

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 08. 003

燃气轮机进气过滤系统滤网更换周期 优化模型研究

Research on update interval optimization model of gas
turbine inlet filtration system

白云山,田鑫,刘志敏

BAI Yunshan, TIAN Xin, LIU Zhimin

(华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030)

(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

摘要:作为拦截空气中污染颗粒的屏障,进气系统对燃气轮机运行的安全性和经济性意义重大。随着运行时间的增加,进气压损逐渐升高,从经济性方面对进气过滤系统的更换周期进行研究具有现实意义。探讨了多级过滤系统更换成本需要考虑的主要因素及计算方法,以单位发电量的滤网更换成本最小化为目标,提出了多级进气过滤系统更换周期的优化模型。对某燃气轮机进气系统的粗滤和精滤更换周期进行优化,单位发电量的滤网更换成本比优化前减少了 1.2%。此外还探讨了天然气价格和滤网初始成本对多级过滤系统最佳更换周期及单位发电量滤网更换成本的影响,可为多级进气过滤系统更换周期的决策提供参考。

关键词:燃气轮机;进气过滤系统;粗滤;精滤;最佳更换周期;优化模型;天然气价格;滤网成本

中图分类号:TM 611.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)08 - 0011 - 04

Abstract:As a shield to block harmful particles,air inlet system plays an important role in safe and economic operation of gas turbine. With increment of operating time, the pressure loss of inlet system increases. Researching update interval of the inlet filtration system from the economy is of realistic importance. Major factors and computing method for the replacement cost of multistage filtration system are discussed,and an optimization model for the update interval of multistage inlet filtration system is proposed on the purpose of minimizing the replacement cost per unit of power generation. Update intervals for coarse filters and fine filters of a gas turbine inlet system are optimized,and the result shows that the filter replacement cost per unit of power generation is 1.2% lower. Finally,effects of gas price and initial cost of filtration system on the optimal update interval of multistage filtration system and replacement cost per unit of power generation are discussed, which are significant for deciding the inlet filtration update interval.

Keywords:gas turbine; inlet filtration system; coarse filters; fine filters; optimal update interval; optimization model; gas price; cost of filter

0 引言

燃气轮机(以下简称燃机)发电机组以其效率高、污染小的优点,在国内外得到了广泛应用^[1-4]。但空气中存在的大量粉尘、油污等颗粒,严重影响燃机安全运行,这些颗粒污染物被燃机吸入后,会磨损压气机叶片并缩短其使用寿命,部分黏附在压气机叶片上的颗粒会导致叶片结垢和表面型线改变,降低机组出力 and 发电效率^[5-7]。按照 GB 3095—2012

《环境空气质量标准》二类地区总悬浮颗粒物(TSP)年平均质量浓度为 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 计算,每年经过 Siemens V94.3A 型燃机(运行时间按 4 500 h 计)进气过滤系统的 TSP 约 2 000 kg,因此,进气过滤系统是燃机必不可少的辅助系统之一,对保障机组的安全运行至关重要。由于当前燃机进气系统多由国外原厂设备制造商(OEM)设计,设计过程中对国内外使用环境的差异缺乏足够重视,国内厂家和用户参与度较低,导致国内燃机进气系统问题频发,严重影响燃机的正常运行^[8-10]。从全寿命周期成本角度分析,由进气过滤系统导致的燃机性能退化成本往往高于系统的初始采购成本,因此,对燃机进气系统的

经济性进行研究具有现实意义^[11]。

目前,国内外部分学者对燃机进气系统经济性进行了研究。文献[12]对末级过滤精度分别为 EN779 F9 和 EN1882 H11 的 2 套过滤系统从进气压损、压气机结垢等方面进行了经济性分析,指出相比于 F9 级过滤器, H11 级过滤器的压差增长更快,对机组出力和热耗影响更大,但由其导致的压气机结垢速率明显降低,总的经济效益仍然相对较高。文献[13-14]指出,过滤器的选型应综合考虑各种型号过滤器特征、过滤器的使用环境及进气系统布置方式,从全寿命周期成本的角度对不同过滤系统的经济性进行了比较。文献[15]对如何定量分析压气机结垢对燃机性能的影响进行了研究,并提出了用敏感性指数(ISF)衡量不同类型燃机对压气机结垢的敏感性。文献[16]研究了某燃机单级滤网的最佳更换周期,从初始成本、停机成本和运行附加成本等方面计算了滤网整个生命周期内的综合成本,并分析了燃料价格、上网电价等因素对滤网最佳更换周期的影响。

由于空气质量较差,国内燃机进气过滤系统多采用粗滤加精滤的配置方式,以增强系统抵御雾霾、沙尘的能力。过滤系统的更换通常以压差达到某一临界值为标准,但我国燃机发电机组数量较多,地域上较为分散,运行特点和环境条件不同,统一采用某一特定临界值作为更换滤网的依据虽然简单易行,但缺乏合理性。作为燃机的进气屏障,进气过滤系统性能优劣对机组影响很大,其更换周期的经济性问题不容忽视。因此,本文以经济性最优为原则,对两级进气过滤系统的粗滤和精滤的更换周期进行深入研究,并对影响两级进气过滤系统更换周期的主要参数进行探讨,以期优化燃机进气滤网的更换周期提供参考。

1 进气过滤系统更换成本分析

进气过滤系统的更换成本是指在系统的使用时间内,采购、安装、运行、维护、处理等费用的总和,如系统使用寿命较长,还应考虑资金的时间价值,以净现值来比较系统的成本。

1.1 采购成本

采购成本 C_{init} 指进气过滤系统的初始购买费用,受过滤器型号、过滤精度和生产厂家等因素的影响较大,多级过滤系统的各级过滤器采购成本可以向供应商咨询。

1.2 停机成本

停机成本 C_{down} 是指由于进气系统工作异常或

过滤性能差导致燃机无法正常运行而造成的损失。通常情况下,过滤器更换时需停机,对于冬季供热机组,应尽量避免供热期间更换进气过滤系统,以免造成经济损失和恶劣的社会影响,对于昼启夜停的调峰机组,过滤器的更换可在夜间进行。

1.3 燃机性能退化成本

(1) 进气过滤系统的优劣对燃机性能影响很大,主要表现在压气机结垢和进气压损两方面,二者对进气过滤系统成本的影响可以通过式(1)、(2)进行计算。

$$C_{\text{foul}} = \int_0^t [P_{\text{loss1}} C_{\text{kWh}} - P_{\text{loss1}} (1 + \eta_{\text{q1}}) Q_{\text{std}} C_{\text{scm}}] dt + \int_0^t (P \eta_{\text{q1}} Q_{\text{std}} C_{\text{scm}}) dt, \quad (1)$$

$$C_{\Delta p} = \int_0^t [P_{\text{loss2}} C_{\text{kWh}} - P_{\text{loss2}} (1 + \eta_{\text{q2}}) Q_{\text{std}} C_{\text{scm}}] dt + \int_0^t (P \eta_{\text{q2}} Q_{\text{std}} C_{\text{scm}}) dt, \quad (2)$$

式中: C_{foul} 为因压气机结垢而增加的成本; $C_{\Delta p}$ 为因进气压损而增加的成本; C_{kWh} 为上网电价; Q_{std} 为机组日常运行时的气耗; C_{scm} 为每立方米天然气价格; P 为机组的发电功率; P_{loss1} 为因压气机结垢而损失的发电功率; P_{loss2} 为因进气压损而损失的燃机发电功率; η_{q1} 为因压气机积垢导致的气耗增加率; η_{q2} 为因进气压损导致的气耗增加率; t 为机组运行时间。

除此之外,影响进气系统更换成本的因素还包括运行维护、拆除和处理等成本 C_{other} 。

1.4 多级进气过滤系统更换周期优化模型

根据以上分析,在使用周期内,多级滤网更换总成本 C_{total} 计算如下

$$C_{\text{total}} = C_{\text{init}} + C_{\text{down}} + C_{\text{foul}} + C_{\Delta p} + C_{\text{other}} \quad (3)$$

以进气过滤系统更换费用最小化为原则,得出优化模型

$$\begin{aligned} & \text{Find } T_{\text{final}}, T_{\text{pre}} \\ & \text{Min } f(T_{\text{final}}, T_{\text{pre}}) = \frac{C_{\text{total}}}{W(P, T_{\text{final}})} \\ & \text{s. t. } T_{\text{final}} > T_{\text{pre}} \\ & \quad T_{\text{final}} < T_{\text{lim1}} \\ & \quad T_{\text{pre}} < T_{\text{lim2}} \end{aligned}$$

其中: $T_{\text{final}}, T_{\text{pre}}$ 分别为进气系统精滤和粗滤更换周期; $W(P, T_{\text{final}})$ 为滤网更换周期内机组实际发电量; $f(T_{\text{final}}, T_{\text{pre}})$ 为单位发电量的滤网更换成本; T_{lim1} 和 T_{lim2} 分别为精滤和粗滤的最大更换周期,防止滤材达到强度极限而失效。

2 实例计算

2.1 某 M701F4 型燃机多级进气过滤系统更换周期计算

某燃气电厂共有 2 套燃气 - 蒸汽联合循环机组,燃机为三菱的 M701F4,蒸汽轮机为 TC2F - 35.4,机组额定功率为 470 MW,单轴布置。燃机进气系统为唐纳森的 GDX 600712X 自清式过滤系统,过滤器级数为 2 级,即粗滤和精滤。粗滤为板式过滤器,过滤精度为 EN779 G4,共 165 个滤芯,每个滤芯采购成本为 300 元;精滤为自清式过滤器,过滤精度为 EN779 F8,共 900 对滤芯,每对滤芯采购成本为 1 500 元。按厂家要求,过滤器的压差报警值为 0.90 kPa,跳机值为 2.25 kPa。

为研究该进气过滤系统粗滤和精滤的最佳更换周期,对进气压损随运行时间的变化关系进行了记录,如图 1 所示。从图中可以看出:粗滤和精滤压差与运行时间基本呈线性关系(其函数关系拟合见式(4),(5));进气系统的粗滤更换时间间隔约为 2 000 h,但每次更换粗滤时,精滤的压差均不同,从燃机运行的经济性考虑,取某一固定值作为粗滤的更换周期缺乏足够的合理性。

$$\Delta p_{pre} = 0.16 + 3.91 \times 10^{-5} t, \tag{4}$$

$$\Delta p_{final} = 0.29 + 8.71 \times 10^{-5} t, \tag{5}$$

式中: Δp_{pre} 为粗滤压差; Δp_{final} 为精滤压差; t 为运行时间。粗滤的初始压差为 0.16 kPa,精滤的初始压差为 0.29 kPa。

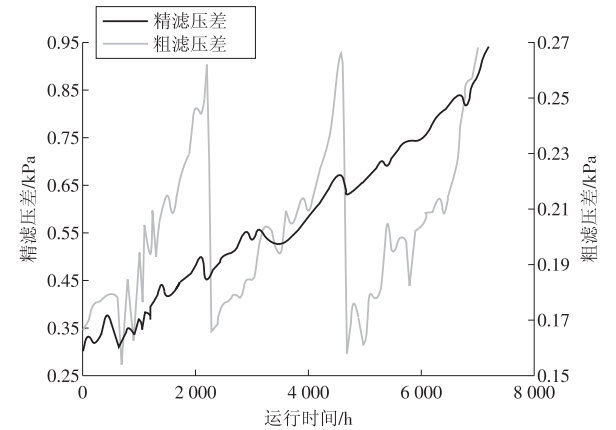


图 1 滤芯压差随运行时间的变化

Fig.1 Filter differential pressure change with operating time

随着进气过滤系统压差的增加,机组出力和效率均会出现不同程度的降低,根据厂家提供的修正曲线(如图 2 所示),可以对进气压损导致的燃机性能损失进行计算。由于该机组为调峰机组,停机期间经常进行离线水洗,并未出现明显的压气机结垢

现象,因此,本例忽略压气机结垢的影响。

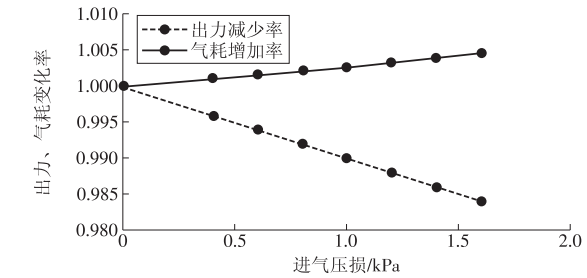


图 2 进气压损对出力及气耗的影响

Fig.2 Influence of inlet pressure loss on output and gas loss

综上所述,根据机组实际运行情况及上文提出的优化模型,可以计算出该燃机发电机组两级滤网的最佳更换周期。为简化起见,首先取精滤的更换周期为某一固定值,对粗滤的最佳更换周期随精滤压差的变化情况进行计算,结果如图 3 所示。该计算结果呈现如下特点。

- (1)粗滤最佳更换周期与精滤压差呈线性关系。
- (2)随着精滤压差的增加,粗滤的最佳更换周期逐渐减小。
- (3)随精滤压差的增加粗滤的最佳更换周期变化较小,基本维持在 820.0 ~ 880.0 h,与 2000.0 h 的实际更换时间间隔相差较大。
- (4)精滤压差处于同一数值时,随着精滤更换周期的增加,粗滤的最佳更换周期随之增加。

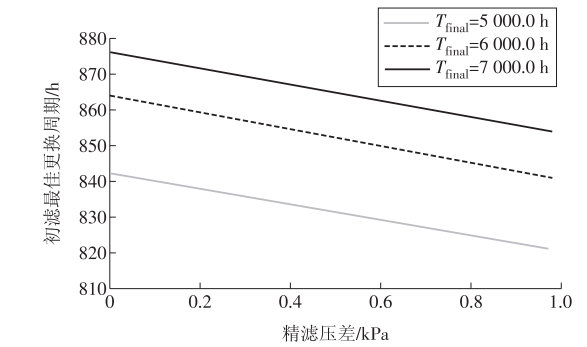


图 3 粗滤更换周期随精滤压差的变化

Fig.3 Change of update interval of coarse filter with pressure difference of fine filter

为了对该机组的两级进气过滤系统的更换周期进行优化,对单位发电量滤网更换成本与精滤更换周期的关系进行了计算,结果如图 4 所示。对于该燃机发电机组,精滤的最佳更换周期约为 6 000.0 h,因每次更换粗滤时精滤的压差不同,因此,对应的粗滤最佳更换周期为 841.0 ~ 864.0 h,为方便起见,可以取中间值 852.5 h,此时单位发电量的滤网更换成本为 2.9289×10^{-4} 元。该机组当前粗滤更换周期约为 2 000.0 h,精滤更换周期约为 7 000.0 h,对应的

单位发电量滤网更换成本为 2.9618×10^{-4} 元,优化后单位发电量的滤网更换成本为原来的 98.8%,经济性有所提高。

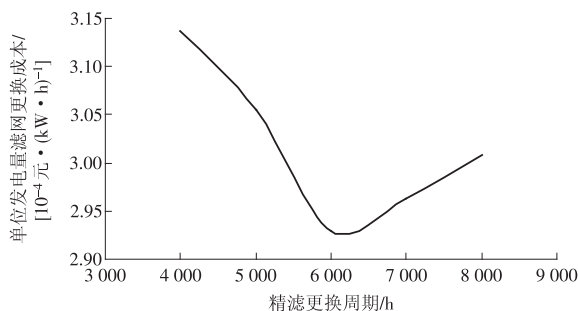


图 4 单位发电量滤网更换成本随精滤更换周期的变化

Fig. 4 Filter replacement cost per power generation unit change with fine filter replacement cycle

2.2 多级滤网更换周期的影响因素

作为多级滤网更换周期的影响因素,燃气价格和滤网初始成本随地域、时间的变化而变化,因此,同一机组进气滤网的最佳更换周期并非固定不变。

2.2.1 天然气价格的影响

天然气价格对单位发电量滤网更换成本的影响如图 5 所示。天然气价格发生变化时,粗滤和精滤的最佳更换周期、单位发电量滤网更换成本随天然气价格变化明显。天然气价格增加 20%,单位发电量的滤网更换成本增加 13% 左右。该机组以基本负荷运行为主,因此天然气价格对单位发电量滤网更换成本影响较大。

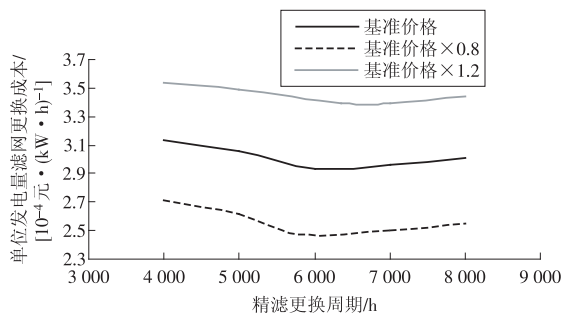


图 5 天然气价格对单位发电量滤网更换成本的影响

Fig. 5 Effect of gas price on replacement cost per unit of power generation

2.2.2 滤网初始成本的影响

目前市场上生产燃机进气过滤系统的厂家较多,AAF, Comfil, 唐纳森等厂家生产的过滤系统价格不尽一致。此外,受市场供需关系、产品技术升级等因素的影响,过滤系统的价格也在不断变化。图 6 为不同的滤网初始成本下,精滤更换周期与单位发电量滤网更换成本间的关系曲线。从图中可以看出,滤网初始成本发生变化时,该进气系统的精滤最

佳更换周期基本维持不变,与天然气价格影响相比,滤网初始成本对单位发电量的滤网更换成本影响较小。

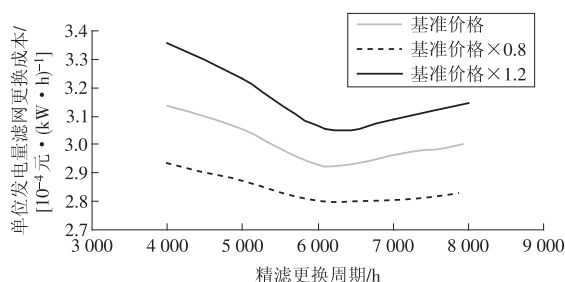


图 6 滤网初始成本对单位发电量滤网更换成本的影响

Fig. 6 Effect of filter initial cost on replacement cost per unit of power generation

3 结论

(1) 本文以单位发电量的滤网更换成本最小化为目标,综合考虑了多级进气过滤系统相关的采购成本、停机成本和性能退化成本,提出了一种计算多级过滤系统最佳更换周期的数学模型。

(2) 对某 M701F4 机组的多级进气过滤系统的最佳更换周期进行了计算,结果表明:粗滤的最佳更换周期随精滤压差的增加而减小;精滤压差处于同一数值时,随着精滤更换周期的增加,粗滤的最佳更换周期随之增加。优化后,粗滤和精滤的最佳更换周期分别为 852.5 h 和 6000.0 h,与优化前相比,单位发电量的滤网更换成本减少了 1.2%。

(3) 分析了天然气价格和滤网初始成本对多级进气过滤系统最佳更换周期及单位发电量滤网更换成本的影响,由于该机组以基本负荷运行为主,天然气价格对二者的影响较大,滤网初始成本对二者的影响较小。因此,对于不同地区、不同运行方式的燃机发电机组,应根据机组的实际运行数据对进气系统的更换周期进行优化。

参考文献:

- [1] WRIGHT I, GIBBONS T. Recent developments in gas turbine materials and technology and their implications for syn-gas firing [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(16): 3610 - 3621.
- [2] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机现状与发展趋势 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5096 - 5102.
- [3] 谢大幸, 石永锋, 郑健, 等. 最新 H 级燃气轮机发展现状 [J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(4): 1 - 3.
- [4] POULLIKKAS A. An overview of current and future sustainable gas turbine technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, 9(5): 409 - 443. (下转第 19 页)

可能超过燃机动力透平轴或推力轴承的许用推力,严重影响燃机的使用寿命,可能造成重大损失。

而在顺德项目 LM6000 型燃机安装过程中,仅拆除了靠近燃机侧的运输螺钉而未拆除靠近发电机侧的螺钉,强制拉伸联轴器使其遭到破坏:燃机侧膜盘承受一定变形并产生轴向力,同时发电机侧运输螺钉受同等大小的力,由于 $F_1 = 3F_0$,燃机侧膜盘变形直至预拉伸值时,产生的轴向力约为 F_2 的 2 倍,超过了燃机推力轴承的许用推力。后期经过反复的技术沟通,采用了联轴器返厂检修并更换燃机推力轴承的维修方案,造成了严重的影响和重大的经济损失。

在燃机膜盘联轴器采用预拉伸安装时,必须严格参照安装步骤,注意勿改变膜片数量且务必拆除运输螺钉,防止误操作引起的轴向力超过燃机轴系的许用载荷,造成不可估量的后果。

5 结论

(1)LM 机组采用冷态对中安装方式,但是随着机组连续运行和地基不均匀沉降,轴系势必发生张角偏移、平行偏移或联合偏移的不对中状况,因此要求所选用的联轴器在保证对中精度的情况下具有较强的不对中补偿能力。

(2)经过比较分析,并结合 LM 机组传递力矩/

功率、机组热膨胀、轴系受力、轴系动态匹配及动平衡品质等特殊需求,选取 HP/R 型双膜盘联轴器应于用 LM 航改型燃机发电机组。

(3)膜盘联轴器采用预拉伸安装方法,安装时必须严格参照安装步骤。保证燃机运行时轴系处于中性状态,且注意变膜片数量和运输螺钉的拆除情况,防止误操作引起的轴向力超过燃机轴系的许用载荷,造成不可估量的后果。

参考文献:

[1] GE Packed Power L. P. Procedure LM2500 + and LM2500 + G4 gas turbine, gearbox, and generator main unit setup and alignment (50 Hz) [Z]. 2013.

[2] 徐阳,赵金阳,陈永祥,等. 国产膜片联轴器的技术及应用进展[J]. 流体机械,2010,38(11):30-35.

[3] 庄祥华. 联轴器[M]. 北京:化学工业出版社,1986.

[4] 成大先. 机械设计手册(第2卷)[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

(本文责编:陆华)

作者简介:

毛杨军(1986—),男,浙江衢州人,工程师,工学硕士,从事航改型燃气轮机发电机组机械系统的研究工作(E-mail:ao. yangjun@hd-ge.com)。

(上接第 14 页)

[5] EFFIOMS O, ABAM F I, OHUNAKIN O S. Performance modeling of industrial gas turbines with inlet air filtration system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2015, 5 (11-12):160-167.

[6] MEHER - HOMJI C B. Gas turbine axial compressor fouling: A unified treatment of its effects, detection, and control [J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1992, 9 (4):311-334.

[7] MISHRA R K. Fouling and corrosion in an aero gas turbine compressor[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(6):837-845.

[8] 李志锋,王进海,童建平,等. PG5301N 型燃气轮机进气系统改造[J]. 燃气轮机技术,2001,14(2):65-68.

[9] 李俊,邓小明. M701F 燃气轮机进气过滤系统改进[J]. 热力发电,2015,44(7):121-124.

[10] 陈仁贵,陶月. 燃气轮机进气系统结霜分析及对策[J]. 热能动力工程,2005,20(6):647-649.

[11] 马方磊. S109FA 燃气轮机压气机进气系统的清洁与维护[J]. 发电设备,2011,25(1):49-52.

[12] SCHROTH T, CAGNA M. Economical benefits of highly efficient three-stage intake air filtration for gas turbines [C]//International Gas Turbine Institute. ASME Turbo

Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, 2008:889-894.

[13] WILCOX M, BRUN K. Gas turbine inlet filtration system life cycle cost analysis[C]//International Gas Turbine Institute. ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011:675-682.

[14] WILCOX M, KURZ R, BRUN K. Technology review of modern gas turbine inlet filtration systems[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2012:1-15.

[15] TARABRIN A P, SCHUROVSKY V A, BODROV A I, et al. An analysis of axial compressors fouling and a cleaning method of their blading [C]//ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1996.

[16] 陈坚红,程元,盛德仁,等. 燃气轮机滤网更换周期优化决策模型研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(20):3302-3307.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

白云山(1988—),男,河北唐山人,工程师,从事燃气轮机故障诊断及进气系统研究方面的工作(E-mail:bys12345@126.com)。