

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.008

弧面凸轮的行星式磨削机理研究

汲德安, 张敏良, 王 荣, 田 园

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘 要:磨削加工是弧面凸轮加工的一个重要工序,弧面凸轮的加工质量和精度与其密切相关。通过采用行星式磨削方法和单侧面磨削原理,在行星式磨削装置中增加微进给机构,通过监测装置所反馈的数据,使得砂轮在磨削过程中可以通过微进给机构增大砂轮的公转半径,实现砂轮的磨损补偿。弥补了行星式磨削方法不能在磨削时进行磨损补偿的缺点,从而能够实现弧面凸轮的连续磨削,提高了弧面凸轮的磨削效率和磨削精度。

关 键 词:弧面凸轮;行星式;单侧面磨削;微进给

中图分类号:TH112.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)03-0030-05

Research of Planetary Grinding Mechanism of Globoidal Cam

Ji Dean, ZHANG Minliang, WANG Rong, TIAN Yuan

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Grinding is an important process in machining of globoid indexing cam. It is closely related to the cam processing of quality and precision. By using the grinding method of planetary and one-side grinding principle, the micro feed structure was put in the planetary grinding device. With the monitoring device by the feedback data, it made the grinding wheel radius increase in the grinding process by micro-feeding structure and realized wear compensation of wheel. At the same time, it also overcame the disadvantage that it couldn't achieve wear compensation during grinding, which could realize continuous grinding of globoid indexing cam, and improve grinding efficiency and accuracy of globoidal cam.

Key words: globoidal cam; planet; one-side grinding; micro-feeding

弧面凸轮分度机构与其它间歇传动机构相比具有结构简单、分度精度高、工作可靠、传动扭矩大等特点,因此广泛用于机械、制药、烟草、包装、高速、高精度场合等相关产业^[1]。弧面凸轮制造加工较困难,一般采用专用数控车床^[2-4]或五轴联动数控车床^[5]。国内一般采用专用车床进行弧面凸轮的磨削加工,其磨削的表面粗糙度一般为1.6左右,分割精度在15"~30"之间,国内与国外存在着一定的差距。弧面凸轮工作性能决定材料的性质,通常为20CrMnTi等硬质材料,砂轮磨削时磨损较快,因此,在磨削过程中需要对砂轮进行磨损补偿,传统的加工过程中在磨损补偿时不能实现连续磨削,这就降低了磨削效率,有时还可能影响到

凸轮的磨削精度。因此,本文通过采用微进给机构实现砂轮的磨损补偿和弧面凸轮的连续磨削,提高磨削效率和精度。

1 弧面凸轮磨削的工作原理

在行星式结构的基础上加上一个微进给结构(见图1),该结构是通过机械传动方式实现直线微进给运动,采用螺母和丝杠相结合的方式。

弧面凸轮在磨削时,通过主轴、自转轴和微进给机构带动砂轮磨头转动和实现微进给补偿运动。砂轮在高速绕自身轴线旋转的同时也在绕主轴轴心进行行星式的公转运动;整个装置在磨削弧面凸轮过程中遵循从动件运动规律往复摆动。当砂轮磨损后,检测装置

收稿日期:2013-11-27;修回日期:2013-12-17

基金项目:上海工程技术大学科研创新项目:弧面凸轮行星式磨削机理研究(13KY0101)

作者简介:汲德安(1989),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为机械制造自动化、流体机械。E-mail:jidean2012@163.com

测得砂轮的磨损量以及凸轮的磨削情况,然后把磨削参数反馈到控制系统,控制系统对微进给装置进行调节,通过增大公转半径 e 来实现砂轮磨损补偿,使得磨损的砂轮在行星式磨削的方式下获得与未磨损砂轮有相同的磨削效果。从粗磨到半精磨再到精磨的全过程不需要更换砂轮,只需调整公转半径 e 即可满足弧面凸轮磨削加工的要求。在调整公转半径 e 时,不需要中断磨削过程,微进给装置可以进行实时调整,进行在线进给补偿,从而保证整个磨削过程的连续性。目前弧面凸轮磨削装置中还可以通过赵虎等^[6]提出的变砂轮变径来控制磨削的连续性。图2为微进给结构径向剖面图。整个磨削装置安装在如图3所示的磨床结构中,通过摆动盘带动磨削装置实现磨削摆动。

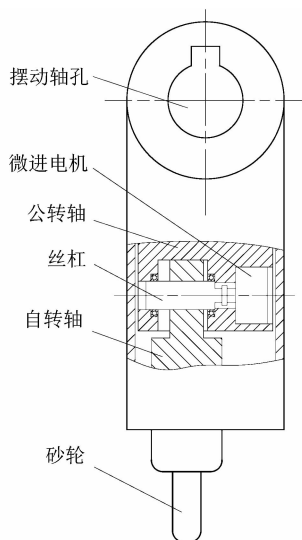


图1 磨削装置结构简图

Figure 1 Structure diagram of grinding device

在磨削过程中借鉴卜凡华^[7]所研究的磨削工艺和采用尹明富等^[8]提出的单侧面磨削方法,即砂轮球头半径小于滚子半径或其直径小于沟槽宽度,砂轮中心位于沟槽表面的等距曲面上。单侧面方法不存在砂轮在磨削过程中被挤碎的情况,同时消除了凸轮表面烧伤现象。单侧面磨削相对其它磨削方式,有利于提高弧面凸轮的分度精度和定位精度。行星式微进给弧面凸轮磨削方法是把行星式磨削、单侧面磨削和微进给原理结合使用,利用各原理的优点提高弧面凸轮磨削装置的磨削精度。

2 磨削进给量计算

采用行星式磨削方式磨头结构的主要参数(如图4所示),砂轮半径为 r ,公转半径为偏心距 e ,行星式转动半径为 R ,其中 $R = e + r$,在磨削转动过程中,磨削装

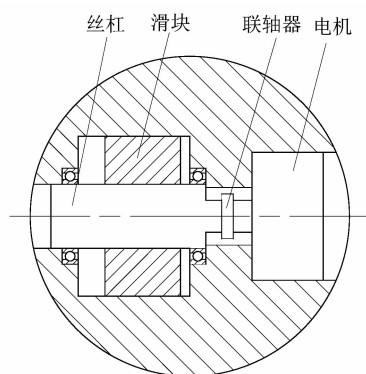


图2 微进给结构剖面图

Figure 2 Profile diagram of micro feed structure

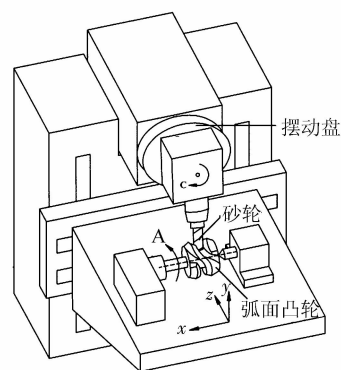


图3 弧面凸轮加工装置

Figure 3 Device of globoidal cam machining

置总长度可以等效为图4中斜线长度 L ,则

$$L = \frac{e}{\sin \beta} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \beta = \arctan \frac{e}{L_1 + L_2}$$

在磨削过程中当砂轮出现磨损需要进给补偿时,设砂轮磨损量为 Δr ,进给量为 Δe ,弧面凸轮和砂轮接触处磨除量为 s ,进给之后公转半径变大为 $e + \Delta e$,行星式磨削半径变为 $e + \Delta e + r - \Delta r$,在进给之后要满足磨削要求则有

$$R + s = e + \Delta e + r - \Delta r \quad (2)$$

可以简化为

$$s = \Delta e - \Delta r \quad (3)$$

上式(3)是砂轮进给量和磨损量之差恰好等于弧面凸轮的磨去量,对弧面凸轮继续磨削时,每次进给量 Δe 要保证

$$\Delta e > s + \Delta r \quad (4)$$

例如经粗磨两侧型面之后,单边留余量为0.15 mm,通过增大进给量实现增大磨削公转半径,继续以该砂轮进行半精磨加工使单边精磨余量达到0.02 ~

0.04 mm,最后进行精磨加工使得弧面凸轮轮廓精度达到0.002 mm。在粗磨—半精磨—精磨的全过程中通过合理的选择进给量 Δe 来保证加工效率和加工质量,精磨时其原则是 Δe 越小越好,从而保证弧面凸轮轮廓面的精度。

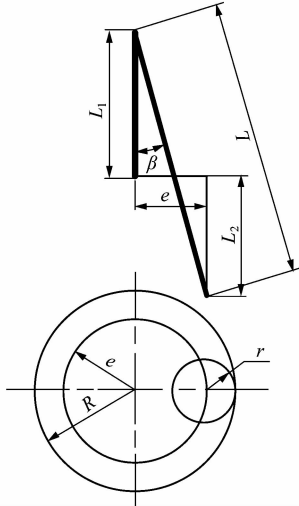


图4 砂轮转动原理图

Figure 4 Principle diagram of cutter rotation

在增大回转半径的同时,刀具杆长度也会相应增加,其增加量为 ΔL

$$\Delta L = \frac{e + \Delta e}{\sin \beta} - \frac{e}{\sin \beta} \quad (5)$$

式中 $\beta = \arctan \frac{e + \Delta e}{L_1 + L_2}$

弧面分度凸轮工作轮廓的曲面方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \cos \phi \cos \theta - R_0 \cos \beta_0 \sin \phi \cos \theta - \\ -L_0 \cos \phi \sin \theta + R_0 \cos \beta_0 \sin \phi \sin \theta - \\ L_0 \sin \phi + R_0 \cos \beta_0 \cos \phi \\ R_0 \cos \beta_0 \sin \theta - C \sin \theta \\ R_0 \cos \beta_0 \cos \theta + C \sin \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

对应的接触角为

$$\beta_0 = \arctan \frac{L_0}{C - L_0 \cos \phi} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (7)$$

式中: L_0 是从动盘圆心到圆柱滚子与凸轮接触点距离; R_0 是滚子半径; ω_1 是弧面凸轮的角速度; ω_2 是从动盘的角速度; ω_2/ω_1 为分度机构的瞬时角速度之比; C 为中心距; θ 是弧面凸轮转角; ϕ 为从动盘上滚子的位置角即滚子的起始位置与滚子的角位移之和。

当采用行星式磨削微进给量为 Δe 时

$$L_0 = L + \Delta L \quad (8)$$

砂轮和凸轮的接触角变为

$$\gamma = \arctan \frac{L + \Delta L}{C - (L + \Delta L) \cos \phi} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (9)$$

根据曹巨江等^[9]和刘兴亮等^[10]提出的单侧面磨削加工凸轮实际轮廓面方程的推导和计算方法进行推导计算微进给磨削方式的方程,得出砂轮中心线的轨迹方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L + \Delta L) \cos \phi \cos \theta - (\Delta R + \Delta e) \cos \gamma \sin \phi \cos \theta - \\ - (L + \Delta L) \cos \phi \sin \theta + (\Delta R + \Delta e) \cos \gamma \sin \phi \sin \theta - \\ (L + \Delta L) \sin \phi + (\Delta R + \Delta e) \cos \gamma \cos \phi \\ (\Delta R + \Delta e) \cos \gamma \sin \theta - C \sin \theta \\ (\Delta R + \Delta e) \cos \gamma \cos \theta + C \sin \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\Delta R = R_0 - R + e$

$$\gamma^0 = \arctan \frac{(L + \Delta L) \frac{\omega_2}{\omega_1} - (\Delta R + \Delta e) \sin \phi \sin \gamma}{(L + \Delta L) \cos \phi - (\Delta R + \Delta e) \sin \phi \cos \gamma - C} \quad (11)$$

在设计磨削结构时要综合考虑进给量 Δe 和杆增长量 ΔL 与杆长 L_1 、 L_2 和偏心距 e 之间的关系。磨削进给量补偿的同时对具有从动件运动规律的刀具也要进行相应的扭矩补偿^[11]。

磨削时为了保证轮廓面的磨削质量和提高磨削效率的情况下,各转轴的转速选择至关重要,公转轴即行星轴转速选择时要考虑行星式磨削中振动问题,因此速度不能太高,但是速度低时会影响磨削的效率,一般取1 000 ~ 1 200 r/min;自转轴和砂轮相连要求高转速才能保证加工表面质量,一般取30 000 ~ 45 000 r/min;对于弧面凸轮转速要与整个磨削装置的摆动速度遵循啮合运动规律,其转速一般不会太高,可根据磨削情况来确定。

3 建模仿真运动分析

弧面凸轮展成平面图(如图5)用来分析整个刀具的摆动情况^[12],在磨削过程中弧面凸轮做旋转运动,其旋转是有一定规律的,该处砂轮磨削时,为了使砂轮能够快速往复摆动,弧面凸轮左转2圈后再右转2圈依次周期循环,一个周期内砂轮往复摆动一次实现对砂轮完整磨削,整个刀具在磨削过程中的摆动角度情况遵循图6所示情况,图6中2条曲线分别代表凸轮左转和右转时砂轮在理想情况下的摆角摆动情况。关于砂轮或从动转轮的运动规律已经得到了相关研究^[13]。

为了验证上述理论分析,建立仿真模型(如图7),

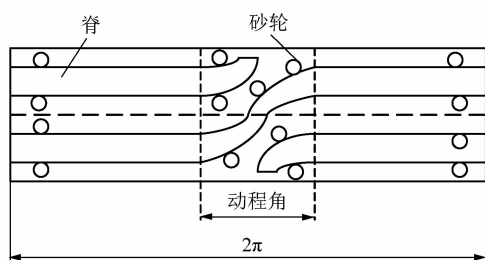


图5 弧面凸轮展开平面图

Figure 5 Globoidal cam expansion plan

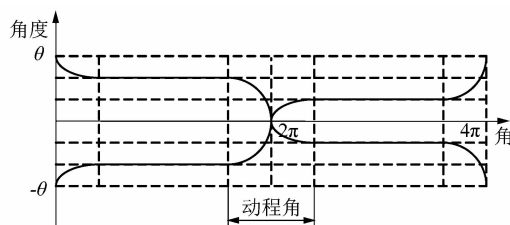


图6 刀具摆动角位移

Figure 6 Tool swinging angle displacement

图中弧面凸轮直径为 75 mm, 长度为 50 mm, 最小槽宽处为 16 mm, 槽深为 10 mm; 磨削结构装置如图 7 中所示零件组成, 机身所表示的固定轴的轴线与弧面凸轮的轴线垂直且位于弧面凸轮长度一半的正上方, 其轴心到弧面凸轮槽内的总长度 230 mm, 包括自转轴前段安装直径为 10 mm、长度为 15 mm 的磨削砂轮(材料一般为高硬度的聚晶立方氮化硼)。

在仿真分析中, 把机身和弧面凸轮上的 2 个轴承设为固定件, 摆动轴与机身之间施加转动副, 同样在摆动轴与公转轴、微进给滑块与自转轴、轴与 2 个轴承之间、微进给丝杠和公转轴之间都要施加转动副; 微进给丝杠与滑块之间施加螺旋副, 且滑块与转动轴之间施加移动副。各结构之间运动副施加完成之后, 再分别在公转轴处转动副、自转轴上的转动副和轴上的转动副上分别施加驱动为 $1\,000\text{ }^\circ/\text{s}$, $25\,000\text{ }^\circ/\text{s}$, $173\text{ }^\circ/\text{s}$, 微进给丝杠处施加 $5\text{ }^\circ/\text{s}$, 时间设为 2 s, 步长为 500。下面为凸轮转向不同时摆动轴随时间摆动的角度仿真分析。

当凸轮转向从左侧看为顺时针方向时, 整个磨削装置向右摆动, 其摆动情况如图 8 所示。

当凸轮转向从左侧看为逆时针方向时, 整个磨削装置向左摆动, 其摆动情况为图 9 所示。

从上述摆动轴所摆动的角度图可知摆动轴摆动的最大摆角为 $-6.5^\circ \sim 6.5^\circ$, 以及摆角随时间的变化规律, 该仿真分析在 2 s 时间弧面凸轮正转一圈或反转一圈时摆动轴摆动角度变化情况, 它与上述理论分析

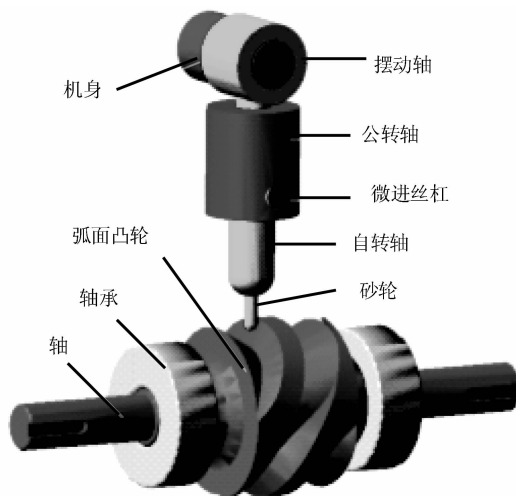


图7 磨削装置模型

Figure 7 Grinding device model

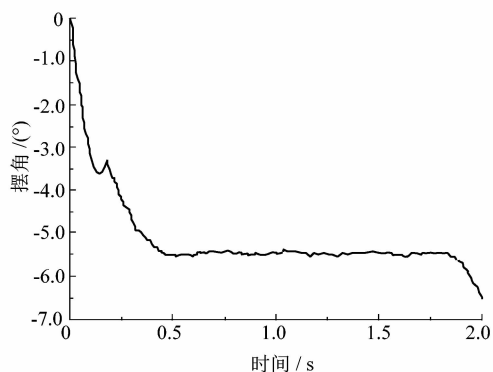


图8 向右摆动角位移

Figure 8 Swinging to the right angle displacement

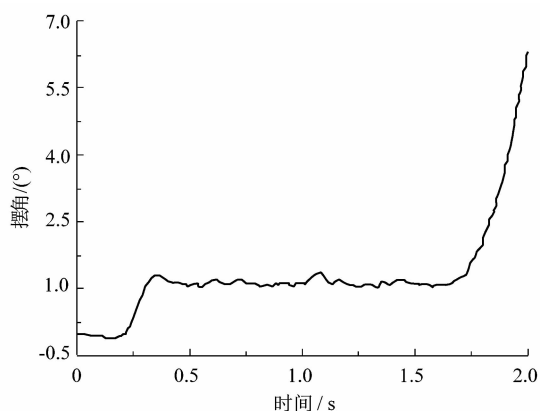


图9 向左摆动角位移

Figure 9 Swinging to the left angle displacement

中摆角随弧面凸轮旋转角度变化结果相同。该仿真是建立在摆动轴处转动副没有施加驱动时情况, 把其视为从动件, 通过分析磨削装置在弧面凸轮磨削时摆动情况, 确定磨削装置的运动规律, 进而实现弧面凸轮磨

削加工,为实现弧面凸轮行星式磨削装置设计提供相关参数和理论依据。

4 结论

本文提出的行星式弧面凸轮磨削装置是在行星式磨削装置中增加可以进行磨损补偿的微进给结构。在行星式弧面凸轮单侧面磨削过程中使用微进给机构对砂轮磨损进行在线补偿,有利于提高凸轮的磨削效率、分度精度、定位精度等。行星式微进给单侧面磨削方法与其它凸轮磨削方法相比更具有优越性,它综合了行星式和单侧面2种方法的优点,再结合微进给原理实现磨损补偿,从理论上可以提高凸轮的磨削效率和精度。从实际的磨削装置而言,该磨头装置较一般磨削方法的装置复杂,但整个凸轮磨削机床相比五轴连动车床,其价格相对较低,经济性好;磨削精度通过调整微进给量,可接近五轴连动车床的磨削精度。相对一般弧面凸轮磨削车床,行星式微进给单侧面磨削车床的磨削精度高、磨削效率高。文中所述磨削装置采用了行星式磨削方法,除了上述所述的优点之外,也存在着缺点,一是该磨头装置结构复杂,二是行星式磨削时由于偏心作用会造成磨削时振动。

参考文献:

- [1] 胡国胜,戎磊杰. 弧面分度凸轮机构在 YB47 型硬盒包装机包装轮中的应用[J]. 设备与仪器, 2011(7): 15-17.
- [2] 刘兴亮. 加工弧面凸轮专用数控磨床的结构研究[J]. 机床与液

=====

(上接第 29 页)

实验结果中圆柱零件的圆度、直线度、平行度已达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,与初始精度相比参数组合优化效果显著。

4 总结

1) 试验在行星式双平面研磨机上进行了圆柱滚子正交试验,并使用信噪比(S/N)评价、ANOVA 方差分析为试验提供分析方法。

2) 试验结果表明选取 4000#氧化铝磨料,磨料质量分数在 25% 左右,研磨盘转速为 $50\ \text{r/min}$ 、夹具偏角为 0° ,为优化后的参数组合。在此条件下,可以实现大多数工件的圆度、直线度、平行度均达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,精度改善显著。

3) 本文只是探索了磨粒粒度、研磨盘转速、以及夹具孔偏角对滚子质量的影响程度,并没有涉及磨粒浓度、载荷、加工时间对滚子质量的影响,对滚子加工来说还不是真正意义上的优化,因此希望在以后的研究中进行更加深入地探究。

参考文献:

- [1] 夏新涛,李航,郝钢. 无心磨削的理论与实践[M]. 北京:国防工业

压, 2009, 37(5): 62-63.

- [3] 吴兴,黄文广,黄兴红,等. 数控随动磨床加工凸轮方法及其精度补偿策略[J]. 机电工程, 2012, 29(6): 636-639.
 - [4] 王芳,郑新. 模切机传纸机构驱动凸轮参数化设计[J]. 轻工机械, 2011, 29(1): 33-35.
 - [5] 胡自化,杨冬香,徐宏,等. 弧面凸轮多轴数控加工编程系统的研究[J]. 湘潭大学学报:自然科学版, 2007, 29(2): 105-110.
 - [6] 赵虎,谢正平. 基于变径砂轮磨削的弧面凸轮磨削中心: 中国, 201110144459. 5[P]. 2011-11-16.
 - [7] 卜凡华. 加工中心自动换刀装置(ATC)弧面凸轮加工工艺研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
 - [8] 尹明富,赵镇宏. 弧面分度凸轮单侧面加工原理及刀位控制方法的研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2): 127-130.
 - [9] 曹巨江,李言,刘兴亮. 弧面凸轮的单侧面磨削加工研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 9(4): 514-523.
 - [10] 刘兴亮,曹巨江. 弧面凸轮的单侧磨削加工研究[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 177-179.
 - [11] KUANG Jao-hwa, HSU Chao-ming, HU Chin-che. Dynamic behavior of globoidal cam systems with torque compensation mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8): 1201-1214.
 - [12] TSAY D M, HO H C. Consideration of manufacturing parameters in the design of grooved globoidal cam indexing mechanisms[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215(1): 95-103.
 - [13] TSAY D M, LIN B J. Design and Machining of Globoidal Index Cams[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119: 21-29.
- 出版社, 2002.
- [2] 丁东辉,戴勇,何瑞江,等. 轴承球研磨运动特性及其影响因素分析[J]. 轻工机械, 2012, 30(3): 77-80.
 - [3] 赵文宏,楼一兵,赵蓉,等. 精密球体研磨机压力控制系统设计[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 111-114.
 - [4] 邵明杰. 滚子制造工艺[J]. 轴承, 1988(3): 59-61.
 - [5] ZHOU S S, LINDSAY R P. Improving workpiece roundness through centerless grinding cycle optimization[J]. Annals of the CIRP: Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 217-222.
 - [6] ROWE W B, KOENINGSBERGER F. The work regenerative effect in centerless grinding[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1965, 4(3): 175-187.
 - [7] 蒋沂萍. 混合轴承及陶瓷球研制近况[J]. 轴承, 2001(2): 33-35.
 - [8] 夏新涛,马伟,顾谭成. 滚动轴承制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
 - [9] WU Y. Taguchi methods case studies from the US and Europe[M]. Dearborn, MI: ASI Press, 1989.
 - [10] COCHRAN W G, COX G M. Experimental designs[M]. 2nd. New York: Wiley, 1968.
 - [11] STONE R A, VEEVERS A. The Taguchi influence on designed experiments[J]. Journal of Chemometr, 1994(8): 103-110.