

· 总体工程 ·

中图分类号:TN97

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2014)12-0021-05

# 机扫雷达智能 BIT 系统设计

张志虎,余酣冬,黄 强

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘要:**首先,给出了机扫雷达智能机内自检(BIT)系统顶层架构,介绍了系统组成和功能,引入了人工智能领域中逻辑程序作为 BIT 知识表示和推理的理论;然后,结合机扫雷达故障诊断例子,论述了知识表示方法和推理机制;最后,描述了系统工作过程,成功实现了基于逻辑程序的智能 BIT 原型系统。借助逻辑程序,系统可充分利用雷达专家丰富的经验,使 BIT 系统本身达到专家的水平,具备高可靠性和自动化能力。

**关键词:**智能 BIT;机扫雷达;逻辑程序;知识表示;推理

## Design of Intelligent BIT System for Mechanic Scan Radar

ZHANG Zhihu, YU Handong, HUANG Qiang

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** The top level architecture of the built-in test (BIT) system is first given, the elements and the function of the BIT system are then presented, the logic program in the field of artificial intelligence is introduced as the theory for BIT knowledge representation and reasoning. And then, the knowledge representation method and reasoning schema are illustrated in details by using fault diagnosis examples of mechanic scan radar. Finally, the system workflow and the realization of the BIT system are described. With the help of logic programs, the intelligent BIT system can take full advantage of radar experts' rich experience, which makes the system itself achieve expert level and possess high reliability and automation capabilities.

**Key words:** intelligent BIT; mechanic scan radar; logic program; knowledge representation; reasoning

## 0 引 言

随着雷达系统越来越复杂,性能越来越高,对雷达可靠性、可测试性和可维护性的要求也越来越高。在保证雷达可靠性,提高雷达装备的可测试性和可维护性,提高测试维修效率,降低测试维修费用等方面,雷达机内自检(简称雷达 BIT)技术无疑是一种重要的途径。

常规 BIT 在提高武器装备测试性和维修性,提高测试维修效率,降低测试维修成本方面起到了极大的作用<sup>[1]</sup>,但常规 BIT 同时存在一些不足,例如功能相对简单、故障诊断能力差、状态检测能力有限、虚警率高<sup>[2-3]</sup>。智能 BIT 的出现,为弥补常规 BIT 的不足提供了新的思路。国外大型航空公司和军工生产企业都在大力支持智能 BIT 技术的研究,并将最先进的研究成果应用于各种飞机、雷达等装备<sup>[2]</sup>。国内智能 BIT 技术的研究起步较晚,基础理论和方法相对薄弱。

智能 BIT 就是将包括专家系统、神经网络、模糊理论、信息融合等智能理论应用到常规 BIT 的设计、检测、诊断、决策等方面,提高 BIT 综合效能,从而降低设备全生命周期费用的理论、技术和方法。本文以机械扫描雷达为例,借助人工智能理论和工具——逻辑程序,设计一种机扫雷达智能 BIT 系统,使得雷达 BIT 系

统能够进行智能化诊断和决策。

## 1 系统设计

基于常规的机械扫描雷达设备,构建如图 1 所示的智能 BIT 系统。系统主要包含罩内设备和舱内设备、状态监测模块、事实产生器、推理机、解释器、知识库、知识库管理模块、控制模块以及人机交互接口。

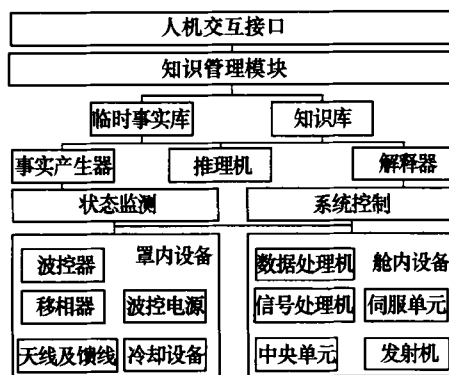


图1 机扫雷达智能 BIT 系统架构图

### 1.1 罩内设备和舱内设备

罩内设备包括裂缝天线、馈线、波控器、驱动器、罩内冷却设备等分系统,舱内设备包括发射机、中央单元、信号处理机、数据处理机等分系统。罩内设备和舱内设备实时或定时向状态监测模块上报各个设备BIT状态。

通信作者:张志虎

Email: zhihuzhang@yeah.net

收稿日期:2014-07-15

修订日期:2014-09-17

## 1.2 系统控制模块

系统控制模块根据推理机产生的指令或者人为指令对罩内设备和舱内设备进行控制。事实上,控制模块是结合专家知识和当前 BIT 状态控制各设备正常工作、停止工作、性能降级工作或者自动转入另外一种工作方式。控制模块也可直接接受人机交互接口输入的控制指令对设备进行操控。

## 1.3 状态监测模块

状态监测模块是故障诊断的前提和基础。通过监测罩内设备和舱内设备状态信号,收集和分析各个设备的数据,判断其运行状态是否正常和故障,从而产生 BIT 信息发送给事实产生器模块。

## 1.4 事实产生器

事实产生器以某种知识表示方法将状态监测模块收集的 BIT 信息表示为事实知识,作为推理机开展推理的依据。事实产生器实际上是一个知识获取模块。

## 1.5 临时事实库

临时事实库存放的是当前工作状态下动态的事实。动态事实可由事实产生器动态产生,也可由用户根据实际的工作模式、工作状态以及当前作战任务等实际情况临时添加。临时事实库为用户干预智能推理提供了接口。

## 1.6 推理机

推理机是实现推理的程序,按照某种的控制策略,根据目前的事实和知识库中先验专家知识进行推理。推理产生的结果辅助用户进行决策或者直接用于对罩内设备和舱内设备进行操控。专家对故障的诊断和处理思想通过推理机实现。推理机是智能 BIT 系统的核心模块。

## 1.7 解释器

解释器是将形式化的知识转化为计算机或者用户能够理解的结果。例如,解释器将推理机推理产生的知识转化为控制模块可以接收的控制指令,或者将推理结果解释为用户可以理解的操作步骤以便用户进行后续的操作。

## 1.8 知识库

知识库是以某种知识表示形式存放专家先验知识的集合。类似数据库,数据库是存放数据的集合,知识库是存放知识的集合。知识库越丰富,推理机可利用的知识就越多,越能够对设备的故障进行诊断和处理,智能 BIT 系统就越智能。知识库又可以细化分为规则库和事实库。在建立知识库时,专家要确保知识库的存放的知识的正确性和知识之间不存在矛盾。

## 1.9 知识管理

知识管理模块是专家对知识库进行管理的工具。用于往知识库中增加知识、删除知识以及更新知识的模块。

## 1.10 人机交互接口

人机交互接口是用户和专家与内部模块交互界面。一方面,专家通过人机交互接口对知识库进行管理,用户通过人机交互接口对设备进行操控;另一方面,解释器通过人机交互接口向用户展示雷达 BIT 故障诊断结果以及操作建议。

## 2 雷达 BIT 知识表示和推理

BIT 知识表示和推理是智能 BIT 系统的核心。本节重点阐述系统所采用的知识表示方法及推理机制。

### 2.1 知识表示

知识表示方法是构建知识库的基础,表示方法选取是否合理不仅关系到知识库的有效存储,并且直接影响推理机的推理效率。

已经提出了多种知识表示方法,如基于产生式规则的表示、框架表示、逻辑表示、语义网络表示等方法。本文基于人工智能领域非常成熟的知识表示方法——逻辑程序。逻辑程序早在 20 世纪 60 年代末及 70 年代初就已经开始了研究,目前已被应用于规划、计算机辅助验证系统、安全分析、产品配置及诊断等领域。值得一提的是,美国顾问项目(USA Advisor Project)采用的知识表示方法就是逻辑程序。该项目旨在构建美国航天飞机飞行控制员决策支持系统。

本文设计的智能 BIT 系统采用的是逻辑程序中文献[4-5]中描述的逻辑程序。逻辑程序具备较强的表达能力和较高的执行效率,被视为知识表示和自动推理中最有价值的工具之一<sup>[6]</sup>。一个逻辑程序是由一些规则和事实组成。逻辑程序中基本规则的语法形式如下

$$a \leftarrow b_1, b_2, \dots, b_m \quad (1)$$

式中:左边部分为规则头;右边部分为规则体;中间的  $\leftarrow$  符号代表推出含义。规则头中  $b_1, b_2, \dots, b_m$  代表的含义是  $b_1$  和  $b_2$  以及  $b_m$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_m$  和  $a$  均是形式化的符号,是规则的基本元素,在具体的应用中指代不同的含义。式(1)中规则代表的直观意义是如果条件  $b_1$  和  $b_2$  以及  $b_m$  均成立,则可以推理得到结论  $a$  成立。举一个简单的例子,如果我们想表达“鸟会飞”这样一条知识,用式(1)中的规则表示如下

$$\text{fly} \leftarrow \text{brid} \quad (2)$$

式中:brid 代表“鸟”;fly 代表“会飞”。整条规则的含义是如果是鸟则可推理得到结论会飞。

逻辑程序中事实的语法形式为

$$a. \quad (3)$$

事实实际是一种特殊的规则。当一条规则的规则体为空时,该规则即为事实。也就是说不需要任何前提条件,便可得到结论,该结论即为直观意义上的客观事实。

逻辑程序中另外一种特殊的规则为完整约束为

$\leftarrow b_1, b_2, \cdots, b_m \tag{4}$

完整约束中规则头为空。所代表的含义是,一旦前提条件成立,将推理不出任何结论。完整约束常在逻辑程序中作为约束准则。

系统中知识库中的知识就是由上述基本规则、事实及完整约束表示。临时事实库中的知识仅由事实表示。在用规则来表示系统 BIT 知识时,首先需要明确规则中基本元素,然后根据专家的经验构建规则。以发射机故障诊断知识为例,首先明确发射机故障知识符号表,如表 1 所示。

表 1 发射机故障知识符号表

符号	含义
Vacuum_Err	真空度异常
Front_Err	前级故障
Modem_Err	调制器故障
OverPres_Err	过压
LessPres_Err	欠压
OverFlow_Err	过流
Fire_Err	打火故障
Wave_Err	驻波故障
Back_Err	末级故障
Cold_Err	冷却异常
Tx_Err	发射机故障

其次,根据专家经验构建发射机故障诊断规则。专家知识是:如果雷达设备出现真空度异常、前级故障、调制器故障、过压、欠压、过流、打火故障、末级故障及冷却异常中某一种或者多种异常现象,则代表发射机出现故障。对应于该专家知识,构建以下 10 条规则:

- r1:Tx\_Err←Vacuum\_Err
- r2:Tx\_Err←Front\_Err
- r3:Tx\_Err←Modem\_Err
- r4:Tx\_Err←Over Press\_Err
- r5:Tx\_Err←Less Press\_Err
- r6:Tx\_Err←Over Flow\_Err
- r7:Tx\_Err←Fire\_Err
- r8:Tx\_Err←Wave\_Err
- r9:Tx\_Err←Back\_Err
- r10:Tx\_Err←Cold\_Err

发射机分系统需要严格的控制和保护机制,一旦检测到异常应立刻停止发射任务。为了表示该知识,可在发射机故障诊断规则集上添加以下符号表和第 11 条规则,以便对发射机分系统进行保护。

表 2 发射机保护符号表

符号	含义
Stop_Work	停止工作

r11:Stop\_Work←Tx\_Err

下面以另外一条辅助决策知识为例描述决策知识  
的知识表示过程。机扫雷达在下视模式中,如果和通道和保护通道被检测出故障,可以通过控制逻辑,将故障通道的输入信号,切换到差通道,能够完成系统性能降级的任务<sup>[7]</sup>。

根据决策知识首先创建符号表,如表 3 所示。

表 3 决策知识示例符号表

符号	含义
AirDown_Work	下视工作模式
SigmaChan_Err	和通道故障
GuardChan_Err	保护通道故障
SwitchDelta_Oper	切换到差通道

然后形成以下规则:

SwitchDelta\_Oper ← AirDown\_Work, SigmaChan\_Err, GuardChan\_Err

2.2 推理过程

推理机进行推理的过程:首先,根据事实产生器产生的动态事实,结合知识库中的已存在的事实,匹配知识库中的规则体,若匹配成功,则触发此条规则产生结论;其次,结论作为新的事实加入,事实不断地去迭代匹配规则体,直至不再产生新的结论,达到一个稳定的状态;最后,该状态下所有的事实作为推理机在此次推理过程中的输出。

以上一节中发射机故障诊断和保护为例,当状态监测模块监测到发射机调制器故障时,事实产生器产生以下事实并存入临时事实库:

Modem\_Err

结合临时事实库中的知识和知识库中存有的知识,当前推理机具备的知识如下:

- r1:Tx\_Err←Vacuum\_Err
- r2:Tx\_Err←Front\_Err
- r3:Tx\_Err←Modem\_Err
- r4:Tx\_Err←OverPress\_Err
- r5:Tx\_Err←LessPress\_Err
- r6:Tx\_Err←OverFlow\_Err
- r7:Tx\_Err←Fire\_Err
- r8:Tx\_Err←Wave\_Err
- r9:Tx\_Err←Back\_Err
- r10:Tx\_Err←Cold\_Err
- r11:Stop\_Work←Tx\_Err
- f1:Modem\_Err

临时事实库中的事实可以匹配知识库中的规则 3,触发规则 3 产生结论 Tx\_Err,即发射机故障。结论 Tx\_Err 作为新的事实加入推理。此时推理机具备的知识如下:

r1:Tx\_Err←Vacuum\_Err

r2:Tx\_Err←Front\_Err  
r3:Tx\_Err←Modem\_Err  
r4:Tx\_Err←OverPress\_Err  
r5:Tx\_Err←LessPress\_Err  
r6:Tx\_Err←OverFlow\_Err  
r7:Tx\_Err←Fire\_Err  
r8:Tx\_Err←Wave\_Err  
r9:Tx\_Err←Back\_Err  
r10:Tx\_Err←Cold\_Err  
r11:Stop\_Work←Tx\_Err  
f1:Modem\_Err  
f2:Tx\_Err

新事实 Tx\_Err 匹配规则 11 成功,触发规则 11 产生结论 Stop\_Work,即发射机停止工作。该结论同样作为新的事实加入推理过程。然而新的事实不再匹配规则,推理过程达到一个稳定状态,此时输出故障结论--发射机故障和控制决策--发射机停止工作。解释器进而向用户提示发射机故障,同时控制模块根据控制决策实时停止发射机工作以保护发射机避免发射机因为大功率输出而烧坏。

3 系统实现

基于逻辑程序的知识表示和推理,可快速构建智能 BIT 系统。本节主要描述系统流程和原型系统实现。

3.1 系统流程

专家进入系统后可通过人机交互接口向知识库添加故障诊断知识,同时也可以删除认为不正确的知识。雷达领域专家在添加知识时一定要确保新添加的知识和知识库中原有的知识不冲突,以确保推理机能够正常开展推理分析工作。

雷达各分系统正常加电启动后,状态监测模块实时监测各分系统的运行状态和故障信息,一旦收到故障信息,将此信息发送给事实产生器模块。事实产生器模块根据文中上节描述的知识表示方法,将故障信息进行形式化的表达,转化为逻辑程序中的事实存入临时事实库,同时触发推理机开展工作。推理机结合临时事实库中的知识和知识库中的规则,根据推理机制开展匹配和迭代,将推理结论发送给解释器模块。解释器将形式化的推理结果转化为故障信息或者控制指令。故障信息或者控制指令均发送给人机交互接口。通过人机交互接口,用户可观察到目前故障信息和故障产生的原因或者获得对故障该采取相关措施的建议。若解释器送出的是控制指令,则直接发送给系统控制模块,对各分系统进行实时控制。图 2 给出了关键流程。

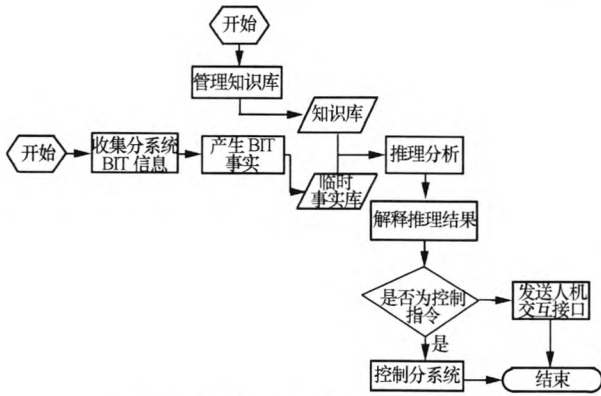


图 2 系统故障诊断和决策流程图

3.2 系统实现

具体实现过程中采用了 Windows 操作系统,开发工具使用 Visual C++ 6.0。运用面向对象技术,通过对成熟逻辑程序推理机——DLV<sup>[6]</sup>的封装,在 VC++ 支持的 MFC 对话框开发模式下,实现了智能 BIT 原型系统。

通过知识符号管理界面添加发射机故障符号表,如图 3 所示。



图 3 知识符号管理界面

通过知识管理界面将规则保存至系统知识库,如图 4 所示。



图 4 知识库规则管理界面

状态监测模块监测到发射机调制器故障,将该故障转化为一条知识存入临时事实库中。系统最终运行结果,如图 5 所示。

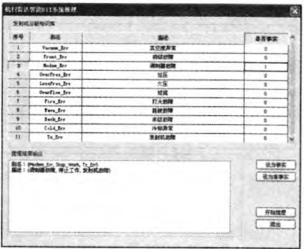


图 5 推理结果显示界面

用户可查看诊断结果,了解系统 BIT 状态,也可根据诊断结果采取相应的操作。系统也可以根据推理结果对设备进行自动控制。

#### 4 结束语

文中给出了一个机扫雷达智能 BIT 系统体系架构、BIT 知识表示方法及推理机制,实现了对机扫雷达罩内设别和舱内设备故障的智能诊断和决策。

机扫雷达智能 BIT 系统利用智能技术——逻辑程序进行 BIT 知识的表示和推理。逻辑程序是一种描述性语言,简单、直观,方便雷达专家将领域知识形式化的表达,易于快速建立 BIT 知识库模型,同时利用成熟的推理机,能够高效、充分利用知识库中的知识对故障进行推理。文中虽然以较为简单的系统级 BIT 例子为例描述了如何开展智能化的故障诊断和决策,但针对更复杂的雷达 BIT 故障信息处理过程是完全一样。关键在于雷达专家按照逻辑程序的知识表达方式将知识形式化为规则存入知识库中。雷达专家的知识越丰富,智能 BIT 系统对故障的诊断和辅助决策的能力就越强大。

文中给出的智能 BIT 设计方案并不局限于构建机扫雷达的智能 BIT 系统,同样适用其他类型雷达 BIT 系统设计。

#### 参考文献

- [1] 温熙森,徐永成,易晓山,等. 智能机内测试理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.  
Wen Xisen, Xu Yongchen, Yi Xiaoshan, et al. Intelligent

(上接第 20 页)

综合以上比较结果,得出结论:两方位-俯仰的定位方式在双舰无源定位中是最优的,它具有定位精度最高,节省系统资源,几乎不受站址误差影响等优点。

#### 4 结束语

舰载动平台无源定位系统的定位精度受到多种因素的影响,包括方位误差、俯仰误差、站址误差以及测时误差;双站定位又面临参数选择的问题。本文定量地分析了定位精度与各误差之间的关系,发现定位误差与各误差之间近似成线性关系,并通过对比给出了双舰无源定位的最佳测量子集,有一定的现实意义。

#### 参考文献

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社,2004.  
Hu Laizhao. Passive location[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [2] 邢翠柳,陈建民. 多站无源时差定位精度分析[J]. 无线电工程, 2012,42(2): 32-34,48.  
Xing Cuiliu, Chen Jianmin. Analysis on positioning accuracy

built-in test theory and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

- [2] 黄运来,梁玉英,张芳. 智能 BIT 故障诊断技术与实现[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(2): 174-176.  
Huang Yunlai, Liang Yuying, Zhang Fang. The research and realization on technology of intelligent built-in test fault diagnosis[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(2): 174-176.
- [3] 徐永成,温熙森,刘冠军,等. 智能 BIT 概念与内涵探讨[J]. 计算机工程与应用, 2001(14): 29-32.  
Xu Yongcheng, Wen Xisen, Liu Guanjuan, et al. Research on the conception and connotation of intelligent built-in test[J]. Computer Engineering and Applications, 2001(14): 29-32.
- [4] Gelfond M, Lifschitz V. Classical negation in logic programs and disjunctive databases[J]. New Generation Computing, 1991(9): 365-386.
- [5] Przymusiński T C. Stable semantics for disjunctive programs[J]. New Generation Computing, 1991(9): 401-424.
- [6] Leone N, Pfeifer G, Faber W, et al. The DLV system for knowledge representation and reasoning[J]. ACM Transactions on Computational Logic, 2006, 7(3): 499-562.
- [7] 徐钧. 机扫雷达 BIT 系统解决方案[J]. 现代雷达, 2006, 28(7): 30-32.  
Xu Jun. BIT system design items on the mechanic scan radar[J]. Modern Radar, 2006, 28(7): 30-32.

张志虎 男,1986 年生,工程师。研究方向为雷达数据处理。

余酣冬 男,1967 年生,高级工程师。研究方向为雷达数据处理。

黄强 男,1977 年生,高级工程师。研究方向为雷达数据处理。

cy of TDOA passive location by multi-station[J]. Radio Engineering, 2012,42(2): 32-34,48.

- [3] 宋春林,徐振来. 动平台多站时差定位的数据处理[J]. 现代雷达, 2008, 30(3): 53-57.  
Song Chunlin, Xu Zhenlai. Data processing for TDOA of moving station[J]. Modern Radar, 2008, 30(3): 53-57.
- [4] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.  
Sun Zhongkang, Zhou Yiyu, He Lixing. Active and passive location techniques with single or multiple observers[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [5] 赵庆媛,沈小马. 无源雷达交叉测向定位布站分析[C]//第十二届全国雷达学术年会论文集. 武汉:中国电子学会无线电定位技术分会,2012: 151-154.  
Zhao Qingai, Shen Xiaoma. Site analysis of passive radar DF location[C]// 12th Radar Academic Annual Symposium. Wuhan: Branch of Radio Location of China Electronic Committee, 2012: 151-154.

谢洲烨 男,1990 年生,硕士研究生。研究方向为雷达协同探测。

沈伟 男,1983 年生,博士。研究方向为雷达协同探测。