

大容量火电机组 寿命管理与调峰运行

张保衡 著

4

水利电力出版社

大容量火电机组寿命管理与调峰运行

张保衡 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 11.375印张 252千字

1988年10月第一版 1988年10月北京第一次印刷

印数0001—4200册 定价4.70元

ISBN 7-120-00379-8/TK·66



内 容 提 要

本书是一本论述大容量火电机组寿命管理与调峰运行的专著,以汽轮机转子疲劳损耗为重点,详细论述了国产汽轮机汽机转子各种启停工况下热应力及疲劳的计算方法与寿命合理分配原则;从热弹性角度,对不同型号国产机组的调峰性能进行了评价,并对它们的经济性进行了计算与比较;此外还对低负荷工况,锅炉燃烧,水动力循环状况等作了介绍。

本书可供从事火力发电厂工作的工程技术人员使用以及科研、制造等部门的工程技术人员参考,也可作为大专院校热能专业的本科生和研究生的选修教材或教学参考用书。

前 言

随着我国各电网容量的扩大,高参数大容量机组的采用,在电网的组成上承担尖峰负荷的中小机组比例相对减少,解决峰谷差的矛盾日益突出。目前,各大电网的峰谷差值已达最高负荷的30%,个别地区已高达50%,预计今后缺电局面缓解以后,各电网的峰谷差必然还会加重。在这种供电形势下,我国各大电力网都面临着高峰负荷出力不足和后夜低谷时出力有余而又低调困难的两大问题;后者即属于电网调峰问题。由于我国各大电网的组成结构一般都是以火电为主,少量的水电又有很多是径流式,不宜弃水调峰,且普遍缺乏其它调峰手段,因而需要大容量火电机组参与调峰运行,已成必然之势。

大容量机组参与调峰运行,由于启动频繁或大幅度负荷变动,机组部件要经常承受剧烈的温度变化和交变热应力,因而导致部件产生低周疲劳损耗,缩短机组的使用寿命。为了保证调峰机组安全可靠的运行和取得较大的经济效益,必须加强机组寿命的管理和合理分配。

机组寿命损耗的预测与合理分配,涉及机组的设计、制造、运行方式以及传热学、高温金属学、现代力学和现代计算技术,与国家的能源政策也有着密切的关系,是一个复杂的跨学科研究课题。近年来我国各有关科研机构、高等院校和有关电厂、制造厂,针对机组调峰的需要,以国产机组为对象,对汽轮机转子及锅炉汽包等主要部件在非稳态下的温度及热应力变化规律、金属材料的疲劳特性以及部件的寿命

损耗,开展了积极的试验研究工作。对国产大容量机组参与调峰运行的可行性,调峰幅度以及相应采取的技术措施进行了深入的探讨;对低荷平带、少汽无功和二班制等不同的调峰运行方式在经济与安全方面进行了实验和理论分析;对启动热应力在线计算方面也已取得一定的进展。我们可以认为,在这个有关电力生产的重大课题领域里,理论和实践两方面都已取得了显著成绩,为今后我国火电机组参与调峰运行的管理和新型调峰机组的研制打下了基础。

但是,到目前为止,有关调峰机组运行寿命管理的若干问题,例如机组非稳态温度状态及热应力计算中放热系数的确定和寿命预测中金属低周疲劳安全寿命准则等问题,尚未得出统一的结论。前者在我国基本上还是一项空白,在研究工作中只能选用外国的实验数据和经验公式,而不同国家的经验公式计算结果又存在着很大的差异,对机组启、停过程中部件温度及热应力的计算精确度有着一定程度的影响;对后者,近年来西安热工研究所等单位对国产转子用钢进行了低周疲劳试验并提出了有关疲劳特性曲线,但由于在实验中未考虑保持时间的影响,并且未给定初始裂纹尺寸,亦尚有待进一步完善。

各国汽轮机转子绝大多数都是使用低碳铬钼钒合金钢,但各国的低周疲劳特性曲线有着很大的差异,其原因除了材料的微量元素含量和锻冶工艺影响之外,主要是因为疲劳曲线给定的初始裂纹尺寸不同,亦即对材料疲劳寿命失效周次各自有着不同的涵义,致使对同一机组在相同启动条件下计算所得寿命损耗率有很大的差异,直接影响了对机组调峰运行特性及可行性的评价。因此,今后有必要对转子及汽包等重大部件安全寿命的涵义和初始裂纹的尺寸定出统一的

准则。

至于汽包用钢的疲劳特性的研究在我国尚是一项空白。

部件上一旦出现裂纹，就有残余寿命的预测问题。现代断裂力学对裂纹扩展速度估算提供了理论基础。我国对断裂力学理论的研究起步较早，并已在航空部门实际应用，但结合电厂热力设备裂纹扩展特性的研究，目前只有少数单位刚刚起步。这也是一个难度较大的综合性课题，因为它不仅与材料裂纹扩展特性有关，而且要求对热力设备部件裂纹所在位置的热应力水平进行精确计算，因而具有跨学科性质。

与部件残余寿命预测有关的另一重大课题是对部件的无损探伤技术的研究与实施。断定主要部件的已有缺陷状态是确定机组能否参与调峰运行和采用何种运行方式的先决条件；国外的一些统计资料表明，汽轮机转子发生断裂事故，百分之六十是由于转子金属存在严重的固有缺陷而未被早期发现，特别引起人们关注的是这些带伤转子多数是在投运约15年后就发生断裂事故，其经历的启动次数不过数百次，远远小于其应有的正常寿命。因此，在未弄清机组主要部件的完好状态之前即投入温度变化剧烈的调峰运行是相当冒险的。火电机组重大部件，特别是汽轮机转子的断裂，常会造成灾难性的后果。目前已投运的国产大容量机组，有很大部分投运年限已超过15年。研究提高探伤技术水平并对转子和汽包等主要部件实施探伤应该被视为急需进行的重要工作之一。

调峰机组寿命管理的另一问题是机组允许运行年限和安全寿命可用系数的确定。这个问题与冶金水平、设备价格、能源政策及供电负荷曲线有关，这是合理分配机组寿命损耗的依据。目前我国尚未定出统一的准则，应由经济主管部门

主持研究确定。调峰机组部件使用寿命合理分配的原则，是在保证安全的前提下取得最大的经济效益，在规定的机组服役年限内，使机组部件的可用寿命得到充分的使用和合理消耗，并非每次启动的寿命损耗越小越好。不按照国民经济发展状况规定机组的服役年限及安全界限，就不能对机组的寿命损耗进行合理的分配。

机组调峰在低负荷下运行，对燃煤机组而言，锅炉燃烧的稳定性是机组带最低负荷的主要限制条件，其次是水动力循环和锅炉调节问题。由于电厂以烧煤为主是我国长期的能源政策，因而锅炉启动时煤粉直接点燃和在低负荷工况下不投油助燃保持炉内的燃烧稳定便成了机组调峰运行中锅炉方面的主要问题。近几年经过有关单位的积极研究、设计和实验，不同型式的预燃室旋流燃烧器、钝体燃烧器和等离子点火设备已在不同型号的锅炉上投运试用并取得了显著成效，为我国燃煤机组调峰运行作出了贡献。

启动时再热蒸汽温度的上升滞后于主蒸汽温度是影响热态启动速度和中压缸产生过大热冲击应力的重要因素。改进旁路系统布置和加大旁路系统容量有利于提高主汽温度和再热汽温的上升速度，我国已投运机组的旁路系统容量大多数均较小，难以满足热态启动时汽温与金属温度合理匹配的要求，而对旁路系统的改造又需要较多的投资，并且往往受到现场空间的限制。

机组在低负荷工况下，汽机末级叶片会出现水蚀及颤振问题，锅炉尾部受热面由于烟气温度下降会加快腐蚀，这些问题尚有待进一步解决。

现在的问题是在对国产机组参与调峰运行尚未解决的问题组织力量进行深入的研究的同时，应将已有的研究成果及

运行经验付诸实施与推广，将我国火电机组的寿命管理与调峰技术尽快进入到实用阶段。

根据我国的能源组成结构看，火电机组担负调峰将是长期的任务，为了适应今后供电形势发展的需要，除了在运行技术、设备改造和提高自动化水平方面要采取相应措施，以提高现有机组的调峰能力外，还应积极研制新型机组，从根本上提高国产机组适应负荷变化和周期性运行的能力。从近几年的实验研究的进展来看，在火电机组调峰方面，有可能创造出我国自己的模式。

为了适应我国大机组运行发展形势的需要，在笔者近年研究成果的基础上写成此书。其中部分成果曾先后在国内有关学术会议、学术刊物及机组寿命与延长国际学术会议（1988年6月，海牙）发表，并得到同行专家认可。书中以大机组寿命管理的主要问题——汽轮机转子疲劳损耗为重点，详细论述了汽轮机转子冷、热态启动及停机工况下热应力及疲劳寿命的计算方法与寿命合理分配原则，并对国产机组汽轮机转子不同启停工况下的温度场、应力场及相应的寿命损耗率进行了分析与计算，从热弹性角度对不同型号的国产机组调峰性能进行了评价；对不同调峰运行方式的安全及经济性进行了分析计算与比较。此外，并广泛参考有关学术论文、技术文献及实验报告，对电厂调峰运行的实验数据、汽包热应力、低负荷工况下炉内稳定燃烧措施、水动力循环状况、变速水泵经济特性以及管道散热对调峰启动的影响作了概括的介绍。

为了使读者对感兴趣的问题便于找到详细资料，在每章之后附有参考文献书目，排列顺序以书中出现的先后为准，并不表示具有优先性质。

希望本书的出版，能对我国动力工作者有所借助，并希望能对我国火电机组寿命管理及调峰工作的进一步发展有所供献。

大机组寿命管理是电力生产中的新事物，笔者限于水平，书中的论述及观点难免有不当之处，诚望读者批评指正。

本书中，有限元计算结果系由研究生李如翔、田晋民、徐鸿、朱方尧、万凌等同志编制程序并完成计算；杨昆、朱松强、沈有望等同志做了大量的公式推导计算工作；书中图表由徐鸿、朱方尧同志进行了详细校核与整理。仅此表示感谢。

笔 者

1987年9月

目 录

前 言

第一章 汽轮机转子的温度与热应力	1
第一节 转子过渡工况下的温度场及应力场	1
第二节 热应力集中现象	32
第三节 转子温度及热应力的解析计算	50
第四节 停机工况转子的热应力	94
第五节 热态启动转子的热应力	110
第六节 调节级汽室汽温与转子的温度	120
第七节 汽缸的温度及热应力	128
第八节 螺栓的热应力	142
第九节 汽温波动对热应力的影响	146
参考文献	147
第二章 汽轮机转子的低周疲劳损耗	150
第一节 金属疲劳机理概述	150
第二节 低炭合金钢疲劳特性关系式	155
第三节 低炭合金钢的疲劳特性实验曲线	159
第四节 汽轮机转子疲劳寿命损耗的估算	168
第五节 汽轮机转子的寿命损耗曲线	179
第六节 汽轮机转子的高温蠕变损伤	188
第七节 汽轮机转子可用寿命的合理分配	190
第八节 转子热应力及寿命损耗的运行监督	200
第九节 汽缸、阀体和管道的疲劳损伤	210
第十节 转子裂纹的扩展与残余寿命	214
参考文献	240
第三章 大机组调峰运行的经济性	242

第一节	低负荷运行方式的经济特性	242
第二节	机组启动和停机过程的经济损失	256
第三节	少汽无功运行方式的经济损失	265
第四节	各种调峰运行方式的经济性比较	268
参考文献		274
第四章	锅炉汽包热应力及疲劳损耗	276
第一节	非稳态工况下汽包温度场	276
第二节	由径向温差引起的热应力	281
第三节	由上下壁温差引起的汽包热应力	286
第四节	汽包内压力引起的机械应力	287
第五节	汽包疲劳寿命的估算	289
参考文献		291
第五章	机组启动及低负荷运行特性	292
第一节	机组的旁路系统	292
第二节	转子的相对胀差	299
第三节	冷态启动时转子的预热	303
第四节	冷态启动方案的拟定	304
第五节	调峰运行热态再启动	309
第六节	锅炉低负荷运行与热态启动	318
第七节	调峰机组的给水泵经济特性	332
第八节	蒸汽管道散热对机组启动的影响	335
第九节	给水泵的启动	338
第十节	高压加热器热应力及运行寿命	342
参考文献		350

第一章 汽轮机转子的温度 与 热 应 力

第一节 转子过渡工况下的温度场 及 应 力 场

汽轮机在启动、停机或负荷变动时，转子金属内部将产生较大的温度梯度并由此而产生热应力，这种过渡工况下的热应力是影响机组对负荷变动的适应能力和机组寿命损耗的重要因素。

本书所指的过渡工况或称为不稳定工况，不同于一般教科书中所说的变工况。变工况是指汽轮机处于不同设计工况下稳定运行时的热力特性，是属于静态问题；本书所指的过渡工况，是研究汽轮机由一个工况过渡到另一个工况的过程中，部件内部温度及应力的变化状态，属于动态问题，正如下文所述，这种过渡工况下温度及应力的变化与汽轮机内部的热力过程有着密切的关系。

由热弹性理论可知，部件中的热应力与部件金属内部的温度梯度成正比。温度梯度是由于汽轮机启动、停机或负荷变动过程中，部件被连续加热或冷却，使部件处于热不稳定状态而造成的。一般来说，汽轮机在稳态工况运行时，不存在或只有轻微的径向温度梯度及热应力，但是由于结构设计上的特点，某些机组例如国产 200MW 汽轮机，在稳态运行时转子上也存在相当大的径向温差及热应力。

汽轮机高、中压转子的前轴封段和前几级，在启停及负

荷变动过程中，汽温的变化最为剧烈，导致该部位温度梯度及热应力为最大，成为整个转子的最危险部位。由于汽轮机转子是高速旋转的部件，目前尚无直接测量其金属温度及热应力的有效手段，需要通过理论计算来解决。有些进口机组虽然装有转子温差探针，其实这种探针同样是通过数学模拟来显示转子内外温差的，并非直接测量转子内外壁的温度，因此它的准确度同样有赖于数学模型的建立。

求解温度场及应力场问题的理论计算通常有二种方法：

一种是解析法，将转子视为无限长圆柱体的一维模型，根据一维不稳定导热微分方程求得温度分布，再由体积平均温差计算转子内外表面的热应力。这种方法只考虑转子径向温差，而不计轴向热流的影响，并且将介质对转子表面的换热条件及转子金属的物理特性作为常数处理，因而影响了它的计算精度；但毕竟一种简便易行的方法，将其计算结果进行修正后，是可以得到工程上所需要精度的。

另一种理论计算方法是数值解法，它将转子考虑为轴对称二维计算模型，避免了一维模型简化时造成的误差，同时由于将复杂的几何形状连续体离散化，用一系列代数方程代替微分方程，并可将介质对转子表面的放热系数及转子金属的物理特性作为随启动时间的变数来处理，因此可以比较精确地计算几何边界条件及温度边界条件复杂的工程实际问题。对于象汽轮机转子这种几何形状不规则、边界条件变化较大的轴对称体，应用数值计算方法可以获得精确的结果。

在数值计算中，常用的有有限差分法和有限单元法，由于有限差分法对于复杂的边界条件适应性较差，因此本书提供的数值计算结果都是用有限单元法完成的。

一、温度场数学模型

计算汽轮机转子不稳定温度场时, 可以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函数问题, 温度 $t(z, r, \tau)$ 在区域 D 中应满足下列偏微分方程式:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (1-1)$$

式中 λ ——材料的导热率;

ρ ——材料的密度;

C_p ——材料的比热。

确定上面微分方程的解, 除需要满足初始条件 $t|_{\tau=0} = f(z, r)$ 外, 在物体边界上还应满足一定的边界条件, 对于汽轮机转子来说, 外表面的边界条件由蒸汽对转子表面的换热速度来确定, 属于传热学中第三类边界条件, 即边界与介质的热交换条件为已知:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_r = \alpha(t - t_f) \quad (1-2)$$

式中 t_f ——与转子表面接触的汽温;

α ——蒸汽与转子表面的放热系数。

当放热系数 $\alpha = 0$ 时, 式 (1-2) 化为绝热边界条件, 即无热交换, 如转子的中心孔边界; 若 $\alpha \rightarrow \infty$, 则 $t(z, r)|_r = t_f$, 此时由第三类边界条件转化为第一类边界条件, 即被加热物体的表面温度与介质温度相等。

由变分原理, 偏微分方程式 (1-1) 的第三类边值问题, 可等价地转化为下列泛函:

$$J[t(z, r, \tau)]$$

$$= \iiint_D \left\{ \frac{\lambda \rho}{2} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)^2 \right] + \rho C_p r \frac{\partial t}{\partial \tau} \right\} dr dz$$

$$+ \int_{j,m} \left(\frac{\alpha}{2} t^2 - \alpha t_r t \right) r ds \quad (1-3)$$

的极值问题，即

$$\frac{\partial J[t(z, r, \tau)]}{\partial t} = 0$$

在求泛函极值的基础上，对 D 进行离散化，即把区域 D 分为若干个小单元（元素体），在每个单元上，泛函式（1-3）是成立的，由于整个区域 D 是全部单元的总和，故得：

$$\frac{\partial \sum_{e=1}^E J^e}{\partial t_k} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial J^e}{\partial t_k} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1-4)$$

式中 J^e —— 在单元 e 内进行变分计算；

E —— 在区域 D 内划分的单元总数；

n —— 待求温度值的节点个数。

对于边界单元：

$$J^e = \iiint_e \left\{ \frac{\lambda \rho}{2} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)^2 \right] + \rho C_p r \frac{\partial t}{\partial \tau} \right\} dr dz$$

$$+ \int_{j,m} \left(\frac{\alpha}{2} t^2 - \alpha t_r t \right) r ds$$

对于内部单元：

$$J^e = \iiint_e \left\{ \frac{\lambda \rho}{2} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)^2 \right] + \rho C_p r \frac{\partial t}{\partial \tau} \right\}$$

$$\times dr dz$$

若设温度 $t(z, r, \tau)$ 在单元体中呈线性分布, 对单元作变分计算, 可得:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} J_i^e \\ J_j^e \\ J_m^e \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} p_i \\ p_j \\ p_m \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} n_{ii} & n_{ij} & n_{im} \\ n_{ji} & n_{jj} & n_{jm} \\ n_{mi} & n_{mj} & n_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial T_i / \partial \tau \\ \partial T_j / \partial \tau \\ \partial T_m / \partial \tau \end{Bmatrix} \quad (1-5) \end{aligned}$$

式(1-5)中 i 、 j 、 m 为三角单元三个顶点的编号, 见图1-1。

把式(1-5)代入式(1-4), 可得到 n 阶线性代数方程组以求解 n 个节点的温度, 其形式为:

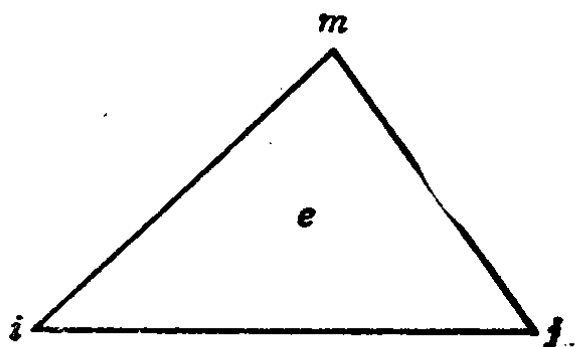


图 1-1 单元编号

$$[K]\{t\} - \{P\} + [N]\{\partial t / \partial \tau\} = 0 \quad (1-6)$$

式(1-6)中, $[K]$ 为刚度矩阵, $[N]$ 为变温矩阵, 分别为 $n \times n$ 阶正定对称方阵; $\{t\}$ 、 $\{P\}$ 和 $\{\partial t / \partial \tau\}$ 分别为 $n \times 1$ 阶温度、热载荷和温度变化率向量; $\{\partial t / \partial \tau\}$ 项可用有限差分展开, 差分格式的形式有多种, 作为例子, 若选用伽辽金格式, 则式(1-6)变为:

$$(2[K] + 3[N] / \Delta \tau) \{t\}_\tau = 3\{P\}_\tau + (3[N] / \Delta \tau - [K]) \{t\}_{\tau - \Delta \tau}$$

上式稳定且不振荡的条件为:

$$3[N] / \Delta \tau - [K] \geq 0$$

对于轴对称有限单元分割, 可近似地得出第一类边界条

件时 $\Delta\tau$ 的限定条件为:

$$\Delta\tau \leq \rho c_p (\Delta x)^2 / 4\lambda$$

式中 Δx ——三角形单元的平均边长;

ρ 、 c_p 、 λ ——分别为转子材料的密度、比热和导热率。

二、应力场数学模型

求解应力场的关键是解出在非稳态温度变化下, 单元上各节点的位移, 从而求得单元内的应变及应力(参考图1-2), 以热弹性理论为基础, 单元各节点的位移可用列矩阵表示为:

$$\{\delta\}^e = [\delta_i^r \ \delta_j^r \ \delta_m^r]^T = [u_i \ w_i \ u_j \ w_j \ u_m \ w_m]^T$$

单元内的位移为:

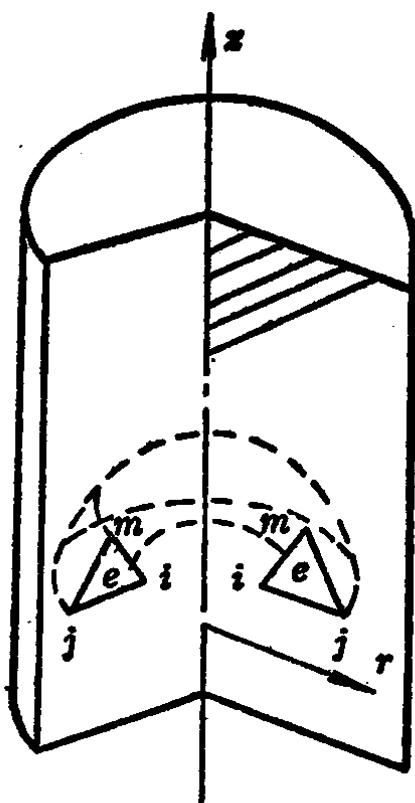


图 1-2 轴对称物体单元示意图