

# 流体静压型指尖密封数值仿真分析

王 旭<sup>1</sup>, 岳国强<sup>2</sup>, 张文平<sup>2</sup>, 郑 群<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 在分析接触型指尖密封和流体动压型指尖密封优缺点的基础上, 提出了流体静压型指尖密封, 并以此为研究对象, 建立了流体静压型指尖密封流固耦合分析的数学模型和计算方法。针对流体静压型指尖密封泄漏和变形的主要影响因素, 进行了数值计算和分析, 计算结果表明: 流体静压型指尖密封具有小变形和低泄漏的优点; 密封间隙是影响泄漏的主要因素, 并且沿周向泄漏是主要泄漏通道, 间隙越小, 沿周向泄漏越明显; 压差一定时, 间隙越小, 静压靴的变形和应力越大, 间隙一定时, 压差越大, 静压靴的变形和应力也越大。

**关 键 词:** 流体静压; 指尖密封; 流固耦合; 泄漏

中图分类号: O351 文献标识码: A

## 引 言

国外从 1991 年提出指尖密封发明专利后<sup>[1]</sup>, 取得具有工程应用意义上的研究成果都是在 1999 年以后。接触型指尖密封是最先提出的一种指尖密封, 优点是结构简单、工作可靠、封严性好; 缺点是指尖靴与转子跑道间有一定的接触压力, 转速较高时, 摩擦产生的热量, 降低指尖密封的耐久性和使用寿命; 其次, 过盈量太大, 指尖出现翘曲, 造成沿指尖臂的侧向泄漏, 同时又加剧指尖靴的磨损, 也不可避免地造成一部分动力损失<sup>[2]</sup>。鉴于此, Arora Gulshan K, Proctor Margaret P 等人提出了流体动压型指尖密封的设计概念<sup>[3-4]</sup>。动压型指尖密封与接触式指尖密封的最大不同在于其动压靴, 依靠足够的压力或转子的高速旋转, 在动压靴内表面生成径向压力, 使其与转子间产生很小的径向间隙。为了使动压靴产生径向升力, 可做成周向收敛型、周向 Rayleigh 型、轴向收敛型、轴向 Rayleigh 型或凹槽型等<sup>[4]</sup>。

动压靴准确设计是实现非接触运行的关键。由于收敛型动压靴的收敛角很小, 加工上很难控制; Rayleigh 型或凹槽型是在动压靴的受压面加工阶梯型面或凹槽来实现动压作用, 这要求动压靴有较大

的尺寸, 在工程实际中有时不能实现; 为保证流体动压作用效果, 往往在跑道上加工出人字形凹槽或斜齿槽, 一旦密封失效, 将起反作用; 另外, 发动机的工作是可变的, 很难保证动压型指尖密封在整个工作转速范围内都保持良好的封严特性和工作可靠性。为此, 本文提出了流体静压型指尖密封, 其特点是使指尖靴只受流体静压作用, 称为静压靴。当气流高速通过密封间隙时, 由于静压靴只受静压作用, 作用于静压靴的压力远小于封前压力, 因而保证了静压靴径向小变形的前提条件。本文提出的流体静压型指尖密封, 是把静压靴的工作面作成圆弧型面, 并且与转子具有相同轴心, 指尖臂设计成圆弧型线, 如图 1 所示。

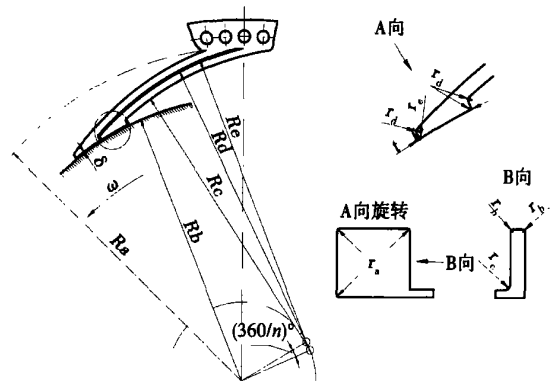


图 1 静压靴与指尖臂型线示意图

## 1 流固耦合分析方法

### 1.1 数学模型

静压靴在密封流体作用下产生变形, 该变形的产生必将导致作用于静压靴载荷的重新分布, 由此又将改变原流场的流动特性, 因此, 静压靴的工作是典型的流固耦合问题。气流在密封间隙内的流动计算基于  $N-S$  方程, 采用带壁面函数的  $k-\epsilon$  模式;

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-09-08

基金项目: 海军装备预研基金资助项目(40101030104)

作者简介: 王 旭(1963-)男, 辽宁沈阳人, 哈尔滨·第七〇三研究所研究员, 工学博士

指尖应力和应变认为满足小变形条件下的线性关系。本文求解流固耦合问题的计算方法为：由 ICEM 创建流体计算模型并划分网格，用 CFX 进行流量和静压靴载荷分布计算，计算结果经 CFX 输出和 ANSYS 输入后，进行指尖应力和应变计算，到此完成第一个循环。计算结果经 ANSYS 输出和 ICEM 输入后，重新生成网格，再按前面的计算步骤重新进行流量和载荷分布计算，以及指尖应力和应变计算，完成第二个循环。此时，用第二个循环流量和静压靴的变形与第一个循环的计算结果进行比较，以判断流量残差和变形残差是否都达到了规定的要求，如果达到了规定的要求，则认为计算已经收敛，否则继续迭代计算，直到收敛为止。本文设定的收敛条件为相邻两次计算的流量残差和静压靴最大变形残差均小于 5%。

### 1.2 几何模型及简化

指尖密封是由前衬环、高压密封环、低压密封环及后衬环用铆接的方式组成单元式结构。为了降低滞后效应，在前衬环与高压密封环及低压密封环与后衬环之间加一个起减摩作用的隔环，为了更有效地降低滞后效应，还可以做成带压力平衡结构的指尖密封，图 2 为设计的带压力平衡结构的流体静压型指尖密封。针对图 2 的几何模型，进行了必要的简化<sup>[3]</sup>：考虑到前后衬环对流场影响不大，气动计算时不再考虑前后衬环，忽略所有的倒角圆；在计算结构变形时，考虑到后衬环对低压密封环的夹持作用，将低压密封环与后衬环的交界面定义为固定截面。由于指尖密封具有旋转对称结构，取其中的一个指尖进计算。图 3 为静压型指尖密封的流固耦合计算模型。

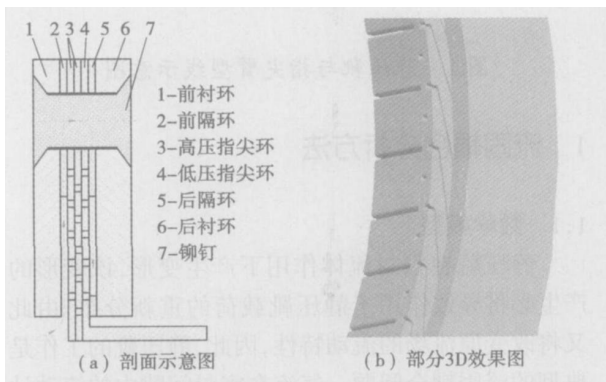


图 2 带压力平衡结构的静压型指尖密封

### 1.3 边界条件

流场模型边界条件：进口截面(Inlet)给定总压；

出口截面(Outlet)给定参考静压；上弧面(Openf、Opert)取 Open 边界条件；两侧面取周期对称边界条件，保持流通量恒定；指尖实体部分取无滑移条件；静压靴工作弧面(Wpd)取壁面无滑移条件；转子表面取旋转壁面边界条件，给定工作转速。

结构模型边界条件：指尖根部完全约束；低压指尖与后衬环接触部分完全约束。

### 1.4 网格划分

由于流场不同位置上的尺度相差悬殊，静压靴的轴向长度和周长弧长都为 7 mm 左右，而静压靴与转子间的间隙只有 0.02 ~ 0.038 1 mm，所以在流场内生成非结构化网格需要大量网格节点，为提高计算精度和节省计算资源，对流场分成若干个块，按结构化网格进行划分，对密封间隙和相邻静压靴间隙划分得很细，对远离这两个区域的部分划分粗些。

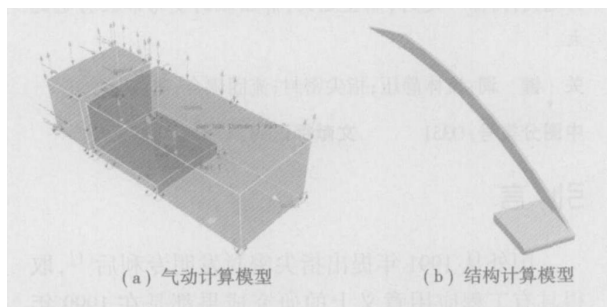


图 3 静压型指尖密封流固耦合计算模型

## 2 流场特性分析

### 2.1 密封间隙内流场分析

图 4 为不同压差和不同间隙时静压靴工作面的流线分布情况。从图 4 可以看出，流动区域大致可分为 4 个部分(如图 5 所示)：A 区表示从静压靴间隙进口流入，从下游侧面间隙流出；B 区表示从静压靴间隙进口流入，从静压靴间隙的轴向出口流出；C 区表示从静压靴间隙的进口流入，从上游侧面间隙流出；D 区表示从上游静压靴间隙流入，从静压靴间隙的轴向出口流出。从图 4 中可以看出，A、B、C、D 4 个区域的大小随着压差和间隙的变化而变化，而流线的曲率变化也随着压差和间隙的变化而变化。在 0.4 MPa 压差下，流线比较平直；在 0.3 MPa 压差下，流线的曲率有所增大；在 0.2 MPa 压差下，流线的曲率变化更明显些，这说明随着压差的减小，更多的流体沿侧向流出，相同压差条件下，对比密封间隙对流线的影响。可以发现，随着间隙的减小，A 区逐渐增大，说明更多流体从下游侧向间隙流出，C 区逐

渐减小, 说明从上游侧向间隙漏出减少; D 区增大, 说明更多的流体从上游静压靴出来进入到下游静压

靴, 然后再从静压靴出口流出。

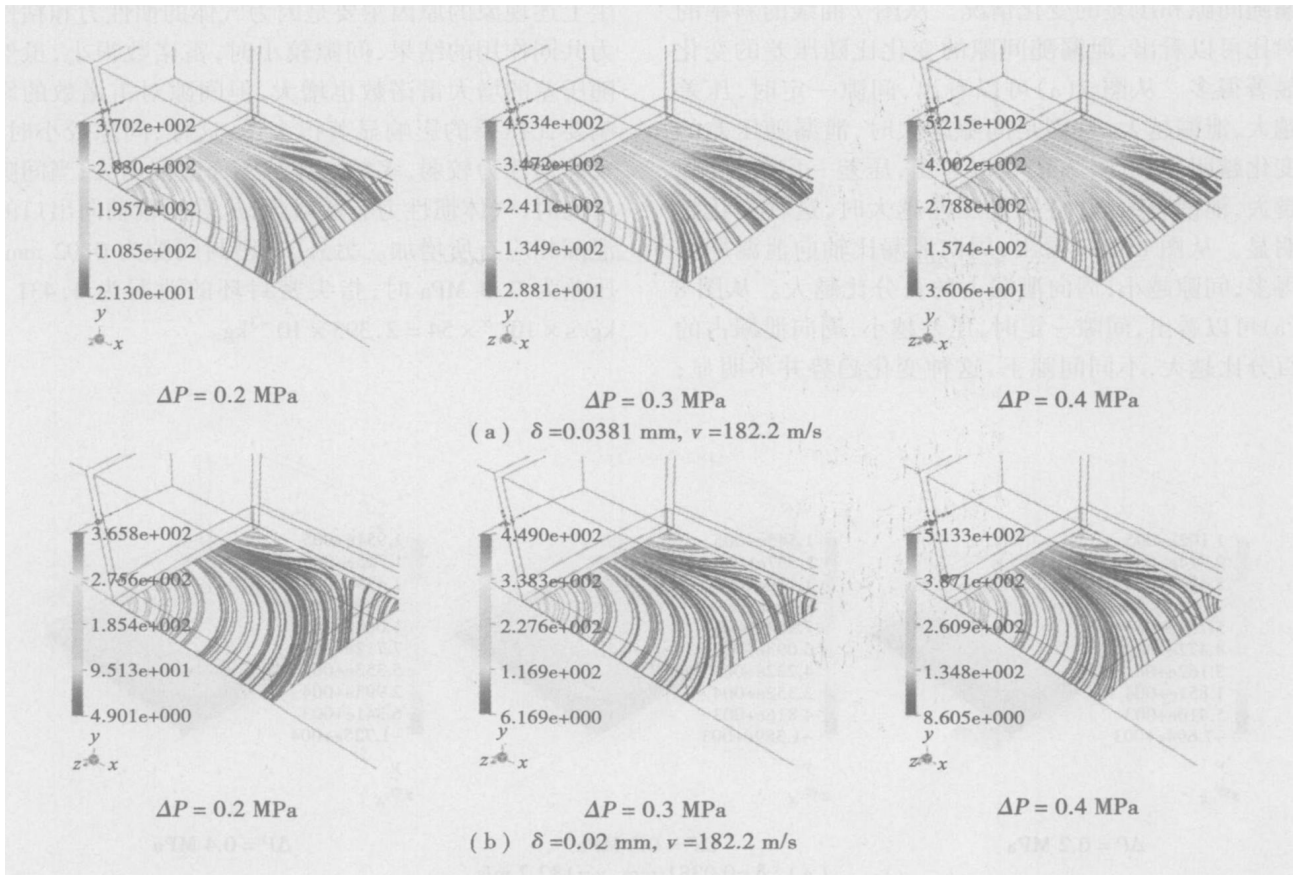


图 4 静压靴下端面的流线 (m/s)

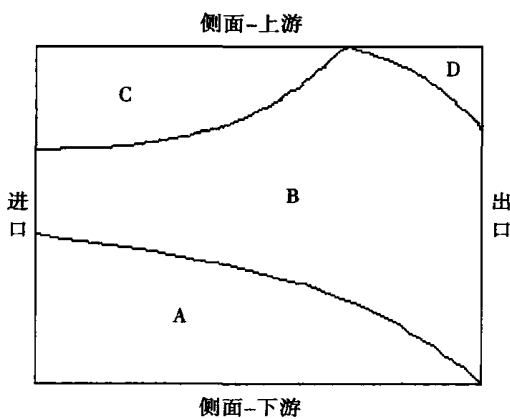


图 5 静压靴下端面流线流动区域

综合上述分析可得到如下结论: 压差对流线的影响不大, 密封间隙显著地影响流线, 间隙越小, 变化越明显。此外, 图 4 中流线的方向和 D 区的来流是由转子旋转造成的。

### 2.2 静压靴下端面压力场分析

用图 6 表示不同间隙和压差条件下静压靴下端面的压力分布情况。从图中可以看出, 在静压靴进口附近存在一个明显的高压区, 压力向其它 3 个方向逐渐降低, 作用于静压靴下端面上的压力远小于封前压力, 这是因为其它 3 个方向为气流出口, 所以压力沿 3 个方向逐渐降低, 形成图中的压力分布。压差一定时, 随间隙的减小, 作用于静压靴下端面上的压力逐渐增大; 当间隙一定时, 随压差的增大, 作用于静压靴下端面上的压力也逐渐增大。另外, 由于转子的旋转作用, 作用于静压靴工作面上的压力并不对称分布, 而是偏向旋转方向, 间隙越大, 不对称越明显。

## 3 泄漏和变形特性分析

### 3.1 泄漏分析

用前面提出的流固耦合计算方法, 对流体静压

型指尖密封的封严能力进行了计算,图 7 为泄漏随间隙和压差的变化情况,图 8 为沿周向泄漏占总泄漏随间隙和压差的变化情况。从图 7 曲线的斜率的对比可以看出,泄漏随间隙的变化比随压差的变化显著得多。从图 7(a)可以看出,间隙一定时,压差越大,泄漏越大,特别是间隙越大时,泄漏随压差的变化越明显;从图 7(b)可以看出,压差一定时,间隙越大,泄漏越明显,特别是压差越大时,这种变化越明显。从图 8 可以看出,周向泄漏比轴向泄漏严重得多,间隙越小,周向泄漏占的百分比越大。从图 8(a)可以看出,间隙一定时,压差越小,周向泄漏占的百分比越大,不同间隙下,这种变化趋势并不明显;

压差一定时,间隙越小,周向泄漏所占的百分比越大,且随间隙的增大,沿周向泄漏有减小的趋势。产生上述现象的原因主要是因为气体的惯性力和粘性力共同作用的结果,间隙较小时,雷诺数很小,虽然随压差的增大雷诺数也增大,但间隙对雷诺数的影响要比压差的影响显著得多<sup>[6]</sup>,这样,间隙较小时,气体惯性力较弱,多数气体从侧面泄漏出去;当间隙增大时,气体惯性力有所增强,从静压靴轴向外口的泄漏相应有所增加。另外,当密封间隙为 0.02 mm,压差为 0.3 MPa 时,指尖密封环的泄漏为  $4.431 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \times 10^{-5} \times 54 = 2.393 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。

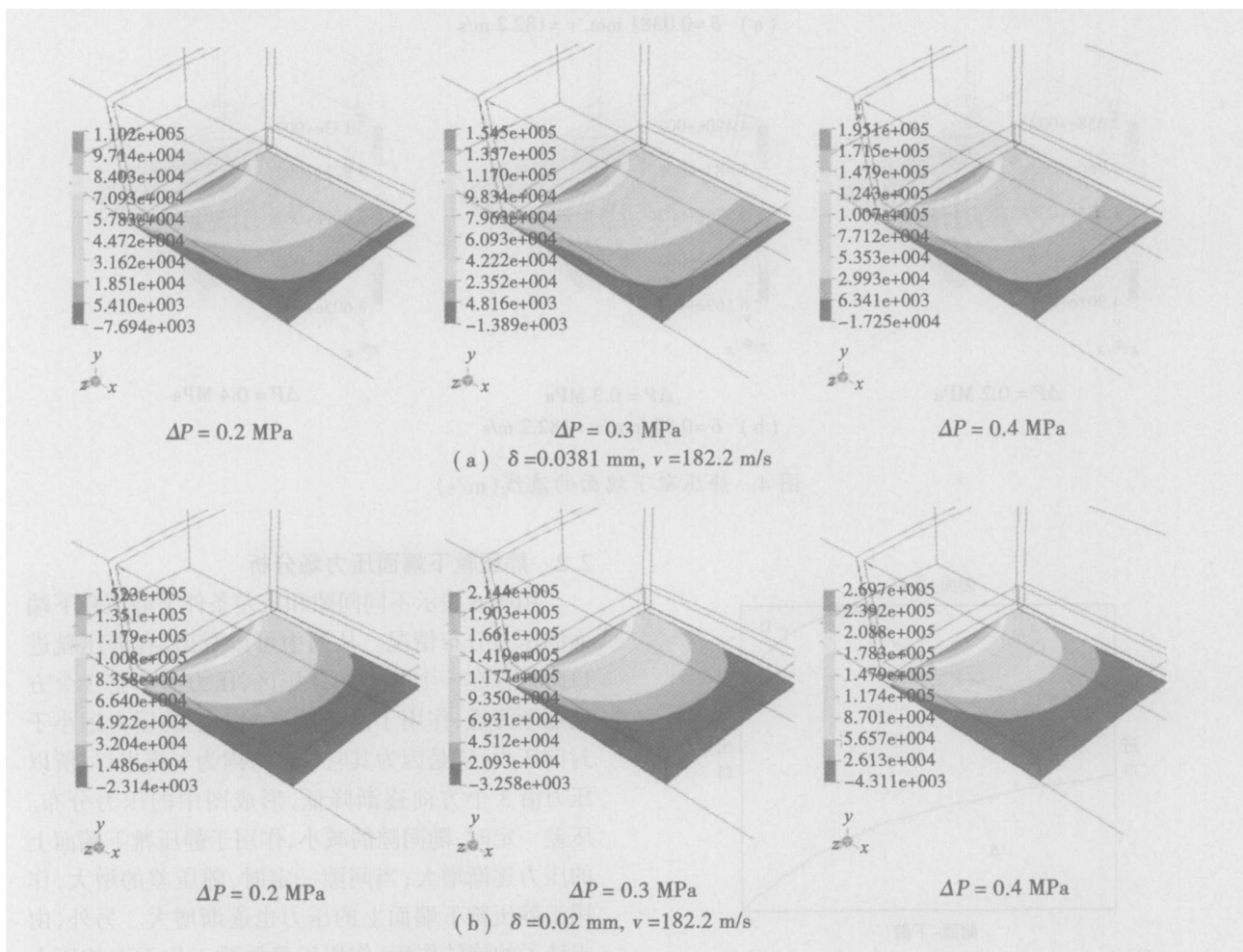


图 6 静压靴下端面上的压力分布(Pa)

### 3.2 变形和应力分析

结构计算也是基于流固耦合计算方法,图 9 为静压靴的变形和应力分布云图。从图中可以看出,当密封间隙为 0.02 mm,压差为 0.3 MPa 时,最大径向变形只有 0.003 82 mm(最大变形为 0.039 1 mm),最大应力

只有 43 MPa。之所以产生较小的径向变形和应力,是因为工作靴按流体静压原理来设计,作用于静压靴下端面上的压力很小,这可以从图 6 中看出,因而保证了静压靴的小变形条件。表 1 为不同密封间隙和压差条件下静压靴变形和应力计算结果。

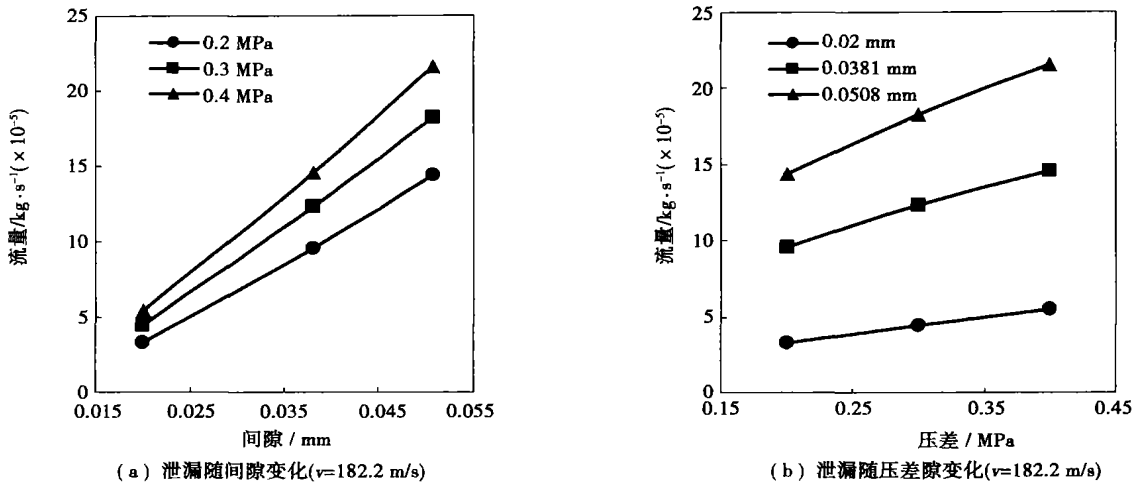


图 7 泄漏随间隙和压差的变化

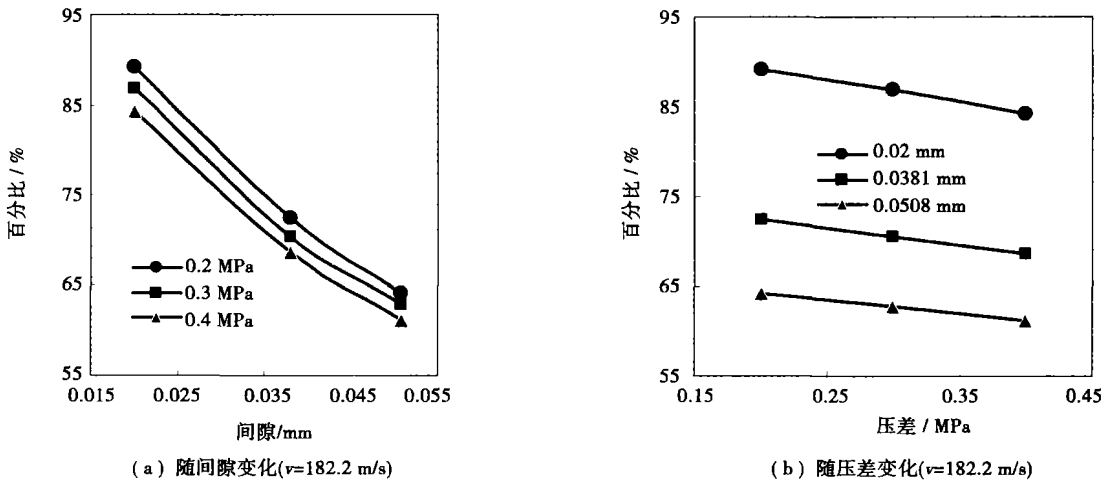


图 8 周向流量占总泄漏的百分比

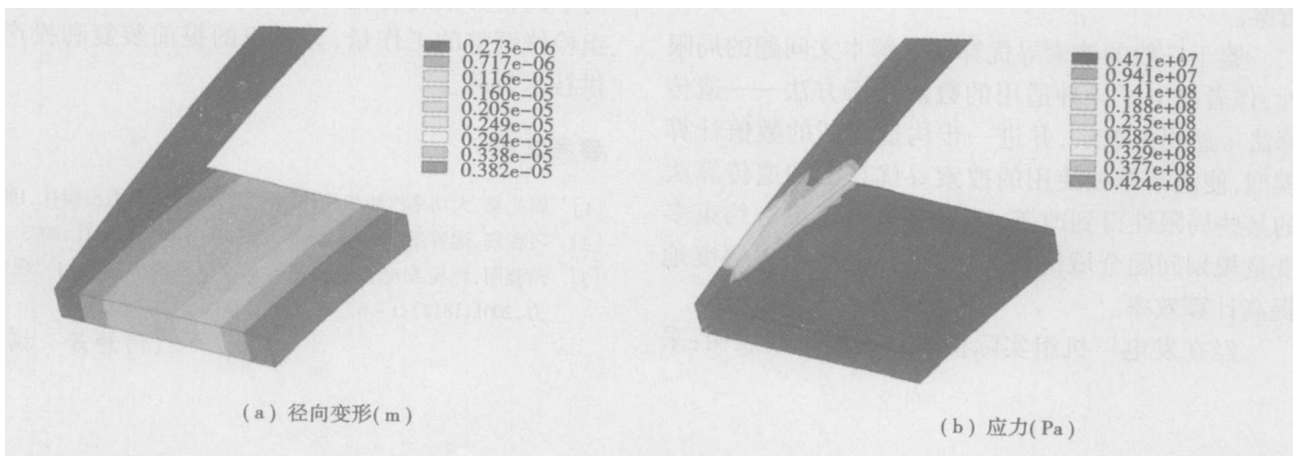


图 9 静压靴变形和应力分布云图

( $\delta=0.02$  mm,  $\Delta P=0.3$  MPa)

表 1 静压靴最大变形和最大应力计算结果( $v=182.2\text{ m/s}$ )

密封间隙 / mm	密封压差 / MPa	最大变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大径向变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大轴向变形 / mm( $\times 10^{-2}$ )	最大应力 / MPa
0.02	0.2	0.280	0.274	0.058 2	30.4
	0.3	0.391	0.382	0.081 2	42.4
	0.4	0.472	0.458	0.114 1	51.2
0.038 1	0.2	0.251	0.246	0.052 4	27.4
	0.3	0.329	0.321	0.068 5	35.8
	0.4	0.401	0.393	0.083 7	43.7

## 4 结 论

(1) 通过对流体静压型指尖密封的流场、泄漏及变形和应力的数值计算表明, 流体静压型指尖密封具有小变形和小应力的优点。

(2) 密封间隙是影响泄漏的最主要因素, 压差越大泄漏越明显, 并且, 相同压差对大间隙泄漏的影响要比小间隙泄漏的影响明显得多; 沿周向泄漏是主要泄漏通道, 并且间隙越小周向泄漏越明显。

(3) 压差一定时, 间隙越小, 静压靴的变形和应力越大; 间隙一定时, 压差越大, 静压靴的变形和应力越大, 并且相同压差对大间隙的影响要比小间隙的影响要明显。

## 参考文献:

- [1] MACKAY CHARLES G, WRIGHT E SCOTT. Laminated finger seal [ P ] . Patent US5042823A, 1991.
- [2] MARGARET P PROCTOR, IREBERT R DELGADO. Leakage and power loss test results for competing turbine engine seal[ J ] . American Society of Mechanical Engineers(ASME) Turbo Expo, 2004 4: 441- 451.
- [3] A RORA GULSHAN K. Noncontacting finger seal with hydrodynamic foot portion[ P ] . Patent US05755445A, 1998.
- [4] PROCTOR MARGARET P, STEINETZ BRUCE M. Noncontacting finger seal[ P ] . Patent US2004155410, 2004.
- [5] BRAUN M J, PERSON H M, KUDRIAVTSEV V V. Finger seal solid modeling design and some solid/ fluid interaction considerations[ J ] . Tribology Transactions, 2003, 46(4): 566- 575.
- [6] 王 旭, 张文平. 指尖密封泄漏流动的数值仿真分析[ J ] . 航空动力学报, 2005, 20(4): 590- 594.

(何静芳 编辑)

(上接第 14 页)

以调整轴瓦数最少, 调整量最小为目标的优化调整方案。

鉴于一般的搜索寻优算法求解本文问题的局限性, 作者提出了一种适用的数值分析方法——遗传算法+ 惩罚函数法, 并进一步构造了新的数值计算模型, 使通常单独使用的搜索寻优算法和遗传算法的某些局限性得到改善, 可以有效地解决有约束多变量规划问题全域优化的求解问题, 同时大幅度地提高计算效率。

经在发电厂机组实际检修过程的试用表明: 采

用本文提供的方法, 显著提高了汽轮机组转子部件对中调整方案的优化计算效率, 能够有效地减少机组检修调整的工作量, 为机组的提前装复和投产提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] 周礼泉. 大功率汽轮机检修[ M ] . 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [2] 刁在筠. 运筹学[ M ] . 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] 芮晓明. 汽轮发电机组轴系自动检测系统的研究[ J ] . 现代电力, 2001, 18(2): 1- 6.

(何静芳 编辑)

used separately. In addition, one can also effectively solve such problems as a partial optimization solution and low calculation efficiency, associated with the process of multi-target project searching. The method under discussion can significantly raise the calculation efficiency and efficaciously reduce shafting regulation work load when applied to the parameter analysis of various alignment versions for the shafting of a turbine rotor system, providing a technical safeguard for achieving an ahead-of-schedule reassembly and put-into-operation of steam turbine units. **Key words:** turbogenerator unit, rotor alignment parameter, numerical analysis method, optimization of bearing bush adjustment scheme, genetic algorithm

流体静压型指尖密封数值仿真分析 = **A Numerical Simulation Analysis of Hydrostatic Fingertip Seals** [刊, 汉] / WANG Xu (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), YUE Guo-qiang, ZHANG Wen-ping, ZHENG Qun (College of Power and Nuclear Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 15 ~ 20

On the basis of analyzing advantages and disadvantages of contact type fingertip seals and hydrodynamic type ones, the authors have presented a hydrostatic fingertip seal and with this type of seal serving as an object of study, established a mathematical model and calculation method for analyzing fluid-solid interaction in the hydrostatic fingertip seals. A numerical calculation and analysis were conducted by taking account of the main factors influencing the leakage and deformation of the above-mentioned seals. The calculation results indicate that the above-mentioned seals enjoy such merits as a small deformation and low leakage. Seal clearance is a main factor influencing the leakage with the circumferential leakage accounting for a major one. The smaller the clearance, the more conspicuous the circumferential leakage. When the pressure difference is constant, the smaller the clearance, the greater the deformation and stress of the hydrostatic pad. When the clearance is constant, the bigger the pressure difference, the greater the deformation and stress of the hydrostatic pad. **Key words:** hydrostatic pressure, fingertip seal, fluid-solid coupling, leakage

叶轴形状对旋风子性能影响的研究 = **Research Findings Concerning the Effect of Axle Shapes on the Performance of Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Zhong-yi, SUN Hai-ou, WANG Song (College of Power and Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), WANG Ming-xin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 21 ~ 24

The authors have studied a kind of high-concentration salt-mist separating device-cyclone separator, and numerically simulated under rated operating conditions three models of cyclone separators featuring three axle shapes, namely, 1. hollow cylinder shape, 2. slim solid truncated cone shape and 3. podgy solid circular truncated cone shape. The drag force characteristics of the corresponding models and their separation-efficiency characteristics at different particle diameters have been given. Meanwhile, on a specialized wind tunnel test rig, drag force and separating efficiency characteristics of the three models were also tested. The test results show that model No. 2 has a relatively stable separating efficiency and a comparatively small drag-force loss with its overall performance being better than that of the other two models. When comparing the test results with the numerical simulation ones, one can find that they are in good agreement, thus providing reference data for further investigations. **Key words:** salt mist separating device, cyclone separator, axle shape, numerical simulation

一种基于数据挖掘的入炉燃料发热量在线智能软诊断方法研究 = **A Study of the Method for an On-line Intelligent Soft Diagnosis of In-furnace Fuel Low Heating Values Based on Data-mining** [刊, 汉] / LI Bi-cheng (Guang-dong Province Yuedian Group Zhuhai Power Station, Zhuhai, China, Post Code: 519050), SHENG Sai-bin (Automation Department, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 25 ~ 28

Coal quality fluctuations in many Chinese coal-fired power plants have posed a serious threat to boiler stable combustion and safe operation. The main contradiction lies in an excessively low heating value of fuel. Taking account of the charac-