

罗茨真空泵排气脉动研究

张莉^{1*} 项挺¹ 钟云会² 肖阳² 张永炬¹

(1. 台州学院 智能制造学院 台州 318000; 2. 浙江真空设备集团有限公司 台州 318000)

The Exhaust Pulsation of Roots Vacuum Pumps

ZHANG Li^{1*}, XIANG Ting¹, ZHONG Yunhui², XIAO Yang², ZHANG Yongju¹

(1. School of Intelligent Manufacture, Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Zhejiang Vacuum Equipment Group Co., Ltd., Taizhou 318000, China)

Abstract The exhaust pulsation of the Roots vacuum pump restricts the stability and reliability of pump operation. To effectively suppress exhaust pulsation, a design scheme for a Roots vacuum pump with a pressure-stabilizing chamber was proposed, and the chamber model was developed. Combining RNG $k-\epsilon$ turbulence model, dynamic grid technology, and multi parameter comparison, the influence of structural parameters such as the opening phase angle, opening width angle, and aspect ratio of the stabilizing chamber on pulsation characteristics was studied and analyzed. The optimal stabilizing chamber structural parameters for suppressing gas pulsation were obtained. Based on this, the exhaust characteristics of the Roots vacuum pump with a stabilizing chamber were compared against those of a traditional Roots pump. Results show that, compared with the direct-discharge pump, the outlet pressure pulsation coefficient and flow pulsation coefficient of the proposed design are reduced by 56.8% and 49.2%, respectively. The pressure stabilizing chamber effectively enhances the stability of the exhaust process and provides theoretical guidance for pulsation suppression in the Roots vacuum pump.

Keywords Roots vacuum pump, Pressure stabilizing chamber, Exhaust pulsation, Fluid simulation, Structural design

摘要 罗茨真空泵排气脉动问题制约了泵运行稳定性和可靠性。为有效抑制排气脉动,提出一种带稳压室的罗茨真空泵设计方案,构建了稳压室结构模型,结合 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、动网格技术与多参数对比,研究分析了稳压室开口相位角、开口宽度角和长宽比等结构参数对脉动特性的影响,得到抑制气体脉动较佳的稳压室结构参数,在此基础上对比分析了带稳压室罗茨真空泵与传统罗茨真空泵的排气特性。研究表明,带稳压室真空泵的出口压力脉动系数较直排泵降低了约 56.8%,流量脉动系数下降了约 49.2%,稳压室结构有效提升罗茨真空泵排气过程的稳定性,为排气脉动控制提供理论依据。

关键词 罗茨真空泵 稳压室 排气脉动 流体仿真 结构设计

中图分类号: TB752.2

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202510012

罗茨真空泵是一种回转式流体机械,依靠两个完全相同的转子在泵腔内做角速度大小相等、方向相反的运动,使吸入端产生真空,从而实现气体的吸入、运输和排出,因罗茨真空泵具有无油润滑、结构简单、工作平稳等优点,在石油、化工和电子行业上均有广泛的应用^[1-3]。

然而,回转式流体机械的排气过程中不可避免会产生周期性排气脉动^[4]。这种脉动不仅会引发气

体动力性噪声,更会导致能量损失,并直接导致泵体、转子、轴承、齿轮等部件产生强迫振动。这种振动不仅使泵运行不平稳,还会传递到连接的管道和整个真空系统,可能影响其他设备的运行^[5]。出口处排气脉动是影响罗茨真空泵运行稳定性重要的因素,因此,有效抑制排气脉动成为提升罗茨真空泵整体性能与可靠性的关键所在。为缓解罗茨泵排气端脉动,国内外学者对罗茨真空泵出口气体

收稿日期: 2025-10-21

基金项目: 浙江省科技计划公益技术项目 (LTGY24E060001); 台州市科技计划项目 (25gya01)

* 联系人: E-mail: yushugen@126.com

脉动做了大量研究。

Mujic E 等^[6] 研究分析了压缩机操作条件和几何特性对螺杆压缩机排气腔中气体脉动水平的影响。表明排气口形状的时间依赖性是影响气体脉动的重要参数,通过优化排气口形状可以降低排气腔中的气体脉动幅度。高进^[7]、符明^[8]、刘建停等^[9] 研究并验证了预进气结构可以大幅减少罗茨泵的脉动。Xing W S 等^[10] 通过数值模拟和实验分析了不同预进气结构的形状和尺寸对流场分布和压力脉动有显著影响,合理设计回流槽结构可以有效改善泵的性能和稳定性。Kong X C 等^[11] 针对氢燃料电池车用罗茨泵,通过优化回流槽设计有效降低排气脉动。Huang P X 等^[12-16] 系统研究了容积式泵与螺杆压缩机的气体脉动控制,提出旁通型脉动陷阱(SPT)用于源端缓冲,并结合冲击管理理论分析瞬态压缩/膨胀中压力波的生成与传播规律并进一步研究了等容与绝热假设对脉动模拟的影响,并将 SPT 与端口结构及管道阻尼耦合,形成了从结构设计到控制策略的完整脉动抑制体系,为低脉动运行提供了理论与工程方法支持。刘瑞青等^[17-18] 对直叶三叶和扭叶型转子进行了对比分析,揭示了扭叶转子噪声小的原因,在这种情况下,罗茨泵的出口截面随着转子转动而变化更加平滑,相对于原始结构的面积线性突变,平行四边形出口截面可以使得气体先行进入封闭腔,从而降低脉动。刘瑞青等^[19] 通过优化罗茨泵转子型线,改善吸排气过渡过程,显著降低了出口压力脉动,说明结构优化是抑制脉动的有效途径。刘正先等^[20]、张顾钟等^[21] 和唐美玲等^[22] 对气冷式罗茨真空泵的逆流冷却口进行理论分析和二维仿真验证,表明逆流冷却口在合适位置可以降低

低罗茨泵的排气脉动。Sun S K 等^[23-24]、Sun S H 等^[25] 通过三维动态网格 CFD 与实验联合研究了罗茨泵的瞬态流动与排气脉动特性,分析了工作腔体、进、出气口袋结构及连接管路对流场和压力波动的影响,并验证了回流设计在缓冲瞬态脉动方面的有效性,同时结合相位锁定 PIV 与 CFD 对泄漏与涡流行为进行了定量分析,指出轴向间隙建模与网格精细度对仿真精度至关重要。Aakre S R 等^[26] 研究了三联往复泵在液态及超临界 CO_2 条件下的体积效率和压力脉动特性,发现即使在多活塞设计下,泵出口仍存在明显脉动。通过在排气出口引入缓冲容积,可在一定工况下显著降低压力脉动幅度,但缓冲效果随泵转速和流量变化而异。

目前,现有研究主要集中在出口局部结构优化和转子形状优化,鲜有对罗茨真空泵壳体进行结构拓展设计。为研究增加封闭腔内压力对罗茨真空泵排气脉动的影响,本文设计了带稳压室的罗茨真空泵,研究了带稳压室的罗茨真空泵的出口排气脉动。结果表明设计的带稳压室罗茨真空泵也可大幅度降低泵的出口排气脉动,对降低罗茨真空泵出口脉动的措施具有理论指导意义。

1 罗茨真空泵排气脉动分析

罗茨真空泵出口压力脉动核心原因源于其工作腔周期性开闭引起的容积突变和气体动力效应。其工作过程如图 1(a)所示,阳转子逆时针旋转,阴转子按顺时针反向旋转。当转子旋转至排气口位置时(图 1(b)),原本封闭的容积 V_0 瞬间与高压排气口连通。排气口压力 p_3 远高于封闭腔内压力 p_2 ,高压气体倒灌冲入腔体(图 1(c))形成压力尖峰引发

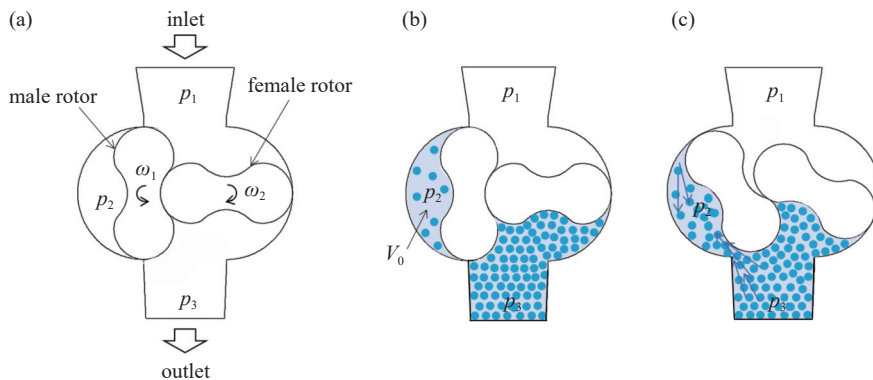


图1 封闭腔与高压排气口连通示意图。(a)工作原理,(b)封闭腔容积,(c)开放腔容积

Fig. 1 Schematic diagram of the connection between the closed chamber and the high-pressure exhaust port. (a) Operational principle, (b) closed chamber volume, (c) open chamber volume

瞬时冲击。当转子继续转动将 V_0 内气体强行推入排气口, 气体在这个过程中被压缩, 压力能积累并突然释放, 进一步放大了脉动幅值, 导致脉动。

气体脉动由压力脉动和流量脉动组成。

压力脉动系数定义为:

$$L_p = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\text{ave}}} \quad (1)$$

式中: $p_{\max}$ 为瞬时最大压力, Pa; $p_{\min}$ 为瞬时最小压力 Pa; p_{ave} 为平均压力, Pa。

流量脉动系数定义为:

$$L_q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{ave}}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\max}$ 为瞬时最大流量, m^3/s ; $Q_{\min}$ 为瞬时最小流量, m^3/s ; Q_{ave} 为平均流量, m^3/s 。

由矩形管道泊肃叶流动可知减少瞬时排气压差可降低流量脉动。因此本文提出在排气端增设稳压室结构以提高泵封闭腔内压力, 以降低排气脉动。

2 稳压室结构

针对泵的容积突变导致排气压差过高, 而引起出口气体产生脉动, 本文在罗茨真空泵泵壳外壁两侧对称设计了稳压室结构, 旨在通过稳压室使封闭腔内气体压力先行增加, 以降低排气时出口高压气体对泵腔的冲击, 从而降低排气脉动。其工作原理如图 2 所示。当吸气阶段结束时(图 2(a)), 稳压室与封闭腔连通, 此时稳压室内储存的气体释放至封闭腔(图 2(b)), 使封闭腔内压力升高。

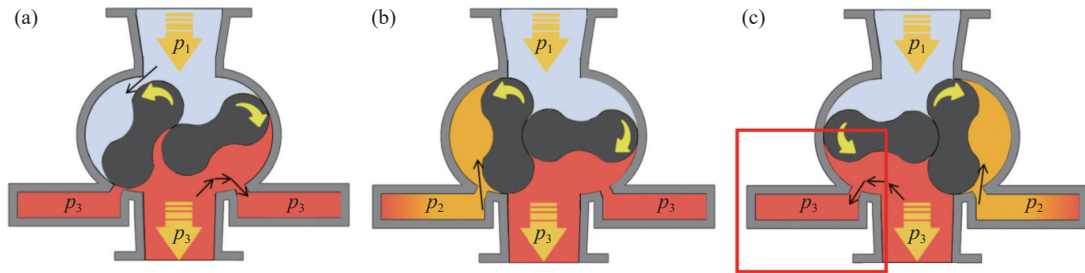


图2 带稳压室结构的罗茨真空泵工作原理。(a)泵腔吸气, (b)稳压室气体释放, (c)稳压室气体回流

Fig. 2 Schematic of Roots vacuum pump with the pressure stabilizing chamber. (a) Pump suction, (b) gas release from the pressure stabilizing chamber, (c) gas reflux in the pressure stabilizing chamber

在此过程中, 通过稳压室气体介入, 降低了封闭腔和出口端压差。随着转子继续转动, 出口高压气体在压差作用下回流至稳压室(图 2(c)), 为下一次封闭腔闭合时提供预增压能量储备。

设罗茨真空泵的几何参数为: 吸气口直径 $D_1 = 100 \text{ mm}$; 排气口直径 $D_2 = 80 \text{ mm}$; 转子中心距 $\alpha = 83.92 \text{ mm}$; 壁腔半径 $R = 67.32 \text{ mm}$ 。忽略了转子端面 and 泵腔内壁面之间的间隙。

图 3 为图 2(c) 的局部放大结构简图, 稳压室的主要结构参数为开口相位角 Φ_1 、开口宽度角 Φ_2 和长宽比 $\lambda (\lambda = a : b)$, 其中稳压室截面 $a \times b$ 其与封闭腔的截面积相同, 为了避免 Φ_1 过大导致稳压室流体域与出口流体域连通, 要求 $\Phi_1 + \Phi_2$ 小于 90° 。稳压室结构参数取值如表 1 所示。

3 泵稳态流场数值模拟方法

3.1 网格划分

鉴于罗茨真空泵存在动态和静态流体域, 本文

采用分块网格划分方式。针对处于静止状态的进气口、排气口及稳压室等区域, 采用结构化笛卡尔网格。对发生转动和变形的旋转区域, 采用动网格,

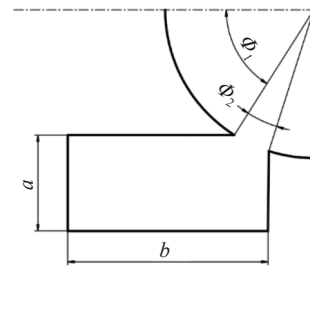


图3 稳压室结构简图

Fig. 3 The structure diagram of pressure stabilizing chamber

表 1 稳压室结构参数

Tab. 1 Dimensions of the stabilization chamber

$\Phi_1/(^\circ)$	30	40	50	60	70	80
$\Phi_2/(^\circ)$	1	2	4	5	6	7
λ	0.444	0.563	0.694	1	1.444	1.778

如图4(a)所示,实现流体域变形过程中的网格重构,整个流场有限元模型的截面图如图4(b)所示,为精

确捕捉泵内部间隙泄漏流动特征,对关键区域实施局部网格加密(图4(c))。

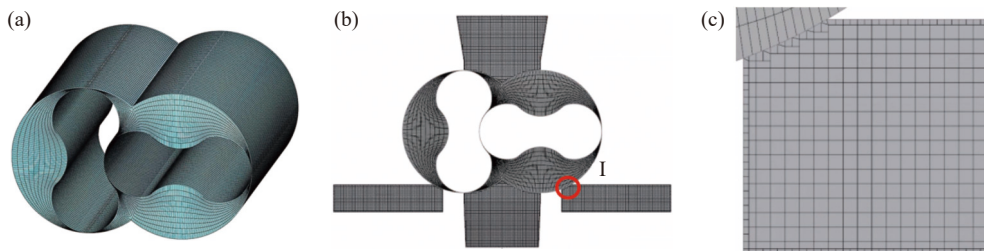


图4 带稳压室的罗茨真空泵有限元模型。(a)动网格模型,(b)网格截面模型,(c) I 局部放大图

Fig. 4 Finite element model of Roots vacuum pump with the pressure stabilizing chamber. (a) Dynamic mesh mode, (b) cross-section mesh model, (c) I local enlarged drawing

为保证不同稳压室模型计算结果的可比性,罗茨真空泵主体区域的网格密度保持一致,经如图5所示的网格无关性验证,最终确定罗茨真空泵主体的网格数量为545637。并在此基础上,稳压室部分根据不同几何模型分别生成另外独立的网格,因此整体网格数量随稳压室形状的变化而有所差异。

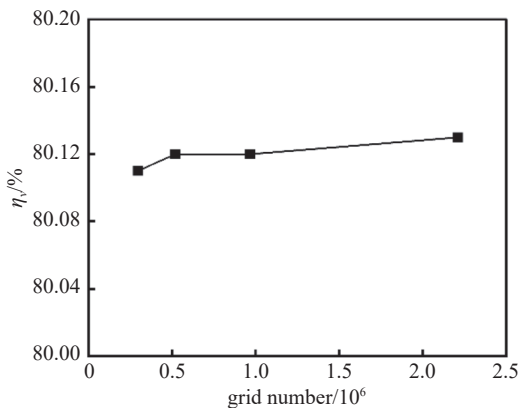


图5 网格无关性验证

Fig. 5 The grid independence verification

3.2 仿真设置及模型验证

(1) 仿真设置

罗茨真空泵进、出口边界分别设置为绝对压力入口和绝对压力出口,基于实际工作条件设置:入口压力 $p_{in} = 20$ kPa,出口 $p_{out} = 28$ kPa,主轴转速为2880 r/min,气体温度为295 K,壳体及转子表面设为绝热无滑移边界条件。设输送气体遵循理想气体状态方程。

泵腔内空气在转子作用下呈强旋流动,为保证内部流场仿真结果准确性,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[27]。控制方程对流项采用二阶迎风格式离散,扩

散项采用中心差分格式离散,收敛精度为0.0001,速度场与压力场耦合采用SIMPLEC算法^[28]。时间离散采用固定角位移步进:每半圈划分为90等分,即每整圈180步,每步角增量为2°。总模拟转数为3圈,共计540个时间步。

为研究稳压室各结构参数对罗茨真空泵出口气体脉动的影响,采用容积效率作为综合判据:

$$\eta_v = \frac{Q_{ave}}{Q_{th}} \quad (3)$$

式中: Q_{ave} 出口平均体积流量, m^3/s ; Q_{th} 为理论排量流量 m^3/s 。

(2) 实验验证

为验证数值方法的可行性,本文以表2所示的罗茨真空泵的零流量压缩比实验数据为基准,开展实验验证。考虑到试验压力范围内的Knudsen数介于0.01~0.37(处于滑移—过渡区),直接采用连续介质Navier-Stokes方程可能无法完全刻画稀薄气体效应。为获得工程可比的计算结果,在粘滞流模型中引入等效粘度 μ_{eff} 以近似补偿稀薄气体的非连续效应。

根据表2的实验数据,相应设置罗茨泵的出入口压力,进行流场仿真。图6为仿真与实验数据对

表2 零流量压缩比

Tab. 2 Zero flow compression ratio

Inlet/Pa	Outlet/Pa	Compression Ratio	μ_{eff}
0.883	27.8	31.47	1.567
2.65	105	39.64	1.674
8.51	323	37.95	1.702
21.2	656	30.92	1.709
58.9	1370	23.23	1.713
234	3440	14.71	1.715

比, 图 6(a) 为出口压力分别为 105 Pa、323 Pa、656 Pa 时泵的平均流量变化曲线。可以看出, 在不同出口压力条件下, 平均流量均能在较短时间内收敛至稳态, 且稳态流量之间差别很小。图 6(b) 为在不同出

口压力下零流量工况的实验值与仿真值对比。从图中可见, 平均流量仿真数据在整个压力范围内均接近零, 当出口压力为 3440 Pa 时, 模拟仿真的平均流量约为 $0.069 \text{ m}^3/\text{s}$, 与实验数据误差较小且可接受。

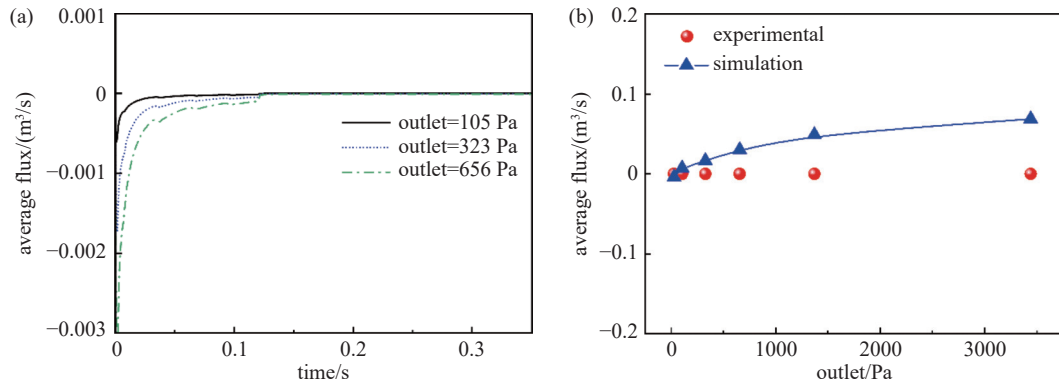


图6 仿真与实验结果对比。(a)不同参数下的仿真结果,(b)零流量验证

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results. (a) Simulation results under different parameters, (b) zero-traffic verification

4 结果分析

4.1 开口相位角 Φ_1 对脉动影响

(1) 容积效率

图 7 为开口相位角 Φ_1 与容积效率和脉动的特性关系曲线。由图 7(a) 可见, 容积效率 η_v 随开口相位角 Φ_1 的增大呈显著提升趋势。当 $\Phi_1 = 30^\circ$ 时, 容积效率仅约为 52%, 远低于工程应用所需的 70% 水平; 随着 Φ_1 增大至 60° , 容积效率快速上升至约 71%, 并在 $\Phi_1 \geq 60^\circ$ 时趋于稳定, 最高约为 74%。过小的 Φ_1 会导致高、低压腔提前连通, 引起明显泄漏, 从而降低容积效率; 当 Φ_1 增大至 60° 以上时, 泄漏效应得到有效抑制, 使容积效率维持在较高水平。

(2) 压力脉动

由图 7(b) 可见, 压力脉动系数 L_p 随开口相位角 Φ_1 的增大呈明显下降趋势。当 $\Phi_1 = 30^\circ$ 时, 压力脉

动系数约为 0.006; 随着 Φ_1 增大至 50° , 压力脉动迅速减小至约 0.002, 降幅超过 65%。当 $\Phi_1 \geq 60^\circ$ 时, 明适当增大开口相位角能够有效削弱啮合区内的压力波动, 改善泵的运行平稳性。

(3) 流量脉动

由图 7(c) 可见, 流量脉动系数 L_q 随开口相位角 Φ_1 的增大整体呈下降趋势。当 $\Phi_1 = 30^\circ$ 约为 2.3, 随着 Φ_1 增至 60° , 流量脉动显著降低至约 1.4, 降幅接近 40%。在 $\Phi_1 = 60^\circ - 70^\circ$ 区间内, 流量脉动保持在最低且相对稳定的水平; 但当 Φ_1 进一步增至 80° 时, 流量脉动略有回升。

研究结果表明, 开口相位角 Φ_1 对罗茨泵性能影响显著。适当增大 Φ_1 可有效抑制高、低压腔的提前连通, 减小泄漏与排气脉动。综合考虑效率与运行平稳性, Φ_1 在 $60^\circ - 70^\circ$ 范围内性能最佳。

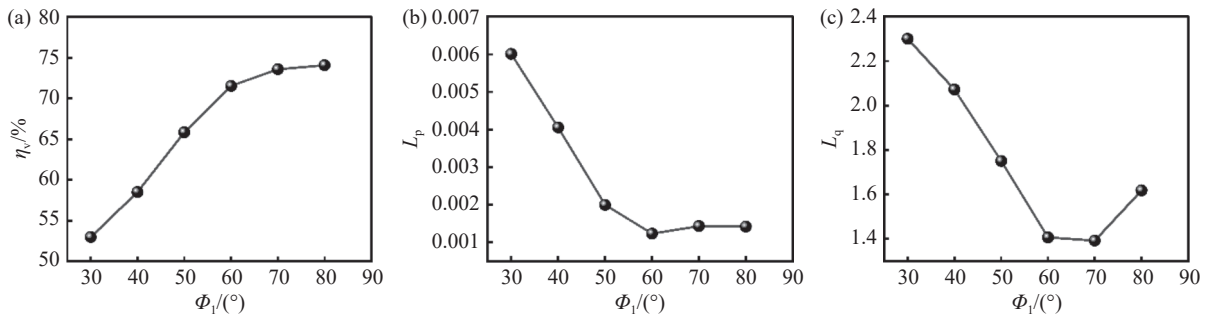


图7 开口相位角对性能的影响。(a)容积效率,(b)压力脉动,(c)流量脉动

Fig. 7 The influence of opening phase angles on performance. (a) Volume efficiency, (b) pressure pulsation, (c) flow pulsation

4.2 开口宽度角 Φ_2 对脉动影响

(1) 容积效率

图8为开口宽度角 Φ_2 与容积效率和脉动的特性关系曲线。由图8(a)可见,容积效率 η_v 随开口宽度角 Φ_2 的增大呈现逐渐下降的趋势。当 Φ_2 从 1° 增至 7° 时,容积效率由约74.1%降低至73.5%。虽然整体变化幅度较小,但可以看出较大的开口宽度角会扩大稳压室与工作腔之间的连通面积,从而增加气体泄漏通道,导致有效传输效率下降。

(2) 压力脉动

图8(b)表明,压力脉动系数 L_p 随 Φ_2 的变化呈现“U”形趋势。当 Φ_2 由 1° 增至 3° 时,压力脉动由约0.0017降低至0.0013,达到最小值;此后随着 Φ_2 的进一步增大,压力脉动逐渐回升。这一结果说明,适当的开口宽度角能够在稳压室容积与气体泄漏之间实现较优平衡,从而有效抑制压力脉动,过大或过小的开口宽度角均不利于压力波动的缓释。

(3) 流量脉动

由图8(c)可见,流量脉动系数 L_q 随 Φ_2 的变化规律与压力脉动相似。当时,流量脉动处于最低水平,约为1.17;而当 Φ_2 较小(1°)或过大(7°)时,流量脉动均明显升高,最高达到约1.6。说明过小的开口宽度角会导致流动不均衡;过大的开口宽度角会导致泄

漏增强,也会加剧流量波动。

综合考虑效率与稳定性, $\Phi_2 = 2^\circ - 3^\circ$ 为较优区间。

4.3 长宽比 λ 对脉动影响

基于前期对稳压室开口相位角 Φ_1 与开口宽度角 Φ_2 的数据分析,综合容积效率与排气脉动两个指标的权衡,选取 $\Phi_1 = 70^\circ$ 、 $\Phi_2 = 3^\circ$,研究长宽比 λ 对泵性能的影响。图9为长宽比 λ 与容积效率和脉动的特性关系曲线。

(1) 容积效率

图9(a)所示为长宽比 λ 对容积效率 η_v 的影响。从结果可以看出,容积效率随 λ 增大呈先升后降趋势,并在 $\lambda = 1.0$ 时达到最大值(峰值约73.75%),整个曲线的振幅极小——从最低点约73.74%上升到峰值,绝对变化量大约为0.01%。表明在本文所设边界条件和几何范围内,容积效率基本稳定。

(2) 压力脉动

图9(b)反映了长宽比 λ 对压力脉动 L_p 的影响。随着 λ 的增大,压力脉动明显下降并在 $\lambda = 1.4$ 左右时达到最小值,随后在更大 λ 上出现轻微回升。该变化的绝对幅度较小。

(3) 流量脉动

图9(c)给出了长宽比 λ 对流量脉动 L_q 的影响。结果表明,随着 λ 的增大,流量脉动整体呈上升趋势,

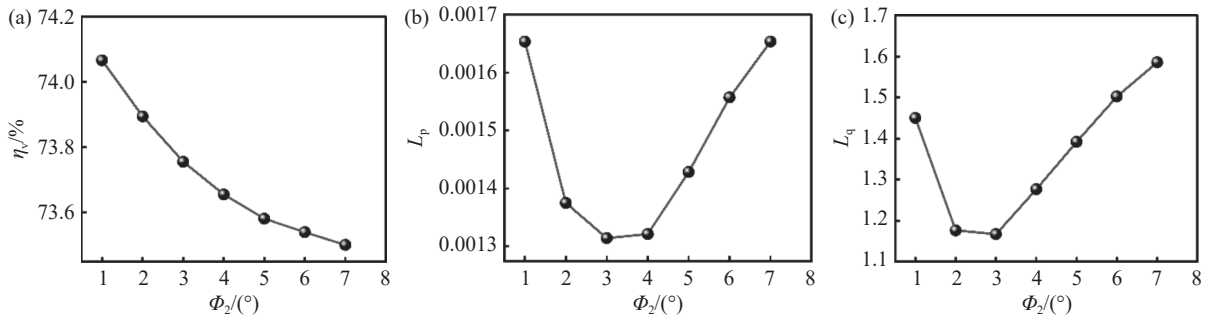


图8 开口宽度角对性能的影响。(a)容积效率,(b)压力脉动,(c)流量脉动

Fig. 8 The influence of opening widths angle on performance. (a) Volume efficiency, (b) pressure pulsation, (c) flow pulsation

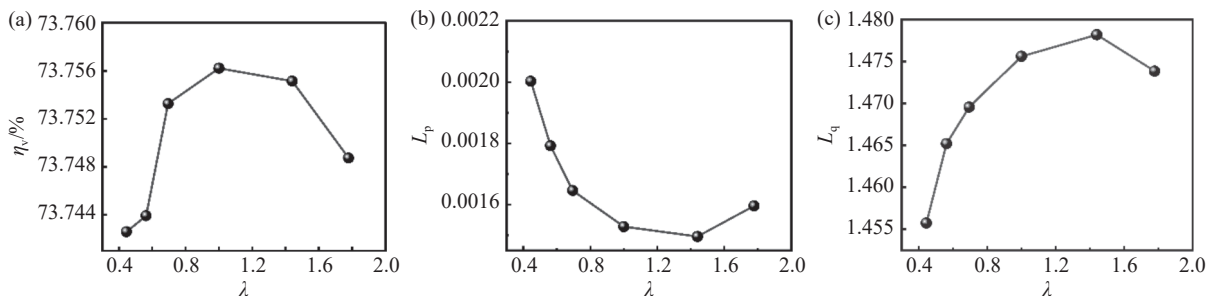


图9 长宽比对性能的影响。(a)容积效率,(b)压力脉动,(c)流量脉动

Fig. 9 The influence of aspect ratios on performance. (a) Volume efficiency, (b) pressure pulsation, (c) flow pulsation

在 $\lambda = 1.4$ 左右达到峰值,增幅约为 0.023,表明长宽比对流量脉动敏感性不大。

整体来看, $\lambda = 1.0 \sim 1.4$ 区间能够在保持效率稳定的前提下,实现较为平稳的脉动表现,整体性能较优。

4.4 原模型与带稳压室结构模型对比分析

取稳压室结构参数为 $\Phi_1 = 70^\circ$ 、 $\Phi_2 = 3^\circ$ 、 $\lambda = 1$,在相同工况下,对比分析两个模型的瞬时压力云图与流线分布,以研究稳压室结构对泵腔内部流动特性的影响。

(1) 排气压力分布对比

图 10 展示了封闭腔向排气口开放时的压力分布情况,图 10(a)和(b)分别为原模型和带稳压室压力分布云图。与原模型相比,带稳压室的罗茨真空泵封闭腔内压力随着转角增大逐步逼近出口处压力,在状态 1 时的内外压差为 3000 Pa 左右,而原模型的内外压差为 5000 Pa 左右,在状态 2 时的内外有压差为 1000 Pa 左右,而原模型的内外压差为 4000 Pa 左右,两模型在状态 3 时,封闭腔内压力与出口处压力持平。稳压室通过增加附加容积,使高压侧压力波在到达封闭腔低压区前得到缓冲与滞后,从而有效削弱了瞬时压差,降低了压力脉动幅值。

(2) 流线对比

图 11 为原模型与所设计模型在左侧封闭腔向

出口开放瞬间的流线分布对比图。由图 11(a)中 I 处可见,原模型出口处形成明显的逆向流线(由出口指向封闭腔),并在出口处形成大尺度回流团,使出口气流方向受到干扰。而图 11(b)中带稳压室模型 I 处的逆向流线数量减小,贴附在出口边缘的涡核变得更小,说明稳压室改变了出口附近的瞬时压力响应,减弱了回流对腔内气体的影响。

图 11(a)中 II 处局部放大图可见,原模型腔内存在由出口延展进腔内的旋转性流线尾迹,其涡核位置靠近腔排气口且流线与出口存在连通,该结构可归类为开放型剪切涡,使腔内流场与出口间存在强耦合,放大了气体脉动。而图 11(b)中带稳压室模型 II 处局部放大图显示出腔内存在封闭型旋涡,其涡环流线呈局部闭合分布,动能与扰动被限制在旋涡的内部循环中,降低了与主流耦合的强度和出口速度波动。

(3) 排气脉动对比

图 12 为原模型与带稳压室模型的压力脉动曲线和流量脉动曲线对比图。

由式(1)~式(2)计算得到两者的压力脉动分别为 0.00454 和 0.00196;出口流量脉动值分别为 3.088 和 1.567。相较于原模型,带稳压室模型压力脉动系数下降了约 56.8%,流量脉动系数降低约 49.2%。相比原模型,带稳压室模型对气体脉动有更佳的抑制效果。

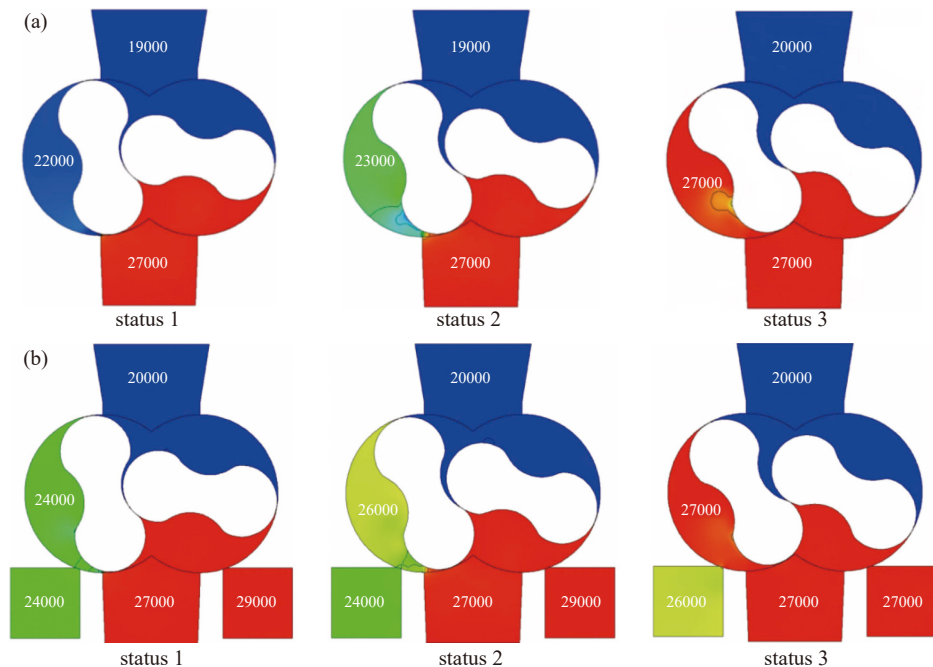


图 10 排气压力分布对比。(a)原模型,(b)带稳压室模型

Fig. 10 Comparison of exhaust pressure distribution. (a) Original model, (b) with the pressure stabilizing chamber model

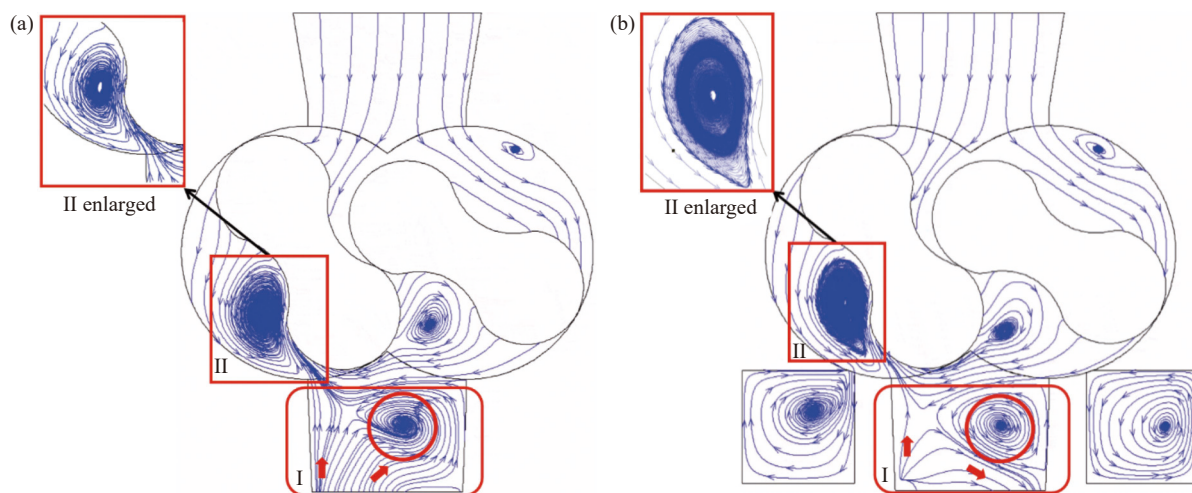


图11 流线对比。(a)原模型, (b)带稳压室模型

Fig. 11 Comparison of streamline. (a) Original model, (b) with the pressure stabilizing chamber mode

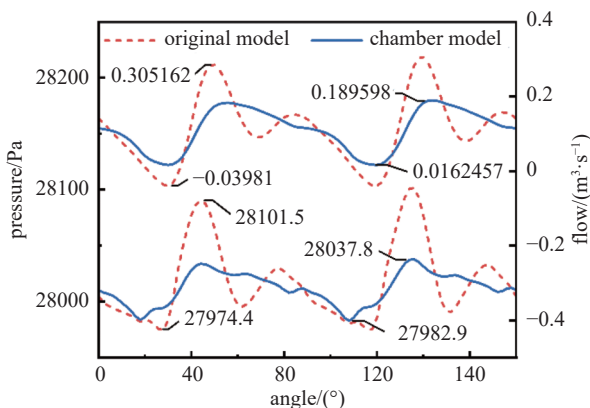


图12 排气脉动对比

Fig. 12 Comparison of exhaust pulsation

5 结论

本文设计了罗茨真空泵稳压室结构模型,研究了稳压室开口相位角、开口宽度角和长宽比等参数对罗茨真空泵排气脉动的影响,对比分析了带稳压室罗茨真空泵与传统罗茨真空泵的气体流动特性,得到如下结论:

(1)稳压室开口相位角 Φ_1 对流量脉动影响最为显著,适当增大开口相位角有助于削弱流量波动,但过大的开口角会破坏气体交换的平衡性,反而导致脉动加剧,因此取 $\Phi_1 = 60^\circ \sim 70^\circ$ 。开口宽度角反映了稳压室颈部通道的流通面积,其大小直接影响气体通过稳压室的平衡性和泄漏强度,过小会造成流动受限与不均,而过大则易引起泄漏与脉动增强,因此取 $\Phi_2 = 2^\circ \sim 3^\circ$ 。长宽比 λ 对脉动特性影响较弱,可在结构布置上灵活调整以适应空间约束。

(2)设计了 $\Phi_1 = 70^\circ$ 、 $\Phi_2 = 3^\circ$ 、 $\lambda = 1$ 的稳压室结

构,与原真空泵模型相比,带稳压室模型的压力脉动较原始结构降低了约56.8%,流量脉动降低了约49.2%。表明稳压室结构对降低罗茨真空泵排气体脉动有效。

(3)本文研究结果为罗茨真空泵排气脉动提供了理论依据。

参考文献

- [1] Yang N H. Principle, characteristics and applications of dry vacuum pumps[J]. *Vacuum*, 2000, 37(3): 1-9 (杨乃恒. 干式真空泵的原理、特征及其应用 [J]. *真空*, 2000, 37(3): 1-9 (in Chinese))
- [2] Lessard P A. Dry vacuum pumps for semiconductor processes: Guidelines for primary pump selection[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 2000, 18(4): 1777-1781
- [3] Long Q Q, Cai D F, Lin D X, et al. Investigation on the noise mechanism of Roots vacuum pumps[J]. *Vacuum*, 2004, 41(4): 141-142 (龙启强, 蔡东锋, 林达兴, 等. 罗茨真空泵噪声机理探讨 [J]. *真空*, 2004, 41(4): 141-142 (in Chinese))
- [4] Wu C M. Fault analysis caused by airflow pressure pulsation[J]. *Petroleum and Chemical Equipment*, 2012, 15(5): 50-51 (吴朝敏. 气流压力脉动引起的故障分析 [J]. *石油和化工设备*, 2012, 15(5): 50-51 (in Chinese))
- [5] Guo H. Study on the reduction of airflow pulsation in natural gas compressors[J]. *Contemporary Chemical Research*, 2017(10): 92-93 (郭皓. 天然气压缩机气流脉动的消减研究 [J]. *当代化工研究*, 2017(10): 92-93 (in Chinese))

- [6] Mujic E, Kovacevic A, Stosic N, et al. The influence of port shape on gas pulsations in a screw compressor discharge chamber[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2008, 222(4): 211–223
- [7] Gao J. Design study of internal reflux groove in Roots blower[J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(9): 30–32 (高进. 罗茨鼓风机内回流槽的设计研究[J]. *流体机械*, 2009, 37(9): 30–32 (in Chinese))
- [8] Fu M. Noise reduction study of gradually expanding clearance in arc-shaped Roots blower blades[J]. *Fan Technology*, 2012, 54(1): 14–18 (符明. 圆弧叶型罗茨鼓风机渐扩缝隙降噪研究[J]. *风机技术*, 2012, 54(1): 14–18 (in Chinese))
- [9] Liu J T, Li Y, Li X P, et al. Study on the flow characteristics of Roots vacuum pump with internal reflux groove[J]. *Fluid Machinery*, 2025, 53(1): 25–32,40 (刘建停, 李杨, 李晓配, 等. 内设回流槽的罗茨真空泵流动特性研究[J]. *流体机械*, 2025, 53(1): 25–32,40 (in Chinese))
- [10] Xing W S, Zhang F, Zhao F F, et al. Influence of Different Reflux Groove Structures on the Flow Characteristics of the Roots Pump[J]. *MACHINES*, 2022, 10(11): 10111087
- [11] Kong X C, Han J Q, Guo Y, et al. Investigation on the pressure fluctuation of hydrogen Roots pump with a novel reflow structure for fuel cell vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 66–78
- [12] Huang P X, Yonkers S W. Rotary lobe blower (pump) or vacuum pump with a shunt pulsation trap: US13155123[P]. 2015-09-22
- [13] Huang P X, Yonkers S W. Screw compressor with a shunt pulsation trap: U. S. Patent 9, 151, 292[P]. 2015-10-6
- [14] Huang P X. Gas pulsations: a shock tube mechanism[J]. *International compressor engineering conference at Purdue*, 2012, 1304: 1–10
- [15] Huang P X. Under Compression (Over Expansion) - An Isochoric or Adiabatic Process? [C]. *International compressor engineering conference at Purdue*. 2012: 20–29
- [16] Huang P X, Yonkers S, Hokey D, et al. Screw pulsation generation and control: a shock tube mechanism[C]. *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Their Systems*, 2013: 113–128
- [17] Liu R Q, Cui D, Wang J, et al. Effect of twist angle on the performance of arc-twisted Roots vacuum pump rotors[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(5): 44–48 (刘瑞青, 崔冬, 王君, 等. 扭转角对圆弧扭叶型罗茨真空泵转子性能的影响[J]. *流体机械*, 2018, 46(5): 44–48 (in Chinese))
- [18] Liu R Q, Cui F, Wang J, et al. Performance analysis of straight and twisted Roots vacuum pump rotors[J]. *Mechanical Design & Manufacturing*, 2019(8): 180–183 (刘瑞青, 崔锋, 王君, 等. 直叶与扭叶罗茨真空泵转子的性能分析[J]. *机械设计与制造*, 2019(8): 180–183 (in Chinese))
- [19] Liu R Q, Zhang L H, Wang J, et al. Research on rotor of low pressure pulsating roots vacuum pump[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(10): 129–132 (刘瑞青, 张凌宏, 王君, 等. 低压力脉动罗茨真空泵转子的研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(10): 129–132 (in Chinese))
- [20] Liu Z X, Xu L H. Numerical analysis of vortices and exhaust pulsation in counterflow-cooled Roots blowers[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(2): 241–246 (刘正先, 徐莲环. 逆流冷却罗茨鼓风机涡流与排气脉动的数值分析[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(2): 241–246 (in Chinese))
- [21] Zhang G Z, Wang F Z, Han G, et al. Performance analysis of counterflow-cooled Roots blowers[J]. *Fluid Machinery*, 2011, 39(4): 48–53 (张顾钟, 王发展, 韩刚, 等. 逆流冷却罗茨鼓风机性能分析[J]. *流体机械*, 2011, 39(4): 48–53 (in Chinese))
- [22] Tang M L, Meng S, Sheng W, et al. Numerical analysis of the effect of counterflow cooling port position on Roots pump performance[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science Edition)*, 2017, 13(4): 321–325,346 (唐美玲, 孟帅, 盛伟, 等. 逆流冷却口位置对罗茨泵性能影响的数值分析[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2017, 13(4): 321–325,346 (in Chinese))
- [23] 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: 195–204
- [24] Sun S K, Jia X H, Xing L F, et al. Numerical study and experimental validation of a Roots blower with backflow design[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018, 12(1): 282–292
- [25] Sun S H, Kovacevic A, Bruecker C, et al. Numerical and experimental analysis of transient flow in roots blower[C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, 425(1): 012024
- [26] Aakre S R, Anderson M H, Brooks P W. Volumetric efficiency and pressure pulsations of a triplex reciprocating

- supercritical CO₂ pump[J]. [The Journal of Supercritical Fluids](#), 2021, 168: 105072
- [27] Huang S, Kang W M, Chen S T, et al. Transient flow field calculation and performance prediction of roots vacuum pump based on CFD[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(2): 62–66,74 (黄思, 康文明, 陈首挺, 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): 62–66,74 (in Chinese))
- [28] Zhang X Y, Liu J C, Wang J, et al. Construction and performance study of a novel eccentric involute-type asymmetric rotor for Roots vacuum pumps[J]. [Journal of Vacuum Science & Technology](#), 2024, 44(1): 78–86 (张轩宇, 刘俊材, 王君, 等. 罗茨真空泵新型偏心渐开线型不对称转子的构建与性能研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2024, 44(1): 78–86 (in Chinese))