

文章编号: 1000-5889(2004)06-0059-05

涡旋压缩机双圆弧修正的几何理论和压缩比研究

王君¹, 彭斌², 李超¹, 刘振全¹

(1. 兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 推导出了涡旋压缩机渐开线型线的双圆弧修正齿的面积和质心的计算公式, 并得到了由该齿构成的动静涡旋在不同曲轴转角下所组成的中心腔和各压缩腔轴向投影面积的计算公式, 完善了双圆弧修正的几何学, 同时得出了不同修正参数及不同排气角下的压缩比的计算公式, 对涡旋压缩机的研究和设计有一定的指导作用.

关键词: 涡旋压缩机; 双圆弧修正; 轴向投影面积; 压缩比

中图分类号: TH45 **文献标识码:** A

Investigation of geometric theory of double-arc modification of scroll compressor and its compression ratio

WANG Jun¹, PENG Bin², LI Chao¹, LIU Zhen-quan¹

(1. College of Petrochemical Technology, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Formulas for evaluation of area and centroid of scroll-wrap are derived for double-arc modification of scroll compressor, and expressions for computing axial projective area of both central chamber and compression chamber at different angular positions of the crank shaft are derived, also. Thus, the geometric theory of double-arc modification, at the same time the equation of compression ratio is gotten for different modificatory parameters and discharging angles, giving a guide for the research and design of scroll compressor.

Key words: scroll compressor; modification of double arc; axial projective area; compression ratio

渐开线型线涡旋压缩机经双圆弧修正后, 其涡旋型线由原来的渐开线变为渐开线加圆弧^[1~4], 涡旋齿的面积和质心都发生了变化; 同时, 压缩腔和中心腔面积变成了由多段圆弧和多段渐开线组成, 这使得几何学计算变得复杂. 这些轴向投影面积的计算是型线修正几何学的重要部分. 涡旋齿的面积和质心的计算是涡旋压缩机型线设计的重要部分, 它直接影响到动涡盘的静平衡、轴系的动平衡和轴承寿命的计算, 是影响整机振动的一个重要因素. 压缩腔面积影响压缩过程中气体的压力、温度的变化和最终的压缩比, 中心腔的面积影响排气口的速度和压力变化^[5~7]. 文献[1]得出了双圆弧修正的各修正参数之间的基本关系和修正型线的方程, 本文在此基础上, 完善了其几何学, 这将有利于涡旋压缩机的精确设计和进行气体流动研究.

1 修正涡旋齿的面积和质心

1.1 渐开线型线的双圆弧修正简介

如图1所示, 双圆弧修正是在涡齿心部用双圆弧连接内外侧渐开线, 构成了能够实现完全啮合的PMP型线^[1]. 渐开线型线的基本参数有3个, 分别是 r_b 、 α 、 R_{or} , 其中两个是独立的, 修正参数有6个, 分别为 φ 、 γ 、 λ 、 β 、 R 、 r , 只有一个是独立的, 它们之

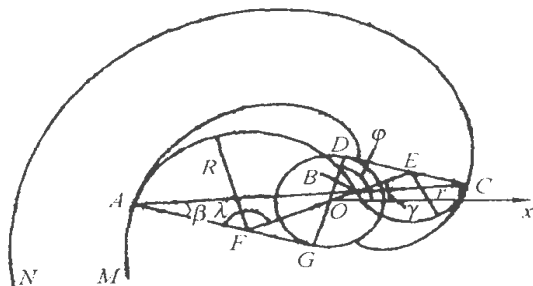


图1 涡旋齿的双圆弧修正

Fig.1 Double-arc modification of scroll wrap

收稿日期: 2003-12-08

作者简介: 王君(1976-), 男, 吉林梅河口人, 博士生.

间有如下关系:

$$\begin{cases} R - r = R_{or} \\ r = \frac{\alpha}{\sin 2\beta} - \frac{R_{or}}{2} = \frac{r_b}{\sin \lambda} - \frac{R_{or}}{2} \\ \varphi = \tan \frac{\lambda}{2} - \frac{\pi}{2} \\ \gamma = \tan \frac{\lambda}{2} - \lambda \\ \lambda = \pi - 2\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_b 为基圆半径, mm; α 为渐开线发生角, rad; R_{or} 为曲轴回转半径, mm; φ 为修正展角, rad; γ 为修正角, rad; β 为圆弧底角, rad; λ 为圆弧中心角, rad; R 为大圆弧 AB 的半径, mm; r 为小圆弧 BC 的半径, mm.

双圆弧修正的方法和以上公式的详细推导过程见文献[1].

1.2 修正涡旋齿的分块和投影面积

如图2所示,修正型线是由大圆弧 AB 、小圆弧 BC 、渐开线 CN 和渐开线 AM 组成的,修正涡旋齿由渐开线部分 S_j (图2中阴影部分) 和修正部分 S_x (图2中无阴影部分) 组成,因此只需求得修正部分的面积和质心就可以确定整个涡旋齿的面积和质心. 为了便于计算首先将修正部分进行分块,其分块法是将修正部分分为4个部分,2个扇形部分 $BCEB(S_1)$ 和 $BAFB(S_3)$, 2个渐开线扇形部分 $CHEC(S_2)$ 和 $PHFP(S_4)$. 渐开线扇形的特点是一条边为基圆的切线,一条边过基圆圆心. 对于任意基圆半径 r_b 和渐开线发生角为 α 的渐开线,无论修正参数的取值如何,涡旋齿的修正部分都可以按以上方法进行分块,修正面积 $S_x = S_1 + S_2 - S_3 + S_4$, 且每部分的面积为

$$\begin{cases} S_1 = r^2 \frac{\lambda}{2} \\ S_2 = S_{OCHO} - S_{\Delta EOC} = \frac{1}{6} r_b^2 [(\varphi_h + \alpha)^3 - (\varphi + \alpha)^3] - \frac{1}{2} r_b^2 (\varphi + \alpha - \cot \lambda) \\ S_3 = R^2 \frac{\lambda}{2} \\ S_4 = S_{OHPO} - S_{\Delta POF} = \frac{1}{6} r_b^2 [(\varphi + \pi + \alpha)^3 - (\varphi_h + \alpha)^3] + \frac{1}{2} r_b^2 (\varphi + \pi + \alpha - \cot \lambda) \end{cases} \quad (2)$$

所以得

$$S_x = \frac{1}{6} r_b^2 [(\varphi + \pi + \alpha)^3 - (\varphi + \alpha)^3] +$$

$$\frac{1}{2} r_b^2 \pi - \frac{1}{2} \lambda (R^2 - r^2) \quad (3)$$

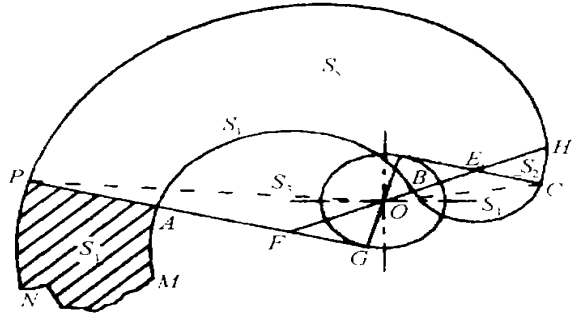


图2 修正型线涡旋齿的分块法

Fig.2 Division of modified scroll wrap

由渐开线的几何学知

$$S_j = \frac{1}{6} r_b^2 \{ [(\varphi_e + \alpha)^3 - (\varphi_e - \alpha)^3] - [(\varphi + \pi + \alpha)^3 - (\varphi + \pi - \alpha)^3] \} \quad (4)$$

式中: S_x 为修正面积, mm^2 ; S_j 为渐开线齿的轴向投影面积, mm^2 ; φ_h 为 H 点处的中线展角, rad; φ_e 为涡圈中心面渐开线最终展角, rad.

对于最终中线展角 φ_e 的修正涡旋齿的总面积为 $S_x + S_j$.

1.3 修正涡旋齿的质心

质心的计算可以通过积分求得,根据格林公式[2]有

$$\begin{cases} x_{gs} = \frac{\iint_{\sigma} x dx dy}{\iint_{\sigma} dx dy} = \frac{\oint_{-L}^L xy dx}{\oint_{-L}^L x dx} \\ y_{gs} = \frac{\iint_{\sigma} y dx dy}{\iint_{\sigma} dx dy} = \frac{\oint_{-L}^L \frac{y^2}{2} dx}{\oint_{-L}^L x dx} \end{cases} \quad (5)$$

文献[1]中确定了修正曲线的方程和各个连接点的坐标,因而修正部分的质心即可求出.

2 各压缩腔及中心腔的轴向投影面积

2.1 动、静涡旋的运动分析和啮合点与曲轴转角的关系

根据动涡旋的运动机构模型可知^[8~10], 动涡旋在工作状态下是平动的,其上任一点的运动轨迹都是半径为 R_{or} 的圆. 对于型线相同的动、静涡旋,动涡旋是相对于静涡旋旋转 π 角,并沿着任意方向平动 R_{or} ,然后随曲柄一同运动. 动、静涡旋啮合点都是对称的,当啮合点由 B 啮合到 b 时,曲轴转过 $d\theta$ 角,因此,对图3a有圆弧中心角的增加等于曲轴转

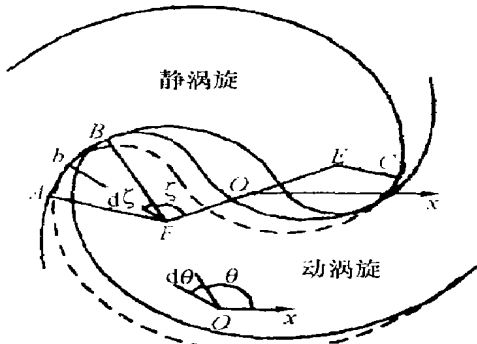
过的角度, 对图 3b 有渐开线展角的增加等于曲轴转过的角度. 即对渐开线部分和圆弧部分分别有

$$d\theta = d\varphi' \quad d\theta = d\zeta \quad \zeta \in [0, \lambda] \quad (6)$$

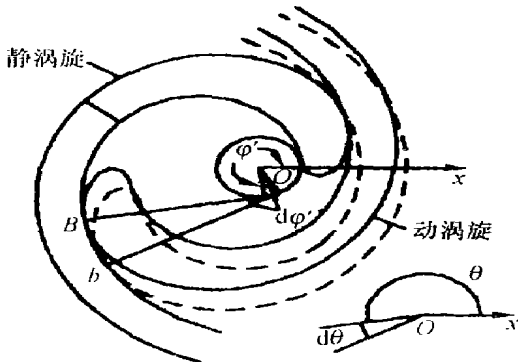
$$\theta = \zeta + \gamma \quad \theta = \varphi' - \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

式中: θ 为曲轴转角, rad; ζ 为圆心角, rad; φ' 为渐开线上点的中线展角, rad.

随着曲轴转角的增大, 啮合点由 1 点逐渐过渡到 6 点完成整个型线的啮合, 如图 4 所示.



(a) 啮合点在圆弧上



(b) 啮合点在渐开线上

图 3 动、静涡旋的相对位置

Fig.3 Relative position of orbiting and fixed scrolls

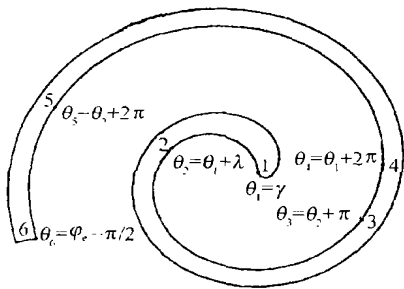


图 4 啮合点在静涡旋内侧型线上的位置

Fig.4 Position of meshing point on inner line of fixed scroll

在静涡旋的内侧型线上, 啮合点从 1 点经由 2、3、4、5 点过渡到 6 点时, 曲轴转角 θ 逐渐增加. 为了进一步描述型线的特点, 本文定义了型线的啮合曲

轴转角 θ' , 它是能够实现啮合的型线从啮合始端啮合到终端曲轴所转过的角度, 它表征型线完成啮合所需的时间. 由于动涡旋的运动是平动, 因此对渐开线部分有 $\theta_j' = \varphi_e - \pi - \varphi$, 对圆弧部分有 $\theta_a' = \lambda$, 对整个修正型线有

$$\theta_z' = \theta_j' + \theta_a' = \varphi_e - \gamma - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

2.2 中心腔和压缩腔的轴向投影面积

如图 5 所示, 当啮合点 P 在 1、2 之间 $\theta \in [\gamma, \gamma + \lambda]$ 时, 啮合点在圆弧部分上, 中心腔面积 $PbNQBMp$ 是由 4 段圆弧组成的, 根据机构模型可知四边形 $efEF$ 为平行四边形^[8], 且

$$eF = fE = R_{or}$$

$$\angle PFB = \angle qeb = \angle QEB = \angle pfb = \zeta$$

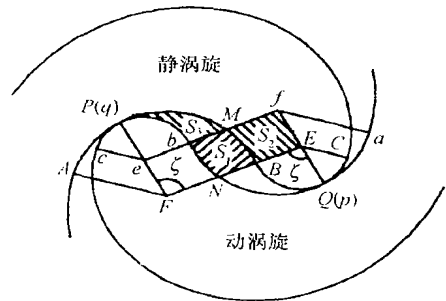


图 5 中心腔轴向投影面积

Fig.5 Axial projective area #1 of central chamber

设 $S_{bNBm} = S_1$, $S_{BEfM} = S_2$, $S_{PbMq} = S_3$, 由图知, 中心面积 $S_z(\theta) = S_1 + 2S_3$, 则可得

$$\begin{cases} S_1 + S_2 + S_3 = S_{FPB} - S_{eqb} = \frac{1}{2} \zeta (R^2 - r^2) \\ S_1 + 2S_2 = S_{\square efEF} = (R + r) R_{or} \sin \zeta \\ S_z(\theta) = (R^2 - r^2)(\zeta - \sin \zeta) \end{cases} \quad (9)$$

将式(7)代入得

$$S_z(\theta) = (R^2 - r^2)[\theta - \gamma - \sin(\theta - \gamma)] \quad \theta \in [\gamma, \gamma + \lambda] \quad (10)$$

式中: S_z 为中心腔的轴向投影面积, mm^2 . 当啮合点 P 在 2、4 间的渐开线上 $\theta \in [\theta_2, \theta_4]$ 时, 中心腔面积由 4 段渐开线和 4 段圆弧组成, 如图 6 和图 7 所示. 中心面积为

$$\begin{aligned} S_z(\theta) &= S + 2S_j - 2S_x = \\ &= \frac{1}{3} r_b^2 [(\theta + \frac{\pi}{2} - \alpha)^3 - \\ &(\theta - \frac{\pi}{2} + \alpha)^3 + (\varphi + \pi + \alpha)^3 - \\ &(\varphi + \pi - \alpha)^3] - r_b^2(\pi - 4\alpha) - 2S_x \end{aligned} \quad \theta \in [\gamma + \lambda, \gamma + 2\pi] \quad (11)$$

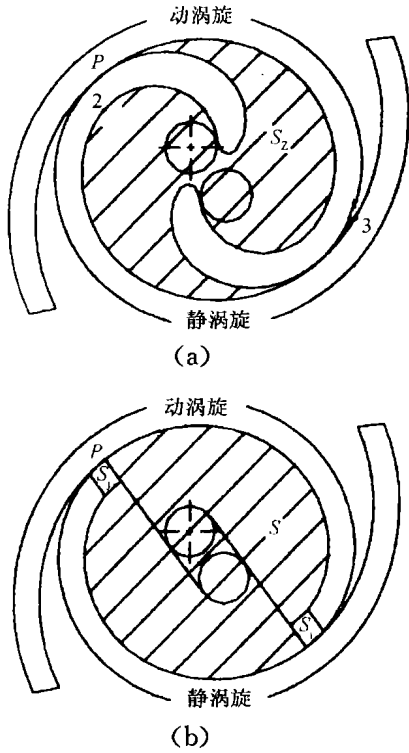


图6 中心腔轴向投影面积2

Fig.6 Axial projective area #2 of central chamber

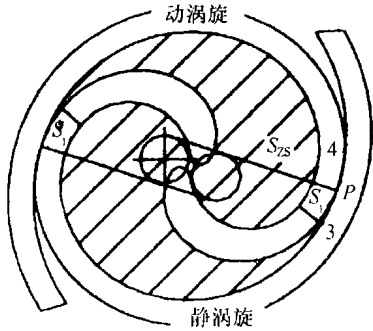


图7 中心腔轴向投影面积3

Fig.7 Axial projective area #3 of central chamber

当啮合点 P 在 4,5 之间, $\theta \in [\theta_4, \theta_5]$ 时, 压缩腔的轴向投影面积由 3 段圆弧和 2 段渐开线组成, 如图 8 所示. 轴向投影面积为

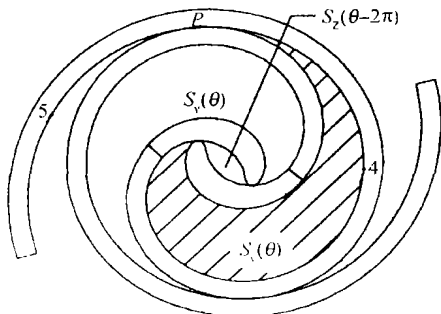


图8 压缩腔轴向投影面积1

Fig.8 Axial projective area #1 of central chamber

$$S_y(\theta) = S_z(\theta) - S_z(\theta - 2\pi) \quad \theta \in [\gamma + 2\pi, \gamma + 2\pi + \lambda] \quad (12)$$

式中: S_y 为压缩腔的轴向投影面积, mm^2 ; 第 1 项为式(11)形式, 第 2 项为式(10)形式.

当啮合点 P 在 5,6 之间, $\theta \in [\theta_5, \theta_6]$ 时, 压缩腔的轴向投影面积由 2 段渐开线组成, 如图 9 所示. 轴向投影面积为

$$S_y(\theta) = \frac{1}{3} r_b \left[\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \alpha \right)^3 - \left(\theta - \frac{3\pi}{2} - \alpha \right)^3 - \left(\theta - \frac{\pi}{2} + \alpha \right)^3 + \left(\theta - \frac{5\pi}{2} + \alpha \right)^3 \right] \quad \theta \in [\gamma + 2\pi + \lambda, \varphi_e - \frac{\pi}{2}] \quad (13)$$

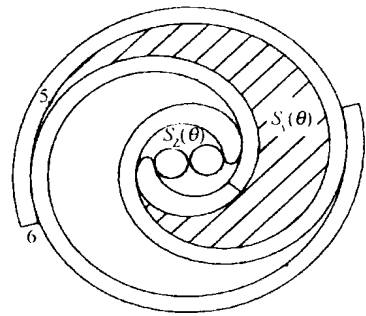


图9 压缩腔轴向投影面积2

Fig.9 Axial projective area #2 of central chamber

3 双圆弧修正涡旋压缩机的气体流动和压缩比

3.1 工作腔的轴向投影面积对时间的变化率

根据连续性条件, 在压缩机转速恒定时, 气体流速在理论上满足:

$$\frac{dv}{dt} = -uA_e = -\omega h \frac{dS}{d\theta}$$

$$\frac{dS}{d\theta} = \begin{cases} (R^2 - r^2)[1 - \cos(\theta - \gamma)] & \theta \in [\gamma, \gamma + \lambda] \\ r_b^2 \left[\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \alpha \right)^2 - \left(\theta - \frac{\pi}{2} + \alpha \right)^2 \right] & \theta \in [\gamma + \lambda, \gamma + 2\pi] \\ (R^2 - r^2)[1 - \cos(\theta - \gamma)] & \theta \in [\gamma + 2\pi, \gamma + 2\pi + \lambda] \\ r_b^2 \left[\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \alpha \right)^2 - \left(\theta - \frac{3\pi}{2} - \alpha \right)^2 - \left(\theta - \frac{\pi}{2} + \alpha \right)^2 + \left(\theta - \frac{5\pi}{2} + \alpha \right)^2 \right] & \theta \in \left[\gamma + 2\pi + \lambda, \varphi_e - \frac{\pi}{2} \right] \end{cases}$$

(14)

式中: h 为齿高, mm; u 为气速, m/s; A_e 为有效流通面积, mm^2 . 工作腔的轴向投影面积对时间变化率的得出, 为进一步研究压缩及排气过程中的气速奠定了理论基础.

3.2 压缩比

当啮合点在 6 点 ($\theta = \varphi_e - \frac{\pi}{2}$) 时, $S_y(\theta)$ 为吸气容积. 当 $\theta = \theta^*$ 时, θ^* 的确定由排气孔的位置决定, $S_y(\theta^*)$ 为压缩终了时的容积. 则压缩比为

$$\epsilon = \left[\frac{S_y(\varphi_e - \frac{\pi}{2})}{S_y(\theta^*)} \right]^n \quad (15)$$

当 θ^* 取 $2\pi + \gamma$ 时, 压缩比达到最大值:

$$\epsilon_{\max} = \left[\frac{S_y(\varphi_e - \frac{\pi}{2})}{S_y(2\pi + \gamma)} \right]^n \quad (16)$$

式中: θ^* 为排气角, rad; ϵ 为压缩比; n 为压缩指数.

4 结论

经双圆弧修正后的涡旋压缩机, 其涡旋型线由原来的渐开线变成由两段渐开线加两段圆弧组成, 涡旋齿的面积和质心都发生了变化; 同时, 压缩腔的中心腔面积变成了分别由多段圆弧和多段渐开线组成, 使得几何学计算变得复杂. 本文推导出了双圆弧修正齿的面积和质心的公式, 同时得到了由该齿构

成的动、静涡旋在不同曲轴转角下所组成的中心腔和各压缩腔轴向投影面积的计算公式, 同时得出了不同修正参数及不同排气角下的压缩比的计算公式.

参考文献:

- [1] 刘振全, 王君, 李雪琴. 涡旋压缩机涡旋齿的渐开线圆弧修正 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(2): 55-58.
- [2] 郁永章. 容积式压缩机技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 728-773.
- [3] LIU Zhenquan, DU Guirong, YU Shicai, et al. The graphic method of modified wrap of scroll compressor [A]. In: James F H. 1992 International Compressor Engineering Conference [C]. West Lafayette: Purdue University Press, 1992. 1 099-1 106.
- [4] 刘振全, 於时才, 杜桂荣. 涡旋式压缩机涡旋齿线性修正的图解法和修正角的研究 [J]. 制冷学报, 1992, 52(2): 6-10.
- [5] 高秀峰, 冯诗愚, 顾兆林, 等. 对称圆弧修正齿型涡旋压缩机排气孔的开设分析 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(6): 89-92.
- [6] 李连生, 束鹏程. 涡旋型线对排气口侵入及排气流速的分析计算 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(7): 56-59.
- [7] 高秀峰, 郁永章. 对称修正齿涡旋压缩机排气研究 [J]. 压缩机技术, 1999, 157(5): 3-7.
- [8] 刘振全, 杜桂荣. 涡旋压缩机理论机构模型 [J]. 机械工程学报, 1999, 35(2): 38-41.
- [9] 樊灵, 耿森林, 靳春梅. 涡旋压缩机机构统一模型的研究 [J]. 机械科学与技术, 2000, 19(5): 755-757.
- [10] 杜桂荣, 刘振全. 涡旋压缩机机构模型及径向随变调节原理 [J]. 制冷学报, 1997(2): 1-7.