

关于重型燃气轮机预测诊断与健康管理的综述

蒋东翔, 刘超, 杨文广, 康维国

(清华大学热能工程系燃气轮机研究所, 北京 100084)

摘要: 针对重型燃气轮机 PHM(预测诊断和健康管理)的研究进展进行了综述, 分析了 PHM 系统的结构组成和主要功能, 论述了远程监测与诊断系统的框架与应用现状, 分析了重型燃气轮机 PHM 的发展趋势。运用 PHM 系统能够更好地保障预测和管理的实施效果, 可有效提高重型燃气轮机的可靠性和运行维护的智能化水平。

关键词: 燃气轮机; 预测诊断; 健康管理; 人工智能; 远程监测与诊断系统

中图分类号: TK47 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.02.001

引言

根据用途, 燃气轮机分为航空发动机、舰船燃气轮机、工业燃气轮机、重型燃气轮机、小型燃气轮机和微型燃气轮机等^[1]。重型燃气轮机主要采用天然气或燃油作为燃料, 广泛用于电站, 据统计全球天然气和燃油发电量占总发电量的五分之一, 是继煤电和核电之后当今世界第三大发电方式, 重型燃气轮机将是 21 世纪乃至更长时期内能源高效转换与洁净利用系统的核心动力设备^[2]。

电站燃气轮机的巨大需求带动了重型燃气轮机的快速发展, 据估计在未来十年内发电用重型燃气轮机机组将新增 12 591 台, 制造成本超过 1 529 亿美元^[3]。目前, 重型燃气轮机的主要制造厂商包括 GE、Siemens、Mitsubishi、Alstom、Solar 等, 据预计, 在未来十年内, GE 将处于领先地位, 所占市场份额超过 44% (以 2012 年的成本核算); 按燃气轮机数量比较, Solar 最多, 占 32.31%^[3]。不同制造厂商的市场份额如图 1 所示。燃气轮机快速发展的同时, 燃气轮机维修成本也在不断增加。据报道, 2009 年全

球工业燃气轮机运行和维修成本超过 180 亿美元, 且在快速增长^[4]。在 F 级燃气轮机电站全寿命周期的成本中, 运行和维修费用占 15% - 20%, 其中维修费用占总成本的 10% - 15%, 且随着技术的进步, 基建和燃料成本所占的比例逐渐下降, 运行维修费用所占比例逐渐上升, 如图 2 所示^[5-6]。在燃气轮机电站设备中, 燃气轮机透平、压气机、燃烧室三大部件的故障率高, 三大部件和控制系统是重型燃气轮机最易发生故障的部件^[7-8]。

目前, 世界主要的燃气轮机制造厂商都在研发下一代燃气轮机 (G 级、H 级), 其压比和燃气初温更高, 单机功率更大。同时, 重型燃气轮机工作环境复杂、运行工况多变, 高参数、复杂环境和频繁变工况增加了失效风险。为此, 随着重型燃气轮机的发展对可靠性的要求越来越高。

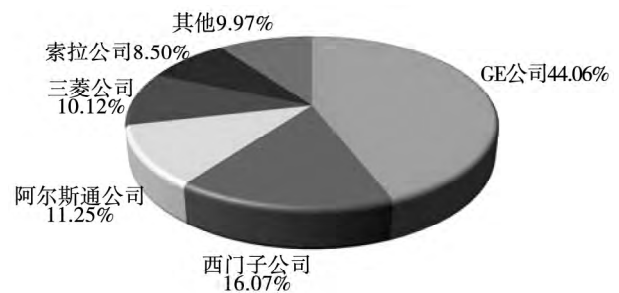


图 1 未来燃气轮机市场份额 (2013 年 - 2021 年)^[3]

Fig. 1 Market share of the heavy-duty gas turbines in the near future (2013 - 2021)^[3]

为保障燃气轮机安全可靠运行, PHM(预测诊断和健康管理)近年来受到广泛重视。PHM 是在状态监测和故障诊断技术基础上的进一步发展, 是对

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-08-25

作者简介: 蒋东翔 (1963-) 河北盐山人, 清华大学教授, 博士生导师。

维修策略的深刻变革。在重型燃气轮机领域,PHM的发展也经历了从状态监测、故障诊断、性能评价到预测诊断和健康管理的发展过程,本文就该领域进行综述,以期整理重型燃气轮机 PHM 的发展现状,展望今后的发展趋势。由于结构和原理的相似性,本文也包括了少量应用在航空发动机、舰船燃气轮机和工业燃气轮机中的 PHM 方法。

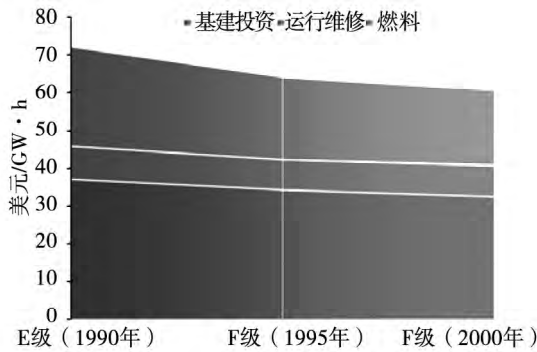


图2 重型燃气轮电站的成本构成^[5]
Fig.2 Composition of the cost of a heavy-duty gas turbine-based power plant^[5]

1 重型燃气轮机预测诊断与健康管理

1.1 燃气轮机维修策略的变革

燃气轮机的可靠性和可用性一直是燃气轮机发展的重要方面。早在20世纪七十年代,燃气轮机状态监测系统就开始用于重型燃气轮机的运行数据记录和故障分析^[9]。状态监测和故障诊断方法早期多应用于燃气轮机热力系统,用来监测热力系统性能参数。热力参数一方面用于性能评估,另一方面热力参数的变化可作为判断性能退化的依据^[10-11]。随后,振动监测、油液监测等技术逐渐应用到燃气轮机中。

状态监测和故障诊断技术的发展推动了维修策略的变革。传统的定期维修策略根据部件失效的周期,按照固定时间间隔维修。定期维修时有的部件仍有一定的剩余寿命,造成浪费;有的部件可能在定期维修前就失效,带来设备非正常停机的风险。为此,基于状态的维修策略近年来逐渐应用到不同的设备中,状态维修实时评估设备健康状态以做出合理的维修决策,提高设备的可靠性和可用性,同时最大限度地延长使用寿命,降低运行维护成本。

实施状态维修的关键是对设备运行状态的准确评估,预测诊断和健康管理在其中起着重要作用。预测诊断与健康管理集成已有的状态监测与故障诊断技术,并通过故障预测诊断分析设备退化趋势,根据预测结果进行优化控制和维修决策,实现对设备健康状态的主动管理。

1.2 预测诊断与健康管理系统的框架

Y. Wang 等人提出了采用条件式结构的状态维修框架,如图3所示^[12]。条件式结构路线清晰,易于执行,不利之处在于层次之间相互联系,后一层次需要由前一层次触发执行^[13]。例如,只有在设备监测到异常时才执行预测诊断,增加了系统执行的等待时间,不易于系统的快速响应和对设备健康状态的实时预测。

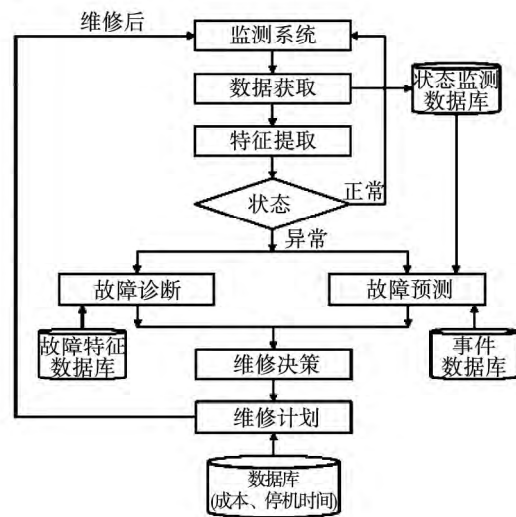


图3 采用条件式结构的状态维修框架^[12]
Fig.3 Condition-based maintenance(CBM) framework if a conditional type structure is adopted^[12]

基于标准 ISO 13374 - 2 - 2007 中状态监测系统的框架^[14],H. Kenneth 等人采用了模块式结构,如图4所示^[15]。该框架包括传感器、数据采集、数据处理、状态识别、健康评估、预测诊断、决策制定7个模块,各个模块相对独立、依次执行,同时各个模块之间的信息相互传递。其中状态识别模块基于监测数据对设备状态进行识别,包括故障识别;健康评估模块基于状态识别结果进行故障诊断,包含了各种故障诊断方法。

完整的PHM(预测诊断与健康管理)系统应包括状态监测、故障诊断、预测诊断、优化控制和维修

决策 4 个主要功能模块 辅助功能模块包括传感器配置与信号采集、数据处理与特征提取、数据库与知识库管理、人机交互接口及控制系统接口等 其框架如图 5 所示。布置在燃气轮机热力系统、转子系统、滑油系统等部位的传感器测量信号经由信号采集系统输入到状态监测系统,进行燃气轮机运行状态的识别;故障诊断基于状态监测系统的特征参数 根据已建立的规则对故障进行诊断;故障预测诊断基于特征参数的变化趋势,预测故障演化趋势和剩余使用寿命。故障诊断和预测诊断结果反馈到燃气轮机,用于优化控制和维修决策。

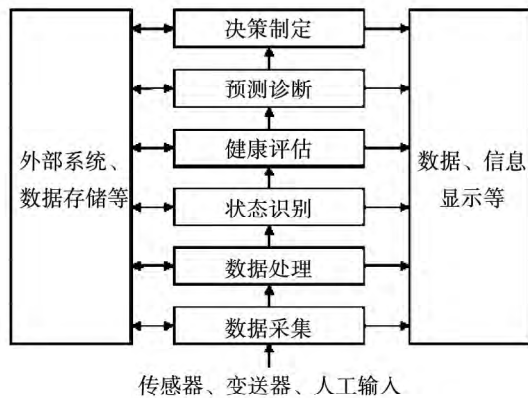


图 4 采用模块结构的状态维修框架^[15]

Fig. 4 Condition-based maintenance(CBM) framework if a modular structure is adopted^[15]

传统的状态监测是被动的行为,而预测诊断和健康管理已转变为主动的策略,将基于运行状态的健康管理与控制和维修决策结合起来,形成闭环的系统。

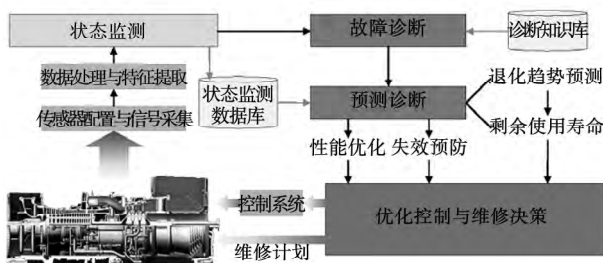


图 5 PHM 系统功能性框架

Fig. 5 Functional framework of a gas turbine prediction, diagnosis and health management(PHM) system

1.3 燃气轮机状态监测

1.3.1 主要监测参数

热力系统监测主要针对燃气轮机热力系统的温度、压力、流量等参数。西门子公司的 V94.3A 燃气轮机热力系统监测参数包括压气机进口温度、进口压力、进口导叶角度、出口温度、出口压力、出口转速、透平排气温度和输出功,燃烧室燃料流量和燃烧室压降^[16]。

燃气轮机常规的振动监测主要包括径向轴承 X 和 Y 方向振动、止推轴承轴向位移、转子转速。燃气轮机气缸振动及转子偏心量在某些场合下需要监测^[17]。美国石油组织(American Petroleum Institute , API) 出版了燃气轮机振动参数监测标准 API616,对振动监测参数进行了约定^[18]。

燃气轮机压气机和透平叶片处于复杂的工作环境中,受到各种扰动易引起疲劳,失效比例较高^[19-20]。叶尖计时法可非接触地测量叶片振动,该方法只需在气缸上安装传感器,对叶片及流场的影响小,可测量整级叶片的振动和变形情况^[21],也可同时测量叶顶间隙和叶片振动^[22]。

引起燃气轮机滑油系统性能退化的因素主要有氧化、热降解、污染(粉尘、金属碎屑) 和额外损耗^[23]。滑油系统的监测参数主要有油压、油温、品质等。对油液碎屑的监测近年来受到重视^[24]。碎屑监测一方面可以反映滑油系统的性能,另一方面可以用于部件磨损故障的监测,如齿轮、轴承等。

为达到最优燃烧效率和低 NO_x 排放,需对燃气轮机燃烧状态进行实时监测,监测参数包括燃烧室燃料流量和燃烧室压降。西门子 V84.3A 燃气轮机使用压力传感器监测燃烧室入口处波动压力,用于分析燃烧稳定性、效率和排放^[25]。近年来,激光技术在监测中受到广泛重视。激光技术能够应用于高温环境,同时对流场无扰动,测量方便、响应速度快^[26]。

1.3.2 燃气轮机状态监测系统

各个重型燃气轮机制造厂商都配备了状态监测系统,有的状态监测系统和控制系统集成,如 GE 的 MARK 系列热力参数监控系统,有的则单独运行,如 Bentley 的 SYSTEM1 系统。

基于燃气轮机变工况的特点,分析监测参数随载荷动态变化的基准值对于状态监测十分重要^[27]。目前,燃气轮机状态监测系统的功能集中在状态监测和在线分析,故障诊断、趋势分析、寿命管理等功

能逐渐集成到状态监测系统中。

1.4 故障诊断与预测诊断

燃气轮机的故障诊断依据对象可分为热力系统故障诊断、振动故障诊断、滑油系统故障诊断等,其中热力系统故障诊断的研究较多^[28-29];振动故障诊断方面,由于重型燃气轮机多采用单转子拉杆结构,拉杆转子的故障特性是重型燃气轮机转子系统区别于一般转子系统的特点^[30],接触作用是影响转子系统故障特性的重要方面^[31]。

相对于故障诊断,预测诊断的研究较少。预测诊断能够在故障发生早期预测故障发展趋势,有助于及早发现故障,避免严重故障的发生。退化趋势预测和剩余使用寿命预测是故障预测诊断的主要内容。

退化趋势预测根据历史数据的变化预测参数变化趋势和故障演化过程。参数趋势预测采用神经网络、模糊数学等方法建模,预测监测参数的发展趋势。异常预测考虑设备偏离正常状态时,根据状态监测参数的变化趋势进行异常识别,采用的方法有符号动力学、信息理论、神经网络等^[32-33]。

故障演化预测基于状态评估预测状态的变化趋势和故障的演化过程^[34]。对于热力系统故障演化过程,效率的变化常被用作预测诊断的依据^[35-36]。利用监测参数构成的状态空间,分析设备在状态空间内的演化过程,可用于演化故障的预测^[37]。

RUL(剩余使用寿命)预测根据设备工作载荷和运行数据分析部件的寿命损耗过程,预测剩余使用寿命,分为基于模型和基于数据的剩余寿命预测。基于模型的剩余寿命预测通过建立部件的物理模型,分析工作载荷引起的寿命损耗,预测剩余使用寿命。物理模型的建立或采用有限元法^[38],或采用简化公式^[39]。由于疲劳等失效过程的不确定性较大,应用贝叶斯理论等方法进行预测过程的评估逐渐受到重视^[40]。基于数据的剩余寿命预测根据设备运行数据,应用统计方法分析失效时间,用于预测剩余使用寿命^[41],所采用的方法包括状态空间模型、统计分布模型等^[42-43]。

2 燃气轮机远程智能监测与诊断系统

将远程技术应用到预测诊断与健康管理系统中,能够整合优质资源,最大化地保障燃气轮机的安全运行。远程监测与健康管理系统概念性框架如

图6所示。在燃气轮机现场进行数据采集、数据处理、特征提取、数据压缩等,通过因特网连接、卫星通讯等将数据传输到远程中心,远程中心基于接收的数据和故障特征数据库、历史数据库、专家知识库等进行状态识别、健康评估、故障诊断和预测诊断,对设备运行给出建议,反馈到燃气轮机运行现场。

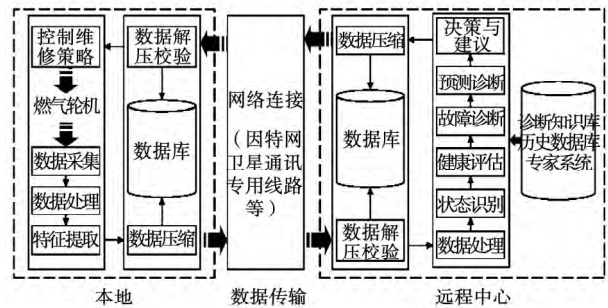


图6 远程监测与健康管理的概念性框架

Fig. 6 Conceptual framework of a remote monitoring and health management system

重型燃气轮机的主要制造厂商均在产品中应用了远程监测与诊断技术。西门子公司通过建立STARMS平台,将燃气轮机运行数据实时传输到远程诊断中心,提供远程诊断服务,该系统包括5个层次:(1)现场数据采集;(2)数据转换与远程传输;(3)数据存储(采集现场存储和远端存储);(4)数据处理与显示;(5)数据接口与客户信息服务^[44-45]。西门子公司远程监测与诊断系统架构如图7所示^[46]。

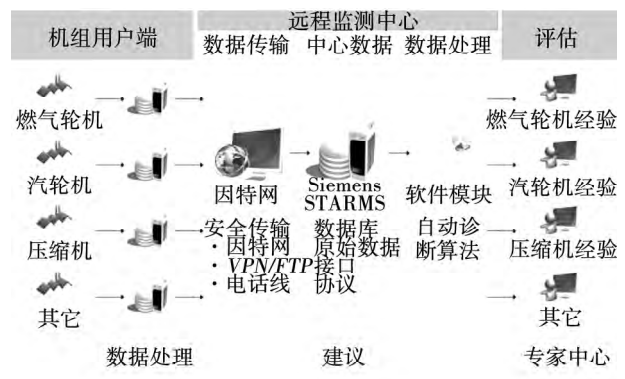


图7 西门子公司远程监测与诊断系统的架构^[46]

Fig. 7 Framework of a Siemens-developed remote monitoring and diagnosis system^[46]

GE公司将远程监测与诊断服务集成到iCenter平台中,对燃气轮机进行实时监测,基于诊断规则判

断失效风险较高的部件,分析燃气轮机运行状态进行优化控制以达到最佳效率和最大功率输出,并提供故障解决方案和决策建议^[47]。三菱公司搭建了远程监测与维修支持系统,分别在日本高砂和美国奥兰多建立了远程监测中心,为燃气轮机提供实时监测、异常诊断、失效原因分析等服务^[48]。

3 重型燃气轮机预测诊断与健康管理发展趋势

预测诊断与健康管理的能够对燃气轮机的运行状态进行实时评估,制定优化控制与维修方案,实现燃气轮机的状态维修,最大化地保障燃气轮机的可靠、稳定运行,降低运行和维护成本。为此,预测诊断与健康管理在燃气轮机未来发展中占有重要地位。

3.1 智能传感器技术与状态监测系统

PHM 实现的基础是传感器技术,当前传感器技术的发展趋势体现在:(1) 耐高温传感器;(2) 与微机电系统集成的智能传感器;(3) 适应新的测量需求的传感器^[49]。传感器技术的发展,一方面将提供更多的测量参数以丰富 PHM 的信息资源,另一方面能够有效降低测量系统成本,这对 PHM 成本控制十分重要^[50]。

状态监测系统是预测诊断与健康管理的承载者和表达者,PHM 的功能通过状态监测系统显示,控制策略的效果通过状态监测系统反馈。阈值及报警值设定是状态监测系统的重要参数。燃气轮机运行工况发生变化时,报警值需要随运行状态的变化而改变。随着设备的运行,发生部件退化或失效后更换等情况时,报警值也需要重新设置。人工设定报警值是当前常采用的方法,但效率低、成本高^[51]。为此,采用智能化技术设定动态报警值,对于提高状态监测准确性、减少误报警和降低虚警率具有重要意义。

3.2 预测诊断的不确定性

基于模型和基于数据的故障预测诊断方法均存在不确定性问题。由于燃气轮机设备的复杂性,基于模型的预测诊断方法难以建立准确的物理模型,同时,部件的失效过程(如疲劳累积、裂纹扩展、磨损等)也存在较大的不确定性。基于数据的预测诊断方法受到数据不完备性、数据准确性等因素的制约,预测结果存在不确定性。应用贝叶斯理论评价预测诊断不确定性,再通过模型更新提高预测诊断

的准确性受到越来越多的关注^[40, 52]。预测诊断的不确定性直接影响到预测结果的可信性,影响控制和维修策略的制定^[53]。为此,管理预测诊断的不确定性、提高预测结果的可靠性将是下一步研究的重点。

3.3 PHM 与优化控制

基于运行状态,PHM 系统提出优化控制建议,反馈到控制系统,实现对燃气轮机的闭环控制,有利于获得最佳控制效果。延寿控制技术就是基于实时监测参数,充分考虑燃气轮机性能指标、寿命指标而进行的多目标优化控制。例如 GE 的 MARK VIe 系统中通过温度匹配功能,在联合循环机组启动时调节燃气轮机排气温度来降低后端汽轮机的寿命损耗^[54]。进一步开放控制系统接口,根据 PHM 给出的控制策略对燃气轮机进行优化控制是今后的发展方向。

3.4 PHM 与运行成本控制

PHM 的发展正在引起燃气轮机维修策略的改变,定期维修将逐渐被状态维修所替代,这有利于提高设备的可用性,防止部件失效引起的非正常停机,降低运行和维修成本。同时,成本控制在 PHM 的实施中也起着重要作用,投入产出比是新的测量技术、健康管理系统能否实际应用的重要指标^[9]。成本控制一方面依靠技术的进步,另一方面需要建立完善的管理体系。

3.5 远程智能监测与健康管理的

远程技术的应用有助于资源协调和优化配置,使得燃气轮机控制和维修决策达到最优化。结合远程技术,预测诊断与健康管理系统架构的设计和实现需要进一步研究^[13]。在现有状态监测系统、状态检修、健康管理的系统架构基础上,整合资源,构建预测诊断与健康管理系统,突出预测诊断与健康管理系统在燃气轮机优化控制、寿命管理、失效预防等方面的作用,建立燃气轮机健康管理及优化控制的闭环系统,最大化保障燃气轮机运行可靠性、可用性和经济性是今后的发展趋势。

3.6 信息融合在 PHM 中的应用

PHM 系统信息来源多,不同信息的表现形式有所差别,对于燃气轮机健康评估的影响也不一样。为整合信息资源、优化决策,信息融合技术正越来越多地应用到燃气轮机 PHM 系统中。根据信息融合的不同层次,信息融合技术分为传感器信息融合、特征信息融合、决策信息融合。选择合适的信息融合层次和融合方法需要根据不同的应用需求和故障特

点 将是信息融合方法的发展趋势,也将影响控制策略与维修决策的制定^[55-56]。

基于多源信息的决策需考虑信息来源及模型的不确定性,如传感器测量误差、疲劳评估模型的不确定性、统计方法的分散性等。上述情况下的控制与维修决策具有大数据分析的典型特征,应用大数据分析方法进行控制与维修的优化决策将受到更多关注。

4 结 论

燃气轮机运行维护成本的控制是燃气轮机发展的重要方面,预测诊断和健康管理因其对控制和维修策略的优化而受到越来越多的关注。本文综述了当前重型燃气轮机预测诊断和健康管理的发展现状,分析了远程监测与诊断系统的架构和功能。

利用预测诊断和健康管理技术,实时监测和评估重型燃气轮机运行状态、动态调整控制策略、制定合理的状态检修方案,实现对重型燃气轮机运行效率、性能、经济性、可靠性和可用性的协同管理,提高燃气轮机运行维护的智能化水平,将是重型燃气轮机未来的发展趋势。

预测诊断与健康管理(PHM)已深刻融入到燃气轮机的整个生命周期,在研发阶段充分考虑预测诊断与健康管理的功能设计,能够更好地保障预测诊断与健康管理的实施效果,有效提高重型燃气轮机的可靠性。这对于我国正在进行的燃气轮机自主研发工作具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Boyce M P. Gas turbine engineering handbook[M]. Elsevier 2012.
- [2] 蒋洪德. 重型燃气轮机的现状和发展趋势[J]. 热力透平, 2012, 41(2): 83-88.
JIANG Hong-de. Status quo and development tendency of heavy-duty gas turbines[J]. Thermal Turbine 2012, 41(2): 83-88.
- [3] Goncharov V V. The forecast of the development of the market for gas turbine equipment in the years 2013-2021 (review) [J]. Thermal Engineering 609: 676-678.
- [4] <http://www.power-eng.com/articles/2010/02/industrial-gas-turbine.html>.
- [5] Diallo O, Mavris D. A Data Analytics Approach to Failure Precursor Detection of Gas Turbine[C]. ASME Turbo Expo, Vancouver, Canada 2011, GT2011-46019.
- [6] Stoll H G. Creating owner's competitive advantage through contractual services[C]. GE Power Systems 2001.
- [7] Balevic D, Burger R, Forry D. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations[C] 2004.
- [8] Balevic D, Hartman S, Youmans R. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations[C]. GER-3620L. 1.
- [9] Volponi A J. Gas Turbine Engine Health Management: Past, Present, and Future Trends [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 1365): 051201.
- [10] Urban L A. Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Conditioning Monitoring[J]. J. Aircraft, 1972, 10(7): 400406.
- [11] 黄晓光,王永泓,翁史烈. 基于 BP 算法的电站燃气轮机故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 72-74.
HUANG Xiao-guang, WANG Yong-hong, WENG Shi-lie. Power plant gas turbine fault diagnosis base on the BP algorithm [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2000, 20(12): 72-74.
- [12] Wang Y, Qiao J Y, Ma L. Framework Construction of Condition Based Maintenance [J]. Applied Mechanics and Materials, 34-35, 1195-1199.
- [13] Kunche S, Chen C C, Pecht M. A review of PHM system's architectural frameworks[C]. The 54th Meeting of the Society for MFPT, Dayton, US 2012.
- [14] ISO. Condition Monitoring. Diagnostics of Machines—Data Processing. Communication and Presentation—Part 2: 13374-2 [S] 2007.
- [15] Holmberg, Kenneth, Adam Adgar, Aitor Arnaiz, Erkki Jantunen, Julien Mascolo, Samir Mekid. E-maintenance [M]. Springer 2010.
- [16] DellaGatta Stefania, Paolo Adami. Fault detection and identification by gas path analysis approach in heavy duty gas turbine[C]. ASME Turbo Expo, Barcelona, Spain 2006, GT2006-90408.
- [17] Gas Turbine Vibration Monitoring—An Overview GE Measurement & Control.
- [18] Standard, A. P. I. 616, 1998. Gas Turbines for the Petroleum, Chemical and Gas Industry [S]. American Petroleum Institute, Fourth Edition, Washington, DC: 1-100.
- [19] Barella S, Boniardi M, Cincera S, et al. Failure analysis of a third stage gas turbine blade [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 386-393.
- [20] 李桂英, 闻雪友, 李东明, 等. 燃气轮机带冠涡轮动叶故障分析及改进[J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 28-31.
LI Gui-ying, WEN Xue-you, LI Dong-ming, et al. Fault analysis and improvement of the shrouded rotating blades of a gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 28-31.
- [21] Chana K S, Cardwell D N. The use of eddy current sensor based blade tip timing for FOD detection [C]. ASME Turbo Expo, Berlin, Germany 2008, GT2008-50791.
- [22] Lawson C, Ivey P. Compressor blade tip timing using capacitance tip clearance probes [C]. ASME Turbo Expo, Atlanta, US 2003, GT2003-38284.
- [23] Turbine Oil Condition Monitoring Training Guide, <http://www.mobilindustrial.com/ind/english/files/tt-turbine-oil-condition-monitoring-training-guide.pdf>.
- [24] Wilson, B W, Hansen N H, Shepard C L, et al. Development of a Modular In-Situ Oil Analysis Prognostic System [C]. SOLE '99 Symposium, Las Vegas, US, 1999.
- [25] Hoffmann S, Weber G, Judith H, et al. Application of active combustion control to siemens heavy duty gas turbines [C]. RTO AVT

- symposium on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels. Lisbon, Portugal, 1998.
- [26] Ma L, Cai W, Caswell A W, et al. Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy [J]. *Optics express* 17(10): 8602–8613.
- [27] Loboda I, Feldshteyn Y. Polynomials and neural networks for gas turbine monitoring: a comparative study [C]. *ASME Turbo Expo*, Glasgow, UK, 2010, GT2010–23749.
- [28] Kamboukos Ph, Mathioudakis K. Comparison of linear and non-linear gas turbine performance diagnostics [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 127: 49–56.
- [29] 李凯. 燃气轮机故障机理及诊断方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
LI Kai. Study of the mechanism governing the faults of gas turbines and the method for diagnosing such faults [D]. Beijing, Tsinghua University, 2006.
- [30] 唐治平. 拉杆转子振动特性与故障模拟分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
TANG Zhi-ping. Analysis of the vibration characteristics of a tie-rod rotor and its fault simulation [D]. Wuhan, Central China University of Science and Technology, 2007.
- [31] 高进, 袁奇, 李浦, 等. 燃气轮机拉杆转子考虑接触效应的扭转振动模态分析 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(12): 9–13.
GAO Jin, YUAN Qi, LI Pu, et al. Analysis of the modal of the torsion vibration of a tie-rod rotor of a gas turbine with the contact effect being considered [J]. *Vibration and Impingement* 2012, 31(12): 9–13.
- [32] Tolani D, Yasar M, Chin S, et al. Anomaly detection for health management of aircraft gas turbine engines [C]. *IEEE American Control Conference*, Portland, US, 2005, 459–464.
- [33] Botros K K, Cheung M. Neural Network Based Predictive Emission Monitoring Module for a GE LM2500 Gas Turbine [C]. *ASME 8th International Pipeline Conference*, Calgary, Canada, 2010, IPC2010–31016.
- [34] Jiang D X, Liu C. Machine condition classification using deterioration feature extraction and anomaly determination. *IEEE Transactions on Reliability* [J] 60(1): 41–48.
- [35] Scharschan J, Caguiat D. Development and improvement of compressor performance prognostics for US Navy gas turbine engines [C]. *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, US, 2005, 3472–3478.
- [36] Mirzamoghadam A V. Gas Turbine Plant Thermal Performance Degradation Assessment [C]. *ASME Turbo Expo*, Berlin, Germany, 2008, GT2008–50032.
- [37] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [C]. *IEEE Aerospace Conference*, 2002.
- [38] Roemer M J, Byington C S, Kacprzyński G J, et al. An overview of selected prognostic technologies with application to engine health management [C]. *ASME Turbo Expo*, Barcelona, Spain, 2006, GT2006–90677.
- [39] Tinga T. Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance [J]. *Reliability Engineering & System Safety* 95(10): 1061–1075.
- [40] Zaidan M A, Mills A R, Harrison R F. Bayesian framework for aerospace gas turbine engine prognostics [J]. *Aerospace UK* 1: 43.
- [41] Venturini M, Therkm D. Application of a Statistical Methodology for Gas Turbine Degradation Prognostics to Alstom Field Data [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 135(9): 091603.
- [42] Sun J Z, Zuo H F, Wang W B, et al. Application of a state space modeling technique to system prognostics based on a health index for condition-based maintenance [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 28: 585–596.
- [43] Puggina N, Venturini M. Development of a statistical methodology for gas turbine prognostics [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 134(2): 022401.
- [44] Vladimir N, Strömberg L, Uebel C. SGT–800 gas turbine continued availability and maintainability improvements [C]. *POWER-GEN Asia*, Bangkok, Thailand, 2009.
- [45] Navrotsky V. Gas turbine performance and maintenance continuous improvement [C]. *VGB Conference*, Friedrichshafen, Germany, 2013.
- [46] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/services/industrial-applications/remote-services>.
- [47] http://site.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/serv/center.htm.
- [48] Kumano S, Mikami N, Aoyama K. Advanced Gas Turbine Diagnostics Using Pattern Recognition [C]. *ASME 2011 Turbo Expo*, Vancouver, Canada, 2011, GT2011–45670.
- [49] Dennis C, Garg S, Hiller S J, Wolfgang Horn, et al. More Intelligent Gas Turbine Engines [R]. *RTOTR-AVT-428*, 2009.
- [50] SAE 2013. Determination of Costs and Benefits from Implementing an Engine Health Management System [S]. *SAE Standard ARP4176*.
- [51] Jablonski A, Barszcz T, Bielecka M, et al. Modeling of probability distribution functions for automatic threshold calculation in condition monitoring systems [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 727–738.
- [52] Lipowsky H, Staudacher S. Application of Bayesian forecasting to change detection and prognosis of gas turbine performance [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(3): 031602.
- [53] Venturini M, Puggina N. Prediction Reliability of a Statistical Methodology for Gas Turbine Prognostics [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2012, 134(10): 101601.
- [54] 刘尚明, 何皓, 蒋洪德. 重型燃气轮机控制发展趋势及未来关键技术 [J]. *热力透平*, 2013, 42(4): 217–224.
Liu S M, He A, Jiang H D. Development Trend of Heavy-Duty Gas Turbine Control Technology [J]. *Thermal turbine* 2013, 42(4): 217–224.
- [55] Liu K B, Gebrael N Z, Shi J J. A data-level fusion model for developing composite health indices for degradation modeling and prognostic analysis [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3): 652–664.
- [56] Loboda I, Yepifanof S. A mixed data-driven and model based fault classification for gas turbine diagnosis

(丛敏编辑)

关于重型燃气轮机预测诊断与健康管理的综述 = **Overview Concerning the Study of the Prediction ,Diagnosis and Health Management (PHM) of Heavy-duty Gas Turbines** [刊 汉]JIANG Dong-xiang ,LIU Chao , YANG Wen-guang (Gas Turbine Research Institute ,Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30(2) . - 173 - 179

An overview of the advances in the study of the prediction ,diagnosis and health management of heavy-duty gas turbines was given with the composition and main functions of a prediction ,diagnosis and health management system being analyzed and the framework and status quo of the application of remote monitoring and diagnosis system being described. On this basis ,the development tendency of the prediction ,diagnosis and health management of heavy-duty gas turbines was investigated. It has been found that to adopt a PHM system can better safeguard ,predict and manage heavy-duty gas turbines and effectively enhance their reliability operation and maintenance intelligence level. **Key Words:** gas turbine ,prediction and diagnosis ,health management ,artificial intelligence ,remote monitoring and diagnosis system

低排放燃烧室旋流器结构对 NO_x 排放的影响 = **Influence of the Structure of the Swirler in a Low Emission Combustor on NO_x Emissions** [刊 汉]WU Ping ,CAO Tian-ze ,ZHANG Chen-xi ,LI Ming-jia (CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30(2) . - 180 - 186

To make a gas turbine to meet the requirements for pollutant emissions ,one must perform an optimized design of the structure of its combustor. At present ,all the world-advanced low emission combustors adopt the dry type fuel deficiency premixed combustion technology ,the key measure of which is to control the premixed uniformity of fuel in the combustion zone ,the more uniform the fuel premixed ,the less the high temperature zones in locals and the less the NO_x produced. For a dry type premixed combustor ,the structure of its swirler exercises important influence on the uniformity of fuel premixed. Therefore ,the authors mainly studied the structure of the swirler in the combustor of a gas turbine ,analyzed the influence of the swirling direction ,swirling number ,fuel and air momentum ratio of the swirler on the NO_x emissions and then looked for the optimized structure of the swirler. It has been found that the optimized swirler should be one with two stages combined along the same direction ,the swirling number in the second stage should be 0.7 ,the fuel and air momentum ratio 0.058 ,the amount of NO_x emissions at the outlet of the combustor 16.6 mg/m^3 ,the total pressure loss coefficient 5.96% and the maximum non-uniformity of the tempera-