

引用格式:王宛阳,吕典,邹志革,等. 基于电荷平衡的 DCM 转换器差分外推控制研究[J]. 微电子学与计算机,2021,38(5): 19-24. [WANG W Y,LYU D,ZOU Z G,et al. Study of CBP—based differentialextrapolation control for DCM converter [J]. Microelectronics & Computer,2021,38(5):19-24.]

基于电荷平衡的 DCM 转换器差分外推控制研究

王宛阳,吕 典,邹志革,闵 闰,童乔凌
(华中科技大学 光学与电子信息学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 为了提升电感电流断续模式(discontinuousconductionmode,DCM)下开关电源转换器的瞬态响应性能,提出了一种基于电荷平衡原理和平均电流的差分外推控制方法.以 Boost 转换器为例,该方法利用采样的输出电压进行差分外推(differential extrapolation,DE),预估负载对电荷的影响,进而通过平衡算法得到电流控制量.相较传统的使用电荷平衡原理的电流控制方法(charge balance principle based current control,CBPC),差分外推控制方法缩短了负载估计的延迟,减小了负载估计误差,为 DCM 转换器的控制设计提供了有效参考.通过 Boost 样机实验对比了 CBPC 控制与 DE 控制在输入、负载和参考电压发生扰动时的响应波形,结果表明,本文提出的 DE 控制对抗动的响应更加优异.

关键词: 开关转换器;断续导通模式;瞬态响应;数字控制;电荷平衡;负载估计

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2021)05—0019—06

Study of CBP-based differential extrapolation control for DCM converter

WANG Wan-yang,LYU Dian,ZOU Zhi-ge,MIN Run,TONG Qiao-ling

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

Abstract: In order to improve the transient response of the switching converter indiscontinueous conducting mode (DCM), a differential extrapolation control method is proposed based on the charge balance principleusing Boost convertor as an example. This method uses the variation of sampled output voltage to carry on an extension, which indicates the load influence on the output capacitor charge, and then obtains the current control quantity by the balance algorithm. Compared with the traditional charge balance principle based current control (CBPC), this method reduces control delay and the transient instability caused by the approximate of load information. The method also providesreferencefor thedesign of DCM controllers. The response waveforms of CBPC control and DE control are comparedby Boost prototype, when input, load and reference voltage are disturbed. Among these experiments, the response is better when using DE control proposed in this paper.

Key words: switching converter;DCM;transient response;digital control;charge balance;load estimation

1 引言

现代 DC/DC 电源对电源的稳定性、准确性、动态特性都提出了更高的需求.传统以 PI 为代表的控

制方式逐渐不能满足新电源的需要,近年有很多关于 DC/DC 变换器新控制方法的研究,用以提升变换器的稳态和瞬态特性.传统的控制方法一般为线性模式,往往通过分析小信号模型和进行前馈补偿

优化响应。但因为变换器器件实际的非线性,它们的控制表现仍有改善的空间^[1]。一些研究中提出了非线性的控制方式如迟滞控制模式和滑膜控制,其移除了传统控制中的前馈补偿而具有更好的动态特性,但这类非线性控制器的控制周期在持续变动,且稳态误差难以消除^[2]。针对特定电路进行特定方向优化的控制方式如 V^2 控制、突发模式控制、主动电感技术、多模式控制、自调节控制在近年来不断被提出^[3-4]。以上的控制方式均为进一步优化特定变换器提供了指导。

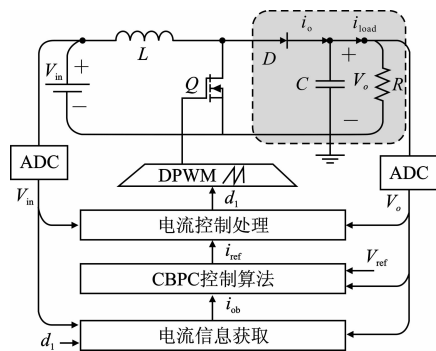
DCMBoost 变换器因没有二极管反向恢复、不需要额外的滤波电感、电压控制环路易于补偿、带宽高等特性在中低功率场合应用广泛。该变换器的众多控制方法中,基于电荷平衡(charge balance principle, CBP)的控制方法具有在负载和线电压扰动时,最小化电压波动、最短化震荡时间等优点,被视为是一种“最佳控制”方法^[5]。因此一些研究进一步提出了基于电荷平衡的结合负载电流估计的平均电流(CBPC)控制方法,其中负载电流估计显著降低了负载变化带来的非线性效应,具有明显的控制优化效果^[6]。进一步的寄生参数估计和参数补偿在一些文章中提出^[7]。但以上控制的负载电流估计方法本身存在的延迟和误差,导致了理想闭环带宽和响应特性的下降^[8]。变换器稳定性和鲁棒性有待进一步提升。

本文基于对上述电荷平衡控制方式中延迟和误差的分析,提出了差分外推(DE)的控制方法,该方法缩短了 CBPC 控制中一个周期的负载估计时延,优化了 DCM Boost 电路瞬态响应,该方法在负载扰动的情景表现突出,可为其它 DCM 转换器的控制提供参考。通过 Boost 样机的扰动实验表明对于输入、负载及参考电压变化的瞬态响应,DE 控制相对 PI 和 CBPC 控制具有更好的效果^[9]。

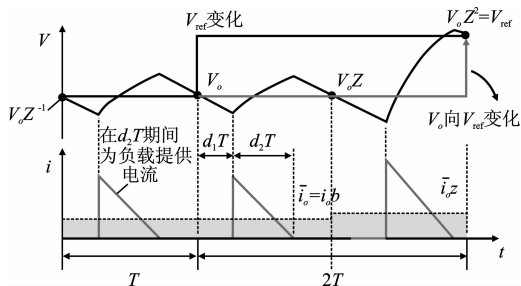
2 基于电荷平衡原理的平均电流模式控制方法

使用电荷平衡原理的电流控制方法在改进 DCM Boost 变换器的瞬态响应时被广泛使用。基本的 CBPC 系统框图 and 关键电压电流波形图如图 1 所示,其中 v_{in} 代表输入电压, v_o 代表输出电压, v_{ref} 为参考电压, d_1 为开关占空比, i_{ob} 代表观测的平均电流, i_{ref} 代表参考电流。

控制的核心原理是:通过输出电容上电压 v_o 受输出电流 i_o 、负载电流 i_{load} 所传输电荷的影响的周期性关系,预测需要的平均输出电流 $\bar{i}_o z$, 得到需要的



(a)CBPC 控制的系统框图



(b)CBPC 控制的关键电压电流波形图

图 1 典型 CBPC 系统框图及波形示意图
参考电流信息。

首先基于输出电容的电荷平衡, v_o 的周期变化量:

$$\Delta v_o = v_o z - v_o = \frac{T}{C} (\bar{i}_o - i_{load}) \quad (1)$$

并且从上式可以估计得上周期的负载电流:

$$i_{load} z^{-1} = \bar{i}_o z^{-1} - \frac{C}{T} (v_o - v_o z^{-1}) \quad (2)$$

考虑到控制器的计算时延,通常在本周期计算下周期需要的控制量,由式(1) 乘上 $z+1$,可以得到:

$$\begin{aligned} \bar{i}_o + \bar{i}_o z &= \frac{C}{T} (v_o z^2 - v_o) + i_{load} z + i_{load} \\ &\approx \frac{C}{T} (v_o z^2 - v_o) + 2i_{load} z^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, i_{load} 的近似基于对两周期间负载电流不变的假设: $i_{load} z^{-1} \approx i_{load} z \approx i_{load}$ 。将(2) 式带入(3) 式中可解出:

$$\bar{i}_o z \approx \frac{C}{T} (v_o z^2 - 3v_o + 2v_o z^{-1}) + 2\bar{i}_o z^{-1} - \bar{i}_o \quad (4)$$

式中, $v_o z^2$ 代表着到下周期时的输出电压, $\bar{i}_o z$ 即为下周期需要的电流控制量,而 i_o 的计算已由(1) 式给出。按照控制意图,分别将 $v_o z^2 = v_{ref}$ 、 $\bar{i}_o = i_{ref}$ 、 $\bar{i}_o z = i_{ob}$ 对应在(4) 式中,最终的参考控制电流表达式为:

$$i_{ref} = \bar{i}_o z \approx \frac{C}{T} (v_{ref} z - 3v_o + 2v_o z^{-1}) + 2\bar{i}_o z^{-1} - \bar{i}_o \quad (5)$$

式中电流观测值 i_{ob} 以及占空比 d_1 的详细计算方式在第3章中给出。

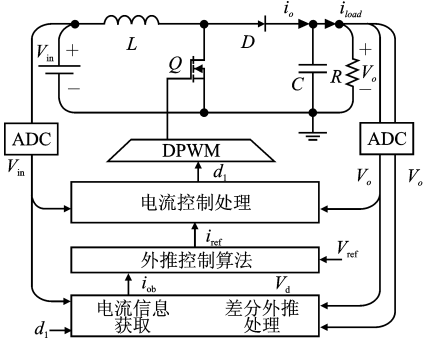
如上所述, CBPC 的控制方法通过两个周期使 v_o 跟踪至 v_{ref} , 因为这种控制方法建立在 $i_{load} z^{-1} \approx i_{load} z \approx i_{load}$ 的假设之上, i_{load} 信息存在延迟和近似, 所以在一些场景下具有不利影响, 下章节中提出了优化方法。

3 差分外推控制方法及小信号分析

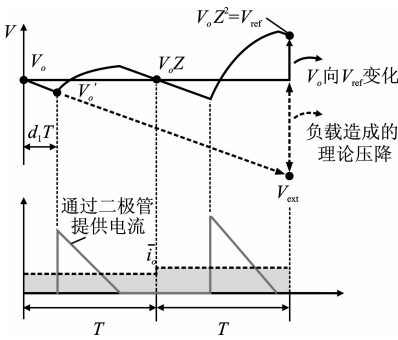
3.1 差分外推的控制方法

为了解决前述问题, 差分外推的控制方法在本节提出. 这种方法避免了负载电流估计造成的延迟, 具有更好的瞬态速度和稳定性。

图2给出了提出的 DE 控制的系统框图以及关键电压电流波形图, 通过两次输出电压采样进行电压的差分外推, 得到与负载信息直接相关的差分外推电压值 v_{ext} , 进而实现平衡控制。



(a) DE 控制的系统框图



(b) DE 控制的关键电压电流波形图

图2 DE 控制的系统框图和波形示意图

首先在 $d_1 T$ 期间, 二极管关断, 由输出电容向负载供电, 从而使电容电压从 v_o 下降到 v_o' . 该变化过程因为变换器一般满足 $RC \gg T$ 而可以近似为直线. 从而由于向负载提供电流, 两个周期内的输出电容压降可以计算为:

$$v_d = v_o - v_{ext} = 2T \frac{\Delta v_o}{\Delta t} = \frac{2(v_o' - v_o)}{d_1} \quad (6)$$

而为了使输出电压达成向 v_{ref} 的变化, 对应两个周期内二极管提供的平均电流要能提供 v_{ext} 到 v_o 以及 v_o 到 v_{ref} 所需要的电流, 因而满足公式:

$$T(\bar{i}_o + \bar{i}_o z) = C(v_{ref} - v_o + v_o - v_{ext}) \quad (7)$$

式中, 本周周期二极管提供的平均电流 $\bar{i}_o = i_{ob}$, 则参考控制电流表达式为:

$$\begin{aligned} i_{ref} = \bar{i}_o z &= \frac{C}{T}(v_{ref} - v_o + v_d) - i_{ob} \\ &= \frac{C}{T}(v_{ref} - v_{ext}) - i_{ob} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, v_d 由式(6)式提供, 因为变换器工作在 DCM 模式, 每周周期在关断时间 $d_2 T$ 期间通过二极管为输出端提供电流, i_{ob} 可由 d_2 与 i_o 峰值 $i_{o, pk}$ 计算得到, 进一步可表示为:

$$i_{ob} = \bar{i}_o = \frac{i_{o, pk} d_2}{2} = \frac{T(v_{in} d_1)^2}{2L(v_o - v_{in})} \quad (9)$$

同时由式(9), 带入算得的 $\bar{i}_o z$ 可以得到下周期所需 d_1 的值. 并且为了保持 DCM 工作模式, 考虑 $(v_o - v_{in})/v_o$ 是 Boost 变换器 CCM/DCM 模式的临界占空比值, 最终的 d_1 取值将为:

$$d_1 z = \min\left(\sqrt{\frac{2(v_o - v_{in})Li_{ref}}{Tv_{in}^2}}, \frac{v_o - v_{in}}{v_o}\right) \quad (10)$$

对比式(8)和式(5)中 CBPC 提供的表达式, 式(8)中的 $i_{ob} z^{-1}$ 和 $v_o z^{-1}$ 项不再出现, 意味着负载估计延迟的缩小和整体计算的更加简明. 通过 DE 控制算法, 电路对小信号扰动的响应得到改善, 后文相关的仿真分析和跳变实验验证了控制的结果。

3.2 小信号分析

典型基于电荷平衡原理的电流控制和所提出 DE 控制方式对应的离散域小信号模型在本节给出, 与前述数字控制的工作场景一致. 基于 2.1 节分析, 离散域下 v_{ext} 由 $v_o - 2v_o T/RC$ 近似后的 DE 控制方程为:

$$\begin{cases} i_{ref} = \frac{C}{T} v_{ref} - v_o + 2 \frac{v_o T}{RC} - \bar{i}_o \\ v_o(z-1) = \frac{T}{C} \bar{i}_o - \frac{v_o}{R} \end{cases} \quad (11)$$

将方程微分化并约去高阶量及化简, 可得:

$$\begin{cases} \hat{i}_{ref} + \hat{i}_o = \frac{C}{T}(\hat{v}_{ref} - \hat{v}_o + 2 \frac{T}{RC} \hat{v}_o) - 2 \frac{v_o T}{R^2 C} \hat{R} \\ (z-1) \frac{C}{T} \hat{v}_o + \frac{\hat{v}_o}{R} - \frac{\hat{v}_o}{R^2} \hat{R} = \hat{i}_o \end{cases} \quad (12)$$

因 $\hat{i}_{ref} = \hat{i}_o z$ 和 $\hat{v}_{ob} = \hat{v}_o$ 已由控制器获得, 最终的闭环小信号模型即为下式:

$$\begin{cases} \hat{v}_o = \Phi_{v_DE}(z) \hat{v}_{ref} + \Phi_{v_DE}(z) \hat{R} \\ \Phi_{v_DE}(z) = \frac{1}{z^2 + a(z-1)} \\ \Phi_{v_DE}(z) = \frac{v_o T}{R^2 C z^2 + a(z-1)} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $a = T/RC$, $\Phi_{v_DE}(z)$ 代表 DE 控制时从 v_{ref} 到 v_o 的小信号传递函数, $\Phi_{R_DE}(z)$ 代表 DE 控制时从负载到 v_o 的小信号传递函数. 同样的, 可以得到 CBPC 控制下的闭环小信号模型表达式, 其中 $\Phi_{v_CBPC}(z)$ 和 $\Phi_{R_CBPC}(z)$ 对应代表 CBPC 控制时从 v_{ref} 和负载到 v_o 的小信号传递函数:

$$\begin{cases} \hat{v}_o = \Phi_{v_CBPC}(z) \hat{v}_{ref} + \Phi_{R_CBPC}(z) \hat{R} \\ \Phi_{v_CBPC}(z) = \frac{1}{z^2 + a(z+1-2z^{-1})} \\ \Phi_{R_CBPC}(z) = \frac{vT}{R^2 C} \frac{z+1-2z^{-1}}{z^2 + a(z+1-2z^{-1})} \end{cases} \quad (14)$$

因为变换器满足 $RC \gg 2T$, 可知 $a \approx 0$. 从而 $\Phi_{v_DE}(z)$ 和 $\Phi_{v_CBPC}(z)$ 的表达式近似为 z^{-2} . 则两种控制方法的表达式均表明 v_o 向 v_{ref} 的变化需两个周期. 但对比小信号模型式, CBPC 控制方法在瞬态信号变化较大时两周期的再稳定可能会丢失. 从 CBPC 的 $\Phi_{R_CBPC}(z)$ 来看, 负载跳变时其输出要多花一个周期来建立稳定, DE 控制缩短的一周期负载预估时延将使变换器在受到扰动时具备更好的响应表现. 仿真和电路实验对此进行了验证.

4 仿真和样机实验结果

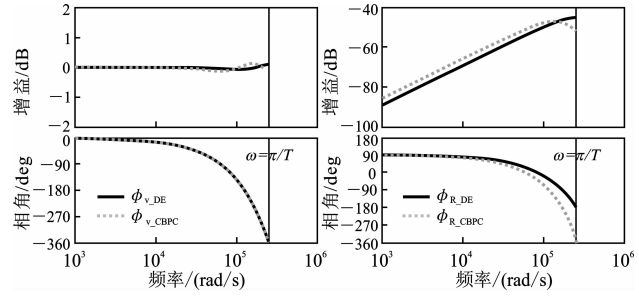
通过 matlab 绘制了 DCM Boost 变换器在 CBPC 和 DE 两种控制下的小信号传递函数波特图.

4.1 仿真结果

式(13)与(14)式中小信号的传递函数波特图如图 3 所示. 从图 3(a)知, 两种控制对于参考电压变化的响应特性是相似的, 但图 3(b)表示出两种控制对于负载变化的响应具有相似性的同时, DE 控制的负载传递函数 $\Phi_{R_DE}(z)$ 的增益曲线要低于 CBPC 传递函数 $\Phi_{R_CBPC}(z)$ 的增益曲线, 表明 DE 控制对于负载扰动有更好的稳定性; 同时注意到传函 $\Phi_{R_DE}(z)$ 相角曲线要高于 $\Phi_{R_CBPC}(z)$ 相角曲线, 代表了 DE 控制可以达到更高的控制频率. 频率响应图说明了 DE 控制有更好的预期控制效果.

4.2 扰动对比实验

为了验证 DE 控制的效果, 搭建了一台 Boost 样机. 在样机分别通过 CPBC 和 DE 控制时, 采集了



(a) 关于参考电压的传递函数 (b) 图关于负载的传递函数

图 3 小信号传递函数对比波特图
负载、输入、参考电压扰动时的响应波形.

4.2.1 实验条件

样机功率部分所用主要参数, 稳态输入输出和工作频率如表 1 所示, 其中 MOSFET 选用 FDS86540 型号, 二极管选用 NRV7-SA4100E 型号. 输入和输出电压的采样通过两个高速 ADC (LTC2314-14) 进行, 数字处理控制芯片采用了 Cyclone IV E 系 FPGA.

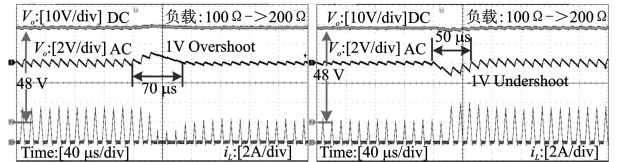
表 1 Boost 电路的主要参数

v_{in}	v_o	L	C	R	f
24 V	48 V	22 μ H	22 μ F	60~250 Ω	80 kHz

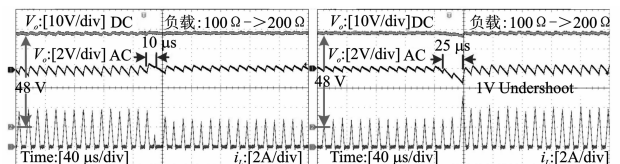
样机通过瞬态理想的空气开关连接不同的输入电源和负载实现跳变切换, 并可通过 FPGA 开发板上 KEY 按键切换参考电压.

4.2.2 实验波形和结果

样机稳定在前述工作条件时, 负载在 100 Ω 到 200 Ω 间跳变的输出电压 v_o 和电感电流 i_L 波形图如图 4 所示. 同样在稳态下输入电压在 20 V 和 24 V 间跳变时两种控制的输出电压 v_o 和电感电流 i_L 对比波形, 在图 5 中给出. 以及当稳态时设定参考电压在 48 V 和 50 V 之间跳变时两种控制的输出电压 v_o 和电感电流 i_L 对比波形, 在图 6 中给出.

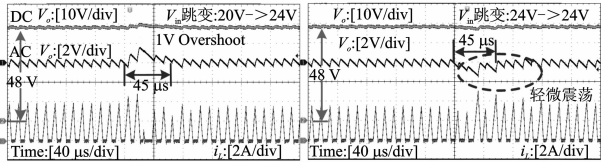


(a) CBPC 控制

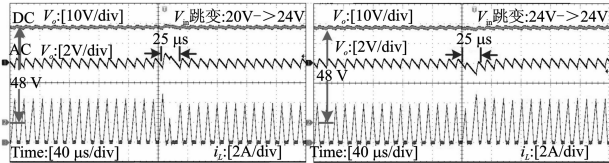


(b) DE 控制

图 4 负载从 100 Ω 向 200 Ω 以及从 200 Ω 到 100 Ω 跳变时的输出电压和电感电流波形

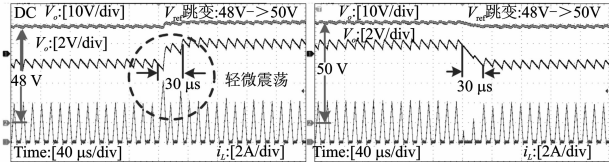


(a)CBPC 控制

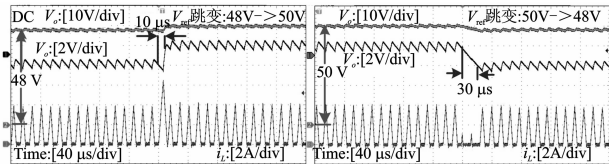


(b)DE 控制

图 5 v_{in} 在 20 V 与 24 V 跳变时输出电压和电感电流波形



(a)CBPC 控制



(b)DE 控制

图 6 v_{ref} 在 48 V 与 50 V 跳变时输出电压和电感电流波形

表 2 中列出了跳变实验的主要结果. 和第 2 章中分析的一致, 相对于一般 PI 数周期以及更大的输出波动, 基于电荷平衡的两种控制适用于提升控制器瞬态响应. 而其中 DE 控制的稳定时间明显短于 CBPC 控制, 并且输出 v_o 的波动更小.

表 2 Boost 样机扰动表现

	CBPC 控制	DE 控制
负载跳变 100~200 Ω	稳定时间 5 周期以上, v_o 波动小	稳定时间 2 周期, v_o 波动小
输入跳变 20 ~ 24 V	稳定时间 5 周期以上, v_o 波动 1V	稳定时间 2 周期, v_o 波动很小
参考跳变 48 ~ 50 V	稳定时间 3 周期以上, 轻微震荡	稳定时间 2 周期, 无振荡

实验补充了当负载跳变范围更大时 CBPC 和 DE 控制的差异, 在负载在 250 Ω 到 60 Ω 间变化时 DE 控制稳定时间仍然在 2 个周期, 而 CBPC 控制的稳定时间上升到 8 个周期以上.

从实验结果来看, DE 控制对负载跳变、输入电

压跳变和参考电压跳变的响应速度更佳, 过冲和欠压均比 CBPC 控制更小且不存在 CBPC 控制的震荡问题, 稳定时间始终维持 2 周期与理论更为一致. DE 控制对负载估计中潜在的误差和延时的消减, 使其响应更快更稳, 特别在负载扰动加重时也可保持理论控制效果.

5 结束语

基于电荷平衡原理的差分外推控制方法优化了 DCM Boost 电路负载估计的过程, 对于小信号扰动的响应迅速准确, 且非常适用于负载扰动的情景. 实测中对于大信号变化时响应可能受到占空比上下限约束问题有待进一步改善. 文章提出的控制方法在 Boost 样机输入、参考电压、负载发生跳变时响应均优于 CBPC 控制方法, 可为 DCM 转换器的控制设计提供有效参考.

参考文献:

[1] BAZDARICR, MATKO D, LEBAN A, et al. Fuzzy model predictive control of a DC-DC boost converter based on non-linear model identification[J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2017, 23 (2): 116-134. DOI: 10. 1080/13873954. 2016. 1232283.

[2] WANG L, WU Q H, TANG W H, et al. Energy balance analysis and control for boost converters[C]// IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing: IEEE, 2017: 8194-8200. DOI: 10. 1109/IECON. 2017. 8217438.

[3] MIN R, ZHANG X F, LYU D, et al. Superposed compensation strategy to optimize load/line transient response and reference tracking for discontinuous conduction mode boost converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (5): 2512-2522. DOI:10. 1109/TII. 2018. 2871359.

[4] HARIHARAN K, KAPAT S, MUKHOPADHYAY S. Constant on-time multi-mode digital control with superior performance and programmable frequency [C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim: IEEE, 2019: 1344-1350. DOI:10. 1109/APEC. 2019. 8722156.

[5] MIN R, TONG Q L, ZHANG Q, et al. Digital sensorless current mode control based on charge balance principle and dual current error compensation for DC-DC converters in DCM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 155-166. DOI:10.

- 1109/TIE, 2015, 2464192.
- [6] QIU Y, CHEN X Y, LIU H. Digital average current-mode control using current estimation and capacitor charge balance principle for DC-DC converters operating in DCM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (6): 1537-1545. DOI: 10. 1109/ TPEL. 2010. 2040089.
- [7] CHEN C, TONG Q L, MIN R, et al. Sensorless predictive current control with a charge balance current estimator for boost converters based on discrete-time model considering current ripple[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(13): 2063-2071. DOI:10. 1049/iet-pel. 2018. 5051.
- [8] ZHANG X F, MIN R, LYU D, et al. Current tracking delay effect minimization for digital peak current mode control of DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (12): 12384-12395. DOI:10. 1109/TPEL. 2019. 2905864.
- [9] 陈晨, 童乔凌, 闵闰, 等. 基于 RLS 的 Boost 转换器在线多参数辨识研究[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(5): 100-103.
- CHENC, TONG Q L, MIN R, et al. Study of RLS-based online multiparameter identification for boost converter[J]. Microelectronics & Computer, 2017, 34 (5): 100-103.

作者简介:

王宛阳 男, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为电力电子转换器的数字化控制. E-mail: hustwwwy@163. com.

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.

邹志革 男, (1975-), 博士, 副教授. 研究方向为超大规模集成电路与系统教学与科研.

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

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.