

文章编号: 0253-2239(2007)06-1096-6

# 应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计

赵廷玉 张文字 叶子 余飞鸿

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 在兼顾图像恢复能力的基础上,将不同物距下点扩展函数相似性的评价函数费希尔信息量(Fisher Information, FI)应用到波前编码实际光学系统相位板的优化设计中。在焦距和孔径之比为 3、有效焦距为 100 mm 的无穷远成像的双胶合系统的基础上,设计得到了双胶合一波前编码系统。通过解码前后的点扩展函数模拟和实验结果表明,该系统在 5 m 到无穷远的物距范围内很好地调制了系统的点扩展函数,使得它对物距不敏感。最后通过对位于 5 m, 10 m 和 15 m 的三人分别进行传统双胶合成像和双胶合一波前编码系统的成像实验对比,有力地证明了双胶合系统的清晰成像的物距范围从 10 m 到无穷远扩展到 5 m 到无穷远,这使得光学系统景深得到很大的延拓。

**关键词:** 光学设计; 非相干光学系统; 波前编码; 费希尔信息量; 相位板; 景深延拓

中图分类号: O438.2 文献标识码: A

## Design of Wavefront Coding System Based on Evaluation Function of Fisher Information

Zhao Tingyu Zhang Wenzhi Ye Zi Yu Feihong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** Considering the imaging restorability, Fisher Information (FI) to evaluate similarity of the point spread functions (PSFs) of different object distances is used to optimize the design of phase mask in practical wavefront coding (WFC) system. A doublet-wavefront coding system is designed based on an infinite focused doublet system with  $f$  number 3, effective focal length 100 mm. The simulation and experimental results of encoding and decoding point spread functions show that the doublet-wavefront coding system is insensitive to the object distance with the modulation of point spread function. With object distance from 5 mm to infinite. 3 people (5 m, 10 m, 15 m far away) are imaged using traditional doublet and doublet-wavefront coding system respectively. The results show that the sharp imaging's object distance of the doublet-wavefront coding system ranges from 5m to infinite, while the doublet system ranges from 10 m to infinite. In this way the field depth is greatly extended.

**Key words:** optical design; incoherent optical system; wavefront coding; Fisher information; phase mask; field depth extending

## 1 引言

非球面因其对光学系统性能的大幅改进,近年来在各种光学系统中得到了广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。波前编码(Wavefront coding, WFC)技术<sup>[6]</sup>也是通过非相干光学系统中引入非球面从而达到延拓景深的目的,它主要包括光学和数字图像处理两个部分,也

就是编码和解码的过程。光学部分可以通过在普通的光学系统的光阑面上加上一块非球面相位板来改造得到。通过精心设计相位板,可以调制点扩展函数(PSF)使它对离焦不敏感。这样在 CCD 上得到的对离焦不敏感的中间模糊像就可以通过数字图像处理来解码得到清晰像,从而大大延拓了景深。因

作者简介: 赵廷玉(1982-),女,浙江杭州人,博士研究生,主要从事光学仪器方面的研究。

E-mail: zhaotingyuhippo@gmail.com

导师简介: 余飞鸿(1966-),男,浙江杭州人,教授,博士生导师,主要从事光学设计、液晶投影仪、图象处理方面的研究。

E-mail: Feihong@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-12-01

此,波前编码技术在诸如显微镜、虹膜识别、红外系统等光学领域具有非常广泛的应用前景<sup>[7,8]</sup>。本文用费希尔信息量作为点扩展函数离焦敏感性的评价函数,设计了适用于双胶合系统的波前编码系统。模拟和实验结果表明,这个双胶合波前编码系统的景深较原来的光学系统有较大的延拓。

## 2 基于费希尔信息量评价函数的双胶合波前编码技术的设计

### 2.1 理论基础

假定相位板的形式可以用多项式来表示<sup>[9]</sup>:

$$z(x, y) = axy + b(x^2 + y^2) + c(x^3 + y^3) + d(x^2y + xy^2) + \dots, \quad (1)$$

其中 $(x, y)$ 为光瞳面上点的坐标, $a, b, c, d, \dots$ 均为尚待优化的相位板的参量, $z$ 为相位板的厚度, $\dots$ 为其他高次项。将(1)式简化写成矩阵相乘形式:

$$z = [a \ b \ c \ d \ \dots] \begin{bmatrix} xy \\ x^2 + y^2 \\ x^3 + y^3 \\ x^2y + xy^2 \\ \dots \end{bmatrix},$$

记 $[a \ b \ c \ d \ \dots]$ 为 $\theta$ ,那么波前编码系统的光瞳函数 $P$ 可以表示成

$$P(x, y, \theta, \tau) = p(x, y) \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \times [f(x, y) + \tau(x^2 + y^2) + z(x, y, \theta)] \right\}, \quad (2)$$

其中 $p(x, y) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq D/2 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > D/2 \end{cases}$ , $D$ 为光瞳直径, $\tau$ 为离焦量, $\lambda$ 为波长, $f(x, y)$ 为未加相位板的光学

系统在对焦情况下的光瞳相位函数。那么波前编码系统的点扩展函数可以表示为

$$h(x', y', \theta, \tau) = \kappa \{ F[P(x, y, \theta, \tau)](x', y') \} \{ F^* [P(x, y, \theta, \tau)](x', y') \}, \quad (3)$$

其中 $(x', y')$ 为像面上点的坐标, $F$ 为傅里叶变换, $*$ 为复共轭, $\kappa$ 为常量。

S. Prasad等<sup>[10]</sup>提出用费希尔信息量来作为点扩展函数对离焦不敏感性的评价函数。费希尔信息量矩阵可表示为

$$J(\theta, \tau) = \iint h(x', y', \theta, \tau) \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \ln h(x', y', \theta, \tau) \right] \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \ln h(x', y', \theta, \tau) \right]^T dx' dy', \quad (4)$$

其中角标 $T$ 为矩阵转置符号。由(2)式、(3)式可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} h(x', y', \theta, \tau) = & \{ F[i(x^2 + y^2)P(x, y, \theta, \tau)] F^* [P(x, y, \theta, \tau)] + \\ & F^* [i(x^2 + y^2)P(x, y, \theta, \tau)] F[P(x, y, \theta, \tau)] \} \kappa. \end{aligned} \quad (5)$$

考虑到焦深和景深的对应关系,以离焦量 $\tau$ 为变量的光瞳函数 $P(x, y, \theta, \tau)$ 可以用以物距 $l$ 为变量的光瞳函数 $P(x, y, \theta, l)$ 来代替。同样道理,点扩展函数 $h(x', y', \theta, \tau)$ 和费希尔信息量的矩阵函数 $J(\theta, \tau)$ 也可以用 $h(x', y', \theta, l)$ 和 $J(\theta, l)$ 来表示。而 $P(x, y, \theta, l)$ 和 $h(x', y', \theta, l)$ 则又可以通过诸如Zemax, CodeV等光学设计软件来直接得到。当且仅当 $JF(\theta) = \int [J(\theta, l)]^2 dl$ 最小时,点扩展函数最为相似,即系统对物距最为不敏感。那么只要找到合适的参量 $\theta$ 使其最小即可。

在设计相位板时,除了要考虑对物距的不敏感之外,另一个必须要考虑的重要因素就是图像恢复能力。调制传递函数(MTF)的面积表示了系统传递物方信息的能力,也表示了数字图像处理中用到的中间

像的信息量。考虑到调制传递函数的曲线也可以通过Zemax或CodeV等光学设计软件直接得到。综上所述,采用费希尔信息量来作为图像恢复能力的评价函数。那么修正了的 $JF(\theta)$ 可以表示为

$$JF(\theta) = \int [J(\theta, l)]^2 dl - \mu \iiint M(u, v, \theta, l) dudvdl, \quad (6)$$

其中 $(u, v)$ 为频谱面上的点的坐标, $M$ 为调制传递函数在相应频率上的数值, $\mu$ 为惩罚子。那么使得(6)式最小的 $\theta$ 即是系统在图像恢复和景深延拓两者之间找到的一个平衡点。

实际计算中,只在欲清晰成像的物距范围内取几个离散的物距对应的点扩展函数作为费希尔信息量的评价对象。将Zemax或者CodeV等光学设计软件产生的光瞳数据和调制传递函数数据代入

(3)式~(6)式即可以得到应用于大景深的波前编码系统的相位板。通过取波前编码系统的光学部分的光学传递函数的倒数作为数字滤波器<sup>[1]</sup>,将中间模糊图像恢复至清晰图像。

## 2.2 传统系统和波前编码系统的成像模拟结果对比

以像素大小为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$  的型号为 IPX-IM48 的 CCD,设计了一个焦距和孔径之比为 3,有效焦距为 100 mm 的无穷远成像的双胶合透镜,其中光阑面在双胶合透镜前 5 mm 处。针对这样的双胶合光学系统,设计了一厚度为 3 mm,材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的相位板。初始相位板的数学表达式如(1)式,取物距  $l_1$  为无穷远, $l_2=10 \text{ m}$ , $l_3=5 \text{ mm}$ ,将 Zemax 或 CodeV 中得到的光瞳数据和调制传递函数数据代入(3)式~(6)式,即可得到使得(6)式最小的相位板参量  $\theta$ 。于是得到如图 1 所示的双胶合-波前编码系统。这样就可以在 CCD 上得到中间模糊像,通过数字图像处理系统可以将模糊的中间像还原成清晰的最终像。

点扩展函数通常表征了光学系统的成像能力,

表 1 传统双胶合光学系统和波前编码系统的编码解码的点扩展函数模拟结果

Table 1 Simulated point spread function of traditional doublet system, and encoding and decoding point spread functions of the doublet-wavefront coding system

Object distance	Traditional system	WFC system's encoding	WFC system's decoding
Infinite			
10 m			
5 m			

表 1 的第三列给出了双胶合-波前编码系统的光学部分的点扩展函数模拟结果。可以看到,尽管物距从无穷远变化到 5 m,但是点扩展函数的形状、大小基本保持不变,只有位置略微有所变化,这是由

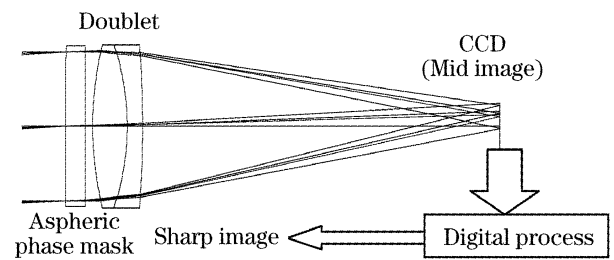


图 1 双胶合波前编码系统的结构示意图

Fig. 1 Structure of doublet-wavefront coding system

下面对双胶合系统和双胶合-波前编码系统的点扩展函数模拟结果进行了比较。

双胶合透镜在物距无穷远、10 m 和 5 m 处的点扩展函数模拟结果罗列在表 1 的第二列。从表 1 中可以清楚地看到在物距无穷远处的点扩展函数是个  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  的圆点,而在不调焦情况下 10 m 和 5 m 处的点扩展函数分别扩展为  $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$  和  $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$  的弥散斑了。可见这是一个小景深的光学系统,即该光学系统可对无穷远的物体清晰成像,对 10 m 的物体成像质量有较大的下降,而对 5 m 的物体则根本无法清晰成像。

于光学系统的相位随着物距的变化会发生略微的变化。因而可以利用这一特性将它解码恢复成理想的点扩展函数,如表 1 第四列所示。可见,经过数字图像处理系统解码后得到的最终点扩展函数无论物距

大小,其大小在  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  左右,因此具有较好的成像能力。由此易知波前编码系统的可以清晰成像的物距范围至少在无穷远到  $5 \text{ m}$ ,这在保证成像质量的前提下,大大延拓了双胶合透镜系统的景深。

由模拟结果可知,传统的双胶合系统景深很小,在无穷远对焦的情况下,清晰成像的物距范围勉强可以达到  $10 \text{ m}$ 。而经过以费希尔信息量为评价函数优化得到的双胶合波前编码系统可以轻松实现  $5 \text{ m}$  以外清晰成像。但  $5 \text{ m}$  处的恢复得到的点扩展函数位置略微有所变化,会在后期的图像恢复过程中引入噪声。

### 3 传统系统和波前编码系统的成像实验结果对比

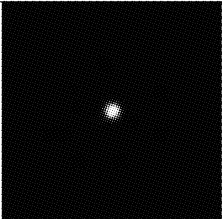
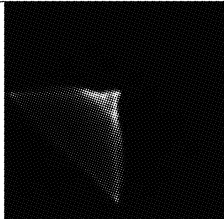
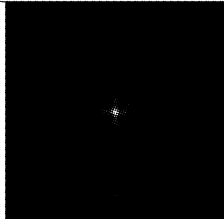
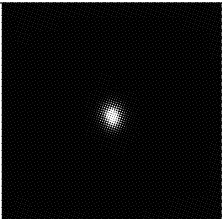
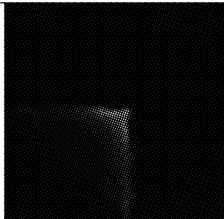
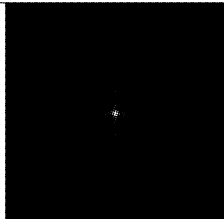
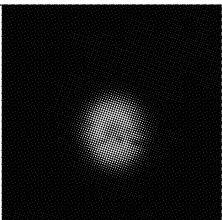
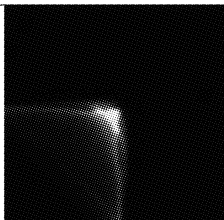
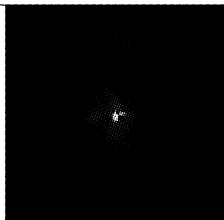
同样的,为了评价两套不同系统的成像能力,表 2 罗列了点光源为  $15 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m}$  和  $5 \text{ m}$  的情况下,双胶合系统实际测得的点扩展函数和双胶合-波前编码系统在 CCD 上实际测得和经数字图像处理解码恢复得到的点扩展函数。其中第二列对应的是传统的双胶合系统测得的点扩展函数,在物距  $15 \text{ m}$  处测得的点扩展函数最小,  $10 \text{ m}$  处次之,  $5 \text{ m}$  处较大,和表 1 第二列的结果比较吻合。但注意的是

$15 \text{ m}$  的物距对于有效焦距等于  $100 \text{ mm}$  的系统来说仍然不能近似为无穷远,因此  $15 \text{ m}$  的物距对应的点扩展函数并不是一理想的点,而是一个较小的弥散斑。这有力地说明传统光学系统如果在无穷远清晰成像,那么在不调焦的情况下根本无法在  $5 \text{ m}$  处清晰成像,在  $10 \text{ m}$  处成像也较为模糊,清晰成像物距范围勉强可以达到  $10 \text{ m}$ 。第三列对应的是 CCD 上测得的双胶合-波前编码系统对不同位置的点光源成像,也就是编码点扩展函数。可以看到,在不调焦的前提下,波前编码系统的编码点扩展函数在三种情况下都比较类似,形状大小尺寸都和表 1 第三列基本一致,但存在光晕,在  $5 \text{ m}$  的点光源测量中尤为明显,这主要是相位板加工精度不够引起的。通过数字图像处理得到表 2 第四列所示的点扩展函数,其中  $15 \text{ m}$  和  $10 \text{ m}$  处的点扩展函数恢复效果较好,  $5 \text{ m}$  的点扩展函数周围存在着一部分的噪声,会对数字图像恢复产生不良的影响。可以通过数字图像处理的手段进行逐步改进,从而减少噪声的影响。

对物距分别在  $5 \text{ m}$ 、 $10 \text{ m}$  和  $15 \text{ m}$  处的三个人分别用传统双胶合系统和波前编码系统进行实物拍摄,结果如图 2 所示。其中图 2(a)是传统双胶合系统所成的像,可以看到在对焦无穷远处,系统在  $15 \text{ m}$  处成

表 2 传统双胶合光学系统和波前编码系统的编码解码点扩展函数实验结果

Table 2 Experimental point spread functions of traditional doublet system, experimental point spread functions of encoding and decoding of wavefront coding (WFC) system

Object distance	Traditional system	WFC system's encoding	WFC system's decoding
15 m			
10 m			
5 m			

像最为清晰,10 m 处的开始模糊,而 5 m 处的人脸已经相当模糊,基本无法辨别细节;图 2(b)是双胶合-波前编码系统的中间模糊图像,即 CCD 上直接获得的图像,可以看到 5 m、10 m 和 15 m 处的人像均不清晰,但并不存在哪个位置的人像特别模糊或特别清晰的现象;图 2(c)是波前编码系统经数字图像解码后的到的图像,尽管还存在一部分的噪声,但

是三个人的脸部特征已经清晰可见了,其中 15 m 和 10 m 的人像较为清晰,5 m 处人像噪声最大,但和图 2(a)相比,在不影响 15 m 处成像质量的前提下,10 m 处成像质量已经有了较大的提高,而 5 m 处的成像更是从完全不清楚到基本清楚发生了质的变化。这也和表 2 第 4 列的结果相吻合。

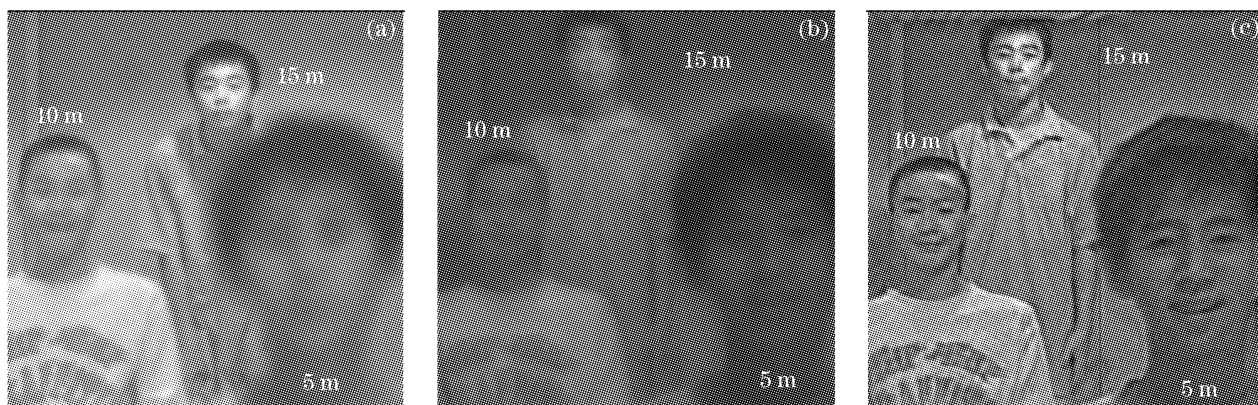


图 2 实物拍摄图像。(a)传统双胶合系统,(b)双胶合-波前编码系统,(c)双胶合-波前编码系统的解码

Fig. 2 Image of real objects (a) traditional doublet system, (b) doublet wavefront coding system, (c) decoding of doublet wavefront encoding system

虽然图像处理中存在一定的噪声,成像质量也有待改进,但实验现象已充分证明以费希尔信息量为评价函数优化得到的波前编码系统,通过调制点扩展函数使系统对物距不敏感,再通过数字图像处理,从而使双胶合波前编码系统在物距无穷远到 5 m 范围之内都可以清晰成像。和传统的双胶合系统无穷远到 10 m 的清晰成像物距相比,已有了较大的提高。

## 4 结 论

将不同物距下点扩展函数相似性的评价函数费希尔信息量应用到波前编码实际光学系统相位板的优化设计中能有效地增大景深。通过在费希尔信息量评价函数上加一个表述图像恢复能力的惩罚因子,就能有效地保证后期图像解码质量。在焦距和孔径之比为 3,有效焦距为 100 mm 的无穷远成像的双胶合系统的基础上,设计得到了双胶合-波前编码系统。通过解码前后的点扩展函数模拟结果和实验结果表明,该系统在 5 m 到无穷远的物距范围内很好地调制了系统的点扩展函数,使它对物距不敏感。最后通过对位于 5 m、10 m 和 15 m 的三人分别进行传统双胶合成像和双胶合-波前编码系统的成像实验对比,有力地证明了双胶合系统的清晰成像的物距范围从 10 m 到无穷远扩展到 5 m 到无穷

远,使得光学系统景深得到很大的延拓。不足之处是双胶合-波前编码系统的解码图像还存在一些噪声,相信可以通过对图像恢复算法进行改进而得到改善。

## 参 考 文 献

- Shen Weimin, Xue Mingqiu. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 743~748 (in Chinese)  
沈为民,薛鸣球. 非球面眼镜片的像差分析和设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 743~748
- Shi Bangren, Kong Mei, Song Zhe *et al.*. Research on optimal geodestic waveguide lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1320~1324 (in Chinese)  
石邦任,孔梅,宋哲等. 优化的波导短程透镜研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1320~1324
- Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478 (in Chinese)  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1475~1478
- Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868 (in Chinese)  
李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 865~868
- Dong Xiaochun, Du Chunlei. The developing threshold method for precise profile control of microlens array with high numerical aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 869~872 (in Chinese)  
董小春,杜春雷. 精确控制大数值孔径微透镜阵列面形的显微阈值方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 869~872
- Edward R. Dowski Jr., W. Thomas Cathey. Extended depth of

- field through wavefront coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866
- 7 Ramkumar Narayanswamy, Alan E. Baron, Vladislav Chumachenko *et al.*. Applications of wavefront coded imaging [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5299**: 163~174
- 8 Edward R. Dowski Jr., Kenneth S. Kubala. Modeling of wavefront coded imaging systems[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4736**: 116~126
- 9 V. P. Pauca, R. J. Plemmons, S. Prasad *et al.*. Integrated optical-digital approaches for enhancing image restoration and focus invariance[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5205**: 348~357
- 10 S. Prasad, T. C. Torgersen, V. P. Pauca *et al.*. Engineering the pupil phase to improve image quality[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5108**: 1~12

## • 新书推荐

### 《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

**作者简介** 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。

联系人:郑京华

地址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮编:100081

手机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com

