DOI: 10.3901/JME.2013.17.026

微圆弧刃金刚石车刀在线图像测量方法*

仇中军¹ 房丰洲¹ 赵群章¹ 周立波²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;
2. 日本茨城大学智能系统工程系 日立 316-8511 日本)

摘要: 为摆脱传统圆弧刃金刚石车刀制造对操作者技能熟练程度和经验的依赖, 并克服制造过程中需反复离线测量的缺点, 利用在线图像测量方法代替传统制造方法中的离线测量, 将获取的切削刃的形状信息和位置信息实时反馈给控制系统, 直接驱动研磨系统带动金刚石车刀按照最优的加工策略针对性的进行切削刃轮廓自动研磨和修整。通过比较三种车刀切削刃圆弧获取方法的效率及精确性, 确定获取金刚石车刀切削刃圆弧中心及研磨系统的旋转中心的最佳图像处理方法。利用在线获取金刚石车刀切削刃圆弧中心及实时计算其与研磨系统的旋转中心距离, 实现初始装夹时金刚石车刀位置的实时调整, 从而消除初始安装误差切削刃加工精度及效率的影响。开发适用于微圆弧刃金刚石车刀测量的图像测量系统, 实际测量验证试验表明, 利用开发的在线图像测量方法获得的切削刃轮廓信息从原理上更准确, 从而为实现圆弧刃金刚石车刀高效、高精度、低成本的稳定加工提供了保证。

关键词: 金刚石车刀 图像处理 在线测量 研磨

中图分类号: TG712

Online Image Measurement Method for Micro-round Nose Diamond Turning Tools

QIU Zhongjun¹ FANG Fengzhou¹ ZHAO Qunzhang¹ ZHOU Libo²

(1. State key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072;
2. Department of Intelligent System Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan)

Abstract: In order to overcome the constraints of the traditional manufacturing method of diamond turning tool that the fabrication process relies on the operator's skill and experiences and needs repeated offline measurements, an online image measurement method is used to replace the offline measurement in the traditional manufacturing method. According to the information of cutting edge shape and location, the grinding system automatically drives the diamond turning tool to grind the edge contour pertinently through optimal processing strategies. The optimal image processing methods for obtaining the center of diamond turning tool cutting edge and center of rotation of the grinding system are determined through a comparison of the efficiency and accuracy of the three methods for obtaining tool cutting edge. By adjusting the distance between the center of diamond turning tool cutting edge and center of rotation of the grinding system on real time, the initial clamping error which influences the precision and efficiency of cutting edge processing is eliminated. An image measurement system suitable for measuring micro-round nose diamond turning tool is developed. The experiments show that the obtained information of cutting edge contour using the developed online image measurement system is more accurate, accurate, and the highly efficiency, high precision, low-cost and stable manufacturing of micro-round nose diamond turning tool is guaranteed.

Key words: Diamond turning tool Image processing Online measurement Grinding

0 前言

目前, 使用圆弧刃单晶金刚石车刀进行超精密

车削的方法被认为是实现复杂形状加工的最佳方法之一^[1-4]。单晶金刚石具有摩擦因数低、导热率高、硬度高以及可加工出接近原子尺寸级的锋利刃口等特点, 是理想的复杂型面超精密加工刀具材料^[5-6]。和直线刃车刀相比, 圆弧刃金刚石车刀在进行复杂型面微细切削过程中对刀容易, 更易形成对切屑、

* 国家自然科学基金(50905125)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA040405)和天津市自然科学基金(12JCZDJC27900)资助项目。
20121012 收到初稿, 20130420 收到修改稿

切削力的稳定控制, 能够获得较高的复杂曲面形状精度^[7-8], 因此高精度微圆弧刃金刚石车刀的市场需求不断扩大。但是单晶金刚石属于立方晶系, 其外观型面多表现为正六面体或者正十二面体, 车刀制造过程中仅靠研磨金刚石刀具毛坯前、后刀面很难形成高精度圆弧切削刃, 而且微观上单晶金刚石表现为每个晶面上原子排列形式、原子密度以及各晶面之间的距离都不同, 从而形成天然金刚石晶体的各向异性, 使切削刃不同处位置在相同研磨工艺下材料去除难易程度不同, 造成了车刀切削刃的刃型误差^[9-10]。因此为使金刚石形成圆弧状切削刃, 就必须要对切削刃形状进行有针对性的圆弧修整加工, 以确保金刚石车刀切削刃的轮廓度符合超精密加工要求。

目前, 微圆弧刃金刚石车刀切削刃的制造大部分仍然是由熟练技工手工操作或半手工操作来完成。加工过程中, 为保证切削刃的刃型精度需要利用显微镜、投影仪以及非接触形状测定装置等进行离线测量, 这种加工方式使切削刃研磨质量极易受操作者技能水平、经验等主观因素影响, 同时研磨过程中多次的离线测量使得加工过程无法连续进行, 车刀每次重新装夹容易形成二次装夹误差。而且仅靠技工的手工操作和肉眼观察很难准确地实现对切削刃轮廓的针对性修整。很难保证被制造的金刚石车刀具有稳定的刃型精度, 生产效率较低, 严重阻碍了相关产业的进一步发展^[11]。

针对以上问题, 本文提出了基于在线图像测量的圆弧刃金刚石车刀自动研磨方法。利用在线图像测量方法代替传统制造方法中的离线测量, 将在线获取的切削刃的形状信息和位置信息反馈给控制系统, 驱动研磨系统带动金刚石车刀按照最优的加工策略自动有针对性地进行研磨和修整, 消除由单晶金刚石各向异性造成的刃型误差。在这个方法中, 金刚石车刀切削刃的在线测量起着至关重要的作用, 它决定了金刚石车刀切削刃轮廓信息(形状误差、位置信息)的获取精度和速度, 进而影响着后续的金刚石车刀切削刃的制造精度和效率。本文针对金刚石车刀研磨过程中的在线图像测量方法进行研究, 确定获取金刚石车刀切削刃圆弧中心及研磨系统的旋转中心的最佳图像处理办法, 在初始安装时实时进行二者间的距离, 消除初始安装误差切削刃加工精度及效率的影响, 并开发适用于微圆弧刃金刚石车刀测量的图像测量系统, 实现微圆弧刃金刚石车刀高效高精度在线测量。

1 圆弧刃金刚石车刀创成原理及系统

根据几何原理, 金刚石车刀圆弧刃可以由研磨盘直线包络车刀围绕圆弧中心的旋转运动形成。同时, 为控制车刀圆弧半径 r , 并对其施加稳定的研磨压力, 还需要保证研磨车刀过程中有直线进给运动功能。圆弧刃的创成原理如图 1 所示。研磨时, 无论车刀前端的形状如何, 最终所形成的圆弧状切削刃的中心 (x_a, y_a) 一定是和系统的摆动中心 (x_0, y_0) 重合的。切削刃圆弧半径 r 由车刀进给的长度来控制, 研磨形成的切削刃上任一点 (x_i, y_i) 距理想圆弧中心即系统的摆动中心的距离 r_i 可以由式(1)表示

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (1)$$

该点的位置可以用该点和车刀圆弧中点连线与切削刃圆弧中点公法线 OO' 形成的角度 θ_i 来表示, 由式(2)计算

$$\theta_i = \arctan \frac{x_i}{y_i} \quad (2)$$

图1 金刚石车刀圆弧切削刃创成原理图

由于金刚石的各向异性, 在相同的压力作用下切削刃上的不同点处的去除量不同, 因此造成成形后的切削刃上不同点处的 r_i 也不同, 形成了圆弧切削刃的形状误差。该误差值 Δr_i 可以由式(3)得到

$$\Delta r_i = r_i - r \quad (3)$$

由以上分析可知, 如果能够在线测得圆弧切削刃上各点的位置 θ_i 和 r_i (或者 Δr_i) 值, 那么在研磨过程中通过控制不同点处的研磨压力和驻留时间就可以实现对切削刃有针对性的研磨, 从而提高圆弧切削刃的形状精度。

因此, 提出基于在线图像测量的圆弧刃金刚石车刀研磨方法^[11]。该方法如图 2 所示。车刀被固定在旋转工作台上, 旋转工作台被固定在垂直进给工作台上, 通过进给工作台的进给可以调节车刀与研

磨盘接触的压力和车刀切削刃圆弧半径。在金刚石车刀相对侧安装有 CCD 相机, 利用 CCD 相机可以将车刀图像在线采集到计算机中, 通过一系列的图像处理能够获得车刀切削刃上各点的形状信息(Δr_i)和位置信息(θ_i), 将这些信息反馈给控制系统后, 就可以通过控制研磨压力和驻留时间, 对切削刃上去除残余或者崩坏部分进行有针对性的研磨, 弥补由于单晶金刚石各向异性造成的去除量不均产生的误差。同时, 由于实现了在位自动测量, 避免了传统的依靠手工操作、肉眼观察测量的缺点, 排除了人为主观因素的干扰。

图2 基于在线图像测量金刚石车刀研磨方法概念图

根据金刚石车刀圆弧刃创成原理可知, 圆弧切削刃的成形研磨由旋转工作台带动车刀摆动完成。车刀初始安装时存在着研磨系统旋转中心和车刀切削刃圆弧中心两个中心。车刀初始安装时, 车刀圆弧圆心和系统旋转中心如果不一致, 就会形成初始安装误差。初始安装误差过大, 会直接影响到圆弧刃金刚石车刀切削刃形状精度和加工效率, 严重时甚至会导致无法形成正确的切削刃形状。

2 基于在线图像识别的装夹误差消除

2.1 金刚石车刀切削刃圆弧中心的获取

通过上述分析可知, 在圆弧刃金刚石车刀研磨开始前, 切削刃的圆弧中心(x_a, y_a)和研磨系统的旋转中心(x_0, y_0)间的安装误差会直接影响到车刀的研磨效率和精度, 甚至会导致无法形成正确的切削刃型。因此必须在车刀初始装夹时尽量使两个中心重合, 以保证在最小的研磨去除量的前提下获得最高精度的圆弧切削刃。当垂直进给工作台固定不动时, 系统的摆动中心是不变的, 因此, 为使两个中心达到重合, 只要在安装的时候调整车刀, 使车刀的切削刃圆弧中心靠近系统旋转中心, 并最终使二者重合。这就需要图像测量系统能够快速准确地捕捉到切削刃的圆弧中心。

获得金刚石车刀切削刃的圆弧中心, 可以通过三种图像处理方法实现: ① 圆弧拟合法, 对 CCD 采集的每帧图像进行一系列的图像预处理(平滑、二值化)后, 利用 Laplace 算子考察图像的每个像素在某个邻域内灰度的变化, 利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律来提取金刚石车刀图像的轮廓, 由于提取处的轮廓包括了两侧棱线(非切削刃)和前端的圆弧线(切削刃), 根据 Ramer 算法对提取到的轮廓进行递归细分, 并将其分割为圆弧和直线两部分, 并求得构成圆弧的点群坐标值, 利用这些点群信息, 基于最小二乘法进行圆弧拟合, 得到圆弧部分在图像坐标系内的圆心坐标; ② 形状模板匹配法, 在首次采集到的金刚石车刀图像上, 基于 Sobel 等边缘提取算子提取出车刀前端轮廓, 将车刀圆弧切削刃轮廓部分的点群及方向矢量信息建立模板, 利用此模板对 CCD 后续采集到的金刚石车刀图像进行匹配, 从而得到车刀切削刃圆弧中心在图像坐标系的坐标值; ③ 灰度值模板匹配法, 此方法和形状模板匹配法类似, 将首次采集到的图像指定区域的灰度分布作为模板, 和后续循环采集到的图像进行匹配, 从而得到金刚石车刀切削刃圆弧中心。

分别利用以上三种方法对同一金刚石车刀图像进行切削刃圆弧中心识别, 比较三种方法的实时性。各方法识别所消耗的时间如图 3 所示。

图3 金刚石车刀切削刃圆弧中心识别时间

从图3中可以看出, 实时性最差的是基于灰度值的模板匹配方法, 测量效率为 1.3 s; 基于形状模板匹配方法实时性最好, 可以达到 0.7 s 的测量效率, 仅为基于灰度值匹配方法的二分之一左右。

图像识别系统对金刚石车刀切削刃圆弧中心的获取不仅要迅速, 而且还要准确, 否则容易造成装夹误差增大。图像识别误差主要是由于光源的非稳定照射及周围环境因素变化造成的。为了比较三种方法获取车刀切削刃圆弧中心的准确性, 分别利用三种图像识别方法对静止不动的金刚石车刀进行 1 000 次的切削刃圆弧中心提取, 并计算获得的圆弧中心坐标 x_a 、 y_a 的方差, 分别如图 4 所示。

图4 不同方法获取切削刃圆弧中心方差

通过对方差的计算发现，形状模板匹配法获取的切削刃圆弧中心无论是坐标 x_a 还是坐标 y_a 的方差都要远小于其他两种方法，表明这种方法测得结果的平均偏离程度较小，数据的波动性最小，因此测量的稳定性最高。进一步统计获取切削刃圆弧中心落入误差范围的次数，如表1所示。从表1中可以看出，基于形状的模板匹配方法 x_a 、 y_a 、 (x_a, y_a) 在小于等于 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的次数分别为616, 406, 255，在小于 $\pm 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 范围内次数分别为933, 768, 730，均多于其他两种方法；而在大于等于 $\pm 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的次数分别为67, 232, 27，远少于其他两种图像识别方法，可见基于形状模板匹配法获得的切削刃圆弧中心准确性和精确性最高，受环境变化因素影响最小，其鲁棒性要优于其他两种图像识别方法。因此本研究采用形状模板匹配法进行圆弧刃金刚石车刀圆心的获取。

表1 不同误差带内三种方法获取坐标统计

误差范围/ μm	比较点	圆弧拟 合法	形状模板匹 配法	灰度值模 板匹配法
$-0.5 \leq \delta \leq 0.5$	坐标 x_a	406	616	457
	坐标 y_a	355	406	258
	坐标 (x_a, y_a)	146	255	144
$-1.0 \leq \delta \leq 1.0$	坐标 x_a	818	933	795
	坐标 y_a	606	768	526
	坐标 (x_a, y_a)	535	730	452
$ \delta > 1.0$	坐标 x_a	182	67	205
	坐标 y_a	394	232	474
	坐标 (x_a, y_a)	165	27	148

2.2 研磨系统的旋转中心的获取

实现了金刚石车刀切削刃圆弧中心的在线获取，那么就可以根据获取的切削刃圆弧中心坐标计算其与研磨系统旋转中心的距离，并调节车刀位置使其切削刃圆弧中心和系统旋转中心重合。由于获取的切削刃圆弧中心坐标是在 CCD 的图像坐标系内，为了便于计算还需要得到系统旋转中心在图像坐标系内的坐标。根据金刚石车刀圆弧刃创成原理，研磨过程中研磨系统的摆动中心是固定的，因此，

根据几何学原理，只要装夹时金刚石车刀上任意有一点和系统旋转中心重合时，那么当系统带动金刚石旋转时，金刚石前刀面上包括切削刃圆弧中心在内的所有点都会围绕系统旋转中心做旋转运动，即切削刃圆弧中心的轨迹是以系统旋转中心为圆心的一段圆弧。因此只要能够获得车刀上切削刃圆弧中心在摆动过程中在不同位置的坐标，并通过最小二乘法进行圆弧拟合即可获得系统的旋转中心。本研究中，将车刀安装在夹具上在 -60° 到 60° 范围内摆动，并且每旋转 5° ，利用前述形状模板匹配法获取车刀切削刃圆弧中心 (x_a, y_a) ，具体数值如表2所示。利用获取的不同位置切削刃圆弧中心进行圆弧拟合，可以得到切削刃圆弧中心摆动轨迹的圆心坐标为(752.377, 436.811)，如图5所示。根据前述分析可知，此坐标即为研磨系统旋转中心在图像坐标系中的位置。

表2 不同旋转角度获取的切削刃圆弧中心坐标

旋转角 度 $\theta/(^\circ)$	(x_a, y_a)	旋转角度 $\theta/(^\circ)$	(x_a, y_a)
0	(709.257, 508.914)	5	(715.056, 514.711)
-5	(702.852, 505.245)	10	(719.616, 516.345)
-10	(694.261, 496.888)	15	(719.088, 514.963)
-15	(686.147, 491.718)	20	(727.813, 519.113)
-20	(681.104, 485.127)	25	(732.240, 524.000)
-25	(676.774, 477.990)	30	(741.652, 525.511)
-30	(677.304, 473.933)	35	(747.268, 524.713)
-35	(675.294, 466.945)	40	(754.597, 521.975)
-40	(672.750, 458.715)	45	(761.780, 523.162)
-45	(669.723, 451.182)	50	(770.485, 521.265)
-50	(667.493, 439.276)	55	(771.515, 517.596)
-55	(663.383, 431.491)	60	(779.215, 515.635)
-60	(662.544, 419.297)

图5 研磨系统旋转中心获取

确定研磨系统的旋转中心后，就可以在金刚石车刀的初始安装时对车刀的位置进行在线调整，消除初始安装误差对车刀加工精度的影响。在安装过程中始终在线获取切削刃圆弧中心位置 (x_a, y_a) ，并计算其与研磨系统旋转中心间的距离，通过夹具上

的调整装置对车刀位置进行调整,直至切削刃圆弧中心和研磨系统旋转中心重合,如图 6 所示。

图 6 金刚石车刀初始安装中心调整

3 切削刃轮廓度误差在线图像测量

传统的金刚石车刀研磨过程采用车刀恒速摆动和恒定进给量的加工方式,由于单晶金刚石具有各向异性,不同方向的硬度差异很大,因此在相同加工工艺条件下,在切削刃不同点处的材料去除量势必会有差异,从而形成了切削刃轮廓度误差。本研究基于在线图像测量获取的切削刃误差信息,研磨过程中对切削刃不同误差位置以不同的驻留时间或者进给量进行针对性研磨,可以有效地减小由单晶金刚石的各向异性导致的轮廓度误差,并提高加工效率。

为实现针对性研磨,切削刃上的各点误差信息及其对应的位置信息是必须的。如图 7 所示,通过对 CCD 采集到的金刚石车刀图像在指定区域内进行二值化、平滑等一系列处理后,提取车刀图像轮廓,并通过 Ramer 算法将切削刃的轮廓线(圆弧部分)分离出来。利用式(1)~(3)即可计算出构成切削刃轮廓线的点群与理想切削刃轮廓线的对应点之间的误差及其对应位置。其流程如图 7 所示。根据获得误差及其位置信息,研磨系统在粗加工阶段采取进给量正比于误差大小,在精加工阶段采取车刀摆动速度反比于误差大小的不同控制策略对切削刃进

行针对性研磨。

图 7 图像检测切削刃轮廓度误差的流程

为了验证微圆弧刃金刚石车刀切削刃在线图像检测方法的精度,分别采用在线图像检测方法和接触式扫描的方法对同一把车刀进行了切削刃轮廓度误差检测。接触式扫描方法是传统金刚石车刀研磨过程中进行离线测量的主要方法之一,通过扫描车刀后刀面靠近切削刃的轮廓得到切削刃轮廓度误差。本文采用 Talysurf PGI 1250 轮廓仪对切削刃形状进行扫描,扫描时调节探针在车刀后刀面位置,使其尽量靠近切削刃,沿着切削刃圆弧方向进行扫描,利用扫描获得的测量点群坐标基于最小二乘法进行圆弧拟合,从而得到圆弧中心,利用式(1)~(3)计算,可以获得各测量点的轮廓度误差及其对应位置。如图 8 所示,图 8 中曲线 1 为开发的在线图像测量方法得到切削刃轮廓度误差曲线,曲线 2 为扫描最靠近切削刃的后刀面得到轮廓度误差曲线。比较两条曲线可以发现,两条曲线从整体变化趋势和细节部分都非常类似,最大误差都出现在 0° 左右,这说明本研究所开发的在线图像测量系统能够准确得到切削刃轮廓度误差及其分布。但是从图 8 中也可以看出,虽然两条曲线的变化趋势几乎相同,但轮廓度误差大小却存在着约 $0.45 \mu\text{m}$ 的差距。为了分析两种测量方法出现差距的原因,在后刀面的不同位置分别进行了轮廓扫描,并计算其轮廓度误差,分别为图 8 中曲线 3~5,曲线标号越大,探针扫描的位置越远离切削刃。比较图 8 中的轮廓度误差曲线 2~5 可知,随着扫描位置越远离切削刃,轮廓仪测量得到的轮廓度误差差距越大,曲线 4、5 甚至曲线的形状(变化趋势)也和曲线 2、3 产生了很大差异。

这主要是由于研磨过程中对后刀面不同位置研磨效果偏差造成的, 越远离切削刃, 研磨效果越差, 轮廓度误差也会越大。由于车刀后角的存在, 实际上圆弧刃金刚石车刀的后刀面是一个圆锥体。探针扫描测量的只是后刀面, 很难准确定位在切削刃上, 如图 9 所示。因此探针扫描测量时测量的只是车刀后刀面, 而非真正切削刃轮廓。而对于图像测量来说, 测量时 CCD 相机镜头的轴线垂直车刀前刀面, 摄取车刀前刀面的图像的轮廓线才真正是车刀的切削刃。由于两种测量方法测量的位置不同, 测量结果也必然会存在误差。从测量原理来看, 相比于传统探针扫描测量方法, 在线图像测量的结果应该更接近于切削刃的实际轮廓度。

图 8 切削刃轮廓度测量结果

图 9 在线图像测量法与接触式扫描法测量原理

4 结论

(1) 在圆弧刃金刚石车刀自动研磨系统的在线识别方法中, 形状模板匹配方法在识别效率和精确性上要远优于灰度值模板匹配和直接圆弧拟合方法, 更适用于圆弧刃金刚石车刀在线测量。

(2) 利用在线获取金刚石车刀切削刃圆弧中心及实时计算其与研磨系统的旋转中心距离, 实现了初始装夹时金刚石车刀位置的实时调整, 从而消除了初始安装误差对切削刃加工精度及效率的影响。

(3) 开发了适用于微圆弧刃金刚石车刀测量的图像测量系统, 实际测量验证试验表明, 从原理上利用开发的在线图像测量方法获得的切削刃轮廓信息更准确, 更适合圆弧刃金刚石车刀高效、高精度、低成本制造。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Qingliang, WANG Yilong, YU Guang, et al. Investigation of anisotropic mechanisms in ultra-precision diamond machining of KDP crystal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4169-4177.
- [2] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
YUAN Julong, WANG Zhiwei, WEN Donghui, et al. Review on ultra-precision machining technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 35-48.
- [3] GAO Wei, LEE J C, ARAI Y, et al. Measurement of slide error of an ultra-precision diamond turning machine by using a rotating cylinder workpiece[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 404-410.
- [4] FANG Fengzhou, ZHANG Xiaodong, HU Xiaotang. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7323-7329.
- [5] WANG Yilong, ZHAO Qingliang, SHANG Yuanjiang, et al. Ultra-precision machining of Fresnel microstructure on die steel using single crystal diamond tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(12): 2152-2159.
- [6] ZONG Wenjun, SUN Tao, LI Dan, et al. Nano-precision diamond cutting tools achieved by mechanical lapping versus thermo-mechanical lapping[J]. Diamond & Related Materials, 2008, 17: 954-961.
- [7] BIDDUT A Q, RAHMAN M, NEO K S, et al. Performance of single crystal diamond tools with different rake angles during micro-grooving on electroless nickel plated die materials[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2007, 33: 891-899.
- [8] QIU Zhongjun, FANG Fengzhou, DING Liyu, et al. Investigation of diamond cutting tool lapping system

- based on on-machine image measurement[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011, 56: 79-86.
- [9] 袁哲俊. 精密和超精密加工技术的新进展[J]. 工具技术, 2006, 40(8): 3-9.
- YUAN Zhejun. New developments of precision and ultra-precision manufacturing technology[J]. Tool Engineering, 2006, 40(8): 3-9.
- [10] ZONG Wenjun, LI Zengqiang, SUN Tao, et al. The basic issues in design and fabrication of diamond-cutting tools for ultra-precision and nano-metric machining[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2010, 50: 411-419.
- [11] QIU Zhongjun, ZHOU Libo, EDA H, et al. Development of vision guided grinding system for diamond turning tools[J]. Key Engineering Materials, 2008, 375-376: 705-709.
-
- 作者简介: 仇中军, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为超精密加工、微纳制造工艺及装备。
E-mail: qiuzhongjun@gmail.com
- 房丰洲(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工理论及工艺、微纳制造技术及装备。
E-mail: fzfang@tju.edu.cn

第三届 IFToMM 亚洲机构与机器科学会议征文通知

为增进亚洲地区机构与机器科学及其相关学科研究人员、行业专家以及学生间的学术交流, 第三届 IFToMM 机构与机器科学会议于 2014 年 7 月 9-10 日在中国天津召开。

本次会议由天津大学和中国机械工程学会共同主办, IFToMM 中国委员会承办。会议将围绕机构与机器科学等议题开展讨论, 主要包括理论运动学、计算运动学、机器零件、驱动器/执行机构、齿轮及传动机构、连杆与凸轮、机构设计、机械动力学、摩擦学、车辆机构、动力学与设计、可靠性、机构试验方法、机器人及机电一体化、生物力学、微纳机构与机器、医疗/保健设备、自然与机器、设计方法、机构与机器科学史、机构与机器科学教育、可重构机构、折纸灵感机构。

请按照会议网站论文要求准备稿件, 并将 PDF 版本上传至会议网站 <http://www.asianmms2014.com>。会议组委会将组织同行专家进行全文评审。

全文提交截止日期: 2014 年 2 月 10 日

录用通知日期: 2014 年 3 月 31 日

修改论文提交截止日期: 2014 年 4 月 30 日