

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2022) 05-076-04 中图分类号: TP206

# 燃气轮机进气过滤系统健康状态监测方法

Health Condition Monitoring Method of Gas Turbine Intake Filtration System

★ 杨宝轩 (北京太阳宫燃气热电有限公司, 北京 100028)

**摘要:** 燃机进气过滤器是确保压气机安全可靠经济运行的重要保障, 然而目前缺乏对过滤器健康状态的有效监测手段。为解决该问题, 同时考虑国内燃机机组多处于部分负荷运行的实际情况, 提出采用折合标准工况的压降损失与过滤器在线过滤效率监测相结合的方法, 评价过滤器的健康状态。通过对太阳宫燃机电厂的应用, 证明该方法可以识别过滤器的堵塞和局部泄露失效状态。

**关键词:** 进气过滤器; 压降损失; 状态监测; 过滤效率

**Abstract:** The gas inlet filter is an important guarantee to ensure the safe, reliable and economical operation of the compressor. However, there is currently a lack of effective monitoring methods for the health of the filter. In order to solve this problem, considering the actual situation that most gas turbine power plants in China are operating at partial load, a method combining the pressure drop loss equivalent to standard operating conditions and the online filtration efficiency monitoring is proposed to evaluate the health status of the filter. Through the application to the Taiyangong gas turbine power plant, it is proved that the method can identify the clogging of the filter and the failure state of local leakage.

**Key words:** Air Inlet filter; Pressure drop loss; Condition monitoring; Filtration efficiency

## 1 引言

燃气轮机进气过滤器是保障燃机进气空气质量和压气机洁净度的重要系统, 是燃气轮机安全可靠经济运行的重要保障, 是有效保护压气机的唯一手段<sup>[1]</sup>。如果进气过滤器过滤效果不佳或选型不当, 会导致压气机积垢、磨损、腐蚀、疲劳和外物撞击等失效模式的出现, 压气机性能严重退化, 可造成的输出功率损失在2%~20%之间<sup>[2]</sup>。

随着运行时间的增长, 大量颗粒物沉积在过滤器表面, 造成过滤器的堵塞或泄露, 进而影响过滤效率和压降损失。电厂运行人员一般通过压降损失这一指标对过滤器健康状态进行评价。然而, 目前的评价方法主要存在如下两方面的问题:

(1) 对于国内运行的燃气轮机发电机组来说, 多数均在部分负荷下运行。其运行的工况参数、环境变量均影响过滤器的压降损失, 因此仅仅采用压降损失这一指标进行评判是不科学的, 需要将SIS系统实测的压降损失折合到标准工况下进行分析。

(2) 目前对于过滤器的状态, 通常只关注过滤器的堵塞, 也就是压降损失的增大和压降损失阈值。但是, 由于腐蚀等现象的存在, 过滤器也会出现局部泄漏等问题, 影响进气质量和性能参数, 因此也需要关注过滤器的这一故障状态。

针对存在的问题, 本文基于机组的运行数据, 对过滤器的健康状态进行了分析, 在此基础上, 提出燃气轮机进气过滤系统状态监测的方法。

## 2 燃机进气过滤系统状态监测研究现状

对于燃气轮机发电机组来说, 机组健康状态监测通常关注气路系统, 各大生产厂商和相关的科研人员对于压气机、燃烧室和透平的状态监测进行了大量的研究工作。而对于压气机前端的进气系统而言, 目前缺少有效的状态监测手段。其主要的原因是进气系统内部的流动非常复杂, 目前没有适合的监测装置。同时, 机组运

行工况复杂, 很难建立进气系统健康状态与机组运行数据(如出力、热耗)等对应关系。

国内研究学者<sup>[3]</sup>提出采用实验测试平台对进气系统性能进行评价和测试的方法, 通过光学传感器进行测量, 基于质量浓度的变化进行评判。然而, 对于过滤器性能的检测, EN779和ISO16890<sup>[4]</sup>通常采用典型颗粒颗粒物进行过滤效率的检测。由于上述的传感器无法准确获得进气系统的全粒径谱信息, 所以无法基于现行的过滤器效率检测手段进行在线监测。

另外, 清华大学提出了燃气轮机进气过滤器健康状态评价方法, 解耦五个影响压降损失的环境因素的影响效果, 建立了集成气路部件模型和过滤器压降损失的数学模型。但是该模型的普适性还有待检验, 另外, 此算法非常复杂, 很难应用于现场人员使用。

为分析燃气轮机机组过滤器状态及其影响因素, 对太阳宫燃机电厂2017~2018年两次清洗间的运行数据进行了分析, IGV开度与压降损失之间的关系如图1所示。

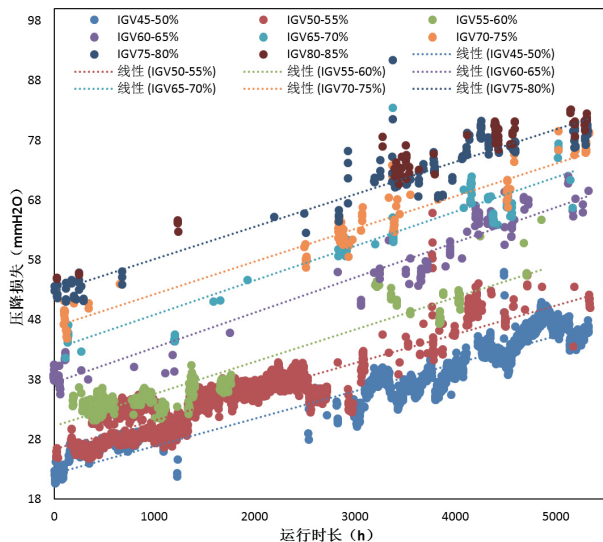


图1 不同IGV开度下压降损失与运行时长之间的关系

基于运行数据, 可以发现压降损失除与IGV开度有关之外, 还与环境温度、湿度等外部环境因素均有关, 如式(1)所示:

$$\Delta p = f(T, P, h, IGV, \dot{m}) \quad (1)$$

其中,  $\Delta p$ 为过滤器压降损失(mmH<sub>2</sub>O), T、P、h、IGV、 $\dot{m}$ 分别为环境温度、压力、湿度、IGV开度和空气质量流量。

从式(1)中可以看出, 压降损失受到多种因素的影响, 如果解耦各个因素是极其困难的。同时, 我国运行的燃气轮机多处于部分负荷下工作, 因此, 仅仅通过压降损失数值的变化无法准确判断过滤器的状态。

### 3 过滤器修正压降损失的计算

#### 3.1 压降损失修正

北京太阳宫燃机电厂多处于部分负荷下运行, 因此, 采用压降损失指标作为过滤器状态评价时, 不能仅仅通过数值大小进行判断, 而应该考虑影响该指标的温度、湿度、IGV开度等因素, 将运行工况折合成标准工况下进行分析<sup>[5]</sup>。

在不同温度下, 空气的粘度不同, 进而影响空气在过滤器内的流动, 因此在进行压降损失的修正时, 引入温度系数 $f_T$ 。机组运行标准工况的温度为15℃, 对应的空气粘度 $\mu_{ref}=0.01784\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,  $f_T$ 定义如式(2)所示:

$$f_T = \frac{\mu_T}{\mu_{ref}} \quad (2)$$

式中,  $\mu_T$ 为实际运行温度时空气粘度(单位为:mPa·s)。

在湿度较大的情况下, 空气的颗粒物会以糊状粘附在过滤器表面, 引起过滤器压差的急剧上升。因此, 湿度对颗粒物在过滤器内的运动和沉积产生重要的影响, 在进行标准工况压降损失修正时, 引入湿度影响系数 $f_h$ 。图2为太阳宫燃气电厂不同运行时间内, 过滤器内压降损失与湿度的关系。

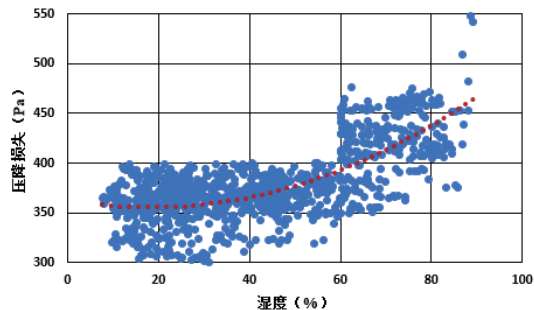


图2 进气过滤器压降损失与湿度关系

标准工况对应的湿度为60%, 根据图2, 将湿度为60%时的压降损失定义为 $\Delta P_{ref}$ ,  $f_h$ 定义如式(3)所示:

$$f_h = \frac{\Delta P_{实} - \Delta P_{ref}}{\Delta P_{ref}} \quad (3)$$

式中,  $\Delta P_{\text{实}}$ 为SIS系统中获得的实测点的压降损失(Pa),  $\Delta P_{\text{ref}}$ 为湿度为60%时的压降损失(Pa)。

另外, 过滤器的压降损失与进气系统的流量具有直接的关系, 根据燃气轮机进气系统的流动情况, 过滤器多孔过滤介质中的流体流动可以采用达西定律进行研究, 如式(4)所示:

$$\Delta P = -\frac{\mu \cdot V}{K} \quad (4)$$

式中,  $\mu$ 为空气粘度,  $V$ 为空气在多孔过滤介质(过滤器)中的流动速率,  $K$ 为多孔介质的渗透率。

从式(4)可以看出, 进气系统过滤器压降损失与空气的流动速率成正比, 即与进气系统的空气质量流量成正比, 因此在进行压降损失修正时, 引入质量流量系数 $f_Q$ 。将标准工况下的设计空气质量流量记为 $Q_{\text{ref}}$ ,  $f_Q$ 定义如式(5)所示:

$$f_Q = \frac{Q_{\text{实}}}{Q_{\text{ref}}} \quad (5)$$

燃气轮机进气系统过滤器的修正压降损失定义如式(6)所示:

$$\Delta P_{\text{修}} = \Delta P_{\text{实}} / (f_T \cdot f_h \cdot f_Q) \quad (6)$$

另外, 燃气轮机进气过滤器的压降损失还与大气环境中颗粒物的大小、颗粒物的种类、颗粒物的粒径分布等因素有关。因此, 如果基于压降损失修正值对过滤器性能进行评判, 还需要对过滤器的过滤效率进行监测和分析, 从而判断过滤器的健康状态。

### 3.2 案例应用

采用上述压降损失修正的算法, 对北京太阳宫燃气电厂#1、#2机组进气过滤器的压降损失进行计算, 同时结合所安装的进气系统粒子在线监测与捕集系统对过滤器健康状态进行评价分析。机组位于北京市朝阳区, 所分析数据为2021年11月13日至2021年12月6日SIS系统的运行数据, 以及在该时段在线粒子监测装置的监测数据。

#### (1) #1、#2机组压降损失修正的计算

#1、#2机组进气系统配置与结构相同, 安装在厂区的同一位置, 采取不同的过滤器类型。从该机组的运行数据可以发现, 在24天的时间间隔内, 温度的分布范围为 $[-1.2^{\circ}\text{C}, 18.6^{\circ}\text{C}]$ , 湿度的分布范围为 $[8.47\%, 82.1\%]$ , IGV开度的分布范围为 $[49.3^{\circ}, 81.2^{\circ}]$ , 因此机组处于变工况、部分负荷下运行, 运行工况较为复

杂。SIS运行数据为每小时一条记录, 基于式(1)~式(6), 可以计算得到机组每小时的压降损失修正值, 将某天24小时压降损失修正值的算术平均值作为该天的数值。计算的结果如图3所示, 可以看出, 将压降损失折合成标准工况下所得到的修正值与测量值之间具有较大的差距, 因此不能直接将测量值用来评估过滤器的健康状态。

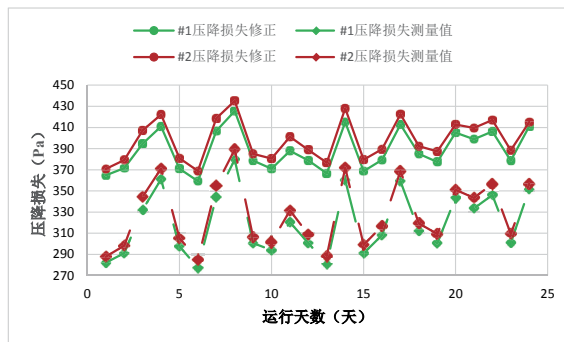


图3 进气过滤器压降损失及其修正值

#### (2) 过滤器健康状态的评估

采用上述计算方法进行修正时, 考虑了环境温度、湿度、流量、IGV开度, 但是忽略了颗粒物的属性。有研究学者提出, 采用颗粒物质量浓度因子进行修正, 但是尚未有研究证明颗粒物浓度的大小与压降损失直接具有直接的线性关系。因为, 压降损失不仅与颗粒物浓度的大小有关, 还与颗粒物的粒径分布、属性以及环境属性有关。因此, 对于过滤器健康状态的评估, 需要在压降损失修正计算的基础上, 结合过滤器过滤效率的监测, 进行综合评判。

对于进气系统过滤器健康状态的监测, 一直缺乏有效的监测传感器, 因此只能根据压降损失和机组出力的变化趋势进行判断。太阳宫燃气电厂安装了在线粒子监测装置, 集成多传感器技术和机器学习算法, 实现进气过滤器前后端粒子的质量浓度、数量浓度以及环境质量的监测, 如图4所示。

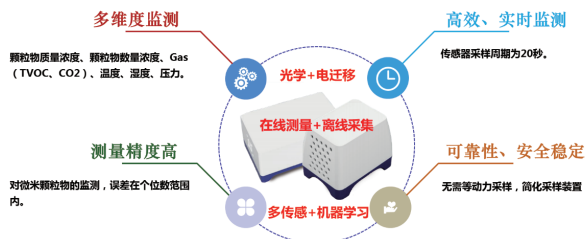


图4 在线粒子监测装置

选取0.3微米粒子作为典型粒径，将进气过滤器过滤效率定义如式(7)所示：

$$\eta_f = \frac{N_{bf} - N_{bh}}{N_{bf}} \quad (7)$$

其中， $\eta_f$ 为过滤器的过滤效率， $N_{bf}$ 为过滤器前0.3微米粒子的数量浓度， $N_{bh}$ 为过滤器后0.3微米粒子的数量浓度。

对于进气过滤器，常见的失效形式有堵塞和局部泄露两种。对于堵塞失效情况，采用压降损失修正值可以识别。但是对于局部泄露失效情况，尤其是对于不是非常严重的局部泄露，采用压降损失很难进行表征。集成采用进气过滤器过滤效率和压降损失修正指标，既可以识别过滤器严重的堵塞失效，同时可以识别过滤器早期泄露的早期失效，可以有效保障燃机机组的安全与可靠运行。

从图3可以发现，#1号机组的修正压降损失小于#2号机组，因此#1号机组的修正出力（折合到标准工况）应该大于#2号机组，但是根据SIS数据计算发现#2号机组的修正出力大于#1号机组。可以发现，仅根据压降损失这一指标去评价进气系统甚至整个机组的性能，有可能造成误判断。采用本文提出的方法，通过监测进气系统过滤器的过滤效率，如图5所示，可以发现#1号机组的过滤效率出现了明显的下降，已经低于过滤器的初始效

率，同时结合两机组的压降损失数值的对比，因此可以初步判定过滤器可能出现了局部泄露。

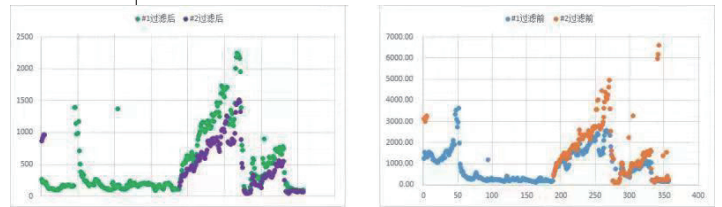


图5 #1、#2机组过滤器过滤效率

## 4 结论

针对燃气轮机进气系统健康状态缺乏有效监测的技术问题，考虑机组在部分负荷工况下运行的情况，提出了采用折合到标准工况下的修正压降损失和进气系统在线粒子监测装置相结合的方法，可以识别进气过滤器的堵塞和局部泄露两种失效状态。通过对北京太阳宫燃机电厂运行数据的分析，可以证明该方法是可行和有效的。AP

### 作者简介：

杨宝轩（1988-），男，北京人，中级工程师，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。

### 参考文献：

- [1] GB/T 15736-2016. 燃气轮机辅助设备通用技术要求[S].
- [2] 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.
- [3] 张涛, 付忠广, 刘志坦, 郝洪亮, 周浩, 刘玉刚. 燃气轮机进气过滤器性能及测试评价方法[J]. 汽轮机技术, 2020, 62 (06) : 401 - 405, 433.
- [4] Ulf S., Frederick M., Thomas S. et.al. The effect of air filtration on gas turbine performance degradation-ISO 16890 and its application to real engine data[C]. The Future of Gas Turbine Technology 9th International Gas Turbine Conference, 2018.
- [5] 清华大学. 一种燃气轮机进气过滤系统运行状态实时监测方法[P]. 中国: CN112414911B, 2021. 8. 24.