

基于有色 Petri 网的机械系统故障诊断研究

朱鑫鹏, 周俊

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 故障诊断对于机械系统的使用与维护起着重要的作用; 为了提高机械系统故障诊断的效率以及直观性, 提出了一种使用基于知识的故障诊断方法, 即使用有色 Petri 网诊断方法建立一种通用机械系统故障诊断模型并进行分析; 针对数控机床液压元件故障这一案例, 首先获取其故障来源建立故障树; 其次在故障树基础上运用有色 Petri 网建模工具 CPNTools 建立有色 Petri 网模型; 最后对模型进行了仿真分析以模拟故障的传递, 进行状态空间分析以判断模型安全性, 结果表明所提出的建模方法能够使得故障传递更加直观化, 快速了解故障的发展趋势, 并表明此模型有着较强的易用性以及通用性。

关键词: 故障诊断; 有色 Petri 网; CPNTools; 仿真分析

Fault Diagnosis of Mechanical System Based on Colored Petri Nets

Zhu Xinpeng, Zhou Jun

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Fault diagnosis plays an important role in the use and maintenance of mechanical system, in order to improve the efficiency and the intuitive of the fault diagnosis for mechanical system. In this paper, a fault diagnosis method based on knowledge was proposed, which used the colored Petri nets to establish a general fault diagnosis model of mechanical system. In the case of the CNC's hydraulic components faults, firstly, the fault source was obtained to establish the fault tree. Secondly, the colored Petri net model was established by the CPNTools used for modeling and simulation of Petri nets based on the fault tree. Finally, the simulation analysis of the model was carried out to get the trend of the fault transmission, the state space report was obtained to validate the security of model. The results showed that the proposed modeling method could make fault transmission more intuitive and the development trend of fault showed more quickly. Besides, the results showed that the model has strong usability and versatility.

Keywords: fault diagnosis; colored Petri nets; CPNTools; simulation analysis

0 引言

故障诊断技术^[1], 是指在机器设备运行或基本不拆卸的情况下, 掌握机器设备的状态, 早期发现故障, 判别故障的部位和原因, 并预测故障的发展趋势^[2]。随着机械工业的发展, 机械系统日益复杂, 故障诊断也成为一项重要的研究。在现实生活中, 很多情况都是依据专家的经验来进行故障诊断, 根据描述性的知识以及故障之间的联系来判断, 这种方法就是基于知识的故障诊断方法^[3]。其定义就是指利用浅知识或深知识进行诊断推理, 主要包括专家系统故障诊断方法、模糊故障诊断方法、故障树故障诊断方法、神经网络故障诊断方法和数据融合故障诊断方法、Petri 网故障诊断方法等^[4]。

Petri 网^[5]是异步并发系统建模与分析的一种重要工具, 广泛应用于系统建模、系统分析与验证、监控与故障监测等领域, 并取得了一系列较完善的研究成果, 成为计算机界、自动化界的热门研究方向。随着控制科学与信息科学领域研究的深入, 在实际的工程应用中, 针对被研究系统的形式化建模问题^[6]、性能评价问题、优化调度问题、同时也成为故障诊断方

法基于知识方法类型中重要的一环。

有色 Petri 网 (colored Petri nets, CPN) 作为一种高级 Petri 网, 在 Petri 网的基础上增加了时间、颜色集、层次结构等概念, 使得有色 Petri 网能够更好的大型复杂系统的建模仿真、性能分析。同时 CPNTools 作为一个成熟的有色 Petri 网建模仿真工具, 可以方便地添加各种颜色集、时间函数等, 所以能够对在多种情况下的仿真进行分析。文献 [7] 提出了基于 Petri 网的机械系统可靠性分析与故障诊断研究, 其主要利用分解法, 并结合马尔科夫模型解决了 Petri 网的空间状态问题; 文献 [8] 提出了基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究, 该研究主要就是用不同的单色代表保护类型、断路器和电网元件, 用颜色托肯进行推理获得诊断结果。文献 [9] 提出了基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别, 该方法主要是通过建立一个有色自控的 Petri 网的电网故障区域识别方法, 将故障诊断方法局限在一个或多个无源网络中, 有助于工作进行。这些研究在某些方面通过使用 Petri 网理论建模解决了一些实际问题, 取得了一定成果。但是目前应用 Petri 网进行的研究也有局限性, 它们并没有建立一个更加直观模型, 通用性不强, 不能够在其他系统模型中简单应用。

本研究运用基于知识的故障诊断方法, 致力于建立更加直观化、高效率、通用的有色 Petri 网模型, 本文提出基于有色 Petri 网的机械系统故障诊断方法, 根据机械系统故障来源建立故障树, 在其基础上建立具有随机时间函数的有色 Petri 网 (CPN) 模型, 通过 CPNTools 工具进行仿真以获取故障的传播信息, 了解故障的发展趋势, 对模型进行状态空间分析从而

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-02-22。

基金项目: 国家教育部留学回国人员启动基金(教外司留[2012]940号); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(16KY0110)。

作者简介: 朱鑫鹏(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事故障诊断方向的研究。

通讯作者: 周俊(1967-), 女, 安徽黄山人, 副教授, 主要从事知识工程方向的研究。

判断模型安全性并进行改进。

1 有色 Petri 网简介

有色 Petri 网 (Colored Petri Nets, CPN) 是一种用来对于复杂系统进行建模分析的一种图形化语言^[10]。

1.1 有色 Petri 网的定义

有色 Petri 网的基本定义如下:

有色 Petri 网 (CPN) 是一个多元组, 其定义为 $CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$, 其中,

1) Σ 是非空类型的有限集, 也称为颜色集 (Color Sets);

2) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是库所 (places) 的有限集, m 表示系统中库所的数目;

3) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是变迁 (transition) 的有限集, n 代表系统中变迁的数目;

4) A 是弧 (arcs) 的有限集, 满足 $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \varnothing$;

5) N 是结点 (node) 函数, 定义为 $N: A \rightarrow P \times T \cup T \times P$; (“ \times ”为笛卡尔积)

6) C 是颜色 (color) 函数, 定义为 $C: P \rightarrow \Sigma$; $C(p)$ 称为托肯色是库所 p 上托肯的所有颜色的集合, $C(t)$ 称为出现色是所有可以使变迁 t 点火的颜色集合。

7) G 是守卫 (guard) 函数, 定义为 $G: T \rightarrow \text{Expression}$;

8) E 为弧表达式的函数, 定义为: $E: A \rightarrow \text{Expression}$;

9) I 是初始化 (initialization), 定义为 $df I: P \rightarrow \text{CloseExpression}$;

图 1 所示为一个简单的有色 Petri 网模型。

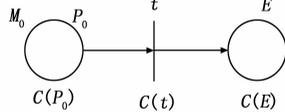


图 1 有色 Petri 网

一个 CPN 可以定义为一个多元组, 是为了给出数学化的描述和明确定义^[11]。

1.2 CPNTools

CPNTools^[12]是由丹麦 Aarhus 大学开发的一个用于有色 Petri 网建模仿真的工具, 它可以提供常见的随机分布函数如: 伯努利, 指数, 正太, 平均, 泊松分布等。这种情况下可以满足不同情况下的仿真。它支持模型的状态空间分析, 时间仿真, 功能分析, 同时支持用户根据 ML 语言编写函数去提取数据^[13], 这样可以使我们得到一个比较精确的仿真模型, 反馈功能可以方便的提供前后关系的错误信息及各元素之间的依赖关系。

2 实验验证

为了验证此有色 Petri 网模型的通用性、易用性, 针对数控机床液压元件故障这一案例进行研究, 通过文献等资料获取液压元件故障的来源并根据故障树原理绘制故障树图; 以故障树图为基础, 以颜色集代表故障来源建立有色 Petri 网模型; 运用 CPNTools 仿真工具对模型进行仿真分析以模拟故障传递; 运用状态空间分析工具判断模型安全性。

2.1 液压元件故障树

本文通过对数控机床液压系统中液压元件部分故障, 主要包括液压泵的故障、整体多路故障以及液压缸故障^[14], 建立故障树可以使得故障来源更加清晰明了, 并可以使得有色 Petri 网的建模变得更加的方便、更具直观化, 运用故障树的 OR (或) 门事件以及基本事件图形进行绘制, 如图 2 为液压元件总体故障树。

其中故障树中各个形状及其含义如表 1 所示。

表 1 故障树中各个形状含义

形状			
含义	OR 门	事件	基本事件

2.2 有色 Petri 网模型建立

根据以上液压元件总体故障树图以及各部分故障树模型图, 可以直观了解其故障来源分布, 由此可以使用 CPNTools 来建立液压元件故障的有色 Petri 网模型, 将故障来源作为有色 Petri 网模型的颜色集, 模型如图 3 所示, 椭圆形状为 Petri 网的库所集, 方框为变迁集, 其中的连接线为其流关系, 库所上面圆圈标识中数字为其托肯数量, 其表述文字为托肯颜色集。变迁方框左下角显示三角代表这个变迁是使能的, 托肯可以进行传递。

建立完模型后, 必须添加声明以及函数以模拟现实的情况来实现仿真分析, 此模型的声明、函数如图 4 所示。以上声明中 DATA 为 string 字符串集, 即故障信息 F1—F34 为字符串集, 如表 2 所示, 为 F1—F34 标识的含义。由于故障传播有传播其故障或没发生故障两种情况, 所以在托肯字符串集中都要增加 “”, 即空集的声明。同时声明一个 INT 整数集, 此整数集带有时间函数, 因此 INTxDATA 为整数、字符串的时间乘积集。“@”符号后面就为此乘积集的时间函数, 在仿真开始之前每个故障时间都为 0。Fault1—Fault9 为各个基本故障的初始标识, 其不带时间函数。变迁上的标识 (i, p) 为传递的信息, i 继承与整数集 INT, p 继承于字符串集 DATA。由

表 2 CPN 中标识及含义

标识	含义	标识	含义	标识	含义	标识	含义
F1	轴向径向半径大	F10	泵齿轮啮合精度差	F19	调压弹簧损坏	F28	防尘密封圈被挤出
F2	泵体裂纹	F11	泵轴油封脱落	F20	系统管路压力大	F29	活塞密封件磨损
F3	油液粘度高	F12	轴向径向半径小	F21	Y 型圈损坏	F30	液压缸安装定心不良
F4	电机反转	F13	液针转动不灵活	F22	法兰面密封不良	F31	液压缸含空气
F5	过滤器堵塞	F14	盖板、轴同心度差	F23	结合面堵塞	F32	液压缸安装位置偏移
F6	压力阀失灵	F15	泵、电机联轴同心度差	F24	系统供油不足	F33	活塞杆全长和局部弯曲
F7	油位不足	F16	泵中有杂质	F25	阀内泄露量大	F34	缸内锈蚀或拉伤
F8	泵体泵盖未密封	F17	溢流阀调定压力低	F26	复位弹簧损坏		
F9	主动轴电机联轴不同心	F18	溢流阀滑阀卡死	F27	活塞杆碰伤拉毛		

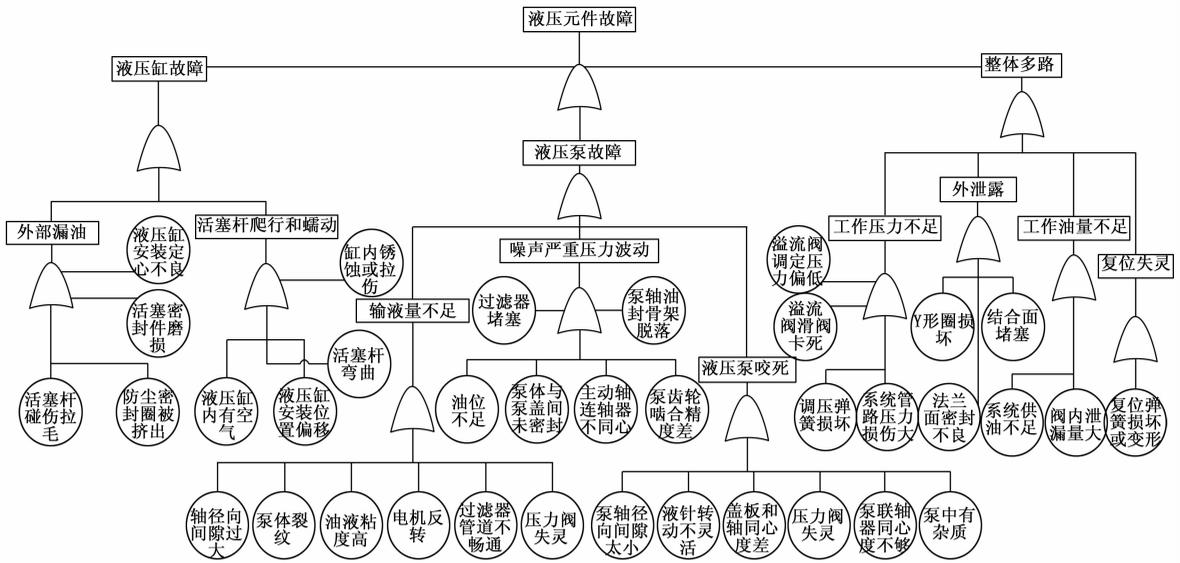


图 2 液压元件故障图

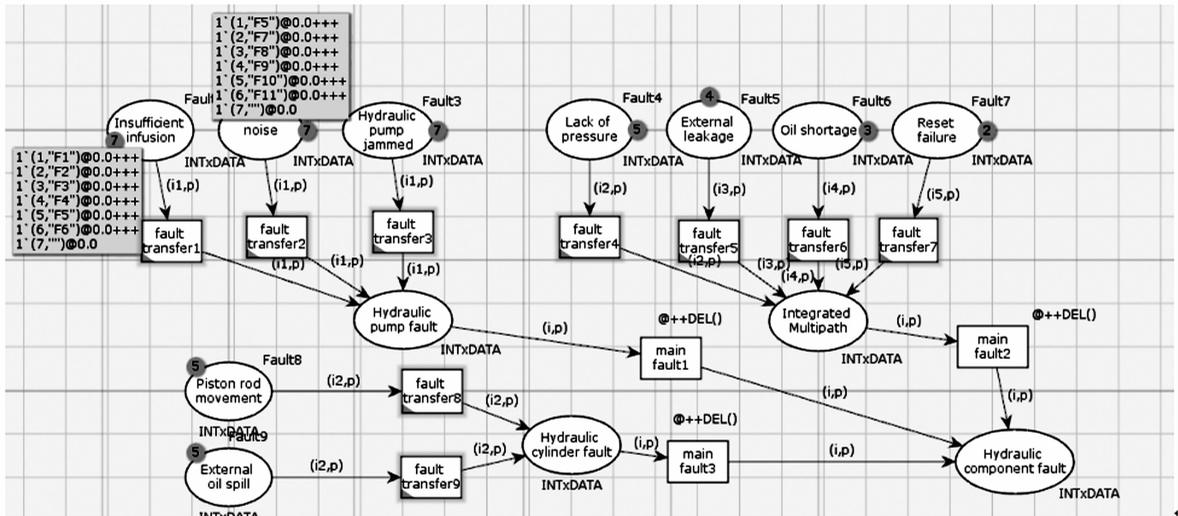


图 3 液压元件有色 Petri 网模型构建

```

▼ Declarations
▶ Standard priorities
▼ Standard declarations
  ▼ colset DATA=string;
  ▼ colset INT = int timed;
  ▼ colset INTxDATA = product INT * DATA timed
  ▼ val Fault1=1' (1,"F1")+
    1' (2,"F2")+
    1' (3,"F3")+
    1' (4,"F4")+
    1' (5,"F5")+
    1' (6,"F6")+
    1' (7,"")
▶ val Fault2
▶ val Fault3
▶ val Fault4
▶ val Fault5
▶ val Fault6
▶ val Fault7
▶ val Fault8
▶ val Fault9
▼ var i:INT;
▼ colset SmallInt1=int with 1..7;
▼ colset SmallInt2=int with 1..5;
▼ colset SmallInt3=int with 1..4;
▼ colset SmallInt4=int with 1..3;
▼ colset SmallInt5=int with 1..2;
▼ var i1:SmallInt1;
▼ var i2:SmallInt2;
▼ var i3:SmallInt3;
▼ var i4:SmallInt4;
▼ var i5:SmallInt5;
▼ var p: DATA;
▼ colset UNIT = unit;
▼ colset BOOL = bool;
▼ colset INTINF = intinf;
▼ colset TIME = time;
▼ colset REAL
▼ fun DEL() = exponential(1.0/5.0);

```

图 4 液压元件有色 Petri 网模型声明

各个目标故障的故障来源个数加 1 决定。由于液压系统故障分布基本按照指数分布, 所以所以在声明中, 为变迁添加指数分布函数 DEL ()。

对于其他机械系统进行故障建模的情况, 只需要改变声明含义, 以及根据现实情况改变故障的分布函数就可以容易使用该建模方法。

2.3 CPN 仿真分析

机械系统故障诊断分析中重要的一环就是了解其故障的传递过程, 进行故障有色 Petri 网的仿真可以帮助我们更好了解故障的发展趋势。如图 5 所示, 有色 Petri 网模型上的工具栏为仿真工具栏, 第一位回到初始状态, 第二为停止, 第三为步进, 第四为自动持续仿真, 本次以仿真工具第 6 个按钮执行快速自动模拟, 即通过随机选择的绑定元素, 并执行事件发生序列, 而不用显示当前每一步之间的状态, 最终的库所状态是在执行 50 步仿真后的结果。可以得知最终液压元件故障库所中含有 12 个托肯, 如 1' (4," F9") @7.6459660905 代表故障来

于故障信息的产生完全随机, 所以声明 colset SmallInt = int with 1..7; 代表产生一个 1-7 中的一个随机数, 其中个数由

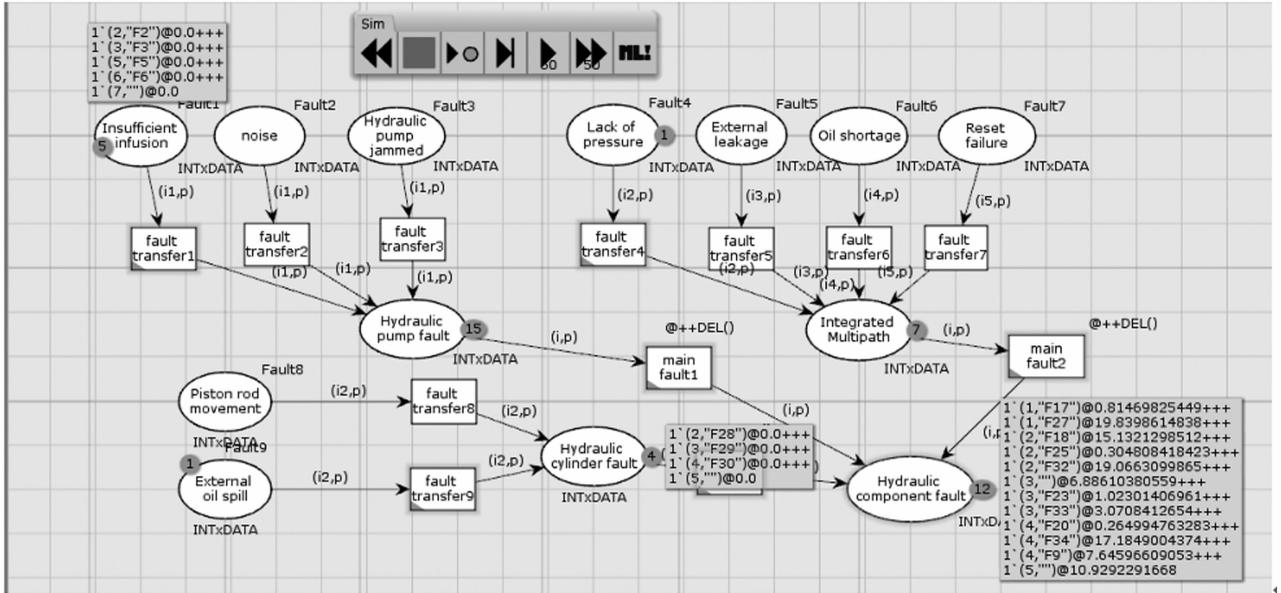


图 5 液压元件故障 CPN 模型仿真

源为主动轴与电机联轴不同心导致的噪声严重与压力波动，从而导致液压泵故障，“@”符号之后的显示为经过变迁到达库所的时间，其时间主要来源于故障发生的指数分布函数。由图可知，液压缸故障中，液压缸安装位置偏移、活塞杆弯曲、缸内锈蚀经故障传递变迁至液压缸故障，再由主故障传递变迁经过指数分布函数的时间传递至最终液压元件故障库中所。整体多路故障中，库所 Fault5、Fault6、Fault7 中不含托肯，其变迁 fault transfer5、fault transfer6、fault transfer7 三种变迁无绿色边框，证明没有无法使能，与库所中不含托肯相一致。由此可见，对于有色 Petri 网进行仿真，其仿真直观高效，可以快速的进行故障传递的模拟以及了解故障的发展趋势。

2.4 CPN 状态空间分析

对于 Petri 网，尤其是复杂的高级 Petri 网进行状态空间分析非常有必要，这是因为在其库所、变迁数量比较多，其间关系更复杂的情况下，很容易出现严重的状态空间爆炸问题，而且 Petri 网开始没有引入层次化的建模方法，所以状态空间爆炸将不利于系统的优化。

接下来，根据这个 CPN 模型，利用 CPNtools 状态空间工具得出状态空间报告 (state space report)，如图 6 为 CPN 模型的状态空间统计信息 (state space statistics)，对于此协议模型，我们得知其中有 62627 个节点 (Nodes) 以及 151862 条弧 (Arcs)，完全状态空间的构造需要 300 秒 (Secs)。强连接图 (Scc graph) 的节点与弧数量与整体一致，说明在这个状态网络之中并没有产生循环。整个序列是有穷的，并且协议可以终止。同时再次进行状态空间分析时，其状态空间统计信息如图 6 右半边所示，其节点数与弧数量与图 6 结果不相同，主要是因为变迁 fault transfer 中含有随机函数。

Petri 网的有界性属性反映模拟系统运行过程中对有关资源的容量要求，从而判断网络的安全性。状态空间分析可以得出网络的有界性属性 (Boundedness Properties)，如图 7 所示为此模型中库所的最佳上界 (best upper integer bound) 与最佳整数下界 (best lower integer bound)。最佳上界为具体规定

statistics	Statistics
State Space	State Space
Nodes: 62627	Nodes: 94396
Arcs: 151862	Arcs: 98205
Secs: 300	Secs: 300
Status: Partial	Status: Partial
Scc Graph	Scc Graph
Nodes: 62627	Nodes: 94396
Arcs: 151862	Arcs: 98205
Secs: 4	Secs: 3
第一次分析	第二次分析

图 6 CPN 状态空间统计信息

了可以在任何可达状态中，驻留在一个库所上的托肯的最大数量，例如在库所 External leakage 中最大上界为 4，代表在其库所中最大有 4 个托肯，而最佳下界为 1，说明在此种随机事件函数的情况下，任何可达状态中可以驻留在库所中的托肯的最少数量为 1，说明此库所为有穷，同理其他库所的状态也是有穷的。

Boundedness Properties

Best Integer Bounds	Upper	Lower
New_Page'External_leakage 1	4	1
New_Page'External_oil_spill 1	2	1
New_Page'Hydraulic_component_fault 1	2	0
New_Page'Hydraulic_cylinder_fault 1	4	0
New_Page'Hydraulic_pump_fault 1	3	0
New_Page'Hydraulic_pump_jammed 1	7	4
New_Page'Insufficient_infusion 1	7	4
New_Page'Integrated_Multipath 1	3	0
New_Page'Lack_of_pressure 1	5	2
New_Page'Oil_shortage 1	3	0
New_Page'Piston_rod_movement 1	5	1
New_Page'Reset_failure 1	7	0
New_Page'noise 1	2	4

图 7 CPN 有界性属性

模块实现与惯测装置静态测试项目的通讯,并能给出正确的惯测测试数据值;模拟简弹测试故障时,故障模拟器软件控制串口通讯模块实现与惯测装置静态测试项目的通讯,并能给出故障的惯测测试数据值。

3.10 惯导系统测试项目模拟

模拟简弹正常测试功能时,故障模拟器软件控制串口通讯模块实现与惯导系统静态测试项目的通讯,并能给出正确的静态位移量数据;模拟简弹测试故障时,故障模拟器软件控制串口通讯模块实现与惯导系统静态测试项目的通讯,并能给出故障的静态位移量数据。

3.11 准备程序测试项目模拟

模拟简弹正常测试功能时,故障模拟器软件控制串口通讯模块实现与准备程序测试项目的通讯,并能给出正确信息数据;模拟简弹测试故障时,故障模拟器软件控制串口通讯模块实现与准备程序测试项目的通讯,并能给出非正确信息数据。

设计完成的简弹测试故障模拟器软件操作简单,功能完备,界面友好,用户体验方便简单,软件配合简弹测试故障模拟器硬件可实现模拟简弹正常测试项目和模拟简弹测试故障等功能,如图 5 所示。

4 结束语

本文设计的简弹测试故障模拟器系统通过了具体型号验证,完成了验收测试工作。测试结果表明:研制的简弹测试故障模拟器系统能够稳定可靠运行,各项功能及技术指标均符合

(上接第 14 页)

根据以上分析,可以得知此网络状态空间属于一种比较大的情形,需要一定时间来进行完整的状态空间分析,由有界性分析得知本网络中并不存在循环,不会产生死锁状态,不会产生状态空间爆炸的情况,属于一种安全网络。

如果产生空间爆炸的情况,需要对模型进行重新分析,对结构进行拆分以找出产生空间爆炸的节点,然后对库所变迁之间的弧进行重新设置,并对声明函数进行改进以使得模型变为安全网络。

3 结论

本文提出了一种通用的基于有色 Petri 网的机械系统故障诊断的建模方法,将故障来源以整数集、字符串集的颜色积集表达,通过增加时间函数以及声明得使仿真符合现实中的情况。针对其他系统的故障诊断,就可以简单的通过改变 CPN 模型中的故障分布函数、故障之间的相互关系函数进行分析,提高了系统故障的建模效率,可通过传统故障树与此模型的对比更加明显的看出。通过工具仿真分析可以方便的知道故障的传播过程以及发展趋势,通过状态空间的分析可以得知网络的运行状况及判定模型的安全可用性,以此对模型进行优化改进使得不会产生空间爆炸的情况,可以看出此研究方法对于机械系统故障诊断模型有着较强的通用性。

参考文献:

[1] 邹芳. 机械设备故障诊断技术的现状及趋势 [J]. 时代农机, 2016 (2): 8-10.
 [2] 李文刚, 胡林桥, 胡强. 数控机床故障诊断综述 [J]. 科技展望, 2014 (20): 235-237.

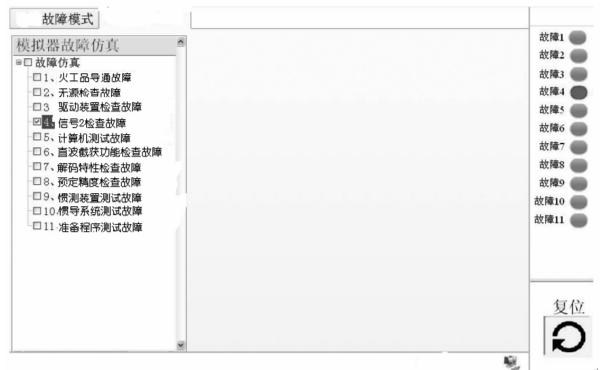


图 5 简弹测试故障模拟器软件示意图

设计要求。可以很好地完成简弹测试设备操作手对简弹测试的操作训练,对我国国防建设具有重要意义。

参考文献:

[1] 江维. 某导弹便携式测试系统的研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
 [2] 吴蕴轩. 导弹校准系统的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
 [3] 张志峰. 导弹模拟器通用开发平台研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
 [4] 胡永红, 楚亚菲, 丁璐. 小型飞行器综合测试系统方案设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (8): 1062-1064.
 [3] 王卫民, 贺冬春. 故障诊断知识建模及系统 [J]. 计算机应用与软件, 2016 (1): 28-30, 72.
 [4] 李娟莉, 杨兆建, 庞新宇. 面向知识工程的提升机智能故障诊断方法 [J]. 煤炭学报, 2016 (5): 1309-1315.
 [5] Dai X, Li J, Meng Z. Hierarchical Petri net modelling of reconfigurable manufacturing systems with improved net rewriting systems [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009, 222.
 [6] Talebberrouane M, Khan F, Lounis Z. Availability analysis of safety critical systems using advanced fault tree and stochastic Petri net formalisms [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 193-203.
 [7] 李俊. 基于 Petri 网的机械系统可靠性分析与故障诊断研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
 [8] 曾庆锋, 何正友, 杨健维. 基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (14): 5-11, 127.
 [9] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别 [J]. 电力系统保护与控制, 2016 (2): 56-64.
 [10] Liu F, Heiner M. Modeling membrane systems using colored stochastic Petri nets [J]. Natural Computing, 2013, 124: .
 [11] 曾哲军, 杨进. 基于有色 Petri 网的工作流故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (3): 719-722.
 [12] 陈国宏, 马云峰. 基于 CPNtools 的城市突发事件应急管理系统的性能分析 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2012 (3): 419-423.
 [13] 胡筱敏, 马云峰, 王宇佳, 等. 基于 CPNtools 的环评工程分析信息化技术的研究 [J]. 环境保护科学, 2011 (3): 63-65, 72.
 [14] 贾文彬. VMC650 五轴联动 (立式) 数控加工中心液压系统可靠性评价 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.