

等 β 角对称圆弧型线的涡旋压缩机几何模型

王乐, 赵远扬, 李连生, 束鹏程

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 针对基于等 β 角对称圆弧型线的涡旋压缩机建立了通用的几何模型, 推导出了修正部分的工作腔容积、吸气孔口面积、泄漏线长度和工作腔换热面积随转角变化的计算公式, 并假定修正部分的泄漏线为渐开线, 起始展开角为涡旋线的起始展开角. 通过解析几何的方法求取排气孔口和轴向力作用面积的各个顶点坐标, 并沿其边界积分, 从而精确地计算出它们的面积. 所建立的通用几何模型可直接用于涡旋压缩机热力和动力模型的计算, 为优化设计奠定了基础, 运用通用几何模型对一台样机进行热力和动力计算, 得到了合理的计算结果.

关键词: 涡旋压缩机; 涡旋型线; 几何模型

中图分类号: TH45 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0598-04

Geometric Model of Scroll Compressor Based on Symmetric Arc Shaped Curves with Equal Beta Angle

Wang Le, Zhao Yuanyang, Li Liansheng, Shu Pengcheng

(National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressors, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Comprehensive and systematic analysis on geometric model of scroll compressors was conducted on the basis of perfect meshing profile. Equations for calculating volume of working chambers, suction port area, length of leakage lines, and heat transfer area with respect to the orbiting angle were derived. Leakage line was assumed to be involute whose starting angle equals that of the scroll line. The coordinate of vertices was computed by analytic method and the discharge port area and compact area of axial force were calculated precisely by integrating along the boundaries. In addition, the geometric model was applied to simulate a prototype of scroll compressor and reasonable results were obtained.

Keywords: scroll compressor; scroll profile; geometric model

符 号 表

r_b	基圆半径, mm	β	圆弧角, ($^\circ$)	φ_i	内侧渐开线初始发生角, ($^\circ$)
h	涡旋体高度, mm	θ^*	排气角, ($^\circ$)	φ_o	外侧渐开线初始发生角, ($^\circ$)
N	涡旋体圈数	φ_e	展开角终了角, ($^\circ$)	V	压缩腔工作容积, mm^3
θ	转动角度, ($^\circ$)	$\varphi_e = \pi((2N+1)/2)/2$		S	压缩腔表面积, mm^2
r_o	回转半径, mm	φ_s	外侧渐开线起始展开角, ($^\circ$)		

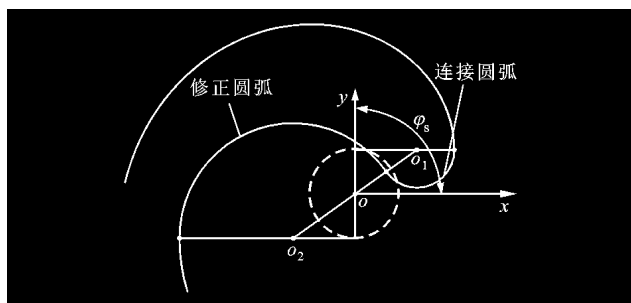
涡旋齿端的修正方式有很多种, 它对涡旋压缩机的热动力性能有着重要的影响^[1]. 等 β 角对称圆弧修正是最早提出的、并广泛地运用在制冷涡旋压

缩机上的最为简单、有效、可行的涡旋齿端的修正方法. 文献[2-3]分别对等 β 角圆弧类型修正的工作容积、切向力和径向力作用线, 以及排气孔口面积作了

详细的分析. 由于几何模型是建立压缩机热力和动力模型的基础, 因此本文对采用等 β 角对称圆弧型线(PMP)的涡旋压缩机进行了完整的计算, 推导出工作容积、泄漏线长度 L 、吸气口面积和换热面积随转角的变化关系, 提出了能精确计算出修正部分的排气孔口面积和气体力作用面积的方法, 为涡旋压缩机的性能模拟和优化设计奠定了基础.

1 PMP 的几何理论

如图 1 所示, 齿端内、外侧涡线分别用修正圆弧和连接圆弧代替^[2], 两圆弧的半径之差等于 r_o , 内外侧涡旋线的起始展开角之差等于 π .



O_1 : 连接圆弧圆心点; O_2 : 修正圆弧圆心点

图1 PMP修正齿型示意图

1.1 压缩腔工作容积

将吸气开始时刻定义为 $\theta=0$, 把腔内工作过程分为5个阶段: ① 吸气阶段, $\theta \in [0, 2\pi]$; ② 渐开线部分啮合的压缩阶段, $\theta \in [2\pi, \varphi_e - \varphi_s - \pi]$; ③ 修正部分啮合的压缩阶段, $\theta \in [\varphi_e - \varphi_s - \pi, \varphi_e + \theta^* - (5\pi)/2]$; ④ 渐开线部分啮合的排气阶段, $\theta \in [\varphi_e + \theta^* - (5\pi)/2, \varphi_e + \pi - \varphi_s]$; ⑤ 修正部分啮合的排气阶段, $\theta \in [\varphi_e + \pi - \varphi_s, \varphi_e + \theta^* - \pi/2]$. 无论采用哪种修正方法, 只有当修正部分构成压缩腔边界的一部分时, 即在上述的第③~第⑤阶段时, 才具有不同未修正齿型的容积计算式, 其推导过程可参考文献[2].

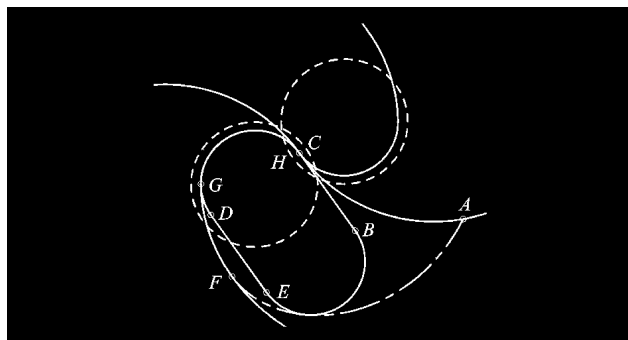
1.2 吸、排气孔口面积

对于具有对称工作腔结构的涡旋压缩机, 其中一侧的吸气孔口面积为

$$A_s = hr_b(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

涡旋压缩机排气孔口的开设方法有许多种^[4], 本文以腰形排气孔口为例, 如图 2 所示, 此时压缩机处于排气开始的位置, CD 与 HG 重合, BE 与 AF 相切, AF 是由静盘内侧涡旋线绕基圆中心逆时针

方向旋转 $2r_o/r_b$ 得到的. 在排气过程中, 排气孔口被动盘齿廓逐渐侵入, 其准确的计算式是很难得到的.



C: 脱啮点; A: 动盘修正圆弧点; H、G: 动盘连接圆弧点; F: 动盘外侧渐开线点; BCDEB: 腰型排气孔口的理论开设最大面积

图2 排气孔口示意图

本文先取孔的边界 BC 、 CD 、 DE 、 EB 段与动盘齿廓的 AH 、 HG 、 GF 段两两组合, 依次判断是否存在交点, 存在则求解交点, 不存在则继续判断. 当计算出所有交点后, 再沿相应的路径积分, 即得到排气孔口面积. 由于各线段的解析式都是已知的, 而交点的判断和计算是可以通过求解解析式所构成的方程组得到的, 所以可以通过编程实现整个计算过程.

1.3 泄漏线长度

以涡旋盘的中心线作为径向泄漏线, 并简化为来自上一个工作腔的泄入线长度 L_i 、泄到下一个工作腔的泄出线长度 L_o 和泄到压缩机吸气腔的泄出线长度 L_o . 当压缩腔的边界由修正部分构成时, 精确地定义和计算泄漏线长度是十分困难的, 所以仍假设泄漏线为渐开线, 其起始展开角为 φ_s , 计算公式可参见文献[4].

1.4 换热面积

在热力模型中, 需要考虑制冷剂与构成压缩腔涡旋体的内外壁面、上下底面之间的换热, 这就需要计算出换热面积. 涡旋盘上下底面的面积是计算工作腔容积时所用到的投影面积, 腔内工作过程的第③~第⑤阶段涡旋盘壁面的换热面积计算如下:

第③阶段

$$S_w = 2hr_b \left\{ \int_{\varphi_s + \pi}^{\varphi_k + 2\pi} (\varphi - \varphi_i) d\varphi + \int_{\varphi_s}^{\varphi_k + \pi} (\varphi - \varphi_o) d\varphi + 2h(r_1 + r_2)\beta \right\} \quad (2)$$

$$\beta = \varphi_s + \pi - (\varphi_e - \theta)$$

式中: φ_k 为啮合点的展开角, 等于 $\varphi_e - \theta$; r_1 、 r_2 分别为连接圆弧和修正圆弧的半径.

第④阶段

$$\left. \begin{aligned} S_w &= 2hr_b \left[\int_{\varphi_s}^{\varphi_k+2\pi} (\varphi - \varphi_i) d\varphi + \right. \\ &\quad \left. \int_{\varphi_s-\pi}^{\varphi_k+\pi} (\varphi - \varphi_o) d\varphi \right] + 2h(r_1 + r_2)\beta \\ \beta &= \frac{\pi}{2} + \varphi_s - (2\pi - \theta^*) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

第⑤阶段

$$S_w = 2h(r_1 + r_2)\beta; \beta = \varphi_e + \frac{3\pi}{2} - \theta - (2\pi - \theta^*) \quad (4)$$

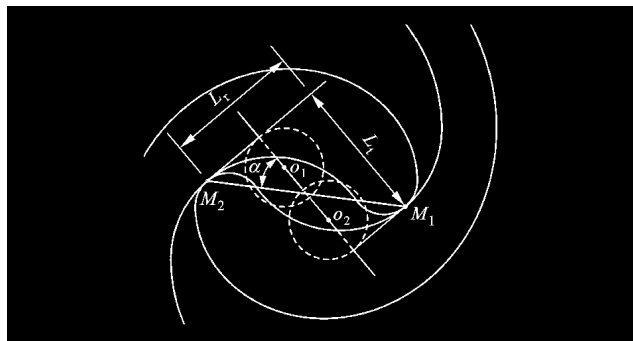
在传热计算中,往往还需要计算工作腔的当量直径^[5],即

$$D_h = \frac{4V}{S} \quad (5)$$

$$S = S_w + \frac{2V}{h} \quad (6)$$

1.5 气体力作用面积

如图3所示,在腔内工作过程的第④、第⑤阶段,中心腔修正部分的切向和径向气体力作用面积的计算有别于不修正时的情况。 L_t 的长度等于圆弧段啮合点 M_1 、 M_2 所连接的线段在基圆连线 o_1o_2 上的投影长度,而 L_r 的长度等于 M_1M_2 在 o_1o_2 法向上的投影长度,计算公式参见文献[2]。



L_t :切向力作用线; L_r :径向力作用线

图3 切向力和径向力作用线

为了确定轴向力的作用面积,以涡旋的中心渐开线作为工作腔和工作腔之间的一个假想的分割线,如图4中的点划线。在腔内工作过程的第④、第⑤阶段,先求出 M_1N_1 、 M_2N_2 、 M_3N_3 与中心线的交点,再沿相应路径积分即可。由于可以借鉴排气孔口的计算程序,所以整个计算过程并不复杂。

2 样机计算结果与讨论

本文针对一台制冷量为 2.5 kW 的涡旋制冷压

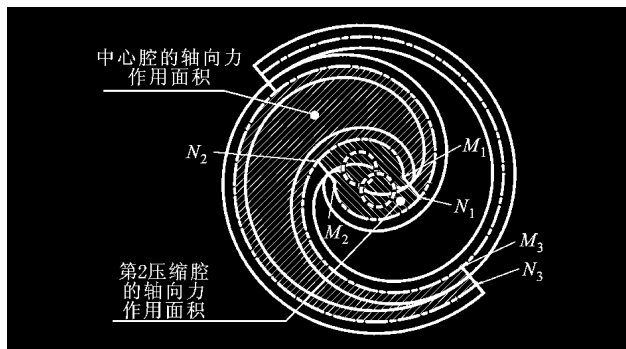


图4 轴向力作用的面积

缩机样机(结构参数见表1),其吸气容积 V_s 为 32.3 mL,内容积比为 4.44,运用此几何模型进行了热力和动力计算。

表1 样机的结构参数

h/mm	15	N	2
r_b/mm	2.5	$\varphi_s/(\circ)$	90
$\varphi_i/(\circ)$	+40	r_o/mm	4.36
$\varphi_o/(\circ)$	-40	$\theta^*/(\circ)$	325

如图5所示,在大约 1/4 个周期内,腰型排气孔口处于全开状态,实际排气面积始终大于圆形排气孔^[3],并且加工简单,是目前常用的开设方法。

由图6可见,径向泄漏线在转角终了时并不等于0,这是因为假设径向泄漏线的起始角为 φ_s 时所产生的误差,但可忽略不计。

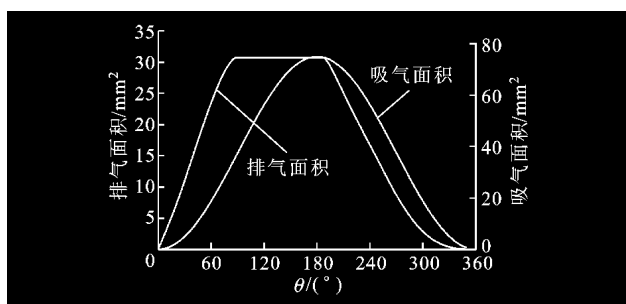


图5 吸、排气孔口的面积

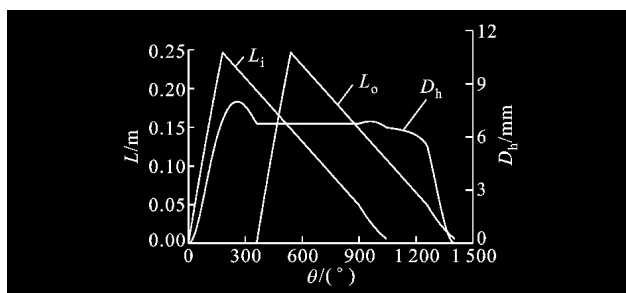


图6 径向泄漏线和当量直径

在吸气压力为 300 kPa、排气压力为 1 500 kPa 的工况下,采用文献[5]的热力学模型绘制出样机的工作腔压力随容积的变化图(p - V 图,见图7)。可以看出,在吸气过程的初始阶段,由于流动阻力的存在,吸气腔的压力总是低于吸气压力,随着泄漏气体的增加和涡旋盘对吸气的加热,将导致吸气腔压力缓慢地增加,因此会引起压缩机容积效率的降低。当 $V \cdot V_s^{-1} > 1$ 时,说明吸气腔所能达到的最大容积大于最终的吸气容积,存在所谓的“过吸气”现象,这有利于容积效率的微小提升。在排气过程中,中心腔的压力总是高于排气压力,并在排气的最后阶段,随着排气孔口面积的减小,导致流动阻力增大,排气腔压力将逐渐升高,结果与文献[6]比较一致。

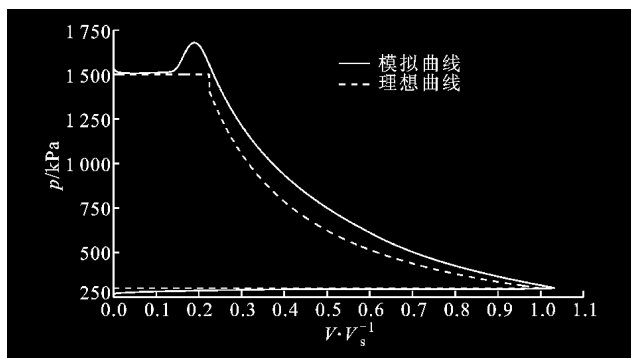


图7 样机的 p - V 图

如图8所示,试验所用样机为低压腔结构。基于 p - V 图,分别计算了气体切向力、径向力和轴向力。气体作用力从排气角(为图中 0° 位置)开始计算,每 360° 为一个循环,大约在 35° 位置切向力有一个较大的变化,这是因为此时吸气开始,吸气腔压力有个跳变,因此变化的幅度比较明显,计算结果与文献[7]比较一致。

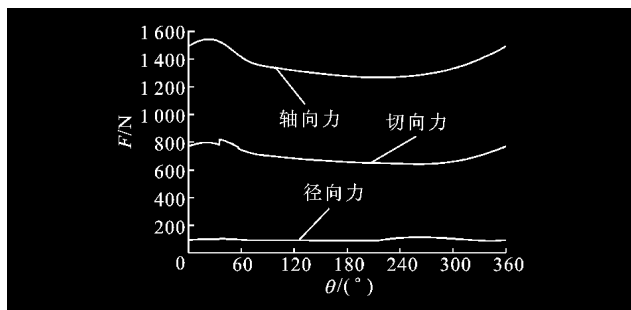


图8 样机的气体作用力

3 结 论

本文给出了基于 PMP 的涡旋压缩机通用几何模型的计算流程,推导出工作容积、泄漏线长度、吸

气口面积、换热面积随转角的变化关系式,对修正部分的泄漏线和轴向作用面积作出了新的定义;提出了能精确计算出修正部分的排气孔口面积和气体力作用面积的方法,对一台样机进行了热力和动力计算,并取得了合理的结果。本文所提出的 PMP 的几何模型对采用其他修正方法的涡旋压缩机的几何研究也有一定的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 冯诗愚,顾兆林,李云. 涡旋机械的涡旋体始端型线研究 [J]. 西安交通大学学报,1998,32(11):88-92.
Feng Shiyu, Gu Zhaolin, Li Yun. Study on top profile for scroll fluid machines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(11): 88-92.
- [2] 高秀峰,刘卫华,冯诗愚,等. 涡旋齿端等 β 角圆弧类型线修正理论的研究 [J]. 西安交通大学学报,2001,35(7):750-754.
Gao Xiufeng, Liu Weihua, Feng Shiyu, et al. Theoretical study on modification of top profile based on arc shaped curves with equal beta angle for scroll fluid machinery [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(7): 750-754.
- [3] 高秀峰,冯诗愚,顾兆林,等 β 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.
Gao Xiufeng, Feng Shiyu, Gu Zhaolin. Discharge port for scroll fluid machinery with symmetric arc-shaped top wrap [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(6): 89-92.
- [4] 高秀峰. 涡旋压缩机型线修正及排气孔研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2000.
- [5] Chen Yu, Halm N, Groll E, et al. Mathematical modeling of scroll compressors — part I: compression process modeling [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 731-750.
- [6] Kim Y C, Seo K J, Park H H. Modeling on the performance of an inverter driven scroll compressor [C]// Proceedings of the International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA: Purdue University, 1998:755-760.
- [7] Lee G H. Performance simulation of scroll compressors [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, 216(2): 169-180.

(编辑 管咏梅 王焕雪)