

基于变工况分析的供热机组负荷特性研究

吴 龙¹,袁 奇¹,丁俊齐²,王学同²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 陕西 西安 710049; 2. 山东电力研究院 山东 济南 250002)

摘 要: 目前,电厂与电力调度部门在确定供热机组的热电负荷调度范围问题上普遍存在争议,为此根据供热机组的热力参数和机组特性,以变工况热力计算为依据,产生机组的热电负荷调度关系曲线。通过与由机组工况图所产生的热电关系曲线对比可以发现,热力计算所得到的热电关系曲线具有足够的精度。而且,通过热力计算的方法,可以更好地将其它限制机组负荷调度的因素考虑进去,使得调度范围更加合理。同时,这种方法可以有效的预测抽汽参数的改变对机组负荷调度的影响,通过对比发现,对于供热抽汽压力较高的机组,适度的降低其抽汽压力可以提高机组的电负荷调度范围。该方法可以为电厂与调度部门的负荷调度问题提供合理的解决方案。

关 键 词: 供热机组; 变工况计算; 负荷调度; 抽汽压力

中图分类号: TK263 文献标识码: A

引 言

热电联产机组可以同时提供热、电两种不同性质的负荷,被广泛用于解决大面积集中供热等问题。《关于发展热电联产的规定》(简称《规定》)第九条明确规定,地方管理部门在制定热电厂电力调度曲线时,必须充分考虑供热负荷曲线变化以及节能因素,不得以电量指标限制热电厂对外供热。然而负荷调度过程中却存在很多的问题,这主要是因为电厂与电力调度部门对于热、电负荷曲线的制定存在一定的差异,缺少合理的论证。由于供热机组的经济性受到机组运行指标、布置方式、热电负荷价格等因素的影响^[1~4],因而很难给出一个全面、完整的评价指标。

本研究根据制造厂提供的供热机组热力参数,进行变工况热力分析。通过自主编制的计算程序,以供热机组运行的负荷限制条件为依据,得到供热机组的热电关系曲线。同时讨论了供热抽汽压力对热电负荷调度范围的影响,可以为普遍存在争议的热电负荷调度问题提供理论依据与参考。

收稿日期: 2012 - 01 - 18; 修订日期: 2012 - 02 - 13

作者简介: 吴 龙(1988 -),男,陕西铜川人,西安交通大学博士研究生。

1 供热机组变工况热力分析

为了完全而精确的描述热力循环内部工质的流量分布以及做功过程之间的关系,采用热平衡法作为变工况分析的计算方法^[5~6]。热力计算所需要的原始资料包括热力系统简图,额定工况下的技术参数(如主蒸汽及再热蒸汽压力、温度,汽轮机各抽汽口的参数,凝汽器压力,除氧器标高,各轴封漏汽参数等),汽轮机各抽汽处压损,加热器端差,疏水端差,辅助系统的有关数据等。以上数据均从机组的热力系统资料中获得。

变工况计算主要是在原始工况(额定工况)的已知数据基础上,采用迭代计算确定变工况参数,包括各抽汽口的压力与比焓确定。

对于抽凝供热机组而言,压力计算若采用传统的弗留盖尔(Flügel)公式精度较低,所以需要采用改进的弗留盖尔公式或者等效焓降法进行计算^[7~8]。为了适应供热机组的特殊性,本研究将汽轮机以抽汽口为界,划分区间分别使用弗留盖尔公式^[9]。通过与实验数据对比可以发现,采用分段的弗留盖尔公式可以得到较高的精度。

调节级后压力:

$$p_2 = p_{20} \frac{D_1}{D_{10}} \quad (1)$$

式中: p_2 —调节级后压力,MPa; D_1 —调节级后机组通流量, t/h。

调节级后到供热抽汽口之前的抽汽压力:

$$p_j = \sqrt{P_T^2 + \left(\frac{D_{11}}{D_{10}}\right)^2 (p_{j0}^2 - p_{T0}^2)} \quad (2)$$

式中: D_{11} —第 j 级后的蒸汽通流量, t/h; p_T —供热抽汽压力,MPa; p_j —第 j 级抽汽压力,MPa。

供热抽汽到凝汽器之间的抽汽压力:

$$p_j = p_{j0} \frac{D_j}{D_{j0}} \quad (3)$$

式中: p_j —第 j 级抽汽压力, MPa; D_j —第 j 级抽汽后的蒸汽通流量, t/h。

机组各级抽汽处焓值的变化与各级内效率的变化有很大的关系,因而需要先确定机组的内效率变化曲线,然后可以得到各级抽汽焓计算式:

$$h_2 = h_1 - H_a \eta_{oi} \quad (4)$$

式中: h_1 —一级组的级前焓值, kJ/kg; h_2 —一级组的级后焓值, kJ/kg; H_a —一级组的等熵膨胀焓降, kJ/kg; η_{oi} —一级组的内效率, %。

为了验证变工况分析的准确性,需要计算出机组的内功率与总热耗,并与实验值进行对比,得:

$$W_i = D_c (h_0 - h_c + q_{th}) + \sum_{j=1}^z [D_j (h_0 - h_j + q_{th}(p))] \quad (5)$$

式中: W_i —汽轮机内功, kJ/kg; D_j 、 D_c — j 级抽汽量、凝汽流量, t/h; q_{th} —蒸汽再热焓增, kJ/kg; h_0 、 h_j 、 h_c —新汽比焓、 j 级抽汽比焓、凝汽比焓, kJ/kg。而:

$$Q_{sr} = D_{zq} h_{zq} - D_{gs} h_{gs} + D_{zr} h_{zr} - D_{gj} h_{gj} - D_{zj} h_{zj} \quad (6)$$

式中: Q_{sr} —机组热耗量, kJ/h; D_{zq} 、 D_{gs} 、 D_{zr} 、 D_{gj} 、 D_{zj} —汽轮机主蒸汽、再热蒸汽、最终给水、再热器减温水、过热器减温水流量, kJ/h; h_{zq} 、 h_{gs} 、 h_{zr} 、 h_{gj} 、 h_{zj} —汽轮机主蒸汽、再热蒸汽、最终给水、再热器减温水、过热器减温水焓值, kJ/kg。

2 热电负荷关系曲线的生成

供热机组实际运行过程中,可以根据制造厂提供的工况图求取机组的热电关系曲线,得出汽轮机可能的工作范围并确定机组的热经济性^[10]。然而,机组的工况图中无法考虑热电负荷的所有限制因素。同时,工况图一般只适用于额定抽汽参数下的负荷调度,当抽汽压力改变后无法继续使用。与此相比,采用热力计算的方法,可以很好的考虑更多的限制因素,并且能够预测抽汽参数改变后,热电负荷调度范围的变动情况。

供热机组的热电负荷调度会受到许多因素的限制。当热负荷确定的时候,最大电负荷主要受到机组最大进汽量、低压缸最大进汽量的限制,而最小电负荷会受到许多因素的影响,主要包括:机组最小进汽量、机组最小凝汽流量、供热抽汽压力、温度、再热器壁温限制等^[11]。

在变工况计算中,将机组最大进汽流量、低压缸最大进汽量作为机组最大电负荷的限制,改变热负荷,得到机组在不同工况下的最大电负荷,进而生成机组热电负荷调度的上限曲线。

对于负荷调度下限,需要同时考虑最小进汽流量、最小凝汽流量、供热抽汽温度、再热器壁温等限制,在变工况计算中,逐步减小机组的负荷,只要其中任意一项限制因素超过界限,便停止计算,得到机组对应工况下的最小电负荷。同样可以根据多组不同工况下的最小电负荷生成机组负荷调度的下限曲线。

3 实际机组算例与分析

为了直观检验所提出的热力计算方法与热电负荷曲线生成方法的精度,以某甲厂生产制造的 C330-16.67/537/537 型汽轮机(以下简称 C330MW 机组)和某乙厂生产制造的 C135-13.24/535/535 型汽轮机(以下简称 C135MW 机组)为例进行说明。

3.1 变工况热力计算及验证

C330 MW 机组为亚临界、中间再热、双缸双排汽、凝汽式汽轮机,中(IP)、低(LP)压缸之间通过碟阀控制供热抽汽,具体结构如图 1 所示。

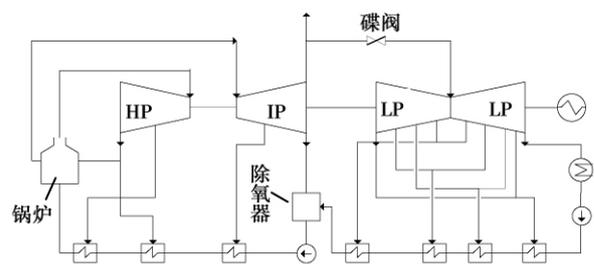


图 1 C330 MW 机组热力系统简图

Fig. 1 Sketch of the thermal system of a 330 MW unit

机组的变工况热力计算中,要求知道各级组的内效率,一般需要利用厂家的流量-效率曲线求出,在缺乏厂家数据的时候,可以通过热力试验结果拟合,还可根据热力试验结果拟合出 C330 MW 机组的内效率曲线。通过试验数据分析,除了调节级与末级的内效率在变工况中变化较大,其它各压力级组在工况变化时内效率基本不变,汽态线近似平行,这与文献[9]中关于供热机组各级内效率的结论一致。调节级、末级的流量与内效率的关系曲线如图 2 所示,其余各级内效率均近似取为恒定值。

根据第 1 节的热力计算理论,可以计算出 C330 MW 机组在不同工况下的电负荷 N 与热耗 Q ,并与相同工况下的已知数据 N_0 和 Q_0 进行比较,分析电负荷的误差 $e(N)$ 与热耗的误差 $e(Q)$,如表 1 所示。

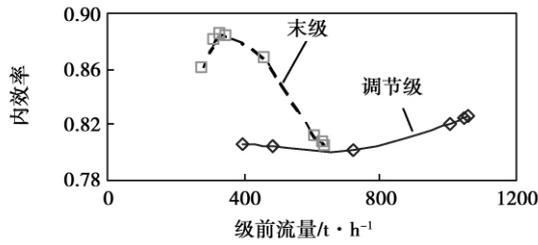


图 2 C330 MW 机组调节级、末级内效率曲线
Fig. 2 Curves showing the internal efficiencies of the regulating stage and last one of a C330 MW unit

由表 1 中两组数据的对比结果可以看出 ,C330 MW 机组变工况热力计算的结果与已知数据基本保持一致 ,具有足够的精度。由此表明 这种计热力学方法可以作为供热机组的热电负荷调度分析的计算基础。

表 1 C330 MW 机组电功率与热耗量的计算值与已知数据对比

Tab. 1 Contrast of the calculated values and known data of the electric power and heat consumption of a C330 MW unit

	$N/$ MW	$N_0/$ MW	$e(N) /$ %	$Q/$ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	$Q_0/$ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	$e(Q) /$ %
额定抽汽	265.04	265.19	0.06	6901	6907	0.08
最大抽汽	264.29	264.08	0.08	6642	6657	0.22
额定纯凝	329.88	330.00	0.04	7972	7976	0.04
75% 纯凝	246.29	247.51	0.49	8070	8050	0.26
40% 纯凝	132.01	132.48	0.36	8616	8511	1.23

这种方法可以同样应用于 C135 MW 机组的变工况热力计算中。其具体计算步骤与 C330 MW 机组相同 ,此处不再重复。热力计算结果与已知数据的对比如表 2 所示 ,可以看出 ,C135 MW 机组的计算同样满足精度要求。

为了便于计算 C330 MW 机组和 C135 MW 机组在任意工况下的热力参数 ,运用 Visual Basic 6.0 编写供热机组变工况计算程序 ,作为求取两台供热机组的热电负荷关系曲线的计算工具。

3.2 热电关系曲线生成与验证

图 3 为 C330 MW 机组的工况图 ,由制造厂提供。工况图中以最大进汽流量作为机组最大电负荷的限制条件 ,而以机组最小进汽流量作为最小电负荷的限制条件。通过图 3 可以得到不同热负荷下机组的最大、最小电负荷 ,从而得到机组的热电关系曲线。

表 2 C135 MW 机组电功率与热耗量的计算值与已知数据对比

Tab. 2 Contrast of the calculated values and known data of the electric power and heat consumption of a C135 MW unit

	$N/$ MW	$N_0/$ MW	$e(N) /$ %	$Q/$ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	$Q_0/$ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	$e(Q) /$ %
额定抽汽	134.90	135.00	0.07	7715.00	7700.80	0.18
最大抽汽	112.22	112.68	0.41	6303.10	6280.80	0.36
75% 抽汽	101.45	101.25	0.20	7825.68	7786.00	0.51
额定纯凝	135.16	135.00	0.12	8137.35	8117.70	0.24
最大纯凝	155.84	155.64	0.13	8103.90	8084.60	0.24
50% 纯凝	67.32	67.50	0.27	8688.64	8636.70	0.60

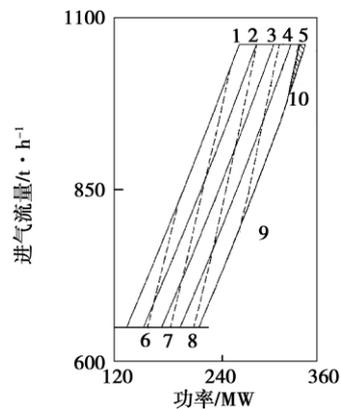


图 3 C330 MW 机组工况图
Fig. 3 Chart showing the operating conditions of a 330 MW unit

同样 ,利用热力计算方法也可以得到机组的热电关系曲线。为与工况图所得结果进行对比 ,只考虑将最大进汽流量与最小进汽流量作为调度限制因素 ,将利用热力计算软件得到的机组热电关系曲线与由工况图所得到的关系曲线进行比较 ,如图 4 所示。

通过图 4 可以看出 ,当两种方法所考虑的限制因素相同时 ,所得热电关系曲线基本一致。这表明变工况计算的方法可以用于求解供热机组的热电负荷调度范围 ,并具有足够的精度。

3.3 热电关系曲线的改进与讨论

在 C330MW 机组的工况图中 ,仅考虑了最小进汽流量对于机组最小电负荷的限制。然而 ,当机组供热抽汽量较大时 ,随着电负荷的降低 ,如果流量过小 ,将会导致低压缸温度过高 ,因此需要考虑最小凝汽流量的限制。

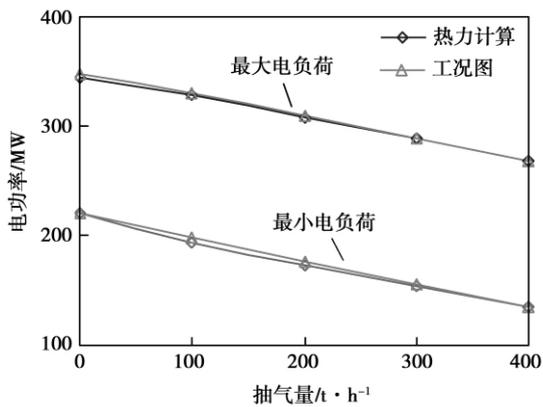


图 4 C330 MW 机组热电关系曲线
Fig. 4 Curves showing the thermoelectric relationship of a C330 MW unit

根据工程经验,暂时选取额定工况下排汽流量的 25% 作为最小凝汽流量,重新使用热力计算程序得到热电关系曲线如图 5 所示。

从图 5 看出,考虑最小凝汽流量的影响之后,机组在较大抽汽量下的热电负荷调度范围将会减小,使得机组运行更加安全合理。

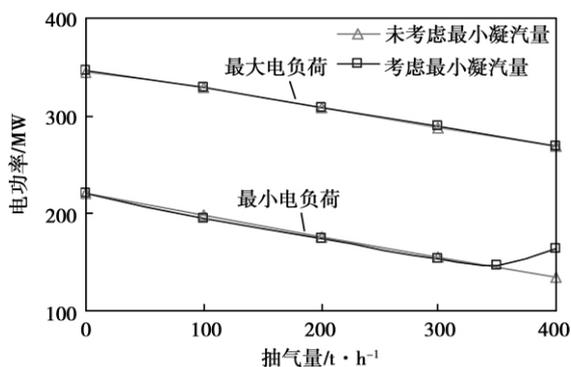


图 5 考虑最小凝汽的 C330 MW 机组热电关系曲线
Fig. 5 Curves showing the thermoelectric relationship of a C330 MW unit with the minimum condensing steam flow rate being considered

通过热力计算程序生成 C135 MW 机组的热电关系曲线来进行验证,如图 6 与图 7 所示。可以看出,针对 C135 MW 机组,两种方法得到的热电关系曲线同样保持高度一致。同时,由于 C135 MW 机组的工况图中考虑了最小凝汽流量的限制,所得到的最小电负荷曲线在趋势上与图 5 一致。这表明图 5 中对 C330 MW 机组热电关系曲线的改进是合理的。

由此可以看出,通过热力计算程序,可以考虑更多限制机组热电负荷调度的因素,改进由工况图所得的热电关系曲线,使结果更加合理。

3.4 供热抽汽压力对负荷调度的影响讨论

工况图中所提供的热电负荷调度范围只适用于额定的供热抽汽参数。然而,在供热机组的实际运行过程中,往往要求降低供热机组的抽汽压力,从而减少机组的煤耗,提高能源利用率^[12]。

由于 C135 MW 机组在中压缸处抽汽,抽汽压力较高,因而适度降低抽汽压力可以有效提高机组的经济性。通过热力计算检验机组在不同抽汽压力下的热电负荷调度范围,可以得到结论:

- (1) 当机组的供热抽汽量较小时,降低机组的抽汽压力对机组的负荷调度能力影响不大;
- (2) 当机组供热抽汽量较大时,若机组的抽汽压力从额定压力(1 MPa) 逐渐降低,机组可以带的最大电负荷与最小电负荷均有所提高,带负荷能力得到提升,如图 8 所示。所得结论与文献 [13] 所述 C6-3.43 型汽轮机改造后的结果相吻合。

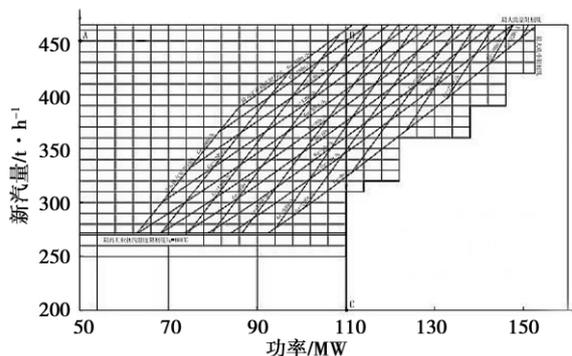


图 6 C135 MW 机组热力系统简图
Fig. 6 Sketch of the thermal system of a C135 MW unit

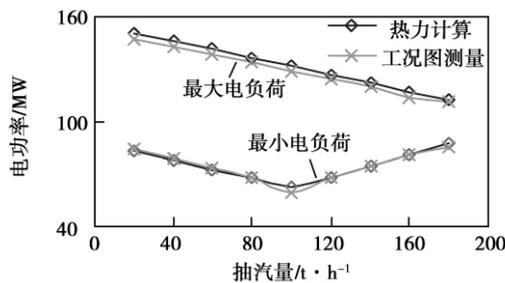


图 7 C135 MW 机组热电关系曲线
Fig. 7 Curves showing the thermoelectric relationship of a C135 MW unit

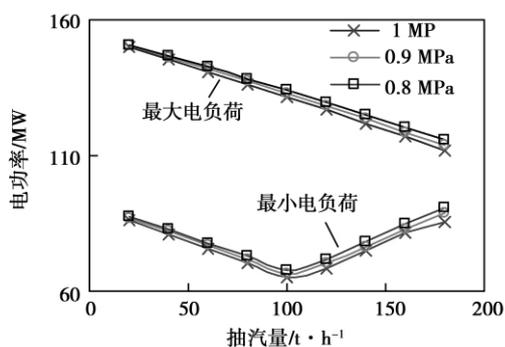


图 8 C135 MW 机组供热抽汽压力对
负荷调度影响

Fig. 8 Influence of the heat-supply-purpose
extraction steam pressure on the load
dispatching of a C135 MW unit

4 结 论

(1) 采用变工况热力计算的方法(分段使用弗留盖尔公式)分析供热机组的热力特性,并充分考虑机组的内效率变化以及供热调节装置对计算的影响。这种计算方法可以编成计算程序,并有效的预测机组热力性能,具有足够高的精度。

(2) 运用变工况计算方法可以得出供热机组的热电负荷调度范围,与通过工况图得出的结果一致。变工况计算的方法可以综合考虑其他限制因素,因而所得热电负荷关系曲线更加合理。

(3) 变工况热力计算的方法可以用于分析抽汽参数的改变对机组负荷调度范围的影响。通过分析得知,对于抽汽压力较高的机组,适当降低抽汽压力可以有效提高电负荷的调度范围。

参考文献:

[1] Myrsine Salta ,Heracles Polatidis ,Dias Haralambopoulos. Industrial combined heat and power(CHP) planning: development of a methodology and application in Greece [J]. Applied Energy ,2011 ,88 (5) : 1519 - 1531.

[2] Nesheim Svein J ,Ertesvag Ivar S. Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power [J]. Energy Conversion & Management 2007 ,48 (3) : 1004 - 1015.

[3] Peacock A D ,Newborough M. Impact of micro-combined heat-and-power systems on energy flows in the UK electricity supply industry [J]. Energy 2006 ,31 (12) : 1804 - 1818.

[4] AiKaterini Fragaki ,Anders N Andersen. Conditions for aggregation of CHP plants in the UK electricity market and exploration of plant size [J]. Applied Energy 2011 ,88 (11) : 3930 - 3940.

[5] 郑体宽. 热力发电厂 [M]. 北京: 水利电力出版社 ,1995.

ZHENG Ti-kuan. Thermal power plants [M]. Beijing: China Water Conservation and Electric Power Press ,1995.

[6] 林嘉华. 供热机组热经济性分析及特性方程研究与应用 [D]. 南京: 东南大学 2003.

LIN Jia-hua. Thermal cost-effectiveness analysis of a heat-supply unit and study and application of its characteristic equation [D]. Nanjing: Southeast University 2003.

[7] 俞启云, 胥建群, 李 刚. 供热机组热力特性研究 [J]. 热能动力工程 2010 25 (S) : 1 - 5.

YU Qi-yun ,XU Jian-qun ,LI Gang. Study of the thermal characteristics of a heat-supply unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2010 25 (S) : 1 - 5.

[8] 李 杨, 邢秦安, 严俊杰. 二次再热超临界供热机组热力系统经济性定量分析方法 [J]. 热能动力工程 ,2004 ,19 (4) : 351 - 353.

LI Yang ,XING Qin-an ,YAN Jun-jie. Economic quantitative method used for analyzing the thermodynamic system of a supercritical heat-supply unit with a double reheat [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2004 ,19 (4) : 351 - 353.

[9] 王 源. 供热机组负荷优化分配的研究 [D]. 南京: 东南大学 2005.

WANG Yuan. Study of the load optimization distribution of a heat-supply unit [D]. Nanjing: Southeast University 2005.

[10] 武学素. 热电联产 [M]. 西安: 西安交通大学出版社 ,1988.

WU Xue-su. Cogeneration Plants [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press ,1988.

[11] 王学栋, 魏 东, 孙书耀, 等. 不同类型供热机组的电热负荷优化分配和调峰能力 [J]. 汽轮机技术 ,2010 ,52 (5) : 387 - 390.

WANG Xue-dong ,WEI Dong ,SUN Shu-yao et al. Optimized distribution of the thermoelectric loads of different types of heat supply units and their peak-shaving abilities [J]. Steam Turbine Technology 2010 52 (5) : 387 - 390.

[12] 邹平华, 赵 耀. 热电厂不同采暖抽汽压力对经济性的影响 [J]. 节能技术 2010 28 (5) : 474 - 477.

ZOU Ping-hua ,ZHAO Yao. Influence of various heating and extraction steam pressures on the cost-effectiveness of a thermal power plant [J]. Energy Conservation Technology 2010 28 (5) : 474 - 477.

[13] 李和逸. C6-3.43 型汽轮机提高抽汽压力的改造 [J]. 发电设备 2006 20 (2) : 98 - 99.

LI He-yi. Modification of a C6-3.43 type turbine for enhancing the extraction steam pressure [J]. Power Generation Equipment , 2006 20 (2) : 98 - 99.

(丛 敏 编辑)

formance test ,error analysis ,Taylor series

基于变工况分析的供热机组负荷特性研究 = **Study of the Load Characteristics of a Heat-supply Unit Based on an Analysis of Its Off-design Operating Conditions** [刊 ,汉] WU Long ,YUAN Qi (College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) ,DING Jun-qi ,WANG Xue-tong (Shandong Electric Power Research Institute ,Jinan ,China ,Post Code: 250002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 424 ~ 428

At present ,there exist universally disputes between power plants and the electric power dispatchment departments concerning the matter how to determine the dispatchment scope of the heat-power load for a heat-supply unit. On the basis of the thermal parameters and characteristics of the heat-supply unit together with its off-design operating condition thermal calculation results ,curves showing the relationship of the heat-power load dispatchment were obtained. Through a comparison with the curves showing the heat-power relationship obtained by using the chart of the operating conditions of the unit ,it can be found that the curves obtained from the thermal calculation have an enough calculation precision. Moreover ,through adopting the thermal calculation method ,other factors ,which limit the load dispatchment of the unit ,can be taken into account properly ,thus making the dispatchment scope more rational and reasonable. At the same time ,the method in question can effectively predict the influence of a change in the steam extraction parameters on the load dispatchment of the unit. Through a comparison ,it can be found that for a unit with a relatively high heat supply steam extraction pressure ,to properly reduce the steam extraction pressure can enhance the power dispatchment scope of the unit. The method under discussion can offer a sound and correct solution to the load dispatchment problem between a power plant and its heat-power dispatchment department. **Key words:** heat supply unit ,off-design operating condition calculation ,load dispatchment ,steam extraction pressure

闭式循环喷雾冷却传热特性实验研究 = **Experimental Study of the Atomization Cooling and Heat Transfer Characteristics of a Closed Type Cycle** [刊 ,汉] ZHANG Wei ,WANG Zhao-liang ,XU Ming-hai (College of Storage ,Transportation and Architectural Engineering ,China Petroleum University ,Qingdao ,China ,Post Code: 266555) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 429 ~ 433

With distilled water and anhydrous alcohol serving as the working medium respectively ,studied was the influence of the atomization flow rate ,surface structure and atomization working medium on the heat transfer performance in a