

DOI: 10.7652/xjtuxb201511005

排汽缸全局气动优化及设计知识挖掘方法

祝培源, 郭振东, 陈红梅, 宋立明, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了提高排汽缸的气动性能,探索排汽缸的设计规律,耦合基于子元模型的全局优化算法、三阶贝塞尔曲线的三维排汽缸参数化方法、RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)方程求解方法与基于总变差分析的数据挖掘技术,提出了健壮高效的排汽缸设计优化与知识挖掘方法。在考虑末级叶片和排汽缸之间相互作用的基础上,选取静压恢复系数最大为目标函数,对低压排汽缸进行了设计优化与知识挖掘。优化得到的排汽缸静压恢复系数从 0.165 提高到了 0.516。采用基于总变差分析的数据挖掘技术并结合排汽缸气动性能分析,阐明了设计变量与目标函数之间的相互影响机制。研究表明:扩压器出口宽度、排汽缸外缸宽度、外导流环高度和外导流环出口角度对排汽缸气动性能有显著影响。所建立的排汽缸优化设计方法和知识挖掘技术为高性能排汽缸设计提供了工具。

关键词: 排汽缸;静压恢复系数;全局优化设计;知识挖掘

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0026-07

Global Optimization of Aerodynamic Design and Knowledge Discovery Method of an Exhaust Hood

ZHU Peiyuan, GUO Zhendong, CHEN Hongmei, SONG Liming, LI Jun

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the aerodynamic performance and explore design guidelines for an exhaust hood, a robust and efficient design optimization and data mining method, which combines meta-based global optimization algorithm with a 3rd-order Bezier curve-based 3D parameterized method, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) solver technique and data mining technique based on variance analysis, is proposed for the aerodynamic optimal design of an exhaust hood. By fully taking into account the interaction between the last turbine stage blades and exhaust hood, design optimization and knowledge discovery of a low-pressure exhaust hood are carried out for maximizing the static pressure recovery coefficient. The static pressure recovery coefficient of the optimal exhaust hood is improved from 0.165 to 0.516. The interactions among design variables and objective function are illustrated using the data mining technique combined with detailed aerodynamic analysis. The research results indicate that the diffuser outlet width, the outer hood width, the outer flow guider's height and the outer flow guider's outlet angle have significant effects on the performance of the exhaust hood. The proposed design optimization and data mining method for the exhaust hood provide a basis for the design of high-performance

收稿日期: 2015-02-06。 作者简介: 祝培源(1990—),男,博士生;宋立明(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106123)。

网络出版时间: 2015-08-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150825.1748.004.html>

exhaust hood.

Keywords: exhaust hood; static pressure recovery coefficient; global optimal design; data mining

高性能排汽缸设计是提高汽轮机能量转换效率的重要技术手段^[1]。汽轮机排汽缸作为连接低压末级叶栅和凝汽器的重要设备,在凝汽器真空度给定的情况下,可以降低末级透平出口静压,提高末级透平的做功能力,从而提高机组效率。为了提高排汽缸的气动性能,排汽缸内部流动特性和优化设计的研究工作得到了发展。Zhang 等通过 PIV 测量手段,研究了排汽缸内部三维流动结构,发现蜗壳内流动损失主要来源于通道涡,端壁涡对流动的影响很小^[2]。Finzel 等通过实验研究了排汽缸高度、水平结合面通流面积、蒸汽进口位置以及顶部泄漏流马赫数对排汽缸性能的影响,研究表明,水平结合面通流面积对排汽缸性能有着最为显著的影响^[3]。Li 等开展了大功率汽轮机全尺寸气动性能分析研究,并指出在分析低压排汽缸气动性能时,需充分考虑末级叶片和末级动叶顶部泄漏流的影响^[4]。

随着优化算法、CFD 技术以及计算机技术的发展,汽轮机排汽缸气动性能优化设计技术得到了发展。Yang 等利用拉丁方实验设计、三阶响应面近似模型、Hookes-Jeeves 直接搜索算法的组合优化策略对排汽缸外导流环进行了优化设计^[5-6]。Li 等开发了基于神经网络的低压排汽缸自动优化平台,并对排汽缸扩压器型线进行了设计优化^[7]。Fu 等对排汽缸扩压器进行了优化设计,通过数值计算和实验测量,对比了不同扩压器设计对排汽缸气动性能的影响^[8]。

在排汽缸气动性能三维设计优化的研究中,大多数研究均没有考虑末级叶片及动叶叶顶间隙对排汽缸的影响,因此本文在对排汽缸气动性能优化设计时,充分考虑了低压末级叶片及动叶叶顶间隙结构对排汽缸性能的影响,并采用基于子元模型的全局优化算法,减少了对计算资源的消耗。同时,采用数据挖掘技术对设计空间进行了知识挖掘,量化设计变量对排汽缸气动性能的影响并获取设计变量和目标函数之间的相互影响机制。

1 排汽缸设计优化方法

耦合基于子元模型的全局优化算法、三阶贝塞尔曲线的三维排气缸参数化方法、三维 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方程求解技术与基于总变差分析的知识挖掘方法,提出了健壮高

效的排汽缸三维设计优化与知识挖掘方法,具体流程如图 1 所示。该方法主要模块有排汽缸参数化方法模块、排汽缸气动性能分析模块、全局优化算法模块和知识挖掘模块。

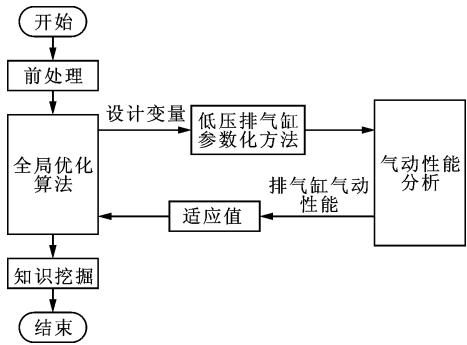


图 1 低压排汽缸设计优化与知识挖掘方法

1.1 基于子元模型的全局优化算法

耦合均匀设计方法、Kriging 模型与 EI(Expected Improvement)函数,研发了基于子元模型的全局优化算法(MBGO)。利用 Dixon-Szegö 系列非线性多峰值函数对 MBGO 的测试结果表明,MBGO 算法能很好地平衡全局最优与局部搜索之间的关系,利用极少的函数估值即可获得设计空间全局最优解^[9]。该算法流程如下。

- (1)采用均匀设计方法生成一组在设计空间均匀分布的训练样本 S ,并进行函数估值。
- (2)采用训练样本 S ,建立 Kriging 近似模型。
- (3)采用研发的差分进化算法寻找设计空间中 EI 值最大的点 E_{Imax} 。若 E_{Imax} 小于目标设定值 t ,算法终止;否则,将 E_{Imax} 所对应的采样点加入到训练样本 S 中,返回步骤(2)。

1.2 总变差分析

利用总变差分析可以定量分析设计空间中变量对性能函数的影响机制,继而与相关学科知识结合,可以探索优化设计相对参考设计性能提高的本质原因^[9]。

设目标函数为 $g(x)$,设计变量为 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, a_0 表示 $g(x)$ 在设计空间总的平均值, a_i 表示除去 x_i 对其他设计变量在设计空间求积分时 $g(x)$ 所对应的均值, a_{ij} 表示除去 x_i 和 x_j 对其他设计变量在设计空间求积分时 $g(x)$ 所对应的均值。 a_0 、 a_i 及 a_{ij} 相应的表达式如下

$$\begin{aligned} a_0 &= \int \cdots \int g(x) dx_1 \cdots dx_k \\ a_i(x_i) &= \int \cdots \int [g(x) - a_0] dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_k \\ a_{ij}(x_i, x_j) &= \int \cdots \int [g(x) - a_i - a_j - a_0] \cdot \\ &\quad dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_{j-1} dx_{j+1} \cdots dx_k \end{aligned} \quad (1)$$

另一方面,设 δ^2 表示 $g(x)$ 在设计空间对应的总方差, δ_i^2 表示仅 x_i 变化时, $g(x)$ 在设计空间对应的方差, δ_{ij}^2 表示仅 x_i 和 x_j 变化时, $g(x)$ 在设计空间对应的方差. δ^2 、 δ_i^2 及 δ_{ij}^2 相应的表达式如下

$$\begin{aligned} \delta^2 &= \int \cdots \int [g(x) - a_0]^2 dx_1 \cdots dx_k \\ \delta_i^2(x_i) &= \int \cdots \int [g(x) - a_0]^2 dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_k \\ \delta_{ij}^2(x_i, x_j) &= \int \cdots \int [g(x) - a_i - a_j - a_0]^2 \cdot \\ &\quad dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_{j-1} dx_{j+1} \cdots dx_k \end{aligned} \quad (2)$$

通常, δ_i^2 又称为主效应,表示单个变量对 $g(x)$ 的影响; δ_{ij}^2 又称为交互效应,表示两个变量对 $g(x)$ 的共同影响. 类似地, 3 个及 3 个以上变量对 $g(x)$ 的影响如 δ_{ijk}^2 等称为高阶效应. 事实上, 高阶效应在实际应用中很少出现, 其对性能函数的影响通常可以忽略不计. 各效应方差之间满足如下表达式

$$1 = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i^2}{\delta^2} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{\delta_{ij}^2}{\delta^2} + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^n \frac{\delta_{ijk}^2}{\delta^2} + \cdots \quad (3)$$

δ_i^2/δ^2 或 δ_{ij}^2/δ^2 值越大, 则相应效应对 $g(x)$ 的影响越显著, 据此可以分析变量对性能函数的影响机制.

1.3 低压排汽缸参数化造型方法

低压排汽缸参数化造型方法如图 2 所示. 内、外导流环曲线均为三阶贝塞尔曲线, 分别由 4 个控

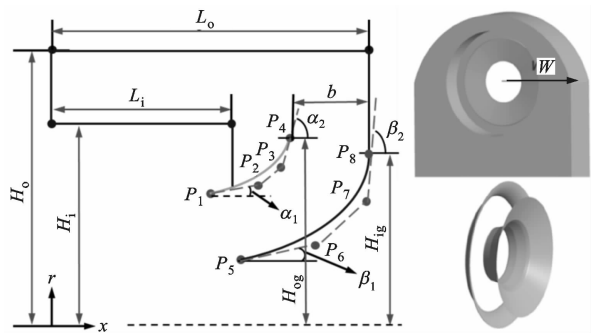


图 2 低压排汽缸参数化造型方法

制点 $P_1 \sim P_4$ 和 $P_5 \sim P_8$ 控制. 考虑扩压器进口和末级叶栅通道相连接, 因此扩压器进口保持不变, 即 P_1 、 P_5 固定. P_4 坐标用扩压器出口宽度 b 和外导流环高度 H_{og} 控制; P_8 坐标用内导流环高度 H_{ig} 控制. 其他几何参数分别是: H_i 和 H_o 分别表示排汽缸内、外缸高度; L_i 和 L_o 分别表示排汽缸内、外缸长度; W 表示排汽缸外缸半宽; α_1 和 α_2 分别表示外导流环进、出口角度; β_1 和 β_2 分别表示内导流环进、出口角度.

2 低压排汽缸气动性能优化

2.1 设计变量和目标函数

在优化过程中, 排汽缸外缸高度和长度保持不变. 本次优化所选的 14 个设计变量见表 1. 静压恢复能力是衡量排汽缸气动性能的重要指标, 因此本文选取静压恢复系数 C_p 对排汽缸气动性能进行评估. 静压恢复系数越大, 表明排汽缸静压恢复性能越好, 其定义为

$$C_p = (P_{out} - P_{in}) / (0.5 \rho v_{in}^2) \quad (4)$$

式中: P_{in} 和 P_{out} 分别是排汽缸进、出口的平均静压; ρ 和 v_{in} 分别是排汽缸进口气流密度和气流速度. 以静压恢复系数最大为目标进行优化设计, 目标函数可表达为

$$\max F_{obj}(x) = f(x) = C_p(x) \quad (5)$$

2.2 低压排汽缸气动性能计算

采用 CFD 软件 ANSYS-CFX 13.0 求解采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型的稳态可压缩 RANS 方程, 获得低压排汽缸的气动性能. 为了考虑低压末级和排汽缸扩压器之间的相互作用以及末级动叶顶部泄漏流对排汽缸气动性能的影响, 对排汽缸气动性能进行评估时考虑了末级和末级动叶叶顶间隙射流的影响. 由于在气动性能评价中考虑了低压末级的影响, 导致了计算资源的急剧增大, 而所采用的 MBGO, 能够对全局最优解与局部搜索进行权衡, 以尽可能减少计算所需要的对气动性能评估的次数, 从而在一定程度上缓解计算资源增大的问题.

图 3 给出了数值计算的计算域和网格划分, 由于排汽缸几何形状复杂, 因而采用非结构化网格进行离散, 而末级叶栅通道及动叶叶顶间隙采用多块结构化网格离散, 网格总数为 467 万. 在数值计算

表 1 优化所选设计变量及相应几何参数

变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
几何参数	β_1	H_{ig}	β_2	P_2	P_3	W	H_i	L_i	α_1	b	H_{og}	α_2	P_6	P_7

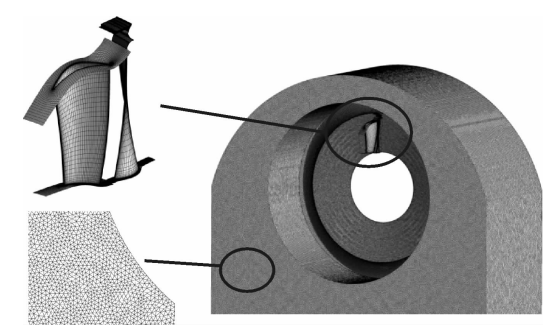


图 3 数值计算的计算域与网格划分

中,进口给定气流总焓和流量,出口给定平均静压。具体的边界条件如表 2 所示。

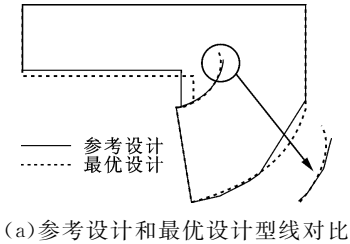
表 2 数值计算边界条件

工质	水蒸气 (IF97)
进口总焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2 530. 893
进口质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	1. 787 1
出口平均静压/Pa	5 598

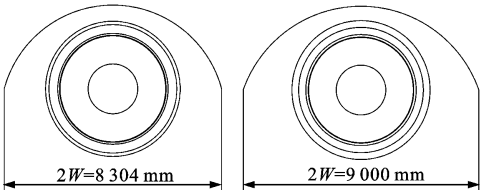
3 优化结果及分析

3.1 设计优化结果

采用所提出的低压排汽缸三维设计优化与知识挖掘方法,对低压排汽缸进行了气动性能设计优化。图 4 给出了优化前后排汽缸几何结构变化。相比于参考设计,优化后排汽缸扩压器通流面积的变化更为光滑,能够更加有效地组织气流流动扩压,有利于气动性能的提高。优化得到的排汽缸外缸宽度明显增加。表 3 给出了优化前后排汽缸及末级叶栅气动性能的对比。优化得到的排汽缸静压恢复系数从 0. 165 提高到了 0. 516,这表明优化得到的低压排汽缸的气动性能有了明显提高。



(a)参考设计和最优设计型线对比



(b)参考设计 (c)最优设计

图 4 优化前后排汽缸几何结构对比

低压排汽缸气动性能的提高对末级叶栅的做功能力有着显著的影响。图 5 分别给出了优化前后末级动叶展向 5%、50%、95%叶高处 3 个截面的压力分布和末级动叶出口沿展向的压力分布。优化后末级动叶出口压力显著降低,而末级动叶后部载荷明显提高,这将提高末级叶栅的做功能力。从表 3 中可以看到,通过对低压排汽缸的设计优化,使得透平末级的输出功率提高了近 4%,而流量基本保持不变,这将有 利于整个机组效率的提高。

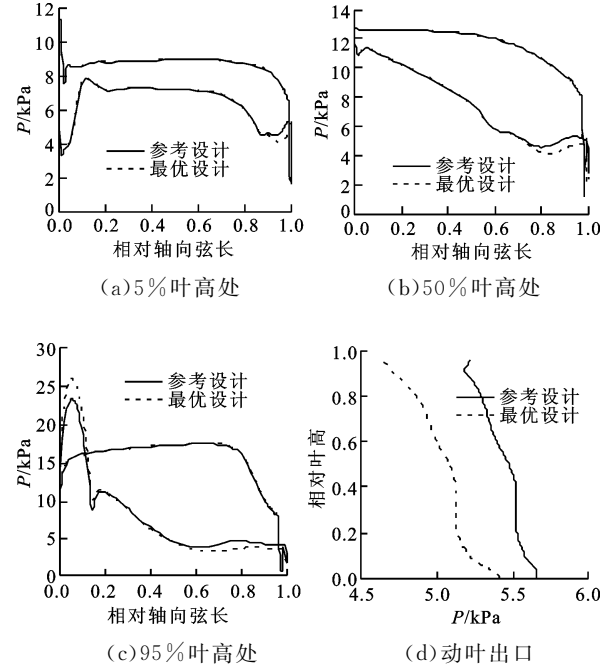


图 5 末级动叶叶片表面及出口压力分布

表 3 优化前后排汽缸及末级叶栅气动性能对比

性能参数	参考值	最优值	提高比例/%
C_p	0. 165	0. 516	212. 73
末级叶栅功率/MW	14. 861 8	15. 451 4	3. 97
出口质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	85. 78	85. 78	0. 00

3.2 总变差分析结果

采用总变差分析方法对设计空间进行知识挖掘,量化设计变量对排汽缸气动性能的影响,以分析设计变量与目标函数之间的相互影响机制,以及最优设计相对参考设计气动性能提高的本质原因。在优化过程中,考虑了 14 个设计变量,因而共有 105 个效应,分别是 14 个单变量的主效应和 91 个两变量的交互效应。图 6 给出了各个变量的效应方差所占总方差的比例,其中单变量效应用其所对应的变量 x_i 表示,两个变量间的交互效应用 x_i/x_j 表示。这里只列出了效应方差比例大于 1% 的变量。由于

单变量的主效应和两变量的交互效应方差的总和已经非常接近 1, 因此这里忽略三变量以及多变量的交互效应。从图 6 中可以看出, 两变量的交互效应对排汽缸的气动性能影响并不十分显著。

由图 6 可知, 所占方差比例最大的几何参数依次是 b 、 W 、 H_{og} 和 α_2 , 表明这 4 个几何参数对排汽缸气动性能的影响最为显著。图 7 给出了 4 个显著变量对目标函数的主效应。在所选的设计空间中, 排汽缸的静压恢复系数随 x_{10} 、 x_6 和 x_{12} 的增加近似线性提高, 而随 x_{11} 的增加呈非线性提高。

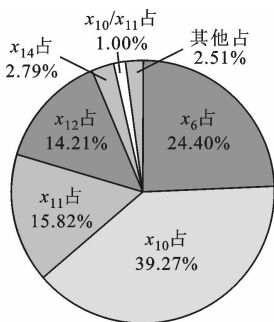


图6 总变差分析饼状图

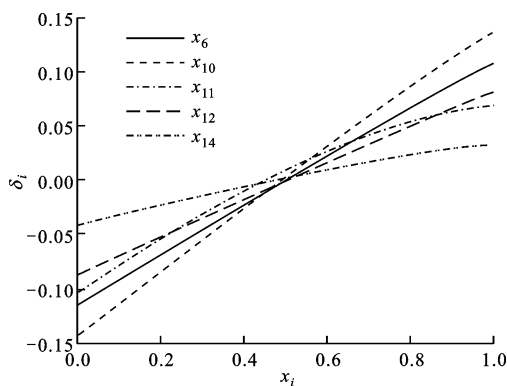


图7 显著变量对目标函数的主效应

3.3 优化结果分析

对低压排汽缸进行详细的气动性能分析, 以验证数据挖掘结果的正确性和优化平台的有效性, 分析优化性能提高的根本原因。为了方便分析排汽缸的气动性能, 这里将静压系数 C_{sp} 和总压系数 C_{tp} 定义如下

$$C_{sp} = (P - P_{in}) / (0.5 \rho v_{in}^2) \quad (6)$$

$$C_{tp} = (P_{t,in} - P_i) / (0.5 \rho v_{in}^2) \quad (7)$$

式中: $P_{t,in}$ 是排汽缸进口的平均总压; P 和 P_i 分别是排汽缸当地静压和当地总压。静压系数用以衡量当地的静压恢复能力, 静压系数越大, 表明当地的静压恢复越好; 总压系数用以衡量当地的总压损失, 总压系数越大, 表明当地的总压损失越大。

根据总变差分析的结果, 扩压器出口宽度是对排汽缸静压恢复系数影响最显著的参数。扩压器是排汽缸的重要组成部分, 对排汽缸的静压恢复性能有着至关重要的作用。文献[10]中也指出, 扩压器的出口宽度是影响其静压恢复能力的重要几何参数。在扩压器进口尺寸确定时, 出口宽度太小, 会导致扩压器的扩压能力不足; 出口宽度太大, 又有可能导致在扩压过程中出现分离流动。在所选的设计空间中, 没有扩压器出口宽度过大的样本, 因而其静压恢复能力随扩压器宽度的增加近似呈线性提高。图 8 比较了优化前后, 扩压器内外导流环壁面静压系数分布云图。优化后, 扩压器内壁上的流动滞止区减弱, 扩压流动更加顺畅, 而且相较于优化前, 优化后扩压器壁面的静压系数有明显提高, 尤其是在扩压器出口位置。这表明优化后扩压器出口宽度的增加使扩压器的静压恢复能力有了明显的提高, 从而也使得整个排汽缸的静压恢复系数提高。

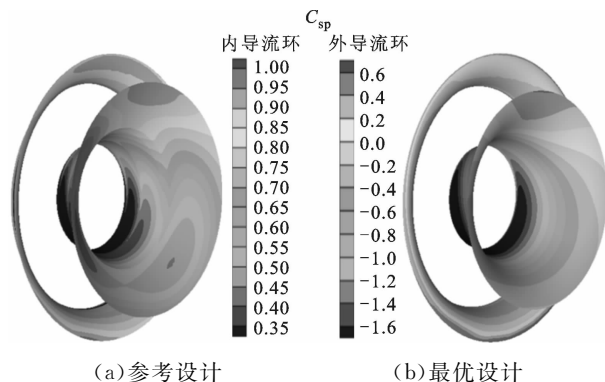


图8 内外导流环壁面静压系数云图

扩压器外导流环高度和外导流环出口角度也是两个对排汽缸气动性能影响十分显著的几何参数, 会直接影响气流在排汽缸蜗壳中的流动情况。取如图 9 所示的 4 个特征截面来分析排汽缸内部的流动特性。图 10 给出了优化前后截面 1 的流线和总压系数云图。相比于参考设计, 优化后涡 2 和涡 3 显著减弱, 而在靠近前端壁的位置出现了涡 1。虽然出现了新的旋涡结构, 但是最优设计的总压系数要明显低于参考设计, 表明优化后流动的总压损失显著降低。这是由于涡 2 是总压损失的主要来源, 相比于涡 2, 涡 1 所引起的总压损失非常小。

图 11 给出了优化前后截面 2 的流线和总压系数云图。此时, 涡 2 已经占据流道的主要空间, 为所有旋涡结构中最强的一支, 是流动总压损失的主要来源。在涡 2 旋转着向下游流动时, 与下游气流相互作用, 形成了占据排汽缸蜗壳大部分空间的通道

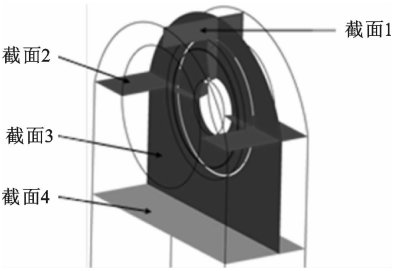
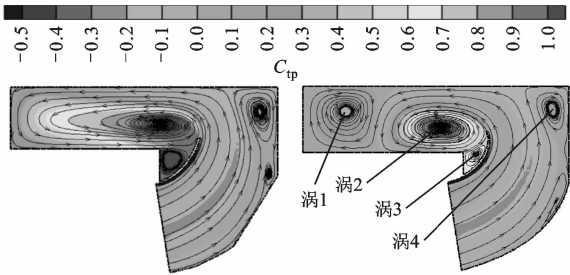
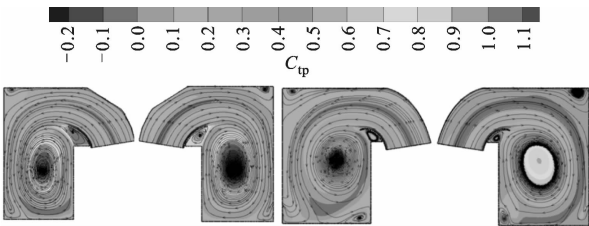


图 9 所取特征面位置



(a)参考设计 (b)最优设计

图 10 截面 1 的流线和总压系数云图



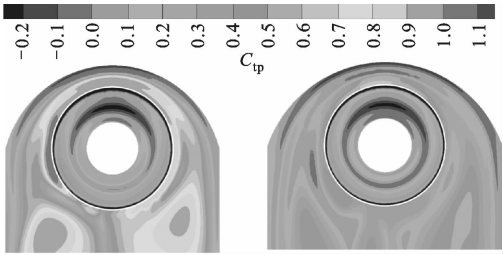
(a)参考设计 (b)最优设计

图 11 截面 2 的流线和总压系数云图

涡结构。所有以上分析表明,优化后 H_{og} 和 α_2 的增加虽然导致了涡 1 的出现,但对主流没有任何明显影响,而流动的总压损失主要来源于涡 2。优化后涡 2 显著减弱,这样就导致总压损失降低,而总压损失降低有利于排汽缸静压恢复能力的提高,这和文献[2]中的结果相一致。

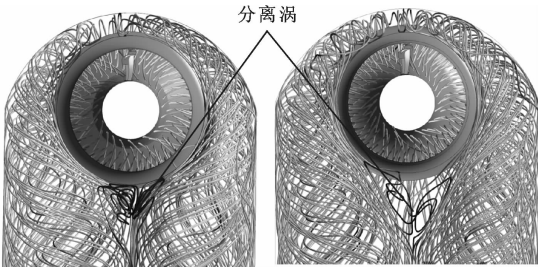
图 12 给出了优化前后截面 3 的总压系数云图。优化后,蜗壳中的总压损失明显降低,并且蜗壳下部整体的总压损失要高于上部。图 13 给出了排汽缸蜗壳中的三维流线结构。蜗壳上部形成的所有涡系结构,在蜗壳下部相互混合形成占据蜗壳大部分空间的通道涡系结构,在扩压器下部形成了分离涡。各个涡系在蜗壳下部的相互混合导致了蜗壳下部较大的总压损失。在蜗壳的左右两侧均形成了通道涡系结构并相互作用。图 14 给出了优化前后截面 4 的流线和总压系数云图。由图可知,涡流之间的相互作用导致通道涡所引起的总压损失增大。优化设计相比于参考设计, W 增大。一方面,这将避免 W

过小所导致的此处流动的加速,从而降低排汽缸静压恢复能力;另一方面,从图 14 中可以看到, W 的增加将使左右两侧的通道涡系之间的距离增加,以减弱它们相互之间的作用,从而降低了其造成的总压损失。因此, W 也是影响排汽缸静压恢复性能的重要几何参数之一。文献[3]中的相应结果也表明排汽缸外缸宽度的减小会降低其静压恢复系数。



(a)参考设计 (b)最优设计

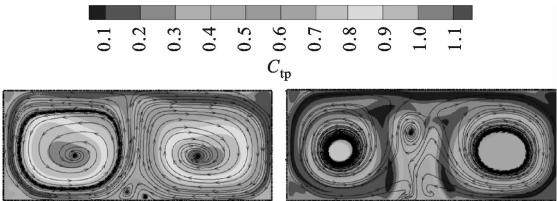
图 12 截面 3 的总压系数云图



(a)参考设计 (b)最优设计

图 13 排汽缸蜗壳中三维流线结构

通过以上分析,优化后排汽缸静压恢复性能的提高主要有两方面的原因。一方面是优化后,排汽缸扩压器的静压恢复能力提高;另一方面是优化后,排汽缸内部流动的总压损失减小。此外,气动分析结果也表明,扩压器出口宽度、排汽缸外缸半宽、外导流环高度和外导流环出口角度对排汽缸的静压恢复性能有显著影响,这和数据挖掘结果相一致。



(a)参考设计 (b)最优设计

图 14 截面 4 的流线和总压系数云图

4 结 论

耦合基于子元模型的全局优化算法、三阶贝塞尔曲线的三维排汽缸参数化方法、三维 RANS 方程

求解技术与基于总变差分析的知识挖掘方法,提出了健壮高效的排汽缸三维设计优化与知识挖掘方法。

本文完成了低压排汽缸的气动性能优化设计,优化设计得到的排汽缸的静压恢复系数从0.165提高到了0.516。排汽缸气动性能的提高使得末级动叶出口静压降低,在流量保持不变的情况下,增加了末级的做功能力。

基于数据挖掘技术对排汽缸设计空间进行了知识挖掘,量化了设计参数对气动性能的影响规律。研究表明:扩压器出口宽度、排汽缸外缸半宽、外导流环高度和外导流环出口角度对排汽缸静压恢复性能有显著影响。

参考文献:

- [1] BURTON Z, INGRAM G L, HOGG S. A literature review of low pressure steam turbine exhaust hood and diffuser studies [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(6): 062001.
- [2] ZHANG W, PAIK B G, JANG Y G, et al. Particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow in an exhaust hood model of a low-pressure steam turbine [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(2): 411-419.
- [3] FINZEL C, SCHATZ M, CASEY M V, et al. Experimental investigation of geometrical parameters on the pressure recovery of low pressure steam turbine exhaust hoods [C]// ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2011: 2255-2263.
- [4] LI Zhigang, LI Jun, YAN Xin, et al. Investigations on the flow pattern and aerodynamic performance of last stage and exhaust hood for large power steam turbines [C]// ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2012: 569-577.
- [5] YANG Jiandao, CHEN Taowen, LI Jun, et al. Aerodynamic optimization design of exhaust hood diffuser for steam turbine with three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes solutions [C]// ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2014: V01BT27A007.

- [6] 杨建道, 陈涛文, 宋立明, 等. 低压排汽缸气动优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 19-24.
YANG Jiandao, CHEN Taowen, SONG Liming, et al. Aerodynamic optimization on the low pressure exhaust hood [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 19-24.
- [7] LI Haitao, DAI Yuejin, SHI Liqun, et al. Automatic aerodynamic optimization platform for low pressure exhaust hood based on neural network [C]// Proceedings of the International Conference on Power Engineering. New York, USA: ASME, 2013: GB18030.
- [8] FU Jinglun, LIU Jianjun, ZHOU Sijing. Aerodynamic optimization of the diffuser towards improving the performance of turbine and exhaust hood [C]// ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2014: V01BT27A024.
- [9] 郭振东, 宋立明, 李军, 等. 基于子元模型的全局优化与设计空间知识挖掘方法 [J]. 推进技术, 2015, 36(2): 207-216.
GUO Zhendong, SONG Liming, LI Jun, et al. Meta model-based global design optimization and exploration method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(2): 207-216.
- [10] TINDELL R H, ALSTON T M, SARRO C A, et al. Computational fluid dynamics analysis of a steam power plant low pressure turbine downward exhaust hood [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1996, 118(1): 214-224.

[本刊相关文献链接]

- 王新军, 周子杰, 宋钊, 等. 核电站凝汽器的压力瞬态变化特性. 2015, 49(7): 6-10. [doi:10.7652/xjtuxb201507002]
- 杨建道, 陈涛文, 宋立明, 等. 低压排汽缸气动优化设计. 2015, 49(3): 19-24. [doi:10.7652/xjtuxb201503004]
- 李瑜, 宁德亮, 李亮, 等. 汽轮机中湿汽损失的定量计算. 2014, 48(1): 25-30. [doi:10.7652/xjtuxb201401005]
- 邵帅, 邓清华, 时和双, 等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013, 47(1): 15-20. [doi:10.7652/xjtuxb201301004]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi:10.7652/xjtuxb201305005]

(编辑 荆树蓉)