

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2023) 04-054-05 中图分类号: TP274

一种应用于智能体的指定时间故障重构观测器

Appointed-time Fault Reconstruction Observers for Intelligent Agent

★熊小雨, 朱亦橙 (国网杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100)
★马蔡国 (杭州凯达电力建设有限公司承装分公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 智能体运行过程中总会受到诸如电压振动、外力破坏、人为误操作等造成的系统性故障问题, 本文针对智能体系统中的执行机构故障, 提出了一种利用指定时间观测器重构故障界的方法, 在故障导数界已知的情况下, 可实现任意指定时间下达到大于故障绝对值的估计, 进一步通过理论分析论证了该方法的合理性, 并进行了仿真实验, 仿真结果证明了其有效性。

关键词: 执行机构故障; 故障重构; 指定时间; 观测器

Abstract: Given that there always exist hidden failures caused by voltage vibrations, external damages and mistake operations during the working process of the autonomous agent, this paper aims to construct an appointed-time fault reconstruction observer to estimate the bound of the fault. The proposed observer can guarantee the estimation value is greater than the actual fault bound, and it only requires knowing the bound of the fault signal derivative instead of the fault signal itself. Then, detailed theoretical proofs are provided to analyze the designed algorithms, and numerical simulations are carried out to verify the effectiveness of the theoretical analysis.

Key words: Actuator failure; Fault reconstruction; Appointed time; Observer

智能体的研究和开发^[1-3]是近年来控制领域的一大热点, 随着制造业的不断更新换代, 智能体的应用领域将会越来越广泛, 除了在军用价值上的体现, 它还可用于现代物流^[4]、科学勘探^[5]、危险加工^[6]、智能救援^[7]等场景中。智能体无需外部人员介入管理, 就可在复杂的环境下顺利完成预期任务或达成目标, 这就要求智能体系统具有强鲁棒性和高容错度。因此, 保证系统在存在故障的情况下依然能够稳定运行至关重要, 而这一前提是具有完善的故障诊断技术。在故障诊断领域中, 故障重构算法是关键一环, 可为后续设计智能体抗干扰以及

容错算法建立坚实基础, 对提升智能体应用效率和可靠性具有很大现实意义^[1]。

智能体的故障从发生的位置上可分为传感器故障、执行器故障以及传感器和执行器同时故障^[8], 其中执行器故障发生的频率较高, 集中体现在电路振动、执行机构遭遇外界阻力或反向运行、电路元器件异常等方面。有研究表明, 仅执行器上的单个故障就足以严重降低整个系统的性能, 甚至无法实现稳定^[9]。一个好的故障重构算法能够精确且及时地反映监控系统中的任何故障信息, 随后就可以触发有效的防御机制来消除故障对系统的影响。故障重构算法分为基于单信号和基于多信号与模型, 在故障诊断领域, 基于模型的重构算法目前已非常成熟丰富。早期有学者针对系统中无法直接获取的关键参数进行重构^[10], 可实现对故障的检测、隔离与识别, 并已集成为基于模型重构算法中的重要一类。早期还有学者提出使用观测器所构造的残差来进行故障重构^[11], 这种方法迄今为止仍被广泛地应用着, 并且已融入了许多其他控制算法, 包括自适应、滑模、鲁棒控制等等。其中, 自适应观测器主要针对与系统参数相关的故障, 比如执行机构出现乘性故障, 有学者就针对输入增益故障, 提出了一种结合残差与控制输入的自适应观测器^[12], 证明了在无穷时间上对故障真值的准确跟踪。对于滑模观测器, 有学者将其应用在四旋翼飞行器上, 不仅可对执行器故障信息进行重构, 还可对外界干扰进行估计, 并利用所有估计结果在控制器里进行补偿, 是一种具有高可靠性的容错控制方案^[13]。除了上述两种观测器, 目前用于重构故障较多的方法是扩维观测器^[14], 其原理是将需估计的故障信号与系统状态同时作为扩维

系统中的状态，并利用故障界的信息来分析重构误差。

上述观测器故障重构方案虽然被广泛采用，但仍存在一些缺陷，比如目前已有的研究较少讨论重构性能，大多是在无穷时间角度上分析重构的准确性，然而实际中，一般期望对故障信息的估计是需要有性能指标的，比如调节时间。此外，现有的故障重构研究都需要提前获知故障界的信息，然而实际中，这种信息是很难获取的，大多是凭借经验去猜测，并且有些故障重构方案只能收敛到一个界内，且此界和故障的界是相关的，可见现存的重构算法局限性仍较多。

受到上述所提缺陷的启发，本文针对执行器匹配性故障，提出了一种利用指定时间观测器重构故障界的方法，将需提前获得故障界信息的要求弱化为故障导数界已知的情况，这种情况更符合实际，因为可以更加准确地凭借经验判断出故障变化率的范围。此方法还可实现任意指定时间下而非无穷时间达到大于故障绝对值的估计，由于是估计故障的界，所以并不要求精确重构，只要求大于故障绝对值即可。在故障界重构出来的基础上，则可通过多种控制器补偿方法，比如滑模控制、鲁棒控制等来消除故障对系统的影响。

1 符号说明

本文将使用以下符号标记和定义： \mathbf{R}^n 表示 n 维实数向量， $\mathbf{R}^{n \times m}$ 表示 $n \times m$ 的实数矩阵， \mathbf{I}_n 表示 n 维单位矩阵。对于两个同维度向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} ， $\mathbf{x} \leq \mathbf{y}$ 表示 \mathbf{x} 中的所有元素依序小于等于 \mathbf{y} 中对应的元素。

2 问题描述

考虑一个在智能体建模中常用的带执行器匹配性故障可观测连续线性系统如式(1)：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 表示 n 个维度的系统状态， $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^p$ 表示 p 维控制输入， $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^q$ 表示 q 维输出， $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^p$ 代表满足假设1的 p 维匹配性故障， $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{(n \times n)}$ 是时不变状态矩阵， $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{(n \times p)}$ 是时不变输入矩阵， $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{(q \times n)}$ 是时不变输出矩阵。

假设1：存在一个 p 维向量 Π ，使得 $|\dot{f}(t)| \leq \Pi$ 。

本文的目标是要设计一个观测器能够在任意指定的时间下达到对故障界的估计，不要求精确重构，只要求大于故障绝对值即可。

注1：本文所采用的指定时间观测器已经被部分学者用于对常值故障或二阶导为0故障的重构^[15]，尽管效果良好，但对故障类型的要求较高，仅限于上述两种，而本文所提算法可用于匹配性故障中的任意类型，适用性好。

注2：为了书写方便，本文部分内容中将省略对自变量 t 的书写，例如用 \mathbf{x} 来表示 $\mathbf{x}(t)$ 。

3 主要结论

针对式(1)可观测线性系统，先建立两个基于故障估计的龙伯格观测器，如式(2)：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_i &= \mathbf{A}\mathbf{z}_i + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{H}_i(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{z}_i) + \mathbf{B}\mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i &= \mathbf{R}_i(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{z}_i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $i \in \{1, 2\}$ ， $\mathbf{H}_i \in \mathbf{R}^{(n \times q)}$ ， $\mathbf{R}_i \in \mathbf{R}^{(n \times q)}$ 表示需要设计的观测器残差增益矩阵， $\mathbf{z}_i \in \mathbf{R}^n$ 表示对系统状态的估计， $\mathbf{v}_i \in \mathbf{R}^p$ 表示对故障的估计。现今：

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{H}_1\mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} - \mathbf{H}_2\mathbf{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} -\mathbf{R}_1\mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{R}_2\mathbf{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{T}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{z} &= \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{T}} = \mathbf{T}\mathbf{B}$ 。于是式(2)可整理为式(4)：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{F}\mathbf{z} + \mathbf{H}\mathbf{y} + \mathbf{G}\mathbf{u} + \bar{\mathbf{G}}\mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{M}\mathbf{z} + \mathbf{R}\mathbf{y} \end{aligned} \quad (4)$$

设指定时间为 D ，则指定时间对状态以及故障值的估计为：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \hat{\mathbf{f}}_u(t) \end{bmatrix} &= \mathbf{K} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{z}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} - \exp^{QD} \begin{bmatrix} \mathbf{z}(t-D) \\ \mathbf{v}(t-D) \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. - \int_0^D \exp^{Q(D-s)} \mathbf{P}\Pi ds \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

和

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{f}_d(t) \end{bmatrix} = K \left\{ \begin{bmatrix} z(t) \\ v(t) \end{bmatrix} - \exp^{QD} \begin{bmatrix} z(t-D) \\ v(t-D) \end{bmatrix} + \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \right\} \quad (6)$$

其中, $\hat{f}_u(t)$ 表示故障真值的上界, $\hat{f}_d(t)$ 表示故障真值下界, \exp 表示指数函数, Q 矩阵和 P 矩阵的定义如下:

$$Q = \begin{bmatrix} F & \bar{G} \\ M & 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{T} \end{bmatrix}$$

定理1: 选取 H 和 R 以及 D , 使得满足: (1) Q 是负定的; (2) $\det[\hat{T}, \exp^{QD}\hat{T}] \neq 0$; 3) $K \exp^{QD}P$ 的倒数 p 行在 $t \in [0, D]$ 上恒为负, 于是式(5)与式(6)两个针对故障上下界估计器中的增益 $K = [I_{n+p}, 0_{n+p}][\hat{T}, \exp^{QD}\hat{T}]^{-1}$, 基于此增益 K , 在指定时间 D 后, $\hat{f}_u \geq f$ 且 $\hat{f}_d \leq f$ 。

证明: 在 $t \geq t_0$ 上, 分别对 $z - Tx$, $v - \bar{T}f$ 求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(z - Tx) &= Fz + Hy + Gu + \bar{G}v - TAx \\ &\quad - TBu - TBf \\ &= F(z - Tx) + \bar{G}v - TBf \\ &= F(z - Tx) + \bar{G}(v - \bar{T}f) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(v - \bar{T}f) &= Mz + Ry - \bar{T}\dot{f} \\ &= M(z - Tx) - \bar{T}\dot{f} \end{aligned} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)写成状态方程的形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} - \dot{Tx} \\ \dot{v} - \dot{\bar{T}f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & \bar{G} \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z - Tx \\ v - \bar{T}f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{T} \end{bmatrix} \dot{f} \quad (9)$$

$$= Q \begin{bmatrix} z - Tx \\ v - \bar{T}f \end{bmatrix} + P\dot{f}$$

将式(9)写成状态方程解的形式为:

$$\begin{bmatrix} z(t) - Tx(t) \\ v(t) - \bar{T}f(t) \end{bmatrix} = \exp^{Q(t-t_0)} \begin{bmatrix} z(t_0) - Tx(t_0) \\ v(t_0) - \bar{T}f(t_0) \end{bmatrix} + \int_{t_0}^t \exp^{Q(t-\tau)} P \dot{f}(\tau) d\tau \quad (10)$$

引入指定时间 D , 在 $t \geq t_0 + D$ 时, 上式(10)可表示为式(11):

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} z(t) - Tx(t) \\ v(t) - \bar{T}f(t) \end{bmatrix} \\ &= \exp^{QD} \begin{bmatrix} z(t-D) - Tx(t-D) \\ v(t-D) - \bar{T}f(t-D) \end{bmatrix} \\ &\quad + \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \dot{f}(s+t-D) ds \end{aligned} \quad (11)$$

于是:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{f}_u(t) \end{bmatrix} &= K \left\{ \begin{bmatrix} z(t) \\ v(t) \end{bmatrix} - \exp^{QD} \begin{bmatrix} z(t-D) \\ v(t-D) \end{bmatrix} - \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \right\} \\ &= K \begin{bmatrix} z(t) \\ v(t) \end{bmatrix} - K \exp^{QD} \begin{bmatrix} z(t-D) \\ v(t-D) \end{bmatrix} \\ &\quad - K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \end{aligned} \quad (12)$$

因为 $K\hat{T} = I_{n+p}$, $K \exp^{QD}\hat{T} = 0_{n+p}$, 则上式(12)可写为式(13):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{f}_u(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} z(t) \\ v(t) \end{bmatrix} - K\hat{T} \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} \\ &\quad - K \exp^{QD}\hat{T} \begin{bmatrix} z(t-D) \\ v(t-D) \end{bmatrix} \\ &\quad + K \exp^{QD}\hat{T} \begin{bmatrix} x(t-D) \\ f(t-D) \end{bmatrix} \\ &\quad - K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \\ &= \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + K \left\{ \begin{bmatrix} z(t) - Tx(t) \\ v(t) - \bar{T}f(t) \end{bmatrix} - \exp^{QD} \begin{bmatrix} z(t-D) - Tx(t-D) \\ v(t-D) - \bar{T}f(t-D) \end{bmatrix} \right\} \\ &\quad - K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \\ &= \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \dot{f}(s+t-D) ds \\ &\quad - K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P \Pi ds \\ &= \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P [\dot{f}(s+t-D) - \Pi] ds \end{aligned} \quad (13)$$

对于上式(12)中的最后一个等式, 由于在假设1里, $|\dot{f}(t)| \leq \Pi$, 故积分项里 $\dot{f}(s+t-D) - \Pi \leq 0$, 且根据定理1中的第三点, 若 $K \exp^{QD}P$ 的倒数 p 行在 $t \in [0, D]$ 上恒为负, 则 $K \int_0^D \exp^{Q(D-s)} P [\dot{f}(s+t-D) - \Pi] ds$ 此项结果的倒数 p 行将恒为正。所以, 当 $t \geq t_0 + D$ 时, $\hat{f}_u(t) \geq f(t)$ 。同理可得到 $\hat{f}_d(t) \leq f(t)$ 。至此, 定理1证毕。

4 仿真

为了验证本文所提指定时间观测器重构故障界方法的有效性, 我们使用Matlab进行了仿真实验。本节中, 我们将针对一个可观测的且带控制器匹配性干扰的线性系统进行仿真。该系统的系统参数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

选取指定时间 $D=2s$, 且设置观测器残差增益矩阵为:

$$H_1 = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}$$

在上述矩阵和参数的选取下, 可验证: (1) Q 矩阵是负定的; (2) 矩阵 $[\hat{T}, \exp^{QD}\hat{T}]$ 是满秩的, 即行列式 $|\hat{T}, \exp^{QD}\hat{T}| \neq 0$; (3) 在观测增益 K 按照 $K = [I_{n+p}, 0_{n+p}][\hat{T}, \exp^{QD}\hat{T}]^{-1}$ 解算下, 绘制 $K\exp^{QD}P$ 的倒数两行在 $t \in [0, D]$ 的变化曲线, 如图1所示。

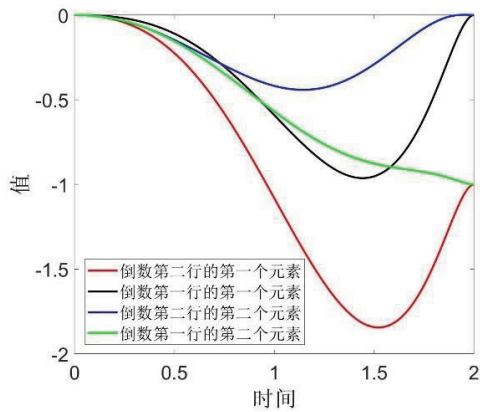


图1 $K\exp^{QD}P$ 的倒数两行所有元素在 $t \in [0, D]$ 上的变化曲线

在图1中, 可明显得知 $K\exp^{QD}P$ 的倒数两行在 $t \in [0, D]$ 上是恒为负的。至此, 以上所有参数的选择可得定理1中的3个条件成立。

接着, 设置2维控制器匹配性故障为:

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(t) \\ 2\cos(t) \end{bmatrix}$$

根据式(5)、式(6), 得到对 $f(t)$ 上下界的估计

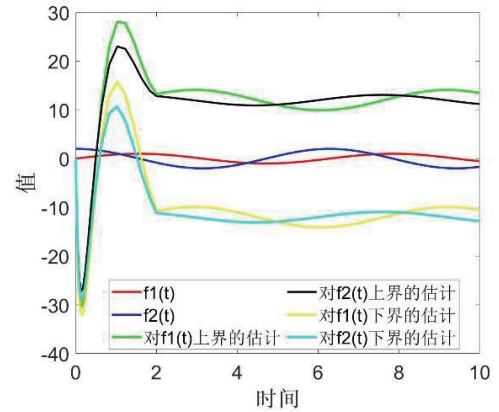


图2 应用式(5)、(6)后对第一组故障 f 界的估计曲线如图2所示。

为了更好地说明本文所提方法的有效性, 我们另外设置了一组故障为:

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5/(t+1) \\ 10\exp^{-t} \end{bmatrix}$$

同样根据式(5)、式(6)得到对 $f(t)$ 上下界的估计如图3所示。

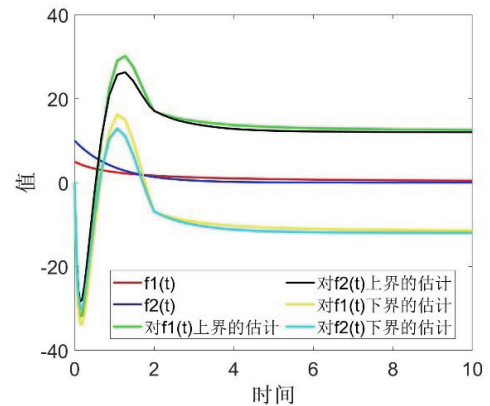


图3 应用式(5)、(6)后对另一组故障 f 界的估计曲线

根据图2和图3, 在指定时间2秒后, 都成功估计出了故障的界, 验证了本文所提指定时间观测器重构故障界的方法确实是有效可行的。

5 结论

本文针对智能体系统运行过程中总会受到的执行

机构匹配性故障问题, 提出了一种利用指定时间观测器重构故障界的方法, 在故障导数界已知的情况下, 可实现任意指定时间下达到大于故障绝对值的估计, 并经过仿真实验验证了所提方法的合理性和有效性。

本文所提方法仍有一定的局限性: 第一, 尽管本文将提前获取故障界信息的要求弱化为故障导数界已知的情况, 但这依旧是和界相关的信息; 第二, 本文所提方法由于只要求最后结果大于故障绝对值即可, 因此具有一定的保守性。

综上, 在未来我们将进一步考虑完全不引入任何和界有关信息的情况, 并且对保守性进行分析。此外, 还将考虑在界已知的情况下如何实现指定时间精确重构故障的问题。 **AP**

作者简介:

熊小雨 (1989-), 男, 湖北荆州人, 中级工程师, 学士, 现就职于国网杭州市余杭区供电公司, 研究方向为配网带电作业技术、智能机器人。

朱亦橙 (1991-), 男, 浙江杭州人, 中级工程师, 学士, 现就职于国网杭州市余杭区供电公司, 研究方向为配网带电作业技术、智能机器人。

马蔡国 (1989-), 男, 湖北荆州人, 中级工程师, 学士, 现就职于杭州凯达电力建设有限公司承装分公司, 研究方向为输电线路技术。

参考文献:

- [1] 苏哲. 智能体中的故障诊断模型及优化算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [2] 汤金宝. 基于多智能体行为预测的智能体决策方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [3] 钟一禾. 基于非线性模型预测控制的智能体自动换道避障研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2020.
- [4] 唐先军, 李国臣, 陈俊超. 试析智能化的物流搬运AGV机器人[J]. 科技创新导报, 2020, 17 (04): 94 + 96.
- [5] 刘建林. 矿井勘探智能体多电机协调化测控建模探究[J]. 煤炭技术, 2017, 36 (08): 249 - 251.
- [6] Simone Kfer. 应用在钣金加工的AGV自动驾驶运输车[J]. 现代制造, 2021, (11): 30 + 32 - 33.
- [7] 钟诚怡, 张慧敏, 李鑫, 胡欣宇. 基于K60信标灯检测的野外搜救智能体设计[J]. 物联网技术, 2020, 10 (05): 86 - 88.
- [8] D. Zhang, G. Feng, Y. Shi, D. Srinivasan. Physical Safety and Cyber Security Analysis of Multi-Agent Systems: A Survey of Recent Advances[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2021, 8 (2): 319 - 333.
- [9] E. Semsar-Kazerooni, K. Khorasani. Team Consensus for a Network of Unmanned Vehicles in Presence of Actuator Faults[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010, 18 (5): 1155 - 1161.
- [10] R. Isermann. Fault Diagnosis Systems, An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [11] E. Y. Chow, A. S. Willsky. Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 1984, 29 (7): 603 - 614.
- [12] H. Wang, S. Daley. Actuator Fault Diagnosis: an Adaptive Observer-Based Technique[J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 1996, 41 (2): 1073 - 1078.
- [13] J. Zheng, P. Li. Fault Tolerant Control of Actuator Additive Fault for Quadrotor Based on Sliding Mode Observer[C]. 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2019, 5908 - 5913.
- [14] R. J. Patton, S. Klinkhieo. Actuator Fault Estimation and Compensation Based On an Augmented State Observer Approach. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference. 2009, 8482 - 8487.
- [15] K. S. Lee, T. G. Park. New Results on Fault Reconstruction Using a Finite-Time Converging Unknown Input Observer[J]. IET Control Theory & Applications. 2012, 6 (9): 1258 - 1265.