

基于扩展卡尔曼滤波的燃气轮机性能参数估计与故障诊断

康维国 蒋东翔

(清华大学 热能工程系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 将扩展卡尔曼滤波方法应用在分轴燃气轮机性能参数状态估计和热力故障诊断领域。根据实际燃气轮机建立非线性热力系统模型,根据模型计算数据建立包含燃气轮机压气机、高压涡轮与动力涡轮等部件健康参数的线性SSM(状态空间模型),设计得到EKF(扩展卡尔曼滤波器);利用所设计EKF对突变型和渐变型各6种燃气轮机典型热力故障部件的健康参数进行估计。结果表明:用扩展卡尔曼滤波器对分轴燃气轮机性能参数状态估计非常及时和准确,适用于分轴燃气轮机实时状态监测和故障诊断中,并且对性能参数的渐变所引发故障的跟踪更为及时,诊断更为准确。

关键词: 分轴燃气轮机; 扩展卡尔曼滤波; 性能参数; 状态估计; 热力故障诊断

中图分类号: TK471 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.013

引言

目前,燃气轮机的故障诊断方法有很多,如基于故障方程的诊断方法、基于观测器的方法、基于支持向量机的诊断方法、模糊诊断、基于人工神经网络的诊断方法以及基于规则的专家系统等^[1-4]。

卡尔曼滤波器方法属于状态观测器方法的一种^[5],可以利用系统测量数据样本来估计系统的状态。在上世纪八十年代就已经应用到航空发动机的故障诊断中,近来也常被应用于燃气轮机的热力故障诊断。本研究首先根据包含部件健康参数的燃气轮机线性状态空间设计了扩展卡尔曼滤波器,然后结合分轴气轮机的测量参数,完成了对燃气轮机状态参数的估计,实现了燃气轮机热力故障的诊断。最后,根据突变故障和渐变故障的不同特征,利用所设计EKF实现了对突变和渐变各6种典型热力故障的准确定位诊断和相关部件健康参数的及时状态估计。

1 分轴燃气轮机模型

分轴燃气轮机主要由压气机、燃烧室、高压涡轮、动力涡轮和负载等主要部件组成,如图1所示。

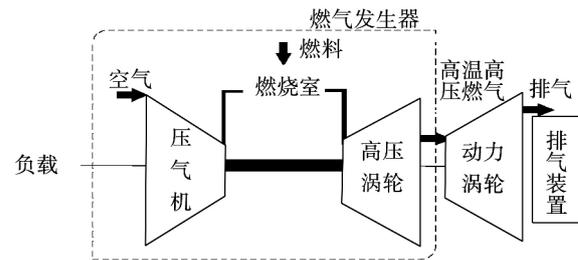


图1 分轴燃气轮机基本组成结构

Fig. 1 Basic composition of a split shaft gas turbine

根据各个主要部件的热力学过程方程,在MATLAB/SIMULINK平台上搭建了分轴燃气轮机的非线性仿真模型,如图2所示。利用此非线性模型通过调整负载功率或燃油流量可以计算分轴燃气轮机在不同工况下各个截面工质的温度、压力、流量等参数,并能够通过调整各部件的性能参数偏差来模拟各种典型的热力系统故障。

所建立的非线性模型的精度需要进行验证,在此选取某型分轴燃气轮机在设计点工况的数据作为标准进行验证,非线性模型和已知设计点主要参数对比如表1所示^[6]。

可以看出,在额定工况点非线性模型的计算结果与已有的设计参数相差不大,误差均在5%以内,即所建的燃气轮机非线性模型具有较高计算精度,可以用于热力故障诊断。

收稿日期: 2015-01-07; 修订日期: 2015-03-23

作者简介: 康维国(1988-),男,山东泰安人,清华大学工学硕士。

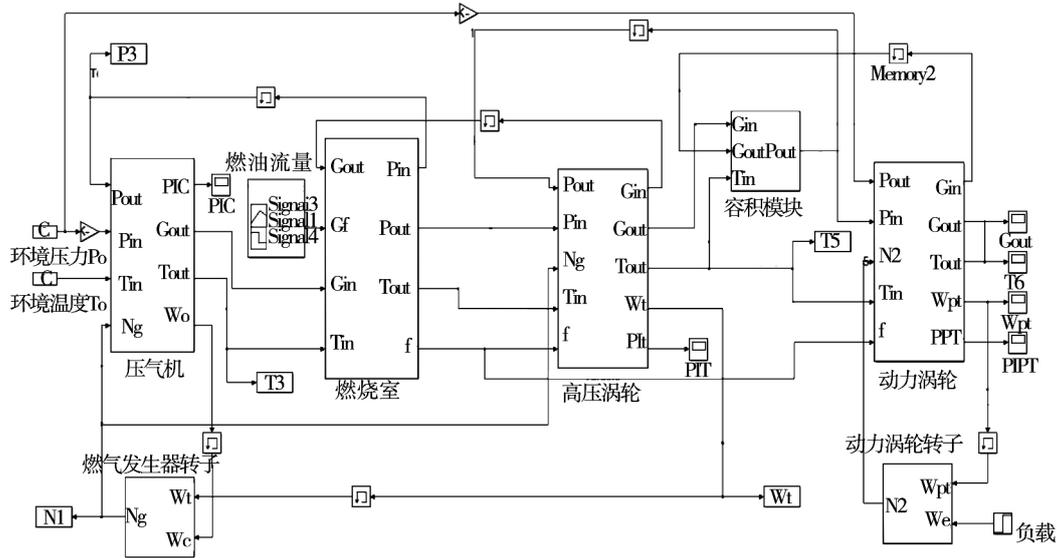


图 2 分轴燃气轮机非线性仿真模型

Fig. 2 Nonlinear simulation model of a split shaft gas turbine

表 1 非线性模型在额定工况准确性验证

Tab. 1 Validation of the accuracy of the nonlinear model in a rated working condition

参 数	设计点数据	仿真数据	误差 / %
燃气发生器转速 / $r \cdot \text{min}^{-1}$	8 500	8 501	0.01
动力涡轮转速 / $r \cdot \text{min}^{-1}$	3 600	3 600	0
压气机出口温度 / K	702.77	706.6	0.5
压气机出口压力 / Pa	1.86×10^6	1.82×10^6	2.15
压气机空气流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	65.318	64.2	1.71
燃油流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	1.318	1.318	0
燃烧室出口温度 / K	1 399	1 393	0.43
高压涡轮出口温度 / K	1 049	1 048	0.10
高压涡轮出口压力 / Pa	3.96×10^5	3.85×10^5	2.78
高压涡轮空气流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	66.044	65.527	0.78
动力涡轮出口温度 / K	777.2	780.3	0.40
动力涡轮出口压力 / Pa	1.02×10^5	1.06×10^5	3.92
动力涡轮输出功率 / kW	20 516	20 219	1.45

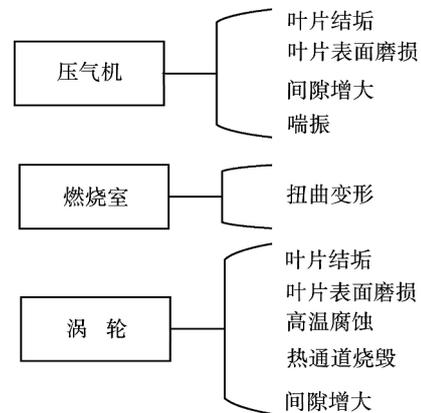


图 3 燃气轮机主要部件典型热力故障

Fig. 3 Typical thermal faults of main components of a gas turbine

表 2 主要部件典型热力故障判据

Tab. 2 Typical thermal failure criteria of the main components

故障名称	判 据
压气机叶片结垢及磨损	GC 下降 7% EC 下降 4%
压气机受外来物损伤	EC 下降 5%
涡轮结垢	GT 下降 6% ET 下降 2%
涡轮叶片腐蚀	GT 增加 6%
涡轮叶片表面磨损	GT 增加 6% ET 下降 2%
涡轮损伤	ET 下降 5%
涡轮热通道烧毁	T4 升高 ET 略有下降
燃烧室扭曲变形	a2 下降 5%

注: T4 - 涡轮前总温; a2 - 燃烧室总压恢复系数。

2 分轴燃气轮机典型部件热力故障

燃气轮机的热力故障主要是指各主要部件的性能参数发生蜕化^[7]。图 3 为燃气轮机压气机、燃烧室和涡轮经常发生的一些典型故障。

对主要部件热力故障进行诊断,通常选择各部件的性能参数与正常状态的偏差作为判据^[7],如表 2 所示。

3 分轴燃气轮机状态空间模型

燃气轮机想要实现在线性能监测与故障诊断,就需要建立更为简洁明了的机载自适应模型^[8],燃气轮机的自适应模型的基础也是其 SSM(状态空间模型),其中线性状态空间模型是其核心部分,由于它运算量小又能达到所需要的精度,并且能结合先进的控制算法,因此得到广泛应用。

已知某型分轴燃气轮机的非线性状态空间模型:

$$\dot{x} = f(x, \mu)$$

$$y = g(x, \mu)$$

式中: $x \in R^n$ — 状态变量; $y \in R^m$ — 输出变量; $u \in R^r$ — 控制变量。

对燃气轮机而言,控制变量 u 往往为燃油流量,它决定了燃气轮机的运行工况;状态变量 x 为能够反映燃气轮机运行状态的变量,输出参数 y 为燃气轮机运行过程中实际测量的参数,这里选取以下参数作为变量:

$$x = [Ng \quad P3 \quad W_{pt}] ;$$

$$u = [G_f] ;$$

$$y = [Ng \quad P3 \quad T3 \quad T5 \quad T6 \quad W_{pt}] ;$$

式中: Ng —燃气发生器转速; $P3$ —压气机后总压; G_f —燃油流量; $T3$ —压气机后总温; $T5$ —高压涡轮后总温; $T6$ —动力涡轮后总温; W_{pt} —动力涡轮输出功率。

控制变量 u 决定了燃气轮机的运行工况,在燃气轮机额定运行工况点 (x_0, y_0, μ_0) 附近对非线性模型进行 Taylor 级数展开可以得到其状态空间模型:

$$\dot{\Delta x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

A, B, C, D 为 SSM 的系数矩阵,用改进拟合的算法求得^[9]。

$$A = \begin{bmatrix} 0.9265 & 0.0377 & -0.0084 \\ 0.1455 & 0.9112 & 0.0197 \\ 0.2026 & -0.0222 & 0.9460 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0066 \\ -0.0047 \\ 0.0123 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.6155 & 0.0713 & -0.0011 \\ -1.6909 & 0.2430 & 0.1431 \\ -1.9123 & 0.2653 & 0.0572 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0004 \\ 0.4738 \\ 0.5371 \\ 0 \end{bmatrix}$$

在环境和工况条件不变的情况下,燃气轮机部件热力故障通常都是由部件的性能参数发生变化所导致的^[10],因此状态空间模型如果能够应用于热力故障诊断,其状态参数中就必须包含与部件性能参数有关的变量。因此根据部件的性能参数,首先定义了燃气轮机各主要热力部件包括压气机、高压涡轮以及动力涡轮在内的健康参数:

$$EC = \frac{\eta_c}{\eta_c^0};$$

$$GC = \frac{g_c}{g_c^0};$$

$$ET = \frac{\eta_T}{\eta_T^0};$$

$$GT = \frac{g_T}{g_T^0};$$

$$EPT = \frac{\eta_{PT}}{\eta_{PT}^0};$$

$$GPT = \frac{g_{PT}}{g_{PT}^0};$$

EC, GC, ET, GT, EPT, GPT 分别为压气机效率、压气机流量、高压涡轮效率、高压涡轮流量、动力涡轮效率和动力涡轮流量与其在额定工况下设计值的比值作为状态空间模型的 6 个健康参数。其中, η_c^0 分别表示了各个性能参数在额定工况下的设计值。同时定义部件健康参数的偏差:

$$\Delta EC = EC - 1;$$

$$\Delta GC = GC - 1$$

$$\Delta ET = ET - 1;$$

$$\Delta GT = GT - 1$$

$$\Delta EPT = EPT - 1;$$

$$\Delta GPT = GPT - 1$$

这样,燃气轮机的主要部件热力故障就能通过

部件健康参数的偏差反映出来。

将部件的健康参数添加到燃气轮机线性状态空间模型中去,同时考虑系统噪声和测量噪声的影响,可以得到描述真实状态空间模型:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u + L\Delta p + \nu \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u + M\Delta p + \omega \end{aligned}$$

其中, A, B, C, D 仍为之前所求系数矩阵, L, M 分别为对应部件健康参数的系数矩阵, $\Delta p = [\Delta EC \ \Delta GC \ \Delta ET \ \Delta GT \ \Delta EPT \ \Delta GPT]$ 。

4 扩展卡尔曼滤波算法

基于之前建立的包含部件健康参数的 SSM 模型,可以认为部件的健康参数变化是一个非常缓慢的过程,可以认为在一段时间内健康参数是保持不变的,即可以作假设: $\Delta \dot{p} = 0$ [11]。则线性状态空间模型变换为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ \dot{\Delta p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u + \omega$$

$$\Delta y = [C \ M] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta p \end{bmatrix} + D\Delta u + \nu$$

卡尔曼滤波就是根据系统的模型信息和测量信息对系统的状态参数进行估计,使估计的均方差达到最小。上述第一个方程称为过程方程,第二个为量测方程,其原理就是利用当前步的测量结果估计后一步的状态参数值,这样进行 k 步计算,根据之前 k 步的测量结果利用系统方程可以对系统的状态参数 Δx 进行先验估计得到第 $k+1$ 步的先验估计误差 \hat{x}_{k+1}^- ,然后根据系统当前的测量结果可以利用量测方程对状态参数进行后验估计,得到后验估计误差 \hat{x}_{k+1} ,定义先验估计和后验估计误差的线性关系为:

$$\hat{x}_{k+1} = L_k \hat{x}_{k+1}^- + K_k y_{k+1}$$

L_k 和 K_k 为增益矩阵,考虑到系统后验估计 \hat{x}_{k+1} 为无偏估计,可以得到其关系为:

$$L_k = I - K_k C_{k+1}$$

定义先验估计误差和后验估计误差协方差:

$$P_{k+1}^- = E \left[\hat{x}_{k+1}^- \hat{x}_{k+1}^{-T} \right]$$

$$P_{k+1} = E \left[\hat{x}_{k+1} \hat{x}_{k+1}^T \right]$$

为了使得后验估计的协方差最小,可以求得卡尔曼增益矩阵为:

$$K_k = \frac{P_{k+1}^- C_{k+1}^T}{C_{k+1} P_{k+1}^- C_{k+1}^T + R_{k+1}}$$

R_{k+1} 为测量噪声的协方差。则全维观测方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ \dot{\Delta p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u + K(\Delta y - \Delta \hat{y})$$

$$\Delta \hat{y} = [C \ M] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta p \end{bmatrix} + D\Delta u$$

此时,通过将燃气轮机部件的健康参数增广为状态参数,扩展的卡尔曼滤波器就可以根据观测参数与正常参数的偏差来估计状态参数偏差,得到燃气轮机健康参数的估计结果,实现燃气轮机的热力故障诊断,其系统流程框架如图 4 所示。

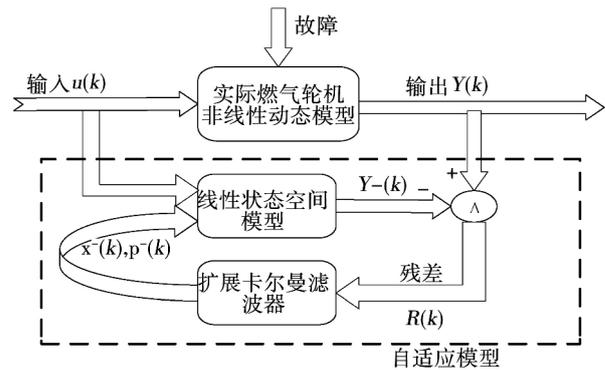


图 4 基于扩展卡尔曼滤波器的燃气轮机故障诊断系统框架

Fig. 4 The gas turbine fault diagnosis system framework based on EKF

5 分轴燃气轮机性能参数估计与故障诊断

在额定工况设计点条件下对所建的燃气轮机自适应模型进行验证,实际燃气轮机用燃气轮机非线性模型来代替。首先,仿真压气机效率下降故障,在仿真进行到 3 000 s 时压气机效率突然下降 5%,此时卡尔曼滤波器对于 6 个部件健康参数的估计如图 5 所示。

类似地,依次仿真压气机流量下降、高压涡轮效率下降、高压涡轮流量下降、动力涡轮效率下降以及动力涡轮流量下降等典型热力故障。

为了能够定量反映扩展卡尔曼滤波突变故障下对 6 个健康参数估计的准确程度,选取健康参数估计值与实际值偏差的均方差来进行衡量,如表 3 所示。

从表中可知,扩展卡尔曼滤波器对于燃气轮机突变型热力故障下健康参数的估计已经非常准确,估

计均方差都非常小,并且对压气机效率 EC 、压气机流量 GC 以及高压涡轮流量 GT 的估计误差相对其它健康参数的估计误差最小,而且在故障发生时能非常及时得跟踪到健康参数的变化。

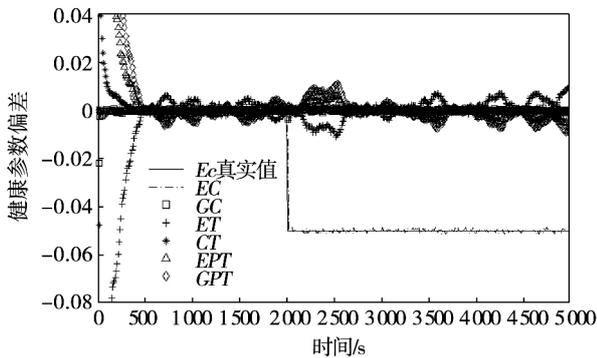


图5 压气机效率突降5%时 EKF 对压气机效率突变故障的状态估计

Fig.5 State estimations of compressor efficiency abrupt faults from EKF when the compressor efficiency goes a sudden drop of 5%

表3 EKF 对突变故障健康参数状态估计的均方差

Tab.3 The mean square error of abrupt faults health parameters of state estimations from EKF

健康参数	EKF 估计的均方差
EC	$2.65E-5$
GC	$1.96E-5$
ET	$1.34E-4$
GT	$4.58E-5$
EPT	$8.40E-5$
GPT	$1.79E-4$

多数情况下燃气轮机主要部件发生热力故障过程都是缓慢的,部件性能是逐渐降低的,所以有必要验证在燃气轮机部件健康参数缓慢变化的情况下,卡尔曼滤波器能否准确及时地估计出系统的状态。图6是在压气机效率健康参数在2000s时由于部件发生渐变故障导致逐渐降低的过程。

同突变故障处理方法类似,对渐变故障下 EKF 对于燃气轮机健康参数的估计误差均方差进行统计,如表4所示。

可以看出,EKF 对燃气轮机渐变故障下部件健康参数的估计值都非常准确,并且与突变故障相比,健康参数的估计误差更小,估计值更准确,对健康参数的变化跟踪也更及时。也可以说 EKF 更适用于燃气轮机渐变故障的状态估计。

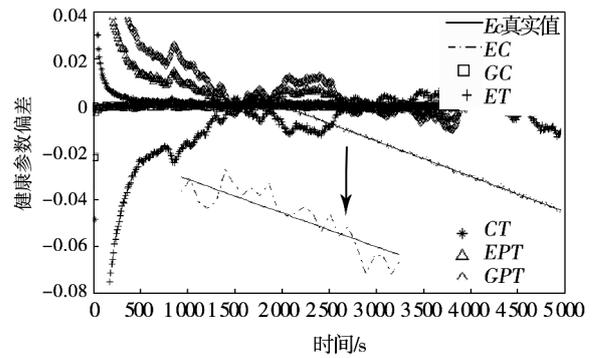


图6 压气机效率逐渐下降至5%时 EKF 对压气机效率渐变故障的状态估计

Fig.6 State estimations of compressor efficiency gradual faults from EKF when the compressor efficiency goes a sudden drop of 5%

表4 EKF 对渐变故障健康参数状态估计的均方差

Tab.4 The mean square error of gradual faults health parameters of state estimations from EKF

健康参数	EKF 估计的均方差
EC	$2.65E-5$
GC	$1.96E-5$
ET	$1.34E-4$
GT	$4.58E-5$
EPT	$8.40E-5$
GPT	$1.79E-4$

6 结 论

首先根据分轴燃气轮机非线性模型建立的 SSM 模型,并分析了燃气轮机主要部件典型热力故障,进而设计了包含燃气轮机部件健康参数的扩展卡尔曼滤波器;然后利用扩展卡尔曼滤波器分别对燃气轮机常见的突变和渐变型热力故障时性能参数进行状态估计,通过对估计结果与实际值误差的分析得到:

(1) 扩展卡尔曼滤波器对突变和渐变型热力故障部件健康参数都能够实现较为准确的估计,能及时跟踪健康参数的实际值,且估计误差都非常小,因而适用于分轴燃气轮机健康参数估计和热力系统故障诊断;

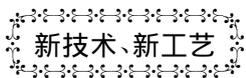
(2) 扩展卡尔曼滤波器对渐变故障时的健康参数估计值与实际值误差的均方差相比突变故障来说更小,并且估计的延迟更小,可见 EKF 对渐变故障

健康参数估计相对更加准确,并且对渐变故障健康参数的跟踪更为及时。

参考文献:

- [1] Li Y G. Gas turbine performance and health status estimation using adaptive gas path analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 2010, 132(4): 041701.
- [2] Poullikkas A. An overview of current and future sustainable gas turbine technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2005, 9(5): 409-443.
- [3] 罗颖锋, 曾进. 基于支持向量机的燃气轮机故障诊断[J]. 热能动力工程 2004, 19(4): 354-357.
LUO Ying-feng, ZENG Jin. Gas Turbine Fault Diagnosis Based on a Support Vector Machine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2004, 19(4): 354-357.
- [4] 衣爽, 徐志强, 杨正薇 等. 基于自组织网络的燃气轮机燃料系统的故障诊断研究[J]. 热能动力工程 2014, 29(3): 237-241.
YI Shuang, XU Zhi-qiang, YANG Zheng-wei. Study of the Fault Diagnosis of a Gas Turbine Fuel System Based on a Self-organized Network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2004, 29(3): 238-241.
- [5] 刘志仓. 基于粒子滤波的非线性系统故障诊断与预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学 2013.
LIU Zhi-cang. Research on Fault Diagnosis and Prediction in Non-linear System Based on Partical Filter[D]. Xidian University 2013.
- [6] LM2500 船用燃气轮机技术手册. 中国人民解放军海军装备技术部舰艇部. 内部资料, 1984.
- The Technical Manuals of LM2500 Marine Gas Turbine. Ship Technology Department of Navy Equipment Department of PLA. Insider Content, 1984.
- [7] 李凯. 燃气轮机故障机理及诊断方法的研究[D]. 北京: 清华大学 2006.
LI Kai. Research of Gas Turbine Fault Mechanism and Diagnosis Methods[D]. Tsinghua University 2006.
- [8] 黄伟斌, 黄金泉. 航空发动机故障诊断的机载自适应模型[J]. 航空动力学报 2008, 23(3): 580-584.
HUANG Wei-bin, HUANG Jin-quan. On board self-tuning model for aero-engine fault diagnostics[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 580-584.
- [9] 陆军, 郭迎清, 陈小磊. 线性拟合法建立航空发动机状态变量模型[J]. 航空动力学报 2011, 26(5): 1172-1177.
LU Jun, GUO Ying-qing, CHEN Xiao-lei. Establishment of aero-engine state variable model based on linear fitting method[J]. Journal of Aerospace Power 2011, 26(5): 1172-1177.
- [10] 于美玲, 刘永文. 基于非线性模型的燃气轮机热参数故障诊断及仿真[J]. 热能动力工程 2012, 26(6): 651-654.
YU Mei-ling, LIU Yong-wen. Thermal Parameter Fault Diagnosis and Simulation of a Gas Turbine Based on a Non-linear Model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2012, 26(6): 651-654.
- [11] 蒲星星. 基于模型的重型燃气轮机气路故障诊断研究[D]. 北京: 清华大学 2013.
PU Xing-xing. Model-based Gas Path Diagnostics for Heavy-duty Gas Turbine[D]. Tsinghua University 2013.

(丛敏 编辑)



新技术、新工艺

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.014

提高供热和供电系统动力效率的方向

《Электрические станции》2013年4月刊报道 根据供热和供电系统动力调查,举例分析了某些动力保护措施。

结论如下:

(1) 用于改进热能和电能生产源的有意义的措施是:

将可调频的电力传动装置用于变负荷条件下工作的泵和鼓风机。

(2) 在改造热能分配系统时,首先必须确定哪些是没有根据地被连接到集中供热系统的耗能设备,它们是在资金投入系统中,待其它部分更新改造后才应用的设备。

(3) 实施这些建议是企业进行的调查研究的结果,它使能量消耗减少20% - 30%左右。

(吉桂明 摘译)

under the condition of vibration and analyzed was the influence of such vibration parameters as various amplitudes , frequencies and vibration intensities on the heat transfer performance. Within the calculation range ,the vibration of the wall surfaces can intensify the heat exchange and can enhance the Nu number by 2.4% at the most outside. In addition ,the intensification effectiveness of the Nu number will increase with an increase of the amplitude. It has been found that the vibration of the wall surfaces can contribute to enhancing the heat exchange and the reason to enhance the heat exchange lies in the improvement of the synergetic degree between the speed field and the temperature gradient field and in a vibration period ,there exists an optimum phase angle corresponding to the field synergy number Fc_1 . When the amplitude of vibration on the wall surfaces is constant ,the optimum phase angle will somewhat lag behind with an increase of the vibration amplitude. When the vibration frequency is constant ,the optimum phase angle will be stabilized at around 315 degrees. **Key words:** vibration ,intensified heat exchange ,field synergy ,dynamic grid

基于扩展卡尔曼滤波的燃气轮机性能参数估计与故障诊断 = Prediction of the Performance Parameters of a Gas Turbine and Diagnosis of Its Faults Based on the Extended Kalman Wave Filtration [刊 ,汉] KANG Wei-guo ,JIANG Dong-xiang (National Key Laboratory on Electric Power System and Power Generation Equipment Control and Simulation ,Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -702 -707

The extended Kalman wave filtration method was applied in the domain of predicting the performance parameters and states of a gas turbine and diagnosing its thermal faults. According to a real gas turbine ,a model for nonlinear thermal systems was established and based on the data calculated by using the model ,a linear state and space model for gas turbines including the healthy parameters of such components as the compressor ,HP turbine and power turbine of a gas turbine. On this basis ,an extended Kalman filter was designed. By utilizing the extended Kalman filter thus designed ,the healthy parameters of the components relating to six typical thermal faults of a gas turbine in sudden change and gradual change type respectively were estimated to realize an accurate estimation and diagnosis of the thermal faults of the split-shaft gas turbine. It has been found that to use the extended Kalman filter to predict the state of the performance parameters of the split-shaft gas turbine is very appropriate and accurate ,applicable for real-time state monitoring and fault diagnosis of split-shaft gas turbines. To this end ,the track of the faults triggered by gradual changes of the performance parameters is on time and the diagnosis is more accurate. **Key words:** split-

shaft gas turbine , extended Kalman wave filtration , performance parameter , state estimation , diagnosis of thermal faults

3 种新型煤层气集输系统增压驱动方案 = **Three Supercharging and Driving Versions for Novel Type Coal Bed Centralized Transmission Systems** [刊 汉] ZHAO Hong-bin , JIANG Ting , YANG Qian (College of Mechanical Storage and Transportation Engineering , China University of Petroleum (Beijing) , Beijing , China , Post Code: 102249) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5) . - 708 - 714

Under the coal bed gas production conditions in Qin-shui basin , three coal bed gas supercharging process system versions for recuperative type gas turbine cycle , solar energy aided gas-steam combined cycle , gas-Kalina combined cycle driving system were designed and the gas turbine waste heat utilization technologies were applied in the supercharging and driving of gas in gas transmission pipelines. Based on the total energy system theory and energy staged utilization principles , a model for the three supercharging systems was established by using the software Aspen Plus and an analysis was also performed of the thermal performance and energy saving potential of various systems. The analytic results show that the power generation efficiencies of the three versions are 60. 42% , 66. 51% and 65. 73% respectively , the costs saved each year are RMB 2. 3983 million yuan , RMB 2. 7254 million yuan and 2. 6858 million yuan respectively , the static investment payback periods are 4. 19 years , 4. 29 years and 4. 80 years respectively and the carbon dioxide emissions reduced are 3806. 06 t/a , 4462 t/a and 4382. 60 t/a , respectively thus enjoying a relatively good energy saving potential. **Key words:** driving by using gas turbines , waste heat utilization technology , Aspen Plus , static investment payback period

双旋流燃油燃烧火焰结构可视化试验研究 = **Experimental Study of the Visualization of the Flame Configuration During the Combustion of Fuel Oil in a Dual Swirling Flow** [刊 汉] YUAN Yong-wen , GE Bing , TIAN Yin-shen , ZANG Shu-sheng (Turbomachinery Research Institute , College of Mechanical and Power Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5) . - 715 - 719

The plane laser induced fluorescence (PLIF) technology was used to conduct an experimental study of the visualization of the flame during the combustion of fuel oil in a dual swirling flow at various gas/air equivalent ratios.