

Buck 变换器的幂次函数指数趋近律滑模算法研究

李永恒¹, 梁青阳¹, 孙超¹, 孙哲²

(1. 空军航空大学, 长春 130000; 2. 中国人民解放军 95926 部队, 长春 130000)

摘要: 在指数趋近律的基础上, 设计一种新型的幂次函数指数趋近律。利用幂次函数的智能特性, 使轨迹的运动速度与轨迹和滑模面的距离相关联, 实现自适应调节, 克服了指数趋近律在穿越滑模面时的剧烈切换, 抑制了抖振现象。将此幂次函数指数趋近律应用于 Buck 变换器, 并给出具体的 Matlab/Simulink 仿真模块, 仿真验证了此方法的有效性。

关键词: 滑模控制; Buck 变换器; 幂次函数指数趋近律; 抖振

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)02-0085-04

Buck Converter Sliding Mode Algorithm Based on Power Function Exponential Reaching Law

LI Yong-heng¹, LIANG Qing-yang¹, SUN Chao¹, SUN Zhe²

(1. Aviation University of Air Force, Changchun 130000, China; 2. No. 95926 Unit of PLA, Changchun 130000, China)

Abstract: A new kind of power function exponential reaching law was designed based on exponential reaching law. The intelligence features of the exponential function were used to associate the speed of the trajectory with the distance of velocity to the sliding mode surface, and adaptive adjustment was implemented. The reaching law could suppress the chattering of the exponential reaching law when it crossing through a sliding mode surface. The power function exponential reaching law was applied to the Buck converter. A specific Matlab/Simulink module was presented, and the simulation verified the effectiveness of this method.

Key words: sliding mode control; Buck converter; power function exponential reaching law; chattering

0 引言

滑模控制是变结构控制方法的一种, 其对内部参数和外部干扰不敏感, 具有很好的鲁棒性, 动态响应特性也较为优异, 适于工程实际。在理想条件下, 由于切换频率无限大, 不会产生抖振, 但在现实情况下, 抖振则无法避免。抖振可引起系统的高频振荡, 这也为其在工程实践中应用提出了极大的挑战。

国内外学者针对滑模控制抖振问题提出了很多解决方法, 我国科学家创立了趋近率方法来减小滑模运动中的抖振问题, 得到了理想的效果^[1]。文献[2]首次提出了变速趋近律, 采用变速趋近律, 会产生扇形的切换区, 并给出了扇形切换区准滑动模态的数学模型; 文献[3]将模糊控制与滑模控制结合起来, 通过模糊规则调节指数趋近律的系数, 设模糊规则的输入为切

换函数的绝对值 $|s|$, 模糊规则的输出为指数趋近律的系数 ε 和 k , 这样可进一步改善滑动模态的动态品质, 减小系统的高频振动; 文献[4]设计了一种自适应变速趋近律, 在轨迹到达滑模面前, 采用自适应指数趋近律, 到达滑模面后, 采用变速趋近律, 有效地减小了抖振; 文献[5]在幂次数趋近率和积分趋近律的基础上, 设计了幂次数积分趋近率、幂次数指数积分趋近率滑模观测器, 从仿真结果中可以看出, 滑模观测器在抑制抖动方面起到了很好的效果; 文献[6]提出了一种双幂次趋近律, 提高了系统的收敛速度, 使系统具有更好的动态品质; 文献[7]提出了一种新型的离散趋近律, 针对系统的不确定部分设计了扰动预测器, 使系统状态稳定于原点, 具有很高的估计精度, 有效地减弱了抖振; 文献[8]针对系统的不确定项, 利用模糊控制进行在线估计, 对切换增益进行模糊自适应调整, 在满足滑模到达条件的基础上, 尽量减小切换增益, 以降低抖振。

本文在二阶 Buck 变换器上设计了一种新型的滑模幂次函数趋近律, 此趋近律在滑模变指数趋近律的基础上, 采用所设计的幂次函数代替滑模变结构控制中的符

号开关函数,可在较大的范围内具有自适应调节的效果,有效地抑制了抖振现象。

1 Buck 变换器的数学模型

Buck 变换器是直流降压变换器,又称为直流斩波器,它是一种输出电压平均值小于或等于输入电压的单开关管的直流电压变换器。

图1所示为 Buck 变换器的拓扑结构图。其中: U_1 为输入直流电压; V_g 为开关管,负责整个电路的通断; D 为续流二极管; L, C 分别表示电感、电容; R_L 为负载电阻。

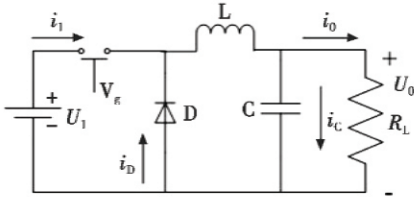


图1 Buck 变换器拓扑结构图

Fig.1 Buck converter topology structure

当开关管 V_g 导通时,电流通过电感 L 向负载充电;当开关管 V_g 关断时,负载电流通过电感 L 放电。Buck 变换器通过开关管的快速通断,维持负载电压的稳定。调节开关管 V_g 的通断周期,即可调整负载两端输出电流和电压的大小。

假定负载为阻性负载,以电感电流 i_L 与电容电压 v_C 为状态变量,忽略电感和电容的寄生电阻,可得 Buck 变换器的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_C}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{CR_L} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_i}{L} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

式中, u 为状态变量。当 $u = 1$ 时,对应开关管 V_g 闭合;当 $u = 0$ 时,对应于开关管 V_g 打开。

2 滑模面和滑模控制策略的设计

Buck 变换器工作在 CCM 模式下,令电压偏差为 x_1 ,电压动态偏差(电压偏差的变化率)为 x_2 ,则 x_1, x_2 可以描述为

$$x_1 = v_{ref} - v_0 \quad (2)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = -\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{v_0}{R_L} - \int \frac{uv_i - v_0}{L} dt \right) \quad (3)$$

对式(3)进行求导,得到滑模状态空间模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{v_i}{LC} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{ref}}{LC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

选取滑模面函数为 $s = cx_1 + x_2$,选取控制规则为

$$u = \begin{cases} u^+ & s(x) > 0 \\ u^- & s(x) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 幂次函数指数趋近律

滑模变结构控制系统产生抖振的根本原因在于系统状态点在切换面的高速切换,于是传统切换面中符号开关函数的存在不可避免地会给系统带来抖振,但若因此而取消开关函数,就失去了变结构的定义,也就无所谓滑模运动,会使系统失去鲁棒性。为此,设计一个基于幂次函数的新型开关函数来代替传统的符号开关函数。

幂次函数的切换与传统符号函数和饱和函数相比,在较大的范围内具有自适应调节的效果。当 s 较大,即系统运动点远离切换面 $s = 0$ 时, $fal(s, \alpha, \delta) > 1$,且偏离切换面越远时, fal 函数的模值越大;当 s 较小,即系统运动点靠近并穿越切换面时,幂次函数的切换与传统符号函数和饱和函数相比没有剧烈的切换,取而代之的是较为平滑的过渡曲线。

3 种开关函数的对比如图2所示。

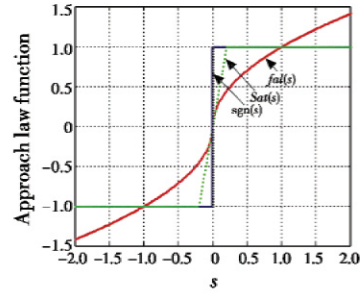


图2 3种开关函数的对比

Fig.2 Comparison of three kinds of switching functions

根据幂次函数设计的新型滑模指数趋近律为

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon fal(s) - ks \\ fal(s, \alpha, \delta) = \begin{cases} \delta^{1-\alpha} & |s| < \delta \\ |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) & |s| \geq \delta \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $0 < \alpha < 1; 0 < \delta < 1$ 。

根据李雅普诺夫稳定性原理,取李雅普诺夫稳定性函数为

$$V(x) = \frac{s^2}{2} \quad (7)$$

则根据式(6)可得:

$$\begin{aligned} 1) \text{ 当 } |s| \geq \delta \text{ 时, } \dot{s} &= -\varepsilon |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks, \text{ 有} \\ \dot{V}(x) = s\dot{s} &= s(-\varepsilon |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks) = -\varepsilon |s|^{\alpha+1} - ks^2 < 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} 2) \text{ 当 } |s| < \delta \text{ 时, } \dot{s} &= -\varepsilon \frac{s}{\delta^{1-\alpha}} - ks, \text{ 有} \\ \dot{V}(x) = s\dot{s} &= s(-\varepsilon \frac{s}{\delta^{1-\alpha}} - ks) = -(\frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}} + k)s^2 \leq 0 \quad (9) \end{aligned}$$

可以看出,式(8)~(9)均为负定的,从而可以证明系统是渐近稳定的,符合设计的要求。

4 控制系统的性能分析

Buck 变换器初始状态 $x_1 > 0, s > 0$, 表示系统状态运动点在切换面 $s > 0$ 一侧。

当 $|s| \geq \delta$ 时, 得滑模趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) - ks < 0 \quad (10)$$

即此时的趋近律 $s(t)$ 为递减函数, 表现为滑模变结构控制中系统运动点向切换面的趋近运动过程。式 (10) 中, ε 表示等速趋近律, 当 $|s|$ 较大时, 若 $|s|^\alpha > 1$, 则表示等速趋近律部分的作用在增强。系统运动点偏离切换面越远, 则 $|s|^\alpha$ 越大, 表示等速趋近律部分的作用越强。运动点在趋近阶段的趋近速度越快, 表现为提高了系统的响应速度和抗干扰能力。

当运动点趋近切换面, 即进入 $0 < s < \delta$ 阶段时, 可得滑模趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \frac{1}{\delta^{1-\alpha}} s - ks < 0 \quad (11)$$

由此可以看出, 此时的 $s(t)$ 依然为递减函数, 表示系统运动点在继续向切换面 $s = 0$ 运动, 只是在进行该阶段时, 递减的速度发生了变化。

在选定常数 α, δ 之后, 不难验证

$$0 < \frac{1}{\delta^{1-\alpha}} < 1 \quad (12)$$

由此可知, 当系统运动点达到切换面附近时, 滑模运动中趋近律部分的作用相比传统的指数趋近律有一定的弱化, 使运动点穿越切换面时维持在较低的速度上, 避免了运动点以较大的速度穿越切换面而引起系统输出强烈的抖振。同时, 由图 2 可知, 在趋近阶段 $0 < s < \delta$ 中, 幂次函数的变化相比符号开关函数和饱和函数要平滑, 符合上述分析。

由于各级组织惯性的作用, 当系统运动点首次穿过切换面, 即进入 $-\delta < s < 0$ 时, 可得滑模趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \frac{1}{\delta^{1-\alpha}} s - ks > 0 \quad (13)$$

表示此时 $s(t)$ 由递减函数变为递增函数, 促使系统运动点向切换面 $s = 0$ 运动。同样, 由于系统惯性的作用, 当运动点再次穿过切换面进入 $0 < s < \delta$ 阶段时, 系统的运动控制将再次按照上述运动规律进行调节运动。

5 仿真实证

通过 Matlab/Simulink 仿真软件, 将指数趋近律和幂次函数指数趋近律分别应用于具体的 Buck 变换器进行比较, 如图 3 所示。

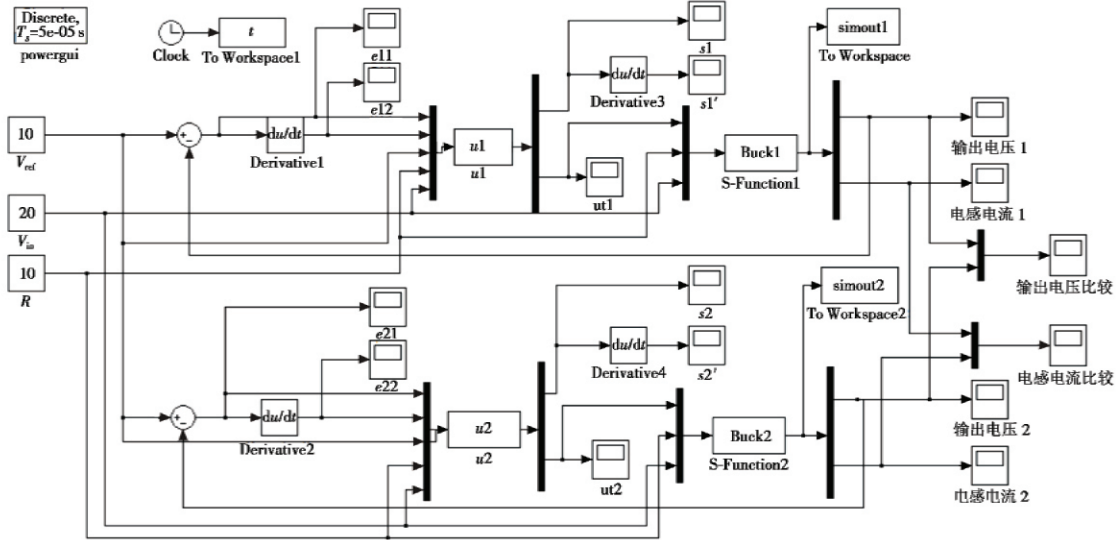


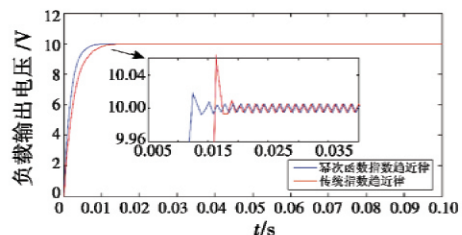
图 3 Buck 变换器滑模控制系统仿真图

Fig. 3 Buck converter sliding mode control system simulation diagram

Buck 变换器参数: $v_i = 20 \text{ V}, L = 0.000 \text{ 02 H}, C = 0.000 \text{ 15 F}, R_L = 10 \Omega$ 。采用指数趋近律, 滑模面采用控制器参数为: $c = 500, k = 3000, \varepsilon = 20$ 。采用幂次函数指数趋近律, 滑模面采用控制器参数为: $c = 500, k = 3000, \varepsilon = 20, \alpha = 0.5, \delta = 0.1$ 。

可知系统在正常情况下的输出图形为图 4。同时, 为了验证采用幂次函数指数趋近律, 系统在负载突变时的鲁棒性优于指数趋近律, 在 0.04 s 时, 将系统的

负载突变为 4Ω , 可得系统输出图形为图 5。



a 输出电压比较

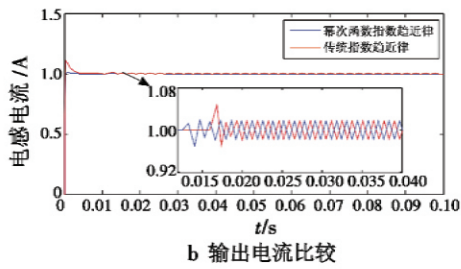


图4 正常情况下的输出仿真

Fig.4 The output of the simulation under normal conditions

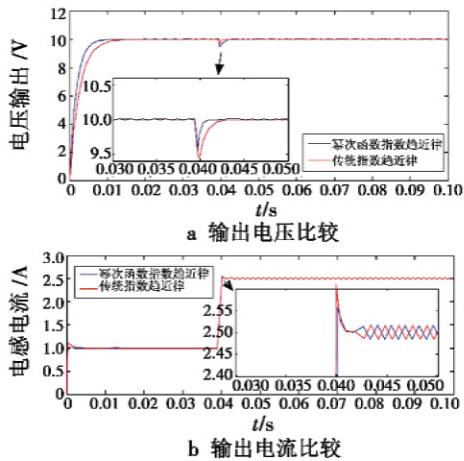


图5 负载突变时的输出仿真

Fig.5 Output simulation when the load suddenly changes

从图4可以看出,在正常情况下,相比于基于传统指数趋近律的滑模变结构控制器控制下的系统,基于幂次函数指数趋近律的滑模变结构控制器控制下的系统到达时间更短,从0.016 s左右缩短到0.012 s左右,系统超调量也更小。

从图5可以看出,当负载突变时,系统都会在负载变化的瞬间产生抖动,然后又回归到原稳态值。不同之处在于,相比于基于传统指数趋近律的滑模变结构控制器控制下的系统,基于幂次函数指数趋近律的滑模变结构控制器控制下的系统在突变处的超调量更小,回归到原稳态值的时间即恢复时间更短,说明系统对于负载变化扰动的鲁棒性更好。

6 结论

本文设计了一种新型幂次函数指数趋近律,并将其应用于 Buck 变换器,该控制方法相较于传统指数趋近律,有效地缩短了系统到达时间,减小了系统超调量,

并在系统负载突变时,体现了良好的鲁棒性,该方法能够较好地改善系统的动态品质,对工程实际有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京:中国科学技术出版社,1990:14-18. (GAO W B. Variable structure control theory foundation[M]. Beijing:China Science and Technology Press,1990:14-18.)
- [2] 宋立忠,温洪,姚琼芸. 离散变结构控制系统的变速趋近律[J]. 海军工程学院学报,1999,28(3):16-21. (SONG L Z, WEN H, YAO Q H. The discrete variable structure control system of variable speed reaching law[J]. Journal of Marine Engineering Institute, 1999, 28(3):16-21.)
- [3] JIANG K, ZHANG J G, CHEN Z M. A new approach for the sliding mode control based on fuzzy reaching law [C]//Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, China, 2002:656-660.
- [4] 罗成. 变结构控制在 Buck 变换器中的应用研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2008. (LUO C. Application research for Buck converter on variable structure control[D]. Wuhan:Hubei University of Technology, 2008.)
- [5] 戴璐. Buck 变换器的滑模变结构控制[D]. 株洲:湖南工业大学,2010. (DAI L. The control of sliding mode variable structure on Buck converter[D]. Zhuzhou:Hunan University of Technology, 2010.)
- [6] 张合新,范金锁. 一种新型滑模控制双幂次趋近律[J]. 控制与决策,2013,29(3):1-6. (ZHANG H X, FAN J S. A new double power reaching law for sliding mode control [J]. Control and Decision, 2013, 29(3):1-6.)
- [7] XU J X, PAN Y J, LEE T H. A gain scheduled sliding mode control scheme using filtering techniques with applications to multi-link robotic manipulators [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2000, 122(4):641-649.
- [8] ZHUANG K Y, SU H Y, CHU J, et al. Globally stable robust tracking of uncertain systems via fuzzy integral sliding mode control[C]//Proceedings of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation, P. R. China, 2000:1827-1831.