

分类号 TN955+.1

密 级

U D C 621

学校代码 10500



湖北工业大学
HUBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

硕士学位论文

(学历教育-专业学位)

题 目：基于智能体的某型雷达天线测试性建模与虚拟验证

英文题目：Testability modeling and virtual verification of a radar
antenna based on agent

学位申请人姓名：李善强

申请学位学科专业：仪器仪表工程

指导教师姓名：聂磊、刘梦然

二〇二一年六月

分类号 TN955+.1

密 级

UDC 62-7

学校代码 10500



湖北工业大学
HUBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

硕士学位论文

题 目 基于智能体的某型雷达天线测试性建模与虚拟验证

英文题目 Testability modeling and virtual verification of a radar antenna based on agent

研究生姓名(签名) 李善强

指导教师姓名(签名) 殷磊 职 称 教授

申请学位学科名称 仪器仪表工程 学科代码 085203

论文答辩日期 2021.05.23 学位授予日期 2021.06.30

学院负责人(签名) 江

评阅人姓名 许贤泽 评阅人姓名 黄安贻

2021 年 6 月 30 日

湖北工业大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李善强

日期：2021年6月15日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖北工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：李善强

指导教师签名：殷磊

日期：2021年6月15日

日期：2021年6月15日

摘 要

测试性是检测故障的一种能力，测试性分析与验证是测试性的一个关键步骤。现有的测试性分析与验证大多数利用的是实物分析验证，即通过系统在使用过程中进行实时故障检测分析，对其进行故障注入，使其发生相应故障模式，但这种方法会出现周期大、成本高，故障难以注入等问题，结合虚拟建模技术的发展，本文提出了利用虚拟技术对雷达天线进行测试性建模与虚拟验证。论文首先从搭建一个虚拟雷达天线模型所需基本理论出发，利用智能体建模技术，搭建了虚拟雷达天线模型，最后测试系统对虚拟雷达天线系统进行故障注入，得到测试性指标结果，完成测试性虚拟分析与验证。论文的主要研究内容如下：

首先针对虚拟建模目标以及方法不明确的问题，进行理论研究。测试性分析与验证来源于故障的发生，即当一个系统发生故障时，需要对故障进行检测，根据检测系统的损坏程度进行维修，使系统重新正常工作，其中故障、检测、维修包括了可靠性、维修性、保障性以及测试性的基础理论知识，再结合雷达天线的系统结构，利用智能体和离散事件建模技术，即可完成虚拟雷达天线仿真模型的搭建。

其次针对搭建的虚拟雷达天线仿真模型，对其特点进行介绍。首先雷达天线系统采用了多层嵌套式结构特征进行模型结构搭建。其次介绍模型包括了主系统、分系统、部件以及保障库等组成部分。在此基础上，介绍了系统中的通讯规则，其中包括分系统之间、系统与部件之间遵循函数通讯，部件之间、部件与保障库之间遵循端口通讯。模型中还包括测试性分析与验证设计部分，该部分将实时循环读取测试机发送过来的故障编码，从而实现故障注入，并计算测试性相关指标数据值返回发送给测试机。

最后通过实例，对某型雷达天线系统的设计方案进行了测试性分析和验证。虚拟验证的流程首先选取双方风险的验证方案。接着对虚拟天线系统进行了 50000 个小时的仿真，得到各个分系统的故障情况，从而确定分系统样本量分配。本文设置了 23 个测试点，通过故障注入，提取每个测试点是否有信号，将生成故障-测试矩阵，对其进行特征提取，除去模糊组和全零组，计算得到测试性指标故障检测率和故障隔离率，致使实现雷达天线测试性虚拟分析与验证，并对测试性设计提出改进意见。

关键词： 雷达天线，测试性验证，虚拟仿真，智能体，RMS

Abstract

Testability is a kind of ability to detect faults, and testability analysis and verification is a key step of testability. At present, testability analysis and verification mainly utilizes physical analysis verification. The detection analysis of the system occurred during the use of the system, it is faulty mode, but the corresponding fault mode is made, but this method will have problems with large cycle, high cost, difficult injection, combined with virtual modeling technology. Development, this paper proposes test virtual modeling and verification of radar antennas using virtual technology. The paper first started from the basic theory of virtual radar antenna model, using intelligent body modeling technology, built a virtual simulation radar antenna model including the tentacles, and finally testing the virtual simulation radar antenna system fault injection, get testability Indicators result, complete test virtual analysis and verification. The main research contents of the paper are as follows:

First, in response to the problem of virtual modeling targets and methods, the atrial study is conducted. Testability analysis and verification comes from the occurrence of faults. When a system fails, it is necessary to detect the fault. Repair according to the degree of damage to the system being detected, so that the system works properly, in which the fault, detection, and maintenance include reliability, maintainability, affordability, and testability basic theory knowledge, and combine the system structure of radar antennas, using agent and discrete event modeling technology, can complete the construction of virtual radar antenna simulation model.

Secondly, for the construction of the virtual radar antenna simulation model, it is introduced. First, radar antenna system uses multi-layer nested structural features to perform model structures. Secondly, the model includes components of the main system, division system, division system, part and guarantee library. Then, the communication rules in the system are introduced, with the system and components, and the components, the components, the part and the guarantee are followed, followed by port communication. The model also includes a test analysis and verification design component that reads the fault encoding from the real-time loop to the test machine, thereby implementing fault injection, and calculates the test-related indicator data value returns to the test machine.

Finally, in a case of a certain radar antenna system, testability analysis and verification are performed according to the design plan. The process of virtual verification first selects the verification scheme of both parties. The virtual antenna system is then simulated 50,000 hours to obtain a sub-system failure rate, thereby selecting a sample quantity assignment of the system. This paper sets 23 detection points. By fault injection, extract if each monitoring point has signal, will generate a fault-detection matrix, and the feature extraction is made, remove the fuzzy group and the whole group, calculate the test target failure detection rate and fault isolation rate cause the realization of radar antenna testing virtual analysis and verification, and propose improvements to test design.

Keywords: Radar antenna, Testability verification, Virtual simulation, Agent, RMS

目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 测试性仿真建模与虚拟验证的发展.....	2
1.2.2 测试性建模与虚拟验证的应用.....	3
1.3 本文的主要内容与论文章节安排	4
第 2 章 某雷达天线系统测试性仿真建模理论分析.....	6
2.1 雷达天线系统三性仿真建模基础理论.....	7
2.1.1 可靠性	7
2.1.2 维修性	8
2.1.3 保障性	9
2.2 测试性.....	9
2.2.1 故障检测率(Fault detection rate, FDR).....	10
2.2.2 故障隔离率(Fault isolation rate, FIR).....	10
2.3 雷达天线系统概述	11
2.3.1 T/R 组件模块.....	12
2.3.2 电源模块	12
2.3.3 频综模块	12
2.3.4 综控模块	13
2.3.5 波分复用模块.....	13
2.3.6 侦察模块	14
2.4 多方法建模	14
2.4.1 离散事件	14

2.4.2 多智能体	15
2.5 本章小结	17
第3章 面向测试性分析的模块化虚拟雷达天线系统仿真模型.....	18
3.1 系统特征	18
3.1.1 建模系统结构特征.....	18
3.1.2 部件故障特征.....	19
3.1.3 部件维修与备件更换.....	22
3.2 通讯规则	23
3.2.1 函数通讯	23
3.2.2 端口通讯	24
3.3 建模模块	24
3.3.1 系统	25
3.3.2 部件	27
3.3.3 备品备件保障库.....	30
3.3.4 故障指标输入.....	31
3.4 本章小结	32
第4章 雷达天线系统测试性虚拟验证研究.....	33
4.1 测试方案的选取	35
4.2 故障样本分配	36
4.3 故障注入	39
4.4 参数评估	43
4.5 本章小结	44
第5章 试验结果总结与系统验证.....	45
5.1 测试性验证试验结果总结.....	45
5.2 测试机系统验证	46
5.2.1 测试机系统验证.....	46
5.2.2 测试机系统评价.....	47
5.3 仿真机系统验证	47
5.3.1 仿真机系统验证.....	47

湖北工业大学硕士学位论文

5.3.2 仿真机系统评价.....	48
5.4 本章小节	49
第6章 总结与展望	50
6.1 工作总结	50
6.2 工作展望	50
参考文献	52
致 谢	56

第1章 绪论

1.1 课题背景与意义

伴随着电子化、信息化、智能化的高速发展,各种系统设备在设计和制造中相继出现了大量的新技术、新工艺,使得现代系统的复杂性不断提高,也将出现当系统发生故障时,很难及时对其进行测试检测和诊断工作^[1,2]。因此为了提高系统设备的可用性和可靠性,降低故障次数,优化设计,控制维修,提出了对系统进行测试的要求,对其测试指标作出了相关规定,由此引发了测试性验证问题。

测试性是指“当系统设备发生故障时,人们能够在短时间内准确地判断出电子产品的工作状态(性能下降、正常工作或不正常工作),同时必须能够有效隔离其内部故障的一种设计特征”^[3,5]。测试性的水平直接影响系统设备的全寿命周期,也系统设备的维修保障。此外,良好的测试性设计对于提高系统设备的维修保障情况和可用性,降低全周期费用,及时、快速地检测和隔离故障等具有极大的作用^[6,8]。现阶段,测试性是系统设备研制、使用和维修保障的重要指标之一。因此,在系统设备的设计、制造、安装和验收过程中,均应对系统设备进行测试性验证。

测试性验证是指根据测试性所规定的测试方法评估系统设备的测试性水平,判断该系统设备测试性水平是否满足设计要求,并以此决定系统设备是否被接收^[9,12]。然而,测试性验证试验需要确定试验方案、故障注入和参数评估。其中,故障注入是测试性验证的关键技术,但是,已有的测试性验证试验中的故障注入是在实物中进行的,这不仅会影响被测对象的性能,甚至有可能破坏被测对象,而且被测对象中可能还存在不可检测点,使部分故障样本无法注入,从而造成试验结果不够准确^[13,17]。因此,虚拟实物测试性验证应运而生,通过仿真技术,开发一款具备自动完成测试性验证的软件具有非常大的实用价值。

复杂系统测试性仿真建模的方法有很多种,根据仿真技术原理,可大致分为系统动力学、面向过程的离散事件和基于智能体的仿真方法^[18,21]。在这些方法中,基于智能体的仿真方法具有自主性强、灵活性强和良好的扩展性等诸多优点,是解决复杂系统的有效方法。其核心思想是更关注系统整体层面上的现象或行为如何由底层行为导致的,为复杂系统建模仿真领域提供了新的思路。它涉及到了广泛且复杂的理论知识,在军事和民用领域已被广泛运用,具有着极其重要的意义。

以智能体建模技术为基础,对军事上的复杂系统进行建模,如搭建舰船、雷达

模型,对战斗过程进行仿真;运行智能体的自主、自觉、协调等功能,对复杂装备进行故障诊断,从而提高复杂系统的效能^[22,23]。除军事领域外,智能体技术还在交通运输调度、复杂系统评估模型、路线规划、系统动力学、疾病传播、社会学等多个领域得到广泛的应用^[24,29]。例如,在交通客运枢纽仿真系统中,通过科学的方法动态地模拟仿真行人、车辆、服务设施等,可有效地预测地铁或交通路口各个环节出现的瓶颈问题,从而实现对行人快速安全过路口、商场紧急快速疏散和车辆有序排除拥堵等方面的需求。在复杂系统评估模型中,每个系统都智能化,都具备良好的独立性和适应性,较好地解决项目多次返工以及动态调整等问题。

现今测试性指标也是设备采办的重要参考指标之一,越来越受到订购方、设计方、试验方、使用方等部门的重视^[30,31]。然而伴随着设备智能化研制的推进,国内不少装备型号正面临设计定型时期,无论是承制单位还是采购单位,都急需一种费用小、省时间、快速的测试性验证试验技术,该技术将解决怎样在降低设备测试性验证试验风险、费用、全周期的同时,科学合理地对设备测试性水平进行验证和评价。

本文在项目的支持下,针对实物测试性验证试验中故障注入困难、风险大、周期长、费用高等问题,提出了基于智能体仿真技术下相控阵雷达天线测试性验证的总体方案,并对测试性验证中的关键技术问题进行了系统的研究。本研究解决了测试性验证中周期长、成本费用高、故障注入困难、故障样本不合理等问题,为装备测试性验证提供了一条可行性方法建议,具有一定的现实意义。这种虚拟验证方式不仅可以实物故障注入时导致的装备损坏,从而增加试验费用的问题,还能解决由于某些物理故障样本无法注入,即出现一些不可检测点,造成测试性评估结果不够全面的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 测试性仿真建模与虚拟验证的发展

复杂系统测试性验证试验技术是随着计算机技术的发展而发展成熟起来的,虚拟测试性验证试验是装备系统评估工作的重要组成部分,甚至当仿真模型颗粒度足够高时,它可以代替物理模型进行全方位的试验验证,从而成为装备系统评估的新技术。在国外测试性技术研究中,欧美国家测试性技术的发展遥遥领先。上世纪70年代,美国首次强调了对测试技术进行研究的重要性^[32]。但当时系统设备发生故障后,测试水平较低,测试手段主要在于人的经验判断,无法将测试技术全面普及。但是到了90年代,随着计算机的普及,使得美国等国家开展测试性技术的

发展非常方便，并取得了一定的成果。1996 年，Sujoy Sen^[33]等人提出利用虚拟仿真技术，搭建可自动生成的伴生虚拟模型，进行测试分析、故障注入以及测试性验证。在对 APG-66 雷达系统初步评估系统的有效性时，美国空军通过搭建虚拟雷达系统模型，对其注入了 1248 个故障^[34]，从而实现对系统的评估。Mr.Douglas^[35]等学者利用仿真建模技术，搭建了鱼鹰直升机虚拟模型，在此基础上进行了其的测试性评估，之后通过实物验证与虚拟验证的结果进行比较，证明了仿真建模技术的可行性和合理性，并据此对直升机测试性验证阶段节省了 500 万美元。

国内测试性分析验证技术起步较晚，但也对虚拟验证试验技术进行了相关研究，并获得了一定的成果。以李永春^[36]等为例，针对复杂电子装备研发过程中性能测试需求，提出了复杂电子装备虚拟仿真测试技术，从而对电子装备的研发设计提供优化。高鑫宇^[37]在进行测试性虚拟验证过程中，针对故障模拟和故障注入等问题，设置多信号检测点，提出了模糊概率多信号流模型，其能够更好地模拟故障传播。李宁^[38]在进行结构化设计语言的过程中，重点研究了航电构型控制系统的测试性建模理论，构建了航电构型控制系统的虚拟仿真模型，完成了系统功能属性的测试及验证要求。刘城^[39]针对实物测试性验证费用高，故障注入难以实现等问题，提出平均无故障时间进行样本量分层分配，优化改进了虚拟验证方案，利用 VS 与 Pspice 混合编程实现虚拟故障注入，利用概率统计的方法估计测试性指标，设计开发了虚拟验证软件系统。王超^[40]分析了测试性实物和虚拟验证技术的各个特点，提出了测试性虚实结合的方法，利用虚拟试验数据为基础的各类先验信息，同时，利用现场试验数据对装备待测指标进行评估，综合利用虚实先验数据来提高指标评估的精度，并利己导弹控制系统对其方法进行了验证。

1.2.2 测试性建模与虚拟验证的应用

在测试性工程中的虚拟验证试验进行研究的文献中，多集中于电子产品的故障传播模拟、特殊故障点注入、测试性分析等方面。例如，王魁^[41]以某型导弹的控制电路为对象，利用 EDA 软件进行故障建模、故障注入以及仿真分析，计算出故障检测率，同时与实际电路发生相同故障时的测试结果相一致，对提高系统测试性验证有一定的意义。赵晨旭^[42]以某型直升机航向姿态系统为对象，建立了航向姿态系统的结构-功能-行为-故障-测试一体化虚拟样机模型，并对模型进行了测试性仿真分析与虚拟验证，得到测试性指标。刘瑛^[43]以小子样统计理论为基础，利用先验信息，构建了航姿系统试验的评估指标和测试性虚实样本的虚拟伴生模型，利用 Dymola 建模仿真平台，搭建了航姿系统虚拟样机，在此基础上，采用层次分析法和模糊综合评判法进行混合评估测试性虚拟试验数据的可信度。最后采用一体化

试验方案进行指标评估和结果分析，有效地分析与验证系统的测试性水平。

1.3 本文的主要内容与论文章节安排

本论文主要是对相控阵雷达天线系统的测试性建模与虚拟验证进行研究，论文是按照测试性验证的过程进行相关性研究，测试性验证工作流程主要分为四个阶段：雷达天线建模、验证方案选取、虚拟故障注入、数据分析和测试性指标计算。论文将利用 Anylogic 通用仿真建模软件，设计并构建了面向雷达天线可靠性、维修性、保障性以及测试性仿真的全数字被测系统模型，选取相应的验证方案，对其进行虚拟故障注入和特征提取，最后通过仿真分析得到测试性指标。基于以上思路，以雷达天线为对象，采用智能体仿真建模技术，研究基于智能体雷达天线测试性验证。具体研究内容如图 1.1 测试性验证总体方案图所示。

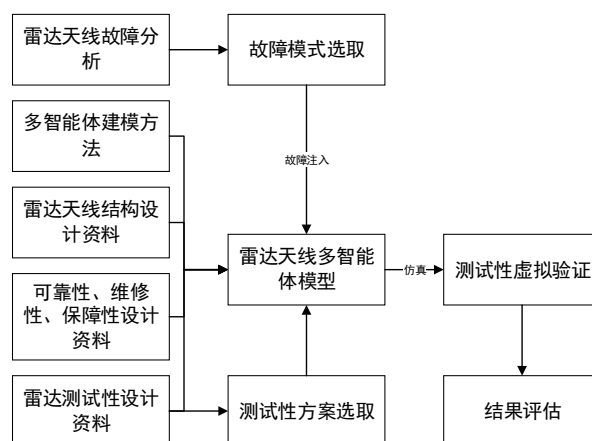


图 1.1 测试性验证总体方案图

根据以上文章的总体方案，论文一共划分了六个章节，各个章节的具体内容如下所示：

第一章：绪论。介绍了雷达天线测试性建模和虚拟验证的研究背景、国内外发展现状，由于雷达天线物理样机的制造成本和设计的复杂程度，引入设计虚拟样机的必要性，同时针对后续文章的研究内容进行总结和阐释。

第二章：某雷达天线系统测试性仿真建模理论分析。本章主要介绍了建模前所需的理论知识。首先，从故障的角度出发，分析了建模过程中可靠性、维修性、保障性以及测试性的基本指标参数。接着从雷达天线系统的分类和功能出发，分析并归纳现阶段雷达天线系统的一般构成，得到子系统的可靠性框图，且明确各分系统内部，部件间及部件与子系统间的功能逻辑关系。最后简要介绍了雷达天线系统建模技术所需基本概念、理论与方法，这为后续进行仿真模型的搭建奠定了基础。

第三章：面向测试性分析的模块化虚拟雷达天线系统仿真模型。本章利用多智

能体、离散事件技术进行混合建模，重点介绍系统特征、模块通讯以及系统、部件、保障库、故障注入等相关分析模块。为测试性分析和试验验证作为模型基础，同时又是技术与艺术的结合。

第四章：雷达天线系统测试性虚拟验证。本章利用虚拟雷达天线模型，对其进行了测试性验证，包括测试验证方案确定、试验样本量的确定、故障注入以及测试性指标分析。实例验证表明，该测试性虚拟验证方法的可行性以及合理性。

第五章：试验结果总结与系统验证。本章主要对第四章模型运行 50000 个小时可靠性结果以及测试性验证结果进行总结，并对测试机与仿真机进行功能和性能的验证和评价。

第六章：总结与展望。本章对本文的研究内容进行总结，并对测试性建模与虚拟验证方面进一步研究的工作进行展望。

第2章 某雷达天线系统测试性仿真建模理论分析

本课题来源于某部委托课题项目。该项目包括两大主要部分：测试性预计和测试性验证。测试性预计将通过分析装备的结构及功能，建立多信号流图模型，对其进行测试性预计获得故障检测率、故障隔离率、未检测故障等测试性指标。测试性验证将在 Anylogic 平台上利用智能体仿真建模技术搭建雷达天线系统虚拟模型，在接收到测试机验证模块发送的故障指令后进行故障模拟，分析测试性指标是否到达要求。考虑到系统的实际需求、技术、成本和难度，本方案采用 Labview 和 Matlab 混合编程完成测试性预计。测试性验证以 Labview 软件为测试机，Anylogic 平台为基础的仿真机，其中测试机与仿真机通过 TCP/IP 通讯，如图 2.1 所示，进行数据交互，实现了使用 Anylogic 作为仿真机虚拟模型的搭建，该模型具有可视、简洁、美观、响应速度快等特点。

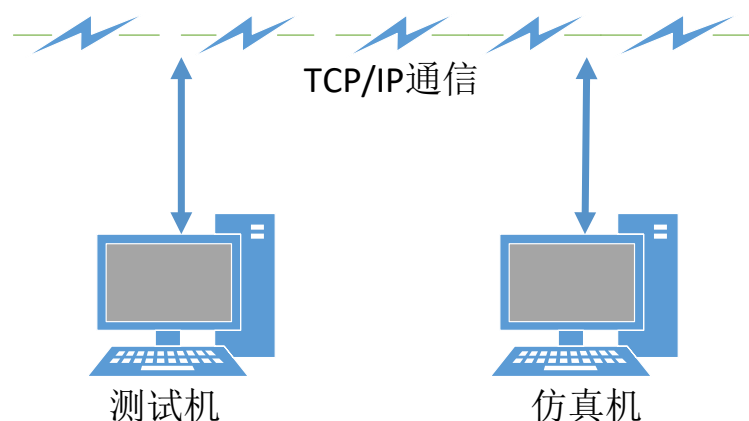


图 2.1 测试机与仿真机信息交互

本章的主要内容是对相控阵雷达天线测试性仿真建模与虚拟验证，其中测试性仿真建模与虚拟验证需要用到虚拟相控阵雷达天线。即仿真建模是测试性虚拟分析与验证的关键部分，要进行雷达天线虚拟建模，需要了解雷达天线建模相关的理论知识，包括测试性设计资料、故障结构、故障规律和环境数据库设计资料等。针对雷达天线故障注入、故障传播等过程，需要用到三性（可靠性、维修性、保障性，RMS）基础理论设计要求，其中，可靠性研究目的是指导模型故障的发生规律。部件发生故障后，根据部件的损伤程度进行维修或者部件整体更换，损伤程度小的可根据维修性进行相应维修，损伤程度大导致维修成本大或不可维修的根据保障性进行部件整体单元的更换。在此基础上，本章根据建模需要，分别给出了相控阵雷达天线系统的可靠性、维修性、保障性以及测试性的定义及关键指标参数，并根

据系统的结构、功能和组成，提出了各个子系统的可靠性逻辑框图，明确了各子系统关键输出参数以及了解各子系统内部件对输出参数的影响情况，最后介绍了多智能体建模以及离散事件建模技术。

2.1 雷达天线系统三性仿真建模基础理论

针对本次论文所要研究的课题，需要搭建一个虚拟雷达天线模型。首先，要明确研究的主题来源于雷达天线故障，故障是指在执行任务期间，系统不能执行规定功能而失效的状态，即系统中部件功能失效影响整个系统的运行，从而可能导致所要求的事件未能完成，故障发生后会根据故障规律进行检测、维修和更换，从而使系统重新工作，其中，故障的研究来源于可靠性，系统的维修来源于测试性，系统的更换来源于保障性，由此引入三性进行基本理论分析。

2.1.1 可靠性

可靠性的定义为：产品在规定时间内、规定条件下完成规定功能的能力^[44,45]。本章给出的可靠性的定义是指雷达天线系统在规定的作战任务条件下，规定的正常工作时间内完成指定功能的能力。其中可靠性的典型特征如下：

（1）规定条件

规定的条件指预先规定的雷达天线系统所受到的外部作用，这是一般指雷达天线的运行环境、使用和维护情况。

使用条件包括：雷达天线的工作模式、规定的输入输出信号、一定误差范围内、规定的机械应力、运行状态还包括工作人员技术水平等。

维修条件包括：维修理论、维修人员的等级、维修设备说明书、维修工具以及各种配置和供应情况等。

（2）规定时间

规定的时间指雷达天线系统在整个作战任务期间能正常完成任务的时间，作战任务期间，雷达需要长时间工作，但随着时间的流逝，雷达天线系统可靠性会越来越低，比如，功能弱化，扫描范围变小，因此，本文采取雷达天线执行作战任务时的可靠度工作指标作为规定时间，即对于雷达天线系统来说，规定时间与雷达的一个作战任务周期相同。但是，当对不同规定对象进行规定时间判定时，也有差异。比如，汽车点火装置需要可靠几秒，实现汽车点火即可，这是瞬时的，而一些桥梁建设或者房屋的地基都需要几十年、几百年的可靠性。

（3）规定的功能

规定功能是指完成作战任务的所有规定功能，包括雷达天线接收和发射信号过程中所涉及的全部作战任务。以大功率开关电源为例，其规定功能包括雷达天线的输出电压、输出功率、扫描范围以及抗干扰能力等。因此，仅当输出电压达到实际规定要求，而输出功率达不到规定要求，就不能说它完成了规定的可靠性功能。工程实践中，在进行故障分析时，需明确规定故障种类及其故障模式判断依据，从而较好的识别天线故障的发生；虽然有些故障只是使天线性能弱化，但由于使用过程中进行及时修复仍然可以认定为在规定的时间内完成了规定的功能。最常用的可靠性指标有平均故障间隔时间和失效率，在此主要介绍平均故障间隔时间情况。

平均故障间隔时间(MTBF, mean time between failure)可用于定量衡量可靠性水平的参数，是一个统计性概率参量。

平均故障间隔时间如式 2-1 所示：

$$MTBF = T/S \quad (2-1)$$

其中，T 是故障失效时间；S 为总产品个数。

当 S 为 0 时，按 1 计算，故障率 $\lambda_S = 1/MTBF$ ；当 S 为 0 时， λ_S 取 0。

任务可靠度计算公式如式 2-2 所示

$$R_m = e^{-\lambda t} = e^{-t/MTBF} \quad (2-2)$$

其中 $e = 2.271828$ 。

2.1.2 维修性

维修性的定义为：当设备出现故障后，应由具有专业技术水平的人员，使用特定的程序和资源，并通过规定修理级别进行维修，从而使产品恢复到规定状态的能力，其中包括维修的难易程度和费用成本情况^[46,47]。维修性也是雷达天线系统的一种质量特性之一，应使之易于维修。例如，雷达天线系统 T/R 组件模块，设计制造时，如果考虑了维修性，该模块就容易拆装，可精确定位到故障点，因此，需要设计合理的模块形状、构成、配置和连接情况，且满足维修性等要求。因此，雷达天线维修性是一种由设计决定的质量特性之一，主要决定于雷达天线系统发生故障时易于定位和检测的过程。

维修性是由系统本身以及维修有关的其他因素决定的。主要有以下几种：

(1) 维修能力受以下的因素影响：维护工作是否合理，制造技术水平是否高、维修所需资源是否充分。

(2) 固有的维修性在正常状态下不会改变，但由于制造水平和工艺技术水平较低，会导致零部件被破坏，无法满足维修性、可测试性和安全性的要求、维修组织不合理和维修所需资源不足等。

(3) 设备维修提供的数据为提高维修性提供了依据, 可以提高设备的维修性。

由于设备在运行阶段的性能极大的影响设备的维修性, 因此在使用过程中通过多情况的活动来维护设备的维修性, 为新设备的开发提供参考信息。

维修性指标参数也众多, 其中包括平均修复时间(MTTR)、最大修复时间、平均预防性维修时间等等。最常用的参数为平均修复时间(MTTR), 具体指标要求为:

平均修复时间(MTTR, Mean time to repair)是指用于定位产品故障情况并加以排除所需实际时间的平均值, 即产品修复所需的平均时间。在实际工作中, 排除产品或系统故障所需的实际时间包括预排准备、故障定位、备件更换、校准、检验、修复等相关维修时间, 但不包括因管理和后勤保障供应不足而造成的延误时间。

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (2-3)$$

其中, t_i 为第 i 次修复时间, N 为修复的次数。

2.1.3 保障性

保障性是指装备设计特性和设计方案能够保障资源满足平时战备和战时使用要求的能力^[48]。装备的设计特性是指装备与保障相关的各种特性, 主要包括可靠性、维修性、测试性、可运输性、安全性等, 最重要的特性是可靠性和维修性。雷达天线系统是雷达系统的一级子系统, 属于复杂子系统, 故本文所指的保障性是指综合保障, 即在作战任务周期内, 尽可能建立一个成本合理、规模较小的完整保障体系。其目标是保证成本使用合理, 完成系统的战备要求, 在装备生命周期内使装备作战部署后尽快形成作战能力。

2.2 测试性

测试性是指产品能及时、准确地确定其状态, 并有效隔离其内部故障的一种设计特性^[49, 50]。测试性的两大特点是准确、及时的检测和隔离故障。测试性指标代表着复杂装备系统的测试性水平。常见的测试性指标包括: 故障覆盖率、故障检测率、关键故障检测率、故障隔离率以及虚警率等等; 具体测试性参数分类如图 2.2 测试性指标分类所示。

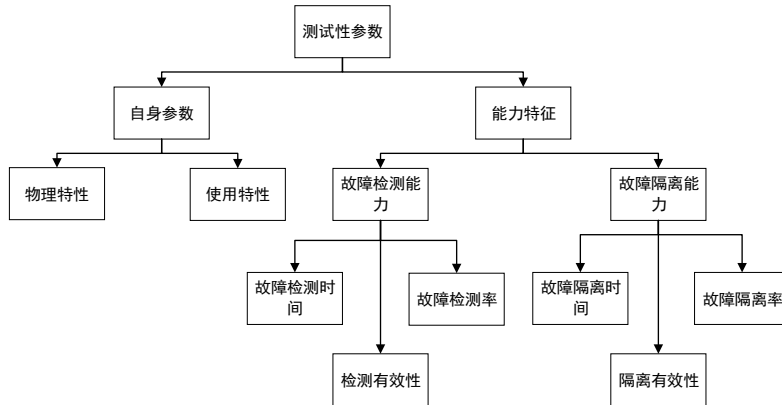


图 2.2 测试性指标分类

当复杂设备出现故障时，要求维修人员能够快速检测和定位到具体某个系统、某个部件，因此，设备测试性性能的基本要求是准确、快速定位故障。在以上测试性指标中，故障检测率与故障隔离率能较好地反映系统测试的准确性，故障检测时间和故障隔离时间能够描述一个系统测试的快速性。然而，由于各类硬件的复杂性日益增加，测试的快速性已不再是一个极其迫切的要求，且测试性的准确性往往比测试的快速性更为重要。因此，本文将选取故障检测率和故障隔离率作为本论文测试性指标。

2.2.1 故障检测率(Fault detection rate, FDR)

故障检测率的定义为通过用规定的方法正确检测出的故障数 N_D 与故障总个数 N 的比值，用百分数表示。实际中用于统计的故障检测率计算模型为：

$$r_{FD} = \frac{N_D}{N} \times 100\% \quad (2-4)$$

N 为故障检测期间发生的故障总数， N_D 为用故障检测规定的方法正确检测到的故障个数。为了使统计得到的指标值接近真实值，一般使统计时间段足够长。

2.2.2 故障隔离率(Fault isolation rate, FIR)

故障隔离率的定义是用检测到的故障数与通过指定方法检测到的不超过指定模糊度的故障数之比，比值用百分数表示。

用于数据统计的故障隔离率可表示为：

$$r_{FI} = \frac{N_L}{N_D} \times 100\% \quad (2-5)$$

其中， N_L 为通过指定方法正确隔离到不大于 L 个可更换单元的故障数， N_D 为通过指定方法正确检测到的故障数。

故障检测率主要是用于将正确检测到的故障隔离到模糊度为 L 的可更换单元组中，从而对故障进行维修。故障隔离率关系到装备的可靠性、维修性和保障性，

是测试性验证中需要考虑的关键试验指标。

2.3 雷达天线系统概述

前文主要介绍了要进行系统建模与虚拟验证所需的四性基本理论，本节根据设计的仿真系统结构的总体框架，将系统按照模块划分为多个子系统，同时给出与各子系统模型框架相关的说明，因与现役装备相关，雷达天线系统总图进行加密处理，如图 2.3 所示。

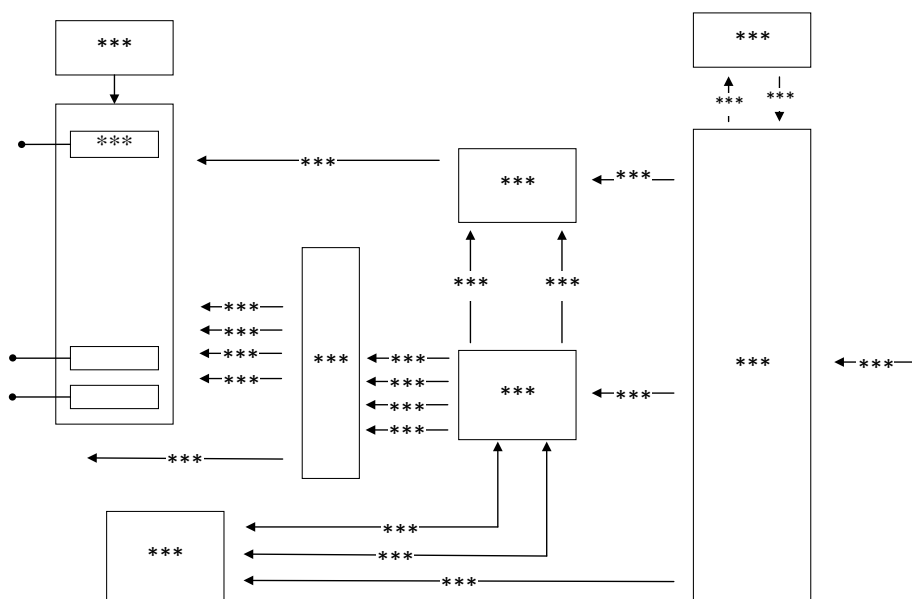


图 2.3 雷达天线系统总图

通过调研，获悉各模块功能，简单介绍如下：

- a) 大功率开关电源：为 T/R 组件提供 500 伏交流电源。
- b) 辅助电源：为综合控制模块、侦察模块、频综模块、波分复用模块提供 200 伏直流电源。
- c) T/R 组件：对发射或接收信号进行滤波、功率放大等信号处理。
- d) 综合控制模块：在不同工作状态下为雷达天线系统其他部件提供相应的控制信号。
- e) 频综模块：提供时钟、激励以及本振信号。
- f) 波分复用模块：将不同波长的光信号整合在一起，实现光纤传输链路的复合功能。
- g) 侦察模块：侦察外界可能存在的干扰信号。

2.3.1 T/R 组件模块

T/R 组件包括模拟电路、数字电路、小信号微波电路及大功率微波电路于一体的电子组件^[51]，其主要作用是完成天线系统发射和接收信号。随着现今半导体技术的高速发展，对 T/R 组件也提出了更高的要求，即在紧凑的结构空间内，要求其具有长时间、高可靠的工作能力。T/R 组件的功能、性能以及可靠性能力直接关系到雷达天线系统的使用效能上。其 T/R 组件内部结构如图 2.4 所示。

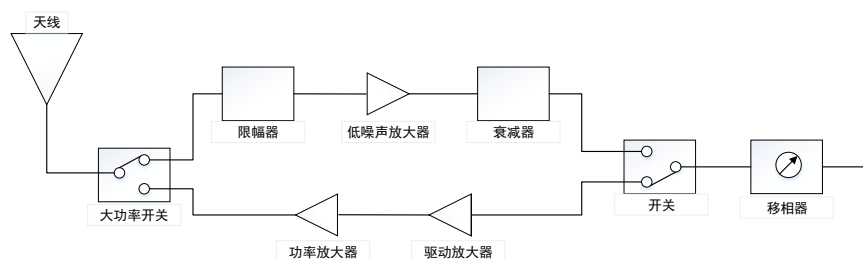


图 2.4 T/R 组件结构图

2.3.2 电源模块

作为雷达天线系统最基本的组成部分，电源模块负责为其他分系统供电，电源模块的可靠、稳定是雷达天线系统正常工作的基本前提^[52]。其内部组成如图 2.5 所示。

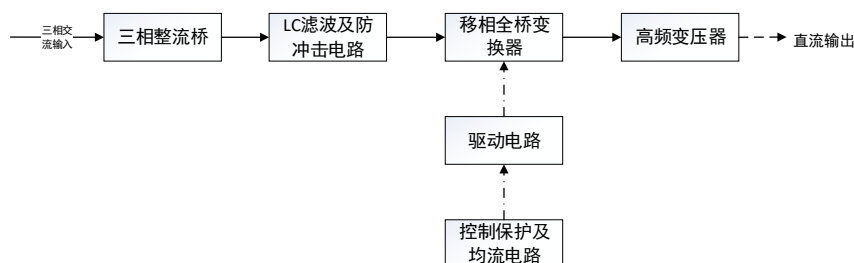


图 2.5 电源模块结构图

2.3.3 频综模块

频率综合模块是雷达天线系统中射频收发系统的关键部件，能够提供高精度、高稳定性的本振信号、激励信号、时钟信号等特定频率^[53]。其内部组成如图 2.6 所示。

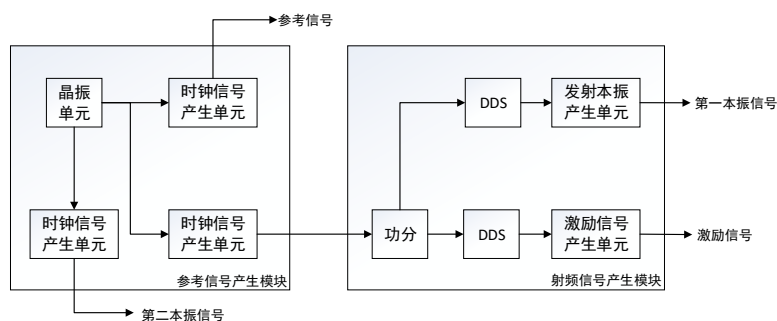


图 2.6 频综模块结构图

2.3.4 综控模块

综合模块是雷达天线系统的重要组成部分之一，其综合控制模块输出比较多，需要和其他模块进行信息交互，且该模块有多个接口，主要功能有：控制 T/R 模块的接收与发射信号、控制波分复用模块光纤信息的交互、控制频综模块的输入与输出^[54]。其内部组成如图 2.7 所示。

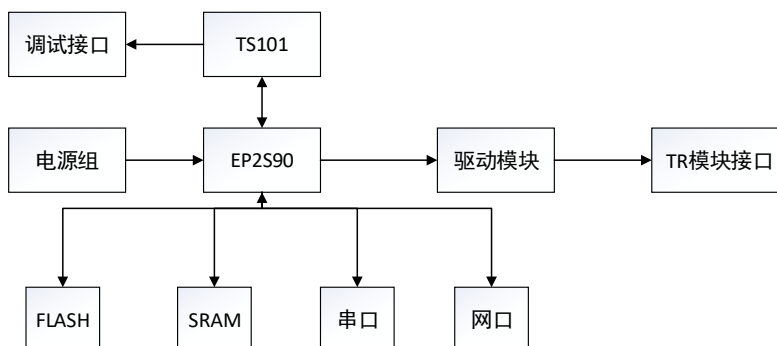


图 2.7 综合控制模块结构图

2.3.5 波分复用模块

波分复用模块指在传输载波上传输至少两个波长的光信号^[55]。其利用现有设备进行通信信息组合，实现雷达天线内部通信的高效传输。波分复用系统是由光发射机、传输模块、合成模块、光纤线路、解复用器、信息转换器等组成。其内部组成如图 2.8 所示。

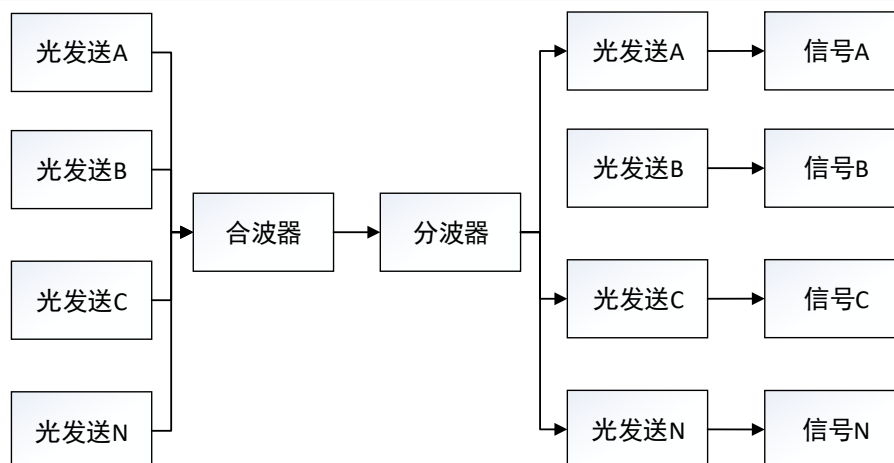


图 2.8 波分复用模块结构图

2.3.6 侦察模块

现代战争中，敌我双方在飞机和舰船上使用了大量的雷达和干扰设备，特别是在一些战争高发地区，双方可能有几十部或者几百部雷达设备^[56]。伴随着电磁环境的日益复杂，对雷达的抗干扰能力要求越来越高，此时，侦察副瓣模块对抵抗敌方有源干扰就十分重要，侦察副瓣模块的存在对雷达的抗干扰能力、敌机跟踪以及反侦察有十分重要的作用。其内部组成如图 2.9 所示。

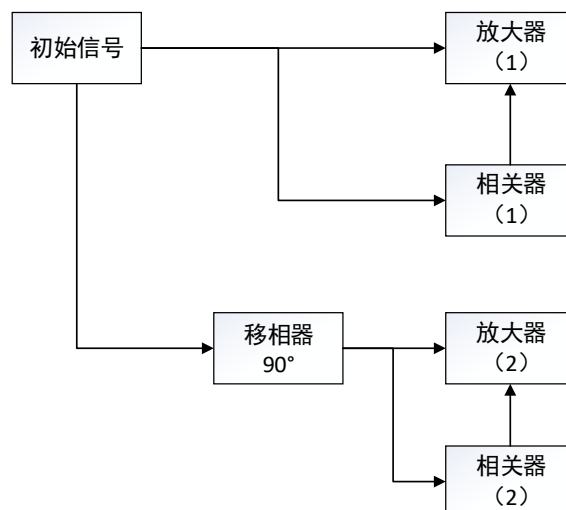


图 2.9 侦察模块结构图

2.4 多方法建模

2.4.1 离散事件

离散事件系统是一种动态系统，其运行规则是由事件驱动，系统状态会出现跳

跃式变化^[57,60]。系统的状态只在离散时间点发生变化,即状态变化是瞬时的,且这些时间点通常是随机的。这类离散事件系统状态变化的原因是事件,事件的发生一般是随机的,但遵循一定概率分布,事件的发生不是持续的,它只在某个时间点瞬间完成,因此,基于离散事件系统的模型大多适用于不能用方程描述的情况,该方法主要用于掌握系统内部状态变化的统计规律。

本文在对任务执行结构、装备的损坏及维修需求、维修要素的配置等方面的模拟上采用了离散事件建模的思想,但具体到建模模块的实现方式上则采用多智能体建模技术对其行为进行模拟。这是由于 Anylogic 中提供的多智能体状态转移图虽然在某些方面能比较方便的满足建模需求,但具有一定的局限性,无法满足特殊条件下的建模及定制化的需要,特别是当进行测试性验证的故障注入时,一些子系统之间的关联及影响方面的模拟无法达到预定要求,因此对于离散事件的利用主要在体现在模型的故障注入情况。

2.4.2 多智能体

多智能体在国内又称多 Agent,该技术兴起于 70 年代,最早出现在人工智能领域,现已发展成为人工智能领域中的一个热门话题。该技术主要用于解决复杂的社会问题,其特点是能够模拟感知、规划、推理、学习等方面行为,具有适应性、学习性、反应性、自主性、知识和信念、意图和责任等特征,特别适用于具有复杂结构、多对象、有自主行为特点问题的研究^[61,66]。多智能体系统是指通过构建多个具备简单智能的单元进行协作来实现复杂的智能行为的系统。对智能体的概念,由于研究对象、使用环境的不同,不同学者有着不同的认知。一般而言,智能体可以是装备、仓库、人员等有形实体,也可以是功能、工序等无形实体,其本质是一种能够接受另一实体的作用并做出反应,通过交流、命令、学习等行为,以感知、适应、学习等手段对动态环境的变化进行调整的实体。智能体的特征导致智能体具备较高的独立性,具有较高的自我控制能力,对内和对外的控制规则有着明显的分界线,这种内外分明的特性,特别适用于模块化建模方案。在多智能体建模技术中,其既包括了传统建模及编程必备的参数、变量、函数、事件等要素,又包含一些特色的建模手段,如状态图技术及端口通讯技术,由这些技术构成了多种智能体建模体系。这些要素在建模中的影响模式如图 2.10 所示。

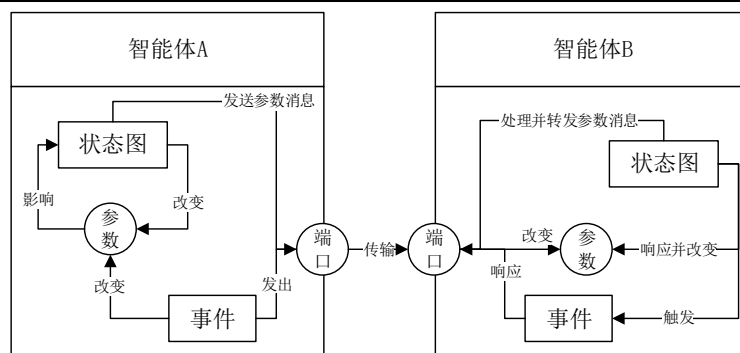


图 2.10 智能体技术中各要素的主要影响模式

在这种影响模式中，参数会对状态图中的各类变迁规则产生影响（如条件变迁、消息变迁、速率变迁等）；状态图中的变迁行为又会对参数或者事件产生影响；另外状态图中的行为能将本智能体内部的参数以消息的形式通过自身端口发送出去，端口与端口之间通过连接线连接，可将相关元素进行关联；当另一个智能体接收到传输来的消息时，其可以转发到状态图或者直接在参数中通过相关函数对传输来的消息进行处理用以改变自身参数或触发相关事件。

1) 状态图

状态图用于描述智能体对某个刺激的动态反应行为。状态图技术是智能体建模中一项关键的技术。

2) 状态转移模式

状态图技术将状态之间的转移规则提取为 5 种模式。

A.超时（Timeout Triggered Transition）当状态图进入到某一状态后，在该状态所处的时间超过所设定的超时阈值时，触发状态转移，这种触发模式一般可用于产生建模的延迟效果。

B.速率（Rate Triggered Transition）这种状态转移模式是以设定的参数速率的通过指数分布产生超时量来执行的，即如果速率参数设定为 5，则平均单位时间内执行 5 次。该触发模式一般适用于状态图内部的变迁行为，或用于触发指数形式产生的事件。

C.条件（Condition Triggered Transition）当条件变为真时，执行状态的转换。如果智能体连续更改变量的值，数值引擎会不断监视数值改变后条件是否成立。

D.消息（Message Triggered Transition）当状态图接收到与定义的消息描述符一致的消息时，触发状态转移。该转移会对消息队列从前往后进行对比检查，直至消耗光消息队列中的所有消息。

E.智能体到达（Arrival Triggered Transition）当智能体到达目的地时触发状态转移，该触发模式一般用于物流领域或具备可移动对象领域的仿真建模，在本模型

中没有用到。

2.5 本章小结

本章根据建模要求，首先介绍了可靠性、维修性、保障性以及测试性四性的基本定义以及重要指标参数，为后续建模提供一些部件故障、维修、备件更换以及测试性故障注入等建模的关键信息。然后根据雷达天线系统总图，分别介绍了天线系统内部 7 大分系统的结构与特征，为后续对雷达天线建模提供强有力的支撑。最后介绍了本论文将使用的虚拟仿真建模技术：离散事件建模和多智能体建模，对其建模技术的建模原理以及建模方法进行了描述。

第3章 面向测试性分析的模块化虚拟雷达天线系统仿真模型

针对雷达天线测试性虚拟验证的问题，上一章对雷达天线系统可靠性、维修性、保障性以及测试性进行理论介绍，并深入了解了雷达天线系统的结构特征，在此基础上，将按照智能体与离散事件建模的方式进行模块化雷达天线虚拟模型的搭建。该模型能对系统以及部件内部各元素进行状态检测，并得到最终测试性指标计算结果。第三章建模思路如图 3.1 所示：

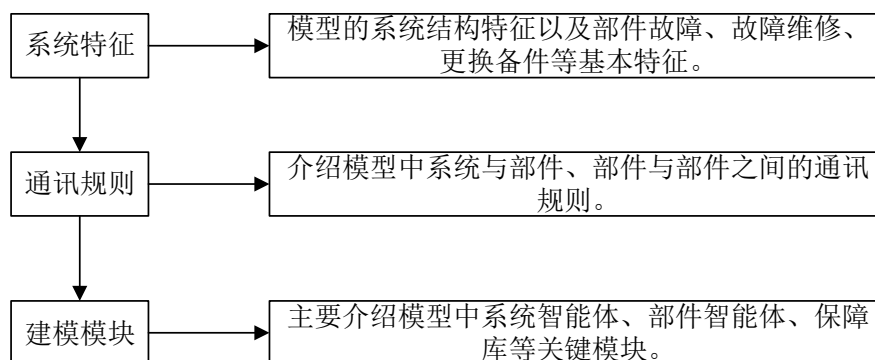


图 3.1 建模思路

3.1 系统特征

3.1.1 建模系统结构特征

雷达天线系统是一个十分复杂的动态系统，它的结构是由各子系统的各种部件组织和协作组成的，其中每个部件单元都具有一定的自主性，同时不同的子系统之间相互联系，以完成雷达天线作战任务，因此，可以将每个子系统、每个部件单元都进行模块化，建立一个模块化雷达天线系统，即可完成系统结构的搭建。现今常用的模块化系统建模的结构有两种：多层嵌套系统以及并列式系统。

a) 多层嵌套系统

复杂系统可直接由多个部件组合构成，也可由内部子系统与部件共同构成。这种关系就属于一种系统中多层级嵌套的关系，为满足这种特征需要在复杂系统通讯协议的标准化上做一定的处理，如图 3.2 所示。

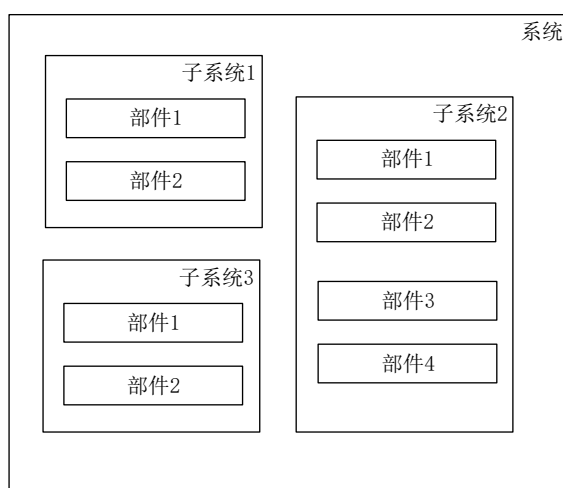


图 3.2 多层嵌套系统结构

b) 并列式系统

对于复杂系统而言，一种结构方式与常用的网络计划图的特征类似。即某些情况下可能呈现单纯的线性关系，这时可以将系统、子系统、部件都排列在同一个界面，这样可以直接看出每个模块的状态情况，但是这种结构对计算机性能要求过高，并且与实际情况不相符合，如图 3.3 所示。

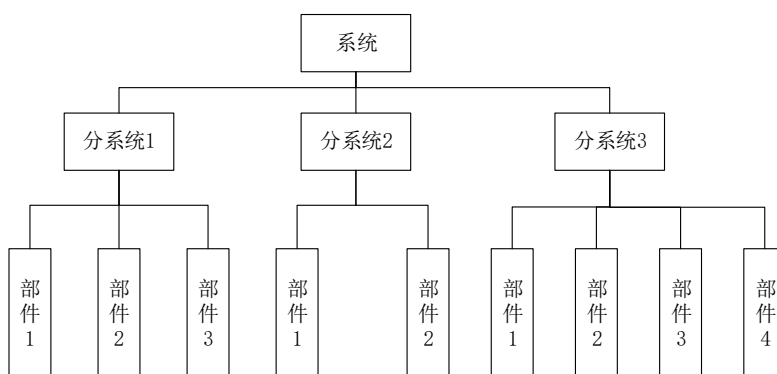


图 3.3 并列式系统结构图

在此，结合计算机性能，并为了将故障定位到子系统的部件级，将选择多层嵌套式结构进行系统结构的搭建。每个系统单元的功能相对独立，可对部件级进行单独故障注入。

3.1.2 部件故障特征

部件故障情况一般遵从可靠性原则，即一个部件将在规定的可靠性寿命内发生故障。部件发生故障之后，根据其损伤程度，区分部件维修要求，损伤程度较低直接进行现场维修就可以恢复正常工作状态，损伤程度较高的部件需要进行备件

更换才能恢复到正常工作状态，在此，提出了将部件故障分为“致命性故障”和“非致命性故障”两种形式；通过“正常工作状态”、“致命性故障”和“非致命性故障”三种状态发展成部件模型三种常用状态。在此基础上，通过部件模型添加可靠性、维修性、保障性、测试性基础理论知识，搭建出基于多智能体的四性建模框架。其中，部件发生致命性故障与非致命性故障的定义如 a)、b) 所示：

- a) 致命性故障：在雷达作战使用阶段天线系统内部部件发生的限于条件而不可修复的故障，这一类故障的发生对雷达完成任务有直接影响。
- b) 非致命性故障：雷达作战使用阶段天线系统内部部件发生的可修复故障，这一类故障的发生表面上看对雷达完成任务没有直接影响，但会影响部件的工作效率，不进行维修可能会导致雷达作战任务失败。

在此将按照现实部件故障状态数据的故障规律进行模拟，即根据历史使用情况中收集到的部件故障情况下的状态数据，作为故障分布参数，致使发生故障，发生故障后会出现条件选择，根据其故障变量类型将选择故障状态。其中每个系统内的部件都给与一个部件故障类型参数如表 3.1 部分所示：

表 3.1 部件故障类型编号

编号	部件名	故障类型
1001	控制保护开关	1
2001	天线	2
3001	晶振单元	1
4001	电源组	1
5001	光发送 A	2
6001	初始信号	1
7001	控制保护开关	1

其中，变量类型 1 为致命性故障部件；变量类型 2 为非致命性故障部件；

根据以上设置的故障类型，再以威布尔分布所成的平均故障时间为核心参数，利用状态图中的到时变迁对故障规律进行模拟，生成不同故障状态。对到时变迁的模拟思路如图 3.4 所示。

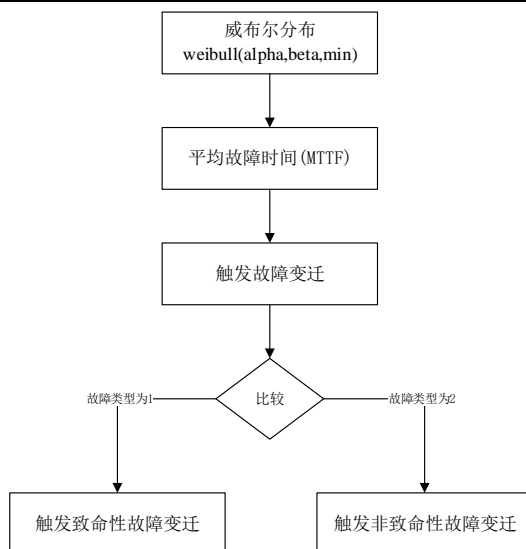


图 3.4 到时变迁的故障规律

该故障方案以平均故障时间为核心参数进行模拟，通过引入威布尔分布能更精确的描述故障规律。该方案模拟精度较高，能较好反应装备的故障规律的问题，但该方案的缺陷在于所需状态及故障数据不易获得，适用于对于故障机理明确（这里的故障机理明确主要是指了解某项可测物理量将会导致故障的发生）、或能收集到状态数据的装备，具备较多的状态及故障数据积累、故障规律与某些可测物理指标强相关的条件下适用。

威布尔分布是一种常用的数学概率分布，在可靠性领域中被广泛应用，常用于各种寿命实验的数据处理。正态分布、指数分布都是威布尔分布的特例形式。

威布尔分布的概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta}}, t \geq \delta \geq 0 \quad (3-1)$$

式中， β 为形状参数，它影响威布尔分布函数的形状； η 为尺度参数； δ 为位置参数。

其累计失效分布函数表示为：

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\tau-\delta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\tau-\delta}{\eta}\right)^{\beta}} d\tau = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3-2)$$

可靠度函数为：

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3-3)$$

故障率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3-4)$$

当 $\beta < 1$ 时，故障率是逐渐递减的，其可用来描述设备的早期故障阶段；当 $\beta = 1$ 时，故障率是一个常数，用来描述随机失效情况；当 $\beta > 1$ 时，故障率呈上升趋势，适用于描述设备的损耗或老化阶段的故障。

威布尔分布的优点在于：它能以不同的形状参数对系统的不同阶段进行描述，具备较高的工程价值。通过调整形状参数、尺度参数和位置参数，可以对各类故障数据进行函数拟合，应用更加灵活。

3.1.3 部件维修与备件更换

在部件经过平均故障时间发生故障之后，将分配决定部件会进行维修还是更换备件，如果支持维修（即发生非致命性故障），那么部件进行现场维修或者事后维修。如果需要部件过于复杂或者部件发生致命性故障，那么就需要将部件进行更换，维修过程需要经过故障类型参数的判断。其中，部件维修涉及维修性理论、部件进行备件更换涉及保障性理论。具体维修以及备件更换如图 3.5 所示：

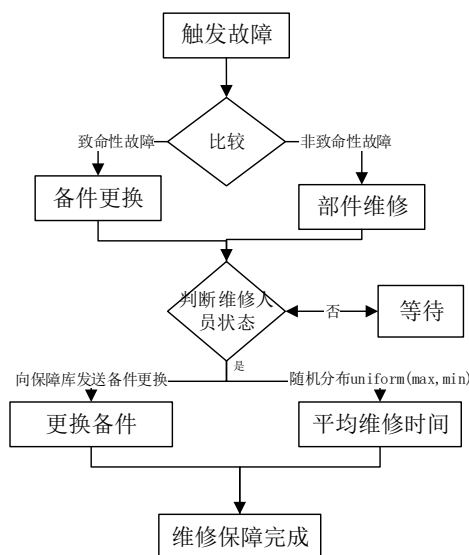


图 3.5 故障维修与备件更换

a) 部件维修特征

当部件发生非致命故障时，会进入维修状态图，首先进行判断相应维修人员的等级、维修人员的数量以及维修人员工具的空闲情况，再依次根据现实情况所得到的具体部件维修时间进行随机时长的维修，最终部件维修完成，恢复到正常状态。维修要素包括维修的触发模式、维修的表现形式、维修后的影响等方面的内容。维修的触发模式体现在维修策略的设计上；

b) 备件更换特征

当部件发生致命性故障时，此时对部件维修已经无济于事，将进行备件更换。首先，也会判断维修人员的相关信息，如果所需备件更换的维修人员不够，那么将进行等待，当维修人员到位时，将进行下一步确定，即向保障库发送信息进行确定可更换部件数量是否满足，如果备件足够，将备件提取，保障库里面备件数量减少。

该特征是考虑到了系统的标准化设计，这会使保障库与部件的关联关系呈现一对多的关系。所以保障库要能够处理对多部件的需求请求，还需要在备件内部设计出在缺货状态下的需求请求的储存及响应规则。备件更换的表现形式及影响体现在对备件的消耗上。

3.2 通讯规则

仿真模型在运行过程中，内部包括自上向下的工作状态信息传递、自下向上的故障状态信息传递以及部件与保障库之间同级的状态信息传递三种状态传递过程，如图 3.6 所示，这些模块之间的交互都需要为之定义通讯规则。在此根据 Anylogic 软件的基本通讯规则包括函数通讯以及端口通讯，从而考虑到模型的结构情况，在此将系统与部件之间的通讯归属于函数通讯，部件与部件之间、部件与保障库之间的通讯归属于端口通讯，这两种状态处理的方式不同，故将模型内部通讯处理情况分为两类：模块之间的函数通讯和同级之间的端口通讯。

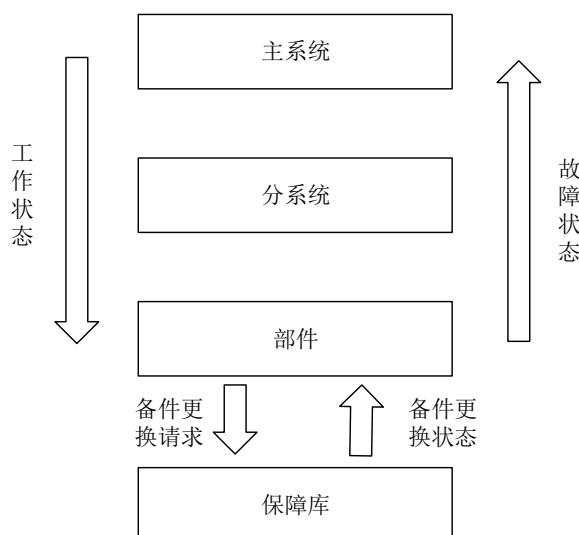


图 3.6 仿真中状态传递情况

3.2.1 函数通讯

函数通讯也称为智能体通讯，是 Anylogic 平台最基础的通讯情况，只需调用 send 函数，其中“msg”为具体消息，智能体为接收消息的对象。这种属于只需要给一个对象发送消息。本质上属于一个消息触发事件。比如：你可以在 T/R 组件系统启动时，发送消息给系统内的衰减器。

3.2.2 端口通讯

第二种端口通信，端口通信需要在智能体内部建立端口，端口内部可以设置通信处理逻辑，在端口通讯处理逻辑中，智能体单元需要通过与其端口相连的多个智能体的信号，对发送过来的信息进行综合处理，进而判断自身所处的状态，并将自身状态以适当的消息类通过相应的端口发出。具体传递形式的输入输出及处理逻辑如图 3.7 所示：

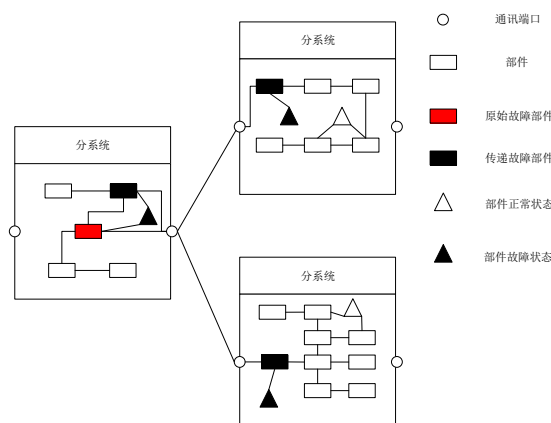


图 3.7 端口通讯的故障传播处理逻辑规则

在进行通讯时还需要定义消息的发送类型。消息类型大致分为三类：String、Double、Int 类，其本质上都属于 Java 里面的参数类型，具体如表 3.2 所示：

表 3.2 端口通讯消息类型

序号	变量类型	备注
1	String	故障类型，设置为“致命”与“非致命性”类型
2	Double	平均维修事件，部件所需要维修的时间
3	Int	部件之间是否有影响，默认设置为 0。

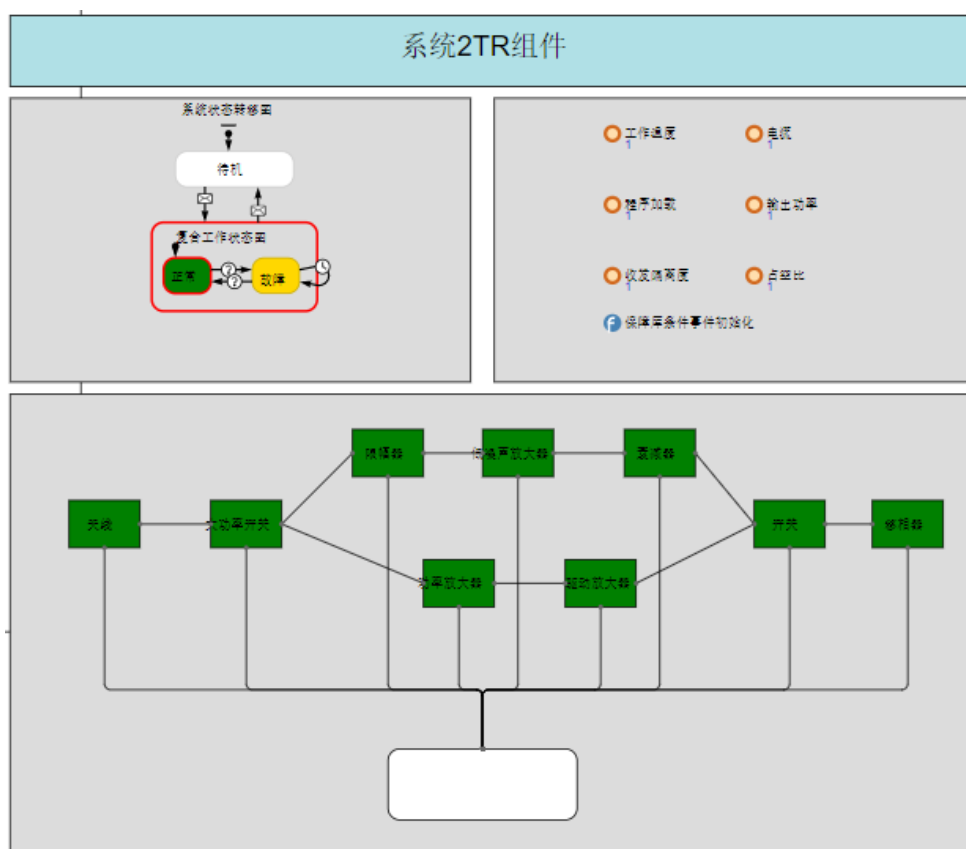
该通讯类用于任务单元、系统、部件、故障模式之间关于性能状态的端口通讯。其中保障库中需要在备件需求中添加需求部件的字段是为了使备件模块记录需求的来源，需要使用 State 端口接收函数将其记录在集合中。

3.3 建模模块

本文利用 Anylogic 仿真软件平台对天线系统进行搭建，首先新建一个模型，命名为“雷达天线系统”。模型的主函数“Main”中新建一个“雷达天线主系统智能体”，在此将系统智能体中构建雷达天线分系统。根据前文对系统特征介绍，本仿真为了便于整个天线系统的故障分析，将每个分系统作为一个智能体，存在于主系统智能体中。每个分系统智能体内部又包括了详细的该系统内部件组成情况。在每个分系统中，建立“部件智能体”以及“保障库智能体”来组成分系统。本小节

表 3.3 仿真模型主要模块介绍

3.3.1 系统



1) 通讯规则

子系统中没有端口通讯，只是用的最简单的函数通讯用来对上主系统，对下的部件进行简单通讯，通讯内容也较为简单，只需要接收到主系统发出的开始的命令消息，进而发送给其内部部件开始的命令消息即可。

2) T/R 组件状态转移如图 3.9 所示。

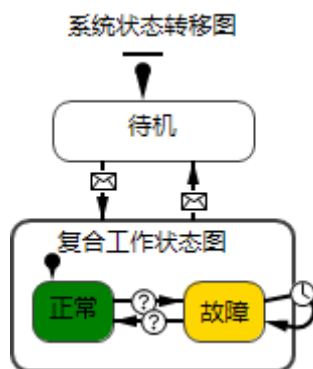


图 3.9 TR 组件状态转移

- 1) “待机”到“复合工作状态图”状态：消息变迁，总任务开始工作，主系统发送开始指令给子系统智能体，使其智能体进入“正常工作状态”。
- 2) “正常”到“故障”状态：条件变迁，当系统内部部件出现致命性故障时，出根据可靠性框图进入故障状态。
- 3) “故障”到“正常”状态：条件变迁，当系统内部部件出现的致命性故障已经修复成功时，进入正常状态。
- 4) “复合工作状态图”到待机状态：消息变迁，总任务结束工作，发送结束指令给子系统智能体，使其进入“正常工作状态”。
- 5) “故障”到“故障”状态：到时变迁，子系统实时处理内部发生多故障状态。

3) 系统内部基本参数如表 3.4 所示。

表 3.4 系统内部主要参数

序号	名称	类型
1	程序加载	int
2	收发隔离功率	int
3	电流	int
4	功率	int
5	占空比	int

3.3.2 部件

部件是系统中最小的可更换单元，是分系统里面的用于产生故障以及维修的基本对象，也是整个模型中关联环节最多，规则最复杂的一类智能体模块。在本论文中将部件设置为一个智能体类型，主要是为了模拟部件内部规则运行情况，部件作为故障产生以及其维修规律对系统，关联部件都有影响，是一个十分重要的一个环节。其需要向系统传递工作状态，向资源保障库传递故障交互信息，从而反馈到备件更换，自身也需要故障以及维修的完成，因此部件智能体是整个模型中最重要的一环，部件智能体内部情况以控制保护开关为例如图 3.10 所示。

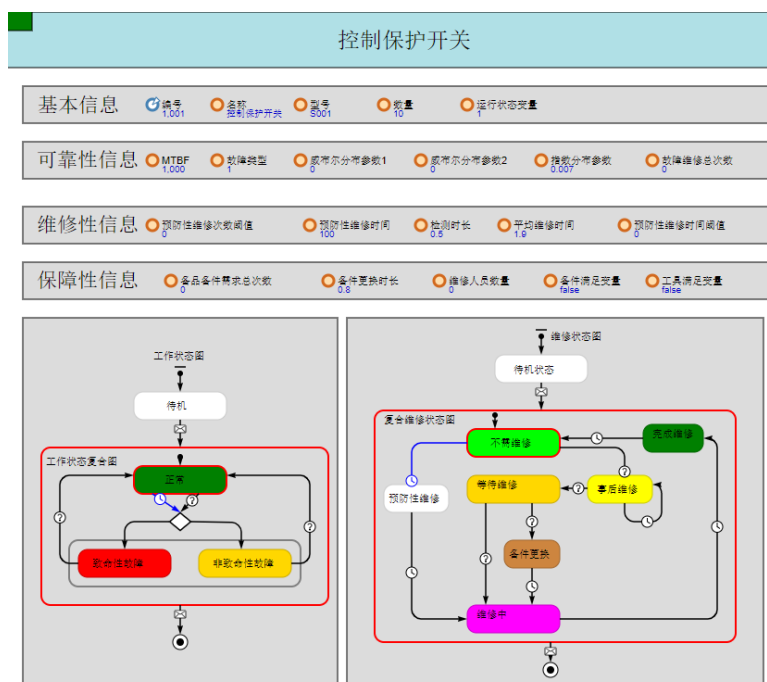


图 3.10 部件智能体结构

1) 通讯规则

为建立系统与部件之间、部件与部件之间、部件与保障库之间的通讯，部件模块中将使用两种通讯规则：一个是通过智能体消息的发送进行信息交互，一个是通过端口进行消息交互的通讯。

以 TR 组件模块中大功率开关部件为例，其部件使用到的通讯规则有：

a) 函数通讯

在模型开始运行时，大功率开关部件将接收到 TR 组件模块发送的“start”消息，在接收到开始消息后，该部件才从待机状态转移到工作状态。

b) 端口通讯

在部件中将会出现三个端口，其中设置的“in”端口与“out”端口将实现部件

之间状态的信息交互。比如说：TR 模块中，限幅器的“out”端口连接着低噪声放大器的“in”端口，那么限幅器的故障将通过端口，将其故障信息发送到低噪声放大器，在接收到故障信息后，可根据现实情况，低噪声放大器出现不同故障情况。另外还设置一个“state”端口用来与保障库进行通讯，该端口与保障库的“state”端口相连，用以部件发生致命性故障时，接收或发送备件更换的信息。其中每个端口都会有接收和发送消息的设置，在其端口接收或发送消息时，可以对其部件进行编号，故障的删选。比如：在限幅器发生致命性故障进行维修时，限幅器会通过端口“state”给保障库“state”端口发送“限幅器故障”消息，TR 组件保障库在接收到消息时，将根据限幅器备件更换的条件进行比较，如果满足备件更换的条件，将进一步在接收消息时对备件数量进行减少。

2) 状态图

a) 部件工作状态图如图 3.11 所示。

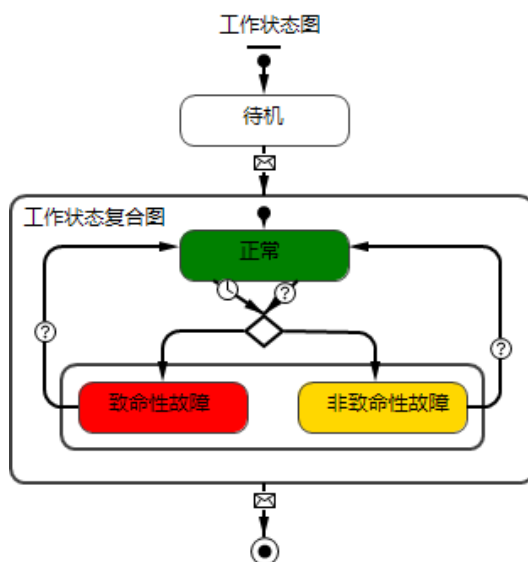


图 3.11 部件工作状态图

1) “待机”到“工作状态复合图”状态：消息变迁，总任务开始工作，发送开始指令给部件智能体，使设备智能体进入“正常工作状态”。

2) “初始状态指针”到“正常”状态。

3) “正常”到“分支”状态 1：时间变迁，超时量为各个部件的平均故障间隔时间。

4) “正常”到“分支”状态 2：条件变迁，进行测试性验证，注入故障时使用，条件为注入故障变量为真即可跳转。

5) “分支”状态到“非致命故障状态”和“致命性故障状态”，其变迁为条件变迁，数据库将导入的部件的故障类型变量，变量为 1 则为致命性故障，变量为 2

则为非致命性故障。

6) “致命性故障”到“正常工作”状态：条件变迁，保障资源库提供保障资源，当保障结束后即可跳转至“工作”状态。

7) “非致命性故障”到“正常工作”状态：条件变迁，维修集提供维修，当维修集结束维修后即可跳转至“正常工作”状态。

8) “工作状态复合图”到“结束”状态：消息变迁，总任务结束工作，发送结束指令给部件智能体，使设备智能体进入“结束”状态。

b) 部件维修状态图如图 3.12 所示

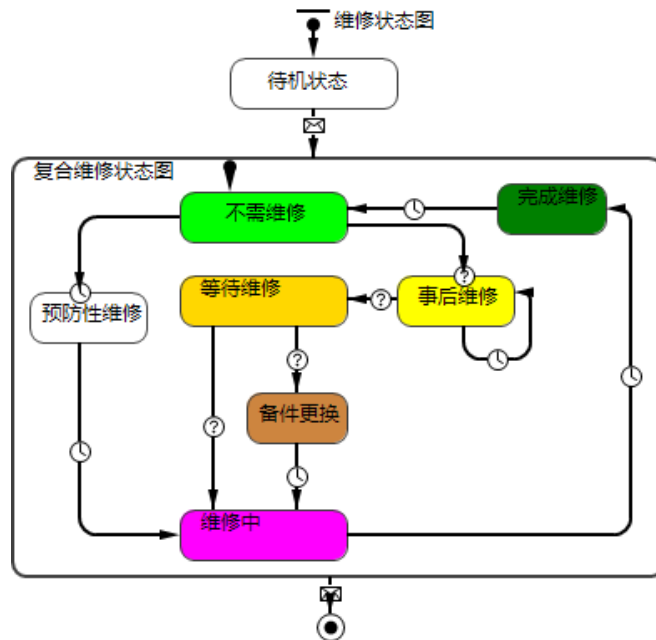


图 3.12 部件维修状态图

1) “待机状态”到“复合维修状态图”状态：消息变迁，主系统发出任务开始，分系统给各个部件发送开始消息。

2) “不需维修”到“预防性维修”状态：时间变迁，预防性维修时间间隔；控制：事后维修等于 false 且预防性维修次数大于等于 0。

3) “不需维修”到“事后维修”：条件变迁，致命性故障等于 true 或者非致命性故障等于 true。

4) “事后维修”到“等待维修”：条件变迁，时间延迟等于检测时长。

5) “事后维修”到“事后维修”：时间变迁，该变迁属于自变迁，时刻为了去判断维修人员与工具的状态，也为一种排队等待的方式，变迁时间等于 5 分钟。

6) “预防性维修”到“维修中”：条件变迁，系统维修人员大于等于 0。

- 7) “等待维修”到“维修中”：条件变迁，非致命性故障等于 true。
- 8) “等待维修”到“备件更换”：条件变迁，致命性故障等于 true。
- 9) “备件更换”到“维修中”：时间延迟，换件时长。
- 10) “维修中”到“完成维修”：时间延迟，时间为平均维修时间。
- 11) “完成维修”到“不需维修”：一段时间延迟，此时向设备发送“维修完成指令”。

3) 部件内部基本参数如表 3.5 所示。

表 3.5 部件内部主要参数

序号	名称	变量类型	备注
1	部件名	String	在模型运行时展示部件名称
2	α	Double	威布尔参数
3	MTBF	Double	设备的平均故障间隔时间
4	故障类型	int	致命性障为 1，非致命性故障为 2
5	运行状态参数	Double	正常为 1，非致命为 0.5，故障为 0
6	平均故障维修时间	Double	设备的平均故障维修时间
7	系统维修人员	int	维修人员分为电气与机械专业维修
8	维修人员专业等级	int	等级分为 1、2、3 级
9	故障维修完成	Boolean	故障维修完成为 true、维修未完成为 false
10	备件更换完成	Boolean	备件更换完成为 true、更换未完成为 false

3.3.3 备品备件保障库

在备品备件保障库中，因为包括的雷达天线系统相关人员、等级、工具等的使用，且备品备件较多，为了合理的搭建保障库模型，在此使用数据库的方式将文件内备品备件维修更换的使用要求通过数据库对其赋值，从而实现保障库的合理性以及多样性，并且在对备品备件进行等级的更新时，只需要更新或者扩充数据库的内容，Anylogic 中有数据库的具体使用方法。在此只需要对数据库内部的变量进行定义即可，系统保障库以系统 1 开关电源保障库为例，如图 3.13 所示。



图 3.13 系统 1 开关电源保障库

数据库内变量的定义也遵循 Java 的基本参数类型，在此定义 3 类变量类型，如表 3.6 所示：

表 3.6 数据库中所包含的变量

序号	变量类型	变量
1	String	维修人员名称、工具名称、维修人员类型
2	Double	维修人员所用时间
3	Int	维修人员等级、维修人员数量、工具数量

3.3.4 故障指标输入

进行测试性验证时，测试机需要按照故障编码表对仿真机进行故障注入。具体实现过程为，首先需要对部件信息进行编码，本文采用的是按照部件编号作为故障编码，即 7 个系统模块，63 个部件，部件编码表如表 3.7 所示。

表 3.7 部件编码简表

编号	部件	编号	部件
1001	控制保护开关	4001	电源组
1002	驱动电路板	5001	光发送 A
1006	高频变压器	6001	初始信号
2001	天线	7001	控制保护开关
3001	晶振单元		

测试机输入故障编码后,会通过 TCP/IP 通讯,传输到仿真 PC 机,仿真 PC 机本地文档接收数据。接着将故障编号导入 Anylogic 的模型使仿真机发生相应的故障模式。仿真机读取本地文档数据时,需要通过离散事件与函数的使用实时对运行过程中的模型进行故障参数的输入。在此,需要在主系统智能体内部建立一个读取文档的函数,命名为 readFile 函数,其该函数作用为将值返回给变量,函数内部有一个参数命名为 fileName,其参数类型为 String,其作用为读取文档数据。接着在主系统智能体内部建立一个循环调取函数事件,需要以 1 秒为时间间隔进行检测本地文档内部存储的值,其事件的触发类型为到时,模式为循环,复发时间为 1 秒,,其作用为通过循环触发 readFile 函数,来进行循环读取本地文档数据。最后,在部件智能体内部建立一个条件事件来匹配主系统智能体读取数据值与部件编号是否一致,如果一致则触发故障,最终实现故障注入过程。具体流程如图 3.14 所示。

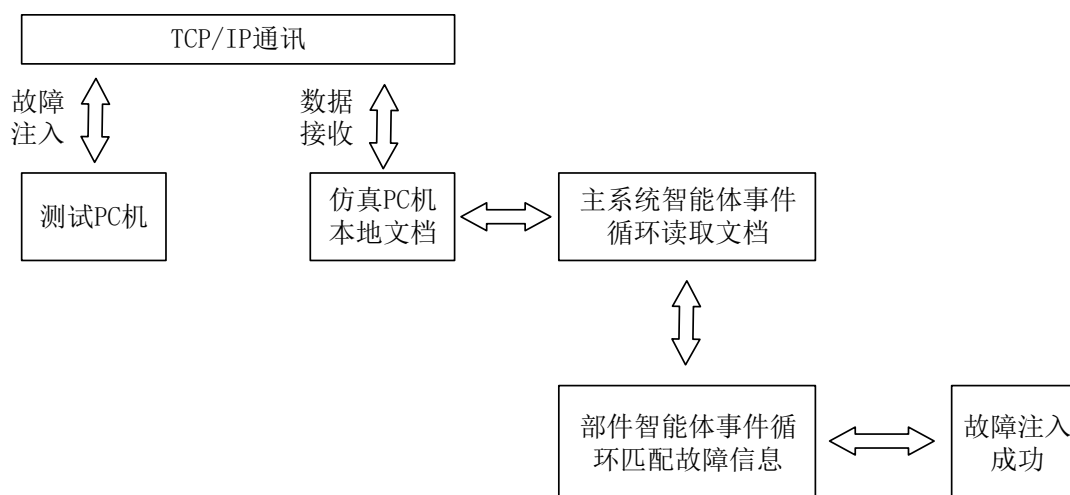


图 3.14 故障注入实现流程

3.4 本章小结

本章利用基于离散事件以及多智能体建模方法对雷达天线系统进行建模,首先分析了多层嵌套式结构与并列式结构的特征,从而根据其雷达天线系统的结构特征选取了多层嵌套式结构,再者介绍了部件故障、故障维修以及备件更换三者建模逻辑。然后介绍了模块之间通讯的规则情况,为后续系统与部件、部件与部件以及部件与保障库之间的通讯提供规则要求。最后模拟了雷达天线系统装备运行时的各个模块特征,形成了模块化的虚拟模型,能对雷达天线系统任务工作中的部件故障、维修、更换以及测试性故障注入、测试性验证等指标统计与计算。该模型为后续测试性虚拟验证提供模型基础。

第4章 雷达天线系统测试性虚拟验证研究

本章节根据第三章所搭建的雷达天线系统虚拟模型，对其进行故障注入、故障模拟以及测试性指标参数评估，从而实现测试性虚拟验证，其验证主要为进行测试性设计的优化与改进提供建议，测试性验证原理框图如图 4.1 所示。

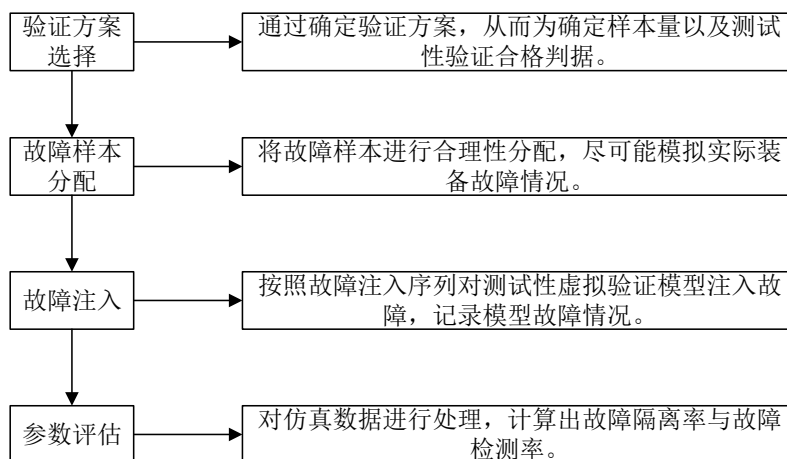


图4.1 雷达天线测试性验证原理框图

相控阵雷达天线测试性验证工作流程主要有四个步骤，测试方案的选取、故障样本集生成、虚拟故障注入、数据分析与测试性指标计算。

本论文所做的测试性验证是由两台PC机所搭建。其中一台PC作为测试机，一台PC机作为雷达天线系统仿真机。

测试机是由Labview软件所搭建而成，具体软件建模界面如图4.2所示。界面分为选择验证方案模块、验证通讯模块以及样本量处理模块组成。第一部分：选择验证方案模块在系统界面的左上角，其作用为进行测试方案的选取以及测试方案指标的输入，主要有设计要求值、双方风险以及最低可接受值三者可根据具体方案信息进行设置，点击获取验证方案即可得到该方案的故障样本量和合格判定数。第二部分：验证通讯模块在上中部分，这一部分主要进行故障注入以及接收验证的数据，主要有输入故障编号编辑框、接收的验证数据显示框以及故障注入、接收返回数据按钮，先填写好要注入的故障编号，点击故障注入就可以通讯到仿真机进行信息的接收，故障规律的模拟。点击接收返回数据按钮，接收的验证数据显示框就会显示测试性验证数据。第三部分：样本量分配模块，这一部分主要是为了进行故障样本量的合理性分配，主要有输入框：故障率、产品数量、工作时间系数以及输出框：各组的故障率、相对发生频率、分配的预样本量、分配的验证样本量，其中根据前

三者值得输入，可自动获得后四者样本值的计算。

测试性虚拟验证系统

设计要求值

0

双方风险

0

故障样本量

0

输入故障编号

接收的验证数据

最低可接收值

0

获取验证方案

合格判定数

0

故障注入

确定

接收返回数据

确定

	故障率	产品数量	工作时间系数	各组的故障率	相对发生频率	分配的预样本量	分配的验证样本量
系统一	0	0	0	0	0	0	0
系统二	0	0	0	0	0	0	0
系统三	0	0	0	0	0	0	0
系统四	0	0	0	0	0	0	0
系统五	0	0	0	0	0	0	0
系统六	0	0	0	0	0	0	0
系统七	0	0	0	0	0	0	0
合计				0	0	0	0

图4.2 测试性虚拟验证系统

仿真机是由Anylogic软件平台搭建而成，具体建模界面如图4.3所示。界面分为系统结构以及系统输出监测两部分组成。第一部分：信息展示包括检测方案以及故障名称，其主要作用为在进行故障注入之后显示出故障编号以及具体故障名称，比如故障名称为t1-主电源-输出电压故障、故障编号为1006。第二部分为系统结构以及系统输出检测部分，其主要作用可以简单明了知道雷达天线系统中的子系统运行状态以及子系统中所监测的信号，比如开关电源中有输出电压和工作温度两个监测信号。在进行开关电源输出电压注入故障时，那么开关电源名称以及输出电压指示灯都会从绿色变化为红色，开关电源的输出电压故障所引起的故障规律也可以一览无遗。

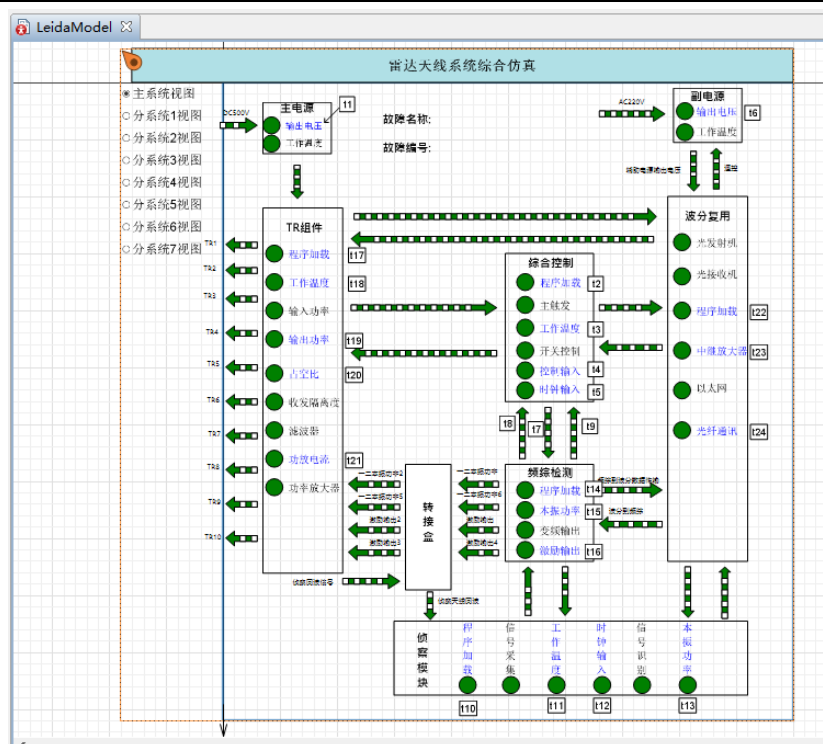


图4.3 仿真机建模界面

4.1 测试方案的选取

建立模拟雷达天线系统的虚拟样机后，为了判断测试性设计是否符合合同要求，需要进行测试性虚拟验证，测试性虚拟验证第一步则需要依据实际情况选取合适测试性指标验证方案。实际工程中考虑到订购方与承制方双方风险以及实验费用，本论文采用考虑双方风险的验证方案来确定故障样本量以及合格判定数。

(1) 确定样本量及合格判据

1) GB5080.5-85 和 GJBz 20045-91 中给出了具体成功率的定数测试方案，可用于故障检测率和隔离率的验证测试方案。

此验证方案以式 4-1 为基础，由于直接用公式求解 n 和 c 值较繁为琐，可查询相应国标的数据表获取。例如，故障检测率要求值是 0.95、最低接受值为 0.85、鉴别比 $D=(1-R_1)/(1-R_0)=3$ 、 $\alpha = \beta = 0.1$ 时，查表考虑双方风险的验证方案数据表可得验证方案 $(n, c) = (60, 5)$ ，其中 n 是试验用样本数， c 是合格判定数。

$$\begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} (1 - R_0)^i R_0^{n-i} \leq \alpha \\ \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} (1 - R_1)^i R_1^{n-i} \leq \beta \end{cases} \quad (4-1)$$

式中， R_0 指设计要求值； R_1 指最低可接收值； α 指承制方风险； β 指订购方风险。

2) 合格判据：具体判定依据为当对系统注入 n 个故障样本，进而检测故障注

入失败次数 F ，若其 F 小于等于 c ($F \leq c$) 时，判定合格；否则判定不合格。

通过查询考虑双方风险的验证方案数据表，部分验证方案数据如表4.1所示，其中设计要求值 R_0 为0.95；最低可接受值 R_1 为0.85；承制单位风险 α 与订购单位风险 β 不同，可得出样本量 n 以及置信水平 c 。

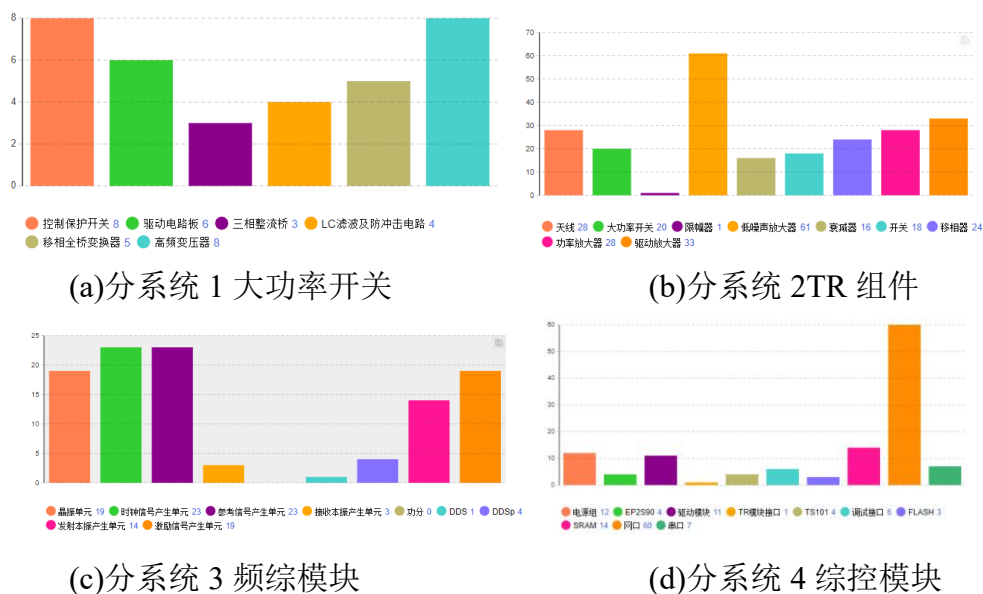
表4.1 部分验证方案数据

$\alpha = \beta$	n	c
0.1	60	5
0.2	28	2
0.3	16	1

考虑某雷达天线实际工程数据积累问题，经双方合同约定承制单位风险 $\alpha=0.3$ 、订购单位风险 $\beta=0.3$ 、设计要求值 $q_0=0.95$ 和最低可接收值 $q_1=0.85$ 。依据表4.1中数据查表可得测试性验证方案中合格判定数 $c = 1$ 以及样本量 $n=16$ 。即在虚拟样机中注入16个故障，若检测失败数超过1次，则判断测试性设计不达标；反之，则达标。

4.2 故障样本分配

对于测试性验证试验，除了需要确定故障样本数和合格判据之外，还应对样本量进行合理分配，从而极大可能地模拟天线系统实际使用时发生故障的分布情况。在此，将对虚拟模型进行故障运行仿真，仿真到 50000 个小时，统计其子系统内部部件故障次数，分系统内部部件故障情况分别如图 4.4:a-g 所示。



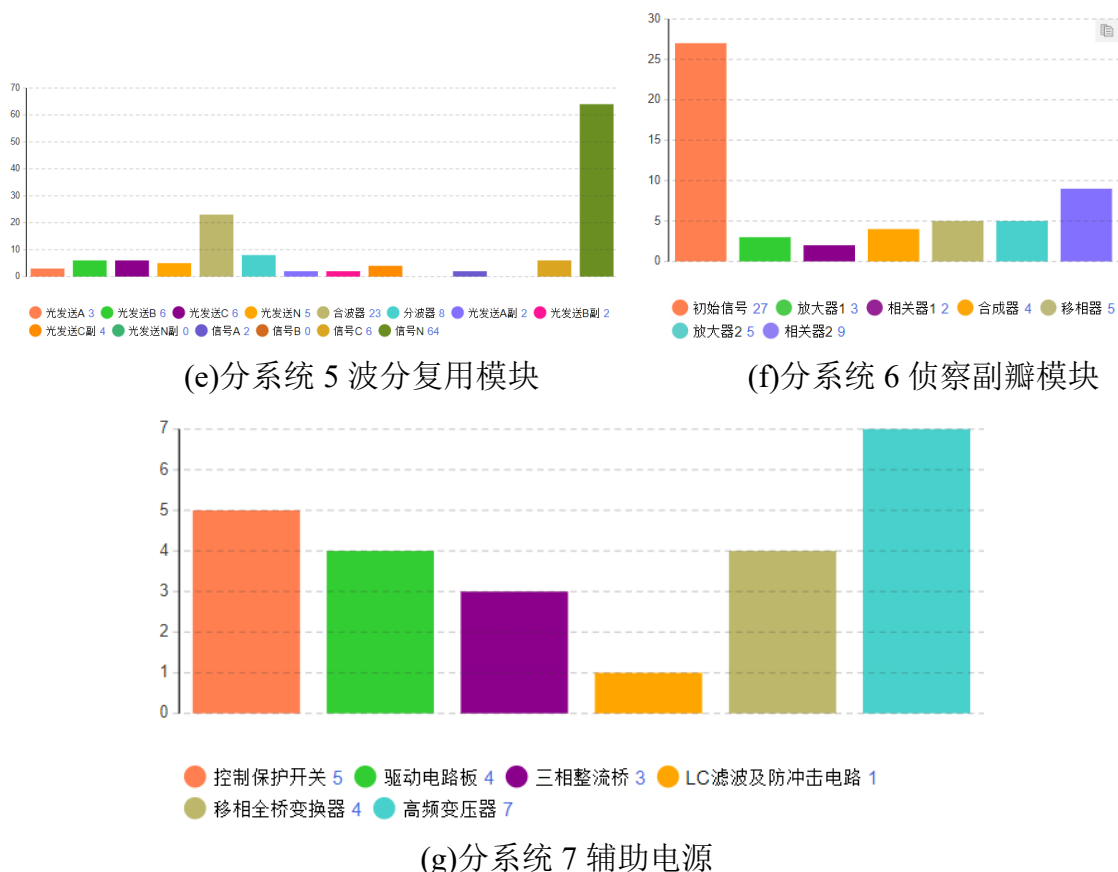


图 4.4 子系统故障情况

各子系统内部件发生故障总次数所表 4.2 所示。

表 4.2 子系统内部件发生故障的次数

序号	子系统名称	故障数量
1	大功率开关电源	34
2	TR 组件	229
3	频综模块	106
4	综合控制模块	122
5	波分复用模块	131
6	侦查模块	55
7	辅助电源	24

故障样本的分配和抽样是基于测试产品的复杂性和可靠性。采用固定样本测试时，可采用分层抽样方法进行样本分配。

(1) 按比例分层抽样方法

首先，分析了试验产品的层次水平和失效率，按失效相对发生频率 C_P ，将确定的 16 个样本量划分给雷达天线子系统，然后用同样的方法再把组成单元的样本

量 n_i 分配给其系统组成部件，计算公式如式 (4-2)、(4-3)。

$$n_i = nC_{pi} \quad (4-2)$$

$$C_{pi} = \frac{Q_i \lambda_i T_i}{\sum Q_i \lambda_i T_i} \quad (4-3)$$

式中， Q_i 指第 i 个单元的数量； λ_i 指第 i 个单元的故障率； T_i 指第 i 个单元的工作时间系数，它等于该部件工作时间与整个工作时间之比。

(2) 故障模式的选择

系统的备选样本量应为规定试验样本量的 3-4 倍，各组成部件的备选样本量也应如此，即 $N_i = 3 - 4n_i$ 。根据每个备选故障模式的相对发生频率乘以 100 确定的累积范围，进行随机抽样来确定要注入的故障模式。样本量按比例分层分配方法选取，分配结果如图 4.5 所示：



图4.5 相控阵雷达天线样本的分配（双方风险均为0.3）

(3) 测试点选择

根据对某型相控阵雷达天线结构和组成的分析，将该系统划分为 7 个模块。由于其结构复杂，输出信息众多，并非每个测试节点都是可测的，因此可以选取其输出节点作为测试节点。如果在初始阶段选择过多的测试节点，后期测试及优化的工作量会大大增加，并且一些可测节点是冗余的，所以测试节点并非越多越好。对于单个模块，判断其是否处于故障状态，最简单方法是对模块的输入输出信号进行合理性分析，所以本小节选择雷达天线各模块的输入输出节点作为主要测试节点，如表 4.3 所示的 t1-t23，共 23 个测试点。23 个测试点也为测试性预计时所设计得测试点。

表 4.3 测试点选择

序号	系统	测试点
1	大功率开关电源	输出电压
2	综合控制模块	程序加载
3	综合控制模块	工作温度
4	综合控制模块	控制输入
5	综合控制模块	时钟输入
6	辅助电源	输出电压
7	综合控制模块	频率数据传输
8	频综模块	左数据传输
9	侦察模块	程序加载
10	侦察模块	工作温度
11	侦察模块	时钟输入
12	侦察模块	本振功率
13	频综模块	程序加载
14	频综模块	本振功率
15	频综模块	激励输出
16	T/R 组件	程序加载
17	T/R 组件	工作温度
18	T/R 组件	输出功率
19	T/R 组件	占空比
20	T/R 组件	功放电流
21	波分复用	程序加载
22	波分复用	光纤通讯
23	波分复用	中继放大器

4.3 故障注入

故障注入是指根据选定的部件，采用人工的方法有意识的产生故障，并将其应用于特定负载的被测对象，为观察和收集测试诊断系统的故障检测和隔离结果提供激励。

在实际过程中，有部分故障注入会导致部件的永久性损坏，为了避免部件损坏，本方案拟采用全仿真的故障注入方法。首先运用 Anylogic 仿真软件对雷

达天线进行实物仿真建模，然后通过软件故障注入，进行测试性验证，如果模型未为对注入的故障做出相应的反应，则表示该故障未被检测出，当超过验证方案要求值时，则需要对测试性设计方案进行修改，然后再进行测试性验证，故障注入实验记录表如表 4.4 所示。故障注入表部件选择来源于 50000 个小时虚拟仿真高频故障部件。

表 4.4 故障注入信息表

序号	注入编号	注入故障部件名称
1	1006	高频变压器
2	2001	天线
3	2004	低噪声放大器
4	2007	移相器
5	2008	功率放大器
6	2009	驱动放大器
7	3001	晶振单元
8	3008	发射本振产生单元
9	4001	电源组
10	4008	SRAM
11	4010	网口
12	5005	合波器
13	5006	分波器
14	5014	信号 N
15	6001	初始信号
16	7006	高频变压器

在Anylogic软件平台中，建模时使用的是基于Java语言的编程语言，按照以上故障样本集中的故障注入序列，对测试性虚拟验证模型注入故障，用离散事件的方式实现故障注入。因而可以根据测试性方案得不同，进行模型仿真，模型运行情况如图4.6-4.8所示：

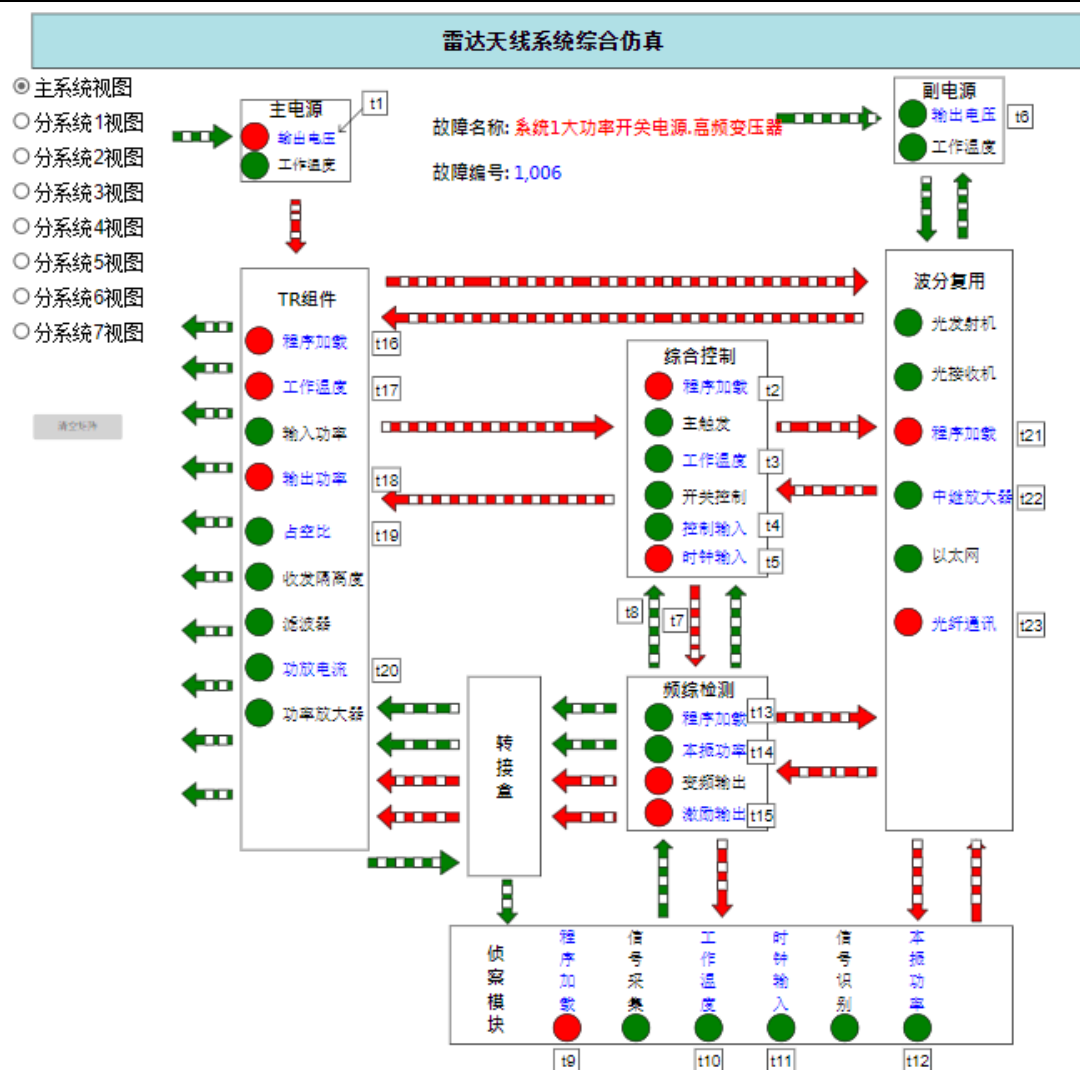


图4.6 测试性验证方案模型运行图

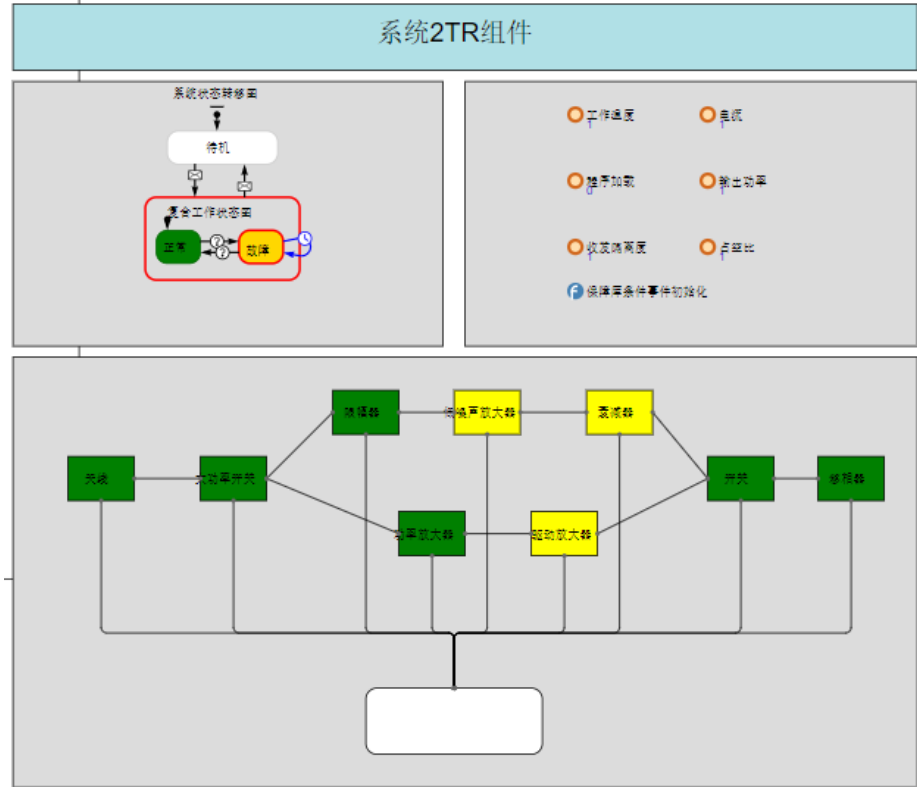


图4.7 系统运行图

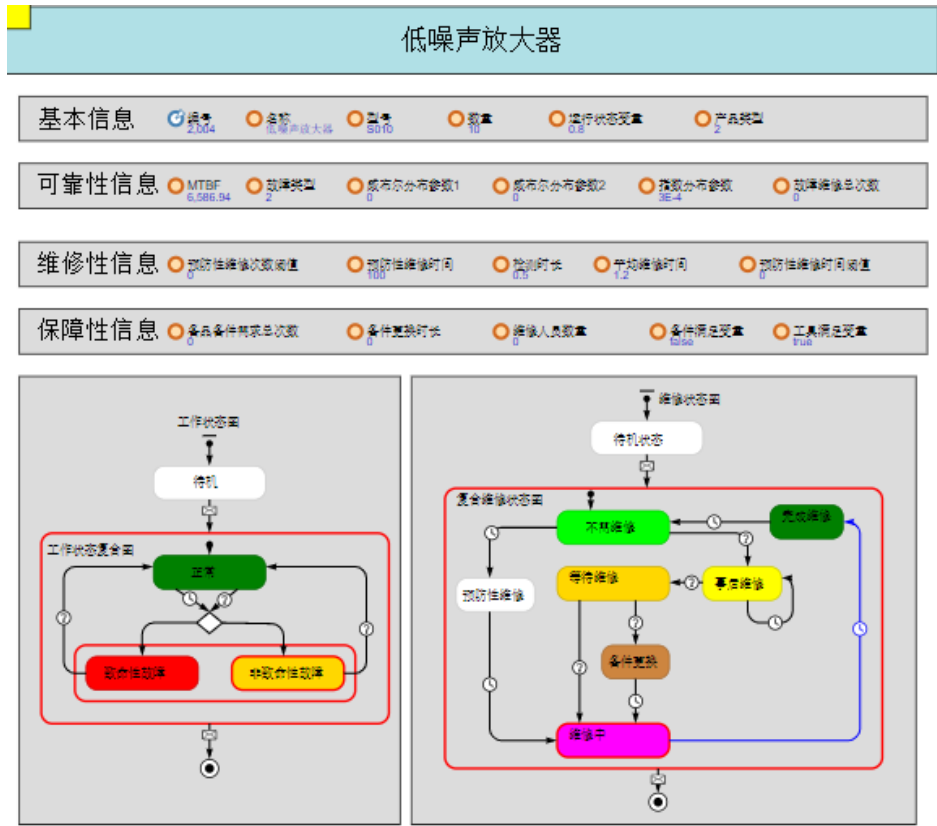


图4.8 部件运行图

4.4 参数评估

模型仿真后,将得到测试点数据,而此时的数据是临时信息,需对其进行存储。仿真数据存储即存储模型仿真时所获得模型中各类参数信息、各节点等故障信息,并将数据传送给测试仪的用户显示界面,具体数据分析流程如图4.9所示。

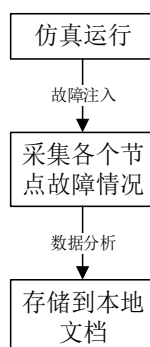


图4.9 数据分析

对仿真数据进行故障特征提取与分析,即对仿真数据进行处理,得到16*23故障-测试相关矩阵,如表4.5输出结果矩阵所示,其中检测数据代表t1-t23这23个测试信号点的信号,纵坐标代表输入故障编号,0代表测试点出现故障,1代表测试点无故障。

表 4.5 故障注入实验记录表

序号	注入编号	检测数据
1	1006	00110101011111010011010
2	2002	1111111111111111110111
3	2004	1111111111111101111110
4	2007	1111111111111111110111
5	2008	1111111111111111110111
6	2009	1111111111111111110111
7	3001	1101111011010111111110
8	3008	1111111111111101101111
9	4001	1011110101111111111101
10	4007	1111011111111110110111
11	4008	1111111111111111111110
12	5001	1101111001110111111101
13	5005	1111111111111111111101
14	5014	1111111111111111111110
15	6003	1111111101111111111111
16	7006	1111101001110110111101

依据以上实验记录，计算未检测故障（全1行）与模糊组（重复的行），获得测试性指标，然后返回测试机输出。16个故障均可在虚拟样机中诊断，按照验证方案中注入16个故障，允许诊断故障失败1次的标准，可判断故障检测率、故障隔离率达到合同要求，结果如图4.9所示。



图4.9 测试性输出结果

4.5 本章小结

本章根据第三章搭建的雷达天线仿真模型进行天线系统测试性虚拟验证试验。首先进行试验方案的选择，确定了故障样本量以及合格判据，接着对样本量进行合理分配，并选择了测试信号点，用来检测故障注入是否成功。然后进行根据故障编号进行故障注入，得到故障-测试相关性矩阵，据此完成对故障特征的分析，进而给出了测试性指标故障检测率与故障隔离率的结果，完成对测试性虚拟验证。

第5章 试验结果总结与系统验证

5.1 测试性验证试验结果总结

通过整个雷达天线测试性建模与虚拟验证的过程,其中共完成了系统仿真 5 万个小时以及测试性验证的两个过程。涉及了 1 个主系统、7 个分系统、63 个部件以及 7 个保障库。且由于涉及的大功率开关电源与辅助电源设计的结构一样,因此在一定程度上降低了仿真分析与虚拟验证过程的复杂程度。

按照前述的测试性虚拟验证整个过程,其中在进行确定与分配故障注入样本的过程中对虚拟系统仿真了 5 万个小时,这 5 万个小时也相应的统计了部件发生故障的总次数。从表 4.2 子系统内部件发生故障的次数中可以得到 TR 组件分系统的故障次数最多,其中分系统中低噪声放大器为薄弱部件,故障次数最多。可以从可靠性角度进行分析部件的寿命情况,从而提高整体分系统的故障率。

第二个为虚拟验证所得到的结果。将表 4.2 故障注入实验记录表进一步处理如图 5.1 所示。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
7	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
10	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
12	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1

图 5.1 故障注入实验数据处理图

其图,横排数字为 23 个检测点,纵排数字为 16 个故障注入序号。图中红色为故障注入后,该检测点无信号,红色为有信号。

通过上图可以看出,没有全绿行,即没有未检测到故障信号。但是第 11 行与

14 行出现了重复行，即出现了模糊组，出现这种情况需要对系统 4 部件网口以及系统 5 部件信号 N 进行故障识别，统计其各自部件发生故障时的故障模式信息，从而识别具体那个部件发生的故障。图中可以看出第 4 列、第 10 列以及第 12 列均为正常信号，那么 16 个样本量的故障注入，未能影响这三列相应的信号变化，在测试性预计时，可将测试点更换，至此，给出测试性设计优化方案。

5.2 测试机系统验证

5.2.1 测试机系统验证

对测试机系统的验证需要分别从功能与性能上进行验证。

(1) 功能验证

测试机系统共有三个主要功能模块：选择验证方案、发送故障编号指令、接收测试性数据以及样本量的计算。

其中选择验证方案中设计要求值、双方风险值以及最低可接受值只需要验证是否可以储存到软件平台上，接着通过系统提供的对故障样本量和合格判定数的计算数据，将二者数据与参考国标的表进行对照检验，可以判定故障样本量和合格判定数的情况，也可以验证二者数据的正确性。计算样本量的验证方式也是如此。

发送故障编号指令与接收测试性数据这两者可以和仿真系统的接收、发射数据的验证方式相同，在此不再赘述，参考仿真系统的验证部分。

在试验过程中，通过上述验证方法，验证了测试机系统功能的正确性，满足试验平台的需求。

(2) 性能验证

性能验证方面，测试机所使用的语言为 G 语言，在 NI Labview2016（32 位）软件平台上搭建。计算设备为 Inter Core i7-10875H CPU 2.30GHz，16.00GB 的机带 RAM，64 位操作系统。测试机系统共有有一个负责与仿真机系统交互的界面主线程，需要在高负载环境下进行负载测试，确保系统能稳定地持续进行。在测试性验证过程中，由于不同故障注入导致的程序数据处理量的增加，观察此时系统任务管理器显示的 CPU 占用率变化范围如图 5.2 所示，可知该程序的负载率在稳定运行状态下，故障注入时会有一个 64% 的跳转，但也有足够的运算余量，满足系统运行性能要求。

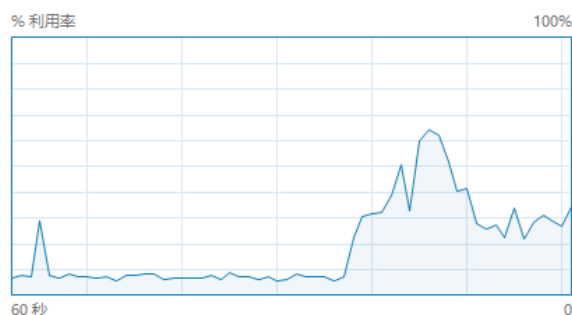


图 5.2 故障注入 CPU 占用率

5.2.2 测试机系统评价

测试机系统采用了自动化,通用化测试的设计思想所实现。通过对测试验证方案的选取与样本量数据的综合判断,按照给定的设计要求值、双方风险以及最低可接受值、故障率、工作系数等可以轻松得到测试验证要求的样本量,故障注入样本分配情况,用户也可以根据测试要求,随时调整配置参数,体现了较高的灵活性与可用性。用户操作界面的简单设计,在确保测试功能的前提下,减少了大量用户操作,使得系统有着较好的易操作性。

与硬件故障注入系统的差异,通过同一个以太网地址实现通信,不需要线的接口,减轻了测试系统的通信有线情况,确保了系统可以对不同型号的设备进行统一的测试,体现了系统设计的通用性与可拓展性。

5.3 仿真机系统验证

5.3.1 仿真机系统验证

对仿真机系统的验证需要分别从需求功能验证与运行性能进行验证。

(1) 功能验证

功能验证需要分析是否运用 Anylogic 软件平台对雷达天线系统进行仿真建模并建立模型,模型功能包括可自动进行故障发生、故障维修、备件更换以及实时接收到测试系统验证模块发送的故障指令后进行故障模拟。

在初期仿真系统搭建过程中,通过仿真机系统控制台提供的对故障发生总次数、维修总次数以及备件更换总次数的后台存储数据回放情况,将采集的原始故障数据和控制台回放的故障注入情况统计的数据进行对照检验,可以判定故障发生、故障维修以及备件更换的逻辑情况。其中,部件发生故障所对应的威布尔参数数据均来自于调研所参考的数据,通过控制台所显示数据与采集数据进行对比,可以验

证故障发生、故障维修以及备件更换的正确性。

对于仿真机系统实时接收测试系统验证模块发送的故障指令功能，可以通过使用仿真机系统的接收端与测试系统发送端的数据进行对比验证故障指令功能的正确性。仿真机系统的接收端为 PC 机的本地文档文件，测试机系统的发送端为 Labview 程序设计端。其中对于两者的通讯需要在同一个 IP 地址下进行数据传输，对比故障注入前后仿真机系统采集的数字和发送端的数据，共同完成仿真机接收故障指令的正确性。

在试验过程中，通过上述验证方法，验证了系统功能的正确性，满足试验的需求。

(2) 运行性能验证

为了确保虚拟雷达天线系统在运行过程中，系统不出现卡顿，有充分的计算余量，需要进行 CPU 运行性能验证。模型在运行时，需要实时读取本地数据库内部部件基本指标参数，且需要实时读取本地文档测试机发送的故障指令以及模型运行分析过程一般都以万为单位的可靠性寿命，因此有着较高的 CPU 占用率。

仿真机所使用的算法来自于 Java 程序编程，在 Anylogic 8.5 软件平台上搭建。计算设备为 Inter Core i5-5200U CPU 2.20GHz，8.00GB 的机带 RAM，64 位操作系统。

在模型运行过程中，分别以 1、2、10、100、250、500 的倍速作为高负载测试环境，运行 10 分钟到 CPU 稳定，通过观察此时任务管理器中的 CPU 占用情况如表 5.1 所示，可知对于高负载情况下，CPU 核心只占用了最多 60% 的计算余量，不会出现系统卡顿等软件运行情况。

表 5.1 不同倍速下 CPU 占用率

倍速	CPU 占用率 (%)
1	22
2	30
10	43
100	46
250	52
500	62

5.3.2 仿真机系统评价

本虚拟雷达仿真机系统采用的是智能体技术进行仿真搭建，可以进行可靠性、

维修性、保障性以及测试性等性能研究。系统将整个天线系统进行模块化划分，可以有效的进行分系统功能的研究，分系统又下沉到部件层次，可以统计部件的信息情况，并且是测试机传输的虚拟故障指令，具有无破坏性、周期短、高效性、成本低、可视化、通用性以及易操作性等特点。

由于雷达天线的仿真是参考现实中真实雷达情况，需要对现实雷达的故障收集做出较为细致的分析，来模拟故障发送、故障传播等情况，因此可用来雷达天线系统教学研究、系统可靠性、维修性、保障性以及测试性分析研究。

5.4 本章小节

本章首先通过对测试性虚拟验证过程中的试验结果进行了分析。然后对开发的测试机系统和仿真机系统进行了功能和性能上的验证，重点考虑实时性方面，并对系统进行了评价。

第6章 总结与展望

6.1 工作总结

在项目课题组的大力支持下,本文以雷达天线系统为研究对象,在 Anylogic 软件平台上,利用多智能体以及离散事件仿真建模的方法搭建了虚拟雷达天线仿真模型,结合四性的基本理论,实现了对雷达天线系统虚拟测试性验证的研究,主要内容如下:

(1) 四性的仿真建模。本文将平均故障时间作为核心参数,引入了可靠性,从而模拟了故障规律。接着将故障分为致命性故障与非致命性故障,从而分别对应引出维修性的部件维修以及保障性的备件更换。最后通过故障注入,机内参数自检的方式实现了测试性验证,该方案为后续其他仿真模型的建立提供了一定的可行性,具备一定的适用性和可操作性。

(2) 测试性虚拟验证的实现。针对现今测试性验证成本高、故障注入困难等问题,本文利用两台 PC 机,一台作为测试机,一台作为仿真机,其中测试机完成测试方案的选取、样本量分配、故障注入指令发送以及测试数据显示,另一台仿真机实现全数字虚拟雷达天线系统的仿真建模,完成模型运行、故障传播、可视化显示的效果,其中两台 PC 机通过 TCP/IP 通讯,不需要数据线的连接,即可完成故障的注入。该方法测试性成本低、故障注入简单且具有很完美的故障可视化传播的效果。

(3) 全数字仿真雷达天线系统的搭建。本文通过多智能体以及离散事件仿真建模技术建立了面向部件级分析的仿真模块,这些模块可以模拟雷达天线系统任务过程中的使用情况,形成的模块化仿真计算模型能够计算以及统计部件的工作特性。这种基于模块化的仿真模型具备较高的灵活性及扩展性。

6.2 工作展望

随着我国仿真验证技术的高速发展,针对雷达天线系统软件仿真测试验证的方法也越来越多。本次论文研究的雷达天线系统虚拟测试性验证系统利用多智能体与离散事件建立了模块化仿真验证模型,能够为测试性虚拟验证提供一种解决方案,此方法虽然具有一定的先进性,但还存在着一些不足需要后续研究的跟进。

(1) 维修性、保障性继续完善。本次论文中,可靠性用在了故障的发生,其中

要根据不同的部件类型，对应不同的分布参数，一般要用到的机电产品遵从威布尔分布，电子产品遵从指数分布，机械产品遵从正态分布，在本次论文中，三者区分不明显，会导致结论的不准确。现今也存在许多故障预测理论以及故障机理演化，后期可以结合计算机技术为故障数字化模拟提供 stronger 的支撑。本次论文主要研究的是测试性虚拟验证，其维修性以及保障性没有具体研究，后期可以在两者投入更深的研究，可以为雷达天线系统全寿命提供一定的研究方案。

（2）数据来源不准确，不完备。本次论文所用到的雷达天线系统乃至分系统内部结构不完善，在此只是提到了关键部件的存在以及关键部件所对应的输出指标。其中，部分基础故障参数数据量不足，导致研究结论可能存在不准确的情况，解决该问题需要对应不同的雷达天线系统，获得更加大量的故障数据。为解决数据问题，也需要有更加有效的可靠性、维修性、保障性以及测试性的数据管理制度。

参考文献

- [1] 王敏,张芑,马立刚,等.典型机-电-液系统测试性建模及诊断策略设计方法[J].液压气动与密封,2020,40(09):26-30+35.
- [2] Huaming Tian,Baokuan Luan,Hong Xue.Test Analysis of Complex Electronic Equipment Based on Multisignal Model[C].2013:481-489.
- [3] 艾书胜. 模拟电路测试性仿真验证技术及软件开发[D].电子科技大学,2015.
- [4] Department of Defense.MIL-STD-2165A,Military Standard Testability Program for Systems and Equipments[S].1993.
- [5] 田仲,石君友. 系统测试性设计分析与验证[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [6] Department of Defense.MIL-STD-1309D,Military Standard Definitions of Terms for Testing,Measurement and Diagnostics[S].1992.
- [7] 江妙富. 装备可靠性维修性保障性要求总体方案技术研究[D].北京:北京航空航天大学硕士学位论文,2004.
- [8] Liwei Song. Research on simulation-based testability verification method of radar[J].2012:1-5.
- [9] 王文亮. 无人机分系统单元测试性分析与验证技术研究[D].北京交通大学,2020.
- [10] 邱静,刘冠军,李天梅. 基于虚拟样机的可测性虚拟试验验证技术研究及发展[C].第二届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛文集,2008.
- [11] 刘磊. 装备智能故障诊断及测试性验证与评价方法研究[D].郑州大学,2017.
- [12] 徐宏泉. 某型舰作战系统设备测试习惯验证技术[J].舰船电子工程,2010(3):136-137.
- [13] 李华康. 测试性试验中等效故障注入技术及应用[D].国防科学技术大学,2015.
- [14] 尹园威,尚朝轩,马彦恒,李刚. 基于故障注入的雷达装备测试性验证试验方法[J].计算机测量与控制,2014,22(07):2128-2130+2134.
- [15] Yuan Wei. The Application of Fault Injection Using Circuit Simulation in Testability Verification[J].Applied Mechanics and Materials,2013,2560(697):937-941.
- [16] 么飞,时光,富小微. 基于故障注入技术的航天器系统级软件测试方法研究[J]. 航天器工程,2019,28(01):130-136.
- [17] 谷振宇,王胜文,洪炳熔,等. 软件故障注入方法及其仿真应用[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2004(04):28-31.
- [18] 邱晓刚,陈亚洲,张鹏.从系统仿真到领域仿真的拓展[J].系统仿真学报,2020,32(09):1637-1644.
- [19] Kunche Akhil,Mielczarek Bożena. Application of System Dynamic Modelling for Evaluation of Carbon Mitigation Strategies in Cement Industries: A Comparative Overview of the Current State of the Art[J]. Energies,2021,14(5).
- [20] 胡晓峰.复杂系统建模仿真的困惑和思考[A].中国科学技术协会学会学术部.新观点新学说学术沙龙文集 58:复杂系统建模仿真中的困惑和思考[C].中国科学技术协会学会学术部:中国科学技术协会学会学术部,2011:9.

- [21] 曹琦.复杂自适应系统联合仿真建模关键技术及应用研究[D].重庆大学,2010.
- [22] 赵金超,齐欢,张立.基于多 Agent 的舰船维修系统建模与仿真方法研究[J].舰船电子工程,2006,26(4):107-110.
- [23] Kim, Changyoon. Estimating the effect of module failures on the gross generation of a photovoltaic system using agent-based modeling[J].Renewable & sustainable energy reviews,2018,91(Aug.):1019-1024.
- [24] 曹中浩,张健钦,杨木,等.基于 GIS 新冠智能体仿真模型及应用-以广州市为例[J].地球信息科学学报,2021,23(02):297-306.
- [25] Zhang Ke,He Fang,Zhang Zhengchao,Lin Xi,Li Meng. Multi-vehicle routing problems with soft time windows: A multi-agent reinforcement learning approach[J]. Transportation Research Part C,2020,121.
- [26] 高子寒,杨丽,魏晓.多智能体仿真再护理领域的应用[J].解放军护理杂志,2020,37(12):71-73+77.
- [27] 李泽群,闫丰亭,史志才,等.基于多智能体的虚拟化地铁站乘客行为仿真[J].系统仿真学报,2020,32(12):2341-2352.
- [28] Mahdi Siavash, Vahid Johari Majd, Mahdie Tahmasebi. A practical finite-time back-stepping sliding-mode formation controller design for stochastic nonlinear multi-agent systems with time-varying weighted topology[J]. International Journal of Systems Science,2020,51(3).
- [29] 贾春洋,邹湘军,王杰,曾泽钦.基于多 Agent 的复杂传动件虚拟装配系统研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020(01):132-135.
- [30] Chun Sheng Zhu et al. Research on the Multi-Objective Optimization Model of System-Level BIT Testability Index Determination[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1498 : 2223-2227.
- [31] 陈阳隆,马彦恒,刘骐玮,侯建强.基于效能的装备 RMST 顶层指标设计方法研究[J].电光与控制,2020,27(07):63-67.
- [32] 史贤俊,王康,张文广,聂新华.测试性验证技术现状分析及展望[J].飞航导弹,2018(12):72-78.
- [33] Sujoy Sen, Sulakshana S. Nath, Venkata N.Malepati, et al. Simulation-Based Testability Analysis and Fault Diagnosis[C]. AYTOTESTCON'96, Test Technology and Commercialization, 1996:136-148.
- [34] AD-A142075.F-16APG-66 Fore Control Radar Case Study Report[R].1983,8.
- [35] Mr. Douglas B. Jaeger. Accreditation of Modeling and Simulation Test Capabilities for CV-22 Initial Operational Test and Evaluation[J].U.S. Air Force T&E Days,2010,3(4):25-29.
- [36] 李永春,连光耀,陈建辉,刘仲权.基于虚拟样机的仿真测试技术研究[J].仪表技术,2008(09):33-35.
- [37] 高鑫宇.测试性虚拟验证中的故障建模技术研究[D].国防科学技术大学,2009.
- [38] 李宁.基于 AADL 的航电构型控制系统测试性建模方法研究[D].中国民航大学,2016.
- [39] 刘城.电子系统测试性虚拟验证与综合评估技术研究[D].电子科技大学,2016.
- [40] 王超.虚实结合的测试性试验与综合评估技术[D].国防科学技术大学,2014.
- [41] 王青麾,王魁.基于 PSpice 的电路故障注入仿真分析方法研究[J].电子产品可靠性与环境

- 试验,2011,29(02):57-60.
- [42] 赵晨旭. 测试性虚拟验证技术及其在直升机航向姿态系统中的应用研究[D].国防科学技术大学,2011.
- [43] 刘瑛. 测试性虚实一体化试验技术研究及其应用[D].国防科学技术大学,2014.
- [44] 李波,蒋颖晖,刘甦,吕平.有源相控阵雷达天线阵面可靠性模型研究[J].质量与可靠性,2018(06):28-30.
- [45] Xiang-Yu Li et al. A copula-based reliability modeling for nonrepairable multi-state k-out-of-n systems with dependent components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(2).
- [46] 阮淑芬.机载无源相控阵雷达天线的维修性设计[J].现代雷达,2008(05):99-102.
- [47] Anna Dzvonkovskaya,Leif Petersen,Thomas Helzel,Matthias Kniephoff. High-frequency ocean radar support for Tsunami Early Warning Systems[J]. Geoscience Letters,2018,5(1).
- [48] 卢雷,史颖超,尹振兴.雷达装备保障系统效能综合评估[J].雷达科学与技术,2017,15(03):276-280.
- [49] Xiu Fang Wang,Bin Chen,Jin Ye Peng,Wei Qi. Research on Modeling and Analysis of Testability for Complex Electronic System[J]. Applied Mechanics and Materials,2015,3682.
- [50] 常春贺,杨江平,卢雷.基于试验和预计的雷达装备测试性评估方法研究[J].装备学院学报,2012,23(03):87-92.
- [51] 彭祥飞,江浩,邓林.基于 GaN 技术的大功率 T/R 组件可靠性设计与分析[J].装备环境工程,2020,17(12):115-118.
- [52] 洪晟,罗无为,周闯,等.雷达电源系统安全运行健康状态评估研究[J].航空工程进展,2020,11(4):585-590.
- [53] 李宏,郝金华,刘洪升.某米波雷达频率综合器的设计与实现[J].电子器件及应用,2012,14(6):1563-4795.
- [54] 张敏.相控阵雷达波束控制技术研究[D].哈尔滨工业大学,2015.
- [55] 田浩.波分复用系统研究进展[J].中国新通信,2020,22(01):81.
- [56] 张平定,王睿.一种新的天线旁瓣对消抗干扰技术的实现[J].现代雷达,2002(02):80-82.
- [57] 廖盟.离散事件动态系统的若干故障诊断问题研究[D].华中科技大学,2017.
- [58] McKinley Kenneth W. et al. Reducing Pediatric ED Length of Stay by Reducing Diagnostic Testing: A Discrete Event Simulation Model[J]. Pediatric Quality & Safety, 2021, 6(2) : e396-e396.
- [59] 段德超.基于离散事件仿真的平板电脑组装设备方案评估[D].上海交通大学,2015.
- [60] Du Haidong. Prediction of armored equipment maintenance support materials' consumption based on imitation [J].2012:1-9.
- [61] Zhu Junwei,Zhou Qiaoqian,Wu Libing.et al. Topology reconstruction based fault identification for uncertain multi-agent systems with application to multi-axis motion control system[J]. Applied Mathematics and Computation,2021,399.
- [62] 颜功达,董鹏,文昊林.基于多智能体的复杂工程项目进度风险评估仿真建模[J].计算机科学,2019,46(S1):523-526.

- [63] 吕建伟, 郭顺合, 徐一帆, 等. 基于多智能体仿真的舰船动力系统航渡任务成功性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(08): 1896-1902.
- [64] Du Haidong. Prediction of armored equipment maintenance support materials' consumption based on imitation [J]. 2012: 1-9.
- [65] 方坤. 复杂系统多态故障树自动建造和分析方法研究[D]. 武汉科技大学, 2020.
- [66] Wenbo Na. Agent-based modeling of availability for complex multiple units systems[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2017, 23(1): 71-81.

致 谢

写到这里也意味着三年的硕士生活接近了尾声，三年前写这一部分是在本科寝室，转眼间，我就要离开这个学校——湖北工业大学，我生活学习了七年的地方，我经历了学校旁地铁站由无到有，经历了学校的高楼耸立，我深爱这所学校，感谢她对我的培育之恩。在即将毕业之际，我想对三年来所以帮助过我的老师，朋友，同学以及亲人表示真挚的感谢。

首先要向我的导师聂磊教授以及副导刘梦然副教授表达最真挚的感谢。聂老师在生活以及项目课题中都给予了我很多的帮助与关怀，让我了解到自身潜力，让我清楚明白自身缺点。在完成测试项目的过程中，一旦遇到难点，比如模型无法实现，聂老师教导，思考的时间不宜超过 3 天，这样可以有助于事情的解决，以及自身有更清楚的逻辑，同样这句话，我觉得也适用于生活中的方方面面。同时幸运的是，刘老师是我的副导，同样给与了我很多帮助，在仿真和实验的实现上，在小论文的书写上，在生活的点点滴滴上。在此，感谢二位导师在三年的时光中对我的教导和照顾。

还要感谢二楼测控系的各位老师，尤其是丁善婷老师、董正琼老师、周向东老师、翟中生老师、简泽明老师等老师在这三年的研究生学习生活中，离不开他们的点滴帮助与指导，我的研究生生活更加多姿多彩，在此也表达对他们最诚挚的感谢。

我还要感谢同实验室的师兄弟以及三年的室友，在他们的陪伴下我度过了难忘的研究生生活。感谢已经毕业的贾雯师姐，因为她的教导，让我抓住机遇、收获了很多。感谢同届的陈立，其在项目上的鼓舞和努力。感谢蔡文涛，黄一凡，王淼，彭阳以及 201、203、218 实验室的师兄弟，让我在毕业之际，感受到了队伍的强大。感谢室友张刘港，夏志鹏，刘亚川七年同窗的陪伴。

最后，感谢我的家人，感觉父母对我上学的理解和支持，我才有机会到湖工读了七年的学习生活。感觉你们的养育之恩，谢谢你们给了我那温暖的家。