

基于 FPSO 的电力巡检机器人的广义二型模糊逻辑控制

吴庆¹ 赵涛¹ 佃松宜¹ 郭锐² 李胜川²
方红伟³ 韩吉霞³

摘要 针对电力巡检机器人 (Power-line inspection robot, PLIR) 的平衡调节问题, 设计了广义二型模糊逻辑控制器 (General type-2 fuzzy logic controller, GT2FLC); 针对 GT2FLC 中隶属函数参数难以确定的问题, 通过模糊粒子群 (Fuzzy particle swarm optimization, FPSO) 算法来优化隶属函数参数. 将 GT2FLC 的控制性能与区间二型模糊逻辑控制器 (Interval type-2 fuzzy logic controller, IT2FLC) 和一型模糊逻辑控制器 (Type-1 fuzzy logic controller, T1FLC) 的控制性能进行对比. 除此之外, 还考虑了外部干扰对三种控制器控制效果的影响. 仿真结果表明, GT2FLC 具有更好的性能和处理不确定性的能力.

关键词 广义二型模糊逻辑控制器, 隶属函数, 模糊粒子群, 电力巡检机器人

引用格式 吴庆, 赵涛, 佃松宜, 郭锐, 李胜川, 方红伟, 韩吉霞. 基于 FPSO 的电力巡检机器人的广义二型模糊逻辑控制. 自动化学报, 2022, 48(6): 1482-1492

DOI 10.16383/j.aas.c190306

General Type-2 Fuzzy Logic Control for a Power-line Inspection Robot Based on FPSO

WU Qing¹ ZHAO Tao¹ DIAN Song-Yi¹ GUO Rui² LI Sheng-Chuan²
FANG Hong-Wei³ HAN Ji-Xia³

Abstract A general type-2 fuzzy logic controller (GT2FLC) is designed to control the balance of a power-line inspection robot (PLIR). Because it is difficult to determine parameters of membership function in GT2FLC, the fuzzy particle swarm optimization (FPSO) is applied to optimize the parameters of membership function in GT2FLC. The performance of GT2FLC is compared with the performance of the type-1 fuzzy logic controller (T1FLC) and interval type-2 fuzzy logic controller (IT2FLC). Furthermore, the influence of external disturbances on the control effect of the PLIR is considered. According to simulations, the performance of GT2FLC is better than performance of other controllers, and the GT2FLC has better ability to deal with uncertainties.

Key words General type-2 fuzzy logic controller (GT2FLC), membership function, fuzzy particle swarm optimization (FPSO), power-line inspection robot (PLIR)

Citation Wu Qing, Zhao Tao, Dian Song-Yi, Guo Rui, Li Sheng-Chuan, Fang Hong-Wei, Han Ji-Xia. General type-2 fuzzy logic control for a power-line inspection robot based on FPSO. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(6): 1482-1492

高压输电线会在环境和机械的作用下出现一些故障或安全隐患, 例如绝缘子老化破损、导线断股、金具氧化腐蚀等, 若不能及时地排除这些问题, 可能会导致重大的事故. 所以高压输电线的巡检一直是供电企业的重要工作. 长时间以来, 我国高压输

电线路的巡检工作都是通过人工完成的, 这不仅耗时耗力, 而且高压输电线常常会跨过高山以及江河这些人工难以到达的地方, 从而出现了巡检盲区. 为了使巡检工作变得更加高效和准确, 我国自上世纪 90 年代中期开始针对电力巡检机器人 (Power-line inspection robot, PLIR) 做了大量的研究^[1-6], 用 PLIR 来代替人工进行高压输电线的巡查和维护. PLIR 具有较高的效率和可靠性, 并且能轻易到达人工无法到达的巡检盲区. 因此, PLIR 的研究具有重大的意义. PLIR 在高压输电线上移动时, 需要面对许多的不确定性, 例如风力的干扰和电线的振动, 所以要对它进行控制使其达到平衡. 文献 [7-11] 提供的方法能够对 PLIR 的平衡进行控制, 然而这些控制器的设计方法需要利用被控对象精确的物理模型, 并且很少考虑一些不确定因素.

收稿日期 2019-04-17 录用日期 2019-06-24

Manuscript received April 17, 2019; accepted June 24, 2019

国家重点研发计划 (2018YFB1307401), 国家自然科学基金 (61703291) 资助

Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB1307401) and National Natural Science Foundation of China (61703291)

本文责任编辑 刘艳军

Recommended by Associate Editor LIU Yan-Jun

1. 四川大学电气工程学院 成都 610065 2. 国网山东省电力公司 济南 250001 3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 沈阳 110006

1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001 3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006

1975 年, Mamdani 等成功地将其 I 型模糊逻辑控制器 (Type-1 fuzzy logic controller, T1FLC) 应用在蒸汽机的控制当中^[12]. 模糊逻辑控制器的设计不需要依赖精确的数学模型, 而仅需要由专家经验总结出的模糊规则. 不仅如此, 模糊逻辑控制器还具有处理不确定性的能力. 因此, T1FLC 得到了大量的研究, 广泛运用于各种领域^[13-23]. 广义 II 型模糊逻辑控制器 (General type-2 fuzzy logic controller, GT2FLC) 是在 T1FLC 的基础上提出来的, GT2FLC 具有三维结构的隶属函数, 使得控制系统处理不确定性的能力增强, 所以得到广泛的关注^[24-27]. 但同时, 三维结构的隶属函数使得 GT2FLC 的运算复杂度也增加了许多. 区间 II 型模糊控制器 (Interval type-2 fuzzy logic controller, IT2FLC) 相比于 GT2FLC, 通过牺牲一些控制性能来减少运算复杂度, 也得到了广泛应用^[28-29]. 为了简化广义 II 型模糊集 (General type-2 fuzzy set, GT2FS) 的运算, Mendel 等^[30] 提出了用 α 平面来表示广义二型模糊集的方法, GT2FS 被分割成若干个区间二型模糊集 (Interval type-2 fuzzy set, IT2FS).

在模糊逻辑控制器中, 隶属函数参数的选取对整个控制系统具有极大的影响. 一般情况下, 隶属函数参数的选取多是依赖于经验或者实验数据, 但随着控制精度要求的变高和被控制系统的复杂性增加, 传统的参数选取方法已经很难达到要求. 尤其是在 GT2FLC 中, 三维结构的隶属函数使得整个控制系统无论是参数维数还是复杂度都大大增加. 因此, 在大量文献中, 提出了用优化算法来优化隶属函数参数的方法, 使得控制系统的性能更好^[31-35].

粒子群优化算法 (Particle swarm optimization, PSO) 是应用比较广泛的一种群智能优化算法, 是 Eberhart 等在对鸟群捕食行为进行研究的基础上提出来的. 此后, 专家提出了许多改进的 PSO 算法, 并且将其应用于不同的领域上^[36-38]. Shi 等^[39] 在基本的 PSO 算法上引入了惯性权重这一概念, 提出了标准 PSO 算法. 惯性权重在标准 PSO 算法中具有平衡全局和局部寻优的能力. 在此基础上, 文献 [40] 提出了一种惯性权重线性递减的方法来改善标准 PSO 算法的寻优能力. 然而, 对于一些非线性系统, 这种线性递减的惯性权重并不完全适用. 文献 [41] 提出了一种通过模糊逻辑系统来调整惯性权重的 PSO 算法, 使得惯性权重的调整更加合理.

本文的创新点如下: 1) 针对 PLIR 平衡调节问题, 设计了 GT2FLC; 2) 针对 GT2FLC 系统中隶属函数参数多并且难以确定的问题, 基于 FPSO (Fuzzy

PSO) 算法来优化 GT2FLC 中的隶属函数参数, 从而增加 GT2FLC 的性能; 3) 通过仿真验证了 GT2FLC 相比于 IT2FLC 和 T1FLC 具有更好的性能和处理不确定性的能力.

1 电力巡检机器人

在本节中, 我们针对 PLIR 的工作原理进行介绍. PLIR 在高压输电线上作业时, 需要通过质心调节机构的调节来保持平衡, 其模型如图 1 所示. PLIR 关于平衡调节的动力学方程可以通过欧拉-拉格朗日方程得到, 欧拉-拉格朗日方程表示为^[42]

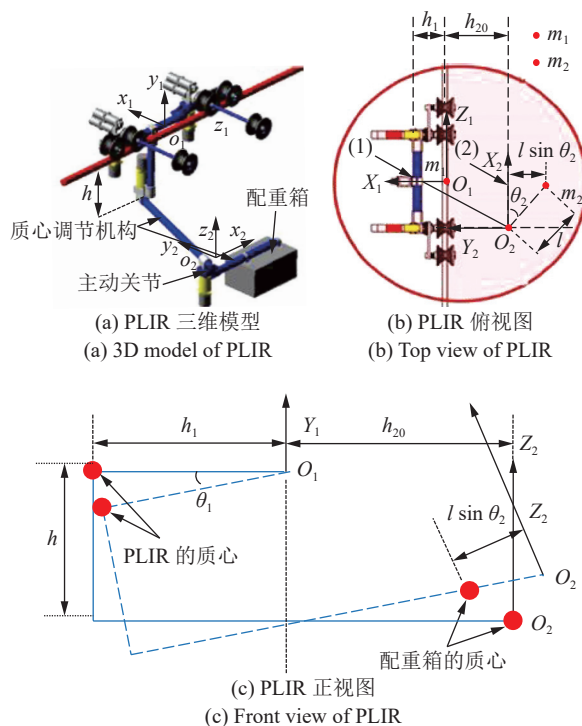


图 1 PLIR 模型

Fig.1 The model of PLIR

$$u_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

其中, u_i 为作用在广义坐标的外部扭矩, L 可以表示为

$$L = K - P \quad (2)$$

其中, K 和 P 分别表示机器人平衡调节模型的动能和势能, 可以表示为

$$K = \frac{m_1 h_1^2 \dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{m_2 l^2 \dot{\theta}_2^2}{2} + \frac{m_2 [h^2 + (-h_{20} + l \sin \theta_2)] \dot{\theta}_1^2}{2} \quad (3)$$

$$P = -m_1 g h_1 \sin \theta_1 + m_2 g [(h_{20} + l \sin \theta_2) \sin \theta_1 - h \cos \theta_1] \quad (4)$$

其中, θ_1 是 PLIR 与水平轴 X_1 的倾角, 如图 1 所示; θ_2 是执行器的杆旋转的角度; m_1 和 m_2 分别为机器人主体和配重箱的质量; l 为执行器的杆的长度; h 是 T 型底座的高度; h_1 为机器人平衡时, 配重箱的质心到高压输电线的距离; h_{20} 为电线到机器人质心的距离; g 是重力加速度. 以上各式中参数的值列在表 1 中. 通过表 1, 可知

$$m_1 h_1 = m_2 h_{20} \quad (5)$$

将式 (5) 代入到式 (4) 中, 可得:

$$P = m_2 g (-h \cos \theta_1 + l \sin \theta_2 \sin \theta_1) \quad (6)$$

最终, 将式 (3) 和式 (6) 代入到式 (1) 中, 得到 PLIR 平衡调节的动力学方程, 表示为

$$\begin{aligned} u_1 &= m_1 h_1^2 + m_2 (h^2 + (-h_{20} + l \sin \theta_2)^2) \ddot{\theta}_1 + \\ & 2m_2 l (-h_{20} + l \sin \theta_2) (\cos \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ & m_2 g d \sin \theta_1 + m_2 g l \sin \theta_2 \cos \theta_1 \\ u_2 &= m_2 l^2 \ddot{\theta}_2 - m_2 l (-h_{20} + l \sin \theta_2) (\cos \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + \\ & m_2 g l \cos \theta_2 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, u_1 是外部扰动, u_2 是作用在关节上的扭矩. 对式 (7) 进行变换, 并且令 $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2]^T = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$, 可得 PLIR 平衡调节的状态空间模型为

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2 \\ \dot{q}_2 &= \frac{u_1 - 2m_2 l (-h_{20} + l \sin q_3) (\cos q_3) q_2 q_4}{m_1 h_1^2 + m_2 [h^2 + (-h_{20} + l \sin q_3)^2]} - \\ & \frac{m_2 g h \sin q_1 + m_2 g l \sin q_3 \cos q_1}{m_1 h_1^2 + m_2 [h^2 + (-h_{20} + l \sin q_3)^2]} \\ \dot{q}_3 &= q_4 \\ \dot{q}_4 &= \frac{u_2 + m_2 l (-h_{20} + l \sin q_3) (\cos q_3) q_2^2}{m_2 l^2} - \\ & \frac{m_2 g \cos q_3 \sin q_1}{m_2 l^2} \end{aligned} \quad (8)$$

表 1 PLIR 对应参数值

Table 1 Values of parameters for the PLI robot

参数	参数值	参数	参数值
m_1 (kg)	63	m_2 (kg)	27
h_1 (m)	0.18	h_{20} (m)	0.42
l (m)	0.5	h (m)	0.5

在本文中, u_2 是 GT2FLC 的控制输出, 我们通过控制 u_2 来对 PLIR 的平衡进行调节, 使得 θ_1 稳定在平衡点附近. u_2 不能直接调节 θ_1 , 而是通过系统的耦合性来间接地调整 θ_1 .

2 广义二型模糊逻辑系统

2.1 广义二型模糊集

一个 GT2FS 记为 \tilde{A} , 它的三维结构的隶属函数如图 2 所示. 一个 GT2FS 可以表示为

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) | \forall x \in X | \forall u \in [0, 1]\} \quad (9)$$

其中, $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ 为次隶属度, X 是主变量 x 的定义域. 次隶属度的支撑域称为不确定性的迹 (Footprint of uncertainty, FOU), 记为 $FOU(\tilde{A})$, 即

$$FOU(\tilde{A}) = \{(x, u) \in X \times [0, 1] | \mu_{\tilde{A}}(x, u) > 0\} \quad (10)$$

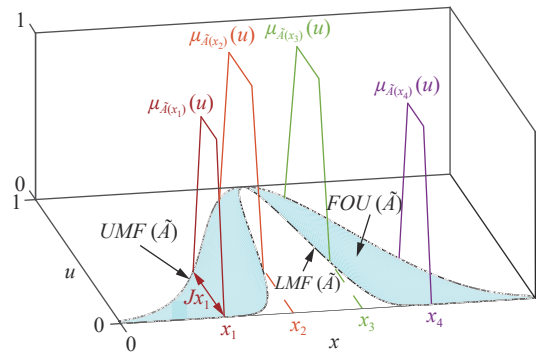


图 2 广义二型模糊集

Fig.2 General type-2 fuzzy set

如图 3 所示, FOU 被它的上、下隶属函数所包含. 其上、下隶属函数分别为 $UMF(\tilde{A})$ 和 $LMF(\tilde{A})$, 即

$$UMF(\tilde{A}) = \inf \{u | u \in [0, 1], \mu_{\tilde{A}}(x, u) > 0\} \quad (11)$$

$$LMF(\tilde{A}) = \sup \{u | u \in [0, 1], \mu_{\tilde{A}}(x, u) > 0\} \quad (12)$$

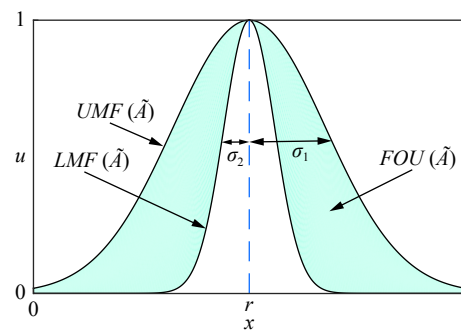


图 3 不确定性的迹

Fig.3 The footprint of uncertain

为了使 GT2FS 的表示更加简便, 文献 [26] 提出了 GT2FS 的垂直切片表示法

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \frac{\tilde{A}(x)}{x} \quad (13)$$

$$\tilde{A}(x) = \int_{\forall u \in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}(x)}(u)}{u} \quad (14)$$

其中, $\tilde{A}(x)$ 为次隶属函数; $\mu_{\tilde{A}(x)}(u)$ 为次隶属度; J_x 为主隶属函数, 同时也是次隶属函数的定义域. 次隶属函数本身是一个一型模糊集, 当次隶属度 $\mu_{\tilde{A}(x)}(u)$ 恒为 1 的时候, GT2FS 就可以看成是一个区间二型模糊集.

Mendel 等^[30] 通过 α 平面来表示 GT2FS, $\tilde{A}_\alpha(x)$ 为 $\mu_{\tilde{A}(x)}(u)$ 的 α 截集, 即

$$\tilde{A}_\alpha(x) = \{u | \mu_{\tilde{A}(x)}(u) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1] \quad (15)$$

GT2FS 的一个 α 平面为 \tilde{A}_α , 即

$$\tilde{A}_\alpha = \int_{\forall x \in X} \frac{\tilde{A}_\alpha(x)}{x} \quad (16)$$

最终, 一个 GT2FS 可以看作是 α 平面的并集, 即

$$\tilde{A} = \bigcup_{\alpha \in [1, 0]} \left[\frac{\alpha}{\tilde{A}_\alpha} \right] \quad (17)$$

在 \tilde{A} 中, 每一个 α 平面都是一个区间二型模糊集. 通过多个 α 平面来表示 GT2FS, 可将 GT2FS 的运算转化为区间二型模糊集的运算. 特别地, 当 $\alpha = 0$ 时的 α 平面为 \tilde{A}_0 , 即

$$\tilde{A}_0 = FOU(\tilde{A}) \quad (18)$$

2.2 广义二型模糊逻辑控制器

一个 GT2FLC 由模糊器、模糊推理机、规则库、降型器、解模糊器这五个部分组成. 模糊器通过隶属函数, 能将精确的输入量映射到模糊空间中, 成为输入的 GT2FS. 输入的 GT2FS 按照规则库中的模糊规则, 在推理机中通过模糊逻辑原理得到输出的 GT2FS. 输出的 GT2FS 经过降型器和解模糊器得到精确的输出量.

在 GT2FLC 中, 隶属函数的上、下隶属函数通常为三角型、高斯和梯型, 次隶属函数通常为梯形、三角型和梯形. 规则库中的规则一般通过专家知识建立的, 一般用 IF-THEN 语句来表示. 在控制系统中有 I 个输入和 N 条规则, 那么第 n 条规则具有如下的形式:

$$\begin{aligned} R^{(n)} : & \text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^n \text{ and } \dots \text{ and } x_I \text{ is } \tilde{F}_I^n \\ & \text{THEN } y \text{ is } \tilde{G}^n, \text{ where } n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (19)$$

其中, \tilde{F}_i^n ($i=1, 2, \dots, I$) 是与输入 x_i ($i=1, 2, \dots, I$) 对应的 GT2FS, 也称为前件; \tilde{G}^n 是 GT2FLC 的后件, y 是 GT2FLC 的最终输出. 模糊逻辑控制器中的 IF-THEN 规则是通过自然语言来描述的, 更容易让人接受. 模糊推理机一般为乘积推理机和最小

推理机. 对于输入向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$, 经过乘积推理, 得到在 α 平面上的激活区间为 $[\underline{f}_\alpha^n, \bar{f}_\alpha^n]$, 即

$$\underline{f}_\alpha^n = \underline{\mu}_{\alpha \tilde{F}_1^n}(x_1) \times \dots \times \underline{\mu}_{\alpha \tilde{F}_I^n}(x_I) \quad (20)$$

$$\bar{f}_\alpha^n = \bar{\mu}_{\alpha \tilde{F}_1^n}(x_1) \times \dots \times \bar{\mu}_{\alpha \tilde{F}_I^n}(x_I) \quad (21)$$

其中, $\bar{\mu}_{\alpha \tilde{F}_i^n}(x_i)$ 和 $\underline{\mu}_{\alpha \tilde{F}_i^n}(x_i)$ 分别为 x_i 在 \tilde{F}_i^n 中对应 α 平面的上、下隶属度. 在模糊推理机中, 每条规则的输出都是一个 GT2FS. 降型器只存在于二型模糊逻辑控制器中, 将二型模糊集转化为一型模糊集. 降型器与解模糊器有时可以看作是一个整体. 在本文中, 为了使得运算更加简便, 采用的是 Biglarbeian-Melek-Mendel 直接解模糊法^[43]:

$$y_{BMM\alpha} = o \frac{\sum_{n=1}^N y_\alpha^n \underline{f}_\alpha^n}{\underline{f}_\alpha^n} + p \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_\alpha^n \bar{f}_\alpha^n}{\bar{f}_\alpha^n} \quad (22)$$

其中, \bar{y}_α^n 和 y_α^n 为后件, o 和 p 要满足 $o + p = 1$ 的条件. 最后, 通过全局解模糊得到最终的输出值 y , 即

$$y = \frac{\sum \alpha (y_{BMM\alpha})}{2 \sum \alpha} \quad (23)$$

其中, $\alpha = \{0, 1/G, \dots, (G-1)/G, 1\}$, G 为广义二型模糊集被分割的次数, 一个 GT2FS 集共有 $G+1$ 个 α 平面, y 作为 GT2FLC 的输出作用到被控系统中.

3 模糊粒子群优化算法原理

3.1 标准粒子群优化算法

在标准 PSO 算法中, 对于一个 N 维的优化问题而言, 假设有 M 个粒子, 每个粒子都是优化问题的一个潜在解, 在 t 时刻, 记第 i 个粒子的位置为 $X_i(t)$, 第 i 个粒子的速度为 $V_i(t)$, 而第 i 个粒子当前最优位置为 $Pbest_i(t)$, 可以表示为

$$\begin{aligned} Pbest_i(t) = & \\ & \begin{cases} Pbest_i(t-1), & \text{若 } fit(X_i(t)) > fit(Pbest_i(t-1)) \\ X_i(t), & \text{若 } fit(X_i(t)) \leq fit(Pbest_i(t-1)) \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $fit(Pbest_i(t-1))$ 和 $fit(X_i(t))$ 为第 i 个粒子相对应位置的适应值. 对于整个粒子群, 有一个最优的位置 $Gbest(t)$, 表示为

$$b = \arg \min_{1 \leq i \leq M} (f(Pbest_i(t))) \quad (25)$$

$$Gbest(t) = Pbest_b(t) \quad (26)$$

在标准 PSO 中, 第 i 个粒子通过式 (12) 来更新自己下一时刻的速度, 即

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 [Pbest_i(t) - X_i(t)] + c_2 r_2 [Gbest(t) - X_i(t)] \quad (27)$$

其中, ω 为惯性权重, c_1 表示认知因子, 代表粒子向自身最优值移动的加速权重; c_2 表示社会因子, 代表粒子向全局最优值移动的加速权重; r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的随机变量. 在粒子更新速度的时候, 速度要在一定的范围内, 即

$$V_i(t+1) \in [V_{min}, V_{max}] \quad (28)$$

其中, V_{min} 和 V_{max} 为粒子速度的最小值和最大值. 通过式 (14), 第 i 个粒子更新自己下一时刻的位置, 即

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (29)$$

在粒子更新位置, 位置要在一定的范围内, 即

$$X_i(t+1) \in [X_{min}, X_{max}] \quad (30)$$

其中, X_{min} 和 X_{max} 为粒子位置的最小值和最大值. 粒子需要不断地迭代来更新自己的位置, 直到达到终止条件为止. 终止条件一般为达到最大迭代次数或者是全局最优的适应值满足要求.

3.2 模糊粒子群算法 (FPSO)

在 FPSO 中, 通过一个一型模糊逻辑系统 (Type-1 fuzzy logic system, T1FLS) 来调整惯性权重的值. 在算法迭代前期, 惯性权重取较大值, 使得粒子具有更好的全局搜索能力, 反之, 在算法迭代后期, 惯性权重取较小值, 使得粒子具有更好的局部搜索能力.

当前迭代次数 ite 和全局最优位置的适应值 $fit(Gbest)$ 作为模糊系统两个输入的信息, 在输入之前对其进行归一化处理, 即

$$Nite = \frac{ite}{ite_{max}} \quad (31)$$

$$Nfit = \frac{fit(Gbest) - fit_{min}}{fit_{max} - fit_{min}} \quad (32)$$

其中, ite_{max} 为最大迭代次数; fit_{max} 和 fit_{min} 分别为适应值的最大值和最小值. 两个输入分别划分成 5 个一型模糊集: NB 表示负大集, NS 表示负小集, ZO 表示零集, PS 表示正小集, PB 表示正大集, 它们的隶属函数如图 4 和图 5 所示. 这个 T1FLS 具有 25 条规则, 如表 2 所示. 最终, 惯性权重 ω 通过式 (33) 计算得到^[4]

$$\omega = \frac{\sum_{n=1}^{25} y^n f^n}{f^n} \quad (33)$$

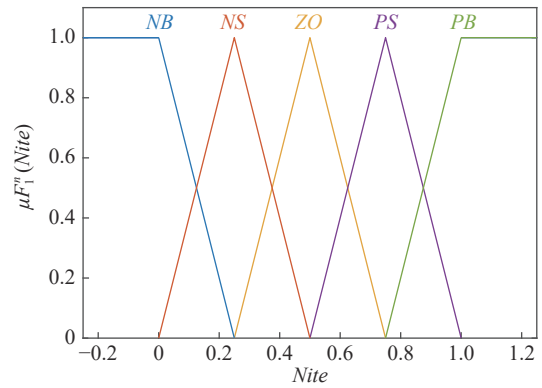


图 4 $Nite$ 对应的隶属函数

Fig.4 The membership function for $Nite$

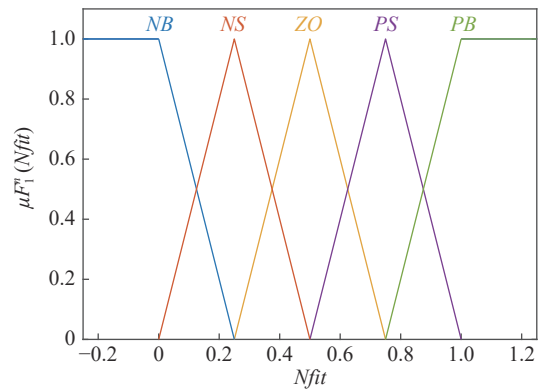


图 5 $Nfit$ 对应的隶属函数

Fig.5 The membership function for $Nfit$

表 2 FPSO 惯性权重调整模糊规则表
Table 2 The rulebase of adjustment for inertia weight in FPSO

ω	$Nite$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	PS	PS	PB	PB
NS	NS	ZO	PS	PB	PB
$Nfit$	ZO	NS	NS	ZO	PS
PS	NB	NB	NS	ZO	PS
PB	NB	NB	NS	NS	ZO

$$f^n = \mu_{F_1^n}(Nite) \times \mu_{F_2^n}(Nfit), \quad n = 1, \dots, 25 \quad (34)$$

其中, y^n 为 T1FLS 后件集; $\mu_{F_1^n}(Nite)$ 和 $\mu_{F_2^n}(Nfit)$ 为输入对应一型模糊集的隶属度. 通过 T1FLS 不断地更新 FPSO 中的惯性权重 ω .

4 广义二型模糊控制器设计与优化

本节针对 PLIR 平衡调节的问题, 设计了一个 GT2-FLC. 基于 FPSO 算法, 对 GT2FLC 的隶属函数参数进行优化, 使得控制性能增强. 图 6 为电力巡检

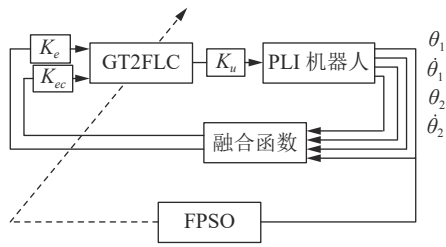


图 6 PLIR 平衡控制和优化原理图

Fig.6 The diagram of balance control and optimization for the PLIR

机器人的平衡控制优化的原理图。

4.1 广义二型模糊逻辑控制器设计

我们将 PLIR 的 4 个状态变量 $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2]$ 作为反馈输入到 GT2FLC 中. 为了避免反馈状态变量过多而导致的模糊规则爆炸, 将 4 个状态变量通过信息融合的方法融合成 2 个状态变量^[44], 即

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \dot{\tilde{\theta}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & k(2) & 0 & 0 \\ k(1) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k(3) & k(4) \\ 0 & 0 & k(2) & k(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

其中, k 为状态反馈增益矩阵, 可以通过线性二次规划的方法得到; $[\tilde{\theta}_1 \ \dot{\tilde{\theta}}_1]^T$ 为融合后的新的状态变量. 我们将 $[\theta_1 \ \dot{\theta}_1]^T$ 作为融合的主变量, 融合后的新变量与主变量具有相同的物理意义. PLIR 的整个控制流程如图 6 所示. K_e 和 K_{ec} 为量化因子, 可以将输入量从物理论域按比例转化到模糊论域中. K_u 为比例因子, 可以将输出量从模糊论域转化到物理论域.

在本文中, 我们用 5 个 GT2FS 来对输入的模糊论域进行分割, 分别为负大集 NB , 负小集 NS , 零集 ZO , 正小集 PS , 正大集 PB . 相应的主隶属函数为高斯型. 对于一个 GT2FS, $\underline{\mu}_{0F_i^n}(x_i)$ 和 $\overline{\mu}_{0F_i^n}(x_i)$ 分别为 FOU 平面上的上、下隶属度值, 即

$$\overline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - r}{\sigma_1} \right)^2 \right] \quad (36)$$

$$\underline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - r}{\sigma_2} \right)^2 \right] \quad (37)$$

其中, r 为上、下隶属函数的均值; σ_1 和 σ_2 分别为上、下隶属函数的标准差. 次隶属函数选择为梯形, 其对应 α 平面的次隶属度为

$$\underline{\mu}_{\alpha F_i^n}(x_i) = \underline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) + \frac{1}{2} \gamma [\overline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) - \underline{\mu}_{0F_i^n}(x_i)] \alpha \quad (38)$$

$$\overline{\mu}_{\alpha F_i^n}(x_i) = \overline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) - \frac{1}{2} \gamma [\overline{\mu}_{0F_i^n}(x_i) - \underline{\mu}_{0F_i^n}(x_i)] \alpha \quad (39)$$

其中, γ 决定次隶属函数形状的参数. 特别地, 当 $\gamma = 0$ 时, 次隶属函数为正方形, GT2FS 转化为一个区间二型模糊集. GT2FLC 的模糊规则如表 3 所示.

表 3 PLIR 平衡调节模糊规则表

Table 3 The rulebase of balance adjustment for the PLIR

w_2	$\tilde{\theta}_1$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZO
NS	PB	PB	PS	ZO	NS
$\dot{\tilde{\theta}}_1$	ZO	PS	PS	ZO	NS
PS	PS	ZO	NS	NB	NB
PB	ZO	NS	NS	NB	NB

4.2 广义二型隶属函数优化

在本文中, 通过 FPSO 算法对 GT2FLC 的隶属函数进行优化, 以得到更好的控制性能. GT2FLC 的两个输入分别对应 5 个 GT2FS, 而每个 GT2FS 的隶属函数需要用 $r, \delta_1, \delta_2, \gamma$ 这 4 个参数来表示, 所以 FPSO 中每个粒子都具有 40 个维度. FPSO 算法的适应度函数为平均绝对误差, 即

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T |\theta_1(i)| \quad (40)$$

图 7 为整个 FPSO 的算法流程图. 最大迭代次数 ite_{max} 设为 1 500, 种群数为 50, c_1 和 c_2 为 1.75. 本文相对文献 [34], 通过 T1FLS 自适应动态更新 PSO 算法的参数, 可以搜索出最佳的 GTFLC 的调节参数, 从而对 PLIR 实现更优控制。

5 仿真结果与分析

本节针对 PLIR 平衡调节的非线性模型, 运用本文所设计的 GT2FLC 进行平衡控制, 并且通过 FPSO 算法对 GT2FLC 中隶属函数参数进行优化. 同时, 本文还考虑了外部扰动对控制效果的影响. 此外, 为了验证本文方法的优越性, 设计了 T1FLC 和 IT2FLC 控制 PLI 机器人的平衡来与 GT2FLC 作对比. 最后将标准 PSO 算法与 FPSO 算法进行了对比. 图 8 和图 9 为 GT2FLC 两个输入优化前的隶属函数的 FOU , 次隶属函数参数 γ 都为 0.5. 图 10 和图 11 为 GT2FLC 两个输入优化后的的隶属函数的 FOU , 它的 γ 的值分别为 0.59, 0.28, 0.27, 0.65, 0.77, 0.54, 0.47, 0.27, 0.48, 0.63.

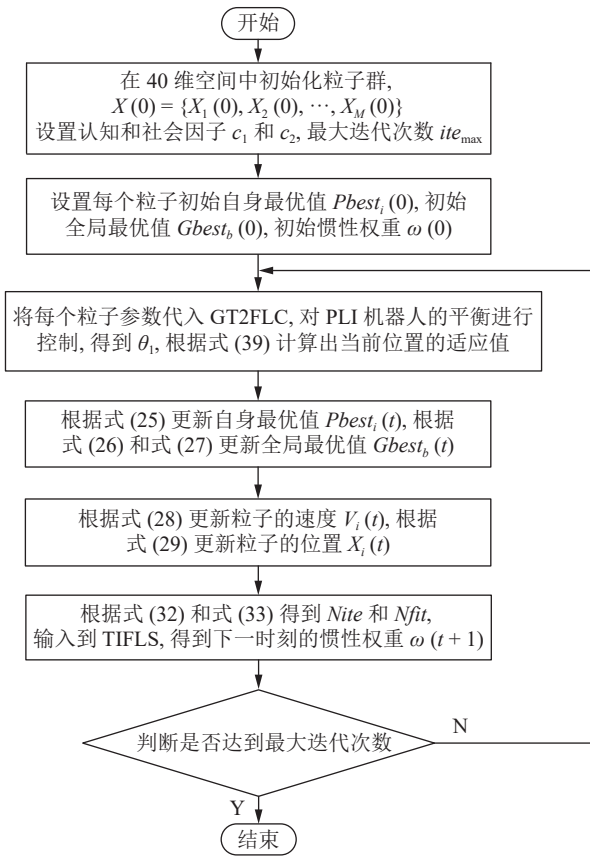


图 7 FPSO 算法流程图

Fig.7 The flow diagram of the FPSO algorithm

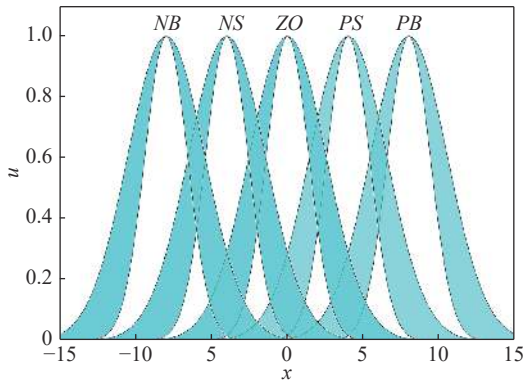


图 8 优化前 θ_1 对应的 FOU

Fig.8 The FOU for θ_1 without optimization

首先考虑在没有任何外部干扰的情况下, 对比在 FPSO 优化下的 GT2FLC 与没有优化的 GT2FLC 的平衡控制效果, 此外, 还与 FPSO 优化下的 IT2FLC 和 T1FLC 平衡控制效果进行了对比. 初始状态 $[\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2] = [0.3, 0, 0, 0]$. 图 12 和图 13 为 PLIR 四个状态的响应, 可以看出, 经过 FPSO 优化后的 GT2FLC 能使 PLIR 中的 θ_1 到达平衡点位置后具有更小的超调, 并且振荡更小. 除此之外, 优化后的 GT2FLC

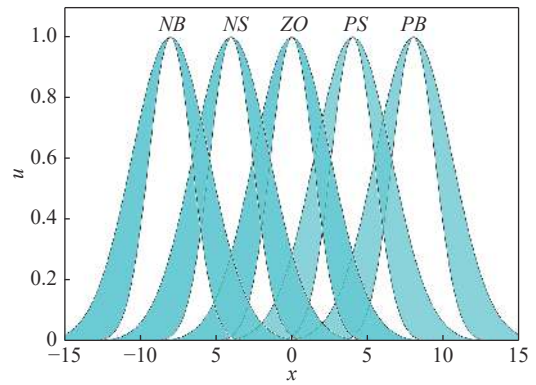


图 9 优化前 $\dot{\theta}_2$ 对应的 FOU

Fig.9 FOU for $\dot{\theta}_2$ without optimization

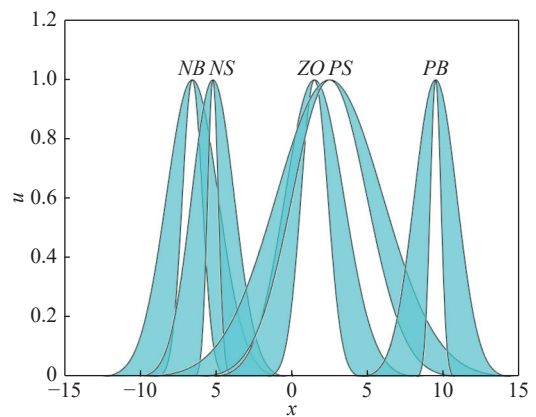


图 10 优化后 θ_1 对应的 FOU

Fig.10 The FOU for θ_1 with optimization

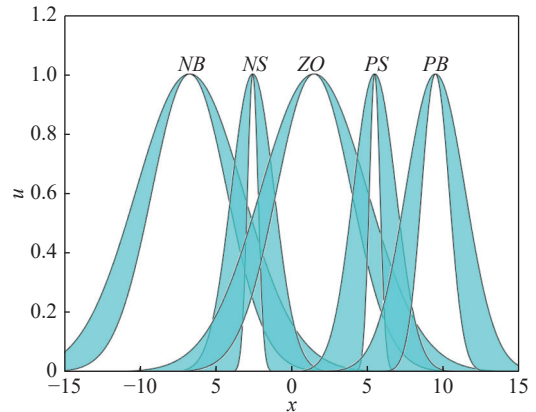
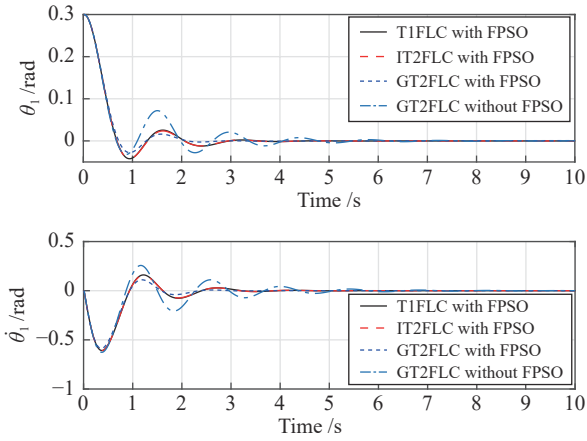
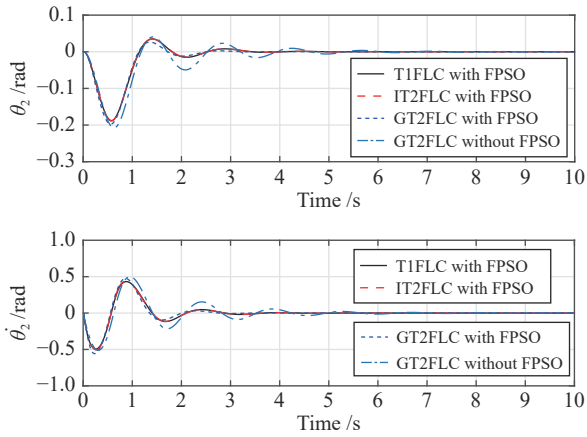
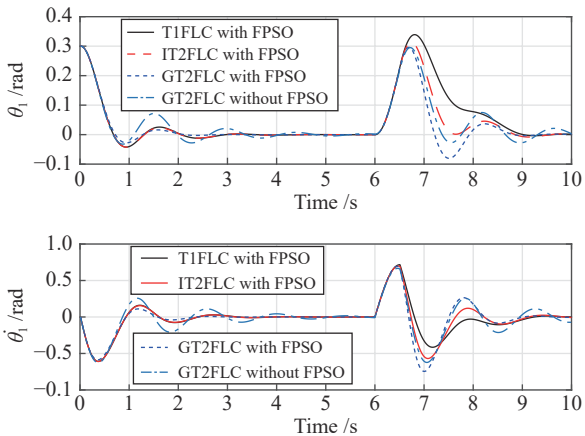
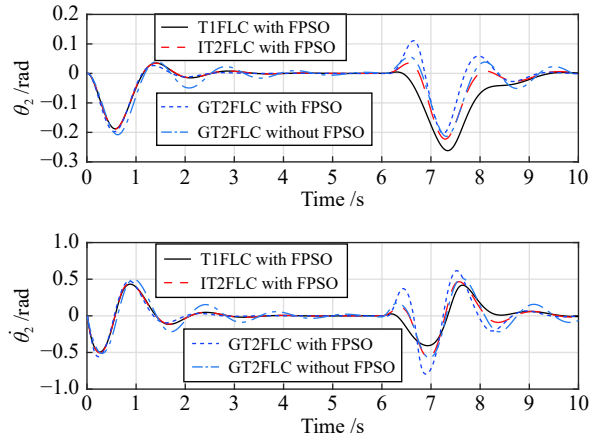


图 11 优化后 $\dot{\theta}_2$ 对应的 FOU

Fig.11 The FOU for $\dot{\theta}_2$ with optimization

也比同样经过优化的 IT2FLC 和 T1FLC 具有更好的性能.

接下来考虑在有干扰情况下, 将几种控制器的控制效果作对比. 当 PLIR 机器人达到平衡时, 遇到一个外部干扰 $u_1 = 30 \text{ N}$, 干扰持续 0.5 s. 图 14

图 12 无干扰下 θ_1 和 $\dot{\theta}_1$ 的响应Fig.12 Responses of θ_1 and $\dot{\theta}_1$ without disturbance图 13 无干扰下 θ_2 和 $\dot{\theta}_2$ 的响应Fig.13 Responses of θ_2 and $\dot{\theta}_2$ without disturbance图 14 有干扰下 θ_1 和 $\dot{\theta}_1$ 的响应Fig.14 Responses of θ_1 and $\dot{\theta}_1$ with disturbances图 15 有干扰下 θ_2 和 $\dot{\theta}_2$ 的响应Fig.15 Responses of θ_2 and $\dot{\theta}_2$ with disturbances

更好的处理不确定性的能力. TIFLC 在遇到干扰后回到平衡位置速度最慢.

为了验证 FPSO 算法的优越性, 我们用标准 PSO 算法和 FPSO 算法分别对几种控制器进行 30 次优化. 将两种优化算法优化后的控制器分别对两种情况下的 PLIR 机器人进行平衡控制, 因为 θ_1 代表 PLIR 与水平轴的夹角, 所以我们通过评价函数对 θ_1 进行计算来量化控制效果. 评价函数分别为平方误差积分 (Integral square error, ISE)、误差绝对值积分 (Integral absolute error, IAE)、时间乘以误差绝对值积分 (Integral time absolute error, ITAE)

$$\begin{aligned}
 ISE &= \int_0^{\infty} [\theta_1(t)]^2 dt \\
 IAE &= \int_0^{\infty} |\theta_1(t)| dt \\
 ITAE &= \int_0^{\infty} t |\theta_1(t)| dt \quad (41)
 \end{aligned}$$

评价指标越小表明控制器具有越好的性能. 表 4 为几种控制器在无干扰情况下的评价指标的均值, 表 5 为几种控制器在有外部干扰情况下的评价指标的均值. 可以看出, 在相同控制器之间进行对比, FPSO 优化后的评价指标要比标准 PSO 优化的评价指标更小.

6 结束语

本文针对 PLIR 平衡调节问题, 设计了一个 GT2-FLC, 并且通过 FPSO 算法优化了 GT2FLC 中的隶属函数参数. 仿真结果表明, GT2FLC 经过 FPSO 算法的优化, 使 PLIR 更快地到达稳定位置, 并且具有更小的超调. 通过与 IT2FLC 和 T1FLC 的对比表明, 本文所设计的 GT2FLC 有更好的控制效

和图 15 为在干扰下 PLIR 的四个状态的响应. 显然, 两个 GT2FLC 相比于 T1FLC 和 IT2FLC 具有

表 4 无干扰下平均评价指标

Table 4 Average evaluation index without disturbance

控制器	ISE	IAE	ITAE
T1FLC-PSO	0.02660	0.14820	0.08061
IT2FLC-PSO	0.02655	0.14238	0.06800
GT2FLC-PSO	0.02655	0.14290	0.06914
T1FLC-FPSO	0.02656	0.14534	0.07417
IT2FLC-FPSO	0.02653	0.14236	0.06732
GT2FLC-FPSO	0.02654	0.14127	0.06536

表 5 有干扰下平均评价指标

Table 5 Average evaluation index with disturbances

控制器	ISE	IAE	ITAE
T1FLC-PSO	0.07380	0.39140	1.76303
IT2FLC-PSO	0.06907	0.37776	1.69851
GT2FLC-PSO	0.06856	0.37537	1.68996
T1FLC-FPSO	0.07376	0.38991	1.75956
IT2FLC-FPSO	0.06875	0.37773	1.69275
GT2FLC-FPSO	0.06857	0.37414	1.68423

果. 在标准 PSO 与 FPSO 的对比中, 可以看出经过改进后的 FSO 具有更好寻优能力. 在 GT2FLC 中, 隶属函数对控制性能具有很大的影响, GT2FS 三维结构的隶属函数相比于 IT2FS 与 T1FS 有更多的自由度, 使得 GT2FLC 具有比 T1FLC 和 IT2FLC 更大潜力. 在未来的工作中, 主要是通过三维仿真平台对本文的算法进行仿真, 以验证本文所提算法的有效性.

References

- Dian S Y, Chen L, Hoang S, Pu M, Liu J Y. Dynamic balance control based on an adaptive gain-scheduled backstepping scheme for power-line inspection robots. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, **6**(1): 198–208
- Fu S Y, Zuo Q, Hou Z G, Liang Z Z, Ta, M, Jing F S, Fu X L. Unsupervised learning of categories from sets of partially matching image features for power line inspection robot. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, China: IEEE, 2008. 2596–2603
- Chen C, Wu G L, Wang Q, Hou X Z, Wang C J, Ye L J, et al. Design of the gripper for power lines inspection robot. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shenyang, China: IEEE, 2014. 3340–3344
- Katrasnik J, Pernus F, Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, **25**(1): 485–493
- Montambault S, Pouliot N. Design and validation of a mobile robot for power line inspection and maintenance. In: Proceedings of the 6th International Conference on Field and Service, Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2007.
- Gulzar M A, Kumar K, Javed M A, M Sharif. High-voltage transmission line inspection robot. In: Proceedings of the 2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Lahore, Pakistan: IEEE, 2018. 1–7
- Almutairi N B, Zribi M. On the sliding mode control of a ball on a beam system. *Nonlinear Dynamics*, 2010, **59**(1–2): 221
- Ghommam J, Saad M. Backstepping-based cooperative and adaptive tracking control design for a group of underactuated AUVs in horizontal plan. *International Journal of Control*, 2014, **87**(5): 1076–1093
- Li Y M, Liu L, Feng G. Robust adaptive output feedback control to a class of non-triangular stochastic nonlinear systems. *Automatica*, 2018, **89**: 325–332
- Chang X H. Robust nonfragile H_1 filtering of fuzzy systems with linear fractional parametric uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, **20**(6): 1001–1011
- Xie X P, Yue D, Peng C. Multi-instant observer design of discrete-time fuzzy systems: A ranking-based switching approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, **25**(5): 1281–1292
- Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-machine Studies*, 1975, **7**(1): 1–13
- Wang Yong-Fu, Ma Bing-Xin, Chai Tian-You, Zhang Xiao-Yu. Type-2 adaptive fuzzy modeling and oxygen excess ratio control for pemfc air supply system. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(5): 853–865
(王永富, 马冰心, 柴天佑, 张晓宇. PEMFC 空气供给系统的二型自适应模糊建模与过氧比控制. 自动化学报, 2019, **45**(5): 853–865)
- Tanaka K. *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications*. New York: Springer, 1997.
- Lee C C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller. II. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1990, **20**(2): 419–435
- Rai N, Rai B. Control of fuzzy logic based PV-battery hybrid system for stand-alone DC applications. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2018, **5**(2): 135–143
- Mamdani E H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1997, **26**(12): 1182–1191
- Berenji H R, Khedkar P. Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, **3**(5): 724–740
- Li X J, Yang G H. Fault detection in finite frequency domain for Takagi-Sugeno fuzzy systems with sensor faults. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, **44**(8): 1446–1458
- Zhao T, Huang M B, Dian S Y. Stability and stabilization of TS fuzzy systems with two additive time-varying delays. *Information Sciences*, 2019, **494**: 174–192
- Xie X P, Yue D, Peng C. Relaxed real-time scheduling stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems via an alterable-weights-based ranking switching mechanism. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, **26**(6): 3808–3819
- Chang X H, Liu Q, Wang Y M, Xiong J. Fuzzy peak-to-peak filtering for networked nonlinear systems with multipath data packet dropouts. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, **27**(3): 436–446
- Liu Y J, Gong M, Tong S, Chen C P, Li D J. Adaptive fuzzy output feedback control for a class of nonlinear systems with full state constraints. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, **26**(5): 2607–2617
- Mendel J M, John R I B. Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, **10**(2): 117–127

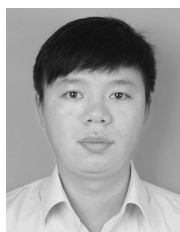
- 25 Liu F L. An efficient centroid type-reduction strategy for general type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*, 2008, **178**(9): 2224–2236
- 26 Zhai D Y, Mendel J M. Computing the centroid of a general type-2 fuzzy set by means of the centroid-flow algorithm. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, **19**(3): 401–422
- 27 Wagner C, Hagrass H. Toward general type-2 fuzzy logic systems based on zSlices. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2010, **18**(4): 637–660
- 28 Zhao T, Liu J H, Dian S Y. Finite-time control for interval type-2 fuzzy time-delay systems with norm-bounded uncertainties and limited communication capacity. *Information Sciences*, 2019, **483**: 153–173
- 29 Zhao T, Dian S Y. State feedback control for interval type-2 fuzzy systems with time-varying delay and unreliable communication links. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, **26**(2): 951–966
- 30 Mendel J M, Liu F L, Zhai D Y. α -plane representation for type-2 fuzzy sets: Theory and applications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, **17**(5): 1189–1207
- 31 Caraveo C, Valdez F, Castillo O. A new meta-heuristics of optimization with dynamic adaptation of parameters using type-2 fuzzy logic for trajectory control of a mobile robot. *Algorithms*, 2017, **10**(3): 85
- 32 Lu X G, Liu M, Liu J X. Design and optimization of interval type-2 fuzzy logic controller for delta parallel robot trajectory control. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2017, **19**(1): 190–206
- 33 Castillo O, Melin P. Optimization of type-2 fuzzy systems based on bio-inspired methods: A concise review. *Information Sciences*, 2012, **205**: 1–19
- 34 Zhao T, Wu Q, Li S C, Guo R, Dian S Y, Jia H R. Optimization design of general type-2 fuzzy logic controllers for an uncertain power-line inspection robot. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2019, **37**(2): 2203–2214
- 35 Castillo O, Amador-Angulo L. A generalized type-2 fuzzy logic approach for dynamic parameter adaptation in bee colony optimization applied to fuzzy controller design. *Information Sciences*, 2018, **460**: 476–496
- 36 Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan: IEEE, 1995. 39–43
- 37 Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In: Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, Seoul, South Korea: IEEE, 2001. 81–86
- 38 Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, **8**(3): 256–279
- 39 Shi Y H, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization. In: Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Washington, DC, USA: IEEE, 1999. 3: 1945–1950
- 40 Xin J B, Chen G M, Hai Y B. A particle swarm optimizer with multi-stage linearly-decreasing inertia weight. In: Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Sanya, China: IEEE, 2009. 505–508
- 41 Shi Y H, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization. In: Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, Seoul, South Korea: IEEE, 2001. 101–106
- 42 Craig J J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 1989.
- 43 Mendel J M. *Uncertain Rule-based Fuzzy Systems — Introduction and New Directions (2nd Edition)*. Springer International Publishing, 2017. 684
- 44 Wang L, Zheng S F, Wang X P, Fan L P. Fuzzy control of a double inverted pendulum based on information fusion. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing, Dalian, China: IEEE, 2010. 327–331



吴庆 四川大学控制工程专业硕士研究生。主要研究方向为模糊控制及其应用。

E-mail: 2017223035223@stu.scu.edu.cn

(WU Qing Master student in control engineering at Sichuan University. His research interest covers fuzzy control, intelligent control and their applications.)



赵涛 四川大学电气工程学院副教授。2010 年获得西南交通大学学士学位。2015 年获得西南交通大学博士学位。主要研究方向为二型模糊集理论和系统设计, 粗糙集和智能控制。本文通信作者。

E-mail: zhaotaozhaogang@126.com

(ZHAO Tao Associate professor at the College of Electrical Engineering, Sichuan University. He received his bachelor degree in mathematics and applied mathematics and his Ph.D. degree in systems engineering from Southwest Jiaotong University, in 2010 and 2015, respectively. His research interest covers type-2 fuzzy set theory and system design, rough sets, and intelligent control. Corresponding author of this paper.)



佃松宜 四川大学电气工程学院教授。分别于 1996 和 2002 年获得四川大学学士和硕士学位。2009 年获得日本东本大学博士学位。主要研究方向为先进控制理论和智能信号处理, 电力电子系统及其控制, 运动控制和机器人控制。

E-mail: scudiansy@scu.edu.cn

(DIAN Song-Yi Professor at the College of Electrical Engineering, Sichuan University. He received his bachelor and master degrees of control engineering from Sichuan University in 1996 and 2002, respectively. He received his Ph.D. degree in nanomechanics engineering from Tohoku University, Japan in 2009. His research interest covers advanced control methods and intelligent signal processing, power-electronics system and its control, motion control, and robotic control.)



郭 锐 国家电网山东电力公司教授级高级工程师. 分别于 2001, 2003 和 2007 年获得哈尔滨工业大学机械工程专业学士, 硕士和博士学位. 主要研究方向为先进控制理论和电力工业智能机器人.

E-mail: guoruihit@gmail.com

(**GUO Rui** Professor of engineering at the State Grid Shandong Electric Power Company. He received his bachelor, master, and Ph.D. degrees of mechanical engineering from Harbin Institute of Technology in 2001, 2003, and 2007, respectively. His research interest covers advanced control methods and intelligent robot for power industry.)



李胜川 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院教授级高级工程师. 1991 年毕业于哈尔滨工业大学. 主要研究方向为变电站设备的运行和维护以及人工智能在电网中的应用.

E-mail: lnsc@163.com

(**LI Sheng-Chuan** Professor of engineering at the Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.. He graduated from Harbin University of Technology in

1991. His research interest covers operation and maintenance of substation equipment and application of artificial intelligence in power grid.)



方红伟 四川大学控制理论与控制工程专业硕士研究生. 主要研究方向为模糊控制和自适应动态规划及其应用.

E-mail: weihongfang528@163.com

(**FANG Hong-Wei** Master student in control theory and control engineering at Sichuan University. His research interest covers fuzzy control, adaptive dynamic programming and their applications.)



韩吉霞 四川大学控制理论与控制工程专业硕士研究生. 主要研究方向为模糊控制和滑模控制及其应用.

E-mail: jixiahan@126.com

(**HAN Ji-Xia** Master student in control theory and control engineering at Sichuan University. Her research interest covers fuzzy control, sliding mode control and their applications.)