

文章编号:1004-4213(2010)06-1143-5

动基座激光束定向偏差测量新方法^{*}

党丽萍^{1,2}, 唐树刚³, 周州¹

(1 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2 驻西北工业大学军代室, 西安 710072)

(3 总参西安测绘研究所, 西安 710063)

摘要:提出了将二维摆镜和象限探测器相结合的动基座激光束定向偏差测量新方法. 以摆镜作为快速调整激光发射主光轴方向的元件, 利用象限探测器测量从目标返回激光主光轴的动态变化量, 并从中分离光轴稳定平台运动对摆镜的耦合作用, 得到激光主光轴相对目标视线的偏角, 进而操控激光发射主光轴稳定瞄准目标. 该方法具有较好的实时性, 适用于运动目标的跟踪及时间为秒级的机载激光制导武器.

关键词:光束定向; 摆镜; 象限探测器

中图分类号: V246

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103906. 1143

0 引言

在机载激光跟踪、制导或激光通讯中, 需要将激光束投送到并持续稳定锁住目标. 由于飞行平台的运动及抖动, 导致激光束偏离目标, 因此, 必须实时测量激光束定向偏差, 并结合运动及姿态信息不断修正激光主光轴的方向^[1-4], 以补偿因平台运动引起的激光主光轴方向与目标视线的偏离.

动基座条件下稳定激光束方向一般用整体稳定和局部稳定两种方式来实现, 整体稳定由于控制的载荷大, 因此响应慢; 局部稳定是利用光学系统中某一元件的动作修正光的方向, 具有灵活、动态准确度高的特点. 文中提出的基于二维可旋转反射镜(简称摆镜)的激光束定向方法, 属局部稳定控制方式的一种. 它将象限探测器和摆镜相结合, 借鉴了复合轴控制技术^[5], 采用粗跟踪、精对双双重控制, 当光电跟踪系统已捕获目标, 通过分析象限探测器输出信号变化, 得到目标反射回的激光主光线对跟踪轴的偏角, 经过机载测量坐标系到目标域坐标系的转换, 得到激光定向的偏差角, 实现激光定向偏差的测量和修正功能, 具有结构简单、准确度高、响应快的特点.

1 基于摆镜的光束定向控制原理

针对具有激光发射功能的光电跟踪系统(激光轴与跟踪轴平行), 基于光电跟踪系统已捕获目标、激光束初始已投射到目标上的假设. 在激光发射系

统出射光路的终端设置一个二维摆镜, 激光对准目标时, 激光发射的主光轴同步跟随光电跟踪系统, 当飞行平台大机动及受不确定的气流影响, 或跟踪目标运动特征突然变化时, 摆镜以扰动的负反馈量偏转, 迅速改变激光的发射方向, 使激光束稳定在目标上, 如图 1.

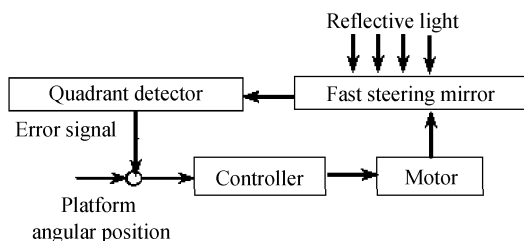


图 1 激光束定向装置的基本结构

Fig. 1 Basic configuration of laser axis-stabilized system

2 激光定向装置光路分析

图 2 为在飞行平台俯仰方向激光定向稳束光路. 其中, 象限探测器是激光主光轴方向偏移量的测量器件, 过其中心建立机载测量坐标系 $oxyz$. z 轴是过象限中心的法线, 与光电跟踪系统光轴重合, 探测器相互垂直的象限分划分别为 x 、 y 轴; 激光束俯仰变化光斑沿 x 轴移动, 激光束方位变化光斑沿 y 轴移动. 以目标为中心建立目标域的坐标系 $o_1x_1y_1z_1$, 向上为 z_1 轴, 光束俯仰顺时针偏转方向为 x_1 轴, 按右手法则确定 y_1 轴. 光电跟踪系统捕获目标后, 激光对准照射目标时, 摆镜在基准位置, 基准位置与激光主光轴成 45° 夹角. 此时, 出射激光经目标漫反射后返回光学系统, 汇聚在象限探测器的中心. 当激光指向轴相对目标偏转 ψ_1 角, 摆镜在光

^{*} 博士后基金项目(0100w016309)资助

Tel: 029-88455503

Email: danglip@sina.com

收稿日期: 2009-06-07

修回日期: 2009-08-27

学系统中的相对位置不变,于是按照光的反射定律,从目标反射回进入光电接收系统的光线方向变化 $2n\psi_1$, n 为从摆镜到探测器光路中光的反射次数. 由于摆镜在飞行平台上,平台的运动与摆镜旋转耦合,实际入射象限探测器的光方向为 ξ ,它与经摆镜反射后的光和光轴的夹角有关.

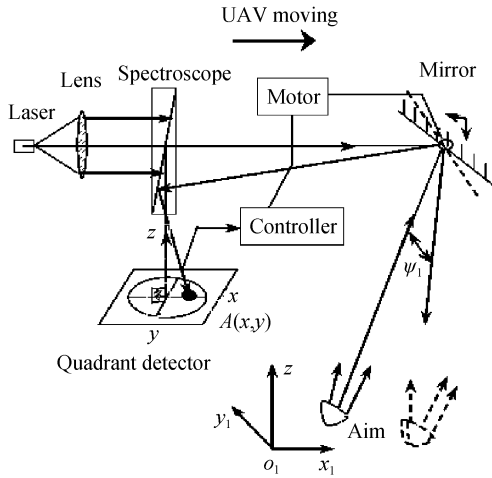


图 2 激光定向稳束光路
Fig. 2 Optical path of laser beam stabilized

入射光方向变化使汇聚光斑位置偏移象限探测器的中心,光斑移动引起的探测器输出信号变化,探测器输出近似与光入射角成正比,因此象限探测器的输出即反映了激光主光轴的偏差,它与飞行平台的运动和姿态信息合成形成摆镜修正激光主光轴的控制信号.

3 激光束定向偏差测量数学模型

3.1 象限探测器的输出

当反射回的光斑偏离象限探测器中心,象限探测器输出的二维与光斑位置有关的电压信号如下

$$\begin{cases} u_x = \frac{2}{\pi} (\arccos(\frac{x}{R}) - \frac{x}{R} \sqrt{1 - (\frac{x}{R})^2} - 1) \\ u_y = \frac{2}{\pi} (\arccos(\frac{y}{R}) - \frac{y}{R} \sqrt{1 - (\frac{y}{R})^2} - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为光斑的半径, (x, y) 是光斑的中心位置坐标.

光斑的半径由与探测器汇聚透镜的通光口径 D 、焦距 f 及探测器对光学系统焦平面的离焦量 Δ 确定. 即

$$R = \frac{D}{2f} \Delta \quad (2)$$

图 3 为光斑位置与入射角的关系示意图.

光斑的中心位置坐标 (x, y) 由探测器入射光的方向角 (ψ, ϕ, ξ) 确定,它们之间数学关系为

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{x}{f} & \tan \phi &= \frac{y}{f} \\ \tan \xi &= \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} = \sqrt{\cos^2 \psi + \cos^2 \phi} \end{aligned} \quad (3)$$

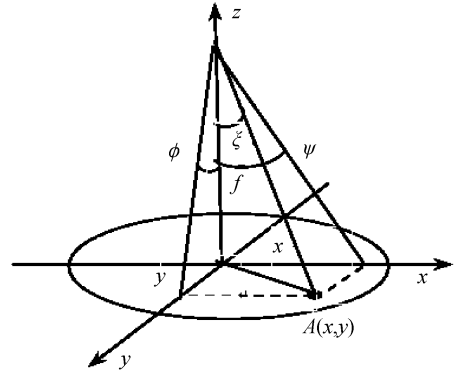


图 3 光斑位置与入射角的关系
Fig. 3 Relation of laser spot position with an angle of incidence

由于光线经过多次反射后进入探测器,假设反射次数为 n ,因此折算到从摆镜出射时光线的方向角为 $(\psi/2n, \phi/2n, \xi)$.

3.2 摆镜与光轴稳定平台的运动耦合

在机载测量坐标系 $oxyz$ 中,以激光主光轴为控制对象. 定义光线矢量为 $A[A_x, A_y, A_z]$,摆镜法线量为 $N[N_x, N_y, N_z]$. 当激光主光轴对准目标,光线矢量 $A_0 = [0, 0, 1]$,摆镜的零位在俯仰方向与光轴夹角 45° ,方位向夹角 90° ,其零位法线矢量为 $N_0 = [\cos 45^\circ, 0, \sin 45^\circ]$.

摆镜在方位和俯仰方向旋转 $(\psi/2n, \phi/2n)$,则其法线矢量为

$$N_{01} = \left[\cos(45^\circ - \frac{\psi}{2n}), -\sin \frac{\phi}{2n} \sin(45^\circ - \frac{\psi}{2n}), \cos \frac{\phi}{2n} \sin(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \right]$$

经反射的激光主光轴光线矢量为

$$A_{01} = A_0 - 2(N_{01} \cdot A_0) \cdot N_{01} = [A_x, A_y, A_z] \quad (4)$$

$$A_x = -\sin \frac{\psi}{n} \cdot \cos \frac{\phi}{2n} \quad (4)$$

$$A_y = -\sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \sin \frac{\phi}{n} \quad (5)$$

$$A_z = -2\sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cos^2 \frac{\phi}{2n} \quad (6)$$

假定光轴稳定平台的旋转为 (α, β, γ) ,其运动对摆镜的转角的耦合相当于分别绕 x, y, z 轴旋转,旋转矩阵分别为 p_x, p_y, p_z ,可表示为^[6]

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$p_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$p_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$w = p_x \cdot p_y \cdot p_z = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\sin \gamma \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma + \sin \gamma \cos \alpha & -\sin \beta \sin \alpha \sin \gamma + \cos \gamma \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.3 激光主光轴的指向偏角

当得到旋转矩阵 p_x 、 p_y 、 p_z 后,激光主光轴光线矢量在 $x_1 y_1 z_1$ 坐标系的表示式为

$$A_1 = [\tau w A_{01}]^T = [A_{x_1}, A_{y_1}, A_{z_1}] \quad (8)$$

式中

$$A_{x_1} = -\cos \beta \cos \gamma \sin \frac{\psi}{n} \cos \frac{\phi}{2n} + \sin \gamma \cos \beta \cdot \sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \sin \frac{\phi}{n} + \sin \beta(1 - 2\sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cdot \cos^2 \frac{\phi}{2n}) \quad (9)$$

$$A_{y_1} = (\sin \beta \sin \alpha \cos \gamma + \sin \gamma \cos \alpha) \sin \frac{\psi}{n} \cos \frac{\phi}{2n} + (\cos \gamma \cos \alpha - \sin \beta \sin \alpha \sin \gamma) \sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cdot \sin \frac{\phi}{n} + \sin \alpha \cos \beta(2\sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cos^2 \frac{\phi}{2n} - 1) \quad (10)$$

$$A_{z_1} = (\sin \gamma \sin \alpha - \sin \beta \cos \alpha \cos \gamma) \sin \frac{\psi}{n} \cos \frac{\phi}{2n} + (\cos \gamma \sin \alpha - \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma) \sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cdot \sin \frac{\phi}{n} + \cos \alpha \cos \beta(2\sin^2(45^\circ - \frac{\psi}{2n}) \cos^2 \frac{\phi}{2n} - 1) \quad (11)$$

因此,激光主光轴指向目标的偏角为

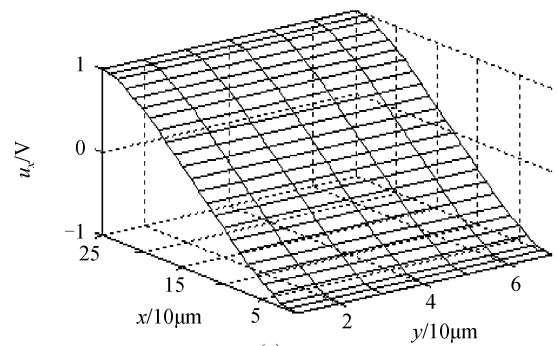
$$\text{高低角: } \tan \phi_1 = \frac{A_{x_1}}{A_{z_1}} \quad (12)$$

$$\text{方位角: } \tan \phi_2 = \frac{A_{y_1}}{A_{z_1}} \quad (13)$$

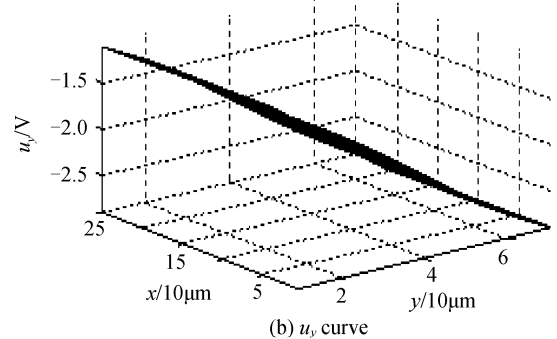
4 数学仿真及误差分析

4.1 数学仿真结果

模拟光斑在探测器的某一任意位置沿探测器 x 轴平移,探测器输出信号 u_x 、 u_y 与光斑中心位置 (x, y) 的关系曲线见图 4。 u_x 信号近似“Z”形,中间为线性区,光斑中心位置大于光斑的半径后,信号出现饱和和, u_y 保持恒定。测量中通过标定或模型法取得线性区的特征参量 k_x 、 k_y 。



(a) u_x curve



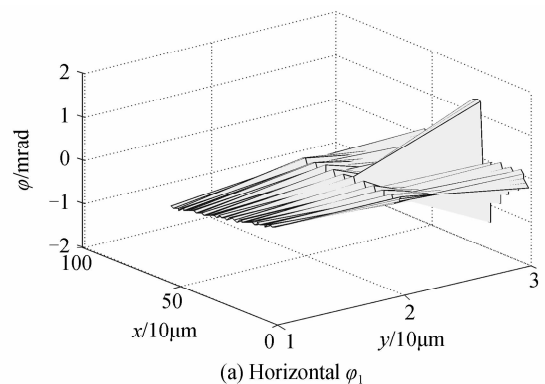
(b) u_y curve

图 4 u_x 、 u_y 随光斑运动的变化规律

Fig. 4 Rule of u_x 、 u_y change with spot moving

然后进一步仿真了激光主光轴方位和俯仰角和探测器上光斑位置的关系,如图 5。假定姿态角 $\alpha = 15^\circ$ 、 $\beta = 7.5^\circ$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 。

仿真结果说明,方位、俯仰角运动的耦合,光斑中心 (x, y) 运动与激光主光轴 (ϕ_1, ϕ_2) 方向变化之间是多维的非线性关系。



(a) Horizontal ϕ_1

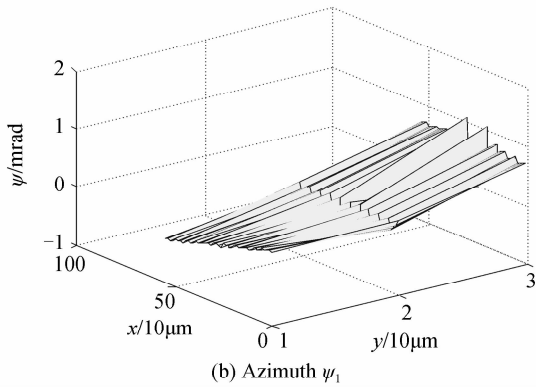


图5 光斑位置与激光主光轴方向的关系

Fig. 5 Relation of spot position with direction of laser axis

4.2 测量误差分析

测量中,首先根据探测系统的 k_x 、 k_y 和当前时刻的 $u_x(x, y)$ 、 $u_y(x, y)$ 信号,推算此时光斑中心位置 (x, y) 及探测器入射光的方向角 (ψ, φ) ,然后利用式(12)、(13)计算激光主光轴指向目标的偏角 (ψ_1, φ_1) 。

因此,激光主光轴指向偏差 (ψ_1, φ_1) 的测量偏差由 (ψ, φ) 的测量偏差和平台姿态的角偏差两部分组成。

$$\delta\psi_1 = \sqrt{\delta\psi^2 + \delta\varphi^2 + \delta\alpha^2 + \delta\beta^2 + \delta\gamma^2}$$

探测器入射光的方向角 (ψ, φ) 的测量偏差主要由 u_x 、 u_y 信号的噪声和探测系统的特性参量 k_x 、 k_y 标定误差引起。平台姿态的角偏差是一个综合误差,由角度传感器准确度和使用工况决定。如陀螺的准确度、伺服系统的控制误差、摩擦干扰力矩等,当飞行平台做大机动——俯仰和横滚运动时,方位环和俯仰环之间也存在耦合,其输出的姿态角偏差变大^[7,8]。

假设选定的三轴陀螺稳定平台陀螺漂移 $0.01^\circ/\text{h}$,探测器 3° 视场。因为激光照射过程中,控制系统始终以激光指向偏差修正激光方向,因此激光的指向偏差测量结果是一个小角度,反射回的激光不超出象限探测器的 $2/3$ 视场,此时线性参量 k_x 、 k_y 标定结果能保证探测器的测角准确度在角秒级,假设为 $5''$,则一小时内最差情况下,激光指向偏差的测量误差为

$$\delta\psi_{1\max} = \sqrt{2 \times 5^2 + 3 \times 36^2} = 62.7''$$

5 结论

光电跟踪系统的光路中设置以二维摆镜和象限

探测器相结合的激光主光轴定向机构,能消除飞行平台的运动及抖动引起的照射目标激光束的抖动、偏移,提高机载激光制导武器的精确打击能力。

文中提出激光束定向偏差测量新方法,以象限探测器的输出作为激光指向偏差的观测信号,通过对光轴稳定平台运动的去耦,得到激光照射主光轴与拟攻击目标视线的夹角,即激光定向偏差。该偏差是激光照射主光轴的修正回路的反馈量,也是对激光指示目标准确度的评价指标,对机载激光武器的使用具有重要意义。

参考文献

- [1] JI Wei. Research on servo control system of Gyro stabilized and opto-electronic tracking platform [D]. Nanjing: Southeast University, 2006:10.
姬伟.陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D].南京:东南大学,2006:10.
- [2] HU Hao-jun. Line-of-sight stabilization of acquisition, tracking and pointing system on moving bed [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005:10.
胡浩军.运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D].长沙:国防科技大学,2005:10.
- [3] ZHOU Ya-lin, AI Yong, ZUO Tao, et al. Experimentation of Real time acquisition and tracking of free space laser beam and analysis of the result [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 943-946.
周亚霖,艾勇,左韬,等.空间光束实时捕获、跟踪实验与分析[J].光子学报,2005, **34**(6):943-946.
- [4] WANG Guo-fu, YU Fa-shan, WANG Xu-dong, et al. Study of image stabilizing algorithm for airborne electro-optical tracking system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(sup):253-255.
王国富,余发山,汪旭东,等.机载光电跟踪系统的电子稳像算法研究[J].光子学报,2007, **36**(sup):253-255.
- [5] LI Jie, GE Wen-qi, GUAN Gui-zhu, et al. Separation of the coupling between precision stabilizing control system and the movement of the tracking Gimbal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5):8-11.
李洁,葛文奇,关贵柱,等.精稳控制系统与跟踪架运动耦合问题的分离[J].光电工程,2002, **29**(5):8-11.
- [6] DANG Li-ping, LIU Jun-hua, TANG Shu-gang, et al. The measurement model of double-four quadrant photoelectric detector no position adjustment [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, **40**(2):142-146.
党丽萍,刘君华,唐树刚,等.双四象限探测器位置自适应测量新模型[J].西安交通大学学报,2006, **40**(2):142-146.
- [7] QIN Yong-yuan. Inertial navigation [M]. Beijing: Science Press, 2006:164-178.
秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2006:164-178.
- [8] XU Zhao-dong, LIU Xin, LI Xin. Research on test of dynamic accuracy in airborne EO tracking and pointing stabilizing platform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2337-2339.
许照东,刘欣,李辛.机载光电跟踪平台动态准确度测试研究[J].光子学报,2007, **36**(12):2337-2339.

A New Measuring Method of Laser Positional Error on Moving Platform

DANG Li-ping^{1,2}, TANG Shu-gang³, ZHOU Zhou¹

(1 Institute of Navigate, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2 Military Office Stationed in Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3 Institute of Surveying and Mapping in Xi'an, Xi'an 710063, China)

Abstract: Combining quadrant detector and fast steering mirror, a new measuring method of the positional error of laser beam on moving platform is proposed. In this method, the fast steering mirror is used to stabilize axis direction of outputting laser beam and the quadrant detector is used to measure the corresponding change of return laser position, then the coupling action between fast steering mirror and the movement of tracking platform is separated in order to get the angle between laser axis and line-of-sight of target. According to this, it can be concluded that the axis of the laser at the target steadily and guide the missile attacking precisely. This method is suitable for real time processing and it is suitable to the laser guided weapons with second class guiding time at last stage trajectory.

Key words: Directional of laser beam; Fast steering mirror; Quadrant detector



DANG Li-ping received the Ph. D. degree in 1991. As a senior engineer, her research interests focus on measuring & testing, laser guided and photoelectric tracking.

2010 中国国际应用光学专题研讨会热点话题

2010年6月,中国深圳:中国光电高峰论坛(COES)下属分会—“2010中国国际应用光学专题研讨会”目前已经筹备就绪,将于9月7日—8日在深圳会议展览中心隆重举办,本次会议得到了业界厂商、专家、媒体和投资公司的广泛关注。据了解,“2010中国国际应用光学专题研讨会”今年将以“最新精密光学加工、激光加工和大功率光纤和半导体激光器”为热点话题展开讨论。

自由曲面光学加工技术引人关注

在光学产业领域,传统应用光学在中国已形成一个巨大的产业群,但遗憾的是,目前国内光学产业大部分仍集中在产业链的中低端,特点是企业群体庞大、规模小而分散、利润低而微薄,恶性竞争严重打击和影响了国内光学产业的健康发展,业界迫切希望通过技术升级、产业整合实现从低端向中高端的产业转型。

当前光学领域正从传统的球面加工向非球面和自由曲面方向转变,加工技术从传统的冷加工向热压成型发展。但这些先进的加工技术和设备在国内市场份额极低,很少企业涉足高端产品,现在不少企业试图向高端领域发展,但面临许多困难,量产或投产的规模都很小,目前并没有形成一定的规模。“2010中国国际应用光学专题研讨会”将围绕这些话题深入讨论,将邀请国内外行业技术专家,共同探讨技术发展趋势和动态,帮助企业加快转型的步伐。

专家方面,著名光学专家、苏州大学精密光学工程中心主任余景池老师、湖南大学微纳研究所所长尹韶辉教授、香港理工大学先进制造技术研究中心总干事李荣彬等专家,加上上海光机所、舜宇光学以及马渊光谱等企业和机构均积极报名参加演讲,届时听众将聆听到关于非球面加工、光学热加工、自由曲面光学的超精密加工技术、高精度光学镜片加工设备等相关话题的介绍,我们也衷心地希望业界朋友能积极报名参会。

光纤激光器:应用不断拓展

激光加工作为先进制造技术已广泛应用于汽车、电子、电器、航空、冶金、机械制造等国民经济重要部门,至今我国已有100多家从事激光加工的制造企业,这些公司已成为国内激光加工市场的主力,他们制造的工业激光器、元器件和激光加工系统约占国内总市场90%以上份额,但作为激光加工设备行业发展基础的高精密机械制造、材料和器件产业的发展比较滞后,尤其是近年来热门的光纤激光器,本次会议将邀请国内最高水准的企业介绍中国自己的光纤激光器,从事光纤激光、激光技术、特种光纤及器件研究和制备领域的多位专家学者参加论坛。与会专家将分别就大功率光纤激光器的发展趋势、国产化研发所必须解决的关键技术等为重点,深入研讨光纤激光领域的若干关键性、基础性科学问题及其在工业、国防等重要领域的应用前景。

本次论坛我们将邀请国内著名激光专家,中科院上海光机所研究员楼祺洪、西安光机所所长赵卫、“国产光纤激光器第一人”—武汉锐科光纤激光器技术有限责任公司董事长闫大鹏、深圳大学副校长阮双琛、西安炬光科技有限公司董事长刘兴胜等专家学者就上述话题进行深入探讨,希望能推动国产光纤激光器商用化和技术发展进程。