

文章编号: 0258-7025(2008)02-0263-05

# 折-衍混合红外激光扫描检测设备的 光学系统设计

刘 琦<sup>1</sup> 刘丽萍<sup>2</sup> 原蒲升<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国人民解放军信息工程大学理学院数学物理系, 河南 郑州 450001  
<sup>2</sup> 哈尔滨工业大学理学院物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 为了使激光扫描检测设备达到较高的检测精度并且具有较强的通用性,一般要求它的光学系统具有大视场、宽工作光谱、高成像质量的特点。以传统 7 片可见光波段镜头为基础,用折-衍混合单透镜代替系统中的双胶合透镜,设计了折-衍混合红外激光扫描检测设备的光学系统,主要参数为:视场  $60^\circ$ ,工作波段  $0.8 \sim 1.06 \mu\text{m}$ ,焦距 30 mm,后工作距离 30 mm。设计结果表明,在 42 lp/mm 空间频率处的调制传递函数(MTF)值接近 0.7,全视场畸变小于 1.9%,重量减轻了 35.3%,表明该系统像质良好且兼具小型化的特点,满足扫描检测设备的技术要求。

**关键词** 应用光学;折-衍混合光学系统;光学设计;激光扫描检测设备

**中图分类号** O 436.1;TN 247 **文献标识码** A

## Design of Hybrid Refractive-Diffractive Optical System of Infrared Laser Scanning Testing Equipment

Liu Qi<sup>1</sup> Liu Liping<sup>2</sup> Yuan Pusheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mathematics and Physics Department, College of Science,  
The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China  
<sup>2</sup> Physics Department, College of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** For the sake of laser scanning testing equipment with high testing precision and general purpose, it is required that the optical system of the testing equipment operates at wide field of view and wide spectrum with high image quality. For these purposes, based on conventional 7-element optical lens in visible band, a hybrid refractive-diffractive optical system is designed for infrared laser scanning testing equipment by using a hybrid refractive-diffractive singlet instead of doublets. The main parameters of the hybrid lens are  $60^\circ$  field of view,  $0.8 \sim 1.06 \mu\text{m}$  action spectrum, 30 mm effective focal length and 30 mm back working distance. The modulation transfer function (MTF) of the hybrid refractive-diffractive lens is near 0.7 at the spatial frequency of 42 lp/mm. The full field of view distortion of the lens is less than 1.9%. The weight decreases by 35.3%. The results show that with the characters of high image quality and miniaturization, the system can meet the general requirements of laser scanning testing equipment.

**Key words** applied optics; hybrid refractive-diffractive system; optics design; laser scanning testing equipment

### 1 引 言

激光扫描检测设备是对激光扫描装置的扫描性能进行检测的设备。随着激光束扫描技术在科研、工业生产特别是军事上的应用日益普及,提出了对检测精度高、通用性强、使用方便的扫描性能检测设

备的需求,就光学系统而言要求达到大视场、宽工作光谱、高分辨率等性能。然而宽光谱扫描光束的使用和达到高分辨率的要求使色差和单色像差的校正变得困难,同时视场的扩大会增加光学系统的畸变,从而降低了扫描检测设备的测试精度。因此采用传

收稿日期:2007-05-15;收到修改稿日期:2007-09-14

作者简介:刘 琦(1980—),河北人,硕士研究生,主要从事衍射光学和光学系统设计等方面的研究。

E-mail:lqi00@yahoo.com.cn

导师简介:刘丽萍,主要从事光学系统设计、光电探测等方面的研究。

统光学系统来完成设计较困难,然而衍射光学元件(DOE)的引入能够突破局限。首先,衍射光学元件具有独特的负向色散特性,不仅为校正系统色差提供了条件,还分担了光焦度,有利于减小单色像差。其次,衍射光学元件可通过波带片的位置、槽宽与槽深及槽形结构的改变产生任意波面,增加了光学设计过程中的自由度,有利于像差的校正<sup>[1~4]</sup>。

本文设计了一个折-衍混合 60°视场红外光学系统,该系统在42 lp/mm空间频率处的调制传递函数(MTF)值接近0.7,全视场畸变小于1.9%,像质优良。基本的设计方法是:按照红外激光扫描检测设备对光学系统的使用要求,完成一个传统的 60°视场折射镜头的设计,达到最优设计结果后,在其结构中引入衍射光学元件,以折-衍混合单透镜代替传统系统中的双胶合透镜,设计了折-衍混合红外波段光学系统。

## 2 折-衍混合镜头的设计思想

### 2.1 初始结构的选择和优化

由于需要设计的是大视场、长工作距离的传统光学镜头,所以选用的是“反远距型”光路结构,即由前后分开的 2 组透镜构成的不对称光学系统。除了具有后工作距长的优点外,同“双高斯型”光路结构相比,由于其物方视场角  $\omega$  大于像方视场角  $\omega'$ ,因此“反远距型”光路结构的像差相对容易校正。本设计所选的初始结构来自已过期的专利镜头。根据设计要求对光学系统进行优化,得到 7 片传统红外折射系统,它由 5 个单透镜和 1 个双胶合透镜组成,其中双胶合透镜密接于光阑后,结构如图 1。图 2 为传统折射镜头的传递函数曲线,在空间频率 42 lp/mm 时全视场的调制传递函数值超过 0.44, 0.7 视场的调制传递函数值超过 0.73;在空间频率 28 lp/mm 时全视场的调制传递函数值超过 0.57, 0.7 视场的调制传递函数值超过 0.82,说明此镜头在

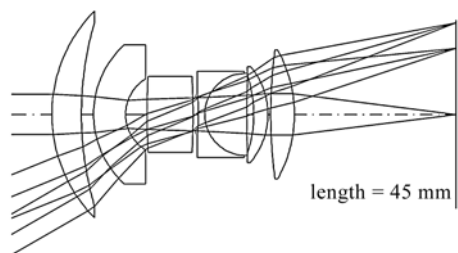


图 1 传统 60°视场折射系统结构图

Fig. 1 Structure layout of conventional 60° field of view refractive lens

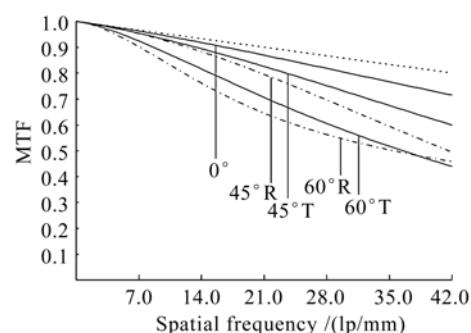


图 2 传统折射系统的传递函数曲线

Fig. 2 Curves of modulation transfer function of conventional refractive lens

低频的调制度较好,高频处像质有待于进一步提高。

### 2.2 折-衍混合镜头的设计理论

双胶合透镜组消色差的方程组为

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi \\ \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = C \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\varphi$  为双胶合透镜总的光焦度;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为透镜 1, 2 的光焦度;  $\nu_1, \nu_2$  分别为透镜 1, 2 材料的阿贝数;  $C$  为透镜组所要达到的消色差状况,这里令其为零。由(1)式可知由于所有光学材料的阿贝数均为正值,消色差使  $C = 0$  必须采用正负透镜组合,这样正透镜的光焦度就大于总的光焦度,大的光焦度意味着大的曲率,从而增加了透镜组的单色像差,给像差的校正带来困难,也增加了加工短焦距透镜的难度。

衍射元件不同于传统的折射元件阿贝数  $\nu_{\text{ref}}$ , 其等效阿贝数  $\nu_{\text{dif}}$  仅仅是波长的函数,与透镜的材料性质无关

$$\begin{cases} \nu_{\text{ref}} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \\ \nu_{\text{dif}} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $n_d, \lambda_d$  分别为所用波段的折射率和中心波长;  $n_F, \lambda_F$  和  $n_C, \lambda_C$  分别为波段两端折射率和波长,通常  $\lambda_C > \lambda_d > \lambda_F$ 。例如在 0.8~1.06  $\mu\text{m}$  红外光波段,衍射元件的阿贝数为负值,  $\nu_{\text{dif}} = -3.48$ 。利用消色差折-衍混合单透镜代替光学系统中的双胶合透镜时,其光焦度分布方程组为

$$\begin{cases} \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{dif}} = \varphi \\ \frac{\varphi_{\text{ref}}}{\nu_{\text{ref}}} + \frac{\varphi_{\text{dif}}}{\nu_{\text{dif}}} = \Delta h \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为光学系统中消色差折-衍混合透镜总的光焦度;  $\varphi_{\text{dif}}, \varphi_{\text{ref}}$  分别为折-衍混合单透镜衍射、折射面

承担的光焦度;  $\nu_{\text{dif}}$ ,  $\nu_{\text{ref}}$  分别为衍射、折射透镜的阿贝数;  $\Delta h$  为消色差折-衍混合透镜在光学系统中的垂轴色差。本文所用的折-衍混合单透镜结构为折射透镜和基底为平面的衍射透镜的组合。由于衍射原件具有负阿贝常数, 所以和传统的消色差透镜组相比有许多优点: 传统的双胶合或双贴合透镜是利用两种阿贝常数相差较大的材料组成的, 但对所有的光学材料, 其阿贝常数均为正值, 所以消色差必须采用正负透镜组合, 使得每块透镜的光焦度绝对值较大, 这就给单色像差的校正带来困难, 特别是对可供选择的材料很少的红外波段, 消色差更为困难。而折-衍混合透镜, 因衍射元件的阿贝常数为很小的负值, 所以折射透镜和衍射透镜的光焦度同号, 通常折射元件的光焦度略小于总的光焦度, 而衍射元件的光焦度非常小(这样衍射元件的光栅周期较大, 容易加工), 使得单色像差容易校正; 另外利用衍射透镜校色差时, 衍射元件可加工在折射元件的某一面上, 这样折-衍混合透镜的体积和重量相当于单透镜, 因此可简化光学系统<sup>[5,6]</sup>。

### 2.3 衍射光学元件初始参数的确定

#### 2.3.1 确定衍射光学元件的型式

在弯曲系数  $C = 1$  的平凸透镜基底上刻蚀衍射光学元件。目的有两个: 一个是减少加工工艺的难度; 二是  $C = 1$  的平凸透镜, 其赛德尔像差系数  $S_1$ ,  $S_2$  因正负相消合成, 产生较少的球差和彗差, 使得初始基底像差比较小, 减小衍射面消像差的负担, 便于进行整个系统的像差校正。

#### 2.3.2 确定衍射光学元件的位置

在未加入衍射元件的系统中, 将单透镜代替双胶合透镜作为衍射光学元件的基底。将单透镜优化为弯曲系数  $T = 1$  的平凸透镜, 考虑了单透镜代替双胶合透镜可以较好地发挥其校正系统色差的能力。只要稍加优化, 就可以明显改善系统像质。

#### 2.3.3 确定衍射光学元件的初始相位参数

旋转对称的衍射光学元件的相位函数表达形式为

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(B_1 r^2 + B_2 r^4 + B_3 r^6 + \dots), \quad (4)$$

式中  $r$  为衍射面的径向坐标,  $\lambda$  为波长,  $B_1$  为衍射面二次相位系数, 决定衍射面的傍轴光焦度, 实现光学系统的消色差;  $B_2, B_3, \dots$  为非球面相位系数, 用于校正系统的单色像差<sup>[7]</sup>。

使用 CODEV 软件, 其相位变化表达式为

$$\phi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots + A_i r^{2i} \dots, \quad (5)$$

式中  $i$  为正整数,  $A_i$  为第  $2i$  次项的系数。(4) 和 (5) 式虽然不同, 但表达式的意义是相同的,  $A_1$  项也是用来校正系统的色差,  $A_2, A_3$  等项用于校正系统的高级像差。

以下标 D 表示与衍射元件相关的参数, 以下标 R 表示与折射系统相关的参数, 设当孔径光阑与衍射元件重合时, 对折射系统优化以后系统像差和数的剩余值分别用  $S_{1R}, S_{2R}$  表示; 衍射光学元件的赛德尔像差和数分别用  $S_{1D}, S_{2D}$  表示。按照使用要求, 加入衍射元件后, 系统的赛德尔像差和数的目标值为 0, 即满足

$$\Sigma S_1 = S_{1D} + S_{1R} = 0, \quad \Sigma S_2 = S_{2D} + S_{2R} = 0. \quad (6)$$

当孔径光阑移至与衍射光学元件重合时, 衍射光学元件像差形式简单, 便于计算其初始相位系数和进行分析, 所以选取此种形式。此时衍射光学元件没有校正系统场曲与畸变的能力。考虑到这一点, 在优化折射系统时, 应使场曲和畸变量尽量满足系统使用要求。另外能够校正系统像差的变量只有  $A_1, A_2$ , 因此, 衍射光学元件只能对系统的两种像差进行校正。根据系统的使用要求, 选择 (6) 式中方程确定衍射光学元件的相位系数  $A_1, A_2$  初始值<sup>[8~12]</sup>。

### 2.4 折-衍混合光学系统的设计结果

在满足红外激光扫描检测设备对光学系统要求的前提下, 用折-衍混合单透镜代替传统折射系统中的双胶合透镜组, 通过理论计算和软件优化得到设计结果, 设计中共采用 6 片透镜和一个衍射面, 其中第 4 片镜片靠近光阑的平面是衍射面, 结构如图 3。图 4 给出折-衍混合光学系统的传递函数, 其中系统在空间频率 42 lp/mm 时全视场的调制传递函数值超过 0.65, 0.7 视场的调制传递函数值超过 0.73; 在空间频率 28 lp/mm 时全视场的调制传递函数值超过 0.74, 0.7 视场的调制传递函数值超过 0.87, 说明此镜头在高频和低频处的图像对比度较高, 像质优

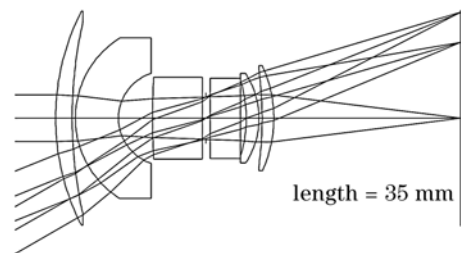


图 3 60°视场折-衍混合系统结构图

Fig. 3 Structure of 60° view hybrid refractive-diffractive field lens

良,能够满足像元尺寸大于 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$ 的光电探测器的要求。其中衍射元件相位系数  $A_1 = -1.013 \times 10^{-3}$ ;  $A_2 = 4.938 \times 10^{-5}$ , 衍射面的基底面是平面,实际半径为14 mm,刻蚀台阶数为8时,最小特征尺寸为 $3.8\ \mu\text{m}$ ,此时衍射效率可以达到94.9%,现有的制作工艺完全满足上述衍射面的加工制作。

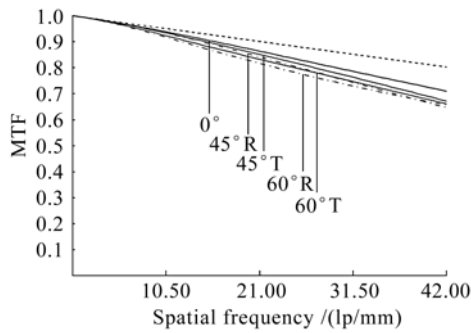


图4 折-衍混合系统的传递函数曲线

Fig. 4 Curves of modulation transfer function of the hybrid refractive-diffractive lens

表2 传统的折射镜头与折-衍混合镜头光学性能的比较

Table 2 Comparison of the conventional refractive lens and hybrid refractive-diffractive lens on optical performance

Lens type	MTF in 42 lp/mm					Lateral color /mm	Distortion /%	Petzval curvature/mm
	0°	45°R	45°T	60°R	60°T			
Conventional lens	0.803	0.797	0.734	0.457	0.442	-0.024	-2.5	-0.09
Hybrid refractive-diffractive lens	0.803	0.801	0.728	0.657	0.662	-0.016	-1.9	-0.06

表3 传统折射镜头与折-衍混合镜头的外观参数

Table 3 Apparent parameters of the conventional refractive lens and the hybrid refractive-diffractive lens

Lens type	Length /mm	Weight /g	Maximal radius /mm
Conventional lens	45	53.29	17.95
Hybrid refractive-diffractive lens	35	34.48	15.96

22.2%,重量减轻了35.3%,镜头最大直径减小了11.1%,如表3所示。

## 4 结 论

设计了 $60^\circ$ 视场折-衍混合红外镜头,该镜头满足激光扫描性能检测设备对光学系统的大视场、大出瞳距离、宽工作光谱和高成像质量的要求,使得扫描性能检测设备具有高检测精度和较强的通用性。设计结果表明,与使用要求相同、元件片数多一片的传统折射镜头相比较,折-衍混合镜头具有改善系统垂轴色差、单色像差;同时极大地降低了系统的重量和尺寸的特点,使得激光扫描性能检测设备在具有

## 3 传统折射光学系统和折-衍混合光学系统的设计结果比较

表1给出传统折射光学系统和折-衍混合系统共同满足的设计参数。表2为传统的折射光学镜头与折-衍混合镜头光学性能的比较。本次设计的含有折-衍单透镜的混合系统与传统折射系统相比较, $0^\circ$ 视场和 $0.7^\circ$ 视场的调制传递函数基本相同,全视场时调制传递函数提高了44%;垂轴色差获得了改善,降低了33.3%;畸变降低了24%,场曲降低了33.3%。不仅如此,还简化了系统结构,长度减少了

表1 两光学系统共同的设计参数

Table 1 Common parameters of the two optical systems

Common parameters	Two optical systems
Field of view (diagonal)	$60^\circ$
Optical waves / $\mu\text{m}$	0.8~1.06
Effective focal /mm	30
Work space /mm	30
Image area /mm	$24.5 \times 24.5$

高精度、通用性的同时,还兼具小型化、使用方便的优点。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kathman, S. K. Pitalo. Binary optics in lens design [C]. *SPIE*, 1990, **1354**:297~309
- 2 M. D. Missing, G. M. Morris. Diffractive optics applied to eyepiece design [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14):2452~2461
- 3 G. M. Morris. Diffraction theory for an achromatic Fourier transform [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(11):2017~2025
- 4 T. Stone, N. George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14):2960~2971
- 5 Changhe Zhou, Peng Xi, Enwen Dai. Laser beam scanning based on the Talbot phase encoding method [C]. *SPIE*, 2002, **4788**:50~59
- 6 Zhao Liping, Wu Minxian. Study on the design of the hybrid singlet to replace the refractive doublet [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2):223~227
- 7 赵丽萍, 邬敏贤. 折衍混合单透镜代替双胶合望远物镜的设计研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(2):223~227
- 8 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 182~183
- 9 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 182~183
- 10 Zhang Yinan, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. A thermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive

- diffraction objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):311~314
- 张轶楠,王肇圻,孙 强. 折-衍混合红外物镜的超宽温消色差设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):311~314
- 9 Zhang Huijuan. Plastic hybrid refractive diffractive eyepiece for head mounted display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):856~859
- 张慧娟. 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):856~859
- 10 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1266~1270
- 范长江,王肇圻,吴环宝 等. 红外双波段双层谐波衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1266~1270
- 11 Li Dongyuan, Hou Lantian, Yan Xiusheng *et al.*. Hybrid refractive-diffractive coupler for image fiber bundle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1210~1213
- 李东源,侯蓝田,闫秀生 等. 传像光纤束的折-衍混合耦合器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1210~1213
- 12 Ma Jing, Chen Yunliang, Tan Liying *et al.*. Angular dispersion analysis of DOE-WDM [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):532~536
- 马 晶,陈云亮,谭立英 等. 衍射光学元件-波分复用角色散特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):532~536

\*\*\*\*\*

## 慕尼黑上海电子展、激光光电展 3 月再创新高

继 2007 年 3 月成功闭幕后,时隔 1 年,2008 年 3 月 18~20 日,由慕尼黑国际博览集团主办的第 3 届慕尼黑上海激光、光电展 LASER • World of Photonics China 2008 和第 7 届慕尼黑上海电子展 electronica & ProductronicaChina 2008 将在上海新国际博览中心再度举办。

经过主办方多年的精心培育与业界的鼎力支持,慕尼黑上海电子展和激光、光电展的展出面积双双创出新高,电子展比上一届激增 30%,而激光、光电展则惊人的将面积整体翻了一番。值得关注的是,由德国联邦经济与技术部和慕尼黑国际博览集团共同主办的“德国激光与光电特别展”将首次登陆上海,形成独一无二的特色展中展,介绍德国领先企业在光学技术方面的最新进展与成就,展示前沿技术与产品。此外,沿袭同期举办多场高品质会议的优良传统,2008 年将将有 7 场高端技术研讨会和高峰论坛轮番登场,探索行业发展新路。

### 品牌展会平台,明星企业云集,展示面积再创新高

高速增长中的中国市场,对于工业激光及光学系统的需求量持续增长,这使得光电产业呈现出前所未有的巨大潜力。随着前两届慕尼黑上海激光、光电展的成功举办,此次展会已经成为国内外激光企业在中国推广最新产品技术、宣传品牌形象的首选。3 月份在上海,观众们将会看到汇聚一堂的知名企业,如德国的通快集团、德商罗芬,肖特集团;美国的相干、理波、恩耐;英国的 GSI;全球领先的光电半导体制造商 OSRAM,激光打标与机械打标的高科技公司镭射沃和 Telesis;作为民族激光企业代表的大族激光、楚天激光、华工激光、华北光电、大陆激光也都悉数参加;还有众多新展商的积极加盟,包括韩国伊欧、欧瑞康、IPG、海洋光学等。慕尼黑激光、光电展的规模也由此创下历史新高,相比上届面积翻番,达到 12000 平方米。

### “德国激光与光电特别展”——与“德国制造”零距离接触

由德国联邦经济与技术部、德国展览业协会和慕尼黑国际博览集团共同带来的“德国激光与光电特别展”将作为 2008 慕尼黑上海激光、光电展的重要组成部分首次登陆上海,以近年来德国激光、光电企业在中国的最大规模的集中亮相,全面展示在光电子技术领域的技术实力和创新能力。

该特别展的另一重点将是将德国的先进太阳能技术引入中国,契合国内最火热的节能话题,这必将吸引更多专业观众的目光。整个展区座落于 E6 馆的醒目位置,展区包括产品展示,工业论坛,德国企业介绍等,参展的企业包括 SCHOTT,PI,SCANLAB,OWIS,IPG,LINOS,OSRAM 和 JENOPTIK 等 30 多家,并由德国光学工业界德高望重的 SCHOTT 公司的 Johannes Hain 博士担任展商主席。

### 同期会议深入洞悉行业现状,探索发展新路

展会期间,除了丰富的产品展示外,同期举办的七场会议也是精彩纷呈。如在慕尼黑上海激光、光电展期间,两场围绕激光技术的研讨会将同期举行,分别是“第三届国际应用激光技术中国研讨会(LPC 2008)”以及“光学前沿——2008 激光技术论坛”,将分别集中讨论激光加工技术、光学元件以及激光技术目前的发展与未来的趋势,以及关于当前激光器技术的前沿进展与面临的挑战,并由国内外知名激光器公司的资深研发专家展示最先进的激光器件。