

DOI: 10.7652/xjtuxb201501002

有机工质透平膨胀机喷嘴的响应面分析优化

王星, 刘小民

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了提高有机工质膨胀机的性能,建立了喷嘴型线优化设计平台,并以喷嘴叶片损失系数为性能指标、以喷嘴型线 5 个控制点的距离参数为设计变量进行了有机透平膨胀机喷嘴的试验设计。采用响应面方法分析了叶片损失系数随型线控制点的变化,揭示了叶片损失系数对喷嘴型线变化的敏感性。研究结果表明:叶片压力面后段、叶片压力面中部、叶片吸力面后段均存在最佳型线,使喷嘴的叶片损失系数较小;在喷嘴的设计过程中,减小喷嘴前段和中段的厚度,可以有效降低喷嘴损失系数;叶片吸力面中段型线的改变对叶片损失系数的影响较大,叶片压力面中段型线的变化对喷嘴损失系数的影响最小。相对于原型喷嘴,采用最优喷嘴型线后叶片损失系数下降了 10%。该研究不仅获得了使叶片损失系数较小的喷嘴型线,还能揭示影响喷嘴性能指标的关键因素。

关键词: 透平膨胀机;喷嘴型线;响应面优化;叶片损失系数

中图分类号: TK523 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)01-0007-07

Nozzle Optimization for Organic Turbo-Expander by Response Surface Analysis

WANG Xing, LIU Xiaomin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An optimization design platform for the profile of nozzle was established, the vane loss coefficient was taken as the performance index, and the distance parameters of five control points on the profile were considered as the variables to experimentally design the nozzle of organic turbo-expander. The response surface method was adopted to analyze the variation of vane loss coefficient with the distance parameters, and the sensitivity of vane loss coefficient to the distance parameters was also revealed. The optimal profiles for the trailing section of pressure surface, the middle section of pressure surface and the trailing section of suction surface were obtained. The results illustrate that the vane loss coefficient can be efficiently decreased by reducing the thickness of front and middle sections of nozzle vane. The profile variation of middle section of the suction surface greatly affects the vane loss coefficient, while the profile variation of the middle section of pressure surface slightly affects the vane loss coefficient. The vane loss coefficient decreases by 10% in the optimal profile design.

Keywords: turbo-expander; nozzle profile; response surface optimization; vane loss coefficient

随着常规化石能源的短缺及环境污染等问题的日益突出,可再生能源的高效利用成为研究热点,地

热能发电技术是热点之一。Ruggero 预测,到 2050 年世界范围内的地热发电装机容量将达 140 GW^[1]。我国地热资源丰富,但大部分属于中低温范围^[2],因此有机朗肯循环(ORC)成为提高低温地热能^[3]利用效率的主要技术。

Wang 等人的研究表明,随着地热源温度的升高,膨胀机效率对有机朗肯循环的输出功影响更加显著^[4]。Pan 等人指出,膨胀机内效率的差异会影响有机朗肯循环性能^[5]。

为了提高有机朗肯循环的性能,需要针对具体热源参数进行向心透平设计,目前有机工质向心透平设计方法大都采用简单的一维设计和相似设计。Fiaschi 等人基于不同的有机工质对有机朗肯循环中的向心透平进行了一维设计^[6]。Seok 等人采用相似设计方法获得了有机工质向心透平^[7]。尽管上述设计方法较为便捷,但是无法准确反映向心透平内部的流动状态,因而需要对有机工质向心透平的一维设计结果进行优化。李艳以 R123 为工质完成了向心透平一维设计,研究结果表明,该设计对强激波引起的损失及气流偏转的预测存在不足^[8]。Pasquale 等人对自行设计的有机工质向心透平的喷嘴型线进行了优化,使喷嘴叶栅的总压损失有所降低^[9]。李艳完成了膨胀比为 8 时的有机工质向心透平的气动优化研究,结果表明,全工况下叶栅总压损失系数显著减小,跨声速工况下级组效率得到明显提高^[10]。

目前,有机工质向心透平喷嘴设计理论仍需发展^[11-12]。本文针对低温地热源有机工质向心透平喷嘴,通过 ANSYS Workbench 软件建立了喷嘴型线优化平台,以喷嘴叶片损失系数作为性能指标、以型线控制点作为变量进行了试验设计,并采用响应面方法对试验设计结果进行了分析,由此提出了喷嘴叶片的最优型线方案。

1 喷嘴叶型参数化模型

本文选择了 TC-2P 径向叶型,叶型的几何及气动参数根据地热源参数确定,如表 1 所示。如图 1 所示,TC-2P 型线采用 B 样条曲线拟合,型线中选取了 5 个控制点作为可控制点,其中控制点 1 和控制点 2 用于控制叶片压力面尾缘和中部的型线,控制点 3、控制点 4 和控制点 5 分别用于控制叶片吸力面中部、前缘、尾缘的型线。优化设计变量为可控制点与对应基点的距离参数,分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 。通过改变距离参数,可以进行喷嘴型线

的调整,距离参数的变化范围如表 2 所示。由于叶片前端和尾端控制点的调整会改变叶片弦长和安装角,因此本文未针对叶片型线的头部和尾部控制点进行控制。5 个控制点距离参数的变化范围根据满足喷嘴型线不会过度变形加以确定。

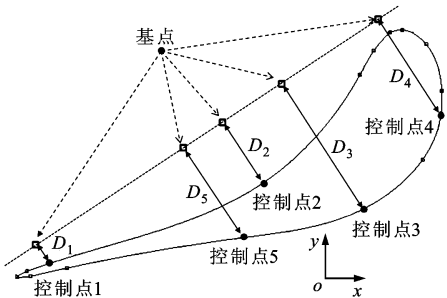


图 1 喷嘴叶型参数化模型

表 1 工质为 R245fa 时喷嘴几何及气动参数

参数	取值	参数	取值
喷嘴叶片弦长/mm	151.13	进口总温/K	330
安装角/(°)	33	出口静压/MPa	0.241
进口总压/MPa	0.364		

表 2 控制点距离参数的变化范围

控制变量	初始值	下限值	上限值
D_1 /mm	5.4	5.0	5.8
D_2 /mm	21.4	19.3	23.6
D_3 /mm	46.7	42.0	51.4
D_4 /mm	37.7	37.7	41.5
D_5 /mm	33.0	29.7	36.3

2 喷嘴型线的响应面优化

图 2 为喷嘴叶型响应面优化方案,该方案主要包括试验设计、CFD 分析、响应面分析。由试验设计、通过型线控制点距离参数组合获得不同的喷嘴型线;采用 CFD 分析获得喷嘴的叶片损失系数;采用响应面方法明确叶片损失系数随优化设计变量的变化趋势,确定距离参数对叶片损失系数的影响程度;通过叶片损失系数的最优距离参数组合确定最优喷嘴叶片型线。本文采用中心复合设计方法实现了试验方案的设计,该方法适用于二次响应面模型的校准,本文中需要完成 28 个试验方案。响应面优化采用的性能指标为叶片损失系数^[11]

$$\zeta = \frac{(h_{\text{exit}} - h_{s,\text{exit}})}{(h_{o,\text{in}} - h_{s,\text{exit}})} \tag{1}$$

式中: h_{exit} 为喷嘴出口焓值; $h_{s,\text{exit}}$ 为喷嘴出口等熵焓值; $h_{o,\text{in}}$ 为喷嘴入口焓值。

叶片损失系数对于距离参数的敏感度可衡量距离参数对叶片损失系数的影响,定义为

$$\gamma = \frac{\max \zeta - \min \zeta}{\zeta} \tag{2}$$

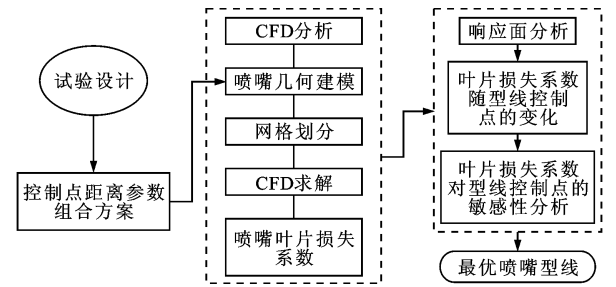


图 2 喷嘴叶型响应面优化方案

3 数值计算方法

3.1 计算域及边界条件

图 3 为喷嘴叶片数值计算域几何外形及边界条件。选取 1 个喷嘴流道作为计算域, L 为叶片弦长。计算域 z 轴方向上的 2 个壁面分别为喷嘴的轮毂面和轮盖面,这 2 个面沿 z 轴方向的距离与喷嘴叶片高度相等,为 $0.15L$ 。沿喷嘴叶片前缘上游延伸 $0.3L$ 作为进口边界,沿叶片尾缘向下游方向延伸 $0.1L$ 作为喷嘴出口边界。在计算域周向边界给定周期性边界条件,以模拟喷嘴内整圈气流流动;在进口边界给定进口总压、总温边界条件;在出口边界给定喷嘴出口静压;轮毂面、轮盖面和喷嘴叶片壁面为绝热无滑移壁面。

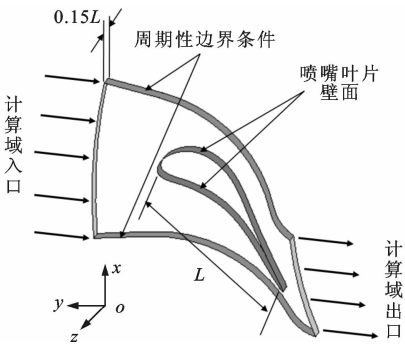


图 3 喷嘴叶片计算域及边界条件

3.2 网格划分及数值计算模型

图 4 为采用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 模块对喷嘴叶片单流道计算模型进行的非结构化网格划分。为了准确反映喷嘴内流动参数的变化,对喷嘴流道内区域进行了网格加密。

图 5 为喷嘴出口质量流量 m 随网格单元数的变化。由图 5 可见,当网格数超过 15 万时,继续增加网

格数对计算结果的影响非常小。综合考虑计算成本和计算结果的准确性,本文计算网格单元数取 20 万。

采用基于有限体积法的数值求解器 CFX 对三维定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程进行求解,控制方程中扩散项和源项的离散采用二阶中心差分格式,对流项的离散采用二阶迎风格式。湍流模型采用耦合 Langtry-Menter 转捩模型的 SST 湍流模型。

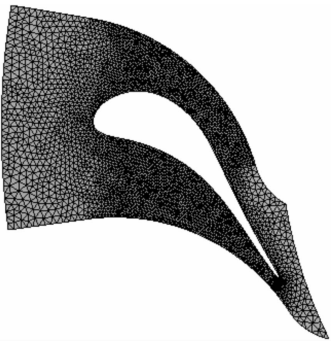


图 4 喷嘴叶片单流道计算模型网格

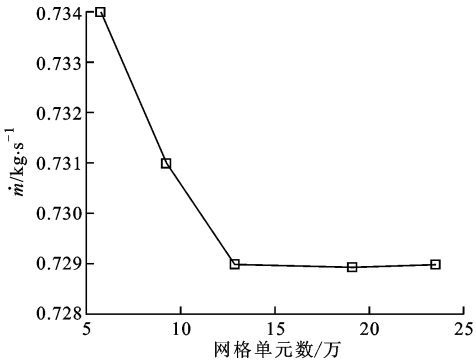


图 5 喷嘴出口质量流量随网格单元数的变化

4 结果与讨论

4.1 喷嘴型线控制点对喷嘴性能的响应面分析

响应面分析的数据由 Ansys Workbench 软件提供的目标驱动优化模块中的响应面分析程序获得。图 6 为叶片损失系数的响应面预测值与试验设计

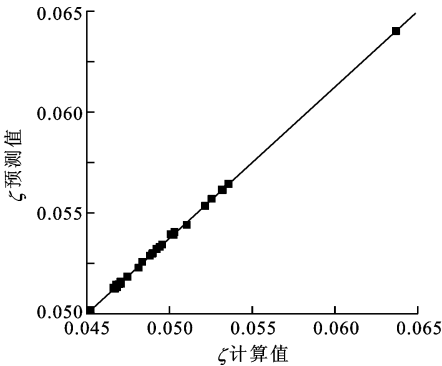
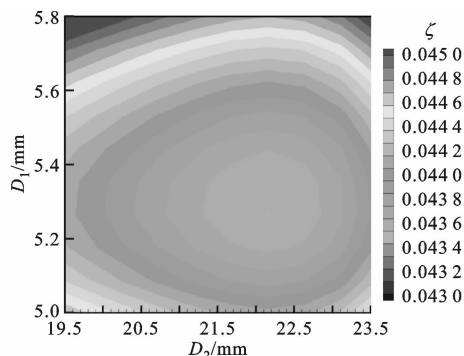


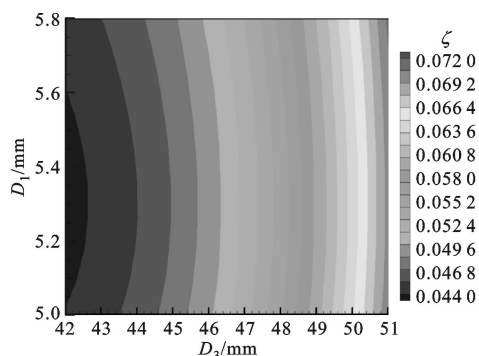
图 6 叶片损失系数的响应面预测值与试验设计点数值计算值的吻合度

计点的CFD计算值的吻合度。由图6可见,预测值与计算值的拟合度较好。通过对图6进行分析,可以确定各个距离参数的特定取值范围,使叶片损失系数较小。除此之外,本文还对最终分析获得的喷嘴叶片的性能进行了数值模拟,并与原型喷嘴叶片的性能进行了比较,以验证优化设计效果。

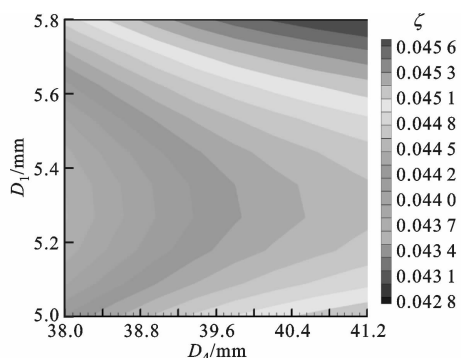
图7显示了影响叶片损失系数的距离参数间的交互作用。由图7可见:当 D_1 为5.2~5.4 mm、 D_2 为21.5~23 mm、 D_3 为42~42.5 mm、 D_4 为37~38 mm、 D_5 为31~33 mm时,均可找到较小的喷嘴叶片损失系数。



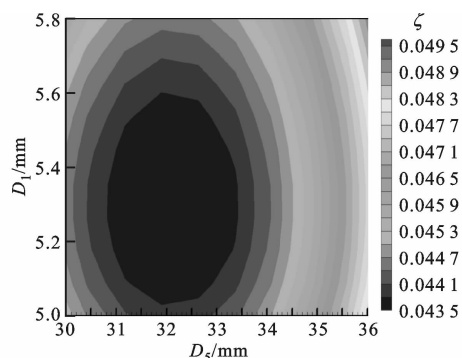
(a) D_1 与 D_2 的关系



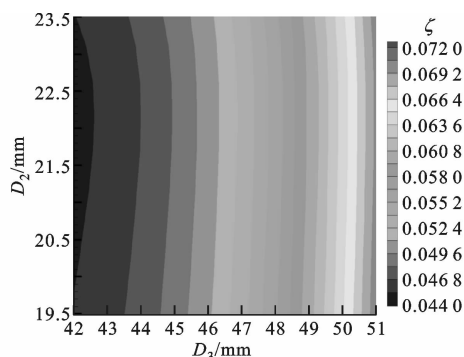
(b) D_1 与 D_3 的关系



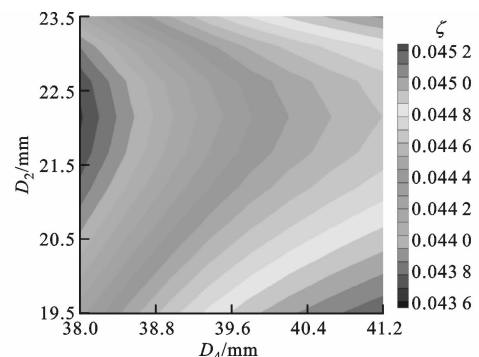
(c) D_1 与 D_4 的关系



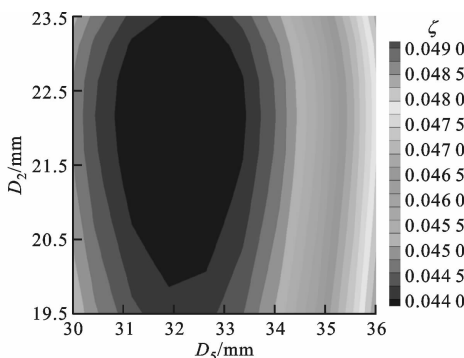
(d) D_1 与 D_5 的关系



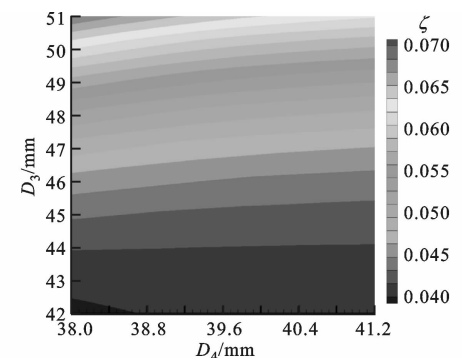
(e) D_2 与 D_3 的关系



(f) D_2 与 D_4 的关系



(g) D_2 与 D_5 的关系



(h) D_3 与 D_4 的关系

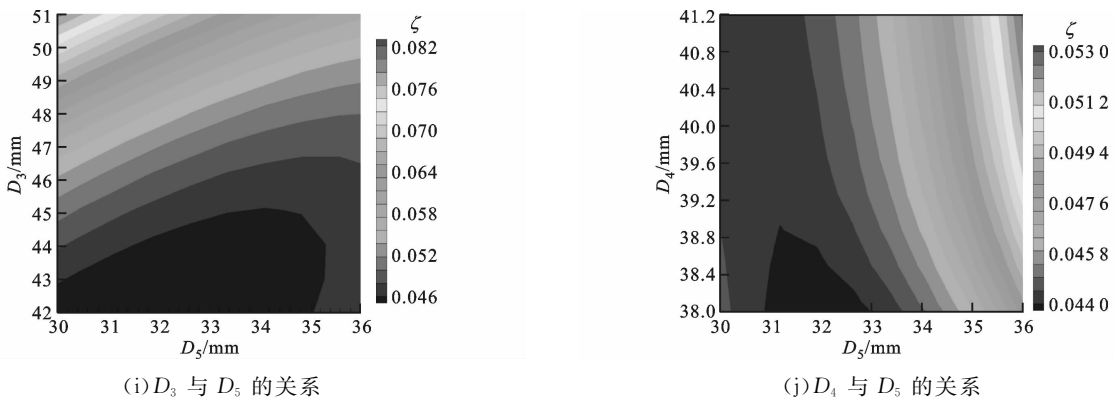


图 7 影响叶片损失系数的各个变量之间的交互作用

图 8 为叶片损失系数随各距离参数的变化。由图 8 可见:叶片损失系数均受控制点距离参数的影响,当控制点距离参数发生变化时,叶片损失系数随

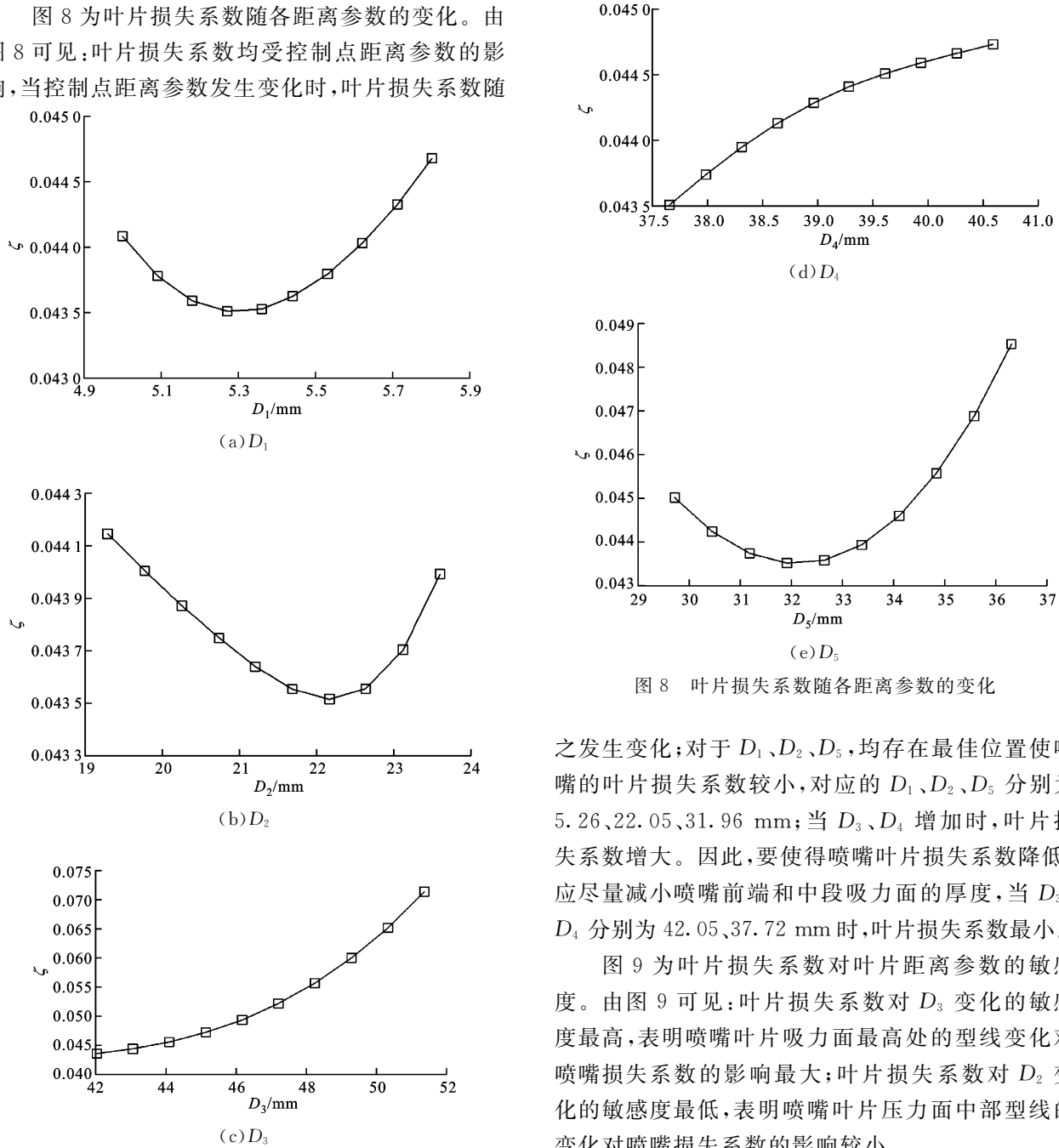


图 8 叶片损失系数随各距离参数的变化

之发生变化;对于 D_1 、 D_2 、 D_5 ,均存在最佳位置使喷嘴的叶片损失系数较小,对应的 D_1 、 D_2 、 D_5 分别为 5.26、22.05、31.96 mm;当 D_3 、 D_4 增加时,叶片损失系数增大。因此,要使得喷嘴叶片损失系数降低,应尽量减小喷嘴前端和中段吸力面的厚度,当 D_3 、 D_4 分别为 42.05、37.72 mm 时,叶片损失系数最小。

图 9 为叶片损失系数对叶片距离参数的敏感度。由图 9 可见:叶片损失系数对 D_3 变化的敏感度最高,表明喷嘴叶片吸力面最高处的型线变化对喷嘴损失系数的影响最大;叶片损失系数对 D_2 变化的敏感度最低,表明喷嘴叶片压力面中部型线的变化对喷嘴损失系数的影响较小。

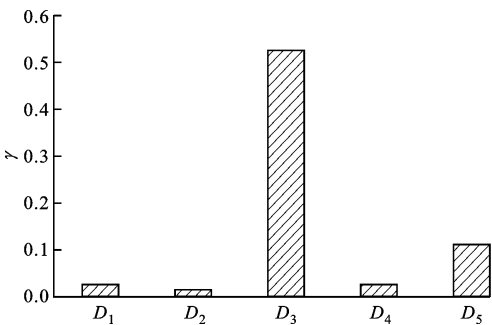


图 9 叶片损失系数对距离参数的敏感度

4.2 喷嘴型线的优化结果分析

基于图 7 分析,获得了有效降低叶片损失系数的距离参数最佳取值方案。图 10 为 2 种喷嘴叶片型线的对比。由图 10 可见,最优喷嘴叶片的前段和中段的厚度明显小于原型叶片。原型和最优喷嘴叶片的距离参数及损失系数如表 3 所示。由表 3 可见,相对于原型叶片,最优叶片的损失系数下降了 10%。在本文中原型叶片喷嘴的质量流量为 0.73 kg/s,优化叶片喷嘴的质量流量为 0.74 kg/s,可见优化使得质量流量有所增加。

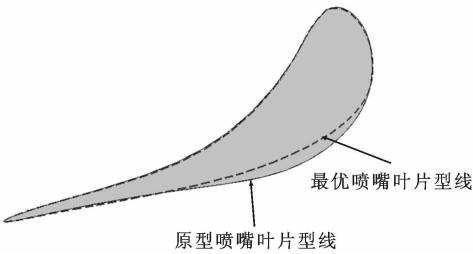


图 10 最优喷嘴叶片与原型喷嘴叶片型线的对比

图 11 为相对距离的定义,图 12 为原型和最优喷嘴流道内的熵 S 随相对距离 D' 的变化。由图 12 可见:当相对距离小于 0.4 时,原型喷嘴的熵与最优喷嘴基本一致;当相对距离为 0.55~1.00 时,最优

表 3 原型和最优喷嘴叶片的距离参数及损失系数

叶片	$D_1 /$ mm	$D_2 /$ mm	$D_3 /$ mm	$D_4 /$ mm	$D_5 /$ mm	ζ
原型	5.35	21.44	46.69	37.70	33.00	0.048 3
最优	5.26	22.05	42.05	37.72	31.96	0.043 8

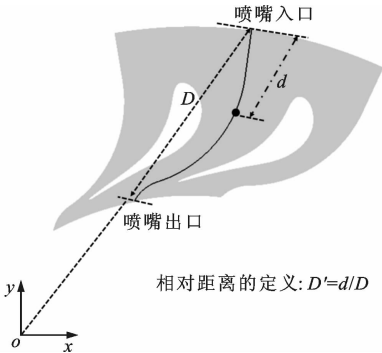


图 11 相对距离的定义

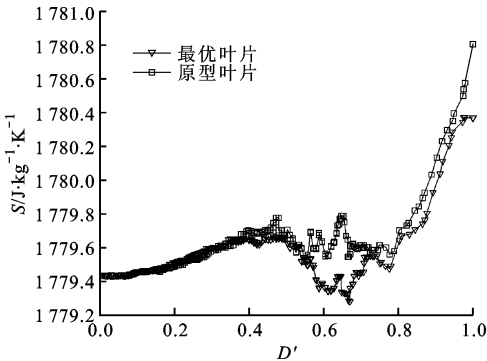
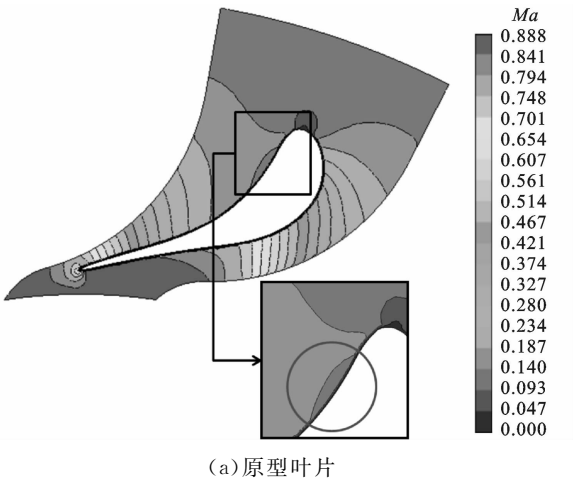


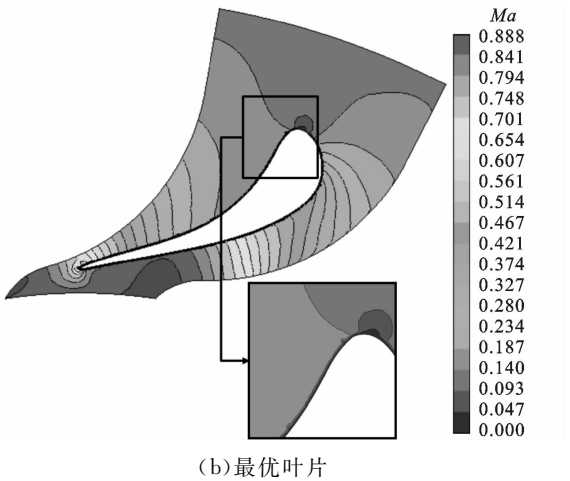
图 12 喷嘴流道内的熵随相对距离的变化

喷嘴的熵均小于原型喷嘴,喷嘴内的损失有所降低。这表明喷嘴叶片吸力面中部型线改进后,喷嘴流道中部至尾缘的能量损失有所下降。

图 13 为优化前后喷嘴流道内的马赫数 Ma 云图。



(a)原型叶片



(b)最优叶片

图 13 优化前后喷嘴流道内的马赫数云图

由图 13 可见,优化后喷嘴前段压力面处的低速区消失,叶片出口处马赫数有所增加。上述研究结果表明,采用最优叶片,有机工质在喷嘴内的流动更为顺畅。

5 结 论

以叶片损失系数为优化目标,基于试验设计方法,对有机工质喷嘴型线进行了响应面分析及优化,获得的主要结果如下。

(1)叶片压力面尾缘、叶片压力面中部、叶片吸力面尾段均存在最佳型线,使喷嘴的叶片损失系数较小;减小喷嘴前段和中段的厚度,可以使叶片损失系数降低。

(2)叶片吸力面中段型线的变化对叶片损失系数的影响较大,叶片压力面中段型线的变化对叶片损失系数的影响较小。

(3)相对于原型喷嘴叶片,采用最优喷嘴叶片后,叶片损失系数下降了 10%。优化后喷嘴前段压力面处的低速区消失,喷嘴出口处马赫数有所增加,有机工质在喷嘴内的流动更为顺畅。

下一步研究工作中将综合考虑喷嘴流量、喷嘴出口气流速度不均匀度等参数的影响,以此对喷嘴型线做进一步优化。

参考文献:

- [1] BERTANI R. World geothermal generation in 2007 [C] //Proceedings of European Geothermal Congress. Unterhaching, Germany: European Geothermal Energy Council, 2007: 1-5.
- [2] BERTANI R. Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report [J]. Geothermics, 2012, 4: 1-29.
- [3] YAMAMOTO T, FURUHATA T, ARAI N, et al. Design and testing of the organic Rankine cycle [J]. Energy, 2001, 26(3): 449-463.
- [4] WANG X, LIU X M, ZHANG C H. Performance analysis of organic Rankine cycle with preliminary design of radial turbo expander for binary-cycle geother-

mal plants [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2013, 135: 111402.

- [5] PAN L S, WANG H X. Improved analysis of organic Rankine cycle based on radial flow turbine [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61: 606-615.
- [6] FIASCHI D, MANFRIDA G, MARASCHIELLO F. Thermo-fluid dynamics preliminary design of turbo-expanders for ORC cycles [J]. Applied Energy, 2012, 97: 601-608.
- [7] KANG S H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid [J]. Energy, 2012, 41: 514-524.
- [8] 李艳, 李海波, 顾春伟. 有机工质向心透平气动设计与变工况性能预测 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 63-66.
LI Yan, LI Haibo, GU Chunwei. Aerodynamic design and off-design performance prediction of radial-inflow turbine with organic gas as working fluid [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 63-66.
- [9] PASQUALE D, GHIDONI A, REBAY S. Shape optimization of an organic Rankine cycle radial turbine nozzle [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135: 042308.
- [10] 李艳, 顾春伟. 高膨胀比有机工质向心透平气动优化研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(7): 1239-1242.
LI Yan, GU Chunwei. Aerodynamic optimization study for a radial-inflow organic turbine with high expansion ratio [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(7): 1239-1242.
- [11] WHEELER A P S, ONG J. The role of dense gas dynamics on organic Rankine cycle turbine performance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135: 102603.
- [12] BAO J, ZHAO L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 325-342.

(编辑 苗凌)