

doi: 10.7690/bgzdh.2018.10.011

基于故障树分析法与寻址技术的航空电源系统故障诊断系统

黄泽波¹, 李占峰¹, 熊亮², 王顺利³

(1. 西南科技大学制造科学与工程学院, 四川 绵阳, 621010; 2. 西南科技大学工程技术中心, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为解决当前航空电源系统故障诊断存在的不足, 提出将故障树分析法与寻址技术相结合的方法。在以 PCI 总线 and 计算机编程技术为核心的测试平台的基础上, 分析航空电源系统的结构和工作状况, 设计出适用于航空电源系统的故障诊断系统, 并以某类航空电源系统为例进行实验验证。结果表明: 该方法测试效率高、故障分析到位、定位准确, 能解决航空电源系统故障诊断中的不确定性问题以及复杂系统发生故障时的多故障现象, 提高航空电源系统的维修性和安全性。

关键词: 航空电源系统; 故障诊断; 寻址技术; 测试系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis System of Aviation Power System Based on Fault Tree Analysis and Addressing Technology

Huang Zebo¹, Li Zhanfeng¹, Xiong Liang², Wang Shunli³

(1. School of Manufacturing Science & Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China;
2. Engineering Technology Center, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China;
3. School of Information Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of the fault diagnosis of the current aviation power system, the method of combining fault tree analysis with addressing technology is proposed. On PCI bus and computer programming technology as the core of the test platform, on the basis of analysis of aircraft power supply system structure and working condition, design is suitable for the aircraft power system fault diagnosis system, as a case study of certain types of aircraft power supply system for experimental verification. Test results show that the method is of high efficiency, fault analysis in place, accurate positioning and can solve the problem of the uncertainty in aircraft power system fault diagnosis and fault phenomenon of complex system failure occurs, improve the maintainability of aircraft power supply system, and security.

Keywords: aviation power supply system; fault diagnosis; addressing technology; the test system

0 引言

航空电源为飞机提供安全可靠的电能, 保证飞机正常工作。随着航空工业的快速发展, 飞机朝着全电方向发展, 用电设备越来越多。飞机的工作环境比较复杂, 对电源系统的性能要求也越来越高。为了保证电源系统的安全可靠性, 必须对其进行故障诊断。航空电源系统作为飞机的关键设备和系统, 在设计、制造、试验过程中进行全面测试, 有效定位并剔除潜在的故障, 对于航空电源系统甚至整个航空工业的发展具有重要意义^[1]。

现有的故障诊断方法存在一定的不足。目前, 电源系统故障检测和诊断技术发展迅速, 虽然新的鲁棒故障检测诊断方法和网络控制系统的故障诊断在理论和工程应用上取得进展, 但是用于具体工业过程还存在很多问题, 无法大规模应用。笔者提出

将故障树分析法与寻址技术相结合的方法, 以故障树的形式全面、系统、层次性地分析航空电源系统潜在的故障, 并对故障进行分类处理, 在下位机单片机系统中通过 4 条地址线对存在的故障信号进行二进制编码, 通过上位机监控软件, 编写寻址程序进行寻址, 通过地址获取对应的信号、测试系统进行数据测量, 获取实测数据并与设定的故障门限值进行比较, 从而确定被测信号是否故障。测试系统以微型计算机的测试系统为核心, 融合信号处理、传感器技术、微电子技术以及数据库管理等技术^[2]。

1 测试系统概述

航空电源系统的主要功能是产生符合飞机上相关标准的电能, 并且按相应的配电逻辑输送到机上的用电设备。该电源系统由主充电器和主蓄电池组成, 其主要功能是根据外部条件和充电控制逻

收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-09-13

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2017F0013)

作者简介: 黄泽波(1988—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 从事电池检测与维护研究。

辑,实现对主蓄电池的充电,对主蓄电池组进行状态检测和故障警告,并且具备自检功能,在充电异常时实时警告和保护^[3]。

笔者研究的对象航空电源系统由 1 组镉镍电池组、1 个充电模块、2 个调压器和 1 个逻辑控制板组成。镉镍电池组内部含有 36 只单体镉镍蓄电池,分两路独立输出,每路由 18 只单体蓄电池串联而成,通过飞控盒 K、F 端对外供电,能够为飞机控制系统供电,以实现全时连续供电。故障测试系统的组成结构如图 1 所示。

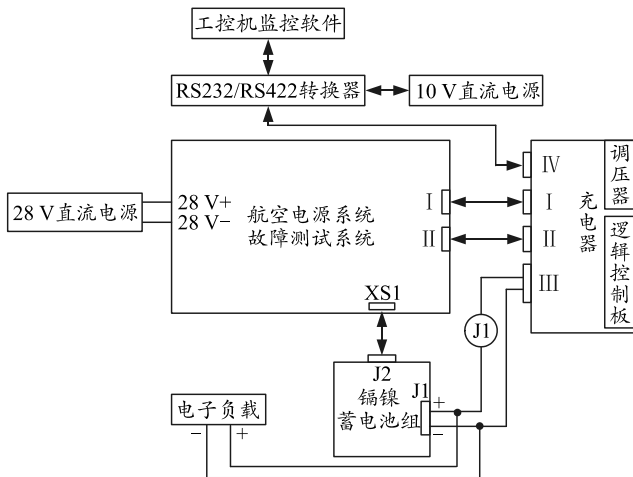


图 1 测试系统组成结构

备和负载箱。工控机测试设备选用研华的 17 寸抽拉折叠式显示屏,IPC-610H/701VG/I5-2400/4G/500G 的主机作为测试系统的核心部分。通过 PCI 总线扩展 A/D 数据卡、I/O 控制卡来满足测试的要求。数据采集卡采用泓格的 PCI-1602U,具备 CI 总线即插即用的特点,分辨率为 16 bit,32 个采样通道。选用泓格的 PIO-D96U 数字量输入输出卡,该卡具有 24 路数字可编程 I/O,负责信号的量程切换,电源和负载的控制。该系统采用 485 通信,负责具备 485 接口电源和负载的控制及获取电压、电流及功率等数据^[4-6]。负载箱里面包含:继电器输出板、数字量端子板、霍尔电流传感器、信号调理板和重要回流条等模块。故障诊断系统的硬件组成结构如图 2 示。

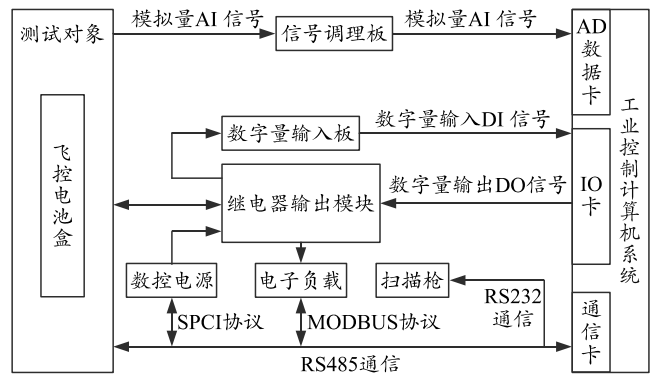


图 2 测试系统硬件组成

2 测试系统的软硬件设计

测试系统的硬件平台采用 PCI 总线系统,由工业控制计算机系统、数据采集系统、负载箱和被测对象等组成。设备硬件主要包括工控计算机测试设

本测试系统是基于 Microsoft .NET 平台采用 C#语言作为上位机编程语言和 SQL Sever 数据库进行数据管理,采用 C#面向对象的图像化编程用于人机界面和测试流程的控制,上位机主界面如图 3。



图 3 故障诊断系统上位机界面

3 现有故障诊断方法分析

随着航空工业的快速发展，国内外在航空电源系统的故障诊断上取得很大进展。目前故障诊断的方法可分为基于解析模型、基于分类方法及数据驱动等方法^[7-10]。

1) 基于解析模型的方法。

该方法最大的优点是对于未知故障具有固有的敏感性，具体可分为参数估计方法和状态估计方法。参数估计方法的基本思想：通过检测系统物理参数的变化预知系统可能发生的物理故障，比如系统的转动惯量、质量等物理参数的变化都可能引起不同故障的产生。状态估计法的思想：从估计系统的状态入手，通过状态观测器重构系统状态，进而产生残差来实现故障诊断，但是目前针对航空电源系统故障诊断中的应用很少，主要是因为航空电源系统不能有效建立完整、精确以及包含所有约束条件的数学模型，难以在时域内得到精确的数学解。

2) 基于分类方法。

该方法通过处理测量到的输入/输出信号来实现故障诊断，可以细分为基于模式识别和基于神经网络的方法，前提是必须拥有大量的关于系统故障的先验知识，具有实测到大量的各类故障样本数据。这样才能从这些故障样本实例中学到故障模式集，并对未知的故障模式进行判别。因为有些故障的产生周期很长，要想获得大量的故障样本往往需要很长时间。

3) 基于数据驱动的故障诊断方法。

该方法包含机器学习、多元统计分析、信号处理及信息融合等方法。数据驱动的故障诊断方法就是通过对过程运行数据进行分析处理，在无须知道系统精确解析模型的情况下，完成对对象的故障诊断；随着工程系统日趋大型化和复杂化，并且受到多种不确定因素的干扰情况下，数据驱动的方法将无法满足要求。

笔者以获取的历史飞行数据、产品测试数据、测试系统参数等作为故障树分析的数据基础，不需要建立定量数学模型。首先通过故障树模型的分析，全面诊断航空电源系统是否存在(潜在的)故障，然后引入计算机中的寻址技术，将故障或是将要发生的故障进行编址，通过上位机软件对地址进行跟踪测量，获取即时测量数据，与设定故障门限值进行对比，以快速定位故障。该故障诊断方法在复杂系统故障诊断中的应用具有一定优势^[10]。

4 故障诊断系统的理论分析

首先对航空电源系统进行故障树分析，得出电源系统的故障模式；然后对存在的故障模式在电源系统下位机软件中进行编码，将检测信号与地址码一一对应起来，通过调用上位机的测试软件来定位下位机对应的地址码信号，并进行实时测量，将获取的实测值与故障门限进行对比，就能直观地找到故障。故障检测与诊断的原理如图 4^[12]所示。

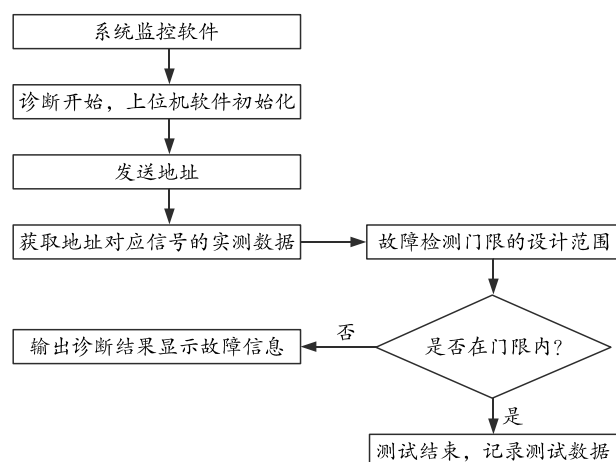


图 4 故障检测与诊断原理

4.1 故障树分析法的基本原理

故障树模型是描述对象结构、功能和关系的一种定性因果模型，用于体现故障发生的层次性及下层故障源和上层故障现象之间的因果关系。故障树分析法是一种自上而下逐层展开的图形演绎分析法，通过定性分析找出导致顶层事件发生的所有可能故障情况，即寻找故障树的全部最小割集。通过最小割集指明故障源及故障原因，方便对电源系统的维修^[13-14]。基于故障树分析法的结构函数定义：设故障树中有 n 个底层底事件 x_1, x_2, \dots, x_n , $C \in \{x_1, \dots, x_n\}$ 的集合，当其中全部底事件都发生时，定事件必然发生，则称 C 为故障树的一个割集。若 C 是一个割集，且任意去掉其中一个底事件后就不再是割集，则称 C 是最小割集^[15]。若故障树有 K 个最小割集，只要有一个最小割集 $k_j (j=1, 2, \dots, k)$ 中的全部底事件 X_i 均发生，故障必定发生， K_j 表示为：

$$K_j(x) = \bigcap_{t=1}^m X_t. \quad (1)$$

K 个最小割集中，只要一个发生，顶事件就会发生，因此故障树的机构函数表示为：

$$H(x) = \bigcup_{j=1}^k k_j(X) = \bigcup_{j=1}^k \bigcap_{t=1}^m X_t. \quad (2)$$

故障树分析法把系统的失效状态作为故障树的顶事件，用规定的逻辑符号表示，找出导致这一不希望事件所有可能发生的直接因素和原因。它们从处于过渡状态的中间事件开始，并由此逐步深入分析，直到找出事故的基本原因，即故障树的底事件为止。这些底事件又称为基本事件，其数据是已知的，或者已经有过统计或实验结果。故障树分析一般可分为以下阶段：1) 选择合理的顶事件及系统的分析边界条件和定义范围，并确定正常与失效的标准；2) 建故障树；3) 对故障树进行简化；4) 定性分析；5) 定量分析^[16]。

顶事件根据研究的对象选取，一般是指系统不希望发生的故障事件。为了能进行分析，顶事件必须有明确的定义，能够定量评价，最终分解出故障的原因。笔者经过分析，将航空电源系统故障选为顶事件。顶事件和一级事件如图 5 所示。

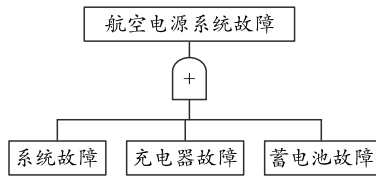


图 5 顶事件和一级事件

对顶事件进行分析，得出造成顶事件发生的原因，即 3 个一级事件系统故障、蓄电池组故障及充电器故障。事件的故障树如图 6—8 所示。

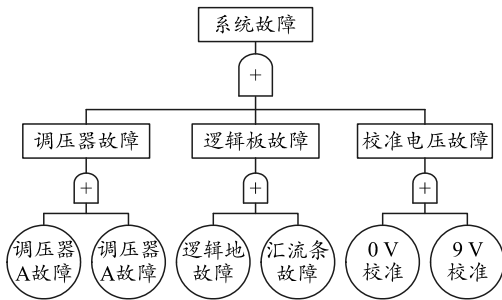


图 6 系统故障树

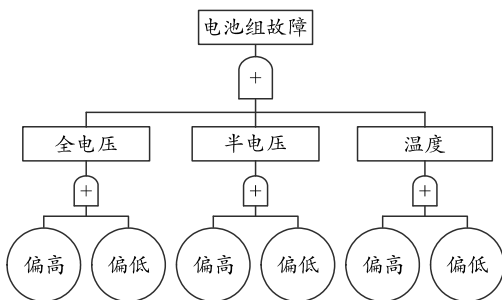


图 7 电池组故障树

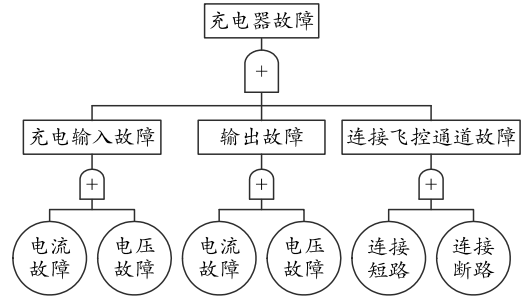


图 8 充电器故障树

通过对被测对象进行故障树分析，得出航空电源系统所有的故障情况如表 1。

表 1 故障存在的情况

序号	被测信号名称	故障可能原因
1	K 端蓄电池组电压	蓄电池故障
2	F 端蓄电池组电压	蓄电池故障
3	K 端蓄电池组半电压	蓄电池故障
4	F 端蓄电池组半电压	蓄电池故障
5	TRU 逻辑“地”信号	整流器故障
6	9 V 校准电压	逻辑控制板故障
7	主充电器	主充电器故障
8	重要直流汇流条	汇流条断路
9	K 端蓄电池组温度	蓄电池故障
10	F 端蓄电池组温度	蓄电池故障
11	0 V 校正电压	逻辑控制板故障
12	TRU 飞控通道连接电路	整流器故障
13	调压器 A 输出电压	调压器故障
14	调压器 B 输出电压	调压器故障
15	K 端蓄电池组和 FCC-1 接通	飞控通道故障
16	F 端蓄电池组和 FCC-2 接通	飞控通道故障

4.2 寻址编码的基本原理

寻址编码技术是指寻找数据及其他信息的地址，进行编码并定位的技术^[17]。寻址编码技术先后有 3 个环节：1) 对信号进行编址；2) 寻址故障信号；3) 故障信号定位。其作用于寄存器、主存储器和输入输出设备。

编址方式是对信号进行编码方法的主要内容，包括编址单位、零地址空间个数、并行存储器编址技术、输入输出设备的非线性编址技术；常用的编址单位有字编址、字节编址、位编址。寻址方式是指寻找操作数及数据存放单元的方法，一般有 3 种寻址方式：立即数寻址、寄存器寻址及主存储器寻址。定位方式是指把指令和数据的逻辑地址转换成主存储器的物理地址的方式，包含直接定位方式、静态定位及动态定位 3 种方式^[18]。

采用位编址的方式对被测信号进行编址，用主存储器寻址方式对下位机编好的信号地址来寻址，测试过程中利用动态定位的方法对故障信号定位。采取这种寻址编码的技术支持非数值运算，提高了

主存储器的利用率和快速定位故障的效果。

经过对被测信号原理分析，在下位机进行地址编码，由上位机进行寻址，通过控制系统将信号导入故障测试平台进行测量，将采集的数据在上位机中进行定量分析，对比被测信号的故障门限设定值，然后确定故障的位置。

计算机中一般采用二进制和十六进制计数。考虑到采集信号的数量，该设计采用二进制计数，节省状态数。设 $f(x)=x^n-1$ ，显然 $f(x)$ 最大时的 X 为最节省状态的进制数，即选取二进制计数。

故障编码和检测故障门限的过程中，首先对电源系统可能存在故障的信号进行地址编码，然后进行定量分析，测试被控过程中的输入信号在正常范围内的变动^[18]，即

$$y_{\min} < y < y_{\max} \quad (3)$$

如果此范围被突破，可认为故障发生或是将要发生，则基于寻址的原理，对被测信号进行编址。故障检测门限设定是结合手动多次测量和计算，并在实际工况中反复工作得出的数据，经过严格的计算得出故障发生的区间，突破设定的区间则认为故障。故障编码和检测门限如表 2 所示。

表 2 信号编码及信号故障门限设定 mA

地址	信号名称	故障门限
0000	K 端蓄电池组电压	≥ 5.10
0001	F 端蓄电池组电压	≥ 5.10
0010	K 端蓄电池组半电压	与 0000 差的绝对值不大于 0.30
0011	F 端蓄电池组半电压	与 0001 差的绝对值不大于 0.30
0100	TRU 逻辑“地”信号	≤ 2.20
0101	9V 校准电压	7.92~8.08
0110	主充电故障	3.402~3.80
0111	重要直流汇流条	4.502~6.50
1000	K 端蓄电池组温度	3.402~4.30
1001	F 端蓄电池组温度	3.402~4.30
1010	0V 校正电压	1.922~2.08
1011	TRU 飞控通道连接电路	4.502~6.50
1100	调压器 A 输出电压	6.002~6.40
1101	调压器 B 输出电压	6.002~6.40
1110	K 端蓄电池组和 FCC-1 接通	≥ 4.80
1111	F 端蓄电池组和 FCC-2 接通	≥ 4.80

5 实验验证及结果分析

本测试系统可模拟和测试航空电源系统在不同工况下的性能参数经过 30 次等精度数据的测量，得出 30 次实测数据的范围。实测值即 30 次测量数据的平均值。实测数据如表 3 所示。

表 3 信号的实测值 mA

地址	实测值范围	实测值
0000	6.19~6.23	6.214
0001	6.19~6.22	6.220
0010	3.89~3.97	3.865
0011	3.87~3.89	3.864
0100	4.89~5.41	5.408
0101	7.97~7.99	7.980
0110	3.49~3.54	3.535
0111	5.40~5.42	5.410
1000	3.99~4.15	4.080
1001	6.03~6.09	6.080
1010	2.01~2.05	2.013
1011	3.53~3.57	3.542
1100	6.11~6.18	6.167
1101	6.16~6.19	6.164
1110	5.94~6.22	6.193
1111	6.19~6.23	6.220

以 K 端蓄电池电压为例，通过计算期望、方差以及对残差分布对其稳定性进行判定，即对 K 端蓄电池电压 30 次等精度独立测量数据如表 4 所示。

表 4 K 端蓄电池电压

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
数值	6.22	6.22	6.24	6.23	6.23	6.23	6.23	6.22
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
数值	6.23	6.22	6.23	6.22	6.23	6.22	6.23	6.23
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
数值	6.23	6.23	6.19	6.22	6.21	6.22	6.19	6.22
序号	25	26	27	28	29	30		
数值	6.23	6.23	6.23	6.23	6.22	6.22		

用 Matlab 软件计算得到 K 端蓄电池电压的期望 $E=6.2227$ ，方差 $\sigma=0.0108$ ，通过观察 K 端蓄电池电压的期望、方差以及残差的分布，并对比设定检测门限。测试系统的稳定性好，K 端蓄电池电压曲线如图 9 所示，残差分布如图 10 所示。

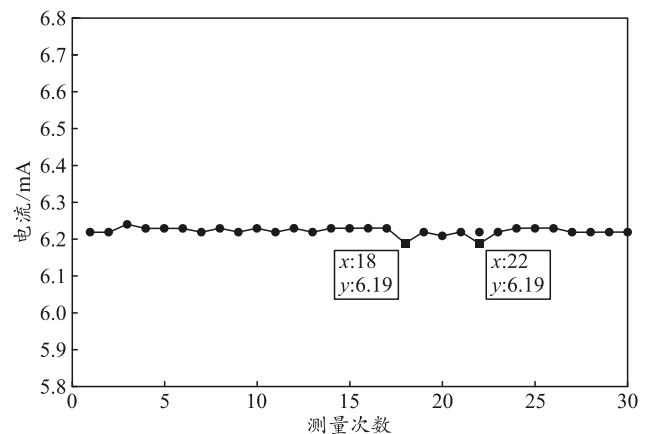


图 9 K 端蓄电池池电压

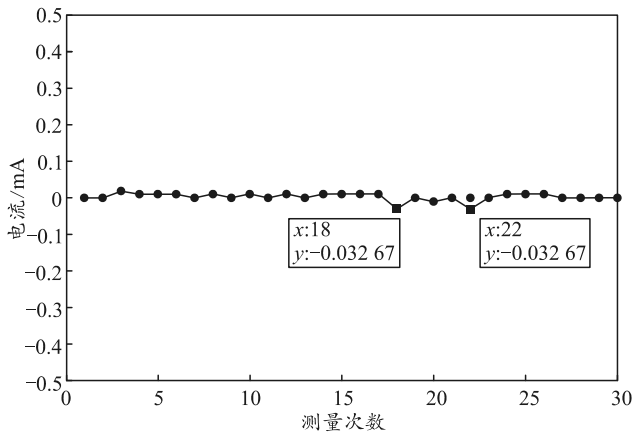


图 10 残差分布

对比故障设定门限发现，地址信号 0100、1011 测得数据不在门限设定范围内，则认为整流器故障。经过上位机故障寻址得出，整流器的逻辑故障和整流器飞控通道连接电路故障。

6 结束语

实验验证结果表明：笔者提出的故障树分析法与寻址技术方法能够有效解决电源系统故障诊断的问题。该方法思路清晰，不需要建立数学模型但是需要大量的历史数据，在电源系统故障检测上能够得到很好运用。

参考文献：

[1] 王树宗, 陶建武, 陶军. 飞机电源实时监测及故障诊断系统[J]. 火箭与制导学报, 2002, 22(4): 184-186.
 [2] 陈朝阳, 张代胜, 任佩红, 等. 基于故障树分析法的汽车故障诊断专家系统[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 130-133.
 [3] 朱云鹏. 基于故障树分析法的软件测试技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(13): 3387-3389.
 [4] 陈国华, 张根保, 任显林, 等. 基于故障树分析法的供应链可靠性诊断及仿真研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(10): 2305-2307.

[5] 文成林, 徐晓滨. 多源不确定信息融合理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 84-87.
 [6] REN L S, SHAO H D, BAO L H. Stress Management in Rock Drivage Team Based on Fault Tree Analysis Method[J]. Advanced Materials Research, 2014, 32(78): 873-877.
 [7] 张秦岭, 郭宏, 姜旭. 大型无人机电源系统故障诊断专家系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1026-1030.
 [8] 张爱玲, 张文英, 张瑞金. 控制系统故障检测与诊断技术的最新进展[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 660-663.
 [9] 孔宁, 李晓东, 罗万明, 等. 物联网资源寻址模型[J]. 软件学报, 2010, 21(7): 1658-1665.
 [10] 杨韦韦, 王东辉, 王跃萍. 基于 L1 自适应控制的飞机操纵面故障重构[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 4-7.
 [11] BARBARA T C, KRZYSZTOF B. Analysis of Undesirable Events Scenarios in Water Supply System by Means of Fault Tree Method[J]. Journal of Konbin, 2010, 35(58): 309-320.
 [12] 候方园. 基于 DHT 的物联网资源寻址关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 42-49.
 [13] 徐小龙, 耿卫建, 杨庚, 等. 分布式无线传感器网络故障检测算法综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4420-4424.
 [14] 饶翔, 王怀民, 陈振, 等. 云计算系统中基于伴随状态追踪的故障检测机制[J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 856-870.
 [15] 邵晨曦, 张俊涛, 范金锋, 等. 基于定性定量知识的故障诊断[J]. 计算机工程, 2006, 32(6): 189-191.
 [16] 李蔚, 俞芸萝, 盛德仁, 等. 基于动态数据挖掘的热力参数传感器的故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 694-701.
 [17] 杨培林, 徐凯, 薛冲冲, 等. 基于模型检测的机电系统 FMEA 研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 162-167.
 [18] 王余奎, 李洪儒, 许葆华. 基于 SIE 和 SVR 的液压泵故障定量诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 33-41.