文章编号: 1006 - 4729(2012)01 - 0035 - 04

汽轮机寿命监测系统

苏毅康[1], 夏 飞[2]

(1. 江西南昌供电公司 业扩报装中心,江西 南昌 330006;
2. 上海电力学院 电力与自动化工程学院,上海 200090)

摘 要: 将汽轮机转子作为监测对象,确定其基本信息和热应力分布情况. 从转子疲劳寿命损耗和高温蠕变寿命损耗两个方面给出转子寿命损耗的计算方法,设计并实现了汽轮机寿命监测系统,以实现汽轮机寿命监测与管理的任务.

关键词: 汽轮机; 转子; 寿命监测
中图分类号: TK26; TP277.2 文献标志码: A

Life Monitoring System for Steam Turbine

SU Yi-kang[1], XIA Fei[2]

(1. *Power Supply Service Center, Nanchang Power Supply Company, Nanchang* 330006, *China*;
2. *School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: The rotor is one of the most important components in the steam turbine and the most important part in life management for steam turbine. Its fundamental conditions, temperature distribution and thermal stress distribution are studied. The life loss of the rotor is calculated from two aspects of the fatigue wastage and the creep wastage. Finally, the stimulation of the life management system is designed and realized for life monitoring of the steam turbine.

Key words: steam turbine; rotor; life monitoring

随着电力行业的不断发展,用电结构也随之发生变化,导致各大电网的峰谷差日益突出,全国各电网峰谷差一般都已达到最高负荷的 30% 左右,而且随着大容量机组的不断投运,峰谷差矛盾将进一步加重. 这样,大中容量机组势必参与调峰运行,因此提高调峰能力已成为电网可靠运行的关键. 参与调峰的机组启停或负荷变动频繁,所以机组部件要经常承受剧烈的温度变化及交变热应力,导致部件产生寿命损耗,缩短机组的使用寿命. 汽轮机转子是工作条件最艰辛、受力情况最复杂的汽轮机部件,其寿命基本代表了整台汽轮机组的寿命. 因此,加强大容量机组的转子热应力监测和寿命管理,可以在最大程度上保证调峰机组的安全可靠运行,并取得较大的经济效益. 汽轮机转子的寿命管理不仅对调峰机组有重要的意义,而且对承担基本负荷、中间负荷的机组也有实用价值[1].

寿命管理是指以机组经济地实现其服役全寿

收稿日期: 2011 - 07 - 04

通讯作者简介: 苏毅康(1981 -),男,硕士,山西阳泉人. 主要研究方向为电力企业信息管理. E-mail: sky419@163.com.

命为目标[2]，在对设备状态进行监测和评估的基础上优化设备运行与维修管理的新技术. 本文通过对汽轮机转子建立数学模型，利用数值计算方法对转子的温度场、应力场进行计算，并以其结果作为机组运行的参考信息，从低周疲劳损耗和蠕变损耗两方面计算转子的总寿命损耗; 采用 VB6.0 程序语言设计与实现了汽轮机寿命管理系统.

1 汽轮机转子的应力计算

作为汽轮机启停和运行中监测的重要参数，转子热应力是汽轮机组寿命损耗计算中必不可少的因素，所以在汽轮机运行过程中，必须对转子的热应力进行监测. 由于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，因此需要通过理论计算得到转子热应力的实时值[3].

本文采用一维解析法来计算转子热应力，即将转子视为无限长的圆柱体的一维模型，根据一维不稳定导热微分方程求得温度分布，再由体积平均温度差计算转子内外表面的热应力. 即:

$$\sigma_{\mathrm{th}} = \frac{E\beta}{1-\gamma}\Delta T_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中: ΔT_{m}——体积平均温差，等于转子某一点处的温度与体积平均温度的差值;

E——弹性模量，MPa;

β——线胀系数;

γ——转子材料的泊松比.

在启停过程中，汽轮机转子除了要承受热应力以外，还存在机械应力，主要是离心切向应力，因此在进行汽轮机转子的安全评估时应综合考虑热应力和机械应力. 离心切向应力与转子的平方成正比，任意转速 n 下的离心切向应力值 σ_n 为:

$$\sigma_n = \sigma_0\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \tag{2}$$

式中: σ_0——额定转速 n_0 下的离心切向应力，MPa.

由此，根据第一强度定理可以得到转子中心孔或外表面处的合成应力为:

$$\sigma_{\mathrm{eq}} = \sigma_n + \sigma_{\mathrm{th}} \tag{3}$$

2 汽轮机转子的寿命计算

目前，汽轮机的寿命管理普遍采用致裂寿命的概念. 致裂寿命即裂纹形成寿命，是指转子从初次投运到出现第一条宏观裂纹所经历的总的运行时间. 这种宏观裂纹一旦出现，若不及时采取措施进行消除，必将继续扩展，直至汽轮机使用寿命的终结.

估计启停和变工况过程中转子的低周疲劳寿命损耗[4]，首先应以热应力集中最严重的部位作为考核重点，在计算出其最大应力及全应变后，就可以求得相应的致裂寿命循环周次 N_{c} 或致断寿命循环周次 N_{f}，每一次应力-应变循环所造成的低周疲劳寿命损耗率即为 $1/N_{\mathrm{c}}$ 或 $1/N_{\mathrm{f}}$.

如果用 Φ_{f} 来表示低周疲劳特性对转子寿命的损耗程度，则有:

$$\Phi_{\mathrm{f}} = \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \cdots + \frac{1}{N_n} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{N_i} \tag{4}$$

式中: n——循环次数.

若不考虑蠕变，则当 Φ_{f} 达到 100% 时，认为转子寿命完结，即产生第一条宏观裂纹.

蠕变寿命损耗的计算方法是根据转子钢材的蠕变寿命曲线查出某一稳定工况下的蠕变寿命，其倒数即表示该工况下运行单位小时的蠕变寿命损耗率[5].

总损耗等于低周疲劳寿命损耗与蠕变寿命损耗之和，即:

$$\Phi_{\mathrm{f}} + \Phi_{\mathrm{c}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{N_i} + \sum_{i=1}^{g}\frac{t_i}{T_i}T_i \tag{5}$$

如果两者的寿命损耗之和达到 100%，则认为转子钢材的无裂纹寿命已经耗尽，转子表面有可能出现宏观裂纹，应引起重视并在检修时作仔细观察.

3 汽轮机寿命监测系统设计与实现

3.1 系统概况及功能

本文设计的寿命监测系统主要采用结构化设计思想，运用面向对象技术，自顶而下，逐步求精，模块化设计，它包括初步设计和详细设计两个阶段. 初步设计的任务是确定软件的总体结构、子程序和各个模块的划分，以及相互之间的连接关系，并进行一定的数据分析. 详细设计的任务就是完成整个程序及一些必要模块，以达到整个系统能够正确运行与显示，实现温度变化监测、数据的存储和显示、趋势统计、报警报表等功能. 最终完成对汽轮机进行在线监测及寿命管理的功能[6].

3.2 汽轮机寿命监测系统初步设计

汽轮机寿命及其管理系统主要包括 3 个方面的内容.

(1) 汽轮机的基本信息库 在对汽轮机进行寿命监测前,需要对一些基本的参数进行赋值,主要包括转子外表面直径、转子中心孔半径、转子材料导热率、泊松比、弹性模量、转子热涨系数,以及蒸汽转子放热系数. 考虑到不同的机组所使用的汽轮机转子型号并不完全相同,所以在系统中除了可以显示该机组转子的基本信息外,还提供修改功能和保存功能,以保证其基本信息的准确性,保证系统的实时更新,达到数据的正确性.

(2) 汽轮机转子温度分布与热应力部分的计算[7] 这是计算汽轮机转子寿命损耗的基础,所以在整个系统数据计算中处于核心地位. 在系统运行过程中(特别是启停、变负荷等过程) 对蒸汽的温度、压力进行监测,调用相关程序计算得到转子的温度与应力,并通过实时曲线显示其变化过程. 通过理论公式计算得到转子各个部分的应力情况.

(3) 汽轮机寿命监测系统 通过计算得到的转子应力谱来计算转子的寿命损耗. 除了记录每一次启停过程中的单次寿命损耗外,还包括转子寿命总损耗、转子剩余寿命和转子安全寿命. 图 1 为汽轮机寿命监测系统主界面.

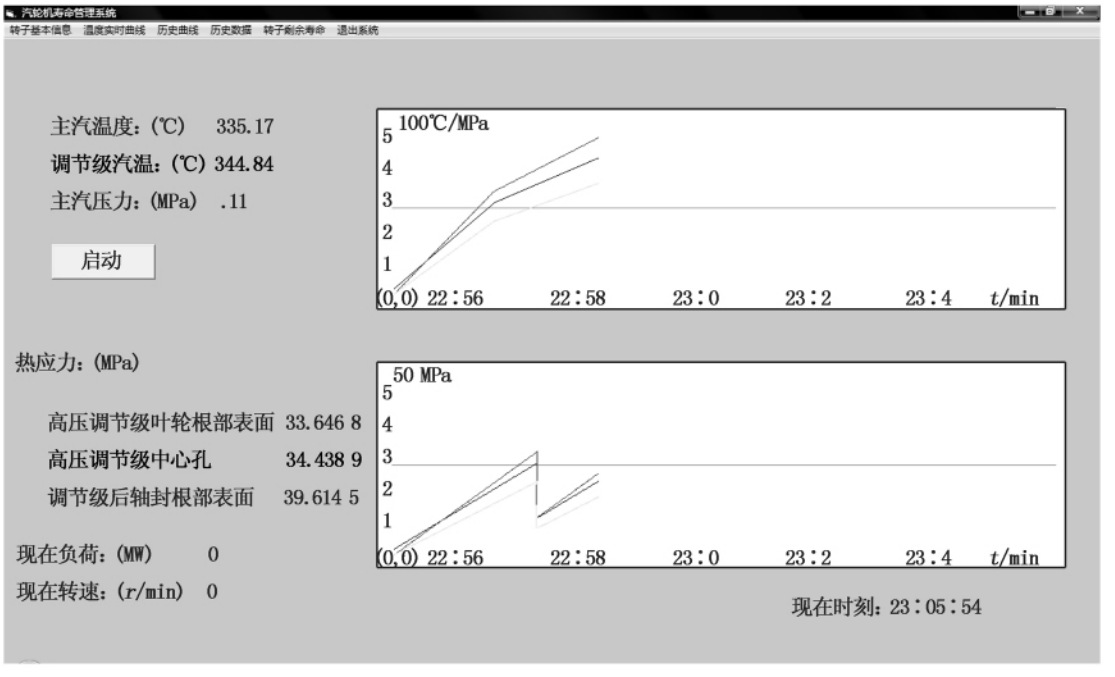


图 1 汽轮机寿命监测系统主界面

3.3 汽轮机寿命监测系统详细设计及功能实现

图 1 的主界面上有两个曲线显示区: 一个是用来显示温度、主蒸汽压力等相关参数的实时变化过程; 另一个显示的是转子热应力的实时曲线. 在作图区域左侧显示的是各个数据的实时值. 同时界面上还设有“启动”和“停止”两个按钮,分别代表机组的启、停过程. 本系统主要仿真开机时的温度及压力的实时运行曲线. 一般情况下,电厂都是拥有 2 台以上的机组以保证稳定运行. 因此,本系统也设计了 2 台机组,并且在主界面上设置了按钮,可以进行切换,以达到实时监测的目的.

3.3.1 系统基本信息的查看与修改

在对汽轮机转子进行寿命管理前,要求对系统进行初始化,即确保转子的相关参数的准确性. 界面上的“修改”按钮是在基本信息出现变化或输入错误的情况下,方便操作人员及时作出调整. 点击“修改”按钮,所有数据显示区会转变为文本框形式,修改完毕后点击保存即可. 由于基本信息是各类计算中的基础,所以在修改时要特别注意. 同时在系统启动前也要确保所有基本信息准确,转子信息往往会影响整个系统的寿命. 一般修改

都是在非常严密的情况下,而且是在确保数据正确性的前提下进行的. 因为其中某个小小的错误会对整个系统的运行造成无法估量的损害.

3.3.2 系统实时数据的显示

在本软件中需要实时显示的数据包括: 主汽温度、调节级温度、主蒸汽压力、热应力(包括高压调节级叶轮根部表面、高压调节级中心孔和调节级后轴封根部表面 3 个主要部位的热应力值) ,以及实时负荷和实时转速. 为了便于操作人员对这些实时数据进行监测,所有这些数据的实时显示都放在软件的主界面上,并提供实时曲线,方便监测人员能够第一时间看到故障并加以处理,以保证机组稳定运行.

3.3.3 系统历史数据的查询及图形显示

由于实时数据具有瞬时性,所以无法查阅过去的"实时"数据. 因此,为了使操作人员能够准确地获取某一时刻的准确数据,系统将实时获得的数据按一定的时间间隔存储下来,以实现数据的历史追忆. 软件提供了历史数据的查询功能,通过点击主界面上的"历史数据",即可进入查询界面. 可供查询的数据包括主要的测点参数及热应力值,并用表格的形式给出. 此外,软件还提供了按一定时间段查询的功能: 输入要查询的时间段的起始时间,系统就会自动筛选出对应的数据.

3.3.4 汽轮机转子寿命损耗的图形显示

汽轮机转子的寿命损耗是系统计算的最终结果. 由于需要在一次完整的启停过程结束后才能计算出该启停过程中转子的寿命损耗,因此转子的寿命损耗值不具有实时性,不能实时显示. 在主界面上点击"转子剩余寿命",即跳出"汽轮机转子寿命图". 这里采用的是饼状图. 因为计算得到的寿命损耗是百分比的概念,用饼状图表示更为直观、易懂.

对汽轮机寿命监测系统进行一次启停过程的仿真,可得到如图 2 所示的转子寿命损耗图.

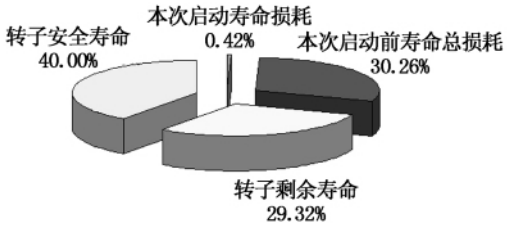


图 2 汽轮机转子寿命损耗示意

安全寿命的设定是为了提高系统的可靠性,为保证计算结果具有一定的裕度,其大小可以根据实际情况进行调整. 根据本次启动寿命损耗的大小可以判断一次启动过程中是否存在问题,而转子剩余寿命是判断汽轮机是否需要检查、维修的基本依据.

汽轮机寿命从理论上来说很重要,但通常都被忽视,一般来说每次机组大修都会检查汽轮机的转子有无裂纹产生,如果产生裂纹,则表明寿命到期了. 其实这只是判断的手段不同而已,但其目的都是为了使整个系统安全运行[8]. 而在线监测可以省去停机引起的经济损失.

4 结 语

汽轮机是否安全运行及发电质量好坏直接影响一个电厂的生存能力与竞争能力. 本文设计的预防维护监测系统可以提高设备的可用性和可靠性. 文中所采用的模型是将实际结构简化后形成的,有些部分和实际还有一定的区别,还需要作进一步的完善,以完成精确的在线计算.

参考文献:

[1] 荆建平,孟光. 汽轮机转子疲劳强度理论研究现状与展望[J]. 汽轮机技术,2003,45(5):260-264.

[2] 李耀军. 火电厂重要部件的寿命管理技术研发与应用[J]. 热力发电,2003(5):9-12.

[3] 夏同棠,檀文原,雷小云,等. 汽轮机转子温度仿真研究[J]. 中国电机工程学报,1996,16(1):6-9.

[4] 王建梅,蔡楷,卫国涛,等. 调峰汽轮机转子热应力及寿命损耗在线监测系统[J]. 汽轮机技术,2001(5):298-300.

[5] 支小牧,寇可新,曹向欣. 汽轮机转子热应力在线监测、寿命管理及优化启动的研究[J]. 汽轮机技术,2000(20):543-548.

[6] 王琪,梁志宏,岳建华,等. 汽轮机转子寿命预测模拟与仿真系统[J]. 热力发电,2004(6):35-38.

[7] 武新华,宋春汀,张新江,等. 汽轮机转子热应力简化计算公式的选取[J]. 汽轮机技术,2000(2):20-23.

[8] 李军,王成利,石业鹏. 浅析汽轮机寿命管理及长期停运机组的保护[J]. 山东煤炭科技,2006(3):19-21.

(编辑 胡小萍)