

双螺杆压缩机齿间间隙分布的计算

熊 伟, 冯全科

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于双螺杆压缩机齿间间隙的生成原理, 提出将阴、阳转子齿面沿接触线的法向间隙作为阴、阳转子的齿间间隙, 将螺杆压缩机齿间间隙分布的计算转化为沿接触线的间隙分布的计算, 即转化为沿接触线的间隙带的计算. 计算结果表明, 螺杆压缩机齿间间隙分布存在跃升现象. 该方法可以获得完整的齿间间隙分布规律, 可以量化不同的齿间间隙获得方法对齿间间隙分布的影响, 计算精度能够满足工程设计的需要.

关键词: 螺杆压缩机; 齿间间隙; 接触线

中图分类号: TH455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)07 - 0682 - 04

Calculation to Interlobe Clearance Distribution of Twin Screw Compressor

Xiong Wei, Feng Quanke

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on producing principle of the interlobe clearance of twin screw compressor, a mathematical algorithm is presented, where the normal distance between the two screw rotor surfaces along the contact line is considered as the interlobe clearance. Therefore the calculation of interlobe clearance is transformed to the calculation of clearance distribution along the contact line. The results show that clearance jump exists along the contact line, and the total interlobe clearance distribution can be obtained with higher accuracy via the proposed algorithm.

Key words: screw compressor; interlobe clearance; contact line

双螺杆压缩机性能的决定性因素之一是转子对的齿间间隙. 转子齿间间隙小是高效螺杆压缩机必不可少的先决条件: 间隙引起压缩机的泄漏, 降低压缩机的容积效率. 但是, 转子对的齿间间隙又是螺杆压缩机安全运行所必需的. 因此, 准确计算出螺杆转子对的齿间间隙分布是合理选取间隙值的前提. 双螺杆压缩机的齿间间隙问题是该领域的重要问题, 许多学者围绕这一问题做了大量的研究工作. 文献[1]将空间的三维问题简化为端面平面上的二维问题进行研究, 进而研究转子的干涉, 但该方法只能得出若干个端面的数据, 难以进行整个转子螺旋齿面的计算. 文献[2]用转子间轴向间隙在转子齿面法向的投影作为转子间的间隙, 得到了转子间间隙的等高线分布.

双螺杆压缩机的接触线是当压缩机的阴、阳转

子啮合时, 两转子齿面相互接触而形成的空间曲线. 实际中的压缩机由于齿间间隙的存在, 理论上的接触线演化为实际中的间隙带. 由于在阴、阳螺杆齿面上, 接触线上的点在该时刻处于啮合状态, 因此螺杆齿面上沿接触线的齿间间隙最小. 本文将螺杆压缩机齿间间隙分布的计算转化为沿接触线的间隙分布的计算, 即转化为沿接触线的间隙带的计算.

1 坐标系的建立及坐标变换

为了分析螺杆转子齿面的相互位置关系, 建立了如下 5 个坐标系 (见图 1).

- (1) 固结在阳转子上的动坐标系 $O_1 x_1 y_1 z_1$.
- (2) 固结在阴转子上的动坐标系 $O_2 x_2 y_2 z_2$.
- (3) 阳转子的静坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$.
- (4) 阴转子的静坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$.

收稿日期: 2003 - 09 - 29. 作者简介: 熊 伟 (1968 ~), 男, 博士生; 冯全科 (联系人), 男, 教授, 博士生导师.

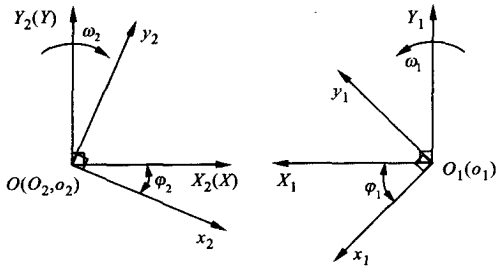


图 1 转子动坐标系与壳体静坐标系

(5) 固结在压缩机壳体上的静坐标系 $OXYZ$.
上述 5 个坐标系间矩阵变换的主要关系如下.

(1) 动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 与静坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 的变换

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix} M_{11} \\ M_{11} &= \begin{bmatrix} \cos i_1 & \sin i_1 & 0 & 0 \\ -\sin i_1 & \cos i_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 动坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 与静坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的变换

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} M_{22} \\ M_{22} &= \begin{bmatrix} \cos i_2 & \sin i_2 & 0 & 0 \\ -\sin i_2 & \cos i_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 静坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 与壳体静坐标系 $OXYZ$ 的变换

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \end{bmatrix} M_{10} \\ M_{10} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ A & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 A 为阴、阳转子的中心距.

(4) 静坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 与壳体静坐标系 $OXYZ$ 的变换

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \end{bmatrix} M_{20} \\ M_{20} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

(5) 可由以上变换,将阴、阳转子齿面方程统一

转换到壳体静坐标系中.阴、阳转子的转换矩阵分别等于 2 个转换矩阵的乘积:

$$\begin{aligned} \text{阳转子} \\ \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix} M_{K1} \\ M_{K1} &= M_{11} \cdot M_{10} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{阴转子} \\ \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} M_{K2} \\ M_{K2} &= M_{22} \cdot M_{20} \end{aligned} \quad (6)$$

2 螺旋齿面曲面方程及曲面法向量

螺杆阴、阳转子的齿面方程分别用下式表达在各自的动坐标系中^[3]

$$\begin{cases} x_i = x_i(t_i, i) \\ y_i = y_i(t_i, i) \\ z_i = z_i(t_i, i) \end{cases} \quad (7)$$

或者表达为矢量形式 $r_i = r_i(t_i, i), i = 1, 2$.

阳转子接触线上一点为 $M_1(x_1(t_1, 1), y_1(t_1, 1), z_1(t_1, 1))$,过该点的法向量(见图 2)为

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{\partial r_1}{\partial t_1} \times \frac{\partial r_1}{\partial i} \\ n &= \frac{\partial r}{\partial t} \times \frac{\partial r}{\partial i} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial i} & \frac{\partial y}{\partial i} & \frac{\partial z}{\partial i} \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

联立啮合条件式和转子的螺旋齿面方程式,即可得到阴、阳转子的接触线方程^[3].通过求解接触线方程,就可求出接触线上各点的参数值 t 、和空间点的坐标.

3 螺杆转子齿间间隙的计算

3.1 坐标系转换

本文将阴、阳转子置于壳体静坐标系 $OXYZ$ 中,在 $OXYZ$ 坐标系中研究阴、阳转子间的间隙(见图 2).

过阳转子上的一点 $M_1(t_1, 1)$ 的法向量为 $n(t_1, 1)$.将该点与法向量用坐标变换从阳转子动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 转换至壳体静坐标系 $OXYZ$

$$\begin{aligned} M_1^O &= \begin{bmatrix} X_1^O & Y_1^O & Z_1^O & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1(t_1, 1) & y_1(t_1, 1) & z_1(t_1, 1) & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{K1} \end{aligned} \quad (9)$$

$$n_1^O = n_1 \cdot M_{K1} \quad (10)$$

将阴转子螺旋齿面用坐标变换从阴转子动坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 转换至壳体静坐标系 $OXYZ$

$$r_2^O = \begin{bmatrix} X_2^O & Y_2^O & Z_2^O & 1 \end{bmatrix} = r_2(t_2, \tau) \cdot M_{K2} = \begin{bmatrix} x_2(t_2, \tau) & y_2(t_2, \tau) & z_2(t_2, \tau) & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{K2} \quad (11)$$

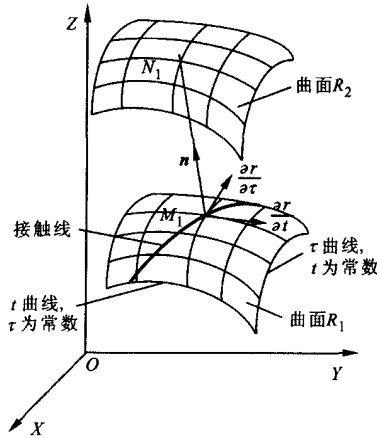


图2 螺旋齿面的法线和两齿面间的法向距离

3.2 齿间间隙的计算

如图2所示, M_1 为阳螺杆转子齿面 R_1 接触线上一点, 在齿面 R_1 上作经过 M_1 点的法向量 n , 过 M_1 点以向量 n 为方向的射线与阴螺杆转子齿面 R_2 相交于 N_1 点, 则齿面间的法向距离 M_1N_1 即为齿间间隙。

在壳体静坐标系 $OXYZ$ 中, $M_1^O(t_1, \tau_1)$ 为阳转子齿面接触线上的一点, $n_1^O(t_1, \tau_1)$ 为过该点的法向量, 则过点 M_1^O 的射线的点法式方程可写为

$$P^O = M_1^O + n_1^O \cdot l \quad (12)$$

式中 l 为直线参数方程的参数。

将该射线表示为2个平面相交的形式

$$\left. \begin{aligned} a_1 X_2^O + b_1 Y_2^O + c_1 Z_2^O + d_1 &= 0 \\ a_2 X_2^O + b_2 Y_2^O + c_2 Z_2^O + d_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将式(11)代入上式中, 得

$$\left. \begin{aligned} a_1 X_2^O(t_2, \tau) + b_1 Y_2^O(t_2, \tau) + c_1 Z_2^O(t_2, \tau) + d_1 &= 0 \\ a_2 X_2^O(t_2, \tau) + b_2 Y_2^O(t_2, \tau) + c_2 Z_2^O(t_2, \tau) + d_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

上式可简写为

$$\left. \begin{aligned} f(t_2, \tau) &= 0 \\ g(t_2, \tau) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

上述非线性方程可以用下列的牛顿迭代公式求解^[4]

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} t \\ \tau \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} t_0 \\ \tau_0 \end{bmatrix} - [F(t_0, \tau_0)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f(t_0, \tau_0) \\ g(t_0, \tau_0) \end{bmatrix} \\ F(t_0, \tau_0) &= \begin{bmatrix} \frac{5f}{5t}(t_0, \tau_0) & \frac{5f}{5\tau}(t_0, \tau_0) \\ \frac{5g}{5t}(t_0, \tau_0) & \frac{5g}{5\tau}(t_0, \tau_0) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由上式可求出阴螺杆齿面与射线的交点 N_1 的参数值 (t_2, τ) , 进而可求出交点的坐标 $N_1^O(X_{N1}^O, Y_{N1}^O, Z_{N1}^O)$, 如图2所示, 则两转子间沿接触线的距离 $d = |M_1N_1|$, d 即为阴、阳螺杆齿间间隙。

4 算法实例

本文以 GHH 齿形为例进行分析计算。图3为一对相互啮合的 GHH 型线螺杆转子, 螺杆转子齿数比为 5/6, 中心距 4515 mm, 阳转子和阴转子的外径分别为 65 mm 和 50194 mm。转子端面型线间均匀间隙为 0103 mm。图4为该 GHH 型线螺杆阳转子和阳转子上的接触线。

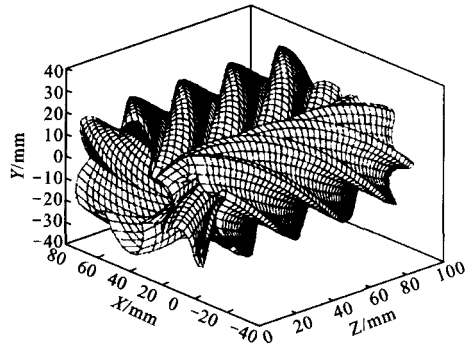


图3 GHH型线螺杆转子

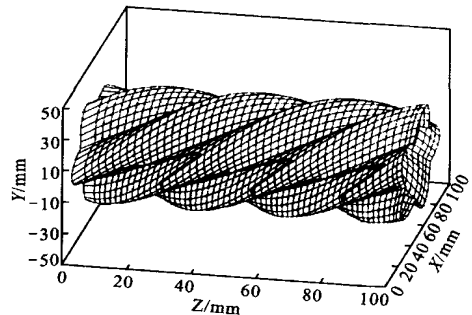
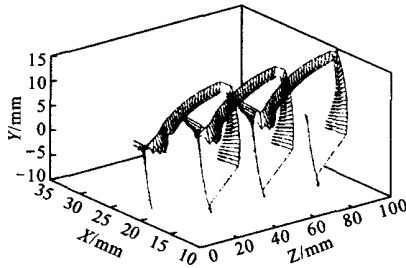


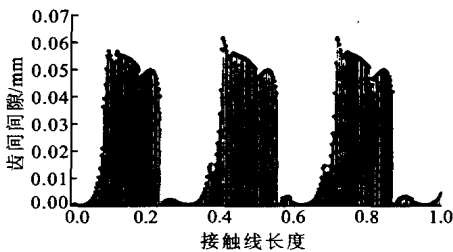
图4 GHH型线阳转子和接触线

利用本文的算法计算出了齿间间隙沿接触线的分布。图5是采用等距型线法生成齿间间隙的结果。对算例所生成的齿间间隙进行分析, 可以发现, 齿间间隙沿接触线的分布是极不均匀的, 转子驱动面的

齿间间隙分布和转子密封面的齿间间隙分布之间存在阶段跃升,并且齿间间隙在密封面的分布也是不均匀的,存在较大差异.



(a) 采用等距型线法生成的齿间间隙



(b) 齿间间隙与接触线长度的关系

图 5 等距型线法生成的齿间间隙沿接触线的分布

英国 Holroyd 公司经过十余年研制的“Holroyd 共轭转子测量系统”可以准确地测量螺杆转子的齿间间隙^[5].图 6 是本文计算结果与文献[5]一组测量数据的比较.由图可见,本文计算结果与测量结果有良好的一致性,但该测量系统不能测量小于 0.1005 mm 的间隙,所以该部分无法比较.计算曲线后段的差异主要是由于计算的转子与测量的转子各段的型线组成不同,导致了各段型线的特性以及转子参数的不同,也是由于转子的加工误差以及测量设备本身的局限性和测量误差造成的.

5 结 论

本文将阴、阳转子齿面沿接触线的法向间隙作为齿间间隙,将螺杆压缩机齿间间隙分布的计算转

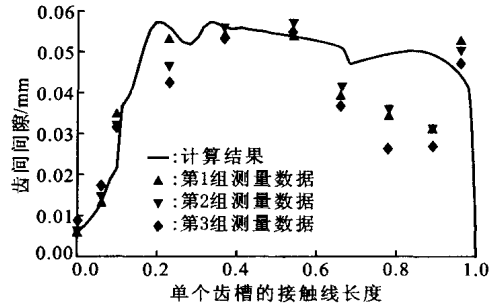


图 6 本文计算结果与文献[5]测量数据的比较

化为沿接触线的法向间隙分布的计算,即转化为沿接触线的间隙带的计算.计算结果表明,该方法计算精度能够满足工程设计的需要,可以获得两螺杆齿面完整的齿间间隙分布数据,可以量化不同齿间间隙获得方法对齿间间隙分布的影响,能够帮助压缩机设计者选择间隙设计值和齿间间隙获得方法,提高压缩机的性能和可靠性.

参考文献:

- [1] Stosic N, Smith I K. Rotor interference in screw compressors [A]. Yu Yongzhang, et al. Proceedings of the 3rd International Compressor Technique Conference [C]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2001. 134 - 142.
- [2] Fong Z H, Huang F C, Fang H S. Evaluating the interlobe clearance of twin screw compressor by the iso-clearance contour diagram (ICCD) [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(6): 725 - 742.
- [3] 邢子文. 螺杆压缩机——理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 50 - 63.
- [4] 邓建中, 葛仁杰, 程正兴. 计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985. 214 - 218.
- [5] Holmes C S. Inspection of screw rotors for the prediction of compressor performance, reliability, and noise [A]. Yu Yongzhang, et al. Proceedings of the 4th International Conference on Compressor and Refrigeration [C]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2003. 82 - 96.

(编辑 王焕雪)

“高精度质子交换膜燃料电池测试系统”在我校建成

我校能源与动力工程学院陶文铨教授与何雅玲教授领导的课题组组织开展的国家自然科学基金重点资助项目取得初步成功,不久前建成了“高精度质子交换膜燃料电池测试系统”.该实验系统经过反复调节、修改和完善,目前温度波动可以控制在 0.15 以内,压力波动可以控制在 200 Pa 以内,相对湿度可以控制在 1%以内.此外,该实验台实现了系统控制的自动化.由于高精度、高稳定性以及自动化控制的实现,为燃料电池的定量实验分析与研究奠定了基础.

(能动学院热流中心程永攀,来源: <http://std.sjtu.edu.cn>)