[热电]

300 MW热电联产机组变工况运行优化与实践

文/中国石油集团电能有限公司热电一公司　张国军

针对亚临界300 MW热电联产机组的实际复杂变工况运行特点，研究考虑调门节流损失和供热抽气变化的滑压运行曲线综合优化方法。开发用于指导机组实时运行优化调整的在线监测系统，实现高调门节流特性的参数化表征及3D可视化实时监测，达到明显改善机组的运行安全性和运行经济性的效果。

中油电能热电一公司四号机组为一台亚临界300 MW热电联产汽轮发电机组，汽轮机为哈尔滨汽轮机厂有限责任公司生产的CC300—16.67/1.3/0.4型。滑压运行方式优化是汽轮机变工况最简单易行而且效果极佳的优化技术。如果机组根据额定背压设计的滑压运行曲线，无法保证机组在变工况模式下始终保持较优的运行状态，尤其是热电联产机组，变工况运行模式较纯凝机组更加复杂；此外，由于机组局部发生改变非常容易影响机组的最优运行状态。针对亚临界300 MW热电联产机组的实际复杂变工况运行特点，研究考虑调门节流损失和供热抽汽变化的滑压运行曲线综合优化方法，并开发用于指导机组实时运行优化调整的在线监测系统，对于机组复杂变工况模式下的运行优化管理是十分必要的。

设计及实现方法

1．高调门节流特性的滑压曲线优化设计及实现方法

纯阀点滑压曲线没有考虑机组复杂变工况时的节流损失，而纯试验获取滑压曲线的方法受机组变工况运行时系统动态调整影响，导致最终计算结果不准确。因此，需要研究亚临界300 MW热电联产机组复杂变工况模式下的系统准稳态参数获取方法，实现对机组的变工况计算，得到顺序阀运行下机组变工况运行时高调门节流损失和机组在不同工况下给水泵功耗的变化情况，综合设计复杂变工况下的机组最优滑压运行曲线，克服目前纯阀点滑压运行曲线设计方法和纯试验获取滑压运行曲线的弊端。

2．抽气变化的三维滑压曲线的二维设计及实现方法

抽气参数变化是亚临界300 MW热电联产机组复杂变工况模式最大的影响因素，机组在从供热期至非供热期的过渡过程中，抽气量和抽气参数都处于实时变化状态，由于机组DCS控制逻辑的二维查表方法限制，目前的滑压运行曲线优化设计及实现方法还无法考虑抽气复杂变化对最优运行主蒸汽压力的影响。因此，需要针对不同供热抽气流量情况建立多目标的非线性优化系统，研究主气压－抽气量－负荷的三维滑压曲线的二维设计及实现方法，保证机组在不同抽气工况下的都能够处于最经济运行状态。

3．高调门流量特性参数化表征及实时状态监测方法

高调门节流特性会随着机组的复杂变工况运行而发生改变，这种改变会对机组的最优运行主蒸汽压力产生一定的影响。然而，目前还没有一

个具体参数能够对其进行定量刻画来实现节流特性的在线实时监测。所以，需要研究针对不同工况下的调门节流特性的参数化表征方法，在此基础上，开发一套调门流量特性的3D可视化监测系统，实现对调门部件运行状态的在线监测和故障预警。利用这个系统机组高调门流量特性不仅能够对高调门的喷嘴配气特性故障进行预警，保证机组的安全稳定性，而且还能够方便电厂人员进行直观方便的观察和操作，指导运行人员实时对机组最优滑压点进行优化调整，实现热电联产机组复杂变工况模式下滑压运行的高效经济性。

机组实际滑压优化存在的问题

1）机组喷嘴配气方式在组合方式、重叠度和流量特性偏离存在的问题。

2）机组采用阀点滑压方式，再加上机组存在抽气供热工况、背压变负荷运行不恒定，导致机组运行主蒸汽压力偏离最优值。

3）由于电厂内有多台机组同时供热，机组抽气量和抽气参数经常发生变化，导致机组变工况模式更加复杂。

4）由于缺乏现场实时调门节流特性的监测系统，无法及时掌握阀门的运行状态和性能，尤其是发生故障和特性改变时，进而不能及时有效地对机组最优滑压曲线进行优化调整。

机组的调门节流特性分析

如图1所示，机组四个高调门及其对应的喷嘴数目相同，采用喷嘴配气规律参与调峰运行，顺序阀的进气顺序为1#＋2#→3#→4#；机组低负荷时属于下缸进气方式，当1#、2#高调门开度接近全开而其他未开时，上下缸进气严重不均、温差大，会产生较大的配气不平衡气流力和漏汽量，影响机组的运行稳定性和经济性；即便是机组的瓦温轴振水平较低，但是机组两阀点运行时，配汽不平衡气流力较大，轴承负载会比较大、加剧部件磨损，不利于轴系运行稳定性；具体表现：顺序阀2#瓦温比单阀方式瓦温高出超过5℃。如图2所示，机组阀门两阀点和三阀点的开起重叠度设计不合理，重叠度设计过大，在重叠度附近节流损失较大。机组在68%阀位点处的开起规律存在不合理性，存在阀门大幅摆动安全隐患；并且，单个阀门的开起规律存在不光滑点，导致阀门动作平稳性较差，加大了设备原件磨损，降低其使用

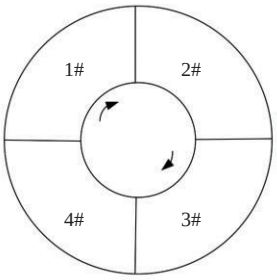


图1　机组高调门喷嘴布置图

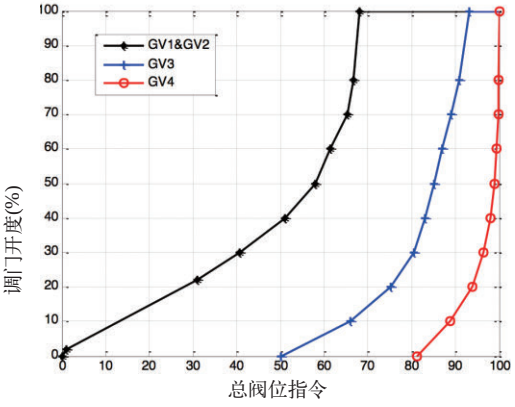


图2　机组顺序阀配气规律设计曲线

寿命，影响了电厂运行的间接经济性。

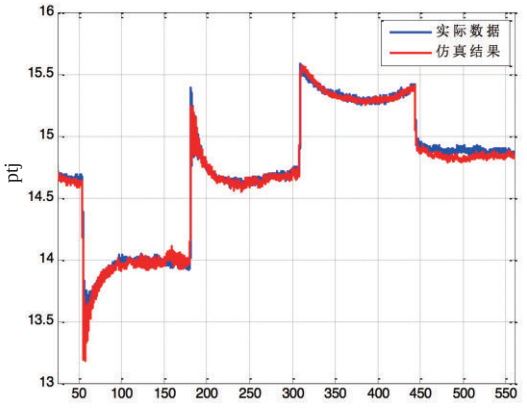
建立机组实际变工况高精度仿真模型

建立亚临界300 MW热电联产机组复杂变工况模式下运行优化技术研究与应用相关的动态数学模型，完成机组组成的锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器及热网的耦合影响模型；孤网运行机组DEH、DCS控制策略以及不同控制策略下机组之间耦合影响模型；发动机模型、蒸汽容积效应模型、转子模型、回热系统模型和再热系统模型。热网模型包括：热用户模块模型、一二级热网换热器模块模型、凝汽器模块模型和热网加热器模块模型。

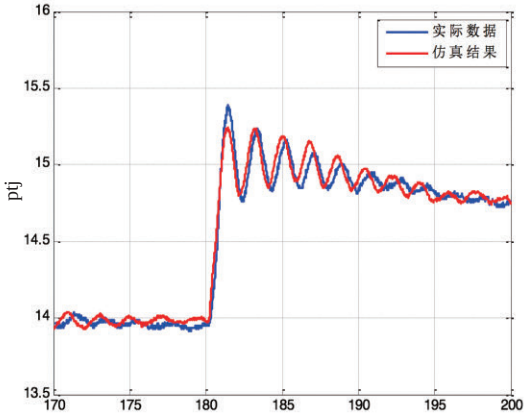
为了满足进行各种运行工况下的仿真优化分析等能力，基于机组实际运行数据完成整个系统数学模型的仿真校验，保证模型与实际物理系统具有较高吻合度，能够如实反映整个系统的静态和动态耦合影响关系。如图3所示，模型精度已经满足需求。

确定调门节流特性和滑压运行曲线优化

由于机组实际投入喷嘴配气规律时，调门特性曲线的重叠度大小直接影响调门节流特性，因此，调门特性曲线对机组最优运行主蒸汽压力是



（a）实测调节级压力与仿真结果对比



（b）局部放大图

图3　亚临界300 MW热电联产机组建模的模型准确度验证

有影响的。目前机组普遍采用的阀点滑压运行方式是不合理的，所选择的滑压阀点受实际安装和变工况等因素往往不是最优经济运行点。因此，应采用考虑节流损失的策略确定滑压点。

一般机组根据负荷大小调整调节阀门，由于蒸汽的分流，部分通过未完全开起的调节阀门将导致较大的节流损失，其余部分通过的是全开的调节气门，几乎没有节流损失，因此整体效率是高于节流配气的。在其他工况下，通过部分开起阀门的主蒸汽受到节流作用的影响，效率下降。而且阀门开起没有重叠，各个配气阀门的开度也是单独控制的。假设有四个调节气门，由于在改变主蒸汽压力参数的情况下，机组的大部分热力参数不会发生明显的变化，而主要的变化量是第一级组的做功、第一级组的效率以及除氧器给水泵的功耗。计算滑压状况下的最优初压的实质是在改变主蒸汽初压的情况下计算，第一级组的总功率实际增量与除氧器给水泵功耗增加量的比较。

从机组做功方面考虑，当主蒸汽流量不变时，由弗留格尔公式可知，调节级后压力基本保持恒定。而通流面积不变，节流后压力与调节级后压力的压差不变，所以节流后压力为定值，实际焓降一定。在主蒸汽流量不变的条件下，调节级前功率为定值，且效率只与主气压有关。

对于调节级后，可以先不考虑背压变化。当主蒸汽流量不变时，改变主蒸汽压力会使高排温度产生波动背压不变的情况下调节级后的功率和效率近似保持不变。机组主蒸汽流量才是影响机组滑压运行曲线确定的最主要因素，以主蒸汽流量为自变量的滑压运行确定方法是有一定的合理性和理论依据的，只不过忽略了一些实际因素而对优化效果产生影响。所以，需进一步将调门节流特性考虑在内，对滑压运行曲线进行修正。

确定考虑抽气变化的最优滑压运行曲线

实际中机组负荷的影响因素还有很多，例如背压的变化会引起机组负荷较大的变化；对于热电联产机组，抽气量的改变会使机组电负荷发生显著的变化。因此，目前普遍采用的以机组负荷作为自变量来确定机组主蒸汽压力的滑压设定值的方法是不合理的。

从给水泵功耗方面考虑，给水泵功耗公式为

$$N_{\mathrm{p}}=\frac{D_0(P_0V_0-P_rV_r)}{\eta_{\mathrm{p}}}$$

式中，D_0是给水流量；P_0、V_0是给水泵出口压力和比容；P_{r}、V_{r}是给水泵入口压力和比容；η_{p}是给水泵效率。

因为给水泵效率和比容可视为不变，所以给水泵功耗只与给水泵前后工质压差和给水流量两个参数有关，与功率等其他因素无关，当主蒸汽流量给定时，给水泵的功耗就只与前后压差有关，而给水泵前压力近似不变，所以主蒸汽压力就决定了给水泵功耗，这就可以通过调节主气压确定最优压力而且，将给水泵功耗的影响因素包括在内，从而说明以机组的主蒸汽流量作为自变量来确定主蒸汽压力的滑压设定值时已经包括了给水泵功耗的影响。再考虑背压变化时的情况，由以上分析知此时可以忽略高排温度的变化，如图4所示。当背压发生变化时，只改了调节级后的功率，而对最优主气压的确定不产生影响，所以在确定最优主气压过程中可以忽略背压的影响。从而说明在主蒸汽流量一定的条件下，机组做功只受主气压的影响。

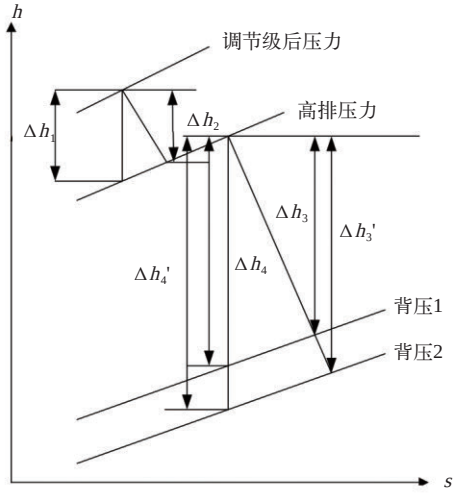


图4　背压变化时的焓熵图

从抽气量方面考虑：当抽气量发生改变时，只会改变调节级后的功率，而以上已经论证了调节级后功率的变化不会对最优滑压值的确定产生影响。然而，实际电厂多台热电联产机组同时工作时，机组变工况模式更加复杂；如图5所示，为亚临界300 MW机组供热期三种典型的供热工况。因此，机组滑压运行曲线即便是以主蒸汽流量作为自变量来确定主蒸汽压力设定值时，抽气变化和背压变化都会对其产生影响。所以，采用在进行滑压运行曲线设计时同时考虑了背压和抽气变化影响的优化策略，以背压和抽气变化的实时在线修正，能够达到运行优化作用。

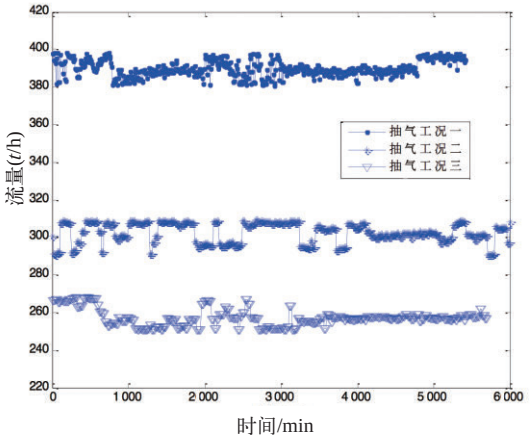


图5　亚临界300 MW机组复杂抽汽量变工况模式

此外，目前电厂机组DCS中的查值用的函数框只适用于二维图，对于三维图就只能当做二维来处理。因此，以机组负荷作为自变量来确定机组的最优滑压值只适用于某一背压和单一抽气参数，当实际背压和抽气参数发生偏离时，该主蒸汽压力值已非最优。所以，基于背压和抽气在线实时修正的机组DCS的滑压运行曲线改造策略，利用二维查询修正方法近似实现三维滑压曲线，能够实现多个背压和抽气工况下的经济运行，还具备良好的扩展性和可实施性，使机组更加接近全工况下的最优运行方式。

建立用于机组变工况运行优化指导的在线监测系统

准确合理的阀门流量特性曲线不仅能够有效提高机组控制精度、改善机组的安全性，而且还能够保证机组滑压运行曲线处于最优经济状态。然而，当机组调门节流特性发生改变时，往往不能及时被发现并同时对机组滑压运行曲线进行调整。开发一套调门流量特性的3D可视化监测系统，实现对调门部件运行状态的在线监测和故障预警。当机组高调门流量特性不仅能够对高调门的喷嘴配汽特性故障进行预警、保证机组的安全稳定性了，而且还能够方便电厂专业人员进行直观和方便的观察和操作，指导运行人员实时对机组最优滑压点进行优化调整，实现热电联产机组复杂变工况模式下滑压运行的高效经济性。

结束语

通过对亚临界300 MW热电联产机组的复杂变工况模式下的运行优化技术优化与实践，达到明显改善机组运行安全高效性的效果：

1）在机组运行的安全稳定性方面，通过在线监测阀门流量特性及对机组调节稳定性的影响，明显改善机组整体的调节系统和轴系的稳定性，确保调门及相关部件的安全运行，避免出现影响机组安全稳定运行的问题。

2）在机组运行的直接经济性方面：通过对机组目前采用的阀点滑压运行曲线的重新综合优化设计，实现机组在变负荷运行时的平均降低运行热耗25～50 kJ/kW·h，折合降低机组发电煤耗1～2 g/kW·h。

3）通过在线监测流量特性的改变程度，及时指导调整滑压运行曲线，保证机组复杂变工况模式下一直处于最优运行经济状态。

4）在机组运行的间接经济性方面，通过建立3D全景可视化汽轮机调速系统模型，实现汽轮机调速系统的实时状态监测和早期预警，及时发现故障问题并及时修复，还能够减小日常维护费用，间接提高机组运行的经济性，增加电厂整体运行效益。EA