

# 汽轮机旁路系统仿真建模

聂 雨 张燕平 黄树红 高 伟

(华中科技大学 能源与动力工程学院 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**以汽轮机高压旁路系统作为对象,提出将旁路系统分为节流减压阶段和喷水减温阶段进行分段建模的思路,建立了旁路系统工作过程机理模型。利用设计数据和现场运行数据对仿真模型进行了验证,在不同工况下该模型的计算结果与设计值的相对误差均满足工程精度的要求。模型出口压力计算结果与设计值的相对误差小于 3%,出口温度计算结果与设计值的相对误差小于 1%,能很好地反映汽轮机高压旁路系统的工作过程。该模型作为燃煤发电机组全工况机理仿真模型的一个重要组成部分,为机组启、停和特殊变工况的能耗模拟研究奠定了基础。

**关 键 词:**高压旁路系统,节流减压,喷水减温,仿真模型

中图分类号:TK262;O242

文献标识码:A

## 引 言

对发电机组进行全工况仿真,是研究发电设备动静特性,优化发电机组的设计和运行的有效手段。而机组在启、停阶段的运行特性和能耗特征是研究机组整体性能的重要内容之一。旁路系统作为在汽轮机启停阶段工作的重要辅助装置,其工作性能的优劣直接关系到系统的安全运行,对旁路系统展开仿真建模,深入研究其工作特性有着重要的意义。

研究中对于旁路系统的仿真建模大多简化处理,将其看成一个简单的蒸汽通路系统,通过经验参数来描述旁路系统的工作特性。文献[1]中提出了关于简化处理蒸汽通路的阻力与流量关系这一概念,认为通路前后的压降—流量关系与阻力系数  $K$  相关,其中  $K$  为常数,由通路的粗糙度和尺寸确定;文献[2]中给出了旁路系统的一种数学模型,该模型将旁路系统的流量特性定义为工质入口参数和旁路调门开度的函数关系,将旁路的压降定义为旁路

的压力损失系数和旁路流量的乘积。经验表明,如果能准确的获得旁路系统的相关经验系数的话,按照以上方式简化处理对象的压力流量关系可以满足工程精度的要求。而在实际建模过程中,对旁路阀的阻力系数或者压力损失系数进行准确取值是非常困难的,也缺乏相应的资料可供参考。因此,在得不到准确的旁路系统阻力系数的情况下,利用传统建模方法对旁路系统进行建模存在着一定的局限性,往往导致模型难以建立或模型精度不高。

本研究以汽轮机高压旁路系统作为对象,提出将旁路系统分为节流减压阶段和喷水减温阶段两段进行分段建模的思路,建立了旁路系统工作过程机理模型。利用设计数据和现场运行数据对仿真模型进行了验证,在不同工况下该模型的计算结果与设计值的相对误差均满足工程精度的要求,能很好地反映汽轮机高压旁路系统的工作过程。

## 1 旁路系统数学模型

### 1.1 建模对象及分段思路

汽轮机旁路系统由管道和阀门构成,其中的主要核心设备即汽轮机旁路阀。汽轮机旁路阀是一种蒸汽转换阀,用于将大流量蒸汽进行调节、降压和降温,这 3 个功能均由同一个阀门来实现。阀门型式,阀门的内部装置设计及执行机构的选择均根据工况要求,配置各有不同,其基本型式如图 1 所示。

由图 1 可知,汽轮机高压旁路阀根据工况要求按比例采用多级孔板和衬套孔对入口蒸汽节流降压,蒸汽减温水通过管道引入,再通过阀内的小孔喷出,在旁路阀内部与高速蒸汽混合,完成减温功能。其工作过程是一个非常复杂的热力过程,高温高压蒸汽在极短的时间内完成整个减温减压动作,要想

收稿日期:2012-10-08; 修订日期:2013-04-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2009CB219803);国家自然科学基金资助项目(创新研究群体科学基金)(51021065)

作者简介:聂雨(1986-),男,湖北浠水人,华中科技大学硕士研究生。

完全按照实际状况描述其热力变化状态是非常困难的。因此在对其进行建模的过程中,应根据其基本工作原理将对象进行适当简化。

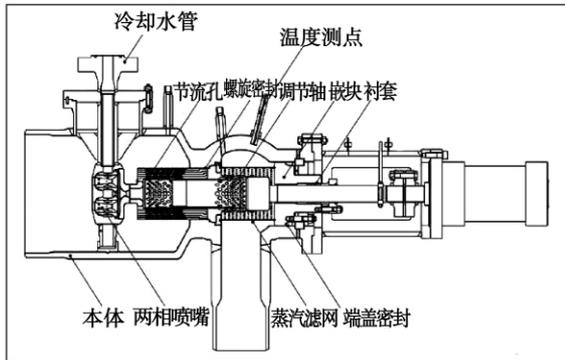


图 1 汽轮机旁路阀

Fig.1 Bypass valves of a steam turbine

根据旁路系统的工作原理,可以首先将整个系统分为两段,即减压部分和减温部分如图 2 所示。其中减压部分即旁路阀对过热蒸汽的节流降压过程,在机组实际启动过程中,过热蒸汽由于流速很快,通过旁路系统的时间非常短暂,因此这一过程与外界发生的热交换可忽略不计,可以将其减压过程简化为基本的绝热节流过程;而减温部分则属于减温水喷入旁路阀中与过热蒸汽的两相混合换热过程。根据这两个基本思路分别建立各部分的模型后,根据实际工作情况中两者的耦合关系,将两段连接起来即可得到旁路系统的整体模型。

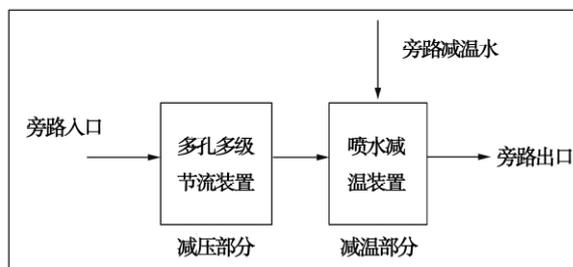


图 2 旁通系统分段示意图

Fig.2 Schematic drawing of the bypass system when divided into two sections

### 1.2 节流减压段模型

对于绝热节流过程,其工作原理即一定流量的流体,当它流经管道内部的节流件时,会在节流件前后产生压差,但节流前后流体的焓值不变,整个过程满足流动连续性方程(质量守恒)和伯努利方程(能量守恒)。根据这两个方程和基本绝热方程可以导

出工质在旁路系统中压差与流量的函数关系,在已知流量的基础上,计算节流件前后的压差<sup>[3-4]</sup>。

对于绝热节流,取节流前后两处参照面,有基本能量方程、连续性方程、绝热方程,分别为:

$$\frac{P_1}{\rho_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_2} \frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{V_2^2}{2g} + Q \quad (1)$$

$$A_1 V_1 \rho_1 = A_2 V_2 \rho_2 \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_2}{\rho_2^\gamma} \quad (3)$$

式中:  $P$ 、 $V$ 、 $A$ —各参照面上的压强(Pa)、流速(m/s)和截面积( $m^2$ );  $\gamma$ —绝热系数;  $\rho$ —蒸汽密度,  $kg/m^3$ ;  $Q$ —摩擦损失, J; 由于整个旁路系统沿程距离很短,蒸汽短时间内高速通过,故此部分在计算中可忽略不计。

联立化简上述方程,可得到旁路系统压差—流量方程为:

$$q_m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cdot \sqrt{\frac{2(1-\lambda^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}) \Delta P \rho_1}{(1-\lambda)(\lambda^{-\frac{2}{\gamma}} - \beta^4)}} \quad (4)$$

式中:  $q_m$ —质量流量,  $kg/s$ ;  $d$ —节流通径(m)与旁路阀门的开度相关,可由阀门的性能曲线得出;  $\beta$ —直径比( $\beta = d/D$ );  $D$ —工作条件下上游管道内径;  $\lambda$ —节流前后压力比;  $\Delta P$ —节流前后差压, Pa。

在旁路系统工作时,旁路蒸汽流量等于锅炉给水流量减去再循环流量和泄漏量,在忽略泄漏的情况下,旁路蒸汽流量可以看作已知量。因此在已知系统流量的情况下,通过整理上式,可将其转化为用于旁路阀节流前后压降计算的非线性方程,求解该方程即可得到节流前后的压力比。

### 1.3 喷水减温段模型

对于旁路系统的喷水减温过程,其基本工作原理是将通过喷嘴雾化后的减温水直接喷入过热蒸汽流,减温水从过热汽中吸收热量,从而使蒸汽的温度降低,达到调节温度的目的<sup>[5]</sup>。该过程属于两相混合换热过程,同样遵循质量守恒和能量守恒,则:

$$G_{out} = G_g + G_w \quad (5)$$

$$G_{out} h_{out} = G_g h_g + G_w h_w + Q_m \quad (6)$$

式中:  $G_g$ 、 $h_g$ —蒸汽流量( $kg/s$ )和蒸汽焓( $kJ/kg$ );  $G_w$ 、 $h_w$ —减温水流量( $kg/s$ )和减温水焓( $kJ/kg$ );  $G_{out}$ 、 $h_{out}$ —出口蒸汽流量( $kg/s$ )和出口蒸汽焓( $kJ/kg$ );  $Q_m$ —热损, J。

由于减温器出口的蒸汽密度随着进口喷水量的变化而变化,所以不能将出口蒸汽的密度作为常数

处理<sup>[6]</sup> ,由两相流相关原理对减温器数学模型的展开化简 ,质量守恒式可转化为:

$$V \frac{d\rho}{d\tau} = G_g + G_w - \rho(G_g + G_w) \rho_i^{-1} \quad (7)$$

其中:  $V$ —减温器容积,  $\text{m}^3$ ;

$$\rho_i = \frac{\rho_g \rho_w (G_g + G_w)}{G_g \rho_w + G_w \rho_g} \quad (8)$$

同样在喷水减温过程中 ,由于流体快速通过 ,在减温器内停留时间短暂 ,故能量守恒式中  $Q_m$  可忽略不计 ,根据质量守恒化简式 ,可将能量守恒式转化为:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{G_g h_g + G_w h_w - (G_g + G_w) h}{\rho V} \quad (9)$$

联立这两项方程 ,即可求解相关出口参数。

## 2 仿真模型建立

### 2.1 对象描述

某厂 660 MW 超超临界机组锅炉型号为: HG - 2001/26.15 - YM3 ,汽轮机型号为: N660 - 25/600/600 ,设有高低压二级串联旁路系统 ,其中高压旁路容量为  $\geq 40\%$  BMCR。要求在机组冷、热态启动和停运时 ,投入旁路系统控制锅炉产生的蒸汽参数和流量 ,使之与汽轮机的要求相一致 ,从而缩短机组启动的时间 ,减少汽轮机循环寿命损耗。高压旁路阀各结构参数已知 ,高压旁路工作技术规范如表 1 所示。

表 1 高压旁路技术规范

Tab. 1 Technical specifications for high pressure bypass pipelines

技术参数	BMCR 工况	冷态	温态	热态	极热态	
		启动	启动	启动		
入口设计值	压力/MPa	25	8.5	8.5	12	12
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	600	410	445	560	580
	流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	$\geq 40\%$ BMCR	210	250	320	350
高旁减温水	压力/MPa	37	36	36	36	36
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	197	130	130	130	130
	流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	129	1.5	10	42	50

### 2.2 仿真模型

基于 MATLAB 平台的 Simulink 是著名的仿真

集成环境之一 ,它为进行系统仿真的工程技术人员提供了极为方便可靠的工具。根据所提出的数学模型 ,结合仿真对象实际情况 ,采用集总参数的方法来建立仿真模型。其内部框架如图 3 所示。

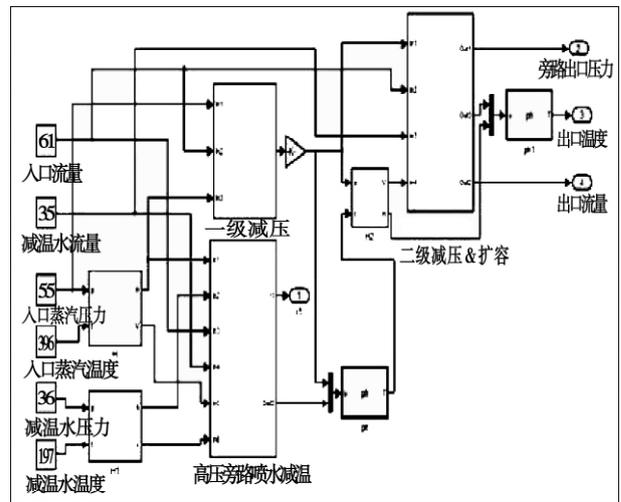


图 3 系统逻辑框架图

Fig. 3 Logic block diagram of a system

由图 3 所示 ,该模型中输入量为旁路入口过热蒸汽和减温水的温度、压强、流量。基于这 3 种基本物理量 ,在模型运算中 ,通过水蒸气性质模块进行物理量转换 ,得到密度、焓值等其他所需参数。对比建模对象的实际工作状态 ,蒸汽在流进和流出笼式阀瓣时先后两次减压 ,并且蒸汽在流出阀瓣时还伴随着旁路出口管大口径的扩容过程 ,在建模时将减压过程分为两级。而由于高压旁路减温水直接喷入阀瓣之中 ,根据数学模型的等焓假设 ,将喷水减温模块并入一级减压 ,然后再同二级减压模块相连 ,即得到整个高压旁路模型。输入量经过模型运算后 ,输出量为旁路出口蒸汽的温度、压强和流量。

### 2.3 结果分析

以高压旁路工作技术规范中的入口设计参数作为初始条件 ,在相应工况下 ,通过所建立的模型进行模拟计算 ,得到的高压旁路出口参数计算值与设计值对比结果如表 2 所示。

由表中所列数据可知 ,在不同工况的情况下利用该旁路模型所计算得到的出口压力计算值与设计值之间的最大相对误差为 3% ,而出口温度的计算值与设计值之间的相对误差均小于 1% ,可以认为该计算结果与设计值之间的相对误差较小 ,满足高压旁路运行工程精度要求。

表 2 模型计算结果与设计值对比

Tab. 2 Comparison of the results calculated by using the model with the design values

技术参数	BMCR	冷态启动	温态启动	热态启动	极热态	
出口压力	设计值/MPa	6.315	1.4	1.4	1.7	1.7
	计算值/MPa	6.384	1.440	1.358	1.683	1.717
	相对误差/%	1.1	2.8	3	1	1
出口温度	设计值/℃	383.9	345	350	360	370
	计算值/℃	386.3	345.3	349.2	360.2	368.9
	相对误差/%	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	0.3

为了进一步验证该分段模型对于机组启动过程模拟的精度,从现场 DCS 历史数据中,选择一次机组冷态启动过程作为研究对象进行分析。该过程旁路运行方式如下: 机组点火后,高旁阀首先保持在 20% 开度直到主汽压慢慢升至最低压力设定值(1 MPa) 为止,此后高旁阀逐渐开大而主汽压维持在 1 MPa,等高旁阀开度增加到最大开度(60%) 时转为滑压方式,主汽压将滑升至蒸汽的冲转压力(8.8 MPa)。通过喷水调节高旁出口汽温不超过设定值,机组启动时该设定值应根据 DEH 给出的再热汽温定值而变化,进行喷水调节。

旁路进出口均分布有温度和压力测点,蒸汽流过旁路前后的温度和压力变化均可从 DCS 系统中得到。从旁路投入开始到旁路稳定运行这一阶段,按等时间间隔的选取几组旁路进出口测点数据,利用分段模型对所取现场数据进行计算,得到的结果如图 4、图 5 所示。图中旁路入口参数曲线为现场入口测点数据,出口参数曲线为分段模型计算结果和现场实测值的对比图形,从数据点对比和曲线趋势对比中可以看到,分段模型的计算结果与实测值基本吻合,由此可以认为所建立的模型具有较高的精确度。

### 3 结 论

(1) 根据将旁路系统分为节流减压阶段和喷水减温阶段两段进行分段建模的思路,利用理想热力

学状态和等焓假设的思想建立了汽轮机旁路系统工作过程机理模型。利用该模型进行仿真计算,在不同工况的对应输入情况下,模型出口压力计算结果与设计值的相对误差小于 3%,出口温度计算结果与设计值的相对误差小于 1%,计算结果满足工程精度要求。

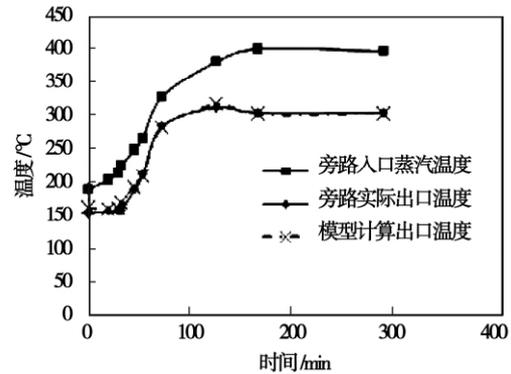


图 4 旁路出口温度计算

Fig. 4 Temperature calculation at the outlet of the bypass

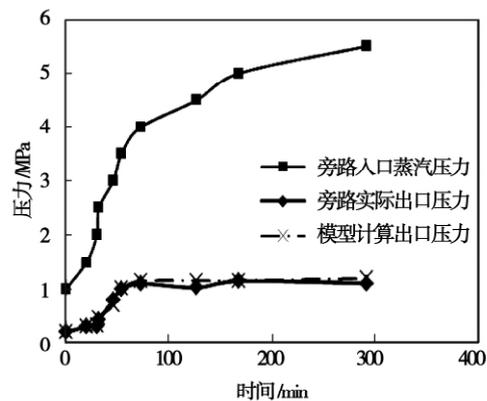


图 5 旁路出口压力计算

Fig. 5 Pressure calculation at the outlet of the bypass

(2) 取现场 DCS 运行数据作为输入值,利用该模型对旁路系统冷态启动过程进行模拟计算,并将所得结果与 DCS 实测数据进行对比,模型计算结果与 DCS 数据基本吻合。

(3) 通过该模型对旁路系统进行模拟计算研究,可以对现场运行人员提供运行指导。并且该模型可作为燃煤机组全工况仿真模型平台的一部分,参与对整个机组的启、停和某些特殊变工况阶段的

计算研究,进而分析旁路运行对电厂其他设备的能耗影响。

参考文献:

[1] 倪维斗,徐向东,李政. 热力系统建模与控制的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
NI Wei-dou, XU Xiang-dong, LI Zheng. Several problems relating to modeling and controlling of a thermal system [M]. Beijing: Science Press, 1996

[2] 吕崇德,任挺进,姜学智. 大型火电机组系统仿真与建模 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
LU Chong-de, RENG Ting-jin, JIANG Xue-zhi. Simulation and modeling of a large-sized thermal power generator unit system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

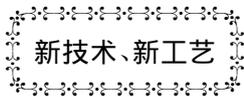
[3] 杨友涛,徐英华,王子纲. 气体流量计 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.  
YANG You-tao, XU Ying-hua, WANG Zi-gang. Gas flow rate meters [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.

[4] 张奇,王世忠,王怀彬. 机组旁路系统减温减压装置热力特性的计算机分析 [J]. 热能动力工程, 1997, 9(5): 369 - 373.  
ZHANG Qi, WANG Shi-zhong, WANG Huai-bin. Computer-aided analysis of the thermodynamic characteristics of a pressure and temperature reduction device installed in a steam turbine unit by-pass system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 9(5): 369 - 373.

[5] 宁德亮,庞凤阁,高璞珍. 喷水减温器动态仿真模型的建立及其解法 [J]. 核动力工程, 2005, 6(3): 280 - 283.  
NING De-liang, PANG Feng-ge, GAO Pu-zhen. Dynamic simulation modeling and solution seeking of a water spraying desuperheater [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 6(3): 280 - 283.

[6] 闫素英,韩伟实. 减温减压器动力学模型研究 [J]. 能源技术, 2003, 24(6): 231 - 234.  
YANG Su-ying, HAN Wei-shi. Study of the dynamic modeling for pressure and temperature reducing devices [J]. Energy Source Technology, 2003, 24(6): 231 - 234.

(丛敏 编辑)



### 受控扩压技术使压气机效率提高 1% - 3%

据《50 Years-Zorya-Mashproekt》论文集报导,由于采用了受控扩压技术,已使 UGT25000 驱动用燃气轮机低压压气机的效率提高 1% - 3%。

乌克兰 NPO《Zorya-Mashproekt》(《曙光-机器设计》科学生产联合体)的 UGT25000 驱动用燃气轮机(27.1 MW 功率,36.5% 效率)是高性能的燃气轮机得到广泛应用,主要用于天然气的压缩和泵输送。

对于该燃气轮机装置的 9 级低压压气机,采用特殊优化的扩压叶型,重新设计最后四级。

区别于常用基于叶型中弧线的造型方法,受控扩压保证大幅度地降低叶型间槽道出口流动的剩余梯度,防止附面层分离,大幅度地降低叶栅内流的不稳定性,从而减少能量损失。

三维粘性正问题计算得出的升级改进的各级气动特性证明了设计性能。

在第二阶段,通过试验验证了重新设计的四级和整个低压压气机的气动力性能。

结果表明,采用受控扩压叶型的重新设计,让 UGT2500 9 级低压压气机在额定设计工况下等熵效率提高 1% - 3%,并使其在低工况下稳定性裕度提高 10% - 15%。

(吉桂明 摘译)

水蒸气喷射泵数值模拟研究进展 = **Advances in the Study of the Numerical Simulation of Steam-jet Pumps**

[刊 汉]ZHANG Jun-qiang ,LIAO Guo-jin ( College of Mechanical Engineering & Automation ,Liaoning University of Technology ,Jinzhou ,China ,Post Code: 121001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 , 28( 4) . - 331 ~ 335

A survey of the research findings in the study of the numerical simulation of steam-jet pumps was given from the following two aspects ,namely ,thermodynamic models and dynamic models. It has been noted that the traditional one-dimensional numerical simulation based on the thermodynamics has a limited precision due to a large number of assumptions having been made and shows its incapability in detailed study of the complex physical phenomena such as condensation and shock waves in the pumps. In the contrast ,to conduct a numerical simulation through establishing dynamic models has its conspicuous leading edges. However ,up to date ,the study of the condensation and shock waves etc. complex physical phenomena is rare and in the depth not enough. The authors have done some research work in this regard and made an analysis and looked into its prospects in combination with the work undertaken by them ,thus laying a foundation for the future research and applications. **Key words:** steam-jet pump ,numerical simulation ,thermodynamic model ,dynamic model

汽轮机旁路系统仿真建模 = **Simulation and Modeling of the Bypass System of a Steam Turbine** [刊 汉]NIE

Yu ,ZHANG Yan-ping ,HUANG Shu-hong ,GAO Wei ( College of Energy Source and Power Engineering ,Central China University of Science and Technology ,Wuhan ,China ,Post Code: 430074) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 4) . - 336 ~ 340

With the high pressure bypass system of a steam turbine serving as the object of study ,presented was an idea to model section by section the bypass system by dividing it into the throttle and pressure reduction section and water-spraying temperature reduction section. On this basis ,the authors have established a model governing the working mechanism of the bypass system. By making use of the design data and those obtained from the on-the-spot operation ,the simulation model was verified. The relative error between the calculation result of the pressure at the outlet calculated by using the model and the design value is less than 3% while that of the temperature is less than 1% . The relative errors between the calculation results and the design values all meet the requirements for the engineer-

ing precisions and reflect very well the working process of the high pressure bypass system of the steam turbine. As an important integral part of the model for simulating the mechanism of coal-fired power generator units at the full load ,the model under discussion has laid a foundation for simulating and studying the energy consumption under the start-up ,shutdown and special off-design operating conditions of the units. **Key words:** high pressure bypass system ,throttle and pressure reduction ,water-spraying temperature reduction ,simulation model

涡轮叶片冷却通道换热特性研究 = **Study of the Heat Exchange Characteristics of the Cooling Passages of a Turbine Blade** [刊 ,汉] YANG Zi-long ( China Warship Academy ,Beijing ,China ,Post Code: 100192) ,XIAO Wei-yan ,WANG Zhi-qiang ,YU Shun-wang ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 4) . - 341 ~ 344

With the cooling flow passage scheme prepared for the high pressure turbine blades of a marine gas turbine newly designed serving as the object of study ,by adopting the full three-dimensional flow-heat coupling method studied was the influence of different cooling passage forms on the heat exchange in the blades of the turbine. A total of three schemes were compared. The merits of the Scheme I lie in its eliminating the high temperature zone on the top boss of the blade and making the average temperature in a section and cooling effectiveness acceptable. The Scheme II makes full use of the temperature difference between the cooling air and metallic surface and makes the cooling effectiveness to the blades and the average temperature distribution in a section to be relatively well. The Scheme III intensifies the heat exchange in the middle of the blades. It has been found that the passage form remarkably affects the temperature distribution on the surface of the blades and at the same time also influences the cooling effectiveness of the blades and the distribution of the average temperature along the blade height. The foregoing can offer a theoretical basis for choosing appropriate cooling passages of the turbine blades. **Key words:** turbine ,cooling blade flow-heat coupling ,heat exchange characteristics ,snake-shaped passage

环境温度对燃气轮机分布式供能系统优化配置的影响 = **Influence of the Ambient Temperature on the Optimized Configuration of a Gas-turbine-based Distributed Energy Supply System** [刊 ,汉] YANG Yun ,ZHANG Shi-jie ,XIAO Yun-han ( Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Advanced Energy and Power ,Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of