2007,22(4): 1489-1498.

[2] 陈晨,童乔凌,谢文,等. 基于改进 EKF 的 DC/DC 转换器电感电流观测器[J]. 微电子学与计算机,2014, 31(6):125-132.

[3] Tong Q L, Zhang Q, Min R, et al. Sensorless predictive peak current control for boost converter using comprehensive compensation strategy[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2014, 61(6): 2754-2766.

[4] Zhang Q, Min R, Tong Q L, et al. Sensorless predictive current controller DC-DC converter with a self-correction differential current observer [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2014, 61(12): 6747-6757.

[5] Min R, Tong Q L, Zhang Q, et al. Digital sensorless current mode control based on charge balance principle and dual current errors compensation for DC-DC converters in DCM [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2016, 63(1):155-166.

[6] Chang Y T, Lai Y S. Online parameter tuning technique for predictive current-mode control operating in boundary conduction mode[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 56(8):3214-3221.

at nighttime using eigenspaces and support vector machine[C]//Congress on Image and Signal Processing. IEEE,2008;422-426.

[5] Yang W L, Wang Y, Vahdat A, et al. Kernel latent SVM for visual recognition[C]//Advances in Neural Processing Systems. IEEE, 2012: 809-817.

[6] 葛广英. 基于 SVM 的车型检测和识别算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(6):6-8,11.

[7] Comes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.

[8] Kornaropoulos E M, Tsakalides P. A novel KNN classifier for acoustic vehicle classification based on alpha-stable statistical modeling [C]//IEEE Workshop Statistical Signal Processing. IEEE,2009:1-4.

[9] Judea Pearl. Reverend Bayes on inference engines: a distributed hierarchical approach [C]// Proceedings AAAI National Conference on AI. Pittsburgh, Pa, 1982;133-136.

[10] Quinlan J R. Induction of decision trees[J]. Machine Learning, 1986, 1(1):81-106.

[11] Quinlan J R. C4. 5: programs for machine learning [M]. Boston: Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

[12] 姚亚涛, 邢留涛. 决策树 C4. 5 连续属性分割阈值算法改进及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42 (12): 372-376.

作者简介:

卞建勇 男,(1980-), 博士,副教授. 研究方向为计算机视觉及嵌入式系统应用. E-mail:bjyong977@126. com.

徐建闽 男,(1960-),博士,教授. 研究方向为交通控制及交通信息处理.

(上接第 103 页)

[7] Jesús L F, Arturo H M, Carlos G R, et al. Robust nonlinear adaptive control of a "boost" converter via algebraic parameter identification[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2014, 61(8): 4105-4114.

[8] Abdennadher K, Venet P, Rojat G, et al. A real-time predictive-maintenance system of aluminum electrolytic capacitors used in uninterrupted power supplies[J]. IEEE Trans Ind Appl , 2010, 46(4): 1642-1644.

[9] Yao K, Tang W J, Hu W B, et al. A current-sensor-less online ESR and C identification method for output capacitor of buck converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 2015, 30(12):6993-7005.

作者简介:

陈 晨 女,(1992-),博士研究生. 研究方向为 DC-DC 转换器的数字控制与参数辨识. E-mail:chenchen_hust@163. com.

童乔凌 男,(1981-),博士,副教授,博士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.

闵 闰 男,(1989-),博士. 研究方向为 DC-DC 电力电子系统的建模、分析与控制.

吕 典 男,(1995-),博士研究生. 研究方向为高频 DC-DC 转换器的设计、建模及控制.