

# 燃气轮机气路故障诊断技术综述与展望

孙靖山

中船重工龙江广瀚燃气轮机有限公司 黑龙江哈尔滨 150078

**摘要:** 气路故障是燃气轮机的主要故障形式,对燃气轮机的安全性和经济性有很大的影响。因此,对气路故障诊断方法的研究具有十分重要的意义。总结了国内外燃气轮机气路故障诊断技术研究的发展现状,并对各种研究方法进行了分类,探讨了基于模型、基于数据和基于知识的故障诊断方法的优点、进展,以及三种方法相互结合的适用范围和可能性,重点介绍了近年来出现的深度学习和融合诊断方法,最后对该领域存在的一些问题和可能的发展方向进行了讨论。

**关键词:** 燃气轮机; 气路故障诊断; 深度学习; 融合诊断

## Overview and Prospect of gas turbine gas path fault diagnosis technology

Jingshan Sun

CSIC Longjiang Guanghan gas turbine Co., Ltd. Harbin 150078, Heilongjiang

**Abstract:** Gas path fault is the main fault form of gas turbine, which has a great impact on the safety and economy of the gas turbine. Therefore, the study of the gas path fault diagnosis method is of great significance. The development status of gas turbine gas path fault diagnosis technology at home and abroad is summarized, and various research methods are classified. This paper discusses the advantages and progress of model-based, data-based, and knowledge-based fault diagnosis methods, as well as the application scope and possibility of the combination of the three methods, and focuses on the recent emergence of deep learning and fusion diagnosis methods. Finally, some problems and possible development directions in this field are discussed.

**Keywords:** gas turbine; Gas path fault diagnosis; Deep learning; Fusion diagnosis

### 引言:

燃气轮机故障通常分为机械故障和气路故障,后者与空气动力学和热力学相关,例如压气机与透平的积垢、腐蚀/磨损、热畸变、外/内物损伤等。据估计,地面发电用燃气轮机由于气路故障造成的事故停机时间占燃气轮机发电系统总停机时间的比例高达46.3%。

### 1. 气路故障诊断研究现状

燃气轮机出现异常时,需要在准确监测的基础上,先排除机械故障,再诊断气路故障。燃气轮机气路故障诊断方法一般可分为三类,如图1所示。以下是三种主流分类中的一些。

#### 1.1 线性和非线性气路分析法

20世纪60年代,首先提出了故障方程法,又称气路分析法。这种气路诊断方法得到了广泛的应用,极大地

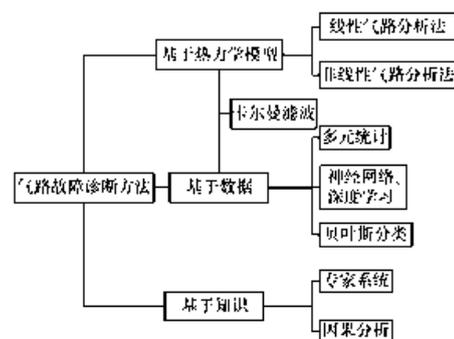


图1 燃气轮机气路故障诊断方法分类

促进了燃气轮机故障诊断技术的发展。Urban的气路分析方法是一种基于线性模型的方法,通过影响系数矩阵描述燃气轮机稳态工作点可测参数偏差与不可测参数偏差之间的关系。不过这种方法过于理想和简化,忽略了燃气轮机模型的非线性特点、传感器的故障与噪声、影

响系数矩阵的准确描述等一系列问题。因此,在线性模型的基础上,非线性模型方法逐渐发展起来,Urban和Volponi等开发出能够实现非线性故障诊断的Pythia软件。House在非线性模型的基础上,应用迭代法提高诊断精度,较好地解决了测量参数和不可测量参数之间的关系问题。但非线性法依然受到测量不确定性的制约,这与线性模型诊断类似<sup>[1]</sup>。

### 1.2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波采用递归算法检测燃气轮机气路问题。该方法易于实现动态在线应用,对测量噪声有滤波效果。最重要的是,它可以估计未测参数,因此被广泛应用。传统的卡尔曼滤波是针对线性函数的,而扩展的卡尔曼滤波采用一阶泰勒展开法在最后一个状态进行线性化。一般来说,状态空间模型是一组描述状态变量、输出变量、控制变量、过程噪声和测量噪声之间动态关系的微分方程。在状态空间模型的基础上,卡尔曼滤波引入部件健康参数,即性能参数偏离标准工况的程度,得到燃气轮机气路故障状态空间模型。针对在实际诊断中遇到的一系列问题,对卡尔曼滤波进行改造和改进显得尤为重要。

改进了燃气轮机滤波用离散非线性模型,提高了模型精度,采用单形采样构建Sigma点卡尔曼滤波器,降低了计算量。对强跟踪卡尔曼滤波法进行改进,改进算法通过引入气路部件先验知识,合理分配各通道的调节作用,提高了诊断精度以及动态响应速度。提出了一种自适应平方根容积卡尔曼滤波器的自适应滤波方法,直接利用基于三阶容积积分方法近似发动机的非线性统计特性,从而避免了滤波过程参数选取的问题。

### 1.3 神经网络

最早成熟的神经网络是误差反向传播(BP)神经网络,它解决了两层神经网络需要复杂计算的问题。神经网络可分为分类和回归两种,两者均可用于故障诊断。前者将包含监测数据和相应故障类型的数据组输入神经网络,经过训练得到网络中包含的故障信息,输入测试数据或实时数据即可得到故障类别,从而完成诊断。后者将燃气轮机健康状态监测参数输入到神经网络中,回归得到健康状态指标值,与实际值进行比较,融合故障知识得到故障信息。虽然神经网络可以以任意精度逼近非线性函数,但传统的神经网络方法大多是从逼近理论的角度对监测数据进行拟合和特征提取。由于网络结构训练算法和计算复杂度的影响,通常只设置2-3层隐藏层,降低了逼近的精度<sup>[2]</sup>。同时,故障样本的完备性、

典型性以及算法的收敛性、训练速度和诊断的实时性等制约着基于传统神经网络的故障诊断技术的发展。近年来,神经网络应用于燃气轮机气路故障诊断的研究不断深入,针对BP神经网络算法本身容易陷入局部极值的问题,引入了蜻蜓算法,对BP神经网络的权值和阈值进行参数优化,提高了诊断的准确率。针对自适应模糊神经网络受聚类参数影响较大的问题,采用人工蜂群算法对这些参数进行优化,提高了故障识别的准确性和稳定性,使燃气轮机故障诊断变得更加实用。同时,为解决神经网络本身结构性等问题,深度学习应运而生。它是一种源于人工神经网络的机器学习方法,其本质是通过在层次结构中堆叠多层非线性信息处理模块来模拟数据背后的高级表示,并对模式进行分类和预测。一种基于多层神经网络的气路故障诊断模型,其网络训练泛化精度可达0.1%。针对燃气轮机气路部件性能衰退故障,引入在深度学习领域取得重大突破的深度置信网络DBN,并使用遗传算法自适应调整DBN算法中的一些参数,从而大大提高了故障诊断的精度。

### 1.4 多元统计

该方法通过将高维数据转化为低维数据来获取有用信息。目前,用于故障初始识别和诊断的贡献图方法主要有传感器有效指数法、基于重构的贡献图法或基于角度的贡献图法。多元统计方法可以提供贡献图等具有较少先验知识的指导信息,更适合无(或少)故障知识的故障诊断。

### 1.5 专家系统

专家系统用于模拟专家在故障诊断中的推理过程。其优点是理解简单,系统编程方便,存储空间小;缺点是并不是所有的断层模式都能用科学理论解释。对于未发生过的故障,知识库中没有存储警告规则,可能会导致诊断失败甚至误诊,影响设备的恢复。

### 1.6 融合诊断方法

随着燃气轮机系统复杂度的提高,建立准确的热力学模型并非易事,基于数据的方法虽然规避了这一问题,但纯数据方法未能充分体现燃气轮机系统机理,诊断过程难以形象解释,分析故障产生原因比较困难。基于知识的方法在形成气路故障特征数据库及诊断知识库时易形成故障信息缺失、定性评估易定量评估难的局面。也就是说,单纯的基于模型、基于数据或基于知识的方法已经不能满足气路故障诊断准确性和诊断效率方面的要求。因此,国内外学者已经在融合诊断方面做了一些尝试。结合遗传算法和神经网络方法对传感器和气路进行

了检测；结合卡尔曼滤波和贝叶斯信念网络技术，所得算法具有改进的识别能力；结合统计分析、神经网络和模糊逻辑技术，总结了一套发动机性能预测和诊断的方法。另外，通过多元统计方法得到低维定性、定量（或模糊化）信息，送入基于知识的系统，基于知识的系统再结合过程行为、过程知识等模拟专家进行故障诊断，也是一种融合诊断的思路<sup>[3]</sup>。

## 2. 气路故障诊断亟待解决的问题

回顾气路故障诊断技术发展的历程，燃气轮机气路故障诊断方法研究还存在一些问题：

2.1 燃气轮机系统复杂度增加，热力学模型的复杂度随之增加，基于模型的故障诊断方法的精度下降，故障诊断计算更加耗时。

2.2 现有热力学模型建立在部件性能衰退或损伤的程度不大的假设基础之上，且只适用于固定几何部件的燃气轮机准稳态工况诊断情况。

2.3 卡尔曼滤波对突变故障的处理需进一步研究。另外，比较了BP神经网络和基于卡尔曼滤波器的气路故障诊断方法，发现在精度方面前者略差，因此需要精度更高的数据驱动算法。

2.4 纯数据方法诊断过程通常是黑箱过程，且未能充分体现系统机理，因此诊断故障原因比较困难。如何运用基于定性的知识和定量的数据实现故障诊断，如何结合先验知识对不可认知故障进行识别并具有学习能力，这些仍是需要解决的问题。

## 3. 气路故障诊断技术发展方向

### 3.1 自适应动态非线性热力建模诊断技术

目前，燃气轮机气路故障诊断技术局限于燃气轮机稳态或准稳态条件和固定的几何部件，当燃气轮机损坏或衰退严重时，现有诊断方法的准确性和可靠性无法得到保证。因此，研究自适应动态非线性热模型诊断技术具有十分重要的意义。

### 3.2 卡尔曼滤波的改进及非线性滤波算法

常见的卡尔曼滤波方法可以准确跟踪渐进式气路故

障，但对快速气路故障的诊断延迟较大，容易被误诊。因此，改进卡尔曼滤波算法对渐进式和快速式气路故障进行准确跟踪具有重要意义。同时，各种非线性滤波算法直接应用于非线性系统，以获得更高的计算精度和更好的稳定性，如无迹滤波、中心差分卡尔曼滤波、粒子滤波等。

### 3.3 先进的数据驱动算法

与两层神经网络不同，多层神经网络中的层数增加了，更宽、更深的网络具备更优秀的表示能力，更强的函数模拟能力。目前深度学习学术界主要的研究既在于开发新的算法，又在于对梯度下降算法以及反向传播算法进行不断的优化，最为火热的技术包括循环神经网络（RNN）、长短期记忆人工神经网络（LSTM）等，主要方向是图像理解，将其应用在气路故障诊断中值得进一步研究。

### 3.4 融合故障诊断方法

融合故障诊断包括数据融合和算法融合。数据融合就是总结不同渠道的信息数据；算法融合就是要实现不同的故障诊断算法间的优势互补，提升气路故障诊断结果的正确性和诊断效率。

## 4. 结束语

针对国内外燃气轮机气路故障诊断的研究现状，本文分别讨论了基于模型、基于数据和基于知识的故障诊断方法的优势、进展、应用范围和结合的可能性，并重点研究了近年来新兴的深度学习和融合诊断方法。最后，总结了燃气轮机气路诊断研究中存在的问题。

### 参考文献：

- [1] 邢媛. 基于离散工作点集扩维的燃气轮机故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
- [2] 应雨龙，李靖超，庞景隆，等. 基于热力模型的燃气轮机气路故障预测诊断研究综述[J]. 中国电机工程学报，2019，39（3）：731-743.
- [3] 谢春玲，戴景民. 燃气轮机故障诊断技术研究综述与展望[J]. 汽轮机技术，2010，52（1）：6-8.