

激光强回馈系统的动态调制稳频技术

曾召利¹, 张书练²

- (1. 第四军医大学 生物医学工程系, 陕西 西安 710032;
2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 激光强回馈系统与弱回馈系统相比, 在无任何电子细分条件下就可获得纳米级的分辨率。但是, 由于其回馈水平高, 容易发生模式转换或偏振跳变, 稳频十分困难。提出了一种激光强回馈系统的动态调制稳频方法, 研究了动态调制稳频中的零点定位、清零补偿等关键技术及算法。实验结果表明, 通过采用动态调制稳频技术, 消除了激光强回馈系统中的模式转移及偏振跳变现象, 获得了调制均匀、幅值相等的回馈条纹, 有效地解决了激光强回馈系统的稳频问题, 大大提高了系统的抗干扰能力, 对进一步研究高精度强回馈测量系统具有重要意义。

关键词: 稳频技术; 激光强回馈; 动态调制

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1402-06

Dynamic modulation frequency stabilization technology in laser strong optical feedback system

Zeng Zhaoli¹, Zhang Shulian²

- (1. Department of Mathematics and Physics, The Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Compared with laser weak optical feedback, laser strong optical feedback can obtain nano-scale resolution without any electric subdivision. However, it is hard to stabilize the laser frequency owing to the strong feedback level high, which may result in mode transformation or polarization flipping. A novel technology of dynamic modulation frequency stabilization method was presented. The key technologies and algorithms of zero point and reset compensation were studied systematically. Experimental results show that the uniform modulation and equal amplitude fringes are obtained. The frequency stabilization problem of strong optical feedback system is resolved successfully by using the dynamic modulation frequency stabilization technology. The result plays an important role in developing high accuracy displacement measurement system with strong optical feedback.

Key words: frequency stabilization technology; laser strong optical feedback; dynamic modulation

收稿日期: 2014-09-20; 修订日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(61405247, 60827006)

作者简介: 曾召利(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光技术及精密测量方面的研究。Email: zengz107@fmmu.edu.cn

0 引言

激光回馈是指在激光测量系统中,激光器输出光被外部物体反射后,其中一部分光回馈到激光器谐振腔与腔内光场发生自混合干涉,从而调制激光器的强度输出。激光回馈测量方法与传统的双光束干涉方法相比,具有灵敏度高、结构简单、自准直和性价比高等优点,已在位移测量^[1]、速度测量^[2]、振动测量^[3]、成像技术^[4]、内应力测量^[5]等领域广泛应用。

激光回馈根据回馈水平(返回到激光器谐振腔的光强与输出光强之比)大小,可分为弱回馈、中等回馈和强回馈等三种。目前,广泛使用的是激光弱回馈测量系统,它的分辨率为二分之一波长。为了获得更高的分辨率,人们提出了电子细分^[6]和光学细分^[7]两种办法。其中,电子细分法分辨率高,可达亚纳米量级,但是受偏振混合和电子噪声等因素影响,测量结果的电子误差难以避免^[8];基于激光强回馈的光学细分法是使激光输出在回馈腔内经历多次往返,形成多重回馈,该方法在没有任何电子细分条件下,分辨率可达纳米量级^[9]。但是,在基于激光强回馈的测量系统中,由于采用高反射率回馈镜,回馈水平增强,激光输出对回馈光的变化十分敏感,激光频率受回馈光影响较大,可达上百 MHz;而且,在强回馈时激光器容易出现模式转换或偏振跳变现象,由此带来的频率变化可达几百 MHz,将导致测量系统无法正常工作。因此,必须对激光强回馈测量系统进行激光稳频。

文中提出了一种外腔动态调制稳频技术,该技术将动态回馈调制与等光强热稳频方法结合起来,在动态回馈调制产生稳定的、动态回馈光场同时,施加等光强热稳频方法进行稳频,从而有效地解决了激光强回馈系统的稳频难题。

1 系统结构

激光强回馈系统的动态调制稳频装置如图 1 所示,整个系统由双频激光热稳频、信号处理和外腔动态调制等三部分组成。其中腔镜 M_1 、 M_2 和石英晶体 Q 组成半外腔双折射双频氦氖激光器,凹面镜 M_1 的反射系数 $r_1=0.996$, 曲率半径 $R=1\ 000\text{ mm}$, 平面镜 M_2 的反射系数 $r_2=0.994$ 。腔镜 M_2 、回馈镜 M_3 和压电陶瓷(PZT)组成动态调制部分,其中 M_2 固定不动, M_3

被加载有 20 Hz 三角波电压的压电陶瓷驱动,一直处于往返运动状态,其作用是在腔镜 M_2 和回馈镜 M_3 之间产生稳定的动态回馈光场。 M_3 的反射系数为 $r_f=0.99$, 曲率半径为 $R=500\text{ mm}$ 。ATT 为衰减片, P 为位移台。沃拉斯顿棱镜 PBS、光电池 D_1 、 D_2 和稳频电路 S 一起组成信号处理部分。Res 为电阻丝,缠绕在激光增益管表面。

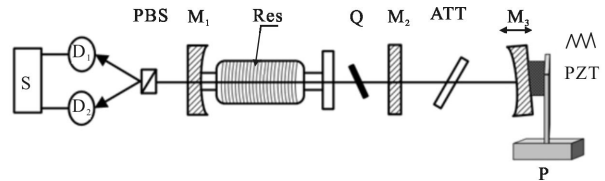


图 1 动态调制稳频系统结构图

Fig.1 Structure of dynamic modulation frequency stabilization

2 动态调制稳频工作原理

动态调制稳频技术的工作原理如图 2 所示。PZT 在周期性电压的驱动下推动回馈镜往复运动,在激光腔镜与回馈镜之间形成稳定光场,并实现对腔内光场的动态调制。同时,两光电探测器分别接收两正交偏振光,经过光电转换及放大、滤波后,进行光强比较,并把其光强差值作为激光稳频的参考信号,通过控制缠绕在激光器外壁上电阻丝的通断,利用不同占空比的方波电压对激光器进行加热和散热,从而控制激光器的腔长,使两分裂模稳定在增益曲线对称的位置,并以这两个分裂模的位置为中心往复运动,从而实现稳频。

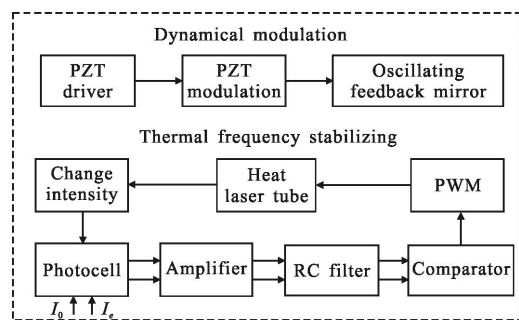


图 2 动态调制稳频技术工作原理图

Fig.2 Chart of dynamic modulation frequency stabilization

3 动态调制稳频技术中的零点问题及最小值算法

在动态调制稳频技术中,由于 PZT 上加载有 20 Hz

的三角波电压(如图3所示),回馈镜 M_3 一直处于PZT的调制运动状态,将无法确定采用该技术的位移测量系统的零点位置。也就是说,在物体开始运动时刻或停止时刻,无法判断被测目标对应的PZT伸缩位置,因此会把PZT的伸缩位移叠加到被测目标的位移中,引起测量误差。为了解决该问题,设计了一个最小值算法。算法的核心思想是:在PZT的一个调制周期内,每次只取出该周期内PZT的零点位置(即无伸长量位置)的数值进行显示,从而避免将PZT的调制位移叠加到被测目标的实际位移。

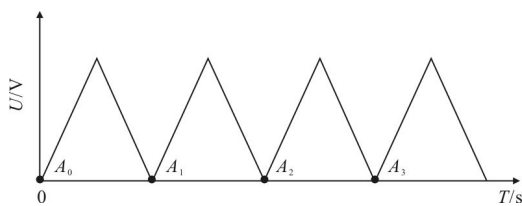


图3 压电陶瓷驱动电压调制图

Fig.3 Schematic of PZT driving voltage

算法的实现过程是:当被测目标没有位移时,在第一个PZT调制周期内,PZT的驱动电压从0V(如图3中的 A_0 位置)逐渐增加到最大值,此时回馈镜的位置从PZT伸长区间的零点移动到最大值;然后PZT的驱动电压从最大值逐渐减小到零值(A_1 位置),这时回馈镜也回到零点,计数器的数值最小。通过比较算法,总可以找到该周期内计数器的最小值,即PZT的零点位置(如图中的 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 等),并发送到显示屏显示,这样显示屏每次显示的数值都将是回馈镜处于伸缩零点时的位移值,即液晶屏显示为零。当被测目标移动时,PZT的调制位移会叠加到被测目标的位移中,此时通过比较器,只要找到一个周期内的最小值,就扣除了PZT本身的调制位移量,也就找到了被测目标此时的实际位移值。测量中,PZT调制设计的周期只有0.05s,能够满足动态测量和实时显示的要求。当被测目标运动停止时,PZT仍然处于调制运动状态,其位移值为被测目标的实际位移值加上PZT的调制伸缩位移,同理,此时通过比较器找到在该位置处PZT一个调制周期内的最小值(如图中的 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 等),该最小值就是PZT调制伸缩位移为零的值,即没有叠加PZT调制伸缩位移的被测目标的实际位移值,此时液晶屏显示的数值为被测目标的实际位移大小。通过上述算法,成功

地消除了由PZT调制运动引入的附加位移,解决了测量中的零点问题。

4 动态调制稳频技术中的防抖问题

在激光强反馈系统用于位移测量过程中,不可避免地要按清零开关或复位开关。而这些按键开关大部分为机械接触,当接触点闭合或断开时都不可避免地产生一连串抖动信号(如图4所示)。从图中可以看出,每按下一次清零键,本应该产生一组稳定的上升或下降沿信号。但是,由于按键抖动,产生了多组上升或下降沿信号,如果不滤除抖动信号,将引入抖动误差,即按下清零键后显示一个随机的抖动误差值。

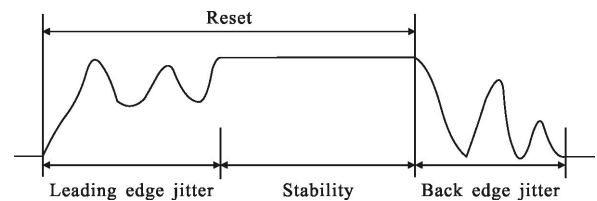


Fig.4 Schematic of reset jitter

为了解决该问题,采取了基于CPLD的计数器延时消抖设计。设计思路:首先设定正确的计数时钟脉冲,当判断到清零键按下时开始计数,计数器计满后,再判断按键状态,如果按键仍然保持按下状态,则认为按键已经稳定闭合,对信号进行后续处理,否则认为是抖动信号,不做任何处理。这里,设定抖动信号的延时时间是消除抖动信号的关键,如果延时设置过长,会使正常的清零得不到处理;如果延时设置过短,抖动信号又不能全部滤除。统计表明,一般人们按键的时间都会大于100ms,而抖动信号的时间一般小于10ms,因此,通过设定合适的延时时间可以很好地解决该问题。实验中,延时时间设置为40ms,该时间阈值不但能够及时处理清零信号,而且还能够有效地滤除按键的抖动误差。

5 动态调制稳频技术中的清零补偿

在动态调制稳频技术中,由于回馈镜在PZT驱动下不停地往返运动,因此会给回馈测量系统的清零带来麻烦。在采用动态调制稳频技术之前,当被测目标不移动,回馈镜也不动(无PZT调制)时,按下清零键,CPLD会发送一个清零值信号值 $0 \times 800\,000$ 给

单片机, 单片机芯片内本身已存储有位移的零点位移值 $0 \times 800\,000$, 此时单片机的处理结果为: 清零信号值-零点位置值=0, 所以液晶屏显示为零, 显示结果正确。

但是, 采用动态调制稳频技术后, 回馈镜(固定在 PZT 上)一直处于调制运动状态, 在按下清零键时, 无法确定回馈镜处于 PZT 伸长区间的什么位置, 它有可能处于 PZT 伸长区间的零点位置, 但更大的可能性是处于 PZT 伸长区间零点位置与最大伸长位置之间的某一点, 比如图 5 中的位置 A。当按下清零键时回馈镜处于 PZT 伸长区间的位置 A, CPLD 将发送清零信号值 $0 \times 800\,000$ 给单片机, 单片机芯片内本身存储有位移的零点位移值 $0 \times 800\,000$, 此时单片机的处理结果为: 清零信号值-零点位置值=0, 液晶屏显示为正常的零值。但是, 从此刻开始, 回馈镜的零点位置已经变为了 PZT 伸长区间中的 A 位置, 而不再是 PZT 无伸长时的 0 位置。而且, 在接下来的测量中, 在一个 PZT 调制周期 A-A' 内使用比较算法寻找最小值时, 得到的最小值的位置是在 B 位置, 但该位置的值已经不是零, 而是一个负数。假设该值为 $0 \times b (b \neq 0)$, 经过最小值算法比较后, 单片机会将该最小值 $0 \times b$ 送到液晶显示屏显示。所以, 除了按清零键的一瞬间, 显示屏显示清零结果为 0 值, 在以后的其它时间, 即使被测目标不移动, 显示屏也不会显示 0 值, 出现按清零键却无法清零的现象。

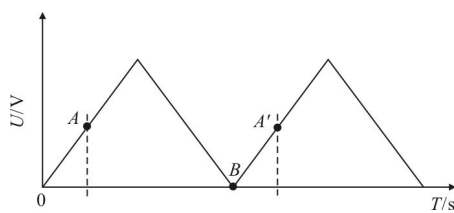


图 5 清零补偿原理图

Fig.5 Schematic diagram of reset with compensation

为了解决上述问题, 设计了动态调制稳频中的清零补偿算法, 其框图如图 6 所示。清零补偿算法的实现过程: 在单片机内定义一个清零参数 A 并赋初值为 0, 单片机不停地通过最小值算法采集一个周期内的最小值, 当未按清零键, 即 A=0 时, 直接送该最小值到液晶屏显示。当按下清零键, 即 A=1 时, 进入补偿程序, 将此时的最小值与单片机内存储的零值 $0 \times 800\,000$ 进行比较, 如果补偿值为 0, 说明按清

零键时刻回馈镜刚好在 PZT 无伸长量的零位置, 此时显示屏输出为 0; 当补偿值不为 0 时, 说明按清零键时刻回馈镜并不在 PZT 的零位置, 此时将该补偿值与最小算法找到的一个周期内的最小值的绝对值相减, 即将一个周期内的最小值补偿到 0, 此时显示屏输出为 0。通过清零补偿算法, 在任意时刻按下清零键, 不管此时回馈镜在 PZT 调制周期的什么伸长位置, 清零结果都将显示为 0, 从而解决了动态调制稳频中的清零补偿问题。

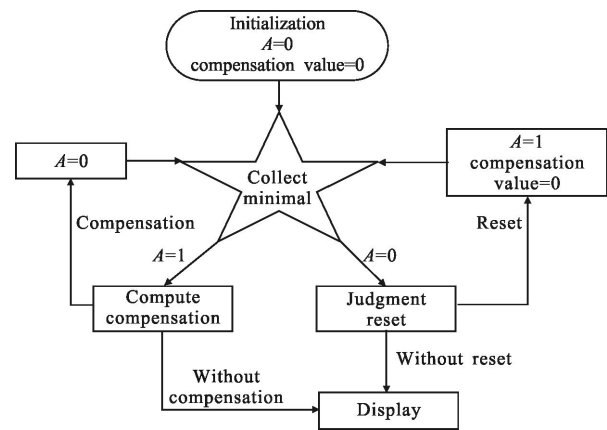


图 6 清零补偿算法框图

Fig.6 Algorithm of reset with compensation

6 实验结果

图 7(a)和(b)分别是激光强回馈系统不使用调制稳频技术和使用调制稳频技术的信号曲线图。其中, 图 7(a)为不使用调制稳频技术时, 被测目标处于静止状态时的回馈条纹曲线, 横坐标 1 小格对应 1 min。从图中可以看出, 如果不采用调制稳频技术, 即使回馈处于静止状态, 由于激光强回馈对空气流动、振动等环境变化十分敏感, 很容易发生偏振跳变(如图中的各个尖峰位置), 激光输出的功率曲线并不是稳定的直线, 而是由一系列尖峰脉冲组成的抖动曲线。对这些尖峰脉冲信号进行计数, 将导致零漂和测量误差。

图 7(b)给出了采用调制稳频技术后的实验结果, 横坐标 1 小格对应 10 ms。从图可以看出, 使用调制稳频技术后, 当被测目标不动时, 由于回馈镜一直处于 PZT 调制状态, 图中仍然得到了两路幅值均匀的回馈条纹信号, 对交流信号滤波后就可以得到稳定的直流信号, 从而消除了强回馈中模式转换或偏振跳变带来的频率剧烈波动。

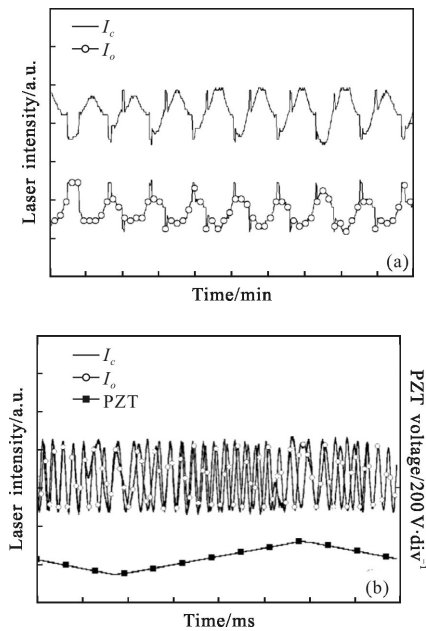


图 7 激光强回馈条纹(a)无动态调制稳频(b)有动态调制稳频
 Fig.7 Strong optical feedback curves (a) without dynamic modulation; (b) with dynamic modulation

为了验证调制稳频技术的稳频效果,采用波长计(HighFinesse WS7)对激光强回馈系统的波长漂移进行了监测,结果如图 8 所示,横坐标 1 小格对应 3 min。图 8(a)中 SM 段曲线为没有采用调制稳频技

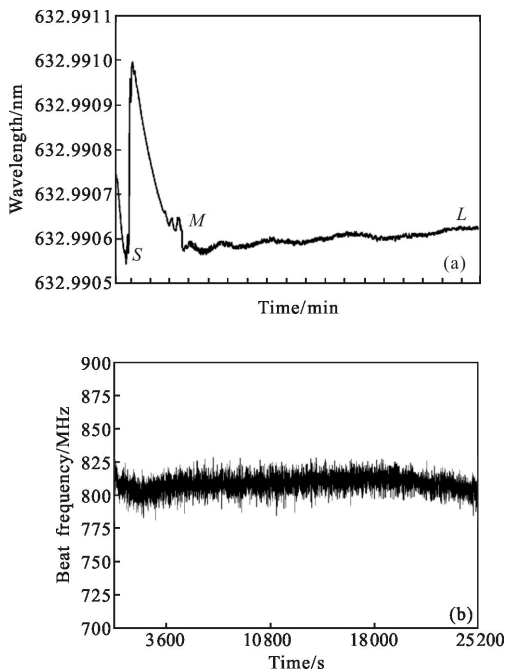


图 8 波长漂移及拍频实验曲线

Fig.8 Experimental results of wavelength drift and beat frequency

术时激光强回馈系统的波长漂移曲线,其波长漂移量约为 0.000 40 nm;曲线的 ML 段为采用调制稳频技术后的波长漂移曲线,其波长漂移约为 0.000 05 nm。可见,采用调制稳频技术后,激光的偏振跳变现象消失了,系统的波长稳定性得到明显提高。

同时,为了准确获得采用调制稳频技术后强回馈系统的长期频率稳定度,采用中国计量院研制的碘稳频激光器与激光强回馈系统进行了拍频比对,测试结果如图 8(b)所示。从图中可以看出,在 7 个小时拍频过程中,拍频差值的变化约为 43 MHz,由此可知,采用调制稳频技术后,激光强回馈系统的频率稳定度优于 1×10^{-7} 。

7 结 论

针对激光强回馈系统无法稳频的问题,提出了一种动态调制稳频方法,研究了动态调制稳频中的零点定位、清零补偿、按键防抖等关键技术及算法。波长监测及拍频实验结果表明,通过采用动态调制稳频技术,消除了激光强回馈系统中的模式转移和偏振跳变现象,频率稳定度优于 10^{-7} ,有效地解决了激光强回馈系统的稳频问题,对进一步研究高性能的激光强回馈测量系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] Liu Qiang, Wang Ming, Xia Wei, et al. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612011-7. (in Chinese)
- [2] Zhu Shoushen, Liu Weixin, Zhang Shulian. Intensity tuning curves in boot process and performance of full-inter-cavity He-Ne lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1106-1110. (in Chinese)
- [3] Huang Yang, Du Zhengting, Deng Jialiang, et al. A study of vibration system characteristics based on laser self-mixing interference effect [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112: 023106-6.
- [4] Tan Yidong, Zhang Shulian, Xu Chunxin, et al. Inspecting and locating foreign body in biological sample by laser confocal feedback technology [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103: 101909-4.
- [5] Chen W, Zhang S, Long X. Internal stress measurement by laser feedback method [J]. *Optics Letters*, 2012, 37: 2433-

- 2435.
- [6] Guo Dongmei, Wang Ming, Tan Suqing. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Optics Express*, 2005, 13(5): 1537-1543.
- [7] Zhang Shulian, Fei ligang, Liu Weixin, et al. Nano-width interference fringes of laser feedback [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 208-211. (in Chinese)
- [8] Wu C M. Periodic nonlinearity resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry [J]. *Optics Communications*, 2003, 215: 17-23.
- [9] Zeng Zhaoli, Zhang Shulian, Wu Yun, et al. High density fringes and phase behavior in birefringence dual frequency laser with multiple feedback [J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4747-4752.

《红外与激光工程》第16届期刊编委会会讯

2015年5月5日,《红外与激光工程》编辑部在北京国家会议中心隆重召开第16届期刊编委会。出席本届编委会的正式代表共有48位,是历届人数最多的一次。邀请出席编委会的院士、专家有:中国光学工程学会名誉理事长金国藩院士、副理事长王立军院士、副理事长马晶教授、《红外与激光工程》主编张锋研究员、执行主编卢进研究员;外籍院士有:澳大利亚斯威本大学副校长顾敏教授、英国曼彻斯特大学李林教授,等。

本届编委会更换了35位老编委,增加了15位新编委,现编委会共有91位编委。增选中国科学院长春精密机械与物理研究所王立军院士、上海理工大学韩森教授、哈尔滨工业大学马晶教授、中国科学院沈阳自动化研究所史泽林研究员、天津大学史伟教授、苏州大学宋瑛林教授、中国科学院物理研究所魏志义研究员、华中科技大学张天序教授为期刊副主编。《红外与激光工程》是中国光学工程学会的会刊,此次期刊换届许多新任编委是由学会理事会成员推荐的,均是行业领军专家或归国精英,为期刊编委会注入了新的活力。

第16届编委会由学会副理事长马晶教授主持,首先请金国藩院士和张锋主编分别为新任的国际期刊委员会专家和《红外与激光工程》第16届新任编委颁发证书。然后请澳大利亚斯威本大学副校长顾敏院士介绍了中国光学工程学会国际期刊发展设想,请卢进研究员汇报了《红外与激光工程》的工作总结,以及下一步工作改进。专家、编委们对学会和编辑部的工作汇报给出了中肯的意见和建议,开拓了发展思路。大家充分肯定了坚持科技期刊特色,走向世界与国际接轨的做法。

结合国际优秀期刊的办刊经验,编辑部将严格遵循“科学家办刊”的宗旨。一本好的科技期刊离不开为之辛勤付出的编委和专家们。《红外与激光工程》编辑部要充分和新一届编委会专家深入沟通、密切合作,依靠和发挥各位专家编委的作用,重新提升和塑造《红外与激光工程》的新面貌。

