

基于仿真的电路板级故障诊断测试方法

王占选¹, 陈嘉恒², 王晴¹

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071)

摘要: 针对某雷达定时器板的电路特点, 提出了一种基于仿真的电路板级故障诊断测试方法; 首先, 利用 pspice 对被测电路进行功能模型建模和故障模型建模, 根据功能模型构建电路仿真原理图进行功能仿真, 进而利用故障模型做故障注入进行故障仿真, 仿真结束获取功能仿真和故障仿真数据, 通过小波分析的方法提取仿真数据的特征, 包括能量分布特征提取、极值特征提取和熵特征提取, 并做测试节点优化删除冗余数据, 最后通过概念格的方法对特征数据做训练, 生成应用于被测对象的故障诊断模型; 通过获取的故障诊断模型对诊断数据进行故障推理, 验证了测试方法的可行性。

关键词: 故障诊断; 故障仿真; 特征提取; 概念格

Circuit Board—level Fault Diagnosis Test Method Based on Simulation

Wang Zhanxuan¹, Chen Jiaheng², Wang Qing¹

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For the Circuit characteristics of a radar timer board, this paper presents a circuit board—level fault diagnosis test method based on simulation. Firstly, used pspice to perform functional model modeling and fault model modeling on the circuit under test, constructed a circuit simulation schematic diagram based on the functional model for functional simulation, and then used the fault model for fault injection to perform fault simulation. After the simulation, obtained the function simulation and fault simulation data, extracted the characteristics of the simulation data by wavelet analysis, including energy distribution feature extraction, extremum feature extraction and entropy feature extraction, and did the test point optimization to delete the redundant data, finally trained the feature data through the concept lattice method to generate a fault diagnosis model applied to the measured object. Used the fault diagnosis model to perform fault reasoning on the diagnostic data, which verified the feasibility of the test method.

Keywords: fault diagnosis; fault simulation; feature extraction; concept lattice

0 引言

电路板被广泛应用于日常生活、工作的各个领域, 随着使用时间的日益增长, 元器件的可靠性逐渐降低, 再加上某些不可预知因素的影响, 使得电路板的故障发生在所难免。为了保障电路板正常工作, 减少电路维修诊断所耗费的大量时间成本和人力成本, 提高电路发生故障的测试诊断效率, 对电路板级测试诊断方法的研究显得尤为重要^[1]。

伴随着计算机技术和 EDA 技术的快速发展, 应用于电路故障诊断的理论研究越来越多^[2], 当前, 与电路故障诊断相结合的理论研究有如下几种: 1) 神经网络^[2]是基于认知科学和神经生物学在信号处理领域的认知成果, 具有很强的非线性拟合能力和自适应能力, 应用于故障诊断的信号处理过程接近于人类的思维方式; 2) 免疫算法^[4]是模仿生物免疫系统而发展起来的智能随机优化算法, 应用于故障诊断具有检测与学习的动态调整能力, 提高诊断测试效率^[5]; 3) 支持向量机^[6]是一种应用于故障分类识别的机器

学习方法, 与最小二乘小波相结合应用于模拟电路故障诊断可有效提高诊断的准确性^[7]。

本文提出了一种基于仿真的故障诊断测试方法, 通过 pspice 对电路板进行建模和仿真, 利用小波分析方法提取电路板仿真结果的数据特征, 并根据数据特征做测试节点优化, 采用概念格诊断推理方法构造电路板故障诊断形式背景, 生成故障诊断规则, 最终通过诊断规则对已有故障数据做诊断推理, 验证测试方法的可行性。

1 测试方法

基于仿真的电路板级故障诊断测试方法流程图如图 1 所示, 建模与仿真单元用于完成被测电路板的功能与故障模型建立、仿真原理图绘制、故障注入、仿真原理图编译、功能仿真及故障仿真等, 用于生成电路中各个测试节点的波形数据, 为板级故障诊断提供训练数据来源; 特征提取单元通过小波分析的方法, 提取测试节点波形数据的典型特征, 如小波系数能量特征、小波系数极值特征以及小波系数熵特征等, 通过这些特征数据用于后续解析故障模式与测试节点之间的关系抽象和总结归纳; 测试节点优化用于删除大量特征数据的冗余数据, 提高测试诊断效率; 利用测试节点优化以后的特征数据以及故障模式信息, 构造用于故障诊断的形式背景和概念格, 包括条件属性概念格

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2019-12-13。

作者简介: 王占选(1988-), 男, 河北柏乡人, 硕士, 研发工程师, 主要从事电子设备故障诊断方向的研究。

和决策属性概念格；诊断规则提取单元用于将上一步构造的诊断形式背景和条件属性概念格通过可辨识属性矩阵的定义计算得到故障诊断的决策辨识函数，进一步利用布尔运算的分配率和吸收率将其转换成最小吸取范式，获取约简以后的条件属性概念格，通过比对约简后的概念格和决策属性概念格，获取故障诊断规则；故障推理与验证单元利用诊断规则对仿真数据做推理诊断，验证方法的可行性。

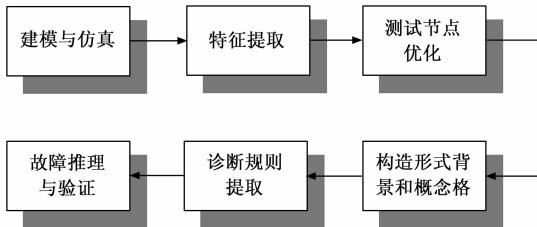


图 1 电路板级故障诊断测试方法流程图

2 建模与仿真

2.1 建模

1) 功能模型建模：比起人工分析，通过 EDA 工具进行电路仿真具有时间耗费少、精度高且可靠性强等优点，可以大大缩短开发周期、降低设计成本，而且还可以随时根据项目需求对电路进行优化和改进。但这些优点大大依赖于元器件模型，只有保证模型的准确可靠，才能充分发挥电路仿真技术的巨大优势。元器件厂家提供的标准模型虽然简单实用，但不具备自行建立模型的灵活性，比如修改模型参数、设置模型故障模式等。为了适应电路故障诊断的需要，首先要建立元器件的功能模型，进一步总结元器件的故障模式，建立能够正确反映故障模式的故障模型，便于通过仿真快速、准确定位电路故障，节省时间，提高效率。

元器件建模流程图如图 2 所示。

2) 故障模型建模：首先应根据上节介绍建立功能模型，在此基础上分析元器件的失效模式，并在此基础上分析失效模式与模型参数的对应关系，并建立故障模型。模型建立完成后还需搭建仿真电路进行验证，分析故障仿真结果的好坏元器件故障模型建模流程图如图 3 所示。

2.2 仿真

元器件的功能模型和故障模型建立完成后，采用 spice3f5 仿真引擎搭建被测对象实际功能电路，进行被测电路的功能和故障仿真，获取仿真数据。

电路故障仿真工作流程如下：

- 1) 准备阶段：打开软件，启动“电路仿真内核看护进程”，载入“仿真引擎”，默认打开电路原理图编辑窗口。
- 2) 检查阶段：检查构建原理图的模型文件是否包含有效元素，如发现问题及时报警，提示错误修改。
- 3) 原理图编辑：通过建立的元器件功能模型和故障模型，根据被测电路板实际拓扑关系，绘制用于仿真的被测电路原理图。

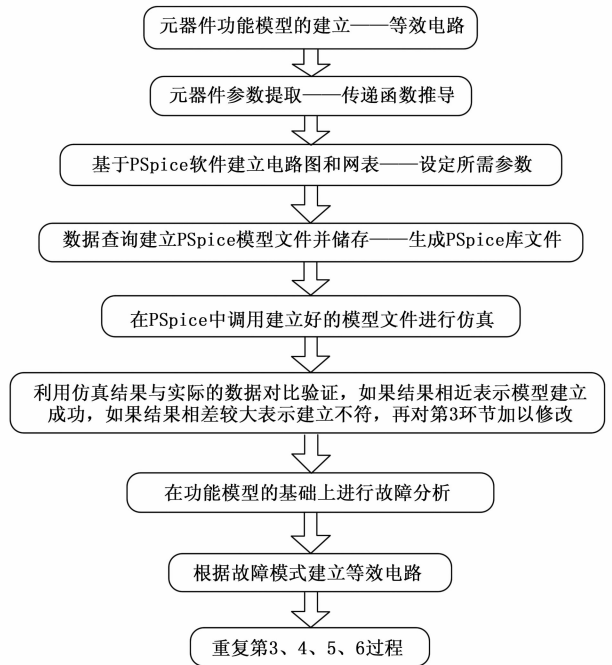


图 2 元器件建模流程图

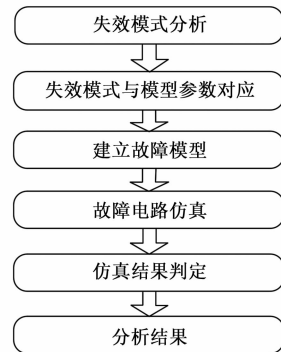


图 3 元器件故障模型建模流程图

4) 原理图编译：原理图编译之前自动进行原理图校验，发现问题及时告警。通过校验的原理图按照“原理图编译变换规则”进行解析，获取电路原理图网表文件，可供后续仿真模块使用。

5) 功能仿真：获取电路仿真原理图网表文件以后，需要设置仿真类型和仿真参数，仿真类型包括直流工作点、瞬态分析、零极点扫描、周期稳态扫描等，仿真参数包括仿真时间长短、时间间隔、电压电流精度、仿真迭代次数等。同时，还需要设置仿真所需功能模型和故障模型的存放路径以及仿真输出数据的存放格式等信息。所有设置完成后便可进行功能仿真，并按照设定好的格式获得仿真结果。

6) 故障管理：用于按照指定的方式进行仿真原理图的故障注入功能，用来模拟电路出现指定故障时的情况，故障注入包括原理图测试节点的故障注入以及元器件类型和元器件位号的故障注入。

7) 故障仿真: 按照步骤 6) 注入的故障模型, 对电路原理图做故障仿真, 获取电路原理图中各个测试节点的仿真数据。

8) 数据处理: 仿真引擎将按照仿真参数设定传回仿真之后的结果数据, 包括各个测试节点的采样数据和仿真设定的各种参数。

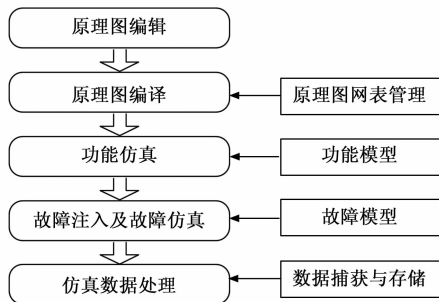


图 4 电路仿真流程

3 特征提取与测试节点优化

3.1 仿真数据特征提取

电路仿真结束后得到的是每个测试点的响应波形数据, 只根据波形数据无法直接用于故障诊断, 需通过一定处理获取该波形数据的特征表示, 比如周期方波信号的幅度、高值、低值、频率、占空比等典型特征, 或者经信号频域分解后特定频率分量对应的非典型特征。电路板级的故障信号大多是非平稳信号, 通常利用小波分解的方式进行处理。通过小波分解的方式提取信号特征有如下两个重点研究内容, 分别是小波基函数如何选择和小波分解层数如何确定。

1) 小波基函数的选择:

小波基函数不像标准傅里叶变换, 具有多样性和不唯一性。通过不同的小波处理, 获得的信号特征也截然不同。对于一个特定的信号来说, 首先应该求解这个信号的目标函数, 根据目标函数求解最优最小基函数。

2) 小波分解层数的确定:

由于仿真结束后获得的波形数据特征差别很大, 对应的小波分解层数的确定没有固定的理论依据, 通过小波分析想要达到的目标也不一样。小波分解层数如何确定的一个重要参数是信噪比, 如果信号的质量好, 噪声低, 出于提高计算效率的考虑, 同时又能够保证信号特征的足够表达, 小波分解层数不需过大。反之, 如果信号的信噪比偏小, 为了能够获取更准确的特征信息, 则需适度加大分解层数。此外, 影响分解层数的另一个重要参数是采样频率, 采样频率越大分解层数也应该越大, 反之较小。在满足故障诊断所需特征信息的情况下, 应该尽量减小分解层数, 提高计算效率。

仿真波形数据经过小波分解以后得到的仍然是离散数据, 依旧不能够直接用于故障诊断, 还需要通过特征向量提取获取离散数据的有用信息。特征向量应是该离散数据

的典型标识, 用于最大限度的与其他信号做区分。

离散波形数据的特征向量提取主要包括能量分布特征提取、熵特征提取以及极值特征提取。能量特征代表离散波形数据的典型特征, 比如波形数据的幅度、高值、低值、频率等, 小波的高频分解系数主要用于表征信号的奇异信息, 小波的低频分解系数主要用于表征信号的轮廓信息。分别计算小波不同分解系数对应的能量特征, 并将其组合成离散波形数据的特征向量。信息熵用于描述随机的稳定程度, 信息熵越小代表信号所包含的信息量越大, 相反, 信息熵越小则达标信号包含的信息量越小, 信号越平稳。信号的熵特征提取不是直接处理测试点波形数据的信号序列, 而是求解不同的小波分解层数或者是不同频段的小波系数所包含特征的概率信息。极值特征是指离散波形数据经过小波分解后, 不同频率的小波系数的幅值, 对故障信号来说, 奇异信号主要包含于高频系数中, 极值特征提取主要用于表征奇异信号的有用信息。

3.2 测试节点优化

测试节点优化是指删除尽可能多的冗余测试点, 同时保证足够多的故障状态隔离。对于隔离电路状态信息来说, 不同的测试节点所起的作用不同。有的节点隔离的状态少, 有的节点隔离的状态多, 有的对隔离故障没作用。测试节点优化有利于减少数据分析计算量, 加快实时诊断过程^[8]。

电路中的测试节点优化主要集中在基于整数编码表的策略和标准^[9]。整数编码法实现测试节点优化有两个步骤: 1) 每次选取故障隔离能力强的测试点加入到最优测试集中; 2) 找到这些最优测试点能隔离哪些故障, 并将这些故障加入到可隔离故障集中, 直到完成故障的全集, 算法结束。

选取故障隔离能力强的测试点的算法处理流程:

1) 选定一个参考标准, 用于衡量每次迭代过程中的测试点是否最优: 对故障判决能力的强弱是评价测试点是否最优的主要依据, 最优测试点应该能够更好的判断是否故障, 并且可以隔离出尽可能多的故障。测试点对故障判决能力的强弱可以用敏感度因子表征, 敏感度因子越大, 则代表测试点对故障越敏感, 根据敏感度因子的大小将测试点排序, 得到一个有序的测试点集合, 集合中越靠前的测试点敏感度因子越大, 对故障的判决能力也就越强。

2) 由得到的通过敏感度因子大小排序的测试点集合计算出每个测试点所能隔离出的故障, 根据已经训练的测试点对应的特征值集合获得故障诊断知识模型。然后对每个测试点对应的所有故障模式进行分类, 获得该测试点对应的故障模式的测试集。如果分类没有问题则代表该测试点能够隔离出对应的故障。按照顺序输入每个测试点对应的故障模式的测试集, 得到有序测试点集合所能隔离出的故障集合。

3) 通过步骤 2 和步骤 3 得到的有序测试点集合以及所能隔离出的故障集合, 删除敏感度因子很小的测试点以及

该测试点所能隔离的故障集合，依次化简得到最优测试集，算法结束。

4 概念格与故障推理

概念格也称形式概念分析^[10]，是建立在数学基础上的一种从形势背景进行数据分析和规则提取的工具，用于对数据集中的概念结构进行识别、排序、显示，被广泛用于信息科学领域。概念格是形式概念分析理论的基础，是对象和属性的集合，包含概念的外延和内涵，外延是指所有对象的集合，内涵是指对象所共有的属性的集合。基于概念格的诊断规则提取相比传统的诊断规则提取算法效率要高，而且可以从多维空间中进行数据分析，在数据分析方面是一个效率很大的工具，可以对属性的多维度、多层次关系进行清晰描述。

仿真数据经过特征提取、测试节点优化以后的故障特征数据，将故障模式以及相关测试节点数据特征经过抽象汇总后建立电路板故障诊断形式背景，基于属性的增量式生成算法构造概念格，并对生成的概念格做数据解析生成诊断知识。最终通过生成的诊断知识对原理图故障仿真数据做推理验证。

5 测试结果与分析

对某雷达定时器板进行建模仿真分析，获取共计10 962个故障仿真数据（如图 5 所示），包括单次功能仿真的 522 个测试节点数据以及分别注入 20 个单节点故障的 522 个测试节点数据。利用小波分析，提取测试节点波形的数据特征（如图 6 所示），由于测试节点含有大量与故障推理定位无关的冗余信息，通过节点优化删除冗余节点（如图 7 所示）。构造形式背景，行对应不同的故障模式，列对应采样节点数据特征与该故障模式是否相关的关系属性（如图 8 所示）。解析概念格，生成故障诊断规则，利用故障诊断规则对诊断数据进行推理诊断，能够准确定位到名称为“F2 + MODEL...”故障（如图 9 所示），验证了通过概念格进行故障推理的正确性。

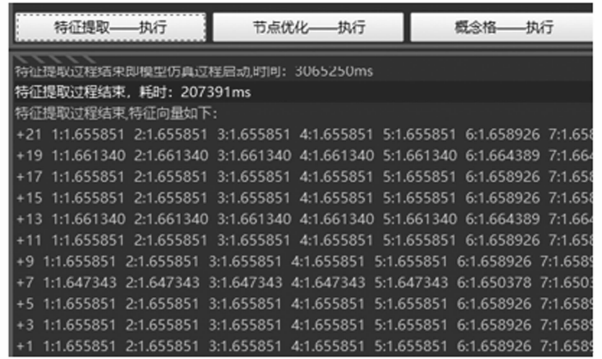


图 6 仿真数据特征提取

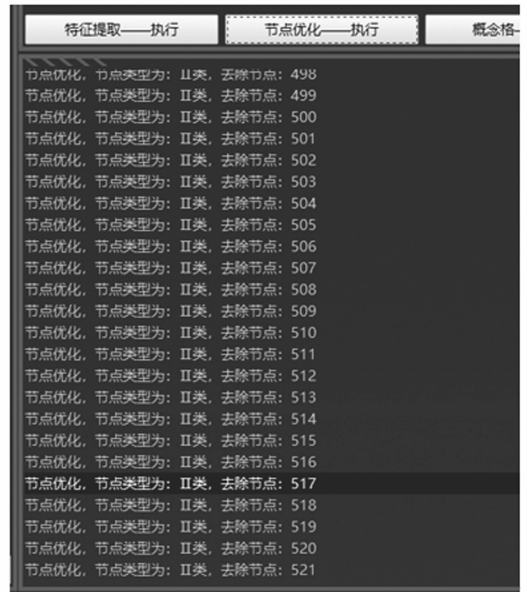


图 7 测试节点优化

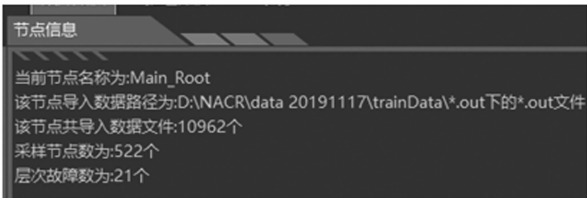


图 5 故障仿真数据

6 结论

本文提出了基于仿真的电路板级故障诊断测试方法。该方法利用建模和仿真获取被测电路板各个测试节点的波形数据，通过小波分析的方法获取波形数据的特征信息，并进行测试节点优化，构造形式背景和概念格，通过解析概念格获取诊断规则，并对被测电路仿真数据做诊断推理，验证了测试方法的可行性。

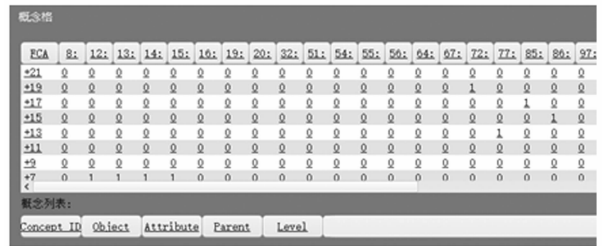


图 8 概念格形式背景

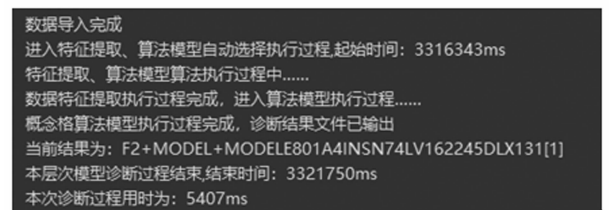


图 9 利用概念格对仿真数据做推理诊断

参考文献:

- [1] 景文君. 基于人工智能算法的模拟电路板诊断工具研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] 曲博. 基于故障字典法的模拟电路故障诊断系统的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] 刘美容, 何恰刚, 等. 一种新的基于神经网络的模拟电路故障诊断系统 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25 (6): 53-56.
- [4] 刘颖, 张民, 等. 被动免疫算法在模拟电路故障诊断中的应用研究 [J]. 海军工程大学学报, 2007, 19 (5): 96-100.
- [5] 刘文业, 何恰刚, 等. 模糊免疫算法及其在模拟电路故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16: 1070-1073.

(上接第 3 页)

1) 多数据源叠加显示的虚拟场景快速构建技术:

采用结构化工艺设计方法, 将电缆布线工艺过程设计的工艺数据、物料数据、三维模型数据、操作过程动画数据、检验点图像数据等各类信息按类汇总, 按照相应标准和企业需求建立结构化装配工艺数据库。通过模型优化工具和二次开发转化 PTC/Creo 设计模型, 并进行面数优化、调整 UV 及材质动画, 参照实物构建虚拟场景, 并进一步地针对装配步骤、结构进行还原。在近距离操作位置充分发挥头戴式设备的优势, 辅助叠加显示内容, 将待安装模块影像、线缆及指令信息增强投射到卫星基座本身, 与环境空间相混合, 增加交互沉浸感。

2) 线缆铺设和装配仿真模拟技术:

利用视觉采集系统识别卫星装配现场的多元装配状态信息, 生成可视化内容的控制信号。根据零部件对象识别结果定位工艺操作序列, 调用结构化工艺信息模型中当前操作步骤的工艺引导文字信息内容、图纸信息、三维模型, 采用人工标识物和自然特征标定装配工作空间的方法进行三维注册, 渲染生成虚实融合的可视化线缆增强现实引导信息模型。在实体卫星和设备本身播放增强现实动画, 通过安装工具+零件+线路的混合仿真动画叠加方式, 将虚拟安装过程及安装后的状态与实体进行精准融合, 并伴随着 1:1 的装配动作实际操作, 实现线缆铺设和装配仿真模拟, 指导操作人员将卫星线缆装配到目标位置。

3) 线缆装配质量检验系统平台的构建:

采用手持式设备+大屏的交互形式, 设定触屏交互逻辑, 通过打印实体测试模型进行摄像机位姿参数标定, 基于计算机视觉技术, 对实时采集的装配现场图像进行预处理和检测特征处理, 将待检测的图形特征描述输入识别模块, 获得检测结果, 实现电连接器插拔完整性检测、设备安装方向检测、设备安装完整性检测等功能。

4 结束语

AR 技术已经广泛应用于大型复杂产品的研制过程, 在国内外大型科研生产类企业取得了显著的应用成效。面对卫星线缆设计和装配的应用需求, 还需要同步开展工程实践研究工作, 突破 AR 应用于线缆设计、铺设、检验等工作的关键技术, 为设计、工艺和操作人员提供虚拟操作和验

- [6] 孙永奎, 陈光, 李辉. 基于可测性分析和支持向量机的模拟电路故障诊断 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29: 1182-1186.
- [7] 罗志勇, 史忠科. 一种模拟电路的支持向量机故障诊断方法 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (15): 34-36.
- [8] 蔡金燕, 陈国通, 张宏伟. 故障诊断中的侧试节点优选方法 [J]. 军械工程学院学报, 2002 (3): 7-10.
- [9] 孙秀斌, 陈光禹, 谢永乐. 模拟集成电路的测试节点选择 [J]. 电子信息学报, 2004, 26 (4): 645-650.
- [10] 文莹, 肖明清, 等. 基于概念格的航空雷达故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (10): 2612-2614.

证的工作环境, 有效的优化线缆设计及装配, 提升卫星产品质量, 缩短研制周期, 节约研制成本。本文对 AR 技术在卫星线缆的设计、装配和检验中的应用需求进行了分析, 总结了 AR 技术应用于卫星线缆的关键技术, 对 AR 技术在卫星线缆领域的应用具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 林惊, 杨珂, 王涌天, 等. 移动增强现实系统的关键技术研究 [J]. 中国图象图形学报, 2009 (03): 560-564.
- [2] 沈克, 蒋建国, 彭太乐. 基于增强现实的人机物理交互仿真系统研究 [J]. 计算机仿真, 2008, 25 (4): 210-213.
- [3] Memi E. Boeing's working on augmented reality, which could change space training, ops [Z]. Boeing Frontiers, Oct. 2006, 5 (6): 21.
- [4] 王峻峰, 徐迟, 李世其. 增强现实环境下的产品装配引导技术. 图学学报, 2012, 33 (4): 114-120.
- [5] 喻晓宇, 张凤军, 戴国忠. 实物界面下的虚拟装配 [J]. 中国图像图形学报, 2010, 15 (8): 1151-1157.
- [6] 刘检华, 万毕乐, 宁汝新. 虚拟环境下基于离散控制点的线缆装配规划技术 [J]. 机械工程学报, 2006, 42 (8): 125-130.
- [7] 高纪开达, 刘检华, 宁汝新, 等. 虚拟环境下线缆建模及装配规划技术的研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (4): 933-935.
- [8] 万毕乐, 宁汝新, 刘检华, 等. 虚拟环境下的线缆装配建模技术研究 [J]. 系统仿真学报. 2006, 18 (s1): 267-271.
- [9] 魏发远. 基于虚拟样机和粒子系统仿真技术的虚拟布线方法 [J]. 工程设计学报, 2005. 12 (4): 208-212.
- [10] 万毕乐. 虚拟环境下的线缆装配建模技术研究 [A]. 第六届全国虚拟现实与可视化学术会议 [C]. 2006.
- [11] Wang X, Dunston P S. Potential of Augmented Reality as an Assistant Viewer for Computer-Aided Drawing [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, 20 (6): 437-441.
- [12] Webel S, Bockholt U, Engelke T, et al. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2013, 61 (4): 398-403.
- [13] 韩勇, 王洁, 赵杰, 等. 国外虚拟装配技术研究综述 [J]. 飞航导弹, 2012 (11): 86-91.
- [14] Schwald B, Laval B D, Sa T O, et al. An Augmented Reality System for Training and Assistance to Maintenance in the Industrial Context [A]. International Conference in Central Europe on Computer Graphics [C]. 2013: 425-432.