

光学刻划技术论文精选

主—编—曹向群

副主编—陈—林—钟—旭

主—审—邹自强—黄维实

55324
C1

机—械—工—业—出—版—社—

光学刻划技术论文精选

主 编 曹向群

副主编 陈 林 钟 旭

主 审 邹自强 黄维实



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本文集是从全国性多次学术会议的文章、全国一、二级学报的论文、全国性杂志和内部刊物约近200多篇论文中挑选出来的，内容涉及光电刻划原理、刻划技术、制造及装置、误差检测等。

本书可供从事光学刻划工作者阅读，亦可供有关技术人员、大专院校师生参考。

光学刻划技术论文精选

主 编 曹向群

副主编 陈林 钟旭

主 审 邹自强 黄维实

责任编辑：郑姝娥，版式设计：霍永明

封面设计：金水棠 责任校对：曹向群 金 彤

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

浙江大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/16·印张12.625 插页·字数303千字

1991年10月北京第一版·1991年10月杭州第一次印刷

印数 1000

·定价：6.50元

ISBN 7-111-03164-4/TH·348(x)

前 言

建国以来,随着光学工业的迅速发展,作为光学加工中特种工艺的刻划技术,经历了从无到有,从小到大,从易到难的发展过程。有关刻划技术方面的不少论文有的在专业会议上宣读而未曾公开出版,有的虽刊登于有关杂志上,但比较分散,不便于查阅,从而减弱了这些论文的影响力。为了有助于光刻技术的发展,我们编辑了这本“精选”。

本书取材于全国性多次学术会议的文章,全国一、二级学报的文章,全国性杂志和内部刊物的文章,是从近200多篇论文中挑选出来的,主要内容涉及刻划、照相及微电子光刻等方面。

收入论文集的稿件,已经过作者仔细修改或作重大修改,为控制稿件字数和提高质量,部分论文由审校人员作了删节。本书由浙江大学、中国科学技术大学、上海交通大学、上海机械学院、南京光学仪器厂的方银东、刘怀道、李明媛、陈林、邹自强、金彤、钟旭、胡学良、曹向群、黄维实编辑、审定和技术校核。全书由曹向群主编,陈林、钟旭副主编,邹自强、黄维实主审。由于编审人员的水平有限,时间紧迫,因而错误之处在所难免,敬请读者指正。

编 者

1990年4月

目 录

刻划与光刻技术述评	浙江大学 曹向群 上海交通大学 黄维实	1
光电圆刻机的发展概况及基本原理	中国科学技术大学 邹自强	6
高精度光电圆刻线机	重庆大学 黄尚廉 钟先信 杨冠玲 梁铨襄 栾兴林	16
计量光栅保护层研究	上海机械学院 陈林 北京303研究所 宋伯伦	19
圆光栅均匀性误差研究	上海机械学院 陈林 方银东	24
精密主轴的双周晃动现象	中国科学技术大学 邹自强	28
提高圆光栅刻划精度的研究	上海机械学院 戴兴庆 陈 林	35
圆分度微机控制细分法	上海机械学院 胡学良 陈林 方银东	39
微机在制作圆光栅和编码盘中的应用	南京光学仪器厂 管俊晨	43
多圈法刻划圆光栅	上海机械学院 陈林 戴兴庆	48
圆刻机精度检定中的几个问题	浙江大学 曹向群 金 彤	55
环形莫尔条纹全接收系统设计问题	重庆大学光电精密机械研究所 杨冠玲	62
变密度型正弦波光栅的研制	南京光学仪器厂 刘怀道 钟 旭	67
金属基底刻划红外光栅	上海光学仪器研究所 王国华	74
计量光栅的绝对零位	北京303研究所 张玮 张微元	80
三色彩色光栅的制造	上海交通大学黄维实 周良 浙江大学 曹向群	87
计量光栅质量指标	新天光学仪器公司 陈继达	90
激光定位光栅检拍机	上海市计量技术研究所 杨守忠 陈福珍	96
1m计量光栅刻划机用的两个干涉仪的设计		
	上海科学技术大学精密机械系 吴永方 王志豪	98
激光定位、静态刻划网络机和网络板的研制		
	江南光学仪器厂 胡锡华 高志 金文悖 钱方正	103
用冠醚提高超微粒干版的分辨率	南京光学仪器厂 钟旭 刘怀道	107
光学精密照相复制D-PVA感光胶的研制及其应用		
	新天光学仪器公司 郑大千 周建军	112
用光刻胶复制高精度黑铬度盘工艺	中国科学院南京天文仪器厂 陆翡翠	117
光学干版和制版软片的研究	西北光学仪器厂 聂华生	123
远紫外光刻的实验研究	中国科学院光电所 王兴无 杨云歧 邵慧玉	129
横向微细加工一瞥——亚微米级和纳米级加工综述	常州半导体厂 黄德源	134
应用相干光技术测量光掩膜线宽	复旦大学 王家楫	139
计量光栅均匀性误差的检测	长春光机所 李明媛 杨进堂	144
自动度盘检查仪的原理和应用	上海光学仪器厂 陈宗锡 陆忠 李亚君 高宜林	150
度盘格线误差检定	上海交通大学 黄维实 浙江大学 曹向群	156
高精度度盘检测装置	苏州第一光学仪器厂 沈家麟 戴泳芳 刘杏定	159

计量光栅光学特性的测试研究	浙江大学 金 彤	163
检测圆光栅的光电定角比相法	长春光机所十六室检测组	167
圆光栅直径误差数字化自动检测	浙江大学 沈 頌 曹向群 陈远绳	176
圆光栅的检测及数据处理	中科院光电研究所 吕文松 魏爱敏 赵安太	182
六十进制光电圆分度检验仪的使用效果	长春光机所 朱应时 孙承浦 李桂霞	192

刻划与光刻技术述评

浙江大学 曹向群

上海交通大学 黄维实

一、引言

刻划元件是计量、测量、控制仪器的基准元件,国内外对这些元件的加工工艺都十分重视。刻划元件精度的提高,意味着计量、测量、控制仪器精度水平的提高。

光刻技术解决了两个问题:一是提高刻划零件的生产率,从而使仪器成本下降;二是一些特形零件如编码度盘、视频天线、浮雕型光栅、全息光栅等等的加工。特别需要提到的是,随着大规模集成电路的发展,推动了光刻技术的发展;而微处理机的发展,使光电刻划更为方便,并实现了自动检测。

二、发展概况

纵观近年来刻划和光刻技术的发展情况,可以看到主要表现在以下三方面:

1. 刻划

刻划工艺的改善,主要表现在采用良好的刻划用蜡层及真空镀铬技术的应用^[1]。而机床主轴的调整、主轴副运动规律的研究^[2]、机床分度精度的检定^[3]等的研究,其目的都是为了提高刻划精度。此外,多圈法刻划光栅则是通过分圈刻划而把长周期刻划误差(特别是封闭差)变成短周期误差^[3],从而通过光栅读数的平均作用来解决刻划光栅的精度问题。

采用光电刻划则是近几年我国刻划技术的一个重大进展。长春光机所蒋潮江等,利用现有圆刻机,加上光电系统,采用火棉胶工艺完成了编码盘的研制工作,并在圆刻机、长刻机及其他刻划设备上,利用光电刻划完成了很多类型的刻划零件,从而使刻划零件的精度、品种达到了一个更新的高度。光电刻划技术的发展,使我国不少长刻机、圆刻机采用了多头读数的光栅平均技术进行光电定位的改造,于是使这些机床达到了新的定位精度水平,再加上投影曝光系统,从而形成了光电刻划机床。在此基础上,由长春光机所、中国科学院光电研究所及昆明机床厂联合研制成功了0.2"光电圆刻机,使我国该类机床列入了国际先进行列^[4]。在长刻机方面,则较多采用激光定位,形成激光定位的长光栅检拍机,使我国的长光栅刻划达到了一个新水平。但从长光栅精度而言,由于环境控制、材料等因素,与国外同类产品相比尚有一定距离^[5]。

2. 照相复制

解放后,我国的经纬仪制造虽然取得了成功,但其中的度盘全采用圆刻机刻划,不但费力,而且废品率高。1965年,我国组织了度盘照相复制的攻关,采用虫胶和重铬酸铵等作感光胶,用真空镀铬进行着色,从而取得成功。于是大量的经纬仪度盘、测角仪度盘、

光栅以及各种分划板等都逐步采用照相复制进行批量零件加工,而这些零件的母板则由刻划机、刻字机刻出,不但减轻了昂贵的机床的工作负担,同时提高了零件的生产率并降低了成本。

照相复制成功之后,在采用的胶层上作过多方面的研究^{[7],[8]}现已用聚乙烯醇来取代虫胶,使成分更为稳定,并用水进行显影定影,这显然对工作人员的健康有利,目前不少单位已采用聚乙烯醇胶作为照相复制用膜层^[8]。

随着大规模集成电路的不断发展,对于光刻胶的研究也日益取得进展^{[9],[10]}。考虑到光刻胶的分辨率高,做细线条就有了希望。为了提高分辨率,不得不缩短光源的波长并从提高光刻胶分辨率着手,于是发展了紫外光刻^[11]、电子刻划、离子刻划等工艺,而其中一些工艺已在光学界得到应用,但我们认为,由于光学界目前受到投资的限制,采用这类光刻技术的速度比起大规模集成线路来较为逊色。

在照相复制的膜层中,尚有一些各有特色的膜层,如火棉胶层、超微粒干版以及其他的特殊制版软片等等^{[12],[13]}。由于超微粒干版的膜层颗粒细、分辨率高,而涂布又不困难,于是在制作光刻模板、中间板等方面有着很好的前景,因为它不但分辨率高,而且曝光能量较小,显影、定影之后,已制成的图案和线条不需真空镀铬。

3. 检验

刻划零件的最大特点不是有规律的线条,便是各种各样的图案,它们或作对准用或作检测元件用,对尺寸的误差,图案的准确性,长度的误差、角度误差等方面都有较高的要求。为此,刻划技术、光刻技术的发展实际上需检验方法、检验设备的相应发展。

根据不同的参数和不同的精度要求,检定时采用多种多样的方法和手段,例如刻划线条的宽度、长度,所刻数字的端正性等项目,在刻划和照相复制工序中需要不断检定,其中长度和角度误差检定^[14]要求较高,而对光栅、码盘而言,则还需加上直流电平漂移、相位漂移、圈间误差等等的检定。

长刻尺检定基本上经过了刻尺目视比较、光电显微镜跟踪、激光干涉仪检定等阶段,从而使我国刻划长尺的水平不断提高,同时保证了万能工具显微镜、阿贝比较仪等用刻尺的仪器的质量。

随着激光技术和光测技术的发展,我国在上海、成都、汉中、昆明等地相继制成了激光比长仪^[15]。它是以激光波长作为基准,这显然使长度检定的精度大大前进了一步,于是高质量的母板皆采用激光比长仪检定。激光比长仪的制成主要依赖于电子计算机对环境因素的修正,激光拍频技术的进展,动态光电显微镜的进步以及机械、环境控制等方面的成功。

角度检定方面,除采用一般的比较法外,还有常角法、排列互比法、多次联系法等^[16]。常角法检定不需要标准器就可对被检盘进行检定,于是在没有很高标准器的情况下,可检定高精度度盘、码盘、光栅等。采用多常角法则可检定较小的检定间隔,例如 3° 、 5° 间隔。

随着光电显微镜技术的发展,我国制成的以度盘加上多只光电显微镜平差的角度基准系统,可自动检定格线和直径误差,用来检定度盘母板更为合适。

光栅技术的发展,特别是光栅多头读数的平差作用,为发展光栅盘作为定位基准打下

了基础。我国首先由长春光机所研究了多头读数的光栅系统。之后,不但制成了光电圆刻机,而且制成了码盘、光栅盘检验仪和六十进制度盘^[17]、光栅盘检验仪,从而使光栅盘、度盘能自动检定且达到高精度的水平。

在我国的角度测定系统中,还有用多面体、多齿分度器再配上光电平行光管来进行角度测定的。在圆刻机检定、度盘检定及角度实物标准检定中常采用这些检测手段,由于篇幅所限,在此未能收入详尽材料。

三、国内外比较

圆刻机情况国内外比较,已在文献[4]中详述过,本文就下述几个方面作些比较。

1) 金属刻划 国内用不锈钢作为金属刻尺的材料,亦有用钢带作刻划光栅的基体的,但同玻璃件相比,使用的比例较小;然而国外用不锈钢、软钢做材料的零件相当多。值得注意的是在Heidenhain长光栅系统说明书中,光栅,感应同步器采用金属材料的比重较大。用金属做基体,其主要的优越性是线膨胀系数同仪器、机床金属零件较为接近甚至一样,从而减小温差带来的误差。

2) 圆光栅制造^{[18],[19]} 国内的圆光栅,采取由刀刻光栅进行复制或是用扇形母板曝光拼接而成,这两种工艺都较为流行;国外较多采用扇形拼接法,特别是英国的有关这方面的论文、著作报导,说明此法用得较为普通。径向光栅的黑白比为1:1,线条外径处宽,内径处窄,这样可使各个直径上的开口比相等,线条可长达15mm,指示光栅做成大约30°的扇形。在光刻过程中采用的是正性光刻胶。

3) 光刻胶 1950~1960年,由于印刷线路的发展,应用了光致抗蚀剂。作为负性抗蚀剂Kodak的KPR是第一批商用材料。1960~1970年微电子技术的发展,使KTER、AZ1350等抗蚀剂使用面越来越广,国外光学行业很快地应用这些胶层及技术,很多报导采用光刻胶作为分划板、度盘、光栅的光刻或照相复制用材料。相比之下,国内光刻胶在光学行业中的应用要少得多。此外,国外在微电子技术中发展的远紫外光刻、电子刻蚀、离子刻蚀等工艺及胶层在国内引入到光学行业的应用也较少。

4) 精度检定^{[21],[22],[23]} 线纹尺的检定可用早已报导过的激光比长仪来进行。将线纹尺放在随动工作台上,用光电显微镜瞄准线纹。在自动测量时,可用一随动系统将线纹尺送至光电显微镜视场之内。如用氦灯作光源时,将用三种波长,642.28206 nm(红光)、605.78021 nm(橙光)和565.11286 nm(绿光)。激光干涉仪的激光光源是一种稳频激光器,对所测量的钢尺来说,标准偏差为0.03 μm。因此认为,在高精度的线纹尺长度测量中,只是偶尔作为校验测量时才需要与氦灯进行比较。

1980年7月,法国国家试验研究所研制了一台检定线纹尺的自动装置,接着把使用范围扩大到量块的检定。

考虑到装置有较大的测量范围,检定时必须把尺子、量棒和量块固定在花岗石工作台的适当位置上,并将其校平。检定量块时,把镜面抛光区内刻有一条精细刻线的侧块拼合在量块两端,使量块变成线纹尺模样。

检定线纹尺和量块的侧块时,刻线用光电显微镜发出重合信号,检定编码尺时,利用编码尺的检测器。在这两种情况下读数时,无须停止平移运动。

该装置的总精度用本身检定尺子的数值与国际度量局对同一尺子检定数值进行对比后

得到。所用尺子为1m, 刻有毫米刻线, 线宽 $4\mu\text{m}$ 。要求在1h20 min内完成全部毫米刻线的检定。尺子放在检定室内, 经过12h恒温后, 在很好的测量条件下, 测量误差为

$$\Delta x = \pm (300 + 0.34x) \times 10^{-6} (\text{mm})$$

式中 x 是以毫米表示的被测长度, 上式中常数项主要来自显微镜在刻划定位中的误差, 第二项系数主要由尺子温度不均匀所造成。

角度和角度测量系统的检定, 可以联邦德国海特海因为例。他们采用精密空气轴承和电子计算机, 采用增量为 $0.1''$ 的测角仪来进行测定。用承载力为500kgf和径向跳动量为 $\pm 0.02\mu\text{m}$ 的双球面空气轴承作为导轨。轴承上载有角规和直径为400mm的玻璃盘, 盘上有162000条刻线。这些刻线用对径的光栅读数头来读数, 对读数进行计值, 并输送给计算机。经计算机处理后输出记录下来的误差曲线。工作台的电机驱动能调节范围, 自 10r/min 到 $1''/\text{s}$, 工作台的测量精度为 $\pm 0.15''$ 。

从上述可知, 长度方面, 国内较国外的检定精度要低些, 而角度检定方面与国外水平已相差不多^[24]。

5) 线纹质量和生产率 根据不少专家到国外参观访问回来的报告, 以及国外专家对我国刻划件的看法, 大致是: 我国不少刻划件的线纹质量较好, 即线条边缘挺直、针孔点少, 光密度亦可达到标准, 但是相比之下, 我国刻划、照相零件的生产率较低。虽然照相法提高了生产率, 但是同国外先进工厂的流水线的生产率相比, 我国的生产方式是单件的, 作坊式的, 因而生产率低, 废品率高, 生产成本低, 于是对于产品出口, 造成了较大的障碍, 是我国在这方面应该发展的重点之一。只有高效率高质量的生产, 才能使生产成本下降, 产品质量提高^[25]。

参 考 文 献

- [1] 邹自强. 精密主轴的双周晃动现象. 计量学报, 1982(4)
- [2] 曹向群, 刘旭, 金彤. 圆刻机精度检定. 浙江大学学报, 1985(5)
- [3] 陈林. 多圆法刻划圆光栅. 上海机械学院学报, 1981(4)
- [4] 邹自强. $0.2''$ 圆刻机的基本原理. 光学机械, 1983(2)
- [5] D.F. Horne. Photomasks Scales and gratings. Adam Hilger Ltd, 1983
- [6] Heidenhain Nc—Linear Transducers, 1983
- [7] 汪国孝, 温忠义, 何复兴等. 大面积码盘、光栅盘虫胶复制技术. 光学机械, 1983(2)
- [8] 郑大千, 周建军. 光学精密照相复制D-PVA感光胶的研制及其应用. 刻划照相论文集. 浙大光仪系, 1985.
- [9] 曹向群. 国外精密刻划和照相复制的发展. 仪器仪表加工技术专辑. 沈阳仪器仪表工艺研究所, 1986
- [10] D.F. Horne. Optical Scales, reticles, gratings masks and standards Appl Opt 1981(23)
- [11] 王兴无, 杨云岐, 邵慧玉. 远紫外光刻的实验研究. 光学工程, 1986(4)
- [12] 刘怀道. 铬盐感光胶的工艺性能分析. 应用光学, 1986(1)
- [13] 邹海兴. 激光光刻技术与接触光刻术的发展. 上海光机, 1987(3)
- [14] 长春光机所十六室. 检测圆光栅的光电定角比相法. 光学机械, 1983(2)
- [15] 吴蜀华, 马寿益. 激光定位光栅动态检验仪的研制. 计量技术, 1988(2)

- [16] 吕文松, 魏爱敏, 赵安太. 圆光栅的检测及数据处理. 光学工程, 1982(1)
- [17] 朱应时, 孙承浦, 李桂霞. 60进制光电圆分度检验仪使用效果. 刻划照相论文集. 浙大光仪系, 1985
- [18] I.A. Routledge, Recent developments in Precision radial grating manufacture, Precision Engineering, 1984(2)
- [19] P.R. Jain, P.H. Sydenham Radial metrological pattern generating engine. J. Phys. E Sci Inst., 1980(4)
- [20] 俞瑞英译. 抗蚀剂和用抗蚀剂制造光学元件的动向. 译自光学(日文), 1983(2) 浙大光仪系资料
- [21] 陈大成译. [日]尺寸和轮廓测量的最新发展. 国外计量, 1985(3)
- [22] T. Masuda M. Kajitani, Automatic Calibration System for Polygon mirrors. Precision Engineering, 1985(1)
- [23] T. Masuda, M Kajitani, An automatic Calibration system for angular encoders Precision Engineering, 1989(2)
- [24] 黄维实. 莫尔技术的发展. 刻划照相论文集. 浙大光仪系, 1985
- [25] 黄尚廉. 国外几何量计量测试仪器技术的发展. 重庆大学光电所论文集, 1985

光电圆刻机的发展概况及基本原理

中国科学技术大学 邹自强

本文除介绍圆刻机的基本原理外, 还根据本人所搜集到的资料综述了圆刻机的发展历史。在漫长的发展过程中, 圆刻机大体经历了抄录刻划, 机械刻划和光电刻划三个阶段。中国古代曾对刻划技术的发展作出过重要贡献。表1、表2所列是世界上圆刻机的生产及研制现状。

作者及其同事们近十几年来研究成功的一种光电圆刻方法的特点是: 利用传统的机械方法进行分度粗定位, 而后再用光电伺服控制对误差进行微量校正。这是一种机电结合、粗精结合的方法, 和国外已有的方法相比, 电子控制系统大为简化; 既可进行间歇刻划, 又可进行连续刻划; 既可进行“光刻”, 又可进行“刀刻”; 还便于对现有机机械式圆刻机进行光电改装。

近代刻划技术要求之一是刻线越来越密, 分度间隔越来越小, 所以本文还介绍了作者在1971年提出的在光电圆刻机上实现的一种细分刻划方法, 即用移相电阻链和细分机构相结合的方法, 它可将刻线密度提高数十倍。

一、历史和现状

圆刻机是制造度盘、码盘、光栅盘等测角元件的关键性设备, 在近代尖端技术中, 例如在火箭弹道测量设备、光电自动检验、超精加工等方面起着重要作用。随着近代科学技术的飞速发展, 圆刻机也有了很大进展, 在近代圆刻机上集中体现了当代精密机械制造、光电自动定位等技术的代表性水平。

圆刻机是制造圆刻度的工具, 人类社会的发展一直离不开度量问题, 因而也一直离不开相应的刻度技术。在国外, 有关刻度的最早的有文字记载的成果是在公元前^[2], 到了公元9世纪有了圆刻机的原型^[3]。在我国, 则有着更为悠久的历史, 大量考古挖掘工作已经发现中国古代许多刻度技术的杰出成果, 早在皇帝时代(公元前2000年)中国就制造了骨尺和玉尺^[4], 这种在骨头上和在玉石上所进行的刻度虽然很粗糙, 每一寸刻一条线, 用肉眼就可分辨出刻度不均匀, 但它们反映了中国远古时代的刻度雏形。到了战国初期(公元前500年), 铜尺刻度已经细到每一分一条线, 刻度总长误差已经做到“不差累黍”^[5]。公元前488年, 鲁班改进了木工尺的刻度标准, 西汉时期(公元9年)制成的新莽铜尺, 刻线细处一分一条线, 刻度工艺十分精巧, 使用滑动的游尺进行读数, 和近代的游标卡尺十分相似^[6](图1)。元朝郭守敬在著名的简仪上, 把圆刻度刻到每6分一条线。清朝康熙十三年(公元1674年)制造的地平经仪上, 度盘直径大到近2m, 为了加强刚度而又减轻重量, 巧妙地用一条腾空飞舞的长龙支持着刻度圈, 龙身飞向一边起到静平衡的效果, 每度内刻有10条线, 附加刻有斜向细分刻线, 可以细读到10″。清朝乾隆九年(公元1744年)制造的畿衡抚辰仪度盘直径约2m, 具有很高的刻度水平, 当时曾详细著书论述了刻度技术的

许多问题,如:度盘平面的加工方法、刻度方法等等还绘图说明了度盘自重怎样引起变形、主轴磨损后怎样继续维持轴系精度等等,乾隆皇帝亲自为此书写了序言^[6]。这在200多年前的历史条件下,在世界技术史上也是一项宝贵的历史遗产。

圆分度刻划方法和刻划机械的发展大体上经历了三个阶段,即:

1) 抄录刻划 它是以原始“母盘”为分度基准,进行抄录复制,在抄记过程中可以对“母盘”误差加以修正。这种方法出现得最早。原始的“母盘”是用圆规或者夹成角度的两个标记进行反复校正刻出来的。这种古老的方法直到现在有些地方仍使用它。

2) 机械刻划 它是以精密蜗轮等机械原件为分度基准,依靠蜗轮蜗杆等传动机构进行刻划,18世纪中期,在美国和德国差不多同时出现了这种自动刻度机^[2],较大量的推广使用这种刻度机是本世纪20年代。目前,作为商品出售的圆刻机主要是这种类型的。

3) 光电刻划 它是以圆光栅等光电元件为分度基准,依靠光电控制来进行刻划,是最近20几年出现的新型刻划方法,现在还没有国家以正式商品方式提供这种圆刻机。

圆刻机按其刻划精度可以分为以下四个等级:

- i) 低精度级,最大直径误差大于 $\pm 10''$;
- ii) 中精度级,最大直径误差大于 $\pm 1'' \sim \pm 10''$;
- iii) 高精度级,最大直径误差大于 $\pm 0.2'' \sim \pm 1''$;
- iv) 超精度,最大直径误差小于等于 $0.2''$ 。

目前,各国高精度圆刻机如表1所示,超精级的如表2所示。

光电圆刻机发展历史还短。民德在50年代初期曾经作过尝试,但当时效果不佳^[9]。美国Baldwin公司于1955年初步建成一台光电圆刻机^{[10], [11]},后来进行不断改进提高^{[12], [13], [14]}。英国J.M.Burch于1960年提出了一种方案设想^[17],N.P.L.于1966年建成了一台圆光栅刻划机^[18]。荷兰Philips公司依靠N.P.L.提供的母光栅也进行过光电刻划试验^[19]。

本人及其同事们1963年设计改造了一台光电圆刻装置(图2),开始探索间歇运动刻划的光电控制方法,当时用人工校正方法刻出了一些试验性度盘,在精度上比原有 $1''$ 机械圆刻机有明显提高^[22];1971年,用同样原理改造建成了一台正式的光电圆刻机,刻出了成品码盘;经过进一步改进,1972年又建成了另一台光电圆刻机(图3),除可进行间歇刻划外,进一步试验成了光电连续刻划方法,刻出了多种高精度码盘和光栅盘。在以上三阶段工作的基础上,按照这些基本原理。经与昆明机床厂、大邑光电所合作于1974年研制成 $0.2''$ 光电圆刻机。近年来,我们在使用中对长春光机所这台 $0.2''$ 光电圆刻机(图4)不断改进,性能有了进一步提高,在一般情况下,最大直径误差 $\leq \pm 0.2''$ (直径全中误差 $\leq \pm 0.1''$);经过特殊措施,最大直径误差 $\pm 0.1''$ 左右(直径全中误差 $\pm 0.046'' \sim 0.078''$),

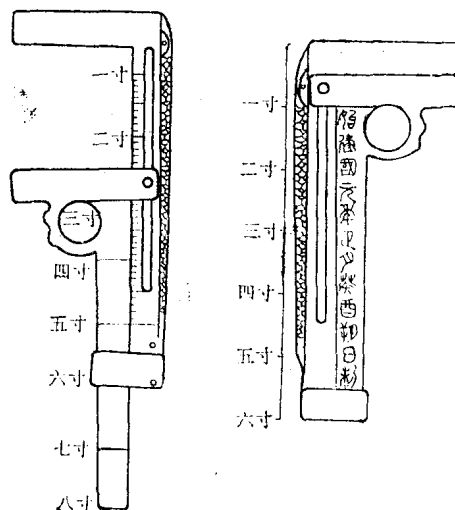


图1 中国古代新莽铜尺刻度

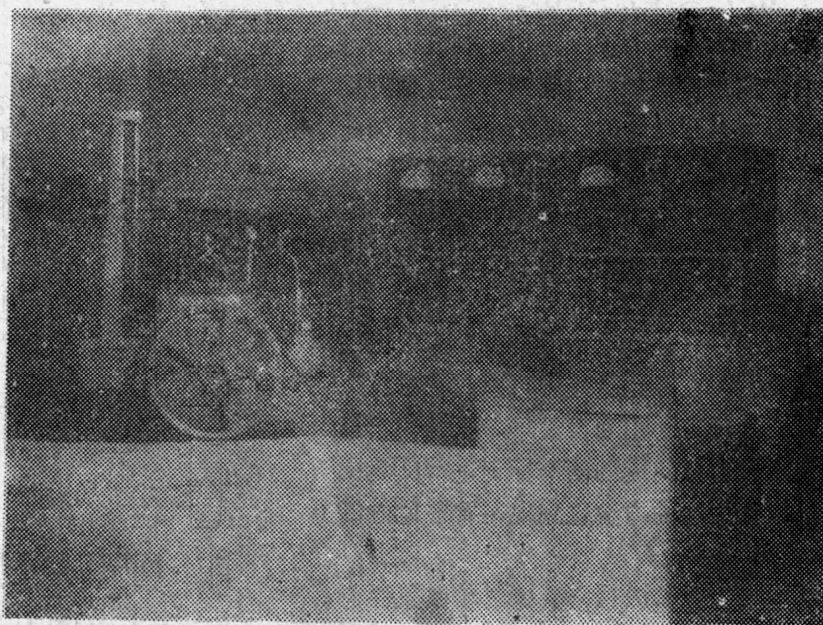


图2 1963年光电圆刻装置

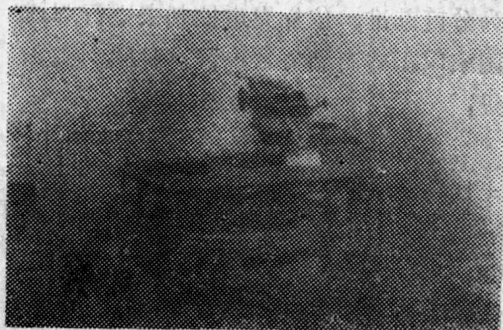


图3 1972年光电圆刻机



图4 0.2圆刻机外貌

表1 世界各国高精度圆刻机生产情况

国 别	民 德	民 德	瑞 士	中 国	苏 联
型 号	TKF450	TM-43	SIP	QG4110	BE-05
刻 度 误 差	直径全中误差 $\pm 0.4'' \sim \pm 1''$	直径全中误差 $\pm 1''$	直径全中误差 $\pm 1''$	最大直径误差 $\pm 1''$	最大直径误差 $\pm 0.5'' \sim \pm 1''$
最大刻度直径(mm)	450	600	1000	1000	1000
分度基准元件	精密蜗轮	精密蜗轮	蜗轮加修正板	精密蜗轮	精密蜗轮
轴 系 结 构	双锥轴系	双锥轴系	双锥轴系	双锥轴系	V形槽滚珠轴系
刻线速度(条/min)	8~16	8~16	4~10	8~16	4~16
最大刻线长度(mm)	12	12	12	12	15

表2 世界各国超精级圆刻机研制及生产情况

国 别	美 国	英 国*	中 国	民 德
刻 度 误 差	最大直径误差 $\pm 0.3''$	最大直径误差 $\pm 0.2''$	最大直径误差 $\pm 0.2''$	直径全中误差 $\pm 0.1'' \sim \pm 0.2''$
用途(可刻对象)	码盘、光栅盘	光 栅 盘	码盘、度盘光栅盘	度盘、光栅盘
分度基准元件	一块圆光栅	一对圆光栅	一 对 圆 光 栅	精 密 蜗 轮
轴 系 结 构	一对石英球	双 球 轴 系	V 形 轴 系	双 锥 轴 系
刻 划 方 法	光 刻	光 刻	光刻、刀刻	刀 刻
运 动 形 式	连续运动	连续运动	连续运动间歇运动	间 歇 运 动
刻 线 速 度	1/15~20条/min	50条/s	3~20条/min(间歇) 30条/min(连续)	4~16条/min
最大刻度直径(mm)	约400	约300	700	950
最大刻线长度(mm)	2	约30	60	12

* 根据作者访问英国NPL时该实验室所介绍的数据。

这样刻出的高精度光栅盘1981年10月通过了鉴定^[1]。

二、间歇刻划原理

一般的机械刻划方法已经有了长期使用的经验，本人的基本想法是：把光电控制技术和传统的机械刻划方式结合起来，建立一种比较简单而用途比较广泛的光电圆刻方法。它的要点是：分度定位由粗精两步联合完成，粗定位用一般机械方法进行，然后用光电方法校正机械误差（精定位），即光电控制只负责最后的微量误差校正。分度传动、间距调整、刻划动作等仍用传统的蜗轮蜗杆等机械方法来完成。这是一种机电结合、粗精结合的方法。和国外的电子学程控方法相比，它的优点是：电子学系统可以大为简化；可靠性较高；既可进行“刀刻”，又可进行“光刻”；既可进行连续运动刻划，又可进行间歇运动刻划；便于对现有圆刻机进行光电改装以提高精度。

原理示意如图5所示。按照这种原理布置的光电圆刻机的具体结构如图6所示。

在圆刻机主轴上装一块和主轴同心，同轴旋转的光栅度盘（动光栅），使其上刻线稍许偏离中心，并切于一个半径约0.6mm的小圆。再在上面装一块光栅度盘（静光栅），刻线也切于一个

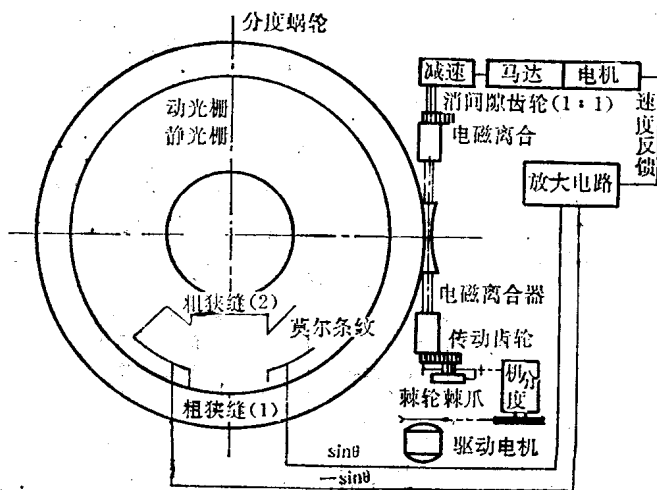


图5 间歇刻划原理示意图

半径0.6mm的小圆，但倾斜方向和动光栅恰好相反。两者刻线数取相同的，对于二进制，32768条线；对于六十进制，32400条线。在平行光照明下形成一簇以主轴中心为中心的同心圆环，动光栅每转过一条刻线，这种莫尔条纹扩张出一圈条纹。

为了准确地瞄准这种条纹，使用了成对的粗狭缝，每对包括两条相邻的粗狭缝，它们均呈圆弧形，中心间距等于相邻两条莫尔条纹间距的一半，缝后各放一块小透镜，焦点上安置光敏二极管，它们敏感出来的波形为较好的正弦波，相位相差 180° 。

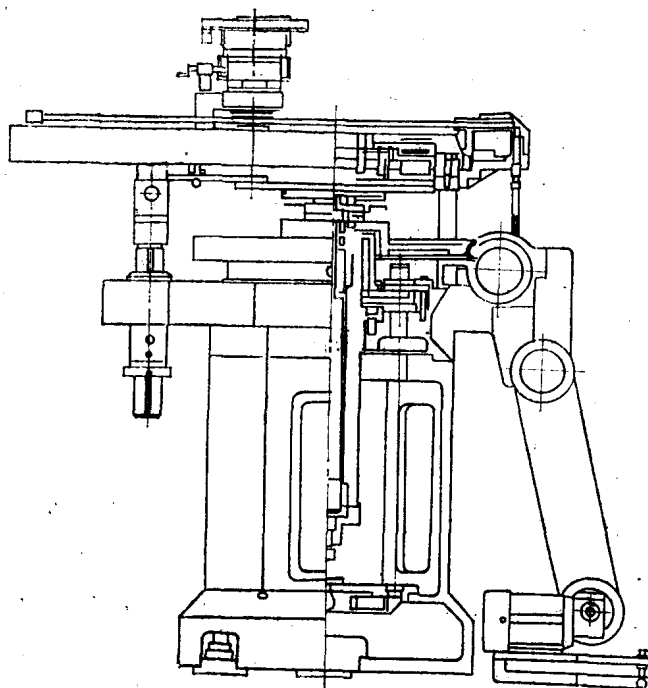


图6 圆刻机结构图

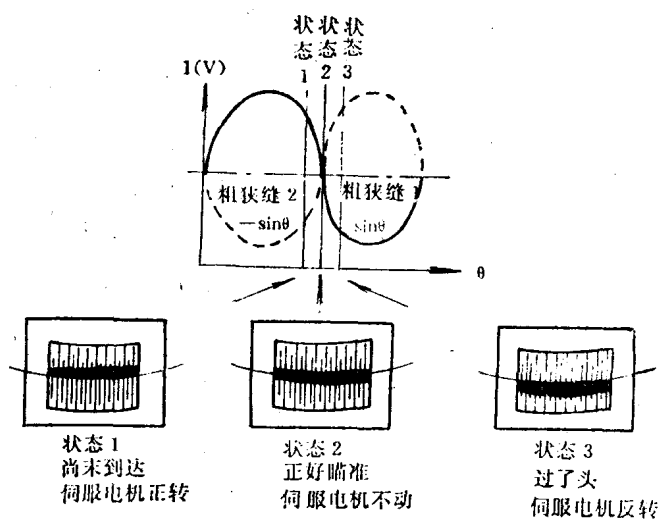


图7 光电信号瞄准状态

这样的狭缝全周共分布有十对，共20个光敏二极管，其中有五对成等间距分布，互成 72° ，另外五对也成等间隔分布，互相也成 72° 。但这五对和前五对互相错开 30° ，并且狭缝径向位置相差 $1/4$ 莫尔条纹间距。这样的组合结果得到：五路正弦信号、五路余弦信号、五路负正弦信号和五路负余弦信号。这二组五路信号分别送入相加电路求取其和，然后正弦和负正弦，余弦和负余弦分别进入差放电路求得其差，得出的输出信号经过斩波和功率放大推动伺服电机组ND—F—09。

每个狭缝长约20mm，包括约700条刻线，所以圆光栅刻线的局部误差和短周期误差被很好地削弱了，中周期误差也得到了相当的削弱。整个圆周上分布多头读数主要为了削弱圆光栅的长周期误差，同时也可进一步削弱中周期误差。多缝读数和多头读数这两种平均作用适当地搭配才能把各种不同频谱特性的误差充分消除掉。狭缝成对的使用，是为了通过差放电路后削弱刻线均匀性对精度的影响，并且补偿灯丝衰老，电源变化等因素对定位精度的影响^[28]。

圆刻机工作时，机械分度系统带动蜗轮和主轴转过了某一角度，停下来以后如果没有误差，莫尔条纹处于双缝的平分线上（图7中的状态2）。这时两路光电信号大小相等，差放输出等于零，伺服电机不动。如果停下后分度尚未达到理想位置（图7中的状态1），狭缝1的信号就大于狭缝2的信号，差放后出现正值，伺服电机就正转，通过减速箱、电磁离合器、消间隙齿轮和蜗轮蜗杆，使主轴正转，一直转到状态2时，差放输出出现零值，伺服电机才停止转动；如果分度停下后，位置过了头（图7中的状态3），狭缝1的信号就小于狭缝2的信号，差放输出出现负值，伺服电机就反转，一直转回状态2为止。

每分度一次，光电信号的波形如图8所示。详细的动作过程也标注在相应位置上。误差校正动作所需时间不应大于每次分度周期的 $1/6$ ，否则就会引入机械误差。

粗动的驱动电机和微动的伺服电机，动力都最后转到蜗杆上，蜗杆两端各有一个电磁离合器，目的是为了把这两种电机的动力互相错开，同时使机械分度误差不会产生累积。当机械分度即将开始（棘爪即将推动棘轮）的那一瞬间，粗动离合器恰好吸上而微动离合器恰好脱开，这两个离合器由同一个凸轮和开关来控制。

微动离合器吸上后，光电校正过程就开始，在指定时间内完成误差校正动作，然后开始落刀刻划或曝光。刀刻或光刻的动作情况和一般刻线机上的动作完全相同。

三、细分刻划原理

近代刻划技术的一个发展趋向是刻线越来越密，分度间隔越来越小，例如高精度的光栅盘和码盘就往往要求很小的分度间隔。用接触倍增法光刻码盘，只有实现几秒量级的分度间隔才能刻成扇形母板。这就要求圆刻线机在提高精度的同时提高可能的刻线数。这台

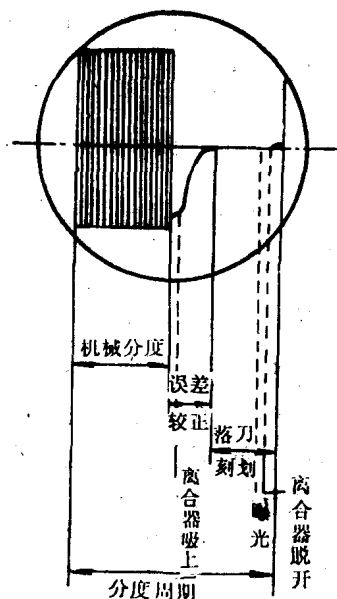


图8 光电刻划示波图形及动作过程