

基于双平面轨迹均匀法的高精度圆柱滚子加工方法研究^①

钟美鹏^② 袁巨龙^③ 姚蔚峰 邓乾发

(浙江工业大学超精密加工中心 杭州 310014)

摘 要 针对目前超精密圆柱滚子加工精度和一致性很难保证的问题,提出了利用行星式双平面研磨方式进行圆柱滚子的加工方法。同时对该方法的加工原理进行分析以及对保持架进行了模态仿真。在研究了圆柱滚子双平面加工运动轨迹基础上,发现靠近研磨盘中心以及研磨盘边缘的轨迹线分布比较集中,而靠近研磨盘中间环带部分的轨迹线分布较为均匀。据此设计并加工了实验装置,采用基于双平面轨迹均匀方法进行超精研磨和抛光。实验研究表明,工件的圆度误差达到了 $0.295\mu\text{m}$,批直径变动量达到了 $1\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 达到了 $0.054\mu\text{m}$,圆柱滚子的表面质量可以达到镜面级别,微观加工纹路具有多向性。公差等级达到了国家标准 0 级要求。

关键词 圆柱滚子,运动轨迹,轨迹均匀,超精研磨

0 引言

轴承是精密机械、仪器设备中的关键基础件^[1,2],是发展精密机床、精密仪器、能源机械(风力发电机)、国防等领域高端装备的重要基础,其精度对装备的总体性能有着重大影响^[2,3],圆柱滚子轴承在重载机械中尤为广泛应用^[4]。精密圆柱滚子(圆柱滚子)作为精密轴承的关键零件,其精度和一致性对轴承的性能和寿命起到至关重要的作用^[5,6]。目前,圆柱滚子的加工主要采用无心磨削原理^[7,8]。无心磨削是工件不定中心的磨削,无需对工件进行装夹定位,这一优点使之能很好地用于大量生产的场合,而每个工件的安装调试时间几乎为零^[9,10]。并且一旦机床调整完毕,则工件在加工过程中基本上是自行找正的^[11]。但是由于工件的中心位置的变化、工件中心直线运动与砂轮轴线的误差、工件与导轮、托板工作面接触的不稳定性、工

件的运动速度误差、以及砂轮和导轮等部件本身的磨损等问题,导致各个工件之间的加工条件无法一致,超精密圆柱滚子的精度和一致性很难保证^[12]。

本论文提出了利用双平面研磨方式进行圆柱滚子的加工方法。并对该方法的加工设备对关键零部件进行了有限元仿真。这对于实现圆柱滚子的超精密高效批量加工,发展圆柱滚子的超精密加工技术,具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

1 加工原理

利用双平面研磨方法加工一批圆柱滚子的实验装置如图 1 所示。一批圆柱滚子工件按等间距辐射状排列方式排列在保持架载物窗中。在加工载荷的作用下,工件与上下磨盘接触;以平面零件双面研磨的方式,对一批滚子同时进行加工;上下磨盘以及保持架可按各自的转速转动。加工过程中根据需要采用固着磨料磨盘或游离磨料进行加工。通过调整磨

① 国家基金重点联合项目(U1604254),国家自然科学基金(51175468,51705330),浙江省基金(LY17E050022),浙江省科技计划(2016C31042)和嘉兴市科技计划(2018AY11004)资助项目。

② 男,1975 年生,博士,副教授;浙江工业大学博士后;研究方向:超精密加工;E-mail: zhongmeipeng@qq.com

③ 通信作者,E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn
(收稿日期:2017-11-17)

盘和保持架之间的转速比,各个滚子在摩擦力作用下进行自转,圆柱表面与磨盘滚动接触,在保证上下磨盘保持平面度的前提下,使各圆柱滚子得到均匀研磨。由于误差匀化的原理,单个滚子的精度误差以及滚子间的尺寸误差在研磨过程中得到充分匀化,可使所有圆柱滚子工件直径趋于一致,从成型原理上可实现圆柱滚子的均匀一致加工。

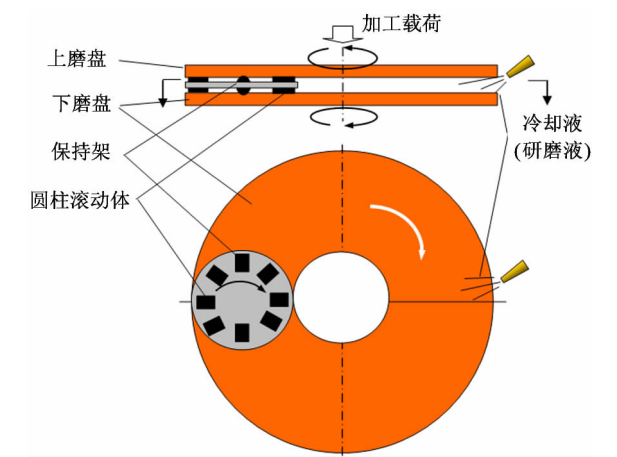


图 1 圆柱滚子双面平面超精密加工装置示意图

行星式双平面圆柱加工机构主要包括如下构件:上研磨盘、下研磨盘、行星轮夹具、外齿圈、内齿圈,如图 2 所示。上研磨盘和下研磨盘同轴放置,分别独立转动,上盘起到加压作用;夹具放在内齿圈和外齿圈之间,圆柱滚子放在夹具的孔槽内,孔槽在夹具表面可呈辐射状分布。加工时,夹具绕研磨盘中心公转同时自转,同时圆柱滚子在上、下研磨盘和夹具的作用下既绕夹具中心公转同时自身滚动,作复杂空间运动。

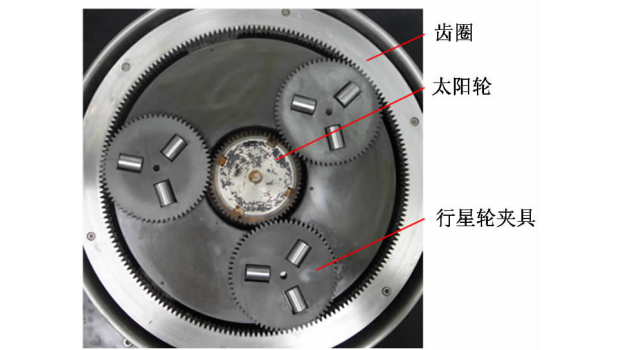


图 2 行星式双平面圆柱加工机构

在双平面圆柱加工方法中,可以将一批圆柱滚子的一致化加工过程等效转换为平面零件的一致化

加工过程。即如果将这一组圆柱滚子构成的虚拟平面零件加工成理想高精度的平面,不管圆柱滚子如何转动,其外轮廓始终构成的是一高精度的平面,从而保证各圆柱滚子具有良好的尺寸精度和形状精度,且各圆柱滚子之间具有良好的一致性。而双平面加工方式本身就满足切削等概率性和尺寸选择性,它利用误差匀化原理可以轻易加工出高精度平面,因此利用双平面加工方式加工批量圆柱,保证其尺寸和精度的一致性,这是完全可行的。双平面圆柱加工的一致化过程简述如下:

(1)如图 3 所示,一组圆柱滚子看做一个整体的平面工件,圆柱滚子的外轮廓构成虚拟平面工件的上下两个虚拟平面或外轮廓,直径大的圆提供高点,直径小的圆提供低点。

(2)当圆柱滚子变换方位时,圆柱滚子构成的相应虚拟平面工件的外轮廓也会产生变化,如图 4 所示。

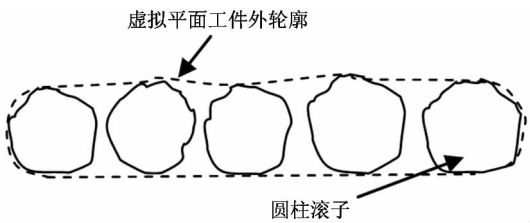


图 3 圆柱滚子构成的初始虚拟平面轮廓

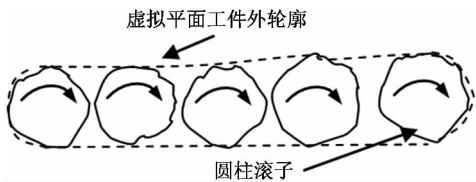


图 4 加工过程中不断变化的虚拟平面轮廓

(3)利用双平面研磨方式,将这一组圆柱滚子作为一个平面工件置于两块相互平行、平整的研磨盘中加工。研磨盘的运动控制圆柱滚子的均匀转动,虚拟平面工件的外轮廓也不断变化,同时受到上下研磨盘的均匀研磨。如图 5 所示。

(4)利用误差匀化的原理,虚拟平面工件的外轮廓上的高点被去除多,低点被去除少,最终虚拟平面工件外轮廓与研磨盘工作面趋于保持一致,即不论圆柱滚子如何变换方位,所构成的虚拟平面工件

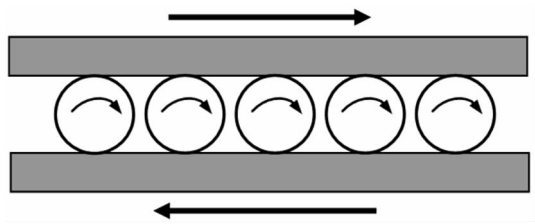


图5 圆柱滚子的双平面加工过程

外轮廓都与研磨盘工作面平行,趋向于理想平面,这样的圆柱滚子则可获得高精度和高一致性,如图6所示。

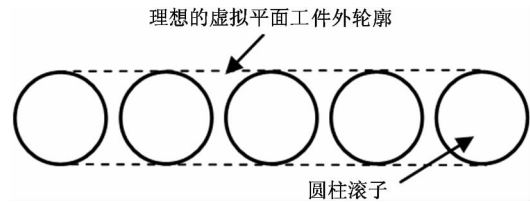


图6 获得高精度、高一致性的圆柱滚子

2 保持架模态仿真、加工轨迹的运动学和仿真分析

2.1 保持架模态仿真

模态分析用于确定结构或部件的振动特性,比如固有频率和振型,可以分清在什么样的激振力的作用下会发生什么样的振动,从而控制相应的振动频率,使外激振动频率避开固有频率,避免发生该振型下的共振,有效减少振动值。本加工装置容易发生共振的环节是保持架,本文对保持架进行模态分析。保持架总体自由振动方程^[13]:

$$(K - \omega^2 M)q = 0 \tag{1}$$

式中: $q = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \cdots \ u_n]$ 为振型矩阵, $K = K^{(1)} + K^{(2)} + K^{(3)} + \cdots + K^{(n)}$ 为刚度矩阵, $M = M^{(1)} + M^{(2)} + M^{(3)} + \cdots + M^{(n)}$ 为质量矩阵, ω 为自然圆频率(rad/s)。

方程(1) 有非零解的条件为:

$$| (K - \omega^2 M)q | = 0 \tag{2}$$

式(2) 的解 ω 即为保持架的固有频率。

利用有限元软件对式(2) 进行了计算得保持架前四阶固有频率为 121.53、121.65、138.74 和 203.96HZ(表1 所示)。研磨转速要避开四阶固有频率,不会产生共振。研磨转速一般选择在 100rpm 以下。

表1 保持架四阶的模态频率 Hz

阶数	1	2	3	4
模态频率 (Hz)	121.53	121.65	138.74	203.96

2.2 圆柱滚子加工轨迹的运动学和仿真分析

规定逆时针方向为转速正向,设外齿圈以 ω_3 的速度逆时针方向转动,齿数为 Z_1 ,内齿轮以 ω_1 的速度逆时针方向转动,齿数为 Z_3 ;夹具自转速度为 ω_2 ,公转速度为 ω_h ,齿数为 Z_2 ,如图7 所示。定义转速比 m ,为夹具自转速度 ω_2 与公转速度 ω_h 之比,即 $m = \omega_2/\omega_h$,它决定着工件的公转和自转运动状态,从而形成不同的工件加工轨迹。

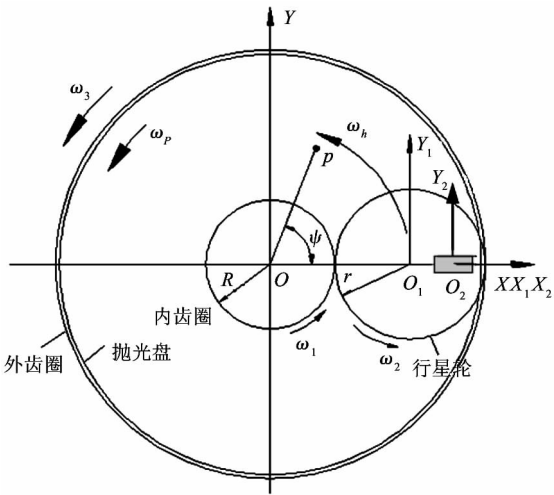


图7 各个转速的定义

如图7 所示,根据周转轮系传动比关系可知:

$$\begin{aligned} i_{31}^H &= \frac{\omega_3 - \omega_h}{\omega_1 - \omega_h} = \frac{Z_2}{Z_3} \times (-\frac{Z_1}{Z_2}) \Rightarrow \omega_h \\ &= \frac{Z_3\omega_3 + Z_1\omega_1}{Z_1 + Z_3} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} i_{21}^H &= \frac{\omega_2 - \omega_h}{\omega_1 - \omega_h} = -\frac{Z_1}{Z_2} \Rightarrow \omega_2 \\ &= (1 + \frac{Z_1}{Z_2})\omega_h - \frac{Z_1}{Z_2}\omega_1 \\ &= \frac{(Z_1 + 2Z_2)\omega_3 - Z_1\omega_1}{2Z_2} \end{aligned} \tag{4}$$

由于内齿圈、行星轮、外齿圈均为相互啮合的齿轮,根据机械原理齿轮啮合条件可知它们的模数相等,设为 n , 则 $Z_1 = 2nR, Z_2 = 2nr, Z_3 = 2n(R +$

2r), 从而可以从式(3)、(4)化简得出工件自转速度 ω_2 和公转速度 ω_h , 其中正值表示沿正方向即顺时针方向转动。

$$\omega_h = \frac{(R + 2r) \times \omega_3 + R \times \omega_1}{2 \times (R + r)} \tag{5}$$

$$\omega_2 = \frac{(R + 2r) \times \omega_3 - R \times \omega_1}{2 \times r} \tag{6}$$

则转速比为

$$m = \frac{\omega_2}{\omega_h} = \frac{R + r}{r} \times \frac{(R + 2r)\omega_3 - R\omega_1}{(R + 2r)\omega_3 - R\omega_1} \tag{7}$$

设下研磨盘速度为 ω_p , 圆柱滚子中心到保持架中心 O_1O_2 与圆柱滚子中心到下研磨盘中心 OO_2 的夹角记为 α , 研磨盘中心到圆柱滚子质心的距离为 c , 圆柱滚子半径为 r_r , 工件滚动时在 t 时刻转过角度 θ , 圆柱滚子中心距夹具中心距离为 L , 点 p 为研磨盘上任意点, 点 p 至研磨盘中心 O 的距离为 R_p 。

当工件与研磨盘纯滚动时, 工件的瞬时滚动速度为

$$\omega_r = \frac{[a\omega_2 - c(\omega_p - \omega_h) \cos\alpha]}{r_r} \tag{8}$$

则在 t 时间内运用积分原理对工件滚动速度进

行积分, 可以得到工件在 t 时刻后转过的角度 θ 。

$$\theta = \int_0^t \left(\frac{a\omega_2 - c(\omega_p - \omega_h) \cos\alpha}{r_r} \right) dt \tag{9}$$

利用图像变换法求解出研磨盘上任意一点 p 相对工件质心 O_2 的运动轨迹方程:

$$\begin{cases} X_p' = R_p \cos[(\omega_p + \omega_2 - \omega_h)t + \psi] \\ \quad - (R + r) \cos\omega_2 t - L \\ Y_p' = \cos\theta(R_p \sin[(\omega_p + \omega_2 - \omega_h)t + \psi] \\ \quad - (R + r) \sin\omega_2 t) + r_r \sin\theta \\ Z_p' = -\sin\theta(R_p \sin[(\omega_p + \omega_2 - \omega_h)t + \psi] \\ \quad - (R + r) \sin\omega_2 t) + r_r \cos\theta \end{cases} \tag{10}$$

2.2.1 不同位置条件下加工轨迹的仿真分析

不同位置条件下 R_p 为点 p 至研磨盘中心 O 的距离。设 $\omega_p = 60$ (r/min), $\omega_h = 12$ (r/min), $m = -1/2$, $t = 100s$, $r = 70mm$, $R = 60mm$, $r_r = 10mm$, $R_p = [60 \ 80 \ 100 \ 130 \ 170 \ 200]$ mm, 代入参数值到式(10)进行 Matlab 仿真, 得出不同位置点 p 的运动轨迹图, 如图 8 所示。

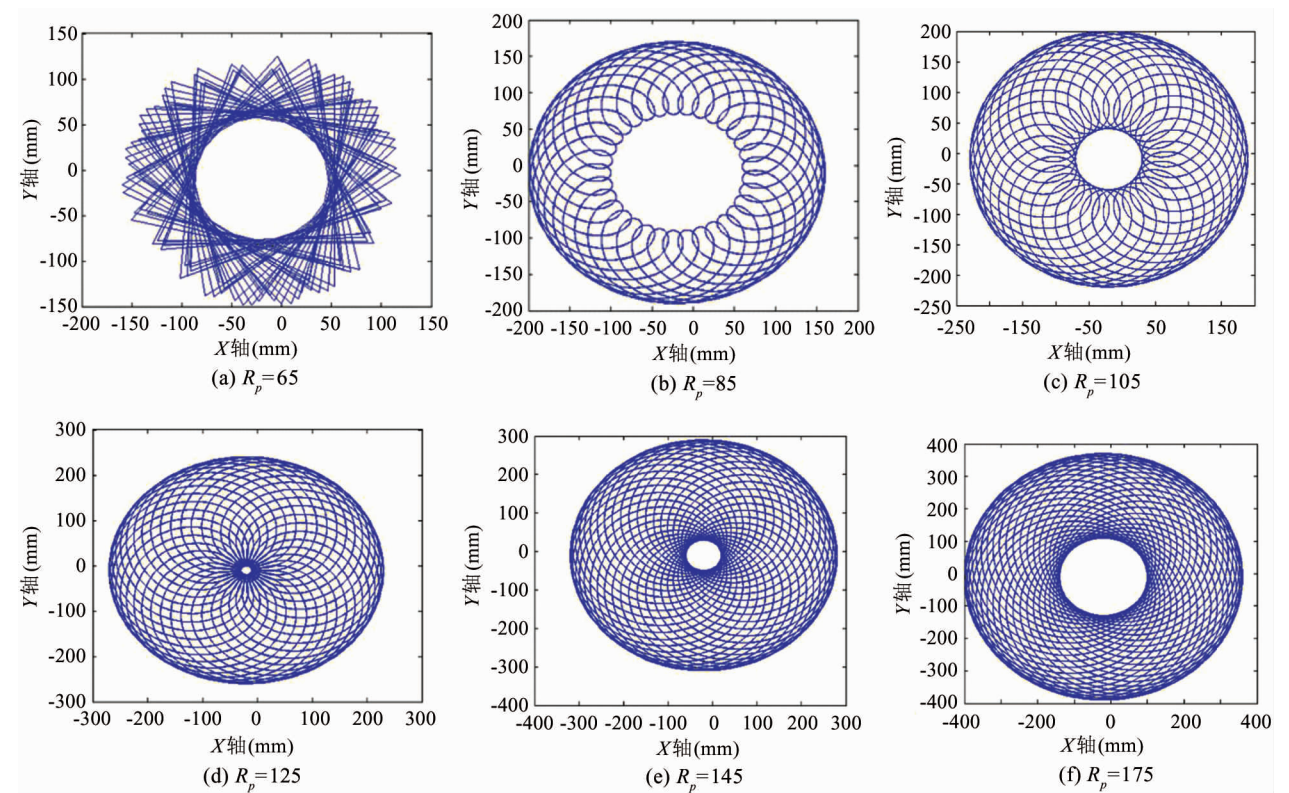


图 8 研磨盘上点 p 不同位置的运动轨迹

由图 8 分析可知,靠近研磨盘中心以及研磨盘边缘的轨迹线分布比较集中,而靠近研磨盘中间环带部分的轨迹线分布较为均匀。基于此仿真结果,当选择加工工艺参数时,应尽量使工件放在研磨盘中间的环带部分,这样有利于工件表面的均匀加工,保证工件的精度。

2.2.2 研磨盘不同转速下加工轨迹的仿真分析

设 $\omega_p \in [10 \ 20 \ 40 \ 60 \ 90 \ 120] \text{ (r/min)}$, $\omega_h = 12 \text{ (r/min)}$, $m = -1/2$, $r = 70\text{mm}$, $R = 60\text{mm}$, $r_r = 10\text{mm}$, $R_p = 175\text{mm}$, $t = 100\text{s}$,在不同研磨盘转速条件下点 p 的运动轨迹如图 9 所示。

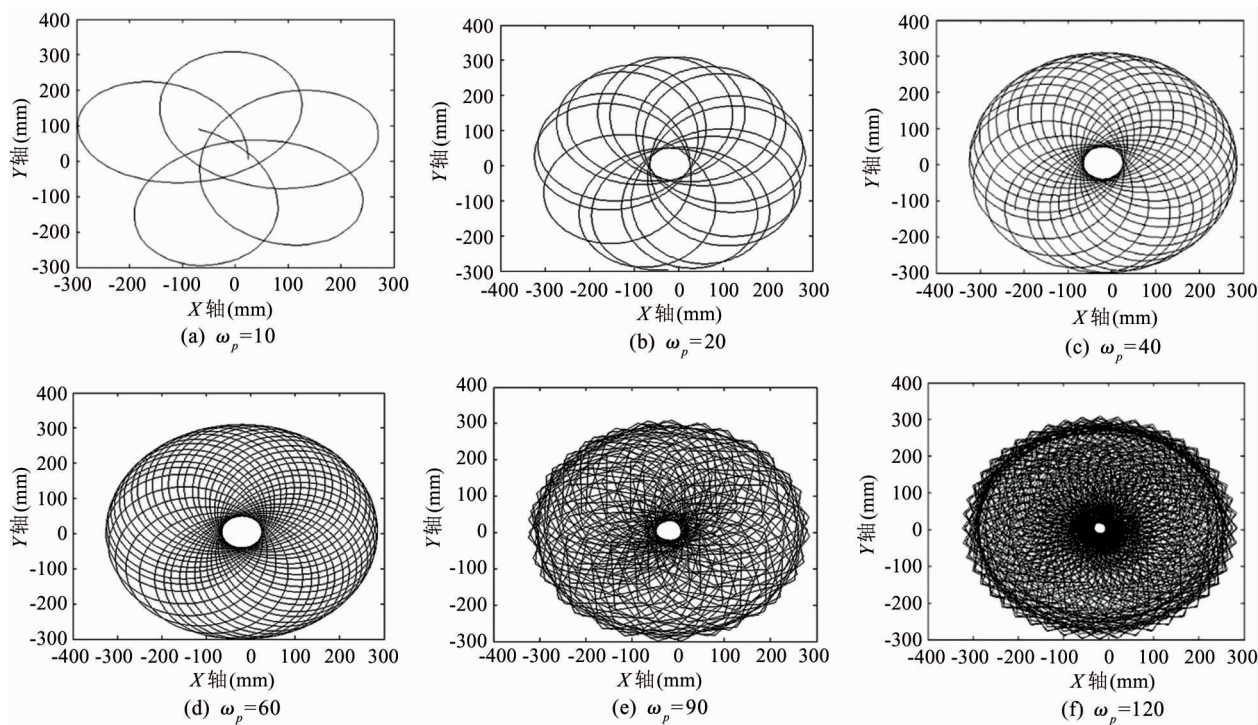


图 9 不同研磨盘转速下点 p 的运动轨迹

由图 9 分析可知,点 p 运动轨迹的弯曲程度受研磨盘转速 ω_p 的大小影响。当 $\omega_p \geq 90\text{rpm}$ 时,运动轨迹明显比较平直,在弯曲处过渡的不够平滑,这种运动轨迹容易引起工件表面的划擦,不利于加工。当 ω_p 在 $40 \sim 60\text{rpm}$ 时轨迹相对比较均匀,且弯曲处过渡比较平滑。

2.2.3 不同传动比条件

设 $\omega_p = 60 \text{ (r/min)}$, $\omega_h = 12 \text{ (r/min)}$, $r = 70\text{mm}$, $R = 60\text{mm}$, $r_r = 10\text{mm}$, $R_p = 175\text{mm}$, $t = 100\text{s}$ 。选定值为 $[-2 \ -1 \ -0.3 \ -0.2 \ 0 \ 0.2 \ 0.3 \ 1 \ 2]$,代入参数值到式(7)进行 Matlab 仿真,得到不同转速比下的运动轨迹,如图 10 所示。

由图 10 分析可知:

(1) 如图 10(g)所示,当 $m = 0.3$ 时,点 p 的轨迹随 t 的变化基本为一簇同心圆,显然其轨迹重合度高;如图 10(c)所示,当 $m = 1$ 或 $m = -0.3$ 时,点 p 轨迹随 t 的变化也出现较高的重合,因此两种传动比参数都不建议选用。

(2) 如图 10(h)和(i)所示,当 $m > 0.3$ 时,轨迹线分布的不均匀性几率增大,因此在这个范围的传动比也应尽量少的选。

(3) 如图 10(a)、(b)、(d)、(e)、(f)所示,当 $m < -1$, $-0.3 < m < 0.3$ 时,点 p 的运动轨迹重合度较低而且分布均匀且密集,因此在实际的加工中应尽量选用在这个范围内的传动比。

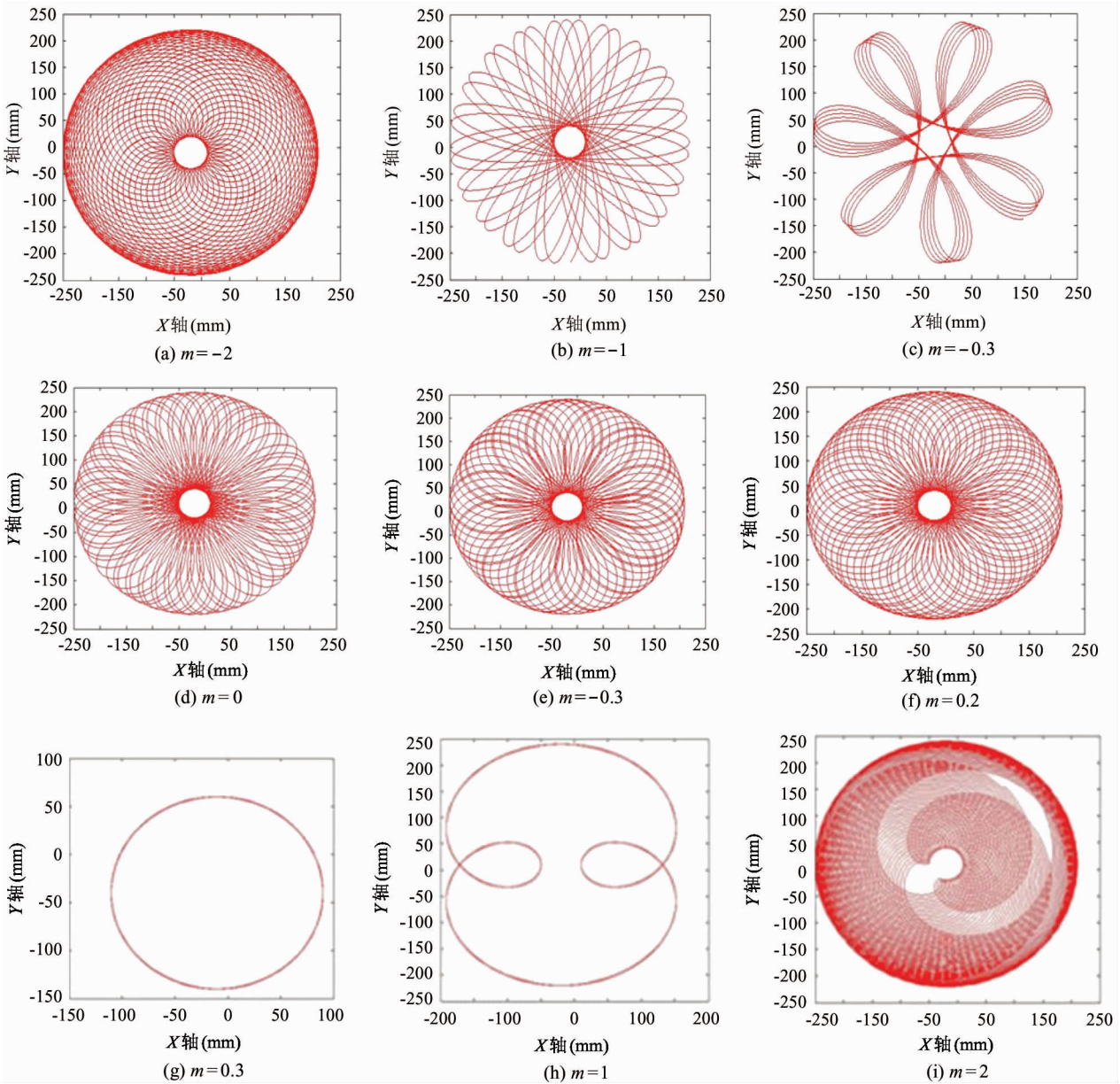


图 10 不同传动比 m 条件下点 p 的运动轨迹

3 实验

3.1 实验条件

本实验中依序采用粒度号为 500#、1000# 和 5000# 的 Al_2O_3 磨料对工件进行加工。在配制研磨液时,为了保证加工过程中圆柱工件持续稳定滚动,减少表面划擦,在研磨液中添加了少量的微乳化水溶性切削液,以起到润滑、防锈、冷却和分散效果,同时还添加了少量的金属清洗剂,以起到清洗工件表面,排除切屑和残留物质的效果。为获得精密圆柱

滚子,在圆柱滚子研磨加工后,还需精研和抛光加工。研磨的目的主要是修整圆柱滚子的几何精度和尺寸精度,精研和抛光的目的主要是改善圆柱滚子的表面质量。圆柱滚子双平面精研和抛光加工的实验条件如表 2 所示,实验装置如图 11 所示。

表 2 实验条件

参数名称	参数值
工件材料	轴承钢 GCr15
工件尺寸	$\Phi 20\text{mm} \times 30\text{mm}$
工件个数	一批 20 个

(表 2 续)

夹具	八边形孔,3 孔夹具
实验设备	改装后的 MS-6Sj 双平面研磨机,如图 11 所示
测量设备	德国 Mahr,MMQ400 型圆度仪,如图 11 所示
研磨盘	上下铸铁盘均贴上绒布抛光垫
研磨液配比 (质量分数)	磨料:切削液:清洗剂:水 = 20: 2: 1:100
磨料	500#,1000#,5000#的 Al_2O_3 微粉
研磨液供给 方式	喷射式,不循环
研磨盘转速	50rpm(旋钮刻度)
加工载荷	10N/每个工件



图 11 圆柱面高效超精密加工机

3.2 实验结果

轴承滚子圆柱面主要分 3 个阶段:粗研、精研和抛光。粗研的目的是快速减小圆柱工件的外圆尺寸和批直径变动量,精研的目的是进一步减小圆柱工件的批直径变动同时快速减小圆柱工件的圆度误差,抛光的目的是改善圆柱工件的表面质量同时进一步减小圆柱工件的圆度误差。

在上述实验条件下,对圆柱滚子进行精研和抛光,圆柱外圆批平均圆度变化如图 12 所示。当 5000#的 Al_2O_3 磨料对工件进行加工时,批平均圆度可以达到 $0.295\mu\text{m}$ 。

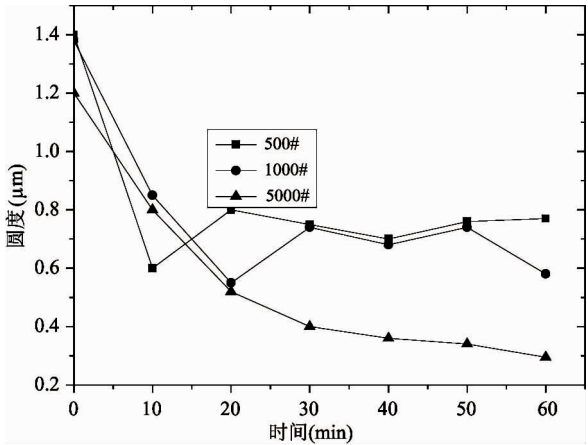


图 12 批平均圆度及其偏差随加工时间的变化

行星式双平面加工方式下,圆柱外圆表面粗糙度批平均 Ra 变化如图 13 所示。当 5000#的 Al_2O_3 磨料对工件进行加工时,圆柱外圆表面粗糙度批平均 Ra 可以达到 $0.054\mu\text{m}$ (54nm) (如图 14 所示)。微观加工纹路具有多向性(如图 15 所示)。公差等级达到了国家标准 0 级要求(如表 3 所示)。

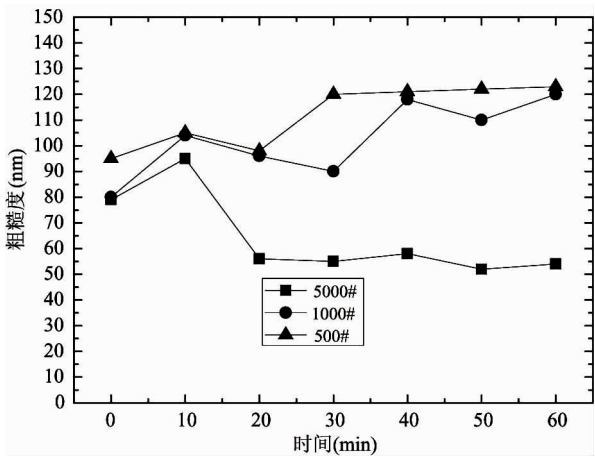


图 13 圆柱外圆表面粗糙度批平均 Ra 变化

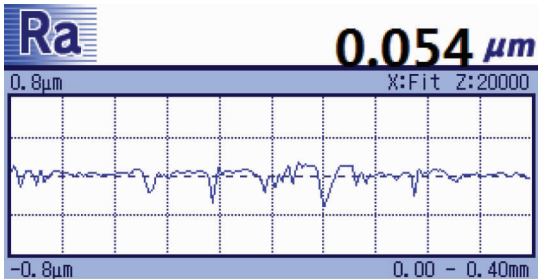


图 14 表面粗糙度 Ra 测量结果

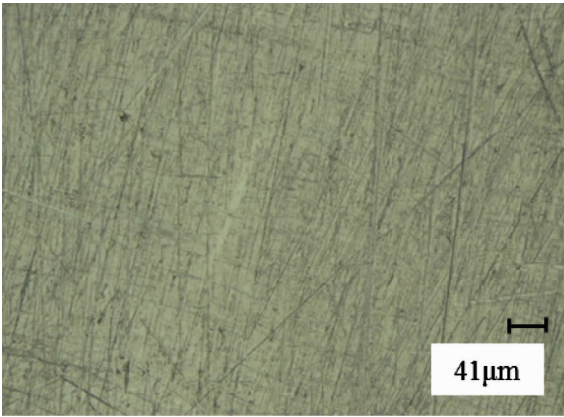


图 15 圆柱滚子外圆表面形貌(放大倍数 500x)

表 3 圆柱滚子国家标准 GB/T 4661-2002

公差级 (mm)	直径区间 (mm)	批直径变 动量(μm)	圆柱表面 粗糙度(μm)	圆度 (μm)
0	18 - 30	1	0.1	0.4
1	18 - 30	2	0.125	0.5

当 5000#的 Al_2O_3 磨料对工件进行加工时,圆柱批直径变动量如图 16 所示。

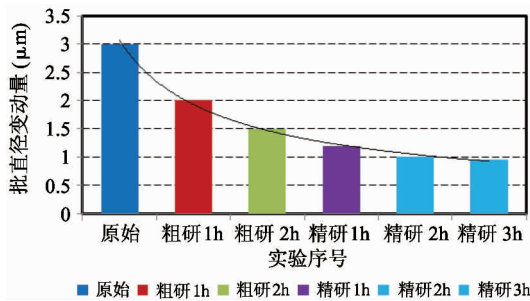


图 16 批直径变动量变化

4 结 论

本文对双平面方式圆柱外圆加工装置的关键零部件进行了仿真研究和实验研究,得出以下结论:

(1)分析了双平面加工圆柱滚子方式的一致化过程,该方法满足切削等概率性和尺寸选择性,它利用误差匀化原理可以轻易加工出高精度平面,因此利用双平面加工方式加工批量圆柱,保证其尺寸和精度的一致性,这是完全可行的。

(2)同时对保持架进行了模态仿真,研磨转速

要避开四阶固有频率,不会产生共振。研磨转速一般选择在 100 rpm 以下。

(3)对圆柱滚子加工轨迹的运动学和仿真分析,靠近研磨盘中心以及研磨盘边缘的轨迹线分布比较集中,而靠近研磨盘中间环带部分的轨迹线分布较为均匀。当 ω_p 在 40 ~ 60rpm 时轨迹相对比较均匀,且弯曲处过渡比较平滑。当 $m < -1$, $-0.3 < m < 0.3$ 时,点 p 的运动轨迹重合度较低而且分布均匀且密集,因此在实际的加工中应尽量选用在这个范围内的传动比。

(4)经过工艺实验研究,采用双平面方式对圆柱滚子进行超精研磨和抛光,工件的圆度误差达到了 $0.295\mu\text{m}$,批直径变动量达到了 $1\mu\text{m}$ 以下,表面粗糙度 R_a 达到了 $0.054\mu\text{m}$ 以下,圆柱滚子的表面质量可以达到镜面级别,微观加工纹路具有多向性。公差等级达到了国家标准 0 级要求。通过上述圆柱滚子双平面精研和抛光实验,证明该方法加工圆柱滚子的有效性,为圆柱滚子加工提供理论基础。

(5)本文未对加工过程的力学机理进行研究,同时未来可以对加工效率的提高进行研究。

参考文献

[1] 杨立芳,叶军. 高速加工中的机床主轴轴承技术[J]. 轴承, 2012(1) :751-754

[2] 顿涌泉. 滚动轴承制造装备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 5-6

[3] Lu D, Zhao W, Lu B, et al. Effects of rolling bearing type and size on the maximum eccentricity ratio of hydrodynamic rolling hybrid bearings[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(2) : 225-229

[4] Ye Z, Wang L, Gu L, et al. Effects of tilted misalignment on loading characteristics of cylindrical roller bearings[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2013, 69(6) : 153-167

[5] Kotzalas M, Harris T. Fatigue failure and ball bearing friction[J]. *Tribology Transactions*, 2000, 43(1) :137-143

[6] Albert J, Shi H, Nien L. Precision cylindrical face grinding[J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(3) :177-184

[7] 邵明杰. 滚子制造工艺[J]. 轴承. 1988(3) :59-61

[8] 夏新涛. 无心磨削的理论与实践[M]. 北京:国防工业

出版社, 2002. 55-60

[9] 李彬彬, 李娜. 铝合金加工无心磨削常见问题探讨 [J]. 中国高新技术企业, 2014(4): 35-36

[10] 刘振军, 张炳海. 无心磨床工件中心高 H 的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2017(7): 13-15

[11] 苏龙飞, 张岩. 托板位置在圆锥滚子外径磨削中的独

特作用. 哈尔滨轴承[J], 2007,28(1): 1-2

[12] 汪健, 崔程久. 空心圆柱滚子轴承在无心磨床上的应用[J]. 机床,1991(4): 39-42

[13] 傅志方, 宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000. 62-64

Research on high precision cylindrical roller processing method
based on double-plane even trajectory analysis

Zhong Meipeng, Yuan Julong, Yao Weifeng, Deng Qianfa

(Ultra-precision Machining Research Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

The accuracy and consistency of the ultra-precision cylindrical roller are hard to be guaranteed at the current stage. In this study, a method of machining the cylindrical roller by the planetary double-plane grinding is proposed. The machining principle is analyzed, and the modal of the cage is simulated. Based on the study of the double-plane machining trajectory of the cylindrical roller, it is found that the trajectories near the center of the grinding disc and the edge of the grinding disc are more concentrated while the trajectories near the middle of the grinding disc are more evenly distributed. The experimental device is designed and processed, the super fine grinding and polishing of cylindrical are carried based on double-plane even trajectory. Experimental results show that the circularity error of the workpiece can reach 0.51 μm , the variation of batch diameter reaches 1 μm , and the surface roughness Ra reaches 0.054 μm . The surface quality of the cylindrical roller can reach the mirror level, and the micro pattern is multi-directional. The tolerance level meets the national standard level zero requirement.

Key words: cylindrical roller, trajectory, even trajectory, ultra fine grinding