

1000MW 发电机组主蒸汽流量计算模型及其实际应用

凌 飞

(国电泰州发电有限公司, 江苏, 泰州 225327)

摘 要: 在弗留格尔公式的基础上, 结合运行实践经验, 提出了一种主蒸汽流量计算公式及其修正方法, 并结合鲁阳发电厂 1000MW 汽轮机为应用实例进行计算。结果表明该计算模型具有一定的应用价值。

关键词: 弗留格尔公式; 主蒸汽流量计算; 实际应用

0 引言

在弗留格尔公式的基础上, 提出了一种主蒸汽流量计算公式及其修正方法, 将此方法运用到电厂实际的生产过程中, 以河南省中电投集团某发电厂 1000MW 汽轮机组为例, 介绍分析了主蒸汽流量的计算模型和现场实际应用的案例。

1 系统介绍

1.1 锅炉

河南省中电投集团某电厂一期工程 2×1000MW 机组锅炉是由东方锅炉(集团)股份有限公司制造的。其型号为: DG3000/26.15-II1, 超超临界参数、变压直流炉、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天岛式布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、对冲燃烧方式, Π 型锅炉。主要参数: 最大连续蒸发量(B-MCR)为 3000t/h, 锅炉出口蒸汽参数 26.15MPa(a)/605/603℃。

1.2 汽机

主汽轮机是由哈尔滨汽轮机有限责任公司制造的。根据我国规定的汽轮机型号标准为: CLN1000-25.0/600/600, 蒸汽参数为主汽压 25MPa, 主再热汽温度均为 600℃, 是超超临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、冲动凝汽式、八级回热抽汽式汽轮机, 最大连续出力为 1037.411MW, 机侧蒸汽参数 25MPa(a)/600/600℃。

1.3 过热器系统

锅炉过热器由低温过热器、屏式过热器和高温过热器组成。低温过热器布置于尾部双烟道的后部烟道中, 炉膛上部布置屏式过热器, 折焰角上方布置有高温过热器。屏式过热器前后分别布置一、二级喷水减温器, 每级减温水两点喷入, 过热器减温

水由省煤器出口引出。

1.4 再热器系统

锅炉再热器由低温再热器和高温再热器两部分组成。低温再热器布置于尾部双烟道的前部烟道中, 高温再热器布置于水平烟道中。高温再热器入口设事故喷水减温器。

2 主蒸汽流量计算方法

1000MW 发电机组主蒸汽流量计算模型是河南电力试验研究院设计和改进的, 根据 DCS 控制逻辑图(图 1), 进入汽轮机的主蒸汽流量是由汽轮机调节级压力经过 f(x) 模块计算出一个流量 $D_{修正}$, 然后 $D_{修正}$ 乘以系数 K, 最后减去高旁流量求得。用公式可以表达为:

$$D = D_{修正} \times \sqrt{\frac{T_{额定主汽温}}{T_{实际主汽温}}} - D_{高旁流量} = D_{修正} \times K - D_{高旁流量}$$

其中:

$D_{修正}$: 汽轮机调节级压力经过 f(x) 模块计算出的修正蒸汽流量(单位为 t/h), 即 $D_{修正} = f(x)$, x 为汽轮机调节级压力(单位是 MPa), f(x) 模块的曲线如表 1 所示。

表 1 f(x) 模块的曲线参数

X	0	6.5	18.75	19.975
D _{修正}	0	1000	3000	3200

$T_{额定主汽温}$: 额定主汽温的热力学温度, 即 $T_{额定主汽温} = 600^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}\text{C} = 873^{\circ}\text{C}$ 。

$T_{实际主汽温}$: 实际主汽温的热力学温度, 其为过热器出口 A/B 侧的主汽温经过二选后得到的。

$D_{高旁流量}$: 高旁流量, 其通过高旁阀反馈值和主蒸汽压力经过 f(x) 模块计算出来。

具体运算逻辑如图 1 所示。

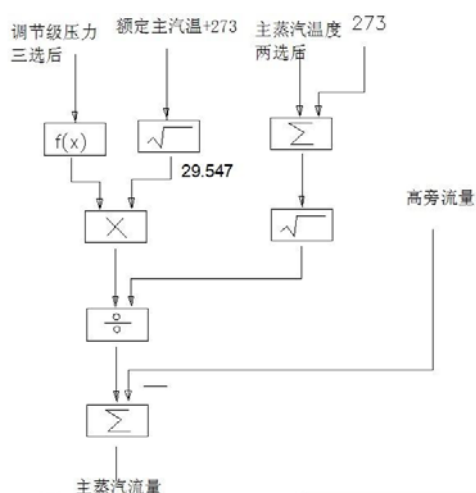


图 1 DCS 控制逻辑图

3 主蒸汽流量计算方法的原理

弗留格尔公式是反映流过汽轮机的蒸汽流量与级（或级组）前后参数关系的公式：

$$\frac{D_1}{D_{10}} = \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{10}^2 - P_{20}^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}} \quad (1)$$

式中：D—通过本级或级组的蒸汽流量；

P—蒸汽压力；

T—蒸汽温度；

1—下标，表示级组前基准工况参数；

10—下标，表示级组前变化后工况的参数；

2—下标，表示级组后基准工况的参数；

20—下标，表示级组后变化后工况的参数。

(1) 该公式在汽轮机通流部分的蒸汽流量不变（无蒸汽加入或抽出）和流通面积不变的条件下导出的。

(2) 当通流面积变化（包括喷嘴和叶片的腐蚀或结垢、中压缸调门开度变化等）、抽、漏气量变化、抽汽压力变化、凝汽器真空变化等情况发生时，该公式应该进行修正。

(3) 当级组内有一级达到临界状态时，此级组后的压力对级组流量没有影响。这是 P_2 应当不计。此时级组的流量只与级组前压力成正比，与级组后压力无关。

(4) 原公式在应用时，在级后压力小于级前压力的十分之一时，认为由它引起的误差很小，可以忽略不计，固允许把公式中的级后压力简化，可以让流量直接比例于级前压力。公式可以简化为：

$$\frac{D_1}{D_{10}} = \sqrt{\frac{P_1^2}{P_{10}^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}} = \frac{P_1}{P_{10}} \cdot \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}} \quad (2)$$

式 (2) 就是我们用调节级压力代替主蒸汽流量测量的依据。

用弗留格尔公式计算主蒸汽流量，则是把汽轮机除调节级外的部分看成是假想级组，再代入公式进行计算。因为凝汽器压力远小于级组前压力（两者相差数千倍，甚至上万倍），则可以直接使用式 (2)，并变形为：

$$D_{10} = \frac{P_{10} \cdot D_1}{P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_{10}}} = D_{\text{修正}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_{10}}} \quad (3)$$

式 (3) 为直接应用的代替主蒸汽计算公式。 P_{10} 为假想级组前实际压力，常取调节级后实测压力（即我们常说的“调节级压力”）。 $D_{\text{修}}$ 为热控逻辑中由汽轮机调节级压力经过 $f(x)$ 模块计算出。 T_1 为 $T_{\text{额定主汽温}}$ ， T_{10} 为 $T_{\text{实际主汽温}}$ 。

于是式 (3) 与逻辑中的运算模型相统一。

4 主蒸汽计算模型的实际应用

4.1 用调节级压力计算主蒸汽流量测量误差较大

弗留格尔公式用于主蒸汽流量只是一个粗略的估计值，不能把它看成流量测量值，只能说它代表了主蒸汽流量变化的大致趋势。原因如下：

(1) 该公式本身的误差太大；

(2) 影响其误差的因素太多，如通流面积变化、抽漏气量变化、抽汽压力变化、凝汽器真空变化等情况，在现场无法一一消除。

4.2 主蒸汽计算模型使用的限制范围

用调节级压力代替主蒸汽流量的计算方法因其自身误差太大，不能用于流量积算、汽水平衡、节能计算、小指标计算、热耗计算、各种热效率计算、经济结算等场合。

4.3 主蒸汽计算模型使用的应用范围

用调节级压力计算主蒸汽流量的计算方法，其可以代表主蒸汽流量的变化趋势，此项功能对锅炉泄露的判断和分析提供了新的角度和思路。例如以下案例。

4.4 案例

11 月 22 日上午，#1 机组处于 1000MW 工况，给水流量由 2880t/h 上升到 3030t/h，给水流量增长了 150t/h 左右。就地检查发现 #1 锅炉 48.5 米左墙

处发生泄露，此处炉膛外部包墙为顶棚过热器至中隔墙，炉膛内部为悬挂低温再热器。当时正处于调试阶段，锅炉四管泄漏还未投入使用，观察过热器壁温和低再壁温无明显变化（泄露处可能无管壁温度测点），所以对判断泄漏点产生了分歧。

观点一：判断为中隔墙泄露。理由：1000MW 时，省煤器入口给水流量由 2880t/h 上升到 3030t/h，给水流量增长了 150t/h 左右。而主蒸汽计算得出进入汽轮机的蒸汽流量保持在 2893t/h。而过热器减温水来自于省煤器出口，该流量已经包含在省煤器入口给水流量中，且高旁旁路阀关严无流量漏出。对于直流炉而言，给水流量增大但出来的蒸汽流量没有变化，说明在直流炉的省煤器、水冷壁、过热器中有泄漏，再根据就地位置可以判断认为顶棚过热器至中隔墙爆管泄露。

观点二：判断为低温再热器泄露。理由：低温再热器 A/B 侧出口蒸汽温度出现较大的偏差。具体数据变化摘录见表 2。

表 2 低温再热器 A/B 侧出口蒸汽温度表

时间	工况/MW	低再出口 A 侧汽温 /℃	低再出口 B 侧汽温 /℃
04:30	1000	520	522
07:30	1000	516	522
08:50	1000	510	532
14:10	750	479	527

根据对低温再热器 A/B 侧出口蒸汽温度出现较大的偏差，认为由于 B 侧有泄漏点造成蒸汽流量较 A 侧少，所以低再出口 B 侧汽温比 A 侧汽温高出 50℃左右。

观点一对观点二反驳认为：由于顶棚过热器至中隔墙泄露处正处于尾部烟道处，中隔墙泄露蒸汽压力较高且蒸汽量较大导致尾部烟道的烟气偏斜，造成低温再热器出口汽温偏差。

结果：11 月 23 日，#1 机组 168 试运结束，停炉检修。11 月 24 日进入#1 锅炉检查发现：起始泄漏点为中隔墙，蒸汽从中隔墙管道泄漏口喷出，直

接喷射到该区域附近的低温再热器弯头上，低温再热器被长时间（由于 168 试运期间）喷射后导致轻微泄漏。**观点一**抓住了主蒸汽流量计算没有发生明显变化这一本质现象，判断出泄露初期的泄露点。通过以上案例可以看出此种主蒸汽流量的计算方法可以代表主蒸汽流量的变化趋势，同时该方法计算出的主蒸汽流量可以用于自动调节系统辅助信号。

5 结论

河南中电投集团某电厂 1000MW 机组主蒸汽流量计算模型是基于弗留格尔公式，是用调节级压力计算主蒸汽流量的一种计算方法，该计算方法虽有一定误差，但在实际电厂运行中还是能起到判断参考作用。

参考文献：

[1] 章德龙. 单元机组集控运行(第一版)[M].北京: 水利电力出版社, 1993.

[2] 孙永平, 朱梅芳, 王敏. 北仑电厂 2 号机组 DAS 系统主蒸汽流量计算模型的修改[J].浙江电力, 2000(03).

[3] 何军民, 李明. 湘潭电厂 300 MW 机组主蒸汽流量计算模型的修改[J].湖南电力, 2005, 25(5).

[4] 周建新, 王雷, 吴海姬, 等. 基于支持向量回归的大容量机组主蒸汽流量建模[J]. 热能动力工程, 2008, 23(2).

[5] 张渡, 楚岩. 应用弗留格尔公式分析速度级汽压代替主蒸汽流量测量问题[J].河南电力,2009(2).

作者简介：

凌 飞（1983—），男，江苏扬州人，国电泰州发电有限公司，E-mail: lingf@gdtz.com.cn.