

应用激光多普勒测速仪研究湍流有旋自由射流

(中国华东理工大学) 肖克俭

(德国 Karlsruhe 大学 Engler-Bunte 研究所) B. Lenze P. Habisreuther

摘要: 用激光多普勒测速仪对旋流器产生的强湍流有旋自由射流的速度场和湍流场进行了实验研究。实验结果表明,这种旋流器十分有利于中心回流区的形成,射流的平均速度分布沿轴向快速地衰减,有旋自由射流呈现湍流各向异性,特别是在回流区域中。本文对流场中湍流动量传递的方向进行了讨论。

关键词: 湍流有旋自由射流;激光多普勒测速仪;平均速度分布;湍流流场

中图分类号: TK473.2

1 前言

旋转射流和旋转燃烧火焰在工业上已得到广泛的应用。在燃气轮机的燃烧室中,对燃烧空气施加有旋流动所产生的高燃烧反应密度,有利于提高燃料的着火特性。旋转射流在喷嘴下沿形成的负压力梯度,促使了一个中心回流区的生成,从而导致了很好的空气动力学稳定性,其回流区附近的高强度湍流特性对提高燃料与空气之间的混合强度有十分重要的作用。

近十年来,人们不仅从能源的角度对燃烧装置提出了提高燃烧效率,降低燃料消耗的要求,而且从环境保护的角度提出了降低有害排放物质如 NO_x , CO, 碳黑和碳氢化合物的排放量的另一要求。针对这些要求研究人员提出了各种解决方案,如在金属材料承受温度范围内提高燃烧介质的进口温度^[1],用多段燃烧室^[2]调节空气过剩系数抑制有害物质的形成。新近的研究表明^[3,4],在燃烧室给定的条件下,用有旋流动强化空气和燃料的进口湍流强度,不仅可以提高燃烧室的空气动力学特性,而且也可拓广喷嘴所用的燃料的种类。

为了对数值流动计算和研究燃烧空气动力学稳定性提供依据,本文利用激光多普勒测速仪 [LDA] 对旋流器产生的有旋自由射流进行了实验研究。

收稿日期: 1998-09-03; 修订日期: 1999-02-01

作者简介: 肖克俭 (1963-), 男, 博士研究生, 现在德国斯图加特 (Stuttgart) 大学攻读博士学位, 主要从事湍流流动和燃烧的研究工作。

通讯处: 200237 上海, 中国华东理工大学一村 103 号 202 室 刘宝坤转

2 实验部分

2.1 可调式旋流器和喷嘴

图 1 展示了可调式旋流器^[5]和喷嘴,它是由 16 块铅块组成,其中 8 块等间距地固定在上部嵌板上,可同步转动一定的角度,下部的嵌板上的 8 块铅块则固定不能转动。在铅块之间形成的 8 对径向和切向流道,通过调节上部的铅块的角度,可使以上流道从单纯径向流道向单纯切向流道过渡,从而可以使空气经过此 16 块铅块组成的流道,产生从无旋到最大有旋的流动。

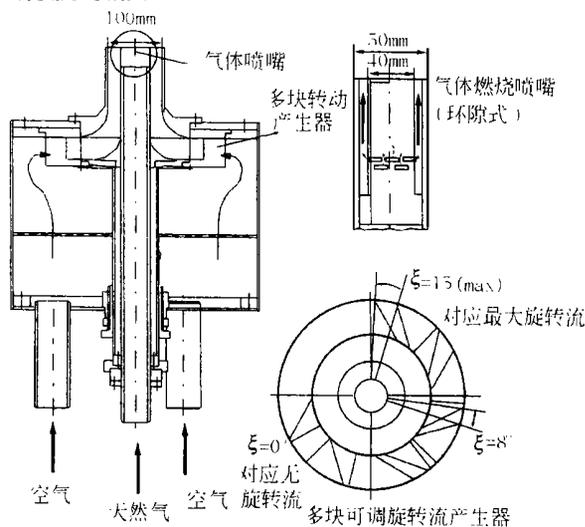


图 1 多块可调式旋转流产生器和喷嘴

2.2 实验条件

实验流程示意图如图 2 所示。空气由空气压缩机提供,天然气来自管道气,它们分别用孔板流量计计量。空气流量为 $400 \text{ N m}^3/\text{h}$,天然气的流量为 $31 \text{ N m}^3/\text{h}$ 。本文对最大空气旋转强度 $S_{0,th} = 1.5$ 的有旋自由射流,在 5 个不同轴向平面上 $x/D = 0.05, 0.75, 1.0, 2.0$ 和 3.0 进行了实验。

2.3 激光多普勒测速仪测试技术和数据处理

本实验采用 TSI公司的 9100-7 双参数激光多普勒测速系统,其中激光光源由 Coherent公司的 4 W 功率氩离子激光器产生。这种激光器工作状态处于 TEM₀₀ 多线模式,可得到波长为 476.5 ~ 694 nm 的激光,其中波长分别为 488 nm 和 514.4 nm 的蓝光和绿光被作为测试工作光。测试的基本原理^[5,6]为:从激光器产生的激光

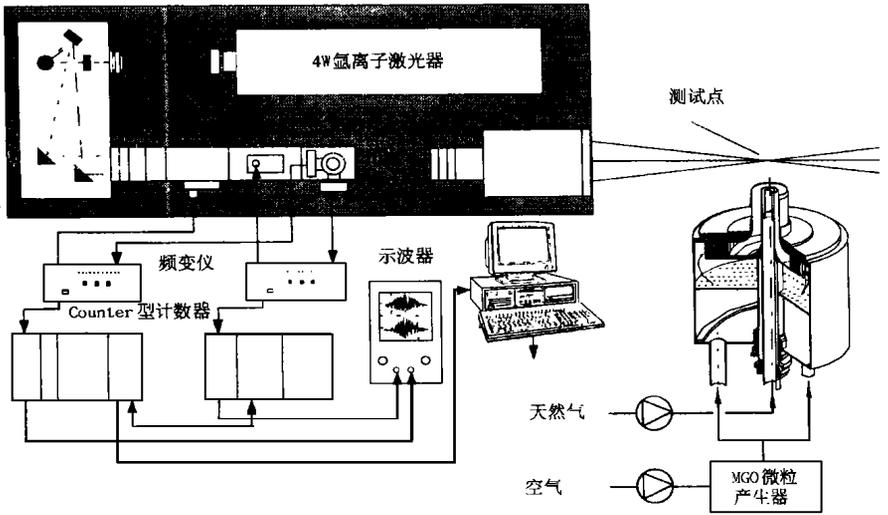


图 2 激光多普勒测速仪系统及实验流程图

首先通过一个由三个反光镜,一个三棱镜和两个极光旋转器组成的分光系统,得到两束相互平行的等功率,相位差为 90° 的单色蓝光和绿光,它们再由各自相应的棱镜分成两对平行光,其中两束蓝光在 X-Z 平面上,两束绿光在平面 Y-Z 上。为了能检测出反向流动,系统采用 Bragg 单元,分别对其中一束蓝光和绿光施加一定的频率位移,最后这两对单色光通过一组聚焦镜,聚焦形成一个形状为椭球体的测试点,在 X-Z 和 Y-Z 平面上产生明暗相间的干涉条纹。平均直径为 1 μm 的微粒示踪介质随空气穿过测试点,从而产生光的闪烁,这种光频信号经捕获进入分光器,由放大器将光信号转变为电信号,再经 Counter 型计数器计数,最后用专用件在 PC 机上进行数据处理。

表 1 激光多普勒测速仪的技术和光学参数

	蓝光	绿光
激光功率和模式	4W, TEM ₀₀	
聚焦透镜焦距 f (mm)	750	
激光束半夹角 °	3.13	
光束间距 s (mm)	22	
间距 d_t (nm)	7.558	7.908
直径 d_m (nm)	0.083	0.087
长度 l_m (nm)	2.569	2.693
频率位移 f_s 与方向	100 m Hz, 向下	

由于激光多普勒测速仪产生不连续的随机信号,因此要求在同一测量点上必须采集大量的数据,保证数据呈现出高斯正态分布的特征。在本实验中,典型的数据速率为 100 kHz。在每个测量点上采集 4096 个样品点可达到上述要求。主要的数据处理公

式如下:

平均速度 u :

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$

湍流脉动速度 [RMS 平均值] u' :

$$U_{RMS} = \sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_i - \bar{u}]^2}$$

湍流剪切应力或湍流脉动速度交互项 $\overline{u'v'}$

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_i - \bar{u}][v_i - \bar{v}]$$

其中 $N = 4096$ 为样品的采集次数, \bar{u} 为平均轴向速度, u_i 为第 i 个样品的轴向速度, u' 为平均平方根湍流脉动速度, $u'v'$ 为湍流剪切应力。

3 结果与讨论

3.1 平均速度

图 3 4 5 为有旋自由射流的平均轴向速度,平均径向速度分布及平均切向速度分布图。从图 3 的平均轴向速度与半径的关系可见,在反向流动和正向流动的界面附近,平均轴向速度的径向速度梯度达到最大,这意味着在此界面附近有很大的正向流与反向流之间的动量交换。

结合图 4 5 可见,有旋自由射流的平均速度分布随着轴向距离的增加呈现出衰减趋势。在喷嘴出口 $x/D = 0.05$ 处的最大平均切向速度可达到 30.5

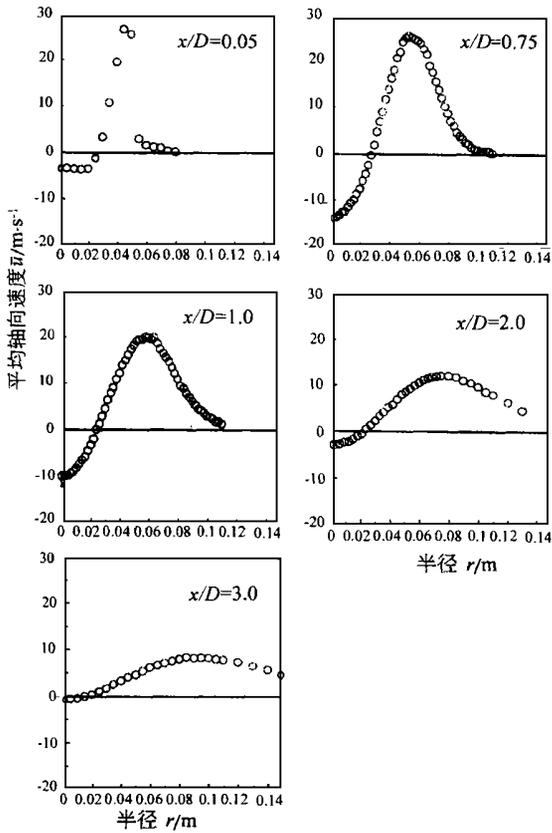


图 3 平均轴向速度的径向分布

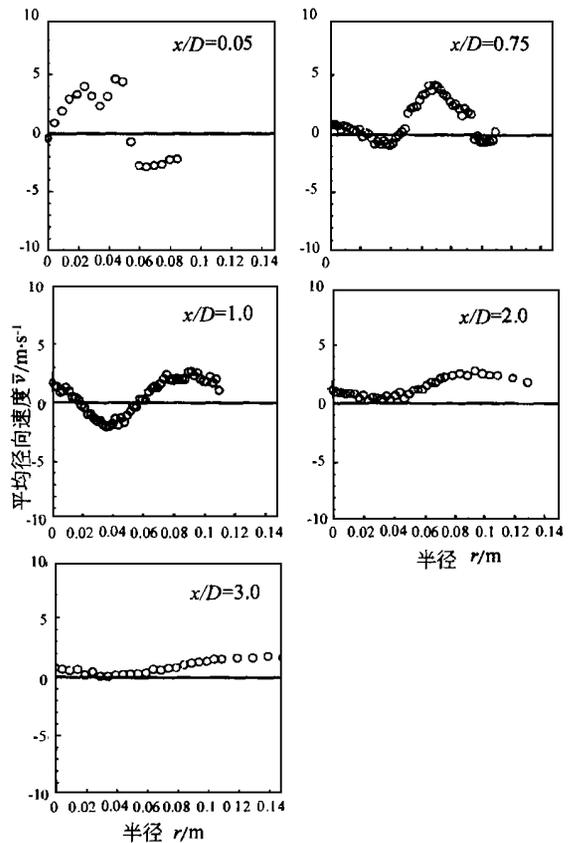


图 4 平均径向速度的径向分布

m/s (图 5), 在三倍于喷嘴直径的下游 $x/D = 3.0$ 处则快速衰减到 4.7 m/s 。由于回流区的形成将环境中的部分流体卷入主流, 从而导致了各平面上的平均速度的最大值沿径向方向外位移。由此可见, 由此旋流器形成的强旋转流体十分有利于中心回流区的形成。

3.2 湍流脉动速度

图 6 显示了三个不同方向上湍流脉动速度与半径之间的关系。从三个脉动速度大小关系上可见, 有旋自由射流在理论旋转强度 $S_{0,th} = 1.5$ 条件下主要呈现出湍流各向异性特征, 在喷嘴轴线附近和远离喷嘴的平面上流动才表现为湍流各向同性。这一实验结果表明, 工程中常采用标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型^[9], 由于未考虑到湍流各向异性, 既使对流动的弯曲性进行修正, 也不能准确地计算回流区的大小和位置。因此基于本实验结果, 对于强旋转流动在建立模型时, 应考虑到以上湍流的各向异性特征, 可采用六方程雷诺应力模型^[10], 这将有助于准确计算流动的速度场和回流区的位置及大小。

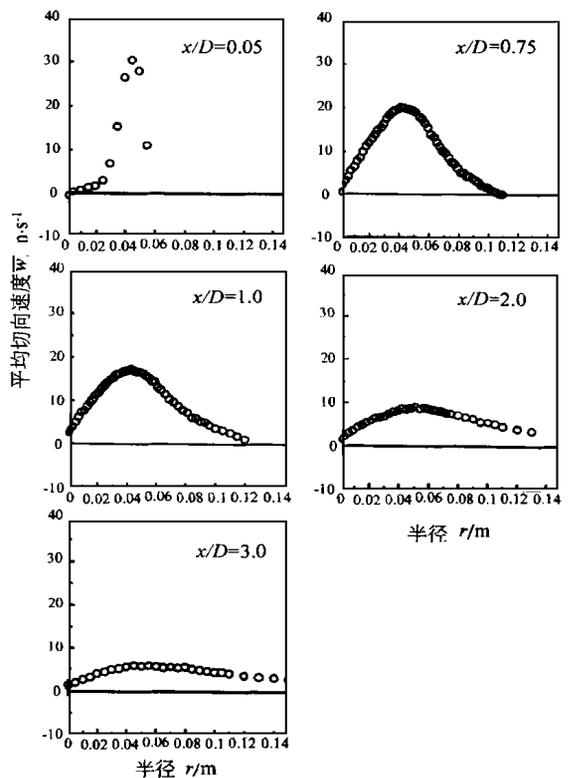


图 5 平均切向速度的径向分布

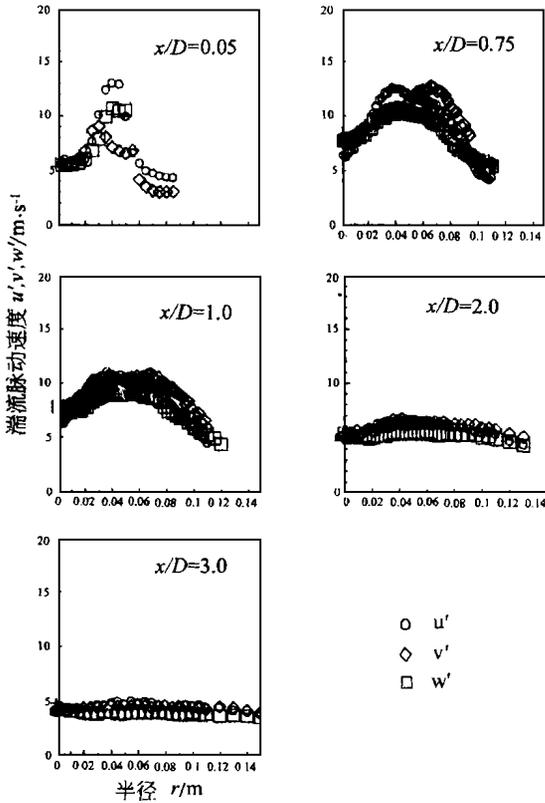


图 6 湍流脉动速度 u', v', w' 的径向分布

3.3 湍流雷诺应力

图 7 反映了在平面 $x/D = 1.0$ 上剪切应力与径向半径之间的关系, 湍流雷诺剪切应力可用来描述轴向动量在径向的湍流

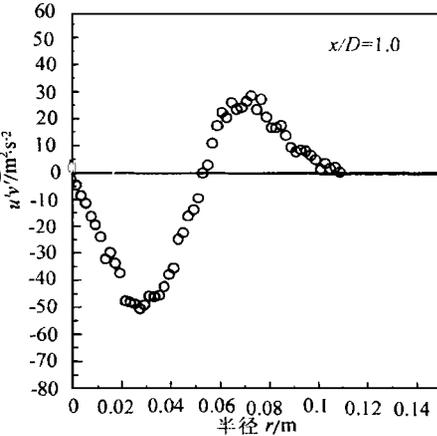


图 7 湍流剪切应力 $\overline{u'v'}$ 的径向分布

传递。图 8 则表示了轴向速度梯度与径向半径之间的关系。

从以上两图可以看到, 当湍流雷诺剪切应力处于局部最小值时, 其速度梯度则达到局部最大值。反之湍流雷诺剪切应力达到最大值时, 则速度梯度处于最小值。这一实验结果表现了与 Boussinesq 公式的一致性。在回流区湍流应力为负值, 速度梯度为正值, 这说明湍流动量将沿径向向对称轴传递, 而在回

流区外部湍流动量将向环境介质中传递。

4 结论

(1) 平均速度分布沿轴向呈现衰减。由于回流区的卷吸作用使得速度达到最大值。

(2) 通过对湍流脉动速度的数量级比较表明, 有旋自由射流在强旋转条件下主要呈现出湍流各向异性特征。

(3) 通过对回流区外的湍流动量传递方向的分析表明, 在回流区内部湍流动量朝轴心传递, 而在回流区外部则向周围环境中传递。

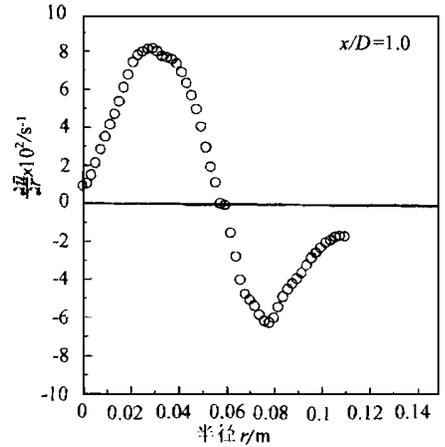


图 8 轴向速度梯度的径向分布

作者对德国 Karlsruhe [卡尔斯鲁尔] 大学 Engler-Bunte 研究所燃烧工程组的全体人员对本项工作的支持与帮助, 以及德国科学文化交流中心 [DAAD] 对第一作者提供的在德参加国际化工、化学物理研讨班的进修机会表示感谢。

参考文献

- [1] Jansohn P. Bildung und Abbau von haltiger Verbindungen, insbesondere von NH_3 und NO in turbulenten Diffusionsflammen. Dissertation, University of Karlsruhe, 1991.
- [2] Weber R and Dugue J. Combustion accelerated swirling flows in high confinements. *Prog. Energy Combustion Sci.*, 1992, 18(3): 349.
- [3] Philipp M. Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Stabilitaetsverhalten mit zentraler Rueckstromzone, Dissertation. University of Karlsruhe, 1991.
- [4] Hoffmann, St. Untersuchungen des Stabilitaetsverhaltens und der Stabilitaetsgrenzen von Drallflammen mit innerer Rueckstromzone, Dissertation, University of Karlsruhe, 1994.
- [5] Leuckel W. Swirl intensities, swirl types and energy losses of different swirl generating devices. IFRF Doc. Nr. G 02/a/16, 1967.
- [6] Durst F, Melling A and Whitelaw J H. Principles and practice of laser doppler anemometry. Academic Press, Lond, 1981.
- [7] Rueck B. Laser-Doppler-Anemometrie. A T Fachverlag GmbH, Stuttgart, 1987.
- [8] Sloan D G, Smith P J and Smooth L D. Modeling of swirl in turbulent flow system. *Prog. Energy Combustion Sci.*, 1986, 12(3): 267.
- [9] Leschziner M A and Rodi W. Computation of strongly swirling axisymmetric free jet. University of Karlsruhe, SFB 80/T/216, 1983.
- [10] Launder B E, Reece R J and Rodi W. Progress in the development of Reynolds stress turbulent closure. *Jour. Fluid Mech.*, 1976, 68(3): 537.

(何静芳 编辑)

〔刊,中〕/Huang Jintao, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 340~ 342

Based on process basic equations, the authors have set up a dynamic characteristics model for single-phase spiral and vertical tube coils. By way of secondary model building obtained is a group of differential equations, which can be solved directly. The comparison of theoretical results and experimental curves attests to the validity of the above-cited model. The results given in this paper may serve as reference data and information during the further study of the dynamic characteristics of once-through boiler spiral tube-coil water walls. **Key words** spiral tube coil, dynamic characteristics, integrated parameters, differential equation group

应用激光多普勒测速仪研究湍流有旋自由射流 = **Research on Turbulent and Swirling Free Jet Stream with the Help of a Laser Doppler Anemometer**〔刊,中〕/Xiao Kejian (East China University of Science & Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 343~ 346

An experimental research is conducted of a movable block swirler-produced velocity field and turbulent flow field of a strongly turbulent and swirling free jet stream. The results of study show that this type of swirler is highly conducive to the formation of a central recirculation zone. The average velocity of the jet stream assumes along the axial direction a rapid decrease with the swirling free jet exhibiting an anisotropic turbulence, especially in the recirculation zone. Also discussed in the paper is the transmission direction of the turbulent flow momentum in the flow field. **Key words** turbulent and swirling free jet, laser Doppler anemometer, average velocity distribution, turbulent flow field

汽轮机通流部分故障诊断的热力判据研究 = **A Study of the Thermodynamic Criteria for the Failure Analysis of Steam Turbine Flow Path Components**〔刊,中〕/Yang Yongping, et al (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 347~ 349

A systematic analysis and study is conducted of the four categories of thermodynamic criteria (i. e., relative inner efficiency, exergy efficiency, equivalent flow path area and included angle of expansion lines) generally applied to the failure diagnosis of steam turbine flow path components. The mechanism of diagnosis and a method of execution are proposed for each kind of criteria. In addition, taking the 200 MW power generating unit of a power plant as a specific example, the authors have performed a quantitative analysis and computation concerning the above-cited criteria. **Key words** steam turbine, flow path components, failure diagnosis, thermodynamic criteria

膜式壁上稳态热流测量技术的误差分析 = **Error Analysis of the Technique for Measuring Steady-State Heat Flux on Membrane Water-walls**〔刊,中〕/Fang Zhaohong, Liu Xiaolei (Shandong Institute of Civil Engineering), Yue Guanxi (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 350~ 352

This paper focuses on a new approach for measuring heat flux density on a solid wall surface by way of solving inverse heat conduction problems. On this basis the authors have by means of a numerical simulation method further discussed from a theoretical perspective the effect of various factors of the heat conduction system itself on the error of this measuring method. Some guidelines concerning the practical use of this method are also presented. **Key words** heat flux measurement, error analysis, number of conditions

用等效热降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响 = **Determination of the Impact on Machine unit Economic Performance of Exhaust Steam Pressure Variation by an Equivalent Enthalpy Drop Method**〔刊,中〕/Li Xiuyun, Yan Junjie, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 353~ 355

With regard to the impact on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation a new quantitative method, i. e., exhaust pressure equivalent enthalpy drop calculation method, is expounded in this paper. On the basis of steam turbine off-design operating conditions the proposed method determines