

文章编号: 2095-4980(2020)06-1141-06

电压模式 Buck-Boost 变换器变论域模糊 PI 控制

祝熙彤, 孙瑀擎, 周 诺, 徐红梅*

(延边大学 电子信息通信学院, 吉林 延吉 133002)

摘 要: 电压模式 Buck-Boost 变换器是一个典型的非最小相位系统。根据 DC-DC Buck-Boost 变换器的工作特性, 运用状态空间平均法建立其小信号模型, 据此设计 PI 控制器参数。Buck-Boost 变换器是一个时变的非线性系统, 传统 PI 控制难以达到最优的控制效果, 由此采用模糊 PI 控制来规避 PI 控制的弊端。针对模糊 PI 控制在被控量变化较大时, 控制精确度变差的问题, 设计了模糊论域自适应伸缩变化的变论域模糊 PI 控制器, 对 Buck-Boost 电路进行控制。通过 Matlab/Simulink 环境仿真, 实验结果表明, 变论域模糊 PI 控制具有更好的动态控制性能。

关键词: 电压模式; Buck-Boost 变换器; 变论域; 模糊 PI 控制; Matlab/Simulink 仿真

中图分类号: TN624; TP273

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019373

Variable universe fuzzy PI control of voltage mode Buck-Boost converter

ZHU Xitong, SUN Yuqing, ZHOU Nuo, XU Hongmei*

(Department of Electronic Information and Communication, Yanbian University, Yanji Jilin 133002, China)

Abstract: Voltage mode Buck-Boost converter is a typical non-minimum phase system. According to the working characteristics of the DC-DC buck-boost converter, the small signal model is established by using the state space average method, and the Proportional-Integral(PI) controller parameters are designed. Buck-Boost converter is a time-varying nonlinear system. Traditional PI control is difficult to achieve the optimal control effect, so the fuzzy PI control is adopted to avoid the disadvantages of PI control. Aiming at the problem that the control precision of fuzzy PI control becomes worse when the controlled variable changes greatly, a variable universe fuzzy PI controller with adaptive scaling change in the fuzzy universe is designed to control the Buck-Boost circuit. Through Matlab/Simulink environment simulation, the experimental results show that the variable universe fuzzy PI control has better dynamic control performance.

Keywords: voltage mode; Buck-Boost converter; variable universe; fuzzy PI control; Matlab/Simulink

Buck-Boost 变换器是 DC-DC 变换器中一类同时具有升、降压功能的变换器, 是开关电源的重要组成部分, 广泛用于光伏发电系统^[1]、新能源电动汽车^[2]、便携式电子移动设备^[3]、绿色能源系统^[4]、LED 照明设备^[5]等领域。Buck-Boost 变换器是典型的非线性时变动力学系统^[6], 运行过程中会产生倍周期分岔、边界碰撞分岔、次谐波振荡、准周期振荡等非线性行为^[7-8], 影响变换器的运行质量和可靠性。Buck-Boost 电路动态模型是非最小相位系统, 在 S 域的右半平面存在一个零点, 系统的动态特性受电路参数影响较大, 稳定性变差^[9]。因此, 对 Buck-Boost 变换器稳定性研究和非线性行为控制优化尤为重要。

目前大多数 Buck-Boost 变换器采用传统 PI 控制闭环控制方式^[10], 这种控制方式需对被控系统运用状态空间平均法或小信号扰动法建立一个精确的数学模型^[11], 根据这个数学模型的幅频和相频特性计算 PI 控制器参数。Buck-Boost 变换器是非最小相位系统, 最小相位系统中用来计算 PI 控制器参数的根轨迹法不再适用^[12]。因此, 需寻求更有效的方法对 Buck-Boost 变换器进行控制。

随着国内外学者对智能控制研究的不断深入, 智能控制与传统 PI 控制结合对开关变换器进行控制成为可能。

收稿日期: 2019-09-29; 修回日期: 2019-11-07

基金项目: 延边大学博士启动基金资助项目(602014093); 延边大学 2017 年度国家自然科学基金前期培育专项资助项目(413080016)

作者简介: 祝熙彤(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为混沌动力学。email: zxt1518788773@163.com

*通信作者: 徐红梅 email: hmxu@ybu.edu.cn

智能控制方法中的模糊控制，不依赖被控系统的精确数学模型，具有动态响应速度快，鲁棒性好等优点^[13]。将模糊控制与 PI 控制相结合形成模糊 PI 控制器，能够很好地解决非最小相位系统抗扰能力差的问题。由于模糊论域固定，而 Buck-Boost 变换器是强非线性系统，当被控量变化较大或较小时，只会用到部分模糊规则，致使控制过程中难以调动完整的模糊规则库，系统控制精确度变差^[14]。

变论域模糊控制思想就是在模糊规则不变的前提下，根据被控量变化情况，利用伸缩因子解除模糊论域固定的限制。当被控量变化较大时，扩张论域；反之，收缩论域^[15]。因此，变论域模糊控制提高了控制规则利用率，更能适应被控量的变化，控制过程更加细化，控制系统容错率和自适应能力更强。本文将变论域模糊控制策略与 PI 控制相结合，设计了变论域模糊 PI 控制器并将其用于 Buck-Boost 变换器的控制环节中。Buck-Boost 变换器具有更好的稳定性、可靠性，提高了 Buck-Boost 变换器对扰动和参数变化的适应能力。

1 Buck-Boost 变换器的基本工作原理

电压模式 Buck-Boost 变换器是以电压为控制对象的变换器。根据状态空间平均法，可得到电流连续导通时，Buck-Boost 变换器输出电压 U 相对于输入电压 U_{in} 的增益：

$$\frac{U}{U_{in}} = \frac{d}{1-d} \tag{1}$$

式中 d 为开关的导通和截止时间占空比。

由式(1)可知，在输入电压固定时，调节 d 可以调节输出电压，实现升降压功能。Buck-Boost 变换器的基本拓扑结构如图 1 所示。根据 Buck-Boost 变换器的小信号模型可知，其输出电压 U 到占空比 d 的传递函数 G_{Ud} 为：

$$G_{Ud}(s) = \left. \frac{U(s)}{d(s)} \right|_{U_{in}(s)=0} = \frac{U_{in} \left(1 - \frac{LDs^2}{RD^2} \right)}{LCs^2 + \frac{L}{R} + D^2} \tag{2}$$

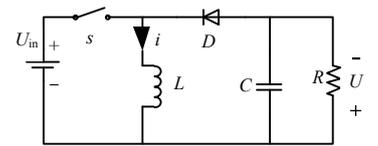


Fig.1 Topology of Buck-Boost converter
图 1 Buck-Boost 变换器的拓扑结构

式中： L 为电感； C 为滤波电容； R 为负载电阻； D, U_{in} 分别为占空比和输入电压的稳态值。从式(2)可以清晰地看到，Buck-Boost 变换器是一个典型的非最小相位系统，该系统在复平面右半平面存在一个零点，系统的稳定性能较差，需要加入补偿环节保证系统的稳定输出。

2 Buck-Boost 变换器的 PI 控制器设计

根据 Buck-Boost 的小信号模型，运用幅相裕度补偿法设计 PI 控制器，控制框图如图 2 所示。由于 Buck-Boost 变换器输出电压与输入电压方向相反，因此取反馈环节 $H(s)=-1, U_M=1$ 。

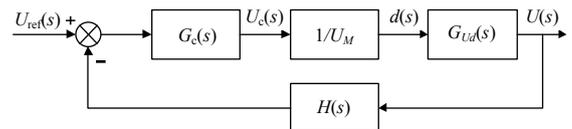


Fig.2 Control block diagram of Buck-Boost converter
图 2 Buck-Boost 变换器控制框图

Buck-Boost 变换器参数如表 1 所示。将参数代入式(2)中，可得其开环传递函数。根据开环传递函数，运用 Matlab 工具箱可以绘制出系统未补偿时的 Bode 图，如图 3 所示。从图中可以看出，系统的相位裕量 γ 和幅值裕量均为负值，不满足稳定性准则，系统极不稳定，需设计相应的补偿环节对电路进行控制。

基于小信号模型的输出增益、穿越频率等指标，利用 pidTuner 工具箱进行 PI 控制器参数设计，选取 $k_p=0.0024, k_i=0.48$ 。绘制加入补偿环节前后的对比 Bode 图，如图 4 所示。从图中可以看到，系统补偿效果明显。相位裕量从 -39.3 dB 提升至 8.1 dB，幅值裕量从 -76.4 提升到 32.4 °，满足工业上相位裕量 γ 应在 30 ° 到 60 ° 之间及幅值裕度大于 6 dB 的设计要求。在实际仿真过程，根据 Buck-Boost 变换器电路具体情况和系统响应速度等条件综合考虑，将 k_p 的参数设置为 0.009 ， k_i 的参数设置为 0.9 。

表 1 Buck-Boost 变换器参数

Table1 Parameters of Buck-Boost converter

parameter	value
input voltage U_{in}/V	15
switching frequency f/kHz	100
reference voltage U_{ref}/V	30
R/Ω	10
$C/\mu F$	470
$L/\mu H$	350

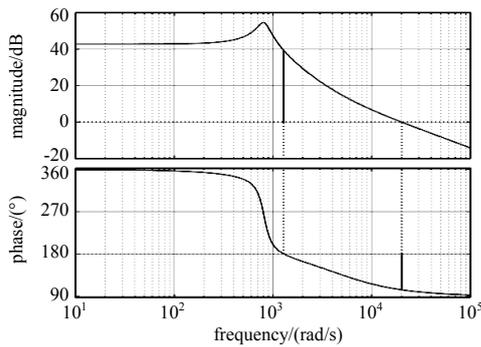


Fig.3 Bode diagram without compensation
图 3 补偿前 Bode 图

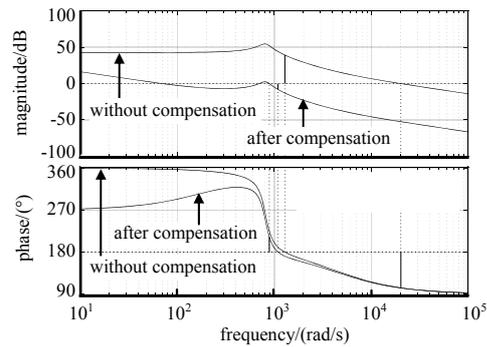


Fig.4 Bode diagram comparison before and after compensation
图 4 加入补偿前后对比 Bode 图

3 Buck-Boost 变换器的模糊 PI 控制器设计

传统 PI 控制是典型的线性控制方法,而开关变换器的开关管具有非线性特性,采用传统 PI 控制具有本质上的弊端。模糊控制不需要被控系统的精确数学模型,是典型的非线性智能控制方法,因此本文将模糊控制与传统 PI 控制相结合,对 Buck-Boost 电路进行补偿。

模糊 PI 控制根据输入误差(E)和误差变化率(E_C)的变化情况,结合模糊规则进行近似推理,得出 PI 控制器参数 k_p, k_i 的调整量 $\Delta k_p, \Delta k_i$,从而实现了对 PI 控制器参数的自适应整定。模糊 PI 控制器结构如图 5 所示。由于系统稳定性能较差,过多的模糊子集会增加系统计算时间,减缓调整速度。本文选用 5 个模糊子集: $E=E_C=\Delta k_p=\Delta k_i=\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, 其中 NB, NS, ZE, PS, PB 分别表示负大、负小、零、正小、正大。图 6 是 E, E_C 的隶属度函数, $\Delta k_p, \Delta k_i$ 类似,不再赘述。

根据 PI 控制器参数整定经验,设计 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 的模糊规则表,如表 2~3 所示。模糊规则表本质上是模糊推理过程中所需控制策略的集合,模糊推理模块根据输入变量 E, E_C 的取值,结合模糊规则表推理出 PI 控制器参数的调节量,从而实现了对变换器的在线控制。由于经过模糊推理后的输出值是模糊量,因此需要进行解模糊化处理才可得供 PI 控制器使用的清晰值,本文解模糊过程采用面积中心法,其输出为由隶属函数和水平坐标轴围成的图像的中心值,计算公式见式(3)。

其中, U_o 是模糊控制器输出值, U 为模糊控制器输入值, $\mu_U(U)$ 为输入变量隶属度函数。

$$U_o = \frac{\int U \mu_U(U) dU}{\int \mu_U(U) dU} \quad (3)$$

经模糊控制器整定后, PI 控制器的参数修正量 k_p', k_i' 为:

$$k_p' = k_p + \Delta k_p \quad (4)$$

$$k_i' = k_i + \Delta k_i \quad (5)$$

表 2 Δk_p 的模糊规则
Table2 Fuzzy rules of Δk_p

E_C	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZE
NS	PB	PS	PS	ZE	ZE
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	ZE	ZE	NS	NS	NB
PB	ZE	NS	NS	NB	NB

表 3 Δk_i 的模糊规则
Table3 Fuzzy rules of Δk_i

E_C	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	ZE
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	ZE	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

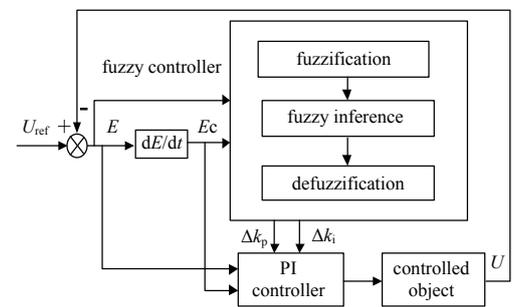


Fig.5 Basic structure diagram of fuzzy PI control
图 5 模糊 PI 控制基本结构图

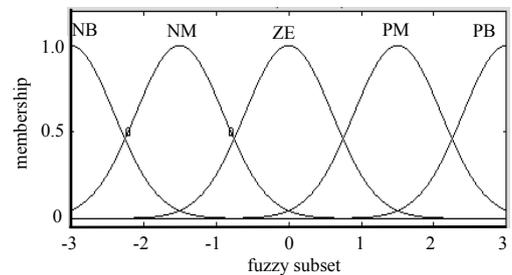


Fig.6 Membership function of E, E_C
图 6 E, E_C 的隶属度函数

4 Buck-Boost 变换器的变论域模糊 PI 控制器设计

模糊 PI 控制器的模糊论域是固定的，不能根据误差和误差变化率情况进行改变，具有一定的局限性。当模糊控制器的输入变量变化较大或较小时，只会用到部分模糊规则。如果模糊论域的范围过小，输入变量相对于模糊论域会产生溢出，导致控制器失控；如果模糊论域的范围过大，可能会导致系统在零点附近振荡。变论域模糊控制实际上就是实时检测被控量的变化情况，根据收缩因子调整模糊 PI 控制器的模糊论域范围，使其跟随被控量自适应变化。变论域模糊 PI 控制器的设计无需依靠过多的专家经验，其核心是伸缩因子的选取，论域的划分准则、隶属函数形状的选取等为次要因素。变论域模糊 PI 控制器的结构图如图 7 所示。

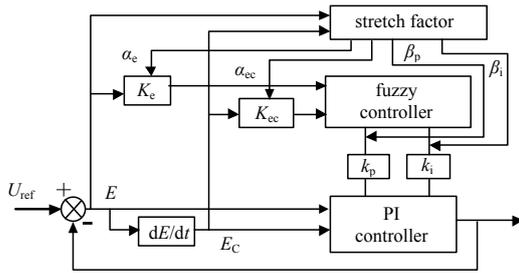


Fig.7 Basic structure diagram of variable universe fuzzy PI control
图 7 变论域模糊 PI 基本结构图

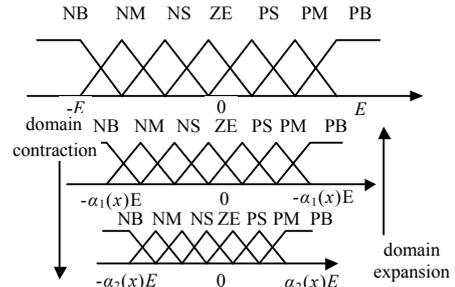


Fig.8 Schematic diagram of variable universe
图 8 变论域原理图

图 7 中， K_e, K_{ec} 为模糊控制器的输入量化因子， k_p, k_i 为输出比例因子。系统根据 E, E_c 取值改变输入伸缩因子 α_e, α_{ec} 和输出伸缩因子 β_p, β_i ，即通过实时改变量化因子和比例因子实现模糊论域的伸缩变化。变论域思想原理图如图 8 所示， $\alpha_1(x)$ 和 $\alpha_2(x)$ 是伸缩因子，设计伸缩因子的方法通常有 3 种：分别是基于函数形式、基于模糊推理和基于偏差分级选取。为简化系统复杂度，选用基于函数形式设计伸缩因子，伸缩因子要具有对偶性、避零性、单调性、协调性和正规性。本文选用的伸缩因子为：

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau + \varepsilon \tag{6}$$

$$\beta(x) = \left(\frac{|x|}{E_c}\right)^\tau + \varepsilon \tag{7}$$

式中： x 为实时的误差或误差变化率； τ 为 0 到 1 之间的常数； ε 为充分小的正数。

5 仿真分析

在 Matlab/Simulink 环境下，基于上述控制方法，根据拓扑结构图 1 搭建 Buck-Boost 变换器仿真电路，对 Buck-Boost 变换器仿真电路分别运用传统 PI、模糊 PI 控制及变论域模糊 PI 控制进行控制，对仿真结果进行对比分析。

仿真模型中的电路参数见表 4，仿真时间设置为 0.3 s，在仿真时间为 0.15 s 时，输入电压从 15 V 突变为 20 V，仿真得到 3 种控制方式对 Buck-Boost 电路输出电压的闭环控制对比波形图，如图 9~10 所示。根据输入误差、误差变化率范围及实际仿真选取输入输出伸缩因子为：

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{3}\right)^{0.9} + 0.00001 \tag{8}$$

表 4 3 种控制器应对电压突变的控制性能比较

Table4 Comparison of three controllers' performance in dealing with voltage abrupt change

control method	peak time/s	overshoot/%	adjustment time/s	steady-state error/mV
PI	0.002 2	29.7	—	1 000
fuzzy PI	0.001 8	18.7	0.10	400
variable universe fuzzy PI	0.002 3	25.3	0.04	200

从图 9 中可以看到，在输入电压 E 未发生突变前，3 种控制器均未产生超调。观测仿真时间 $t=0.13\sim 0.15$ s 期间输出电压波形图可以发现，变论域模糊 PI 的调节速度最快，稳态误差最小，控制器稳定性能最好；模糊 PI

控制器较 PI 控制器调节速度更快,稳态误差更小;PI 控制器稳态误差最大,达到了 800 mV,系统控制性能较差,在应对电路参数发生突变的情况下,控制效果较差。图 10 是系统输入电压参数发生突变时,3 种控制器作用下输出电压波形图。从图中可以看出,变论域模糊 PI 控制效果最好。结合表 4,可以看到 PI 控制的超调量最大,其次是变论域模糊 PI 控制,模糊 PI 控制的超调量最小。虽然变论域模糊 PI 的超调量较大,但其他跟随性能指标和稳态性能指标是 3 种控制器里最好的。因传统 PI 控制的控制效果较差,系统的输出电压波形的稳态误差达到了 1 000 mV,在计算控制器的调节时间时,无法和另 2 个变换器在同一标准下进行比较,所以未计算其调节时间。变论域模糊 PI 控制的调节时间最短,为 0.04 s,模糊控制的调节时间达到了 0.1 s;变论域模糊 PI 的稳态误差为 200 mV,较模糊 PI 的 400 mV 更小。综上,变论域模糊 PID 控制器具有较强的抗干扰能力,动态响应速度快,调整时间短,具有良好的动态性能和稳态性能。

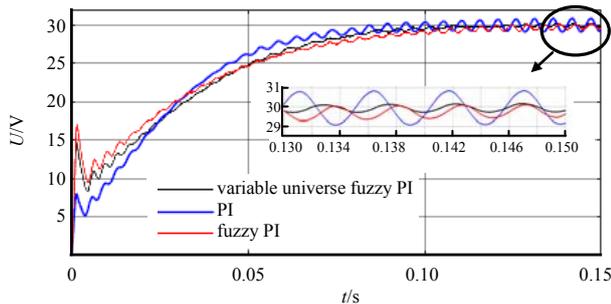


Fig.9 Waveform contrast of output voltage under three controllers before E -mutation

图 9 突变前,3 种控制器作用下的输出电压对比波形图

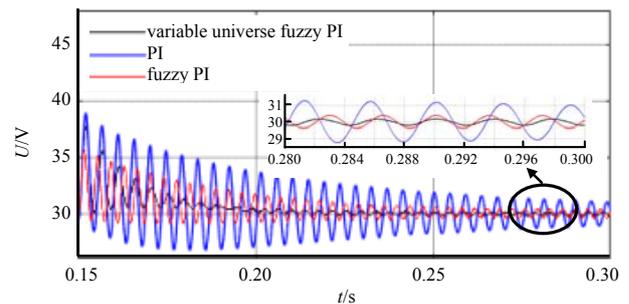


Fig.10 Waveform contrast of output voltage under three controllers after E -mutation

图 10 E 突变后,3 种控制器作用下的输出电压对比波形图

6 结论

本文建立了 Buck-Boost 变换器的小信号模型,设计了 PI 控制器和模糊 PI 控制器,提出了 Buck-Boost 变换器的变论域模糊 PI 控制方案,并搭建了基于 Matlab/Simulink 的 3 种控制方式下 Buck-Boost 变换器的系统仿真模型。对 Buck-Boost 变换器采用变论域模糊 PI 控制,有效解决了 PI 控制器抗扰动能力差、模糊 PI 控制器控制精确度不佳的问题。变论域模糊 PI 控制利用伸缩因子以一定的规则伸缩论域,使模糊论域根据被控变量自适应伸缩变化,充分利用了模糊规则,提高了系统的控制精确度、响应速度和稳定性。通过 Matlab/Simulink 仿真实验验证了变论域模糊 PI 控制器较模糊 PI 控制器和传统 PI 控制器的优越性,对外部参数变化具有较强的抑制能力,自适应能力更强,控制精确度更高,在实际工程设计中具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] LÓPEZDEL MORAL D,BARRADO A,SANZ M,et al. Analysis and implementation of the Buck-Boost modified series forward converter applied to photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2018,(176):771-787.
- [2] 张勇敢,宋树祥,廖志贤,等. 电动汽车新型光伏充电桩 DC-DC 变换器的研究与设计[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018,43(5):1765-1776. (ZHANG Yonggan,SONG Shuxiang,LIAO Zhixian,et al. Research and design of new photovoltaic DC-DC converter for electric vehicles[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2018,43(5):1765-1776.)
- [3] KATAYAMA N,TOSAKA S,YAMANAKA T,et al. Newtopology for DC-DC converters used in fuel cell-electric double layer capacitor hybrid power source systems for mobile devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1):313-321.
- [4] JAMSHIDPOUR E,POURE P,SAADATE S. Photovoltaic systems reliability improvement by real-time FPGA-based switch failure diagnosis and fault-tolerant DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(11): 7247-7255.
- [5] 曾怡达,朱仁伟,唐丽,等. 一种新型无电解电容 Buck-Boost 正反激 LED 驱动电路的研究[J]. 电源学报, 2018,16(2): 104-109,130. (ZENG Yida,ZHU Renwei,TANG Li,et al. Study on novel electrolytic capacitor free Buck-Boost forward-flyback LED drive circuit[J]. Journal of Power Supply, 2018,16(2):104-109,130.)
- [6] 王礼辉,陶彩霞,田莉. 开关电感 Buck-Boost 变换器的非线性行为控制研究[J]. 电气传动, 2017,47(9):24-28. (WANG Lihui,TAO Caixia,TIAN Li. Research on nonlinear behavior control in switched-inductor Buck-Boost converter[J]. Electric Drive, 2017,47(9):24-28.)

- [7] 孙方雅,祝熙彤,李泽宇,等. 电压模式 Buck 变换器典型工作状态分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):469-473,494. (SUN Fangya,ZHU Xitong,LI Zeyu,et al. Analysis of typical operating state of voltage mode Buck converter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):469-473,494.)
- [8] BAO Bocheng,ZHANG Xi,BAO Han,et al. Dynamical effects of memristive load on peak current mode buck-boost switching converter[J]. Chaos,Solitons and Fractals:the Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 2019(122):69-79.
- [9] 杨超,苑红,余岱玲,等. 变论域模糊 PID 控制在改善 DC-DC 变换器非线性非最小相位系统的性能研究[J]. 电工电能新技术, 2017,36(1):30-37. (YANG Chao,YUAN Hong,YU Dailing,et al. Research on performance of variable universe fuzzy PID control in improving nonlinear non-minimum phase system for DC-DC converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017,36(1):30-37.)
- [10] 杨航,刘凌,阎治安,等. 双闭环 Buck 变换器系统模糊 PID 控制[J]. 西安交通大学学报, 2016,50(4):35-40,67. (YANG Hang,LIU Ling,YAN Zhian,et al. A fuzzy PID control strategy for Buck converter system of double closed loop circuits[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016,50(4):35-40,67.)
- [11] 梁勇,赵莉华,张亚超,等. 一种基于自适应模糊 PID 控制的移动电源设计[J]. 电源技术, 2014,38(4):752-754. (LIANG Yong,ZHAO Lihua,ZHANG Yachao,et al. A new mobile power supply design based on adaptive fuzzy PID control[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014,38(4):752-754.)
- [12] 冀常鹏,孙巍. 变论域自适应模糊 PID 控制系统仿真与应用[J]. 测控技术, 2018,37(10):119-123. (JI Changpeng,SUN Wei. Simulation and application of Variable Universe adaptive fuzzy-PID control system[J]. Measurement & Control Technology, 2018,37(10):119-123.)
- [13] 董钰莹,赵敏. 永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 电子科技, 2018,31(7):24-27. (DONG Yuying,ZHAO Min. Synthesis of robust predictive control for LPV system with bounded disturbances[J]. Electronic Science and Technology, 2018,31(7):24-27.)
- [14] 时培成,徐增伟,王锁,等. 变论域自适应模糊 PID 主动悬架控制研究[J]. 机械科学与技术, 2019,38(5):713-720. (SHI Peicheng,XU Zengwei,WANG Suo,et al. Variable universe adaptive fuzzy PID control of active suspension[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019,38(5):713-720.)
- [15] 骆秀秀,杨超,余岱玲,等. Buck 变换器的变论域模糊自适应 PID 控制的研究[J]. 工业控制计算机, 2016,29(2):48-49,52. (LUO Xiuxiu,YANG Chao,YU Dailing,et al. Variable universe fuzzy adaptive PID control study of Buck convertor[J]. Industrial Control Computer, 2016,29(2):48-49,52.)