

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.014

NOUS 控制和 PID 控制的直流降压变压器控制性能对比

吴小康^{1,2}, SCHMID Robert², 张帆¹, 张莹冰¹, 赵晋泉¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 墨尔本大学工程学院, 澳大利亚 墨尔本 3010)

摘要: 为了寻求更加优化的直流降压变压器控制系统, 搭建了一台直流降压变压器并根据其参数建模, 在此基础上分别设计了一种基于 NOUS 算法的状态空间控制系统、使用观测器的 NOUS 算法控制系统和 PID 控制系统。用示波器展示变压器在这 3 种控制系统下的阶跃响应输出和负载发生突变时的瞬态响应, 以对比它们的控制性能。结果表明, 基于 NOUS 算法的状态空间控制系统具有更好的瞬态响应和控制精确度, 而 PID 控制系统在鲁棒性方面具有优势, 使用观测器的 NOUS 算法控制系统仍保留了收敛速度快的优点, 但会导致控制系统建模中的误差被放大, 影响输出结果。

关键词: 直流降压变压器; 状态空间控制; NOUS 算法; 观测器; PID 控制; 稳态误差; 瞬态响应; 鲁棒性; 自动化控制

中图分类号: TM712; TM41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0473-06

Comparison of control performance between NOUS control and PID control on DC-DC buck converter

WU Xiaokang^{1,2}, SCHMID Robert², ZHANG Fan¹, ZHANG Yingbing¹, ZHAO Jinquan¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Engineering, University of Melbourne, Melbourne 3010, Australia)

Abstract: In order to seek a more optimal control system, this study built a DC-DC buck converter and conducted the system modelling according to its parameters, based on which three controllers were designed, including a state-space controller with non-overshooting and non-undershooting (NOUS) algorithm, a NOUS controller with observer and a proportional-integral-derivative (PID) controller. The step responses and transient responses of the converter with 3 different control systems when load changes were shown by an oscilloscope, so that their control performances could be compared. The results indicate that the state-space controller based on NOUS algorithm has better transient response and control precision, while PID controller has advantage in robustness. NOUS controller with observer preserves the advantage of fast convergence, but will lead to amplifying the errors in the system modelling and cause worse control results.

Key words: DC-DC buck converter; state-space control; NOUS algorithm; observer; PID control; steady state error; transient response; robustness; automatic control

直流降压变压器因载流量大、易于控制以及响应快等优点, 广泛应用于机动车供电、机械手臂控制和通信系统能源供给等领域^[1]。目前直流降压变压器产业面临的主要挑战包括高控制精度需求下对稳态响应无误差、对瞬态响应收敛速度快且无超调以及负载变化或环境干扰鲁棒性等^[2]。直流降压变压器控制方法

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700840)

作者简介: 吴小康(1992—), 男, 硕士, 主要从事电气自动化控制研究。E-mail: lken923@126.com

通信作者: 赵晋泉, 教授。E-mail: zhaojinqun@hhu.edu.cn

引用本文: 吴小康, SCHMID Robert, 张帆, 等. NOUS 控制和 PID 控制的直流降压变压器控制性能对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 473-478.

WU Xiaokang, SCHMID Robert, ZHANG Fan, et al. Comparison of control performance between NOUS control and PID control on DC-DC buck converter[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 473-478.

主要有比例积分微分(PID)控制和状态空间控制。

PID 控制具有直接、程序简单等优点。周雪松等^[3]为提高 DC-DC 变换器的抗扰性能,建立 PID 型滑模控制器,进而推导出系统等效控制表达式。张巍等^[4]使用模糊 PID 控制无刷直流电动机,消除转矩脉动,削弱换相区转矩脉动,提升电机运行的鲁棒性。PID 控制器设计的关键是对比例参数、积分参数和微分参数的选择,这些决定了控制的整体效果。PID 算法中参数的选择和调整取决于设计者的经验和喜好,科学的设计方法包括对 PID 算法进行频域变换和分析^[5]。

状态空间控制在拓展性方面具有优势,系统被抽象为一个矩阵后可以用数学的方法计算出控制向量对被控制系统的影响^[5-6]。Gladys 等^[7]在 POESLLC 直流变压器上设计了一种补偿器和 PID 控制器进行对比,发现与 PID 控制器相比,补偿器可以提供更快的收敛速度。

笔者基于 Schmid 等^[8-10]推导出的计算控制向量参数 NOUS (non-overshooting and non-undershooting) 算法,设计了基于 NOUS 算法的状态空间控制系统(以下简称 NOUS 控制系统),将该控制系统应用于直流降压变压器上,并设计 PID 控制系统与之进行对比,拟为寻找一种更加优越的直流降压变压器控制系统方案提供参考。

1 直流降压变压器设计和建模

标准的直流降压变压器电路^[11]见图 1,图中 V_g 为电源输入电压, R_c 为电容内阻, C 为电容, R_L 为电感内阻, L 为电感, R 为电阻, $V_{control}$ 为方波控制电压。

分析图 1 中的电路模型,可得脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)占空比 d 到输出电压 V_{out} 在频域 s 上的传递函数 G_p ^[2,5] 为

$$G_p(s) = \frac{V_{out}(s)}{d(s)} = \frac{V_g(1 + sR_cC)}{1 + \left(R_cC + \frac{RR_LC + L}{R + R_L}\right)s + LC\left(\frac{R + R_c}{R + R_L}\right)s^2}$$

(1)

用现代控制理论分析电路可得状态空间模型(式(2)):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} - \frac{RR_c}{L(R_c + R)} & -\frac{R}{L(R_c + R)} \\ \frac{R}{C(R_c + R)} & -\frac{1}{C(R_c + R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_g}{L} \\ 0 \end{bmatrix} dt \\ V_{load} = \begin{bmatrix} \frac{R_cR}{R_c + R} & \frac{R}{R_c + R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \end{cases}$$

(2)

式中: V_{load} ——负荷两端电压。

根据式(2),定义 A 、 B 、 C 、 D 矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} - \frac{RR_c}{L(R_c + R)} & -\frac{R}{L(R_c + R)} \\ \frac{R}{C(R_c + R)} & -\frac{1}{C(R_c + R)} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{V_g}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} \frac{R_cR}{R_c + R} & \frac{R}{R_c + R} \end{bmatrix} \quad D = 0$$

2 3 种控制系统设计

2.1 NOUS 控制系统和使用观测器的 NOUS 控制系统的设计

2.1.1 NOUS 算法

对于一个有 p 个极点的 n 阶系统,Moore 设计了一种根据计算特征向量集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, ($v_i \in R^n$) 和 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, ($w_i \in R^p$) 计算控制向量 $F = W V^{-1}$ 的计算方法^[12]。构建 Rosenbrock 矩阵方程^[13]:

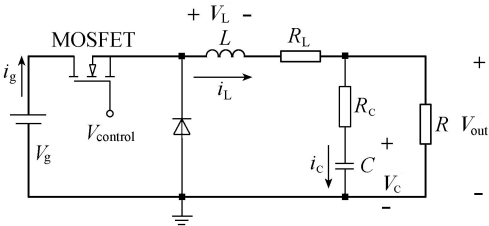


图1 直流降压变压器电路
Fig.1 Circuit of DC-DC buck converter

$$\begin{bmatrix} A - \lambda_i I & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ s_i \end{bmatrix}$$

(3)

式中: I ——单位矩阵; λ_i ——系统的特征值,每个特征值对应一个向量 s_i ,对于 $i=1,2,\dots,n-p,\lambda_i$ 应等于系统的零点 z_i ,对应的 s_i 为零矩阵。

Robert 在此基础上提出了一种设计方法,在数学上证明了他的方法可以实现无超调控制,并命名其为 NOUS 控制:对于式(3)中 $i=n-p+1,\dots,n,\lambda_i$ 可以随意选择, $s_i=I_{n-p+i}$ 。定义当前状态向量 $x(t)$ 和稳态状态向量 x_{ss} 的差为 $\zeta(t)=x(t)-x_{ss}$,并定义变量 $\alpha=[\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n]^T=V^{-1}\zeta(0)$,根据选择的特征值 λ_i 计算 α ,当 α 满足判据时,闭环控制系统的瞬态响应无超调^[8-10]。

2.1.2 NOUS 控制系统设计

将式(2)中 $A、B、C、D$ 矩阵代入式(3),根据选择的特征值(λ_1,λ_2),可求得特征向量集 V ,据此算出 α 。对于二阶系统的 NOUS 算法,无超调的判据为 $(\alpha_1+\alpha_2)\alpha_2>0$ 。如果选择的向量组不满足判据,则尝试下一组特征值。找到满足条件的特征值后可计算降压变压器的控制向量 F ,并算出反馈向量参数^[8]。NOUS 算法程序的流程见图 2。

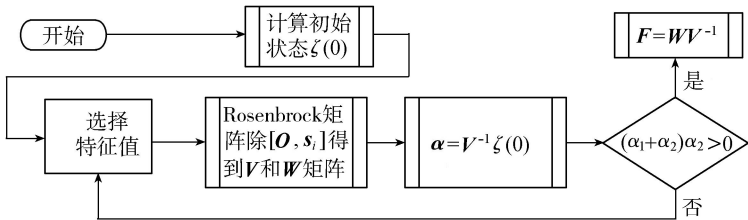


图 2 NOUS 算法程序的流程

Fig. 2 Flow chart of NOUS algorithm

在完成 NOUS 算法程序的基础上,用传感器测量电路中的参数变化,并据此更新 NOUS 算法控制器的参数,即可实现因负荷变化或扰动等原因系统参数发生变化时,该控制器的控制效果保持一致。

2.1.3 使用观测器的 NOUS 控制系统设计

观测器是在状态空间控制器基础上设计的附加控制系统。在实际应用中,系统的一些状态参数受环境条件或是成本限制等因素影响难以得到测量,使用观测器可以通过数学方法代替对部分参数的测量^[5-6]。对于直流降压变压器,减去电流传感器可以为原型机减少约 20% 的成本。而实际产品中一般不需要配置开发板的单片机,因此不用电流传感器减少的成本会高于 20%。通过添加观测器,可以减去这部分成本。

使用观测器需要测量系统输出向量 y 与根据估测状态向量 $\hat{x}$ 推算出的输出向量 $\hat{y}$ 的差值,据此修正 $\hat{x}$ 使其接近真实状态向量 x ：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - \hat{y})$$

(4)

式中: G ——观测器反馈增益; u ——控制输入。

一般情况下,选择观测器的特征值使其收敛速度比闭环控制系统快 2~6 倍较为合适^[6,14-15]。选定观测器特征值后可以计算得观测器反馈增益 G 。

2.2 PID 控制系统设计

本文设计 PID 控制系统目的是作为 NOUS 控制系统的实验对照组在直流降压变压器原型机上运行。PID 控制系统的设计目标为拥有尽可能短的瞬态响应时间,使瞬态响应无超调和具有鲁棒性^[16-17]。本文用波特图进行 PID 控制系统参数选择。

标准 PID 控制的传递函数为^[5]

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K(Z_1 s + 1)(Z_2 s + 1)}{s}$$

(5)

式中: $K_p、K_I、K_D$ ——PID 控制比例、积分、微分参数; K ——传递函数的放大系数; $Z_1、Z_2$ ——传递函数的 2 个零点。

闭环传递函数正相关于式(1)(5)之积:

$$T(s) \propto G_p(s) G_{PID}(s)$$

经过在波特图上绘制 $T(s)$, 选择 $Z_1 = 0.1, Z_2 = 10^{-6}$ 可以使 150 Hz 以上幅频降低以消除噪音; 选择 $K = 1.86$, 可以使阶跃响应无超调并获得最短的达到稳态时间。综上, PID 控制系统的 3 个参数分别为 $K_p = 0.186, K_i = 1.86, K_d = 1.86 \times 10^{-7}$ 。

3 3 种直流降压变压器控制系统性能对比

分别从阶跃响应、鲁棒性对 PID 控制系统、NOUS 控制系统和含观测器的 NOUS 控制系统的直流降压变压器控制性能进行对比。

3.1 阶跃响应测试

阶跃响应测试主要考察电路控制系统的稳态误差和瞬态响应的特性。根据应用的需要, 会对瞬态响应的特性有各种要求, 最常见的包括收敛速度快、无超调等。本文定义成功的降压变压器的阶跃响应具有的特征为: (a) 10 V 以阶跃响应内稳态误差小于 0.1 V; (b) 收敛到允许误差以内的时间短于 20 ms; (c) 瞬态响应无超调。0 ~ 6 V 的阶跃响应实验中输出电压在示波器上的对比结果见图 3、表 1。

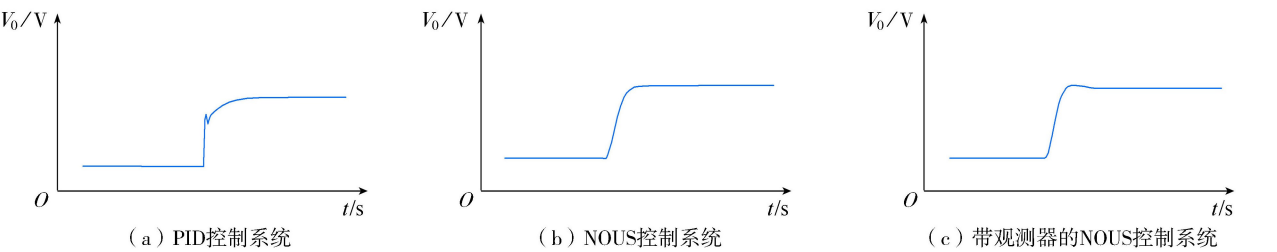


图 3 3 种控制系统下降压变压器 0 ~ 6 V 阶跃响应在示波器上的结果

Fig. 3 0-6 V step response of the buck converter with 3 controllers on oscilloscope

图 3 中可看出: 从稳态误差的角度考察, NOUS 控制系统、带观测器的 NOUS 控制系统和 PID 控制系统都能实现稳态误差小于 0.1 V; 从收敛速度的角度考察, NOUS 控制系统收敛速度最快, 带观测器的 NOUS 控制系统其次, PID 控制系统收敛速度较慢; 从超调的角度考察, PID 控制系统和 NOUS 控制系统都如设计预想一样, 实现了瞬态响应无超调, 带观测器的 NOUS 控制系统具有超调。

NOUS 控制系统在阶跃响应中展现出优越性, 它拥有更小的稳态误差, 更快的收敛速度。而加入观测器的 NOUS 控制系统表现不佳, 它的稳态误差较大并且阶跃响应有超调, 和原本设计的意图不符, 但在收敛速度上仍然优于 PID 控制系统。

状态空间控制需要非常精确的建模才能保证控制结果符合预期, 在反馈信息充足的情况下, 系统可以修正有限的误差, 但是使用观测器的情况下, 用计算代替一部分反馈向量的信息, 导致误差被放大。而用相同的系统参数在 MATLAB 的仿真中 NOUS 控制系统和带观测器的 NOUS 控制系统的瞬态响应几乎完全一样, 仅控制信号波形有些许不同, 可见观测器会导致建模误差放大, 使得控制效果与预期有差别。

3.2 鲁棒性测试

负载电路中加一个开关可以使负载电阻在 4.5 Ω 和 21 Ω 之间切换, 本文将以此测试系统的鲁棒性。状态空间控制方法需要所有准确的系统参数进行建模, 包括负载电阻, 所以当切换负载电阻的时候, 控制方法也需要进行实时更新。本文中 NOUS 控制系统的算法, 包括根据 NOUS 判据寻找符合条件的极点程序都被翻译成 C 语言写入单片机使其能够检测负载电阻的变化并在线更新控制器算法。检测负载电阻需要对电流进行测量, 而观测器的价值就在于代替电感电流测量, 所以这里不加入鲁棒性测试对比。实验分别记录了 NOUS 控制系统和 PID 控制系统在电阻从 21 Ω 突变到 4.5 Ω 时的瞬态响应, 结果如图 4 所示。

图 4 中, PID 控制系统下直流降压变压器重新回到稳态的时间为 8.1 ms, NOUS 控制系统下直流降压变

表 1 3 种控制系统下变压器 0 ~ 6 V 阶跃响应实验结果
Table 1 Experiment results of 0-6 V step response of the buck converter with 3 controllers

控制系统	稳态误差/V	收敛速度/ms	有无超调
PID 控制系统	0.1	121.0	无
NOUS 控制系统	0.025	11.8	无
带观测器 NOUS 控制系统	0.1	17.8	有

压器重新回到稳态的时间为 22.4 ms,证明了 PID 控制系统优越的鲁棒性。而状态空间控制下每次系统的变化都需要对控制程序进行重新计算,从检测到参数变化到计算出新的控制向量所花的时间以及这段时间内产生的较大输出偏差,导致其鲁棒性不如 PID 控制。

4 结 语

a. 基于状态空间控制的 NOUS 控制系统具有最优秀的瞬态响应和收敛速度。在设定值频繁变化,并且对控制的速度和精度有较高要求的时候,是更优越的控制方法。但是基于状态空间的算法需要对被控制系统进行准确的建模,这意味着系统中参数的变化会导致控制失效,不具备鲁棒性。因为状态空间控制的极点选择和控制效果均可量化,在 NOUS 算法中表现为满足一定判据下可保证瞬态响应的无超调,所以可以把控制程序的设计步骤写入单片机,让系统自行检查系统中参数的变化实时更新控制算法,实现鲁棒性。

b. 使用 NOUS 控制系统的直流降压变压器有成本较高的缺点,因为状态空间算法需要更多的反馈参数,在直流降压变压器中表现为额外的电流传感器的成本。但这个缺点可以通过设计观测器来弥补。带观测器的 NOUS 控制系统仍保留了收敛速度快的优点,但会导致控制系统建模中的误差被放大,影响输出结果。

c. PID 控制系统在收敛速度和瞬态响应的波形均不如 NOUS 控制系统,但是具有程序简洁、鲁棒性好的优点。这两个优点使 PID 控制系统在现代工业控制中最为常用。

d. NOUS 控制系统和 PID 控制系统各有优劣,在处理频繁的设定值变化时应选择 NOUS 控制系统;在系统无法精确建模,或系统模型需要持续变化时,PID 控制系统是更好的选择。

NOUS 控制算法在直流降压变压器控制上的应用仅仅是一种简单应用,它可以处理更高阶的复杂系统^[9]。在复杂系统中,基于状态空间的控制算法更具价值和意义^[18]。未来的研究可以着眼于更复杂的控制系统,如风电机电控制、自动驾驶等,NOUS 控制系统无超调的特性使其在这些领域会有更加具体和重要的意义。

参考文献:

[1] KHALILIAN M, ADIB E, FARZANEHFARD H. Family of single-switch soft-switching pulse-width modulation DC-DC converters with reduced switch stress [J]. IET Power Electronics, 2018, 7(8) : 2182-2189.

[2] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. Fundamentals of power electronics [M]. 2nd ed. New York : Kluwer Academic Publishers, 2004.

[3] 周雪松,李康,马幼捷. DC-DC 变换器滑模变结构控制研究 [J/OL]. [2020-03-29]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000419>. (ZHOU Xuesong, LI Kang, MA Youjie. Research on sliding-mode variable-structure control of DC-DC converter [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1-7 [2020-03-29]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000419>. (in Chinese))

[4] 张巍,李刚,奚培锋. 基于 Buck 变换器的无刷直流电机转矩控制仿真 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(10) : 67-72. (ZHANG Wei, LI Gang, XI Peifeng. Torque control simulation of Brushless DC motor based on Buck converter [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(10) : 67-72. (in Chinese))

[5] GOODWIN G C, GRAEBE S F, SALGADO M E. Control system design [M]. Valparaiso : Universidad Tecnica Federico Santa Maria, 2000.

[6] FRANKLING F, POWELL J D, EMAMI-NEAINI A. Feedback control of dynamic systems [M]. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson Higher Education, 2010.

[7] GLADY J B P, MANJUNATH K. Analysis-intelligent design and simulation of improved state-space modelling for control of Luo converter [J]. Computers and Electrical Engineering, 2019, 75 : 230-244.

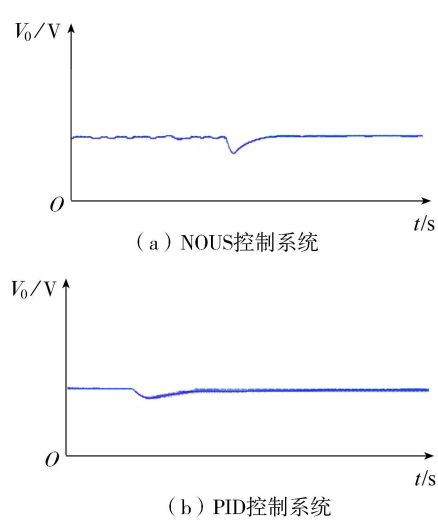


图 4 负载电阻从 21 Ω 跳变为 4.5 Ω 时 2 种控制方法下变压器瞬态响应
Fig. 4 Transient response of the converter with 2 controllers when load changes from 21 Ω to 4.5 Ω

[8] SCHMID R, CUOGHI S, GOEL A, et al. New nonovershooting step response control for the DC-DC buck converter[C]// Anon. Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Taipei: IEEE,2016: 344-349.

[9] SCHMID R, NTOGRAMATZIDIS L. A unified method for the design of nonovershooting linear multivariable state-feedback tracking controllers[J]. Automatica, 2010, 46(2):312-321.

[10] SCHMID R, NTOGRAMATZIDIS L. Achieving a nonovershooting transient response with multivariable dynamic output feedback tracking controllers[C]//Anon. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2009, combined with the 28th Chinese Control Conference. Shanghai:IEEE, 2009: 5328-5332.

[11] 张方华,严仰光. 直流变压器的研究与实现[J]. 电工技术学报,2005,20(7):76-80. (ZHANG Fanghua, YAN Yangguang. Research and verification on DC transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,20(7):76-80. (in Chinese))

[12] MOORE B C. On the flexibility offered by state feedback in multivariable systems beyond closed loop eigenvalue assignment [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1976, 21(5): 689-692.

[13] 梁艳春,周春光,李寿范. 基于遗传算法的 Rosenbrock 函数优化问题的研究[J]. 软件学报,1997,8(9):701-708. (LIANG Yanchun, ZHOU Chunguang,LI Shoufan. Research on optimization of Rosenbrock function based on genetic algorithm [J]. Journal of Software, 1997,8(9):701-708. (in Chinese))

[14] 陈雅雯. 基于卡尔曼滤波的多控制器最优状态估计策略方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2018.

[15] FAN Linsheng, YANG Yanfu, XIANG Qian, et al. Dispersion immune polarization demultiplexing scheme based on extended Kalman filter for Stokes vector Kramers-Kronig receiver[J]. Optics Communications,2020,463(15):125423.

[16] FENG Q, NELMS R M, HUNG J Y. Posicast-based digital control of the buck converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 759-767.

[17] 张轩,徐苗,郑德聪,等. 基于变论域模糊 PID 控制的 BLDCM 仿真分析[J]. 微特电机,2020,48(3):54-57. (ZHANG Xuan, XU Miao, ZHENG Decong, et al. Simulation analysis of BLDCM based on variable universe fuzzy PID control[J]. Small & Special Electrical Machines, 2020,48(3):54-57. (in Chinese))

[18] 田爱娜,李卫星,刘道伟,等. 基于改进状态空间模型的空调负荷控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019,43(8),124-130. (TIAN Aina, LI Weixing, LIU Daowei, et al. Control strategy of air conditioning load based on improved state-space model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(8),124-130. (in Chinese))

(收稿日期:2020-04-01 编辑:刘晓艳)

· 简讯 ·

河海大学 3 项成果入选科技部支撑防汛救灾重点专项

科技部在“重大自然灾害监测预警与防范(2020)”等重点专项中遴选出 24 项技术装备、成果来支撑防汛救灾。河海大学短时临近精细化雨量预报场技术、精细化网格预报与智能化预报技术和网格化精细预报降雨径流水文模型技术 3 项科研成果获推荐应用。3 项科研成果均依托国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项“中小河流洪水防控与应急管理关键技术研究与示范”而开发研制。

(本刊编辑部供稿)