

## 基于自组织网络的燃气轮机燃料系统的故障诊断研究

衣 爽<sup>1</sup>,徐志强<sup>2</sup>,杨正薇<sup>2</sup>,李淑英<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶重工集团公司第 703 研究所,黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘 要:**针对燃气轮机燃料系统在实际运行过程具有故障征兆多,单一、标准故障数据难以得到的特点,提出一种基于自组织神经网络的燃料系统故障诊断方法。该方法通过建立燃料系统故障诊断模型,选择合适的燃料系统故障特征参数形成合理的故障诊断分析网络。以某型工业燃气轮机燃料系统为例进行分析,选取燃气阀开度、燃气阀压差和燃气控制压力 3 个监测参数作为故障诊断模型网络的输入,以系统中常见的 3 种典型故障燃气管路泄漏、燃气过滤器堵塞、燃气阀故障作为网络的输出。以实际运行数据作为网络测试样本,对该燃机实际运行故障进行测试。测试结果表明:该方法可以有效地诊断出燃料系统的 3 种典型故障,同时支持在线诊断,具有较好的工程应用价值。

**关 键 词:**故障诊断;自组织神经网络;燃气轮机;燃料系统

中图分类号:TK477

文献标识码:A

## 引 言

燃气轮机的燃料系统是保障机组安全、稳定运行的重要辅助系统。燃料系统的主要作用是调节燃料流量和清洁燃料并点火<sup>[1]</sup>。作为透平发电机组的附属系统之一,燃料系统是出现故障频率比较高的部件。据统计,燃料系统故障大约占到燃气轮机机组总故障的 10%<sup>[2]</sup>,常见故障包括燃料过滤器堵塞、燃料泄漏、燃料压力异常、燃料阀故障等<sup>[3]</sup>。

目前,针对燃料系统的故障并没有比较好的诊断方法<sup>[4]</sup>,基本是当系统的实际监测参数超出正常范围后,根据不同的故障征兆和实际的运行经验,排查故障原因并采取相应的措施,如停机、维修等。另一方面,燃气轮机的燃料系统结构复杂,故障征兆多样,故障影响范围广<sup>[5]</sup>,因此其诊断的难度大,一般的故障诊断方法都不能及时准确的对燃料系统已发生故障进行诊断。

本研究针对燃料系统需要通过对高维历史运行数据的分析和比较去寻求监测数据的内在关系的技术特点<sup>[6]</sup>,提出一种基于自组织网络的故障诊断方法,目的是减少对专家经验知识的依赖程度,以便从一个新的角度实现对燃料系统的状态监测和故障诊断。

通过建立自组织神经网络故障诊断模型,对燃料系统运行过程中产生的典型故障进行诊断,并在故障发生后给出合理的措施,降低燃气轮机发电机组的维护成本,提高机组安全稳定运行的能力。

## 1 燃料系统概述及常见故障分析

## 1.1 燃料系统概述

燃料系统的主要作用是控制不同工况(如启动、加速、减速、额定工况等)下进入透平机喷嘴燃烧的燃料流量,为发动机的安全运行提供重要保障<sup>[7-8]</sup>。燃料系统一般由燃料过滤器、燃料流量调节控制阀、一/二级流量安全阀、燃气排放阀、温度传感器、压力传感器、管道、喷嘴等组成。

本研究以金牛 70 燃气轮机发电机组的燃料系统为例,该机组是 Solar 公司生产的单轴燃气轮机发电机组,该机组是由一台轴流式燃气轮机、一台发电机和一台齿轮箱组成,单机功率约为 7 000 kW。金牛 70 燃气轮机为双燃料机组,在一般情况下使用天然气燃料,因此主要分析燃气系统的运行机理,提取故障征兆,对燃气系统的几种常见故障进行诊断。系统原理如图 1 所示。

在机组启动之前要对燃料系统进行检查,当截止阀检测正常后压缩空气吹扫排气系统和燃料喷嘴。清洁后的燃料通过管路进入滤器进行过滤,除去燃气中的颗粒污染物,以免造成管路的堵塞,防止

收稿日期:2013-11-26;修订日期:2014-02-24

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCFZ1005)

作者简介:衣爽(1986-),女,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工程大学博士。

对其它元件造成伤害。从过滤器出来的燃料进入燃料泵进行增压达到机组起动和运行过程中的燃料压力的要求,一旦压力符合机组起动条件后执行起动指令,根据燃气轮机的实际工况控制系统对燃料流量调节阀进行调整,分配进入一、二路的燃料量,一定压力和温度的燃料被送入点火器,由压缩空气将其雾化,并在燃烧室内点火。被雾化的燃料经过喷嘴进入燃烧室和空气混合燃烧。

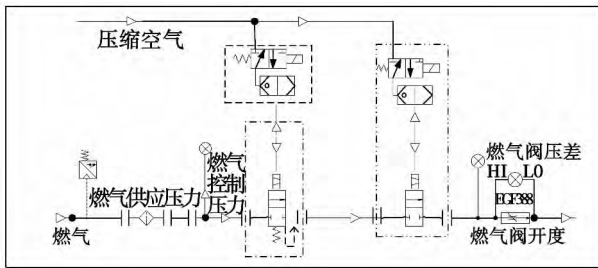


图 1 燃气轮机发电机组燃料系统原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of a gas turbine generator unit fuel system

### 1.2 燃料系统常见故障分析

通过统计该型燃气轮机机组燃料系统十年内所发生的故障,得到燃料系统的 3 个常见故障,即燃料过滤器滤芯堵塞、燃料泄漏和燃料阀故障。其中燃料过滤器堵塞的故障约为 43%,主要原因是由于燃料质量低,燃料内的杂质多。燃料泄漏约占 24%,主要原因多为连接处紧固不够,密封不好和个别零件损坏。燃料阀故障占到 15%,主要是由于法兰处垫片损坏、燃料阀振动或异常摆动。除了上述故障外还有一些其它的故障,如油管中含有气体导致点火失败、回油管排气阀未打开等,发生的概率在 5% - 7%。

通过分析燃料系统的常见故障和典型征兆,可以看出燃料系统健康状态没有预知的正确模式,需要对复杂的监测数据进行分析 and 比较,寻求故障征兆与故障原因的内在关系。燃料系统的故障诊断需要依据故障发生时的征兆及历史监测数据进行综合判断。

## 2 自组织网络可视化及参数选择

自组织特征映射网络作为一种典型的无监督网络,是由 Kohonen 于 1981 年提出的一种通过自组织竞争学习网络实现数据降维和可视化的无监督竞争学习型前馈神经网络模型<sup>[9-10]</sup>。自组织网络与

有监督网络的不同之处在于,它的学习过程不需要提供理想的目标输出,只需要向网络提供基本的学习样本,网络就可根据输入样本的特性进行自学习,从而对样本进行聚类,起到矢量量化器的作用。

### 2.1 自组织神经网络的可视化

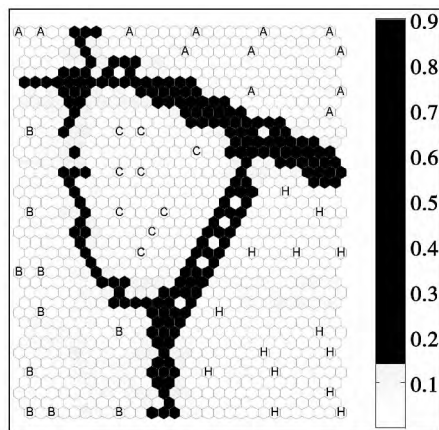
自组织神经网络工具箱提供了丰富的自组织网络可视化途径<sup>[11-12]</sup>。它可以显示分类边界,投影方向和变量之间的依赖关系。其中距离矩阵是常用的网络可视化形式。距离矩阵也称为 U 矩阵,它作为一个训练图,显示了不同条件下的具有明确边界的聚类结果。每一个 U 矩阵里的六边形网格表示其与获胜单元的距离,说明不同的情况对应不同的数据聚类。在聚类中颜色深浅逐渐变化表明这一类中权值重要性的变化。故障状态可以投射到标有聚类结果的 U 矩阵图上,对应在网络上的位置显示其重要性,同时也显示出实际的状态。神经元之间距离的远近由白色到黑色过度,颜色越深代表距离越远。在不同类别之间距离较远,颜色逐渐加深,形成很明显的分界线。

### 2.2 参数选择

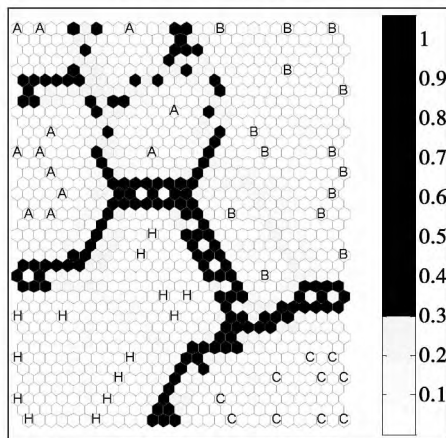
为了全面的表征燃料系统所有的状态(健康态和各种故障状态),在进行故障诊断之前需要选取系统的监测参数并进行特征信息提取,以达到故障诊断的精度要求。对于燃料系统一方面考虑燃料系统供应压力必须满足燃气轮机燃烧室入口压力(约 2.0 MPa)要求,因此需要选择燃料系统中与压力相关的测点参数。选取 3 处压力测点参数,分别是燃气供应压力、燃气控制压力和燃气控制阀压差。另一方面,燃料系统流量的精确控制与主控系统的控制性能有直接关系,因此选取燃料阀的开度作为反映系统控制性能的变量。最后,由于气体燃料系统燃料供应的流量需要满足当前燃气轮机工作负荷的需求,故选取燃气轮机排气温度作为表征燃气轮机系统当前运行状态的变量。以上共选出 5 个参数都能在一定程度上表征燃料系统的运行状态。

在基于自组织网络的故障诊断方法中,参数的个数对 U 矩阵中故障分布有一定的影响,不同的参数个数会形成不同的 U 矩阵,因此需要寻求合适的输入参数的数目。分别选择 5 个特征参数(燃料阀开度;机组平均排气温度;燃气阀压差;燃气供应压力;燃气控制压力)和 3 个特征参数(燃料阀开度、燃气阀压差和燃气控制压力),同时选择相同的输出结构进行分析比较,得到如图 2(a) 和图 2(b) 所

示的 U 矩阵。



(a) 3个输入参数的情况



(b) 5个输入参数的情况

(A - 燃气管路泄漏; B - 燃气过滤器堵塞;  
C - 主燃气阀故障; H - 系统正常)

图 2 不同输入参数的 U 矩阵

Fig. 2 U matrixes at various input parameters

从故障诊断的角度来看,输入越多反映系统故障状态的信息就越准确的判断系统的运行状态,但是图 2 却表现出相反的结论,即选择 3 个参数作为输入得到的 U 矩阵的分类效果比 5 个参数的分类效果更清晰。当选择 5 个参数作为输入时,故障 A 和故障 B 区域之间的划分不够明显,且故障 A 区域之间还有几个小区域,整个区域不够完整,虽然图 2 (a) 中故障 A 区域也存在这个问题,但是总体比图 2 (b) 要好一些。

通过分析原因发现出现这种现象是由于燃料系统的故障诊断选择 3 个参数燃料阀的开度、燃气阀压差和燃气控制压力就可以有效的反映出系统的故障特征。另外的两个特征参数燃气供应压力和平均排气温度对燃气管路泄露、燃气过滤器堵塞和主燃

气阀故障的发生是不敏感的,不能直观的反映系统状态,即增加这两个参数不但达不到提高诊断精度的目的,还会对诊断结果形成干扰。

燃料供应压力需要维持在恒定的范围内保持稳定,它由燃料管道内的稳压阀控制,与燃料系统的运行状态无关,因此不能反映出文中所关注的系统异常情况。另一个参数平均排气温度虽然可以反映燃料流量的变化情况,但是对于文中的 3 个故障并不敏感,另一方面平均排气温度的异常所引发的原因有很多,比如传感器故障,燃烧室故障,喷嘴故障等,并不一定是由于燃料系统出现故障导致的,因此平均排气温度作为燃料系统的故障输入参数并不合适。

通过以上分析发现不是输入参数越多诊断效果越好,输入参数过多会使系统出现冗余,从而找不到真正引发故障的参数,因此选择恰当数目的输入量才能取得最好的诊断效果。本研究中利用粗糙集约简得到的 3 个参数作为输入样本得到其可视化结果。

### 3 故障诊断与测试

通过统计金牛 70 该机组近十年的监测数据并进行分析,提取 65 组实际运行数据作为训练样本,其中包括 3 种典型故障样本,分别是燃气管路泄漏、燃气过滤器堵塞、主燃气阀故障。每种故障样本各 15 组和正常样本 20 组。选择 25 组测试样本数据。将训练样本加入到自组织网络中得到的 U 矩阵如图 3 所示。

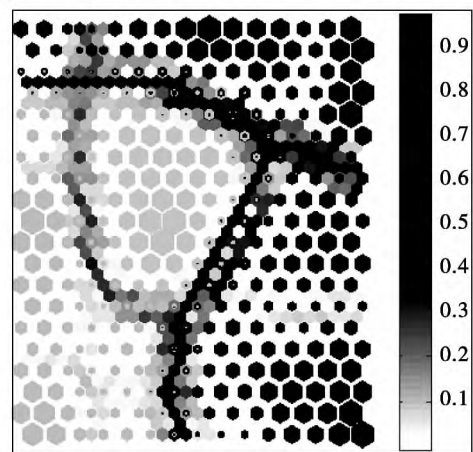


图 3 燃气系统的 U 矩阵

Fig. 3 U matrix of the fuel system

从图 3 中可以明显地看出整个网络将燃气系统的训练数据分成 4 类,神经元的大小、颜色和位置分别代表了实际数据的分类情况。距离较近的神经元被定义为同一类的,而边界区域的神经元之间的距离要比在聚类内部的神经元之间的距离大很多并且相同属性的运行状态在输出层上的距离相对小。

分别绘制燃料系统所选择的 3 个参数的分量图,如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出燃气阀开度 (GVP) 可以直接区分出故障 C 和非故障 C 的样本。图 4(b) 燃气阀压差 (GFDP) 的分量图可以发现该参数可以将燃气管路泄漏故障(故障 A)、燃气过滤器堵塞的故障(故障 B) 两个故障和其它故障区分出来。但是该参数不能区分故障 C 和正常状态。燃气控制压力 (GFCP) 将整个区域分为 3 部分,其中图 4(c) 中间的浅色带将该图分为两部分,上半部分为燃气管路泄漏(故障 A) 区域,即利用燃气阀压差 (GFDP) 可以将故障 A 和其它参数分开,而图 4(c) (图中与图 4(a) 图重叠的部分即为燃气阀故障(故障 C) 区域,其余部分就表示系统运行正常。这样 3 个参数将 3 种故障和健康状态划分出来。

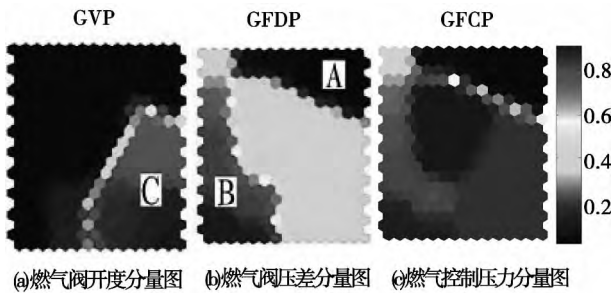


图 4 燃气系统故障诊断的主分量图  
Fig. 4 Chart showing the main components for diagnosing faults of the gas system

为了测试故障诊断网络的精确度,截取燃料系统运行过程中的一段故障数据如图 5 所示,该组故障数据在 3495 时间点之后都发生变化,其中 GVP 降低,GFDP 升高,GFCP 先升高后下降。将该数据录入建立好的网络模型中,利用网络追踪图(如图 6 所示)可以很直观的看出系统由正常状态进入到故障 C 区域,即发生了燃气过滤器堵塞的故障,经实际分析检查结果得到实际情况确实是燃气阀出现了故障。

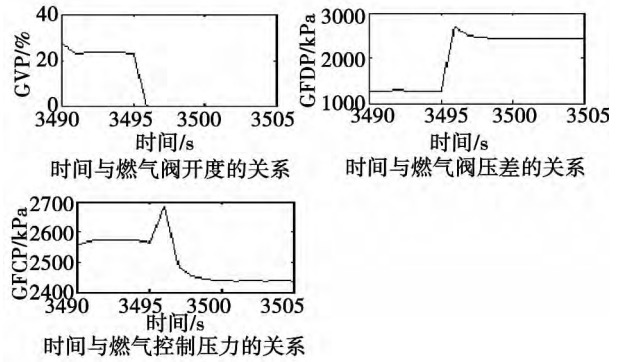


图 5 机组发生故障时提取的故障数据  
Fig. 5 Fault data picked up when a fault occurs to the unit

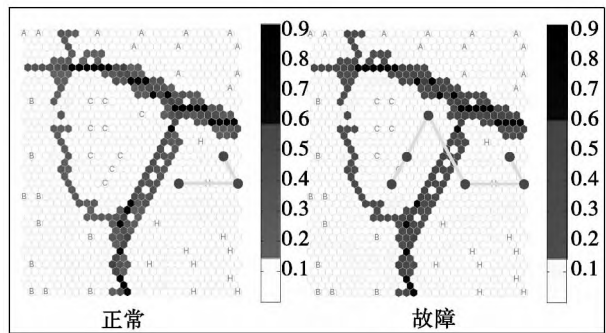


图 6 系统由正常状态转入故障 C 状态  
Fig. 6 The system turns from the normal state to the fault state C

#### 4 结 论

提出一种基于的自组织的特征网络 (SOM) 的燃气轮机燃料系统故障诊断方法。通过研究该方法可以得出结论:

(1) 自组织网络能够将输入层的高维空间的样本,在竞争层映射成样本模式分类分布的低维特征空间。不同的输入参数可以得到不同的网络结构,并不是越多的输入参数对系统故障的诊断效果越好,选择恰当的输入量既可以减少数据冗余又可以提高系统的故障诊断准确度。

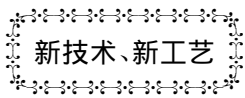
(2) 自组织神经网络作为无监督的学习算法可以模拟之前的经验,并自动适应不可预知的环境变化,以及减少对专家经验的依赖。测试结果表明,基于自组织网络的燃气系统故障诊断方法具有实用性

和高效性 这种方法可能适合于诊断燃气轮机其它辅助系统的故障。

#### 参考文献:

- [1] JIANG Xu-feng ,FEI Yi-wei ,QIAN Kun ,et al. The application of lubricant oil monitoring to aero-engine preventive maintenance [J]. Lubrication Engineering 2004 2: 56 - 58.
- [2] 衣 爽. 燃气轮机滑油和燃料系统故障诊断与预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2012.  
YI Shuang. Research of the fault diagnosis and prediction of the lubrication oil and fuel system of a gas turbine [D]. Harbin: Harbin Engineering University 2012.
- [3] 翁史烈, 王永泓. 基于热力参数的燃气轮机智能故障诊断[J]. 上海交通大学学报 2002 36(2): 165 - 168.  
WENG Shi-lie ,WANG Yong-hong. Intelligent fault diagnosis of gas turbines based on thermal parameters[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2002 36(2): 165 - 168.
- [4] 王明锐. 汽轮机及主要辅机在线监测诊断系统研究与应用[D]. 天津: 天津大学 2009.  
WANG Ming-rui. Research and applications of the on-line monitoring and diagnosis system of a steam turbine and its main auxiliary equipment [D]. Tianjin: Tianjin University 2009.
- [5] Y. G. Li ,P. Nilkitsaranont ,Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance [J]. Applied Energy 2009 86: 2152 - 2161
- [6] Weng Shilie ,Wang Yonghong. Intelligent fault diagnosis of gas turbine based on thermal parameters [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2002 36(2): 165 - 168.
- [7] Xiang Zhiwei Zhang Hui Wang Bin. The application of oil monitoring techniques in the failure diagnosis of ship diesel engine [J]. Lubrication Engineering 2009 34(4): 108 - 110.
- [8] 陈 恬 孙建国. 粗糙集与神经网络在航空发动机气路故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报 2006 21(1): 207 - 212.  
CHEN Tian ,SUN Jian-guo. Applications of the rough sets and neural networks in the fault diagnosis of the air loop of an aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power 2006 21(1): 207 - 212.
- [9] Vesanto J. SOM-Based Visualization Methods [J]. Intelligent Data Analysis. 1999 3 ,111 - 126.
- [10] Kohonen ,T. Self-organizing neural projections [J]. Neural Networks 2006(19): 723 - 733.
- [11] Kohonen ,T. Self-organizing maps ,Third Edition [M]. Berlin: Springer 2001.
- [12] García H L. González. ,I M. Self-organizing map and clustering for wastewater treatment monitoring [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2004(17): 215 - 225.

( 丛 敏 编辑)



## 2009 - 2013 年 11 种机型燃气轮机退出生产线

据《Gas Turbine World》2013 年年度手册报道,从 2009 到 2013 年的 5 年期间共有 11 种机型燃气轮机已退出生产线,包括 IM - 150、ST18A、ST40、PGT5、LM2000PS、MS6001C、GT8C/C2、SGT - 1000F( V64. 3A)、SGT6 - 3000E( W501D5A)、SGT5 - 3000E( V94. 2A)、SGT6 - 6000G( W501G)。

退出生产线的大多数型号是因为在市场上它们不再具有竞争能力、生产重叠或直接弃用。

通常,旧型号被更高效率的燃气轮机或升级和改进的机组所代替。尽管给定型号不再正常生产,但制造厂商将根据特殊订单生产和供货。

此外,还列出了上述 11 种机型燃气轮机的原设备制造厂商和燃气轮机型号、燃气轮机主要设计参数、基本负荷、ISO 额定输出功率、热耗率、效率、推出年份和退出生产年份。

( 吉桂明 摘译)

基于自组织网络的燃气轮机燃料系统的故障诊断研究 = **Study of the Fault Diagnosis of a Gas Turbine Fuel System Based on a Self-organized Network** [刊 汉] YI Shuang, LI Shu-ying ( College of power and energy engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), XU Zhi-qiang, YANG Zheng-wei ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 238 - 241

In the light of such specific features as several signs of a fault during the actual operation of the fuel system of a gas turbine and difficulty in obtaining single and standard fault data, put forward was a method for diagnosing any faults of a fuel system based on a self-organized neural network. The method in question chosen proper fault characteristic parameters of the fuel system to form a sound and correct analytic network for diagnosing any faults by establishing a model for diagnosing faults of a fuel system. With the operating state of the fuel system of an industrial gas turbine serving as an example to conduct an analysis, the operation data of the following three monitoring parameters were chosen as the sample input for the fault diagnostic model, namely, the opening degree of the gas valve, pressure difference of the gas valve and gas control pressure, and the three types of commonly seen fault were chosen as the output of the network, namely, gas pipeline leakage, clogging of the gas filter and fault of the gas valve. With the actual operation data serving as the sample of the network under the test, the actual operation fault of the gas turbine in question was tested. The test results show that the method under discussion can be used to effectively diagnose three typical faults of the fuel system and at the same time can support on-line diagnosis, thus meriting a relatively good application value for engineering projects. **Key words:** fault diagnosis, self-organized neural network, gas turbine, fuel system

船用汽轮机变工况长叶片技术研究 = **Study of Long Blade Technologies for Marine Steam Turbines Under the Off-design Operating Conditions** [刊 汉] KANG Lei, ZHANG Xiu-feng, WANG Chao ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), LUO Xiao-ming ( Harbin Steam Turbine Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 242 - 248

Marine steam turbines are characterized by their multiple operating conditions and variable rotating speeds etc. actual operating peculiarities. The authors have performed an aerodynamic optimization of the long blades in the last stage of a low pressure steam turbine under the multi-operating conditions by using a numerical simulation method and a contrast and analysis of the overall performance and loss coefficients of the prototype blade, retrofitted blade and bent blade under two operating conditions. The research results show that the retrofitted blade and bent blade can make the reaction of the blade along the blade height be more uniform and through the optimization, the attack angle values along the blade height under the off-design operating conditions are smaller, thus enhancing the effi-