

基于改进 EKF 的 DC/DC 转换器电感电流观测器

陈 晨¹, 童乔凌¹, 谢 文², 刘政林¹

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2 中国人民解放军第二炮兵指挥学院 通信系信息作战教研室, 湖北 武汉 430012)

摘 要: 为了减小电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)引起的 DC/DC 转换器输出电压噪声, 消除负载变化引起的稳态误差, 提出了一种基于改进的扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman filter, EKF)的电感电流观测器. 首先, 介绍了 Boost 型转换器的状态空间方程和扩展卡尔曼滤波器; 之后提出负载估算算法, 对 EKF 进行改进. 利用改进 EKF 的输出电压、电感电流和占空比即可估算出实际负载值, 从而实时更新改进 EKF 的参数, 使电流观测器可以准确估计电感电流; 最后对提出的电流观测器进行了仿真验证. 仿真结果表明, 在负载突变时, 改进 EKF 可以对 EMI 引起的输出电压噪声进行有效滤波, 同时准确估计电感电流, 保证了 DC/DC 转换器输出电压的准确性.

关键词: DC/DC 转换器; 改进的扩展卡尔曼滤波; 电流模式控制; 电流观测器

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)06-0125-04

A DC/DC Converter Inductor Current Observer Based on Improved EKF

CHEN Chen¹, TONG Qiao-ling¹, XIE Wen², LIU Zheng-lin¹

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

2 Information Warfare Staff Room of Communication Department,

Second Artillery Command College of the Chinese PLA, Wuhan 430012, China)

Abstract: This paper presents a DC/DC converter inductor current observer based on improved extended Kalman filter, which can reduce output voltage noise caused by electromagnetic interference and eliminate the steady state error when load changes. Firstly, the State-space equations of boost DC/DC converter and extended Kalman filter are introduced. Secondly, the load estimation algorithm is proposed to improve the extended Kalman filter. The improved extended Kalman filter can use output voltage, inductor current and duty ratio to estimate actual load value. Therefore, the parameters of improved EKF can be updated in real time and current observer can estimate inductor current accurately. Finally, the validity of the proposed approach has been demonstrated by simulation. The simulation results show that the improved extended Kalman filter can filtering the output voltage noise caused by electromagnetic interference effectively, and estimate inductor current precisely, which ensures the accuracy of the output voltage.

Key words: DC/DC converter; improved extended Kalman filter; current mode control; current observer

1 引言

近年来, 采用数字控制方式的 DC/DC 转换器以其良好的适应性、灵活性和高可靠性成为国内外学术界研究热点. 电流模式控制是主要的数字控制技术之一, 它通过采样电感电流进行反馈控制. 电

流模式控制电感电流以等于控制电流, 从而实现转换器的快速响应. 然而要获得理想的控制结果, 对电流传感器有很高的速度和精度要求, 使整个系统的成本大幅度提高.

文献[1-6]研究了基于 DC/DC 转换器的数字电流模式控制技术. 文献[1-2]提出了预测电流控制方

收稿日期: 2013-08-02; 修回日期: 2013-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61202469); 教育部博士点基金(20120142120102)

式,通过采样当前周期电感电流、输入输出电压来计算下一个周期的占空比.这种控制方式解决了数字控制计算时间延时的问题,使电感电流能在几个周期内达到控制电流值,实现电感电流的快速调节.然而,这些控制方式依赖于精确高速的电感电流传感器,为此文献[3]中提出了无电流传感器的预测控制模式,它只需采样输入输出电压,采用一阶状态观测器对电感电流进行估计.但是,这些预测控制忽略了电磁干扰引起的输出电压噪声.文献[4]中采用分段仿射的卡尔曼滤波器,实现了电感电流估计.由于 Boost 型 DC/DC 转换器是一种非线性系统,采用分段线性化近似必然会产生一定的误差,使精确电流预测控制精度不高.文献[5]中采用扩展卡尔曼滤波器对输出电压进行滤波同时精确估计电感电流,算法要求负载是恒定的,这种假设在实际应用中难以得到满足.

本文针对 Boost 型 DC/DC 转换器,提出一种可以实时估计负载变化的改进扩展卡尔曼滤波器算法.通过在 Simulink 中建立基于改进 EKF 的 Boost 型 DC/DC 转换器仿真模型,验证基于改进扩展卡尔曼滤波器作电感电流观测器的可行性.

2 基于 EKF 滤波器的 Boost DC/DC 转换器

Boost 型 DC/DC 转换器是一种能够实现升压的开关电源.为了保证良好的稳定性和动态响应,需要通过检测输出电压进行反馈控制^[7].目前,DC/DC 转换器大多工作在高频情况下,在开关器件的开关过程中,寄生元件(如寄生电容、寄生电感等)中能量的高频变化产生了大量的电磁干扰,引起输出电压噪声,这将直接影响转换器的性能.为了消除噪声信号的影响,需要对输出电压进行滤波处理.由于 Boost 型 DC/DC 转换器是非线性系统,需采用适用于非线性系统的扩展卡尔曼滤波器对其输出电压进行滤波,其结构图如图 1 所示.其中, I_{EKF} 和 V_{EKF} 分别是 EKF 滤波器输出电流和输出电压, I_{REF} 是控制电流.

2.1 Boost 型转换器的离散化数学模型

采用状态空间平均法对 Boost 电路进行分析,为了便于说明这里暂不考虑寄生参数对电路的影响.令状态变量 $X(k) = [I_L(k), V_O(k)]^T$, 根据文献[5]可得其离散化状态空间方程(1):

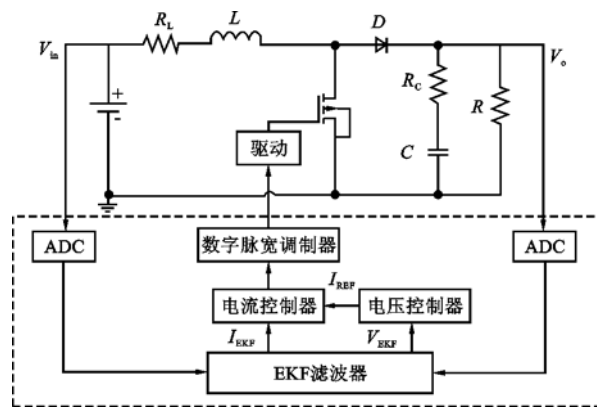


图 1 基于 EKF 的 Boost 型 DC/DC 转换器结构图

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T}{L} \\ \frac{T}{C} & 1 - \frac{T}{RC} \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} 0 & \frac{Td}{L} \\ -\frac{Td}{C} & 0 \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} \frac{T}{L} V_{\text{in}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $X(k)$ 为 kT 时刻的状态变量, $I_L(k)$ 和 $V_O(k)$ 分别为 kT 时刻电感上的电流和电容上的电压, V_{in} 为输入电压, d 为占空比, $Z(k)$ 为输出量, T 为开关周期, R 为电阻值, C 为电容值.

从式(1)可以得出状态转移系数矩阵中有非线性项,因此 Boost 型 DC/DC 转换器是一种非线性系统.要对输出电压进行滤波,需采用针对非线性系统的扩展卡尔曼滤波器.

2.2 EKF 滤波器

扩展卡尔曼滤波器是适用于非线性系统的卡尔曼滤波器,它常被用来进行时域高斯白噪声的滤波和状态估计^[8].正是基于这一点,可以用它来减小由 EMI 引起的输出电压噪声,同时完成电感电流的观测.

考虑噪声,式(1)可以表示为

$$X(k) = f[X(k-1), U(k), v(k-1)] \quad (2)$$

$$Z(k) = h[X(k), v(k)]$$

式中, $U(k)$ 为 kT 时刻的控制量, $w(k-1)$ 和 $v(k)$ 分别为过程和观测噪声信号,且满足 $E[w(k)] = E[v(k)] = 0$, $E[w(k)w^T(j)] = Q$, $E[v(k)v^T(j)] = R$, $E[w(k)v^T(j)] = 0$ (即过程噪声和观测噪声不相关).

EKF 滤波方程如下:

$$X(k|k-1) = f[X(k-1|k-1), U(k), 0] \quad (3)$$

$$P(k|k-1) = A(k)P(k-1|k-1)A(k)^T + W(k)QW(k)^T \quad (4)$$

$$K_g(k) = \frac{P(k|k-1)H(k)^T}{H(k)P(k|k-1)H(k)^T + V(k)RV(k)^T} \quad (5)$$

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K_g(k)[Z(k) - h[X(k|k-1,0)]] \quad (6)$$

$$P(k|k) = [I - K_g(k)H(k)]P(k|k-1) \quad (7)$$

其中, $A(k) = \frac{\partial f}{\partial X}$, $W(k) = \frac{\partial f}{\partial w}$, $H(k) = \frac{\partial h}{\partial X}$, $V(k) = \frac{\partial h}{\partial v}$.

式(3)和(4)分别是状态预测公式和协方差预测公式,而式(5)~(7)则是对状态预测和协方差预测的修正更新公式.

结合式(1)和式(2)可以看出,卡尔曼滤波器的状态方程需要使用负载 R 的值.但实际上,DC/DC 转换器驱动的负载可能发生变化,如果不对状态方程中的参数进行实时更新,负载值的误差将引起卡尔曼滤波器输出的误差,进而造成预测电感电流的较大偏离和输出电压的稳态误差.因此,本文提出了一种可以实时更新负载参数的改进 EKF 滤波器.

3 改进 EKF 滤波器

改进 EKF 滤波器可以根据输出电压和电感电流,实时计算 Boost 电路中的负载值,从而及时更新扩展卡尔曼滤波器中状态空间方程的参数,避免预测电感电流的较大偏离,同时,减小甚至消除输出电压的稳态误差.

3.1 负载估算算法

利用状态平均法可知,在稳态状态下,输出电流 $I_O(k)$ 和电感电流 $I_L(k)$ 的关系如式(8)所示:

$$I_O(k) = I_L(k)[1 - D(k)] \quad (8)$$

扩展卡尔曼滤波器的输出几乎等同于实际电路输出电压,则

$$\hat{V}_O(k) = I_O(k)R \quad (9)$$

联立式(8)和(9)可得

$$R = \frac{\hat{V}_O(k)}{I_L(k)[1 - D(k)]} \quad (10)$$

则方程(1)中的电阻值可以用式(10)来代替.其中, $\hat{V}_O(k)$ 为扩展卡尔曼滤波器的输出,即输出电压的估计值.

3.2 改进卡尔曼滤波器的鲁棒性

卡尔曼滤波器的鲁棒性直接影响到整个系统的稳定性,因此需要证明负载替代过后的卡尔曼滤波器的鲁棒性.为了使证明过程直观明了,推导过程忽略了寄生参数的影响.离散化之后的输出电压的状态方程为

$$C \frac{\hat{V}_O(k+1) - V_O(k)}{T} = I_L(k)[1 - D(k)] - \frac{V_O(k)}{R} \quad (11)$$

在稳态状态下,输出电压的采样值不变,即 $V_O(k) = V_O(k+1)$.令输出电压估计值的稳态误差为 $\Delta V_O(k) = \hat{V}_O(k) - V_O(k)$,并将式(10)带入式(11),可得

$$\frac{\Delta V_O(k+1)}{\Delta V_O(k)} = \frac{I_L(k)[1 - D(k)]T}{C \hat{V}_O(k)} \quad (12)$$

在 $D(k)T$ 时间内,输出电容近似以恒速率向负载放电,放电电流为 $I_L(k)[1 - D(k)]$,则电压峰峰 V_{PP} 可以用式(13)来表示:

$$V_{PP} = \frac{\int_0^{D(k)T} I_L(k)[1 - D(k)]dt}{C} = \frac{I_L(k)D(k)[1 - D(k)]T}{C} \quad (13)$$

将式(13)带入式(12)可得

$$\frac{\Delta V_O(k+1)}{\Delta V_O(k)} = \frac{V_{PP}}{D(k) \hat{V}_O(k)} \quad (14)$$

在实际电路中,输出电压的纹波 V_{PP} 总是远远小于输出电压,所以卡尔曼滤波器输出值的误差将逐渐减小,最终将等于实际输出电压值.

4 仿真结果

以 Boost 转换器为控制对象,在 Simulink 中建立整个系统的仿真模型.仿真模型基本参数为 $U_{in} = 6V$, $U = 12V$, $f = 100kHz$, $L = 50\mu H$, $C = 65\mu F$, $R = 24\Omega$, $R_L = 0.1\Omega$, $R_{ds} = 0.011\Omega$, $R_D = 0.1\Omega$, $R_{esr} = 0.05\Omega$, $V_F = 0.7V$.其中, f 为开关频率, R_L 是电感上的串联寄生电阻, R_{ds} 为开关管的导通电阻, R_D 和 V_F 分别为二极管上的串联寄生电阻和压降, R_{esr} 为电容上串联寄生电阻.采用常规 PID 控制器配合改进卡尔曼滤波器进行控制.仿真模型引入过程噪声和观测噪声,其中过程噪声包括电感电流噪声和输出电阻噪声.三者方差分别为 0.0025, 0.01, 0.01.对采样后的电压值和经过改进 EKF 滤波的电压值相对于其真实

值进行了误差累积统计,即对每个周期的误差绝对值进行累加,其结果如图 2 所示。

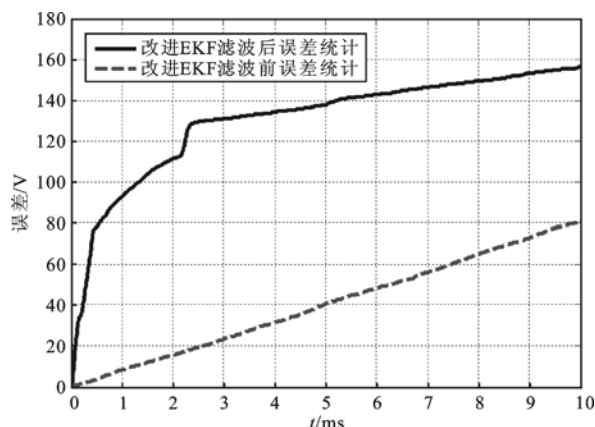


图 2 滤波前后误差累积统计曲线

从图 2 可以看出,当输出电压稳定后,在 3~10 ms 的时间里,滤波前累积误差统计曲线的斜率为 8.286 V/ms,而滤波后累积误差统计曲线的斜率约为 3.429 V/ms,因此滤波后累积误差统计曲线的斜率要远小于滤波前曲线的斜率,说明滤波后的输出电压更接近于真实值,改进 EKF 滤波器起到了一个满意的滤波效果。

当负载由 $24\ \Omega$ 突变为 $12\ \Omega$ 时,经过改进 EKF 滤波和 EKF 滤波的 Boost 转换器的输出电压响应如图 3 所示。图 3 中,输出电压值均为单位开关周期内的电压平均值。从图中可得,负载突变后,经过改进 EKF 滤波的输出电压可以很快进行调整,及时跟随参考电压且没有稳态误差。而经过 EKF 滤波的输出电压,则会受到负载变化的影响,产生 0.12 V 的稳态误差。因此在 Boost 型 DC/DC 转换器中引入改进 EKF,可以有效减少由负载变化所产生的输出电压稳态误差。

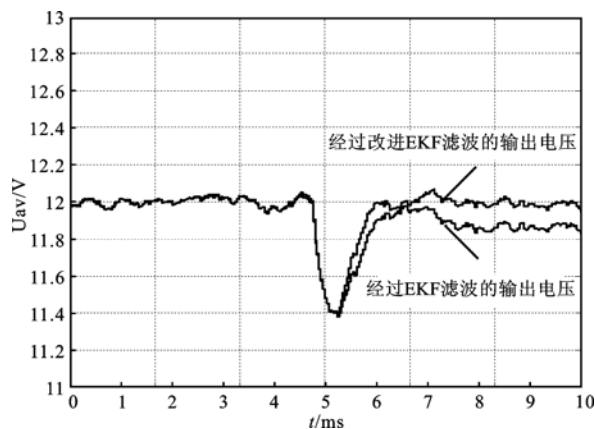


图 3 经过改进 EKF 滤波和 EKF 滤波的输出电压响应

负载的变化不仅影响扩展卡尔曼滤波器的输出电压,同时还影响其输出电感电流。两种卡尔曼滤波

器输出电感电流和实际电感电流响应曲线如图 4 所示。其中卡尔曼滤波器的输出电感电流为单位开关周期内电流平均值。由图 4(a)可知,当负载跳变后,实际电感电流平均值约为 2.234 A,而 EKF 输出电感电流为 1.7 V,产生了 0.534 A 的估计误差,因此 EKF 滤波器不能很好的预估实际电感电流的变化。由图 4(b)可知,无论是负载跳变前还是跳变后,改进 EKF 输出电感电流与实际电感电流平均值均基本吻合。

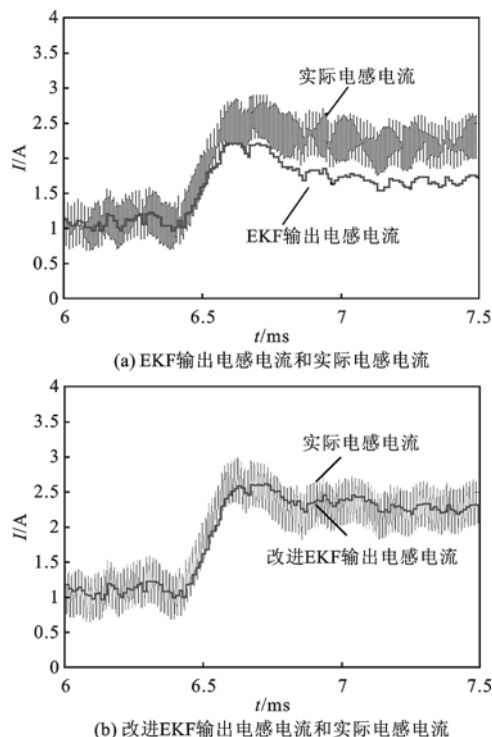


图 4 卡尔曼滤波器输出电感电流和实际电感电流对比图

5 结束语

本文设计了基于 Boost 型 DC/DC 转换器的改进 EKF 滤波器,并与经典 EKF 滤波器进行了对比。仿真结果表明,改进 EKF 滤波器可以实时估计负载的变化,减少 EMI 引起输出电压噪声,及时调整状态空间方程,快速准确跟随实际输出电压和电感电流。因此,本文提出的改进 EKF 滤波器既可以作输出电压滤波器,同时还能用作电感电流的观测器,为 Boost 型 DC/DC 转换器的数字控制策略提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Chen J, Prodic A, Erickson R W, et al. Predictive digital current programmed control[J]. IEEE Trans Power Electron, 2003,18(1):411-419.

(下转第 132 页)

个结深分别为 $4\ \mu\text{m}$ 与 $0.25\ \mu\text{m}$, 工艺实现上就增加了一层掩膜, 使工艺相对复杂, 终端结构硅表面的临界电场采用值为 $2.8\text{e}5\ \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$, 此值较大. 本文在实际长度只有 $159\ \mu\text{m}$ 的外延上实现了 $670\ \text{V}$ 的耐压, 同时场限环的结深只有 $3.5\ \mu\text{m}$, 容易实现, 工艺不用增加额外的掩膜, 而且硅表面的最大电场只有 $2.36\text{e}5\ \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$, 结构比较可靠.

表 2 不同终端结构的对比

文献	耐压/ V	终端长度/ μm	结深/ μm	$E_{\text{max}}/V \cdot \text{cm}^{-1}$	工艺
[7]	675	190	5.0	—	简单
[8]	670	180	4.0	$2.80\text{e}5$	复杂
本文	670	159	3.5	$2.36\text{e}5$	简单

4 结束语

文中设计了一款 $600\ \text{V}$ VDMOS 的终端结构, 设计出的终端除去终止环与半个元胞的尺寸, 终端结构实际长度为 $159\ \mu\text{m}$, 仿真得出其击穿电压为 $670\ \text{V}$, 且硅表面电场最大值为 $2.36\text{e}5\ \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$. 电场分布均匀, 工艺相对简单, 因此在减小了终端结构所占的芯片面积的同时, 提高了器件的可靠性.

参考文献:

- [1] Fabre A. Low power current mode second-order band-

pass IF filter [J]. IEEE Trans on CA S(II), 1997, 44(6): 436-446.

- [2] 项骏, 林争辉. 600 伏高压 LDMOS 的实现[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(11): 149-152.
- [3] Findlay W J, Coulbeck L. Edge termination for very high voltage IGBT devices [J]. IPEMC'97, 1997(1): 67-73.
- [4] 高嵩, 石广源, 王中文. 单场限环结构的表面电场分布及环间距的优化[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(2): 0114-05.
- [5] 陈星弼. 场限环的简单理论[J]. 电子学报, 1988(3): 6-10.
- [6] B. Jayant Baliga. Fundamentals of power semiconductor device[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [7] 高东岳. 一种 $600\ \text{V}$ VDMOS 终端保护环结构的设计[J]. 中国集成电路, 2009(8): 58-61.
- [8] 宋文斌, 蔡小五. 一种新型高压功率器件终端技术[J]. 微电子学, 2011, 41(4): 567-569.

作者简介:

胡玉松 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为大功率器件的研究与设计.

冯全源 男, (1963-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为数字、模拟及射频集成电路设计.

陈晓培 女, (1982-), 博士研究生. 研究方向为大功率器件的研究与设计.

(上接第 128 页)

- [2] Bibian S, Jin H. High performance predictive dead-beat digital controller for DC power supplies[J]. IEEE Trans Power Electron, 2002, 17(3): 420-427.
- [3] Qiu Y, Liu H, Chen X. Digital average current-mode control of PWM DC-DC converters without current sensors[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2010, 57(5): 1670-1677.
- [4] Beccuti AG, Mariethoz S, Cliquennois S, et al. Explicit model predictive control of DC-DC switched-mode power supplies with extended kalman filtering [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 56(6): 1 864-1 874.
- [5] 童乔凌, 陶志威, 谢文, 等. 基于 EKF 的 DC/DC 转换器电感电流观测器[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 48-51.
- [6] Welch G, Bishop G. An introduction to the kalman filter, NC 27599-3175 [R]. Chapel Hill: University of

North Carolina, 2001.

- [7] 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.
- [8] Sanjaya Maniktala. 精通开关电源[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.

作者简介:

陈晨 女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为开关电源转换器的控制.

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

谢文 男, (1980-), 硕士, 讲师. 研究方向为无线通信.

刘政林 男, (1968-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.