

11-20-2019

## Encoder Fault Detection and Fault Tolerant Control of 3D Stage Wire System Based on FDRE

Li Wei

1. *College of Electrical and Information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

Zhenfu Ge

1. *College of Electrical and Information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

Fuyuan Shen

1. *College of Electrical and Information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

Jianxing Gong

2. *Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Co., Ltd, Lanzhou 730050, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Encoder Fault Detection and Fault Tolerant Control of 3D Stage Wire System Based on FDRE

### Abstract

**Abstract:** Aimed at the problem of encoder fault of 3D stage wire system, combined with LADRC, two kinds of *fault tolerant control strategies* are presented based on *fault diagnosis reliability evaluation (FDRE)* to prevent the spread of fault effects in the system and causing accidents. Based on this, *the soft and hard smooth transition soft redundant switching mechanism* is designed. The simulation results show that the control strategy can ensure encoder fault detection in a timely and reliable manner, and effectively improve the safety and reliability of 3D stage wire system.

### Keywords

3D stage wire system, encoder fault, SPRT, FDRE, soft redundancy

### Recommended Citation

Li Wei, Ge Zhenfu, Shen Fuyuan, Gong Jianxing. Encoder Fault Detection and Fault Tolerant Control of 3D Stage Wire System Based on FDRE[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 740-749.

# 基于 FDRE 的 3D 威亚编码器故障检测与容错控制

李炜<sup>1</sup>, 葛振福<sup>1</sup>, 申富媛<sup>1</sup>, 龚建兴<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃工大舞台技术工程有限公司, 兰州 730050)

**摘要:** 针对 3D 威亚系统中角位移反馈元件编码器故障, 为防止故障影响在系统中蔓延导致事故发生, 以线性自抗扰控制(LADRC)构建的 3D 威亚系统为基础, 提出了两种基于故障诊断可靠性评价(Fault Diagnosis Reliability Evaluation, FDRE)的编码器故障软闭环容错控制策略, 并据此设计了软、硬平滑过渡的软冗余切换机制。仿真结果表明, 所提出的编码器故障容错策略, 可及时可靠地检测到编码器故障, 并能使 3D 威亚及时安全、平滑地进行软闭环容错运行, 有效地提高了 3D 舞台威亚系统的安全可靠性能。

**关键词:** 3D 舞台威亚; 编码器故障; SPRT; 故障诊断可靠性评价; 软冗余

中图分类号: TP29

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 04-0740-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0268

## Encoder Fault Detection and Fault Tolerant Control of 3D Stage Wire System Based on FDRE

Li Wei<sup>1</sup>, Ge Zhenfu<sup>1</sup>, Shen Fuyuan<sup>1</sup>, Gong Jianxing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu University of Technology Stage Technology Engineering Co., Ltd, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of encoder fault of 3D stage wire system, combined with LADRC, two kinds of *fault tolerant control strategies* are presented based on *fault diagnosis reliability evaluation (FDRE)* to prevent the spread of fault effects in the system and causing accidents. Based on this, *the soft and hard smooth transition soft redundant switching mechanism* is designed. The simulation results show that the control strategy can ensure encoder fault detection in a timely and reliable manner, and effectively improve the safety and reliability of 3D stage wire system.

**Keywords:** 3D stage wire system; encoder fault; SPRT; FDRE; soft redundancy

## 引言

随着技术的快速发展和人们对剧场演绎效果的更高追求, 3D 威亚在大型舞台表演及演唱会中开始崭露头角, 尤其是在高性能控制下, 灵活生动

及更具观赏性的展现形式, 使其在舞台表演中倍受青睐<sup>[1-2]</sup>。在 3D 威亚控制系统中, 编码器作为角位移信号反馈的传感器, 是确保系统高性能安全运行的核心部件, 亦是最易受外部干扰甚至发生故障的器件。一旦编码器发生故障, 故障产生的影响会通过反馈通道在系统中迅速蔓延, 它不仅会使威亚系统的控制性能下降, 还有可能造成严重的伤亡事故。因此, 对编码器故障进行实时诊断并容错, 是提高 3D 威亚安全可靠运行水平的重要途径<sup>[3]</sup>。

近 40 年来, 随着系统的日益复杂, 故障诊断



收稿日期: 2017-06-06 修回日期: 2017-09-04;  
基金项目: 国家自然科学基金(61364011), 甘肃省省  
青年科技基金(1610RJYA022);  
作者简介: 李炜(1963-), 女, 陕西西安, 硕士生,  
教授, 研究方向为故障诊断与容错控制、工业过程  
先进控制方向; 葛振福(1989-), 男, 山东莱芜, 硕  
士生, 研究方向为故障诊断与容错控制、工业过程  
先进控制方向。

<http://www.china-simulation.com>

与容错控制技术受到国内外学者的广泛关注,并取得了长足发展<sup>[4-9]</sup>。对于编码器的故障诊断也有了研究<sup>[10-12]</sup>,采用的方法包括基于模型的方法以及基于数据驱动的方法等。基于模型的方法虽然诊断速度较快,但需要精确的系统数学模型,而建立复杂系统的数学模型并非易事;基于数据驱动的方法虽无需模型,有更好的适用性及应用价值,但往往难以平衡故障诊断快速性与可靠性之间的关系,特别是针对诸如 3D 舞台威亚这类运动速度较高的系统。编码器作为 3D 舞台威亚的角位移反馈传感器,因此,一般传感器故障基于硬件冗余及软冗余的容错方法亦有可借鉴之处<sup>[13-15]</sup>。基于硬件冗余的容错有着较好的安全可靠性能,但系统成本相对较高;基于软冗余的容错方法,设计灵活、易实现且成本较低,但在复杂系统中,解析冗余或软冗余信息的获取又往往比较困难。

鉴于此,本文在采用线性自抗扰控制(LADRC)技术 3D 舞台威亚系统的基础上,针对编码器故障,采用了一种基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)与序贯概率比检测算法(SPRT)的编码器故障检测方法;为减小 SPRT 对微小故障的漏检影响以及传统二值式切换机制因故障检测不可靠导致的误切换及切换动态对系统的影响,提出了一种基于故障诊断可靠性评价(FDRE)的平滑切换机制;进而又通过对 3D 舞台威亚控制系统解析冗余的深度分析,给出了基于系统自身冗余信息及 LS-SVM 预测模型的软冗余容错策略;最后,对文中所提出的故障检测与容错控制策略进行详实的仿真研究。

## 1 3D 舞台威亚运动学原理及“抗扰范式”的建立

### 1.1 3D 舞台威亚运动学原理及协调同步策略

#### 1) 3D 舞台威亚运动学原理

3D 舞台威亚运动系统通常由 4 台伺服单点吊机及 1 套滑轮组构成。为便于建模分析,本文首先从 3D 舞台威亚系统整体工作空间的几何模型入手,建立其笛卡尔坐标系,具体如图 1 所示。

图 1 中,  $A_i(i=1\sim 4)$  分别为 3D 威亚系统在舞台空间中的四个定滑轮顶点,考虑定滑轮在整体系统中体积较小,本文将四个定滑轮看作四个点;  $M_i(i=1\sim 4)$  分别为 4 台伺服电机,  $P$  点为演员或者道具。以舞台水平面  $B$  的中心  $O$  点作为笛卡尔坐标系的原点,  $L_i(i=1\sim 4)$  分别为演员位置点到各滑轮顶点之间的钢索绳长。

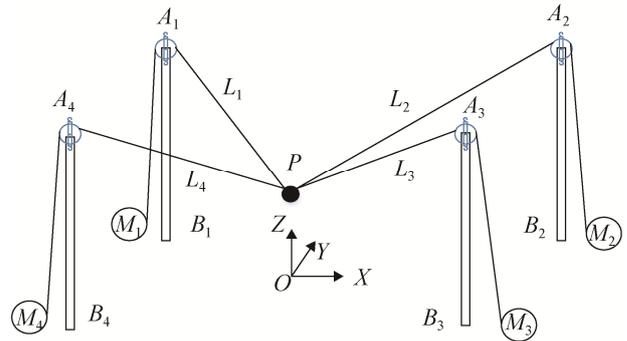


图 1 3D 舞台威亚系统运动原理图

Fig. 1 3D stage wire system motion diagram

假设舞台立体空间的长、宽、高分别  $B_1B_2 = a$ ,  $B_2B_3 = b$ ,  $A_1B_1 = h$ , 则 3D 威亚系统运动空间各顶点的位置坐标分别为:

$$\begin{aligned} A_1 &: \left(-\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, h\right), A_2 : \left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, h\right), A_3 : \left(\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, h\right), \\ A_4 &: \left(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, h\right). \end{aligned}$$

若演员位于被定义舞台空间的任意位置点  $P:(x, y, z)$ , 忽略钢绳的弹性延伸, 演员位置点到各滑轮组顶点之间钢索的长度可表示为:

$$\begin{cases} L_1(k) = \sqrt{(x_d(k) + a/2)^2 + (y_d(k) - b/2)^2 + (z_d(k) - h)^2} \\ L_2(k) = \sqrt{(x_d(k) - a/2)^2 + (y_d(k) - b/2)^2 + (z_d(k) - h)^2} \\ L_3(k) = \sqrt{(x_d(k) - a/2)^2 + (y_d(k) + b/2)^2 + (z_d(k) - h)^2} \\ L_4(k) = \sqrt{(x_d(k) + a/2)^2 + (y_d(k) + b/2)^2 + (z_d(k) - h)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$x_d(t), y_d(t), z_d(t)$  为预设空间姿态曲线对应的各分坐标曲线形式。

#### 2) 3D 舞台威亚软协调同步策略

3D 舞台威亚演绎的理想期盼是“随乐起舞”, 从控制的角度是指威亚应在规定的背景音乐时间内, 平稳精准地沿预设姿态轨迹行走全程。3D

威亚协调同步的思想可诠释为：根据预设空间姿态曲线的运动学方程，在线实时求取伺服电机角位移给定值，并据其通过硬同步协调运行。其核心可认为是一种从预设姿态曲线到 3D 威亚伺服电机角位移变化的线性或非线性映射计算。

由式(1)即可求得 3D 威亚钢索各实时绳长变化：  

$$\Delta L_i(k) = L_i(k) - L_{0i}, (i=1 \sim 4) \quad (2)$$

式中： $L_{0i}$  为演员位置点到各滑轮组顶点的初始绳长。

假设伺服单点吊机卷轴的半径为  $R$ ，若忽略卷轴上钢索层叠的情况，则卷轴转动一圈，钢索的绳长变化为：

$$\Delta l = 2\pi R \quad (3)$$

由式(2)和式(3)即可进一步求得 3D 威亚伺服电机实时角位移给定值：

$$\theta_{di}(k) = \Delta L_i(k) * 2\pi / \Delta l, (i=1 \sim 4) \quad (4)$$

分析式(1)~(4)可知，当威亚按照预设姿态曲线运转时，即当  $P$  点坐标变化时，4 条钢索绳长也随之变化，3D 威亚便会根据实时给定的角位移，通过对各伺服单点吊机的控制实现协调同步运转。

## 1.2 3D 舞台威亚单机“抗扰范式”的建立

伺服单点吊机是 3D 舞台威亚驱动系统的子单元，在同步旋转坐标系下，若采取  $i_d \equiv 0$  的控制策略，则其机电数学模型可表示为：

$$\ddot{\theta} = -\frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}x_2 + \frac{1.5n_p\phi_f}{J}u + d \quad (5)$$

式中： $\theta$  为伺服电机输出角位移； $J$  为转动惯量； $T_L$  为电机的负载转矩； $B$  为摩擦系数； $n_p$  为电机极对数； $\phi_f$  为转子磁动势； $d$  为电机在运行中受到的外部不确定扰动干扰。若将式(13)中易出现的参数摄动及外部干扰  $(-\frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}x_2 + d)$  用扩展状态变量  $f$  表示，且  $\dot{f}=h$ ，控制量增益  $\frac{1.5n_p\phi_f}{J}$  用  $b_0$

表示，则上述舞台威亚伺服机电系统可用“抗扰范式”<sup>[16-17]</sup>的理念描述为：

$$\ddot{\theta} = f + b_0u \quad (6)$$

式中：输出角位移与输入电压之间的关系  $\ddot{\theta} = b_0u$  为“抗扰范式”的“鱼骨”， $f$  则为“鱼刺”。式(6)

的建立为自抗扰控制相关策略的方便使用奠定了基础，因此，文本采用文献[17]设计的 LADRC 作为 3D 舞台威亚系统的运动控制策略。

## 2 3D 威亚系统编码器故障诊断与容错控制策略

3D 舞台威亚中有 4 台伺服单点吊机，故有 4 个位置编码器用以实时反馈伺服电机的角位移输出，当其中一个或多个编码器发生故障时，都会造成威亚系统单机的控制精度下降，影响系统的协调同步性能，甚至会引发安全事故。因此，实现编码器的故障诊断与容错控制是提高 3D 威亚的安全可靠性能的重要保障。

### 2.1 3D 舞台威亚编码器故障诊断与容错控制系统结构

鉴于 3D 舞台威亚 4 套伺服驱动系统的控制结构相同，且多个编码器同时发生故障的概率较小，因此，本文仅考虑其中一个编码器发生故障的情形，基于 LADRC 的 3D 舞台威亚编码器故障诊断与容错控制系统结构如图 2 所示。图中， $\theta_i$ 、 $\theta_j(i, j=1 \sim 4, i \neq j)$  为 3D 威亚各伺服单点吊机的输出角位移； $\theta_{di}(i=1 \sim 4)$  为据式(4)协调同步算法计算所得电机参考角位移输入，即 LADRC 的给定输入； $d_i(i=1 \sim 4)$  分别为舞台威亚控制系统第  $i$  台电机的外部扰动。 $\hat{\theta}_i(i=1 \sim 4)$  为 LS-SVM 预测模型对第  $i$  台电机  $\theta_i$  的输出预测值， $z_i$  为软闭环角位移反馈值， $r_i(i=1 \sim 4)$  为实际编码器输出与 LS-SVM 模型预测值产生的残差信息，系统编码器正常时， $r_i(k)$  为均值接近于零的高斯白噪声。

系统工作时，首先由 SPRT 故障检测环节依据  $r_i(k)$  残差信息来判断编码器是否发生故障，然后将故障诊断信息传递给 FDRE 模块，进行相应的故障状态评价，并据此驱动软冗余切换机制，由  $z_i$  信号以软闭环的形式实现编码器的平滑安全容错，确保 3D 舞台威亚的安全可靠运行，其中软冗余信号可为图 2 中 LS-SVM 模型的预测输出  $\hat{\theta}_i$ ，亦可为系统非故障编码器输出  $\theta_j$  的解析冗余值。

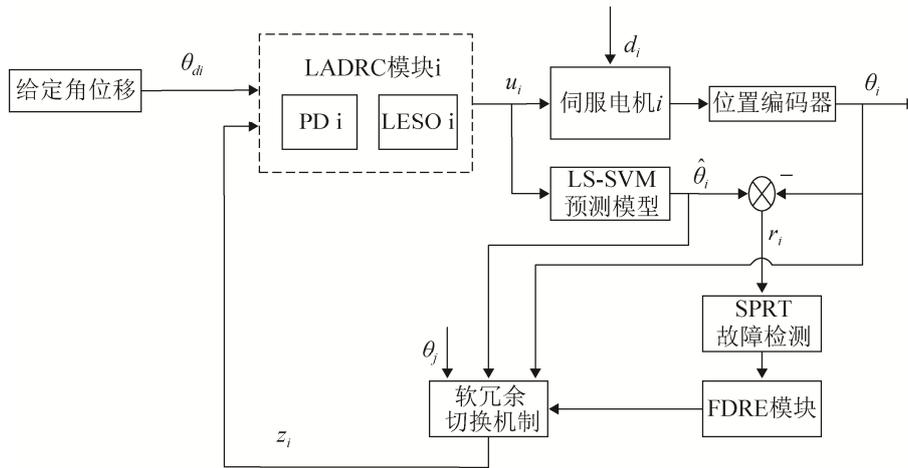


图 2 3D 舞台威亚编码器故障诊断与容错控制结构图

Fig. 2 Fault diagnosis and fault tolerant control structure of 3D wire encoder

## 2.2 基于 LS-SVM 预测模型与 SPRT 的 3D 舞台威亚编码器故障检测

### 1) 基于 LS-SVM 预测模型的残差生成

3D 舞台威亚系统是运动控制系统, 对实时性要求较高, 在众多数据驱动算法中, LS-SVM 求解速度较快, 在解决非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势, 并能够推广应用到函数拟合等其他机器学习问题中。因此针对 3D 舞台威亚系统中编码器故障, 本文选用 LS-SVM 作为系统预测模型的建模方法, 基于 3D 威亚正常运转历史数据 (LADRC 输出-编码器角位移输出) 建立 LS-SVM 预测模型, 其具体建模机理这里不作赘述。

结合图 2, 系统运行时, 基于 LS-SVM 数据驱动预测模型的残差生成原理可描述为: 由 LS-SVM 预测模型角位移预测输出值  $\hat{\theta}_i$  与实际编码器输出角位移信号  $\theta_i(k)$  作差而成, 即:

$$r_i(k) = \hat{\theta}_i(k) - \theta_i(k) \quad (7)$$

### 2) 基于 SPRT 的编码器故障检测

对于 3D 舞台威亚系统的编码器故障诊断, 既要考虑其故障检测的快速性, 还要兼顾故障检测的可靠性。滑动数据窗检验是常用的多样本检验方法, 窄窗少样本时故障检测较快, 但漏报率  $P_M$  和误报率  $P_F$  高; 宽窗多样本时故障诊断可靠性虽高, 但又会产生大时延。SPRT 方法是一种根据故障大

小而自动改变窗宽, 并通过预设的  $P_M$  和  $P_F$  来合理设置阈值的故障检验算法。该方法无需预先规定观测样本的数目, 只是在检验过程中不断增加观测数据, 待  $P_M$  和  $P_F$  都满足系统要求时停止检验。该方法不但能可靠地检测故障, 而且所需样本数较少, 因此本文选取 SPRT 作为 3D 舞台威亚系统的编码器故障检测方法, 具体原理如下:

假设  $k$  维残差序列  $r(k) = (r_1, r_2, \dots, r_k)^T$  服从正态分布  $N_k(\mathcal{G}, \sigma)$ , 分别假设检验模型  $H_0: r_k \sim N_k(0, 1)$  代表系统正常,  $H_1: r_k \sim N_k(\theta_0, 1)$ ,  $\theta_0 \neq 0$  代表系统发生故障, 则可设计判决阈值  $T(H_0)$  和  $T(H_1)$  如下式:

$$\begin{cases} T(H_0) = P_M / (1 - P_F) \\ T(H_1) = (1 - P_M) / P_F \end{cases} \quad (8)$$

建立  $k$  时刻的对数似然概率比判决函数  $\lambda(k)$ :

$$\lambda(k) = \sum_{j=1}^k \ln \frac{f(r(j), \theta_0)}{f(r(j), 0)} = \sum_{j=1}^k r(j)\theta_0 - \frac{k}{2}\theta_0^2 \quad (9)$$

式中:  $f(r(j), \theta)$  为  $r_k \sim N_k(\theta, \sigma)$  的概率分布密度函数。

进而推导出判决函数  $\lambda(k)$  的递推公式:

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + r(k)\theta_0 - \frac{1}{2}\theta_0^2 \quad (10)$$

由于系统正常运行时,  $\lambda(k)$  会形成一个较大的负值, 一旦故障产生, 必须积累一段正值以抵消正常运行时积累的负值  $\lambda(k)$ , 方可达到设计的阈值指示故障, 这便造成了编码器故障检测延迟, 为

消除这种正常时段内  $\lambda(k)$  产生的诊断延时, 采用归零法对  $\lambda(k)$  进行校正, 校正后的判决函数为:

$$\lambda^*(k) = \begin{cases} \lambda(k), & \lambda(k) > 0 \\ 0, & \lambda(k) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

则 SPRT 的判决规则为:

- ①  $\lambda^*(k) \leq \ln T(H_0)$ , 判决  $H_0$  为真, 系统编码器无故障;
- ②  $\lambda^*(k) \geq \ln T(H_1)$ , 判决  $H_1$  为真, 系统编码器发生故障;
- ③  $\ln T(H_0) \leq \lambda^*(k) \leq \ln T(H_1)$ , 增加数据继续检验。

### 2.3 基于 FDRE 的编码器故障容错策略

#### 1) FDRE 函数设计

针对编码器故障, 传统基于故障诊断结果的软冗余容错切换机制为软、硬信号的二值式切换, 这种切换方式因未考虑故障的大小和诊断结果的可靠性等因素, 易产生切换动态或误切换, 进而影响 3D 威亚系统的控制性能, 甚至导致容错失败引发更严重的事故。鉴于此, 本文提出一种基于 FDRE 的软冗余平滑切换机制, 通过对故障检测结果的可靠性进行定量分析, 并将其引入切换机制, 来进一步提高 3D 威亚编码器故障容错的安全可靠性。

考虑到编码器故障诊断的残差信息、漏报率及误报率, 均是决定故障诊断可靠性的重要因素, 结合前述 SPRT 故障检测方法, 设计如下 FDRE 函数:

$$R_F(k) = 1 - \exp\left(-a \left( \frac{\lambda^*(k) - \ln T(H_0)}{\ln T(H_1) - \lambda^*(k)} \right)\right) \quad (12)$$

式中:  $a$  为故障检测灵敏度。

这里通过巧妙地将残差信息的对数似然值  $\lambda^*(k)$  以及由漏报率和误报率所决定的故障检测阈值融入其中, 使得  $R_F(k)$  对故障发生及变化过程的检测有了可靠的量化评价信息。

进一步分析式(12)可以看出, 当 SPRT 判决函数值  $\lambda^*(k) \rightarrow \ln T(H_0)$  时, 故障诊断可靠性  $R_F(k) = 0$ , 此时表示系统编码器发生故障的可能性为 0; 当 SPRT 判决函数值  $\lambda^*(k) \rightarrow \ln T(H_1)$  时, 故障诊断可靠性  $R_F(k) = 1$ , 此时表示系统编码器

发生故障的可能性为 1; 当 SPRT 判决函数值  $\lambda^*(k)$  介于故障检测阈值  $(\ln T(H_0), \ln T(H_1))$  之间时, 故障诊断可靠性  $R_F(k) \in (0, 1)$ , 此时表示系统编码器发生故障的可能性为  $R_F(k)$ , 且 FDRE 函数使 SPRT 检测结果对出现在增加数据继续检验阶段的微小故障有着更明确的故障指示。

#### 2) 软冗余平滑切换机制设计

根据 FDRE 函数  $R_F(k)$  所提供的故障信息, 构造如下编码器故障诊断与软冗余容错切换机制:

$$z_i(k) = (1 - R_F(k))\theta_i(k) + R_F(k)s_i(k) \quad (13)$$

式中:  $s_i(k)$  为威亚编码器软冗余信号值。

由式(12)及(13)可知,  $R_F(k) \in [0, 1]$ , 且当  $R_F(k) = 1$  时, 表示编码器故障诊断可靠性为 100%, 此时容错机制为完全软闭环; 当  $R_F(k) = 0$  时, 表示编码器无故障, 此时容错机制为硬闭环; 当  $0 < R_F(k) < 1$  时, 此时可根据  $R_F(k)$  的大小, 取容错机制为软、硬编码器信号的融合闭环。

为了更清晰地表达基于 FDRE 的平滑切换机制的工作原理, 图 3 给出了编码器故障诊断及容错切换流程图。

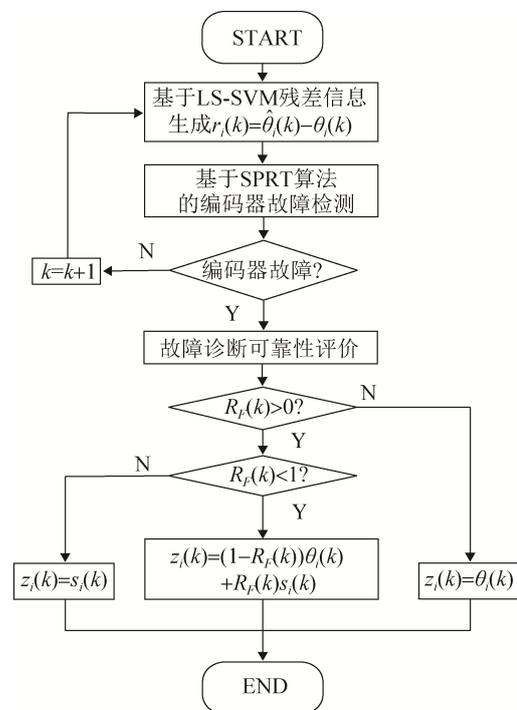


图 3 3D 舞台威亚编码器故障诊断与平滑切换机制流程图  
Fig. 3 Flow chart of fault diagnosis and smooth handoff mechanism of 3D wire encoder

结合式(13)及图 3 可以看出, 基于 FDRE 的软冗余切换机制, 可根据故障诊断可靠性的 高低, 自行调整软、硬信号在反馈量中的比例。一方面, 使威亚系统在编码器故障后也能获得正常系统实际输出的近似值, 从而遏制编码器故障信息产生的影响在闭环系统中传播; 另一方面, 软、硬平滑切换, 可有效地减小二值式切换产生的切换动态及误切换对系统造成的影响, 保证威亚控制系统的安全可靠性能。

### 3) 编码器软冗余策略

#### 策略 1: LS-SVM 预测模型软冗余信号

由 2.2 节可知, LS-SVM 预测模型对 3D 舞台威亚控制系统的实际角位移输出  $\theta_i$  有着较为精确的预测输出值  $\hat{\theta}_i$ , 二者存在明确的冗余关系, 因此,  $\hat{\theta}_i$  可作为故威亚系统故障编码器的软冗余信号。

#### 策略 2: 编码器输出之间的解析冗余

根据 3D 舞台威亚的运动学原理, 联立式(1)~(4)可以得到给定实时角位移信号  $\theta_{di}$  之间的冗余关系, 这里若以  $\theta_{d1}$  作为已知量, 则有:

$$\begin{cases} \theta_{d2} = (\sqrt{(\theta_{d1}R + L_{01})^2 - 2ax_d(t)} - L_{02}) / R \\ \theta_{d3} = (\sqrt{(\theta_{d1}R + L_{01})^2 - 2ax_d(t) + 2by_d(t)} - L_{03}) / R \\ \theta_{d4} = (\sqrt{(\theta_{d1}R + L_{01})^2 + 2by_d(t)} - L_{04}) / R \end{cases} \quad (14)$$

当威亚控制系统正常运行时, 系统输出角位移信号  $\theta_i$  可准确跟踪实时给定角位移信息  $\theta_{di}$ , 则给定实时角位移信号  $\theta_{di}$  之间的冗余关系可等效为舞台威亚 4 个编码器的软冗余关系, 这里仍以  $\theta_1$  作为已知量, 则有:

$$\begin{cases} \theta_2 = (\sqrt{(\theta_1R + L_{01})^2 - 2ax_d(t)} - L_{02}) / R \\ \theta_3 = (\sqrt{(\theta_1R + L_{01})^2 - 2ax_d(t) + 2by_d(t)} - L_{03}) / R \\ \theta_4 = (\sqrt{(\theta_1R + L_{01})^2 + 2by_d(t)} - L_{04}) / R \end{cases} \quad (15)$$

式(15)表示的是 1#编码器与 2#、3#、4#编码器之间的解析冗余关系, 也即当 2#、3#、4#编码器发生故障时, 均可用 1#编码器的解析冗余信号替换; 其它编码器之间的冗余关系均可根据式(1)~(4)类推得出, 此处不再赘述。

在明确 3D 舞台威亚冗余关系的前提下, 当第

$k$  时刻舞台威亚编码器发生故障时, 便可根据软冗余容错切换机制以及编码器的两种软冗余策略, 令  $s_i(k) = \hat{\theta}_i(k)$  或令  $s_i(k) = f_i(\theta_j(k))$  ( $f_i(\theta_j(k))$  表示软冗余策略 2 中所述非故障编码器输出的解析冗余关系), 从而通过设计的容错策略确保 3D 威亚系统正常或降低性能运行。

## 3 仿真研究

为验证文中所述编码器故障容错控制策略的有效性, 在 *simulink* 仿真平台上搭建了基于 LADRC 的 3D 舞台威亚的仿真系统, 对 3D 舞台威亚 2#编码器施加故障, 在第 5 s 时刻加入渐变微小故障(未超过故障检测阈值), 当第 7 s 时刻发生阶跃突变故障信息, 并在故障作用 3 s 后恢复正常, 其变化过程可描述为: 无故障→微小故障→大故障产生, 具体仿真内容与结果如下。

### 3.1 系统仿真建模与参数整定

#### 1) 舞台威亚空间参数及伺服电机相关参数

为方便仿真实验, 将某实际大型舞台按一定比例缩小, 舞台立体空间的长、宽、高分别取为  $a=20$  m,  $b=10$  m,  $h=10$  m。

假设威亚演员初始位置点  $P_0 = (0, 0, 5)$ , 背景音乐时段为 30 s, 以式(16)所示的变半径同心圆螺旋曲线运动。

$$\begin{cases} x_d(t) = 3e^{-0.05t} \cos(0.628t) \\ y_d(t) = 3e^{-0.05t} \sin(0.628t), t \in (0, 30] \\ z_d(t) = 5 - 0.167t \end{cases} \quad (16)$$

仿真实验中, 伺服电机的额定功率  $P_N = 7.5$  KW; 额定电压  $U_N = 220$  V; 额定转速  $T_N = 1000$  r/min; 转动惯量为  $J_0 = 0.36 \times 10^{-4}$  Kg \* m<sup>2</sup>; 转子磁动势  $\varphi_{f0} = 0.2$  A; 电机极对数  $n_p = 4$ 。

2) LADRC 参数整定与故障检测相关参数选取考虑 LADRC 的强鲁棒性, 对于 3D 威亚系统机电参数存在随机摄动的情形, 仍可将 4 组 LADRC 的参数值设定为一致。设 3D 威亚系统响

应时间为 0.2 s, “总扰”为 0~30 Hz 的扫频信号, 可整定相应带宽参数为  $\omega_c = 30$ ,  $\omega_0 = 50$ , 则扩张观测器与控制器参数分别为  $\beta_1 = 150$ ,  $\beta_2 = 7\ 500$ ,  $\beta_3 = 125\ 000$ ,  $k_p = 900$ ,  $k_d = 60$ 。

为确保威亚系统的安全性能, 取编码器故障诊断的误报率和漏报率为  $P_F = P_M = 0.01$ , 发生故障时的残差统计分布均值  $\theta_0 = 0.5786$ , 故障检测灵敏度  $a \in (0, 2]$ 。

### 3.2 3D 威亚编码器故障检测与容错仿真分析

#### 1) 3D 舞台威亚编码器故障检测仿真分析

系统工作时, 基于 LS-SVM 与 SPRT 的故障检测结果如图 4 所示。

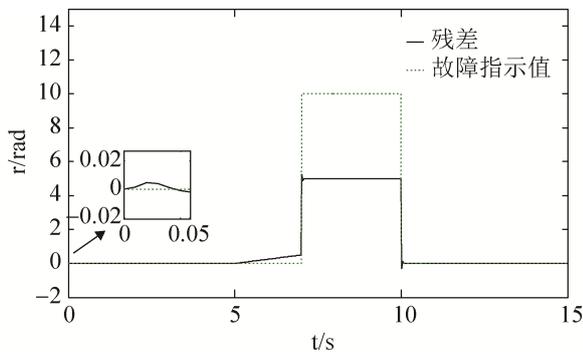


图 4 3D 舞台威亚编码器故障检测指示图  
Fig. 4 Fault detection indicator of 3D wire encoder

从图 4 可以看出, 3D 威亚在启动初期及 5~7 s 出现渐变微小故障阶段, 残差曲线出现小幅值波动, 但经 SPRT 算法判决威亚编码器并未发生故障, 此时故障指示值为 0。第 7 s 时刻对编码器施加阶跃故障后, 故障指示值立刻变为 10, 此时 SPRT 判决编码器出现故障; 而当第 10 s 时, 故障消失后, SPRT 判决编码器未出现故障, 故障指示值也迅速变为 0, 且在此后的一小段残差波动时间内, SPRT 判决编码器正常。这说明基于 LS-SVM 预测模型与 SPRT 的故障诊断方法, 能够快速可靠的检测 3D 舞台威亚的编码器故障, 但对微小故障有明显的漏检, 亦会影响威亚系统的控制性能。

#### 2) FDRE 函数仿真分析

对 3D 舞台威亚编码器施加图 4 所示故障信

息, 分别设定 6 种故障灵敏度因子进行对比分析, 其 FDRE 函数的变化趋势如图 5 所示。

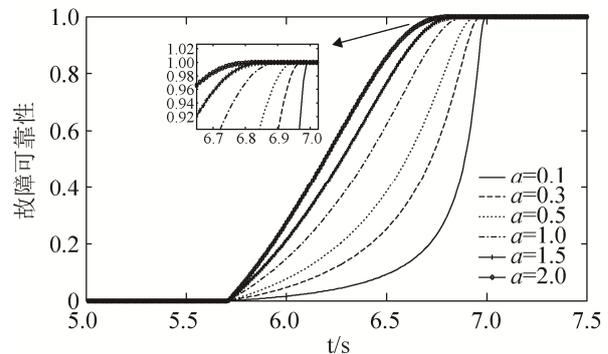


图 5 FDRE 函数仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of FDRE function

分析图 5 可以看出, 当威亚编码器无故障时, FDRE 函数值趋近于 0; 当编码器发生微小故障但又未超过故障阈值上限时, 随着故障持续, 6 种故障灵敏度因子下的故障可靠性评价函数值均作出相应指示; 当故障灵敏度因子较小时, 故障诊断可靠性前期变化较缓, 后期变化较快; 而当灵敏度因子较大时, 故障诊断可靠性的变化则恰恰相反; 在 7 s 时刻, 编码器发生大故障时, 其 FDRE 函数值趋近于 1。这充分说明: 一方面, 故障检测灵敏度因子  $a$  值的选取会影响故障诊断可靠性的评价, 进而影响系统编码器软冗余切换效果, 通过适当选取故障灵敏度因子  $a$  值, 基于 FDRE 的软冗余切换机制可实现 3D 舞台威亚编码器故障的平滑安全容错; 另一方面, 在编码器发生微小故障时, FDRE 已有故障指示, 进而将基于式(13)的软冗余切换机制引入容错系统, 以减弱因传统 SPRT 对微小故障的漏检所产生的影响。

#### 3) 3D 舞台威亚软冗余容错控制仿真分析

在第 5~10 s, 2#编码器仍发生前述故障, 分别以基于 2 种软冗余策略的角位移信号作为反馈值, 取故障灵敏度值  $a = 1.2$ , 并结合有/无 FDRE 的 2 种软冗余切换机制进行仿真, 其容错控制效果如图 6~7 所示。

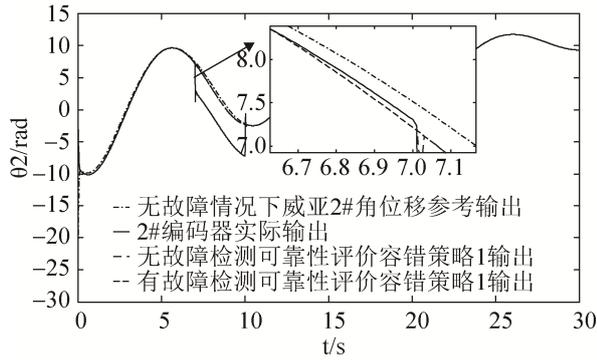


图 6 基于软冗余策略 1 的容错控制效果图  
Fig. 6 Effect chart of fault tolerant control based on soft redundancy strategy 1

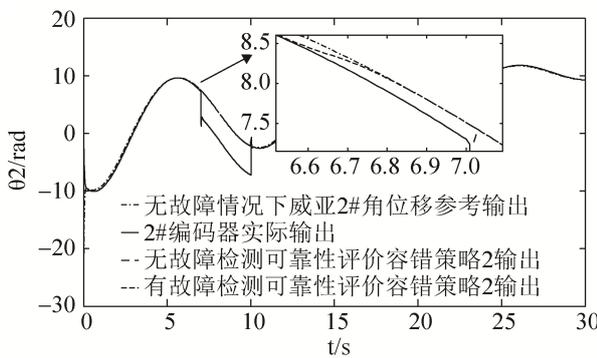


图 7 基于软冗余策略 2 的容错控制效果图  
Fig. 7 Effect chart of fault tolerant control based on soft redundancy strategy 2

在同一软冗余策略的切换时刻,若取两种切换机制下的最大角位移反馈信号误差值 $|\epsilon|_{\max}$ 作为评价指标:

$$|\epsilon|_{\max} = \max |z_2(k) - \theta_{2n}(k)| \quad (17)$$

式中:  $z_2(k)$ 、 $\theta_{2n}(k)$  分别为同一时刻基于容错策略的角位移反馈值以及无故障情况下的威亚 2#编码器输出值。则对比图 6 和图 7, 可得出表 1 所示的评价指标值。

表 1 两种软冗余容错策略在不同切换机制下的 $|\epsilon|_{\max}$   
Tab. 1  $|\epsilon|_{\max}$  for fault tolerance strategies of two kinds of soft redundancy

时间/s	5~10	
无/有 FDRE	无	有
容错策略 1/ rad	0.57	0.46
容错策略 2/ rad	0.34	0.035

结合图 6~7 及表 1 可以看出,在软冗余切换阶

段,引入基于 FDRE 的切换机制后,对于两种软冗余容错策略均能更加及时准确、平滑地完成切换,且在编码器发生微小故障时,就可更早地进行软冗余容错切换。究其原因:一是 SPRT 算法对威亚编码器故障诊断的快速可靠性能,确保系统在较短时间内正确诊断出编码器故障;二是基于 FDRE 的容错切换机制,能依据 FDRE 的量化指标  $R_F(k)$ ,可有效弥补传统 SPRT 对微小故障的漏检影响;并对软、硬角位移信号进行更为及时的自动调整与平滑过渡,有效地减小了容错切换动态及误切换对系统造成的影响,确保威亚系统的安全可靠运行。

#### 4) 3D 舞台威亚容错运行轨迹仿真分析

当第 5~10 s, 2#编码器发生故障时,在基于 FDRE 的基础上,两种软冗余容错策略的威亚运行轨迹如图 8~9 所示。

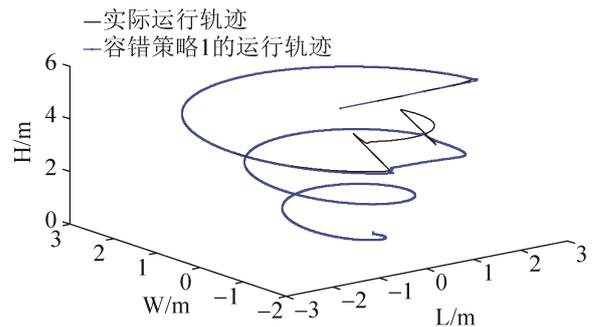


图 8 基于软冗余策略 1 的威亚运行轨迹控制图  
Fig. 8 Wire trajectory control chart based on soft redundancy strategy 1

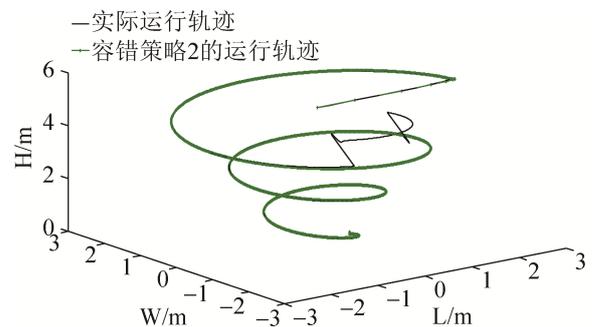


图 9 基于软冗余策略 2 的威亚运行轨迹控制图  
Fig. 9 Wire trajectory control chart based on soft redundancy strategy 2

在软冗余切换阶段,若取两种容错控制策略下的运行轨迹位置最大偏离值 $|\eta|_{\max}$ 作为威亚运行性

能评价指标:

$$|\eta|_{\max} = \max |\rho(k) - \rho_n(k)| \quad (18)$$

式中:  $\rho(k)$ 、 $\rho_n(k)$  分别为同一时刻基于容错策略下的威亚运行位置以及无故障情形下的威亚实际运行位置。

对比图 8 和图 9, 可得出表 2 所示的威亚运行  $|\eta|_{\max}$ 。

表 2 两种软冗余容错策略威亚运行轨迹  $|\eta|_{\max}$   
Tab. 2  $|\eta|_{\max}$  for fault tolerance strategies of two kinds of soft redundancy

时间/s	容错策略 1/m	容错策略 2/m
5~10	0.14	0.03

结合表 1~2 及图 6~9 可以看出, 在软冗余切换时刻, 基于容错策略 2 的威亚运行最大角位移误差值  $d_{\max}$  以及运行轨迹位置最大偏离值  $|\eta|_{\max}$  均相对较小, 威亚运行轨迹平滑无突变, 这说明在软冗余容错策略 2 下, 3D 舞台威亚的容错性能更优。其原因可归结为: 当系统受到参数摄动及外部扰动等“总扰”影响时, 基于历史数据所建立的 LS-SVM 模型预测值无法反映“总扰”的影响, 其准确性会随之降低, 从而造成了略大的误差; 而 3D 威亚各编码器虽独立工作, 但同步算法的软协调作用使得各编码器输出相互冗余, 冗余关系准确稳定、易获取且不受控制策略的约束。因此, 基于非故障编码器输出的解析软冗余策略, 较 LS-SVM 预测模型的软冗余策略有着更优的容错性能。

## 4 结论

本文针对 3D 舞台威亚系统中编码器故障问题, 结合 LADRC 下的协调同步策略及 SPRT 算法, 提出了两种基于 FDRE 的软冗余容错控制策略, 并进行了较为详尽系统仿真研究, 得出主要结论如下:

1) 基于“抗扰范式”理念设计的 3D 舞台威亚 LADRC 控制系统具有良好的控制性能, LS-SVM 预测模型与 SPRT 算法的有机结合能快速可靠地诊断 3D 威亚编码器故障, 为系统的容错控制提供了保障。

2) 基于 FDRE 的编码器软冗余平滑切换机制的引入, 能有效地弥补传统 SPRT 对编码器微小故障的漏检影响, 并减小传统软、硬信号二值式切换产生的切换动态或误切对系统的影响, 进一步提高容错的安全可靠性。

3) 在软协调同步方法下, 基于非故障编码器输出之间解析冗余的容错策略, 因不受系统控制方法的约束, 更贴近演绎实际, 有更高可靠的容错性能以及更高的工程参考价值。

## 参考文献:

- [1] 谢海岐, 黄学通, 盛敏, 等. 舞台 3D 飞行机构控制技术探讨[J]. 演艺科技, 2014(11): 32-35.  
Xie Haiqi, Huang Xuotong, Sheng Min, et al. Discuss about 3D Flight Mechanism Control Technology in Stage[J]. Entertainment Technology, 2014(11): 32-35.
- [2] 曾金桥. 一种四索牵引平动并联机器人的运动分析与控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 2-3.  
Zeng Jinqiao. Motion Analysis and Control of a Four-Cable-Driven Translational Parallel Robot[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 2-3.
- [3] 李炜, 李青朋, 毛海杰, 等. 基于 T-S 模糊神经网络模型的编码器故障软闭环容错控制方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(12): 3646-3650.  
Li Wei, Li Qingpeng, Mao Haijie, et al. Method of soft close-loop fault-tolerant control in encoder faults based on the T-S fuzzy neural network model[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(12): 3646-3650.
- [4] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-752.  
Zhou Donghua, Hu Yanyan. Fault Diagnosis Techniques for Dynamic Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 748-752.
- [5] 周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 161-171.  
Zhou Donghua, Shi Jiantao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 161-171.
- [6] Gao Zhiwei, Senior Member, Carlo Cecati, et al. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2015, 62(6): 3757-3767.

- [7] Gao Zhiwei, Carlo Cecati, Steven Ding. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (S0278-0046), 2015, 62(6): 3768-3774.
- [8] Jiang Jin, Xiang Yu. Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches[J]. *Annual Reviews in Control* (S1367-5788), 2012, 36: 60-72.
- [9] Youmin Zhang, Jin Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. *Annual Reviews in Control* (S1367-5788), 2008, 32: 229-252.
- [10] 董静, 万秋华, 赵长海, 等. 光电编码器故障诊断技术研究现状与展望[J]. *中国光电*, 2015, 8(5): 755-767.  
Dong Jing, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Current situation and prospect of fault diagnosis for photoelectric encoder[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 755-767.
- [11] 邓方, 陈杰. 基于数据特征及模糊逻辑的光电编码器故障诊断[J]. *中南大学学报*, 2011, 42(1): 876-882.  
Deng Fang, Chen Jie. Optical encoder fault diagnosis based on characteristics of data and fuzzy logic[J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42(1): 876-882.
- [12] 陈兴林, 刘杨, 吕恒毅. 采用小波处理的空间光电编码器智能故障诊断[J]. *华中科技大学学报*, 2010, 38(4): 79-82.  
Chen Xinglin, Liu Yang, Lü Hengyi. Wavelet processing-based intelligent fault diagnosis of spacial photoelectrical encoders[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2010, 38(4): 79-82.
- [13] 赵博, 李元春. 考虑多传感器故障的可重构机械臂主动取代分散容错控制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(2): 226-230.  
Zhao Bo, Li Yuanchun. Active substituting decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators with multi-sensor failures[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 226-230.
- [14] 于泳, 蒋生成, 王高林, 等. 基于状态观测器的感应电机速度传感器故障诊断及容错控制[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(8): 123-130.  
Yu Yong, Jiang Shengcheng, Wang Gaolin, et al. Fault Diagnosis and Tolerant Control for Speed Sensors Based on State Observers in Induction Motor Drives[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(8): 123-130.
- [15] M Sourander, M Vermasvuor, D Sauter. Fault tolerant control for a dearomatisation process[J]. *Journal of Process Control* (S0959-1524), 2009, 19(7): 1091-1102.
- [16] Huang Y, Xue W, Zhiqiang G, et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis[J]. *Journal of Systems Science & Mathematical Sciences* (S1000-0577), 2014, 53(4):1-5.
- [17] Z Gao. Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning. In: *Proceedings of the 2003 American Control Conference*[C]. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.