

基于模糊准则的雷达健康评估方法研究

邵威¹, 许厚棣², 金贤龙²

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;
2. 空装驻合肥地区第一军事代表室, 安徽合肥 230088)

摘要: 雷达是一种极为复杂的军用综合电子设备, 其健康状态直接关系到作战能力的可持续性, 对雷达健康状态进行准确的评估, 有利于真正实现雷达装备基于状态的维修保障模式。本文提出了一种基于模糊规则的雷达健康评估方法, 将无法用精确数据表示的专家经验模糊化, 变为雷达健康状态模糊知识库, 经过模糊推理后, 具有雷达健康状态智能评估的能力。文章给出了模糊控制器的结构, 介绍了模糊推理的全过程, 详细描述了雷达健康评估的模糊准则设计方法。最后, 通过实际数据验证, 该模糊准则评估方法可有效反映雷达的健康状态。

关键词: 雷达系统; 健康管理; 模糊规则; 状态评估

中图分类号: TN95; TN956 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)02-0152-04

Research on Fuzzy Rules Based Health Assessment Method of Radar

SHAO Wei¹, XU Houdi², JIN Xianlong²

(1. The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China; 2. The First Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Hefei, Hefei 230088, China)

Abstract: Radar is a very complex military integrated electronic equipment. Its health status is directly related to the sustainability of combat capability. Accurate assessment of radar health status is conducive to the realization of condition based maintenance support mode of radar equipment. The paper puts forward a new method for fuzzy rules based health state assessment of radar. By fuzzing the expert experience which can't express with accurate data, a health state base of fuzzy knowledge for radar is set up. After fuzzy reasoning, the system has an intelligent ability for state assessment of radar. The structure of fuzzy controller is given, the whole process of fuzzy reasoning is introduced, and the design method of fuzzy criteria for radar health assessment is described in detail. At last, the model is validated by actually measured data and can reflect radar's health state.

Key words: radar system; health management; fuzzy rules; state assessment

0 引言

雷达是一种极为复杂的军用综合电子设备, 其主要作用就是探测各种飞行器, 在现代战争中越来越受到关注, 其作战能力的可持续性成为装备优劣的重要标志^[1]。早期的雷达大多采用各个现场可更换单元(LRU)送出的机内自测(BIT)信号进行故障后的反应式维修^[2], 这种故障检测方法只针对上报故障的单元进行维修, 经常会出现维修不彻底的现象, 造成设备长期处于维修状态, 不仅增加了雷达的维护成本, 也降低了雷达的战斗

力的可持续性^[3]。

在这样的背景下, 我们开展了新一代雷达的健康管理技术的研究, 利用数据采集系统, 借助各种智能推理算法来评估系统自身的健康状态^[4]。健康管理是对传统 BIT 能力的进一步拓展, 这种发展的主要技术要素是从状态监控向健康评估的转变, 这种转变引入了智能推理能力, 借助这种能力, 识别和管理故障的发生、规划维修和供应保障, 对装备未来的健康状态进行评价, 是一种全面的状态实时管理技术, 这种技术不是为了直接消除故障, 而是为了了解装备的战备状态, 从而实现自助式保障, 降低使用和保障费用的目标^[5]。

本文提出了一种基于模糊准则的雷达健康状态评估方法,将无法用精确数据表示的专家经验模糊化,变为雷达健康状态模糊知识库^[6],经过模糊推理后,具有智能雷达状态评估的能力。

1 系统结构

目前,国际上通用的健康管理体系统架构是视情维修的开放体系结构(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM),该体系综合了不同领域 PHM 系统共同的设计思想以及应用技术和方法,并在包括美国海军舰船系统、飞机、民用车辆以及其他工业领域在内的诸多系统中得到初步应用验证,成为业内广泛遵守的系统框架^[7]。

雷达是一个复杂的电子系统,它包括天线分系统、发射分系统、接收分系统、信号处理分系统等,每个分系统由若干设备组成,健康管理系统通过分布式采集,对每个分系统的健康管理状态进行数据处理后,进行状态监测、健康评估后提出保障决策建议,若单个分系统的 LRU 较多时,可以有效利用同类 LRU 的健康状态冗余信息,可有效降低分系统故障诊断的难度。

在整个雷达健康管理系统框架中,状态监测、健康评估是核心部分,尤其是健康评估,直接关系到雷达装备是否能够持续作战的决策结果。相对于状态监测,常规都采用基于“阈值计算”或者“故障树”的判断方法,而健康评估,更类似于一种推理过程,需要借助一些智能算法来完成^[8-9]。在实际雷达使用过程中,广泛采用的是利用专家经验,对各参数进行人工分析后,进行一定程度上健康状态评估,但是这种方法,效率太低,而且使用限制很大。为此,选择了利用模糊准则来实现模拟专家经验进行推理,实现雷达健康状态评估。

2 算法实现

2.1 模糊控制器的结构

所谓模糊推理方法^[10],就是对雷达工作时的过程参数,例如环境参数、雷达各部件实时工作参数(如雷达发射功率、雷达接收噪声电平)、雷达电源参数等数据进行采集后,送入模糊控制器中,将无法用精确数据表示的专家经验模糊化,变为雷达健康状态模糊知识库,经过模糊推理后,具有智能雷达故障预测的能力。模糊控制器结构如图 1 所示。

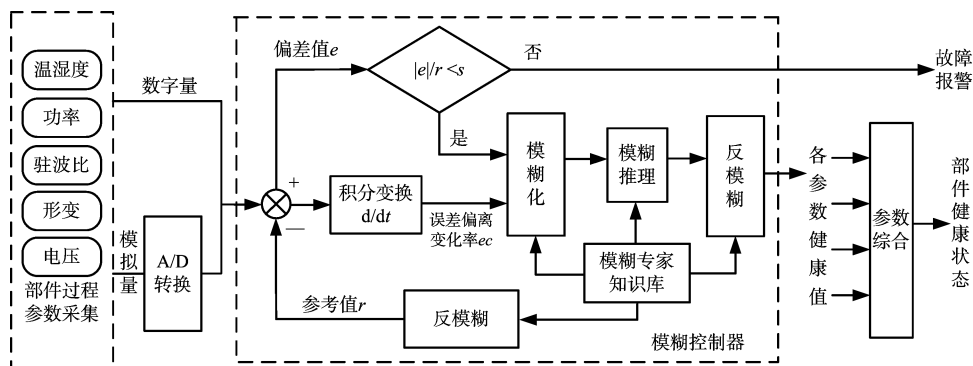


图 1 模糊控制器结构图

2.2 模糊推理过程

根据模糊控制器结构框图,雷达在进行模糊推理是按照以下步骤进行:

1) 采集雷达部件的多个过程参数,并将所述过程参数统一转换为数字量;

2) 将数字量形式的过程参数送入模糊控制器,由模糊控制器将每个过程参数与对应的参考值 r 进行比较,计算每个过程参数相对参考值的

偏差值 e 和参数偏差的变化率 e/c ;

3) 每个过程参数的参考值 r 存储于模糊知识库中,通过反模糊处理后与控制器输入的过程参数相比较;

4) 计算每个过程参数的偏差值 e 的绝对值和参考值 r 的比值 $|e|/r$,将它与预设阈值 s 进行比较,如果大于预设阈值,则认为发生了突发性故障,则直接对该参数所属的零部件或者整件进行故障报警;

5) 当 $|e|/r$ 小于预设阈值 s 时, 则利用模糊专家知识库中的模糊隶属度准则对偏差值 e 和变化率 e/c 进行模糊化处理和模糊推理, 得到该过程参数的模糊健康值, 然后再对其进行反模糊处理, 得到该过程参数的健康状态精确值;

6) 重复上述步骤, 计算出每个过程参数的健康状态精确值后, 对它们进行加权处理, 得到雷达部件的最终健康状态。

2.3 模糊准则设计

模糊推理控制器的输入语言变量采用过程参数的偏差值 e 和变化率 e/c , 将偏差值 e 进行时间上的积分变换得到误差变化速度 e/c , 对其进行模糊化。因为雷达的参数值各种各样, 各种数值的大小也不同, 所以采用相对值进行模糊量化。将 e 和 ec 转换成 e_r 和 ec_r 后再进行量化, 即

$$e_r = e/r \quad (1)$$

$$ec_r = d(e/r)/dt \quad (2)$$

e_r 和 ec_r 使用同一个语言值的模糊子集: $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 即负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。输入变量的各子集采用高斯函数定义, 呈正态分布。取 e_r 和 ec_r 的量化等级为 11 级, 即 $e_r, ec_r = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, e_r 的基本论域为 $[-0.5, 0.5]$, ec_r 的基本论域为 $[-20, 20]$ 。将输入变量在论域上的值映射到 11 个量化等级上, 再通过隶属度函数可以得到输入变量在各个模糊子集变量上的隶属度赋值。输入变量的模糊化隶属度函数采用高斯函数定义, 曲线图如图 2 所示。

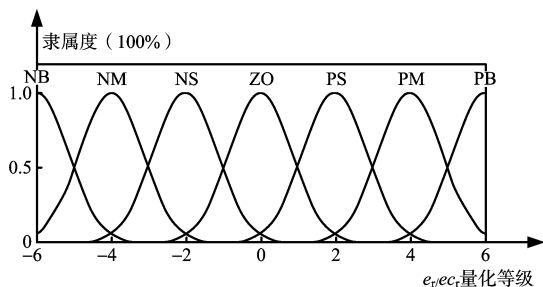


图 2 输入变量 e_r 和 ec_r 隶属度曲线

模糊控制器是一个二输入一输出的模糊控制器, 采用雷达每个部件当前的健康度 H 作为模糊推理器的输出。其语言值的模糊子集为: 很差, 较差, 不及格, 及格, 较好, 很好, 即 $\{VB, LB, NP, PS, LG, VG\}$, 各子集采用三角函数定义。取 H 的

化等级为 11 级, 即 $H = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, H 的基本论域为 $[0, 100]$ 。输出变量 H 隶属度函数如图 3 所示。

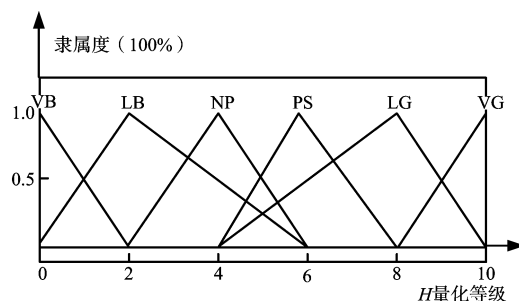


图 3 输出变量 H 隶属度曲线

在确定了隶属度函数和论域后, 在根据专家经验数据和实际工程数据, 建立合适的模糊规则表, 如表 1 所示, 描述了多组根据当前的误差和误差变化速度作出雷达部件当前健康度 H 推理的准则。

表 1 健康度 H 模糊规则表

ec_r	e_r						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	VB	LB	NP	PS	PS	NP	LB
NM	VB	NP	PS	LG	NP	NP	LB
NS	LB	NP	PS	VG	LG	PS	NP
ZO	NP	PS	LG	VG	LG	PS	NP
PS	NP	PS	LG	VG	PS	NP	LB
PM	LB	NP	PS	LG	PS	NP	VB
PB	LB	NP	PS	PS	NP	LB	VB

在确定了当前输入 e_r 和 ec_r 所对应的模糊子集的隶属度后, 形成了一个 e_r 和 ec_r 的隶属度矩阵, 根据模糊规则进行矩阵运算, 可以得到雷达每一个部件的健康状态的模糊子集, 这是一个模糊量。该模糊量是一个由多个语言变量组成的一个模糊集合, 不能直接用于对雷达部件的状态进行精确的预测, 必须要经过解模糊运算, 将模糊值转换为精确值, 才能发挥出对雷达部件各个参数的状态精准预测和判断的效果。

解模糊就是以输出变量 H 的隶属度函数为基础, 采用“最小-最大-重心法”的方法, 从该隶属度函数中找出一个最能代表这个模糊集合作用的精确量的过程, 这个点就是每个模糊子集的曲线与横坐标轴所围成的重心, 其计算方法如下:

$$u = \frac{\int_x x \mu_N(x) dx}{\int_x \mu_N(x) dx} \quad (3)$$

在大多数情况下,只能用数值积分方法来计算,具体如下:

$$u = \frac{\sum x_i \mu_N(x_i)}{\sum \mu_N(x_i)} \quad (4)$$

例如,在经过模糊推理后,得出当前输出的健康度模糊值,VB的隶属度为0,LB的隶属度为0,NP的隶属度为0,PS的隶属度为0.3,LG的隶属度为0.8,VG的隶属度为0.2,可以根据式(4),结合图3计算出PS,LG,VG 3个子集的重心值,可得到

$$u_{PS} = \frac{6 \times 1}{1} = 6 \quad (5)$$

$$u_{LG} = \frac{5 \times 0.25 + 6 \times 0.5 + 7 \times 0.75 + 8 \times 1 + 9 \times 0.5}{0.25 + 0.5 + 0.75 + 1 + 0.5} = 7.33 \quad (6)$$

$$u = \frac{10 \times 1}{1} = 10 \quad (7)$$

再根据模糊推理的结果,得出当前健康度量等级为

$$\frac{0.3 \times 6 + 0.8 \times 7.33 + 0.2 \times 10}{0.3 + 0.8 + 0.2} \approx 7.4 \quad (8)$$

再将该值放入健康度H的基本论域中,可以得到当前的健康度为74。

3 结果分析

根据上述分析方法,选择雷达数字收发组件进行健康评估计算,实际应用中,在雷达后端服务器中建立模糊控制器,对数字收发组件的温湿度、发射功率参数、接收噪声电平、电流、电压等一个月记录的参数进行模糊推理,如图4所示。

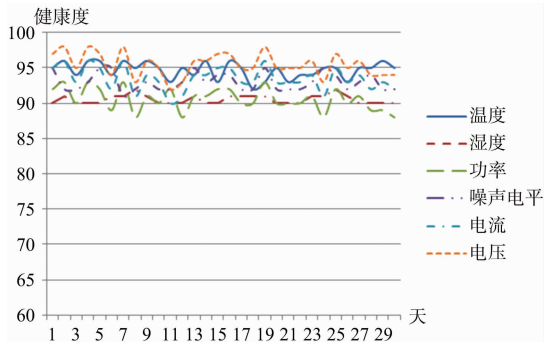


图4 组件各参数健康度

由于数字收发组件对不同参数的敏感性不同,需要采用不同的加权对各个参数的健康值进行加权综合处理,得出最终健康状态。加权值也

从专家经验知识库中获取,表2为不同参数在数字收发组件健康评估中的加权值。

表2 参数加权值

参数	权重比	参数	权重比
温度	0.1	噪声电平	0.3
湿度	0.05	电流	0.15
功率	0.3	电压	0.1

根据表2的加权,可以得到组件整体的健康度评估结果,如图5所示。

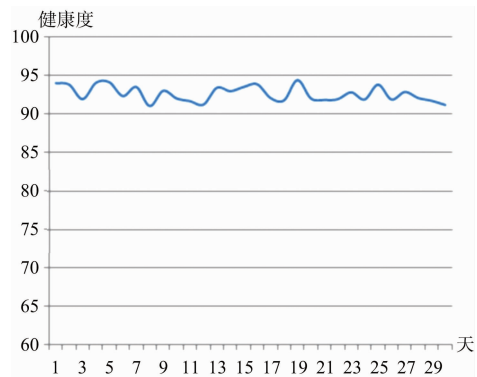


图5 模块健康度评估结果

由图5可以看出,当健康管理系统加入模糊控制器后,由于模糊控制器能够根据系统偏差e和偏差变化率ec的不同,而对雷达模块的状态参数进行在线评估,所以得到的模块整体的健康度曲线也比较好,在出现个别参数瞬时误差较大时,模糊控制器也表现出较好的鲁棒性,对被评估对象特性的变化有很快的适应性,可以反映出模块实际的健康状态,该组件为新加工组件,其健康度在90以上。

4 结束语

健康状态管理技术是保障雷达作战性能、提高测试性效率、降低寿命周期内维护成本的关键之一。本文针对雷达各组件给出了一种通用化的、基于模糊规则的健康状态评估方法,将专家经验模糊化,通过模糊控制器对组件状态进行在线的健康评估,通过实际数据验证,该方法结合了专家经验和模糊控制两者的优点,可准确评估组件状态。随着人工智能、大数据等技术的发展,后续可开展更多有效的健康管理及故障预测相关技术研究,进而推进整体军用电子领域维修保障技术的进步。