

基于条件规则与故障树法的燃气轮机故障诊断^{*}

尚 文, 王维民, 齐鹏逸, 崔 津, 曾咏奎
(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

摘要: 针对燃气轮机各类故障的诊断问题, 将条件规则与故障树法相综合的诊断技术应用到燃气轮机的故障诊断研究中。在建立燃气轮机失效故障树的基础上, 通过归纳总结典型的故障案例和维修经验, 构建了基于条件规则的逻辑推理模型, 利用基于信号处理技术的燃气轮机故障分析原理, 在故障树的中间事件和底端事件上, 增加了具体故障分析的条件规则, 并进行了物理和逻辑判断, 以确定故障树每个分支的诊断选择, 从而明确了每一步的故障诊断分析, 最终得出了精确的故障原因和故障部位。结合某海上石油作业区燃气轮机发电机组的转子振动故障实例, 在进行燃气轮机发电机组在线监测的基础上, 运用基于条件规则的故障树法快速而准确地分析出了故障的根本原因。研究表明, 该诊断方法简单易行, 便于维修技术人员掌握, 可广泛运用于燃气轮机发电机组的可靠性维护。

关键词: 燃气轮机发电机组; 条件规则; 故障树法; 振动故障; 可靠性维护

中图分类号: TK478; TP277; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)07-0798-05

Gas turbine engine fault diagnosis based on conditions of rule-based and fault tree

SHANG Wen, WANG Wei-min, QI Peng-yi, CUI Jin, ZENG Yong-kui
(Diagnosis & Self-Recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at all kinds of the gas turbine fault diagnosis problems, a comprehensive technology of the rule-based and fault tree method was investigated in the gas turbine fault diagnosis research. On the base of the established fault tree of gas turbine, the typical fault cases and maintenance experience were summarized, the based on condition the rules of logic reasoning model was established, the fault analysis principle of gas turbine based on signal processing was utilized, the certain conditions rules were increased in the middle of the fault tree events and bottom events, the physical and logical judge were judged to determine the fault tree on each branch diagnosis choice, thus every step of the fault diagnosis analysis were clear, the accurate fault causes and failure parts were concluded in the end. For the gas turbine generating unit rotor vibration fault example of an offshore oil operation area, the rapid and accurate the root causes were analyzed by the based on rules conditions of fault tree method on the foundation of online monitoring, The results indicate that the method is convenient in maintenance and technical staff to grasp, it can be widely used in gas turbine generating unit reliability maintenance field.

Key words: gas turbine generating set; conditions of rule-based; failures tree method; vibration fault; reliability maintenance

0 引 言

海上采油/气平台和大型浮动生产、储存、卸货油轮, 由于其远离陆地, 所采用的电力系统具有它的独立

性和特殊性。具有效率高、启动快、运行平稳、能源自主性强等特点的燃气轮机发电机组完全符合海上作业要求。然而由于海上恶劣的工作环境, 燃气轮机发电机组频繁发生故障, 对燃气轮机的故障诊断与可靠性

维护显得尤为重要。对燃气轮机的故障诊断与预测是利用已掌握的故障诊断知识,对机器运行状态数据进行实时监测、定位与诊断;结合历史数据和相关故障模式,利用诊断方法分析一定时间内的性能参数和振动性能变化趋势,对已经发生或者可能发生的故障进行诊断、分析和预报,以确定故障的类别、部位、程度和原因,提出维修对策^[14]。随着研究的深入,研究人员总结并应用多种燃气轮机的故障诊断方法,包括有:故障树分析法、小波分析法^[5]、条件规则法、神经网络诊断法^[6]、模糊诊断法、气路分析法^[7]等诊断方法。

然而,有的方法是独立使用于不同的故障现象和故障部位,有的需要进行复杂的公式推导和程序编辑。这就要求燃气轮机的操作技术员要掌握多种的故障诊断方法和多种的数据分析能力,甚至需要进行复杂程序编辑,难度较大^[8-10]。因此,寻求开发一种燃气轮机故障诊断方法,既可以让燃气轮机的操作技术人员和维修技术人员快速熟练地掌握并应用于工程实践,又可以快速准确地进行故障分析及推理,确定故障部位及故障原因。

本研究采用故障树分析法与条件规则法相结合的综合诊断方法,将其应用于燃气轮机发电机组的转子振动故障诊断研究中,并通过现场测试得以验证,对于使用燃气轮机生产作业的企业具有很大的经济效益。

1 故障树法和条件准则法在燃气轮机故障诊断中的应用

1.1 建立燃气轮机失效故障树

由于燃气轮机的故障特点与其他动力设备的故障特点存在一定不同,燃气轮机各组件之间存在复杂的逻辑关系,从而产生复杂故障模式关系;同时,燃气轮机的故障具有很大的随机性和突发性。故障树分析法能够根据故障产生和发展的逻辑关系以及故障模式关系进行故障树分析,并得到系统所有的故障原因和故障发生部位。因此,故障树分析法比较适合于燃气轮机的故障诊断研究^[11]。

本研究从燃气轮机的主要故障机理及失效模式入手,通过研究分析工程实践中记录的燃气轮机故障失效模式及现场维修案例,寻求燃气轮机故障案例的直接原因、间接原因,乃至根本原因,从分析失效因果关系中的顶事件开始直至寻找导致故障发生的底事件,由果及因、自下而上进行,以 5 类常见的故障失效模式(转子系统故障、叶片故障、冷却系统故障、控制系统故障和燃烧室系统故障)为中间事件,以循序渐进地找出每类事件

发生的所有可能出现的原因,并分解到基本事件为止。本研究绘制出的燃气轮机失效故障树图如图 1 所示。

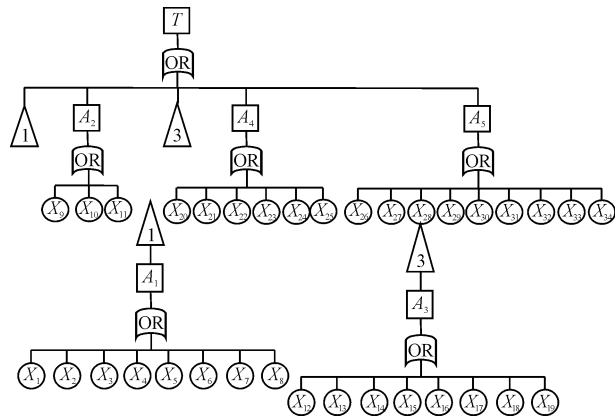


图 1 燃气轮机失效故障树图

燃气轮机故障树(如图 1 所示)共考虑了 34 个不同的底事件。图 1 中各符号所代表的事件如表 1 所示。

表 1 燃气轮机失效故障树基本事件表

符号	事件	符号	事件
T	燃气轮机失效故障	X ₁₅	叶片受冲蚀/磨损故障
A ₁	转子振动故障	X ₁₆	叶片受环境冲击故障
A ₂	冷却系统故障	X ₁₇	叶片蠕变损坏
A ₃	叶片故障	X ₁₈	叶片综合机械故障
A ₄	控制系统故障	X ₁₉	叶片受燃烧系统影响
A ₅	燃烧系统故障	X ₂₀	热电偶故障
X ₁	转子支撑部件松动	X ₂₁	压力传感器故障
X ₂	转子动静件摩擦	X ₂₂	离心调速器故障
X ₃	转子不平衡故障	X ₂₃	毛细温度管故障
X ₄	转子不对中故障	X ₂₄	燃料控制阀故障
X ₅	转子油膜振荡故障	X ₂₅	燃油截止阀故障
X ₆	联轴节不精确或损坏	X ₂₆	热电偶发生故障
X ₇	气动耦合涡动故障	X ₂₇	火焰筒发生损坏
X ₈	转子自激振动故障	X ₂₈	热通道部件损坏
X ₉	冷气通道阻塞故障	X ₂₉	流量分配器出现故障
X ₁₀	冷却水泵出力不足	X ₃₀	燃料流量控制系统故障
X ₁₁	冷却水高点排放阀故障	X ₃₁	外部管道发生泄漏
X ₁₂	叶片疲劳故障	X ₃₂	燃料安全截止阀失效
X ₁₃	叶片脆变故障	X ₃₃	燃烧室喷油系统故障
X ₁₄	叶片热气腐蚀故障	X ₃₄	燃烧室燃料喷嘴阻塞

1.2 基于条件规则的燃气轮机故障树法研究

由于传统的燃气轮机故障树法存在一定的模糊性和不确定性,对故障诊断结果的精度产生不良影响,本研究提出一种基于条件规则的燃气轮机故障树法对传统的燃气轮机故障树法进行技术改进,以提高故障诊断结果的精度。

基于条件规则的故障树分析法就是在故障树的中间事件和底端事件上,增加一定的条件规则,进行物理和逻辑判断,所添加的条件规则可以为单步判断,也可

以分多步进行精确判断,确定故障树每个分支的诊断选择,以便准确地得出故障发生的原因和故障部位。从顶事件出发,在每个节点的地方,分别添加相应的条件规则,不但可以明确故障诊断的思路及方案,也可以迅速地缩小诊断范围,极大地提升故障诊断的精确度。

燃气轮机故障诊断中的条件规则一般为:性能参数或振动参数(功率、温度、压力、流量、转速和振幅等数值)是否变化,是否偏高、偏低、偏大、偏小,以及各种的信号特征是否出现等。条件规则需要技术人员进行相应的监测和实验过程,并且通过监测得到相应的监测数据和故障特征征兆,以便进行相应的故障分析

和判断,从而进一步推理得出燃气轮机故障的根本原因。在建立燃气轮机失效故障树的基础上,本研究通过归纳总结大量的故障案例和维修资料,构建了基于条件规则的逻辑推理模型。本节主要以燃气轮机转子振动故障为例,主要设计出带有条件规则的燃气轮机转子振动故障树(如图2所示),通过基于条件规则的燃气轮机振动故障树对不同现场的目标机组进行故障诊断,燃气轮机诊断技术人员就可以针对相应的监测对象,获得诊断所需的振动数据和信息,运用基于条件规则的燃气轮机故障树法的分析,准确地确定故障发生部位及故障根本原因。

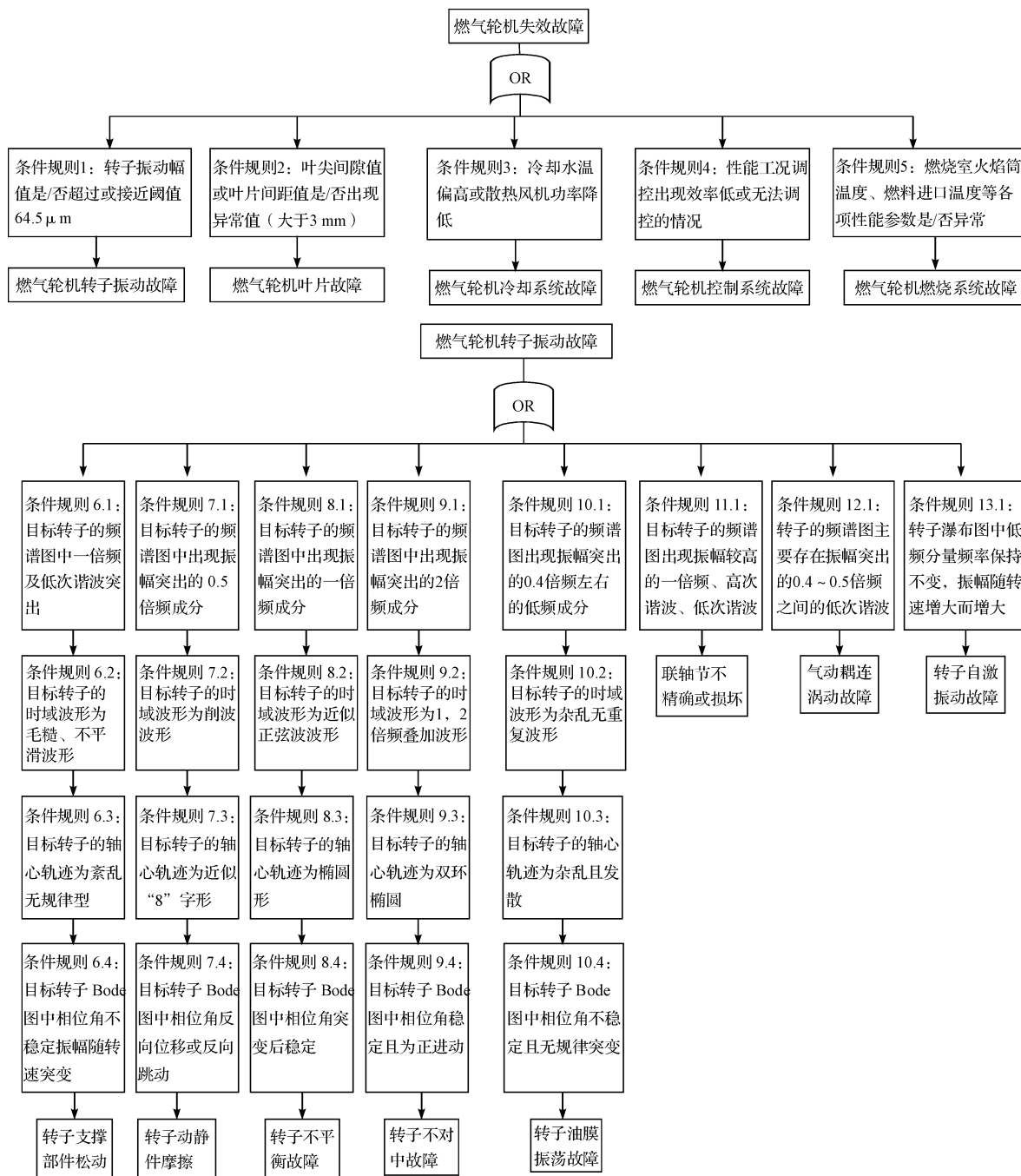


图2 基于条件规则的燃气轮机转子振动故障树

2 基于条件规则与故障树法的诊断实例分析

本研究对某海上石油作业区的4台MARS100燃气轮机发电机组A、B、C、D进行振动测试。使用针对该型号机组的测试系统对机组的5个轴承处转子运行状况进行振动信号的采集、分析和处理,并在线监测5个轴承处转子的振动情况,通过时域谱图、频域谱图、阶次谱图、Bode图、瀑布图、轴心轨迹等分析处理,实现对机组的状态检测及故障诊断。观察在线监测显示的振动信息,其中A、B、D号机组振动幅值均明显小于报警值,转子处于安全振动范围内。然而,C号机4、5号轴承处振动较大。监测4、5号轴承间转子运行转速为8640 r/min左右;故该目标转子的一倍频在144 Hz左右。4号轴承X方向的频域谱图如图3所示,4号轴承Y方向的时域分析图如图4所示,5号轴承处的轴心轨迹图如图5所示。

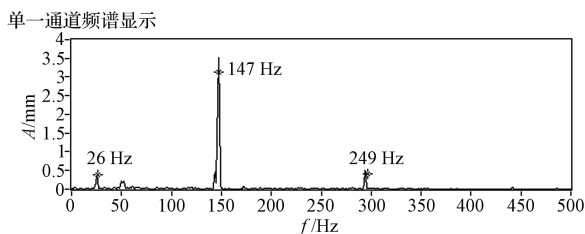


图3 燃气轮机目标转子频谱图

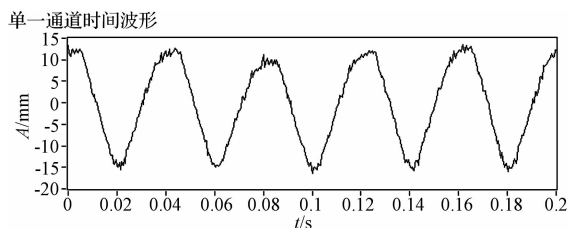


图4 燃气轮机目标转子时域谱图

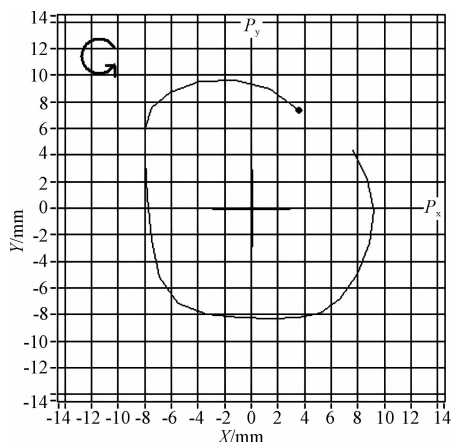


图5 燃气轮机目标转子轴心轨迹图

本研究运用基于条件规则的故障树法进行C号机的故障分析与诊断:

(1)通过对燃气轮机失效故障树的5个中间事件的条件规则逐一进行分析,得出条件规则1:振动幅值接近阈值符合故障规则条件,继而进行中间事件 A_1 燃气轮机转子系统故障的分析;

(2)目标转子频谱图如图3所示,147 Hz频率成分幅值突出,低频频率成分及高阶频率成分都较低;通过分析转子振动子故障树中条件规则6.1~12.1得出条件规则8.1:监测目标转子的频谱图中出现极高的一倍频成分符合故障规则条件,继而进行条件规则8.2的分析;

(3)目标转子时域谱图如图4所示,目标转子的时域波形近似于正弦波,通过分析条件规则8.2:监测目标转子的时域波形为正弦波符合故障规则条件,继而进行条件规则8.3的分析;

(4)目标转子轴心轨迹如图5所示,目标转子的轴心轨迹近似于椭圆,通过分析条件规则8.3:监测目标转子的轴心轨迹为椭圆形符合故障规则条件,由于对目标机组的监测过程中并未进行启停机,转速基本恒定,不进行Bode图及瀑布图分析。

在此,对于C号机组4、5号轴承振动过大的故障分析完毕,通过基于条件规则的故障树法分析,可得出目标转子振动过大的根本原因为转子不平衡故障。可考虑对目标转子做现场动平衡,以解决此类振动故障。

3 结束语

本研究通过对燃气轮机失效故障的分析调研,根据国内外关于研究解决燃气轮机失效故障的有效资料,采用基于条件规则的故障树分析法,结合维修案例实践,设计并建立了符合燃气轮机故障机理的条件规则故障树。结合某海上石油作业区的燃气轮机发电机组的振动故障案例,事实证明,基于条件规则的故障树法具有很严密的逻辑分析能力,可在一定程度上提高燃气轮机故障诊断效率,提高燃气轮机可靠性维护的经济效益与社会效益。同时,采用此法可以防止误判和漏判,具有很高的适用性和针对性,并大大地减轻了故障诊断和机组维护的难度,从而使燃气轮机的操作人员和维修人员快速、熟练地掌握并应用于工程实践。

参考文献(References):

- [1] 金鑫,任献彬,周亮.智能故障诊断技术研究综述[J].理论与方法,2009,28(7):30-32.
- [2] 张春华,刘伟.基于故障树的故障诊断专家系统[J].兵

元离开缺陷所在位置的距离。缺陷的尺寸越大,质量单元越接近缺陷所在位置,那么,有缺陷的固有频率值与无缺陷的固有频率值之间的差值就越大,进而说明整个结构的刚度降低越明显。所以,通过移动载荷法可以定性判断出起重机主梁上缺陷所在的位置,并且在实际的起重机结构无损检测过程中,也可以运用该方法进行缺陷定位。

4 结束语

本研究利用移动载荷法,建立了型号为 MH0.5-3.5 的单主梁门式起重机的三维模型和有限元模型,并且对 4 组不同缺陷的模型进行了小车和载重共 100 kg 在主梁上运动过程的模拟,提取了两个典型振型的固有频率曲线。笔者对模拟结果进行了固有频率值求差处理,并得出“质量单元在起重机主梁上的移动改变了结构固有频率”的结论。当尺寸的缺陷越大,质量单元越靠近缺陷所在位置,则有缺陷结构的固有频率值与无缺陷结构的固有频率值之间的差就越大,进而达到缺陷定位的目的,该结果为起重机无损检测提供了重要依据。

参考文献 (References):

[1] 刘永峰,田洪森. 国内外工程起重机发展状况研究[J]. 施工技术,2008,37(s2):476-477.

[2] 王小明,卢志强. 国内外大型起重机的研究现状及发展趋势[J]. 机电产品开发与创新,2009,22(2):6-10.

[3] 周俊坚,王黎斌,杨 勇. 基于 ANSYS 的一种造船门机金属结构的有限元分析[J]. 机械,2012,39(11):49-53.

[4] 胡留现,李一帆,王慧萍. 小型门式起重机静力学及模态分析数值模拟的研究[J]. 矿山机械,2010,38(15):72-75.

[5] 朱从军. 基于有限元法的轻型港口起重机结构动态分析[J]. 中国工程机械学报,2008,6(3):333-339.

[6] 龚凌诸,杨晓翔,钟舜聪,等. 基于环境激励的港口起重机工作模态分析[J]. 机电工程,2011,28(4):422-424.

[7] 仲伟秋,孙 国,杨学军,等. 桥梁损伤的一种振动检测方法[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005,24(5):698-699.

[8] 杨永刚,罗 韧. 有关桥梁振动检测技术的讨论[J]. 低温建筑技术,2008,30(4):91-92.

[9] ZHONG Shun-cong, OYADIJI S O, DING Kang. Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies[J]. **Journal of Sound and Vibration**,2008,311(3-5):1075-1099.

[10] HUANG Qin-dan, GARDONI P, HURLEBAUS S. A probabilistic damage detection approach using vibration-based non destructive testing[J]. **Structural Safety**,2012(38):11-21.

[11] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequencies: a review [J]. **Engineering Structures**,1997,19(3):718-723.

[12] 工自动化,2009,28(11):15-17.

[3] 谢春玲,戴景民. 燃气轮机故障诊断技术研究综述及展望[J]. 汽轮机技术,2010,52(1):1-3.

[4] MEHER-HOMJI C B, GABRILES G. Gas Turbine Blade Failures-causes, Avoidance, and Troubleshooting[C]. Proceedings of the 27th Turbomachinery Symposium,1998:129-179.

[5] 邓 湘,吴 勇,唐 宇. 基于小波包分析的高速牵引电机轴承故障诊断研究[J]. 现代电子技术,2012,35(15):106-109.

[6] 于宗艳,韩连涛,孟娇茹. 基于人工神经网络的航空发动机故障诊断方法[J]. 现代电子技术,2013,36(2):65-67.

[7] 蒋 亮,李书明,郝 英,等. 航空发动机气路故障诊断研

[8] 陈成春. 基于条件规则的故障树分析法的研究与应用[J]. 制造业自动化,2012,34(1):82-85.

[9] 陈 军,李 英. 数控车床自动力架常见故障诊断与维修[J]. 现代制造技术与装备,2012(6):44-46.

[10] BORGUET S, LÉONARD O. Comparison of adaptive filters for gas turbine performance monitoring [J]. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 2010, 234(7):2202-2212.

[11] 范小霞,古小平,李国志,等. 压气站燃气轮机模糊故障树失效分析[J]. 天然气与石油,2010,28(6):10-14.

[编辑:张 翔]

(上接第 801 页)

究现状[J]. 中国民航学院学报,2005,23(5):60-65.

[编辑:张 翔]