

临界角法激光直写聚焦伺服系统静态特性研究

梁凤超^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

2 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

摘要: 为同时提高金属网栅屏蔽效率及红外透过率, 要求激光直写线条细且均匀。而工件面型误差、光刻胶涂布不均匀性、机械轴系误差等会造成写入焦斑离焦, 影响线条线宽及均匀性。需引入聚焦伺服系统来实时探测并补偿离焦, 确保写入光束实时聚焦在光刻胶面上。给出了临界角法调焦的原理, 搭建了由探焦光路、离焦信号前放、压电陶瓷微位移执行机构组成的聚焦伺服系统, 进行了离焦误差静态特性实验研究。实验结果表明: 系统的静态分辨力为 40 nm, 线性范围为 5 μm, 均满足设计要求。

关键词: 隐身技术; 激光直写; 临界角法; 自动调焦; 伺服系统

中图分类号: V 271.4 TP273 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2011)05-0059-04

Static Characteristics of Auto-Focusing Servo System Based on Critical Angle Method for Laser Direct Writing

LIANG Fengchao^{1,2}

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China

2 Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun 130033, China)

Abstract In order to improve the shielding effectiveness and infrared transmittance of metallic mesh, it is required to narrow the width of laser direct writing line and to improve its uniformity. The error of the shape of the concave spherical substrate, uneven thickness of the photoresist film, or shake of machine shafting could result in defocusing during laser direct writing which will affect the line width and its uniformity. The promising approach to avoid defocusing is to detect and compensate the defocusing error via an auto-focusing servo system. Critical angle method was selected for detecting and compensating the defocusing error. The preamplifier was designed and the weak Focus Error Signal (FES) was amplified successfully. The auto focus servo system was established and the static characteristic curve of FES was demarcated. The static state experimental results show that the distinguishable displacement is 40 nm with the linear range of about 5 μm, which can satisfy the design requirements.

Key words stealth technology; laser direct writing; critical angle method; auto-focusing; servo system

0 引言

隐身技术是通过改变武器装备、平台等目标的可探测信号特征, 使其难以被敌方探测系统发现、识别和跟踪打击的技术。雷达截面积 (Radar Cross Section, RCS) 是影响飞行兵器隐身性能的一个重要参数, RCS 越大, 被雷达发现的距离就越远, 可供拦截方实施的拦

截时间就越长, 从而拦截的成功率就越大^[1], 减小飞行兵器的 RCS 是隐身技术的研究热点之一。隐身技术应用于飞机、导弹等武器装备^[2-3], 能够延迟被发现的时间, 削弱敌方雷达等预警系统探测发现、跟踪的能力, 大大降低其防御系统执行监视、火控和杀伤 3 个功能的概率, 大幅度提高己方目标生存能力。

在各种精确制导体制中, 红外制导因制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、效费比高等优点, 在现代武器装备发展中占据着重要地位^[4]。红外成像制导技术代表了当今红外导引技术发展的总趋势, 是精确制导技术的一个重要发展方向^[5]。在飞行兵器光学窗口上

收稿日期: 2010-05-26 修回日期: 2010-07-12

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (1042ZK1001)

作者简介: 梁凤超 (1978-), 男, 吉林松原人, 博士, 副研究员, 研究方向为自动控制、电磁隐身技术。

制备一层既能高效透过红外光,又能屏蔽雷达波的金属网栅,能够在不影响自身对目标红外识别的同时,有效缩减 RCS 实现飞行兵器的雷达隐身。

1 金属网栅光电特性分析

1967年,德国学者 Ulrich等在 Marcuvitz条状网栅的等效电路模型基础上,全面分析了金属网栅及其互补结构的远红外光学特性。如图 1所示的金属网栅,线宽为 $2a$,周期为 g ,网栅膜厚度为 t 。在自由空间垂直入射情况下,当 $t \ll 2a$, $2a \ll g$,电感性网栅雷达波段透射率近似等于^[6]:

$$T(0,0) = \frac{4g^2}{2} \left[\ln \left(\sin \frac{a}{g} \right) \right]^2 \quad (1)$$

如以分贝为单位定义屏蔽效率为

$$S = -10 \lg T \quad (2)$$

在光学频率范围内,网栅起衍射光栅的作用,对入射光产生多级衍射。网栅的透过率等效于每个衍射级次透射率总和,可简单地由遮拦比(开口总面积的份额)给出:

$$T_{\text{total}} = \frac{(g-2a)^2}{g^2} \quad (3)$$

对成像应用而言,仅中心零级是有用的,包含在中心零级的能量与包含在 PSF(点扩散函数)中的总能量之比为

$$T_{\text{mesh}}(0,0) = \frac{(g-2a)^4}{g^4} \quad (4)$$

是网栅遮拦比的简单平方关系。式(4)说明,线宽 $2a$ 必须做得尽可能小,周期 g 必须做得尽可能大,才可使衍射到中心零级的能量份额最大,使网栅对成像系统性能影响最小。

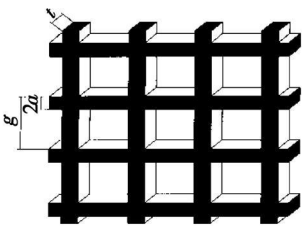


图 1 金属网栅薄膜基本结构

Fig 1 The sketch of metallic mesh

由式(1)~式(4)可知,金属网栅的光电特性是相互矛盾的:当网栅屏蔽效率增加,红外透过率则下降。解决该矛盾的途径就是使金属网栅线宽与周期的比值($2a/g$)越小越好。在实际应用中,网栅周期的大小一般被屏蔽雷达波长所约束,因此,解决金属网栅光电特性矛盾的最好途径就是尽量减小网栅的线宽 $2a$ 并保持线条均匀。

2 临界角法调焦原理

2.1 聚焦伺服系统的必要性

凹球面激光直写设备能够通过激光扫描曝光直接在一定口径的凹球面内写入网栅线条,是制备凹球面网栅的关键设备^[7]。为使凹球面网栅线条线宽 $2a$ 小且均匀,在激光直写过程中需始终保持写入光束聚焦在涂覆光刻胶的凹球面上。虽然凹球面激光直写设备采用四轴同心结构和同心扫描光学系统保证了激光束径向聚焦于凹球面^[8],理论上不会离焦,但由于凹球面的面型误差、表面涂覆光刻胶层的不均匀性、机械轴系误差和设备装调精度等因素,使得在激光直写过程中聚焦光束可能离焦,影响写入线宽及其均匀性。

提高凹球面激光直写线条质量的重要途径是引入聚焦伺服系统,使之在激光直写过程中实时检焦并补偿离焦。在高精度激光直写系统中,常见的离焦误差检测的方法有临界角法、刀口法、像散法、斜光束法、准直小孔调焦法、棱镜顶角分像法、光度法等。其中像散法分辨力高,但动态范围很小;顶角分像法动态范围大,分辨力也高,但系统复杂,调试困难;小孔调焦法系统结构简单,动态范围适中,但动态分辨力低;临界角法分辨力较高、动态范围适中、结构简单、调试相对容易,故在凹球面激光直写聚焦伺服系统中采用临界角法调焦方案。临界角法调焦研究主要是在平面工件中的应用,还未见在球面上的调焦的相关报道。如侯澍研究了像差对临界角方法探焦技术测量精度与灵敏度的影响^[9];熊木地等研究了二元光学激光直写设备中提高调焦伺服系统实时性能的方法^[10-11]。

2.2 临界角法调焦原理

凹球面网栅激光直写设备光学系统包括激光直写主光路与聚焦伺服辅助光路。主光路主要由 He-Cd 激光器、激光功率控制器、空间滤波器、分束棱镜、写入物镜等元件组成。为实时反馈写入光束聚焦状态,采用 He-Ne 激光器作为探焦激光束,对写入物镜进行 442 nm 与 632.8 nm 两个波长消色差设计,保证了这两个波长光束共焦,He-Ne 激光器的聚焦状态可作为 He-Cd 刻划激光束聚焦状态的反馈。在激光直写过程中,聚焦伺服系统作为刻划光束的反馈环节,能够实时探测刻划光束离焦量并实时调整物镜使物面始终处于焦深范围以内,这是确保激光直写线条线宽 $2a$ 小且线条均匀的关键。

临界角法调焦技术原理如图 2 所示。当光从一种媒质向另一种媒质传播时,光在界面上产生反射和折射,其反射系数由菲涅耳公式给出^[12-13]:

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$R_s = \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos t}{n_1 \cos i + n_2 \cos t} \quad (5)$$

$$c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (6)$$

其中: n_1, n_2 是两种介质的折射率; i, t 分别是入射角和折射角; c 为临界角。光从光密媒质向光疏媒质传播 ($n_2 > n_1$)、入射角 i 大于或等于 c 时, 将产生全反射; 当入射角 $i < c$ 时, 其反射系数陡峭下降。临界角法正是利用入射角大于和小于 c 时反射率的显著差异来判断离焦和正焦。

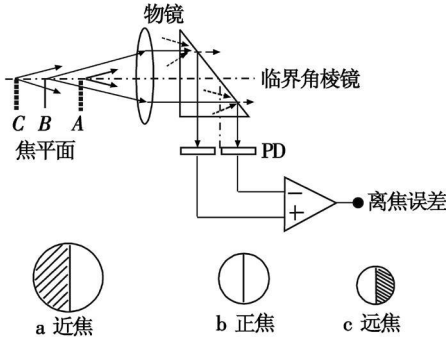


图 2 临界角法调焦技术原理

Fig 2 The principle of focus error detection by critical angle method

图 2 中两象限光电二极管 (Photodiode, PD) 的光敏面对准临界角棱镜出瞳面, 一个象限接收探焦光束光轴以上光束的反射, 另一象限接收光轴以下光束的反射。不同的离焦状态形成会聚、平行或发散的探焦光束, 再经临界角棱镜在 PD 接收窗口形成不同明暗对比的光斑。若 PD 两象限阳极电流分别为 I_1, I_2 , 则离焦误差信号 S_{FES} 为

$$S_{FES} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (7)$$

图 2 中 A、B、C 分别为近焦、正焦和远焦 3 种状态的焦平面。正焦状态时, 经 B 反射的光束为平行光, 在临界角棱镜上的入射角等于临界角, 发生全反射, 在 PD 接收窗口上形成如图 2b 所示的左右明暗程度相同的光斑, $I_1 = I_2, S_{FES} = 0$ 。近焦状态时, 经 A 反射的光束轻微发散, 致使光轴以上光束入射角小于临界角, 反射陡峭下降, 大部分光从临界角棱镜折射出去, 而光轴以下光束入射角大于临界角, 形成全反射, 在 PD 接收窗口形成如图 2a 所示的左暗右明的光斑, $I_1 < I_2, S_{FES} < 0$ 。远焦情形, 经 C 反射的光束轻微会聚, 在二象限 PD 上得到如图 2c 所示左明右暗的光斑, $I_1 > I_2, S_{FES} > 0$ 。在一定的离焦范围内, S_{FES} 与离焦量成线性关系, 测定 S_{FES} 便可探知离焦量。

3 离焦信号的探测

由于探焦激光束经过多组光学元件, 光能量大

量损失: 每经过一个反透射镜大概损失 4%; 经过分束棱镜损失约 50%; 经光刻胶反射约损失 96%。这使得探焦信号非常微弱, 增加了提取离焦信号的难度, 离焦信号的探测是聚焦伺服系统的难点之一。

选择合适的光电探测器接收探焦光斑要考虑其光谱特性、光敏感度、暗电流、象限数目、截止频率和光敏面范围等因素^[14-16]。本系统选择日本滨松公司的两象限光电探测器, 光敏面范围为 10 mm × 10 mm, 暗电流 2 nA, 截止频率 10 MHz。对于波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光来说, 其光敏感度约为 0.43 W/A。为了发挥 PN 型光电探测器的高速响应特性, 将其在反偏下使用, 这样可以减小极间分布电容, 改善其响应速度。

光电信号提取的第一级放大电路为图 3 所示的互阻抗电路, 这不仅能够提高信噪比, 也能提高动态范围^[17-18], 输出电压 V_{OUT} 为

$$V_{OUT} = - (I_s + I_b) R_f + V_{os} R_f / R_s \quad (8)$$

这种方式的界限在于运算放大器的偏置电流 I_b 或者失调电流 I_{os} 。由于偏流 I_b 或失调电流 I_{os} 与被测电流一起被放大 R_f 倍转换成电压, 而一般 R_f 数百 k, 故选择运放时应重点解决 I_b 和 I_{os} 的影响, 同时兼顾失调电压及其温度特性、共模抑制比、频率特性等。

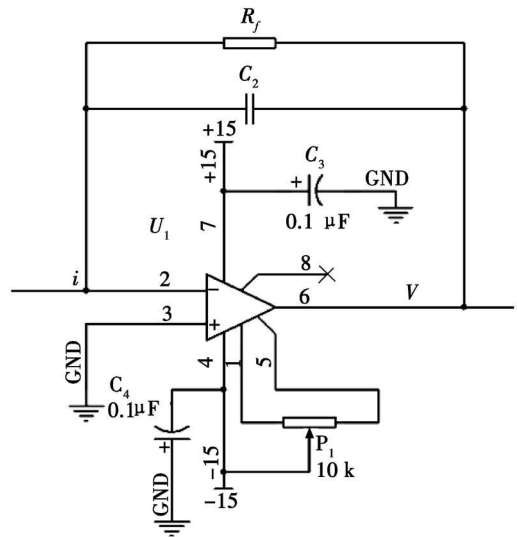


图 3 前置放大电路

Fig 3 The circuit of preamp lifier

4 静态特性实验研究

4.1 实验装置

图 4 为基于临界角法的调焦伺服系统原理与实验装置。调焦伺服系统包括离焦误差检测单元、调焦执行机构和伺服控制环路。激光器、格兰棱镜、偏振分束棱镜、1/4片、物镜、临界角棱镜、光电探测器及其前置放大器属于离焦误差检测单元; 压电陶瓷及其驱动器为调焦执行机构; AD 采集装置采集离焦误差信号输入

到计算机, 计算机软件系统执行调焦控制算法, 控制压电陶瓷驱动物镜调焦, 构成聚焦伺服控制单元。

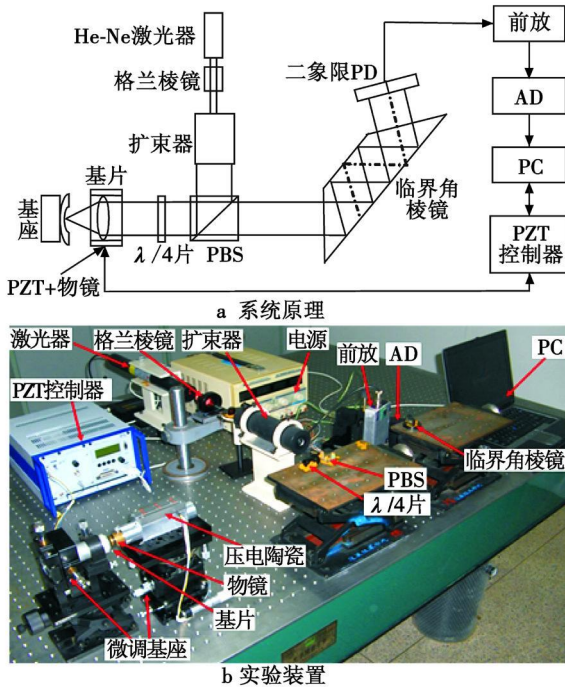


图 4 基于临界角法的聚焦伺服系统

Fig 4 Auto-focusing system based on critical angle method

He-Ne激光器发出的激光束经过格兰棱镜得到 S 偏振态的线偏振光, 经扩束器扩束为直径 10 mm 的平行光束, 经 PBS 进入 $\lambda/4$ 片。调整 $\lambda/4$ 片光轴与线偏振光偏振方向成 45° 角, 使线偏振光变成圆偏振光, 然后经物镜聚焦在凹球面基底上形成探焦光斑。由凹球面基底反射回来的光仍是圆偏振光, 经物镜、 $\lambda/4$ 片后, 又变成线偏振光, 但偏振方向旋转了 90° , 即与原先通过 PBS 的线偏振光振动方向互相垂直, 成为 P 偏振光。这就避免了沿同一光路传播回来的两束光发生干涉。P 光透过 PBS 照射到临界角棱镜的入瞳面, 再经 3 次折 反射由临界角棱镜出瞳面射出, 照射到光电探测器表面上。不同的聚焦状态会在光电探测器两象限上形成不同明暗对比的光斑, 阳极输出电流的差别由前置放大电路及后续电路处理便得出了离焦误差信号。离焦误差信号经 AD 采集到计算机, 计算机软件系统执行调焦控制算法控制压电陶瓷调整物镜, 使物面始终处于写入焦斑的焦深范围以内。

物镜的驱动元件要具有亚微米量级的分辨力, 目前亚微米量级定位精度的驱动器有音圈电机、压电陶瓷、直线电机和静压轴承等^[19]。

由于压电陶瓷的位移分辨率高, 频率响应快、承载大、有良好的机械静压力特性, 且结构简单及受外力干扰小, 因此在调焦伺服系统中, 选用压电陶瓷作为微位移执行元件。选择 PI 公司的压电陶瓷, 行程为 38

μm , 具有纳米级的电容传感器, 分辨力优于 $0.2 \mu\text{m}$, 全程重复定位精度 $3 \mu\text{m}$ 。

4.2 静态特性实验研究

为得到压电陶瓷 38 μm 行程范围内的离焦误差静态特性, 采用的实验方法为: 调整聚焦伺服系统使正焦状态时压电陶瓷位于 19 μm , 作为初始零位。控制压电陶瓷移动到位置 0 μm , 制造远焦状态, 再以一定的时间间隔驱动压电陶瓷以一定的步长向前移动, 同时控制程序自动读取并保存当前 FES 和压电陶瓷位置, 这样压电陶瓷从位置 0 μm 移动到位置 38 μm 时便完成了远焦、正焦及近焦的 离焦量-FES 记录过程。而后, 再控制压电陶瓷由位置 38 μm 返回到 0 μm , 同样自动记录 FES 和压电陶瓷位置得到近焦、正焦及远焦的 离焦量-FES 数据。经多次实验得到如图 5 所示的离焦误差静态特性曲线。由曲线的趋势线可见, 在离焦量 $-5 \sim +7 \mu\text{m}$ 范围内, 离焦误差信号与离焦量保持较好的线性关系, 而超出此范围则表现出一定的非线性。实验结果表明: 聚焦伺服系统的静态分辨力为 $40 \mu\text{m}$, 满足设计要求; 离焦误差静态特性曲线的线性范围约为 $5 \mu\text{m}$ 。

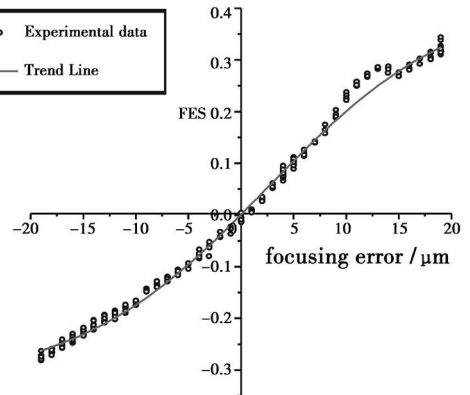


图 5 离焦误差信号静态特性

Fig 5 Static state specification of FES

5 结束语

引入聚焦伺服系统是凹球面网栅激光直写设备写入均匀细线条、进而解决金属网栅光电特性的矛盾重要途径之一。本文研究了基于临界角法的激光直写聚焦伺服系统, 介绍了检焦原理、微弱离焦信号探测技术, 搭建了调焦伺服系统, 针对球面基片进行了聚焦伺服系统的静态特性实验研究。实验结果表明: 聚焦伺服系统的静态分辨力为 $40 \mu\text{m}$, 离焦误差静态特性曲线的线性范围约为 $5 \mu\text{m}$, 达到了设计要求。静态实验研究为下一步进行聚焦伺服系统的动态研究及最终实现凹球面网栅激光直写动态调焦奠定了理论与实验基础。

(下转第 79 页)

- [J]. Applied Optics, 1978, 17(13): 2037-2042
- [2] YAMAMOTO M, WATABE A, UKITA H. Optical progressive dimensions design considerations [J]. Applied Optics, 1986, 25(22): 4031-4034
- [3] TANABE T, TANAKA Y, ARAI R. Simplified analysis of the readout waveform for an elliptical mark [J]. Applied Optics, 1993, 32(20): 3755-3760
- [4] MILSTER T D. New way to describe diffraction from optical disks [J]. Applied Optics, 1998, 37(29): 6878-6883
- [5] 成先富, 贾惠波, 徐端颐. 光盘光学系统标量衍射理论的有效性分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(8): 53-55, 59
- [6] ZHOU Z P, RUAN Y. Optimization of information pit shape and read-out system in read-only and write-once optical storage system [J]. Applied Optics, 1988, 27(4): 728-731.
- [7] MANSUR PURM. Certain computational aspects of vector diffraction problems [J]. Opt Soc Am (A), 1989, 6(5): 786-805.
- [8] MOHARAM M G, GRANN E B, POMMET D A. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. Opt Soc Am (A), 1995, 12(5): 1068-1076
- [9] GRANET G. Analysis of diffraction by surface-relief crossed gratings with use of Chandezon method application to multilayer crossed gratings [J]. Opt Soc Am A, 1998, 15(5): 1121-1131
- [10] 樊超, 孙宁宁, 梁义涛, 等. 基于时间调制的光学相关法测量亚像元像移研究 [J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 73-76
- [11] LIX D, TAO G. Low-frequency harmonic vibration analysis with temporal speckle pattern interferometry [J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34(3): 259-264
- [12] HANSEN R S A compact ESPI system for displacement measurements of specular reflecting or optical rough surfaces [J]. Optics & Laser in Engineering, 2004, 41(1): 73-80
- [13] CHENG H Y, LUO Q M, WANG Z, et al Efficient characterization of regional mesenteric blood flow by use of laser speckle imaging [J]. Applied Optics, 2003, 42(28): 5759-5764
- [14] KHM K D. Applications of laser speckle photography for the mal flow problems [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 29: 171-200
- [15] 徐文东, 干福熹, 施宏仁, 等. CD-R 光盘盘基槽深和槽宽均匀性测试方法研究 [J]. 中国激光, 2001, A28(11): 994-998
- [16] 厄尔夫 R K. 散斑计划学 (原理与应用) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [17] 刘培森. 散斑统计光学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

(上接第 62 页)

参考文献

- [1] 呼玮, 杨建军, 龙光正, 等. 弹道导弹被动段动态 RCS 建模与仿真 [J]. 电光与控制, 2010, 17(4): 22-25
- [2] 张京国, 梁晓庚, 吴万芳. 一种隐身目标电磁散射特性的计算方法 [J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 1-5
- [3] 付伟. 飞机的光电隐身技术 [J]. 电光与控制, 2008, 9(1): 7-10
- [4] 赵超, 杨号. 红外制导的发展趋势及其关键技术 [J]. 电光与控制, 2008, 15(5): 48-53
- [5] 王立. 先进红外制导技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001
- [6] KOHN M, WEN S J, TRAYLOR J D, et al Analysis and design of transparent conductive coating and filters [J]. Optical Engineering, 1993, 32(5): 911-925
- [7] 梁凤超, 胡君, 续志军. 激光直写凹球面网栅的电控实现 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 792-796
- [8] 胡君, 梁凤超, 熊木地, 等. 影响球面光刻线宽均匀度的关键技术 [J]. 光电工程, 2006, 33(3): 1-4
- [9] 侯澍. 像差在临界角方法探焦技术中的影响 [J]. 光学精密工程, 1998, 6(1): 122-126
- [10] 熊木地, 肖文礼, 邢忠宝. 提高实时调焦伺服系统性能的一种新方法 [J]. 微细加工技术, 2001, (2): 1-5
- [11] 熊木地, 肖文礼, 邢忠宝. 激光直写设备调焦伺服控制系统的研究 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 79-82
- [12] 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009
- [13] 郁道银, 谭恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [14] 张洪润, 张亚凡. 传感器技术与应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [15] 浦昭邦. 光电测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [16] 李旭, 王臻. 光电检测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [17] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [18] 席德勋. 现代电子技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [19] 熊木地. 大行程亚微米精度激光直写设备定位技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000