

## 舰船主动力装置故障隔离与参数估计方法\*

黄林,程刚,朱国情,陈于涛

(海军工程大学舰艇装备仿真技术研究所,湖北武汉 430033)

**摘要:**针对舰船主动力装置结构复杂、故障种类多和系统不确定性等故障诊断问题,提出采用基于双因果键合图模型的定量故障隔离与参数估计方法。根据系统传感器配置方案,建立双因果键合图模型,通过因果路径分析,推导得到系统解析冗余关系,并获得故障特征矩阵。建立系统线性分式变换键合图模型,开展故障仿真,将其与双因果键合图模型耦合,在 MATLAB/Simulink 环境中进行仿真试验,实现了舰船主动力装置的故障隔离与参数估计。结果表明:对双因果键合图模型因果路径分析,可以避免手动推导系统解析冗余关系的繁杂过程;基于其部件构造方程的分析可以有效实现系统故障隔离与参数估计,实时跟踪和预测故障状态。

**关键词:**舰船主动力装置;双因果键合图;故障隔离;参数估计

中图分类号:U664.3 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)02-176-09

## Fault isolation and parameter estimation of marine main power plant based on bicausal bond graphs

HUANG Lin, CHENG Gang, ZHU Guoqing, CHEN Yutao

(Research Institute of Equipment Simulation Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the inherent characteristics of complicated structure, multiple fault types and system uncertainty of marine main power plant, a quantitative algorithm for fault isolation and parameter estimation based on bicausal BG (bond graph) was developed. Based on sensor configuration scheme, the system bicausal BG model was built. By analyzing the model causal path, the system ARRs (analytical redundancy relations) were derived and the fault signature matrix was obtained. The LFT (linear fractional transformation) BG model was developed for fault simulation. Through coupling LFT and bicausal BG models, the fault isolation and parameter estimation of marine main power plant were realized and the effectiveness was validated by MATLAB/Simulink software. Results show that the bicausal BG helps to simplify ARRs deviation, and the fault isolation and parameter estimation can be effectively realized and the fault status can be tracked and predicted by analyzing the element constitutive equation of bicausal BG.

**Keywords:** marine main power plant; bicausal bond graph; fault isolation; parameter estimation

舰船主动力装置是舰船至关重要的组成部分,包含了主机、传动装置、推进轴系和推进器等。由于结构复杂且工作环境恶劣,因此故障率较高,但舰船机舱空间狭窄,管路系统复杂,发生故障后很难通过肉眼观察进行排查<sup>[1]</sup>。基于上述特点,针对舰船主动力装置的故障诊断与隔离问题一直是重要的研究课题。

基于数学模型的故障诊断技术是近年来发展较快的一种方法。通过建立一个能够准确描述系统动态变化过程的数学模型,在其基础上,推导系统的解析冗余关系 (Analytical Redundancy Relations, ARRs), 建立系统的故障特征矩阵 (Fault Signature Matrix, FSM), 再通过在线对系

统故障特征向量进行观测,可以实时地对系统进行故障诊断与隔离。基于解析模型故障诊断的准确性与实时性很大程度上取决于系统模型的质量。针对复杂系统建模与故障诊断问题,键合图理论以其规范化、系统化和支持多能域耦合建模的特点,为复杂系统的故障诊断提供了一个便捷、有效的方法。参数估计是在系统故障隔离基础之上,采用一定的数学算法对系统中的不确定性参数进行估计,掌握和分析系统的故障程度,这对于缓慢性故障的诊断具有非常重要的意义,可以应用于系统的健康状态评估,将事后维修随后逐渐发展到基于运行状态的状态维修,从而对主动力装置进行快速和准确的评估<sup>[2]</sup>。

\* 收稿日期:2018-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579242)

作者简介:黄林(1992—),男,江西萍乡人,讲师,博士,E-mail:787594765@qq.com

在国外, Samantaray 等<sup>[3]</sup>、Bouamama 等<sup>[4]</sup>、Merzouki 等<sup>[5]</sup>和 Loureiro 等<sup>[6]</sup>针对基于键合图理论的建模与故障诊断问题进行了大量深入的研究,其中最具代表性的为 Samantaray 等<sup>[7-8]</sup>针对锅炉蒸汽系统进行的键合图建模,以及基于该模型的故障诊断方法研究,充分证明了即使是对于蒸汽系统这样复杂、强非线性的系统,基于键合图理论的建模与故障诊断方法同样是适用的。在国内,樊久铭等<sup>[9]</sup>建立了液体火箭发动机的故障诊断键合图模型并进行了故障诊断的仿真验证。牛刚等<sup>[10]</sup>针对机车制动系统故障检测与隔离的问题,建立了系统键合图模型,提出了采用序贯概率比方法对系统残差进行跟踪判断,实现了部件的故障诊断与隔离。黄志武等<sup>[11]</sup>采用同样的方法,针对法维莱制动机系统,推导计算了系统解析冗余关系,得到了系统故障特征矩阵,并将该方法进行了实际应用。彭小辉等<sup>[12]</sup>针对航天器推进系统的时变特性,在系统键合图模型的基础上,采用了Z检验分析与解析冗余关系相结合的半定性故障隔离方法,实现了对部件的故障检测与隔离。

基于双因果键合图模型的故障诊断是在上述研究方法上的进一步创新,相比于文献[9-12]所采用的因果关系倒置诊断键合图模型(Diagnostic Bond Graph, DBG),双因果键合图可以帮助建模者以更灵活的方式进行系统因果关系的指定。一方面,通过对因果路径的分析,在推导系统ARRs时不需要形成具体的数学表达式,减少了大量的工作。另一方面,相比于传统的键合图模型,双因果键合图模型中的故障部件同时接收了系统流变量和势变量的信息,因此,根据部件的构造方程,可以实现部件的参数估计,实时地跟踪故障状态参数,具有重要的现实意义。

文献[13]以两水箱系统为例,研究了基于双因果键合图模型的故障诊断与隔离问题,文献[14]提出了基于双因果键合图模型参数估计方法,并以一小型的移动机器人为对象进行了方法的验证。

针对舰船主动力装置的故障隔离与参数估计

的问题,提出采用基于双因果键合图模型的定量故障隔离与参数估计方法。

## 1 系统分析与建模

键合图理论最早由 Paynter 教授在 20 世纪 60 年代初提出,后经推广,逐渐成为一种系统动力学图示建模方法<sup>[15]</sup>。

### 1.1 舰船主动力装置键合图建模

图 1 所示为某型舰主动力装置的键合图模型,该型舰采用的主机为 16PA6-280STC 涡轮增压柴油机,文献[16]建立了该型柴油机的键合图模型并进行了详细的试验验证,柴油机模型即采用该模型。飞轮是保证柴油机连续运转的非常重要的部件,采用惯性元件  $I_{fy}$  对其进行建模。主机通过离合器与齿轮箱接合,在不考虑接合和脱开操作的情况下,离合器可以采用  $C_{cul}$  和  $R_{cul}$  进行表示(文献[17]建立了更为详细的离合器键合图模型),分别为其扭转刚度和阻尼。变换器 TF 表示齿轮箱传动; $I_{pinion}$ ,  $I_{gear}$ ,  $R_{pinion}$ ,  $R_{gear}$  和  $C_{gear}$  分别表示齿轮箱小齿轮转动惯量、大齿轮转动惯量、小齿轮摩擦阻力、大齿轮摩擦阻力和扭转刚度<sup>[18]</sup>;  $C_{coup}$  和  $R_{coup}$  分别表示万向联轴器的扭转刚度和阻尼; $I_{shaft}$  和  $R_{shaft}$  分别表示轴系的转动惯量和摩擦阻力; $R_{cpp}$  为螺旋桨,  $I_{vessel}$  表示船体的质量。推力轴承连接万向联轴器,固定在船体上,用于传递柴油机功率和承受螺旋桨推力,其简化成了以航速为输入变量的阻力模块  $R_{thrust}$ 。模型中略去了部分对模型整体动态特性没有影响并且故障率非常低的部件,例如用于连接主机与齿轮箱的高弹联轴器、水润滑轴承等。

根据造船厂提供的“主推进装置控制监测系统测点表”,除去部分辅助系统以及温度或开关量测点,与本研究对象相关的传感器测点有(在图 1 所示的模型中进行了标明):柴油机转速传感器  $Df: N$ ,轴扭矩传感器  $De: \tau_{shaft}$ ,大齿轮和小齿轮转速传感器  $Df: N_{pinion}$  和  $D: N_{gear}$ ,轴转速传感器  $Df: N_{shaft}$ ,桨扭矩传感器  $De: \tau_{cpp}$ ,航速  $Df: vs$ ,油门齿杆位置传感器和柴油机功率传感器。

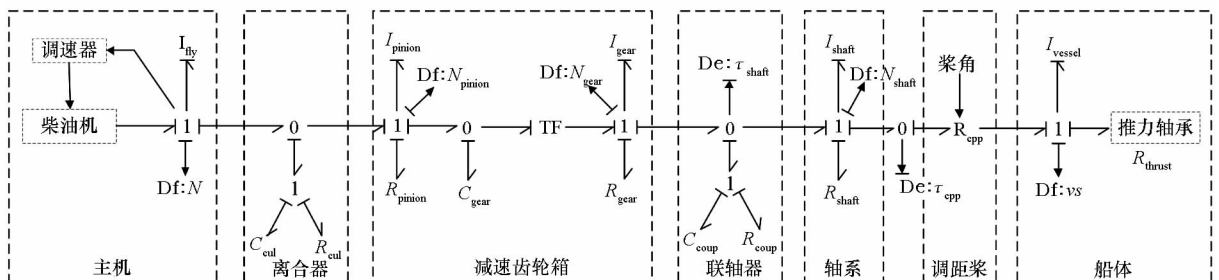


图 1 舰船主动力装置键合图模型

Fig. 1 Bond graph model of the marine main power plant

1.2 BG-LFT 故障建模

BG-LFT 故障建模<sup>[19]</sup>是在系统键合图模型的基础上,提供一种简洁明了的基于故障机理的图示化故障建模方法,采用该方法可以非常方便地进行系统设备、执行器和传感器等的故障模拟。

假设阻性元件  $R_n$  上作用有一个乘性故障,如图 2 所示,则其发生故障后输出的故障势变量大小为:

$$e_F = R_n(1 + F_R)f_R \quad (1)$$

式中,  $R_n$  为阻性元件在正常状态下的阻性值,  $F_R$  为该乘性故障的故障因子。

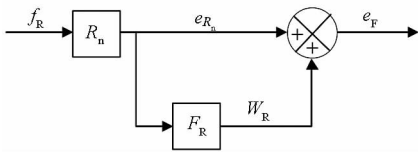


图 2 阻性元件乘性故障方块

Fig. 2 Block diagram of an R-element with a multiplicative fault

图 3 所示为图 2 对应的 BG-LFT 模型。其中,故障因子  $F_n$  前的负号“-”,是由 0 节点和 1 节点的计算规则所确定;  $De^* : z_{FR}$  表示该传感器为虚拟传感器,并不真实存在,其作用是解释模型的运算逻辑,使模型更容易被理解;可调势源  $MSe : W_R$  表示由于故障  $W_R$  的引入,而使得模型所产生的额外势变量的影响。

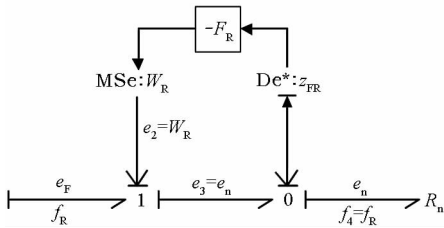


图 3 阻抗型 R 元件乘性故障的键合图 LFT 模型

Fig. 3 BG model LFT of an R-element in resistive causality with a multiplicative fault

1.3 系统双因果键合图模型

双因果键合图的概念最早由 Gawthrop 教授提出<sup>[20]</sup>,用于研究基于键合图模型的系统逆向动力学以及系统参数及状态估计等问题。双因果键合图的功率键和其对应的因果关系如图 4 所示,并引入了几个新的元件,分别为源-传感器(Source-Sensor, SS)、势放大器(Amplifier of Effort, AE)、流放放大器(Amplifier of Flow, AF)。双因果关系键的因果关系指定规则与传统键合图模型的因果关系指定规则的对比如图 4(a)和图 4(b)所示。



(a) 传统键合图因果关系

(a) Causality of traditional bond graph



(b) 双键合图因果关系

(b) Causality of bicausal bond graph

图 4 双因果键因果关系规则

Fig. 4 Information exchange in bicausal bonds

图 4(b)为双因果键因果关系的两种表示方法,功率键的两端各有半截因果划,半箭头表明了系统内能量流动的方向。在双因果键中,由于势变量和流变量的指定方向一致,因此,根据键合图理论中 0 节点和 1 节点的特性方程和计算法则,对于连接有双因果键的节点来说,双因果键必须是成对出现,而且只能有两条,普通功率键的数量则没有限制。

图 5 所示为舰船动力装置的双因果键合图模型,该模型等同于文献[9-12]的诊断键合图模型,SSf 和 SSe 作为信号源接收传感器的信号输入系统并进行系统残差的分析 and 诊断。ARR<sub>3</sub> 至 ARR<sub>9</sub> 在其对应的结点元件处已标明。文献[13]证明了不管选择哪一个元件作为因果关系的结点,尽管其生成的 FSM 不同,但其部件的故障诊断特性都是相同的。

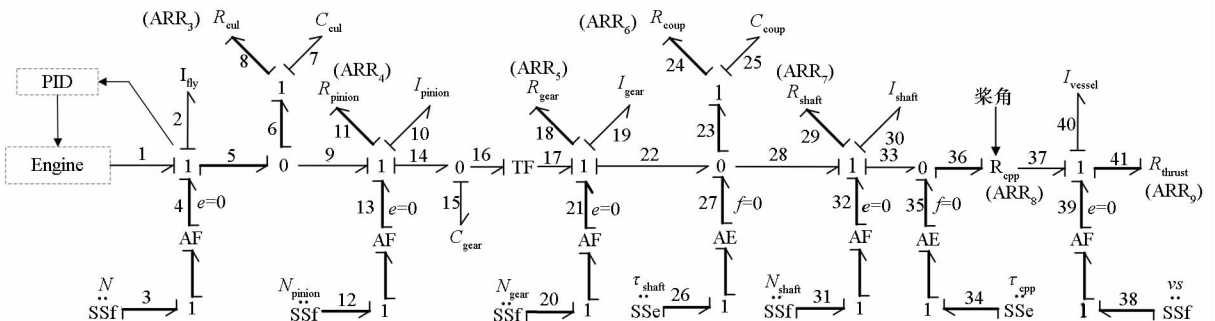


图 5 舰船动力装置双因果键合图模型

Fig. 5 Bicausal bond graph model of the marine main power plant

## 2 舰船主动力装置解析冗余关系分析

$$ARR_8 = ARR_8(R_{c_{pp}}) \quad (7)$$

$$ARR_9 = ARR_9(R_{c_{pp}}, I_{vessel}, R_{thrust}) \quad (8)$$

### 2.1 舰船主动力装置 ARR<sub>s</sub>

对于舰船主动力装置,ARR<sub>1</sub> 和 ARR<sub>2</sub> 可以直接从调速器的控制输出油门齿杆位置和柴油机功率输出获得,例如,假设实际装备中的调速器发生故障,其输出的油门齿杆位置与模型控制器的输出将不一致,则通过 ARR<sub>1</sub> 可以立即进行调速器故障的判断。

由于双因果键合图对于每一个 ARR 都定义了明确的结点元件,因此可以直接通过因果关系的推导得到 ARR 路径上所有的部件,而不需要推导具体的 ARR 数学表达式,节省了非常大的工作量。例如,根据图 5 所示的舰船主动力装置的双因果键合图模型,传感器 SSf: N 对应的结点元件为 R<sub>cul</sub>,其对应的因果路径关系为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SSf: } N \rightarrow f_3 \rightarrow f_4 \rightarrow f_5 \rightarrow f_6 \rightarrow f_7 \rightarrow C_{cul} \rightarrow e_7 \rightarrow e_8 \\ \text{Engine} \rightarrow e_5 \rightarrow e_6 \rightarrow e_8 \\ \text{SSf: } N \rightarrow f_3 \rightarrow f_4 \rightarrow f_2 \rightarrow I_{fly} \rightarrow e_2 \rightarrow e_3 \rightarrow e_6 \rightarrow e_8 \\ \text{SSf: } N \rightarrow f_3 \rightarrow f_4 \rightarrow f_5 \rightarrow f_6 \rightarrow f_8 \end{array} \right.$$

由上述因果路径可得,ARR<sub>3</sub> (R<sub>cul</sub>为对应的结点元件)包含的系统部件为:

$$ARR_3 = ARR_3(C_{cul}, R_{cul}, \text{Engine}, I_{fly}) \quad (2)$$

ARR 包含的部件越少,其所能进行故障诊断的针对性就越强。同理,根据模型因果关系,ARR<sub>4</sub> 至 ARR<sub>9</sub> 的表达式分别为:

$$ARR_4 = ARR_4(\text{Engine}, I_{fly}, R_{pinion}, I_{pinion}, \text{TF}, C_{gear}) \quad (3)$$

$$ARR_5 = ARR_5(\text{TF}, R_{gear}, I_{gear}, C_{gear}) \quad (4)$$

$$ARR_6 = ARR_6(C_{coup}, R_{coup}) \quad (5)$$

$$ARR_7 = ARR_7(R_{shaft}, I_{shaft}) \quad (6)$$

### 2.2 系统 FSM

根据上述系统 ARR<sub>s</sub> 的表达式,实际装备中的 9 个传感器分别对应 9 个 ARR<sub>s</sub>。因为,例如 I<sub>shaft</sub> 和 R<sub>shaft</sub> 都为轴系相关部件,并且系统部件的转动惯量一般不会发生变化,则其在 FSM 中可统一表示为轴系。I<sub>fly</sub> 也不需要再在 FSM 中考虑,TF 表示齿轮箱传动,因此,可以得到系统的 FSM 如表 1 所示。FSM 最右侧两列 M<sub>b</sub> 和 I<sub>b</sub> 分别表示故障可诊断性和可隔离性。从表 1 中可以看出,在现有的传感器布置方案下,系统中所有部件的故障都是可诊断并且可隔离的。

### 2.3 基于双因果键合图的参数估计方法

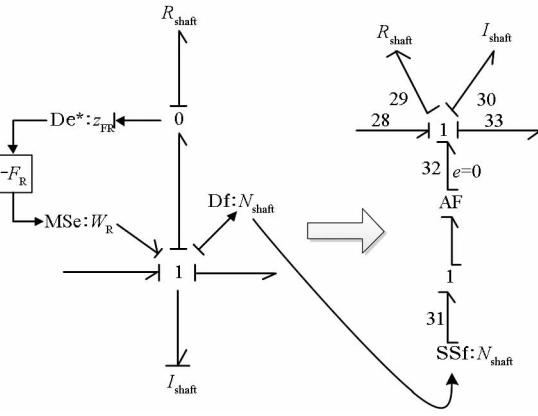
参数估计指的是对发生故障部件的故障参数进行估计和预测。通过一定的算法,结合 LFT 模型以及双因果键合图,可以实现系统故障的参数估计。根据故障类型的不同,参数估计方法可分为设备故障、执行器故障和传感器故障,分别对应键合图模型中的储能和耗能元件(C, R, I)、源元件(Se, Sf, MSe, MSf)和传感器(De, Df),虽然故障种类不同,但实现方法和原理是一致的,本文以设备参数故障为例,进行基于双因果键合图的参数估计方法研究。

假设舰船主动力装置经长时间服役后,轴系磨损加重,则装置中 R<sub>shaft</sub> 对应的摩擦阻力将增大,其 BG-LFT 模型如图 6(a)所示,其中 FR 为故障因子。图 6(b)所示为对应的以 R<sub>shaft</sub> 为结点元件的双因果键合图模型。

表 1 舰船主动力装置故障特征矩阵

Tab. 1 Fault signature matrix of the marine main power plant

部件	ARR <sub>1</sub>	ARR <sub>2</sub>	ARR <sub>3</sub>	ARR <sub>4</sub>	ARR <sub>5</sub>	ARR <sub>6</sub>	ARR <sub>7</sub>	ARR <sub>8</sub>	ARR <sub>9</sub>	M <sub>b</sub>	I <sub>b</sub>
调速器	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
主机	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
离合器	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
小齿轮	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
齿轮传动	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
大齿轮	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
联轴器	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
轴系	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
调距桨	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
推力轴承	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1



(a) BG-LFT 故障模型 (b) 双因果键合图模型  
(a) BG-LFT fault model (b) Bicausal bond graph model

图 6 阻性元件 R 的参数估计模型

Fig. 6 Fault estimation model of the R-element

在图 6(b) 中, 假设系统正常运行, 则根据 1 节点的系统解析冗余关系有:

$$r = e_{28} - e_{33} - R_{\text{shaft}} \cdot SSf - I_{\text{shaft}} \cdot \frac{dSSf}{dt} = 0 \quad (9)$$

BG-LFT 模型故障注入后,  $R_{\text{shaft}}$  元件发生故障, 轴系磨损量增大, 系统解析冗余关系为:

$$r_F = e_{28} - e_{33} - R_{\text{shaft}} \cdot SSf - I_{\text{shaft}} \cdot \frac{dSSf}{dt} + W_{FR} = 0 \quad (10)$$

假设阻性元件  $R_{\text{shaft}}$  的故障是可隔离的, 则可以通过双因果键合图的计算法则以及系统残差与故障系统之间的关系对系统发生的故障大小进行估计。根据双因果键合图因果关系计算法则, 由 BG-LFT 模型中的势源和传感器的因果关系推导, 可以得到发生在阻性元件  $R_{\text{shaft}}$  的故障值为:

$$W_{FR} = - \left( e_{28} - e_{33} - R_{\text{shaft}} \cdot SSf - I_{\text{shaft}} \cdot \frac{dSSf}{dt} \right) \quad (11)$$

$$z_{FR} = R \cdot SSf \quad (12)$$

$$F_R = - \frac{W_{FR}}{z_{FR}} = \frac{e_{28} - e_{33} - R_{\text{shaft}} \cdot SSf - I_{\text{shaft}} \cdot \frac{dSSf}{dt}}{R \cdot SSf} \quad (13)$$

### 3 仿真验证

#### 3.1 系统模型与双因果诊断键合图模型的耦合

图 7 所示为舰船动力装置系统模型与双因果诊断键合图模型的耦合模型。为了验证本文理论

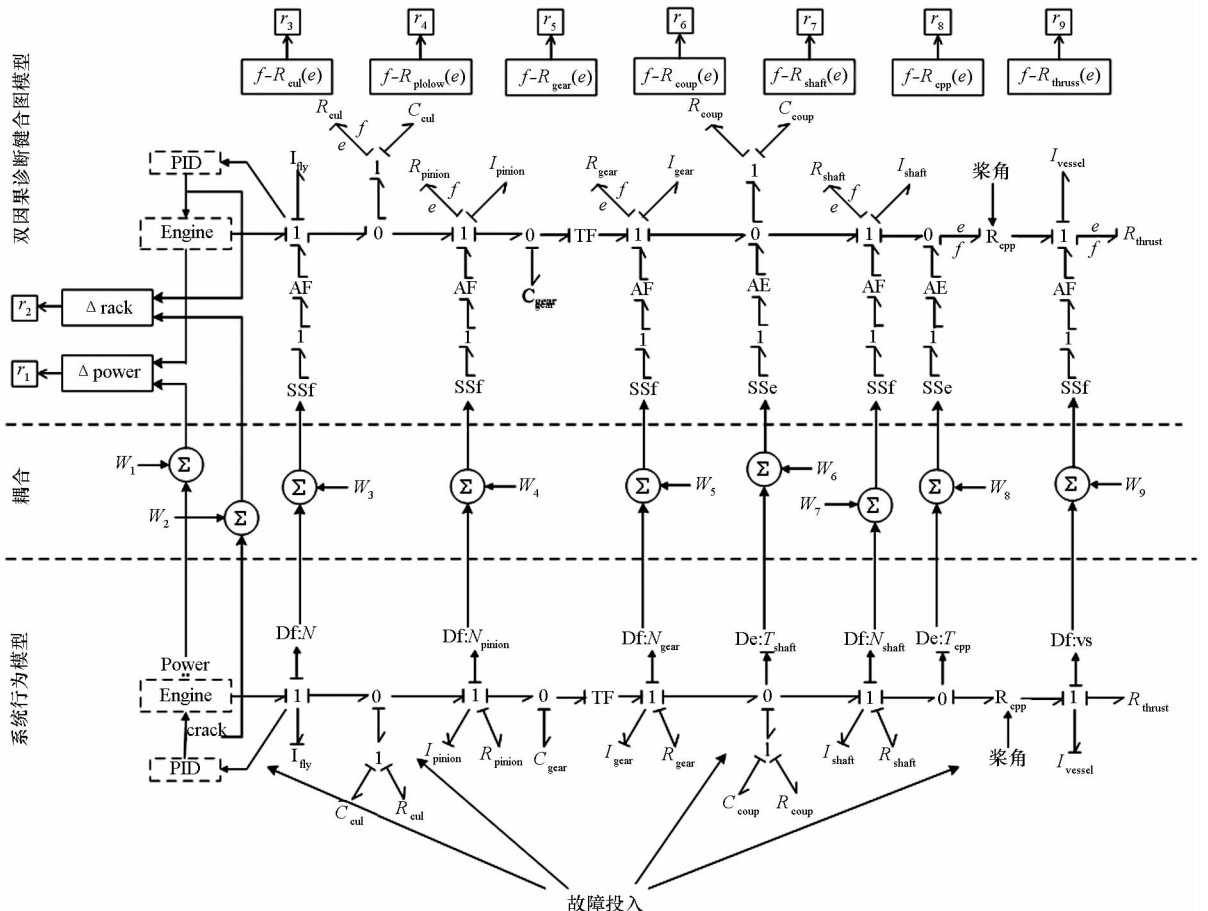


图 7 舰船动力装置故障诊断耦合模型

Fig. 7 Coupling model of the marine main power plant

方法的正确性,将系统的键合图模型与诊断键合图模型连接,用系统的键合图模型模拟实际系统,在系统中注入相应故障,通过诊断键合图模型进行检测。为了模拟真实环境噪声工况下传感器测量量的不确定性,所有由传感器采集的系统模型信号都加入了相应的噪声污染,噪声信号采用 MATLAB/Simulink 中白噪音,噪声的振幅为传感器输出的 0.1%,平均值为 0。图 7 中  $W_1$  至  $W_9$  为噪声信号与传感器信号的叠加输出。仿真试验中,由于 DBG 模型多采用微分计算,为消除传感器输出信号在噪声干扰下由于微分计算而产生的异常阶跃,采用算术平均滤波法,对传感器输出信号和残差信号进行了五点平滑降噪处理。在实际故障诊断的应用中,只需要将实际系统代替图 7 中的系统行为模型即可。模型中,  $r_1$  至  $r_9$  分别对应系统的 9 个残差。建立好模型后,建模者可以任意地对动力装置中的任何部件进行故障仿真试验,

从而可以得到大量的离线故障仿真数据,这对于动力装置的后续健康状态检测具有非常大的帮助。

### 3.2 MATLAB 仿真试验与结果分析

以比较典型的舰船长时间服役后,舰船主动力装置柴油机效率下降和轴系磨损加重为例,开展故障仿真,并进行故障诊断与隔离。

#### 3.2.1 柴油机效率下降故障

仿真时间设置为 1000 s,在第 500 s 的时候注入柴油机效率下降故障,使柴油机输出功率从 100% 降低至 95%,图 8 所示为双因果键合图 DBG 模型  $ARR_1$  至  $ARR_9$  的动态响应。从  $ARR$  的响应中可以很明显地看出,  $ARR_2$ ,  $ARR_3$  和  $ARR_4$  对该故障是敏感的,其值非常明显地偏离了 0 的位置,其余残差均在 0 左右波动。  $ARR_9$  在第 500 s 的时候有一小波动,产生该现象的原因是柴油机输出功率的下降导致螺旋桨推力下降,而因为船体满载质量比较大,惯性也大,因此

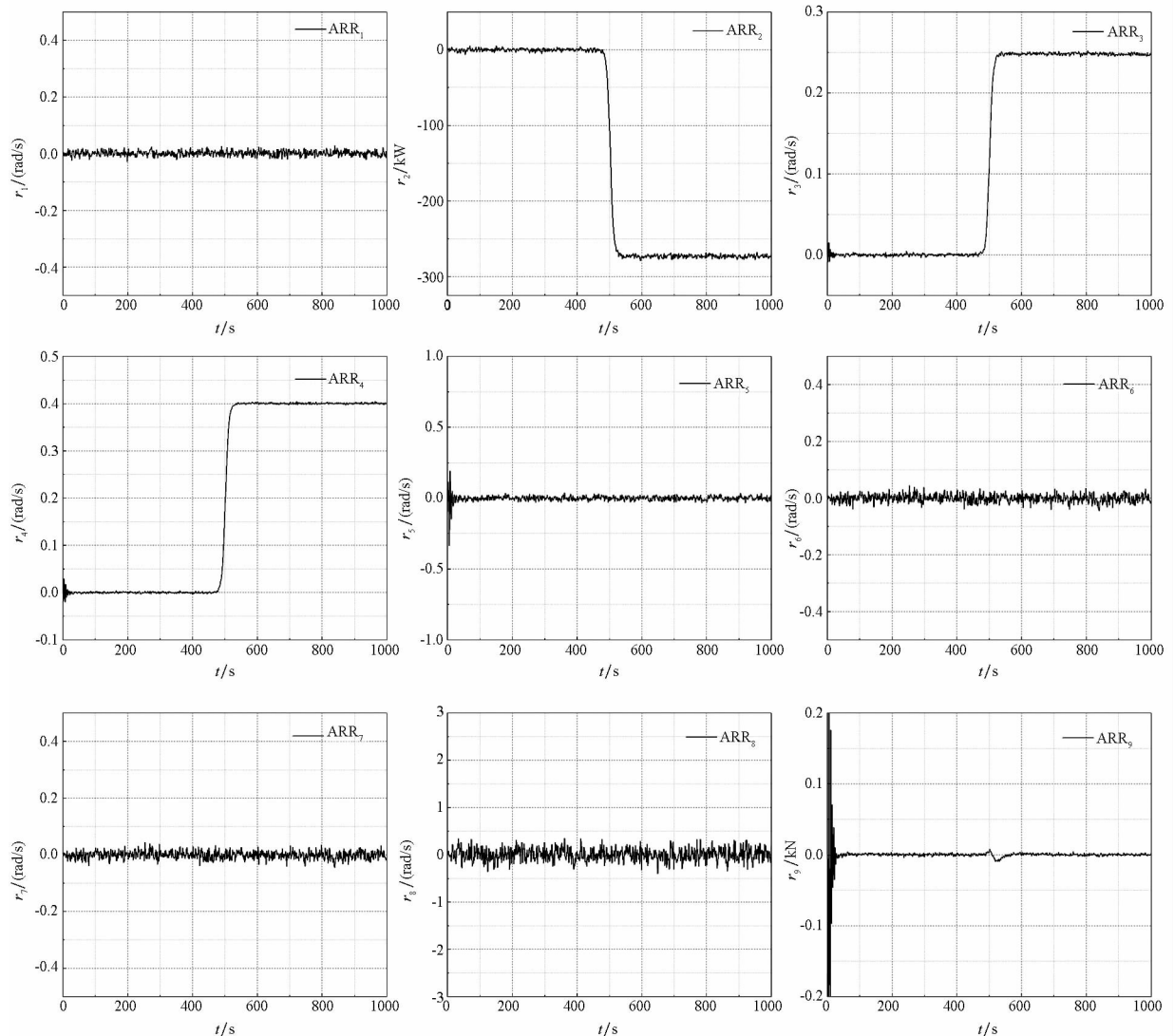


图 8 柴油机效率下降故障残差响应

Fig. 8 Residuals response when engine efficiency decline

航速下降得比较慢,待系统重新稳定后,ARR<sub>9</sub>恢复至 0。通过以上分析可以得到故障特征向量 [0 1 1 1 0 0 0 0],通过与表 1 的 FSM 进行对比,其柴油机所对应的故障特征向量是相匹配的并且是唯一的,因此可以知道是主动力装置中的柴油机发生了故障,该故障是可隔离的。

### 3.2.2 轴系磨损增加

设置轴系磨损故障因子为 0.172,使磨损值

正常的 1450 Nms/rad 增加至 1700 Nms/rad,图 9 所示为在故障下系统双因果键合图 DBG 模型 ARR<sub>s</sub> 的动态响应。从 ARR<sub>s</sub> 的响应中可以很明显的看出,只有 ARR<sub>7</sub> 对该故障是敏感的,其值非常明显的偏离了 0 的位置,其余残差均在 0 左右波动。通过以上分析可以得到故障特征向量 [0 0 0 0 0 0 1 0 0],从而检测出系统中的轴系发生了故障,实现了该故障的诊断与隔离,验证了本方法的正确性。

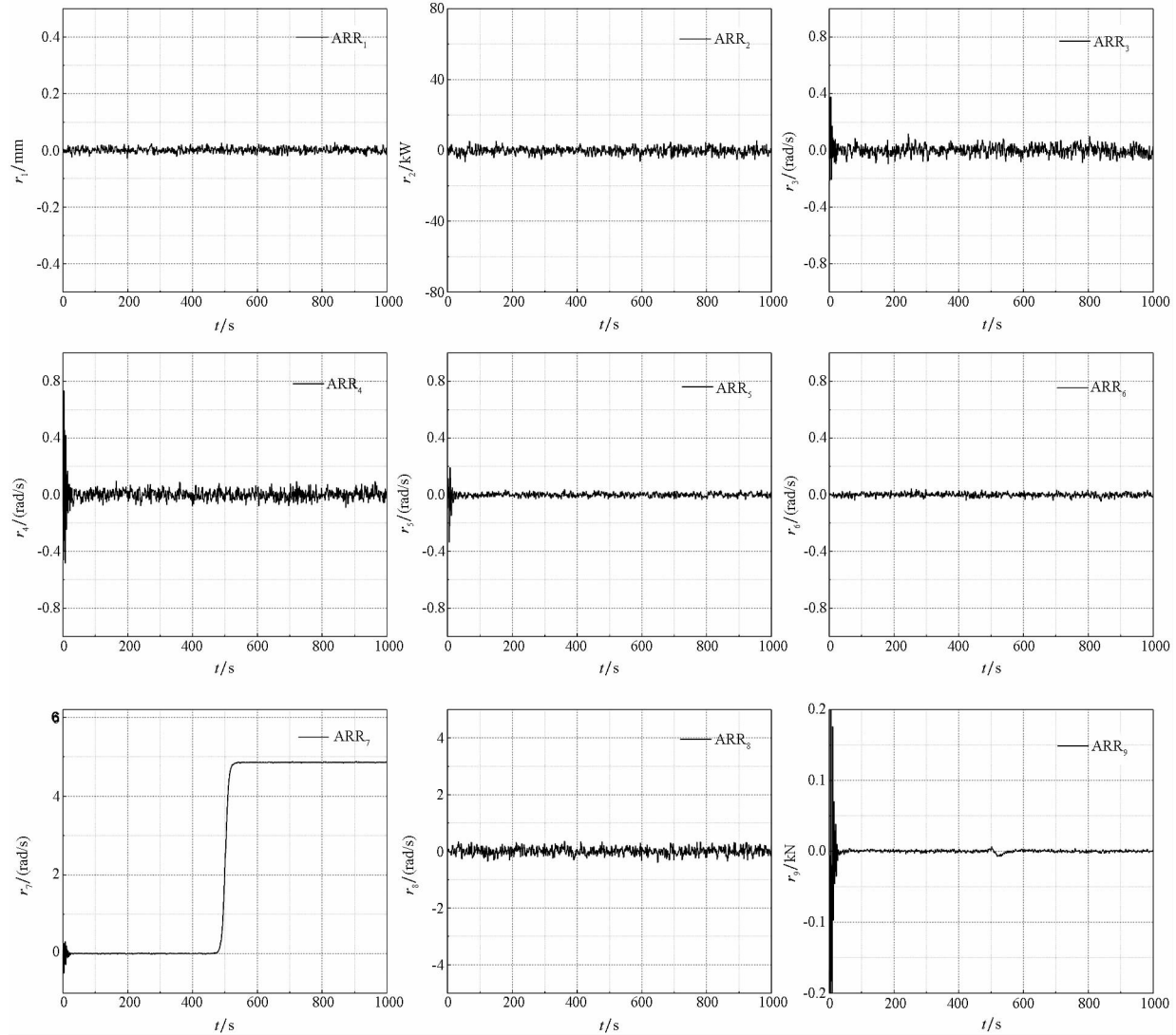


图 9 轴系磨损增加故障残差响应

Fig.9 Residuals response of the wear of shaft

### 3.2.3 参数估计仿真分析结果

图 10 和图 11 所示为柴油机效率以及轴系磨损故障参数的估计值随时间变化的动态曲线,从图中可以看出,通过采用本文的方法,不管是故障前还是故障后,系统都能够很快地对故障参数进行实时估计。在故障注入后,系统能够非常迅速地对故障参数进行估计,并且是非常准确的。

## 4 结论

提出了基于双因果键合图模型的定量故障隔离以及参数估计方法,利用该方法对舰船主动力装置进行了故障隔离以及参数估计仿真试验,结果表明:

- 1) 双因果键合图模型具有更加明确和灵活

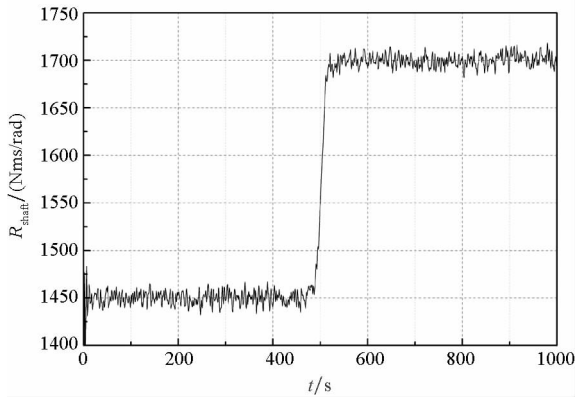


图10 轴系磨损故障参数估计

Fig. 10 Estimation of the friction of shaft

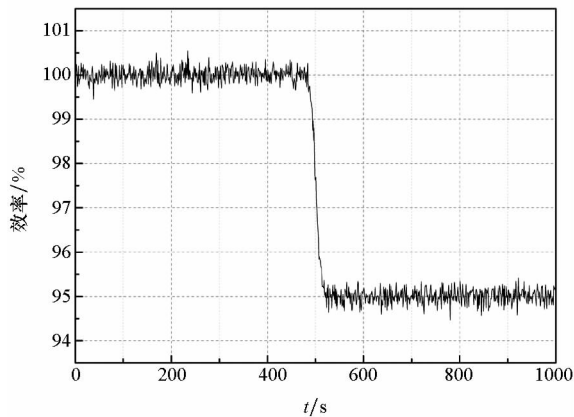


图11 柴油机效率下降参数估计

Fig. 11 Estimation of the efficiency of diesel engine

的因果路径关系,通过对其进行分析推导可以直接得到系统 ARRs,不需要复杂的数学推导过程。

2) 在现有的传感器布置方案下,通过双因果键合图模型得到的系统 FSM 具有很好的故障诊断特性,舰船主动力装置中所有系统部件的故障都是可诊断和可隔离的。

3) 键合图 LFT 模型可以很好地进行系统故障建模,将其与双因果键合图模型结合,可以方便地实现系统各种离线故障仿真,得到大量的系统故障数据。

4) 基于双因果键合图模型的参数估计算法能够实现系统故障参数的估计并具有很好的实时性,在系统发生故障后,故障参数能够得到及时的反馈。

## 参考文献 (References)

[1] 曾凡明, 吴家明, 庞之洋, 等. 舰船动力装置原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
ZENG Fanming, WU Jiaming, PANG Zhiyang, et al. Principle of marine power plant [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

[2] 陈彧赟, 侯博文, 何章鸣, 等. 数据驱动的复杂系统非预期故障诊断通用过程模型[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 126-133.

2017, 39(6): 126-133.

CHEN Yuyun, HOU Bowen, HE Zhangming, et al. General process model for unanticipated fault diagnosis of complex system based on data driven [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(6): 126-133. (in Chinese)

[3] Samantaray A K, Bouamama B O. Model-based process supervision—a bond graph approach [M]. UK: Springer, 2008.

[4] Bouamama B O, Medjaher K, Bayart M, et al. Fault detection and isolation of smart actuators using bond graphs and external models[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(2): 159-175.

[5] Merzouki R, Medjaher K, Djeziri M A, et al. Backlash fault detection in mechatronic system [J]. Mechatronics, 2007, 17(6): 299-310.

[6] Loureiro R, Merzouki R, Bouamama B O. Bond graph model based on structural diagnosability and recoverability analysis: application to intelligent autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3): 986-997.

[7] Bouamama B O, Medjaher K, Samantaray A K, et al. Supervision of an industrial steam generator. part I: bond graph modelling [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(1): 71-83.

[8] Medjaher K, Samantaray A K, Bouamama B O, et al. Supervision of an industrial steam generator. Part II: online implementation [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(1): 85-96.

[9] 樊久铭, 王秋生, 徐敏强, 等. 诊断键合图在液体火箭发动机故障诊断中的应用[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 977-980.  
FAN Jiuming, WANG Qiusheng, XU Minqiang, et al. Application of diagnostic bond graph to fault diagnosis for liquid-propellant rocket engine [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 977-980. (in Chinese)

[10] 牛刚, 赵亚君. 基于键合图模型的机车制动系统故障检测与隔离[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 894-899.  
NIU Gang, ZHAO Yajun. Bond graph model based fault detection and isolation for locomotive brake [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(6): 894-899. (in Chinese)

[11] 黄志武, 刘建刚, 刘伟荣, 等. 基于解析冗余关系的法维莱制动机系统故障诊断技术[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 29-35.  
HUANG Zhiwu, LIU Jiangan, LIU Weirong, et al. Fault diagnosis of faiveley braking system based on analytical redundancy relations [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(3): 29-35. (in Chinese)

[12] 彭小辉, 晏政, 李艳军, 等. 一种基于解析冗余关系的半定性故障隔离方法在航天器推进系统中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 104-110.  
PENG Xiaohui, YAN Zheng, LI Yanjun, et al. A semi-qualitative fault isolation method based on analytical redundancy relations for spacecraft propulsion system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(6): 104-110. (in Chinese)

[13] Samantaray A K, Ghoshal S K. Bicausal bond graphs for supervision: from fault detection and isolation to fault



- accommodation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(1): 1–28.
- [14] Touati Y, Merzouki R, Bouamama B O. Fault estimation and isolation using bond graph approach[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(20): 138–143.
- [15] Paynter H M. *Analysis and design of engineering systems*[M]. USA: MIT Press, 1961.
- [16] 黄林, 程刚, 许伟, 等. 某型舰用四冲程柴油机键合图建模与仿真[J]. *内燃机学报*, 2017, 35(6): 561–568.  
HUANG Lin, CHENG Gang, XU Wei, et al. Bond graph based modeling and simulation of a four stroke marine diesel engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(6): 561–568. (in Chinese)
- [17] Merzouki R, Samantaray A K, Pathak P M, et al. *Intelligent mechatronic systems* [M]. UK: Springer, 2013.
- [18] Djeziri M A, Merzouki R, Bouamama B O, et al. Fault detection of backlash phenomenon in mechatronic system with parameter uncertainties using bond graph approach [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006: 600–605.
- [19] Kam S C, Dauphin T G. Bond graph models of structured parameter uncertainties[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2005, 342(4): 379–399.
- [20] Gawthrop P J. *Bicausal bond graphs* [J]. *Society for Computer Simulation*, 1995: 83–88.

---

(上接第 114 页)

- [8] Cao X, Sun C. Multi-AUV cooperative target hunting based on improved potential field in underwater environment [C]// *Proceedings of 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation*, 2018: 118–122.
- [9] Liu F, Narayanan A. Collision avoidance and swarm robotic group formation [J]. *International Journal of Advanced Computer Science*, 2014, 4(2): 64–70.
- [10] Song Y, Li Y B, Li C H, et al. Mathematical modeling and analysis of multirobot cooperative hunting behaviors [J]. *Journal of Robotics*, 2015, 2015: 1–8.
- [11] Das G P, McGinnity T M, Coleman S A, et al. A distributed task allocation algorithm for a multi-robot system in healthcare facilities[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 80(1): 33–58.
- [12] Bayram H, Bozma H I. Coalition formation games for dynamic multirobot tasks [M]. *Algorithmic Foundations of Robotics XI*, 2015: 37–54.
- [13] Stouch D W, Zeidman E, Callahan W, et al. Dynamic replanning on demand of UAS constellations performing ISR missions [C]// *Proceedings of SPIE International Society for Optics and Photonics*, 2011: 238–243.
- [14] Komenda A, Novák P. Multi-agent plan repairing [C]// *Proceedings of IJCAI Workshop*, 2011: 1–6.
- [15] 付勇, 汪浩杰. 一种多机器人围捕策略[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(2): 26–29.  
FU Yong, WANG Haojie. A new capture strategy of multi-robots[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2008, 36(2): 26–29. (in Chinese)