

# 基于 RBR 和 PCA 的 2.4 米风洞故障诊断系统应用研究

郁文山<sup>1,2</sup>, 易凡<sup>1</sup>, 蔺元臣<sup>3</sup>, 马永一<sup>1</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073; 3. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 为解决 2.4 米风洞试验装备的故障监测与诊断 (FDD) 问题, 设计了一种基于规则推理 (RBR) 和主元分析 (PCA) 的并行故障诊断系统; 对试验流程和因果关系较强的单一装备故障, 采用 RBR 诊断方法; 而对控制过程和重要传感器的故障, 通过构建 PCA 模型, 根据平方预报误差 (SPE) 实现系统故障的诊断; 运行效果表明: 该系统实时性好、诊断结果与实际相符合、且对过程故障具有较强的针对性。

**关键词:** 风洞; 规则推理; 主元分析; 故障监测与诊断

## Application Research on FDD System Based on RBR and PCA in 2.4 m WT

Yu Wenshan<sup>1,2</sup>, Yi Fan<sup>1</sup>, Man Yuanchen<sup>3</sup>, Ma Yongyi<sup>1</sup>

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. College of Mechanics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In this work, the parallel Fault Detection and Diagnosis (FDD) system based on Rule-Based Reasoning (RBR) and Principal Component Analysis (PCA) was designed to check the fault of equipments in the 2.4 m Wind Tunnel (WT). The RBR method is used to deal with the single equipment fault which involves experiment processes and on-off state information. And the fault from controlling process and important sensor were checked by Square Prediction Error (SPE) basing on the PCA model. The result shows that the system can deal with the fault in time and has a good consistency with the actual experiments. In addition, it also exhibits a strong pertinence for fault from the process.

**Keywords:** wind tunnel; rule-based reasoning; principal component analysis; fault detection and diagnosis

## 0 引言

2.4 米跨省速风洞 (以下简称 2.4 米风洞) 是我国大型的气动力试验地面模拟平台, 其装备保障能力关系到型号研制任务的质量和进度。随着 2.4 米风洞试验装备智能化水平和集成度的提高、风洞试验任务的日趋增长, 试验装备的维护难度与日俱增, 为保障试验装备正常运行所花费的维修费用和时间亦越来越多, 目前对参试装备的故障监测和诊断 (Fault Detection and Diagnosis, FDD) 主要靠人工方式, 不仅效率和数据利用率低, 且效果受人员素质影响大。

针对 FDD 的关键技术, 国内外也进行了深入的理论和应用研究, 如基于规则推理 (rule-based reasoning, RBR) 和案例推理 (case-based reasoning, CBR) 的专家系统、模糊推理和神经网络、模式识别等方法<sup>[1]</sup>。基于 RBR 的专家系统通过知识规则进行推理, 有效地模拟专家的决策过程, 在 FDD 中得到了较为广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。但存在知识获取瓶颈问题, 难以处理大量信息, 且在复杂特殊问题中存在极大的主观性和偶然性, 无法充分利用客观数据所提供的信息。基于 CBR 的方法, 能通过处理相似问题的成功经验来诊断新问题, 文献 [5-7] 结合 RBR

和 CBR 的优缺点成功的将基于规则的案例推理 (rule-based CBR, RCB) 用于 FDD 系统。针对不确定和不精确的知识与数据, 模糊推理方法提供了一种很好的故障诊断处理方法<sup>[8]</sup>。而神经网络通过模仿人类神经细胞的结构和功能, 利用其记忆、学习能力, 在难于建立系统模型的 FDD 对象上得到了广泛应用。FDD 在本质上可归为一类模式识别问题, 即依据相关征兆通过特征提取对故障模式进行分类。目前, FDD 的模式识别方法, 主流研究方向是主元分析 (principle component analysis, PCA), 主元分析是多元统计分析中常用的方法之一, 它将过程中采集的复杂信息数据压缩集中到少数几个主元特征, 使其能更集中的反映原始数据中所包含的变化信息, 并有效分离系统信息和噪音<sup>[9]</sup>。PCA 方法存在的不足之处, 文献 [10] 已作了详细的描述, 并提出了相对主元分析 (relative principle component analysis, RPCA) 的方法, 消除了量纲差异带来的虚假影响。文献 [11] 提出了将监测数据投影到物理意义明确的指定模式的指定元分析 (designated component analysis, DCA) 方法, 克服了 PCA 模式的复合效应。文献 [12] 针对传统 PCA 贡献图的缺陷提出了一种改进型的 PCA 方法。然而, 上述方法针对某一特定的对象进行故障诊断时有其各自的优点和不足, 很难用单一方法完成 FDD 的最终目标, 必须利用多种方法才能获得满意的诊断结果。

本文根据风洞试验装备故障的特点, 提出了一种基于

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2016-01-28。

作者简介: 郁文山 (1980-), 男, 甘肃永登人, 博士研究生, 工程师, 主要从事风洞控制和机电液伺服系统方向的研究。

RBR 和 PCA 的 FDD 方法。对因果关系较强的故障通过知识推理的专家系统；对过程控制和传感器故障，用统计检验的方法判别传感器测量值对主元模型的偏离程度实现故障的诊断。

### 1 基于 RBR 的专家系统

通常一个以 RBR 为基础的专家系统主要包括五个组成部分：知识库、推理机、综合数据库、解释系统以及人机界面，结构如图 1 所示。专家系统的组成部分中，知识库和推理机是核心部件。知识库是推理机的基础，含有事件型知识和功能型知识，通过对经验知识、实例知识以及数据知识的提取，进一步生成标准事实库格式的规则。推理机是对知识的应用，是解决特定问题的计算机程序，与具体的知识表示有关。综合数据库用于存放原始特征数据、中间信息和诊断结果。解释系统则是对推理过程和规则进行解释。人机界面负责把用户输入和输出的信息转换为系统内规范的表示形式和用户易于理解的外部表示形式。

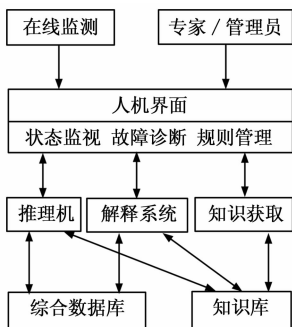


图 1 专家系统结构图

### 2 PCA 故障诊断

#### 2.1 PCA 数学基础

PCA 基本思想是把高维信息投影到低维子空间，并保留主要信息的方法。PCA 最早是由 Pearson 于 1901 年提出的。通常一个标称的  $n \times m$  维数据矩阵  $X$  可以分解为<sup>[12]</sup>：

$$X = \hat{X} + E \tag{1}$$

式中，矩阵  $X$  的列表示  $m$  个变量（测量传感器），行表示  $n$  组数据。

其中  $\hat{X}$  和  $E$  可以分别表示成如下形式：

$$\hat{X} = TP^T \tag{2}$$

$$E = \hat{I}\hat{P}^T \tag{3}$$

其中： $T \in R^{n \times l}$ ， $P \in R^{m \times l}$  是得分和负载矩阵， $X$  阵的分解方式是确保  $[PP^T]$  和  $[TT^T]$  是正交阵，即  $\hat{X}$  和  $E$  的互相关阵为 0，此主元投影将原来  $X$  的  $m$  个变量减少到 1 个主元  $T$ 。

依据上述分析，一个新的监测数据向量可以被分解为：

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{4}$$

其中： $\hat{x} = PP^T x = Cx$  是主元子空间（principal component subspace, PCS）的投影， $\tilde{x} = (I - C)x = \hat{C}x$  是残差子空间的投影（residual subspace, RS）。PCA 模型将监测数据投影到两个正交的子空间，当标称数据发生变化的时候，对应的 RS 中，异常偏差和噪声也随之发生变化。

#### 2.2 PCA 异常检测

构建的 PCA 模型可用于传感器数据的统计检验，正常情况下，监测数据向量  $x$  的投影更多的是在 PCS，而在 RS 上的投影值非常小，当发生故障时，监测数据在 RS 上的投影值会

极大的增加，因此，定义平方预报误差（square prediction error, SPE）：

$$SPE(x) = \|\hat{x}\|^2 = x^T(I - C)x \leq \delta_Q \tag{5}$$

式中， $\delta_Q$  是统计量  $SPE$  的控制限，可由下式计算：

$$\delta_Q = \theta_1 \left[ \frac{c_0 \sqrt{2\theta_2 h_0^2}}{\theta_1} + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} + 1 \right]^{\frac{1}{h_0}} \tag{6}$$

其中： $\theta_1 = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ ， $\theta_2 = \sum_{i=1}^{m_j} \lambda_i^2$ ， $\theta_3 = \sum_{i=1}^{m_j} \lambda_i^3$ ， $h_0 = 1 - \left( \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2^2} \right)$ ， $\lambda_i$  为标称系统自相关矩阵的  $l$  最大特征值。

#### 2.3 PCA 故障诊断

通过上述方法一旦检测到异常，可通过  $SPE$  随时间变化的趋势图来进行故障的诊断。 $SPE$  也被称为  $Q$  统计量，其第  $j$  个元素第  $i$  时刻的统计量定义为：

$$Q_{ij} = e_{ij}^2 = (X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2 \tag{7}$$

PCA 的故障诊断方法，就是以  $Q$  统计量在第  $i$  时刻的值表示此时刻传感器测量值对主元模型的偏离程度，如果  $Q_{ij} > \delta_Q$ ，表示传感器故障导致该测点数据异常，则表明控制过程出现了某种异常，常用于过程故障的监测。

### 3 故障诊断系统设计

系统在线监测已数据表的形式存储在实时数据库中，经数据预处理存入历史数据库并进行在线故障诊断，工作流程如图 2 所示。将实时数据库中的信号与阈值进行比较判断，确定信号状态，再根据知识库中的判别表进行判断，经推理得到该时刻风洞试验装备的运行状态；同时，将实时数据库中传感器和重点装备的监测值进行标准化处理，计算  $SPE$  值，与历史数据计算出的控制限进行比较，判断是否存在故障，若存在故障，通过故障辨识诊断出系统故障。

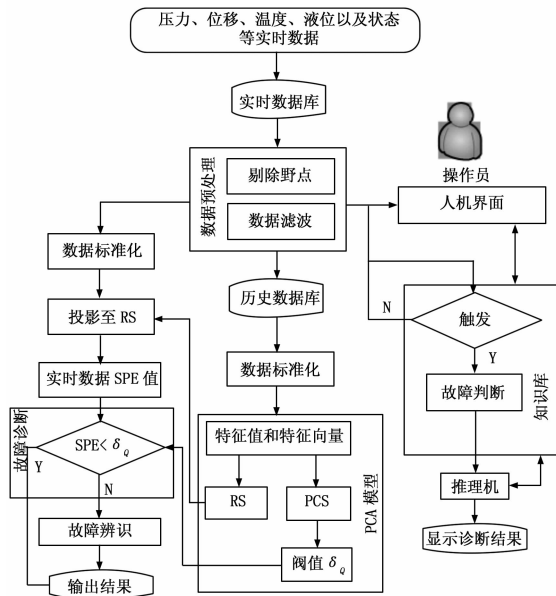


图 2 FDD 系统工作流程

#### 3.1 专家系统设计

##### 3.1.1 知识表示

基于产生式规则的知识表示法是目前使用最广的知识表示模式，主要用于因果关系较强的专家知识，风洞试验的流程规范和简单装备故障亦具有较强的逻辑和因果关系，适用于基于

产生式规则的知识表示。

### 3.1.2 知识分析

在构建基于规则表示的知识库前, 需对风洞试验流程和装备故障诊断知识进行汇总和分析。在风洞试验流程中装备就绪情况、阀门位置及开关情况、压力波动情况具有严格的逻辑关系, 根据上述逻辑关系, 可自动判别各系统是否准备就绪、联锁系统是否正常等; 其次现场装备故障具有明显的因果表现。用专家知识表示的自然语言故障诊断方法如表 1 所示。

表 1 知识表示

a. 试验流程诊断专家知识

自然语言的试验流程诊断知识表示

序号	判据 1	判据 2	判据 3	结论
1	全模 定 $\alpha$ 变 Ma 工况 $Ma \leq 0.9$	联机	① 1#、2#、4# 油源压力正常; ② 攻角机构运行正常; ③ 充气密封工作正常; ④ 快速阀已全开; ...	设备 正常
		准备 开车	① 栅指预置到位; ② 主排气阀已全关; ③ 压力传感器初值正确; ④ 质管系统允许开车; ...	准备 就绪
		开车	① 主调到预置位置; ② 总压到切换点主排开; ③ 总压稳栅指闭环调节; ④ 流场稳攻角运行; ...	吹风 正常

b. 装备故障诊断专家知识

自然语言的试验流程诊断知识表示

序号	判据 1	判据 2	判据 3	故障原因	故障处理
1	1# 油源 温度 >45°	冷却水 压力 $\leq$ 1.5Mp		冷却水 故障	本次吹风 后处理冷 却系统
		油箱 液拉 $\leq$ 650mm	油源 压力 $\geq$ 15Mp	液位不足	巡视检查
		油箱 液位 $\leq$ 400mm	油源 压力 $\leq$ 12Mp	液压系统 管路爆裂	紧急停车

### 3.1.3 知识库构建

专家知识库的构建是以产生式规则表的形式来表示, 产生式规则表的逻辑表示形式为:

(规则名 (IF <条件 1> <条件 2> ... <条件 n>)  
(THEN <结论 1> <结论 2> ... <结论 m>))

其中 <条件> 为故障判据、<结论> 为故障原因和故障处理措施。

为方便规则的管理, 采用面向对象的编程技术将数据库封装, 在知识库管理模块的协调控制下, 从判据库中选取响应知识构成规则的前件, 从原因库和处理库中选取响应知识构成规则的后件, 形成一条完整的故障规则。

例如表 1.a 中的知识表示对应的诊断规则为, 当监测到‘联机’、‘准备开车’、‘开车’状态标志后, 判断各项判据是否成立, 若判据成立, 则进行后续流程, 产生式规则表为:

(Rule1 (IF <QDABM\_0.9 = 1> and <ON\_LINE = 1> and <1# OILSYS\_P  $\geq$  15Mp> and <2# OILSYS\_P  $\geq$  15Mp> and <4# OILSYS\_P  $\geq$  15Mp> and <\_MECH = 1> and <GAS\_SEAL = 1> ...)) (THEN <DEVICE\_NORMAL = 1>));

(Rule2...); (Rule3...); ...)

在上述各个规则中, Rule1, Rule2, Rule3 为规则名, IF 为规则的前件, THEN 为规则的后件。

### 3.1.4 推理机设计

本系统在进行推理机设计时, 采用正向推理方式, 正向推理也称为实时驱动方式, 系统将所要诊断的在线监测数据与知识库中规则的前件条件进行匹配, 若匹配成功, 则将该知识库的结论作为中间结果, 继续与知识库中的规则进行匹配, 直到得出风洞试验工况和装备故障的诊断结果。

### 3.2 PCA 故障诊断系统设计

在风洞中, 应用了大量的位置、压力及角度控制系统, 如引射压力控制系统, 总压控制系统, 静压控制系统以及模型姿态控制系统等, 在本文中, 以引射压力控制系统来讨论风洞过程控制的故障诊断。引射压力控制原理如图 3 所示, 在引射压力控制系统中, 通过位置伺服系统调节主调压阀的开度, 从而实现引射压力的闭环控制。假定, 压力测量管路堵塞、轻微漏气或是传感器异常, 会导致测量值  $P1_{sup,m}$  低于实际值。在闭环控制作用下, 为保证引射压力的精确控制, 压力控制器输出值  $S_{sup,set}$  变大, 使主调压阀开度增加用于补偿压力扰动, 则会导致伺服阀流量  $S_w$ , 阀门开度  $S_{sup}$  等变量随之发生变化, 至到引射压力  $P1_{sup,m}$  保持在设定值  $P1_{sup,set}$ 。而实际上引射压力真值  $P1_{sup}$  始终高于设定值, 于是测量故障会蔓延至  $S_{sup,set}$ ,  $S_w$ ,  $S_{sup}$ , 根据它可以找出引起异常波动的几个可能性最大的量, 确定故障的确切原因  $F_{plsup}$ , 从 SPE 图中就会准确的分离出故障。除此之外, 其他传感器测量故障  $F_{ssup}$ ,  $F_{sw}$ ,  $F_{hy}$ ,  $F_T$  也可以通过 SPE 图诊断。

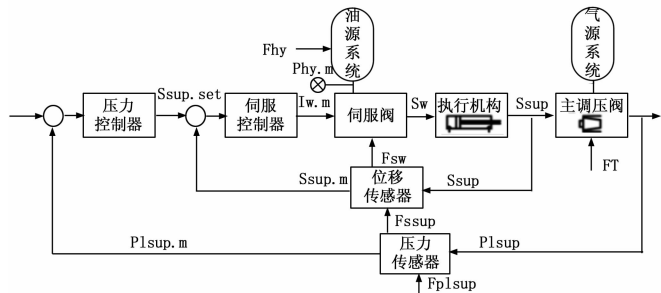


图 3 引射压力控制系统

## 4 系统实现

系统将采集的在线监测数据通过基于 TCP/IP 的 OPC 和 MODBUS 协议上传至数据分析层。数据分析层主要完成系统的状态监测与故障诊断, 状态监测由 WonderWare 组态软件实现, 故障诊断软件及其脚本语言采用 C# 编写, 数据库是 SQL Server。

### 4.1 数据采集

2.4 米风洞试验装备和过程控制中, 在线监测数据包括流

场控制参数、模型振动参数、现场试验装备状态参数等。依据控制系统的硬件结构和拓扑形式，选择 OPC、内存反射卡和数据采集卡等多种数据采集方式，全面采集各状态信息，其数据采集原理如图 4 所示。

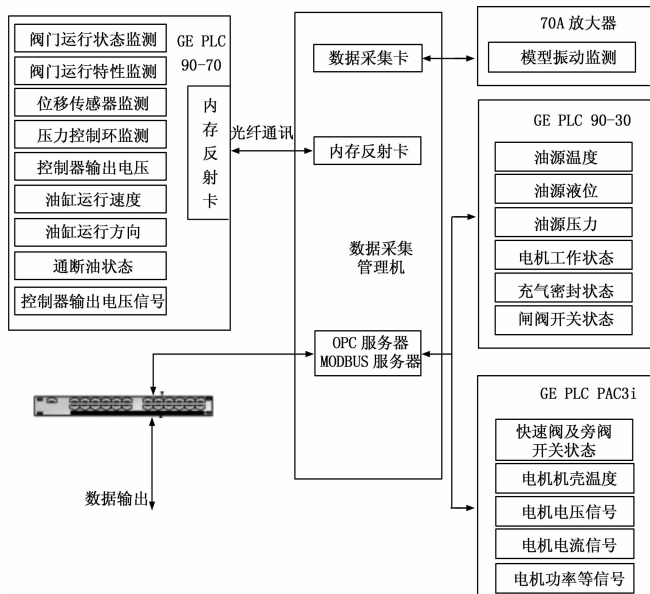


图 4 数据采集系统原理图

### 4.2 软件实现

软件系统由状态监测和故障诊断软件组成，软件架构如图 5 所示。状态监测软件主要实现监测数据的接收、处理、显示与存储，同时将历史数据分发给故障诊断模块，并将故障诊断结果、预测结果、试验运行状态予以显示。故障诊断软件实现在线监测数据的故障诊断、定位，并将故障诊断结论实时存储

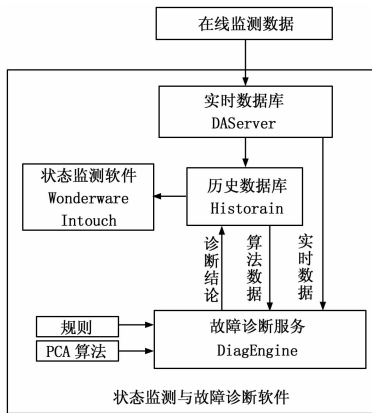


图 5 软件架构及流程

(上接第 30 页)

在这套设备上只要我们稍微修改一下测量平台上的夹具和装夹方式，就可以推广到对大多数的直线运动机构来进行线性测量及数据分析，有极大的应用及推广范围。

本系统使用了激光干涉仪测量技术，这种测量仪器属于贵重精密仪器，是普通的企业不一定能拥有测量技术，因此，还需要进一步的改进。在系统设计方案当中，我们铺设了一条技术暗线，运动路线放置了光栅尺。如果没有激光干涉仪，或者不需要测量精度非常高的情况下，就用控制器读取光栅尺的位

于历史数据库。

### 5 结束语

本文针对 2.4 米风洞自主式维修保障系统建设项目中的故障诊断，设计了基于 RBR 和 PCA 的 FDD 系统，通过 PCA 方法进行特征提取并实现故障诊断，有效弥补了 RBR 方式下数据利用率不高的缺陷。利用 Wonder Ware 组态软件、C# 软件以及 SQL Server 数据库开发了状态监测与诊断系统软件，该系统能根据在线监测数据准确诊断出风洞运行状态和装备故障，有利于岗位人员快速发现装备故障并采取相对应的解决措施，减少了工作的盲目性。

#### 参考文献：

- [1] 张金玉, 张 炜. 装备智能故障诊断与预测 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] Jeffrey Schein, Steven T. Bushby, Natascha S. Castro, John M. House. A rule-based fault detection method for air handling unit [J]. Energy and Buildings, 2006, 38: 1485-1492.
- [3] 周汝胜, 焦宗夏, 王少萍, 等. 基于专家系统的导弹发射车液压系统故障诊断 [J]. 航空学报, 2008, 29 (1): 197-202.
- [4] Cen Nan, Faisal Khan, M. Tariq Iqbal. Real-time fault diagnosis using knowledge-based expert system [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2008 (86): 55-71.
- [5] Tung Yuanhsin, Tseng Shianshyong, Weng Juifeng, et al. A rule-based CBR approach for expert finding and problem diagnosis [J]. Expert Systems with Applications, 2010 (37): 2427-2438.
- [6] 张代胜, 王 悦, 陈朝阳. 融合实例和规则推理的车辆故障诊断专家系统 [J]. 机械工程学报, 2002, 38 (7): 91-95.
- [7] 潘 伟, 王汉功. 基于规则和实例混合推理的故障诊断专家系统 [J]. 振动工程学报, 2004, 17 (S): 601-604.
- [8] Wu Jianda, Wang Yuhsuan, Bai Mingsian R. Development of an expert system for fault diagnosis in scooter engine platform using fuzzy logic inference [J]. Expert Systems with Applications, 2007 (33): 1063-1075.
- [9] Du Zhimin, Jin Xinqiao, Yang Yunyu. Fault diagnosis for temperature, flow rate and pressure sensors in VAV systems using wavelet neural network [J]. Applied Energy, 2009 (86): 1624-1631.
- [10] 文成林, 胡 静, 王天真, 等. 相对主元分析及其在数据压缩和故障诊断中的应用研究 [J]. 自动化学报, 2008, 34 (9): 1128-1139.
- [11] 周福娜, 文成林, 汤天浩, 等. 基于指定元分析的多故障诊断方法 [J]. 自动化学报, 2009, 35 (7): 971-982.
- [12] Du Z M, Jin X Q, Wu L Z. Fault detection and diagnosis based on improved PCA with JAA method in VAV systems [J]. Building and Environment, 2007 (42): 3221-3232.

置数据，取代激光干涉仪测量，这一部分相关技术，是项目实用性有待提高的一个方面。

#### 参考文献：

- [1] 固高科技. OtoStudio 高级运动控制编程手册 [Z], 2010.
- [2] RENISHAW. 激光干涉仪原理及应用概述 [Z]. 2004.
- [3] 百度文库. 线性拟合方法 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/d31c8252b84ae45c3b358c4d.html>.
- [4] 中国机械工程学会, 中国机械设计大典编委会. 机械设计手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.