



航空动力学报
Journal of Aerospace Power
ISSN 1000-8055, CN 11-2297/V

《航空动力学报》网络首发论文

题目: 转子径距比对燃料电池气体循环泵性能影响
作者: 杨悦民, 张志宇, 李龙, 刘建峰, 黎义斌
DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210348
收稿日期: 2021-07-05
网络首发日期: 2021-12-08
引用格式: 杨悦民, 张志宇, 李龙, 刘建峰, 黎义斌. 转子径距比对燃料电池气体循环泵性能影响[J/OL]. 航空动力学报. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20210348>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

转子径距比对燃料电池气体循环泵性能影响

杨悦民^{1,2}, 张志宇^{1,2}, 李 龙^{1,2}, 刘建峰³, 黎义斌^{1,2}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325100;

3. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘 要：为了揭示径距比对凸轮式气体循环泵的气动性能的影响规律,通过坐标变换推导了 3 叶的圆弧-渐开线-圆弧转子型线方程,建立 6 种不同径距比的气体循环泵模型进行对比分析。采用重整化 $\kappa-\epsilon$ (RNG $\kappa-\epsilon$) 湍流模型对转子腔内部进行三维非定常数值计算,结合动网格技术分析转子径距比对气体循环泵流量特性、转子腔速度分布的影响规律,并与实验结果进行对比。结果表明:转子径距比对气体循环泵性能影响较为明显,随着转子径距比由 1.34 增大到 1.45,泵出口平均流量与瞬时流量脉动呈上升趋势,且在 1.38~1.40 时变化较为明显,平均流量增大了 0.001833m³/s(15.8%);转子径距比在 1.38~1.40 时,转子受力较好,对转子径向激励力分量 F_r 的抑制较为明显,对转子轴向激励力分量 F_a 的影响不显著;随径距比变化,转子腔内涡量分布变化较为明显,转子径距比在 1.40 时,转子腔内涡量分布较小,有效抑制了气体回流。

关键词：气体循环泵; 径距比; 流量特性; 速度分布; 径向激励力

中图分类号：V219; TK91

文献标志码：A

Influence of rotor diameter ratio on the performance of fuel cell gas circulating pump

YANG Yuemin^{1,2}, ZHANG Zhiyu^{1,2}, LI Long^{1,2}, LIU Jianfeng³, LI Yibin^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute, Lanzhou University of Technology, Wenzhou, Zhejiang 325100, China;

3. Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to reveal the influence of the diameter-to-distance ratio on the aerodynamic performance of the cam-type gas circulating pump, a three-lobe arc-involute-arc rotor profile equation was derived through coordinate transformation, and 6 gas circulations with different diameter ratios were established to compare and analyze the pump model. The Re-normalization group $\kappa-\epsilon$ (RNG $\kappa-\epsilon$) turbulence model was used to calculate the three-dimensional unsteady numerical simulation inside the rotor cavity, and in combination with the dynamic grid technology, the influence of the rotor diameter ratio on the flow characteristics of the gas circulating pump and the velocity distribution of the rotor cavity was analyzed, and the results

收稿日期：2021-07-05

基金项目：温州市科技计划项目(G20190017);甘肃省自然科学基金(20JR5RA452)

作者简介：杨悦民(1995-),男,硕士生,主要从事气体循环泵气动性能研究。

通信作者：黎义斌(1977-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事流体机械流动理论方面的研究。E-mail:liyibin58@163.com

引用格式：杨悦民,张志宇,李龙,等. 转子径距比对燃料电池气体循环泵性能影响[J]. 航空动力学报: 1-10.

YANG Yuemin, ZHANG Zhiyu, LI Long, et al. Influence of rotor diameter ratio on the performance of fuel cell gas circulating pump[J]. Journal of Aerospace Power: 1-10.

were compared with the experimental results. The results showed that the rotor diameter ratio had a significant impact on the performance of the gas circulating pump. As the rotor diameter ratio increased from 1.34 to 1.45, the average volume flow rate and instantaneous flow pulsation at the outlet of the pump showed an upward trend, and the changes were more obvious between 1.38—1.40. The average flow increased by $0.001833\text{m}^3/\text{s}$ (15.8%); when the rotor diameter-to-pitch ratio was 1.38—1.40, the rotor received better force, the suppression of the radial excitation force component F_x of the rotor was more obvious, and the influence on the rotor radial excitation force component F_y was not significant; the vorticity distribution in the rotor cavity changed significantly with the variation of the diameter-to-distance ratio. When the rotor diameter-to-distance ratio was 1.40, the vorticity distribution in the rotor cavity was smaller, which effectively suppressed gas backflow.

Key words: gas recycle pump; diameter—distance ratio; discharge characteristic; velocity distribution; radial exciting force

凸轮式气体循环泵主要由转子、泵体和齿轮腔、密封装置等部分组成,通过一对同步齿轮带动转子进行同步反向转动,具有结构紧凑、承压能力强、维护方便、容易制造等优点。相比于其他容积式气体循环泵(齿轮泵、螺杆泵),由于凸轮式气体循环泵具有上述优点,已成为螺杆泵、齿轮泵的最佳替代品之一,因此在船舶、新能源汽车等领域发挥着重要作用。

部分学者对气体循环泵的数值计算及转子叶型线设计^[1-4]进行了大量研究。李玉龙^[5]等人通过对宽顶转子的研究,做出通用轮廓构造的轮廓方程,构建出适用于各类外啮合转子泵容积利用系数的通用计算模型;刘玉岱^[6]提出圆弧—摆线—渐开线型罗茨泵转子型线可提高泵抽气效率,减小转子之间气体泄漏量,用来替代以往的圆弧—渐开线型转子型线;杨向君^[7]基于主动转子上母型线段与从动转子共轭型线段间的运动关系,分别给出型角和节角两种通用共轭模型的求解方法及对应的全参数化的型线方程;姜希彤^[8]等介绍了曲爪型真空泵转子的典型型线以及优化型线的构建方法;Hsieh^[9-11]利用共轭齿轮理论对转子泵的螺旋转子轮廓建立了数学模型;冯诗愚^[12]等通过坐标变换推导了阴阳转子的基本方程,建立了双齿气体循环泵的数学模型。

随着计算流体动力学(CFD)的广泛应用,数值模拟成为很多学者首选的研究手段。王君等^[13]人提出一种新型椭圆弧型转子型线,建立椭圆弧型转子型线生成的数学模型,得到转子中各段曲线的解析方程和角度的取值范围;黎义斌等^[14]基于动网格模型和局部网格重构的网格变形技术,

对燃料电池凸轮式气体循环泵多叶转子腔内部气动性能进行研究;Jung^[15-16]通过对转子的运动学分析,建立一种带有椭圆凸角的凸轮泵设计方法;Huang 和 Liu^[17]对渐开线三叶鼓风机进行数值模拟,直观的分析了风机的流动特征;黄思等^[18]对罗茨泵内部流动进行瞬态模拟和性能预测,为罗茨泵的设计和應用提供了理论依据。

基于对凸轮式气体循环泵已有的研究,发现其中还存在很多不足,对圆弧—渐开线型线研究不够深入。因此,本文通过坐标变换推导3叶的圆弧—渐开线—圆弧转子型线方程,建立6种不同径距比的气体循环泵模型进行对比分析,采用 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型对转子腔内部进行三维非定常数值计算,结合动网格技术分析转子径距比对气体循环泵气动性能的影响规律。

1 模型建立

1.1 型线设计

凸轮式气体循环泵转子采用圆弧—渐开线—圆弧型线,两转子在渐开线的基圆处相切,以3叶转子为例,如图1所示,JKL段曲线是成对称形转子的1/6型线,IJ为叶根圆弧段,JK为渐开线段,KL为叶顶圆弧段,R为渐开线JK的基圆半径,只需要推导出此段曲线的型线方程,即可绘制整个转子型线。

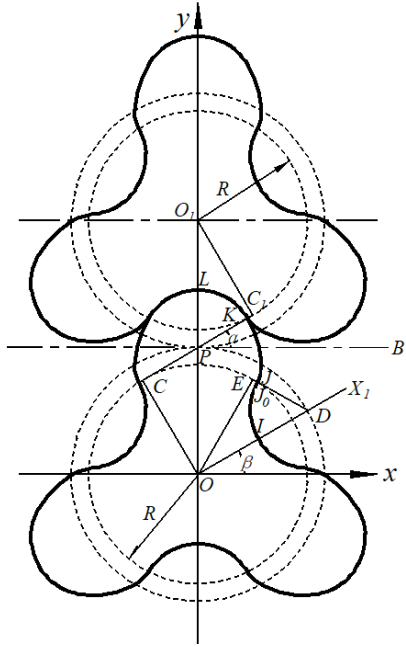


图1 圆弧-渐开线-圆弧型转子型线
Fig.1 Arc-gradient-round arc rotor line

1) JK 渐开线段型线方程为

$$\begin{cases} x = R \begin{bmatrix} \left(\cos\phi + \frac{\pi}{180} \phi \sin\phi \right) \cos\theta - \\ \left(\sin\phi - \frac{\pi}{180} \phi \cos\phi \right) \sin\theta \end{bmatrix} \\ y = R \begin{bmatrix} \left(\cos\phi + \frac{\pi}{180} \phi \sin\phi \right) \sin\theta - \\ \left(\sin\phi - \frac{\pi}{180} \phi \cos\phi \right) \cos\theta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中 JK 段渐开线段展开角起始角度 φ_{\min} 和终止角度 φ_{\max}

$$\begin{cases} \varphi_{\min} = \angle EOJ_0 = \frac{180}{\pi} \left(\tan\alpha - \frac{\pi}{2Z} \right) \\ \varphi_{\max} = \angle COJ_0 = \angle DOC - \angle DOJ_0 \end{cases} \quad (2)$$

2) IJ 叶根圆弧段型线方程为

$$\begin{cases} x = \frac{A}{2} \cos\beta + \frac{\pi}{2Z} R \cos\varphi \\ y = \frac{A}{2} \sin\beta + \frac{\pi}{2Z} R \sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

其中 IJ 圆弧段展开角起始角度 φ_{\min} 和终止角度 φ_{\max}

$$\begin{cases} \varphi_{\min} = \angle X_1DJ + \beta \\ \varphi_{\max} = \angle X_1DO + \beta \end{cases} \quad (4)$$

3) KL 叶峰圆弧段型线方程为

$$\begin{cases} x = \frac{\pi}{2Z} R \cos\varphi \\ y = \frac{A}{2} + \frac{\pi}{2Z} R \sin\varphi \end{cases} \quad (5)$$

其中 KJ 圆弧段展开角起始角度 φ_{\min} 和终止角度 φ_{\max} :

$$\begin{cases} \varphi_{\min} = \alpha = \arccos \frac{2Z(D-A)}{\pi A} \\ \varphi_{\max} = 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

1.2 几何模型

在推导圆弧-渐开线-圆弧型转子型线方程时,首先要确定转子叶数 Z,转子中心距 A,转子外圆直径 D,且转子中心距 A 与外圆直径 D 存在以下关系:

$$\frac{A_{\min}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2Z} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2Z}\right)^2}}} \quad (7)$$

其中 A_{\min} 为最小中心距,现定义转子径距比

$$\kappa = \frac{D}{A} \quad (8)$$

如图 2 所示,当给定转子叶数 Z 和转子外圆直径 D 时,将存在一个最小中心距 A_{\min} ,既存在一个最大径距比 κ_{\max} ,且转子叶数不同时, A_{\min} 不同, κ_{\max} 也不同。若设计的中心距 A 小于 A_{\min} 时,必然发生转子型线干涉。当设计的转子中心距 A 增大,则径距比 κ 会随之减小,经计算可以得到

$$Z=3 \text{ 时, } A_{\min}=0.681D, \kappa_{\max}=1.468$$

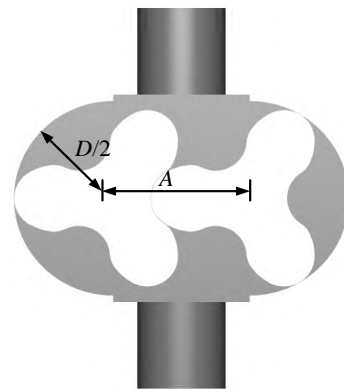


图2 转子径距比图示
Fig.2 Rotor diameter ratio

本次研究对象为直叶转子,以 3 叶为例,保持气体循环泵转子外圆直径不变,分别建立 κ 为 1.34、1.36、1.38、1.40、1.43、1.45 的六种气体循环泵计算模型进行研究。额定参数为:额定转速 n

$=3000\text{r}/\text{min}$, 扬程 $H=4\text{m}$ 。由于气体循环泵是由一对完全啮合的同步齿轮带动转子进行转动, 故转子之间、转子和转壁间都存在一定的微小间隙, 否则会造成齿轮或转子卡死, 无法正常运转。本次研究模型转子间间隙为 0.15mm , 进出口直径为 40mm , 表 1 为径距比参数变化, 图 3 为转子三维模型。

表 1 径距比参数

Table 1 Diameter distance ratio parameters

κ	D/mm	A/mm
1.34	90	67
1.36	90	66
1.38	90	65
1.40	90	64
1.43	90	63
1.45	90	62

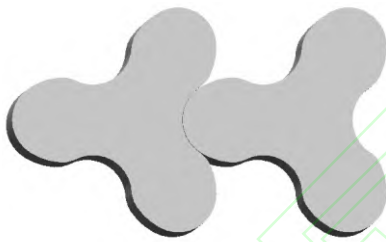


图 3 多叶转子三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of a leafy rotor

图 4 为不同径距比 κ 与转子腔容积利用率的关系曲线, 转子腔容积利用率常用容积利用系数来表示, 现定义容积利用系数为

$$\lambda = \frac{V - V_z}{V} \quad (9)$$

式中 V 为转子腔容积, V_z 为转子体积

由图可知, 随着径距比 κ 逐渐增大 (1.34 增至 1.45), 转子型线圆弧段减小, 渐开线段增长, 相应的转子型线形状发生改变, 转子逐渐“变瘦”, 转子腔有效容积利用率也随之增大 (0.43 增至 0.48), 进而引起气体循环泵性能变化。

2 数值模拟

2.1 网格划分及边界条件

整个计算区域由入口部分、转子旋转区域、出口部分组成, 如图 5 所示。为了保证转子间隙处有较高的计算精度, 对转子旋转区域采用四边形结

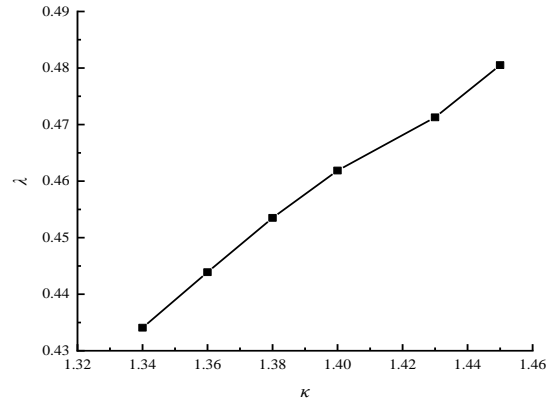


图 4 不同径距比的容积利用系数

Fig.4 Volume utilization coefficient for different radial distance ratios

构化网格, 并对边界层进行加密。边界条件设置为入口压力为 202.6kPa , 出口压力为 243.1kPa , 输送介质为空气。为了使网格尺寸对湍流模型、求解算法和边界条件的计算精度控制在合理范围, 需要在计算前对网格数量进行无关性验证。

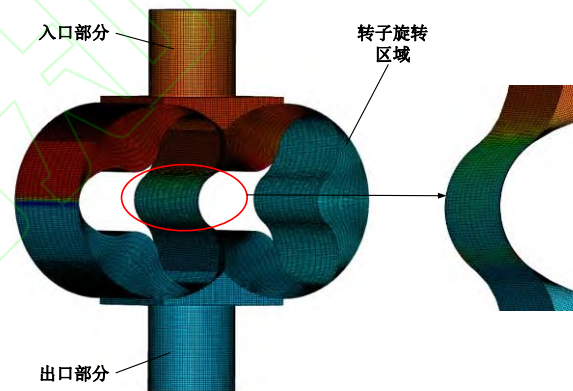


图 5 计算流体域网格图

Fig.5 Computational fluid domain grid diagram

由计算可知, 当网格数量小于 3.8×10^5 时计算结果有较为明显的波动, 其中网格数量为 2.4×10^5 时的计算结果与 3.3×10^5 时的计算结果误差为 2.4% , 网格数量由 3.8×10^5 逐渐增加到 8.2×10^5 时, 计算结果变化较为平缓, 网格数量为 3.8×10^5 时与网格数量为 4.7×10^5 、 5.9×10^5 时的计算结果最大误差分别为 0.06% 、 0.08% 。计算结果表明, 当网格数量大于 3.8×10^5 时网格数量对计算结果的影响很小, 考虑到计算成本的因素, 最终选择网格数量为 3.8×10^5 。

2.2 控制方程及湍流模型

本研究采用商业软件 PumpLinx 进行数值模拟, 结合动网格技术, 能够很方便的将流体域的旋

转或平移运动进行设置,流动区域采用的控制方程包括连续性方程和动量守恒方程。

连续性方程(质量守恒定律方程)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

式中 ρ 表示流体的密度; t 表示时间; u 、 v 、 w 分别表示速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

动量方程(Navier—Stokes 方程)

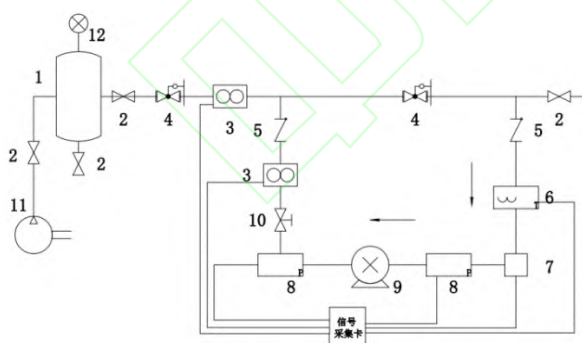
$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f} \quad (11)$$

式中 p 表示压力; μ 表示流体动力黏度; \mathbf{u} 为速度矢量。

数值计算结果的优良程度和湍流模型的选取关系密切,通过查阅相关文献^[19],选取 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,计算中忽略重力对流场的影响,进出口均设置为压力边界条件,壁面采用无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数。

3 实验验证

为验证数值计算的精确度,现选取转子径距比 $\kappa=1.40$ (转子间间隙为 0.15mm)的气体循环泵搭建试验台(如图 6 所示),对不同进出口压差下的气体循环泵进行体积流量(文中简称流量)特性试验,气体循环泵模型如图 7 所示。其中测试仪器包括 YYLTX-610 热式流量计、MIK-P3000 压力变送器、PZ9902 电功测量仪、UT373 激光转速计,并以气体为介质。



1 储气罐; 2, 10 球阀; 3 YYLTX-610 热式流量计; 4 减压阀; 5 单向阀; 6 温度计; 7 加湿器; 8 压力测量计; 9 循环泵; 11 空压机; 12 压力表

图 6 气体循环泵试验台

Fig.6 Gas circulating pump test table

控制额定转速为 $n=3000\text{r}/\text{min}$, 调节出口球阀开度来改变出口压力, 做出气体循环泵在不同扬程下数值模拟及性能试验的对比曲线, 如图 8

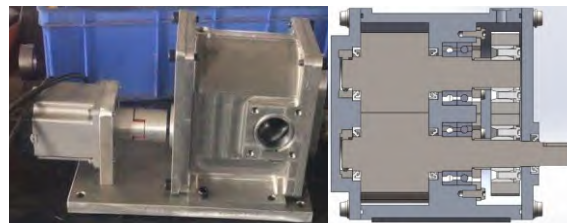


图 7 气体循环泵模型装配图

Fig.7 Assembly drawing of gas circulating pump model

所示。结果表明, 出口流量和容积效率与进出口压差成反比, 且进出口压差越大, 流量与效率下降幅度变大。由于数值预测中忽略了间隙泄漏及机械摩擦损失, 数值预测和实验结果会产生一定误差, 且误差在 3% 以内, 因此数值模拟具有较高的预测精度, 能够较好的预测气体循环泵的性能。

4 结果与分析

4.1 径距比对气体循环泵流量特性的影响

图 9 为径距比 κ 与出口瞬时流量脉动强度及出口平均体积流量(文中简称流量)的关系曲线, 图 10 为额定工况下, 不同径距比瞬时流量脉动曲线。

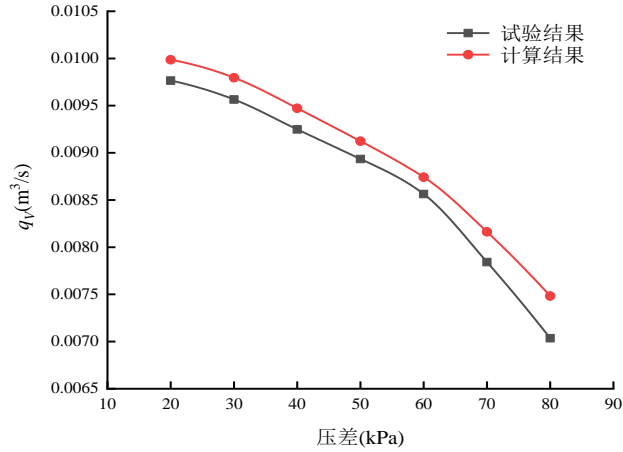
流量脉动强度通常使用流量不均匀系数来表示, 定义流量不均匀系数为

$$\delta_q = \frac{q_{v, \max} - q_{v, \min}}{q_{v, \text{ave}}} \quad (12)$$

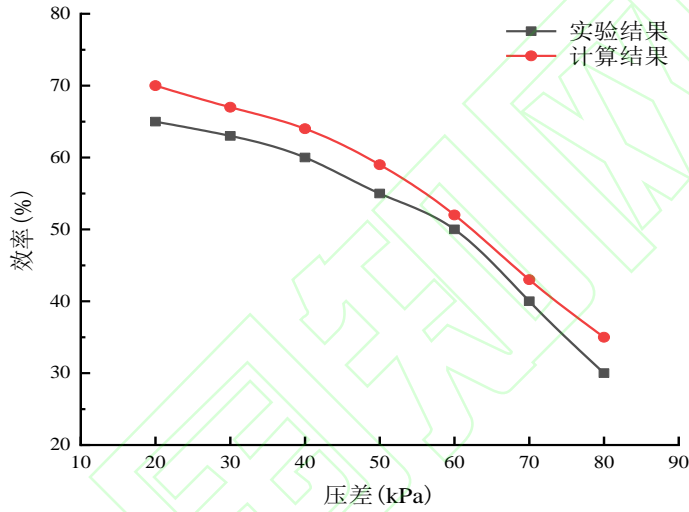
式中 $q_{v, \max}$ 为最大瞬时流量; $q_{v, \min}$ 为最小瞬时流量; $q_{v, \text{ave}}$ 为平均流量。

分析表明: 径距比 κ 对气体循环泵出口流量特性影响较为显著, 随着转子径距比由 1.34 逐渐增大到 1.45, 气体循环泵出口平均流量逐渐增大 ($0.0088\text{m}^3/\text{s}$ 增至 $0.0127\text{m}^3/\text{s}$); 泵出口瞬时流量脉动幅值呈上升趋势 (3.58 增至 5.02), 出口流量脉动具有明显的周期性, 且在 $\kappa=1.38\sim 1.40$ 时, 出口平均流量和瞬时流量脉动变化较为明显。

气体循环泵的实际流量与径距比 κ 有重要的关系, 由于转子叶数和转子外圆直径给定时, 圆弧—渐开线—圆弧形转子随着径距比的增大, 转子中心距减小, 转子型线渐开线段范围减小, 导致转子端面面积减小, 容积利用系数提高, 转子出口流量会上升; 但渐开线密封效果优于圆弧, 转子渐开线段范围减小会导致转子间隙处介质内泄漏增加, 出现较大的流量脉动幅值。由此说明, 增大径距比能提升气体循环泵出口流量, 但会造成出口瞬时流量脉动增加, 因此在具体工况下, 理论上存



(a) 流量压差曲线



(b) 效率压差曲线

图 8 气体循环泵数值模拟与实验结果对比

Fig.8 Comparison of the numerical simulation and the experimental results of the gas circulation pump

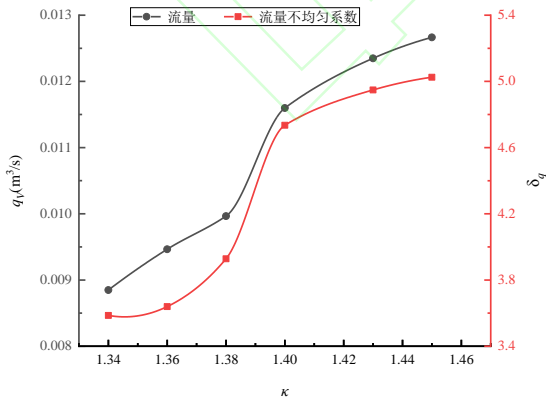


图 9 径距比与流量脉动强度及出口平均流量的关系曲线
Fig.9 Relationship curve between the radial distance ratio and the flow pulsation strength and the average outlet flow rate

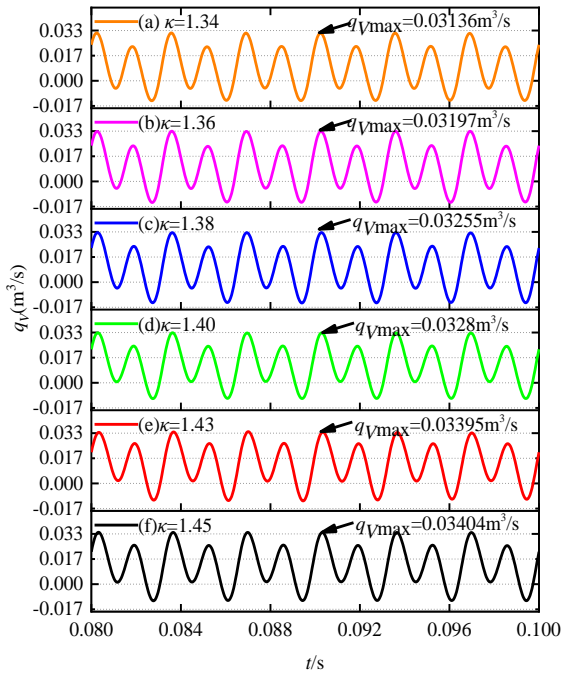
在一个最优径距比,使转子腔内部流量特性较好。

4.2 径距比对转子径向激励力的影响

转子径向激励力是影响泵整体性能的重要因素,径向激励力较大会导致转子径向跳动变大,引起泵振动和噪声增加,也会降低轴的使用寿命,为了揭示 κ 对转子径向激励力的影响规律,对转子旋转域沿 x 、 y 方向的径向激励力 F_x 、 F_y 进行监测,根据式(13)求出转子径向激励力所受的合力

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (13)$$

由于泵腔内两转子对称分布,且同步反向转动,因此两转子所受径向激励力大小相等,方向相反。本文只研究左转子的受力情况,由图 9 可知,径距比 κ 在 1.36 和 1.43 时流量变化较为平缓,故研究径向激励力时舍去 1.36 和 1.43 两个工况。



distance ratio κ

图 10 不同径距比 κ 的流量脉动曲线

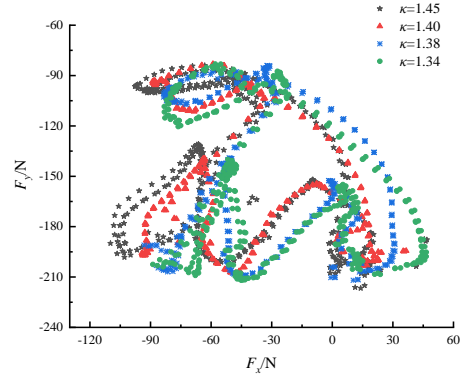
Fig.10 Flow pulsation curve with different radial

图 11 为在不同径距比 κ 下左转子所受径向激励力随时间 t 的变化规律,可以看出,随着 κ 增大 ($\kappa=1.34$ 增至 1.45),转子所受径向激励力呈先减小后增大趋势,且在 1.40 时转子受力较小,径向激励力分布较为集中。这是由于径距比 κ 较小时,转子容积占比增大,使径向受力面积增大,导致壁面间摩擦力增大;径距比 κ 较大时,转子容积占比减小,但较小的径向间隙面积使间隙内气体流速增大,导致流体间内摩擦力增大,两者此消彼长,影响转子受力。

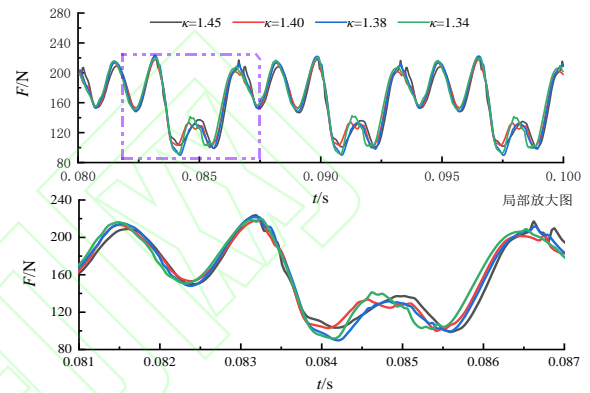
图 12 为不同径距比 κ 下气体循环泵转子在一个周期内所受径向激励力分量 F_x 的变化规律,结果表明,转子所受径向力 F_x 变化具有一定周期性,且随着径距比的增加,转子腔内 F_x 的脉动幅值呈先减小后增大的趋势,在 $\kappa=1.38$ 时幅值最小,最大波峰值为 31.06N,仅为 $\kappa=1.45$ 时的 63.6%。根据图 9 结论,径距比 $\kappa=1.45$ 时,转子腔内部具有较大的流量脉动幅值,这是造成转子所受径向激励力较大的主要原因。

结果表明,气体循环泵转子径距比 κ 对转子所受径向激励力分量 F_x 影响较为显著。径距比 κ 较大或较小时,转子受力幅值较大,径距比 $\kappa=1.38 \sim 1.40$ 时,转子受力减小。

图 13 为不同径距比 κ 下气体循环泵转子在一



(a) 左转子径向激励力分布



(b) 不同径距比 κ 下转子径向激励力 F 脉动曲线

图 11 径距比 κ 对转子径向激励力的影响

Fig.11 Effect of the radial distance ratio κ on the radial excitation force of the rotor

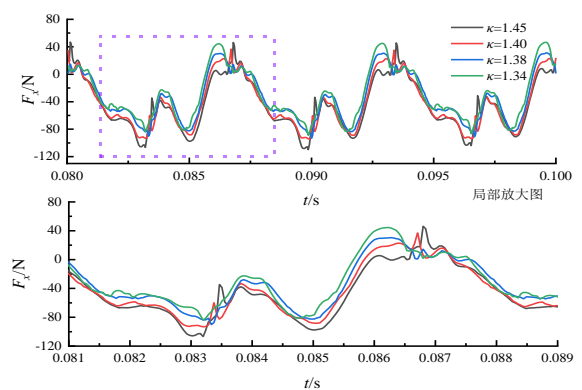


图 12 不同径距比下转子径向激励力分量 F_x 脉动曲线

Fig.12 F_x pulsation curve of the radial excitation force component of the rotor under different radial distance ratios

个周期内所受径向激励力分量 F_y 的变化规律,结果表明,转子所受径向力 F_y 成周期性变化,且随着径距比的增加,转子腔内 F_y 的脉动幅值略有变化,但与图 12 相比,脉动幅值变化较小,径距比对径向激励力分量 F_y 的抑制不明显。

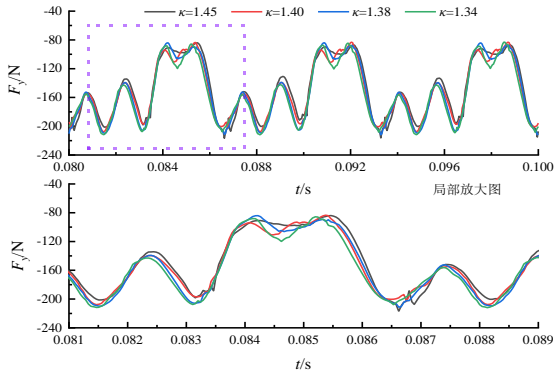


图 13 不同径距比下转子径向激励力分量 F_y 脉动曲线
Fig.13 F_y pulsation curve of the radial excitation force component of the rotor under different radial distance ratios

4.3 转子腔速度分布

为进一步研究气体循环泵转子腔流场特性在不同转子径距比 κ 下的变化,截取 yz 截面(图 14),对转子腔进行速度流场分析。

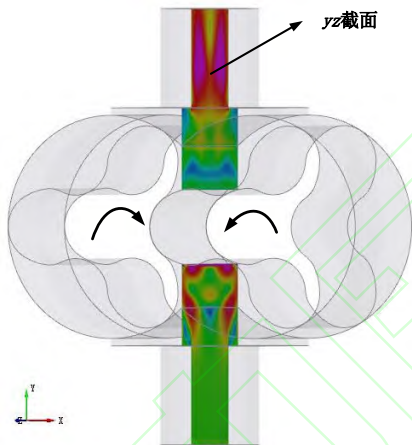


图 14 yz 截面位置示意图

Fig.14 Schematic diagram of the yz cross-section location

转子腔内速度分布变化呈周期性,转子转动一周,速度存在 3 个周期的变化,图 15 为一个周期内不同时刻下(0.095、0.097、0.1s)不同径距比的 yz 平面速度云图。结果表明,径距比对转子腔内速度分布影响较为明显,在任意时刻,均整体左右对称,且从入口到出口速度逐渐增大。在 $t=0.1s$ 时刻,转子旋转完一个周期,独立腔室气体完全排出泵体,a 处速度达到最大。气体在转子腔内流动时,通过两转子、转子与转壁间微小间隙产生泄漏,径距比较大或较小(1.34 或 1.45)时,间隙泄漏速度较高,在 b、c 处产生较大的速度梯度,径距比在 1.38~1.40 时,泄漏量减少,高速流动区域已缩

小到啮合点附近很小的区域。

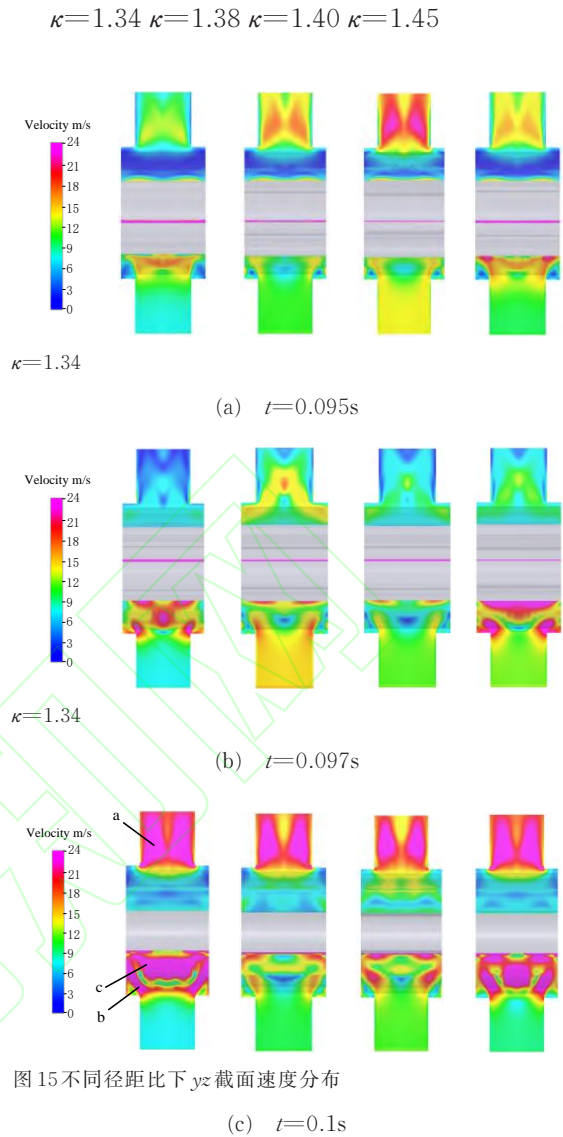


图 15 不同径距比下 yz 截面速度分布

(c) $t=0.1s$

radial ratios

Fig.15 yz surface velocity distribution at different

图 16 为 0.1s 时刻不同径距比的转子腔内速度流线图,转子在旋转过程中,转子腔内部高、低压侧体积的周期性变化,使腔内间隙区域流体速度发生突变,伴随着间隙区域的附壁射流效应,使 A、B 处出现局部旋涡结构。

结果表明,随着径距比 κ 增大(1.34 增至 1.45),A 处局部旋涡变化较为明显,B 处局部旋涡变化较小,且在 $\kappa=1.40$ 时,A 处局部旋涡较小,由图 11 结论可知,转子在 $\kappa=1.38\sim 1.40$ 时所受径向激励力较小,因此介质在通过泵腔时所受到力的扰动较小,A、B 处局部旋涡减小。由此可知,改变径距比可以有效的抑制转子腔内的局部旋涡,减少介质通过转子腔时的能量损失。

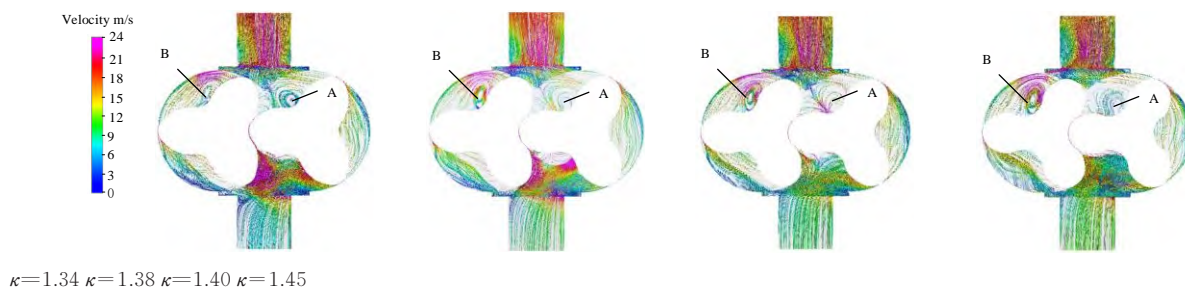


图 16 不同径距比下转子腔内速度流线图

Fig.16 Internal velocity flow line diagram of rotor cavity under different diameter ratios

5 结 论

为了揭示径距比 κ 对凸轮式气体循环泵的气动性能的影响规律,采用数值模拟与实验相结合的方法对圆弧—渐开线—圆弧线型 3 叶转子进行研究,得到结论如下:

1) 凸轮式气体循环泵出口流量与转子径距比密切相关,随着径距比增大,泵瞬时流量脉动与出口平均流量均呈上升趋势,且在径距比取 1.38~1.40 时,变化较为明显。

2) 随着径距比增大,转子所受径向激励力先降低后增大,当径距比在 1.38~1.40 时,径向激励力分布较为集中,且径距比对径向激励力分量 F_x 抑制较为明显,对径向激励力分量 F_y 影响较小。

3) 气体循环泵由于两转子之间、转子与转壁之间存在微小间隙,转子在运行过程中,在微小间隙处会出现速度异常增大现象,且出现局部漩涡。改变径距比能有效抑制局部漩涡,在径距比为 1.40 时抑制较为明显。

参考文献:

- [1] ZHAO X, VACCA A. Numerical analysis of theoretical flow in external gear machines[J]. Mechanism & Machine Theory, 2017, 108:41—56.
- [2] SUN S K, ZHAO B, JIA X H, et al. Three-dimensional numerical simulation and experimental validation of flows in working chambers and inlet/outlet pockets of Roots pump[J]. Vacuum, 2017, 137(1):195—204.
- [3] 刘振超,何雪明,黄海楠. NURBS 曲线在罗茨泵转子型线设计中的应用[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 110—116.
LIU Zhenchao, HE Xuemin, HUANG Hainan. Application of NURBS curve in roots pump rotor profile design[J]. Food and Machinery, 2019, 35(7): 110—116. (in Chinese)
- [4] 朱超颖,林景殿,苏中地. 一种新罗茨转子型线的构成方法[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(12): 1449—1452.
ZHU Chaoyin, LIN Jingdian, Su Zhongdi. A novel type of roots rotor profile[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(12):1449—1452. (in Chinese)
- [5] 李玉龙,臧勇,赵岩,等. 转子泵容积利用系数的通用计算模型[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2):116—121.
LI Yulong, ZANG Yong, ZHAO Yan, et al. General calculation model of effective volume utilization coefficient for rotor pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2):116—121. (in Chinese)
- [6] 刘玉岱. 圆弧—摆线—渐开线型罗茨轮型线啮合分析[J]. 真空, 1995(6): 18—22
LIU Yudai. Meshing analysis for roots rotor profile of arc—cycloid—involute type[J]. VACUUM. 1995(6): 18—22. (in Chinese)
- [7] 杨向君,孙付春. 泵用转子共轭型线段的通用求解模型研究[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(8):667—671.
YANG Xiangjun, SUN Fuchun. Universal solution to conjugated profiles of roots—pump rotor: a theoretical study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(8):667—671. (in Chinese)
- [8] 姜希彤,宋永兴,王君,等. 曲爪型真空泵转子优化型线研究[J]. 真空, 2014, 51(2): 9—12.
JIANG Xitong, SONG Yongxing, WANG Jun, et al. Study on the optimized profile of curved claw type vacuum pump rotor[J]. Vacuum, 2014, 51(2):9—12. (in Chinese)
- [9] HSIEH C F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps[J]. Mechanism & Machine Theory, 2015, 87(12):70—81.
- [10] HSIEH C F, DENG Y C. A design method for improving the flow characteristics of a multistage roots pumps[J]. Vacuum, 2015, 121:217—222.
- [11] HSIEH C F, ZHOU Q J. Fluid analysis of cylindrical and screw type roots vacuum pumps[J]. Vacuum, 2015, 121: 274—282.
- [12] 冯诗愚,周利彪,等. 双齿气体循环泵基本几何理论和容积计算[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9):1936—1942.
FENG Shiyu, ZHOU Libiao, et al. Basic geometric theory and volume calculation of double—tooth gas circulation pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9):1936—1942. (in Chinese)
- [13] 王君,刘瑞青,崔冬,等. 新型椭圆弧型罗茨转子的几何理论及其性能分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 136—141.

- WAANG Jun, LIU Ruiqin, CUI Dong, et al. Geometric theory and performance of a novel elliptical arc roots rotor[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(2): 136—141. (in Chinese)
- [14] 黎义斌, 李龙, 刘建峰, 等. 燃料电池气体循环泵多叶转子腔内部气动性能数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(3): 46—56.
- LI Yibin, LI Long, LIU Jianfeng, et al. Numerical study on the aerodynamic performance of multi-blade rotor cavity in the gas circulating pump of fuel cell[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(3): 46—56. (in Chinese)
- [15] JUNG S Y, HAN S M, CHO H Y, et al. Automated design system for a rotor with an ellipse lobe profile[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(11): 2928—2937.
- [16] JUNG S Y, BAE J H, KIM M S, et al. Development of a new gerotor for oil pumps with multiple profiles[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(5): 835—841.
- [17] HUANG Z F, LIU Z X. Numerical study of a positive displacement blower[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(10): 2309—2316.
- [18] 黄思, 康文明, 等. 基于 CFD 的罗茨真空泵的瞬态流场计算与性能预测[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(2): 62—66.
- HUANG Si, KANG Wengmin, et al. Transient flow simulation and performance prediction of roots vacuum pump based on CFD[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(2): 62—66. (in Chinese)
- [19] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 1—14.
- WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 1—14. (in Chinese)