

国产 200MW 汽轮机中 压缸启动转子寿命损耗分析*

唐 博

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 采用有限单元法计算分析了国产 200 MW 中间再热汽轮机中压缸启动高压转子的温度场和应力场, 并估算了一次中压缸启动高压转子的寿命损耗, 为优化该型机组的启动方式提供了参考。

[关键词] 汽轮机, 中压缸启动, 高压转子, 寿命损耗

[中图分类号] TK263.1; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)02-0042-05

当前电网峰谷差日益扩大, 200 MW 机组已作为调峰机组, 迫切要求其能在保证安全性的条件下尽可能缩短启动时间。中压缸进汽冲转启动方式较常规的高、中压缸同时进汽冲转的启动方式, 不仅启动时间缩短, 而且减少高、中压转子的热应力, 因此中压缸启动成了目前电厂对国产 200 MW 汽轮机积极研究的一种启动方式。

中压缸启动指蒸汽先通过再热器进入中压缸冲转, 通过高压缸排汽阀或旁路门进汽预暖高压缸, 待高压缸暖机结束或机组带一定负荷后, 再切换到常规的高、中压缸同时进汽带负荷。由于在中压缸启动进汽冲转、接带负荷初期阶段, 中压缸内为真空, 缸内蒸汽压力低, 因此换热系数小, 中压转子不会产生较大的热应力^[1]。只是在机组带负荷后, 高压缸内蒸汽参数高, 环境比中压缸恶劣得多, 因此转子寿命损耗的焦点主要集中在高压转子。

本文以江苏新海发电厂国产 200 MW 中间再热汽轮机的资料为依据, 采用有限单元法分析计算了其中压缸启动高压转子的温度场和应力场。

1 数学模型

1.1 温度场基本方程

计算汽轮机转子不稳定温度场, 一般认为转子是一个均匀、各向同性且无内热源的物体, 属于解轴对称非定常温度导热问题, 它可由下列方程描述:

$$\begin{cases} \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(kx \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial t}{\partial y} \right) - \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \\ t|_{\tau=0} = t_1(x, y) \\ k \frac{\partial t}{\partial x} n_x + k \frac{\partial t}{\partial y} n_y + \alpha(t - t_f) = 0 & (x, y) \in S_2 \\ t = t_2(x, y) & (x, y) \in S_1 \end{cases} \quad (1)$$

$t_1(x, y)$ —初始温度分布; $t_2(x, y)$ —边界 S_1 上的已知温度分布, 在 S_2 边界上存在着对流换热; t_f —介质温度; n_x, n_y —边界 S_2 外法线方向与 x 和 y 轴夹角的余弦; x —旋转半径, 由中心孔指向轴表面; y —对称轴; τ —时间; k —转子材料导热系数; c —转子材料比热; α —对流换热系数, 不仅与通流部分参数

* 收稿日期: 2001-10-12.

作者简介: 唐博, 1970-, 工学硕士, 南京师范大学动力工程学院讲师, 主要从事热能动力设备的教学和研究。

有关, 而且还与轴的不同部位有关, 本文采用文献[2] 上推荐的公式.

1.2 有限元法的温度场方程

应用伽略金方法建立基本方程, 对时间项进行三点后差格式离散, 得出满足边界条件的变步长有限元法- 温度场本构方程:

$$\left[[k] + \frac{2A+1}{A^2+1} \cdot \frac{[C]}{\Delta t} \right] \{t\}^n = [F]_t + \frac{[C]}{\Delta t} \left[\frac{A+1}{A} \{t\}^{n-1} - \frac{A}{A+1} \{t\}^{n-2} \right] \quad (2)$$

其中:

$$K_{ij} = \sum_e \int_e x \lambda \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy + \sum_{S_2^e} \int_{S_2^e} x \alpha N_i N_j ds$$

$$C_{ij} = \sum_e \int_e x c \rho N_i N_j dx dy$$

$$F_i = \sum_{S_3^e} \int_{S_3^e} x \alpha N_i t_f ds - \sum_{S_2^e} \int_{S_2^e} x q N_i ds$$

N_i — 形函数; S_3^e — 包含第三类边界条件的单元边; S_2^e — 包含第二类边界条件的单元边; S_1^e — 不包含边界条件的单元内部边; $A = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}$ 时间变步长倍数.

1.3 有限元法的应力场方程

对于弹塑性情况, 以 Mises 屈服准则和塑性流动法则可建立起应力和应变关系方程, 然后用有限元法求解暂态过程的热应力[3]. 首先将时间域分成若干步, 求出稳定应力场, 然后采用增量加载法, 求出下一步的稳定应力场, 一直计算到所要求的步数. 在计算过程中要考虑有些单元高斯点的应力会从弹性区过渡到塑性区. 方程如下[1]:

$$[K] \Delta \{ \delta \} = \Delta \{ R \}_v + \{ R \}_p + \{ R \}_e + \{ R \}_T \quad (3)$$

式中: $[K] = \iint_e [B]^e T [D] e [B]^e dx dy$ — 单元刚度阵; $\Delta \{ R \}_v = \iint_e [N]^T \begin{bmatrix} \Delta K_x \\ \Delta K_y \end{bmatrix} dx dy$ — 单元体积分力

增量载荷向量; $\Delta \{ R \}_p = \int_{S^e} x [N]^T \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \end{bmatrix} ds$ — 边界单元表面力增量载荷向量; $\Delta \{ R \}_e$ — 集中力增量载荷

向量; $\Delta \{ R \}_T$ — 结点力增量载荷向量.

1.4 寿命损耗估算

汽轮机在启停过程中转子所承受的是交变热应力. 这种交变热应力导致了汽轮机转子的低周疲劳, 对转子寿命有较大的影响.

目前国内在进行转子寿命损耗估算时所用的金属高温疲劳曲线及计算公式各不相同, 但比较倾向使用文献[2] 上给出的疲劳寿命表达式:

$$\mathcal{E} = 0.0025 N_i^{-0.1} + 0.725 N_i^{-0.98} \quad (4)$$

式中: N_i 代表到出现 $0.1 \mu m$ 裂纹的循环次数.

该公式是根据将模型叶轮感应加热到 $500^\circ C$, 再用冷风吹, 冷却到 $300^\circ C$, 循环中应力保持时间为 4 h 的实验中得到的. 与汽轮机作实际的冷、热态启动相比, 在客观上比较真实地反映了材料的性能.

2 转子剖分和启动曲线拟定

2.1 高压转子的有限元网格划分

本计算中转子的有限元网格均采用 8 结点 4 边形单元. 在启动过程中, 由于转子横断面上发生最大

应力的部位是在外表面上, 考虑微机的计算条件和计算结果的准确性, 在对高压转子剖分时, 转子中心孔及外表面处网格应适当加密, 对高压调节级、第一压力级这一启动过程中温度变化最为剧烈的区段以及前轴封等处也应适当加密网格, 如图 1. 对高压转子整体剖分, 得到 275 个单元 956 个结点.

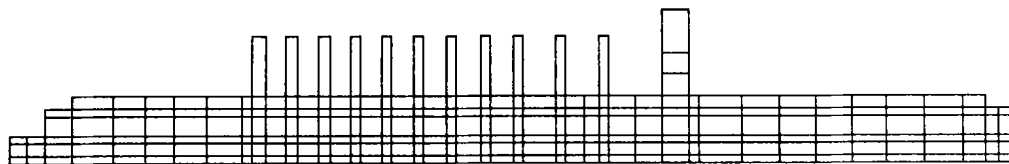
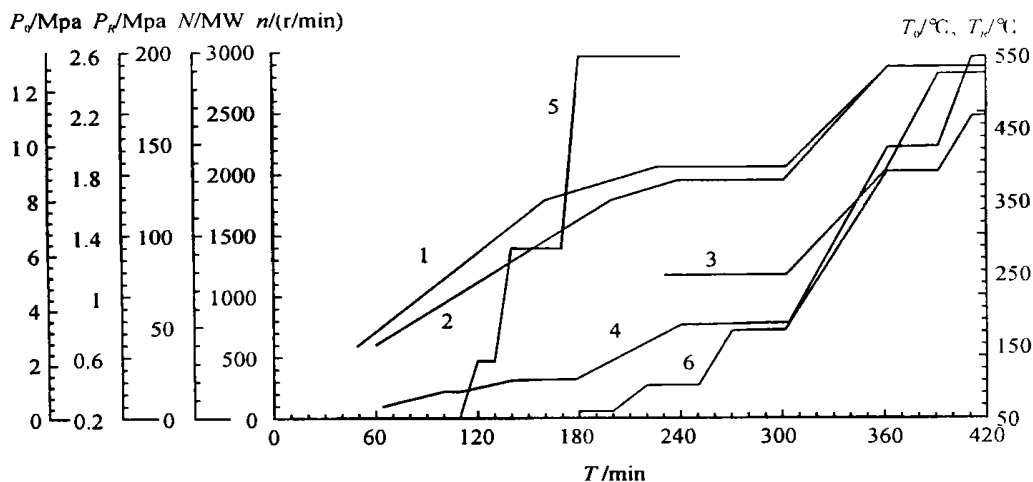


图 1 高压转子有限元网格

2.2 启动曲线的拟定

计算的启动曲线按新海发电厂试验优化后的中压缸启动试验曲线进行, 如图 2.



1: 新汽温度(T_0); 2: 再热汽温(T_R); 3: 新汽压力(P_0); 4: 再热汽压(P_R); 5: 转速(n); 6: 功率(N)

图 2 中压缸启动试验曲线

3 计算结果及分析

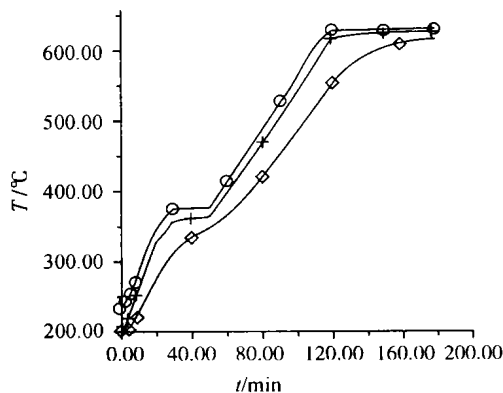
3.1 启动状况分析

切换前高压转子由倒暖预热及鼓风摩擦来加热, 由于抽真空使高压转子换热系数较低, 当高压转子达到与进气温度相匹配的温度(300℃左右) 时, 可以认为它处于均匀温度场, 即认为高压转子初始温度为 300℃, 但轴封处温度为 150℃.

整个启动过程耗时约 7h, 从切换到高压缸进气至启动结束, 大约 3 h. 高压缸初始阶段温升率是较低的, 产生的应力也较小.

3.2 温度场分析

(1) 图 3 为调节级后气温及转子径向温度随时间变化的曲线. 从图中可以看出, 在切换之初转子温度响应较慢, 随着启动过程的延续, 蒸汽流量加大, 调节级气压升高, 换热系数随之增大, 转子表面与蒸汽温度曲线逐渐接近.



○: 蒸汽温度; + : 轴表面温度; □: 中心孔温度

图 3 为调节级后气温及转子径向温度随时间变化的曲线图

(2) 从图 3 中还可以看到, 在整个启动过程中, 出现了 2 次转子内外表面温差较大的情况. 一次发生

在切换后 20 min, 另一次发生在切换后 120 min. 后者由于蒸汽温度很高, 金属许用应力随温度升高而下降, 故在相同转子内外表面温差下, 120 min 时转子的情况应倍加关注.

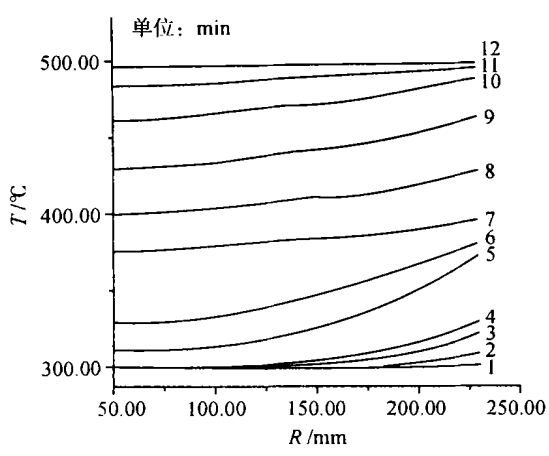
(3) 图 4 为调节级后金属温度在切换后不同时间沿转子径向变化. 在切换后 80 min 转子进入准稳态, 即随时间变化, 转子内外表面温差变化很小; 而到 110 min 后, 准稳态结束, 120 min 时内外表面达温差最大值. 随后由于机组暖机, 转子内外表面温差开始减小.

(4) 图 5 为启动过程中切换到高压缸进气后 120 min 高压转子的温度场分布图, 此时转子内外表面温差最大, 蒸汽参数亦较高.

3.3 应力场分析

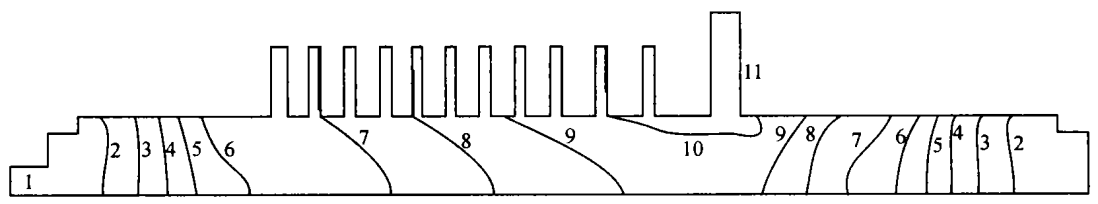
图 6 为等效应力场, 从图中可以看出调节级叶轮根部出现最大应力, 最大等效应力值为 122.57 MPa.

根据启动曲线, 切换后 120 min 的主气温升率为 1.93 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 根据文献[2] 常规冷态启动过程中, 相同的温升率下高压转子调节级叶轮根部的最大应力为 190.4 MPa. 由此可见, 中压缸冲转倒暖预热高压缸的启动方式, 从热应力角度讲, 比常规冷态启动应力水平低.



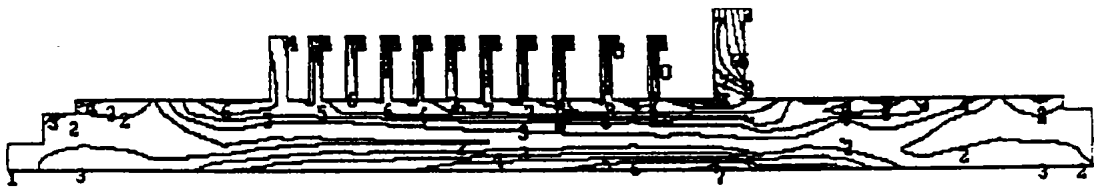
1: 1min; 2: 3min; 3: 5min; 4: 10min;
5: 20min; 6: 50min; 7: 80min; 8: 90min;
9: 100min; 10: 120min; 11: 150min; 12: 170min

图 4 调节级后金属温度在切换后不同时间沿转子径向变化曲线图



1: 57.884; 2: 115.24; 3: 161.6; 4: 207.96; 5: 254.32; 6: 300.68; 7: 347.03; 8: 393.03; 9: 439.75; 10: 486.11; 11: 513.47

图 5 切换后 120 min 高压转子的温度场/ $^{\circ}\text{C}$ 示意图



1: 13.516; 2: 133.13; 3: 254.75; 4: 376.36; 5: 497.97; 6: 619.59; 7: 741.2; 8: 862.82; 9: 984.43; 10: 1106; 11: 1225.7

图 6 切换后 120 min 高压转子等效应力场/ $(1 \times 10^5 \text{ Pa})$

由计算结果可知, 最大等效应力 122.57 MPa 没有进入塑性区, 这说明拟定的启动曲线是安全可靠的. 从热应力角度讲, 还有提高温升率, 进一步缩短启动时间, 提高电厂的经济安全性的可能.

从图 3 可以看出, 在启动过程中, 有两次内外转子表面温差较大的情况. 这表明转子出现过两次应力较大的情况. 虽然第一次应力峰值不大 (92.75 MPa), 但从金属材料的角度应避免这种情况的发生. 因此, 在启动过程中, 高压缸进气后负荷不要增加太快, 同时也要避免高压排气端温度过高.

3.4 寿命损耗估算

由文献[2] 推荐的相同类型机组叶轮根部应力集中系数为 2.76, 则调节级叶轮根部最大应力为:

$$\Delta\sigma = 2.76 \times 122.57 = 338.29 \text{ (MPa)}$$

根据文献[2]应力—应变循环公式、疲劳寿命表达式,得出该次中压缸冲转倒暖预热高压缸的启动(单向过程),其寿命损耗为0.00254%。

4 结论

(1)本次中压缸启动过程中,在切换到高压缸进气后出现过两次温度梯度峰值,其中切换后120 min在调节级叶轮根部的温度梯度和应力水平最大。

(2)中压缸启动过程中,调节级叶轮根部出现最大等效应力为122.57 MPa,远低于常规的高、中压缸同时进气冲转的冷态启动应力水平。因此从热应力角度看,比常规冷态启动安全;

(3)由于中压缸进气冲转先倒暖预热高压缸,故切换到高压缸进气后可以以较快的速度加负荷,此启动方式较常规的高、中压缸同时进气冲转的启动方式,不仅启动时间缩短,而且减少高、中压转子的热应力。

(4)该次中压缸启动单向寿命损耗为0.00254%。从热应力角度讲,该启动曲线还可以进一步优化,以提高温升率,缩短启动时间,提高电厂的经济安全性。

[参考文献]

- [1] 唐博. 国产200MW汽轮机启动方式研究与其转子寿命损耗分析[D]. 南京: 东南大学硕士学位论文, 1996.
- [2] 张保衡. 大容量火电机组寿命管理与调峰运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [3] 谢贻权, 何富保. 弹性和塑性力学中的有限单元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [4] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

Analysis of the Service Lifetime Loss of Domestic 200MW Turbine Rotor for the Intermediate Pressure Cylinder Start-up

Tang Bo

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The paper calculates and analyses the temperature field and the stress field of high pressure rotor (H. P. R) of domestic 200 MW intermediate reheat turbine during the start-up of the intermediate pressure cylinder (I. P. C) by adopting the finite element method, and estimates the loss in the service lifetime of the H. P. R in course of the I. P. C start-up on its once run. The results are useful for optimizing the start-up mode of this type of turbine unit.

Key words: steam turbine, intermediate pressure cylinder start-up, high pressure rotor, loss in service lifetime

[责任编辑: 刘健]