

文章编号: 1001 - 9014(2007)05 - 0396 - 05

气动热环境下高速飞行器光学窗口 光传输数值仿真研究

范志刚^{1,2}, 张亚萍², 裴扬威², 张 郡², 何艳磊²

(1. 哈尔滨工程大学机械工程博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:处在气动热环境中的光学窗口由于热传导和热应力等效应导致窗口材料外形和光学性质的变化,进而影响来自目标的红外辐射光线的传输,使目标图像产生模糊、抖动、偏移和能量衰减,给红外成像带来不利影响。以红外成像在高速拦截器上的应用需求为背景,进行了光学窗口光传输效应理论计算基本方法的分析,介绍了建立的数学模型和仿真软件,最后给出了典型状态下的计算结果。

关键词:气动光学;光学窗口;光线追迹;气动热

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A

NUMERICAL SIMULATION OF OPTICAL TRANSMISSION THROUGH HIGH SPEED AIRCRAFT OPTICAL WINDOW IN AERODYNAMIC THERMAL ENVIRONMENT

FAN Zhi-Gang^{1,2}, ZHANG Ya-Ping², PEI Yang-Wei², ZHANG Jun², HE Yan-Lei²

(1. Postdoctoral Research Station of Mechanical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Research Center of Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the aerodynamic environment, optical window's shape and optical property will be changed because of the thermal transmission and thermal stress, then the transmission of the infrared radiation from the target will be affected, which will make the image fuzzy, flutter, departure and energy's attenuation, thus, the effectiveness of infrared image will be heavily affected. According to the requirement of IR imaging technique applied in high-speed interceptor, the optical transmission theory and basic calculating methods of optical window were studied. The mathematic model and simulation software were introduced. Some computer simulation results at classical state were presented.

Key words: air-optics; optical window; ray-tracing; aerodynamic thermal

引言

随着新军事技术变革的到来,各种无人驾驶的飞行器(或精确打击武器)信息获取的精确性和时效性的依赖程度大幅度地提高,采用光学成像探测跟踪目标和追求高速飞行,已成为当代各种精确拦截武器的必然发展趋势。随着这两项技术的广泛应用,气动光学问题也应运而生。飞行器速度越高,采用光学成像探测系统的精确拦截武器气动光学效应越严重,探测的精度也越大。

从机理上看,气动光学效应主要是由于通过气

流层及窗口的光波位相和振幅的改变,使光波的传播方向改变和成像质量下降。湍流的分析与计算已有大量相关的文献^[1],而研究气动热环境对窗口光传输的影响尚不多见,本文重点研究了气动热环境对窗口性质的影响,并建立了相关的光线追迹模型进行仿真。

1 光学窗口气动热环境分析

飞行器在大气层内高速飞行时,在光学窗口周围形成复杂的湍流流场,产生温度场和热应力,影响窗口的物理和光学性质。

根据传热学原理,光学窗口材料在气动热环境下,原本均匀分布的折射率会因温度梯度和热应力的存在而产生不均匀分布,不均匀的程度与窗口的温度分布及内部应力有关.即物体的变形不仅仅由外力引起,温度的变化也能产生热变形.当温度变化受到约束时就会产生热应力,温度场和应力场使材料密度和极化率发生变化,从而改变材料的折射率.为研究光波在窗口介质中的传输机理,窗口介质折射率的研究是整个气动光学效应机理研究的极其重要和基础的部分.

1.1 气动热应力(弹光效应)对窗口折射率影响

光学窗口温度升高导致热应力产生,介质中存在弹性应力或应变时,介质的光学性质(折射率)将发生变化,这就是弹光效应.应力对材料折射率的影响是一个比较复杂的问题.原来各向同性的材料受到应力的作用,其折射率会变成与单轴晶体或双轴晶体类似,应力双折射是应力作用下材料折射率变化的主要表现^[2~4].

晶体的折射率可用折射率椭球来描述,即

$$i_j x_i x_j = 1, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \epsilon_{ij} = \frac{1}{n_{ij}^2} = \frac{1}{n_{ij}^2}; \quad = \begin{pmatrix} n_{xx}^2 & n_{xy}^2 & n_{xz}^2 \\ n_{xy}^2 & n_{yy}^2 & n_{yz}^2 \\ n_{xz}^2 & n_{yz}^2 & n_{zz}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{介电张量}).$$

折射率 n_{xx} 、 n_{yy} 、 n_{zz} 、 n_{yz} 、 n_{xz} 、 n_{xy} 都是 x 、 y 、 z 的函数,对于立方型结构的晶体,折射率 n 与应变之间的关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} 1/n_{xx}^2 \\ 1/n_{yy}^2 \\ 1/n_{zz}^2 \\ 1/n_{yz}^2 \\ 1/n_{xz}^2 \\ 1/n_{xy}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ yz \\ xz \\ xy \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, p_{11} 、 p_{12} 、 p_{44} 为应变光学常数,由应力和应变的关系可以得到折射率和应力之间的关系为

$$\begin{pmatrix} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{zz} \\ n_{yz} \\ n_{xz} \\ n_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_0 \\ n_0 \\ n_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ yz \\ xz \\ xy \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$C_1 = n_0^3 (p_{11} - 2\nu p_{12}) / (2E)$$

$$C_2 = n_0^3 [(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))] / (2E)$$

$$C_3 = n_0^3 p_{44} / (2G)$$

C_1 、 C_2 、 C_3 都是应力光学常数, E 、 G 、 ν 分别为杨氏模量、剪切模量和泊松比.对于各项同性的晶体, $p_{44} = (p_{11} - p_{12}) / 2$, $G = E / 2(1 + \nu)$.应力光学常数 C_1 、 C_2 、 C_3 即为弹光系数,为晶体的物性参数,具体数值,可以查阅相关手册或相关文献.手册和文献没有的,还有待用实验方法测定,目前有一些测量晶体弹光系数的方法.

2 窗口光传输机理分析

在知道了窗口折射率分布的条件下,可以通过光线追迹的方法研究光传输问题^[5].在窗口光传输的计算中,基于几何光学的光线追迹法可以非常简洁直观地由入射波前得到出射波前,进而用物理光学方法来计算光瞳函数,从而得到窗口系统的光学评价函数(PSF、MTF、Strehl比等).

2.1 光线追迹模型

参考平均流场的计算方法,在数值分析计算时,窗口折射率的分布不可能认为是某种简单的模型,而是从相位、光程、折射率密度分布等因素分析,确定计算单元区域(网格),设定每个网格区域有一个定常折射率.对于折射率分布不均匀且存在形变的窗口,加大计算密度,即减小划分网格的体积,增加网格数量,来达到需要的计算精度.对于表面存在形变的窗口,计算时最重要的有两点:一是确定入射光线(入射角已知)与窗口表面的交点,二是确定窗口表面的法矢量.然后就可以利用斯涅尔定律按梯度逐级求得折射光线矢量,最终得到出射波前.

计算机 3D 处理中,为了显示出物体在光照下不同的明暗效果,提出了各种光线追迹方法,在计算光线与物体相交时有两种基本方法:包围盒(bounding volume)、空间划分(space subdivision),并实现了并行处理.本文在光线追迹时,对变形的窗口首先采用包围盒方法,构造出一个包围窗口的长方体,如图 1 所示,然后在包围盒内部采用空间划分方法追迹光线.

2.2 光学评价函数的计算

由光线追迹得到的光程 OPD_i 为

$$OPD_i = \int_i n_i l. \quad (4)$$

假设主光线的光程为 OPD_0 ,那么第 i 条光线经过流场介质产生的波像差为:

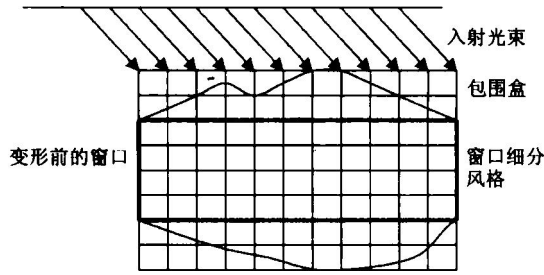


图 1 窗口包围盒示意图
Fig 1 Sketch of the window's bounding volume

$$W(x, y) = \frac{2}{\lambda} (OPD_i - OPD_0) \quad (5)$$

因此,通过计算出光瞳上每条光线的光程差,就可以得到整个出瞳的波像差.经过窗口的出射波面为:

$$A(x, y) = a(x, y) e^{W(x, y)} \quad (6)$$

式中 $A(x, y)$ 为系统的瞳函数; $a(x, y)$ 为波面的振幅分布; $e^{W(x, y)}$ 为波面的相位分布.

应用线性光学系统理论进行点扩散函数计算,首先求出由物点发出球面波通过光学系统以后的出射波面,即求出光学系统的波像差和瞳函数,然后根据惠更斯原理用衍射积分的方法计算出像面点扩散函数,再对点扩散函数进行傅里叶变换,得到系统的光学传递函数.

飞行器光学成像探测系统对目标的成像一般满足远场近似条件,根据惠更斯原理,瞳函数为 $A(x, y)$ 的波面,在像面上形成的振幅分布为:

$$U(x, y) = \int \int A(x, y) e^{-\frac{j\pi}{\lambda f}(xx+yy)} dx dy \quad (7)$$

由上式可知,像面的振幅分布为瞳函数的傅里叶变换,因光强正比于振幅的平方,所以点扩散函数为:

$$PSF(x, y) = |U(x, y)|^2 \quad (8)$$

对点扩散函数进行傅里叶变换可得窗口的光学传递函数^[6].

3 窗口光传输软件仿真结果

3.1 窗口气动热效应的 ANSYS 仿真

在光学窗口中考虑 ZnS 窗口, ZnS 材料的光学参数为:常温常态折射率 $n = 2.356$ (波长 $10\mu\text{m}$ 时),热光系数 $\beta = 5 \times 10^5$,弹光系数 $P_{11} = 0.091$, $P_{12} = -0.01$, $P_{13} = 0.075$ 物性参数 $k = 18\text{w/m} \cdot \text{k}$, $p = 485\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{k})$, $\rho = 4030\text{kg}/\text{m}^2$, $q = 120000\text{w}/\text{m}^2$, $T_0 = 50$, $h = 10\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$, $E = 74\text{GPa}$, $\nu = 7 \times 10^{-6}$

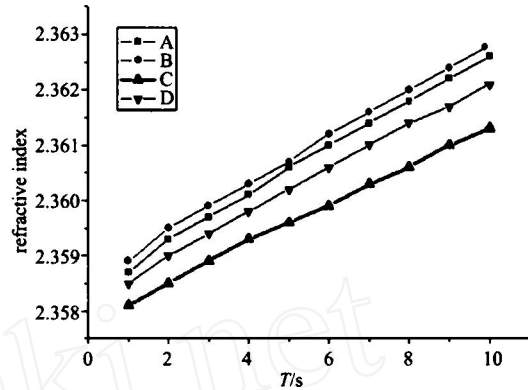


图 2 窗口外侧面中心点折射率随时间变化曲线
Fig 2 The center point index variable curve with time for window's outside surface

$K, \nu = 0.37, \sigma = 105\text{MPa}, G = 27\text{MPa}$,气动热流 $q = 120000\text{w}/\text{m}^2$,窗口外气动压力为 1MPa ,内侧考虑一个大气压 0.1MPa ,窗口的初始温度为 $T_0 = 50$,应力分析参考温度为 20 ,时间步长为 0.5s ,考虑到现有计算机的能力,网格划分为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1\text{mm}$,其中在厚度方向网格划分为 1mm .窗口的边界约束考虑固定约束.用 Ansys 软件分析,采用顺序耦合中的间接法,先进行热分析,再将得到的节点温度作为体载荷施加到结构分析中的节点上.通过仿真计算可以得到窗口外侧面中心点上折射率随时间的变化曲线为如图 2 所示.

由图 2 知,随着时间的增加,温度和应力逐渐增大,折射率也逐渐增大.由 D 曲线可知热光效应使折射率增大,由 A、B、C 曲线可知,弹光效应使 x, y 方向的折射率增大,而使 z 方向的折射率变小,这是由于 z 方向的应力为负值,为压应力.同时,由图 2 可知,热光效应对折射率的影响比较大,而弹光效应比较小.以外侧面中心点第 10s 的折射率为例,热光效应引起的折射率变化为 0.0061 ,而弹光效应引起的折射率变化为 0.0007 ,为热光效应作用的 11.5%.

3.2 窗口光传输仿真

在进行光学分析时,设光学系统口径 D 为 60mm 、光学系统焦距 f 为 250mm 、工作波段为 $8\mu\text{m}$ 、光线垂直入射到光学窗口上,对于 ANSYS 仿真得出的在窗口内时间和空间分布不均的折射率,根据建立的光波在光学窗口热环境下传输效应的数学模型,得出相应的焦平面图像的各评价指标.这里选取 xoz 平面 $30^\circ \sim 45^\circ \sim 60^\circ$ 入射角度 (此入射角是入射光线与窗口法线的夹角),光波经过窗口后的畸

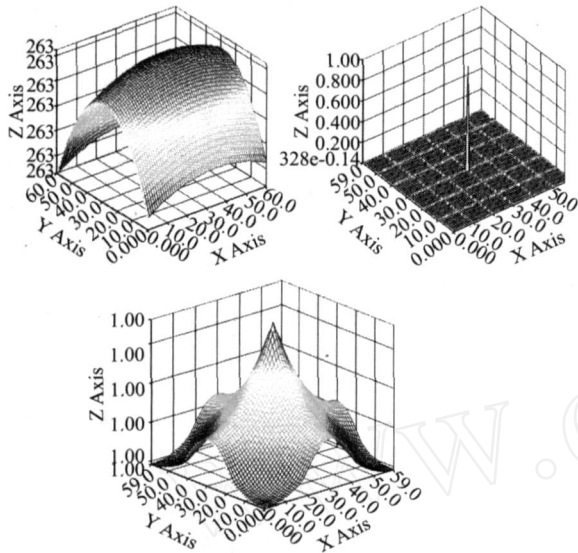


图3 入射角 30° 时出射波面图(a)、PSF(b)、MTF(c)
Fig.3 Wave front(a) PSF(b) MTF(c) when incident angle is 30°

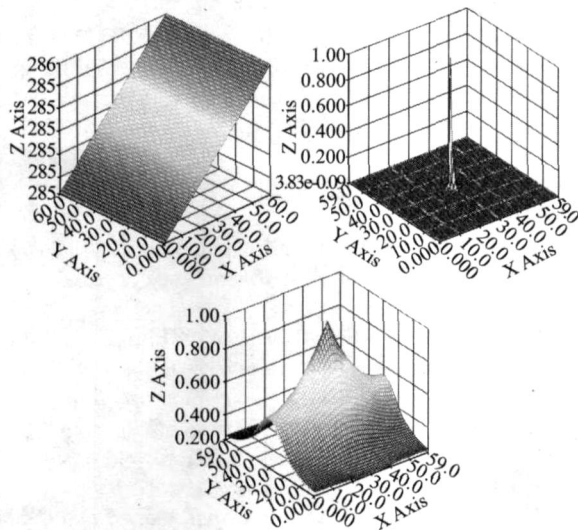


图4 入射角 45° 时出射波面图(a)、PSF(b)、MTF(c)
Fig.4 Wave front(a) PSF(b) MTF(c) when incident angle is 45°

变波面以及相应的点扩散函数和传递函数如图3至图5所示。

从上述各图可以看出,不同入射角的目标成像光束通过窗口后的光程差不同,所造成的畸变波面和对应的PSF也不同。可以得知,在相同窗口数据分布情况下,入射角为 30° (xoz 平面内)时,成像质量良好,但是随着入射角的增大,MTF明显下降。目前在光学窗口的初步设计中,当入射角最大选为 60° 与实验结果较为吻合。

4 结论

通过以上分析和程序运行结果可以得知,为减

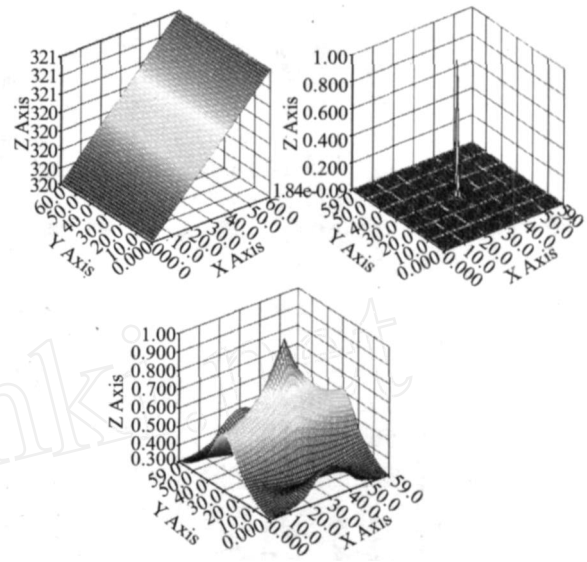


图5 入射角 60° 时出射波面图(a)、PSF(b)、MTF(c)
Fig.5 Wave front(a) PSF(b) MTF(c) when incident angle is 60°

小气动光学效应的影响,获得流场和光学窗口的光传输光程差是关键,在对气动热辐射和热应力分析的基础上,对气动热环境下建立的光学窗口空间有限元模型以及相应的光线追迹算法是可行的,根据光线穿过非均匀介质后的畸变波前获得的光传输特性所进行的像质评价具有一定的参考价值。

同时,目前对高速飞行器光学窗口光传输分析的数值仿真模型都是在简化条件下得出的,和工程实际相比还有一定的差距。考虑到实际工程条件如:气体电离、高温、不同化学组分及真实气体等条件下的大涡模拟方程、窗口的材料、形状、固定模式、镀膜、隔热制冷等条件、光学传输效应以及光波与流场和窗口的相互作用理论还有待于深入研究,数值仿真系统需要完善,同时需要研究与建立对数值仿真系统的评价体系。因此基于真实条件下的光波在光学窗口中的传输机理研究,数值仿真系统研究,评价体系研究是飞行器光学窗口气动光学效应机理研究的前沿,其中一系列关键问题的解决,能够为揭示流场和窗口气动光学效应的机理,探测和修正红外目标图像畸变,提高我国高速飞行器的探测,跟踪识别能力和作战性能提供一条行之有效的技术途径。

REFERENCES

- [1] Wan Z, Guo Y, Chen D, *et al* Calculating aero-optic effect of turbulent flow on the hypersonic flying vehicle [J]. *SPIE* 2000, 4125: 102—107.
- [2] DU Shao-jun, LU Qi-sheng, SHU Bo-hong Analysis on thermal effect and stress-birefringence of laser window [J], *High Power Laser & Particle Beams* (杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 激光窗口热效应和应力双折射的分析. 强激光与粒

子束), 2004, 16(5): 575—581.

- [3] Huang M. Stress effects on the performance of optical waveguides[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40, 1615—1632
- [4] XING Jin-hua, QIAN Bin, FENG Jin-fu, Measurement of the elasto-optic effect of crystal using white light interferometer[J], *Laser Journal*(邢进华, 钱斌, 冯金福, 等. 白光干涉技术测量晶体的弹光效应. *激光杂志*), 2004, 12(3): 38—43.

- [5] Yagel R, Cohen D, Kaufman A. Discrete ray tracing computer graphics and applications[J], *IEEE*, 1992, 12(5): 19—28
- [6] LI Pi-Ding, LI Yu-Min, FU Yu-Tian, *et al* Effect of over-sample-superposition on MTF for long wave infrared camera [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(李丕丁, 李玉敏, 傅雨田, 等. 长波红外相机多次采样叠加对 MTF 的影响分析. *红外与毫米波学报*), 2006, 2(25): 13—16

(上接 395 页)

析发现相比原始光谱,一阶导数光谱更适合对粗纤维含量进行诊断,由一阶导数光谱构建的线性模型可对粗纤维含量变化的 69.3%做出解释,要优于指数模型的 66.9%;并且该模型与其它 3 类模型相比, $RMSE = 3.538$, 值最小,由其所得到的粗纤维含量理论值与实测值之间的相关系数 $r = 0.693$. 因此认为采用一阶导数光谱构建的线性模型对粗纤维含量进行估算较为合适.

本试验构建模型所采用的高光谱数据是室内鲜样光谱反射率,样本数有限,所构建的模型是在确定粗纤维含量光谱诊断敏感波段的基础上采用单一波段得到的,对构建模型只是作了初步性的尝试,因此所得到的结论还有待进一步验证,在本研究结论基础上,利用高光谱遥感技术更为准确地确定玉米叶片粗纤维含量的敏感波段范围和光谱参数,建立准确度更高的粗纤维监测与诊断模型是今后研究的主要内容.

REFERENCES

- [1] CHEN Shu-Peng, TONG Qing-Xi, GUO Hua-Dong *Mechanism of High-Resolution Remote Sensing and Recognition of Landcover*[M]. Beijing: Beijing Sci & Tech Press (陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 高光谱分辨率遥感信息机理与地物识别 [M]. 北京: 北京科学出版社), 1998, 21—23.
- [2] HE Yong, LI Xiao-Li Discriminating varieties of waxberry using near infrared spectra [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何勇, 李晓丽. 用近红外光谱鉴别杨梅品种的研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(3): 192—194.
- [3] SHAO Yong-Ni, NE Yong Method for predicting acidity of bayberry juice by using vis / near infrared spectra [J]. *J.*

Infrared Millim. Waves (邵咏妮, 何勇. 可见近红外光谱预测杨梅汁酸度的方法研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(6): 478—480.

- [4] LI Xiao-Li, HU Xing-Yue, HE Yong New approach of discrimination of varieties of juicy peach by near infrared spectra based on PCA and MDA model[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(李晓丽, 胡兴越, 何勇. 基于主成份何多类别判别分析的可见—红外光谱水蜜桃品种鉴别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(6): 417—420.
- [5] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, *et al* Estimating com leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 74: 229—239.
- [6] TAN Chang-Wei, WANG Ji-Hua, HUANG Wen-Jiang, *et al* Study on spectral variation of LTN, CHL and LAI of summer maize [J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin* (谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 等. 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究. *西北植物学报*), 2004, 24(6): 1041—1046.
- [7] Graeff S, Claupein W. Quantifying nitrogen status of com in the field by reflectance measurements [J]. *Eur J. Agron*, 2003, 19: 611—618.
- [8] JIANG Hai-Rong, WANG Ji-Hua, XIE Rui-Zhi, *et al* Canopy spectral reflectance in relation to the leaf cellulose contents at different vertical layers of maize plants [J]. *Trans CSAE* (蒋海荣, 王纪华, 谢瑞芝, 等. 玉米叶片纤维素含量与冠层光谱特征研究. *农业工程学报*), 2005, 21(10): 5—8.
- [9] YANG Sheng *Technology for Feedstuff Analysis and Quality Assessment*[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press (杨胜. 饲料分析与质量检测技术 [M]. 北京: 北京农业大学出版社), 1993, 21—23.
- [10] Philpot W D. The derivative ratio algorithm: avoiding atmospheric effects in remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(3): 350—357.