

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.006

椭圆旋轮线型罗茨泵转子型线设计

贲晨阳^{1,2}, 何雪明^{1,2}, 刘振超^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:为提高罗茨泵的性能,课题组提出了椭圆旋轮线构成的转子型线,得到了罗茨泵椭圆旋轮线型转子型线的数学模型。分析了椭圆率对转子型线形状的影响,并推导了转子型线的根切条件;然后以容积效率为性能参数对转子型线进行分析研究。结果表明:转子型线的椭圆率越小,容积效率越大;当椭圆率为0.4时,容积效率为0.665 6,比传统摆线型转子型线提高了23.09%,比圆弧型转子型线提高了8.07%。椭圆旋轮线型转子型线性能更好。

关键词:罗茨泵;转子型线;椭圆旋轮线型;容积效率

中图分类号:TH326;TB752.26

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)04-0034-06

Rotor Profile Design of Elliptical Rotary Wheel Line Type Roots Pump

BEN Chenyang^{1,2}, HE Xueming^{1,2}, LIU Zhenchao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to improve the performance of Roots pump, a rotor profile composed of elliptic rotor profile was proposed, and a mathematical model of the rotor profile of Roots pump was obtained. The influence of ellipticity on the shape of rotor profile was analyzed, and the root cutting condition of rotor profile was deduced. Then the rotor profile was analyzed with volume efficiency as performance parameter. The results show that the smaller the ellipticity of the rotor profile is, the greater the volume efficiency is. When the ellipticity is 0.4, the volume efficiency is 0.665 6, which is 23.09% higher than that of the traditional pendulum rotor profile and 8.07% higher than that of the arc rotor profile. The performance of the oval wheel rotor profile is better.

Keywords: Roots pump; rotor profile; elliptical rotary wheel profile; volumetric efficiency

转子形状主要由转子型线决定,罗茨泵转子型线的设计,直接关系到罗茨泵性能的高低。

国内外专家学者对罗茨泵转子型线设计进行了有价值的分析研究。王建等^[1]建立基于流量脉动系数的齿轮泵中齿廓的主动设计的数学模型。邹旻等^[2]分析了2转子间差动角对双啮合弦线转子泵流量脉动率的影响,提出了一种具有2对转子的双啮合弦线转子泵。杨舒然^[3]基于齿廓啮合原理,建立了圆弧与其包络线、偏心渐开线与其包络线的啮合模型,提出

了3种新型罗茨泵转子。黄龙龙等^[4]对摆线泵进行CFD和FSI仿真,并将仿真结果进行对比。李玉龙等^[5-6]基于渐开线齿廓的构造方法,提出了具有渐开线齿廓的转子型线,并为实现罗茨泵转子便捷高效的轮廓构造,提出了一种双对称图解法。Kang等^[7]开发了一种新的转子型线,该转子型线由圆弧和摆线组成;通过体积计算和流场分析,分析不同型线对转子性能的影响。Hsieh等^[8]利用共轭齿轮原理对罗茨泵摆线转子型线进行数学建模。Wu等^[9]等建立多级罗茨真空泵

收稿日期:2022-01-15;修回日期:2022-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275210);国家自然科学基金资助项目(51975251);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(FMZ2018Y2)。

第一作者简介:贲晨阳(1997),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为现代机械设计与制造、机械动力学。E-mail:1527728918@qq.com

IVEC 型转子型线,提出了面积利用率和啮合间隙面积 2 个几何性能指标,用于评估转子型线的优劣。

传统的转子型线包括圆弧型、摆线型以及它们之间的发展和组合线型。然而以容积效率作为性能参数来评判罗茨泵转子型线的性能,传统转子型线性能普遍偏低。故课题组提出了一种椭圆旋轮线型转子型线,并详细推导了转子型线由叶峰曲线到叶谷线的设计算法,并分析了椭圆率对转子型线的影响。该型线的容积效率明显高于传统罗茨泵转子型线。

1 椭圆旋轮线转子型线设计

罗茨泵的 2 个转子形状是完全一样的,转子每个叶峰和叶谷^[10]也是完全一样,且每个叶上的转子形状又是对称的。所以设计转子型线时,只需要设计 1 个叶或者半个叶上的齿廓,进而可以通过旋转和对称变换,将转子型线完整设计出来。

罗茨泵转子型线的节圆将单叶上型线分成了 2 个部分,分别为叶峰曲线和叶谷曲线。叶谷曲线在节圆内,叶峰曲线在节圆外。根据罗茨泵转子的工作原理,罗茨泵的左侧转子的叶峰曲线和右侧转子的叶谷曲线为共轭关系,所以只需设计左侧转子的一条叶峰曲线,通过包络法求解右侧转子的叶谷曲线,进而通过坐标转换得到左侧转子的叶谷曲线,完成整个转子的型线设计。

一条光滑曲线在另一条光滑曲线上做无滑动的滚动运动,光滑曲线上的一点的运动轨迹定义为广义旋轮线。当光滑曲线为圆时,圆做纯滚动形成的轨迹即为旋轮线,又称摆线^[11]。当滚动圆换成滚动椭圆时,滚动椭圆上的一点轨迹也为一种旋轮线,可以将它定义为椭圆旋轮线。

建立罗茨泵转子坐标系如图 1 所示,其中包含了 2 对坐标系,分别是固结在罗茨泵泵体的左侧转子的静坐标系 $O_1X_1Y_1$ 和固结在右侧转子的静坐标系 $O_2X_2Y_2$;固结在罗茨泵泵体的左侧转子的动坐标系 $O_1x_1y_1$ 和固结在右侧转子的动坐标系 $O_2x_2y_2$;静坐标系不随着转子的转动而发生任何位置变化,动坐标系随着转子的转动发生相应角度的转动; R 为罗茨泵转子的节圆半径; φ 为罗茨泵转子的转角; ω 为转子旋转的角速度。

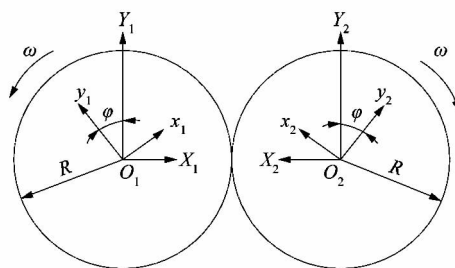


图 1 罗茨泵转子坐标关系

Figure 1 Rotor coordinate relation of Roots pump

如图 2 所示,当滚动椭圆在纯滚动运动中围绕节圆的圆周逆时针旋转时,滚动椭圆上的点 p 的运动轨迹,即为椭圆旋轮线。定义椭圆的参数方程为:

$$\begin{cases} x(\psi) = -a\cos\psi; \\ y(\psi) = b\sin\psi. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ 为椭圆参数角, a 为椭圆长轴, b 为椭圆短轴。

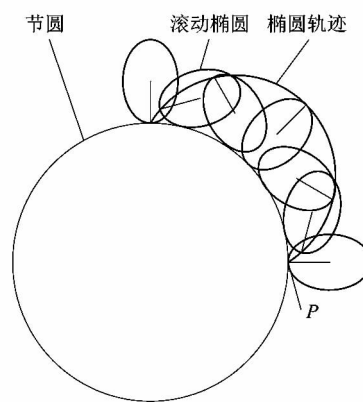


图 2 椭圆旋轮线轨迹

Figure 2 Trajectory of elliptical rotary wheel line

如图 3 所示,点 A 为椭圆开始滚动前圆与椭圆的接触点;当椭圆滚动一个角度 θ 时,点 B' 为椭圆和圆的接触点,可以看出椭圆上的曲线 AB 的长度等于椭圆在节圆上滚动经过的曲线 AB' 的长度。对椭圆弧长计算需要进行椭圆积分,则 2 条曲线的长度之间的关系可表示为:

$$L = r_p \theta = \int_0^\psi (\partial_\psi^2 x(\psi) + \partial_\psi^2 y(\psi))^\frac{1}{2}. \quad (2)$$

式中: L 为椭圆滚动 1 周的长度, r_p 为节圆的半径, θ 为滚动椭圆在圆上滚动角。

椭圆旋转 1 周所转的角度为 $\theta = \frac{\pi}{2}$, θ 与罗茨泵的

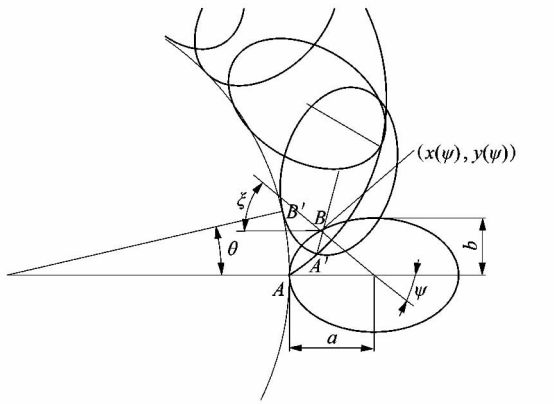


图3 椭圆旋轮线的几何关系

Figure 3 Geometric relationship of elliptical rotary wheel line

转子叶数有关。因此先设定罗茨泵转子的叶数为2, 则椭圆在圆上的滚动范围为1/4圆。根据图2所显示的运动轨迹的几何关系, 推导出椭圆旋轮线型转子型线叶峰曲线的方程为:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a \cos(\xi + \theta)(\cos \psi - 1) + b \sin(\xi + \theta) \sin \psi + r_p \cos \theta; \\ y_1 &= a \sin(\xi + \theta)(\cos \psi - 1) - b \cos(\xi + \theta) \sin \psi + r_p \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ξ 为滚动椭圆在接触点 B 上的法向角, $\xi = \tan^{-1} \frac{\partial_\psi x(\psi)}{\partial_\psi y(\psi)}$ 。

得到了椭圆旋轮线型转子型线的叶峰曲线, 可求解叶谷曲线:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -x_2 \cos(2\varphi) - y_2 \sin(2\varphi) + 2R \cos \varphi; \\ y_1 &= -x_2 \sin(2\varphi) + y_2 \cos(2\varphi) + 2R \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则叶谷曲线的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= a \cos(\xi + \theta - 2\varphi)(\cos \psi - 1) + b \sin(\xi + \theta - 2\varphi) \cdot \sin \psi + r_p (\cos(\theta - 2\varphi) - 2 \cos \varphi); \\ y_2 &= a \sin(\xi + \theta - 2\varphi)(\cos \psi - 1) + b \cos(\xi + \theta - 2\varphi) \cdot \sin \psi + r_p (\cos(\theta - 2\varphi) + 2 \sin \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由三角函数中的辅助角公式^[12]求解 φ 与参数 θ 的关系, 需要分别求 x_1 和 y_1 对参数 θ 的导数。

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= (a(\xi' + 1)(1 - \cos \psi) + b\psi' \cos \psi) \sin(\xi + \theta) + (-a\psi' + b\xi' + b) \cos(\xi + \theta) \sin \psi - r_p \sin \theta; \\ y'_1 &= (a(\xi' + 1)(\cos \psi - 1) - b\psi' \cos \psi) \cos(\xi + \theta) + (-a\psi' + b\xi' + b) \sin(\xi + \theta) \sin \psi + r_p \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \psi' &= \frac{r_p}{[(-a \sin \psi)^2 + (b \cos \psi)^2]^{0.5}}; \\ \xi' &= \frac{ab\psi' \sec \psi^2}{b^2 + (a \tan \psi)^2}. \end{aligned}$$

求解出 φ 与 θ 的关系后, 将 φ 代入式(5)中右侧转子的叶谷曲线, 将叶谷曲线和叶峰曲线进行连接得到了1叶转子的四分之一型线, 如图4所示。曲线 CD 为椭圆旋轮线型转子型线。

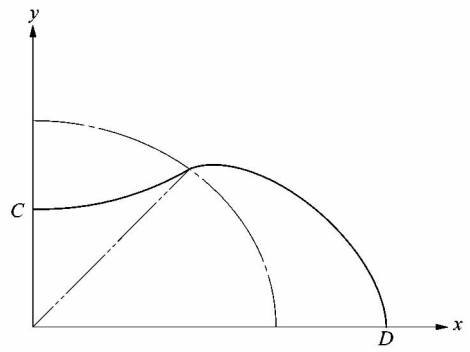


图4 椭圆旋轮线型转子型线

Figure 4 Rotor profile of elliptical rotary wheel line type

2 椭圆率对转子型线的影响

2.1 椭圆旋轮线型转子型线根切条件

椭圆旋轮线是由椭圆在节圆上滚动形成的轨迹, 其形状主要受椭圆短轴和椭圆长轴的比值影响, 即椭圆率 $\lambda = b/a$ 。不同的椭圆率会形成不同的椭圆旋轮线, 当 $\lambda = 1$ 时, 椭圆旋轮线即为摆线, 构成的转子型线为常用的摆线型转子型线; 当 $\lambda \neq 1$ 时, 转子型线为椭圆旋轮线型转子型线。

椭圆旋轮线型转子型线会产生如同齿轮设计过程中根切现象。出现根切的转子会使得转子的抗弯曲能力下降, 重合度减少, 影响转子运转的平稳性。

根据齿轮啮合原理^[13], 得到罗茨泵转子的啮合条件:

$$v_{r_2} = v_{r_1} + v_{12} = 0。 \quad (7)$$

式中: v_{r_1} 表示在 $O_1x_1y_1$ 中啮合点沿叶峰曲线运动的相对速度, 且 $v_{r_1} = \frac{dr_1}{dt} = \frac{dx_1}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{dy_1}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$; v_{r_2} 表示在动坐标系 $O_2x_2y_2$ 中啮合点沿共轭曲线即叶谷曲线运动的相对速度; v_{12} 表示啮合点处相对运动速度。

令:

$$f = (2r_p \cos \varphi - 2x_1)x'_1 + (2r_p \sin \varphi - 2y_1)y'_1。 \quad (8)$$

则椭圆旋轮线型转子型线的根切条件为:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \theta} & -v_{x_1}^{(12)} \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} & -\frac{\partial f}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{vmatrix} = 0; \\ A_2 &= \begin{vmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial \theta} & -v_{y_1}^{(12)} \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} & -\frac{\partial f}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{vmatrix} = 0。 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中:

$$\frac{\partial f}{\partial \theta} = 2[x_1'^2 + y_1'^2 + x_1''(x_1 - r_p \cos \varphi) + y_1''(y_1 -$$

$$r_p \sin \varphi];$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = 2r_p(x_1' \sin \varphi - y_1' \cos \varphi)。$$

式中: $v_{x_1}^{(12)}$ 和 $v_{y_1}^{(12)}$ 分别为啮合点处沿 x_1, y_1 方向的相对运动速度。

可将式(9)化简为:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= -2r_p x'_1(x'_1 \sin \varphi - y'_1 \cos \varphi) + 2(2y - \\ &\quad 2r_p \sin \varphi)[x_1'^2 + y_1'^2 + x_1'(x_1 - \\ &\quad r_p \cos \varphi) + y_1'(y_1 - r_p \sin \varphi)] = 0; \\ A_2 &= 2r_p y'_1(-x'_1 \sin \varphi + y'_1 \cos \varphi) + 2(-2x + \\ &\quad 2r_p \cos \varphi)[x_1'^2 + y_1'^2 + x_1'(x_1 - \\ &\quad r_p \cos \varphi) + y_1'(y_1 - r_p \sin \varphi)] = 0。 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由式(6)可知: 当 r_p 一定时, 椭圆率 $\lambda = b/a$ 越小, 则 ξ' 的值越小, x'_1 以及 y'_1 就越小; 椭圆率不断变化达到 0.3 时, x'_1 以及 y'_1 的值接近于 0, 则 A_1 与 A_2 的值约等于 0, 导致椭圆旋轮线型转子型线产生根切现象。

2.2 椭圆率对转子型线的影响

针对不同椭圆率的转子型线情况, 设定转子的节

圆半径 r_p 为 60 mm、转子叶数 Z 为 2。将式(2)代入式(5), 计算得到不同椭圆率 λ 对应的 a, b 和 r_p , 其参数如表 1 所示。

表 1 不同椭圆率下转子型线参数
Table 1 Rotor profile parameters under different ellipticities

椭圆率 λ	椭圆长轴 a/mm	椭圆短轴 b/mm	节圆半径 r_p/mm
0.4	12.170 1	4.868 0	35.659 8
0.5	11.801 9	5.900 9	36.396 2
0.6	11.428 1	6.856 9	37.143 7
0.7	11.056 8	7.739 8	37.886 4
0.8	10.693 1	8.554 4	39.613 9
0.9	10.340 1	9.306 1	39.319 7

根据以上参数, 绘制完整的转子型线, 其中不同椭圆率下转子型线如图 5 所示。从图中可以看出, 椭圆率越小, 整个转子型线的凹凸性越明显。

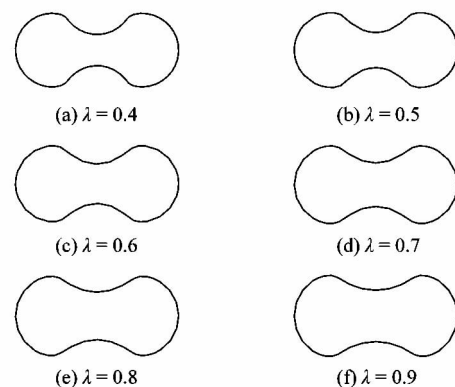


图 5 不同椭圆率下的转子型线

Figure 5 Rotor profile under different ellipticity

3 椭圆旋轮线型转子型线性能分析

转子在运转过程中, 1 个转子每转动 $1/Z$ 周, 1 个腔室的气体就从罗茨泵进口输送到了罗茨泵出口, 当转子旋转 1 周时, 即完成 1 个周期的气体输送工作。该运转过程反映了罗茨泵的性能, 通常该性能以容积效率^[14]来量化。所谓容积效率是指罗茨泵在抽气过程中所输送的实际气体体积除以泵整个腔室的体积。同时因为罗茨泵的整个转子在轴的方向上形状完全一致, 所以理论上罗茨泵的容积效率只与转子的端面形状相关, 与其他因素关系不大。为了计算罗茨泵的容积效率更加方便, 可以将容积效率的三维问题换算成

二维问题。图6即为1个2叶罗茨泵的腔室横截面。阴影部分即为转子的腔室部分,根据图形可以得到转子的容积效率公式为:

$$\eta = \frac{2(\pi r_a - S)}{\pi r_a^2 + 4r_a r_p} \quad (11)$$

式中 S 为单个转子的面积。

根据转子型线的方程,可以得到转子型线的所有直角坐标,并将直角坐标换算成极坐标,对应函数为 $\rho = g(\beta)$, ρ 为极径, β 为极径对应的角度,所以转子的面积公式为:

$$S = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\beta \quad (12)$$

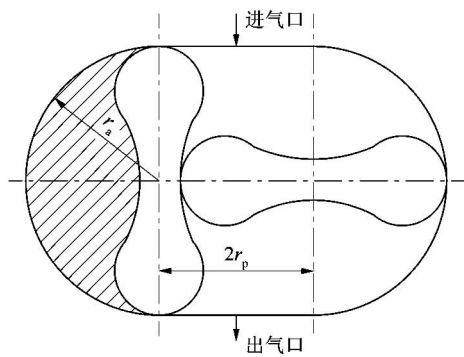


图6 2叶转子的腔室横截面

Figure 6 Cross section of chamber of 2-blade rotor

容积效率作为罗茨泵性能的重要参考之一,因此,为了验证新型转子型线的性能优劣,就椭圆旋轮线转子型线的不同参数对容积效率的影响进行了分析。根据椭圆旋轮线型转子型线的数学模型,转子型线的形状主要受椭圆率 λ 和转子叶数 Z 这2个参数的影响。为了准确地分析不同参数对转子型线容积效率的影响规律,采用唯一变量原则,即控制唯一变量而排除其他因素的干扰从而验证唯一变量的作用。

为了分析不同椭圆率对容积效率的影响规律,需限定转子型线的齿顶圆半径一定,即保证各个转子的大小一样;同时保证转子叶数相同,即保证各个转子形状一样。取齿顶圆半径为60 mm,转子叶数为2叶,不同椭圆率下椭圆旋轮线型线容积效率如表2所示。

根据表2所示数据,当椭圆率不断变小,转子的面积也越来越小,转子的容积效率越来越大。当椭圆率为0.4时,转子的容积效率最大,为0.6656。

表2 不同椭圆率下罗茨泵的容积效率

Table 2 Volumetric efficiency of Roots pumps under different ellipticities

椭圆率 λ	节圆半径 r_p/mm	转子面积 S/mm^2	容积效率 $\eta/\%$
0.4	35.659 8	4 697.632 1	66.56
0.5	36.396 2	4 848.895 2	64.46
0.6	37.143 7	5 015.016 4	62.24
0.7	37.886 4	5 178.332 2	60.10
0.8	39.613 9	5 344.193 2	57.98
0.9	39.319 7	5 500.231 7	56.00

传统摆线转子受摆线形成原理的限制,节圆半径和齿顶圆半径比值固定,转子齿顶圆半径和节圆半径的比值即径距比固定,2叶摆线转子型线径距比固定为1.5,取齿顶圆半径为60 mm,计算得到2叶摆线型转子的容积效率如表3所示。可知摆线型转子型线的容积效率小于椭圆旋轮线型转子型线。

表3 摆线型转子参数

Table 3 Parameters of cycloid rotor

节圆半径 r_p/mm	转子面积 S/mm^2	容积效率 $\eta/\%$
40	5 654.797 0	54.09

根据表2和表3所示数据分析,椭圆旋轮线型转子容积效率均大于摆线型转子,当椭圆率为0.4时其容积效率相比摆线转子最大容积效率0.5409提高了约23.09%。

对圆弧形转子设计时,圆弧形转子型线径距比不固定,2叶圆弧形转子型线径距比的取值范围为1.2368~1.6698。同样对圆弧形转子容积效率分析时,参照唯一变量原则,取齿顶圆半径为60 mm,取不同径距比分别为1.3000,1.4000,1.5000和1.6000,圆弧形转子相对应参数如表4所示。

表4 圆弧形转子参数

Table 4 Parameters of arc rotor

径距比	节圆半径 r_p/mm	叶峰圆弧半径/mm	转子面积 S/mm^2	容积效率 $\eta/\%$
1.300 0	46.153 8	33.143 4	6 981.487 2	38.67
1.400 0	42.857 1	30.310 8	6 191.575 8	47.40
1.500 0	40.000 0	28.469 9	5 560.726 0	54.99
1.600 0	37.500 0	27.241 3	5 055.099 6	61.59

根据表2、表3和表4所示的数据分析,当圆弧形转子的径距比变大到1.5时,圆弧形转子容积效率与摆线型转子容积效率基本一样,当径距比继续变大时,圆弧形转子容积效率超过摆线型转子。椭圆旋轮线型转子的椭圆率在0.6以下时,椭圆旋轮线型转子的容积效率比圆弧形转子大,当椭圆率为0.4时,其容积效率相比圆弧形转子最大容积效率61.59%,提高了约8.07%。当椭圆旋轮线型转子型线椭圆率在0.6以下时,转子的容积效率最高,比传统罗茨泵转子型线更有优势。

4 结论

课题组提出了一种新型的椭圆旋轮线转子型线,推导其数学模型。对于齿顶圆半径为60 mm,转子叶数为2叶的罗茨泵转子,在不发生根切的情况下,椭圆率与转子的容积利用率大小成反比。当椭圆率为0.4时,椭圆旋轮线型线容积效率最大,达到66.56%,相比于传统摆线型和圆弧形转子,容积效率分别提高了23.09%和8.07%,说明椭圆旋轮线型线在性能方面比传统摆线型与圆弧形转子型线更有优势。现有的改善是直接对转子型线的改善,后续可以运用NURBS曲线直接表达旋转的椭圆,通过曲线局部可调性进一步优化转子型线。

参考文献:

- [1] 王建,崔祥波,常雪峰.基于流量脉动系数的齿轮泵齿廓的主动设计及特性分析[J]. 液压与气动,2019(9):29-35.
- [2] 邹旻,乔永强,任爽,等.双啮合弦线转子泵的设计与受力分析[J]. 液压与气动,2020(5):184-189.
- [3] 杨舒然.罗茨真空泵的新型转子型线构建方法及排气脉动研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2019:21-36.
- [4] 黄龙龙,王艳华,刘勇,等.基于CFD和FSI的摆线泵仿真分析[J]. 液压与气动,2020(7):69-75.
- [5] 李玉龙,范钧,李光宇,等.高形转子基于渐开线齿廓的型线构造方法研究[J]. 真空科学与技术学报,2019,39(5):387-389.
- [6] 李玉龙,秦运栋,张安民,等.罗茨转子轮廓的双对称图解构造法[J]. 液压与气动,2021,45(9):96-100.
- [7] KANG Y H, VU H H. A newly developed rotor profile for lobe pumps: Generation and numerical performance assessment [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(3):915-926.
- [8] HSIEH C F, ZHOU Q J. Fluid analysis of cylindrical and screw type Roots vacuum pumps[J]. Vacuum, 2015, 121:274-282.
- [9] WU Y R, TRAN V T. Generation method for a novel Roots rotor profile to improve performance of dry multi-stage vacuum pumps[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128:475-491.
- [10] 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.
- [11] 李玉龙,孙付春,张宸赫. 泵用转子型线的摆线构造方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(12):1025-1028.
- [12] 李金泰,韩焱,曹洪,等. 辅助角公式几何推证和工程实例应用[J]. 数学学习与研究, 2021(30):130-131.
- [13] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2009:245-255.
- [14] 张旺,杨帅,刘志杰. 基于响应面法的双螺杆泵容积效率建模优化[J]. 机床与液压, 2021, 49(8):117-121.

(上接第33页)

- [16] WANG Y Z, LEE K J. 3D-printed semi-soft mechanisms inspired by origami twisted tower[C]//IEEE 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems. Pasadena, USA:IEEE, 2017:161.
- [17] JEONG D H, LEE K J. Design and analysis of an origami-based three-finger manipulator[J]. Robotica, 2018, 36:261.
- [18] KIM S J, LEE D Y, JUNG G P, et al. An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat [J] Science Robotics, 2018, 3:2.
- [19] SONG C Y, CHEN Y, CHEN I M. Kinematic study of the original and revised general line-symmetric Bricard 6R linkages[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(8):2.
- [20] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [21] 郭盛,海波著. 冗余并联机器人构型综合与应用[M]. 北京:科学出版社, 2016.