

DOI: 10.7652/xjtuxb201608002

螺杆转子磨削及计算机数控砂轮修整

赵永强^{1,2}, 赵升吨¹, 魏伟锋², 侯红玲²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西理工学院机械工程学院, 723000, 陕西汉中)

摘要: 为了实现异形螺杆转子在数控螺杆转子磨床 SK7032 的磨削加工, 并对螺杆转子的磨削精度进行评测, 提出了一种分段的计算机数控(CNC)砂轮修整方法和确定分段间隔的方法。依据砂轮回转面与被磨削螺杆转子螺旋面的相切条件, 推导了二者的空间接触线方程, 用接触线方程计算了磨削螺杆转子所需的砂轮截型。采用不同的安装角和中心距对同一螺杆转子型线所对应的砂轮截型进行计算, 计算结果对比表明, 安装角是机床的敏感参数, 中心距变化 1 mm 引起的砂轮截形误差小于 1 μm 。由此也得到了分段 CNC 砂轮修整方法所对应的合理分段计算间隔, 即相邻两次计算砂轮截型的中心距差值应小于 1 mm。将某型螺杆空压机的阴转子在 SK7032 转子磨床上进行磨削, 磨削后的转子型线检测结果显示: 与理论型线相比, 采用分段的 CNC 砂轮修整方法磨削后的型线误差在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内。该研究可为 SK7032 数控螺杆转子磨床的功能实现和螺杆转子的磨削提供参考。

关键词: 螺杆压缩机; 螺杆泵; 螺杆转子; 转子磨削

中图分类号: TH455 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0006-09

Screw Rotor Grinding and Computer Numerical Control Grinding Wheel Dressing

ZHAO Yongqiang^{1,2}, ZHAO Shengdun¹, WEI Weifeng², HOU Hongling²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

Abstract: To grind special-shaped screw rotor and evaluate the grinding precision of rotor ground, a method of segmented computer numerical control (CNC) grinding wheel dressing is proposed, and the segmented interval determining scheme is given. According to the tangent condition between grinding wheel surface and rotor helical surface, the contact line equation is deduced. The grinding wheel profile can be calculated by the condition line equation and rotor profile. Several grinding wheel profiles are obtained by different installation angle and center distance on the same rotor profile. The results show that the installation angle is a sensitive parameter and the error within 1 μm results from changed center distance of 1 mm. The reasonable center distance interval of segmented CNC grinding wheel dressing method ought to be less than 1 mm. The test is carried out on a SK7032 grinder for a female rotor, and the machining error can be controlled within $\pm 10 \mu\text{m}$ with the method of grinding wheel segmented dressing.

Keywords: screw compressor; screw pump; screw rotor; screw rotor grinding

螺杆压缩机因其结构简单、操作方便、动力平衡性好、适应性强和工作可靠等优点,在制冷、矿山、化工、冶金、空气动力及各种工艺流程中得到了广泛应用^[1]。尽管人们了解螺杆压缩机的工作原理有120多年,但是压缩机在近40年内才被广泛应用,其主要原因是其效率低、转子的加工成本高。螺杆转子作为压缩机的核心零件,直接影响压缩机的效率、转子间的功率传递和噪声等,而螺杆泵转子加工依然是制约螺杆泵行业发展的瓶颈。

提高螺杆压缩机效率的根本方法是进行转子型线的设计。近年来,国内外学者在转子型线设计方面做了诸多探索:文献[2]提出了一种基于轮齿啮合的用于Wankel发动机的内摆线轮齿的生成方法,可以避免型线之间的干涉;文献[3]提出了三螺杆泵转子型线设计与成形磨削的加工方法,并推导了成形砂轮的计算方法;文献[4]开发了一种螺杆空压机转子专用软件包,克服了传统设计方法周期长、计算准确度差的缺点;文献[5]提出将阴、阳转子齿面沿接触线法向间隙作为齿间间隙,为转子之间齿间间隙分布规律获取和量化提供了解决方法;文献[6]提出了通过啮合线分析形成转子型线的方法,即只需给定转子轴距、转子齿数和啮合线就可以生成转子型线;文献[7]提出了基于流体流动和热力学过程的一种双螺杆压缩机的优化设计方法,使压缩机的转子型线,压缩速度和进口温度等都有改善;文献[8]针对直线共轭内啮合齿轮泵,给出了由啮合线求滑动率、啮合角和压力角的方法,解决了内啮合齿轮泵的型线设计;文献[9]采用齿廓线法,逐步演示螺杆压缩机转子型线的设计过程,为螺杆转子型线的解析法设计提供了一种更优方法。以上在螺杆转子型线设计、优化方面的研究成果为提高压缩机、泵、发动机等的效率奠定了基础。

提高螺杆转子压缩机效率的核心是精密加工螺杆转子,这也是转子型线设计得以实现的重要保证^[10]。无论采用指状铣刀还是盘形铣刀进行铣削,都很难保证转子型面的质量,而立方氮化硼(CBN)砂轮磨削在转子加工的表面质量、型线一致性和加工效率等方面具有突出的优势,但同时也存在很大的局限性^[11]。铣刀和CBN砂轮都属于成形刀具,一把铣刀或一种规格的CBN砂轮仅适合加工某一种规格的螺杆转子,而且转子的最终加工精度完全取决于铣刀和CBN砂轮本身的精度,加工后的螺杆转子型线误差无法进行修正。

计算机数控(CNC)砂轮修整技术作为一种高

效精密加工方法,已在蜗杆、螺旋齿轮、滚珠丝杠等零件加工中得到广泛应用^[12-13]。该技术在螺杆转子加工中的应用也是逐步展开的,英国HOLROYD公司生产的TG350E数控螺纹磨床,采用了CNC砂轮修整技术并配备了在线测量,可以实现被加工表面超差和砂轮局部破损的实时检测与误差补偿,使螺杆的型线误差控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 之内^[14]。

我国的螺杆压缩机是从20世纪70年代开始逐渐发展起来的。陕西汉江机床有限公司于2011年在第十二届中国国际机床展览会上首次推出拥有自主知识产权的数控螺杆转子磨床SK7032。以该机床为基础的高精度螺纹加工技术及设备得到了国家专项的重大支持,重点解决了SK7032在磨削工艺、砂轮修整、机床精度保持和可靠性验证等方面存在的诸多难题。

本文针对SK7032所涉及的关键技术——修整CNC砂轮和实现转子磨削精度而进行的研究工作。

1 螺杆转子的磨削理论

对螺杆转子的等升距螺旋槽的磨削需要解决两个问题,一个是磨削砂轮与螺杆转子之间的空间螺旋运动,另一个是砂轮截型与螺杆螺旋槽的截型相对应。因此,螺杆转子的磨削加工采用无瞬心包络法,即倾斜的砂轮绕自身轴线旋转,螺杆转子相对砂轮作螺旋进给运动^[15-16]。

1.1 螺杆转子磨削的空间坐标系

转子磨削的空间坐标系如图1所示^[17]: $oxyz$ 是转子坐标系, z 为转子轴线; $o_u x_u y_u z_u$ 是砂轮坐标系, z_u 为砂轮回转轴线。转子的 $y_o z$ 平面和砂轮的 $y_u o_u z_u$ 平面相互平行,两平面之间的距离记为中心距 A_c 。转子轴线 z 和砂轮轴线 z_u 之间的夹角记为

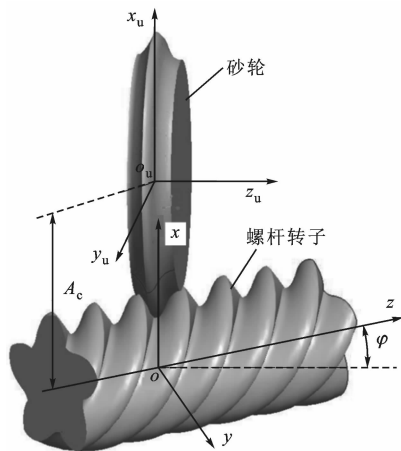


图1 螺杆转子磨削的空间关系

砂轮的安装角 φ 。在转子磨削过程中,砂轮的安装角 φ 相对固定,而中心距 A_c 随着磨削深度的变化和砂轮修整量的累加而变化。因此, A_c 和 φ 是螺杆磨削中两个重要工艺参数。

1.2 螺杆磨床的坐标系和运动定义

螺杆转子磨床的运动关系如图2所示,其中砂轮架的旋转方向为 B ,安装在砂轮架上的金刚轮的两个直线进给方向分别为 V 和 W ,砂轮沿工件径向的进给方向为 X ,螺杆的转动方向为 C ,转子的轴向进给方向为 Z ,工作台面的整体回转方向为 S [18]。

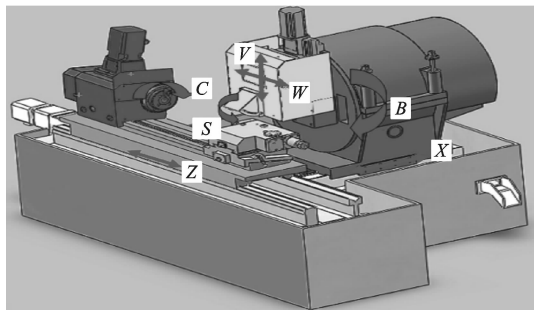


图2 螺杆转子磨床的坐标系定义

螺杆转子数控磨床 SK7032 的数控系统采用西门子 840D,其5个运动控制通道分别定义为 t_z 、 t_x 、 t_v 、 t_w 和 t_c 。转子的螺旋进给方向采用 t_z 和 t_c 通道控制,砂轮的进给方向采用 t_x 通道控制,金刚轮的两个进给运动采用 t_w 和 t_v 通道控制。

1.3 螺杆转子曲面方程和法线方程

螺杆转子的螺旋面是由端面型线作螺旋运动而形成的,螺杆转子的磨削成形过程可以看作砂轮的回转面与螺杆转子的螺旋曲面之间的空间啮合运动。螺杆转子磨削的关键是根据已知的螺杆转子的端面型线求解砂轮的精确截形。以下将以右旋螺杆转子为例,探讨砂轮截形求解的方法和步骤 [4]。

在空间坐标系 $oxyz$ 中,某一曲线绕轴线 oz 作右旋螺旋运动,当转过 τ 角时所形成的右旋螺旋面方程为

$$\begin{cases} x = x_0(t)\cos\tau - y_0(t)\sin\tau \\ y = x_0(t)\sin\tau + y_0(t)\cos\tau \\ z = p\tau \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为螺旋特性表征参数; T 为导程, $p = \frac{T}{2\pi}$; t

和 τ 是参变量。螺旋曲面上任一点处的法线 $\mathbf{n}$ 为

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial \tau} & \frac{\partial y}{\partial \tau} & \frac{\partial z}{\partial \tau} \end{vmatrix} \quad (2)$$

1.4 螺杆转子磨削的接触线方程

如图1所示的螺杆转子磨削的空间位置关系,当转子螺旋面为右旋时,砂轮坐标系 $o_u x_u y_u z_u$ 与转子坐标系 $oxyz$ 之间的转换关系为 [14]

$$\begin{cases} x_u = x - A_c \\ y_u = y\cos\varphi - z\sin\varphi \\ z_u = y\sin\varphi + z\cos\varphi \end{cases} \quad (3)$$

当砂轮的回转面和螺杆转子的螺旋曲面空间啮合时,转子曲面与砂轮回转面之间形成一条空间位置固定的接触线。该接触线绕砂轮轴线回转一周即形成砂轮的回转面,该接触线绕转子轴线作螺旋运动形成转子的螺旋曲面 [13,15]。

在砂轮坐标系 $o_u x_u y_u z_u$ 中,距砂轮中心 o_u 距离为 z_{u1} 处作与砂轮轴线 $o_u z_u$ 垂直的平面,便得到一条砂轮截交线 $\widehat{cd}$,见图3。砂轮截交线与转子螺旋曲面的接触点记为 M ,则转子螺旋曲面在点 M 的法线 $\mathbf{n}$ 必然与砂轮截交线上过 M 点的切线垂直,即螺杆转子螺旋曲面与砂轮回转面的接触线条件为

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4)$$

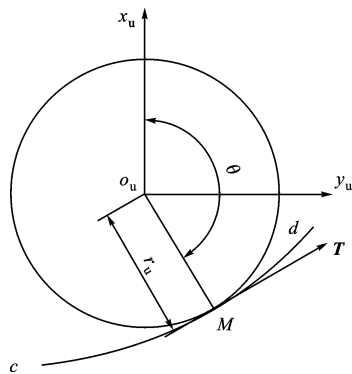


图3 转子磨削的接触条件

砂轮的回转面在 M 点的切线 $\mathbf{T}$ 的表达式为

$$\mathbf{T} = -\mathbf{i}(y_0\cos\varphi + z_0\sin\varphi) + \mathbf{j}(x_0 - A_c)\cos\varphi + \mathbf{k}(x_0 - A_c)\sin\varphi \quad (5)$$

联合式(1)~式(5),推导出右旋螺杆转子磨削的接触线方程为

$$\begin{aligned} & p(y_0\cos\tau + x_0\sin\tau + p\tau\tan\varphi)(\sin\tau + \\ & \frac{dy_0}{dx_0}\cos\tau) + (A_c - x_0\cos\tau + y_0\sin\tau) \left[p\cos\tau - \right. \\ & \left. p\frac{dy_0}{dx_0}\sin\tau - \tan\varphi \left(x_0 + y_0\frac{dy_0}{dx_0} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

1.5 求解螺杆转子磨削的接触线方程

在实际运算过程中,螺杆转子的端面型线以离散点的形式出现,各离散点处一阶导数表示为

$$m_i = \frac{dy_i}{dx_i}$$

(7)

由于接触线方程在各离散点处一阶连续,此处采用一阶导数为参数的三次样条函数法进行求解^[6]。

当求解离散点处的一阶导数之后,式(4)变换成关于参变量 τ 的三角超越方程。为了提高计算速度,可采用数值法求其近似解。

1.6 螺杆转子磨削用砂轮的截形计算

在设计螺杆转子的端面型线时,通常采用直线、圆弧、椭圆弧、摆线等拼接和包络而成,并以离散点的形式存储,后续计算针对离散点数据进行^[12,14]。

用 $x_i, y_i, \frac{dy_i}{dx_i}$ 分别替换式(1)、式(2)、式(5)、式(6)中 $x_0, y_0, \frac{dy_0}{dx_0}$,得到与 (x_i, y_i) 对应的 τ_i ,再将 τ_i 代入转子螺旋面方程得到相应的 (x_i, y_i, z_i) ,最后经坐标系变换式(3),将接触线坐标值转化到刀具坐标系中^[16]。

如图 4 所示,在砂轮坐标系中,由 R_u - Z_u 曲线表示的砂轮轴向截形中任意一点的坐标方程为

$$\left. \begin{aligned} R_u &= (x_u^2 + y_u^2)^{1/2} \\ Z_u &= z_u \end{aligned} \right\}$$

(8)

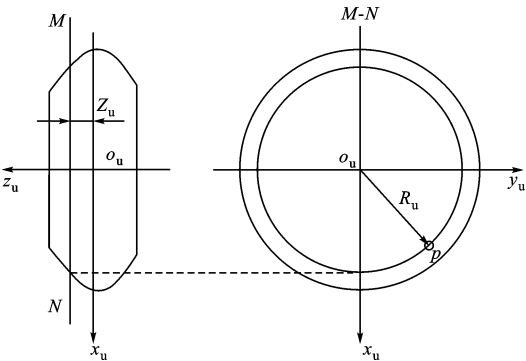


图 4 砂轮轴向截形示意图

2 砂轮截型的计算实例

以某一规格的螺杆空压机中阴转子的磨削加工为例,给出磨削用砂轮截形的计算过程和计算结果。阴转子的基本参数如表 1 所示,其端面单齿槽型线的部分数据如表 2 所示。

根据表 2 所列的阴转子的端面型线数据,绘制单齿槽型线。将单齿槽截型绕坐标点(0,0)旋转,得到的阴转子的整体端面型线如图 5 所示。

按照前面所述的螺杆转子和砂轮的空间啮合理

表 1 阴转子的基本参数

参数	数值
根圆直径/mm	60.942
节圆直径/mm	57.727 3
顶圆直径/mm	117.562
头数	6
导程/mm	344.2
螺旋角/(°)	44.01
旋向	右旋
材料	45 #
材料硬度 HBS	200~250

表 2 阴转子单齿槽截形的部分数据

序号	x/mm	y/mm	序号	x/mm	y/mm
1	-29.452	50.834	14	-27.999	51.546
2	-29.346	50.899	:	:	:
3	-29.240	50.965	630	28.154	51.417
4	-29.135	51.032	631	28.271	51.372
5	-29.026	51.094	632	28.388	51.328
6	-28.913	51.147	633	28.505	51.286
7	-28.798	51.195	634	28.624	51.246
8	-28.681	51.239	635	28.741	51.205
9	-28.565	51.284	636	28.857	51.158
10	-28.449	51.331	637	28.969	51.102
11	-28.336	51.383	638	29.078	51.042
12	-28.223	51.437	639	29.187	50.982
13	-28.111	51.492	640	29.297	50.923

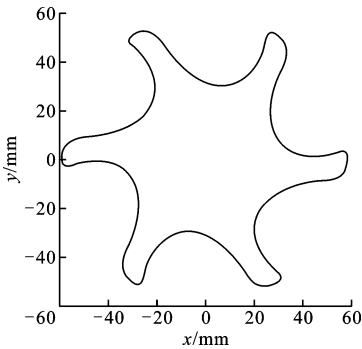


图 5 阴转子端面型线

论,根据阴转子的单齿槽型线数据,利用 MATLAB 编程计算砂轮的轴向截形。设定初始计算参数:中心距为 245 mm,砂轮安装角为 43°,初始相位角为 190°。计算的砂轮截形部分数据如表 3 所示。

表 3 砂轮截形的部分数据

序号	R_u/mm	Z_u/mm	序号	R_u/mm	Z_u/mm
1	-14.823	203.144	14	-13.764	203.239
2	-14.741	203.142	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
3	-14.659	203.141	630	14.510	203.130
4	-14.577	203.142	631	14.592	203.133
5	-14.495	203.145	632	14.674	203.137
6	-14.413	203.149	633	14.756	203.140
7	-14.331	203.155	634	14.838	203.144
8	-14.250	203.162	635	14.919	203.147
9	-14.168	203.171	636	15.001	203.151
10	-14.087	203.182	637	15.083	203.155
11	-14.006	203.194	638	15.165	203.159
12	-13.925	203.207	639	15.247	203.163
13	-13.844	203.222	640	15.329	203.167

3 砂轮轴向截形的影响因素

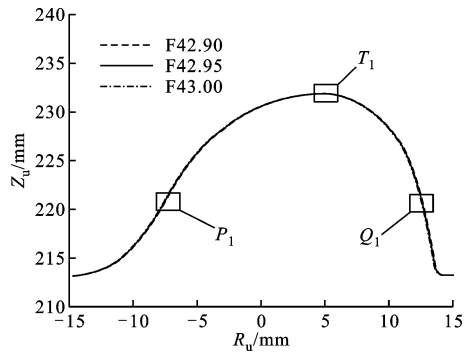
3.1 砂轮安装角

理论上,砂轮安装角直接采用螺杆转子的螺旋角或螺旋角的余角即可。在工程实际中,由于受机床的进给精度的影响,砂轮的实际安装角与理论值之间必然存在误差。

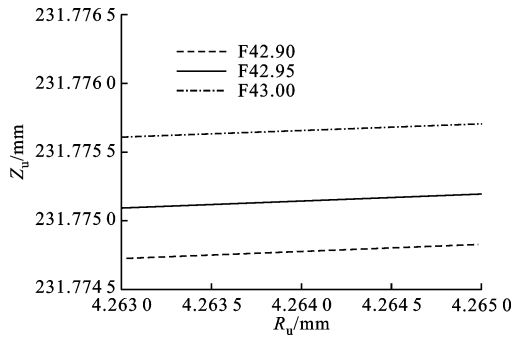
在中心距为 250 mm、初始相位角为 130°的前提下,仅改变砂轮的安装角得到的砂轮轴向截型如图 6 所示。图 6 中的 3 条曲线 F42.9、F42.95 和 F43 分别对应的砂轮安装角为 42.9°、42.95°、43°,3 者之间相差 0.05°。

将图 6a 中的 3 个区域 T_1 、 P_1 、 Q_1 放大后,如图 6b~图 6d 所示。其中图 6b 中 F42.9 与 F42.95 之间偏差为 0.5 μm ,而 F42.95 与 F43 之间的偏差为 0.4 μm ;图 6c 中 F42.9 与 F42.95 之间偏差为 5 μm ,而 F42.95 与 F43 之间的偏差为 4 μm ;图 6d 中 F42.95 与 F43 之间的偏差达到 23 μm 。对除此 3 个区域之外的曲线偏差分析可见:不同区域的偏差均不一样,靠近 T_1 区域的偏差小,而在 P_1 和 Q_1 附近的偏差大。

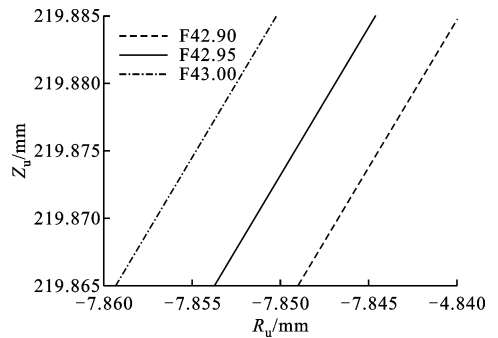
砂轮安装角变化 0.05°引起的砂轮截型曲线各处的偏差变化都很大。因此,砂轮安装角是砂轮截型计算的一个敏感参数,也是 SK7032 磨床调整中必须严格控制的一个工艺参数。如何准确调整和准确测量此参数的实际值,对于砂轮轴向截型的计算非常关键。



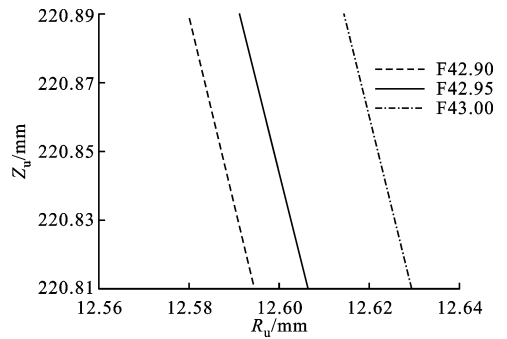
(a) 安装角相差 0.05°



(b) T_1 区放大图



(c) P_1 区放大图



(d) Q_1 区放大图

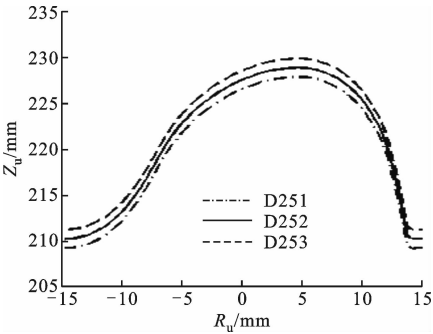
图 6 不同砂轮安装角对应的砂轮截形

3.2 中心距

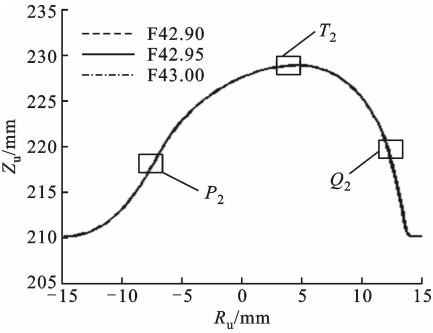
从图 1 可见,中心距 A_c 定义为螺杆转子的齿根圆半径和砂轮轴向截型的最大半径之和,其中螺杆

转子的齿根圆半径相对固定,砂轮轴向截型中的最大半径值随着砂轮的修整而逐渐变小。

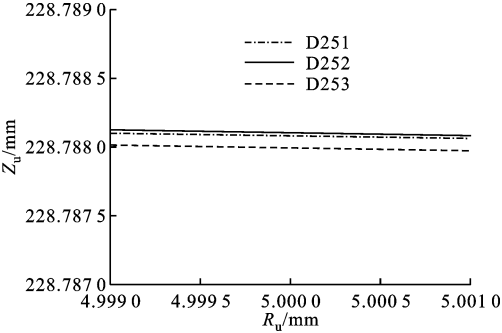
在砂轮安装角为 42° 、初始相位角为 130° 时,只改变中心距,计算得到的砂轮轴向截型如图 7 所示,其中 D251、D252、D253 三条曲线所对应的中心距



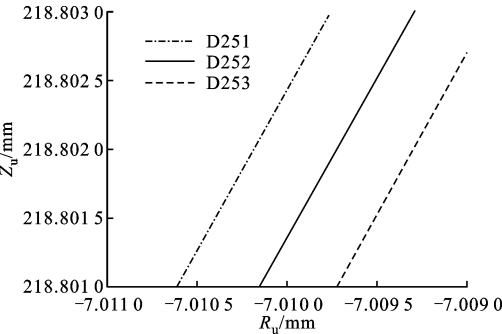
(a) 3 种中心距对应的砂轮截形



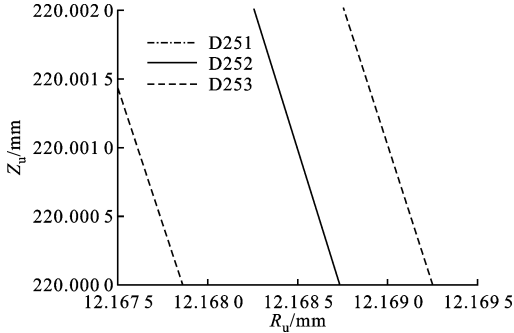
(b) 平移后的 3 条砂轮截形



(c) T_2 区放大图



(d) P_2 区放大图



(e) Q_2 区放大图

图 7 不同中心距对应的砂轮截型

分别为 251、252 和 253 mm。

将图 7a 中 D251 曲线向下移动 1 mm, D253 向上移动 1 mm, 平移后的 3 条曲线近似重合, 见图 7b。将图 7b 中的 T_2 、 P_2 、 Q_2 3 个区域放大后如图 7c ~ 图 7e 所示。 T_2 区中 D251 与 D252 曲线之间的偏差小于 $0.1\ \mu\text{m}$, D251 与 D252 曲线之间的偏差小于 $0.2\ \mu\text{m}$; P_2 区中 D252 与 D251、D253 之间的偏差相近, 都小于 $0.5\ \mu\text{m}$; Q_2 区 D251 和 D252 之间的偏差为 $0.4\ \mu\text{m}$, D251 和 D252 之间的偏差为 $0.7\ \mu\text{m}$ 。此 3 条曲线上的差异源于中心距的变化, 即中心距变化会使砂轮的截型数据产生变化。因此, 只要有效控制中心距的变化量, 就可以控制由此而引起的砂轮截型误差。

在转子磨削过程中, 砂轮磨损后必须及时修整, 每次修整之后, 砂轮的半径都会变小。砂轮修整的单次进给量很小, 约为 $0.005\sim0.02\ \text{mm}$, 若要将已经破损、磨损的部分修整完全, 必须经过多次修整。多次修整后, 砂轮半径减小的累加值便不容忽视。

由图 7 可见, 当中心距差值为 1 mm 时, 所计算的砂轮截形偏差小于 $1\ \mu\text{m}$ 。因此, 在砂轮修整过程中, 将砂轮半径减小的累积量作为一个工艺参数, 砂轮每修整一次, 此参数被修正一次, 当该值超过 1 mm 时, 需重新设定中心距并计算新的砂轮截型数据, 这是螺杆转子磨削中砂轮分段修整方法的实现过程。

4 螺杆转子的磨削试验

为了验证由螺杆转子端面型线计算的砂轮截型数据的精度, 特别是螺杆转子磨床加工的精度, 在 SK7032 上对某型阴转子进行磨削试验, 并对磨削之后的阴转子进行检测, 评定磨削加工的精度。

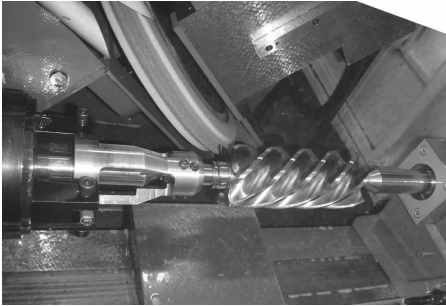
4.1 螺杆转子的磨削加工

在转子磨削之前, 首先保证机床参数、转子与砂

轮的基本参数之间的一致性,然后计算砂轮的截型数据,并对砂轮进行修整,最后利用修整后的砂轮对螺杆转子进行磨削。

为了提高螺杆转子中多个齿槽截型的一致性,尽量使用一次修整后的砂轮对各个齿槽进行磨削。当每个齿槽都被磨削一次后,进行砂轮的二次修整和转子的二次磨削。重复以上步骤,直到转子齿面磨削完整。

在 SK7032 数控螺杆转子磨床上进行螺杆转子磨削和磨削后工件如图 8 所示。



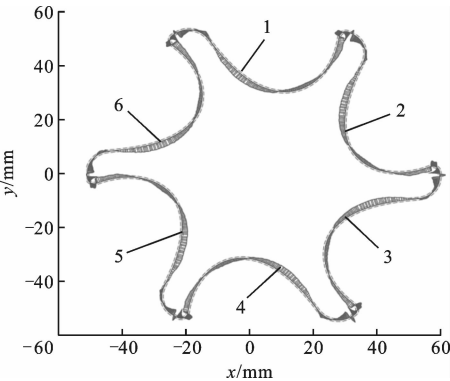
(a)在 SK7032 上的磨削



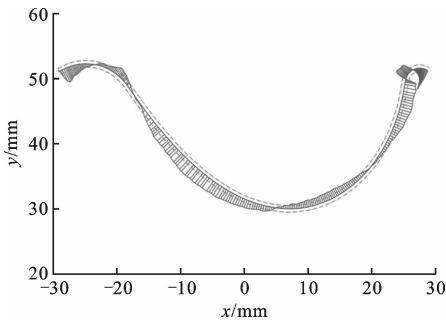
(b)磨削后的阴转子
图 8 阴转子的磨削

4.2 螺杆转子的齿形检测

利用 P65 齿轮检测仪对加工后的阴转子型线进行检测,检测结果如图 9 所示,图中的阴影部分为偏差值。



(a)阴转子总体检测误差



(b)1 齿槽的误差

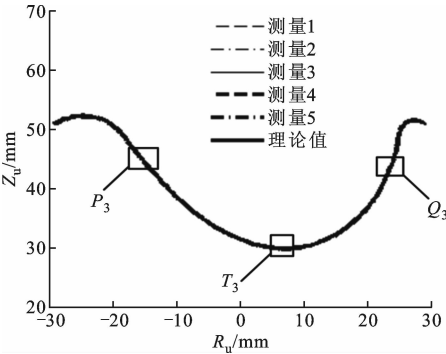
图 9 阴转子的检测数据

由图 9a 可见,阴转子端面型线的 6 个齿槽偏差值较均匀,每个齿槽最大误差出现的位置和数值很相近,其中 1 齿槽的测量型线如图 9b 所示。检测结果显示各齿槽的检测值和理论值偏差小于 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

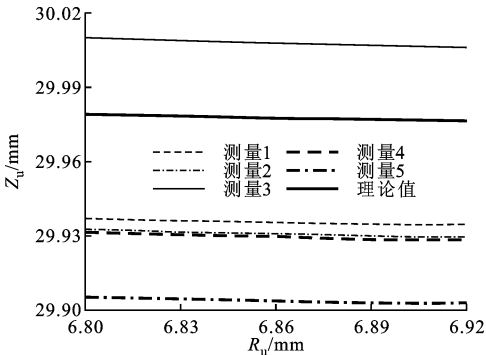
4.3 阴转子型线检测值分析

在三坐标测量机上,对在 SK7032 上磨削后的 5 个不同阴转子的一个齿槽端面型线进行测量。将 5 组测量的齿槽型线数据和理论型线数据进行比对,结果如图 10 所示。

从图 10b~图 10d 所示的所有曲线上的 3 处放大图可以看出,5 条测量曲线在 P_3 区中的相互偏差在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右,在 T_3 区中的偏差相差较大,在 Q_3 区中的差异更大。这与图 9b 中看到的齿槽对应位



(a)测量型线与理论型线对比



(b) T_3 区放大图

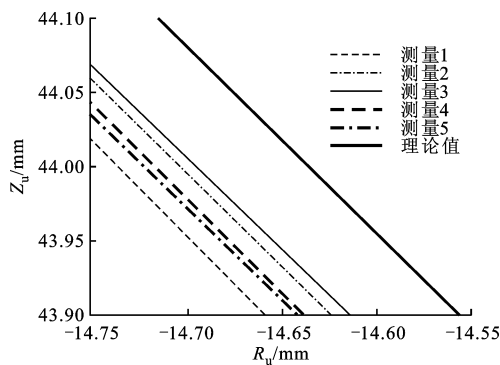
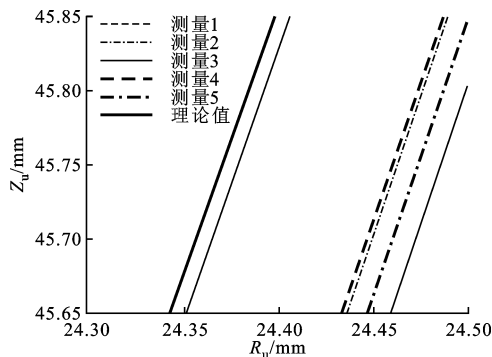
(c) P_3 区放大图(d) Q_3 区放大图

图 10 阴转子测量型线与理论型线的对比

置处的偏差一致。造成误差变大的原因是拐点位置测量头的接触条件变差。

另外,在 P_3 、 T_3 和 Q_3 区中理论型线与测量型线的相对偏差较大,这主要是由于测量型线与理论型线的初始位置不统一而引起的,可以通过调整理论型线的初始位置而靠近测量型线,这样的调整具有随机性。

从图 10 中读出测量型线与理论型线之间的偏差及其位置,可以通过调整砂轮截型数据使误差减小。这种误差补偿方式是 CNC 砂轮修整技术的一个突出优势,也是提高转子型线磨削精度的有效方法,将作为后续研究工作的重要方面。

5 结 论

本文对异形螺杆转子数控磨削中的分段 CNC 砂轮修型方法进行了理论和试验研究,通过计算发现,砂轮的安装角相对于中心距对砂轮的截型影响较大,安装角变化 0.05° 所引起的砂轮截形误差最大达到 $23 \mu\text{m}$,而中心距变化 1 mm 引起的砂轮截型误差小于 $1 \mu\text{m}$ 。在砂轮的安装角一定的前提下,采用 1 mm 的中心距间隔分段 CNC 砂轮修型方法对某阴转子在 SK7032 上进行磨削试验后,P65 齿

轮检测仪的测量结果显示最终型线误差在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内。因此,在复杂螺杆转子的数控磨削时,更应注重机床中砂轮安装角的调整 and 中心距间隔的选取。

参考文献:

- [1] 邢子文, 吴华根, 束鹏程. 螺杆压缩机设计理论与关键技术的研究和开发 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 755-763, 810.
XING Ziwen, WU Huagen, SHU Pengcheng. Research and development on design theory and key technology of screw compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 755-763, 810.
- [2] LITVIN F L, FENG P H. Computerized design and generation of cycloidal gears [J]. Mech Mach Theory, 1996, 31(7): 891-911.
- [3] MIMMI G, PENNACCHI P. Determination of tool profile for the milling of three-screw pump rotor [J]. Mechanica, 1997, 32(4): 363-377.
- [4] 邢子文, 彭学院, 束鹏程. 螺杆压缩机设计计算软件的研究与开发 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(11): 1-7.
XING Ziwen, PENG Xueyuan, SHU Pengcheng. Software package for design of twin screw compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(11): 1-7.
- [5] 熊伟, 冯全科. 双螺杆压缩机齿间间隙分布的计算 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 682-685.
XIONG Wei, FENG Quanke. Calculation to inter-lobe clearance distribution of twin-screw compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(7): 682-685.
- [6] ZAYTSEV D, FERREIRA C I. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 744-755.
- [7] KWON S M, KANG H S, SHIN J H. Rotor profile design in a hypogenerator pump [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(2): 3459-3470.
- [8] 魏伟锋, 张广鹏, 杜真一, 等. 参数化直线共轭内啮合泵齿廓设计方法 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 49-55.
WEI Weifeng, ZHANG Guangpeng, DU Zhenyi, et al. Design method of internal rotary gear pump by parameterized line conjugated tooth profile [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 49-55.
- [9] 徐健, 余宾宴, 余小玲, 等. 螺杆压缩机转子型线设计方法 [J]. 压缩机技术, 2012(2): 1-6, 14.

- XU Jian, YU Binyan, YU Xiaoling, et al. Study on rotor profile design of screw compressors [J]. Compressor Technology, 2012(2): 1-6, 14.
- [10] 张元勋, 唐倩, 江振伟, 等. 基于啮合间隙的螺杆齿形设计与成形加工方法 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 48-57.
- ZHANG Yuanxun, TANG Qian, JIANG Zhenwei, et al. Design of screw tooth profile based on backlash and design method of forming cutter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 48-57.
- [11] WEI J, ZHANG G A. Precision grinding method for screw rotors using CBN grinding wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(5/6/7/8): 495-503.
- [12] 吴宝海, 张娟, 杨建华, 等. 螺杆压缩机转子成形砂轮刃形计算 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 192-198.
- WU Baohai, ZHANG Juan, YANG Jianhua, et al. Calculation method for edge shape of forming wheel for screw rotors machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 192-198.
- [13] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A, et al. Geometry of screw compressor rotors and their tools [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2011, 12(4): 310-326.
- [14] 周斌, 魏伟锋. 国内外螺杆转子精密加工设备综述 [J]. 制造技术与机床, 2011(12): 66-70.
- ZHOU Bin, WEI Weifeng. The special reports of domestic and foreign screw rotor precision processing equipment [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011(12): 66-70.
- [15] 吴序堂. 齿轮啮合原理: 2版 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 77-105.
- [16] 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: 50-67.
- [17] LYASHKOV A A, PANCHUK K L. Computer modeling of a pump screw and disc tool cross shaping process [J]. Procedia Engineering, 2015, 113: 174-180.
- [18] 侯红玲, 赵永强. 双螺杆压缩机转子磨削参数的精确计算 [J]. 机械设计, 2014, 31(10): 72-76.
- HOU Hongling, ZHAO Yongqiang. Calculation of grinding parameters of twin-screw compressor rotor [J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(10): 72-76.

(编辑 杜秀杰)

(上接第5页)

- [9] BALSAMO L, BETTI L, HEIGI H. A structural health monitoring strategy using cepstral features [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333: 4526-4542.
- [10] BISPO B C, FREITAS D R S. On the use of cepstral analysis in acoustic feedback cancellation [J]. Digital Signal Processing, 2015, 44(1): 88-101.
- [11] 王燕, 邹男, 付进, 等. 基于倒谱分析的单水听器目标运动参数估计 [J]. 物理学报, 2014, 63(3): 034302.
- WANG Yan, ZOU Nan, FU Jin, et al. Estimation of single hydrophone target motion parameter based on cepstrum analysis [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 034302.
- [12] XIE Chuan, CAO Xiaoli, HE Lingling. Algorithm of abnormal audio recognition based on improved MFCC [J]. Procedia Engineering, 2012, 29(4): 731-737.
- [13] NIE Mengyan, WANG Ling. Review of condition monitoring and fault diagnosis technologies for wind turbine gearbox [J]. Procedia Cirp, 2013, 11: 287-290.
- [14] LI Bing, ZHANG Xining. Periodical feature extraction and fault diagnosis for gearbox using local cepstrum technology [C]//Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2015). Houston, Texas, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V04BT04 A059.

(编辑 杜秀杰)