

文章编号: 1005-0329(2014)06-0033-04

变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的研究

王吉岱, 张臻臻, 魏军英

(山东科技大学, 山东青岛 266590)

摘要: 研究变基圆渐开线涡旋膨胀机的型线方程及膨胀容积问题。本文首先根据涡旋机正常工作的原则, 推导出了变基圆半径渐开线型线构成涡旋膨胀机所必须满足的条件, 然后根据变基圆半径渐开线涡旋型线的构成条件求出了变基圆半径渐开线的型线方程。依据型线方程给出了动涡盘和静涡盘内外壁面的坐标方程, 根据坐标方程画出了变基圆半径渐开线构成的涡旋腔, 并分析了变基圆半径渐开线型线构成涡旋膨胀机的几何特点。最后根据涡旋腔的容积变化规律和啮合点的特性, 求出了各个腔室的展角范围, 并以第二膨胀腔为例, 利用法向等距线法推导出了变基圆半径渐开线涡旋膨胀机各个腔室的容积计算公式, 为进一步研究变基圆半径渐开线涡旋膨胀机提供了一定的理论基础。

关键词: 涡旋膨胀机; 变基圆半径渐开线; 型线方程; 容积计算

中图分类号: TH12

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2014.06.007

Research of the Scroll Expander with Variable Base Circle Radius Involute

WANG Ji-dai, ZHANG Zhen-zhen, WEI Jun-ying

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The profile equation and the expanded volume of the scroll expander with variable base circle radius involute is studied. Based on the normal operational principle the scroll expander, this paper firstly deduces the necessary condition of variable base circle radius involute profile to constitute the scroll expander, furthermore, obtains the profile equation of the base circle involute with varying radius. According to the profile equation, the coordinate equations of the inside and outside walls for the moving and fixed scrolls are obtained. According to coordinate equations, the scroll chambers constituted by the variable base circle radius involutes are described. And the geometry feature of the profile of base circle involute with varying radius is analyzed. Finally according to the volume change regularity of scroll chambers and the mesh point feature, this paper deduces the range of the flare angle for each expansion chamber. And using the second expansion chamber as an example, normal equidistant curve method is applied to calculate each chamber volume. It provides a theoretical basis for the further research of the variable base circle radius involute scroll expander.

Key words: scroll expander; variable base circle radius involute; profile equation; volume calculation

1 前言

涡旋式膨胀机作为一种新型的能量转换装置, 具有外形尺寸小、结构简单、零部件少、重量轻等优点, 已经被应用于制冷与空调、低温余热回收等领域^[1], 但其技术仍不成熟, 主要表现在其能量转换效率较低^[2]。目前, 国内外许多科研单位、高校试验室都在对涡旋式膨胀机的工作原理、

结构特点、涡盘的受力、泄漏等方面做相关的研究, 以提高其效率。影响涡旋式膨胀机性能的决定因素是其涡旋型线。文献[3]主要对变径基圆渐开线作为涡旋型线的可行性做了分析, 文献[4]主要从通用涡旋型线的角度对涡旋型线做了研究。本文主要从啮合原理的角度出发, 在前人的基础上对变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的型线方程及容积变化做了深入探讨和研究。

收稿日期: 2013-09-17 修稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2009AA05Z212)

2 变基圆半径渐开线涡旋型线的构成条件

根据文献 [5] 涡旋机能够正常工作的必要条件包括以下几点:

(1) 对于动涡盘或静涡盘上任意一点, 在静涡盘上或动涡盘上必有一点且只有一点与之相啮合;

(2) 当涡旋面上一对共轭点相啮合时, 动、静涡旋型线特征几何中心之间的距离, 不随主轴转角而变化;

(3) 在两个共轭点处, 与两个面相切的向量相互平行且垂直于两个涡旋盘偏置的方向。

如图 1 所示, $X_f O_f Y_f$ 为静涡盘坐标系, $X_o O_o Y_o$ 为动涡盘坐标系。 DE 为啮合点 C 的公切线, AC 、 BC 为渐开线法线的垂线, 易得 AC 与 BC 共线, 所以 $|O_f A| = |O_o B|$ 。也就是说啮合点 C 所对应的动、静涡盘的瞬时基圆半径相等。

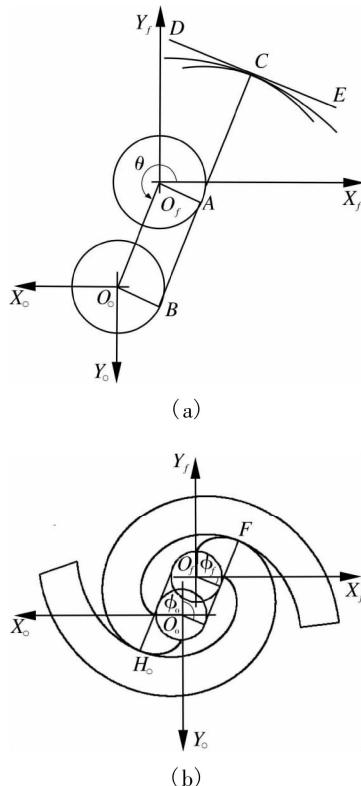


图 1 喷合原理示意

当啮合点是动涡盘的外壁面与静涡盘的内壁面的共轭点时(如图 1 中 H 点), 啮合点所对应的动涡盘的外壁面的基圆半径 a_{oo} 与静涡盘的内壁面的基圆半径 a_{fi} 相等; 当啮合点是动涡盘的内壁面与静涡盘的外壁面的共轭点时(如图 1 中 F 点), 啮合点所对应的动涡盘的内壁面的基圆半

径 a_{oi} 与静涡盘的外壁面的基圆半径 a_{fo} 相等。且啮合点所对应的动涡盘的渐开角 ϕ_o 与静涡盘的渐开角 ϕ_f 相差 π , 即 $\phi_o - \phi_f = \pm \pi$, 当动涡盘外壁面与静涡盘内壁面相啮合时取“-”号, 当动涡盘内壁面与静涡盘外壁面相啮合时取“+”号。

对于基圆半径连续改变的圆渐开线, 基圆半径 $a = a + K\phi$, 在一对啮合点处:

$$a_{oo} = a_{fi} = a + K\phi_f = a + K(\phi_o + \pi) \quad (1)$$

而 $a_{oi} = a + K\phi_o$, 所以 $a_{oo} = a_{oi} + K\pi$ 。即变基圆半径渐开线能够构成涡旋膨胀机的必要条件是共轭点所对应的动、静涡盘的瞬时基圆半径必须相等, 且涡盘的外壁面的渐开线展开角与内壁面的展开角相差 π 。

3 变基圆半径渐开线型线方程

如图 2 所示, M 为渐开线上的任一点, 坐标为 (x, y) , 所对应的渐开角为 ϕ , R_s 为其法线向量, R_g 为其法线向量的垂线, 则 $R_g = \frac{dR_s(\phi)}{d\phi}$ 。

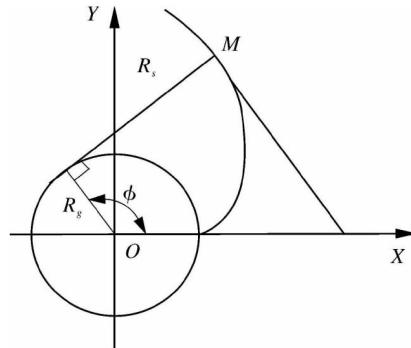


图 2 圆渐开线

易求得渐开线方程为:

$$\begin{cases} x = R_s \sin \phi + R_g \cos \phi \\ y = -R_s \cos \phi + R_g \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

对于变基圆半径渐开线, $R_g = a + K\phi$, 则:

$$\begin{aligned} R_s &= \int_0^\phi R_g d(\phi) \\ &= \int_0^\phi (a + K\phi) d(\phi) \\ &= a\phi + \frac{K\phi^2}{2} + C \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得变基圆半径渐开线型线方程:

$$\begin{cases} x = \left(a\phi + \frac{K\phi^2}{2} + C\right) \sin \phi + (a + K\phi) \cos \phi \\ y = -\left(a\phi + \frac{K\phi^2}{2} + C\right) \cos \phi + (a + K\phi) \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

当 $K = 0$ 时, 所得型线即为基圆渐开线, 所得涡旋体为等壁厚涡旋体; 当 $K > 0$ 时, 涡旋体的壁厚随渐开角 ϕ 的增大而逐渐增加, 如图 3 所示; 当

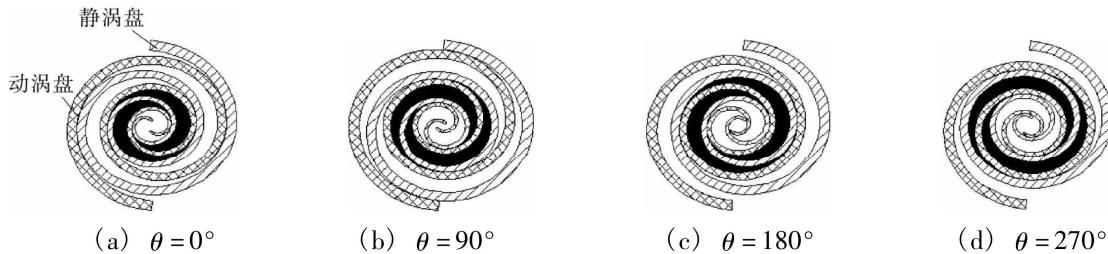


图 3 壁厚逐渐增大的涡旋型线

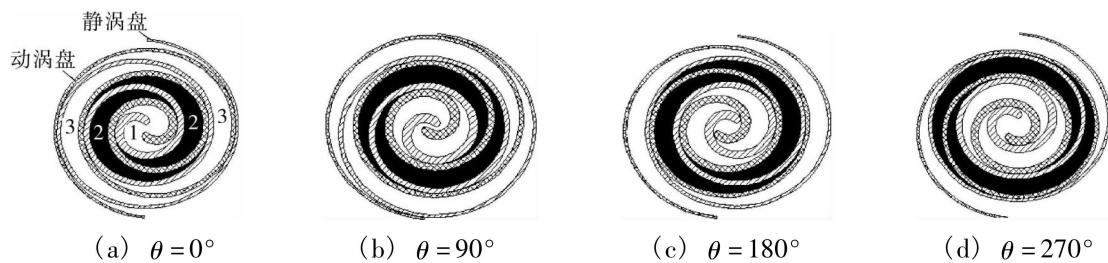


图 4 壁厚逐渐减小的涡旋型线

根据涡旋膨胀机的工作要求, 需要有较大的膨胀比及排气腔。当 $K < 0$ 时, 所构成的涡旋腔有较大的容积, 更符合涡旋膨胀机的工作要求。

由于涡旋式膨胀机的动、静涡盘相位相差 180° , 动涡盘绕静涡盘做半径为 r 的顺时针圆周平动, 则坐标变换方程为:

$$\begin{cases} x_f = -x_o + r\cos\theta \\ y_f = -y_o + r\sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

设式(2)为变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的静涡盘的外壁面型线, 根据变基圆半径渐开线能够构成涡旋膨胀机的必要条件得, 动涡盘的内壁面方程为:

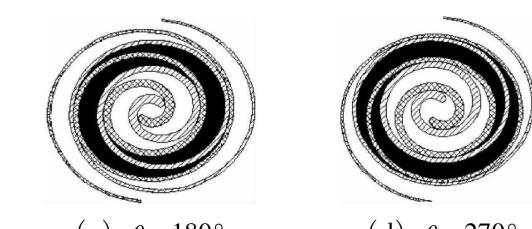
$$\begin{cases} x_{oi} = R_{soi}\sin\phi_f + R_{goi}\cos\phi_f \\ = (R_s + r)\sin(\phi - \pi) + R_g\cos(\phi - \pi) \\ = - (R_s + r)\sin\phi - R_g\cos\phi \\ y_{oi} = -R_{soi}\cos\phi_f + R_{goi}\sin\phi_f \\ = - (R_s + r)\cos(\phi - \pi) + R_g\sin(\phi - \pi) \\ = (R_s + r)\cos\phi - R_g\sin\phi \end{cases} \quad (6)$$

由坐标变换方程可得, 涡旋膨胀机动、静涡盘内外壁面在同一坐标系下的方程:

$$\begin{cases} x_{fi} = - (R_s + r)\sin\phi - R_g\cos\phi \\ y_{fi} = (R_s + r)\cos\phi - R_g\sin\phi \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{fo} = R_s\sin\phi + R_g\cos\phi \\ y_{fo} = -R_s\cos\phi + R_g\sin\phi \end{cases} \quad (8)$$

$K < 0$ 时, 涡旋体的壁厚随渐开角 ϕ 的增大而逐渐减少, 如图 4 所示。且 $|K|$ 越大, 壁厚的变化率越大。



$$\begin{cases} x_{oi} = - (R_s + r)\sin\phi - R_g\cos\phi + r\cos\theta \\ y_{oi} = (R_s + r)\cos\phi - R_g\sin\phi + r\sin\theta \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_{oo} = R_s\sin\phi + R_g\cos\phi + r\cos\theta \\ y_{oo} = -R_s\cos\phi + R_g\sin\phi + r\sin\theta \end{cases} \quad (10)$$

其中, (x_{fi}, y_{fi}) 为静涡盘内壁面坐标, (x_{fo}, y_{fo}) 为静涡盘外壁面坐标, (x_{oi}, y_{oi}) 为动涡盘内壁面坐标, (x_{oo}, y_{oo}) 为动涡盘外壁面坐标。

4 计变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的容积计算

当动、静涡盘以相位差为 π 、基圆中心距为 r 组合时, 能够形成数对封闭的膨胀腔, 如图 4 所示, 1 为第一膨胀腔(进气腔), 2 为第二膨胀腔, 3 为第三膨胀腔, 以此类推。各对膨胀腔的体积随主轴转角 θ 的变化而变化。

由啮合条件 3 得, 同一个啮合点上两条渐开线展角大小相差 π 。即 $\phi_i = \phi_o + \pi$ 。

$$\text{令 } \begin{cases} x_{fi} = x_{oo} \\ y_{fi} = y_{oo} \end{cases}, \text{ 求得: } \phi_o = \frac{\pi}{2} + \theta + 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

所以组成第 n 个膨胀腔的展角范围为:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} + \theta + 2(n-2)\pi \leq \phi_{on} \leq \frac{\pi}{2} + \theta + 2(n-1)\pi \\ \frac{3\pi}{2} + \theta + 2(n-2)\pi \leq \phi_{in} \leq \frac{7\pi}{2} + \theta + 2(n-1)\pi \end{cases} \quad (12)$$

如图 5(a) 所示, 以静涡盘外壁面与动涡盘内壁面所围成的第二膨胀腔为例。易得面积 S_2 为涡旋线 L_{oi} 所围成的面积与涡旋线 L_{fo} 所围成的面积之差。根据法线等距线法^[6], 对涡旋线 L_{fo} 作平动, 如图 5(b) 所示, 则:

$$S_2 = S_2^1 = L_2 r \quad (13)$$

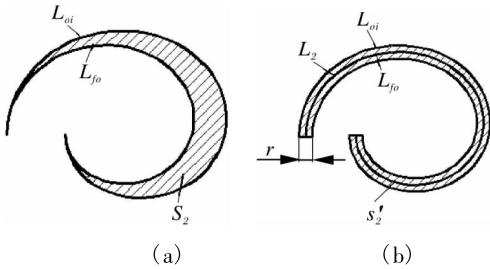


图 5 第二涡旋腔轴向投影面积

涡旋线 L_2 的方程为:

$$\begin{cases} x = -\left(R_s + \frac{r}{2}\right) \cos\phi + R_g \sin\phi \\ y = -\left(R_s + \frac{r}{2}\right) \sin\phi - R_g \cos\phi \end{cases} \quad (14)$$

展角为:

$$\pi + \theta \leq \phi \leq 3\pi + \theta \quad (15)$$

所以:

$$\begin{aligned} L_2 &= \int_{\phi+\pi}^{\phi+3\pi} (x^2 + y^2)^{1/2} d\phi \\ &= \int_{\phi+\pi}^{\phi+3\pi} \left| R_s + \frac{r}{2} + K \right| d\phi \end{aligned} \quad (16)$$

$$S_2 = r \int_{\phi+\pi}^{\phi+3\pi} \left| R_s + \frac{r}{2} + K \right| d\phi \quad (17)$$

同理可得:

$$S_3 = r \int_{\phi+3\pi}^{\phi+5\pi} \left| R_s + \frac{r}{2} + K \right| d\phi \quad (18)$$

$$S_n = r \int_{\phi+(2n-3)\pi}^{\phi+(2n-1)\pi} \left| R_s + \frac{r}{2} + K \right| d\phi \quad (19)$$

所以, 变基圆半径渐开线涡旋膨胀机第 n 个膨胀腔的容积为:

$$V_n = 2S_n h = 2rh \int_{\phi+(2n-3)\pi}^{\phi+(2n-1)\pi} \left| R_s + \frac{r}{2} + K \right| d\phi \quad (n = 2, 3, \dots, n) \quad (20)$$

对于第一膨胀腔, 即进气腔的容积与型线最初一段的修正情况有关。

5 结论

(1) 根据涡旋机正常工作的条件, 推导出变基圆半径渐开线型线构成涡旋膨胀机的必要条件: 共轭点所对应动、静涡盘的瞬时基圆半径必须相等;

(2) 根据涡旋膨胀机的工作原理及啮合条件, 求出了变基圆半径涡旋线的型线方程。由型线方程得出涡旋盘壁厚随渐开角的变化而变化, 且壁厚的变化量与基圆的变化量有关;

(3) 利用法向等距线法求出了变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的各个腔室的容积, 为进一步研究变基圆半径渐开线涡旋膨胀机提供一定的理论基础。

参考文献

- [1] 刘井龙, 熊联友, 侯予, 等. 一种新型膨胀机——涡旋式膨胀机 [J]. 深冷技术, 2000, (4): 13-15.
- [2] 顾兆林, 郁永章, 蒋德明. 一种新型燃气机——涡旋式发动机的理论研究 [J]. 内燃机学报, 1995, (4): 361-367.
- [3] 田亚永. 变径基圆渐开线涡旋型线的研究 [J]. 甘肃科技, 2011, (15): 37-38.
- [4] 王立存, 陈进. 通用涡旋型线参数变换特性及形状优化研究 [J]. 中国机械工程, 2008, (12): 1466-1469.
- [5] 李连生. 涡旋压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 71-121.
- [6] 刘涛, 邬再新, 刘振全. 法向等距线法生成涡旋压缩机型线的研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(60): 55-58.
- [7] Li Y, Wang J H, Lu N, et al. Energy Efficiency Analysis of a Scroll-type Air Motor Based on a Simplified Mathematical Model [C]. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2007.
- [8] 王立存. 通用涡旋型线集成设计理论与方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [9] Wang J H, Li Y, Xing L, et al. Mathematical Modeling Study of Scroll Air Motors and Energy Efficiency Analysis-Part I [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(1): 112-121.
- [10] Wang J H, Li Y, Luo X, et al. Mathematical Modeling Study of Scroll Air Motors and Energy Efficiency Analysis-Part II [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(1): 122-132.

作者简介:王吉岱(1961-),男,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为涡旋机械的优化设计及应用,通讯地址:266590 山东青岛市经济技术开发区前湾港路 579 号山东科技大学机械电子工程学院。