

文章编号 1004-924X(2016)04-0819-07

基于图像清晰度检测的光栅刻划平台调平装置

丁健生, 史国权*, 石广丰

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:针对制备衍射光栅时刻划平台倾斜导致的光栅槽型误差,提出了一种基于图像清晰度检测与电动倾斜台调节的光栅刻划平台在线调平装置。建立了图像清晰度与光栅刻划平台倾角间关系的模型,应用该模型,控制光栅刻划平台在一定范围内实现了闭环动态调平。对上述理论研究进行了试验验证。试验结果表明,该调平装置简单可行;对于50 mm×50 mm的光栅毛胚,调平装置可控制刻划平台的水平倾角在4"以内,满足光栅刻划对平台定位精度的要求。该装置既可用于刻划前的调平准备,也可推广应用于光栅刻划过程中的实时检测。

关键词:光栅刻划;光栅刻划平台;调平装置;图像清晰度测量;评价函数

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0819

Grating ruling platform leveling device based on image clarity measurement

DING Jian-sheng, SHI Guo-quan*, SHI Guang-feng

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: sgq@cust.edu.cn

Abstract: To reduce the grating groove errors caused by the inclination of a grating ruling platform in the fabrication of diffractive gratings this paper proposes a real-time leveling device for the grating ruling platform based on image clarity measurement and electrically adjusting a tilting table. A physical model was built based on the inclination relations between the image clarity measuring and the inclination angle of grating ruling platform. Based on the model, the leveling device could control the grating ruling platform to implement the closed loop dynamic leveling within a certain range. The above theory was verified by tests. The results show that the leveling device is simple and feasible. For a grating blank with a size of 50 mm×50 mm, it controls the inclination of the grating ruling platform to be within 4", meeting the requirements of the grating ruling for platform positioning accuracy. Moreover, the leveling device can be used in leveling before ruling and also in ruling processing in real time.

Key words: grating ruling; grating ruling platform; leveling device; image clarity measurement; evaluation function

收稿日期:2015-12-01;修订日期:2016-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51405031, No. 51575057)

1 引言

衍射光栅是航空、军工等领域光谱仪器的核心元件^[1]。机械刻划作为低刻线密度原刻衍射光栅制造的重要手段,在制作光栅母板方面具有重要作用^[2]。其过程是利用金刚石刻划刀在光栅毛胚上进行挤压、抛光,形成光栅槽形^[3]。该工艺要求光栅毛胚表面与刻划刀运动平面具有较高的平行度,在加工前需通过调平装置对光栅毛胚进行调平。

随着科技的发展以及高精设备对调平精度需求的不断提高,调平技术已逐步由传统的手动调平向自动调平方式过渡。中科院长春光机所姜伟伟等人利用斜角传感器和电动机械支腿研制了大型光电设备的基准平面调平系统^[4],精度达到 0.003° 。天津大学陈永亮等人设计了在大负载、大偏载条件下基于液压支架的试验台动态调平算法,算法具有较强的通用性和鲁棒性^[5]。

由于光栅刻划过程具有小尺寸、低负载、高精度等特点,同时因光栅毛胚表面的镀膜层强度极为脆弱,不适合采用接触式测量仪器(如数显千分表)测量倾斜量,故此本文设计了一种利用 CCD 相机进行水平检测及电动倾斜台进行倾角调节的光栅刻划平台在线调平装置。试验证明该装置能够有效的进行水平调节,调节精度达到 $4''$,效果理想。

2 系统分析与设计

2.1 问题分析

光栅毛坯是一种在玻璃基底上镀上铝膜的光学原件,为提高吸附强度,通常中间会增加一层镀铬层作为连接层,其主要结构如图 1 所示。

光栅机械刻划过程如图 2 所示,光栅毛胚相对于刻划刀分别在刻划方向和分度方向进行水平运动,形成光栅槽形。假设光栅槽长为 L ,光栅毛胚与机床 X 轴夹角为 α ,则每道槽的首尾深度相差约为 $L \times \sin \alpha$ 。同理若光栅毛胚与机床 Y 轴夹角为 β ,槽间距为 W ,则相邻两道槽的深度相差为 $W \times \sin \beta$ 。显然,在光栅尺寸规格不变的情况下,为减少光栅槽形误差,应尽量使 α 及 β 的值趋近于零,既光栅毛胚表面应相对于刻划机床的 X、Y

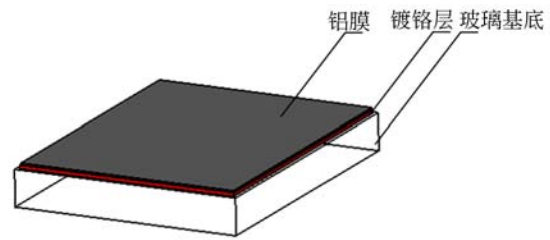


图 1 光栅毛胚构成示意图

Fig. 1 Diagram of grating structure

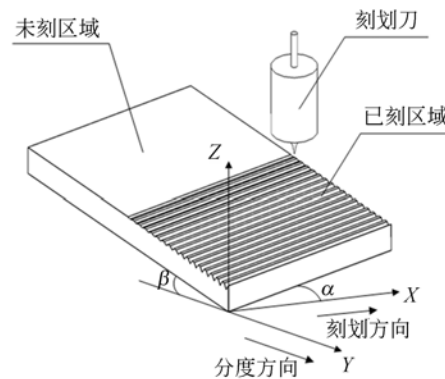


图 2 光栅刻划示意图

Fig. 2 Diagram of grating ruling

运动平面水平。

2.2 系统构成

该系统由高精密切划机床、电动倾斜台、CCD 摄像机及控制计算机等组成,如图 3 所示。光栅毛胚通过夹具固定在电动倾斜台上,电动倾斜台通过连接板固定在机床运动平台上。显微镜通过支架独立固定,位于光栅毛胚上方,与机床运动平台间无连接。

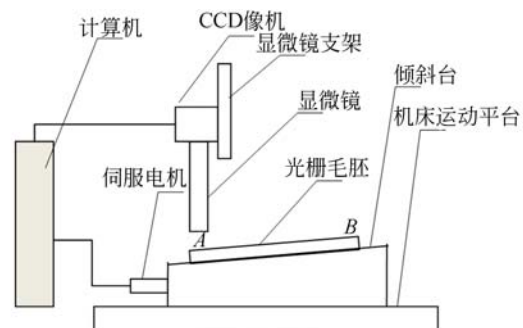


图 3 系统构成示意图

Fig. 3 Diagram of system components

刻划机床为超精密纳米数控机床,采用气浮

导轨及直线电机驱动机床运动平台做直线运动,定位精度为 50 nm。

电动倾斜台由 2 路伺服电机及精密倾斜台组成,可通过编程控制倾斜台在光栅刻划方向及分度方向进行倾角调节,重复定位精度 2"。为简化起见,仅对光栅沿刻划方向的调平进行论述,对于分度方向的调平可采用相同的方法实现。

显微镜及 CCD 摄像机负责系统的倾角测量,其光学放大为 50~500 倍,配合高分辨率 CCD 摄像机,可清晰分辨 1 μm 的物体。受显微镜景深限制,系统工作之前必须先对倾斜台进行粗调,使 A、B 两点的高度差小于 10 μm 。

2.3 系统工作原理

在光学系统中,显微镜对特定距离的物体成像最清晰,这个位置称为镜头的焦面^[6]。偏离焦面(离焦)的物体在显微镜中成像模糊,模糊程度与离焦量在一定范围内具有对应关系。据此原理,可利用图像的清晰度来间接获得光栅表面与镜头之间的距离。

实际调节过程,首先通过机床将光栅毛胚的一端 A 移动至镜头下,调节镜头对焦,使光栅毛胚的 A 端在显微镜下呈现最清晰图像(清晰度通过程序实时计算)。然后控制机床使光栅毛胚的另一端 B 移动至显微镜镜头下,若 A、B 等高,则此时 B 端同样能够在显微镜下呈现清晰图像(不考虑机床直线度误差及光栅毛胚自身平面度误差),两幅图像的清晰度相近。反之,若 A、B 不等高,则此时 B 端的图像清晰度低于 A 端。通过建立清晰度与物距之间的对应关系,便可根据 B 端图像的清晰度值判定出 A、B 两点的高度差值,再控制电动倾斜台进行定量调节,可构成闭环控制系统,从而实现自动调平功能。

受机械结构误差因素影响,在对 B 点进行调节的同时,可能会对 A 点的清晰度产生少量影响。因此调平装置往往需要往复调节几次才可形成比较理想的调节效果。为此在正式加工前可通过数控机床编程设定自动进行若干次往复运动,以配合调平装置工作。

3 关键技术分析

3.1 图像清晰度评价函数的选取

计算光栅图像的清晰程度是自动调平系统的

重要环节。它通过清晰度评价函数对不同位置所拍摄的光栅图像进行评分,从而定量的得出图像清晰度,进而间接计算出光栅表面距镜头的距离。为此理想的清晰度评价函数应具备单峰性——在极值点两端单调;灵敏性——能准确反映离焦位置的变化;低复杂性——易于实时在线计算等特点。

图像清晰度评价函数已有很多经典算法,整体上可分为基于灰度梯度检测、基于频率函数、基于信息学原理、基于统计学原理等^[7-11]。其中基于边缘梯度检测算法由于计算量小,适合用在线检测,故采用此种算法实现图像清晰度评价。

基于边缘梯度检测的清晰度评价算法,按照算子的不同,有 Laplace 算子、Roberts 算子、Sobel 算子等形式^[12-14]。为测试各种算子的分辨能力,控制显微镜依次在不同物距下采集光栅毛胚图像,相邻两幅图像对应的物距相差 1 μm ,形成的图像序列如图 4 所示。表 1 所示为上述 3 种算子应用于该图像序列时的清晰度曲线数据,图 5 所示为对应的清晰度曲线对比图。其中 X 坐标为光栅表面距镜头的相对距离(取能够开始成像的距离作为零点),单位为 μm ,纵坐标为清晰度值,没有单位。从图中可以看出,3 种算子均可以在 0~18 μm 内得到单峰、局部单调的评价曲线,且峰值相同(13 μm 处)。超出 20 μm 以后,3 种算子的清晰度均不再随物距的增大而显著变化。在近焦阶段,Laplace 与 Roberts 算子曲线变化不灵敏,分辨能力较差,相比之下 Sobel 算子则具有更好的线性递增趋势。在远焦阶段,Sobel 算子也具有更宽的分辨区间及灵敏度。

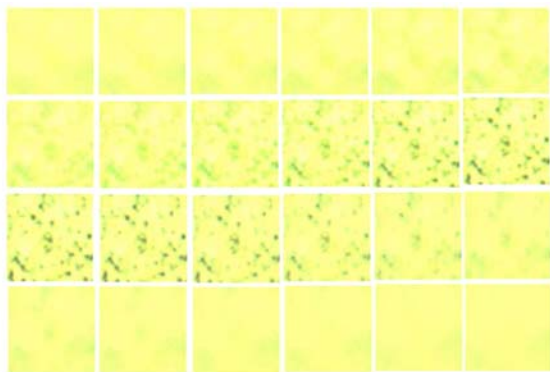


图4 测试图像序列

Fig. 4 Image sequence to test

表 1 3 种算子清晰度数据

Tab. 1 Clearness of three operators (μm)

相对距离	Laplace	Roberts	Sobel
1	13.283 1	3.235	4.599 4
2	13.288 2	3.28	4.722
3	13.255	3.355	4.949 1
4	13.348 5	3.485	5.250 4
5	13.511 9	3.675	5.793 8
6	13.668 8	3.975	6.558 9
7	13.900 9	4.47	7.725 8
8	14.446	5.085	9.123 8
9	15.307 3	5.95	10.894 1
10	17.642	7.51	13.759
11	20.555 1	9.31	17.131 1
12	23.211 4	10.645	19.559 5
13	24.229 2	10.94	19.983 1
14	23.472 6	10.08	18.253
15	20.837 8	8.145	14.386 1
16	17.662 5	6.035	10.221 3
17	15.140 3	4.38	6.896 7
18	13.599 7	3.52	5.161 7
19	13.237 7	3.315	4.764 3
20	13.307	3.28	4.605 4
21	13.224 6	3.225	4.519 9

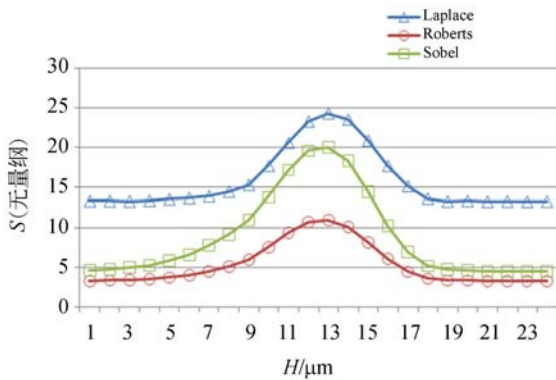


图 5 3 种算子清晰度曲线对比图

Fig. 5 Clearness curve comparison chart of three operators

综上所述,采用 Sobel 算子作为图像清晰度评价函数。其具体形式基于两个 3×3 矩阵:

$$S_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad S_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图像上任一点 (x, y) , 基于 Sobel 算子的清晰度计算公式为:

$$V(x, y) = \sqrt{(G(x, y) * S_1)^2 + (G(x, y) * S_2)^2}, \quad (1)$$

式中: $G(x, y)$ 代表图像在 (x, y) 点的灰度值, $*$ 为卷积运算, S_1 与 S_2 代表水平与垂直 2 个方向上的模板。

对于尺寸为 $m \times n$ 的图像 A, 其整体清晰度为:

$$F(A) = \sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n V(x, y) / (m * n). \quad (2)$$

3.2 平台倾角与图像清晰度的关系模型

对表 1 中 Sobel 算子的数据进行二次有理拟合, 得清晰度曲线函数:

$$S(H) = \frac{2.048H^2 - 73.83H + 755.7}{H^2 - 26.06H + 179.7}, \quad (3)$$

式中: H 代表光栅表面距镜头的相对距离, $S(H)$ 代表该距离对应的清晰度值。给定一清晰度值, 通过上式反求 H , 可得该清晰度对应的距离值 (通常有 2 个解)。

由于光栅及倾斜台的尺寸均已知且固定, 因此很容易将 A、B 端点距镜头的距离之差换算成倾斜台的角度增量。最终平台倾角与图像清晰度的关系模型为:

$$\Delta\alpha = \arcsin \left[\frac{(S^{-1}(F(B)) - S^{-1}(F(A)))}{L} \right], \quad (4)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为倾斜台的角度调整增量, L 为光栅毛胚的长度, 此处为 50 mm, 函数 F 为图像清晰度评价函数, S^{-1} 为清晰度曲线函数的反函数。由于 S 为非常规函数, 难以得到其反函数的解析解, 故求解 S^{-1} 时采用数值方法。

3.3 离焦极性的判定

在上述模型中, 函数 S 大体呈抛物线形状。给定一个清晰度, 除非该清晰度是曲线上的极大值, 否则会有 2 个距离值满足此清晰度, 一个值靠近镜头焦面, 另一个值远离镜头焦面。由此产生一个问题: 当发现所摄图像不清晰时, 如何判断物体究竟是离焦面过近还是过远, 即离焦极性的判定问题。

首先在设计夹具时, 可保证 A、B 两点位于倾斜台旋转轴同侧, 这样可保证 A、B 两点具有相同

极性,接下来只需要判定 B 点的极性既可。此外为缩短 A 点在调平过程中的调节量,应使 A 点尽量靠近倾斜台的旋转轴,这样当改变倾斜台的倾斜角度时,A 点距镜头的距离变化最小。

对于 B 点,采用试错法进行极性判定。先控制倾斜台向一个方向(如靠近焦点方向)移动一个小量(此处为 4"),如此时的图像清晰度变得更高,则表明光栅处于离镜头焦面过远位置;反之则表明光栅离焦面过近,B 点极性得以判定。

4 试验测试及误差分析

4.1 试验测试

为了验证本装置的调平效果,通过试验进行测试。试验预制 1 组光栅毛坯,尺寸为 60 mm×60 mm,4 个边各保留 5 mm 宽的空白区域,中间镀膜面积为 50 mm×50 mm。试验采用 Olympus 显微镜观测,其数值孔径为 0.8,光学放大倍数调至 500。同时为测试系统精度,采用 KEYENCE GT2 数显千分尺对光栅表面未镀膜区域进行接触式同步测量,其分辨率为 0.1 μm。采用自编程实现的控制软件进行图像处理及倾斜台控制。测试过程如下:

(1)通过数控机床移动光栅毛坯镀膜区一端 A 至显微镜下,手动调节显微镜进行初始对焦,直至图像清晰度达到最大值。将千分尺读数置零,同时在软件中将此时测得的 A 点距离值置零。

(2)移动光栅毛坯镀膜区另一端 B 至显微镜下,记下此时千分尺及测量软件测得的 B 点高度数据。

(3)控制电机按照 A、B 高度差调节 B 点高度。

(4)将 A 点移回至显微镜下,记录 A 点高度。

(5)重复步骤(2)(3)(4),直至软件判定 A、B 点的高度之差小于等于 0.5 μm。

各轮测试数据如表 1 所示。表中真值表示千分尺测得的读数,测量值表示基于图像法测得的值。

表 2 试验数据

Tab. 2 Result of test

序号	A 点真值	A 点测量值	B 点真值	B 点测量值
1	0	0	-5.2	-6.45
2	-0.6	-0.43	-1.1	-1.42
3	-0.7	-0.31	0.9	0.67
4	-0.6	-0.38	0.5	0.12
5	-0.6	-0.30	0.2	-0.19
6	-0.7	-0.25	0.2	0.02

从表中数据可以看出,经过五 5 次调节,A、B 两点测量值已趋于相同。此时 A、B 两点的真值仍然存在 0.9 μm 误差,换算成角度为 3.7"。

4.2 误差分析

作为闭环控制系统,该系统的误差主要来源于执行机构及测量机构。

执行机构方面,尽管 A 点在设计时已尽量靠近倾斜台的旋转轴,理论上调整 B 点高度时 A 点高度不应发生变化,但由于机械结构误差的影响,调节 B 点时仍对 A 点的高度带来一些影响。为此需要往复调整多次才能使 A、B 两点的清晰度逐渐趋于相近,得到较为理想的调平效果。

测量机构方面,由于系统是基于图像来间接判定物距,受光线环境及 CCD 传感器稳定性影响,对同一位置多次测量所得到的清晰度并不完全相同,而是在一定范围内随机波动。对此系统已经通过多次测量取平均值来减小误差,但该误差不可消除。

5 结论

本文针对光栅机械刻划的调平问题,根据工程实际情况,设计了一套自动调平装置,建立了图像清晰度与调平台倾角间关系的理论模型,通过试验对该装置进行了验证。试验结果表明,该调平装置简单可行,调节精度达到 4",满足工程需要。该装置既可用于刻划前的准备阶段,也可推广应用于光栅刻划过程中的实时检测。

参考文献:

- [1] 刘洪兴,张巍,巩岩.光栅参数测量技术研究进展[J].中国光学,2011,4(2):103-110.
LIU H X,ZHANG W,GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*,2011,4(2):103-110. (in Chinese)
- [2] 李晓天,于海利,齐向东,等.光栅刻划机 300 mm 行程工作台研制及其自适应控制方法[J].中国激光,2014,41(6):169-176.
LI X T,YU H L,QI X D, et al.. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2014,4(2):103-110. (in Chinese)
- [3] 张宝庆,史国权,石广丰,等.衍射光栅机械刻划成槽的预控试验[J].光学精密工程,2013,21(7):1666-1675.
ZHANG B Q,SHI G Q,SHI G F, et al.. Pre-control of mechanical scratching diffractive grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(7):1666-1675. (in Chinese)
- [4] 姜伟伟,高云国,冯栋彦,等.大型光电设备基准平面自动调平系统[J].光学精密工程,2009,17(5):1039-1044.
JIANG W W,GAO Y G,FENG D Y, et al.. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1039-1044. (in Chinese)
- [5] 陈永亮,王向伟,潘高峰,等.液压支架试验台电液多轴加载系统耦合调平控制[J].煤炭学报,2011,36(10):1762-1767.
CHENG Y L,WANG X W,PAN G F, et al.. Coupling leveling controller design of electro-hydraulic multi-axis synchronous loading for hydraulic support test rig[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011,36(10):1762-1767. (in Chinese)
- [6] 郭惠楠,曹剑中,周祚峰,等.采用光流估计的数字相机自动对焦算法[J].红外与激光工程,2013,42(12):1039-1045. (in Chinese)
GUO H N,CAO J ZH,ZHOU Z F, et al.. Auto-focus algorithm of digital camera based on optical flow estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(12):1039-1045. (in Chinese)
- [7] 聂凯,刘文耀,王晋疆.ICF 微靶装配体图像清晰度评价方法[J].发光学报,2014,35(12):1506-1510.
NIE K,LIU W Y,WANG J J. Image definition evaluation method of ICF micro-target assembly [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35 (12): 1506-1510. (in Chinese)
- [8] 朱孔凤,姜威,王端芳,等.一种新的图像清晰度评价函数[J].红外与激光工程,2005,34(4):464-468.
ZHU K F,JIANG W,WANG D F, et al.. New Kind of clarity-evaluation-function of image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (4): 464-468. (in Chinese)
- [9] 张艳超,赵建,韩希珍,等.SUSAN 清晰度评价函数在自动对焦中的应用[J].中国光学,2014,7(2):240-244.
ZHANG Y CH,ZHAO J,HAN X ZH, et al.. Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing [J]. *Chinese Optics*,2014,7(2):240-244. (in Chinese)
- [10] 洪裕珍,任国强,孙健.离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J].光学精密工程,2014,22(12):3401-3408.
HONG Y ZH,REN G Q,SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(12):3401-3408. (in Chinese)
- [11] 陈涉,孟永宏,靳刚.椭偏光学显微成像系统聚焦评价函数的研究[J].光学学报,2005,25(7):923-929.
CHEN SH,MENG Y H,JIN G. Study on the autofocus evaluation function in ellipsometric image system [J]. *Acta Optica Sinica*,2005,25(7):923-929. (in Chinese)
- [12] 张天煜,冯华君,徐之海,等.基于强边缘宽度直方图的图像清晰度指标[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(2):312-320.
ZHANG T Y,FENG H J,XU ZH H, et al.. Sharpness metric based on histogram of strong edge width[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48 (2): 312-320. (in Chinese)

- [13] 孙杰,袁跃辉,王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. 光学学报,2007,27(1):35-39.
SUN J, YUAN Y H, WANG C Y. Comparison and Analysis of Algorithms for Digital Image Processing in Autofocusing Criterion[J]. *Acta Optica Sinica*,2007,27(1):35-39. (in Chinese)
- [14] 郭惠楠,曹剑中,周祚峰,等. 基于色彩相关性的彩色图像清晰度评价算法[J]. 红外与激光工程,2013,42(11):3132-3136.
GUO H N, CAO J ZH, ZHOU Z F, *et al.*. Image definition evaluation algorithm based on color relativity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(11):3132-3136. (in Chinese)

作者简介:



丁健生(1983—),男,吉林长春人,博士研究生,讲师,2005年于吉林大学获得学士学位,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事超精密加工方面的研究。E-mail: dingjs@ccut.edu.cn

导师简介:



史国权(1965—),男,吉林舒兰人,博士,教授,博士生导师,1989年、1992年、1996年于吉林大学获得学士、硕士、博士学位。研究方向为精密、超精密加工技术。E-mail: sgq@cust.edu.cn