

环泵、补水泵对于供热管网稳定运行具有重要意义。

表 1 热网换热器技术参数

项目		数值
汽侧(壳程)	设计压力/MPa	0.8
	最高工作压力/MPa	0.7
	耐压试验压力/MPa	2.0
	设计温度/℃	340
水侧(管程)	设计压力/MPa	1.6
	最高工作压力/MPa	1.5
	耐压试验压力/MPa	2.0
	设计温度/℃	150
出/进口工作温度/℃		120/65

注:型号,RJBW1400-590-1.6-2;换热面积,590 m²。

2 方法研究

供热机组在线监测^[3]从两方面考虑:一方面从节能减排角度出发,利用发电功率-供电煤耗曲线(以下简称煤耗曲线)得到额定功率下的供电煤耗,按照大小进行煤耗排序,实现优化机组发电调度;另一方面从供热机组安全运行角度出发,实现供热系统监控及计算分析。

2.1 煤耗排序

2.1.1 煤耗计算

对于纯凝机组,根据相关规范^[4]计算机组实时供电煤耗;对于供热机组,根据相关规定^[5-6]计算机组热电比,按照好处归电法计算供热机组供电煤耗。

$$\varepsilon = Q_{gr}/(P_s \times 3\,600) \times 100\% \quad , \quad (1)$$

$$Q_{gr} = \sum_i q_{msteami}(h_{steami} - h_{hsi}) \quad , \quad (2)$$

式中:ε为热电比;P_s为供电功率;Q_{gr}为供热抽汽热量;q_{msteami}为机组第*i*段抽汽质量流量;h_{steami}为机组第*i*段抽汽比焓;h_{hsi}为机组第*i*段回水(疏水)比焓。

$$b_g = \frac{q}{29.308\eta_b\eta_p(1 - \eta_u)} - \frac{\varepsilon(P_s \times 3\,600)}{2\,930.8\eta_b\eta_p(1 - \eta_u)P_e} \quad , \quad (3)$$

式中:b_g为供热机组供电煤耗,g/(kW·h);q为未考虑供热时机组热耗率,kJ/(kW·h);P_e为发电功率,MW;η_b,η_p,η_u分别为锅炉效率、管道效率、厂用电率,%;29.308为标准煤热值,MJ/kg。

煤耗偏差(抽汽供热引起)与热电比近似呈线性关系,即

$$\Delta b_g = \frac{\varepsilon \times 3\,600}{2\,930.8\eta_p\eta_b} \quad . \quad (4)$$

2.1.2 煤耗曲线拟合

抽取实时数据库发电功率和供电煤耗数据样

本,拟合煤耗曲线。在对参数的线性估计中,最小二乘法给出的估值最稳定,最能抑制原始数据中的波动^[7](这种估计为最小方差估计),煤耗曲线拟合方法采用最小二乘法,曲线形式为

$$b = f(P_e) = a_1P_e^2 + a_2P_e + a_3 \quad , \quad (5)$$

将机组额定功率代入煤耗曲线,得到该机组在额定负荷下的供电煤耗,作为煤耗排序依据。

根据供热历史运行数据及计算结果,确定热电比划分层次及范围大小,对热电比进行分挡。提取满足某一挡热电比的实时计算数据,拟合生成煤耗曲线。某电厂通过热电比分挡,生成的煤耗曲线形式见表 2。

表 2 供热机组煤耗曲线(额定负荷)

热电比/%	煤耗曲线	供电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]
0(纯凝)	0.0023x ² - 1.34x + 523.60	328.60
10~35	0.0016x ² - 0.844x + 413.66	304.46
35~70	0.0001x ² - 0.1031x + 312.04	290.11

机组纯凝工况是热电比为 0 的特殊情况,利用热电比分挡法可以满足以下几种工况下的煤耗曲线生成需求。

(1) 机组供热不连续时,提取热电比为 0 时段的数据,得到机组纯凝工况的煤耗曲线。

(2) 热电比范围相同(偏差可忽略)时,生成某一特定热电比下的煤耗曲线,对比 2 台机组煤耗。

以热电比为判断依据,利用未来热负荷预测,选择相应煤耗曲线为供电煤耗排序,为热负荷分配、发电调度提供依据。

2.2 供热监测及计算

监测机组供热系统的运行状况,集中展示供热抽汽及一级水网运行;对供热系统各部位热量^[8]进行实时计算;在线计算供热机组标煤耗,首站换热器温升、效率等指标,为分析电厂供热情况及重要数据预警提供基础数据。

根据机组供热流程,在线计算各部分热量。

(1) 针对抽汽系统,以换热器为计算模型,计算抽汽加热给换热器循环水热量,见式(2)。

(2) 一级水网循环水净吸(供二次水网或者用户)热量

$$Q_w = q_{mw0} \times h_{w0} - q_{mw1} \times h_{w1} \quad , \quad (6)$$

式中:q_{mw0}为一次热网循环水流量;h_{w0}为一次热网出口循环水比焓;q_{mw1}为一次热网进口循环水流量;h_{w1}为一次热网进口循环水比焓。

(3) 采集关口(计量)测点计算电厂关口供热量Q_{CK},Q_{CK}计算采用水和水蒸气热力性质方程(IAP-WS-IF97)。

根据抽汽热量 Q_{gr} ,一级水网循环水净吸热量 Q_{wt} ,关口计量热量 Q_{GK} 流程,直观监测能量变化及相互关系。根据各机组形式,收集供热系统测点。抽汽系统:抽汽压力(MPa)、温度($^{\circ}C$)、流量(t/h),疏水压力(MPa)、温度($^{\circ}C$);一次热网循环水系统:一次热网循环出口压力(MPa)、温度($^{\circ}C$)、流量(t/h),一次热网循环进口压力(MPa)、温度($^{\circ}C$)、流量(t/h);关口测点:计量关口压力(MPa)、温度($^{\circ}C$)、流量(t/h),计量关口热量(GJ/h)。

3 在线监测应用

3.1 发电调度

某电网公司利用辖属机组煤耗排序结果,优化发电调度。在新机组纳入排序前,通过现场性能试验与在线计算结果进行对比^[8-9],对在线计算结果进行验证。某 660 MW 超临界机组具有常年稳定工业负荷,抽汽位置为热再热器出口,满负荷试验期间数据见表 3,煤耗对比结果见表 4,对比结果满足规定要求,在线计算结果准确。

在煤耗曲线拟合时,对于多台供热机组,采用具有同一挡热电比的煤耗曲线;对于不同范围热电比,机组采用热电比最集中的煤耗曲线;对于非供热期机组,按照纯凝时煤耗曲线,将发电功率代入煤耗曲线,得到统计期内机组煤耗,为机组发电调度提供参考。

3.2 在线监测

某发电集团公司供热系统在线监测项目如下。
(1)供热系统基本流程展示。根据汽水流程

(如图 2 所示)设定在线监测过程参数和性能参数。

表 3 某供热机组试验期间数据对比

试验工况	试验数据	在线计算
主蒸汽压力/MPa	24.27	24.13
主蒸汽温度/ $^{\circ}C$	568.23	568.15
再热蒸汽压力/MPa	4.28	4.28
再热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	572.77	572.17
高压缸排汽压力/MPa	4.70	4.69
高压缸排汽温度/ $^{\circ}C$	326.81	327.26
给水压力/MPa	28.44	28.02
给水温度/ $^{\circ}C$	289.14	289.10
过减水流量/($t \cdot h^{-1}$)	12.27	11.31
再减水流量/($t \cdot h^{-1}$)	30.16	26.97
给水流量/($t \cdot h^{-1}$)	1947.21	1950.63
供汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	53.90	54.10
试验热耗/[$kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	7720.27	7721.48

表 4 煤耗对比结果(#2 机组)

项目	煤耗在线监测系统	比对试验结果
锅炉热效率/%	92.81	92.43
汽机热耗/[$kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	7721.48	7720.27
发电煤耗/[$g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	286.73	288.34
机组厂用电率/%	4.689	4.875
机组供电煤耗/[$g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	300.84	303.12
发电煤耗偏差/%		0.56
供电煤耗偏差/%		0.75

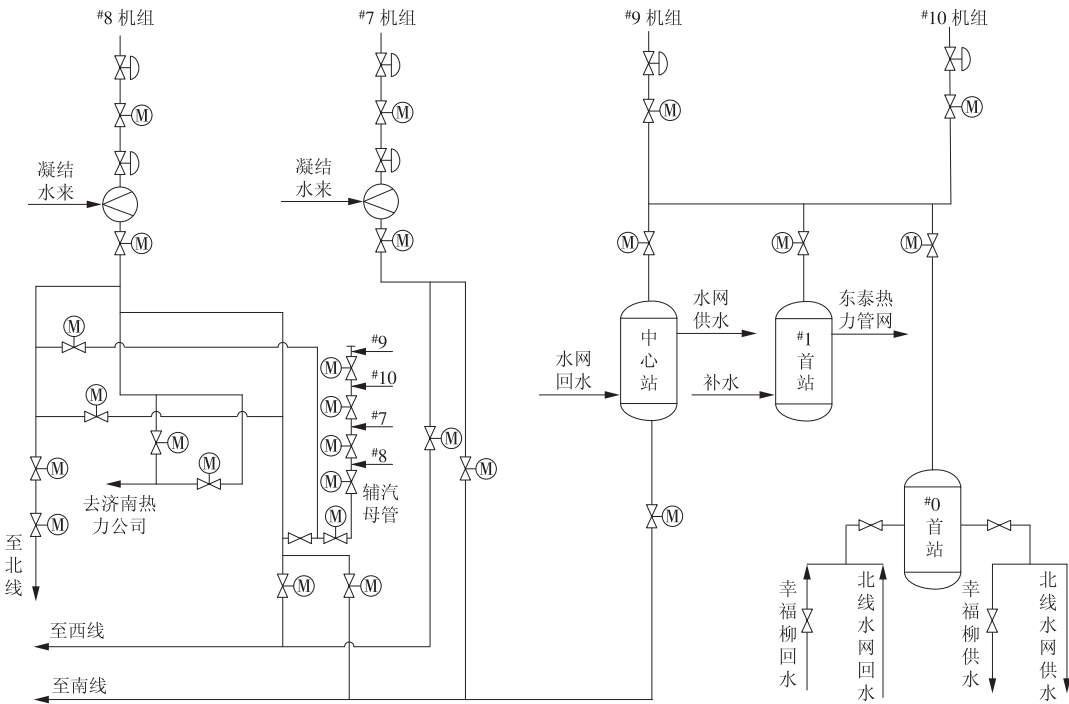


图 2 汽水流程

(2)热量传递变化流程。对供热关口计量参数进行汇总计算,展示各供热计量分支热量,见表 5;对供热首站(一次热网)参数进行汇总计算,便于比较关口计量、首站进出口参数变化趋势,见表 6。

(3)供热报表。自动采集实时数据生成供热报表,可以有效节约人力成本。表 7 为供热供汽关日报表,表中公司在编号列以 0 表示,电厂在编号列以 1~3 表示。

表 5 关口参数汇总

电厂	供热用户	供热介质	结算方式	计量	热负荷/ (GJ·h ⁻¹)	累计热量/GJ		
						日	月	年
黄台	对北线供热	蒸汽	流量	66 t/h				
	对西线供热	蒸汽	热量	251 GJ/h				
	对南线供热	蒸汽	热量	156 GJ/h				
	对 #2 首站供热	蒸汽	热量	191 GJ/h	1 671	21 103	546 252	546 252
	#0 首站对北线供热	蒸汽	热量	267 GJ/h				
	对厂热力公司(供开发区地段)	高温水	热量	179 GJ/h				
	中心站	高温水	热量	451 GJ/h				
莱芜	方兴热力公司	高温水						
	燃气热力公司	高温水	热量	328 GJ/h	328	5 045	135 300	135 300
烟台	烟台 500 供热公司高温水	高温水	热量	1 345 GJ/h				
	烟台 500 供热公司蒸汽	蒸汽	热量	418 GJ/h	1 921	9 224	240 400	240 400
	烟台 500 供热公司	蒸汽	热量	164 GJ/h				
临沂	市区供暖老供热高温水供暖热量	高温水	热量	416 GJ/h	1 034	14 226	367 682	367 682
	市区供暖新供热高温水供暖热量	高温水	流量	5 845 t/h				
聊热	市区高温水供热	高温水	热量	374 GJ/h	374	6 179	172 322	172 322
运河	济宁港宁纸业有限公司	蒸汽	流量	19 t/h	52	868	181 023	181 023
众泰	新泰供热公司	高温水	热量	339 GJ/h	333	4 690	123 032	123 032
沾化	东线工业用汽	蒸汽	流量	17 t/h	134	2 215	56 209	56 209
	西线县城采暖用汽	蒸汽	流量	35 t/h				

注:累计热量按自然年统计,本表数据为当年 1 月统计数据。

表 6 一次热网参数汇总

电厂	结算方式	计量	首站	首站入口/首站出口/供热母管		
				压力/MPa	温度/℃	流量/(t·h ⁻¹)
黄台	流量	66 t/h	—	—/—/0.65	—/—/246	—/—/63
	热量	251 GJ/h	—	—/—/0.59	—/—/249	—/—/84
	热量	156 GJ/h	—	—/—/0.58	—/—/249	—/—/57
	热量	191 GJ/h	—	—/—/0.09	—/—/242	—/—/102
	热量	267 GJ/h	#0	0.41/0.72/—	53/85/—	1 315/1 362/—
	热量	179 GJ/h	#1	0.86/1.19/—	63/91/—	7 908/7 967/—
莱芜	热量	328 GJ/h	#1	0.44/0.94/—	57/87/—	2 869/3 165/—
烟台	热量	1 345 GJ/h	#1	0.49/1.34/—	58/69/—	8 980/4 196/—
	热量	418 GJ/h	#1	0.49/1.30/—	58/68/—	8 980/4 537/—
	热量	164 GJ/h	#1	0.49/0.95/—	58/65/—	8 980/1 829/—
临沂	热量	416 GJ/h	老首站	0.21/0.91/—	70/93/—	7 312/1 980/—
	流量	5 845 t/h	新首站	0.21/0.99/—	70/95/—	7 312/5 620/—
聊热	热量	374 GJ/h	#1	0.25/1.05/—	74/95/—	4 639/4 735/—
运河	流量	19 t/h	—	—/—/0.64	—/—/237	—/—/20
众泰	热量	339 GJ/h	#1	0.42/0.73/—	58/81/—	3 336/3 328/—

续表						
电厂	结算方式	计量	首站	首站入口/首站出口/供热母管		
				压力/MPa	温度/℃	流量/(t·h ⁻¹)
沾化	流量	17 t/h	—	—/—/0.71	—/—/282	—/—/19
	流量	35 t/h	—	—/—/0.63	—/—/299	—/—/33

表 7 供热供汽关口日报表

编号	流向	结算方式	测点个数	供热均值/(GJ·h ⁻¹)	供热累计值/GJ	供汽均值/(t·h ⁻¹)	供汽累计值/t	平均负荷/(GJ·h ⁻¹)
0	—	—		2 330	55 762	104	2 508	3 644
1	一期高温水(供热)	热量	1	1 073	25 756	—	—	1 232
	二期高温水(供热)	热量	1	159	3 773	—	—	
2	四和供热(供热)	热量	2	3	63	—	—	893
	运河热力(供热)	热量	2	21	494	—	—	
	北湖科技(供热)					—	—	
	运河热力(供汽)	流量	1	—	—	16	393	
	如意印染(供汽)	流量	1	—	—	18	422	
	如意花布(供汽)	流量	1	—	—	9	224	
3	北线(供热)	流量	1	—	—	61	1 469	1 519
	西线(供热)	热量	3	225	5 367	—	—	
	南线(供热)	热量	3	139	3 287	—	—	
	#2 首站(供热)	热量	3	311	7 461	—	—	
	#0 首站去北线水网(供热)	热量	3	238	5 702	—	—	
	热力公司(供热)	热量	3	161	3 859	—	—	

4 结论

- (1)通过在线计算供热机组煤耗,为火电机组煤耗排序、电负荷分配、供热机组间热负荷分配提供依据。
- (2)通过抽汽系统、换热系统、热网系统全面监测,为供热机组系统经济、安全运行提供分析基础。
- (3)随着信息技术发展,供热机组在线监测系统在机组小指标考核、耗差分析系统、热网系统安全运行、热网管道经济性分析中将发挥重要作用。

参考文献:

[1]王智微,杨东,褚贵宏,等. 面向公司级的电厂运行信息系统的研究开发[J]. 中国电机工程学报,2007,27(z1): 21—26.

[2]张金生. 浅析亚临界 600 MW 凝汽机组供热改造[J]. 能源与节能,2015(3):170—172.

[3]解春林,薛永锋,王松岭,等. 供热机组在线监测系统以热电模型研究[J]. 东北电力技术,2012(7):9—11.

[4]火力发电机组煤耗在线计算导则: DL/T 262—2012[S].

[5]国家计委,国家经贸委,建设部,国家环保总局. 关于发展热电联产的规定(总计基础[2000]1268 号) [Z].

[6]戴军,刘光耀,徐婷婷,等. 供热机组热电比影响因素研究[J]. 华电技术,2013,35(12):7—10.

[7]宗殿瑞,宋文臣. 最小二乘法应用探讨[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),1998(3):296—301.

[8]马朋波. 山东实时监管二期供热及污染物技术开发报告[R]. 西安:西安热工研究院有限公司,2013.

[9]贵州省节能发电调度煤耗在线监测系统比对试验导则: DB52/T 726—2011[S].

(本文责编:白银雷)

作者简介:

马朋波(1982—),男,陕西咸阳人,工程师,从事火电厂性能分析及监控研究工作(E-mail:mapengbo@ tpri. com. cn)。

如何使用平面角单位符号“°”“′”“″”

平面角的非 SI 单位度、[角]分、[角]秒是我国的法定计量单位,其符号“°”“′”“″”是法定符号。由于它们的特殊性,使用时应注意以下几条。

(1)不是字母符号,须置于右上标,表示量值时数值与符号间不留间隙,如 30°。(2)表示一个平面角的量值时,可同时使用 2 或 3 个单位,例如 α = 25°20′,β = 18°15′30″。(3)与其他单位构成组合单位时,符号上需加圆括号,如 10 (°)/min。(4)书写平面角的量值范围时,第 1 个量的单位符号不应省略,如 10°~15°不应写为 10~15°。(5)不应将“′”“″”用于表示时间,如 35 min 28 s 不得写为 35°28′。(6) GB/T 1.1—2009《标准化工作导则第 1 部分:标准的结构和编写》建议:“平面角宜用单位(°)表示,例如,写作 17.25°不写作 17°15′。”即“度”最好按十进制细分。