

汽轮机的转子损伤与优化启动

许德刚,翟 萍,秦力一

(郑州大学工程力学系,河南 郑州 450002)

摘 要:针对汽轮机启动时机器损耗和燃料损耗都很大且容易出事故这一问题,研究了转子的热应力计算,导出了转子热应力计算公式,根据连续损伤理论,讨论了转子的疲劳损伤计算,并从总损耗最小出发,探讨了汽轮机的优化启动问题.研究结果表明,汽轮机启动时的热应力并非越低越好,而是存在一最佳值,在此值附近启动效益最好.

关键词:汽轮机;转子;损伤;优化启动

中图分类号:TK 263.61 文献标识码:A

随着火电机组容量的迅速增加,汽轮机转子的体积也迅速变大,由转子内部温差而产生的热应力越来越大,而且,由于大型家用电器的普及以及其它原因,电网中的峰谷差会随气温或昼夜等因素的变化而增大,调峰任务加重.对于调峰机组,由于启停频繁,经常在非稳态工况下运行,转子热应力及由此而造成的损伤更加突出,所以对转子的疲劳和蠕变损伤问题的研究越来越重要,并引起了国内外有关专家的关注^[1,2].

汽轮机在暂态工况下运行时,其燃料损耗和由疲劳、蠕变等造成的转子寿命损耗皆与启动温升率有关,但两者与温升率之间呈相反的变化规律,因此适当调整温升率可使总损耗最小,从而可对启动过程进行优化.

本文首先讨论了汽轮机转子热应力的计算,导出了转子热应力计算公式,然后在此基础上利用连续损伤理论计算了转子的损伤,最后讨论了汽轮机的优化启动及在工程实用中应注意的一些问题.

1 汽轮机转子的热应力

转子是汽轮机的关键部件,易损且昂贵,所以一般以转子为代表计算汽轮机的寿命损耗.设转子为无限长圆筒体,初始温度均匀且与蒸汽温度相一致,转子材料的物性系数等为常数,由此转子的瞬态温度分布可由如下方程描述:

$$\left\{\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \\ T|_{\tau=0} &= T_{q0}; \\ \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} &= -\frac{\alpha}{\lambda} [T - (T_{q0} + \eta_1 \tau)] \quad (0 < \tau < \tau_1); \\ \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} &= -\frac{\alpha}{\lambda} [T - (T_{q0} + \eta_1 \tau_1 + \eta_2 (\tau - \tau_1))] \quad (\tau > \tau_1); \\ \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_b} &= 0. \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: τ 为时间变量; T 为转子内任意一点处 τ 时刻的温度; a 为转子材料的导温系数; r, R, R_b 分别为转子的任意半径、外圆半径和内孔半径; α 为对流放热系数; λ 为转子材料的导热率; T_{q0} 为转子的初始温度; η_1, η_2 分别为第一和第二阶段蒸汽温升率; τ_1 为第一阶段持续时间.

求解上述方程,可得转子温度场分布:

$$\begin{aligned} T &= T_{q0} + \eta_1 \tau - \frac{\eta_1 R_b^2}{2a} \ln \frac{r}{R} + \eta_2 \Delta \tau - \\ &\quad \frac{\eta_2 R^2}{4a} \left[\left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{2}{B} \left(1 - \frac{R_b^2}{R^2} \right) \right] + \\ &\quad \frac{2R^2 B}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n I(\beta_n)^{-1} D_{10} \left(\beta_n \frac{r}{R} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Phi_n = \eta_1 e^{-\beta_n F_0} + \Delta e^{-\beta_n (F_0 - F_1)}$;
 $I(\beta_n) = \beta_n^2 \{ (\beta_n^2 + B^2) D_{01}(\beta_n) - \frac{R_b}{R} \beta_n [B S_{01}(\beta_n) + \beta_n D_{01}(\beta_n)] \}$;
 $D_{10}(\beta_n) = Y_1 \left(\beta_n \frac{R_b}{R} \right) J_0(\beta_n) - J_1 \left(\beta_n \frac{R_b}{R} \right).$

收稿日期 2002 - 06 - 30,修订日期 2002 - 08 - 05

基金项目 河南省自然科学基金资助项目(954051500)

作者简介:许德刚(1948 -)男,山东省单县人,郑州大学教授,硕士,主要从事疲劳断裂方面的研究.

万方数据

$$Y_0\left(\beta_n \frac{r}{R}\right);$$

$$D_{00}(\beta_n) = Y_0\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) J_0(\beta_n) - J_0\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) \cdot$$

$$Y_1(\beta_n);$$

$$D_{01}(\beta_n) = Y_0\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) J_1(\beta_n) - J_0\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) \cdot$$

$$Y_1(\beta_n).$$

B 是 Biot 数, β_n 为下述方程的第 n 个根:

$$J_0(\beta_n) - \frac{J_1\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right)}{Y_1\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right)} Y_0(\beta_n) - \beta_n [J_1(\beta_n) + J_1\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) Y_1\left(\beta_n \frac{R_b}{R}\right) Y_1(\beta_n)] = 0. \quad (3)$$

以上各式中, $J(\cdot)$, $Y(\cdot)$ 分别为第一和第二类贝塞尔函数.

根据热弹性理论,可求出转子外圆面热应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{rR} = 0; \\ \sigma_{\theta R} = \sigma_{zR} = g_1 \eta_2 + g_2 \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n Q_n, \end{cases} \quad (4)$$

式中: g_1 为与转子材料和尺寸有关的常数; $g_2 = \frac{E\beta}{1-\mu} \cdot \frac{2BR^2}{\alpha}$; $Q_n = L(\beta_n)^{-1} \left[\frac{2R^2B}{\beta_n(R^2 - R_b^2)} - 1 \right] \cdot D_{10}(\beta_n)$; σ_{rR} , $\sigma_{\theta R}$, σ_{zR} 分别为转子外表面处沿径向、切向及轴向的热应力; E , B 分别为转子材料的弹性模量和泊松系数; β 为线膨胀系数.

由式(4)和应力 $\sigma_{\theta R}$, σ_{zR} 保持常数的条件为 $\Phi_n = 0$. (5)

2 转子寿命损耗的计算

由于转子轴为大型锻件,锻造过程破坏了材料的各向同性,严格地说应按各向异性材料对待.根据损伤理论,各向异性纯疲劳损伤模式可由下式表示^[3]:

$$\frac{\partial D_F^*}{\partial N} = K \left[\frac{\sigma_{fg}^2}{(1 - D_{fg})^2} - \frac{\sigma_{kk}^2}{3(1 - D_{kk})^2} \right]^\beta Y_{ij}^* i^* \otimes i_j^*, \quad (6)$$

式中: $Y_{ij} = (1 - D_{ij})^{-2} \sigma_{ij} s_{ij} (1 - D_{ef})^{-1} \sigma_{ef}$ 为损伤扩展力分量; σ_{fg} 为应力张量分量; D_F^* 为疲劳损伤张量; $i^* \otimes i^*$ 为并矢基张量; K , α , β 为材料常数.式中带下划线的指标约定为不求和指标.

在单向加载或采取等效应力的情况下,上式可简化为

$$\frac{\partial D_F}{\partial N} = A \frac{\sigma^A}{(1 - D)^C}, \quad (7)$$

式中: A , C 为材料常数.

如果考虑平均应力的影响,也可采用 CHABOCHE 模型:

$$\frac{\partial D_F}{\partial N} = [1 - (1 - D_F)^{1+\beta}]^\beta \left[\frac{\sigma_M - \sigma_m}{M(\sigma_m)(1 - D_F)} \right]^\beta, \quad (8)$$

式中: $M(\sigma_m)$ 为与平均应力有关的材料常数.

纯蠕变损伤演化方程为

$$\frac{dD_c}{dt} = A' \frac{\sigma^n}{(1 - D_c)^r}, \quad (9)$$

式中: A' , n , r 为材料常数.

脆性断裂时间为

$$t_f^c = [TA'\sigma^n(1+r)]^{-1}. \quad (10)$$

在蠕变与疲劳共同作用下,考虑到耦合效应,总损伤以增量形式表示为

$$dD = A \frac{\sigma^B}{(1 - D)^r} dN + A' \frac{\sigma^n}{(1 - D)^r} dt. \quad (11)$$

对上式积分可求得机件损耗

$$H_1 = h(N, \sigma). \quad (12)$$

3 燃料损耗

机组启动过程中的燃料损耗与机组型式、容量、管道系统等有关.目前燃料损耗的确定一般有两种方法:一是实验法.由于种种不利因素,此法应用很少;二是理论计算.计算时把整个启停过程划分为停运、冲转、升荷等六个阶段.在全部启停过程中,总燃料损耗可用下列线性关系式表示:

$$H_2 = \sum_{i=1}^6 K_i \tau_i, \quad (13)$$

式中: K_i 为第 i 阶段的燃料损失因子; τ_i 为第 i 阶段经历的时间.

4 发电量损耗

在供电紧张的情况下,还要考虑发电量的损耗问题,发电损耗可由下式表示

$$H_3 = \int_{t_0}^t [N_0 - N(t)] dt, \quad (14)$$

式中: N_0 为正常情况下机组的发电功率; $N(t)$ 为升荷阶段时刻的机组功率.

5 优化求最佳应力

把各种损耗化成统一的单位,即根据机器价格、燃料价格及电价,把损失折合成货币

$$H = P_1 C_1 H_1 + P_2 C_2 H_2 + P_3 C_3 H_3, \quad (15)$$

式中: P_1 , P_2 , P_3 为加权系数; C_1 , C_2 , C_3 分别为机器价格、燃料价格和电价.

考虑到式(4)(12)(13)及式(14),对式(15)优化求最小值,即可确定最佳应力.实际启动时,由于种种因素的影响,应力总有波动.但如控制温升率使应力在最佳值附近变化,将使总损耗最小,所以以最佳应力为中心,可作一应力带,其宽度为引起疲劳损伤的交变应力幅的门槛值,此带称之为最佳应力带.启动时控制应力在此带内波动可使总损耗最小.即使由于种种原因不能把应力控制在带内,只要使应力尽量靠近应力带,也会取得很好的经济效益.

对于人工操作的机组,需要把转子应力显示给操作人员,为此可在转子危险点处安装温度、压力传感器,测量汽温、气压等参数,利用计算机,根据数学模型计算并显示出转子应力及损伤等,操作人员可据此控制机组的运行.

6 结论

(1)本文导出了转子温度场和应力场计算公

式.

(2)根据连续损伤理论提出了计算转子损伤的有关公式.

(3)本文提出了以总损耗最小为原则进行优化启动的方法,并讨论了在工程实用中的有关问题.

参考文献:

[1] SWAMINATHAN V P. Life assessment of an HP - IP rotor under creep service condition[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power ,1990 ,112 :237 - 242.

[2] CHERUVU N S ,MALMFELDT L R. Metallurgical characterization of a high - pressure rotor for remaining service life assessment after 26 years of service[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power ,1990 ,112 :543 - 549.

[3] 许德刚,沈亚鹏.各向异性材料疲劳损伤模拟[J].应用力学学报,1996,13(4):131 - 136.

Rotor Damage and Optimal Startup of Steam Turbine

XU De - gang , ZHAI Ping , QIN Li - yi

(Department of Engineering Mechanics Zhengzhou University Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : In the startup period ,steam turbine runs in transition state , and it is likely to be heavily damaged ,thus giving rise to give rise to accidents . Therefore , improving startup operation efficiency is very significant for both safety and economy purposes . In this paper , the formulae for computing thermal stress of rotors are proposed ; then , based on the theory of damage , the fatigue damage and creep damage of the rotor are computed . From the view in which the total loss is minimal , the optimal startup mode of steam turbine is proposed . The research indicates that the opinion that the lower the thermal stress is , the better does not hold up ; the startup mode in which thermal stress is constant and equal to optimal stress is the optimal startup mode .

Key words steam turbine ,rotor ,damage ,optimal startup