0254-6124/2024/44(6)-1120-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIN Xin, HE Yufeng. SysML-based Fault Diagnosis Method for Space Payload Systems (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1120–1133. CSTR:32142.14.cjss.2023–0109. DOI:10.11728/cjss2024.06.2023–0109

基于 SysML 的空间有效载荷系统故障诊断方法

金 鑫[1,2] 贺宇峰[2]

1(中国科学院大学 北京 100049)

2(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

摘 要 针对空间有效载荷系统高复杂性和高可靠性需求的特性, 设计了一种基于 SysML (System Modeling Language) 的故障诊断方法. 该方法融入 MBSE (Model Based System Engineering) 思想, 提出了基于 SysML 的空间有效载荷系统故障分析流程. 基于 SysML 对空间有效载荷系统建立了故障分析相关的模型, 其中, 为满足故障分析建模的需求, 对 SysML 元模型进行扩展定义, 从而实现对组件间关系和故障表征与直接关联组件间关系的描述; 基于所建模型构建故障诊断的整体框架, 并提供从 SysML 数字模型到 FTA (Fault Tree Analysis) 的转换逻辑, 从而实现对所有故障可能性的获取. 通过案例分析, 对提出方法在实际应用中的具体流程进行分析, 并验证了该方法的有效性和实用性.

关键词 系统建模语言, 空间有效载荷, 故障诊断, 故障树分析

中图分类号 V411.8

SysML-based Fault Diagnosis Method for Space Payload Systems

JIN Xin[1,2] HE Yufeng[2]

1(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

2(*Technology and Engineering Center for Space Utilization*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094)

Abstract Aiming at the characteristics of high complexity and high reliability requirements of space payload systems, a fault diagnosis method based on SysML (System Modeling Language) is designed. The method incorporates the idea of MBSE (Model Based System Engineering), and proposes a failure analysis process of space payload system based on SysML. First, a failure analysis related model is established for the space payload system based on SysML, in which the SysML meta-model is extended and defined to meet the needs of failure analysis modeling, thus realizing the description of inter-component relationships and the relationship between the fault characterization and the directly related components. Then, an overall framework for fault diagnosis is constructed based on the constructed model, and the

2023-10-07 收到原稿, 2024-01-30 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

conversion logic from the SysML models to FTA (Fault Tree Analysis) is provided, thus finally obtaining all fault possibilities. Finally, this paper demonstrates the specific process of the method in practical application through case studies and verifies the effectiveness and practicality of the method.

Key words System modeling language, Space payload, Fault diagnosis, Fault tree analysis

0 引言

随着空间科学与应用研究的不断深入, 空间有效载荷系统的复杂程度日益提高, 导致故障发生的可能性大幅提升, 因此空间有效载荷系统的可靠性越来越受到重视, 而高效的故障诊断能力对提升数据可靠性具有重要意义[1,2].

故障树分析 (Fault Tree Analysis, FTA) 和失效模式与影响分析 (Failure Mode and Effects Analysis , FMEA) 是最为广泛被应用于设备故障诊断的技术[3–5]. FTA 从某个故障开始向下搜索每个可能的原因, 直到确定合适的组件级别, 这种方式十分直观, 且便于理解[6–8]. FMEA 则是一种自下而上的方法, 其以每个组件为起点, 评估故障在系统中的传播, 这种方法符合故障发生的实际机理[9,10]. 然而, 随着空间有效载荷系统的复杂化, 这两种方法的缺陷也逐渐在工程实践中显现出来, 例如对于历史数据和专业知识具有高度依赖性, 且处理复杂系统时会变得非常冗长和复杂, 将大幅降低效率.

为了提高故障分析与诊断的效率和减少对研制人员主观性的依赖, 应当在传统技术中引入基于模型的系统工程 (Mode Based System Engineering, MBSE) 思想, 将现阶段遵循人工经验以及文档为核心的故障分析与诊断模式转变为基于数字模型的形式. 因此, 本文针对空间有效载荷系统提出了一种基于 SysML 数字模型的故障分析与诊断方法, 提出了针对通用空间有效载荷系统的故障诊断整体框架, 给出了详细的建模与诊断流程, 最后以一个故障实例详细阐述了具体实践过程.

1 空间有效载荷系统的特点及故障诊断方法

空间有效载荷系统是指航天器为执行各种在轨科学或技术任务而携带的仪器、设备或实验装置组成的系统, 一般具有以下特点.

(1) 高度定制化. 每个有效载荷均是针对特定任务需求或场景而设计和制造的, 因此根据任务的性质和目标的改变, 有效载荷的具体组成也会不同.

(2) 系统结构复杂, 且仪器数量庞大. 系统由多个有效载荷、信息装置、配电装置等仪器组成, 有效载荷内部又由多个组件和子系统组成.

(3) 多样性. 执行不同任务的多个有效载荷在同一航天器平台上共存.

(4) 高度可靠性需求. 空间任务成本高昂, 对载荷进行维修十分困难, 因此对空间有效载荷具有严格的高可靠性需求.

(5) 跨多学科领域. 载荷系统具有的参数涉及电、热、信息等多个学科领域.

为了保证空间有效载荷系统的高可靠性, 当异常出现时能够对故障进行诊断, 从而实现及时的响应是十分必要的. 随着机器学习和人工智能的发展, 基于对大量多传感器的数据的分析, 通过模式识别等算法可以实现较为准确的故障诊断, 但是由于有效载荷系统的特点使得基于数据方法的适用性受到较大的限制, 例如高度定制化的特点使其较批量化生产的设备来说更不易获取到丰富的数据、高度可靠性的设计需求使得实验所获取到的故障与健康样本十分不平衡、数量巨大和跨多学科的参数特点使得数据学习和分析的难度非常大, 所以相较之下, 基于模型的故障诊断方法的优势则显现了出来, 其仅需设备的物理结构及运行机理, 且具有更强的物理解释性, 这都更符合高可靠性的设计需求.

在基于模型的方法中, SysML (Systems Modeling Language) 提供了一种结构化的方法来帮助系统工程师清晰地描述或理解复杂系统, 可以帮助工程师们更迅速、精确地定位故障器件. 此外, SysML 半形式化的系统描述方式有利于计算机自动读取并解析系统的 SysML 模型, 从而实现以 SysML 模型为输入, 自动化地完成一系列故障定位的计算, 使得 SysML 这一通用标准系统建模语言成为模型构建的优良工具.

2 基于 SysML 的空间有效载荷系统建模

SysML 是一种用于系统工程的建模语言, 旨在描述、分析和设计复杂系统, 适用于涉及多个学科和领域的跨学科项目.

图 1 给出了 SysML 为建模者提供的 9 种类型, 分别为活动图、时序图、状态机图、用例图、需求图、模块定义图、内部模块图、参数图和包图[11,12]. 其中, 隶属于结构图的模块定义图和内部模块图可以描述系统的组成以及系统内各元素之间的相互连接与交互关系, 而这些描述内容恰恰是故障诊断所需要的信息, 因此本文选择这两类图来对空间有效载荷系统的组成以及内部交互关系进行建模. 然而, 由于 SysML 本身缺乏故障分析中所需要的部分语义, 所以本文在故障分析与诊断模型的搭建中对 SysML 进行了语义上的扩展, 即元模型的扩展定义.

2.1 系统结构建模

2.1.1 系统组成建模

采用 SysML 模块定义图对空间有效载荷系统进行系统组成的描述. 一般的空间有效载荷系统主要由系统配电器、系统信息装置和实验载荷组成[13,14], 其中实验载荷是为了完成特定任务而定制的, 本文以材料实验载荷[15] 和燃烧实验载荷[16] 两个实验载荷为例进行分析. 实验载荷的内部一般会有独立的供电单元、实验单元和信息单元, 具体的 SysML 模型如图 2～4 所示.

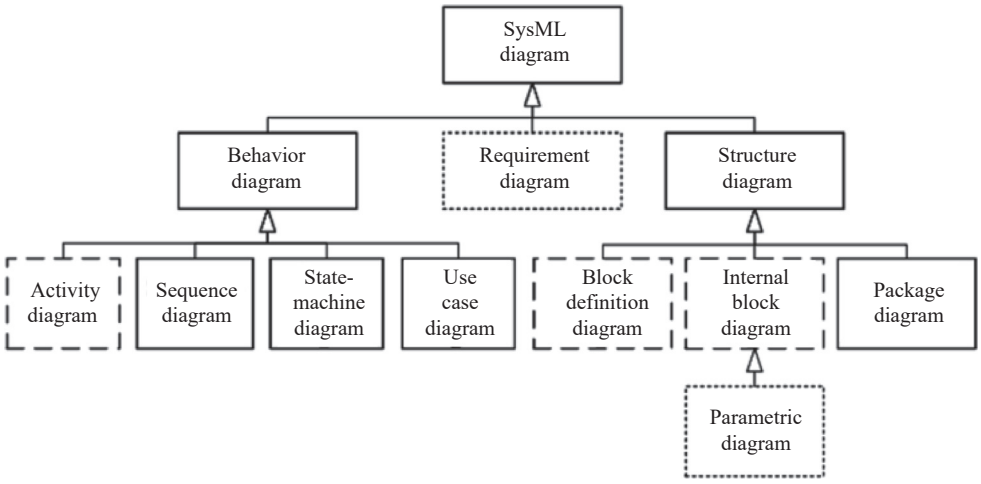


图 1 SysML 图分类

Fig. 1 SysML diagram classification

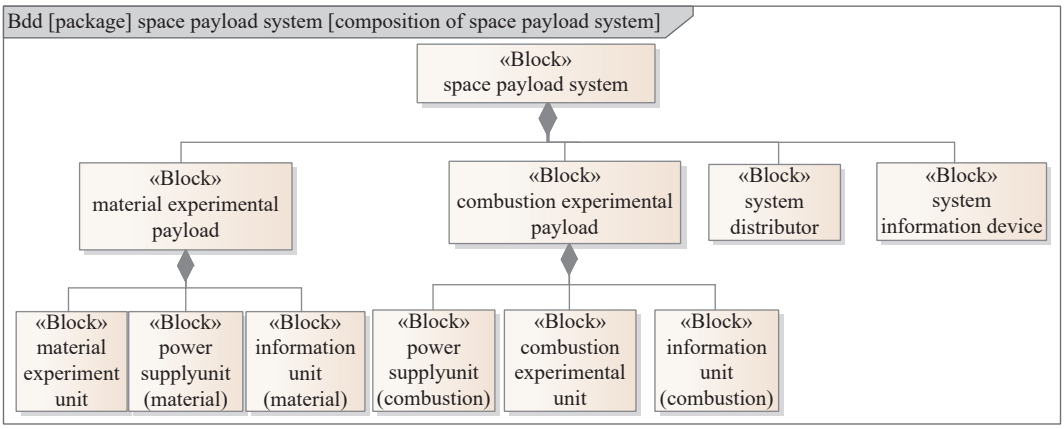


图 2 空间有效载荷系统组成

Fig. 2 Space payload system composition

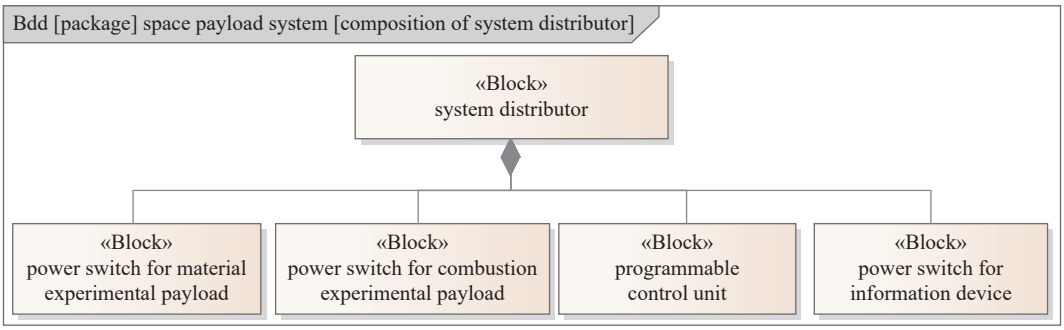


图 3　系统配电器组成

Fig. 3　System distributor composition

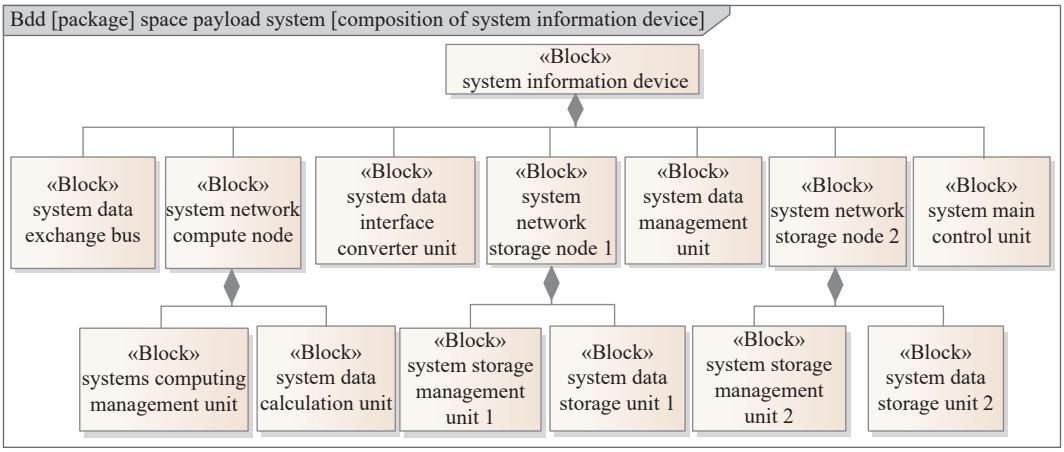


图 4　系统信息装置组成

Fig. 4　System information device composition

2.1.2　系统模块内部建模

模块间通过端口进行交互的内容与方向是故障诊断所需要的重要依据, 因此对其进行恰当的描述是至关重要的. 使用 SysML 内部模块图来描述前文模块定义图中定义的系统内部各模块之间的交互关系.

对端口进行定义. 针对空间有效载荷系统建立了三种典型端口类型的模型, 分别为直流电源、测控指令和数据信息 (见图 5). 每种接口类型会具有不同的属性, 直流电源端口具有电流和电压属性, 测控指令端口和数据信息端口具有数据大小和传输速率属性. 针对这些属性的典型值类型具体定义, 如图 6 所示, 均是基于 SysML 库中内置的实数值类型泛化得到, 并指定了单位.

对系统各层级的内部进行建模, 包括空间有效载荷系统内部、燃烧实验载荷内部、材料实验载荷内部、系统配电器内部和系统信息装置内部, 具体如图 7～11 所示.

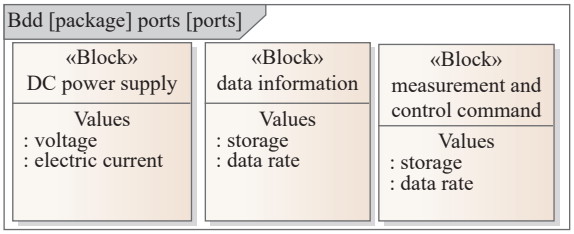


图 5　典型端口定义

Fig. 5　Typical port definition

2.2　元模型扩展定义

元模型是指模型的模型, SysML 中内置的各种描述方式都为元模型. 然而, SysML 内置的元模型有限, 所以其能表达的语义也是有限的. 由于 SysML 内置元模型缺乏对故障分析中的一些语义的表达, 所以对 SysML 进行元模型的扩展.

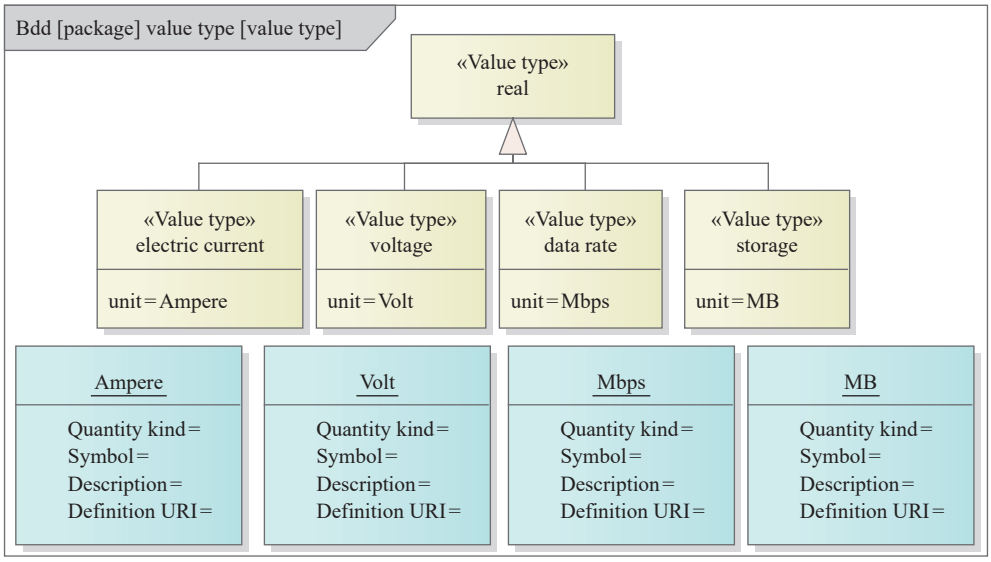


图 6 值类型定义

Fig. 6 Value type definition

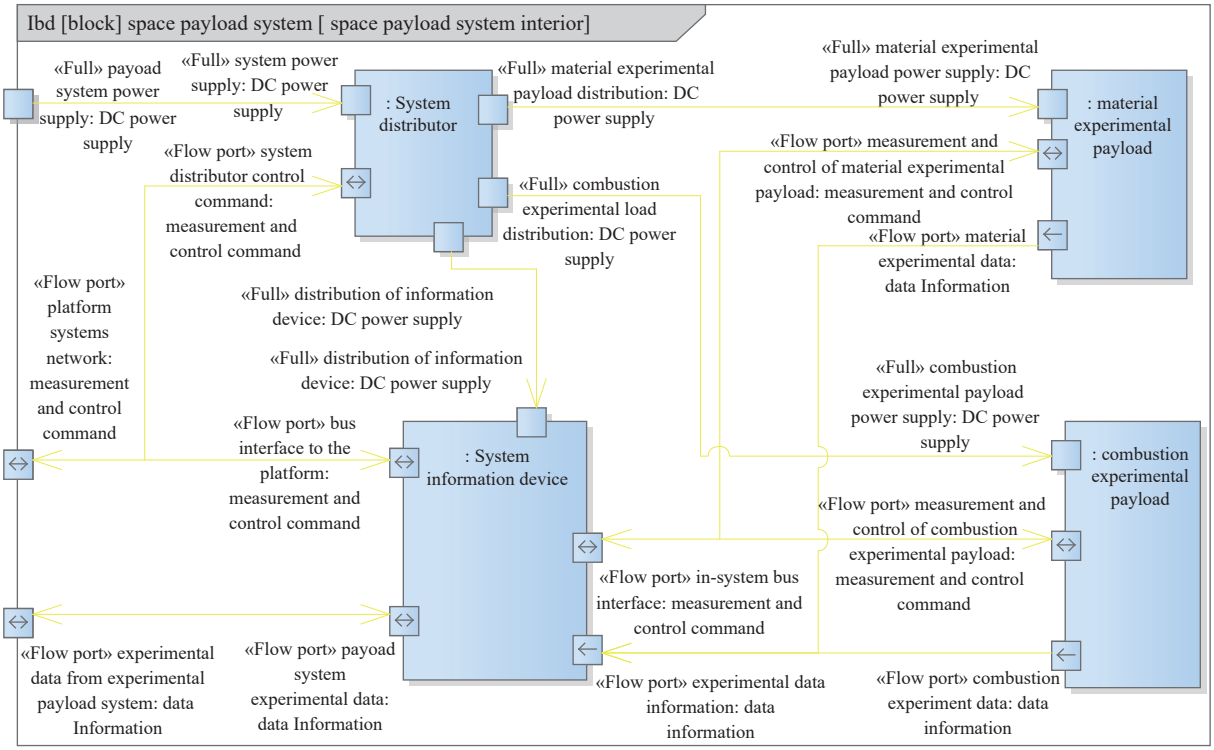


图 7 空间有效载荷系统内部

Fig. 7 Space payload system interior

为保障实验系统平稳运行, 在系统内会配置一些备份设备来保障安全. 当主设备发生故障时, 备份设备就会运行, 以保障系统的功能能够正常实现. 主设备和备份设备之间是可相互替换的关系, 这一关系会影响故障诊断的结果, 因此在 SysML 模型中应当体现. 为体现组件间存在可替换关系, 基于 SysML 的 Dependency (依赖) 元模型扩展得到可替换元模型, 具体定义如图 12 所示. 可替换元模型两端连接的模

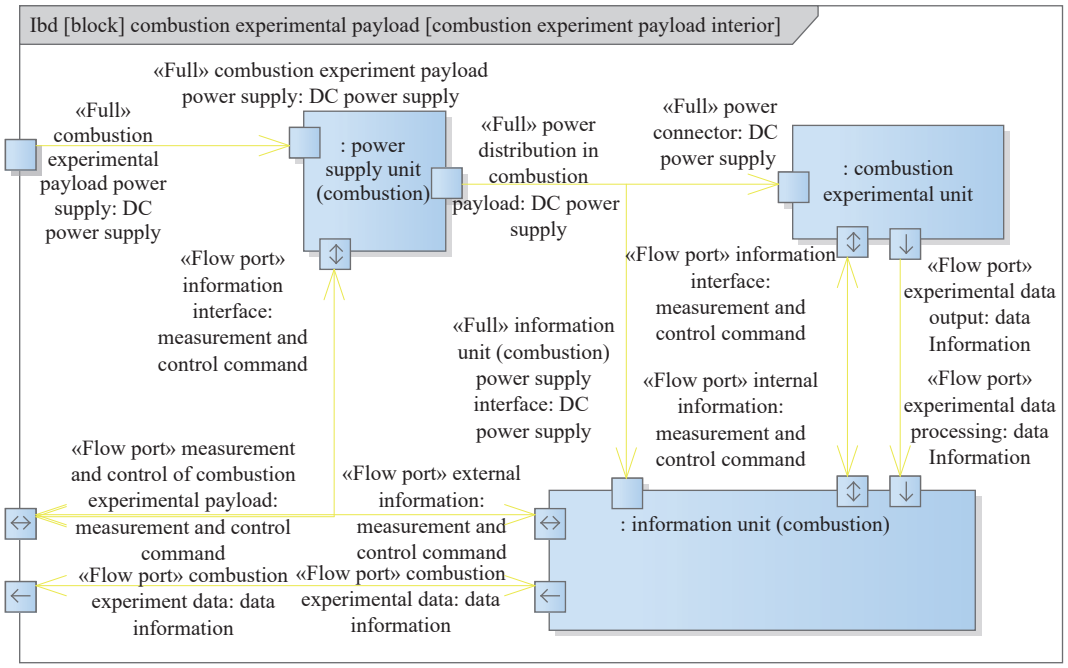


图 8　燃烧实验载荷内部

Fig. 8　Combustion experiment payload interior

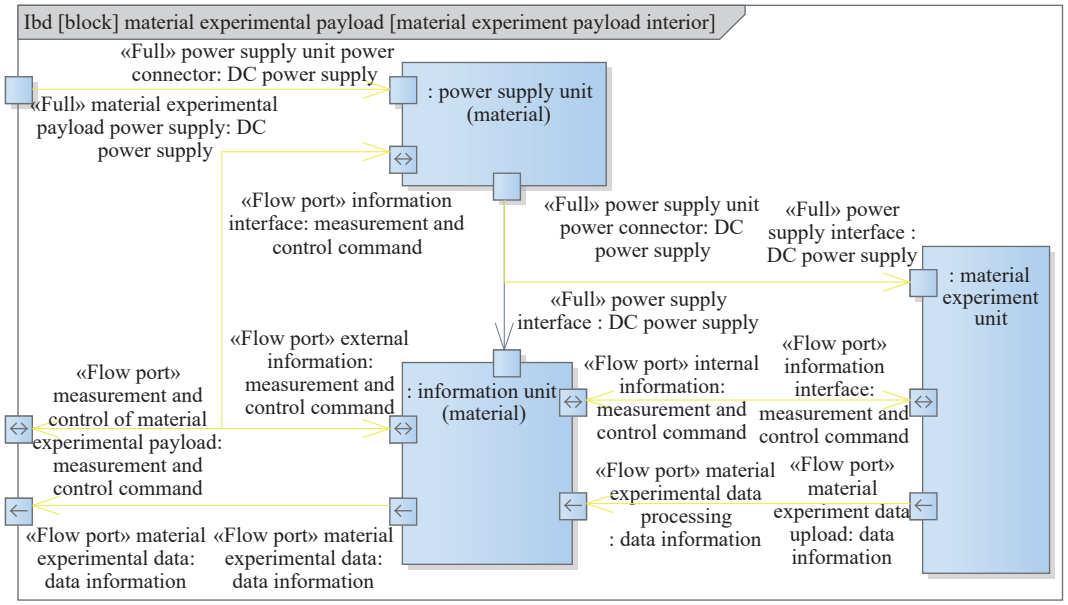


图 9　材料实验载荷内部

Fig. 9　Material experiment payload interior

块具有完全一样的功能, 可独立工作, 在其中一方无法工作时, 另一方可代替其完成相应工作, 两者对指定故障事件的影响表现为逻辑“或”的关系, 即仅当两者均发生故障时才会导致指定故障事件的发生.

为了准确描述故障表征, 本文基于 Class 扩展定义了故障表征元模型. 同时, 为了描述故障表征与直接关联组件之间的关系, 基于 Dependency 扩展定义了直接关联元模型, 具体定义如图 12 所示.

2.3　组件关系建模

实验系统的信息装置中含有多个存储节点, 这些

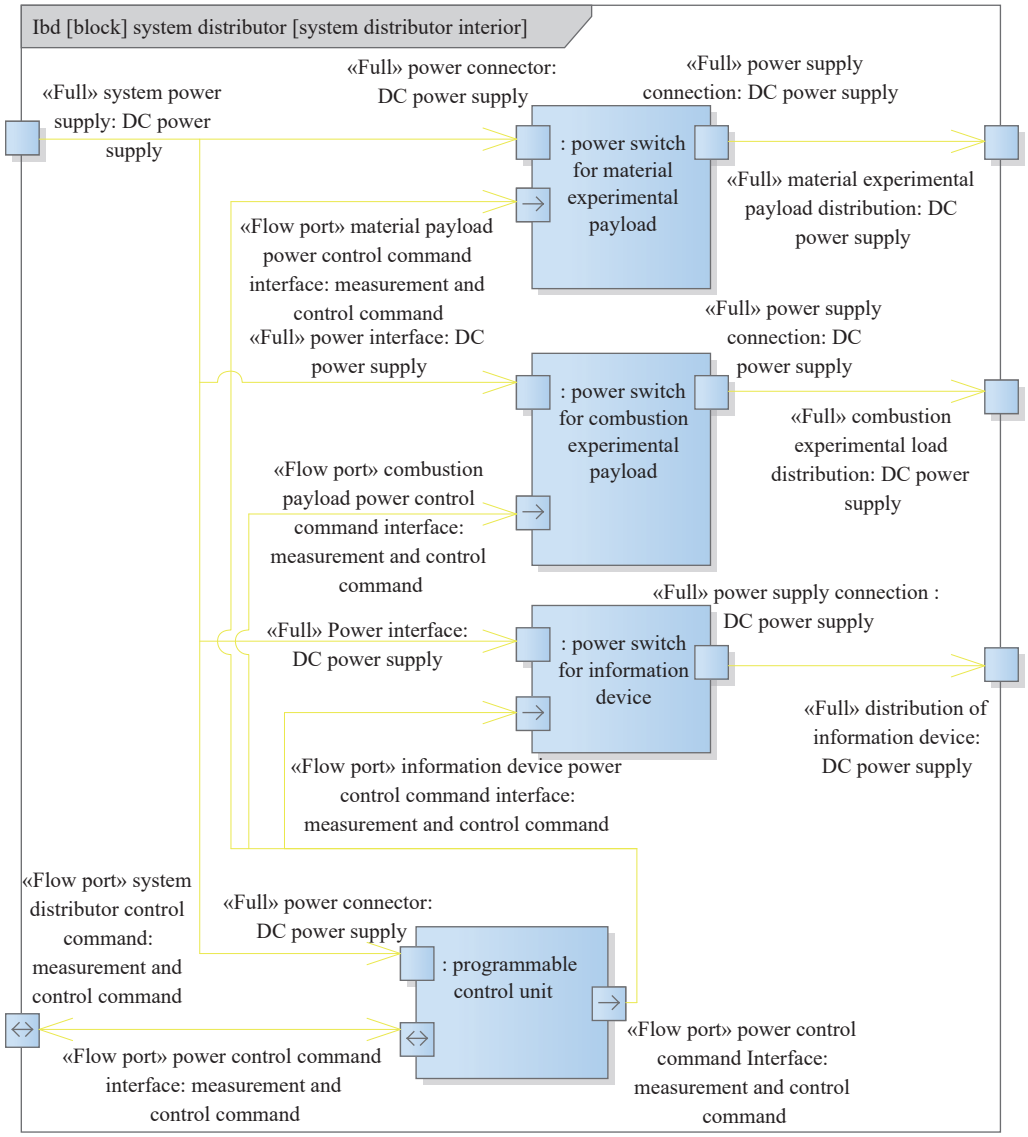


图 10 系统配电器内部

Fig. 10 System distributor interior

节点在功能上可以相互替换, 在某个存储节点损坏或无法正常工作后, 可以将数据信息存储到其他的存储节点的存储单元中. 因此, 基于定义的可替换元模型, 本文建立了系统信息装置内满足可替换关系的两个存储节点的组件关系模型, 如图 13所示.

2.4 故障表征建模

通过故障表征与组件之间的关联分析, 可快速定位到与故障具有最直接关联关系的失效组件, 然而想要获得更准确的故障诊断结果, 则需要进一步找到所有间接关联组件. 因此, 建立故障表征直接关联模型是故障诊断的起始步骤, 是最初始和简略的故障分析. 本文建立的故障表征直接关联模型如图 14 所示.

3 空间有效载荷故障诊断设计

3.1 故障诊断基本逻辑流程

基于 SysML 的空间有效载荷系统故障辅助诊断整体流程如图 15 所示, 共分为预处理和故障诊断两部分.

(1) 预处理阶段主要是对由 SysML 模型导出的 XML 文件进行解析, 对获取到的信息进行整合, 从而得到表 1 所示的 9 个信息.

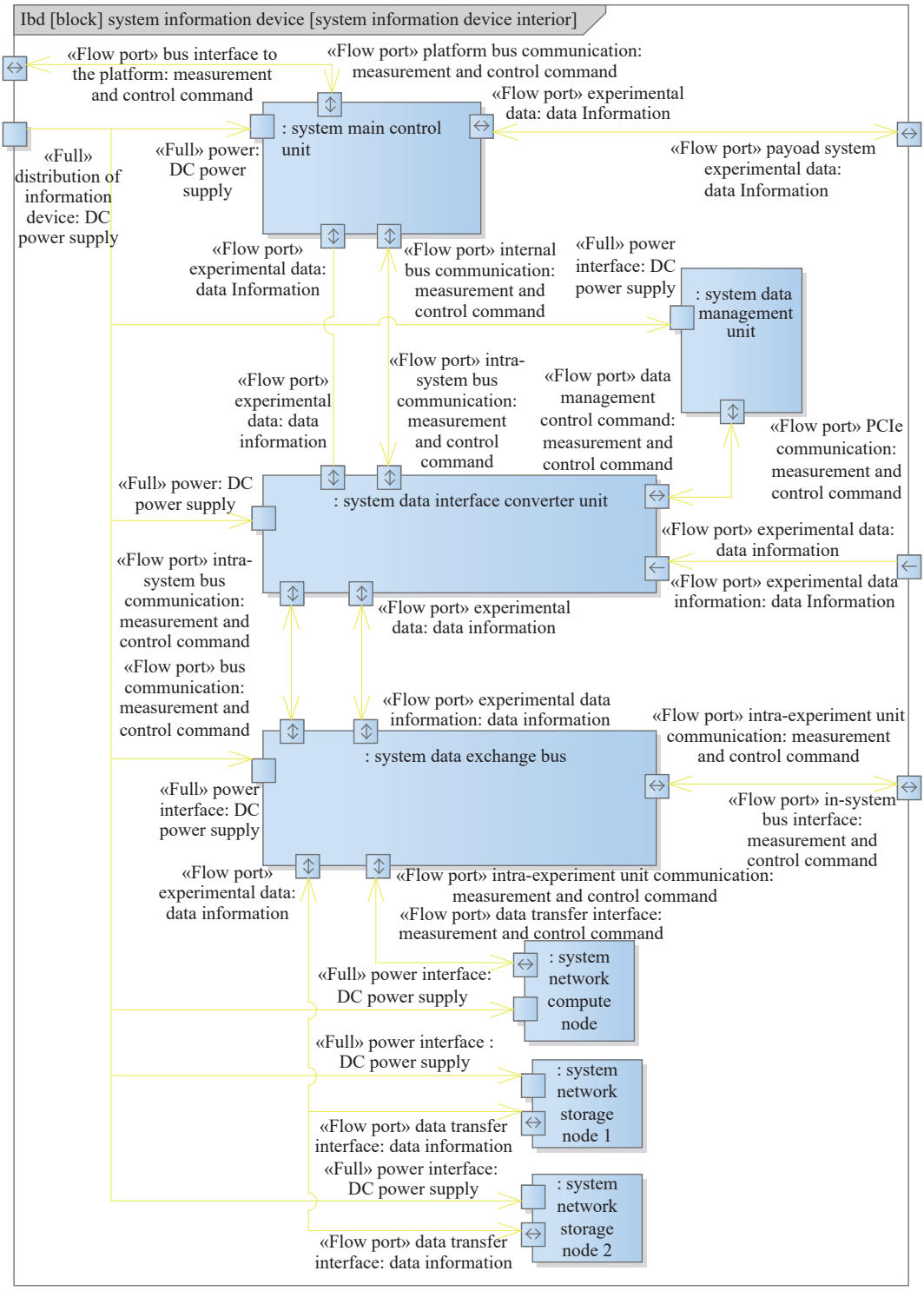


图 11　系统信息装置内部

Fig. 11　System information device interior

(2) 输入当前观测到的故障表征后, 故障诊断的流程开始. 将观测到的故障表征根据故障表征直接关联模型匹配到直接相关组件; 分析直接相关组件的端口关系, 逐步定位到所有与故障间接相关的组件, 并将这些组件按端口的交互逻辑关系构建成故障树模型; 基于故障树模型计算得到故障的最小割集.

3.2　故障树构建逻辑

图 16 给出了故障树模型的构建逻辑, 具体构建

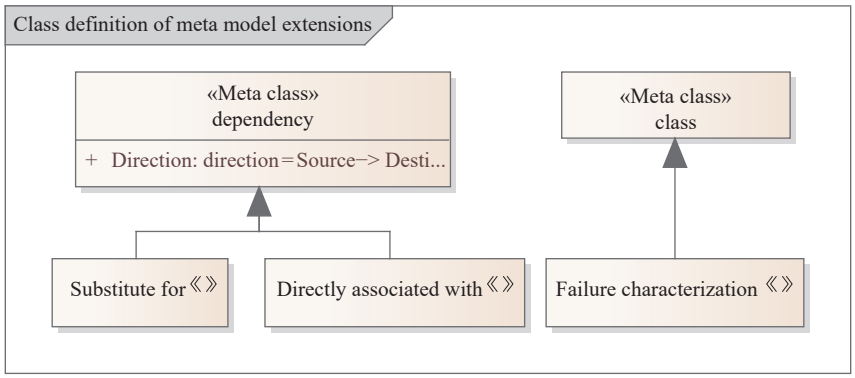


图 12 元模型扩展定义

Fig. 12 Extension of meta model

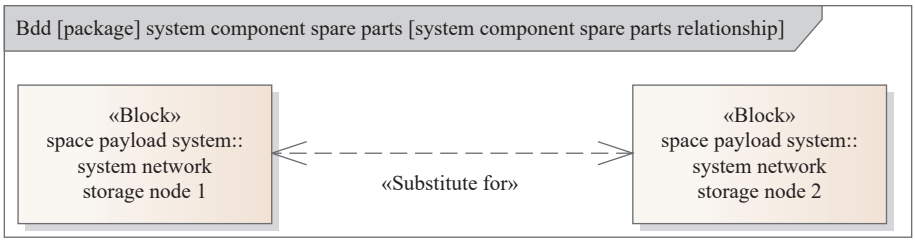


图 13 组件关系

Fig. 13 Component relationships

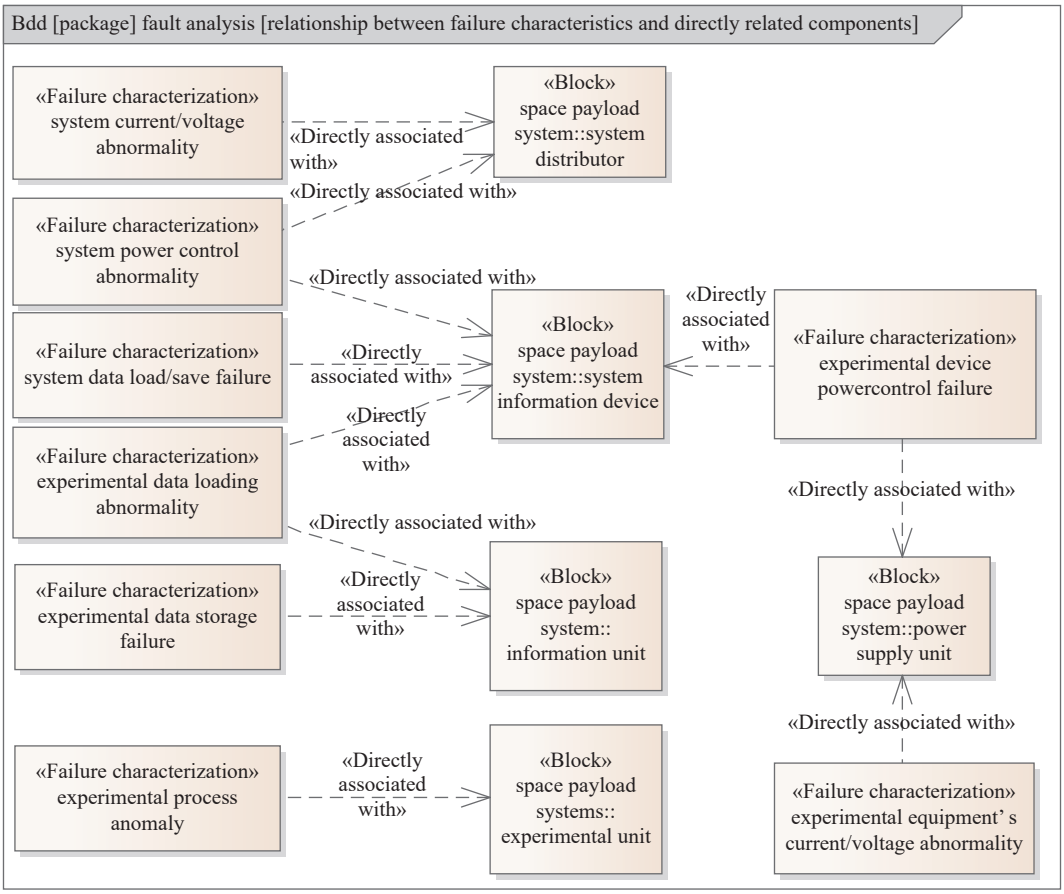


图 14 故障表征直接关联模型

Fig. 14 Direct correlation model for fault characterization

步骤如下.

步骤 1　将某组件发生故障的原因分为该组件自身故障和该组件的输入故障.

步骤 2　由自身故障和输入故障追溯相关故障组件: 对于自身故障, 根据模块定义图模型追溯至其内部组件; 对于输入故障, 根据内部模块图模型追溯至对该组件有输入的组件.

步骤 3　重复步骤 1 和步骤 2, 直至故障树扩展到 SysML 模型定义的最小单元的故障事件.

步骤 4　将所有故障事件用正确的逻辑元件连接起来即可得到完整的故障树模型.

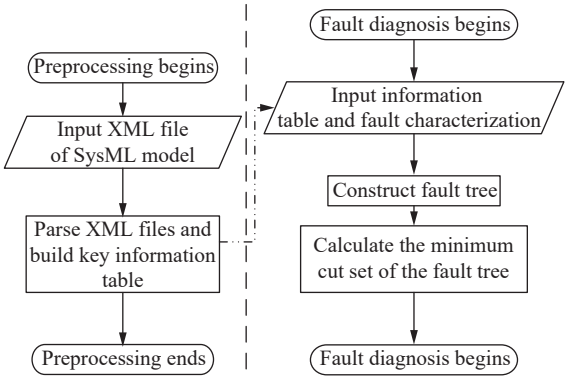


图 15　技术路线流程

Fig. 15　Flow chart of the technical route

需要注意的是, 当追溯至引发输入故障的器件内部时, 需要将其中与输入故障无关的组件剔除, 通过端口的类型和交互流的方向可以排除不相关的组件. 例如图 16 中, 组件 D 对组件 A 有输入, 所以 A 的输入故障可能是由 D 自身故障引起的, 但 D 内含的组件 F 和 E 中, F 与 A 没有交互关系, 或交互的内容与故障表征无关, 所以在扩展故障树模型时, 需要将“F 故障”删除.

3.3　故障割集计算

在故障树分析 (FTA) 中, 求出故障树的最小割集可以获取引发故障树顶层故障事件的所有可能性. 然而, 传统的通过对故障树进行模型分析和故障机理分析来获取最小割集的过程十分复杂繁琐, 也不易通过计算机来实现. 因此, 选择引入 Petri 网模型来简化故障树模型的最小割集求解过程, 其基本思路是将故障树模型转化为 Petri 网模型, 再利用 Petri 网可以表达为关联矩阵的特性, 来达到仅通过简单的矩阵运算就可以求解得到最小割集的目的.

Petri 网是一种由节点和定向弧长组成的二元有向图, 将故障树中的事件转换为 Petri 网中的库所 P, 用圆圈表示, 并将逻辑符号转换为变迁 T, 通过直线段或矩形表示. 故障树模型向 Petri 网模型转化的具

表 1　SysML 模型信息

Table 1　SysML model information

信息列表名称	信息列表格式	释义
Bloc kList	[{Block1 Name, Block1 Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个模块的信息, 包括Block的名字、xmi.id.
Reuse Block List	[{Reuse Block1 Name, Reuse Block1 Xmi.id, Prototype Xmi.id }, ...]	以元组的形式存放每一个重用模块的信息, 包括Reuse Block的名字、xmi.id和原型Block的xmi.id.
Port List	[{Port1 Name, Port1 Xmi.id, Owner Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个端口的信息, 包括Port的名字、xmi.id和拥有者Block的xmi.id.
Value Type List	[{Value Type1 Name, Value Type1 Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个值类型的信息, 包括ValueType的名字和xmi.id.
Fault List	[{Fault1 Name, Fault1 Xmi.id},...]	以元组的形式存放每一个故障表征的信息, 包括故障表征的名字、xmi.id.
Aggregation List	[{Source1 Xmi.id, Target1 Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个组合关联的信息, 包括提供者和客户端的xmi.id.
Connector List	[{Source1 Xmi.id, Source Is Navigable, Target1 Xmi.id, Target Is Navigable}, ...]	以元组的形式存放每一个连接器的信息, 包括提供者和客户端的xmi.id以及是否可以为被指向者
Substitution List	[{Source1 Xmi.id, Target1 Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个替换关联的信息, 包括提供者和客户端的xmi.id.
Relevance List	[{Source1 Xmi.id, Target1 Xmi.id}, ...]	以元组的形式存放每一个相互关联的信息, 包括提供者和客户端的xmi.id.

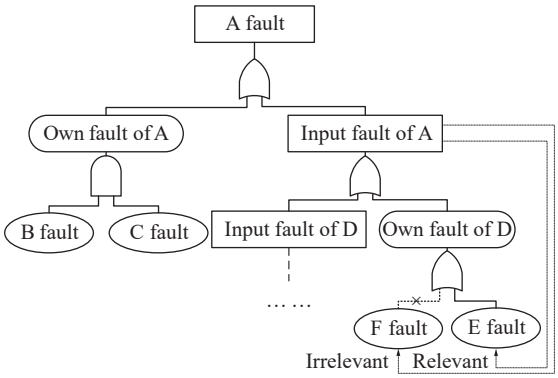


图 16 故障树模型构建逻辑

Fig. 16 Construction logic of fault tree model

体对应关系, 如图 17 所示, 其中左侧为故障树中的符号, 右侧为 Petri 网中的符号.

Petri 网模型中的相关定义如下.

$\boldsymbol{I}: P \to T$为输入矩阵, 若 p_i为 t_j的输入, 则 $\boldsymbol{I}_{i,j}=1$, 否则$\boldsymbol{I}_{i,j}=0$.

$\boldsymbol{O}: T \to P$为输出矩阵, 若 p_i为 t_j的输出, 则 $\boldsymbol{O}_{i,j}=1$, 否则$\boldsymbol{O}_{i,j}=0$.

$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{O}-\boldsymbol{I}$, 为关联矩阵, 由此矩阵可以计算出最小割集, 计算步骤如下[17].

步骤 1 在$\boldsymbol{A}$中找到不含“–1”项的行, 该行对应故障表征直接关联器件的故障事件, 继续在该行中“1”项所在的列中查找为“–1”的项, 其所在的行代表了导致直接关联器件故障的原因事件. “1”项所在的列中若包含多个“–1”项, 则项之间为“与”逻辑关系, 而每一列之间为“或”逻辑关系.

步骤 2 逐个处理步骤 1 中的找到的“–1”项所在的行, 在该行中寻找“1”项. 若没有“1”项, 则表示该行对应的故障事件已为最小故障事件单元. 若含有“1”项, 则将该行按步骤 1 中相同的方式进行处理, 其中若某行中有多个“1”项, 则这些项之间是“或”逻辑关系.

步骤 3 重复步骤 1 和步骤 2, 直到所有新找到的行中均不存在“1”项为止.

步骤 4 将所有搜索到的事件之间为“与”逻辑关系的用乘号 (×) 运算, 为“或”逻辑关系的用加号 (+) 运算, 以此得到故障顶层事件的表达式, 将其展开并根据布尔吸收律求解即可得到以 (+) 号连接的各项最小故障割集的表达式.

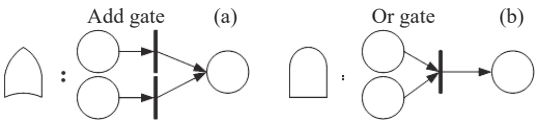


图 17 故障树逻辑符号与 Petri 网的转换关系

Fig. 17 Conversion of fault tree logic symbols to Petri nets

4 应用实例

以针对“系统数据存储故障”的故障诊断过程为例具体给出所提方法的实现过程. 根据已观测到的“系统数据存储故障”故障表征, 通过图 14 构建的故障表征直接关联模型可知直接关联的组件是系统信息装置, 因此“系统信息装置故障”为待构建的故障树模型的顶层事件.

根据 3.2 节中介绍的故障树构建逻辑完成故障间接关联组件的搜索和完整故障树模型的构建, 将“系统信息装置故障”原因分为自身故障和输入故障, 由“或”逻辑关系连接. 对于自身故障则需要根据系统信息装置的 SysML 模块定义图模型查询其内部组件, 由模型可知其由系统网络计算节点、系统网络储存节点 1、系统网络储存节点 2、系统主控单元、系统数据交换总线、系统数据接口转换单元和系统数据管理单元组成, 因此将这些器件的自身故障事件用“或”逻辑关系连接, 并指向系统信息装置自身故障. 对于输入故障, 则需要查询与系统信息装置相关的 SysML 内部模块图模型来进一步扩展故障树, 如根据图 7 所示的 SysML 模型可知, 对系统信息装置有输入的是系统配电器、平台系统网和系统实验数据信息接口, 因此将这些组件的故障事件用“或”逻辑关系连接并指向输入故障事件. 此外, 通过图 10 所示的系统配电器内部模型可知, 材料实验载荷加断电开关与燃烧实验载荷加断电开关对系统信息装置并无输入关系, 因此该二者的故障事件被从故障树模型中剪去, 系统配电器故障事件仅向下扩展了程控单元故障与信息装置加断电开关故障两个底层故障事件. 综上, 构建所得到的完整故障树模型如图 18 所示, 其中故障树模型的底层事件如表 2 所示.

根据 3.3 节内容, 将故障树模型转化为 Petri 网形式, 如图 19 所示, 表 3 给出了所有事件. 根据 Petri

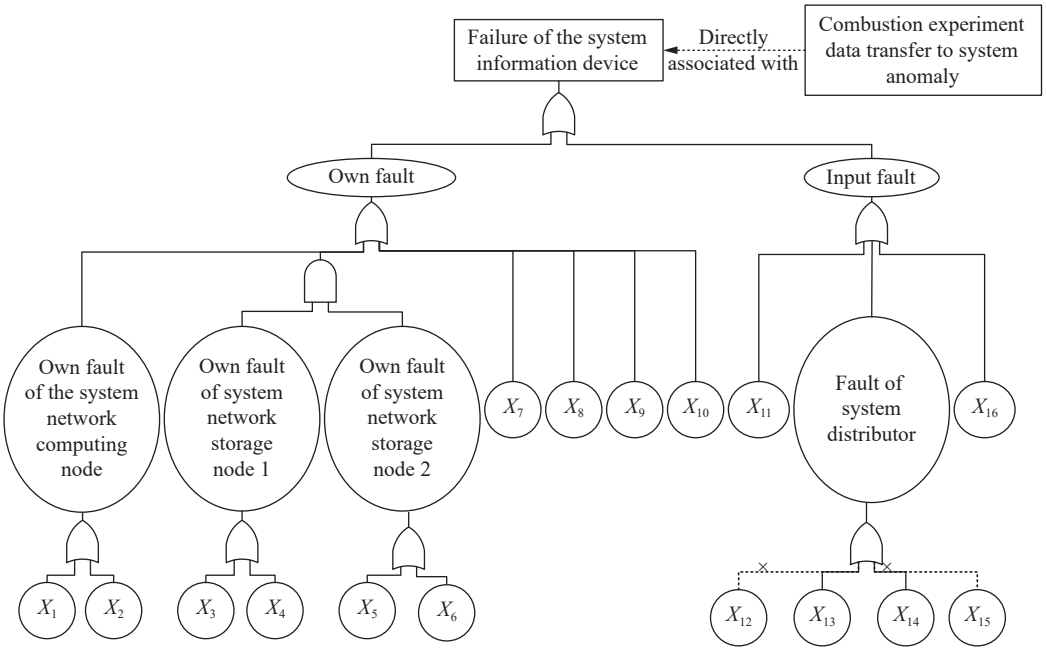


图 18　系统数据存储故障树模型

Fig. 18　System data storage fault tree model

表 2　“系统数据存储故障”故障树模型底事件

Table 2　Fault tree model of “system data storage failure” bottom event

事件	符号	事件	符号
系统数据计算单元自身故障	X_1	系统数据接口转换单元自身故障	X_9
系统计算管理单元自身故障	X_2	系统数据管理单元自身故障	X_{10}
系统存储管理单元1自身故障	X_3	平台系统网故障	X_{11}
系统数据存储单元1自身故障	X_4	实验装置加断电开关故障	X_{12}
系统存储管理单元2自身故障	X_5	程控单元故障	X_{13}
系统数据存储单元2自身故障	X_6	系统信息装置加断电开关故障	X_{14}
系统主控单元自身故障	X_7	信息装置加断电开关故障	X_{15}
系统数据交换总线自身故障	X_8	系统实验数据信息接口故障	X_{16}

网可以获取输入矩阵与输出矩阵, 并进一步计算得到图 20 所示的关联矩阵.

根据图 20 所示的关联矩阵即可计算出“系统信息装置故障”事件的表达式为 $P_{21}=P_1+(P_2+P_3)\times(P_5+P_3)\times(P_6+P_4)\times(P_5+P_4)\times(P_6+P_7+P_8+P_9+P_{10}+P_{11}+P_{12}+P_{13}+P_{14})$, 根据表达式得到最小割集为 P_1, P_2, P_3P_5, P_3P_6, P_4P_5, P_4P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, 即造成“系统信息装置故障”的所有可能性如下: 系统主控单元自身故障; 系统数据管理单元自身故障; 实验载荷系统实验数据信息输入故障; 系统数据计算单元自身故障; 系统计算管理单元自身故障; 系统存储管理单元 2 自身故障; 系统存储管理单元 1 自身故障; 系统数据存储单元 2 自身故障; 系统存储管理单元 1 自身故障; 系统存储管理单元 2 自身故障; 系统数据存储单元 1 自身故障; 系统数据存储单元 2 自身故障; 系统数据存储单元 1 自身故障; 以太网的输入故障; 系统数据交换总线自身故障; 平台系统网输入故障; 系统数据接口转换单元自身故

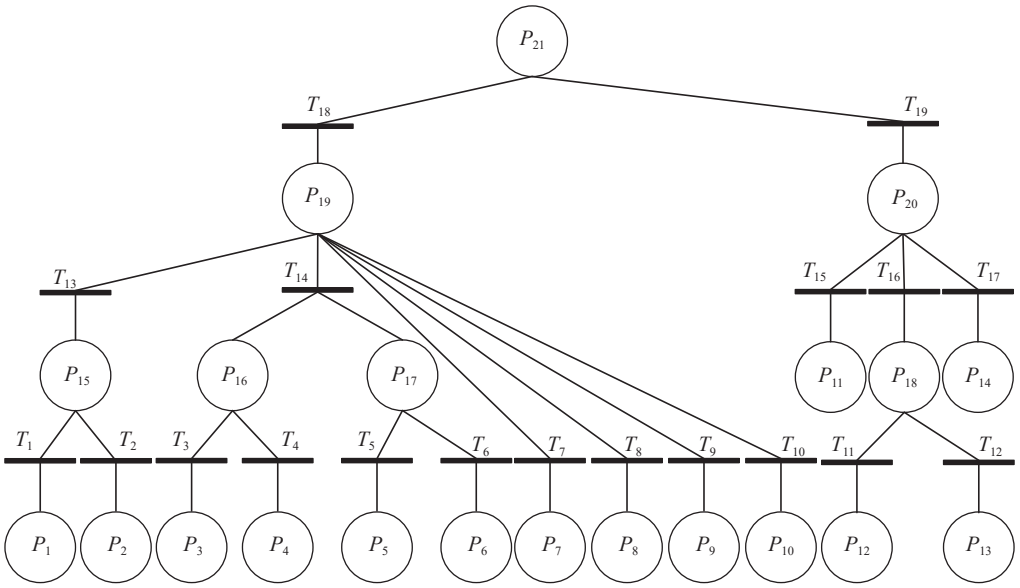


图 19 系统数据存储故障树模型

Fig. 19 System data storage fault tree model

表 3 “系统数据存储故障”故障树模型底事件

Table 3 Fault tree model of “system data storage failure” bottom event

事件	符号	事件	符号
系统数据计算单元自身故障	P_1	程控单元故障	P_{12}
系统计算管理单元自身故障	P_2	系统信息装置加断电开关故障	P_{13}
系统存储管理单元1自身故障	P_3	系统实验数据信息接口故障	P_{14}
系统数据存储单元1自身故障	P_4	系统网络计算节点自身故障	P_{15}
系统存储管理单元2自身故障	P_5	系统网络存储节点1自身故障	P_{16}
系统数据存储单元2自身故障	P_6	系统网络存储节点2自身故障	P_{17}
系统主控单元自身故障	P_7	系统配电器故障	P_{18}
系统数据交换总线自身故障	P_8	系统信息装置自身故障	P_{19}
系统数据接口转换单元自身故障	P_9	系统信息装置输入故障	P_{20}
系统数据管理单元自身故障	P_{10}	系统信息装置故障	P_{21}
平台系统网故障	P_{11}		

$$
\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0\\
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
\end{bmatrix}
$$

图 20 Petri 网关联矩阵

Fig. 20 Correlation matrix of the Petri net

障; 系统信息装置加断电开关故障; 实验数据信息的输入故障.

5　结论

将 MBSE 思想引入到空间有效载荷系统的故障诊断过程当中, 针对空间有效载荷系统的高复杂化、高度定制化、多样性和跨多学科领域的特点, 引入 SysML 对空间有效载荷系统进行建模, 并扩展了 SysML 元模型, 以建立适用于故障分析的组件关系模型与故障表征直接关联模型. 基于所建 SysML 模型, 提出了故障诊断整体框架, 实现了从 SysML 模型到故障树模型的构建以及故障的最小割集计算, 从而获取了引发故障表征的所有可能性. 最后, 通过实例验证了本方法用于空间有效载荷系统故障分析与诊断的可行性和实用性.

参考文献

[1] WANG D Y, FU F Z, LI W B, *et al*. A review of the diagnosability of control systems with applications to spacecraft[J]. *Annual Reviews in Control*, 2020, **49**: 212-229

[2] WANG Yakun, YANG Kaifei, ZHANG Jie, *et al*. Case study of in-orbit satellite failures and artificial intelligence based failure detection[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, **42**(1): 16-29

[3] SAMSON O T, MICHAEL I O, AKANNI A A, *et al*. A review of failure analyses in engineering: causes, effects and possible solutions[C]//2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG). Omu-Aran: IEEE, 2023: 1-8

[4] TIMPERLEY L, BERTHOUD L. Reliability analysis and failure mitigation strategies for the PROVE pathfinder CubeSat payload[C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky: IEEE, 2022: 1-18

[5] YAZDI M, MOHAMMADPOUR J, LI H, *et al*. Fault tree analysis improvements: a bibliometric analysis and literature review[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2023, **39**(5): 1639-1659

[6] RAJENDRAN R, DHANRAJ J A. A Fault Tree Analysis (FTA) focusing the design attributes and Decision Tree Analysis (DTA) comparing payload: weight for various adhesive mechanism of wall climbing robot[J]. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 2023, **11**(5s): 606-617

[7] LAWRENCE S, LOVELESS D. System-level radiation effects modeling using temporal fault trees[C]//2023 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2023: 1-14

[8] AMMONS K J. Concept of Operations and Failure Analysis for A Complex Deployable CubeSat Antenna Payload [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2022

[9] MOHAN A B, AMBILIKUMAR C K. Advancements in failure mode and effect analysis: a review[C]//2022 Second International Conference on Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS). Kottayam: IEEE, 2022: 1-6

[10] JONES M, FRETZ K, KUBOTA S, *et al*. The use of the expanded FMEA in spacecraft fault management[C]//2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Reno: IEEE, 2018: 1-6

[11] DELLIGATTI L. SysML Distilled: a Brief Guide to the Systems Modeling Language[M]. Upper Saddle River: Addison-Wesley, 2013

[12] FRIEDENTHAL S, MOORE A, STEINER R. A Practical Guide to SysML: the Systems Modeling Language[M]. 3rd ed. Waltham: Morgan Kaufmann, 2015

[13] HE Yufeng. Research of Key Technologies on Intelligent Test for Payload System[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2011

[14] WANG Jing. Research on Technology of Generating Test Cases Intelligently for Payload System[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences), 2018

[15] CUI Xiaojie, LU Dengbai, MA Dongtao, *et al*. Research progress of high temperature material science experimental equipment for space application[J]. *Manned Spaceflight*, 2023, **29**(4): 455-463

[16] ZHANG Zhenzhong, KONG Wenjun, ZHANG Hualiang. Design of combustion science experimental system for China space station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 72-78 (张振忠, 孔文俊, 张华良. 空间站燃烧科学实验系统设计 [J]. 空间科学学报, 2020, **40**(1): 72-78)

[17] LI Yongyong, ZHANG Yongjin, ZHANG Yanjun. Design of vehicle fault diagnosis expert system based on petri net[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2020(1): 4-7

作者简介



金　鑫　男, 1998 年 12 月出生于上海市, 现为中国科学院大学飞行器设计专业硕士研究生, 主要研究方向为飞行器总体设计、系统工程和空间态势感知.
E-mail: jinjessy@163.com



贺宇峰（通信作者）　男, 1979 年 10 月出生于陕西省榆林市, 现为中国科学院空间应用工程与技术中心研究员、硕士生导师, 主要研究方向为计算机应用、自动测试.
E-mail: heyufeng@csu.ac.cn