

基于改进键合图方法的层次机电系统的测试性建模与分析

龙玉峰^{1,2}, 史贤俊¹, 肖志才¹, 张 捷¹, 杨 宇²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001;

2. 中国人民解放军 92154 部队, 山东 烟台 264001)

摘要: 现有层次化机电系统测试性建模与分析方法, 存在着测试性参数值较小的缺陷, 为了解决上述问题, 提出基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性建模与分析方法; 引入改进键合图方法, 将其有效的融合到贝叶斯网络中, 以此为基础, 搭建系统测试性模型, 通过插值获取测试性参数; 以搭建的系统测试性模型为工具, 描述层次化机电系统结构, 构建层次化机电系统键合图, 检测并隔离层次化机电系统故障, 实现了基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性的建模与分析; 通过实验结果显示: 与现有的 3 种层次化机电系统测试性建模与分析方法相比较, 提出的层次化机电系统测试性建模与分析方法极大地提升了测试性参数, 充分说明所提方法具备更好的测试性效果。

关键词: 改进键合图方法; 层次化机电系统; 测试性; 建模; 分析

Testability Modeling and Analysis of Hierarchical Electromechanical System Based on Improved Bond Graph Method

LONG Yufeng^{1,2}, SHI Xianjun¹, XIAO Zhicai¹, ZHANG Jie¹, YANG Yu²

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. 92154th Unit of PLA, Yanti 264001, China)

Abstract: The existing testability modeling and analysis methods of hierarchical electromechanical system have the defects of small testability parameters, in order to solve these problems, a new testability modeling and analysis method based on improved bond graph for hierarchical electromechanical system is proposed. The improved bond graph method is introduced, which is effectively integrated into Bayesian network. On this basis, the testability model of the system is built, and the testability parameters are obtained by interpolation. Taking the built system testability model as a tool, the structure of hierarchical electromechanical system is described, the bond graph of hierarchical electromechanical system is constructed, the fault of hierarchical electromechanical system is detected and isolated, and the testability modeling and analysis method of hierarchical electromechanical system based on the improved bond graph is realized. The experimental results show that: compared with the existing three testability modeling and analysis methods for hierarchical electromechanical system, the proposed testability modeling and analysis method for hierarchical electromechanical system greatly improves the testability parameters, which fully shows that the proposed method has better testability effect.

Keywords: improved bond graph method; hierarchical electromechanical system; testability; modeling; analysis

0 引言

随着智能化技术的不断发展, 机电系统应运而生, 主要涉及医学、光学、材料工程、机械工程、化学、物理学以及生物工程等多种学科和工程技术。机电系统的制造工艺包括微米制造工艺、机械工艺、集成电路工艺以及其它特种工艺等, 其在国民经济以及军事方面均存在着广泛的应用前景^[1]。

层次化机电系统指的是多层次的机电系统, 随着机电系统层次的增加, 该系统的复杂性与混合性也在逐渐提升, 向着微型化、综合化发展。虽然层次化机电系统带来了很

多便利, 但同时也带来了威胁, 例如层次化机电系统故障原因增加、可监测性约束增加等, 导致层次化机电系统测试性下降, 极大地提升了层次化机电系统的诊断维修难度, 成为影响层次化机电系统寿命周期的重要因素之一。为了提升层次化机电系统的安全性及可用性, 降低层次化机电系统寿命周期成本, 应该在层次化机电系统设计初期做好测试性设计, 将其与健康监测与诊断有效的结合, 这对保持层次化机电系统的健康状态至关重要。精炼层次化机电系统设计提升系统可测试性的过程称为 DFT (design for testability)^[2]。测试性指的是系统可以及时准确地确定系统

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-08-09。

作者简介: 龙玉峰(1982-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事测试性设计、故障诊断与预测方向的研究。

引用格式: 龙玉峰, 史贤俊, 肖志才, 等. 基于改进键合图方法的层次机电系统的测试性建模与分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9):

61-66.

状态，并隔离内部故障的一种设计特征。为此，学者们对层次化机电系统测试性建模与分析方法进行了较为深入的研究。

就现有的研究成果来看，使用较为广泛的层次化机电系统测试性建模与分析方法主要有 3 种，分别是基于系统结构的层次化机电系统测试性建模与分析方法、基于信息流的层次化机电系统测试性建模与分析方法和基于多信号流图的层次化机电系统测试性建模与分析方法。其中，基于系统结构的层次化机电系统测试性建模与分析方法主要是依据系统的多层次特征构建测试性模型，以模型为基础，分析层次化系统的需求以及诊断系统故障；基于信息流的层次化机电系统测试性建模与分析方法采集层次化机电系统的信息流，以此为基础，构建系统测试性模型，验证层次化机电系统；基于多信号流图的层次化机电系统测试性建模与分析方法采集层次化机电系统的信息流，将其转换为多信号流图，提取特征向量，以此为依据，构建测试性模型，以此为工具提出层次化机电系统的诊断策略。上述 3 种方法具有各自的优势，但是均存在着测试性参数小的缺陷，为了解决上述问题，提出基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性建模与分析方法研究。键合图方法是一种系统动力学建模方法，主要是以图形方法来表示、描述系统动态结构，是对系统进行动态数字仿真时有效的建模工具，可以提升人们对多层次机电系统行为的洞察力^[3]。在表达方式上，键合图方法将机电系统涉及的物理参量，统一归纳为势、流、动量与变位，利用回转器与变换器表征层次化机电系统的基本连接方式。键合图方法在多个领域具有广泛的应用。通过键合图方法的应用，可以极大地提升层次化机电系统测试性建模与分析方法的测试性参数，从而增强方法的性能，并设计实验验证提出方法的测试性效果^[4]。

1 系统测试性模型构建

1.1 改进键合图方法引入

改进键合图方法是一种图形化的系统动力学建模方法，也就是采用图示描述层次化机电系统能量结构与能量传递方式的一种表示方法^[5]。

键合图元通口相互联结便形成键，键是通口的图形表示。键合图中每一根键都具有两个变量，其均是时间的函数，两者的标量积即为通口出的瞬间流动功率，称其为功率变量或者键变量。当元件连接在一起时，两个变量受到约束作用在机电系统上产生能量传递。变量在通口处成对出现，分别为势变量与流变量，则功率计算公式为：

$$P(t) = e(t) * f(t) \tag{1}$$

其中： $P(t)$ 表示的是瞬间流动功率； $e(t)$ 表示的是机电系统势变量； $f(t)$ 表示的是机电系统流变量。

$$P = e(t) * f(t) = \omega \tau \tag{2}$$

对势变量与流变量进行积分，得到广义动量与广义位移为：

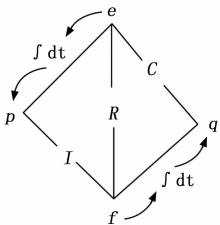
$$\begin{cases} p(t) = \int_{t_0}^t e(t) dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t) dt \\ q(t) = \int_{t_0}^t f(t) dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t) dt \end{cases} \tag{3}$$

其中： p_0, q_0 分别表示的是时间 t_0 时的初始动量与初始位移。

广义动量与广义位移是能量变量，利用一根功率键的能量为：

$$E(t) = \int_{t_0}^t e(t) * f(t) dt \tag{4}$$

则势变量、流变量、广义动量、广义位移可以用来统一表示不同能量，四者关系如图 1 所示。



键合图广义变量基本关系图

键合图元件可以依据能量转移模型与通口数量两种方式分类，这是产生键合图的基本依据^[5]。键合图元件分类如图 2 所示。

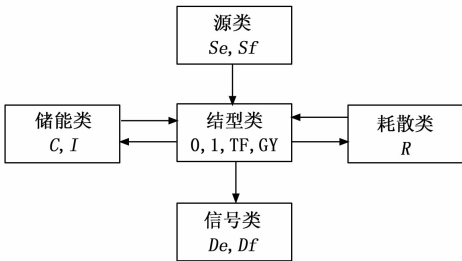


图 2 键合图元件分类图

键合图模型是由键合图元构成，根据层次化机电系统测试需求定义九种基本键合元，具体如表 1 所示。

表 1 基本键合图元表

一通口元件		二通口元件	
阻性元	$\frac{e}{f} \rightarrow R$	变换器	$\frac{e_1}{f_1} \rightarrow m_{TF} \frac{e_2}{f_2} \rightarrow$
容性元	$\frac{e}{f} \rightarrow C$	回转器	$\frac{e_1}{f_1} \rightarrow m_{GY} \frac{e_2}{f_2} \rightarrow$
惯性元	$\frac{e}{f} \rightarrow I$	结	
势源	$Se \rightarrow e$	0—结	$\frac{e_1}{f_1} \rightarrow 0 \frac{e_n}{f_n} \rightarrow$
流源	$Sf \rightarrow f$	1—结	$\frac{e_1}{f_1} \rightarrow 1 \frac{e_n}{f_n} \rightarrow$

1.2 基于改进键合图方法的贝叶斯网络搭建

以上述引入的键合图方法为基础，将其融入到贝叶斯

网络中, 搭建基于改进键合图方法的贝叶斯网络, 具体搭建过程如下所示。

贝叶斯网络也被称为概率网络或者置信网络, 是一组随机变量间关系的表示。对于每一个变量, 通过边界与给定的条件概率分布相连^[6]。简单的贝叶斯网络示意图如图 3 所示。

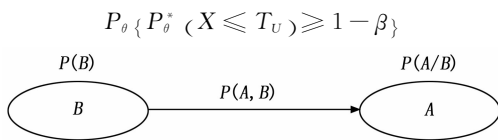


图 3 简单的贝叶斯网络示意图

基于改进键合图方法的贝叶斯网络搭建步骤如下。

1) 通过改进键合图模型确定假设变量和信息变量。对于层次化机电系统来说, 输入电压已知, 由此键合图各结点的势能可以导出, 以此来作为信息变量, 键合图模型中的元件 R 与 I 作为假设变量;

2) 依据键合图中结点 0 相当于并联, 结点 1 相当于串联, 以此为依据, 将键合图模型模块化, 并构建模块化后系统的故障树, 具体如图 4 所示。

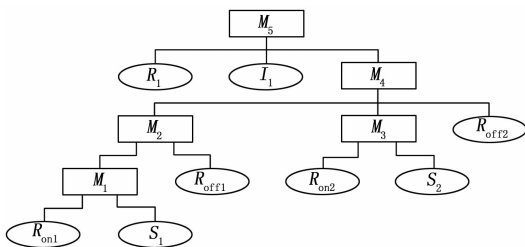


图 4 系统故障树示意图

3) 将上述得到的故障树转化为贝叶斯网络, 具体如图 5 所示。

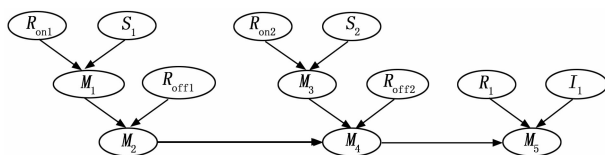


图 5 故障树转化的贝叶斯网络示意图

上述过程完成了基于改进键合图方法的贝叶斯网络的搭建, 为下述层次化机电系统测试性模型的构建做准备^[7]。

1.3 测试性模型

以上述搭建的基于改进键合图方法的贝叶斯网络为基础, 构建层次化机电系统通过测试性模型, 具体构建过程如下所示。

层次化机电系统通过测试性模型构建步骤如下。

1) 确定建模对象: 对被建模系统进行原理图模型、结构模型与故障模型构建, 对其影响、危害性进行分析, 同时识别、提取模型信息, 确定每个子系统之间、系统多个部件之间的相互影响;

2) 依据分析系统结果, 建立描述系统部件、故障与测试信号之间的关系; 分析系统的功能结构, 依据对象间的关联, 将模型片段进行连接, 构建整个系统的测试性模型;

3) 对构建的系统测试性模型进行修正与校验, 并通过分析获取需要的概率信息, 确定各个结点的测试性参数, 以便于后续的测试性分析。

在测试性模型的构建过程中, 需要注意的是: 当被建模系统具有多种工作模式时, 需要增加模式转换结点表示系统的不同工作模式变动情况; 当多个故障具有同一测试信号, 并且概率映射关系相同的情况下, 需要增加融合结点对模型连接情况进行简化。另外, 还可以通过增加中继结点, 表示系统故障传播的关系^[8]。

上述过程完成了测试性模型的构建, 为下述测试性参数计算提供支撑。

1.4 测试性参数计算

依据上述构建的测试性模型, 获取系统正常工作的概率曲线, 通过插值获取测试性参数, 测试性参数计算过程如下所示。

通过测试性模型得到系统稳态转移矩阵为:

$$Q_{ij} = \begin{cases} U'_{ij} & \text{if } i \neq j \\ -\sum_i U'_{ik} & \text{if } i = j \end{cases} \quad (5)$$

其中: U'_{ij} 表示的是系统显示状态之间的状态转移矩阵。则系统稳态概率满足下述公式:

$$\pi Q = 0 \text{ 且 } \sum_{k \in T} \pi k = 1 \quad (6)$$

将公式 (6) 转化为区间线性方程, 表示为:

$$Q^T \prod^T = b \quad (7)$$

其中: Q^T 表示的是矩阵 Q_{ij} 的转置; $\prod^T$ 表示的是系统待求解的状态概率区间; b 表示的是 $[0, 0, \dots, 0, 1]^T$ 。

将公式 (7) 进行预处理, 变换为:

$$M^T \prod^T = r \quad (8)$$

其中: $M^T = \frac{Q_{ij}}{2} * Q^T, r = \frac{Q_{ij}}{2} * b$ 。

则系统测试性参数为:

$$\xi = \oint_{i,j=1} \frac{E(t) \cdot P(t)}{Q_{ij}} * \prod_{i,j} \frac{Q^T * M^T}{b \cdot r} \quad (9)$$

上述过程完成了系统测试性模型的构建, 为下述层次化机电系统分析提供模型支撑。

2 基于测试性模型分析层次化机电系统

2.1 层次化机电系统描述

以上述构建的测试性模型为基础, 描述层次化机电系统。层次化机电系统主要是由电机电器部分、直流电机驱动器、机械部分、减速器以及负载部分等 5 个子系统构成^[9]。层次化机电系统结构如图 6 所示。

直流电源为驱动器提供电力, 电机在转矩模式下进行旋转运动, 通过减速器带动负载惯量盘运动, 减速器的输

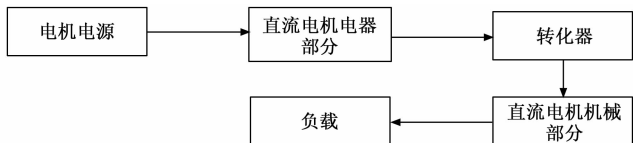


图 6 层次化机电系统结构图

入输出位置由电机编码器与负载编码器测得^[10]。

在层次化机电系统中，影响系统测试的主要为系统摩擦力，主要存在于机械部分与负载部分，为此，针对上述两部分进行详细分析，利用 Stribeck 摩擦模型构建摩擦力模型^[11]。

Stribeck 摩擦模型基本表达式为：

$$(T_f, \omega) = \begin{cases} T_{\text{stribeck}} & \omega \neq 0 \\ T_e & \omega = 0 \text{ 且 } |T_e| < T_s \\ T_s \text{sign}(T_e) & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

其中： (T_f, ω) 表示的是非线性摩擦力矩； T_{stribeck} 表示的是 Stribeck 曲线； ω 表示的是旋转角速度； T_e 表示的是外部驱动力； T_s 表示的是静摩擦力矩。

$\bar{X}$ 计算公式为：

$$T_{\text{stribeck}} = [T_e + (T_s - T_e)e^{-a\omega}] \text{sign}(\omega) \quad (11)$$

其中： a 表示的是常数

2.2 层次化机电系统键合图建模

以上述层次化机电系统描述结果为依据，构建层次化机电系统键合图模型。具体过程如下所示。

改进键合图方法可以对层次化机电系统元件之间的相互作用与能量流动进行完整描述，层次化机电系统键合图模型如图 7 所示。

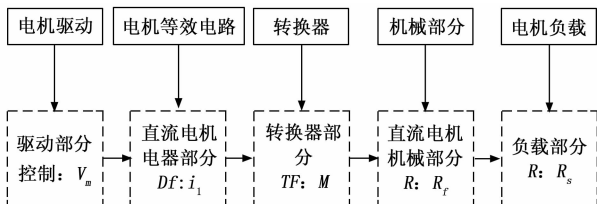


图 7 层次化机电系统键合图模型示意图

如图 7 所示，直流电机机械部分本构关系为：

$$e = \begin{cases} g_1(f) & \theta_e \neq 0 \\ e & \theta_e = 0 \\ f_c \text{sign}(e) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

其中： θ_e 表示的是测得的电机位置。

电机负载部分本构关系为：

$$e = \begin{cases} g_2(f) & \theta_s \neq 0 \\ e & \theta_s = 0 \\ f_{cs} \text{sign}(e) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

其中： f_{cs} 表示的是电机负载部分的静摩擦力矩； θ_s 表示的是测得的负载盘位置。

上述过程完成了层次化机电系统键合图模型的构建，

为下述层次化机电系统故障检测与隔离做准备^[12]。

2.3 层次化机电系统贝叶斯网络搭建

以上述构建的层次化机电系统键合图模型为基础，搭建层次化机电系统贝叶斯网络，以此来描述层次化机电系统的逻辑关系^[13]。为了增强贝叶斯网络的描述能力，将层次化机电系统的资源、信息类别、数值与数量表达式引入到贝叶斯网络中，成为扩充的层次化机电系统贝叶斯网络^[14]。

层次化机电系统贝叶斯网络如图 8 所示。

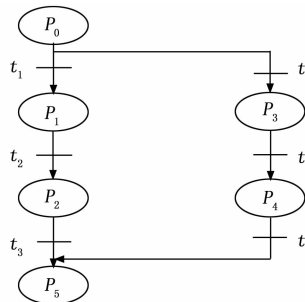


图 8 层次化机电系统贝叶斯网络示意图

如图 8 所示，完成了层次化机电系统贝叶斯网络的搭建，为层次化机电系统故障检测与隔离做准备^[15]。

2.4 层次化机电系统故障检测与隔离

依据上述构建的层次化机电系统键合图模型与贝叶斯网络为基础，对层次化机电系统故障进行检测与隔离，具体框架如图 9 所示。

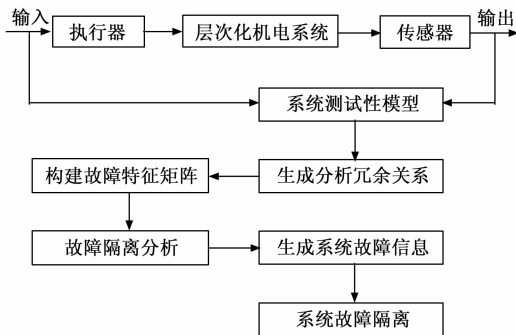


图 9 层次化机电系统故障检测与隔离框架图

如图 9 所示，此文利用解析冗余关系进行层次化机电系统故障的检测与隔离^[16]。解析冗余关系是一种包括层次化机电系统输入、模型参数与传感器测量等多种已知条件的约束关系^[17]。

根据因果路径，得到层次化机电系统第一个结构独立的解析冗余关系表示为：

$$ARR_1 = \beta V_{in} k_1 k_2 - J_m \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} \right) - g_1 \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} \right) \right] - K \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} - M \frac{\theta_s}{\beta_{\theta_s}} \right) \quad (14)$$

其中： ARR_1 表示的是层次化机电系统第一个结构独立

的解析冗余关系; β 表示的是有效因子; k_1, k_2 表示的是计算参数; J_m 表示的是层次化机电系统的电源参数; g_1 表示的是第一个结构独立的解析冗余关系的可靠系数; K 表示的是电机传动轴的刚度。

得到层次化机电系统第二个结构独立的解析冗余关系表示为:

$$ARR_2 = MK \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} - M \frac{\theta_s}{\beta_{\theta_s}} \right) - J_m \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} \right) - g_2 \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\theta_e}{\beta_{\theta_e}} \right) \right]$$

(15)

其中: ARR_2 表示的是层次化机电系统第二个结构独立的解析冗余关系; M 表示的是层次化机电系统冗余因子; g_2 表示的是第二个结构独立的解析冗余关系的可靠系数。

将上述公式 (14) 与公式 (15) 进行整合, 得到系统解析冗余关系表示为:

$$ARR = ARR_1 + \frac{ARR_2}{M}$$

(16)

依据上述得到的 ARR 值, 判断层次化机电系统故障是否能够隔离, 判断程序如图 10 所示。

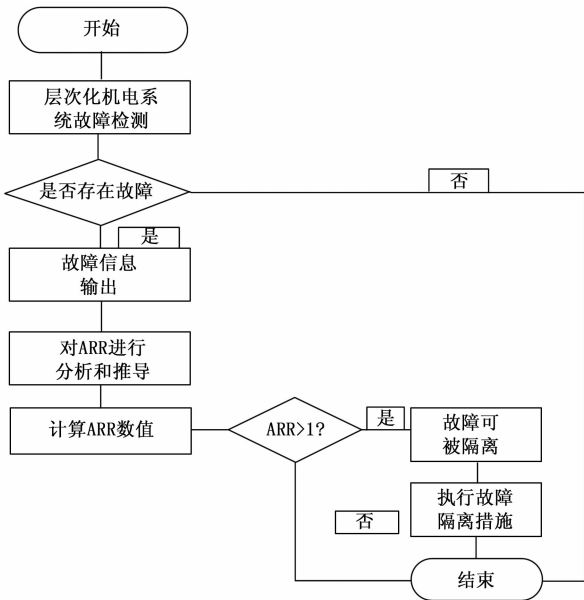


图 10 层次化机电系统故障隔离判断程序图

通过系统测试性模型构建以及层次化机电系统故障检测与隔离, 实现了基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性的建模与分析, 为层次化机电系统的稳定、安全运行提供更加有效的保障^[18]。

3 测试性参数实验对比分析

上述过程实现了基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性建模与分析方法的设计, 但是对其是否能够解决现有 3 种方法存在的问题, 还无法确定, 为此设计仿真对比实验。在仿真对比实验过程中, 采用基于系统结构的层次化机电系统测试性建模与分析方法、基于信息流的层次化机电系统测试性建模与分析方法、基于多信号流图的层

次化机电系统测试性建模与分析方法与提出的基于改进键合图方法的层次化机电系统测试性建模与分析方法进行对比实验, 通过测试性参数体现方法的测试性效果。具体实验过程如下所示。

3.1 实验准备

为了保障实验数据的准确性, 对仿真对比实验进行充分的准备。首先, 选定唯一的实验对象—层次化机电系统, 参数设置情况如表 2 所示。

表 2 层次化机电系统参数设置表

参数	数值	参数	数值
M	10	k_1	1
K	0.3	k_2	0.053
J_m	0.005	f_s	0.000 1
f_m	0.06	f_n	0.001
f_{cs}	0.15	f_c	0.008
β	0.151	α	0.008 1
g_1	0.02	g_2	0.06

层次化机电系统模式转换开关时序如图 11 所示。

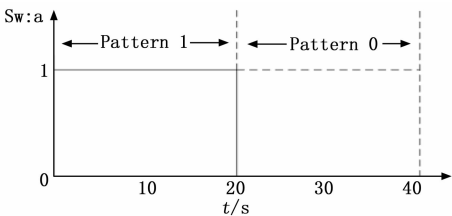


图 11 层次化机电系统模式转换开关时序图

层次化机电系统故障检测实验平台总体结构如图 12 所示。

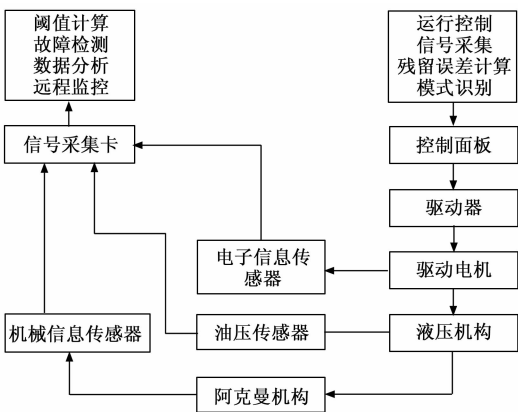


图 12 层次化机电系统故障检测实验平台总体结构图

3.2 实验结果分析

以上述实验准备为基础进行对比实验, 通过实验得到测试性参数对比情况如表 3 所示。

常规情况下, 测试性参数越大, 表示方法性能越好。如表 3 数据显示, 提出方法的测试性参数远远的高于现有 3 种方法, 其最大值可以达到 15.89。

表 3 测试性参数对比情况表

实验次数	基于改进键合图方法建模结果	基于系统结构方法建模结果	基于信息流建方法模结果	基于多信号流图方法建模结果
30	10.23	9.02	5.12	3.12
60	12.11	8.10	5.00	3.00
90	13.00	7.00	5.02	3.46
120	14.23	6.99	5.46	5.12
150	15.89	6.53	5.13	4.89

实验结果表明,与现有的 3 种机电系统层次化可测性建模与分析方法相比,本文提出的机电系统层次化可测性建模与分析方法大大提高了可测性参数。其原因是提出的层次化机电系统可测性建模与分析方法,通过构建的可测性模型得到系统正常运行的概率曲线,并利用插值法得到可测性参数,从而构造一个层次化的机电系统键合图,检测和隔离层次化的机电系统故障,提高可测性参数,使可测性结果最大化。

4 结束语

针对传统层次化机电系统测试性建模与分析方法中测试性参数小的问题,提出了一种基于改进键合图法的层次化机电系统测试性建模与分析方法。基于上述基于改进键合图方法的贝叶斯网络,通过可测性模型建立层次化机电系统,计算可测性参数,建立层次化机电系统键合图模型,结合层次机电系统的键合图模型和贝叶斯网络对层次机电系统的故障进行检测和隔离,并基于改进的键合图方法完成了层次机电系统的可测性建模和分析。仿真实验结果表明,本文提出的分层机电系统可测性建模与分析方法大大提高了可测性参数,为分层机电系统的稳定安全运行提供了更有效的保障。然而,该方法的可测性参数仍有较大的改进空间,有待于进一步的优化研究。

参考文献:

[1] 陈森发. 复杂系统建模理论与方法 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.

[2] 王艾伦, 仇勇, 赵振宇, 等. 复杂机电系统模块化自动建模及仿真 [J]. 机电工程, 2003, 20 (1): 50-53.

[3] 连光耀, 黄考利, 陈建辉, 等. 装备测试性设计关键技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 1196-1197.

[4] LI S Y. Design of control system of a MEMS strong-link for PC authentication system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016 (6): 62-68.

[5] 黄磊. 基于键合图模型的复杂机电系统故障诊断方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

[6] 代京, 张平, 李行善, 等. 航空机电系统测试性建模与分析 [J]. 航空学报, 2010, 31 (2): 277-284.

[7] TSIRONIS C, GIANOPOULOS I K, SOULTANA VASILE-IADOU, et al. Modeling and control simulation of an electrome-

chanical mm-wave launching system for thermonuclear fusion applications [J]. Fusion Engineering & Design, 2016, 112: 367.

[8] VAVILOV V E. Selecting the rotor's magnetic system in electromechanical energy converters with highly coercive permanent magnets [J]. Russian Engineering Research, 2018, 38 (4): 256-259.

[9] XIA D, HOU K, AN N, et al. Power system electromechanical dynamic simulation considering thermal power OPC protection model [J]. Power System Protection & Control, 2017, 45 (4): 145-149.

[10] DU W J, BI J T, WANG H F. Damping degradation of power system low-frequency electromechanical oscillations caused by open-loop modal resonance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018 (99): 1.

[11] ZHAO T, XIE Y. Multi-axis coupling of machining centers based on electromechanical modeling [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57 (2): 113-119.

[12] CHEN S L. Photoacoustic imaging by use of micro-electromechanical system scanner [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2018, 23 (1): 1-10.

[13] ZHANG P, DONG Y F. Functional decomposition process model for complex electromechanical based on design-centric complexity and TRIZ [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (23): 10-17.

[14] LIN G W, QIN L G. Electrically controlled quantum memories with a cavity and electro-mechanical system [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52 (3): 1-6.

[15] LUO S H, LI S B, TAJADDODIAAFAR F, et al. Adaptive synchronization of the fractional-order chaotic arch micro-electro-mechanical system via Chebyshev neural network [J]. IEEE Sensors Journal, 2018 (99): 1.

[16] YANG Y, XIAO X, TAO S, et al. Multi-port interface technique and application of electromagnetic and electromechanical transient hybrid real-time simulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (4): 231-240.

[17] ZHANG Y, WU J. Optic fiber acceleration sensors based on micro-electromechanical systems technology [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (6): 60-66.

[18] SHTIKIN L V, BERINSKII I E, INDEITSEV D A, et al. Electromechanical models of nanoresonators [J]. Physical Mesomechanics, 2016, 19 (3): 248-254.

[19] 代京, 于劲松, 张平, 等. 基于多信号流图的诊断贝叶斯网络建模. 北京航空航天大学学报, 2009, 35 (4): 472-475.

[20] BORIK S, CAP I, BABUSUAK B, et al. Implementation of variable segments to model the arterial system using electromechanical analogy [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 68 (3): 220-223.