

控制受限滑模控制 Buck 变换器优化设计

倪 雨¹, 许建平²

(1. 成都信息工程学院控制工程学院, 四川成都 610225; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031)

摘 要: 该文针对传统滑模控制开关变换器的滑模系数选取困难的问题, 分析了控制受限的传统滑模控制 Buck 变换器的滑动模态区与滑模系数的关系. 根据电感电流为零时系统在相平面的运动规律与滑模区的关系, 给出了选取最优滑模系数的方法, 以确保开关变换器系统在负载变动范围内快速进入滑动模态区, 避免输出电压振荡现象. 可根据负载变化范围直接采用公式计算最优滑模系数. 仿真研究和实验结果验证了优化设计方法的正确性和有效性.

关键词: 滑模控制; 控制受限; 临界滑模系数; 滑动模态区; Buck 变换器

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0555-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.023

Optimal Design of Sliding Mode Control Buck Converter with Bounded Input

NI Yu¹, XU Jian-ping²

(1. College of Automatic Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to simplify the selection of sliding coefficient of conventional sliding mode control switch converter, the relations among the sliding region, the sliding coefficient and the circuit parameters of Buck converter are analyzed and discussed. When inductor current is zero, according to the relationship between the systems trajectory and sliding region, an optimal design method for the sliding coefficient was proposed to ensure that under load variation, the switch converter enter the sliding region without the output voltage oscillation phenomena. Based on load variation scope, the optimal sliding coefficient is calculated directly. The simulation and experimental results verify the validity and feasibility of the optimal design method proposed.

Key words: sliding mode control; bounded input; critical sliding coefficient; sliding region; Buck converter

1 引言

滑模控制是变结构系统的一种有效控制方法, 滑模变结构控制系统具有卓越的鲁棒性和瞬态特性. 因而具有变结构特点的开关变换器的滑模控制受到了电力电子领域专家们的关注, 滑模控制开关变换器的研究取得了丰硕成果^[1~4]. 其中, 滑模控制开关变换器的降频^[5~8], 抖振的削弱(消除)^[9~17], 以及如何提高滑模控制开关变换器的品质^[18~23]是重要研究课题. 但仅有少量文献对滑模控制开关变换器的设计方法进行研究^[6, 18, 23].

滑模控制开关变换器是控制量受限的滑模控制系统, 由控制量受限的滑模控制理论可知^[16], 一阶滑模控制系统的滑模区与滑模系数成反比, 而滑动模态的动态

速度与滑模系数成正比, 且滑模系数过大将引起系统输出量的振荡, 从而降低系统的鲁棒性. 因此, 滑模系数必须兼顾较大滑模区范围和良好的滑模动态速度, 需要合理设计. 文献[6]研究了基于二阶系统设计方法设计的二阶滑模控制开关变换器, 有效地解决了滑模系数的选取问题. 但是, 滑模控制的一个重要特点是降阶控制, 采用二阶滑模控制的开关变换器失去了滑模控制的降阶控制优势, 而且该设计方法比较繁琐. 文献[18]采用的通过测量负载电流设计滑模系数的方法, 存在较大测量损耗且不能获得良好的负载瞬态特性和稳态精度. 文献[23]给出了一种基于超调量的滑模系数设计方法, 获得了良好的控制效果, 但不能确定滑模系数是否最佳. 为此, 本文研究了控制受限滑模控制开关变换器的最优滑模系数设计方法, 使滑模控制系统具有最优滑模品质.

本文将分析传统一阶滑模控制 Buck 变换器的滑动模态区与滑模系数和电路参数的关系,结合 Buck 变换器的轻载运动特性,提出一种最优滑模系数设计方法,最后通过仿真和实验结果验证本文所提出方法的可行性和有效性.

2 滑模控制原理

滑模控制的思想是设计一个控制量,使滑模控制系统在相平面上的系统轨线总是运动至事先设计的轨道上,并沿此轨道运动至相平面原点,进入系统稳态.如图 1(a)所示为滑模控制原理图,其中, $S=0$ 为切换面, x_1 为变结构系统的输出误差, x_2 为输出误差的一阶导数.滑模控制系统在经过正常运动和滑模运动两个阶段后,最终进入系统稳态.滑模控制系统具有三个主要特征:滑动模态的存在性、滑动模态的稳定性和滑动模态的可达性.

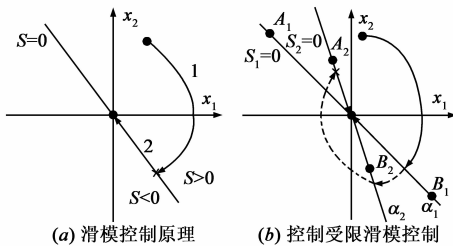


图1 滑模控制系统的运动轨线

控制受限滑模控制系统的滑模区与滑模系数呈反比例关系,当滑模系数很大时,系统可能出现如图 1(b)所示的系统轨线,线段 A_1B_1 和 A_2B_2 表示两种情形下的滑模区域, α_1 和 α_2 是两个不同的滑模系数,满足 $\alpha_1 < \alpha_2$.由图 1(b)可知,当滑模系数为 α_2 时,系统轨线在首次到达切换线时处于滑模区 A_2B_2 之外,系统结构发生切换,并继续做趋近运动,第二次到达切换线时进入滑模区 A_2B_2 之内,从而开始做滑模运动,这样的运动显然增加了系统的稳态恢复时间,导致系统输出量发生振荡.

3 滑模电压控制 Buck 变换器

3.1 误差状态方程

如图 2 所示为一阶滑模电压控制 Buck 变换器.选取输出电压误差 $x_1 (= V_{\text{ref}} - \beta u_o)$,参考输出电压误差变化率 $x_2 (= -\beta i_c / C)$ 作为系统变量, $u_c \in \{0, 1\}$ 作为开关控制量,可以得到系统工作于电感电流连续模式的误差状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{LC}x_1 - \frac{1}{R_L C}x_2 - \frac{\beta u_s}{LC}u_c + \frac{V_{\text{ref}}}{LC} \end{cases} \quad (1)$$

当阶跃减载量较大时,在开关关断期间,一阶滑模

电压控制 Buck 变换器将出现电感电流等于零的情形,此时系统具有不同于式(1)的误差状态方程.

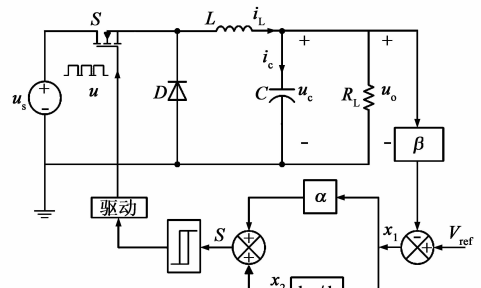


图2 一阶滑模电压控制Buck变换器

(1) 误差状态方程(电感为零)

当电感电流 $i_L = 0$ 时, $i_c = -\frac{u_o}{R_L}$, 带入 $x_2 = -\frac{\beta}{C}i_c$

可得到

$$x_2 = \frac{\beta u_o}{CR_L} \quad (2)$$

对式(2)两边求导得到

$$\dot{x}_2 = \frac{\beta}{CR_L} \dot{u}_o \quad (3)$$

利用电容的伏安关系,将式(3)转换为:

$$\dot{x}_2 = -\frac{\beta}{C^2 R_L} i_c \quad (4)$$

将 $i_c = -\frac{u_o}{R_L}$, 带入式(4)可得到

$$\dot{x}_2 = -\frac{\beta u_o}{C^2 R_L^2} \quad (5)$$

整理式(5)有

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{(CR_L)^2} x_1 - \frac{V_{\text{ref}}}{(CR_L)^2} \quad (6)$$

结合式(6)可得电感电流为零时的误差状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{(R_L C)^2} x_1 - \frac{V_{\text{ref}}}{(R_L C)^2} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 系统相平面运动方程(电感为零)

对式(2)进行整理:

$$x_2 = \frac{\beta u_o}{CR_L} = \frac{\beta u_o - V_{\text{ref}} + V_{\text{ref}}}{CR_L} = -\frac{1}{CR_L} x_1 + \frac{1}{CR_L} V_{\text{ref}} \quad (8)$$

将式(8)两边同乘以 CR_L , 并整理可得

$$R_L C x_2 + x_1 - V_{\text{ref}} = 0 \quad (9)$$

式(9)为滑模控制 Buck 变换器系统在电感电流等于零期间的运动方程.由式(9)可知,电感电流为零时,系统轨线在相平面 $(x_2 - x_1)$ 内沿斜率为 $-(R_L C)^{-1}$ 的直线 l_c 运动.

3.2 滑动模态区

Buck 变换器属于二阶控制对象,根据滑模控制技

术降一阶的控制特性,只需设计一个一阶滑模面方程(即滑模线).选取切换线为 $S = \alpha x_1 + x_2 = 0$, (α 为滑模系数, $\alpha > 0$ 确保滑动模态稳定),滑模运动规律为

$$x_1 = x_1(t_1)e^{-\alpha t} \quad (10)$$

其中, t_1 表示系统运动至切换线并开始做滑模运动的时刻, t_1 之前系统做趋近运动.由式(10)可知,滑动模态的动态速度直接取决于滑模系数,滑模系数越大,系统进入滑模区后的动态速度越快.

为了分析滑动模态区,将滑动模态存在条件等价

$$\begin{cases} \dot{S} < 0, & 0 < S < \xi \\ \dot{S} > 0, & -\xi < S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, ξ 为任意小正数.

将式(11)带入式(1)得到:

$$\begin{cases} \lambda_1 = (\alpha - \frac{1}{R_L C})x_2 - \frac{1}{LC}x_1 + \frac{V_{ref} - \beta u_s}{LC} < 0, & 0 < S < \xi \\ \lambda_2 = (\alpha - \frac{1}{R_L C})x_2 - \frac{1}{LC}x_1 + \frac{V_{ref}}{LC} > 0, & -\xi < S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

文献[23]根据式(12)中 α 与 $(R_L C)^{-1}$ 的关系,按三

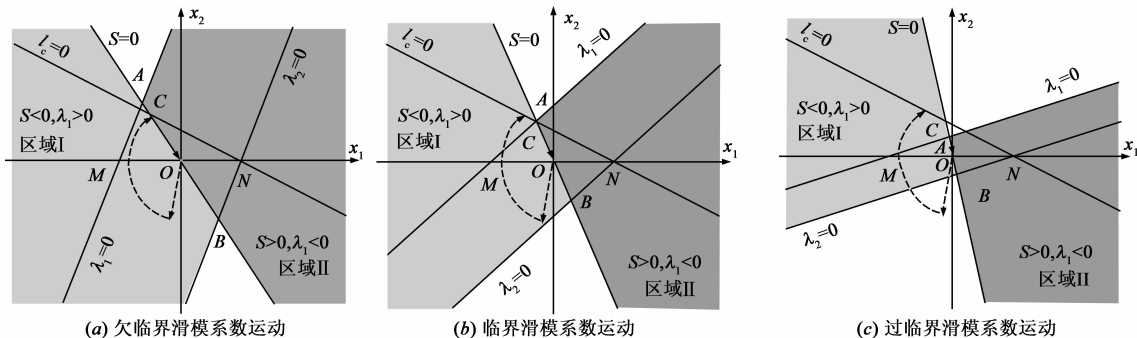


图3 滑模控制系统减载运动轨迹 ($\alpha > (R_L C)^{-1}$)

(2)临界滑模系数运动.此时,滑模系数较大,点 C 与滑模区域的边界点 A 重合,如图 3(b)所示.由图 3(b)可知,当负载减载时,临界滑模系数的系统运动轨线在趋近运动中的一段时间会进入电感电流为零的状态,之后经端点 A 直接进入滑模面做滑模运动.

(3)过临界滑模系数运动.此时,滑模系数大于临界滑模系数,点 C 落在滑模区 AB 之外,如图 3(c)所示.由图 3(c)可知,当负载减载时,过临界滑模系数的系统运动轨线的趋近运动的中间段进入电感电流为零的运动状态,经过 C 点后系统仍旧做趋近运动,最后进入滑模面做滑模运动,最终进入稳定运行状态.

欠临界滑模系数运动时,滑模系数偏小,导致滑动模态动态品质和稳态品质较差;过临界滑模系数运动时,虽然滑动模态的静态品质好,但经过电感电流为零的运动后仍旧不能即时进入滑模运动,增加了趋近

种情形分析了滑动模态区.分析结果表明,当 $\alpha > (R_L C)^{-1}$ 时,可以获得最好控制效果.滑模控制 Buck 变换器的滑模区随着负载电阻和滑模系数的增大而减小,加载将增加滑模区,系统更容易进入滑模区;减载时将减小滑模区,系统较难进入滑模区.可见,如果系统能在减载时第一时间进入滑模区,那么系统加载时一定能够在第一时间进入滑模区.

3.3 最优滑模系数设计

为了获得最优滑模品质,根据条件 $\alpha > (R_L C)^{-1}$ 设计滑模控制 Buck 变换器的滑模系数.在相同减载量的情况下,滑模区将随着滑模系数的增加而减小,系统运动轨线可能出现三种情况:欠临界滑模系数运动、临界滑模系数运动和过临界滑模系数运动.假设电感电流等于零的直线 $i_c = 0$ 与切换线 $S = 0$ 的交点为 C ,直线 $\lambda_1 = 0$ 与切换线 $S = 0$ 的交点为 A ,下面分别对这三种情况进行分析.

(1)欠临界滑模系数运动.此时,滑模系数较小,交点 C 位于滑模区 AB 之间,如图 3(a)所示.由图 3(a)可知,减载时,欠临界滑模系数的系统运动轨线可以第一时间到达并进入滑模区做滑模运动.

运动的时间,从而增加了暂态过程的时间;临界滑模系数运动时,系统轨线总能快速进入具有较好滑动模态品质的滑模区,实现了趋近运动与滑模运动的优化分配.因此,欠临界和过临界的系统动态品质基本一致,临界滑模系数的系统具有最佳响应速度.

根据图 3(b),联合式(9)、(12)和 $S = 0$,有

$$\alpha^2 + m\alpha + n = 0 \quad (13)$$

其中, $m = \frac{(R_L^2 C - L)V_{ref} - R_L^2 C \beta u_s}{LCR_L V_{ref}} < 0$, $n = \frac{\beta u_s}{LCV_{ref}} > 0$.

再结合条件 $\alpha > (R_L C)^{-1}$,可得临界滑模系数计算

$$\text{公式} \quad \alpha = \frac{1}{2}(-m + \sqrt{m^2 - 4n}) \quad (14)$$

临界滑模系数与负载电阻的关系如图 4 所示.由图 4 可知,临界滑模系数与负载电阻成正比,且总是高于 $(R_L C)^{-1}$.由前面分析可知,系统最轻载时的滑模区最小,对于一个固定减载,如果此时输出没有振荡,那么

在其它负载情况下系统输出也不会出现振荡. 因此, 为了使滑模控制 Buck 变换器在最大负载跃变时输出无振荡, 选取最大负载电阻对应的临界滑模系数为最佳滑模系数, 并可使系统获得高速滑动模式.

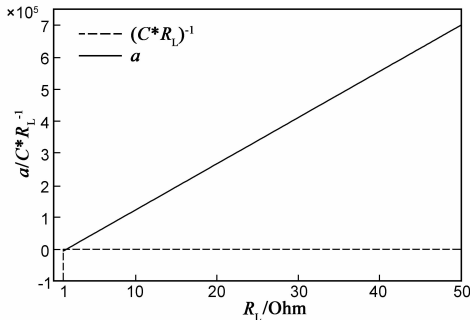


图4 临界滑模系数与负载电阻的关系

4 仿真与实验

下面对最优滑模系数设计方法进行仿真论证和实验研究, 以验证该选取方法的正确性和有效性. 滑模控制 Buck 变换器的电路参数与设计指标: 输入电压 $u_s = 12\text{V}$, 输出电压期望值 $V_d = 5\text{V}$, 负载电阻 R_L 变化范围: $R_{L\min}(50\Omega) \sim R_{L\max}(1\Omega)$, 滤波电感器 $L = 100\mu\text{H}$, 滤波电容 $C = 1880\mu\text{F}$, 滤波电容的串联等效电阻 $R_c = 25\text{m}\Omega$. 仿真和实验采用滞环调制方式, 滞环宽度为 $2k = 200$.

根据式(14)可以计算出滑模系数为 $\alpha = 700000$; 再分别选取欠临界滑模系数 200000 和过临界滑模系数 1200000. 如图 5 所示为负载在 2.5A 和 0.1A 之间阶跃变化时的瞬态特性.

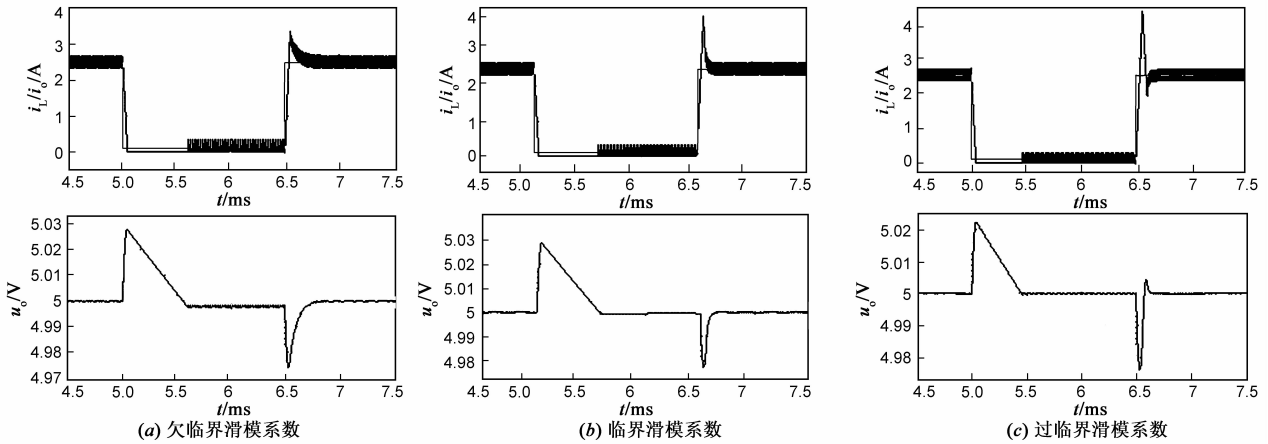


图5 滑模控制Buck变换器负载跃变时输出电压响应波形

由图 5 可知, 系统减载/加载瞬态调节时间分别为 $520\mu\text{s}/250\mu\text{s}$ 、 $510\mu\text{s}/120\mu\text{s}$ 和 $480\mu\text{s}/150\mu\text{s}$, 其中过临界滑模系统加载时存在振荡, 欠滑模系数系统减载时存在

稳态误差. 可见, 临界滑模系统具有最优加减载瞬态响应性能和稳态性能.

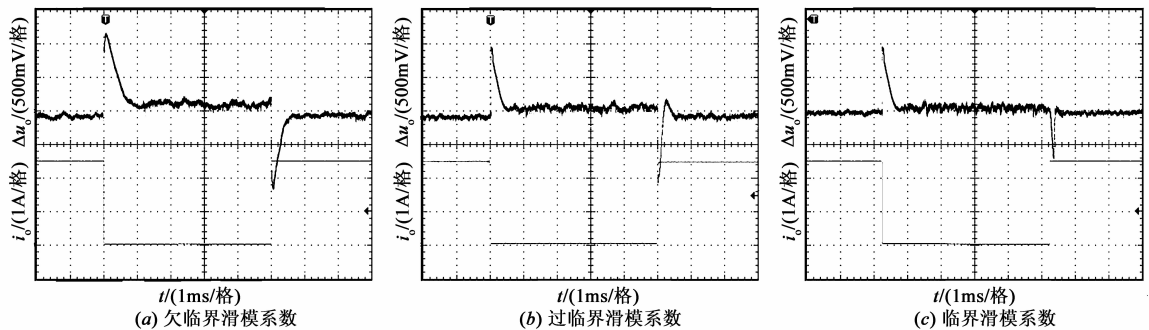


图6 传统滑模控制Buck变换器负载突变瞬态波形

由图 6 实验结果可知, 临界滑模控制 Buck 变换器具有最快动态速度, 且输出电压无振荡. 实验结果中输出电压稳态调节时间较仿真时偏大, 这主要由实际控制延迟和测量延迟引起.

仿真和实验结果表明, 临界滑模控制 Buck 变换器较欠临界和过临界滑模控制 Buck 变换器具有更快动态

响应速度, 且输出电压无振荡. 通过式(14)直接算得临界滑模系数, 即滑模控制 Buck 变换器的最优滑模系数.

5 结论

本文基于控制量受限的滑模控制理论, 研究了滑模区与滑模系数和主电路参数的关系, 根据滑模控制 Buck 变换器的轻载特性提出了滑模系数最优设计公

式,再结合负载电阻变动范围能计算出最优滑模系数,解决了滑模系数选取困难的问题.仿真研究和实验结果表明临界滑模系统具有最优负载动态特性和稳态性能.最优滑模控制器设计简单,滑模系数设计方便,有助于滑模控制推广到开关变换器的实际应用中.

参考文献

- [1] 伍言真,丘水生,陈艳峰.DC/DC 开关变换器滑模变结构控制的新方案[J].电子学报,2000,28(5):62-64.
WU Yan-zhen, QIU Shui-sheng, CHEN Yan-feng. A novel sliding-mode control scheme for PWM DC/DC switching converter [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(5): 62-64. (in Chinese)
- [2] Comanescu M, Xu L. Sliding-mode MRAS speed estimators for sensorless vector control of induction machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(1): 146-153.
- [3] Topalov A V, Cascella G L, Giordano V, et al. Sliding mode neuro-adaptive control of electric drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 671-679.
- [4] 汤赐, 罗安, 周柯, 等. 新型注入式混合有源滤波器的滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 99-103.
TANG Ci, LUO An, ZHOU Ke, et al. Sliding model control of new injection type hybrid active filter [J]. Proceedings of CSEE, 2007, 27(19): 99-103. (in Chinese)
- [5] Hebertt S R. Sliding mode control on slow manifolds of DC-DC power converters[J]. International Journal of Control, 1988, 47(51): 1323-1340.
- [6] Tan S C, Lai Y M, Tse C K, et al. A fixed-frequency pulse-width-modulation based quasi-sliding mode controller for buck converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1379-1392.
- [7] Nguyen V M, Lee C Q. Tracking control of buck converter using sliding-mode with adaptive hysteresis[A]. Canesin C A. Proceedings of the 26th Power Electronics Specialists Conference[C]. Atlanta, USA: IEEE, 1995. 1086-1093.
- [8] 马皓, 韩思亮. 新型功率放大器时变滑模控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 55-59.
MA Hao, HAN Si-liang. Time-dependent sliding surface for novel AC power amplifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 55-59. (in Chinese)
- [9] 倪雨, 许建平. 准滑模控制开关变换器分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 1-6.
NI Yu, XU Jian-ping. Study of quasi-sliding-mode control switching DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 1-6. (in Chinese)
- [10] Arulselvi S, Ramesh Kumar C, Uma G, et al. Design of fuzzy sliding mode control for DC-DC converter [A]. L M Palaniswami, L M Patnaik. Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing [C]. Madras, India: IEEE, 2005. 217-222.
- [12] Khaehintung N, Kunakom A, Aorpimai M, et al. An adaptive fuzzy logic controller by sliding mode control method for DC-DC converter [A]. D M Vilathgamuwa. Proceedings of the 6th Conference on Power Electronics and Drive System[C]. Bangkok, Thailand: IEEE, 2005. 136-139.
- [13] Lin P Z, Lin C M, Hsu C F, et al. Type-2 fuzzy controller design using a sliding-mode approach for application to DC-DC converters[J]. IEE Proceedings of Electronics Power Applications, 2005, 152(6): 1482-1488.
- [14] Guo L P, Hung J Y, Nelms R M. Digital implementation of sliding mode fuzzy controllers for boost converters[A]. L M Prieto. Proceedings of the Twenty-First Applied Power Electronics Conference and Explore[C]. Ontario, Canada: IEEE, 2006. 1424-1429.
- [15] Guo L P, Hung J Y, Nelms R M. Design and implementation of sliding mode fuzzy controllers for a buck converter[A]. SKamal Al-Haddad. Proceedings of the twenty-first International Symposium on Industrial Electronics [C]. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 2006. 1081-1087.
- [16] Cheng K H, Hsu C F, Lin C M, et al. Fuzzy-neural sliding-mode control for DC-DC converters using asymmetric gaussian membership functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1528-1536.
- [17] 高为炳, 程勉. 变结构系统的品质控制[J]. 控制与决策, 1989, 4(4): 1-6.
GAO Wei-bing, CHENG Mian. Quality control of variable structure control systems[J]. Control and Decisions, 1989, 4(4): 1-6. (in Chinese)
- [18] Frasca R, Iannelli L, Vasca F. Dithered Sliding-mode control for switched systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs, 2006, 53(9): 872-876.
- [19] Tan S C, Lai Y M, Cheung M K H, et al. An adaptive sliding mode controller for buck converter in continuous conduction mode [A]. James Kokernak. Proceedings of the 19th Applied Power Electronics Conference and Explore [C]. Anaheim, USA: IEEE, 2004. 1395-1400.
- [20] Fadil H E, Giri F, Ouadi H. Adaptive sliding mode control of pwm boost DC-DC converters[A]. L Glielmo. Proceedings of the 45th Conference of Control Application [C]. Munich, Germany: IEEE, 2006. 3151-3156.
- [21] Ni Y, Xu J P. Study of global sliding mode controlled switching DC-DC converters[A]. John Chiasson. Proceedings of the 40th International Conference on Industrial Technology [C]. Chengdu, China: IEEE, 2008. 1-5.
- [22] Ni Y, Xu J P. Global sliding mode controller for buck converter based on reaching law[A]. Yu J B. Proceedings of the 6th

International Conference on Communications, Circuits and Systems[C]. Xiamen, China: IEEE, 2008. 1457 – 1461.

- [23] 倪雨, 许建平, 于海坤, 王金平. 控制受限滑模控制 Buck 变换器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 26 – 32.

NI Yu, XU Jian-ping, YU Hai-kun, WANG Jin-ping. Design of sliding mode control Buck converter with bounded input [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 26 – 32. (in Chinese)

作者简介



倪雨(通讯作者) 男, 1978年4月生于四川成都. 工学博士, 现为成都信息工程学院控制工程学院副教授. 研究方向为开关 DC-DC 变换器电路拓扑及滑模控制技术.

E-mail: niyuheiger@163.com



许建平 男, 1963年6月生于贵州. 教授, 现为西南交通大学电气工程学院博士生导师. 研究方向为高频开关变换器电路及其控制策略.

E-mail: jpxu-swjtu@163.com