

# 涡轮盘腔内部流动和换热机理研究

李 文 张冬阳 何 平 谭春青

(中国科学院工程热物理研究所 北京 100190)

摘 要: 首先分析了旋转雷诺数  $Re_\varphi$ 、预旋比  $\beta_0$  以及湍流参数  $\lambda_T$  对带有预旋的转静系盘腔内流动及换热特性的影响, 重点考察了  $Re_\varphi$ 、 $\beta_0$  和  $\lambda_T$  对轮盘中心处预旋比  $\beta_\infty$ 、阻力系数  $\xi$  的影响, 并详细分析了盘腔内部流动结构, 发现惯性力和离心力占不同主导地位是诱发不同的流动结构的主要原因; 另外得到了旋转壁面局部 Nusselt 数沿径向的分布规律及影响因素; 最后研究了无量纲质量流量  $c_w$  对无量纲温度  $\theta$  的影响, 发现  $\theta$  与  $c_w$  基本满足对数关系。

关 键 词: 预旋; 转静系; 换热; 旋转雷诺数; 预旋比; 湍流参数

中图分类号: TK474.7

文献标识码: A

## 符号说明

$a$ —轮盘内径/m  
 $b$ —轮盘外径/m  
 $s$ —动静盘距离/m  
 $G$ —间隙比,  $G = s/b$   
 $L$ —出口喷嘴长度/m  
 $d$ —出口喷嘴直径/m  
 $\lambda_T$ —湍流参数,  $c_w Re_\varphi^{-0.8}$   
 $q_w$ —壁面热流/ $W \cdot m^{-2}$   
 $R$ —恢复因子  $R = Pr^{1/3}$   
 $Pr$ —普朗特数  
 $\bar{x}$ —无量纲半径,  $\bar{x} = r/b$   
 $c_w$ —无量纲质量流量  $\dot{m}_p / \dot{m}_b$   
 $r$ —半径/m  
 $v$ —速度/ $m \cdot s^{-1}$   
 $\Omega$ —转盘转速/ $s^{-1}$   
 $Re_\varphi$ —旋转雷诺数  $\rho \Omega b^2 / \mu$   
 $\mu$ —流体运动粘性系数/ $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$   
 $\rho$ —流体密度/ $kg \cdot m^{-3}$   
 $\beta$ —预旋比  $v_\varphi / \Omega r$   
 $Nu$ —努谢尔特数  $q_w r / k(T_{ad,w} - T_w)$   
 $\xi$ —阻力系数  $(P - P_p) / (0.5 \rho \Omega^2 r_p^2)$   
 $T$ —温度/K  
 $T_{ad,w}$ —绝热壁温/K  $T_a - (1 - R) U^2 / 2C_p$   
 $\theta$ —无量纲温度  $(T_{t,b} - T_w) / (T_{t,p} - T_w)$

$r_p, r_b$ —进出口半径/m  
 $z$ —离静盘距离/m  
 下标  
 p—入口喷嘴  
 b—出口喷嘴  
 r—径向  
 z—轴向  
 $\varphi$ —周向  
 $\infty$ —中心面( $z/s = 0.5$ )  
 w—旋转壁面  
 a—空气  
 ad—绝热  
 t—总参数

## 引 言

随着涡轮前温度的提高, 现代燃气轮机和航空发动机对高温高转速下工作的涡轮轮盘性能要求更加苛刻, 因此开展涡轮盘腔中流动和传热研究具有十分重要的意义。首先涡轮盘的温度分布影响到涡轮盘的强度, 与涡轮的安全性有重大关系; 其次盘腔中的流动与换热会影响冷却气体流量大小, 直接关系到涡轮气动性能。

为了保证现代燃气轮机和航空发动机的安全性, 减少冷却及密封气体流量, 提高效率, 在实际设计中必须了解盘腔内流场的流动和传热特性。国外很早就重视了这方面的数值分析和实验研究工作, 如 Chew 较早就进行了旋转盘腔内部流动和换热的数值模拟方面的研究<sup>[1]</sup>, Metzger 等人则最早应用热色液晶测温技术对带有冲击冷却的旋转轮盘进行测量实验<sup>[2]</sup>, Ong 和 Owen 利用边界层方法研究径向通流旋转盘腔内部流动与换热特征<sup>[3]</sup>, Pilbrow 等人针对旋转盘腔开展了换热的实验和数值计算研究<sup>[4]</sup>, 并提出其流动结构主要受预旋比( $\beta_0$ ) 以及湍流参数( $\lambda_T$ ) 主导控制。国内学者也对压气机、涡轮

收稿日期: 2010-08-16; 修订日期: 2010-10-18

作者简介: 李文(1982-) 男, 安徽临泉人, 中国科学院工程热物理研究所博士研究生。

轮盘冷却做了相关实验和计算分析<sup>[5]</sup>。

张东阳通过实验和计算对轮盘表面温度及应力分布进行研究<sup>[6]</sup>，以了解各相关参数对涡轮轮盘安全性能及寿命的影响。本研究通过计算验证、分析其实验结果，并进一步对其内部流动结构及轮盘表面换热特性进行详细研究。

### 1 研究对象及数值计算方法

预旋喷嘴就是一个带有预旋的膨胀喷嘴，其主要作用是降低冷气来流的静温和相对总温，同时能降低冷气流对涡轮盘的气动阻力，这些都是有利的方面，但不利的是导致换热系数下降<sup>[7]</sup>。可见轮盘内部流动及换热是比较复杂的过程，因此有必要开展更深入的分析研究。

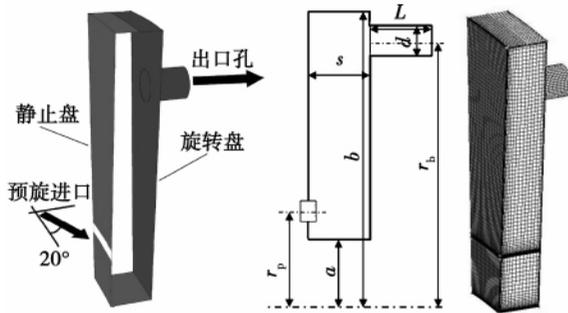


图 1 计算模型及网格

图 1 是装置结构： $b = 0.216 \text{ m}$ 、 $a/b = 0.67$ 、 $G = 0.051$ 。静子具有 24 个圆形进气喷嘴，转子有 60 个圆形出口孔， $d = 8.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 $L/d = 1.25$ 、 $\alpha_p = 0.74$ 、 $\alpha_b = 0.93$ ，出口孔和进气喷嘴面积比为 2.9。由于旋转盘腔在旋转过程中的流动结构具有周期性变化特征，实际计算模型进行简化：计算域选取为旋转盘腔的 1/60，在保证进气面积相等的情况下，进口 24 个进气喷嘴改为连续的进口槽。

数值计算采用商业软件 CFX 进行，前处理结构化网格由 ICEM 生成，求解与后处理采用 CFX11。CFX11 计算程序采用有限体积法及全隐式求解技术求解三维定常  $N-S$  方程，整个定常流动区域采用时间推进方法。湍流模型采用 SST 模型，SST 湍流模型是基于  $k-\omega$  模型的一种改进模型，它能用于模拟非各向同性的流动，与  $k-\epsilon$  模型相比，SST 模型对于近壁流动的刻画更加完善，但是它要求近壁第一层网格的  $y^+$  值很小，必须在 1 左右，因此需要更多的计算资源和计算时间。

进口条件给定质量流量、流动方向及总温与湍流度，出口条件给定静压力，壁面为无滑移边界条件，对于热传递计算根据实验条件选择<sup>[8,10]</sup>，静止轮盘壁面表面为绝热边界条件，旋转壁面定温  $20^\circ\text{C}$ ，进口总温保持为  $55^\circ\text{C}$ ，环境温度为  $20^\circ\text{C}$ 。

网格划分：整个盘腔采用结构化网格。冷气进口、出口网格相对比较细密，贴近转盘为满足 Ekman 边界层的特点，布置间逐渐增大的网格，第一层网格布置在距壁面  $0.004 \text{ mm}$  处，以比例因子 1.2 增长，流体计算域网格节点约 14 万。

### 2 旋转轮盘空腔内部流动分析

#### 2.1 流场速度和压力分布

首先对流场内部流动结构进行分析。取轴向方向为坐标轴  $z$  方向， $z/s = 0.5$  处为无穷远处，此处无量纲中心预旋比为  $\beta_\infty$ ，计算盘腔内部流动压力分布，计算工况选取相关实验工况如表 1 所示<sup>[8~9]</sup>。

表 1 各工况点条件

	工况 1	工况 2	工况 3
$Re_e$	$0.8 \times 10^6$	$0.8 \times 10^6$	$0.8 \times 10^6$
$\lambda_T$	0.127	0.235	0.369
$\beta_p$	0.52	0.95	1.49

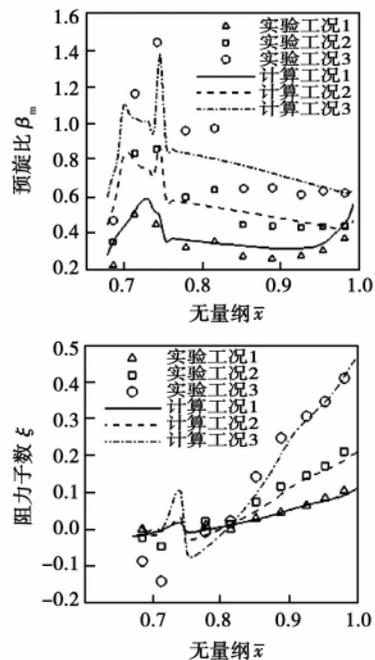


图 2 各工况条件下预旋比、阻力系数计算和实验结果对比

图 2 为各工况条件下中心预旋比、阻力系数的计算结果和实验结果对比。从图中可以看出: 中心预旋比沿径向变化, 实验结果中最大值出现在进口半径  $r_p$  处, 计算结果也很好地预测了这一特征, 且最大误差出现在喷嘴进口前后, 分析原因得知, 这主要是由于计算模型的简化造成的, 且随着  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  的增加  $\beta_\infty$  在整个半径区域增加较为明显, 这是由于  $z/s = 0.5$  处远离旋转壁面, 流体速度受射流影响较为明显; 而阻力系数分布基本满足转静系理论上静压随半径单调增加的规律, 仅在进口处由于扰动增加而局部改变了单调性, 从总体上看阻力系数随预旋比、湍流参数的增加而增加。

2.2 涡轮盘腔内部流场分析

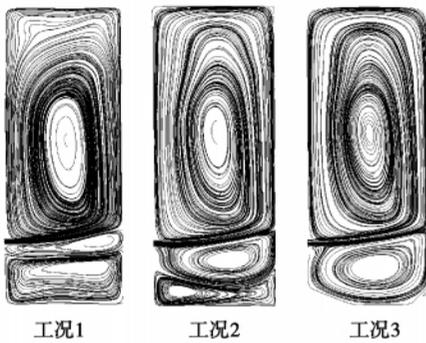


图 3  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  对盘腔内部流场的影响

图 3 为空腔内部流动结构随  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  的变化。首先分析  $r > r_p$  区域内大旋涡形成的原因, 由于动轮盘的旋转, 在泵效应的作用下, 工质沿动轮盘向径向“泵”出, 腔内压力下降, 促使静轮盘侧流体逆径向流动, 从而形成一个较大的涡。从图可以看出, 在

$Re_\phi = 0.8 \times 10^6$  且不变的情况下,  $r > r_p$  范围“泵效应”和入口射流惯性力作用方向一致, 即均使流线逆时针流动, 且此时离心力作用足够强, 因此在离心力和惯性力的共同作用下使得整个上半区被单个核心涡占满; 而在  $r < r_p$  范围内, “泵效应”和入口射流惯性力作用方向相反, 此时要看离心力和惯性力相对大小, 在工况 1 时, 入口惯性力作用较小, 占有主导地位, 离心力所诱导涡较大位于低半径处, 随  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  的增加, 惯性力随之增强, 惯性力所诱导涡逐渐向低半径处膨胀, 至工况 3 时, 离心力所诱导涡消失, 整个  $r < r_p$  区域被单个涡占满, 此时整个通道仅有两个旋涡, 分布在进口上下两侧。

图 4 为  $\beta_p$ 、 $\lambda_T$  恒定的情况下  $Re_\phi$  对空腔内部流动结构的影响, 其中  $Re_\phi = 0$  工况下为无预旋垂直进气。可以看出, 在无旋转时, 主流射流在压力梯度作用下, 流线向高半径方向流动, 此时入口射流在整个流场内部诱发四个较大旋涡, 其中  $r > r_p$  范围有 3 个,  $r < r_p$  范围有一个。随着  $Re_\phi$  的增加, 此时盘腔内流体不但受到主流惯性力作用, 还要受到离心力和哥氏力的作用,  $r > r_p$  处旋涡在主流惯性力和离心力的共同作用下被压缩, 向高半径方向缩小, 至  $Re_\phi = 0.4 \times 10^6$  时, 最上面两个旋涡在消失, 与此同时内径处“泵效应”逐渐增强, 内径处生成由离心力所诱导涡, 并随着离心力增加, 这种诱导涡逐渐向高半径方向膨胀; 至  $Re_\phi = 0.8 \times 10^6$  基本达到最大, 而原有的由主流惯性力所诱导涡被“压扁”, 整个通道主要由 3 个涡组成, 其中  $r > r_p$  范围有一个,  $r < r_p$  范围有两个。

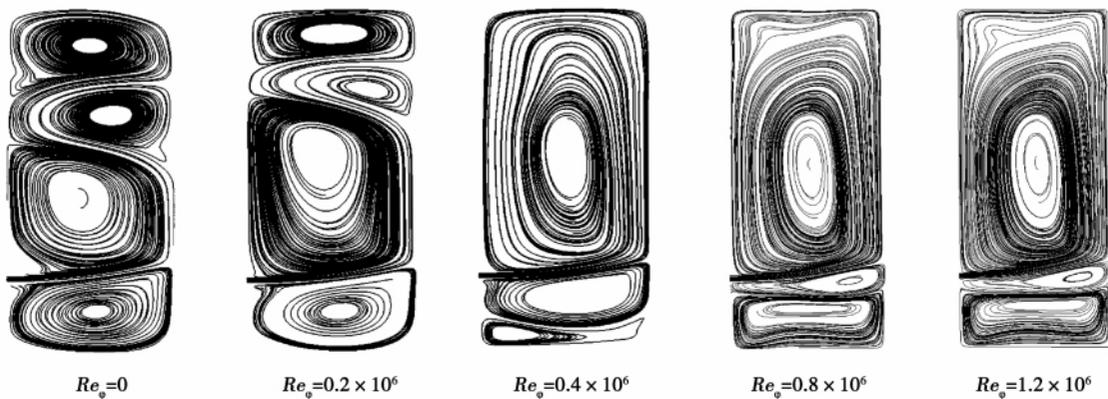


图 4  $Re_\phi$  对盘腔内部流场的影响

### 3 旋转轮盘空腔内部换热分析

#### 3.1 局部 $Nu_r$ 的影响参数

靠近旋转壁面两出口孔中间取径向线,研究  $Nu_r$  沿该径向线随参数  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  以及  $Re_\phi$  的变化规律,各工况点条件如表 2 所示<sup>[10]</sup>。图 5 为  $Nu_r$  沿径向分布的实验和计算结果对比,可以看出,计算结果和实验结果总体吻合较好,在  $r > r_p$  范围内无论是整体分布趋势还是数值大小都吻合较好,仅在  $r = r_p$  附近计算结果较实验结果出现一个更大的峰值。究其原因,这一现象主要由于计算模型简化而造成的。

表 2 各工况点条件

	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
$Re_\phi$	$0.8 \times 10^6$	$1.2 \times 10^6$	$0.8 \times 10^6$	$1.2 \times 10^6$
$\lambda_T$	0.125	0.125	0.36	0.36
$\beta_p$	0.52	0.52	1.4	1.4

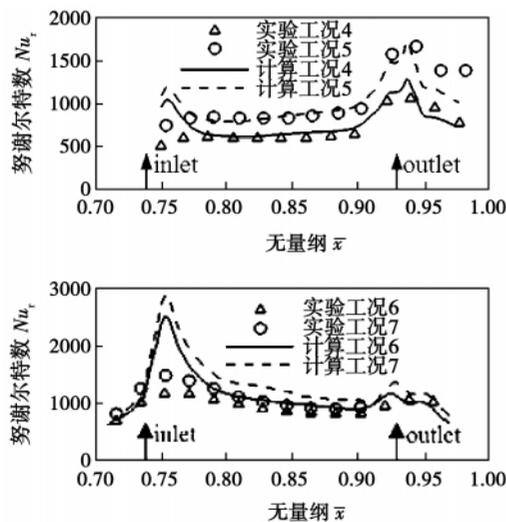


图 5 各工况条件下  $Nu_r$  沿径向分布计算和实验结果对比

从  $Nu_r$  沿径向线分布规律看:在定  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  情况下,  $Nu_r$  随  $Re_\phi$  的增加而增加,且在  $r_b$ 、 $r_p$  处均出现两个峰值,第一个峰值由于进口来流对旋转壁的冲击造成的,而第二个峰值则是由于出口处出现较大切向流所致,且此时在  $r_p < r < r_b$  范围内其内部流动结构如图 4 所示,惯性力和离心力均具有对换热效应强化的作用,定工况下,离心力随半径增加而逐渐增大,而惯性力随半径增加由于远离射流入口导致逐渐降低;其中工况 4 和工况 5 两条  $Nu_r$  分布线形状基本一致,从喷嘴进口至出口孔处峰值之间,  $Nu_r$  随

半径增加逐渐增加,这主要由于此时由离心力起主导作用,且随着半径增加离心力逐渐增大促进换热导致  $Nu_r$  逐渐增加。工况 6 和工况 7 两条  $Nu_r$  分布线形状也基本一致,从喷嘴进口峰值至出口孔处峰值之间  $Nu_r$  随半径增加逐渐减小,分析发现这主要由于此时  $\lambda_T$ 、 $\beta_p$  值较大即导致惯性力作用较强,随着半径的增加,离心力的增加不足以抵消惯性力的减小导致  $Nu_r$  逐渐减小,直至出口孔出现第二个峰值。

#### 3.2 $c_w$ 对 $\theta$ 的影响

$\theta$  是衡量出口温度高低的一个无量纲量,影响  $\theta$  的参数较多,如文献[11]进行了  $\beta_p$  对  $\theta$  影响的理论和数值分析,而无量纲质量流量  $c_w$  对  $\theta$  的影响规律有待开展研究。

依据表 2 计算工况 4、工况 5,保持  $\beta_p = 0.52$  恒定不变,分别在  $Re_\phi = 0.8 \times 10^6$ 、 $Re_\phi = 1.2 \times 10^6$  工况下改变  $c_w$ ,以研究  $c_w$  对  $\theta$  的影响,计算结果如图 6 所示,从图中可以看出,在不同  $Re_\phi$  下,轮盘出口平均温度随着质量流量增大而降低,在本研究范围内,无量纲出口温度  $\theta$  与无量纲质量流量  $c_w$  基本满足对数关系,且变化斜率随  $Re_\phi$  的增加而减小,即  $Re_\phi$  越大  $\theta$  随  $c_w$  的增加而降低更快。

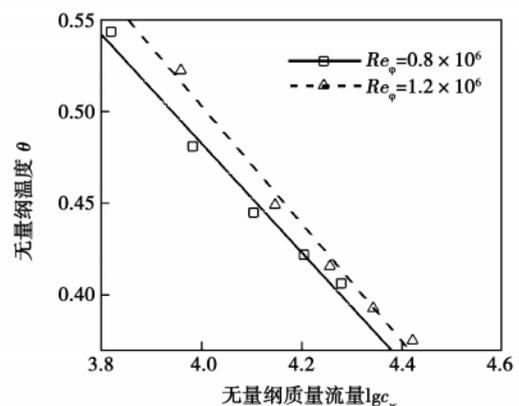


图 6 无量纲出口温度随无量纲质量流量的变化趋势

### 4 结 论

通过对带有预旋的转静系统的计算结果和实验结果的对比研究,得到如下结论:

- (1) 对于装置的中心预旋比  $\beta_\infty$ 、阻力系数  $\xi$  分布计算结果和实验测量结果吻合良好,说明计算方法可行,具有一定参考价值。 $\beta_\infty$  在进口半径  $r_p$  处存在一个最大值,而  $\xi$  沿径向的分布基本满足理论上

静压随半径单调增加的规律,仅在进口处由于扰动增加而局部改变了单调性。

(2) 在不同的湍流参数 $\lambda_T$ 、预旋比 $\beta_p$ 、旋转雷诺数 $Re_\phi$ 下,空腔内部显示出复杂的流动结构变化,分析发现这主要由于惯性力和离心力占不同的主导地位及不同的作用效果造成的。

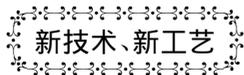
(3) 对局部 Nusselt 数 $Nu_r$ 的实验和计算结果总体吻合较好,在定 $\lambda_T$ 、 $\beta_p$ 工况下, $Nu_r$ 随 $Re_\phi$ 的增加而增加;在定 $Re_\phi$ 工况下, $Nu_r$ 随 $\lambda_T$ 、 $\beta_p$ 的增加而增加。

(4) 在 $\lambda_T$ 、 $\beta_p$ 较小的工况下, $Nu_r$ 在进出口之间的范围内沿径向是递增的;在 $\lambda_T$ 、 $\beta_p$ 较大的工况下, $Nu_r$ 在进出口之间的范围内沿径向是递减的。

(5) 无量纲出口温度 $\theta$ 与无量纲质量流量 $c_w$ 基本满足对数关系,且变化斜率随 $Re_\phi$ 的增加而减小,即 $Re_\phi$ 越大 $\theta$ 随 $c_w$ 的增加而降低更快。

#### 参考文献:

- [1] CHEW J W. Computation of flow and heat transfer in rotating cavities[D]. United Kingdom: University of Sussex, 1982.
- [2] METZGER D E, BUNKER R S, BOSCH G. Transient liquid crystal measurement of local heat transfer on a rotating disk with jet impingement[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113: 52-59.
- [3] ONG C L, OWEN J M. Prediction of heat transfer in a rotating cavity with a radial outflow[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113: 115-122.
- [4] PILBROW R, KARABAY H, WILSON M, et al. Heat transfer in a "Cover-Plate" pre-swirl rotating-disc system[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121: 249-256.
- [5] 田淑青, 陶智, 丁水汀, 等. 轴向通流旋转盘腔内换热的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 755-760.
- [6] ZHANG D, VARAH S, LOCK G D, et al. Thermal modelling of heat transfer in a rotating disc due to a superposed flow of cooling air[R]. IHTC13, Sydney, Australia, 2006.
- [7] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] YAN YOUYOU, GORD MAHMOOD FARZANEH, LOCK GARY D, et al. Fluid dynamics of a pre-swirl rotor-stator system[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125: 641-647.
- [9] PAUL LEWIS, MIKE WILSON, GARY LOCK, et al. Physical interpretation of flow and heat transfer in preswirl systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129: 769-777.
- [10] LOCK GARY D, YAN YOUYOU, NEWTON PAUL J, et al. Heat transfer measurements using liquid crystals in a pre-swirl rotating-disc system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127: 375-382.
- [11] MAHMOOD FARZANEH GORD, MIKE WILSON, MICHAEL OWENJ. Numerical and theoretical study of flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator system[R]. ASME Paper 2005-GT-68135, 2005.



新技术、新工艺

## 涡轮机的激光精确找中

Pruftechnik 已经研制了新一代燃气和蒸汽轮机的激光找中系统—Centralign Ultra Expert, 该系统用于转动机械内部部件, 包括轴承环、隔板、内缸和机匣。与传统的方法相比(诸如钢琴丝技术、经纬仪望远镜或安装假轴), 使用该系统可以节省大量时间并还总能够达到高精度等级。

该激光找中系统的激光束用作为基准线, 进行透平各部件的测量, 相对于基准线的所有水平和上下偏差都显示在计算机上, 这样, 定出半缸底座的修正值, 采取必要的措施改正各部件的定位。

系统优点:

- 上半拆下和扣上测量。
- 120 ~ 5 000 mm 直径、最长 40 m 找中。
- 元件变形和椭圆形的探测。
- 控制传感器监测和自动纠正任何激光漂移。
- 整个组装件找中的最佳选择, 每个部件纠正值最小。
- 每个直口纠正值的即时显示。
- 缩短蒸汽轮机和燃气轮机的停机时间。

《柴油机和燃气轮机世界》2011 年 1-2 月刊

船用燃气轮机技术的发展方向及我国发展途径的思考 = **Development Tendency of Marine Gas Turbine Technologies and Ideas for Their Development Approaches in China** [刊, 汉] WANG Shi-an ( Shenyang Bureau of Naval Forces of Chinese People's Liberation Army , Shenyang , China , Post Code: 110031 ) , WU Qiong , WANG Jun , JI Gui-ming( CSIC Harbin No. 703 Research Institute , Harbin , China , Post Code: 150078 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -379 ~ 382

Introduced were recent advances of marine gas turbine technologies in relevant application domains and analyzed was their development and application tendency. The main approaches currently available for developing marine gas turbines were described and some imaginations and suggestions concerning the development approaches for marine gas turbines in China were also presented. It is noted that the design and development of light-duty gas turbines should follow the development policies of starting from a high start point and one machine for multiple purposes and wide-ranging applications. A few models of gas turbine unit should be introduced. By adopting a generalization design ( scale up/down , modular design of compressors and increase/decrease the number of stages of a compressor etc. ) , types of units with the power outputs being increased and decreased should be developed , forming a series of marine gas turbines with proper power grades needed by China. **Key words:** marine gas turbine , technology , simple cycle , complex cycle , combined cycle

涡轮盘腔内部流动和换热机理研究 = **Study of the Mechanism Governing the Flow and Heat Exchange Inside a Turbine Wheel Disk-formed Chamber** [刊, 汉] LI Wen , ZHANG Dong-yang , HE Ping , TAN Chun-qing ( Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -383 ~ 387

First analyzed was the influence of such parameters as rotary Reynolds number  $Re_\phi$  , pre-swirling ratio  $\beta_p$  and turbulent flow parameter  $\lambda_T$  on the pre-swirled flow and heat exchange characteristics inside the wheel-disk-formed chamber of a rotor/stator train with an emphasis being put on the influence of  $Re_\phi$  ,  $\beta_p$  and  $\lambda_T$  on the pre-swirling ratio  $\beta_x$  and drag coefficient  $\xi$  at the center of the wheel disk. Furthermore , the flow configuration inside the chamber was also analyzed in detail. It has been found that the inertia and centrifugal force dominate differently is the main cause for forming various flow configurations. In addition , the distribution regularity of and influencing factors on local Nusselt number along the radial direction on the rotary wall surfaces were obtained. Finally , the influence of non-dimensional mass flow rate  $C_w$  on non-dimensional temperature  $\theta$  was studied , finding that  $\theta$  and  $C_w$  basically meet a logarithm relationship. **Key words:** pre-swirling , rotor/stator train , heat exchange , rotary Reynolds number , pre-swirling ratio , turbulent flow parameter