

汽轮机通流部分故障诊断的热力判据研究

(华北电力大学北京动力工程系) 杨勇平 杨 昆

摘 要: 针对用于汽轮机通流部分故障诊断的四种热力判据(相对内效率、焓效率、当量通流面积、膨胀线夹角),进行了系统的分析与研究,提出了每种判据的诊断机理与实施方法,并以某电厂 200 MW 机组为例,进行了定量分析与计算。

关键词: 汽轮机;通流部分;故障诊断;热力判据

中图分类号: TK262

1 引言

近年来,随着火电厂自动化水平的提高以及计算机在运行管理领域的广泛应用,实现机组的“预知性维修”,正在受到电力生产部门的高度重视。预知性维修,综合了在线监测、故障诊断、计算机管理、辅助决策等技术,对提高机组的经济性与可靠性具有重要意义。汽轮机作为整个电厂的核心设备,是实施火电厂预知性维修的重点与难点。汽轮机通流部分腐蚀、积垢、磨损、损坏,是汽轮机最常见的故障,并且这些故障的发生总是伴随着一些热力参数的变化。因而可以通过监视热力参数的变化,研究热力参数与故障之间的内在联系,实现汽轮机通流部分的故障诊断^[1]。本文针对用于汽轮机通流部分故障诊断的四种热力判据(相对内效率、焓效率、当量通流面积、膨胀线夹角),进行了系统的分析与研究,提出了每种判据的诊断机理与实施方法,并以某电厂 200 MW 机组为例,进行了定量分析与计算。

2 四种热力判据

2.1 相对内效率

相对内效率是应用最普遍的汽轮机性能评价指标,它是指汽轮机某级或级组的实际焓降与理想等熵焓降之比,某级组 i 相对内效率的表达式为:

$$Z_i = \frac{h_{in}^i - h_{out}^i}{h_{in}^i - h_s^i} \quad (1)$$

式中, $h_{in}^i, h_{out}^i, h_s^i$ 分别为级组 i 的入口焓、出口焓及等熵焓。

当汽轮机某级组通流部分发生故障时,导致其相对内效率下降,因而可以通过监视汽轮机各级组

相对内效率的变化,初步诊断出通流部分发生的故障。在实际诊断中,为了得到汽轮机各级组相对内效率,不仅需要测量各抽汽点的压力,同时还要测量各点的温度。在此基础上调用水蒸气参数计算程序,计算相关的焓与熵,进而计算出其相对内效率。汽轮机在变工况时,中间级组的相对内效率基本不随负荷变化。调速级由于受到不同程度的节流,其相对内效率随负荷变化较大,因此需建立调速级相对内效率与负荷的函数关系式。对于由最后一段抽汽与低压缸排汽构成的末级组,由于其排汽处于湿蒸汽区,目前尚无成熟准确的测量排汽焓的技术,因此暂不考虑末级组的诊断。

在诊断时,将汽轮机各级组的实测的相对内效率与对应负荷下的基准相对内效率进行比较,即可诊断出故障发生的部位以及故障的严重程度。利用相对内效率进行通流部分故障诊断的不足之处是不能区分出故障的具体种类(磨损还是阻塞);另一方面正如作者在文献[2]中指出的那样,由于“重热现象”,使得汽轮机总体相对内效率与各级组的相对内效率变得更加复杂。

2.2 焓效率

汽轮机的焓效率是基于热力学第二定律基础上提出的评价汽轮机性能优劣的参数指标,它能真实反映蒸汽在汽轮机内由热能转变为机械能过程中的不可逆损失,克服了相对内效率的定义中需要与假想的等熵膨胀点进行比较的缺点,而是将膨胀过程中实际的焓降与减少的焓量进行比较,同时克服了相对内效率中“重热现象”的影响。具体诊断过程及方法与相对内效率类似。某级组 i 焓效率的表达式为:

$$Z_e = \frac{h_{in}^i - h_{out}^i}{e_{in}^i - e_{out}^i} \quad (2)$$

式中, $h_{in}^i, h_{out}^i, e_{in}^i, e_{out}^i$ 分别为级组 i 的入口焓、出口焓、入口焓及出口焓。

2.3 膨胀线夹角

在 $h-s$ 图中,汽轮机膨胀过程性能的优劣可以通过膨胀线与水平线的夹角反映出来,夹角越大,相对内效率越高;夹角越小,相对内效率越低。因此可以利用膨胀线夹角进行汽轮机通流部分的故障诊断。

收稿日期: 1999-02-10; 修订日期: 1999-04-13

作者简介: 杨勇平(1967-),男,副教授,从事火电厂经济性、节能、性能监测、故障诊断、信息管理方面的研究,华北电力大学系副主任。通讯处: 100085 北京清河四拨子

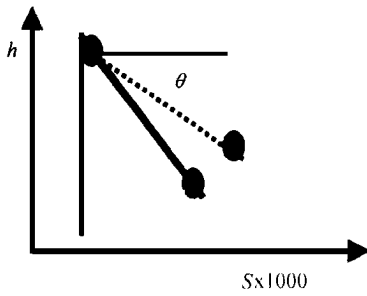


图 1 汽轮机膨胀线夹角示意图

如图 1 所示, 实线 AB 表示汽轮机某级组在给定负荷时基准膨胀线, θ 即为此时的膨胀线夹角。我们分别定义级组的焓降与熵增为:

$$k = h_a - h_b \quad (3)$$

$$e = S_b - S_a \quad (4)$$

由此可以计算出膨胀线夹角:

$$\theta = \arctg \left[\frac{k}{e} \right] \quad (5)$$

由于 k 与 e 的数量级相差较大, 使得 θ 接近 90° 。为此我们以 $(s \times 1000)$ 作为横坐标。在实际运行中, 当级组发生故障时, 相对内效率下降, θ 减小, 如图中虚线 AC, 膨胀线夹角变为 θ' 。

2.4 当量通流面积

汽轮机通流部分故障最终导致通流面积的增加或减少, 因而应选择能够反映汽轮机级组通流面积变化的物理量作为故障诊断的热力判据。当汽轮机级组处于临界状态或即使处于压临界状态, 但由于级组膨胀前后压力相差较大, 此时通过该级组的流量只与级组前的参数 (如压力、比容) 以及通流面积有关, 即有如下关系式:

$$G = f(P_i^{in}, V_i^{in}, A_i) \quad (6)$$

或将通流面积表达成通过该级组的流量与级组前的参数的函数, 即:

$$A_i = f(P_i^{in}, V_i^{in}, G) \quad (7)$$

现定义 G, P_i^{in}, V_i^{in} 的组合函数为:

$$h = \frac{G}{P_i^{in} V_i^{in}} \quad (8)$$

式中, 流量的单位取 t/h , 压力的单位取 $10^5 Pa$, 比容的单位取 m^3/kg 。研究表明: 通过某级组的流量与 h 成正比, 因此我们将 h 称为“当量通流面积”, 它具有面积的量纲。这样, 可以通过监测某级组的 h 的变化, 即可诊断出其通流面积的改变。经初步分析, h 变化 10%, 其通流面积 A_i 实际变化 50%; h 变化 15%, 其通流面积 A_i 实际变化 100%。

采用“当量通流面积”进行汽轮机通流部分的故障诊断, 可以进一步明确通流面积是增加 (磨损) 还是减少 (堵塞), 其难点是通过各级组的流量并不能直接测得, 需在热平衡计算的基础上, 得到汽轮机各段回热抽汽量, 进而根据流量平衡, 得到通过各级组的实际流量。级组前的比容根据实测的温度与压力, 采用水蒸气参数计算程序获得。

3 各种热力判据基准状态的确定

在采用以上各种热力判据进行汽轮机通流部分故障诊断时, 其中一项基础工作就是确定各种热力

判据在无故障时的数值, 即确定基准状态。由于基准状态一般随负荷变化, 因此需建立各热力判据的基准状态与负荷的关系式。以某国产 200 MW 机组为例, 该机组有八段抽汽, 我们将调速级单独作为一个对象, 而将其它由两相邻抽汽点之间构成的级组分别作为一个级组。由于汽轮机低压缸排汽处于湿蒸汽区, 为进行其故障诊断带来了较大困难, 因而暂不考虑末级组的诊断, 这样共划分为 9 个级组。利用生产厂家提供的数据, 得到了汽轮机各级组四种热力判据在不同负荷时的基准状态, 限于篇幅, 计算数值不再列出。

结果表明: 对于调速级, 各种热力判据均随负荷变化而变化; 对于中间机组, 除级组前压力随负荷变化外, 其它四个热力判据在不同负荷时基本维持不变, 为进行故障诊断提供了方便。现将中间级组的这四个热力判据在不同负荷时的平均值, 作为统一的诊断基准, 结果列入表 1。

表 1 不同负荷时中间级组各热力判据基准状态平均值

| 级 组 | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|---------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----|
| 相对内效率 % | 86.7187 | 87.78 | 96.88 | 97.89 | 43.80 | 46.84 | 12.89 | 50 |
| 焓效率 % | 93.6493 | 81.90 | 88.95 | 13.95 | 05.89 | 35.90 | 54.91 | 92 |
| 膨胀线夹角 | 76.0476 | 42.69 | 83.79 | 38.79 | 20.66 | 42.69 | 08.72 | 17 |
| 当量通流面积 | 10.8624 | 32.44 | 37.70 | 56.108 | 5.143 | 2.226 | 0.373 | 7 |

由于调速级的各项热力判据随负荷变化, 为了得到在任意负荷时各热力判据的基准值, 采用最小二乘法进行拟合, 结果如下:

相对内效率:

$$\eta_{ri} = -70.99 + 258.25x - 135.86x^2 \quad (9)$$

焓效率:

$$\eta_{ie}^I = -40.26 + 233.35x - 117.94x^2 \quad (10)$$

当量通流面积:

$$\varphi_{I1} = -0.519 + 9.672x - 0.634x^2 \quad (11)$$

膨胀线夹角:

$$\theta_{I1} = -83.88 + 250.27x - 127.14x^2 \quad (12)$$

式中, 自变量 x 为实际主蒸汽流量与设计主蒸汽流量的比值, 它基本能够反映机组负荷的大小。表 1 与式 (9) 至式 (12), 构成了汽轮机通流部分故障诊断热力判据的比较基准。

4 实例分析

为了进一步说明各热力判据的有效性, 在该 200 MW 机组某次热力试验所得原始数据的基础上, 分别利用四种热力判据进行了分析与计算。试验

时, 机组负荷为 203.02 MW, 主蒸汽流量为 638.2 t/h, 计算结果列入表 2

表 2 某次热力试验汽轮机各级组四种热力判据计算结果

| 级 组 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|---------|---------|-----------|------------|-----------|---------|----|-----|------|----|
| 相对内效率 % | 50.7386 | 6287.7377 | 3388.6288 | 9479.6181 | 5887.23 | | | | |
| 焓效率 % | 74.0293 | 6993.1288 | 9694.7894 | 5588.7487 | 0389.74 | | | | |
| 膨胀线夹角 | 37.8475 | 7676.2467 | 2178.9578 | 3765.9566 | 4769.59 | | | | |
| 当量通流面积 | 7.97810 | 8824.5647 | 5070.23106 | 4141.2241 | 7364.4 | | | | |

将表 2 中的计算结果与对应的基准状态进行比较, 即可诊断出汽轮机各级组通流部分所发生的故障。图 2 至图 5 分别为各热力判据的实际值与基准值的比较结果, 图中, 左侧条形代表基准值, 右边条形代表实际值。

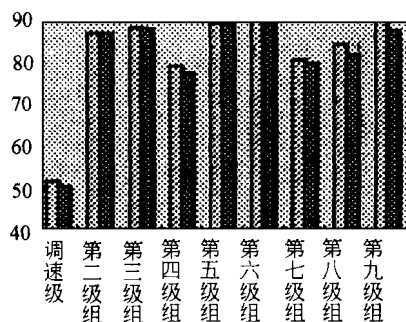


图 2 各级组相对内效率实际值与基准值比较

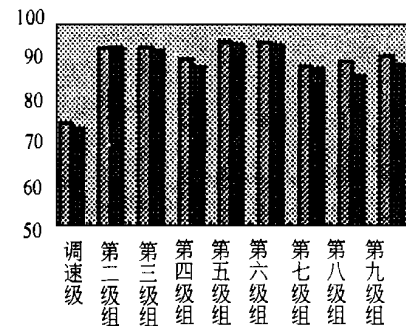


图 3 各级组焓效率实际值与基准值比较

从图中, 可以诊断出: 调速级、第四级组、第八级组、第九级组的实际值与基准值相差较大, 说明这些级组发生不同程度的故障; 而其余级组, 其实际值与基准值比较接近, 表明其状态良好。为了进一步澄清故障的性质, 我们可以考察图 5 中当量通流面积的比较结果: 对于调速级与第九级组, 其当量通流面积的实际值小于

基准值, 表明其通流部分发生堵塞或积垢; 而对于第四级与第八级组, 由于其当量通流面积的实际值大于基准值, 表明其通流部分发生磨损。

通过以上实例分析, 可以得出以下结论: 采用四种热力判据, 均可以诊断出汽轮机通流部分发生的故障, 而且它们的诊断结果是一致的, 相对内效率、焓效率、膨胀线夹角这三种判据, 诊断的本质及机理

上都比较类似, 具有计算简单、监测容易等优点, 但不能诊断出故障的种类及本质; 而当量通流面积却可以实现这一功能, 但同时又具有计算复杂等不足之处。因而, 在具体的诊断中, 可以将二者结合起来, 发挥各自的优势: 先采用相对内效率、焓效率、膨胀线夹角这三种判据中的一种, 进行初步诊断, 对于诊断出发生的故障的级组, 采用当量通流面积进一步诊断出故障的性质与种类。

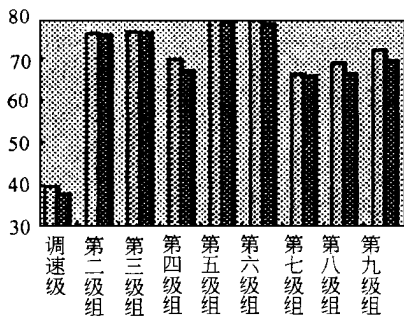


图 4 各级组膨胀线夹角实际值与基准值比较

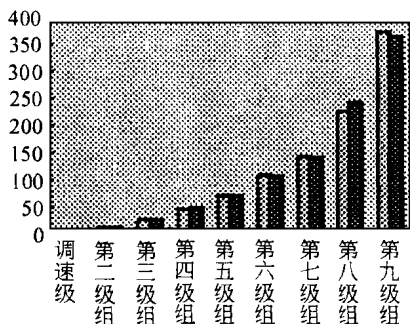


图 5 各级组当量通流面积实际值与基准值比较

5 结束语

本文提出了适用于汽轮机通流部分故障诊断的四种热力判据 (相对内效率、焓效率、当量通流面积、膨胀线夹角), 通过实例分析, 对每种判据的诊断机理与实施方法进行了分析比较。这些热力判据, 可以与机组的 DAS 系统或 DCS 系统结合, 实现汽轮机通流部分的在线故障诊断与预测性维修, 进一步提高机组的

安全性与经济性。目前, 我们已经在某电厂 200 MW 机组的“性能监测、诊断、指导系统”上, 采用相对内效率与当量通流面积两个热力判据进行汽轮机通流部分的故障诊断, 运行效果良好。

参考文献

- [1] 忻建华, 叶春. 300 MW 汽轮机高压缸通流部分故障的热参数模糊诊断. 动力工程, 1997, 17(3).
- [2] 杨勇平, 王加璇. 汽轮机性能评价新准则——焓效率. 汽轮机技术, 1995, 37(1).
- [3] 杨勇平. 火电厂效率、成本、优化、仿真的理论研究与应. 中国科学院工程热物理研究所博士学位论文, 1995.
- [4] Zaleta A, Royo J and Valero A. Basis for an integral malfunction analysis in thermomechanical systems. *Proceedings of TAISE 97, ASME*, 1997.

(何静芳 编辑)

〔刊,中〕/Huang Jintao, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 340~ 342

Based on process basic equations, the authors have set up a dynamic characteristics model for single-phase spiral and vertical tube coils. By way of secondary model building obtained is a group of differential equations, which can be solved directly. The comparison of theoretical results and experimental curves attests to the validity of the above-cited model. The results given in this paper may serve as reference data and information during the further study of the dynamic characteristics of once-through boiler spiral tube-coil water walls. **Key words** spiral tube coil, dynamic characteristics, integrated parameters, differential equation group

应用激光多普勒测速仪研究湍流有旋自由射流 = **Research on Turbulent and Swirling Free Jet Stream with the Help of a Laser Doppler Anemometer**〔刊,中〕/Xiao Kejian (East China University of Science & Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 343~ 346

An experimental research is conducted of a movable block swirler-produced velocity field and turbulent flow field of a strongly turbulent and swirling free jet stream. The results of study show that this type of swirler is highly conducive to the formation of a central recirculation zone. The average velocity of the jet stream assumes along the axial direction a rapid decrease with the swirling free jet exhibiting an anisotropic turbulence, especially in the recirculation zone. Also discussed in the paper is the transmission direction of the turbulent flow momentum in the flow field. **Key words** turbulent and swirling free jet, laser Doppler anemometer, average velocity distribution, turbulent flow field

汽轮机通流部分故障诊断的热力判据研究 = **A Study of the Thermodynamic Criteria for the Failure Analysis of Steam Turbine Flow Path Components**〔刊,中〕/Yang Yongping, et al (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 347~ 349

A systematic analysis and study is conducted of the four categories of thermodynamic criteria (i. e., relative inner efficiency, exergy efficiency, equivalent flow path area and included angle of expansion lines) generally applied to the failure diagnosis of steam turbine flow path components. The mechanism of diagnosis and a method of execution are proposed for each kind of criteria. In addition, taking the 200 MW power generating unit of a power plant as a specific example, the authors have performed a quantitative analysis and computation concerning the above-cited criteria. **Key words** steam turbine, flow path components, failure diagnosis, thermodynamic criteria

膜式壁上稳态热流测量技术的误差分析 = **Error Analysis of the Technique for Measuring Steady-State Heat Flux on Membrane Water-walls**〔刊,中〕/Fang Zhaohong, Liu Xiaolei (Shandong Institute of Civil Engineering), Yue Guanxi (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 350~ 352

This paper focuses on a new approach for measuring heat flux density on a solid wall surface by way of solving inverse heat conduction problems. On this basis the authors have by means of a numerical simulation method further discussed from a theoretical perspective the effect of various factors of the heat conduction system itself on the error of this measuring method. Some guidelines concerning the practical use of this method are also presented. **Key words** heat flux measurement, error analysis, number of conditions

用等效热降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响 = **Determination of the Impact on Machine unit Economic Performance of Exhaust Steam Pressure Variation by an Equivalent Enthalpy Drop Method**〔刊,中〕/Li Xiuyun, Yan Junjie, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 353~ 355

With regard to the impact on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation a new quantitative method, i. e., exhaust pressure equivalent enthalpy drop calculation method, is expounded in this paper. On the basis of steam turbine off-design operating conditions the proposed method determines