

7-30-2020

Numerical Simulation and Experimental Study of Three-dimensional Flow Field on Roots-type Power Machine Based on Dynamic Mesh Technique

Yanjun Xiao

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Yuxiang Liu

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Dayuan Wang

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Feng Hua

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation and Experimental Study of Three-dimensional Flow Field on Roots-type Power Machine Based on Dynamic Mesh Technique

Abstract

Abstract: *A new roots-type power machine was recommended. As for it, the working fluid of low pressure waste heat according was simulated to both the different operating conditions and the different intake and exhaust pressure and flow, and the changing process of internal flow field over time period using dynamic mesh technique was simulated when the power machine was in rotating work. The pressure field, velocity field and mass flow rate with the simulation results were analyzed, thus reaching the optimum operating conditions and the key parameters of the roots-type power machine. A test platform and conducted field tests was designed. As a result, the large consistency of the experimental data and simulation results illustrates the fact that numerical simulation of low-temperature conditions can be a practical means to research actual fluid machinery. It provides a new thinking in selecting appropriate roots-type power machines according to different types of waste heat in industrial production. Moreover, these efforts will provide strong theoretical guidance and foundation for the subsequent engineering practice of waste heat recovery system on roots-type power machine.*

Keywords

industrial low-temperature waste heat, waste heat recovery, roots-type power machine, numerical simulation, experimental study

Authors

YanJun Xiao, Yuxiang Liu, Dayuan Wang, Feng Hua, and Chunxia Li

Recommended Citation

Xiao Yanjun, Liu Yuxiang, Wang Dayuan, Feng Hua, Li Chunxia. Numerical Simulation and Experimental Study of Three-dimensional Flow Field on Roots-type Power Machine Based on Dynamic Mesh Technique[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 2998-3005.

罗茨式动力机的三维流场数值模拟与试验研究

肖艳军, 刘玉香, 王大源, 冯华, 李春霞

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 针对新型罗茨式动力机, 模拟在不同进气压力、流量的低温余热工质推动下, 其旋转工作中内部流场随时间周期变化过程; 结合仿真结果分析其压力场, 速度场及质量流量, 得出罗茨式动力机的理想运行工况及其关键参数; 同时设计试验平台并进行了现场测试。试验数据与仿真结果在很大程度上的一致性说明了数值模拟低温工况可以作为研究实际流体机械的一种切实可行的手段, 对于工业生产的不同余热类型配比罗茨式动力机的选型研究提供了一种新思路, 为后续罗茨式动力机余热回收系统的工程实践提供了强有力的理论指导和依据。

关键词: 工业低温余热; 余热回收; 罗茨式动力机; 数值模拟; 实验研究

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 12-2998-08

Numerical Simulation and Experimental Study of Three-dimensional Flow Field on Roots-type Power Machine Based on Dynamic Mesh Technique

Xiao Yanjun, Liu Yuxiang, Wang Dayuan, Feng Hua, Li Chunxia

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A new roots-type power machine was recommended. As for it, the working fluid of low pressure waste heat according was simulated to both the different operating conditions and the different intake and exhaust pressure and flow, and the changing process of internal flow field over time period using dynamic mesh technique was simulated when the power machine was in rotating work. The pressure field, velocity field and mass flow rate with the simulation results were analyzed, thus reaching the optimum operating conditions and the key parameters of the roots-type power machine. A test platform and conducted field tests was designed. As a result, the large consistency of the experimental data and simulation results illustrates the fact that numerical simulation of low-temperature conditions can be a practical means to research actual fluid machinery. It provides a new thinking in selecting appropriate roots-type power machines according to different types of waste heat in industrial production. Moreover, these efforts will provide strong theoretical guidance and foundation for the subsequent engineering practice of waste heat recovery system on roots-type power machine.

Keywords: industrial low-temperature waste heat; waste heat recovery; roots-type power machine; numerical simulation; experimental study

引言

余热属于二次能源, 是各种可燃气体一次能源用

于工业生产过程中的热量, 通常将其按温度不同划分为低温、中温和高温余热资源^[1]。各个种类各个行业的余热资源有着各自的特点, 并且直接影响余热回收技术方案的设计。

目前, 我国的中高温余热发电技术主要是以余热锅炉匹配汽轮机所组成的汽轮机发电系统为主, 在钢铁、冶金等行业中得到了应用, 但对于中低温



收稿日期: 2015-03-29 修回日期: 2015-05-07;
基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2013202230);
作者简介: 肖艳军(1976-), 男, 河北沧州, 博士, 副教授, 研究方向为嵌入式系统应用、余热利用技术、新能源装备及其关键技术; 刘玉香(1989-), 女, 河北衡水, 硕士, 研究方向为机电一体化成套设备极其关键技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2998 •

余热, 尤其是温度低于 260 °C, 压力低于 0.8 MPa 的低温余热资源回收技术起步较晚、尚未发展成熟^[2]。中低温余热发电技术方面, 主要是涡旋式膨胀机或螺杆膨胀机两种关键设备为核心的余热废气利用系统^[3-5], 而这方面的研究多采用对现有机型的探索、研究和改进。但这些技术在中低温余热回收方面存在核心设备结构复杂、加工成本高、维护不方便、运行成本高等明显缺点, 无法满足中小企业对于节能技术的需求^[6]。针对中低温余热回收利用的技术需求, 本文提出了新型罗茨式动力机用于中低温余热回收的技术方案。新型罗茨式动力机在中低温余热回收系统中的应用具有明显的技术优势:

(1) 叶片结构有良好的几何对称性能, 更易保持运转得平稳性; (2) 有较大的气腔容积, 输出功率和扭矩较大; (3) 比其它膨胀机的机械结构简单, 运行成本大大降低。

罗茨式动力机作为依靠流体介质推动转子旋转做功的动力机械, 内部气体流动情况非常复杂, 在以罗茨式动力机为动力核心设备的发电系统中, 对于其功率与各种余热资源的匹配是需要研究的首要技术问题, 这对于准确确定低温余热回收系统的组成有着重要的现实意义。采用理论经验推导加试验验证的方法, 存在设计周期长、设备试制成本高的缺点, 并且难以准确得到内部流场的性能参数。本文根据不同进气压力流量来模拟低温余热工质, 运用计算流体动力学的数值模拟方法和动网格技术来模拟动力机旋转工作中内部流场随时间周期变化过程, 由仿真结果分析其压力场, 速度场及质量流量曲线图, 得出罗茨式动力机的理想运行工况, 对仿真模拟的不同低温工况进行试验研究, 为后续罗茨式动力机余热回收系统的工程实践提供了强有力的理论指导和依据, 对低品位能源的进一步回收和利用具有深远的影响。

1 罗茨动力机低温工况仿真环境建立

1.1 低温工况的理论分析

为了数值模拟动力机在低温工况下的工作性

能, 并为搭建实验平台研究动力机低温工况下输出机械能的情况提供理论基础, 需要分析动力机工作的热循环过程, 得出动力机输出机械能的影响因素, 从而确定低温仿真环境的影响因素。对于本文的蒸汽装置动力循环, 热循环采用朗肯循环。蒸汽动力循环采用图 1 所示的水泵、锅炉、罗茨式动力机和冷凝器 4 个主要装置组成。水泵中的水被压缩升压后, 进入锅炉被加热汽化, 继而进入罗茨式动力机膨胀做功发电, 做功后的低压蒸汽进入冷凝器冷凝成水, 最后再回到水泵中, 完成一个工作循环。罗茨式动力机膨胀做功阶段, 流体工质推动转子旋转做功因其流量大、散热量相对较小, 忽略摩擦等不可逆因素, 简化为可逆绝热膨胀过程, 即等熵膨胀过程。故动力机在工作过程中, 忽略转子摩擦损失, 漏气损失, 湿气损失等其它功耗损失, 蒸汽焓值减小值可以作为流体膨胀做功多少的重要指标。

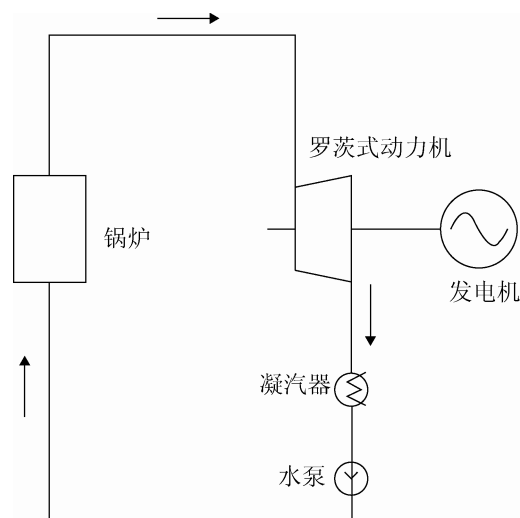


图 1 罗茨式动力机动力循环图

本文仿真分析时将实验气体按理想气体来处理, 通过下式计算动力机的理想焓降。

$$\Delta h = h_1 - h_{2s} = \frac{k}{k-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1)$$

其中: Δh 为动力机理想焓降, kJ/kg; k 为定熵指数; R_g 为气体常数, J/(kg·K); p_1 为罗茨式动力机进气压力, Pa; p_2 为罗茨式动力机排气压力, Pa。

由式 (1) 可知, 理想焓降值与低温工质的气体常数和罗茨式动力机进气温度成正比, 与排气进气压力比成反比。故本文罗茨式动力机低温工况的仿真环境与气体的温度、压力、气体常数等因素有关。

1.2 动力机低温工况下流体域模型的建立

仿真环境以工业生产过程中产生的低温饱和蒸汽进行研究, 设定低温饱和蒸汽的压力范围为 0.2 MPa~1 MPa, 对应的温度范围为 134 °C~184 °C。低温饱和蒸汽从动力机的进汽口进入工作腔, 推动 8 字形转子旋转做功, 做功后的乏汽从排汽口排出, 如图 2 所示。动力机的转子是依靠流体力工质推动从而绕中心轴进行旋转运动, 需要数值模拟计算转子上的力或力矩来确定转子运动规律, 分析动力机在低温工况分别为 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa, 0.7 MPa, 0.8 MPa, 0.9 MPa, 1.0 MPa 时的工作性能。

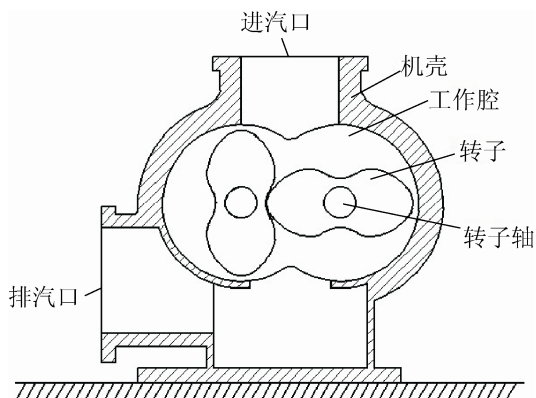


图 2 罗茨式动力机结构示意图

首先对数值模拟对象进行几何建模, 根据罗茨式动力机结构特点, 几何模型主要分为三部分: 旋转流场部分、进汽部分和排汽部分。罗茨式动力机关键部件是它的转子, 本文转子型线采用的是渐开线型转子型线, 渐开线型转子模型建立过程如下:

在设计罗茨式动力机的渐开线型转子时, 首先根据设计要求确定转子叶数以及转子间的中心距, 然后通过选取合适的径距比确定叶轮最大外圆半径, 根据已有参数确定节圆半径, 节圆压力角以及

基圆半径等参数, 最后根据蒸汽动力机的用途及工作介质选取合适的间隙值, 从而可以确定出转子的理论渐开线型方程。

选定参数: 转子头数 $Z = 2$, 转子叶顶圆直径 $D = 300 \text{ mm}$, 两转子的中心距 $a_0 = 202 \text{ mm}$ 。从而确定节圆半径 $R_2 = 101 \text{ mm}$, 节圆压力角 $\alpha = 51.83^\circ$, 基圆半径 $R_1 = 62.42 \text{ mm}$, 圆弧半径 $R_0 = 49 \text{ mm}$ 。从而确定渐开线型方程如下式所示, 代入到三维软件利用方程式驱动曲线绘制转子理论模型。

渐开线段方程:

$$\begin{cases} x = 62.42 \times \sin(0.904 + t) - \\ 62.42 \times (0.487 + t) \times \\ \cos(0.904 + t) \\ y = 62.42 \times \cos(0.904 + t) + \\ 62.42 \times (0.487 + t) \times \\ \sin(0.904 + t) \end{cases} \quad (2)$$

参数范围: $0 \leq t \leq 1.5700$

叶谷圆弧段方程:

$$\begin{cases} x = 101 \times \cos(t) \times \sin(t) - \sin(t) \times \\ \sqrt{49 \times 49 - 101 \times 101 \times \sin(t) \times \sin(t)} \\ y = 101 - 49 \times \cos\{\arcsin[101 \times \cos(t) \times \\ \sin(t) / 49 - \sin(t) / 49 \times \sqrt{49 \times 49 - \\ 101 \times 101 \times \sin(t) \times \sin(t)}]\} \end{cases} \quad (3)$$

参数范围: $0 \leq t \leq 0.4511$

叶峰圆弧段方程:

$$\begin{cases} x = 101 + 49 \times \cos[t + \\ \arcsin(101 \times \sin(t) / 49)] \\ y = 49 \times \sin[t + \arcsin(101 \times \sin(t) / 49)] \end{cases} \quad (4)$$

参数范围: $0 \leq t \leq 0.2136$

根据动力机的用途及工作介质选取合适的间隙值, 在上述理论型线参数方程的基础上, 利用软件将转子截面沿型线方向均匀缩小间隙值的一半, 然后绘制出渐开线转子的实际型线, 从而建立渐开线型转子的三维实体模型。

根据实际条件对罗茨式动力机进行了进汽口和排汽口的简化, 降低模型的复杂外形, 即有利于离散计算区域, 提高前处理仿真效率, 又可以降低

计算网格的数量和边界的区域。本文的罗茨式动力机的流场域模型如图 3 所示。

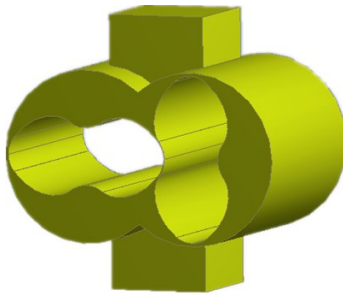


图 3 罗茨式动力机流场域模型

考虑到计算域的网格将在计算中发生较大变形, 并且动网格计算对单元质量要求较高, 为了降低网格的畸变率, 计算域采用三棱柱形网格, 网格单元总数为 107 584, 网格 maximum cell skewness<0.37, 单元的畸变率较低, 有利于动网格的实现。模型的进汽口利用 cooper 方法对体进行网格划分。对进汽口的非源面进行网格划分, 采用 quad 单元, map 划分; 对进汽口的源面进行网格划分, 采用 tri 单元, pave 划分; 将进汽口的源面网格节点模式投影到整个体, 采用 hex/wedge 单元, cooper 划分。

1.3 参数设置及算法选择

罗茨式动力机的工作腔容积随转子之间啮合转动而周期性变化的, 故动力机内部流场的数值模拟唯有通过动网格而完成。三维动网格参数的设置比较复杂, 易出现负体积, 设定参数之前尽量提高网格的质量, 确保网格的畸变率足够小, 在计算过程中需要多次尝试修正动网格参数, 以避免负体积出现。

罗茨式动力机雷诺数较高, 故湍流模型选用非定常 k-e 模型。考虑到收敛性和收敛速度, 采用基于压力的隐式求解器。气体在流动过程中遵循流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒定律。对连续性和动量的求解采用 PISO, 该算法可更好的适应瞬态问题的模拟。对压力的计算采用 PRESTO! 格式离散, 其余采用二阶精度的迎风格式离散^[7]。

2 低温工况动力机运动仿真结果及分析

假定转子转过一圈所需时间为 0.04 s, 时间步长 Time step size 取 0.000 1 s, 针对动力机的内部流场运动情形, 对工况 1(0.2 MPa), 工况 2(0.3 MPa), 工况 3(0.4 MPa), 工况 4(0.5 MPa), 工况 5(0.6 MPa), 工况 6(0.7 MPa), 工况 7(0.8 MPa), 工况 8(0.9 MPa), 工况 9(1.0 MPa) 共 9 个工况进行仿真分析, 假设各工况下进气口的流量不变, 分析动力机在不同工况下的工作性能, 下面列出了部分工况的仿真结果, 如图 4~5 所示。

2.1 压力云图结果及分析

由罗茨式动力机的工作机理可知, 动力机机壳内的空间被两转子大致分隔成 3 部分, 同时这 3 部分的压力会随着两转子的相向旋转而交替发生变化。图 4(a)中与进汽口相通的空间部分颜色为红色, 其压力接近 0.2 MPa, 即进汽压力; 与排汽口相通的空间部分颜色为接近黄色, 其压力接近 0 MPa, 即排汽压力; 被转子与机壳密封的空间部分颜色接近深黄色, 为进汽压力向排汽压力过渡中。图 4(b)~(j)中各个时刻的压力变化分布情况, 与图(a)基本一致, 同时也符合罗茨式动力机工作机理的压力变化规律, 验证了本文数值模拟所选数学模型、所使用计算方法以及边界条件的设置是合理的, 在一定程度上说明数值模拟结果的可靠性。

由压力云图可以分析出: 在两转子的啮合部位以及转子与机壳密封部位出现红色区域与蓝色区域交替出现的情形, 即高低压交替出现。这是由于两转子在啮合过程中对啮合处以及机壳密封处的工作介质进行排挤, 使得该部分处的瞬时压强急剧增大, 出现红色区域; 随着转子啮合结束, 啮合时被压缩气体分布的空间急剧扩张, 导致瞬时压强逐渐降低, 出现蓝色区域。随着转子的高速旋转, 运动过程中会反复出现高低压交替情形, 转子会受到压力冲击, 使转子受损, 影响转子的使用寿命。

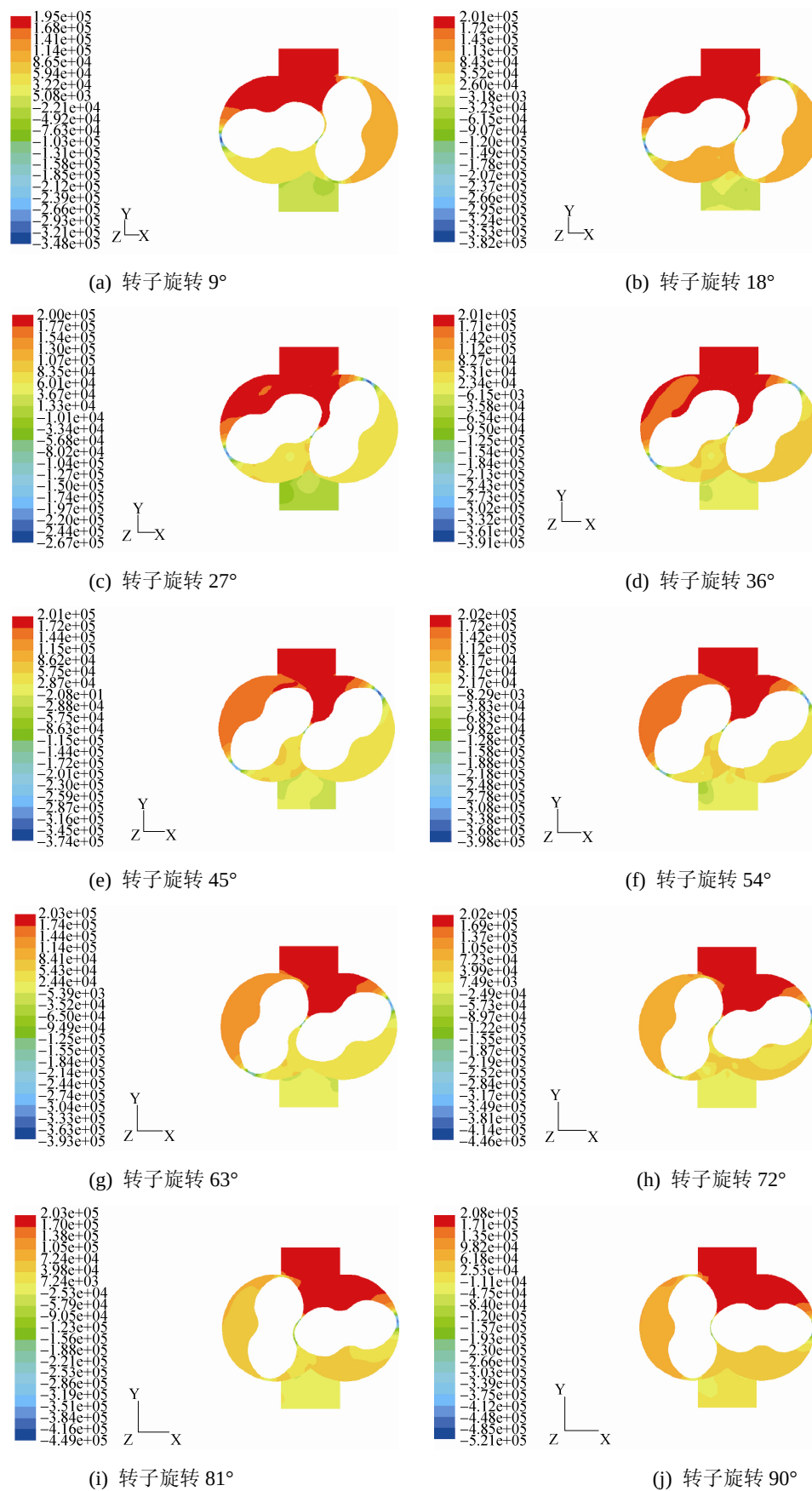


图 4 罗茨式动力机压力场分布云图

<http://www.china-simulation.com>

2.2 速度矢量图结果及分析

图 5 为工况 1(0.2 MPa)下转子旋转 0~90°时运动仿真结果某一截面速度放大图。由图可以看出罗茨式动力机运转过程中的速度变化的大小以及内部流向的复杂性, 捕捉流场的瞬时变化规律。

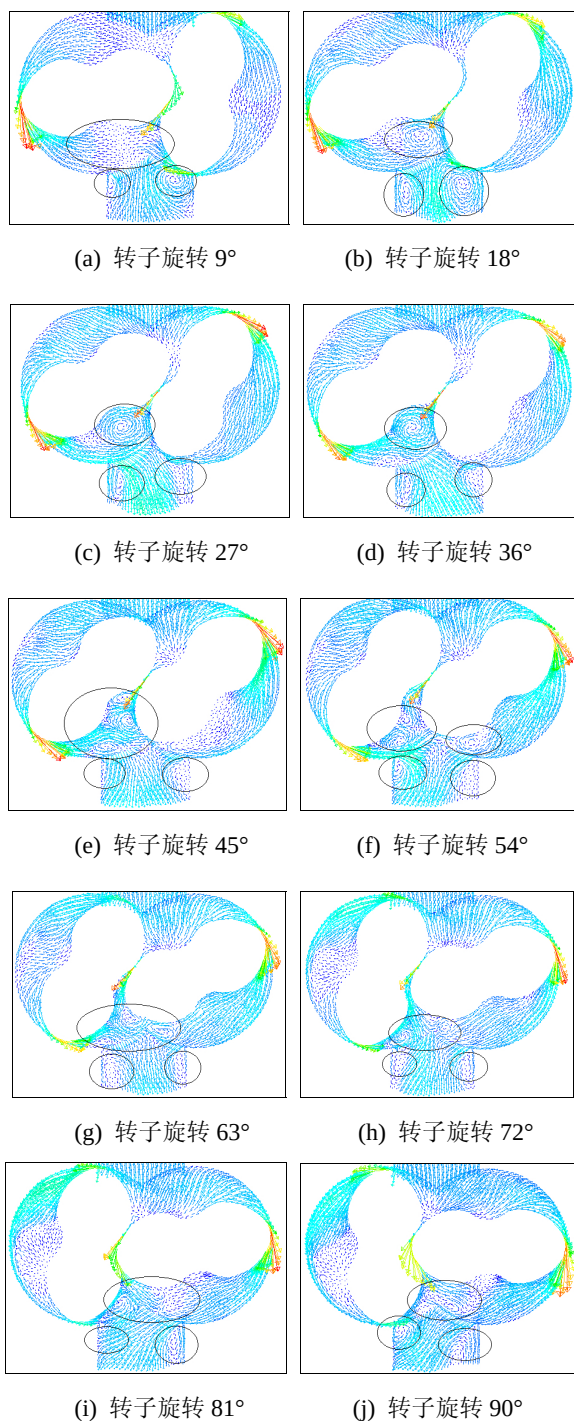


图 5 罗茨式动力机速度场放大图

由图 5 可以分析出: 转子开始旋转时, 排气口与机壳壁面相邻部位两侧产生了涡流现象, 但随着转子的继续旋转, 排气口的流速持续增加, 排气口两侧的涡流现象逐渐减小。这个过程产生的原因主要是由于排气口近壁面附近的流速较低时, 此处的气流与排气口高速气流相互掺杂产生了涡流现象, 故随着排气口流速的增加, 涡流逐渐减小, 但由于转子的旋转此处的流速方向比较复杂, 故涡流现象实时变化。

由图 5 还可以分析出: 靠近两转子的啮合处, 并处于排气口侧, 随着转子的旋转, 逐渐由没有漩涡到形成一个漩涡, 由一个漩涡到形成多个漩涡, 由仿真过程可以清晰的看出漩涡形成的整个过程。这是由于腔内的两个转子是同时向相反方向旋转工作的, 内部气流由于流向的不同, 出现了漩涡现象。同时, 随着排气口气流流速的增加, 使气流流向更加的复杂, 故在排气侧出现了漩涡现象^[8]。

2.3 质量流量结果分析

本文对于非定常问题的分析, 采用监控质量流量的方法来判定结果的收敛。进气口的质量流量为 3.884 583 2 kg/s, 出口处为 3.885 245 7 kg/s, 由此可见二者差值很小, 反映出较小的误差, 进一步说明本次分析结果的准确性。

通过对上述仿真结果进行分析, 综合考虑压力场, 速度场以及质量流量差值, 得出罗茨式动力机的最佳工况应当是流体对转子冲击在许用范围内, 流场的压力与速度较大, 压力分布均匀, 速度运转平稳的情形。工况 8(0.9 MPa)下罗茨式动力机的最大应力为 2 820 Pa, 最大速度为 84.5 m/s, 质量流量结果稳定, 故其为较佳工况。

3 试验平台的建立与研究

3.1 试验平台的建立

为了试验研究罗茨式动力机在低温工况下的做功情形, 本文以罗茨式动力机为核心动力设备搭建了低温余热回收的发电系统, 对仿真模拟的低温

工况进行试验研究。图 6 为搭建的试验平台的 3D 模型与实物照片, 图中①控制系统、②发电机、③罗茨风机、④电动比例调节阀、⑤手动控制阀、⑥压力表、⑦温度计、⑧电磁流量计、⑨散热风扇、⑩减振底座、⑪ 编码器。该试验平台通过锅炉加热水产生水蒸汽, 为整个试验系统的搭建提供稳定气源, 模拟低温工质。从锅炉出来的压缩空气经过调节阀调节气源的流量及压力, 进入罗茨式动力机后推动转子旋转做功, 做功后的低压蒸汽进入冷凝器冷凝成水, 再进入水泵, 完成一个工作循环。

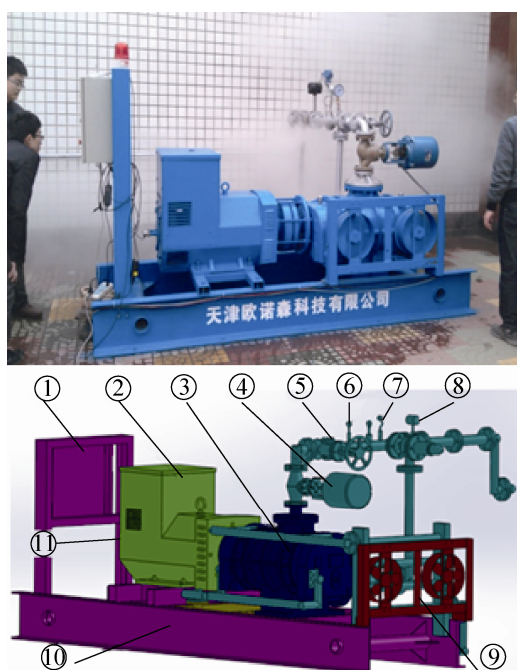


图 6 罗茨蒸汽发电机实验平台实物照片与 3D 模型

3.2 试验目的

本试验的目的是为了初步了解低压蒸汽发电装置样机的基本性能以及实际运行调节状况, 测试动力机在低压饱和蒸汽的条件下能否稳定输出电能, 验证罗茨式蒸汽发电装置应用于余热回收领域的可行性。在完成试验的基本测试后, 还需要对罗茨式蒸汽发电装置进行基本性能的测试, 包括电能输出特性、负载特性、流量特性等性能。电能输出特性试验是为了评估动力机在空载以及带负载下的动力性能, 是评判机组经济性的关键指标。负载特性试验是为了在规定转速下, 评定动力机负载的

工作特性以及机组所承受的机械负荷的情况, 同时也可以利用在各种转速下测得的负荷特性了解机组的速度特性。流量特性的试验是为了测定动力机的流量影响因素, 用来分析余热利用率的影响指标。

3.3 实验数据及分析

在实验过程中, 通过调节进汽阀, 控制蒸汽的进气量及压力, 观察设备的运转情况, 待系统稳定后将采集发电机转速, AB, BC, CA 之间的线电压以及蒸汽进入罗茨式动力机前的流量、压力并进行记录, 如表 1 所示。

表 1 罗茨蒸汽动力机空载实验数据

发电机 转速 /(r/min)	线电压			蒸汽 流量 /(t/h)	蒸汽 压力 /MPa
	AB/V	BC/V	CA/V		
210	10	3	7	0.51	0.07
265	32	40	38	0.65	0.09
732	46	42	49	2.46	0.25
986	138	143	150	2.87	0.32
1 200	202	200	200	4.32	0.45
1 270	290	289	284	5.03	0.59
1 400	343	349	336	5.74	0.67
1 430	363	369	355	5.83	0.68
1 490	378	380	379	6.45	0.69
1 700	383	385	383	7.56	0.77
1 930	389	389	389	8.72	0.81

为了更直观地反应发电机转速与蒸汽流量、压力之间的关系, 在 Matlab 中将表 1 中的数据整理依次得到发电机电压-转速, 电压-蒸汽流量-蒸汽压力的曲线图如图 7~8 所示。

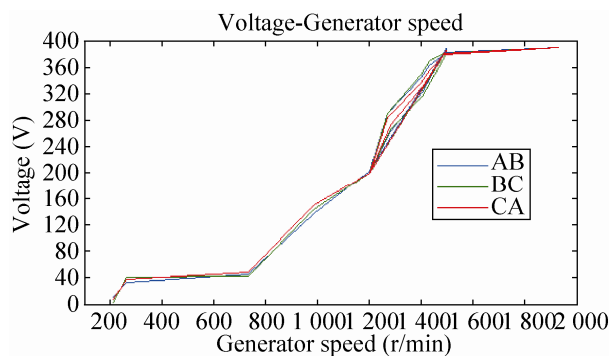


图 7 发电机电压-转速曲线图

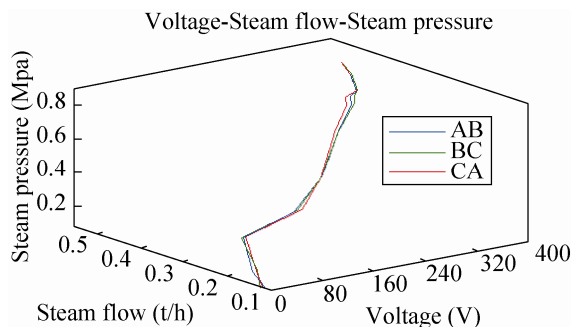


图 8 发电机电压-蒸汽流量-蒸汽压力曲线图

由实验数据表及曲线可以看出,可以看出输出电压与蒸汽流量、压力、转速近似成“S”型,随着蒸汽压力和流量的升高,动力机的输出转速和输出电压逐渐增加,即对外做功也越多。考虑动力机长期运行的可靠性,应当在尽量满足动力机内部流场性能的前提下,选择输出机械能更多的工况,作为动力机的最佳运行低温工况,工况 9(1.0 MPa)的转速最大为 1 930 r/min,其输出的机械能最大。该结论与以上流场仿真结果在很大程度上具有一致性。

4 结论

(1) 分别对罗茨式动力机的低温工作介质处在不同特性的各工况进行了非定常数值模拟计算,分析动力机在不同低温饱和蒸汽下的压力场,速度场以及质量流量的变化规律,直观清晰地观测到涡流的产生,运动和消失的过程,通过对比不同工况间模拟的差异,得出压力值与速度值较大的工况 8(0.9 MPa)为罗茨式动力机理想运行工况。

(2) 在实验研究中,以罗茨式动力机为核心搭建了低温余热回收的发电系统,对仿真模拟的不同低温工况进行试验研究,分析了不同工况对效率的影响,工况 9(1.0 MPa)下动力机的输出机械能最大,与理论分析的工况较为接近,通过对模拟结果

与试验数据的分析比较证实了 CFD 用于动力机流场研究的可靠性和可行性。指导了实践中根据工业生产的不同余热类型配比罗茨式动力机的选型方法,这对于罗茨式动力机在中低温余热回收装置中的推广应用具有十分重要的实践指导意义和参考价值。

(3) 通过本文计算,说明数值模拟可作为研究实际流体机械的一种既切实可行又省时省力的手段,在得到较好的结果后可以有针对性地采用实验对计算结果进行校核,在很大程度上避免了试验的盲目性,节省时间与成本,提高了效率。

参考文献:

- [1] 王统彬. 纯低温余热发电方案设计及系统优化 [D]. 河北: 华北电力大学(河北), 2009: 4-6.
- [2] 张键敏, 于海. 有色冶金烟气余热回收利用 [J]. 冶金能源, 2011, 30(2): 59-64.
- [3] 曹滨斌, 李惟毅. 螺杆膨胀机双循环低温余热回收系统分析 [J]. 天津大学学报, 2010, 43(4): 310-314.
- [4] 刘广彬, 赵远扬, 李连生. 低温余热回收用涡旋膨胀机性能模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 89-91.
- [5] Naoki Hayakawa, Yoshitsugu Wakazono, Takeyoshi Kato, et al. Minimizing Energy Consumption in Industries by Cascade Use of Waste Energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 1999, 14(3): 795-801.
- [6] 曹明莉, 房明, 李勇. 基于能值理论的水泥企业可持续性评价 [J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 767-771.
- [7] Ahmed Kovacevic. Boundary Adaptation in Grid Generation for CFD Analysis of Screw Compressors [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering (S0029-5981), 2005, 64(6): 401-426.
- [8] 刘正先, 徐莲环, 赵学录. 罗茨鼓风机内部气流脉动的非定常数值分析 [J]. 航空动力学报, 2010, 22(3): 401-405.