

NMOHEMS 布放系统可靠性的 Petri 网分析方法

Reliability Analysis Method Based on Petri Network for NMOHEMS Deployment System

翁兴国^{1,2} 王晓蕾² 叶松² 于利军² 陈振涛²

(陆军航空兵学院飞行理论系¹,北京 通州 101123;解放军理工大学气象海洋学院²,江苏 南京 211101)

摘要: 针对 NMOHEMS 布放系统的使用背景和工作原理,分析了对布放系统进行可靠性分析的重要性。根据 NMOHEMS 布放系统的工作过程,构建了系统的故障树模型,阐述了布放系统各个事件之间的逻辑关系。结合 Petri 网模型对故障树进行表示和简化,并使用 Petri 网描述了系统的动态性质和结构性质,弥补了传统故障树分析法的不足。理论分析和实例验证结果表明,该方法可以减少计算量,且易于在计算机上实现,为系统的可靠性分析和优化设计提供了理论基础。

关键词: 可靠性分析 Petri 网 故障树 关联矩阵 最小割集 NMOHEMS

中图分类号: TP802+.1 **文献标志码:** A

Abstract: In accordance with the operating background and working principle of new mobile offshore hydrologic environment monitoring system (NMOHEMS), the significance of analyzing the reliability of the deployment system is elaborated. The fault tree model of the system is established on the basis of operating procedures of NMOHEMS deployment system. The logical relationship among each event of the deployment system is described. Combining with Petri network model, the fault tree is represented and simplified, and by using Petri network, the dynamic and structural characteristics are depicted, this makes up the shortcomings of traditional fault tree analysis method. The results of theoretical analysis and practical example show that this method can reduce the amount of computation, and can be implemented in computer; it provides theoretical foundation for reliability analysis and optimization design of the system.

Keywords: Reliability analysis Petri network Fault tree Associated matrix Minimal cut set New mobile offshore hydrologic environment monitoring system (NMOHEMS)

0 引言

新型远海机动水文环境现场监测系统^[1-2] (new mobile offshore hydrologic environment monitoring system, NMOHEMS) 是一种基于无人机技术、流星余迹通信技术^[3] 和海洋现场探测技术^[4] 的深远海机动海洋水文环境监测系统。该系统主要由无人机及其控制发射机动单元、舰船和岸基用户单元、流余主站和现场探测单元四大部分组成。NMOHEMS 采用无人机机载方式,实现现场探测单元的超远距离目标区域的现场投放任务。

NMOHEMS 自动化程度比较高,系统的结构复杂,因此对其可靠性要求也较苛刻。可靠性工作应贯穿于 NMOHEMS 的概念设计、方案设计、技术设计、生产、试

验、操作使用直至退役的全寿命过程,其主要的内容包括可靠性预测、可靠性设计、可靠性试验、可靠性分析和评估等^[5]。由于篇幅有限,本文只对 NMOHEMS 布放系统进行可靠性分析。

结合故障树直观性的优点,综合利用数学化和图形化的分析工具 Petri 网模型对 NMOHEMS 布放系统进行可靠性分析^[5]。由于故障树模型难以描述系统的动态特性,不易表现故障发生的时序关系,因此在建立故障树的基础上,使用 Petri 网模型对故障树进行描述和简化,解决故障树难以描述系统动态特性的瓶颈,从而提高系统可靠性设计和分析的效率。

1 NMOHEMS 布放系统

NMOHEMS 布放系统主要由机载单元、降落伞单元和现场探测单元三个模块组成,系统结构示意图如图 1 所示。当无人机到达指定的海域后,通过驱动电路激活投掷执行机构按顺序依次布放现场探测单元。每一枚现场探测单元释放出仓后,安装在尾部的降落伞自动打开。由于受无人机空间荷载的限制,将现场探测单元设计成伸缩式结构。该单元主

国家自然科学基金资助项目(编号:40976062);

江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK2012513)。

修改稿收到日期:2013-04-27。

第一作者翁兴国(1986-),男,2013年毕业于解放军理工大学军事大气探测理论与技术专业,获硕士学位,助教;主要从事海洋探测技术方面的研究。

要由主浮体和剖面探头承载单元两部分组成^[6]。投掷之前,剖面探头承载单元收缩在主浮体里面;投掷之后,其在下降过程中要求实现自动有效膨胀,膨胀的动力来源于化学反应产生的气体。现场探测单元以气压弹射的方式进行布放,以免降落伞在现场探测单元释放后对无人机的飞行造成安全隐患。投掷仓投放的切换、自动加压系统的加压、投放前后投掷仓仓门的打开和关闭由机载单元完成。降落伞单元主要完成降落伞的自动打开以及现场探测单元入水后的自动脱离。现场探测单元是布放系统的核心,主要完成现场探测单元的自动膨胀、温度、深度以及盐度等剖面信息的获取。

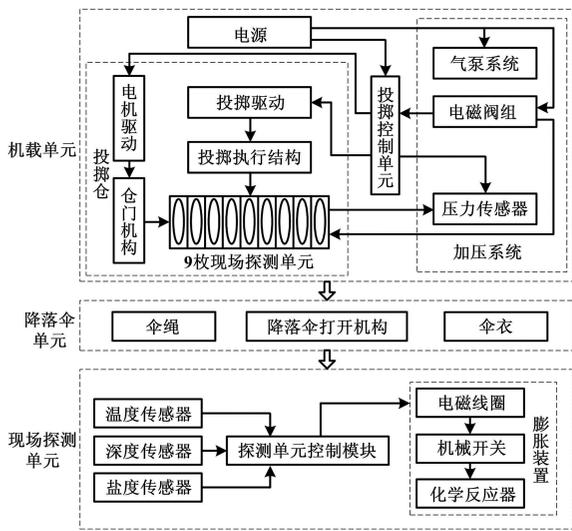


图1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of system

2 NMOHEMS 布放系统故障树分析

故障树分析模型是一种经典的可靠性分析方法,它使用规定的事件符号和逻辑门符号表示系统故障传播的逻辑关系,从而演绎 NMOHEMS 布放系统各事件之间的因果关系。布放系统以无人机布放失效为顶事件,先逐层对布放系统各模块进行图形演绎,找出导致布放任务失败的全部直接原因和间接原因;接着寻找布放失败发生的原因和原因组合,识别布放失败的所有故障模式;最后分析判断潜在的故障,便于方案的修改和设计。

在不考虑 NMOHEMS 布放系统与其他系统关联的情况下,将布放系统的事件进行编码,理清事件发生的时序关系,得到系统的故障树如图2所示。从图2可以看出,根据 NMOHEMS 布放系统各事件之间的逻辑关系,能够初步观察到故障的传递路径。

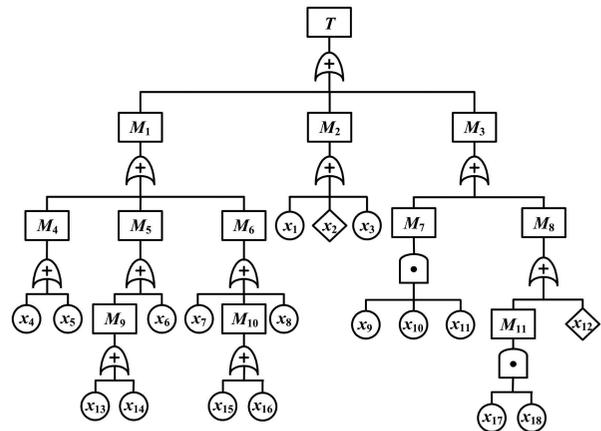


图2 NMOHEMS 布放系统的故障树模型

Fig.2 The fault tree model of deployment system of NMOHEMS

系统故障树的各事件的编码表如表1所示。

表1 事件名称及代码符号

Tab.1 Event names and code symbols

代码	事件名称	代码	事件名称
T	布放失败	x ₄	电磁干扰
M ₁	机载单元失效	x ₅	线路及器件故障
M ₂	降落伞故障	x ₆	释放开关坏
M ₃	探测单元故障	x ₇	气路漏气
M ₄	控制器故障	x ₈	气泵故障
M ₅	释放装置故障	x ₉	温度模块故障
M ₆	弹射筒压力不足	x ₁₀	盐度模块故障
M ₇	探测模块故障	x ₁₁	深度模块故障
M ₈	体积膨胀系统故障	x ₁₂	机械故障
M ₉	驱动装置故障	x ₁₃	执行机构故障
M ₁₀	电磁阀组故障	x ₁₄	电机故障
M ₁₁	化学反应故障	x ₁₅	电源故障
x ₁	伞绳缠绕	x ₁₆	继电器故障
x ₂	伞未打开	x ₁₇	反应器故障
x ₃	伞衣破坏	x ₁₈	反应速率过慢

3 布放系统的 Petri 网模型

故障树模型虽然能够图文兼备,清楚表达各个事件之间的逻辑关系,但在演绎故障动态传播方面稍显不足。此外,对于复杂系统,故障树定量分析繁杂而冗长,实际计算比较困难。Petri 网模型可以弥补故障树的不足,Petri 网能够直观地描述系统的动态过程,使用 Petri 网的关联矩阵也可以方便求出系统的最小割集,为定量分析奠定基础。Petri 网还可以很好地应用数学化的方法诊断系统故障的动态传递过程。Petri 网模型将故障树的各种逻辑连接关系简化为只由库所和变迁组成、以有向弧为连接边的网络,使系统的故障模型简洁、易懂,故障的传播关系一目了然。NMOHEMS 布放系统故障树的 Petri 网模型如图3所示。图3中,P_i为故障树中

顶事件、中间事件和基本事件的库, t_i 为故障树中事件之间逻辑关系的变迁。

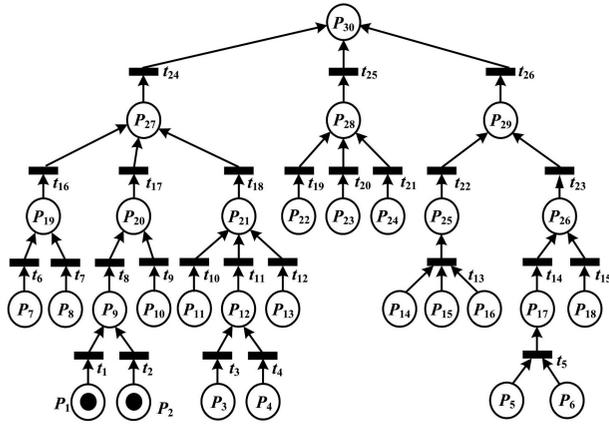


图3 NMOHEMS 布放系统 Petri 网模型

Fig.3 Petri network model of deployment system of NMOHEMS

$$A = O - I = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 & \dots & t_6 & t_7 & \dots & t_{16} & t_{17} & t_{18} & \dots & t_{24} & t_{25} & t_{26} \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_7 \\ \vdots \\ p_{19} \\ \vdots \\ p_{27} \\ \vdots \\ p_{30} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & & & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & & 0 & 0 & & & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & & 0 & 0 & & & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & -1 & 0 & & & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 1 & 1 & & & 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & & & 1 & 1 & 1 & & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & & & 0 & 0 & 0 & & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

根据式(1),求解 NMOHEMS 布放系统 Petri 网最小割集的步骤如下^[9]。

① 观察关联矩阵,找到没有-1 所在的行,即第 30 行(布放失败所在行),记录下每个 1 所在的列分别为第 24、25、26 列。

② 从第 24 列出发,搜索此列并记录下这一列中-1 所在的行为 27。

③ 继续搜索第 27 行,记录下这一行中 1 所在的列为 16、17、18,则说明同为 P_{27} 的输入库所,它们之间为“相或”关系。按步骤②循环查找,第 16 列中-1 所在行为 19,这一行中 1 所在的列为 6、7,继续寻找第 6 列-1 所在行,-1 所在行为 7,即有: $P_{19} = P_7 + P_8$ 。同样的方法查找第 17、18 列,可得:

$$P_{27} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_7 + P_8 + P_{10} + P_{11} + P_{13} \quad (2)$$

④ 再从第 25 列出发,重复步骤②、③,即搜索第 28 行,可得:

$$P_{28} = P_{22} + P_{23} + P_{24} \quad (3)$$

⑤ 从第 26 列出发,重复步骤②、③,即搜索第 29

3.1 关联矩阵法求最小割集

Petri 网求最小割集的方法主要有路径搜索法、库所矩阵法和关联矩阵法。但是,路径搜索法会对大型的 Petri 网模型造成组合爆炸困难问题^[7],而库所矩阵法难以进行故障的诊断分析,因此本文采用关联矩阵法求解系统的最小割集。Petri 网的结构可以用一个矩阵来表示。若从库所 P 到变迁 t 的输入函数取值为非负整数 ω ,即为 $I = (P, T) = \omega$,则用从 P 到 t 的一段有向弧并旁注 ω 表示;若从变迁 t 到库所 P 的输出函数取值为非负整数 ω ,即为 $O = (P, T) = \omega$,则用从 t 到 P 的一段有向弧并旁注 ω 表示。特别地,若 $\omega = 1$,则不必标注;若 $I = (P, T) = 0$ 或 $O = (P, T) = 0$,则不必画弧。 I 和 O 均可表示为 $n \times m$ 非负整数矩阵, O 与 I 之差 $A = O - I$ 称为关联矩阵^[8]。本文研究规范网,所以 $\omega = 1$ 。NMOHEMS 布放系统的关联矩阵为:

行,可得:

$$P_{29} = P_{14} \times P_{15} \times P_{16} + P_5 \times P_6 + P_{18} \quad (4)$$

⑥ 根据上述步骤,可知:

$$P_{30} = P_{27} + P_{28} + P_{29} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_7 + P_8 + P_{10} + P_{11} + P_{13} + P_{22} + P_{23} + P_{24} + P_{14} \times P_{15} \times P_{16} + P_5 \times P_6 + P_{18}$$

⑦ 使用布尔吸收率或素数法,求得最小割集。

3.2 系统故障的诊断

故障的产生和传播是一个典型的动态过程,利用 Petri 网可以很好地描述故障现象的动态传播过程以及事件发生的时序关系^[10]。关联矩阵是求解系统状态变迁的主要工具,系统状态变迁的关系式为:

$$M_{k+1} = M_k + A^T X_k \quad (5)$$

式中: M_k 为点火前的系统故障的初始标志集; M_{k+1} 为点火后的系统故障的结果标志集; A 为关联矩阵; X_k 为第 k 次点火转移序列。

由式(5)的递推关系,可得:

$$M_d = M_0 + A^T \sum_{k=0}^{d-1} X_k \quad (6)$$

式中: M_0 为点火前的系统故障的初始标志集; M_d 为点

