

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2022) 07-062-04 中图分类号: TP391.97

基于数据驱动模型的轴流式压气机性能分析

Performance Analysis of Axial Compressor Based on Data Driven Model

★ 杨宝轩, 邱浩 (北京太阳宫燃气热电有限公司, 北京 100028)

摘要: 轴流式压气机性能分析通常采用气路分析方法或实验方法进行研究, 但是以北京某燃机电厂为例, 机组大多在部分负荷下工作, 因此采用数学模型难以准确预测压气机的性能。本文提出基于运行数据驱动, 折合到标准工况下, 进行修正出力和热耗率的计算, 获得压气机的状态。同时基于进气端颗粒物浓度监测装置, 计算压气机吸尘量和颗粒物分布, 结合已有文献中CFD仿真结果, 建立压气机性能分析方法, 从而对压气机的健康状态进行全面评估。

关键词: 压气机; 性能分析; 状态监测; 数据驱动

Abstract: Axial compressor performance analysis is usually carried out by gas path analysis method or experimental method. However, taking a gas turbine power plant in Beijing as an example, most of the units work under partial load, so it is difficult to accurately predict compressor performance using mathematical model methods. This paper proposes to calculate the corrected output and heat rate based on the operating data drive, converted to the standard operating conditions, and obtain the compressor state. At the same time, based on the particulate matter concentration monitoring device at the intake end, the compressor dust absorption and particulate matter distribution are calculated. Combined with the CFD simulation results in the existing literature, a compressor performance analysis method is established to comprehensively evaluate the health status of the compressor.

Key words: Compressor; Performance analysis; Condition monitoring; Data driven

1 引言

燃气轮机由压气机、燃烧室和透平三部分组成, 重型燃气轮机性能的优劣主要取决于通流关键部件 (进气滤网、压气机进气导叶、压气机叶片、燃烧室、透平

叶片等) 的性能。燃气轮机运行时需要吸入大量的空气, 空气中的颗粒物 (包括灰尘、沙粒、花粉等) 经由进气过滤器吸入压气机内部, 引起压气机积垢、腐蚀或外物撞击等失效现象。其中, 积垢是最重要的压气机失效现象之一, 研究发现燃气轮机机组性能下降的70%~85%是由压气机积垢造成^[1]。积垢是颗粒物沉积在压气机叶片表面而形成的, 将会造成压气机叶片表面粗糙度增加以及叶片型面的改变, 进而影响其流通面积, 降低空气的质量流量, 导致压气机效率等性能指标下降。

然而在燃气轮机运行监测变量中, 无法直接获得压气机效率, 也无法实现对压气机叶片积垢状态的直接监测, 因此通常采取间接手段对压气机的积垢严重程度进行评估。压气机积垢是可恢复的失效形式, 运行过程中通常采用离线水洗和在线水洗的方法进行叶片积垢的清除, 以恢复机组的性能。对于积垢严重程度的判断是决定水洗时间的重要依据, 因此研究压气机性能退化趋势及其预测方法, 是目前迫切需要解决的问题。

2 压气机性能退化预测研究现状

随着燃气轮机投运时间的不断延长, 压气机健康状态必将逐渐下滑, 导致流通能力、压气机增压比、叶片及轴系振动特性等发生变化, 使燃气轮机性能逐渐下降。长期以来, 国内外针对重型燃气轮机通流关键部件性能退化机理及评估预测模型持续开展了研究。Kurz^[2]

建立了压气机的性能计算模型, 引入线性偏差因子, 全面分析了叶片结垢导致的压气机性能退化机理, 在此基础上, 国内外的研究学者对进气滤网和叶片结垢的性能退化机理进行了大量研究, 用不同的表面粗糙度表征结垢的严重程度^[3], 并采用数值仿真^[4]和简化实验相结合的方法研究结垢对部件性能的影响。近年来, 有学者通过修正质量流量、改进级堆叠方法、气路分析法建立结垢的性能退化模型。针对结垢这一个复杂的动态形成过程, 需要对多工况、复杂流动条件下的单层和多层颗粒物的沉积机理进行微观层面的深入研究, 也需要探讨机理模型和运行数据相结合的性能退化建模方法。

近年来, 研究人员提出了多种压气机性能计算和预测的数学模型, 但是由于压气机的性能与工况、环境条件具有直接的关系, 尤其是对于燃气热电厂来说, IGV (进口导叶) 的调节较为频繁, 运行工况较为复杂, 因此很难获得准确的计算结果。因此, 本文从现场运行易于操作的角度出发, 基于运行数据驱动模型, 计算自压气机清洗以来机组的折合出力和折合热耗, 同时基于进气率监测系统的监测数据, 双向评估压气机的性能劣化趋势, 为机组的清洗提供决策依据。

3 压气机积垢状态评估方法

以北京市某燃机电厂为例, 该电厂配置有两台美国GE公司生产的9FA型燃气轮机, 采用燃气蒸汽联合循环发电, 燃气轮机型号为PG9351FA, 主要为北京地区区域供热和电力调峰使用。根据2017~2018年的燃机运行数据, 对压气机的性能趋势进行了分析。

3.1 运行数据的前处理

燃气轮机运行数据来自于现场传感器的监测数据, 然而传感器的测量数据受到众多因素的影响, 会导致测量误差和不确定测量值的出现, 因此在进行运行数据分析之前, 需要剔除异常数据和不确定性数值。

本文用于评估和分析燃气轮机压气机性能的运行数据为2017年11月15日至2018年4月5日之间的数据。

3.2 燃气轮机修正出力和热耗

根据北京某电厂提供的燃机历史数据进行分析, 对效率和出力修正到ISO状态下的数据 ($T=15^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=60\%$, 大气压=1,013bar)。修正出力和热耗的计算公式如式 (1)、式 (2) 所示:

$$P_{\text{修正}} = P_{\text{实际}} \times \frac{101.325}{P_1} \times \sqrt{\frac{T_1 + 273.15}{288.15}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{修正}}$ 为修正出力, MW; $P_{\text{实际}}$ 为SIS系统测量的燃机实际出力, MW; P_1 为入口压力, hPa; T_1 为入口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$q_e = \frac{3600 \times \dot{m}_f \times \text{LHV}}{P_{\text{修正}} \times 10^6} \quad (2)$$

式中: q_e 为热耗, GJ/MWh; LHV为混合气燃料的热值, kJ/kg, 该值为动态变化的数值; \dot{m}_f 为天然气的质量流量, kg/s; $P_{\text{修正}}$ 为燃机的修正出力, MW。基于运行数据, 根据公式 (1) 计算修正出力, 修正出力与运行时间之间的关系如图1所示, 从图中可以看出随着运行时长的增加, 总体上出力呈现逐渐下降的趋势, 但是中间存在较多的分散点。分析运行原始数据可以发现, 该机组频繁在低IGV开度下运行, 且IGV调控比较频繁, 因此需要研究不同IGV开度下出力与运行时长的关系。

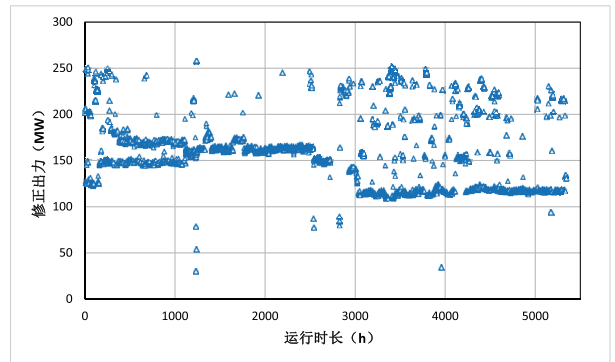


图1 修正出力与运行时长之间的关系

将IGV开度进行分类, 从 45° ~ 85° IGV开度范围, 每间隔5%划分为一段, 共划分为8个区间, 将IGV开度为 45° ~ 60° 区间下的修正出力与运行时长之间的关系绘制如图2所示。从图2中可以看出, 随着运行时间的增长, 出力呈现明显的下降趋势, 且变化趋势是相同的。从拟合的线性关系中可以看出, 随着IGV开度的增大, 出力下降幅度更明显。在机组运行的这段时间内, 燃烧室和透平均处于健康状态, 因此出力的下降主要是由于压气机的积垢造成的。当IGV在最大开度的位置, 下降幅度大约为10MW ($\approx 4\%$)。

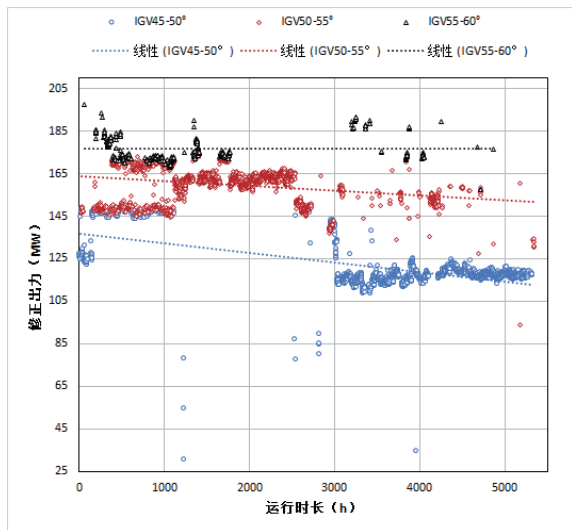


图2 不同IGV开度下修正出力与运行时长之间的关系

工厂运行时大多数IGV的位置为45°~55°，在这些IGV位置时，可以清楚地看到污垢造成的影响。由于电网决定功率水平，这对生产没有影响，但是热耗的升高会对燃料的消耗和工厂的经济效益产生影响。并且燃料消耗的增加和CO₂的排放有直接关系，干净的机器可以最小化碳排放。因此，对不同IGV开度下热耗率进行了分析，其结果如图3所示，从图中可以看出两次离线水洗之间，在不同IGV位置，修正后的热耗增加，这是由两次离线水洗之间吸入的污垢导致的不可避免的结果。当IGV开度小于60°时，IGV位置对热耗增加有显著影响。在低的IGV开度下，污垢增加，相关的热耗也在提高。该电厂主要以较低的IGV开口位置运行，因此污垢对燃料的经济性产生了负面影响。

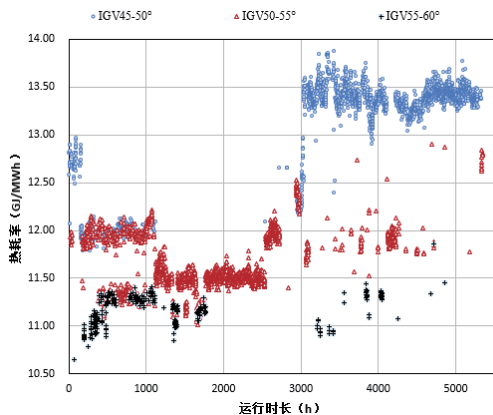


图3 不同IGV开度下热耗率与运行时长之间的关系

3.3 压气机积垢状态评估

压气机积垢造成出力下降、热耗率增加，而对于压气机积垢状态的评估是非常困难的，一方面是因为难以利用现场传感器监测积垢状态，另一方面对于在部分工况下运行的燃机机组来说，压气机效率的精确计算是非常困难。因此，本文提出采用在进气系统安装用于监测颗粒物浓度的传感器如图4所示，该传感器采用光学测量和机器学习算法相结合，可实时获得0.3~10微米不同粒径颗粒物在进气过滤器前后两端的浓度。

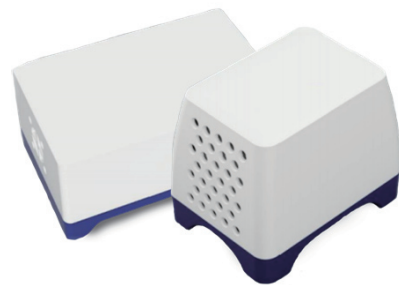


图4 颗粒物浓度监测传感器

根据传感器的监测结果可计算进入压气机内部灰尘的数量和粒径分布，如图5所示。研究人员采用CFD的仿真方法对压气机在不同工况下的积垢生成速率进行分析，仿真结果表明由于积垢造成机组出力损失呈指数级增长^[1,5]，在1000~2000小时运行之后，颗粒物沉积厚度的稳定使得机组性能趋于稳定，其表达式如式(3)所示：

$$\Delta P = a(1 - e^{-bt}) \quad (3)$$

式中： ΔP 为机组出力损失，MW； t 为时间，h； a 、 b 为常数， $a=0.07$ ， $b=0.004$ 。

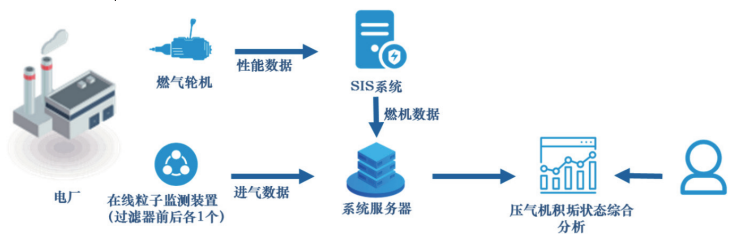


图5 压气机积垢状态评估系统

基于图5所示的系统，根据传感器监测的数据，可以计算出清洗之后指定运行时长下吸入压气机内部的灰尘数量。根据杨化动论文中的仿真结果^[1]，可以计算出在特定工况下吸入压气机内部灰尘沉积在压气机叶片的

情况,从而计算出积垢对压气机性能的影响。为验证分析结果的正确性,根据SIS系统的运行数据,反向评估压气机的积垢严重程度。因此,采用正反向相结合的方法,可以实现压气机状态的评价。

4 结论

压气机积垢是造成燃机机组性能下降的最主要影响因素,针对压气机性能计算存在准确度不足的问题,考虑电厂工作人员的实际情况,提出采用厂级运行数据,结合进气系统颗粒物浓度传感器,计算进入压气

机内部的灰尘数量和粒径分布。结合已有研究文献中CFD仿真分析的结果,通过正反向相结合的方法,对压气机健康状态进行分析。**AP**

作者简介:

杨宝轩(1988-),男,北京人,中级工程师,学士,现就职于北京太阳宫燃气热电有限公司,主要从事燃气联合循环机组机务技术管理工作。

邱浩(1991-),男,湖南岳阳人,助理工程师,学士,现就职于北京太阳宫燃气热电有限公司,主要从事燃气发电节能管理工作。

参考文献:

- [1] 杨化动. 积垢的形成机理及其对轴流式压气机性能的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [2] Rainer Kurz, Klaus Brun. Degradation in Gas Turbine Systems[C]. Proceedings of 18 ASME Turbo Expo. Munich, Germany: 2018, 1 - 10.
- [3] Bammert K, Woelk G U, Bammert K, Woelk G U. The Influence of the Blading Surface Roughness on the Aerodynamic Behavior and Characteristic of an Axial Compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1980, 102 (2) : 283.
- [4] 张龙新, 陈绍文, 孙士珺, 等. 污垢沉积对某轴流压气机中间两级性能影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, (35) : 130 - 136.
- [5] 杨承, 黄志峰, 马晓茜. 联合循环机组中燃气轮机部件劣化对功率效率的敏感性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (22) : 5803 - 5810.