

# 故障诊断系统的综合收益评价模型

严建峰<sup>1,2</sup> 李伟华<sup>1</sup>

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)<sup>1</sup> (苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)<sup>2</sup>

**摘要** 基于不同智能技术开发的故障诊断系统在不同的应用环境中表现迥异,如何根据应用评估并选择合适的算法是故障诊断系统设计的关键问题。提出了故障诊断系统中正负收益和综合收益的概念,分析了影响故障诊断系统实施效用的主要因素,设计了综合收益评价模型。该模型在汽车发动机、航空发动机两种典型设备的故障诊断系统设计过程中的应用结果显示综合收益评价模型有较高的评估选择能力。

**关键词** 故障诊断系统,效用评价,综合收益

**中图法分类号** TP306 **文献标识码** A

## Overall Benefit Evaluation Model for Fault Diagnosis System

YAN Jian-feng<sup>1,2</sup> LI Wei-hua<sup>1</sup>

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Performance of fault diagnosis system (FDS) based on different intelligent technology varies a lot in difference environment. How to evaluate and choose a suitable algorithm is key issues in FDS design. This paper put forward a theory of positive, negative and overall benefit in FDS, analyzed the main factors affecting the implementation effectiveness of FDS and designed an overall evaluation model. Applied in FDS design for car engines and aero-engine, the model shows high performance.

**Keywords** Fault diagnosis system, Effectiveness evaluation, Overall benefit

## 1 引言

随着科学技术的进步和智能信息技术在设备中的广泛应用,设备的结构日趋复杂,装备的维修保障问题日渐突出。特别是大型复杂设备,其故障具有不均匀性、渐进性和并存性等特点,传统的基于精确完备数学模型的故障诊断模式已经不能满足复杂设备故障诊断的需求。为保证设备安全工作,必须发展智能故障诊断技术,才能延长设备有效工作时间,发挥设备的最大使用价值。现代故障诊断系统(FDS)主要采用各种智能算法来设计诊断模型。不同时期 FDS 采用的智能算法也在不断演化,从传统的专家系统、决策支持系统到现代各类计算智能方法,都在 FDS 中被广泛应用。但是各类诊断算法根据应用的不同,其性能和开发实施代价有很大差异。如何根据具体应用对象的特点,评价选择合适的诊断算法是 FDS 设计中的关键问题。

本文针对 FDS 诊断算法的评价选择问题,对比传统人工智能算法和主流计算智能算法的特点,提出了基于收益的评价思想,分析了影响收益的主要因素,设计了基于收益的评价模型,并应用于两个典型设备。

## 2 FDS 中的诊断算法评价模型

### 2.1 FDS 主要系统结构

FDS 的设计包括三要素:输入的故障特征、采用的诊断

方法和输出的故障模式,可描述为一个三元组  $A = \{\text{故障特征, 诊断方法, 故障模式}\}$ 。一个典型的 FDS,其结构如图 1 所示,横向可以分成输入层、处理层和输出层三部分。在输入层,需要分析具体应用设备的主要故障特征,并使用特征提取、特征选择等方法来消除冗余特征或推导出新特征,形成最终故障特征集。根据该故障特征集对原始测试数据进行预处理,形成与故障特征集格式匹配的测试数据,并作为系统的输入。在处理层,需要设计诊断方法的评价模型,选择最适用于具体应用的诊断方法来进行诊断模型的设计。在输出层,需要对历史故障数据库进行数据挖掘处理,得到主要故障模式集。诊断模型根据处理结果与故障模式集进行匹配,形成诊断结果作为输出。故障特征处理、诊断方法评价选择和对故障模式的数据挖掘是设计 FDS 的前提和基础。

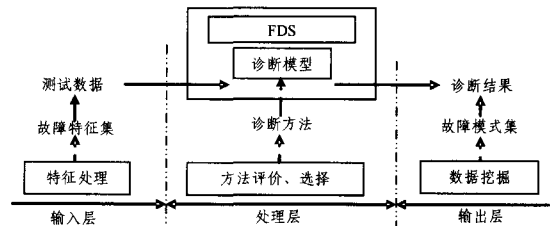


图 1 典型智能 FDS 系统结构

现在有更多的研究集中在故障特征处理和对故障模式的数据挖掘方面,但是在诊断方法评价和选择方面,没有成熟的

到稿日期:2008-02-29 本文受国家部委基金(51315080404,9140A17050206HK03)资助。

严建峰(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为远程自动测试系统、智能故障诊断等;李伟华(1951—),男,博导,教授,主要研究方向为远程自动测试系统、智能决策支持系统、网络安全等。

方法可供参考。本文基于对常见诊断算法的分析,提出了基于综合收益的评价模型。

## 2.2 FDS 常见诊断算法

一方面,传统的人工智能方法应用比较成熟,具有易于理解、解释方便、推理简单的特点,并且开发实施的代价较小。如基于规则的故障诊断专家系统仍然是目前诊断领域应用较为广泛的模式,应用在某些 FDS 系统中显示出较好的性能。另一方面,由于故障诊断问题可以被归结为图论问题<sup>[1]</sup>,而各类计算智能方法在图论问题方面应用较早且有优秀的性能表现,因此现在更多工作致力于使用各种计算智能方法来提高 FDS 的诊断精度和效率。

## 2.3 FDS 诊断算法评价的必要性

新的智能算法的采用,使得诊断模型的诊断准确率不断提高,提高了 FDS 对设备潜在故障的预测能力,防止故障损失。但是高诊断准确率往往也意味着更高的算法复杂度,更多的软硬件开销、开发成本和其他相关费用。为更好地评价模型的效益,引入三个概念:

**定义 1(正收益)** 采用 FDS 给设备使用带来的各方面收益,量化为经济量。

**定义 2(负收益)** 采用 FDS 的各方面代价(设计、实施、误诊断等),量化为经济量。

**定义 3(综合收益)** 正收益与负收益的差值。

一个典型 FDS 中,算法性能的增长导致的收益与支出的增长关系,如图 2 所示。其中曲线 1 为正收益曲线,说明正收益是算法性能的一个递增函数。但是当正收益达到一定极限(接近  $y_2$  处),性能的提升对正收益增加的贡献可以忽略。曲线 2 为负收益曲线,说明当性能到达一定极限(接近  $x_2$  处),提升性能将会付出巨大的代价。曲线 3 为综合收益曲线,说明当性能到达一定程度( $x_1$  处),综合收益最大,而当性能超过该阈值时,性能的提升反而引起综合收益的下降。

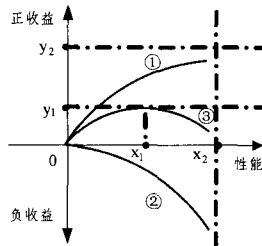


图 2 算法性能提升与收益、代价的关系

但实际应用中,往往只考虑最大的正收益而忽略负收益对整体应用效果的影响,导致 FDS 应用的目标是性能接近  $x_2$  处。但根据本文分析,实施 FDS 的目的是在应用 FDS 的设备能够获得最大的综合收益,即 FDS 应用的根本目标是接近图 2 中  $x_1$  处。本文据此设计了综合收益评价模型来实现综合收益最大化的目标。

## 3 评价模型

为了达到综合收益最大化的目标,需要(1)建立综合收益函数,(2)对函数求极大值。综合收益函数可以通过正收益函数和负收益函数的组合进行求解,但是 FDS 的正收益和负收益与应用设备有高度相关性,很难建立起统一的数学表达式。为简化问题分析,本文采用离散分析求解的方法,首先分析评

价模型涉及的主要因素,再建立评价模型。根据具体应用,对各种诊断算法应用评价模型进行求解和对比。

正收益函数与负收益函数是建立评价模型的前提。本文从实施 FDS 后能够挽回的故障损失的角度来考虑正收益函数模型。根据应用设备和具体的诊断模型的不同,FDS 能够以一定效率发现故障征兆,指导技术人员采取相应的维修措施,从而避免故障的发生或降低故障损失。设某设备有  $N$  种故障模式,故障模式  $j$  发生的频率为  $f_j$ ,若故障模式  $j$  未能被发现,其故障后果有  $M$  种形式,故障后果  $i$  的可能性为  $p_i$ ,造成损失为  $c_i$ 。设 FDS 的诊断准确率为  $CR$ ,则该设备采用 FDS 带来的正收益为

$$Pb = CR \times \sum_{j=1}^N [f_j \times \sum_{i=1}^M (p_i \times c_i)] \quad (1)$$

与负收益相关的因素包括三部分:FDS 的系统开发相关费用、FDS 成功预警后的相关处理费用和误诊断引起的损失。其中系统开发相关费用主要包括设计开发费用  $c\_dvp$ 、样本采集费用  $c\_sg$ 、人员培训费用  $c\_pt$  等,与具体设备相关,而与故障模式的相关性不大。因此 FDS 的系统开发相关费用为

$$Ob_1 = c\_dvp + c\_sg + c\_pt \quad (2)$$

FDS 成功预警后的相关处理费用与具体故障模式相关,包括每种故障模式的各类故障后果引起设备停修、引起工作量损失  $c\_wl$  和设备维修费用  $c\_em$ ,即

$$Ob_2 = CR \times \sum_{j=1}^N [f_j \times \sum_{i=1}^M (c\_wl_i + c\_em_i) \times p_i] \quad (3)$$

误诊断引起的损失包括两方面:(1)设备正常,但 FDS 报错引起的相关处理费用  $sn$ ;(2)设备有故障或故障征兆,但 FDS 没有发现,导致设备损伤引起的损失  $sp$ 。为量化误诊断引起的损失,引入统计决策理论中 ROC 曲线<sup>[2]</sup>相关的两个概念:假负率、假正率。

**定义 4(假负率, FNR)** 被预测为负的正样本结果数与正样本实际数的比值。

**定义 5(假正率, FPR)** 被预测为正的负样本结果数与负样本实际数的比值。

在 FDS 中,假负率就是设备正常但 FDS 报错的比率;假正率就是设备有故障或故障征兆但 FDS 没有发现的比率。

设对于 FDS 对各类故障模式诊断的假负率都为  $FNR$ ,假正率都为  $FPR$ ,则误诊断引起的负收益为

$$Ob_3 = Ob_{31} + Ob_{32} \quad (4)$$

$$Ob_{31} = FPR \times \sum_{j=1}^N [f_j \times \sum_{i=1}^M (p_i \times c_i)] \quad (5)$$

$$Ob_{32} = FNR \times \sum_{j=1}^N [f_j \times \sum_{i=1}^M (c\_wl_i + c\_em_i) \times p_i] \quad (6)$$

设备采用 FDS 的综合收益为

$$Cb = Pb - (Ob_1 + Ob_2 + Ob_3) \quad (7)$$

## 4 实验与分析

### 4.1 发动机 FDS 评价

发动机是机电设备的关键系统,其故障诊断是一个非常复杂的过程。目前在发动机 FDS 的研究方面有较多的工作可以借鉴,采用的诊断算法涵括了各类智能技术<sup>[3-5]</sup>。本文在 FDS 中主要应用了决策树和神经网络两种方法作为诊断模型的核心算法。其中决策树方法作为传统人工智能算法的典型,神经网络方法作为计算机智能方法的典型。在应用对象

方面,本文以航空发动机与普通汽车发动机作为综合收益评价模型的应用对象,其故障模式相关因素分别如表1所示,经济量的单位是万元。

两种算法的主要参数如表2所示,涉及经济量的单位是万元。由于汽车发动机的结构比航空发动机简单,汽车发动机FDS的故障特征集比航空发动机FDS的故障特征集更小,相关开发设计难度也相应降低。

基于表1、表2中数据,根据式(1)至式(7),分别计算出三种算法应用于两种典型发动机系统的正负收益和综合收益的情况,如表3所示。对航空发动机FDS和汽车发动机FDS分别应用综合收益评价模型后,从表3可知对于航空发动机等关键设备应用诊断准确率较高的神经网络算法等计算智能算法能够取得较好的效果,而在汽车发动机上的应用结果显示计算智能方法与传统智能方法的应用效果相当。这是由于航空发动机这类关键设备一旦发生故障,导致的各类故障后果都较为严重,容易引起巨大的经济损失。虽然计算智能算法的开发代价较大,但是通过提高算法正收益并减少误诊断引起的损失,计算智能算法的综合收益明显优越于决策树算法等传统人工智能方法。而对于汽车发动机等普通民用设备,神经网络算法带来的正收益虽然优越于决策树算法,但首先其较大的开发代价抵消了这类算法带来的正收益,其次虽然神经网络算法的误诊断引起的负收益远远低于决策树算法,但由于负收益都维持在较低的水平,因此对整体综合收益的影响不大。因此对于汽车发动机等非关键设备,神经网络算法和决策树算法的应用效果相当。

表1 发动机故障模式表

类型	故障模式	频率 ( $f_i$ )	故障模式特性			相关维修代价	
			故障后果	可能性 ( $p_i$ )	损失 ( $c_i$ )	$c_{wl}$	$c_{em}$
航空发动机	燃烧室故障	0.0003	R <sub>1</sub>	0.8	120	0	0
			R <sub>2</sub>	0.15	50	4	1
			R <sub>3</sub>	0.05	10	2	2
...	...	...	...	...	...	...	...
汽车发动机	转子故障	0.006	R <sub>4</sub>	0.7	0.1	0.02	0.05
			R <sub>5</sub>	0.3	0.9	0.2	0.25
			...	...	...	...	...

表2 发动机中算法相关因素

类型	算法	准确率 (CR)	假负率 (FNR)	假正率 (FPR)	设计开发 ( $c_{dvp}$ )	样本采集 ( $c_{sg}$ )	人员培训 ( $c_{pt}$ )
航空发动机	决策树	0.85	0.12	0.20	12.5	12.2	5.0
汽车发动机	神经网络	0.98	0.03	0.01	18.0	23.6	4.2
航空发动机	神经网络	0.98	0.03	0.02	6.5	1.7	3.4

表3 发动机中各算法综合收益评价(单位:万元)

类型	算法	正收益 ( $P_b$ )	负收益			综合收益 ( $C_b$ )
			开发 ( $Ob_1$ )	处理 ( $Ob_2$ )	误诊断 ( $Ob_3$ )	
航空发动机	决策树	182.5	29.7	15.5	57.9	79.4
汽车发动机	神经网络	232.6	45.8	7.6	13.2	176.0
航空发动机	决策树	34.5	3.8	1.5	2.4	26.8
汽车发动机	神经网络	42.9	11.6	1.8	0.5	29.0

## 4.2 综合收益模型方法分析

相对于一般将算法性能与具体FDS应用对象分开考虑的思想,本文认为算法的应用效果与应用对象存在较大的相关性,并分别分析具体设备的故障模式和备选算法的相关因素,提出了综合收益评价模型。

通过建立综合收益评价模型,可以对不同算法进行评估和选择,挑选出最佳的算法。本文采用了离散分析求解的方法,能够在备选算法中挑选出综合收益最大的算法。这种评估和选择思想如图3所示,通过综合收益模型,将各种算法映射到收益平面的上面离散的点。虽然算法不能找到综合收益曲线理论上的极大值 $p_{max}$ ,但是能够对各个算法的综合收益值进行比较,从而挑选出备选算法中的最优值 $p_2$ ,其对应算法就是适用于该设备的最佳算法。

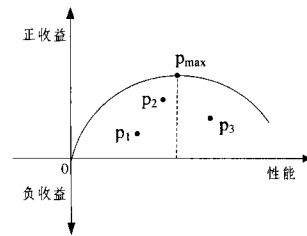


图3 综合收益曲线

**结束语** 随着各类智能算法的发展,FDS诊断模型可采用的算法日益丰富,而基于不同算法的FDS的性能表现和实施成本往往存在较大差异。如何根据不同的应用需求选择合适的算法,达到性能和成本之间的最佳平衡,成为构建FDS的重要考虑因素。相对于传统将系统性能作为评价FDS唯一因素的设计思想,本文提出了一种基于综合收益的FDS评价模型,提出了正负收益的概念,分析了其主要因素,并建立了离散化评价模型。在航空发动机和汽车发动机两种典型系统上应用综合收益FDS评价模型后的结果证明不同设备实施FDS的综合收益与该FDS采用的核心诊断算法相关。

FDS的综合收益评价本质上是在多维度空间寻找最优解的过程。本文提出的评价模型采用了离散化的思想来求解综合收益的一个相对较优解,在求解效率和解的质量上还存在较大的优化潜力。将来的工作将致力于建立更为精确的模型,采用进化算法等在高维度空间最优解或局部最优解求解方面表现优秀的算法来提高模型的性能。

## 参考文献

- [1] 罗熊,孙增圻. 计算智能方法优化设计模糊控制系统:现状与展望. 控制与决策,2007,2(9):961-966
- [2] Dwyer A J. In pursuit of a piece of the ROC. Radiology, 1997, 202:621-625
- [3] Hayashi, Shoji. Study of machine fault diagnosis system using neural networks//Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. v 1,2002:956-961
- [4] Charles L, Richard A L. Migrating fault trees to decision trees for real time fault detection on international space station // IEEE Aerospace Conference. 2005:1559584
- [5] Camelia H, Stefan E. Towards high accuracy fault diagnosis of digital circuits // Proceedings of the 30th International Symposium for Testing and Failure Analysis(ISTFA 2004). 2004:47-51