

磨削螺杆转子砂轮截形计算与仿真验证

陆如升¹, 沈志煌¹, 彭丽文¹, 姚斌^{1*}, 姚博世²

(1. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005;

2. 陕西省汉江机床有限公司, 陕西 汉中 723003)

摘要: 介绍了螺杆转子成型磨削原理, 并给出成形砂轮截形计算的基本流程. 再利用啮合原理推导建立了螺杆转子螺旋面与砂轮回转面的接触线方程式, 从而计算得到成形砂轮截形曲线. 详细论述了用分段累加弦长参数的数值计算方法, 对砂轮截形进行计算, 避开对转子截形曲线各离散点直接求导的困难, 提高了计算效率. 最后以某非对称型线螺杆转子为例, 对砂轮截形进行计算绘制, 并通过仿真加工检验计算的正确性, 同时进行干涉判断. 该方法也为螺杆转子后续的有限元分析和虚拟测试实验提供了精确的实体模型.

关键词: 螺杆转子; 螺旋面; 成形砂轮; 累加弦长; CAD/CAM

中图分类号: TH 164

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2011)05-0852-04

双螺杆压缩机属于容积型压缩机械, 具有平稳的高速运转、多相混输、排气量几乎不受排气压力的影响及易于操作维护等优点, 被广泛应用于矿山、化工、建筑、航空及制冷等工业部门. 其中作为双螺杆压缩机的核心部件螺杆转子是影响其性能的关键因素. 为进一步改善螺杆压缩机的性能、扩大其应用范围, 应在阴、阳转子型线设计^[1], 转子加工方法及其刀具刃形计算^[2], 转子几何特性计算和热力性能计算等方面作更深入的研究. 转子型线由最初以点、直线和圆弧组成的对称性圆弧型线发展到现今最新的以圆弧、椭圆、抛物线等曲线组合而成的非对称型线^[3]. 螺杆转子加工方法包括: 铣削、滚削以及成型磨削^[4]等方法. 由于新型转子的齿面复杂, 齿数较少, 螺旋升角大, 采用铣削加工计算复杂, 刀具制造要求高, 加工精度低. 若采用成型磨削加工方法, 能有效地提高螺杆转子的加工精度, 进而提高其终端产品压缩机、工业泵、冷冻机的性能和工作效率, 使其产品更节能、更环保, 产生良好的社会效益^[3].

1 螺杆转子成型磨削原理

在专用数控磨床上加工转子齿面时, 砂轮被修整成与转子螺旋面相适应的形状, 加工时螺杆转子以螺

旋特性数作螺旋运动, 成型砂轮则绕其轴线作回转切削运动, 从而磨出工件整个廓型^[5].

1.1 砂轮坐标与工件坐标转换关系

如图 1 所示, 在成型砂轮磨削转子螺旋面的几何空间中, 砂轮坐标系 $[O_G: X, Y, Z]$ 固定在砂轮上, 原点位于砂轮前端面圆心, Z 轴与工件 z 轴成一定夹角 Ψ , 轴线间最短距离为 a ; 工件坐标系 $[O_T: x, y, z]$ 固定在工件上, Z 轴与工件轴线重合. 两坐标系间的转换关系式可表示为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \Psi & -\sin \Psi \\ 0 & -\sin \Psi & \cos \Psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a \\ -e \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

1.2 砂轮回转面与转子螺旋面接触条件式

因为螺杆转子线型复杂, 其端截形曲线一般不能用具体的统一的方程表示, 通常以参数方程形式表示. 这里先设螺杆转子型线参数方程为

$$r_0 = x(s)i + y(s)j, \quad (2)$$

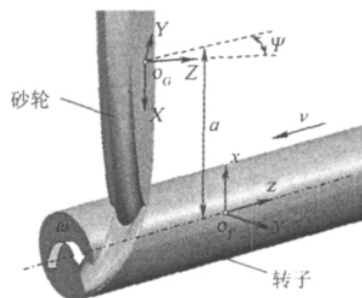


图 1 螺杆转子成型磨削原理图

Fig. 1 The forming grinding principle of screw rotor

收稿日期: 2010-10-22

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2010ZX04001-162)

* 通信作者: yaobin@xmu.edu.cn

则转子螺旋面方程可表示为

$$r = [x(s)\cos\theta - y(s)\sin\theta]i + [x(s)\sin\theta + y(s)\cos\theta]j + p\theta k. \quad (3)$$

其中, s 为端截形弧长参数, θ 为螺旋面参数, p 为螺旋参数.

由微分几何理论可知螺旋面上任一点法矢量:

$$n = r_s \times r_\theta,$$

其中, $r_s = [\frac{\partial x}{\partial s}\cos\theta - \frac{\partial y}{\partial s}\sin\theta]i + [\frac{\partial x}{\partial s}\sin\theta + \frac{\partial y}{\partial s}\cos\theta]j$;
 $r_\theta = [-x(s)\sin\theta - y(s)\cos\theta]i + [x(s)\cos\theta - y(s)\sin\theta]j + pk$.

根据文献[6]详述的空间曲面啮合原理可推得接触条件式方程:

$$\begin{aligned} F(s, \theta) = & \sin\Psi[x'(s)\cos\theta - y'(s)\sin\theta][x(s)\cos\theta - y(s)\sin\theta][x(s)\cos\theta - y(s)\sin\theta - a] + \\ & p\cos\Psi[x'(s)\cos\theta - y'(s)\sin\theta][x(s)\cos\theta - y(s)\sin\theta - a] - p\cos\Psi[x'(s)\sin\theta + y'(s)\cos\theta] \\ & [x(s)\sin\theta + y(s)\cos\theta] - \sin\Psi[x'(s)\sin\theta + y'(s)\cos\theta] \\ & [-x(s)\sin\theta - y(s)\cos\theta] - p^2\theta\sin\Psi[x'(s)\sin\theta + y'(s)\cos\theta] = 0. \end{aligned}$$

记 $\frac{\partial x}{\partial s} = x'(s)$, $\frac{\partial y}{\partial s} = y'(s)$.

2 成型砂轮截形求解

所有专利转子型线都是在严格精密的加工过程中生成的,但很少有将加工方法详述成文,以致于很难实现型线的重建,加之螺杆转子型线越趋复杂,螺杆端截面截形已不能用特定的方程表示,而是由设计或通过测量给出一组离散点来描述螺杆端截面截形^[7].

2.1 计算各离散型值点斜率

当截形曲线以离散点形式表示时, $x'(s)$ 与 $y'(s)$ 计算比较复杂,计算精度难以保证.实践证明,取累加弦长作为参数来计算各离散型值点斜率,能很好地拟合大挠度曲线,且能提高砂轮截形计算的精确性和可靠性^[8],具体计算方法如下介绍:

1) 输入型值点 $P_i(x_i, y_i)$, $i=0, 1, \dots, n$;

2) 计算累加弦长:

$$s_0 = 0,$$

$$s_k = \sum_{j=1}^k l_j = \sum_{j=1}^k |P_{j-1} - P_j| = \sum_{j=1}^k \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, k \in \mathbf{N}^*,$$

以 $x = x(s)$ 为例求解型值点处斜率 $x'_i(s)$ ($i=0, 1, \dots$,

n), 为方便演算简记为 x'_i ($i=0, 1, \dots, n$), 则

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{s_{j+1}}{s_j + s_{j+1}}, \\ \mu_j = 1 - \lambda_i, \\ C_j = 3[\lambda_i \frac{x_j - x_{j-1}}{s_j} + \mu_j \frac{x_{j+1} - x_j}{s_{j+1}}]. \end{cases}$$

其中 $j=1, 2, \dots, n-1$.

3) 利用 3 次样条函数的 m -连续性方程^[9-10]:

$$\lambda_j m_{j-1} + 2m_j + \mu_j m_{j+1} = C_j, j=1, 2, \dots, n-1.$$

现欲求 $n+1$ 个未知量 x'_i ($i=0, 1, \dots, n$), 而 m -连续性方程仅有 $n-1$ 个方程, 故还需补充 2 个方程:

$$\begin{cases} 2x'_0 + \mu_0 x'_1 = C_0, \\ \lambda_n x'_{n-1} + 2x'_n = C_n. \end{cases}$$

根据实际情况确定边界条件, 在首、末端指定一阶导数即: $\mu_0 = \lambda_n = 0$ 建立 m -连续性方程组:

$$\begin{bmatrix} 2 & \mu_0 & & & \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & & \\ & \lambda_2 & 2 & \mu_2 & \\ & & & \ddots & \\ & & & \lambda_{n-1} & 2 & \mu_{n-1} \\ & & & & \lambda_n & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_0 \\ x'_1 \\ x'_2 \\ \vdots \\ x'_{n-1} \\ x'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{n-1} \\ C_n \end{bmatrix}.$$

4) 用追赶法解此三角带状矩阵, 效率高, 计算可靠; 同理可求得 $y'_i(s)$ ($i=0, 1, \dots, n$).

2.2 砂轮截形计算

将 $x'_i(s)$ 与 $y'_i(s)$ 逐一代入接触条件式方程(4)可得到一系列 θ_i ($i=0, 1, \dots, n$), 再利用式(1), (3)即可求出接触点在砂轮坐标系下的坐标 (X_i, Y_i, Z_i) .

最后成型砂轮轴向截形由 $R_{Gi}-Z_{Gi}$ 给定

$$\begin{cases} R_{Gi} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} & (i=0, 1, \dots, n), \\ Z_{Gi} = Z_i \end{cases}$$

其中 R_G 为成型砂轮轴向廓形圆半径; Z_G 为在轴向上的距离.

3 成型砂轮计算实例

在螺杆转子的成型砂轮设计计算过程中, 一般先输入转子截形数据, 再选取适当的砂轮安装角和中心距来计算砂轮廓形, 并通过计算机仿真判断是否干涉、过切及欠切现象, 最后再进行实际磨削加工. 整个设计过程可简单地用图 2 表示.

3.1 中心距和安装角的确定

在传统螺杆转子加工工艺中, 转子轴线与砂轮轴之间的中心距 a 没有严格规定, 一般取 $a = (0.7 \sim$

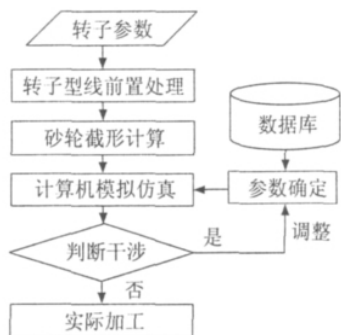


图 2 成型砂轮设计流程

Fig. 2 The design process of the forming grinding wheel

1. 5) D_G , D_G 为砂轮直径; 根据经验初步选定安装角 Ψ , 然后根据工艺条件和试磨结果进行调整. 这种方法虽然可靠, 但是费时, 影响生产效率. 课题组借助计算机辅助设计与制造技术, 进行模拟仿真, 快速有效的选取中心距 a 与安装角 Ψ , 提高设计效率, 在一定程度上消除干涉现象^[11].

3.2 成型砂轮设计

以加工某非对称型线阴转子成型砂轮设计为例, 阴转子单齿截形如图 3, 利用本课题组的螺杆转子设计软件, 计算得到砂轮截形如图 4, 光顺处理后部分数据点见表 1.

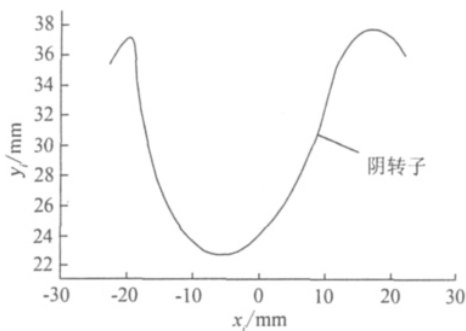


图 3 阴转子单齿截形

Fig. 3 The profile of female rotor

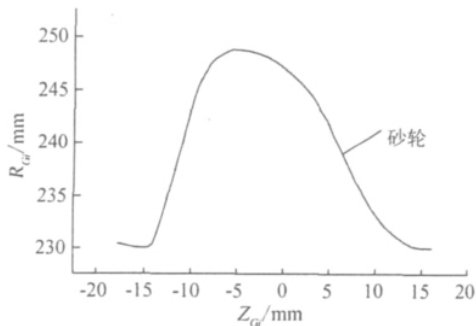


图 4 砂轮轴截形

Fig. 4 The axial profile of wheel

表 1 砂轮截形光顺后部分数据

Tab. 1 Part of the data points of wheel

n	R_{Gi}/mm	Z_{Gi}/mm
1	230.4010	-17.3879
2	230.3286	-17.1795
3	230.2701	-16.9825
4	230.2216	-16.7908
5	230.1808	-16.6017
6	230.1498	-16.4185
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
194	230.0962	14.8276
195	230.0904	14.9033
196	230.0815	15.0701
197	230.0781	15.2340
198	230.0808	15.4004
199	230.1174	16.3869

3.3 计算机模拟仿真

在 Unigraphics NX 环境下, 对螺杆转子磨削成型进行仿真加工, 其仿真流程如图 5 所示.

仿真过程部分图例及最终三维模型如图 6 所示, 通过此结果表明本文所采用的算法正确可靠, 也为后续的有限元分析等研究提供较精确的三维模型.

4 结 论

在螺杆转子成型磨削方面, 一般只是进行理论分

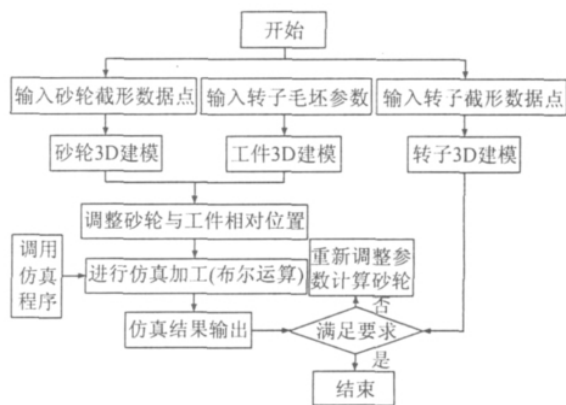


图 5 计算机模拟加工转子过程

Fig. 5 The process of computer simulation

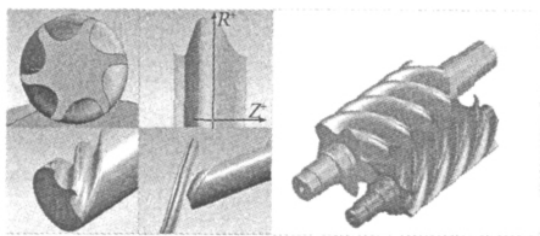


图6 计算机模拟加工转子过程部分图例及其三维模型

Fig. 6 The process of computer simulation and 3D models of screw rotors

析与计算,便直接进入实践环节,而较少进行模拟仿真实验,验证其计算的精确性和可靠性。近年来,由于计算机辅助设计、仿真技术以及数值计算等工程科学的发展,螺杆转子的设计与加工方法得到了较大的改进。本文通过建模和仿真,替代过去大量的繁琐的试磨与近似计算,提高了螺杆转子的设计效率,降低生产成本,并且在实际中得到满意的应用。现今螺杆转子的设计与加工技术已经发展比较成熟^[12]。但核心技术都由各个先进企业所独有并受到严格保护,而未被广泛推广使用。由于螺杆转子螺旋槽形状与磨削加工工艺比较复杂,因此在螺杆转子设计与加工方面还需进行更深入的研究,并在实践中不断创新发展。

参考文献:

[1] 邓定国,束鹏程. 回转压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,1991:14-37.

- [2] 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.
- [3] 熊伟,冯全科. 螺杆压缩机研究现状与热点[J]. 流体机械,2005(3):30-32.
- [4] 韩琦. 螺旋曲面数控成形磨削技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2002.
- [5] Wei Jing, Zhang Guanghui. A precision grinding method for screw rotors using CBN grinding wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010,48(5):495-503.
- [6] Litvin F L. Gear geometry and applied theory[M]. Cambridge:Prentice Hall,1994.
- [7] 王克,赵巍. 螺旋曲面廓型的数值拟合方法研究[J]. 沈阳工业大学学报,2002(2):91-94.
- [8] 莫蓉,常智勇. 计算机辅助几何造型技术[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [10] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [11] Stosic N. A geometric approach to calculating tool wear in screw rotor machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(5): 1961-1965.
- [12] Hsieh J M, Tsai Y C. Geometric modeling and grinder design for toroid-cone shaped cutters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(9):912-921.

Calculation of Grinding Wheel Profile and 3D Simulation for Grinding Screw Rotor Flute

LU Ru-sheng¹, SHEN Zhi-huang¹, PENG Li-wen¹, YAO Bin^{1*}, YAO Bo-shi²

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shanxi Hanjiang Machine Tool Co., Ltd, Hanzhong 723003, China)

Abstract: In order to describe the forming grinding principle of screw rotor, the design process of the forming grinding wheel is given. The contact line equation of screw rotor's helical groove and forming grinding wheel's rotation surface is established by engagement principle. To optimize the traditional method of calculating forming grinding wheel by known rotor end section profile, a numerical analysis method (accumulated chord length parameter method) has been presented in detail. This method can improve the efficiency and reliability of the calculation of forming grinding wheel axial profile. Taking the asymmetry linear screw rotor (female) as an example, this paper calculates the grinding wheel axial profile and draws it using special designed software. The simulation examples are done by CAD (computer aided design) based on the secondary development technology of UG. This study provides a precise 3D model which can be used in areas such as finite element analysis and virtual testing experiments.

Key words: screw rotor; helical groove; forming grinding wheel; accumulated chord length; CAD/CAM