

文章编号: 0253-2239(2010)02-0411-05

光学表面污染的成像系统的性能测试和分析

乌大琨^{1,2} 周彦平¹

(¹ 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨, 150001; ² 哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 光学表面污染是导致光学成像系统成像质量降低的重要因素之一。对光学表面被直径 $d=0.3$ mm 而颗粒间距不同的颗粒污染的成像系统进行了测试, 相应的分辨率值由奥林巴斯公司编写的软件 HYRes 3.1 给出。然后采用时域有限差分方法(FDTD)计算了相应的前向散射光强分布。结果表明, 随着污染颗粒间距的减小, 前向散射光强的最大值在数值上变化不大, 但位置更加远离成像面中心, 而且光能更加集中于某些点上, 分辨率随之减小; 当颗粒间距达到一定值时, 分辨率严重降低以致无法由软件读出, 而前向散射光的最大值也迅速下降, 且几乎位于成像面边缘。因此, 在光学表面污染量较小、不足以造成光能传输率明显改变的情况下, 污染颗粒衍射引起的光能分布的改变可以导致光学成像系统成像质量的降低。

关键词 空间光学; 分辨率; 时域有限差分; 光强分布; 颗粒污染

中图分类号 V443⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0411

Performance Test and Analysis for Imaging System of Contaminated Optical Surface

Wu Dakun^{1,2} Zhou Yanping¹

(¹ School of Astronautic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Contaminants on the optical surface is one of the key factors that reduce imaging quality of optical imaging system. The imaging system, which is contaminated by particles with the diameter $d = 0.3$ mm and different distances between particles, is examined firstly. The relevant resolution power is obtained by software HYRes 3.1, which is written by Olympus Corporation. Then FDTD (finite-difference time domain) method is used for calculating the distribution of forward scattering intensity. The results show that the maximum intensity changes a little, but location is away from center of image plane, and light energy concentrates on some point as distance between particles falls. At same time, resolution declines. When distance between particles reaches a fixed value, resolution reduces so badly that it cannot be read out by software, and maximum light intensity, which is situated at edge of image plane, drops rapidly. Therefore, the change of the light-energy distribution brought by scattering of particles can reduce the imaging quality of optical imaging system when contaminants quantity on optical surface is too small to change transmissibility.

Key words space optical; resolution; finite difference time domain (FDTD); distribution of light intensity; particle contamination

1 引言

光学表面污染是导致光学成像系统成像质量降低的重要因素之一。光照射到污染的光学表面上

时, 不仅会导致光学系统透射率降低^[1], 还会导致点扩展函数(PSF)包络线变宽, 光学系统成像质量下降^[2]。对于空间光通讯系统, 天线表面的颗粒污染

收稿日期: 2009-02-13; 收到修改稿日期: 2009-04-02

作者简介: 乌大琨(1970—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事空间光电信息技术方面的研究。

E-mail: wu.dk@hit.edu.cn

导师简介: 周彦平(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间环境与光电信息技术等方面的研究。

E-mail: ypzhou@hit.edu.cn

导致透射光强发生变化,如果载波波长较长,避免表面大颗粒的聚集显得非常重要^[3]。现代科学技术的发展对成像系统的精度提出了更高的要求,研究污染对成像系统的影响有着重要的意义。

光学表面污染通常可以分为分子污染和颗粒污染,分子污染主要来源于空间环境中物质的冷凝,颗粒污染主要是灰尘颗粒、短纤维和冷凝物质等颗粒物的沉积;对污染区内分子分布尚未形成面污染的分子污染早期情形也可以等效采用颗粒污染的方法进行分析。光照射到污染的光学表面上时,会影响光学表面的透射和反射,而且,光照射到非均匀介质还会引起散射^[4]。一般认为颗粒间距为半径的3倍时可以不考虑其它颗粒的影响,即发生独立散射。事实上,当光学表面发生较多量分子污染或较为严重颗粒污染时,这个条件不能满足。徐兰青等^[5]利用蒙特卡罗方法和斯托克斯-米勒矩阵表述探索散射介质中偏振光的传输特性并讨论了单次散射与多次散射对后向散射米勒矩阵的影响。单次散射和二次散射光子构成后向散射光的主体部分并决定了后向散射米勒矩阵的特性,而多次散射光子的影响仅表现为背景。目前,关于光在颗粒随机分散体中的散射问题的理论比较繁杂,叶云霞等^[6]通过分析平行光束在纳米圆形颗粒随机散射体的出射面上光强组成,推导了透射光强的计算公式;而顾芳等^[7]为证明粒子计数器测量非球形颗粒物质量密度计算公式的合理性,从颗粒群粒度分布概念出发提出了统计意义上的平均质量概念,推导了非球形颗粒物质量密度的理论公式。由于本文散射体分布已知,因此采用数值解法。

通常来讲,成像系统成像质量的好坏不仅取决于光学系统和成像器件,数字信号处理(digital signal processing, DSP)软件也决定着最终的成像质量。因此,透射率降低^[1]、点扩展函数包络线变宽^[2]仅仅是颗粒污染对其中的光学系统所造成的影响。本文则重点研究光学表面颗粒污染对整个成像系统的影响。为此,首先测试了颗粒污染前和颗粒污染后成像系统的分辨率变化。因为分辨率是光学测试中的一个概念,其定量计算是由调制传递函数随空间频率的变化关系得到的,而调制传递函数由物、像的归一化强度谱决定,所以透射光强分布的变化会引起分辨率的改变。于是采用二维时域有限差分方法(FDTD)计算出与测试条件相对应的透射光强分布,邵理堂等^[8]通过对1~10 μm 烟尘颗粒物米氏(Mie)散射对差分吸收光谱法(DOAS)影响的数值模拟和实验研究得出,烟尘颗粒物的散射光强

与颗粒粒径分布、颗粒数密度有关。本文将则不同颗粒大小和间距引起的光强分布的变化与成像系统成像质量的变化进行比较。

2 性能测试

曹运华等^[9]采用双向反射分布函数(BRDF)测量仪测量了紫红色和白色涂漆板在400~780 nm 内的光谱双向反射分布函数,分析了光谱双向反射分布函数随波长及散射角的变化趋势与目标样片光学特性的关系。戴名奎等^[10]对国内外光学表面的检测方法进行了介绍。之后,杨甬英等^[11]介绍了一种利用非接触式方法实时扫描测量精密元件表面轮廓的技术,同时研制了计算机自动控制的多功能表面轮廓仪,该仪器横向分辨率为1 μm,纵向分辨率为0.1 nm; L. R. Baker等^[12,13]将数码相机应用到显微镜成像比较仪,这是一种简单而成本较低的精确测量光学表面缺陷和污染物的方法。这些方法可用来进行光学表面污染后的微观测量。文献[14]则介绍了一种测量空间污染的光度计。对于本文的研究来说,用于测量气溶胶的滤网技术更值得借鉴。滤网技术是测量颗粒吸收系数的最常用方法。对于气溶胶来说,颗粒吸收系数的测量比较困难,原因在于:

- 1) 颗粒引起的总消光(散射和吸收)很小,约小于 10^{-4} m^{-1} ;
- 2) 吸收系数小于散射系数,很难在测量结果中将散射和吸收分开。

为了解决问题1),可以对颗粒进行浓缩,增加消光,于是便有了滤网技术;问题2)的一个解决办法是移去所有散射光效应,于是测量得到的消光仅仅是由吸收造成的^[15]。为此,K. Fischer^[16], C. I. Lin等^[15]及A. D. Clarke等^[17]都进行了改进。本文测试用的颗粒吸收系数大,因此问题2)可以忽略。鉴于测量气溶胶所用的滤网是为了得到一定粒径范围的颗粒,而本文是在颗粒尺寸已知的前提下进行的测试,因而可用透明胶片代替滤网。图1为测量

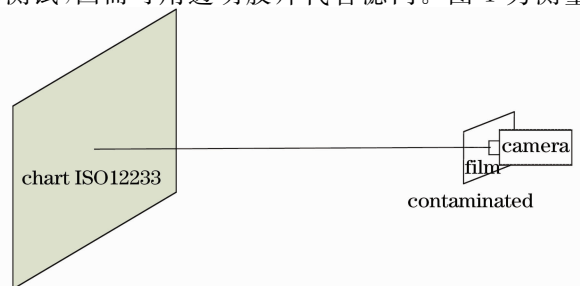


图1 测量装置示意图

Fig. 1 Sketch of test equipment

装置示意图。

图 1 中, chart ISO12233 为数码相机分辨率测试图, 该图遵照 ISO-12233“电子成像静止照片分辨率测试”标准。胶片的材质相同, 分别被直径 $d = 0.3 \text{ mm}$, 颗粒间距 l 不同的颗粒沾染。

为了便于对比, 分别将未被污染的胶片和有颗

粒沾染的胶片按照图 1 进行拍照。然后将这些拍出的数码照片输入计算机, 由软件 HYRes 3.1 读出未沾染和沾染程度不同的胶片的成像分辨率(该软件由奥林巴斯公司根据 CIPA DC-003 编写, 利用软件给出分辨率的优点在于可避免主观误差)。图 2 为各种情况下分辨率测试结果。

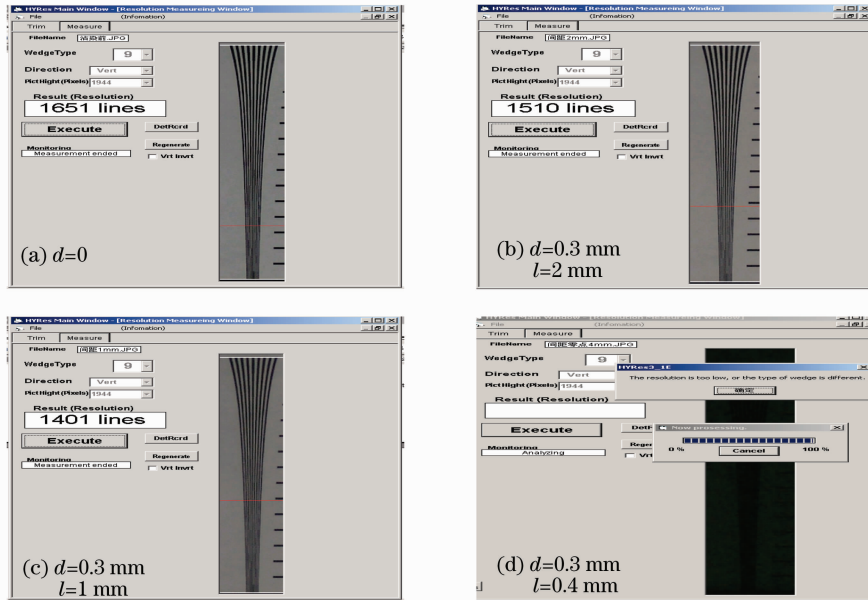


图 2 胶片污染前后的分辨率

Fig. 2 Resolution of film before and after being contaminated

图 2(b), (c) 的分辨率值分别为 1510 lines, 1401 lines, 都低于图 2(a) 的 1651 lines, 而图 2(a) 是未受沾染时的分辨率测试结果。这说明: 胶片污染后, 光学系统的分辨率确实有所降低, 且颗粒间距越小, 分辨率值越低。图 2(d) 的分辨率则太低以至无法由软件 HYRes 3.1 读出, 此时 $d = 0.3 \text{ mm}$, $l = 0.4 \text{ mm}$ 。事实上, 如果认真观察的话, 人眼还是可以在一定程度上分辨出这些线条的。

3 表面受污染的光学系统的性能分析

F. M. Kahnert^[18] 详细地分析了各种颗粒散射和吸收模型, 在这些模型中, 由于 FDTD 能有效解决形状不规则、各相异性、分布非对称的带电或不带电颗粒的散射, 而被广泛用于天线散射分析^[19]、微带电路分析^[20]、织物的电磁吸收^[21]、生物细胞的光学吸收^[22~25]、大气冰晶的散射^[26]、不规则聚合体^[27]、表面凹凸的多面体颗粒^[28]、内部有非球形粒子的颗粒^[29]、内部有气泡和烟灰的六棱柱^[30]、颗粒聚合体^[31]以及光子晶体光纤(PCF)^[32]等的分析。很多研究人员致力于完善 FDTD 方法。为了节省计算时间和计算机内存, S. V. Georgakopoulos 等^[33] 发表了利用二阶时

间精度、四阶空间精度的 FDTD(2, 4) 和子网格为标准的时间与空间都为二阶精度的 FDTD(2, 2) 的混合方法。Maxim A. Yurkin 等^[34] 利用 FDTD 的计算尺度参数达到 80。Fenghua Zheng 等^[35] 突破柯朗稳定条件限制, 将交替方向隐式用于 FDTD, 数值结果表明, 在相同精度前提下, 该方法迭代次数约是传统 FDTD 方法的三分之一, 计算速度至少快 1.55 倍。

鉴于以上分析, 采用时域有限差分法对讨论范围原用吸收边界条件(ABC)左右边原用理想匹配(PDL), 上下边界采用理想磁导体(PMC)。对受到 $d = 0.3 \text{ mm}$, l 不同的颗粒沾染后, 光学系统的透射光强度分布进行了远场计算分析。计算结果如图 3 所示。图中横坐标为接收面坐标, 纵坐标为远场光强分布。

可见图 3(a), (b) 的光强最大值在数值上相差不大, 但图 3(a) 中光强最大值只有一个, 且位于成像面中心, 而图 3(b) 中光强最大值有两个, 对称分布于中心线两侧, 且光能更加集中于最大值附近的某些点。图 3(c) 中的光强和其最大值都明显下降, 且光强由几乎处在成像面的边缘的最大值向成像面中心逐渐减弱, 几乎接近为零, 此时颗粒间距为 $l =$

0.5 mm,其分辨率测试结果是:分辨率太低导致无法读出分辨率值。由此可见,当 $l=2$ mm, $l=1$ mm时,前向散射光强的最大值在数值上没有大的变化,随着颗粒间距减小,最大值点由成像面中心分为两束向两侧移动,光能分布也更集中于某些点。当颗粒间距为 $l=0.4$ mm时[如图3(c)所示],光强最大值突降,位置已接近成像面边缘,成像面中心光强几乎为零。

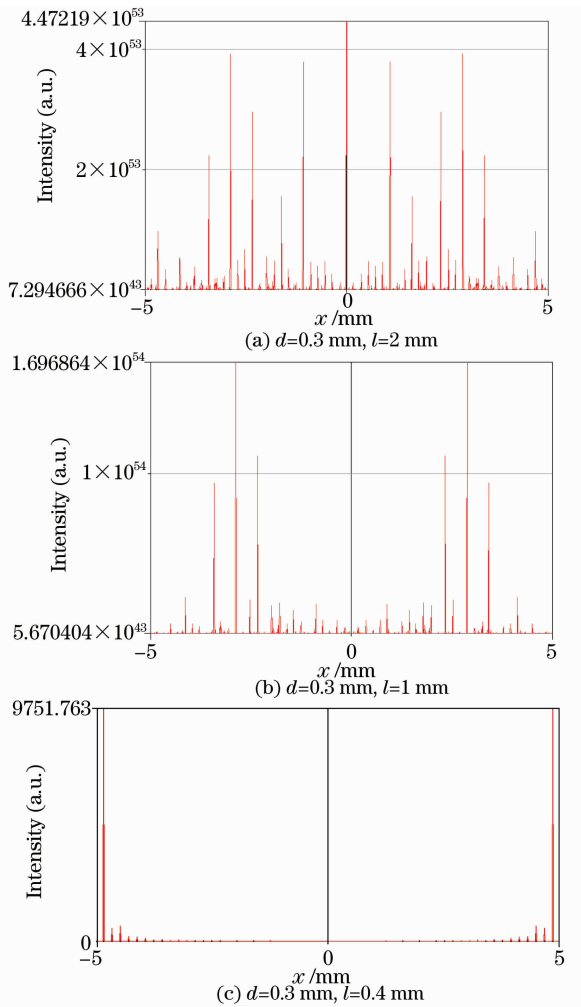


图3 透射光的光强分布

Fig. 3 Distribution of transmitted light intensity

通过计算可知 $l < 0.4$ mm时的前向散射光强分布结果均与 $l=0.4$ mm时的光强分布一致。

4 结 论

将前向散射数值分析结果与分辨率测量结果进行对比:当 $l=2$ mm, $l=1$ mm时,两张照片的分辨率值分别为1510 lines,1401 lines,都低于胶片未被污染时测得的分辨率值1651 lines。颗粒间距减小时,前向散射光强的最大值在数值上变化不大,但成

像质量降低,只有当颗粒间距减小到 $l=0.4$ mm时,光强最大值下降明显,且成像质量严重降低。可见:随着沾染颗粒间距的减小,前向散射光强的最大值在数值上变化不大,但位置更加远离成像面中心,分辨率亦随之减小;当颗粒间距达到一定值时,分辨率严重降低以致无法由软件读出,前向散射光的最大值也迅速下降,且几乎位于成像面边缘。

通常认为光学表面沾染导致光能传输率下降,以上的工作则证明在光学表面沾染量较小、不足以造成光能传输率明显改变的情况下,由于沾染颗粒衍射引起的光能分布的改变也可以导致光学成像系统成像质量的降低。

参 考 文 献

- Zhao Xue, Zhou Yanping, Liu Haigang. Effect of optical system caused by space organism pollution[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 113~118
- 赵雪,周彦平,刘海刚. 空间沾染对光学系统的影响分析[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1): 113~118
- Dakun Wu, Yanping Zhou, Song Guo. Grain effect on imaging of spatial optical system[C]. *SPIE*, 2007, **6595**: 1~7
- Wu Dakun, Zhou Yan ping. Relationship between antenna contamination and laser wavelength in optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 564~568
- 乌大琨,周彦平. 光通信中天线表面颗粒沾染与激光波长的关系[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 564~568
- Hendrik Christoffel Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover Publications, 1981
- Lanqing Xu, Hui Li, Yongping Zheng. Influence of single scattering and multiple scattering on backscattered mueller matrix in turbid media[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 64~66
- Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light intensity of light scattering from nano-particle random scatterers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 951~956
- 叶云霞,范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 951~956
- Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass density algorithm based on average mass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1706~1710
- 顾芳,杨娟,卞保民等. 基于平均质量的悬浮颗粒物的质量密度算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1706~1710
- Shao Litang, Wang Shimin, Tang Guanghua *et al.*. Influence of particle Mie scattering on differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 594~601
- 邵理堂,王式民,汤光华等. 颗粒物Mie散射对差分吸收光谱技术的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 594~601
- Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target sample[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
- 曹运华,吴振森,张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- Dai Mingkui, Xu Deyan. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. *Optical Instrument*, 1996, **18**(3~4): 33~36, 32~39
- 戴名奎,徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. *光学仪器*, 1996, **18**(3~4): 33~36, 32~39

- 11 Yang Yongying, Xu Ming, Zhuo Yongmo. Profiler of surface of non-contact testing with real-time scanning style[J]. *J. Zhejiang University(Natural Science)*, 1999, **33**(3): 317~322
杨甬英, 徐敏, 卓永模. 实时扫描非接触测量表面微观轮廓仪[J]. *浙江大学学报(自然科学版)*, 1999, **33**(3): 317~322
- 12 Lionel R. Baker. Surface imperfections: specimen measurement by microscope and digital camera [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(10): 2059~2060
- 13 L. R. Baker. Surface damage metrology: precision at low cost [C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 41~51
- 14 C. Leinert, D. Klüppelberg. Stray light suppression in optical space experiments[J]. *Apl. Opt.*, 1974, **13**(3): 556~564
- 15 C. I. Lin, M. Baker, R. J. Charlson. Absorption coefficient of atmospheric aerosol; a method for measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(6): 1356~1363
- 16 K. Fischer. Bestimmung der absorption von sichtbarer strahlung durch aerosol partikels [J]. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1970, **43**: 244~254
- 17 A. D. Clarke, A. P. Waggoner. Measurement of particle optical absorption, imaginary refractive index, mass concentration, and size at first international LAAP workshop [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(3): 398~402
- 18 F. M. Kahnert. Numerical methods in electromagnetic scattering theory[J]. *JQSRT*, 2003, (79~80): 775~824
- 19 W. V. Andrew, C. A. Balanis, P. A. Tirkas *et al.*. Finite-difference time-domain analysis of HF antennas on helicopter airframes [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1997, **39**: 100~113
- 20 D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra *et al.*. Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, **38**(7): 849~857
- 21 D. Sullivan, D. Borup, O. Gandhi. Use of the finite-difference time-domain method in calculating EM Absorption in human tissues[J]. *IEEE Trans. Biomed. Engng.*, 1987, **BME-34**(2): 148~157
- 22 A. Dunn, R. Richards-Kortum. Three-dimensional computation of light scattering from cells[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, **2**(4): 898~905
- 23 A. Dunn, C. Smithpeter, A. Welch *et al.*. Finite-difference time-domain simulation of light scattering from single cell[J]. *J. Biomed. Opt.*, 1997, **2**(3): 262~266
- 24 R. Drezek, A. Dunn, R. Richards-Kortum. Light scattering from cell: finite-difference time-domain simulations and goniometric measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3651~3661
- 25 R. A. Drezek, A. K. Dunn, R. R. Richards-Kortum. A pulsed finite-difference time-domain (FDTD) method for calculating light scattering from biological cells over broad wavelength ranges[J]. *Opt. Express*, 2000, **6**(7): 147~157
- 26 P. Yang, K. N. Liou. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(10): 2072~2085
- 27 G. Videen, W. Sun, Q. Fu. Light scattering from irregular tetrahedral aggregates [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1~3): 5~9
- 28 P. Yang, K. N. Liou, M. I. Mishchenko *et al.*. Efficient finite-difference time-domain scheme for light scattering by dielectric particles; application to aerosols[J]. *Appl. Opt. -LP*, 2000, **39**(21): 3727~3737
- 29 M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, L. D. Travis. Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements and Applications[M]. San Diego. Academic Press, 2000, 173~221
- 30 P. Yang, K. N. Liou. Light scattering by hexagonal ice crystals: comparison of finite-difference time domain and geometric optics models[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(1): 162~176
- 31 W. Sun, Q. Fu. Finite-difference time domain solution of light scattering by dielectric particles with a perfectly matched layer absorbing boundary condition[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3141~3151
- 32 Chang Jianhua, Li Chuanqi, Wu Xuhua. Analysis of dispersion characteristic in photonic crystal fibers based on FDTD method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 124~127
常建华, 李传起, 武旭华. 基于 FDTD 方法的光子晶体光纤色散特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 124~127
- 33 S. V. Georgakopoulos, R. A. Renaut, C. A. Balanis *et al.*. A hybrid fourth-order FDTD utilizing a second-order FDTD subgrid [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, **11**(11): 462~464
- 34 Maxim A. Yurkin, Alfons G. Hoekstra, R. Scott Brock *et al.*. Systematic comparison of the discrete dipole approximation and the finite difference time domain method for large dielectric scatterers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17902~17911
- 35 Fenghua Zheng, Zhizhang Chen, Jiazong Zhang. A finite-difference time-domain method without the courant stability conditions [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1999, **9**(11): 441~443