

基于可变遗忘因子 RLS 的 Boost 转换器在线多参数辨识

陈 晨¹, 程 帅², 陶诗飞³, 童乔凌¹

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2 矽力杰半导体技术(杭州)有限公司, 江苏 南京 210000;

3 武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对 Boost 转换器控制性能受电感和电容变化影响的问题, 提出了一种基于可变遗忘因子递推最小二乘法(recursive least squares method, RLS)的在线多参数辨识算法. 考虑电感电流纹波, 推导了精确的电感和电容辨识模型. 在此基础上, 研究了 RLS 算法中遗忘因子动态取值问题. 通过在算法的误差信号中恢复系统噪声的方法, 动态计算遗忘因子的取值, 解决了传统 RLS 算法难以兼顾稳态精度和参数跟踪能力的问题. 仿真结果表明, 该算法可以在动态条件下, 精确且快速地跟踪电感和电容值的变化, 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; 可变遗忘因子

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)10-0042-05

Variable Forgetting Factor RLS Based Online Multiparameter Identification for Boost Converter

CHEN Chen¹, CHENG Shuai², TAO Shi-fei³, TONG Qiao-ling¹

(1 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 Silergy Semiconductor Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

3 Wuhan Marine Machinery Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the issue that the control performance of Boost converter is affected by inductance and capacitance variations, this paper proposed a variable forgetting factor RLS based online multiparameter identification algorithm. Considering the inductor current ripple, an accurate inductance and capacitance identification model was derived. On this basis, the dynamic value of forgetting factor in RLS algorithm was studied. By recovering system noises in the error signal of the algorithm, the value of forgetting factor was dynamically calculated, which solves the problem that the traditional RLS algorithm cannot balance steady-state accuracy and parameters tracking ability. The simulation results show that the algorithm can track the variations of inductance and capacitance accurately and quickly under dynamic condition, and has good robustness.

Key words: boost converter; recursive least squares method; parameter identification; variable forgetting factor

1 引言

近年来, 数字控制的脉宽调制 DC-DC 转换器以其对系统噪声和元件参数变化的低敏感性、可编程性、易于与其他数字系统集成以及可实现复杂的控制策略等特点, 成为研究的热点^[1-5]. 数字 DC-DC 转

换器主要的控制技术有电压模式控制和电流模式控制两种. 电压模式控制为单环控制, 电流模式控制增加了内环电流环控制, 具有更高的响应速度和更大环路增益带宽, 瞬态响应速度较快^[6]. 无论何种控制, 它们的设计均依赖于转换器的精确建模. 为了提高 DC-DC 转换器系统的控制性能, 需要对电感和电

容进行在线参数辨识,以及时跟踪其变化。

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^[7-10]。文献[7]等人针对 Boost 转换器的负载估计,比较了代数参数辨识算法和经典渐近观测器。文献[8]提出了一种针对负载和输入电压的代数辨识算法。根据所辨识的参数,可以相应地在线整定广义比例积分自适应控制器。对于 Boost 转换器的电容和其等效串联电阻(Equivalent series resistance, ESR),Abdennadher 等人研究了一种实时检测技术^[9]。基于电容电流和纹波电压的采样,电容参数可以通过卡尔曼滤波获得。Buiatti 等人研究了一种在线辨识负载、电容、电容 ESR 和电感的算法^[10]。该算法基于 MOSFET 门信号、电感电流以及输出电压的采样信息,经过不同的数据处理方式,分别估计出以上四个参数值。以上这些参考文献,解决了负载、输入电压、电容、电容 ESR 和电感的在线辨识问题。然而没有一种算法既可以同时估计电感和电容,又对硬件系统要求低。

本文针对 Boost 转换器提出了一种基于可变遗忘因子 RLS 的在线多参数辨识算法,可以在动态条件下精确且快速地跟踪电感和电容值的变化。算法简单,对系统硬件要求较低。仿真结果充分验证了利用该算法在线辨识 Boost 转换器电感和电容值的可行性。

2 基于 RLS 算法的在线多参数辨识

图 1 所示为基于 RLS 的在线多参数辨识算法的 Boost 转换器结构图。其中 V_{IN} 和 V_O 分别为输入和输出电压, MOSFET 是功率开关管, Diode 是二极管, L 为电感, C 为输出电容, R 是负载。 $\hat{L}$ 和 $\hat{C}$ 分别为电感和电容的辨识值。阴影区是 Boost 转换器的数字控制部分,通过设计合适的数字控制器保证系统的稳定运行。数字控制器可以采用电压模式控制或者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辨识结果不收敛的问题,电感和电容在线辨识只能在动态过程中进行。首先,通过小幅度改变参考电压 V_{REF} ,给 Boost 转换器系统制造一个动态过程,为电感和电容在线辨识提供必要条件。利用采样输入电压、输出电压和电感电流,基于 RLS 的在线多参数辨识算法可以估计出电感和电容值。

2.1 电感和电容辨识模型

参数辨识精度依赖于转换器模型的精度。为了

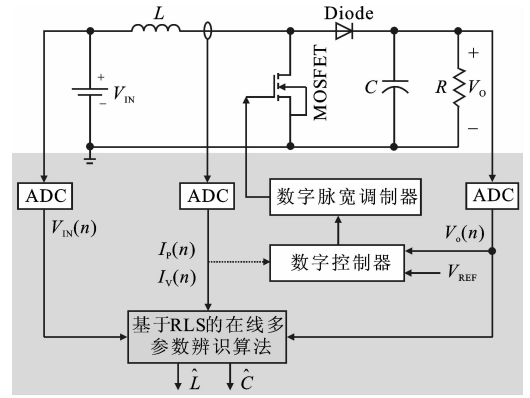


图 1 基于 RLS 在线多参数辨识算法 Boost 转换器结构图
准确辨识电感和电容值,首先对 Boost 转换器的传统平均状态方程进行了改进。

考虑电感电流纹波,并结合前缘 PWM 调制方式,得到改进后的 Boost 转换器离散平均状态方程:

$$\begin{aligned} L \frac{I_P(k+1) - I_P(k)}{T} &= V_{IN}(n) - D'(n)V_O(n) \\ C \frac{V_O(n+1) - V_O(n)}{T} &= D'(n)\bar{I}_L(n) \mid D' - \frac{V_O(n)}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $V_O(n)$ 为第 n 开关周期起始时刻输出电压采样值, $I_P(n)$ 为第 n 开关周期起始时刻采样的电感电流峰值, $\bar{I}_L(n) \mid D'$ 为第 n 开关周期开关关断时间内的平均电感电流,表示为:

$$\bar{I}_L(n) \mid D' = \frac{I_P(n) + I_V(n)}{2} \quad (2)$$

式中, $I_V(n)$ 为第 n 开关周期谷值电感电流,在开关导通时刻采样得到。

整理(1)得到标准最小二乘法形式的 Boost 转换器电感和电容辨识模型,分别如式(3)和式(4)所示。

$$[V_{IN}(n) - D'(k)V_O(n)]\theta_L = I_P(n+1) - I_P(n) \quad (3)$$

$$\left[D'(k)\bar{I}_L(n) \mid D' - \frac{V_O(n)}{R} \right]\theta_C = V_O(n+1) - V_O(n) \quad (4)$$

式中, θ_L 和 θ_C 为待辨识参数, $\theta_L = T/L$, $\theta_C = T/C$ 。在此基础上,分别采用递推最小二乘算法对辨识模型,式(3)和(4)中的待辨识参数 θ_L 和 θ_C 进行递推估计,最后计算出电感和电容值。

2.2 基于 RLS 算法的电感和电容辨识

递推最小二乘法是一种广泛应用的自适应滤波

器. 其具有计算速度快、计算量小、收敛速度快且受噪声影响小的特点, 在参数辨识领域被普遍使用, 尤其适用于在线参数辨识.

RLS 算法递推公式如下

$$e(n) = y(n) - \hat{\theta}^T(n-1)\varphi(n) \quad (5)$$

$$K(n) = \frac{P(n-1)\varphi(n)}{\lambda + \varphi^T(n)P(n-1)\varphi(n)} \quad (6)$$

$$\hat{\theta}(n) = \hat{\theta}(n-1) + K(n)e(n) \quad (7)$$

$$P(n) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - K(n)\varphi^T(n)]P(n-1) \quad (8)$$

式中, $e(n)$ 为误差信号, $y(n)$ 为系统输出量, $\varphi^T(n)$ 为观测矩阵, $\hat{\theta}(n-1)$ 为递推 $n-1$ 次得到的参数估计值. $K(n)$ 为卡尔曼滤波增益矩阵, $P(n)$ 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.

对于数字控制 Boost 转换器, 基于 RLS 算法的电感和电容估计每个开关周期递推计算一次. 根据输入输出电压和电感电流采样值以及占空比, 计算第 n 开关周期 $\varphi(n)$ 和 $y(n)$, 进而得出增益矩阵 $K(n)$ 和误差信号 $e(n)$, 并以此对上一个开关周期的参数估计值 $\hat{\theta}(n-1)$ 进行修正. 这样逐周期引入新观测数据, 不断对参数估计值进行修正, 直到达到满意的精确程度为止. 最后根据最优 $\hat{\theta}(n)$ 计算最终的电感和电容估计值.

3 基于可变遗忘因子 RLS 的多参数辨识算法

经典 RLS 算法中 λ 为一个固定值, 也就是按固定速率削弱过去观测数据的作用. 若 λ 接近 1, 该算法精度高但对参数的跟踪能力降低. 降低 λ 可以提高跟踪能力, 但同时会减低稳态精度. 为了满足这两种矛盾的需求, 本文提出了一种基于可变遗忘因子 RLS 的在线多参数辨识算法.

式(5)中的 $e(n)$ 根据第 $n-1$ 周期的参数估计值计算得到, 是先验误差. 后验误差可以定义为

$$\varepsilon(n) = y(n) - \hat{\theta}^T(n)\varphi(n) \quad (9)$$

从式(5)、(7)和(9)得,

$$\varepsilon(n) = e(n) [1 - \varphi^T(n)K(n)] \quad (10)$$

通过在误差信号中恢复系统噪声来设计遗忘因子的取值, 即遗忘因子 $\lambda(n)$ 可以根据式(11)进行调整,

$$E\{\varepsilon^2(n)\} = E\{v^2(n)\} \quad (11)$$

式中, $E\{v^2(n)\} = \sigma_v^2$ 是系统噪声的功率.

将(6)和(10)代入(11)得,

$$E\left\{\left[\frac{\lambda(n)}{\lambda(n) + q(n)}\right]^2\right\} = \frac{\sigma_v^2}{\sigma_e^2(n)} \quad (12)$$

式中, $q(n) = \varphi^T(n)P(n-1)\varphi(n)$, $E\{e^2(n)\} = \sigma_e^2(n)$ 是先验误差信号的功率. 在式(12)中, 我们假设输入信号和误差信号是不相关的. 当辨识参数开始收敛于实际值时, 该假设是成立的. 我们还假设遗忘因子是确定性的并且依赖于时间. 通过求解二次方程(12), 可以得到可变遗忘因子的表达式:

$$\lambda(n) = \frac{\sigma_v \sigma_q(n)}{\sigma_e(n) - \sigma_v} \quad (13)$$

式中, $E\{q^2(n)\} = \sigma_q^2(n)$. 功率估计可以由式(14)和式(15)得到.

$$\hat{\sigma}_e^2(n) = \hat{\sigma}_e^2(n-1) - (1-\alpha)e^2(n) \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_q^2(n) = \hat{\sigma}_q^2(n-1) + (1-\alpha)q^2(n) \quad (15)$$

式中, α 是加权因子.

考虑到 λ 的取值必须在 $[0, 1]$ 范围内, 本文提出算法的遗忘因子可以按下式给出:

$$\lambda(n) = \min\left\{\frac{\sigma_v \hat{\sigma}_q(n)}{\xi + |\hat{\sigma}_e(n) - \sigma_v|}, \lambda_{\max}\right\} \quad (16)$$

ξ 为很小的正常数, 可以防止除以零的情况发生. 在算法收敛之前或者当系统出现突变, $\hat{\sigma}_e(n)$ 比 σ_v 大, 这样 $\lambda(n)$ 是一个较低的值, 使算法可以实现快速收敛和跟踪. 当算法收敛到稳态解, $\lambda(n)$ 转变为 $\lambda_{\max}$, 使算法具有较高的估计精度.

4 仿真结果

为了验证基于可变遗忘因子 RLS 的在线电感和电容辨识算法的可行性, 以 Boost 转换器为控制对象, 在 Simulink 中搭建整个系统的仿真模型, 电路参数为: $V_{IN} = 6 \text{ V}$, $V_O = 12 \text{ V}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $L = 22 \mu\text{H}$, $C = 68 \mu\text{F}$, $R = 10 \Omega$. 其中, f 为开关频率. 数字控制器采用峰值电流模式控制.

图 2 所示为参考电压小幅度变化波形和相应的输出电压响应波形. 为了在动态估计电感和电容, 将参考电压增大 3%, 即从 12 V 增加到 12.36 V, 并持续 20 μs . 从图 2 中可以看出, 参考电压变化后, 输出电压紧接着发生瞬态响应, 然后随着参考电压的恢复重新回到稳态. 整个过程的调节时间约为 240 μs . 输出电压最大偏移量约为 0.2 V, 小于稳态输出电压的 2%, 由此可见, 参考电压小幅度变化对输出电

压的影响很小. 在这种情况下,Boost 转换器可以看作一直工作在稳态.

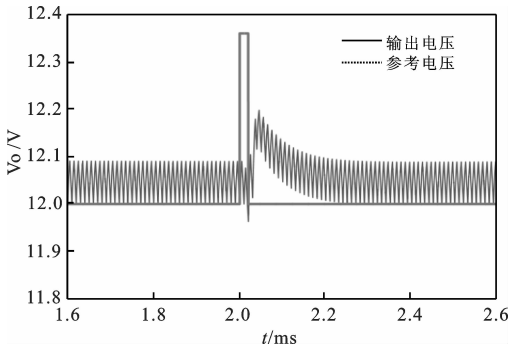


图2 注入参考电压和输出电压波形

随着参考电压小幅度变化的开始,AD 转换器同步采样所需的输入输出电压和电感电流,并用于计算电感和电容值. 不同输入电压下,动态时间内电感和电容辨识结果如图 3 和图 4 所示. 由图 3 可知,额定输入电压下,电感辨识结果经过 6 次递推收敛到 $22.04\ \mu\text{H}$,与实际值 $22\ \mu\text{H}$ 之间的误差仅为 0.18% . 当输入电压减小为 $5\ \text{V}$,电感估计值仍为 $22.04\ \mu\text{H}$. 由图 4 可知,额定输入电压下,电容辨识结果经过 4 次递推收敛到 $68.65\ \mu\text{F}$,与实际值 $68\ \mu\text{F}$ 相比,误差为 0.96% . 输入电压为 $5\ \text{V}$ 时,电容估计值为 $68.72\ \mu\text{F}$,估计误差为 1.06% ,与额定输入电压下的估计误差十分接近. 由辨识结果可见,提出算法可以准确辨识电感和电容值,且不受输入电压变化的影响.

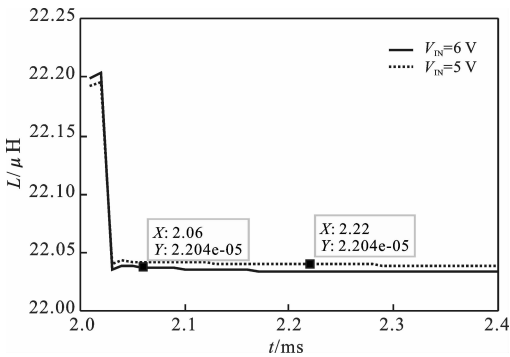


图3 不同输入电压下电感辨识结果

为了验证提出算法对电感和电容参数的跟踪性能,在 $t=2.3\ \text{ms}$ 时刻将电感从 $22\ \mu\text{H}$ 突变为 $28\ \mu\text{H}$,同时将电容从 $68\ \mu\text{F}$ 突变为 $56\ \mu\text{F}$. 变化前后电感和电容的辨识结果如图 5 和图 6 所示. 从两图中可以看出,提出算法下,电感辨识结果经过 15 次和

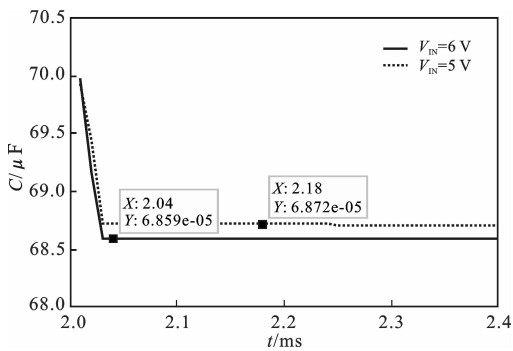


图4 不同输入电压下电容辨识结果

13 次递推收敛,辨识结果分别为 $27.63\ \mu\text{H}$ 和 $56.65\ \mu\text{F}$,与实际值 $28\ \mu\text{H}$ 和 $56\ \mu\text{F}$ 之间的估计误差均小于 1.4% .

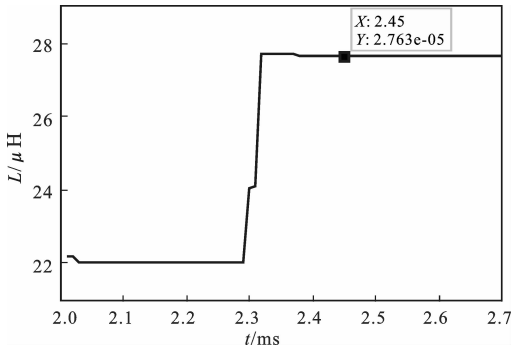


图5 电感和电容变化前后的电感辨识结果

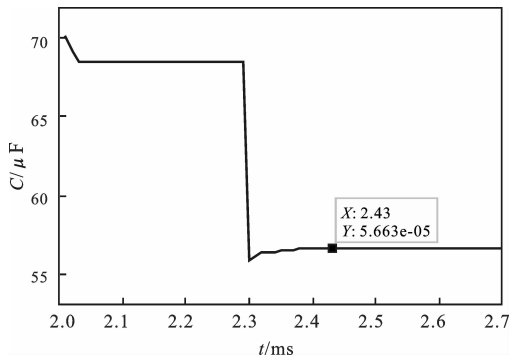


图6 电感和电容变化前后的电容辨识结果

从仿真结果中可以看出,提出算法不受输入电压变化的影响,且在电感或电容动态变化时,能够快速且精确地跟踪实际值,收敛时间短,辨识精度高,具有良好的动态跟踪性能和稳态性能.

5 结束语

本文设计了一种基于可变遗忘因子 RLS 的 Boost 转换器在线多参数辨识算法. 在考虑电感电

流纹波的基础上,推导出标准最小二乘法形式的电感和电容辨识模型.通过在算法的误差信号中恢复系统噪声的方法,动态计算 RLS 算法中遗忘因子的取值,解决了传统 RLS 算法难以兼顾稳态精度和参数跟踪能力的问题.仿真结果表明,基于可变遗忘因子 RLS 的在线多参数辨识算法可以在动态条件下,精确且快速地跟踪电感和电容值的变化.在实践中简单且易于实现,为 Boost 转换器的电感和电容辨识提供了新思路.

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] Tong Q L, Chen C, Zhang Q, et al, A sensorless predictive current controlled boost converter by using an EKF with load variation effect elimination function[J]. Sensors, 2015, 15(5): 9986-10003.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Gensior A, Weber J, Rudolph J, et al. Algebraic parameter identification and asymptotic estimation of the load of a boost converter[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(9): 3352 -3360.
- [8] 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.
- [9] 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): 1644-1642.
- [10] Buiatti G, Amaral A, Cardoso A, An online technique for estimating the parameters of passive components in non-isolated DC/DC converters[C]// Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. [s. l.]. 2007: 606-610.

作者简介:

陈 晨 女, (1992-), 博士研究生. 研究方向为 DC-DC 转换器数字控制与参数辨识.

E-mail: chenchen_fly@hust. edu. cn.

程 帅 男, (1980-), 硕士. 研究方向为 DC-DC 变换器芯片设计.

陶诗飞 男, (1988-), 硕士. 研究方向为控制理论.

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.