

风电场储能系统的二维云模型控制策略

刘小荷, 荣园园, 居 荣

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 为了平滑风力发电功率的波动, 常常在风电场中配置一定容量的储能装置, 这样能够有效地抑制风力发电的间歇性和波动性. 本文考虑储能系统的过度充放电对其使用寿命产生的不利影响, 在充放电能力及充放电强度的双约束条件下, 建立了基于二维云模型的储能控制系统, 可以实时修正储能装置的充放电功率值. 不仅抑制了风电功率的波动性, 提高了功率输出的稳定性, 而且使储能装置的荷电状态维持在一定范围内, 避免了过度充放电, 延长了储能装置的使用时间. 最后运用 MATLAB/Simulink 软件对基于二维云模型的储能控制系统进行仿真, 验证了该方法的正确性.

[关键词] 风力发电, 储能系统, 一阶低通滤波, 荷电状态, 云模型控制

[中图分类号] TM614 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)01-0031-06

The Two-Dimensional Cloud Model Control Strategy of Energy Storage System for Wind Power Generation

Liu Xiaohu, Rong Yuanyuan, Ju Rong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Wind power has the characteristics of intermittence and volatility. With certain capacity of energy storage devices, wind power volatility can be smoothed effectively. This paper, considering the damage to the energy storage system service life caused by the excessive charging and deep discharging, proposes a two-dimension cloud model control strategy for the storage system, under the double constrain conditions of the capability and intensity to charge and discharge. The strategy, adjusting the power reference value of energy storage system in real time, improves the stability of wind power output, and extends the energy storage system service life. Finally, the result of simulation in MATLAB/Simulink shows the correctness and effectiveness of the cloud model control strategy.

Key words: wind power, energy storage system, one-order low-pass filtering, state of charge, cloud model controller

近年来, 风能等新能源发电技术在国内外飞速发展. 由于蓄电池、超级电容、飞轮和抽水蓄能等大容量储能系统具有动态吸纳和适时释放能量的特点^[1], 在风电、太阳能等分布式发电系统中配置适当容量的储能装置, 可以平抑输出功率, 起到弥补输出功率间歇性和波动性等缺点的作用.

本文首先分析了储能装置运行状态的两个指标: 充放电能力指标和充放电强度指标. 利用一阶低通滤波器对风电功率的波动进行了平抑, 将二维云模型控制器引入了储能系统的控制当中, 将电池充放电能力和强度这两项指标作为二维云模型控制器的规则前件, 将储能系统的功率修正值系数作为规则后件, 通过构建云模型控制规则, 自适应地调节储能系统功率参考值, 使储能电池工作在安全范围内, 大大延长了电池的使用寿命.

1 储能系统模型及指标

1.1 电池储能系统数学模型

通常用荷电状态(state of charge, SOC)来表征电池的剩余容量状态. SOC 的数值定义为电池剩余容量

与电池额定容量的比值,可以采用以下公式进行估算^[2]:

$$\begin{cases} \text{SOC}(t) = (1-\rho) \text{SOC}(t-1) + \frac{\omega_c P_c(t) \Delta t \eta_c - \omega_d P_d(t) \frac{\Delta t}{\eta_d}}{E_n}, \\ 0 \leq \omega_c + \omega_d \leq 1, \\ \omega_c, \omega_d \in \{0, 1\}, \\ \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为储能电池自放电率, ω_c 和 ω_d 为储能电池第 t 时间段的充放电控制标志, 充电或者放电过程中 $\omega_c + \omega_d = 1$, 浮充过程中 $\omega_c + \omega_d = 0$, $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$ 分别为储能电池第 t 时间段的充电和放电功率, η_c 、 η_d 分别为储能介质的充电效率和放电效率, E_n 为储能电池的额定容量. 为了保证储能电池具备实时吸收和释放功率的能力, 必须使储能电池工作在一定的安全范围内, SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别为储能电池荷电状态的最小值和最大值.

1.2 表征储能电池运行状况的指标

为了将 SOC 控制在一定的范围内, 本文提出能够衡量储能电池运行状况的两大指标: 充放电能力指标和充放电强度指标.

1.2.1 储能电池充放电能力指标

充放电能力用来衡量储能电池平滑风电功率波动能力的大小, 其表达式为:

$$S(t) = \frac{\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{ref}}}{(\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_{\min})/2}. \quad (2)$$

式中, SOC_{ref} 为储能电池最佳状态推荐值, 通常取 $(\text{SOC}_{\max} + \text{SOC}_{\min})/2$; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 依据不同储能介质而有所改变^[3]. $S \in [-1, 1]$, 其值越靠近 -1, 储能电池的充电能力越强, 放电能力越弱; 其值越靠近 1, 储能电池的放电能力越强, 充电能力越弱; 其值维持在 0 附近时, 表示储能电池的充放电能力适中.

1.2.2 储能电池充放电强度指标

充放电强度用来衡量某一时刻, 储能电池释放或吸收功率能力的大小, 其表达式为:

$$\varepsilon(t) = \omega_c \frac{P_{br}(t)}{P_{c\max}} + \omega_d \frac{P_{br}(t)}{P_{d\max}}. \quad (3)$$

式中, $P_{br}(t)$ 为储能电池功率参考值, $P_{br}(t) > 0$ 时储能电池放电, $P_{br}(t) < 0$ 时储能电池充电; $P_{c\max}$ 、 $P_{d\max}$ 分别为储能电池的最大充电功率和最大放电功率. $\varepsilon(t) \in [-1, 1]$, ε 为 -1 时, 储能电池吸收的功率参考值为最大值; ε 为 1 时, 储能电池释放的功率参考值为最大值; ε 为 0 时, 储能电池的功率参考值为 0.

2 储能系统的云模型控制策略

2.1 风电功率平滑策略

一阶低通滤波是目前最常用的平抑风电功率波动的方式之一, 它具有结构简单、工程易实现的优点^[4-5]. τ 为低通滤波器的时间常数, 通过对风电场的输出功率 P_w 进行一阶低通滤波后, 获得并网功率参考值 P_{wr} , 二者的差值 P_{br} 由储能系统进行补偿, 具体数值关系如下所示:

$$P_{wr} = \frac{1}{1+\tau s} P_w. \quad (4)$$

$$P_{br} = P_{wr} - P_w. \quad (5)$$

为了确保储能电池在某一确定容量情况下能够安全运行, 必须考虑储能电池的荷电状态^[5], 尤其是当靠近电池容量限定时. 为了使 SOC 保持在合理的范围内, 本文建立了基于二维云模型的控制策略, 监测储能电池的 SOC, 实时修正储能电池的功率参考值, 避免过度充放电情况的发生.

如图 1 所示, 本文将电池充放电能力和强度这两

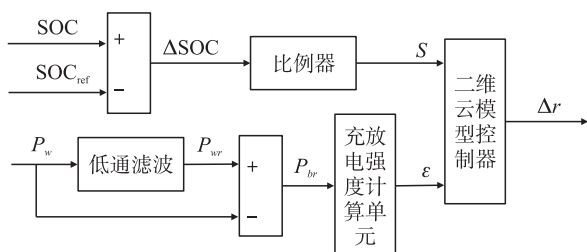


图 1 二维云模型控制策略结构框图

Fig. 1 The structure diagram of the two-dimensional cloud model controller

项指标作为二维云模型控制器的规则前件,将储能系统的功率修正值系数作为二维云模型控制器的规则后件,形成“双输入-单输出”的控制形式,得到储能电池的功率偏差修正系数 Δr 。

从而,储能电池的功率偏差修正值为:

$$\Delta P_b(t) = [\omega_c(t)P_{cmax} + \omega_d(t)P_{dmax}] \Delta r(t). \quad (6)$$

此时,储能电池修正之后的参考功率为:

$$P_b(t) = \Delta P_b(t) + P_{br}(t). \quad (7)$$

2.2 云模型控制器设计

由于风力发电具有随机性和波动性,所以储能系统充放电能力和充放电强度两项指标也具有随机性和不确定性的特点. 由李德毅院士建立的云模型理论,将概率论中的随机性和模糊集理论中的模糊性结合起来,对随机不确定问题具有很好的处理能力^[6-7]. 云模型不确定性推理系统的运行过程如图 2 所示。

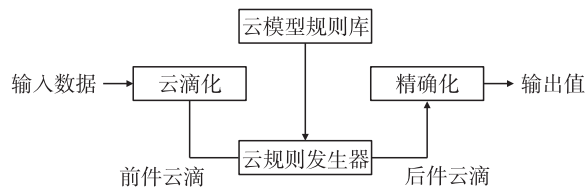


图 2 云模型不确定性推理系统

云模型不确定性推理系统的核心是云模型规则库的制定,规则库对控制器的控制效果有直接的作用. 规则库由自然语言描述的若干条 If-Then 定性规则构成^[8]. 本文考虑储能电池充放电强度和能量双项指标,利用二维多规则云推理进行控制,图 3 为二维云模型多规则推理的结构图。

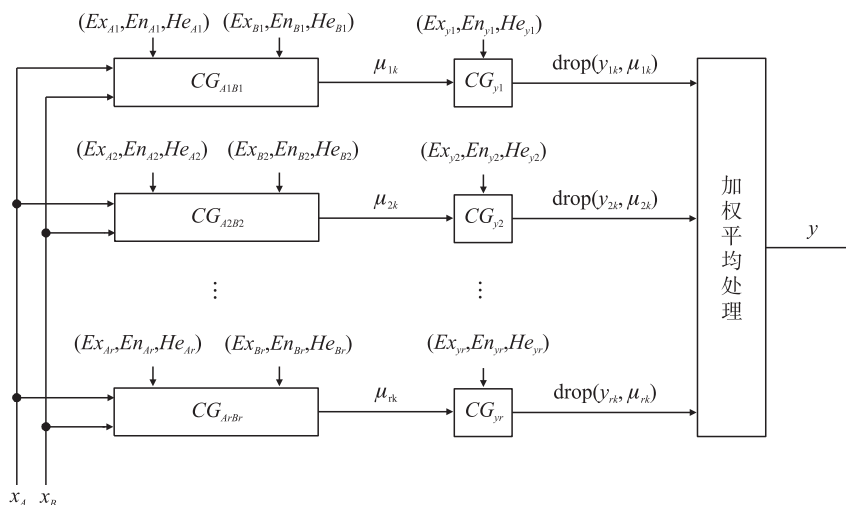


图 3 二维云模型多规则生成器

Fig. 3 The multi-rule generator of the two-dimensional cloud model

首先,将所有输入量和输出量进行云化,并用云的概念加以表示^[9-10]. 本文充放电能力指标 S 、充放电强度指标 ε 和功率修正系数 Δr 的论域都为 $[-1, 1]$, 期望 Ex 和超熵 He 按照控制效果进行调整. 表 1 详细列举了各项的取值情况。

表 1 二维云模型规则表

Table 1 The rules table of the two-dimensional cloud model

规则	输入/输出	定性表示	云概念表示
规则前件	充放电能力指标 S	很低	$A1(-1, 0.4/3, 0.01)$
		偏低	$A2(-0.6, 0.4/3, 0.01)$
		适中	$A3(0, 0.6/3, 0.01)$
		偏高	$A4(0.6, 0.4/3, 0.01)$
		很高	$A5(1, 0.4/3, 0.01)$
	充放电强度指标 ε	负大	$B1(-1, 0.5/3, 0.01)$
		负小	$B2(-0.5, 0.5/3, 0.01)$
		零	$B3(0, 0.5/3, 0.01)$
		正小	$B4(0.5, 0.5/3, 0.01)$
		正大	$B5(1, 0.5/3, 0.01)$

续表			
规则	输入/输出	定性分析	云概念表示
规则后件	功率修正系数 Δr	负大	$C1(-1,0.01/3,0.005)$
		负中	$C2(-0.5,0.01/3,0.005)$
		负小	$C3(-0.2,0.01/3,0.005)$
		零	$C4(0,0.01/3,0.005)$
		正小	$C5(0.2,0.01/3,0.005)$
		正中	$C6(0.5,0.01/3,0.005)$
		正大	$C7(1,0.01/3,0.005)$

表 1 中的 3 个变量建立成的云模型如图 4-图 6 所示.

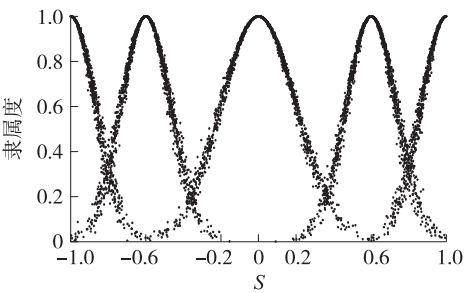


图 4 储能电池充放电能力指标云模型
Fig. 4 The cloud model of energy storage battery charge and discharge capability

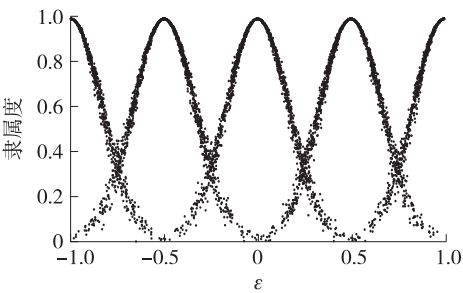


图 5 储能电池充放电强度指标云模型
Fig. 5 The cloud model of energy storage battery charge and discharge intensity

将输入及输出云化后,建立相应的控制规则,同时编写推理规则库.当储能电池充放电能力指标 S 很低或者偏低时,表示剩余电量不足,若此时充放电强度指标 ε 为正,表示储能电池处于释放能量的状态,为了避免深度放电的情况发生,应当使功率修正系数 Δr 为负,适当减小储能电池的功率参考值;反之,当储能电池充放电能力指标 S 很高或者偏高时,表示剩余电量趋近饱和,若此时充放电强度指标 ε 为负,表示储能电池处于吸收能量的状态,为了避免过度充电的情况发生,应当使功率修正系数 Δr 为正,适当增大储能电池的功率参考值.根据以上规律,共设计 25 条控制规则,如式(8)所示.

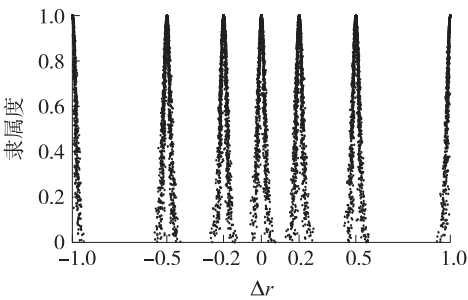


图 6 功率修正系数的云模型
Fig. 6 The cloud model of power correction coefficient

$$R=\{r_{ij}\}=\begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 4 & 3 & 2 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 7 & 6 & 4 & 4 & 4 \\ 7 & 7 & 5 & 4 & 4 \end{bmatrix}.$$

(8)

式中, r_{ij} 表示二维云模型控制器的控制规则,其中 $i=1\sim 5,j=1\sim 5,k=1\sim 7$.当 $i=5,j=1$ 时,表示充放电能力指标 S 为很高、充放电强度指标 ε 为负大,此时功率修正系数 Δr 为正大.二维云模型控制规则的示意图如图 7 所示.

3 系统仿真分析

本文以配置 50 MW 风电机组、10 MWh 锂离子储能电池的某风电场为研究对象,利用 MATLAB/Simulink 仿真平台,搭建风电场有功功率平滑系统.仿真时间为 24 h,滤波时间常数 $\tau=1\ 000\text{ s}$, SOC_{\min} 为 0.1, SOC_{\max} 为 0.9, SOC 初值设定为 0.6.

图 8 显示的是风电功率平滑前后的效果图和储能电池的充放电功率.由图 8 可知,风电功率经低通滤

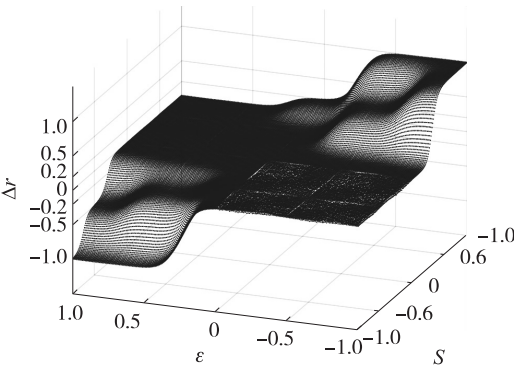


图 7 二维云模型控制规则示意图
Fig. 7 Diagram of the two-dimensional cloud model control rules

波器滤波后的波动率明显减小,趋于平滑.平滑后的风电功率并入电网,平滑前后的功率差值由储能电池吸纳.

图9为储能电池的功率修正系数图,图10为采用二维云模型控制策略前后的储能电池SOC对比图.如图10所示,未采用二维云模型控制策略时,在大约25 000 s和45 000 s时,储能电池的荷电状态SOC接近最小值 SOC_{min} ;在大约60 000 s时,SOC已经超过最大值 SOC_{max} ,储能电池处于过度充电状态;在大约85 000 s时,SOC超过最小值 SOC_{min} ,储能电池处于深度放电状态.储能电池的过度充放电会威胁到储能电池的使用寿命.

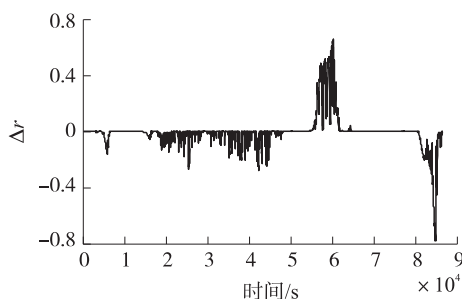


图9 储能电池的功率修正系数

Fig. 9 The power correction coefficient of the storage battery

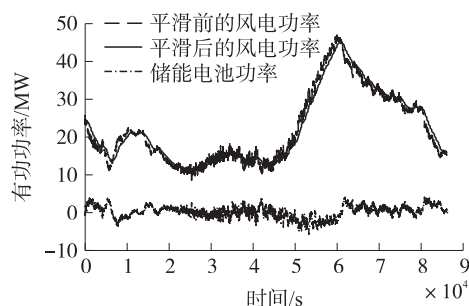


图8 平滑前后风电功率和储能电池充放电功率

Fig. 8 Before and after smoothing wind power and the storage battery charging and discharging power

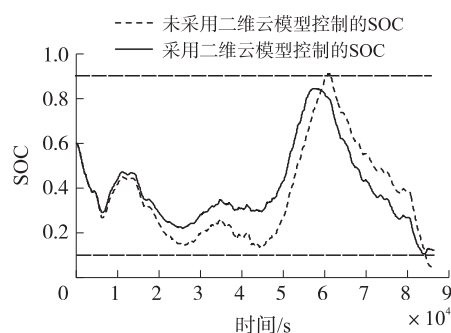


图10 采用二维云模型控制前后的荷电状态

Fig. 10 The SOC under the two-dimensional cloud model control

在采用二维云模型控制策略之后,结合图9和图10可以看出,在0 s~17 000 s、48 000 s~57 000 s和62 000 s~80 000 s这三个时段时,储能电池的SOC处于0.3~0.7之间,控制策略并不作用,对储能电池的功率不进行修正.从20 000 s~45 000 s和80 000 s~86 400 s这两个时段可以看出,当SOC低于0.3,且储能电池处于放电状态时,需要对放电功率进行修正,达到减小放电功率的目的,SOC值越小,修正值越大;但当SOC低于0.3,而储能电池处于充电状态时,功率不需要进行修正.从55 000 s~65 000 s这一时段可以看出,当SOC高于0.7,且储能电池处于充电状态时,需要对充电功率进行修正,达到减小充电功率的目的,SOC值越大,修正值越大;但当SOC高于0.7,而储能电池处于放电状态时,功率不需要进行修正.从图10可以看出,在大约60 000 s时SOC超过0.9和85 000 s时SOC低于0.1时,二维云模型控制器对储能电池的功率进行了有效的修正,保证了储能电池工作在安全范围内,避免了过度充放电情况的发生,有效地延长了储能电池的使用寿命.

4 结语

本文采用一阶低通滤波器对风电有功功率进行滤波处理,通过电池储能装置的平抑作用,有效地减小了风电并网波动率.考虑到储能电池的使用寿命,将二维云模型控制策略引进储能电池SOC控制过程中,依据储能电池充放电能力和充放电强度两项指标,修正储能电池功率参考值,在平滑风电功率波动的同时兼顾控制储能电池的SOC值,使储能电池工作在安全范围内.SOC处于合理的范围,避免了过度充放电情况的发生,对延长储能电池的使用寿命具有一定的意义.

[参考文献] (References)

- [1] 李强,袁越,谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 115-122.
LI Q, YUAN Y, TAN D Z. Progress on application of energy storage technology in wind power integration[J]. Journal of Hohai

- university(natural sciences),2010,38(1):115-122.(in Chinese)
- [2] 彭思敏,曹云峰,蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):38-43.
PENG S M,CAO Y F,CAI X. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid[J]. Automation of electric power systems,2011,35(16):38-43.(in Chinese)
- [3] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.
DING M,XU N Z,BI R. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of electric power systems,2011,35(2):66-72.(in Chinese)
- [4] TELEKE S,BARAN M E,BHATTACHARYA S,et al. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE transactions on energy conversion,2010,25(3):787-794.
- [5] LI W,JOOS G,ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution[C]//Power Systems Conference and Exposition,Atlanta:IEEE,2006:2 077-2 084.
- [6] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34.
LI D Y,LIU C Y. Study on universality of the normal cloud model[J]. Engineering science,2004,6(8):28-34.(in Chinese)
- [7] KHALID M,SAVKIN A V. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage[J]. Renewable energy,2010,35(7):1 520-1 526.
- [8] 宋志惠,韩晓娟,孟芳园,等. 基于云模型的风电功率平滑控制策略研究[J]. 电气应用,2012(24):101-104.
SONG Z H,HAN X J,MENG F Y,et al. Research of smoothing strategy for wind power based on cloud model[J]. Electro technical application,2012(24):101-104.(in Chinese)
- [9] 丁明,吴建锋,朱承治,等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING M,WU J F,ZHU C Z,et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):22-29.(in Chinese)
- [10] 王成全. 基于二维云模型规则提取算法研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(26):46-49.
WANG C Q. Study of rules extraction method based on two-dimension cloud model [J]. Computer engineering and applications,2010,46(26):46-49.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第25页)

- [14] 谭文,张敏,李志攀,等. 分数阶互联电力系统混沌振荡及其同步控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(2):74-78.
TAN W,ZHANG M,LI Z P. Chaotic oscillation of interconnected power system and its synchronization[J]. Journal of Hunan university of science and technology(natural science edition),2011,26(2):74-78.(in Chinese)
- [15] MATIGNON D. Stability results for fractional differential equations with applications to control processing[J]. Computational engineering in systems applications,1997(2):963-968.
- [16] 黄雯迪,闵富红. 单一驱动多响应分数阶混沌系统的完全同步[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2015,15(2):1-8.
HUANG W D,MIN F H. Complete synchronization of single-drive and multiple-response fractional-order chaotic system[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2015,15(2):1-8.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]