

文章编号: 1004-4353(2016)03-0267-04

基于最小割集的光学测云系统故障诊断

尹延通¹, 刘高飞^{1*}, 季亮²

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 解放军理工大学理学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 针对光学地面测云系统投入使用时间较短, 现场数据较少, 无法及时诊断故障等问题, 应用 Petri 网络的矩阵算法求得该系统故障树的最小割集和最小路集, 并结合结构重要度系数, 提出了基于最小割集的故障树诊断方法. 经实例分析表明, 该方法缩短了故障诊断时间, 提高了设备的维修效率.

关键词: 光学测云系统; 故障诊断; 故障树; 最小割集

中图分类号: TJ772.1 **文献标识码:** A

Fault pattern analysis of optic droplets detection systems based on minimal cut sets

YIN Yantong¹, LIU Gaofei^{1*}, JI Liang²

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China; 2. Institute of Philosophy, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China)

Abstract: Aming at the problem that the faults of optical ground-based droplets detection system is hard to analyse due to its short serving time and insufficient raw data. The MCS and MRS of the systematic fault tree is studied and acquired by using Petri network matrix algorithm. Based on MCS analysis and combined with structure weight factor and fault deduction method, analysis speed for systematic faults is largely increased and the repair effectiveness of new equipments is enhanced.

Keywords: optical droplets detection system; fault diagnosis; fault tree; minimal cut sets

故障诊断技术对于提高系统可靠性和稳定性具有重要意义. 目前故障诊断方法主要分为: 基于系统数学模型、基于系统输入输出信号、基于人工智能和故障树(fault tree)的分析方法等^[1-2]. 在这些方法中, 故障树分析法是用于大型复杂系统可靠性、安全性分析和风险评估的一种重要方法, 其中求解故障树的最小割集(minimal cut sets, MCS)是故障树分析法的一种重要手段和目的^[3]. 目前 MCS 的求解方法主要有上行法、下行法、应用 Petri 网求解法和基于二元决策图技术的方法^[4]. 王巍等开发了基于故障树最小割集和最小路集的诊断推理策略, 并提出了测点配置和优化的方法^[5]. 朱大奇等计算了故障树最小割集的重要度,

并在量级上进行了分析比较, 为系统的故障源搜寻提供了具体有效的测试步骤^[6].

云的形态、分布、数量及其变化标志着大气运动的状况, 对其观测对军事活动、国民经济和社会服务等方面具有重要意义^[7]. 测云系统集成红外光学、电子、机电、自动化技术于一体, 实现了全天空云量、云族和云分布的昼夜连续观测, 但是由于该系统构成较为复杂, 且投入使用时间较短, 故系统出现故障时, 难以及时判明故障原因, 影响系统的功能发挥. 本文根据测云系统的结构特点, 利用 Petri 网络模型进行建模, 并综合系统结构重要度系数以及各部件故障判明方式, 对各部件进行排序, 以此及时判明故障原因, 提高了故障诊断的效率.

收稿日期: 2016 - 05 - 17

* 通信作者: 刘高飞(1961—), 男, 副教授, 研究方向为装备质量与可靠性.

1 光学地面测云系统

如图 1 所示,测云系统由光学测量分系统、采集与控制分系统、数据处理分系统 3 部分组成. 光学测量分系统是系统的核心,主要用于获取天空红外辐射数据,为云量、云族和云分布的分析提供原始数据;采集与控制分系统主要用于将光学测量分系统采集的天空红外数据传输至数据处理分系统,并采集系统参数,控制、监测整机工作过程;数据处理分系统是通过与采集与控制分系统配合,发出有效指令控制光学测量分系统有序工作,同时处理天空红外辐射数据,得到云量、云族及云分布的分析计算结果,并进行相应的显示存储.

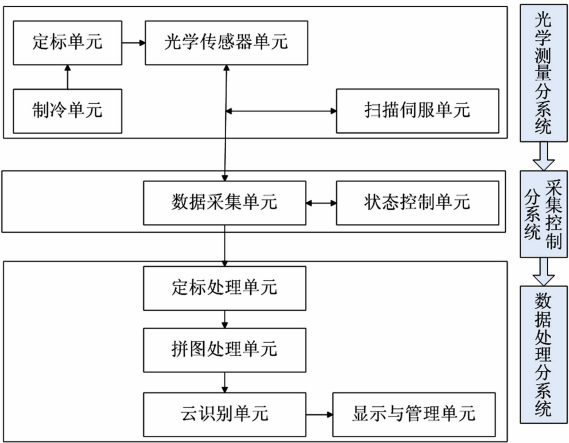


图 1 光学地面测云系统的组成框图

2 系统故障树的 MCS 求解

以系统故障为顶事件,逐层对系统各模块进行图形演绎,找到导致测云系统故障的全部直接原因和间接原因,即可识别测云系统的所有故障模式^[5]. 根据测云系统的结构原理,本文给出了如图 2 所示的系统故障树. 从图 2 中可以直观地看出测云系统各事件之间的逻辑关系,利用该图可初步判断故障的传递路径. 系统故障事件编码如表 1 所示.

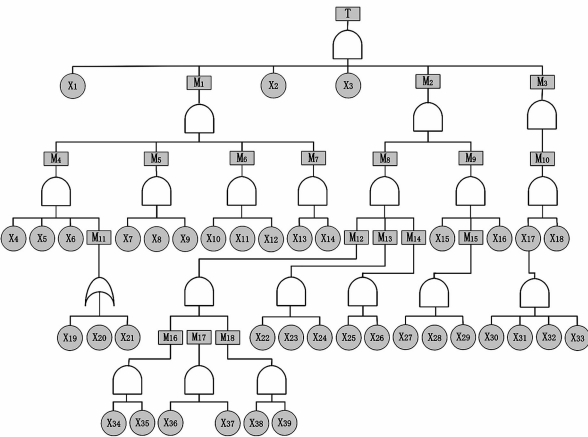


图 2 光学地面测云系统的故障树模型

表 1 光学地面测云系统的故障事件名称及其代码符号

代码	事件名称	代码	事件名称	代码	事件名称
T	测云系统故障	X ₂	通信故障	X ₂₂	RS485 接口故障
M ₁	光学测量分系统故障	X ₃	MEGA128 系统故障	X ₂₃	干燥剂故障
M ₂	数据处理分系统故障	X ₄	红外焦平面阵列故障	X ₂₄	铂电阻故障
M ₃	采集与控制分系统故障	X ₅	红外镜头污染	X ₂₅	调理电路故障
M ₄	红外组件故障	X ₆	红外保护窗磨损	X ₂₆	A/D 转换电路故障
M ₅	定标机构故障	X ₇	定标黑体损坏	X ₂₇	湿敏电容故障
M ₆	扫描伺服机构故障	X ₈	半导体制冷故障	X ₂₈	振荡电路故障
M ₇	激光回波测量机构故障	X ₉	散热片损坏	X ₂₉	A/D 转换电路故障
M ₈	环境参数测量传感器故障	X ₁₀	机械轴故障	X ₃₀	湿敏电容故障
M ₉	系统参数测量传感器故障	X ₁₁	步进电机故障	X ₃₁	振荡电路故障
M ₁₀	ARM 系统故障	X ₁₂	角度限位开关故障	X ₃₂	发射电路故障
M ₁₁	镜头保护机构故障	X ₁₃	激光器故障	X ₃₃	发射镜头故障
M ₁₂	环境温度传感器故障	X ₁₄	采集板故障	X ₃₄	接收电路故障
M ₁₃	环境湿度传感器故障	X ₁₅	工作黑体温度传感器故障	X ₃₅	温控电路故障
M ₁₄	能见度传感器故障	X ₁₆	伺服限位状态测量电路故障	X ₃₆	接收镜头故障
M ₁₅	电路板温度传感器故障	X ₁₇	多通道 A/D 电路故障	X ₃₇	数据采集板电路故障
M ₁₆	发射器故障	X ₁₈	I/O 接口故障	X ₃₈	电源单元故障
M ₁₇	接收器故障	X ₁₉	红外组件故障	X ₃₉	接地线连接故障
M ₁₈	电控箱故障	X ₂₀	加热电阻丝故障		
X ₁	电源故障	X ₂₁	风扇故障		

采集与控制分系统主要由模块化构建而成,故障诊断时可利用替换的方法迅速判明故障位置,且组成系统的各个模块技术成熟、稳定性高;数据处理分系统主要应用计算机,软件可靠性相对较高,且该分系统故障现象明显,易于判断。因此根据可靠性关键件原则,整个系统的可靠性主要取决于光学测量分系统。光学测量单元由红外辐射测量机构、激光组件、伺服机构、散热机构、镜头保护机构和密闭腔等组成。

Petri 网是一种基于位置、变迁、有向弧和令牌组成的有向网^[3],该网对故障系统进行模拟具有形象化和简化的优点;因此,本文利用文献[3]的方法对光学测量分系统进行分析,具体步骤如下:

步骤 1 根据光学地面测量系统机构构成和故障原理建立光学测量分系统的故障模型,如图 3 所示,其中故障各事件的编码如表 2 所示。

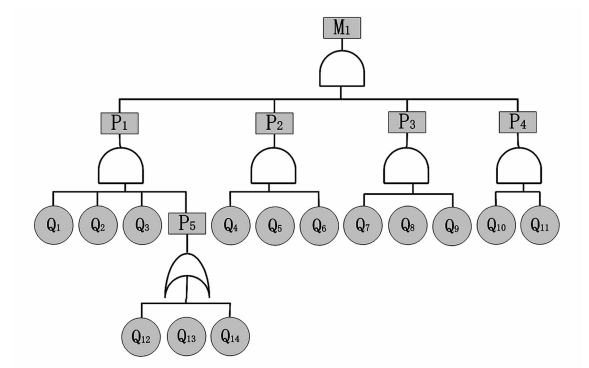


图 3 光学测量分系统的故障树模型

表 2 光学测量分系统的故障事件名称及其代码符号

代码	事件名称	代码	事件名称
M ₁	光学测量分系统故障	Q ₅	半导体制冷故障
P ₁	红外组件故障	Q ₆	散热片损坏
P ₂	定标机构故障	Q ₇	机械轴故障
P ₃	扫描伺服机构故障	Q ₈	步进电机故障
P ₄	激光回波测量机构故障	Q ₉	角度限位开关故障
P ₅	镜头保护机构故障	Q ₁₀	激光器故障
Q ₁	红外镜头污染	Q ₁₁	采集板故障
Q ₂	红外保护窗磨损	Q ₁₂	加热电阻丝故障
Q ₃	红外焦平面阵列故障	Q ₁₃	风扇故障
Q ₄	定标黑体损坏	Q ₁₄	干燥剂故障

步骤 2 运用 Petri 网络对上述模型进行建模,见图 4。

步骤 3 从顶事件 T 开始,前集是 4 个输入变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 , 输入位置 P_1, P_2, P_3, P_4 作为矩阵的行向量;

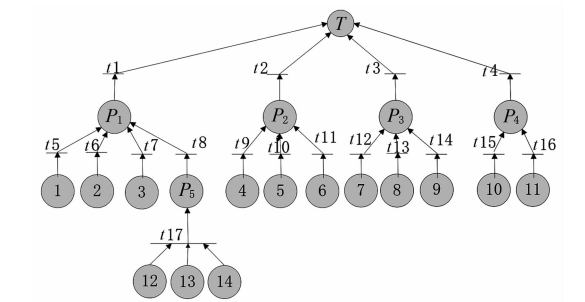


图 4 光学测量分系统的 Petri 网模型

步骤 4 1) 由于每个向量都存在中间位置,因此保持相对位置不变,将 P_1 行向量替换成行向量 $(1,2,3,P_5)$;重复替换过程,将 P_2 至 P_4 向量分别替换成行向量 $(4,5,6), (7,8,9), (10,11)$; 2) 由于列向量 P_5 存在中间位置,故重复步骤 3 之后,在 P_5 的位置上将其替换成列向量 $(12,13,14)^T$;

步骤 5 系统中所有的元素都替换成相应的输入位置,因 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11 分别是其所在列的公用元素,故将其分别复制到所在列对应的剩余位置,将稀疏矩阵变成实矩阵;

步骤 6 列向量构成割集,行向量构成路集,并且从中去除它们各自的父集,最后分别得到故障树的最小割集 $\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12,13,14\}$ 和最小路集 $\{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}, \{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13\}, \{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 14\}$ 。

3 基于 MCS 的系统故障诊断

根据文献[5]中的方法,计算系统的最小割集和最小路集,进而对故障原因进行诊断。具体步骤描述如下:

步骤 1 对故障树的底事件进行分类,分为正常事件、故障事件、未判明事件和无需判明事件。

步骤 2 利用正常事件对最小路集中的未知事件进行判断。如果一个含有 n 个底事件的最小路集中有 $n-1$ 个正常事件,则另一个事件一定是故障事件。

步骤 3 利用正常事件对最小割集形式的故障树进行减枝,即如果一个最小割集中含有正常事件,则顶事件的发生一定不是由该最小割集引起的。

步骤 4 如果步骤 3 完成之后只剩下一个割集,那么顶事件一定是由该割集引起的;否则,使

用故障事件库中的底事件与每一个剩余割集进行匹配,完全匹配的割集就是引起顶事件失效的故障源。

步骤 5 如果上述步骤完成之后仍然不能匹配,则视情增加测试点,重复步骤 2 至步骤 4,以进一步确定故障源。

在对光学地面测云系统的故障诊断中,通过初测判断可以判明 Q_{13} 风扇故障;根据最小割集判断,若底事件没有发生则剪去 P_5 的割集,确定顶事件不是由 Q_{12} 、 Q_{13} 、 Q_{14} 引起,从而将 Q_{12} 和 Q_{14} 列入无需判明的事件库。单元结构重要度系数^[5]定义为:

$$I_i = 1 - \prod_{X_j \in K_j} (1 - \frac{1}{2^{N_j-1}}), \quad (1)$$

其中 I_i 为第 i 个基本事件的结构重要度系数, K_j 为第 j 个最小割集, $N_j(X_j \in K_j)$ 为基本事件 X_j 所在的最小割集 K_j 中基本事件的个数, $X_i \in K_j$ 表示第 i 个基本事件属于第 j 个最小割集。由公式(1)得其底事件的结构重要度系数均为 1。

将底事件按照判明方式进行分类: Q_1 、 Q_2 可以通过人工直接判明; Q_4 、 Q_5 、 Q_6 、 Q_9 可以通过替换的方法判明; Q_3 、 Q_7 、 Q_8 、 Q_{10} 、 Q_{11} 为机械设备故障和关键件故障,需要借助仪器检测,故障判明时间长难度大。

根据试用和试验结果显示,故障判明时间相对于各底事件的排序依次为: $\{Q_3, Q_7, Q_{10}, Q_{11}\} > \{Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_9\} > \{Q_1, Q_2, Q_{12}, Q_{13}, Q_{14}\}$ 。测云系统光学测量部分的故障诊断方案的查明顺序为: $\{Q_{12}, Q_{13}, Q_{14}\}$ 、 $\{Q_1, Q_2\}$ 、 $\{Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_9\}$ 、 $\{Q_3, Q_7, Q_{10}, Q_{11}\}$ 。

4 故障实例及诊断分析

本文选取测云系统在试验及试用过程中的一次故障判明过程,对本文提出的方案进行说明。

某次更换场地安装之后,设备故障现象为图像有显示,但是显示不正常,调用历史资料进行调试发现显示正常,故初步判断是光学测量分系统故障。按照下行法依次对红外组件机构、定标机构、扫描伺服机构、激光回波测量机构、镜头保护机构进行故障诊断,最终发现是角度限位器在运输过程中人工搬运损坏。对该部件进行更换,维修

用时 5 h。

按照本文提出的方案,通过人工场外观察 Q_{13} 风扇无故障之后,应用最小割集方法将 Q_{12} 和 Q_{14} 列入无需诊断事件,通过观察 Q_1 和 Q_2 ,排除镜头保护机构故障,应用备件替换法对 Q_4 (定标黑体损坏)、 Q_5 (半导体制冷故障)、 Q_6 (散热片损坏)、 Q_9 (角度限位开关故障)进行判明,用时 2 h,大大缩短了故障诊断时间。

5 结论

本文设计了一种光学地面测云系统的故障诊断方案,主要包括: 1) 结合光学测量分系统故障原理建立故障树模型,运用 Petri 网络对故障树模型进行简化; 2) 建立系统最小割集和最小路集矩阵; 3) 基于结构重要度系数对底事件进行排序,提出了系统的故障诊断方案。经故障实例分析证明,本文方案缩短了诊断时间,提高了故障诊断效率,具有较高的可操作性,对优化新设备故障诊断方案具有参考价值;但由于本文应用的故障实例较少,今后将增加故障实例分析,对诊断方法进一步进行优化。

参考文献:

- [1] 赵翔,李著信,萧德云,等.故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J].机床与液压,2002(4):3-6.
- [2] 刘玲,张西,汪琳娜.故障诊断技术的现状与发展[J].电子测试,2016,4:62-63.
- [3] 秦兴秋,邢昌风.一种基于 Petri 网模型求解故障树最小割集的算法[J].计算机应用,2004,24(Z1):299-300.
- [4] 李卫宁,高洪林,马亮,等.潜艇鱼雷应急发控系统故障树最小割集的求解[J].四川兵工学报,2010,31(8):43-46.
- [5] 王巍,崔海英,黄文虎,等.基于故障树最小割集和最小路集的诊断方法研究[J].数据采集与处理,1999,14(1):26.
- [6] 朱大奇,于盛林.基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J].数据采集与处理,2002,17(3):341-344.
- [7] 高太长,刘磊,赵世军,等.全天空测云技术现状及进展[J].应用气象学报,2010(1):101-109.
- [8] 孔繁强,张鑫,张慧霞,等.故障树最小割集和最小路集在火箭故障诊断中的应用[J].电子设计工程,2011,19(18):8-10.
- [9] 安晨亮.故障树原理在故障诊断系统中的应用[J].导弹与航天运载技术,2009(1):48-51.