

基于实时状态监测的燃气轮机 CBM 决策系统

万安平¹, 陈坚红¹, 盛德仁¹, 胡亚才¹, 陈启构²

(1. 浙江大学 热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江萧山发电厂, 浙江 杭州 311251)

摘要: 提出一种基于实时状态监测的燃气轮机视情维修(CBM)决策系统。该系统以实时数据库中燃气轮机的实际运行状态信息数据为依据,采用燃气轮机相关部件寿命预测计算方法,推算当前状态下的使用寿命(运行时数和启动次数),并折算成基准运行条件下的等效使用寿命,然后与最大维修寿命进行比较,预测得到剩余寿命。基于运行时数和启动次数的维修系数和服务系数的乘积,提出等效服务系数的概念;根据已运行时段和待预测时段的等效服务系数之间的关系,建立了 4 类 CBM 决策模型,进而对燃气轮机相关部件的具体维修时机进行决策。最后,应用 ASP.NET 技术,开发了基于 B/S 架构模式的燃气轮机 CBM 决策系统,并应用于工程实际,验证了该系统的有效性和实用性。

关键词: 燃气轮机; 监测; 寿命预测; 服务系数; 视情维修

中图分类号: TK 37;TK 38

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.027

0 引言

随着我国经济的高速发展以及对环境问题的高度重视,清洁度较高的燃气轮机得到了推广。由于技术垄断,我国大型燃气轮机的维修技术还处于初步阶段,燃气轮机的维修严格按照制造商所规定的时间间隔进行,维修费用非常昂贵,大幅提高了电厂的运行成本。在我国电力体制的深入改革和“厂网分开,竞价上网”市场化环境中,制定科学、成本合理的燃气轮机维修策略,对燃气轮机电厂的安全经济运行有着十分重要的意义。

视情维修 CBM(Condition-Based Maintenance)利用成熟的状态监测技术,实时监测设备运行状态,并据此来执行相应的维修决策^[1-2]。CBM 可减少维修过剩以及停电时间,保障设备运行的安全性和经济性^[3]。在国内外大型设备维修中 CBM 已得到广泛应用。文献[4]就大型发电设备运行状态复杂这一特点,提出了基于时间和状态相结合的维修策略;文献[5]通过数据融合方法,建立了以可靠性为中心的维修策略,即 CBM 系统;文献[6]将实时监测系统得到的风机状态运行数据,成功运用到风力发电机的 CBM 中;文献[7]以电气设备实际的运行状态为依据,推算状态检修决策中的电气设备故障率,进而确定设备的实际役龄。文献[8]建立了电力设备安全状态模糊综合评估模型,构建了较为完整的电力设备安全状态评估体系。文献[9]则利用集成开发工具 JBuilder 和 Oracle9i 数据库设计开发了具有很强实用性的初级电力市场环境下省级电网发、输电设备检修优化系统。此外,CBM 在燃气轮机维修方面也得到了一定程度的应用,文献[10]将状态维修策

略应用到燃气轮机的压气机叶片污垢水洗上,实现了压气机的在线和离线水洗;文献[11]提出综合考虑电厂成本、利润和电力市场因素,建立燃气轮机状态维修计划;文献[12]定性地介绍了应用燃气轮机运行数据计算相关部件维修间隔的方法;文献[13]利用等效运行时间分析法建立燃气轮机等效运行时间方程,提出基于 EOH 分析的燃气轮机寿命评估手工统计方法。

目前燃气轮机维修所需的各项状态数据一般是采用人工统计计算的方法得到,耗时费力且准确性不高,只能大致预测维修周期,不能得到精确的预测结果,不适用于高度自动化运行的电力系统。为实现电力企业的生产信息与管理控制的一体化,基于 PI/II 等实时数据库的电厂厂级监控信息管理系统(SIS)得到了迅猛发展^[14],并在电力企业得到了广泛的应用^[15-16]。为此,在已构建的电厂 SIS 的基础上,本文采用 ASP.NET 技术的浏览器/服务器(B/S)架构模式,开发基于实时数据库中燃气轮机的实际运行状态数据信息的燃气轮机 CBM 决策系统。该系统可在线自动计算燃气轮机相关部件的使用寿命,并准确给出其具体维修时的决策,以制定科学可行的维修计划和优化配件管理工作,提高了燃气轮机运行的可靠性和维修管理的自动化水平。

1 CBM 决策系统组成及分析

基于实时状态监测的燃气轮机 CBM 决策系统由两部分组成:运行于后台计算服务器端的燃气轮机使用寿命实时在线预测程序;运行于 Web 服务器端的显示计算结果和信息系统管理 B/S 程序。系统模块化结构数据的流程如图 1 所示。

燃气轮机部件实时运行状态的数据先通过传感

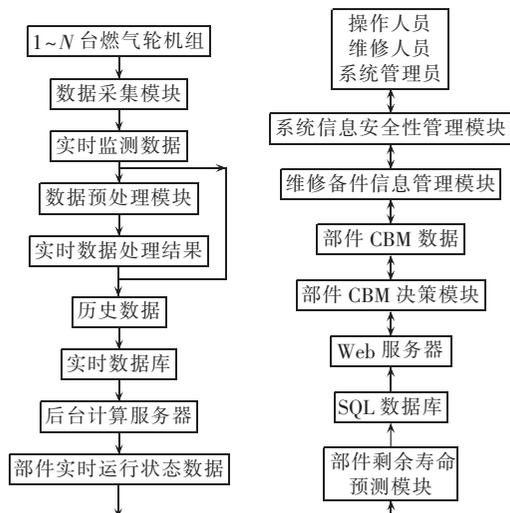


图 1 系统模块化结构数据流程图

Fig.1 Modularized data flow of system

器传送到分布式控制系统(DCS)上,再通过与该系统相连的接口机传送到实时数据库中存储。

在后台计算服务器端,程序从实时数据库中读取燃气轮机的实时状态运行参数,进行计算、分析、判断,形成燃气轮机的运行状态描述;再计算燃气轮机相关部件在实际运行条件下的使用寿命,并折算成基准运行条件下的等效使用寿命,然后与基准运行条件下的最大维修寿命进行比较,预测剩余寿命,并将预测结果存入 SQL 数据库表中。

基于 Internet/Intranet 结构的 B/S 架构模式的 CBM 决策系统,使用浏览器作为统一的用户界面,根据面向对象(object oriented)的方法进行模块化设计,Web 端程序大体分为 CBM 决策模块、维修备件信息管理模块和系统信息安全性管理模块 3 个部分。CBM 决策模块读取 SQL 数据库中的燃气轮机相关部件的实时剩余寿命数据,通过选择不同的 CBM 决策模型,计算决策相关部件的具体维修时机,并在网页上显示各部件的剩余寿命预测和 CBM 决策结果。维修备件信息管理模块根据 CBM 决策结果,制定合理的燃气轮机相关部件维修计划,并同时做好备件更换记录和计划管理工作。系统信息安全性管理模块负责网站的信息发布、用户权限管理等工作。各模块的划分和设计遵循“高内聚、低耦合”的原则,分别进行独立的开发和测试,系统运行时由主模块调用各个子模块,分别完成一项相对独立的功能,因此该系统具有良好的移植性和扩展性。

2 CBM 决策系统的实现方法

2.1 相关开发工具和关键技术

CBM 决策系统基于 B/S 模式开发,采用面向对象的思想 and C# 编程语言进行程序设计,Web 服务器端的动态页面采用 ASP.NET 技术制作。为了增强页

面对于曲线和图形的表现能力,将开源的 ASP.NET 图表类库 ZedGraph 控件嵌入到网页中。该系统主要利用 Microsoft 公司的 Visual Studio2005 集成开发环境、关系型数据库系统 SQL2000 和 OSI 公司的 PI 实时数据库等开发工具实现。

系统开发的关键技术如下。

a. 基于 iBatis.NET 的 SQL 数据库访问技术。

在 CBM 决策系统后台计算服务器和 Web 服务器有燃气轮机启停记录、燃烧系统等多张 SQL 关系数据表用于存储数据,虽可直接通过 ADO.NET 编程访问 SQL 数据库,但这样势必要在程序代码中嵌入大量重复的数据库访问程序,使得开发的项目难以维护。基于 iBatis.NET 的对象关系映射(ORM)技术结合了面向对象技术的简单易用性和关系型数据库技术的操作优势,采用面向对象的方式将这些对象组织起来,通过映射使数据库层对于业务逻辑透明,从而实现真正的完全面向对象的访问 SQL 数据库。

b. 基于 Ajax 的无刷新页面技术。

在 CBM 决策系统 Web 服务器端软件中有机结合原有的 Java script、DHTML 和 CSS 等技术,实现 Ajax 无刷新页面的数据异步传输,用户在单击按钮提交操作时,只需要传输关键数据,浏览器立即更新用户界面,并向服务器发出异步请求,以执行更新或查询数据库;当请求返回时,无需刷新整个页面来更新用户界面。这些原有技术在现代浏览器上都得到了很好的支持,因此访问 Ajax 应用不需要安装任何浏览器插件。

c. 基于 Zedgraph 的绘图应用技术。

Zedgraph 是一个比较新型的开源类库,使用 C# 语言编写,用来创建基于任意数据集的多种二维图形图像。类库编写是面向对象的。由于是源代码,必要时还可以对源代码进行修改,重新生成。图表是对数据进行分析评估的常用工具,也是最直观的表现数据的方法。在 CBM 决策系统用户界面中使用 Zedgraph 的图表来表现数据,工程技术人员根据图表信息直观了解部件的当前运行状态。

2.2 数据采集与预处理

来自现场 DCS 等数据源的数据,首先被送往实时数据库节点的接口程序进行例外测试,当数据变化值超过各节点预先设定好的例外偏移值时,该数据被进一步传送,否则丢弃。通过例外测试的数据被送到快照子系统,成为新的快照值,先前的快照值将通过螺旋门压缩技术比较数据变化值是否超过预先设定的压缩偏移值,决定是进一步传送还是丢弃。CBM 决策系统所用到的实时数据库测点有发电机功率等连续变化测点和点火次数等跳跃变化测点 2 类。功率等测点用于寻找最大运行功率和跳闸功

率,其采样精度要求较高;点火次数等测点由于在很长一段时间都无变化,其采样精度要求较低。可通过设置测点的例外偏移值和压缩偏移值来实现不同的采样精度的需求。

当系统收到数据链传来的燃气轮机实时或近实时状态数据时,预处理程序根据阈值比较协议要求,对数据进行过滤、综合、重组和分类,然后送往多通道推理机对应的推理机通道来完成数据预处理。

2.3 燃气轮机寿命预测方法

燃气轮机的维修原则是先高温部件后其他部件。技术人员经过研究和实际经验积累,选择燃烧系统、热通道和转子 3 个具有代表性的部件的维修寿命(等效运行时数和等效启动次数)作为基准,其他部件参照此基准值来确定各自的维修寿命。

热通道部件等效运行时数和等效启动次数计算方法^[17]如下,燃烧系统部件和转子部件的计算方法与之相似。

a. 热通道部件等效运行时数计算式为:

$$F_H = (K + MI)(G + 1.5D + A_f H + 6P) \quad (1)$$

其中, M 、 K 分别为由湿度控制方式、蒸汽注入率和第 2、3 级喷嘴材料所确定的系数; I 为水和蒸汽注入占进气流量的百分比; G 、 D 、 H 分别为燃用天然气、轻油和重油的年基本负荷运行小时数; A_f 为重油严重系数; P 为年调峰运行小时数。

b. 热通道部件等效启动次数计算式为:

$$F_S = 0.5N_A + N_B + 1.3N_P + 20E + 2F + \sum_{i=1}^n (\alpha_{T_i} - 1)T_i \quad (2)$$

其中, N_A 、 N_B 、 N_P 、 E 、 F 分别为机组年部分负荷、基本负荷、尖峰负荷、紧急启动和快速升负荷启动次数; T_i 为年跳闸次数; α_{T_i} 为跳闸严重系数; n 为跳闸种类数。

在后台计算服务器端,程序从实时数据库中读取燃气轮机点火信号、点火时数、启动次数、跳闸次数和发电机有功功率等测点的实时状态运行参数,进行计算、分析、判断,形成燃气轮机的运行状态描述。其中,点火信号和点火时数测点分别用于判断机组的启停机状况和记录运行时数;发电机有功功率测点用于实时分析计算机组的最大负荷和跳闸时的跳闸负荷。然后,通过计算燃气轮机相关部件在实际运行条件下的使用寿命(运行时数和启动次数),折算成其在基准运行条件(指以天然气为燃料、没有注水或蒸汽、连续无跳闸正常启动的运行条件)下的等效使用寿命(如式(1)和(2)所示)。最后,将得到的燃气轮机相关部件等效使用寿命同其在基准运行条件下的最大维修寿命进行比较,预测相关部件的剩余寿命。为方便 Web 服务器端读取预测结果对燃气轮机相关部件进行 CBM 决策判断,将预测结果实时地存入 SQL 数据库相应表中。表 1 为制造商提供

表 1 燃气轮机部件最大维修寿命
Tab.1 Maximum maintenance life of gas turbine components

部件	运行时间/h	启动次数
燃烧系统	8000	450
热通道	24000	900
转子	48000	2400

的燃气轮机相关部件在基准运行条件下的最大维修寿命^[17]。

2.4 燃气轮机 CBM 决策模型

在文献[17]中,把燃气轮机相关部件的等效运行时数(等效启动次数)与实际运行时数(实际启动次数)的比值定义为维修系数 MF(Maintenance Factor),即:

$$MF_H = F_H / A_H$$

$$MF_S = F_S / A_S$$

同时将实际运行时数(实际启动次数)与统计期间所有小时数的比值定义为服务系数 SF(Service Factor),即:

$$SF_H = A_H / PH$$

$$SF_S = A_S / PH$$

上述 4 个公式中,下标 H、S 分别对应运行时数和启动次数。燃气轮机部件 CBM 决策分析如图 2 所示。影响维修系数的主要因素有燃料种类、负荷变化情况、是否注入蒸汽或水、有无尖峰负荷运行、有无机组跳闸、机组启动方式(正常启动、紧急启动或快速升负荷启动)等;服务系数只受单位统计时间内的实际运行时数(实际启动次数)的影响。

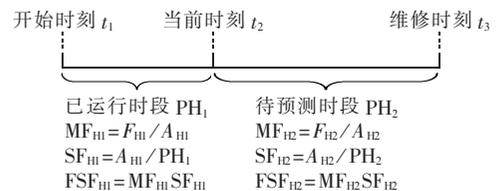


图 2 燃气轮机部件 CBM 决策模型

Fig.2 CBM decision-making model of gas turbine components

在后台计算服务器端,根据燃气轮机寿命预测方法,预测得到燃气轮机相关部件的剩余寿命。为对其具体维修时机进行决策,本文基于运行时数(启动次数)的维修系数和服务系数的乘积,提出运行时数(启动次数)的等效服务系数 FSF(Factored Service Factor)的概念。根据已运行时段 PH₁ 和待预测时段 PH₂ 的等效服务系数是否相等(对 2 个时段的维修系数和服务系数是否相等分别进行排列组合,共有 4 类情况),建立了 4 类 CBM 决策模型。这样发电企业不仅可以根据燃气轮机已运行时段的等效服务系数对待预测时段的具体维修时机进行决策,同时也可以结合发电企业在待预测时段给出的实际运行行

划等效服务系数,通过给定等效服务系数一个系数的值,得到燃气轮机相关部件的具体 CBM 决策时机。燃气轮机相关部件运行时数(启动次数的 CBM 决策模型建立方法相同)的 4 类 CBM 决策模型如下。

a. 第 1 类 CBM 决策模型。解决的是燃气轮机在待预测时段 PH_2 与已运行时段 PH_1 的运行情况相同时的维修时机决策问题。即 PH_2 的 MF_2 和 SF_2 分别取 PH_1 的 MF_1 和 SF_1 的值,预测 2 个时段的等效服务系数 FSF 相等情况下的维修时刻 t_3 。

已运行时段 PH_1 的等效服务系数为:

$$FSF_{H1} = MF_{H1} SF_{H1} = \frac{F_{H1}}{A_{H1}} \frac{A_{H1}}{PH_1} = \frac{F_{H1}}{PH_1} \quad (3)$$

其中, A_{H1} 、 F_{H1} 分别为已运行时段 PH_1 的实际运行小时数和等效运行小时数。

由总运行时段 $PH_1 + PH_2$ 的等效服务系数定义,可得:

$$FSF_H = MF_H SF_H = \frac{IF_H}{PH_1 + PH_2} \quad (4)$$

其中, IF_H 为燃气轮机部件的理想维修间隔,即总的等效运行时数。

由式(3)、(4)及 $MF_{H2} = MF_{H1}$ 、 $SF_{H2} = SF_{H1}$ 可得到维修时刻 t_3 :

$$\frac{F_{H1}}{PH_1} = \frac{IF_H}{PH_1 + PH_2} \Rightarrow PH_1 + PH_2 = IF_H \frac{PH_1}{F_{H1}} \quad (5)$$

$$t_3 = t_1 + (PH_1 + PH_2) = t_1 + \frac{IF_H PH_1}{F_{H1}}$$

b. 第 2 类 CBM 决策模型。解决的是燃气轮机在待预测时段 PH_2 与已运行时段 PH_1 的运行情况不同时的维修时机决策问题。即 PH_2 的 MF_{H2} 取 PH_1 的 MF_{H1} 、 SF_{H2} 取企业根据实际运行计划给定的年运行小时数 FAH (Forecast Actual Hours),预测计算 2 个时段的等效服务系数 FSF 不相等情况下的维修时刻 t_3 。

待预测时段 PH_2 等效服务系数为:

$$FSF_{H2} = MF_{H2} SF_{H2} = \frac{F_{H1}}{A_{H1}} \frac{FAH}{8760} \quad (6)$$

由待预测时段 PH_2 的等效服务系数定义,可得:

$$FSF_{H2} = \frac{F_{H2}}{PH_2} = \frac{IF_H - F_{H1}}{PH_2} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得到维修时刻 t_3 :

$$\frac{F_{H1}}{A_{H1}} \frac{FAH}{8760} = \frac{IF_H - F_{H1}}{PH_2} \Rightarrow PH_2 = 8760 A_{H1} \frac{IF_H - F_{H1}}{F_{H1} FAH} \quad (8)$$

$$t_3 = t_2 + PH_2 = t_2 + 8760 A_{H1} \frac{IF_H - F_{H1}}{F_{H1} FAH}$$

c. 第 3 类 CBM 决策模型。解决的是燃气轮机在待预测时段 PH_2 与已运行时段 PH_1 的运行情况不同时的维修时机决策问题。即 PH_2 的 SF_{H2} 取 PH_1 的 SF_{H1} 、 MF_{H2} 取企业根据实际运行计划给定的维修系数,预测计算 2 个时段的等效服务系数 FSF 不相

等时的维修时刻 t_3 。

待预测时段 PH_2 等效服务系数为:

$$FSF_{H2} = MF_{H2} SF_{H2} = MF_{H2} \frac{A_{H1}}{PH_1} \quad (9)$$

由式(7)、(9)可得到维修时刻 t_3 :

$$\frac{MF_{H2} A_{H1}}{PH_1} = \frac{IF_H - F_{H1}}{PH_2} \Rightarrow PH_2 = PH_1 \frac{IF_H - F_{H1}}{MF_{H2} A_{H1}} \quad (10)$$

$$t_3 = t_2 + PH_2 = t_2 + PH_1 \frac{IF_H - F_{H1}}{MF_{H2} A_{H1}}$$

d. 第 4 类 CBM 决策模型。解决的是燃气轮机在待预测时段 PH_2 与已运行时段 PH_1 的运行情况不同时的维修时机决策问题。即 PH_2 的 MF_{H2} 和 SF_{H2} 都用企业根据实际运行计划给定的维修系数和年运行小时数,预测计算 2 个时段的等效服务系数 FSF 不相等情况下的维修时刻 t_3 。

待预测时段 PH_2 等效服务系数为:

$$FSF_{H2} = MF_{H2} SF_{H2} = MF_{H2} \frac{FAH}{8760} \quad (11)$$

由式(7)、(11)可得到维修时刻 t_3 为:

$$\frac{MF_{H2} FAH}{8760} = \frac{IF_H - F_{H1}}{PH_2} \Rightarrow PH_2 = 8760 \frac{IF_H - F_{H1}}{MF_{H2} FAH} \quad (12)$$

$$t_3 = t_2 + PH_2 = t_2 + 8760 \frac{IF_H - F_{H1}}{MF_{H2} FAH}$$

2.5 备件维修信息管理

通过前文提及的评估方法和预测模型,可计算得到燃烧系统、热通道和转子系统部件的维修时刻,同时也可得到所涉及组件的维修时刻。在保证安全性的情况下得到最大的可用率,实现 CBM。通过维修可以解决因结垢、结渣或者其他因素引起的热效率下降、稳定性下降等影响到生产的现象,使机组的经济性和稳定性增加。

由于机械零部件的维修效果会随着维修次数的增加而降低,同时维修费用会不断地增加。当维修不能达到设备的预期效果或者维修费用大于更换费用时,应该选择更换设备而不是继续维修。因此,需要对每个部件的不同组件的维修次数和达到了最大维修次数需要更换等信息进行有效管理。系统给出了燃气轮机燃烧系统 Caps 等 6 类共 120 种组件,热通道部件的 624 个组件(Stage Bucket、Stage Shrouds 各有 3 类,每类又分别有 100 种组件;Stage Nozzles 有 4 类,每类各有 6 种组件)的维修更换信息管理。

3 应用实例及分析

将本文开发的基于实时状态监测的燃气轮机 CBM 决策系统应用于某电厂的 3 台燃气-蒸汽联合循环发电机组的 CBM 决策。后台计算服务器程序统计出燃气轮机热通道部件自 2010 年 5 月 20 日检修后的实际运行时数和启动次数分别为 15710.5 h 和

509 次(图 3 中的点 A)。利用燃气轮机寿命预测方法中的式(1)和式(2),可求解得到热通道部件的等效运行时数和等效启动次数分别为 18 129.97 h 和 635.4 次(图 3 中的点 B)。由表 1 知,热通道部件在基准运行条件下的最大维修时数和启动次数分别为 24 000 h 和 900 次(图 3 中点 C),可推算出剩余等效运行时数和启动次数分别是 5 870.03 h 和 264.6 次。

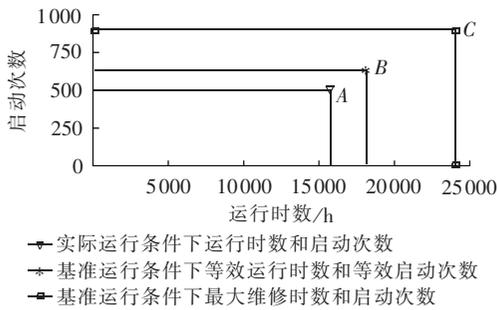


图 3 预测结果

Fig.3 Predictive results

由定义可知,已运行时段的运行时数维修系数 $MF_{H1} = F_{H1} / A_{H1} = 18\ 129.97 / 15\ 710.5 = 1.154$,启动次数的维修系数 $MF_{S1} = F_{S1} / A_{S1} = 635.4 / 509 = 1.248$ 。图 2 中的维修开始时刻 t_1 为 2010 年 5 月 20 日,给定当前时刻 t_2 为 2012 年 5 月 30 日,可计算已运行时段的运行时数服务系数 $SF_{H1} = A_{H1} / PH_1 = 15\ 710.5 / 17\ 784 = 0.883$,启动次数服务系数为 $SF_{S1} = A_{S1} / PH_1 = 509 / 17\ 784 = 0.0286$,进而可计算已运行时段的运行时数等效服务系数为 $FSF_{H1} = MF_{H1} SF_{H1} = 1.154 \times 0.883 = 1.019$,启动次数等效服务系数 $FSF_{S1} = MF_{S1} SF_{S1} = 1.248 \times 0.0286 = 0.0357$ 。

如果企业选择第 1 类 CBM 决策模型,即 PH_2 时段的运行时数(启动次数)维修系数和服务系数都选取 PH_1 时段的运行时数(启动次数)维修系数 1.154 (1.248)和服务系数 0.883 (0.0286),由式(5)计算得运行时数(启动次数)的维修时刻 t_3 为 2013 年 1 月 24 日(2013 年 4 月 3 日)。根据矩形维修原则,以先到达的运行时数或是启动次数的维修时刻,作为部件维修时刻^[17]。因此,取 2013 年 1 月 24 日作为热通道部件的维修时刻。

如果企业选择第 2 类 CBM 决策模型,即 PH_2 时段的运行时数(启动次数)维修系数按照 PH_1 时段的运行时数(启动次数)维修系数 1.154 (1.248), PH_2 时段的运行时数(启动次数)服务系数用企业根据实际运行计划给定的年运行时数(启动次数)5 000 h (200 次),由式(8)计算运行时数(启动次数)的维修时刻 t_3 为 2013 年 6 月 5 日(2013 年 6 月 20 日)。因此,根据矩形维修原则,选取 2013 年 6 月 5 日作为热通道部件的维修时刻。

如果企业选择第 3 类 CBM 决策模型,即 PH_2 时段的运行时数(启动次数)服务系数按照 PH_1 时段的运行时数(启动次数)服务系数 0.883 (0.0286), PH_2 时段的运行时数(启动次数)维修系数用企业根据实际运行计划给定的 1.2 (1.3),由式(10)计算运行时数(启动次数)的维修时刻 t_3 为 2013 年 1 月 15 日(2013 年 3 月 22 日)。因此,根据矩形维修原则,选取 2013 年 1 月 15 日作为热通道部件的维修时刻。

如果企业选择第 4 类 CBM 决策模型,即 PH_2 时段的运行时数(启动次数)服务系数和维修系数都用企业根据实际运行计划给定的维修系数 1.2 (1.3)和年运行时数(启动次数)5 000 h (200 次),由式(12)计算运行时数(启动次数)的维修时刻 t_3 为 2013 年 5 月 22 日(2013 年 6 月 5 日)。因此,根据矩形维修原则,选取 2013 年 5 月 22 日作为热通道部件的维修时刻。

一般情况下常用的是第 1 类 CBM 决策模型,即根据燃气轮机已运行时段的等效服务系数对待预测时段的具体维修时机进行决策,本文第 2、3、4 类 CBM 决策模型可以由企业根据自己的实际运行计划,对待预测时段的具体维修时机进行决策。

4 结语

本文提出一种基于实时状态监测的燃气轮机 CBM 决策系统,开发了燃气轮机燃烧系统部件、热通道部件和转子部件的寿命预测和 CBM 决策的实现程序。本决策系统的创新之处在于发电企业不仅可以根据燃气轮机已运行时段的等效服务系数对待预测时段的具体维修时机进行决策,同时也可以结合发电企业在待预测时段给出实际运行计划的等效服务系数,通过给定等效服务系数一个系数的值,得到燃气轮机相关部件的具体 CBM 决策时机。该系统已在某电厂投入运行,实践表明,该系统运行稳定,灵活高效,能满足工程实际应用。

参考文献:

- [1] FLAGE R, COIT D W, LUXHOJ J T, et al. Safety constraints applied to an adaptive Bayesian condition-based maintenance optimization model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 102: 16-26.
- [2] ZHOU Z J, HU C H, WANG W B, et al. Condition-based maintenance of dynamic systems using online failure prognosis and belief rule base[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39 (6): 6140-6149.
- [3] 李燕青, 律方成, 刘国平, 等. 我国电气设备状态维修的发展与实现[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 16-19.
LI Yanqing, LÜ Fangcheng, LIU Guoping, et al. Development and implementation of condition based maintenance for electrical equipments in China[J]. Electric Power, 2003, 36(2): 16-19.
- [4] VERMA A K, SRIVIDYA A, RAMESH P G. A systemic approach

- to integrated e-maintenance of large engineering plants[J]. International Journal of Automation & Computing,2010(2):173-179.
- [5] NIU G,YANG B S,PECHT M. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability centered maintenance[J]. Reliability Engineering and System Safety,2010,7(95):786-796.
- [6] TIAN Z,JIN T,WU B,et al. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring[J]. Renewable Energy,2011,36(5):1502-1509.
- [7] 潘乐真,张焰,俞国勤,等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):91-94.
- PAN Lezhen,ZHANG Yan,YU Guoqin,et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):91-94.
- [8] 姚建刚,肖辉耀,章建,等. 电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(1):52-58.
- YAO Jiangang,XIAO Huiyao,ZHANG Jian,et al. Design of electric equipment operation security condition assessment system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2009,21(1):52-58.
- [9] 李刚,程春田,廖胜利,等. 省级电网发、输电设备检修优化系统研究与开发[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):142-146.
- LI Gang,CHENG Chuntian,LIAO Shengli,et al. Optimal maintenance system of generation and transmission devices for provincial power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):142-146.
- [10] PNS R,VNA N. An optimal maintenance policy for compressor of a gas turbine power plant[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME,2008,130(2):11-15.
- [11] ZHAO Y J,VOLOVOI V,WATERS M,et al. A sequential approach for gas turbine power plant preventative maintenance scheduling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME,2006,128(4):796-805.
- [12] 毛丹,诸粤珊. 三菱 M701F 型燃气轮机维修理念分析[J]. 燃气轮机技术,2010(3):53-57.
- MAO Dan,ZHU Yueshan. An analysis of the M701F gas turbine maintenance conception[J]. Gas Turbine Technology,2010(3):53-57.
- [13] 龚文强,王庆初. 基于 EOH 分析的燃机检修策略优化[J]. 中国电力,2011,44(8):40-42.
- GONG Wenqiang,WANG Qingren. Strategies optimization of gas turbine overhaul based on EOH analysis[J]. Electric Power,2011,44(8):40-42.
- [14] 侯子良. 再论火电厂厂级监控信息系统[J]. 电力系统自动化,2002,26(15):1-3.
- HOU Ziliang. Study on the supervisory information system of plant level in fossil fuel power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(15):1-3.
- [15] 李蔚,盛德仁,陈坚红,等. 电厂实时监控信息系统的设计与应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):218-221.
- LI Wei,SHENG Deren,CHEN Jianhong,et al. Selecting the scheme of real-time database for SIS in a power plant[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):218-221.
- [16] 洪慧,林中达. PI 数据库及其信息交换技术在电厂中应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(3):60-63.
- HONG Hui,LIN Zhongda. Application of PI real-time database and information exchange in power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(3):60-63.
- [17] BALEVIC D,HARTMAN S,YOUMANS R. Heavy duty gas turbine operating and maintenance considerations[R]. Atlanta,GA, USA:GE Energy Services,2009.

作者简介:



万安平

万安平(1983-),男,江西南昌人,博士研究生,主要从事联合循环机组优化运行与维护等方面的研究工作(E-mail:anpingwan@zju.edu.cn);

陈坚红(1967-),男,浙江义乌人,副教授,博士,通讯作者,从事能源与环境专业等教学和科研工作(E-mail:power@zju.edu.cn)。

CBM decision-making system based on real-time status monitoring for gas turbine

WAN Anping¹,CHEN Jianhong¹,SHENG Deren¹,HU Yacai¹,CHEN Qigou²

(1. Institute of Thermal Science and Power System,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Xiaoshan Power Plant of Zhejiang Southeast Electric Power Co.,Ltd., Hangzhou 311251, China)

Abstract: A CBM(Condition-Based Maintenance) decision-making system is proposed for gas turbine, which, based on its actual operating state information in the real-time data base, applies the residual life prediction method for its components to calculate the service life(running hours and start/stop cycles) under current operating states, converts the service life into the equivalent service life under benchmark operating conditions, and predicts the residual life by the comparison between the equivalent service life and the maximum maintenance life. The concept of equivalent service factor is proposed based on the products of maintenance factor and service factor. According to the relationship between the equivalent service factor of operated period and that of predictive period, four CBM decision-making models are established for the specific maintenance time of gas turbine component. The ASP.NET technology is applied in the development of a CBM decision-making system based on B/S structure and its effectiveness and practicability are verified by a practical project.

Key words: gas turbines; monitoring; life prediction; service factor; condition-based maintenance