

文章编号 1004-924X(2010)02-0390-07

# 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取

贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**为了在光切法三维形貌测量中快速准确提取光条的中心位置,保证测量精度,研究了一种光条中心的亚像素提取方法。将图像的灰度视为关于坐标的二维函数,在 CCD 拍摄的激光光条图像中求取灰度的偏导数和梯度,图像中每一点的梯度代表此点的灰度变化方向,将此方向简化为光条上的点的法线方向。对梯度的大小设定阈值并结合该点的灰度信息,提取图像灰度变化最激烈的部分,即光条饱和带的像素位置。对光条饱和带的每个像素,按照不重复计算的原则在梯度方向上和规定邻域内求灰度中心,得到精确到亚像素级的光条中心位置。此方法将光条曲线的法线方向简化为灰度的梯度方向,省去了求海赛矩阵以确定法向的步骤。实验证明,同等条件下,该方法的计算耗时为常规亚像素提取方法的 10%。利用该算法进行实际测量,在 200 mm×200 mm 测量范围下,误差(3 $\sigma$ )为 0.057 mm,满足了测量对精确性和实时性的要求。

**关键词:**图像处理; 灰度梯度; 亚像素中心

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A

## Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method

JIA Qian-qian, WANG Bo-xiong, LUO Xiu-zhi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to extract the central positions of a light stripe and to ensure the accuracy of surface measurement based on light-sectioning method, an approach of the light stripe central position extraction in sub-pixel is investigated. By taking the gray level of an image as a 2D function of coordinates, the directional derivative and the gradient of the image of light stripe are calculated. In the image, the pixel gradient represents the direction of the change in gray level, and it is assumed as the normal direction of the light stripe curvilinear. Pixels at the positions of light stripe can be extracted by setting a threshold for both absolute values of the gradient and the gray level. The sub-pixel central positions of the light stripe are equal to the mean value of the gray-level-weighted positions of the pixels in the stripe's adjacent region along the gradient direction. With this method, the normal direction of the stripe can be simplified to be the gray level gradient, which avoids complicated steps to calculate a Hessian matrix to get normal directions. Experimental results indicate that the elapsed time of the

收稿日期:2008-11-10;修订日期:2008-12-26.

基金项目:科技部中德科技合作重点项目(No. 2003DFB00028)

method is only 10% that of the traditional way, and the error ( $3\sigma$ ) of real measurement is 0.057 mm in the range of 200 mm  $\times$  200 mm. It can satisfy the requirements of accuracy and real-time measurement.

**Key words:** image processing; gradient of gray-level; central positions in sub-pixel

## 1 引言

光切法(线结构光法)三维形貌测量技术是一种基于光学三角法的非接触式测量技术。其基本原理<sup>[1-4]</sup>是将线激光器发出的“光刀”投射到被测物体表面,用 CCD 摄像机记录物体对光条的调制,在计算机中解算条纹的变形,将二维信息转换为三维信息。平移被测物体或线激光器与 CCD 摄像机组成的传感单元,使激光平面以一定的间隔扫描物体表面,在物体表面形成一系列的光切面二维轮廓,由光切面二维轮廓组合形成物体表面三维轮廓。光切法测量技术以其大量程、大视场、较高精度、实时性强及主动受控等特点,在工业产品快速成型、测距以及三维面形测量等方面得到了应用<sup>[3-5]</sup>。

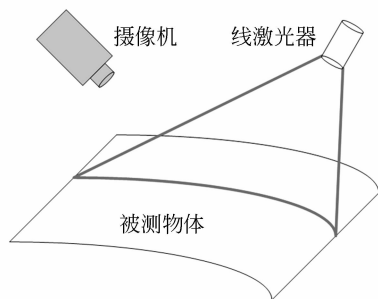
测量中,准确提取图像中的光条中心是影响测量精度的关键。激光器投射出的“光刀”有一定的线宽,CCD 拍摄得到的光条图像也有一定的像素宽度,由于被测物体的纹理、表面光洁度以及测量环境的不同会引起光条散射程度不同,加大了提取光条中心的难度<sup>[6]</sup>,因此需要寻找快速精确且鲁棒性好的中心提取算法。本文研究了光条图像的灰度分布,通过求取图像的灰度梯度,将光条曲线的法线方向简化为灰度梯度方向,在法线方向上求取光条的中心,既考虑了曲线的方向性,又保证了亚像素的提取精度,省去了传统方法中求海赛矩阵以确定法向的繁琐计算,提高了提取效率。

## 2 光切法测量系统的原理

### 2.1 测量原理

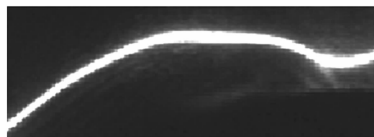
光切法测量系统的基本原理如图 1 所示。

线激光发出的“光刀”受到被测物体表面深度变化的调制,变形的的光条中包含了物体的三维形貌信息<sup>[2]</sup>,精确提取 CCD 拍摄图像的光条中心是



(a) 光切法测量原理

(a) Principle of light sectioning method



(b) 真实光条图像

(b) Picture of light stripe

图 1 光切法的测量原理

Fig. 1 Illustration of light sectioning method

测量的前提。

### 2.2 光条中心提取

目前的光条中心提取方法分为两类:一类是基于图像灰度的方法,如极值法、边缘法、阈值法、重心法<sup>[2]</sup>等。极值法是将灰度的最大值点当作光条中心,但如果光条图像存在饱和,则提取出的中心宽度不等于单个像素;边缘法包括简单的边缘提取,用边缘数据来近似求解中心,或提取光条的双边边缘,用平均值作为几何中心;阈值法是求取阈值大于设定值的两个像素的中心为光条中心;重心法是在图像的宽度方向上对像素位置进行灰度加权而求出光条中心。在基本的方法上,也发展出了一些改进的算法,如自适应的阈值判断方法或利用遗传算法进行阈值选取<sup>[7]</sup>等。另一类是将图像看成  $z(x, y)$ ,通过函数的微分几何特性,将  $z(x, y)$  的脊线提取出来。如果要精确到亚像

素的精度,需要在曲线的法向上进行 Taylor 展开,而曲线的法线方向则由海赛矩阵的特征值和特征向量确定<sup>[8]</sup>。Steger<sup>[8]</sup>使用高斯核与图像进行卷积来估计图像的导数,由此求出海赛矩阵并确定线条的中心。此方法能达到亚像素的精度,算法稳定,鲁棒性好,但是计算量大且尺度因子<sup>[8]</sup>的选定对线条的检测至关重要,如果图中存在宽度差别较大的两条曲线,则难以精确提取中心。

极值法、阈值法和重心法由于没有考虑线条的方向性,因此在光条曲线的曲率变化较大处存在着误判断。而如果考虑曲线的方向性,求取曲线梯度和法向,在法向上进行泰勒展开、抛物线拟合<sup>[9]</sup>或利用重心法<sup>[2]</sup>求解中心,则要首先提取图像骨架或计算每个像素的海赛矩阵<sup>[8]</sup>,计算成本很高,影响了测量的实时性。

### 3 光条中心的亚像素提取

要实现光条中心的亚像素提取,必须考虑曲线的方向性,即求取曲线的梯度和法线方向。

#### 3.1 线激光光强分布

线激光光条在截面上的一维近似高斯分布<sup>[7]</sup>如图 2 所示。

从图 2 可以看出,光条在中心处存在着饱和,且沿法向方向灰度变化较快,即灰度梯度很大。

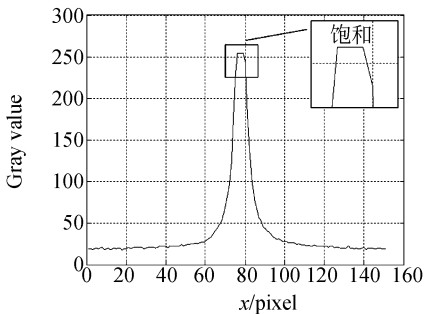


图 2 线激光截面的近似高斯分布

Fig. 2 Approximate Gaussian distribution of cross section of a line laser

图 3 示出了一幅线激光的图像以及其灰度的二维分布情况。可以看出,在线条的法线方向

上,光强仍然近似服从高斯分布。因此,要确定光强中心,必须找出法线方向。

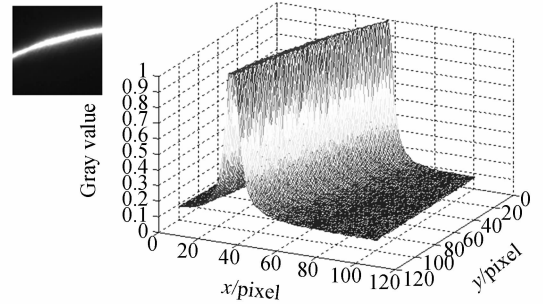


图 3 线激光图像光强的二维分布

Fig. 3 Two dimensional light intensity distribution of light stripe

#### 3.2 线激光光强的二维梯度

求灰度梯度是图像边缘提取的重要步骤,本文的灰度梯度的求取,不依赖于经典的边缘提取算子与图像的卷积,而是直接将图像看成二维函数  $F(x, y)$ , 对其求偏导数。对激光光条图像  $F(x, y)$  求取灰度梯度  $(\Delta x, \Delta y)$ :

$$\Delta x = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\Delta y = \frac{\partial F(x, y)}{\partial y}. \quad (2)$$

梯度的绝对值在边缘处取较大值,在均匀变化的背景和光条饱和处取较小值。对图像中的每一点  $(x, y)$  进行以下运算:

$$F(x, y) > \text{const}, \quad (3)$$

$$a_1 < (\Delta x^2 + \Delta y^2) < a_2. \quad (4)$$

const 为图像中灰度最大值与灰度最小值的平均,由下式确定:

$$\text{const} = (\max(F) + \min(F)) / 2. \quad (5)$$

$a_1, a_2$  分别是判断灰度梯度大小的阈值,由下式确定:

$$a_1 = \min(\Delta x^2 + \Delta y^2) \approx 10^{-3}, \quad (6)$$

$$a_2 = 0.7 \max(\Delta x^2 + \Delta y^2) \approx 10^{-1}.$$

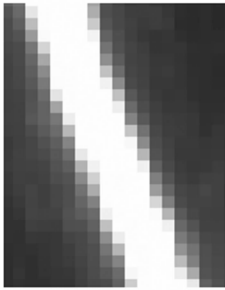
进行上述处理后,可同时去掉灰度变化剧烈的边缘部分和灰度变化缓慢的背景,得到点的集合  $P(x, y)$ 。  $P(x, y)$  中的点的位置都是像素级的,而光条中心的线宽大于一个像素。

图 4 示出了激光光条图像和求取的  $P(x, y)$  集合中的点及其对应的灰度梯度,其中图 4(a)为

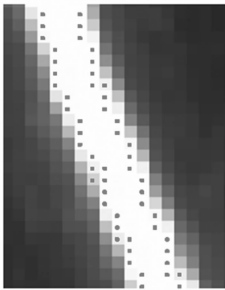
原始图像,图 4(b)中的点为提取出的点的集合  $P(x, y)$ ,图 4(c)中的箭头示出了各点对应的灰度梯度方向。

### 3.3 光条中心位置的亚像素提取

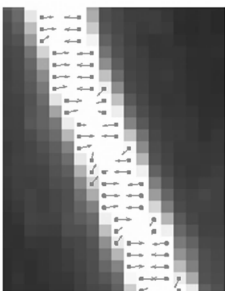
通过图 4 可以看出,灰度梯度方向与曲线的法线方向非常接近,可以将灰度梯度近似看成是曲线的法线方向。因此,可以对  $(x, y) \in P(x, y)$  沿着其灰度梯度方向求取光条中心。



(a) 原始图像  
(a) Original image



(b) 点  $P(x, y)$  的集合  
(b)  $P(x, y)$  collection



(c) 灰度梯度方向  
(c) Gradient of gray level

图 4 光条的灰度梯度

Fig. 4 Gradient of gray level of light stripe

对于一点  $(x_0, y_0) \in P(x, y)$ ,以  $(x_0, y_0)$  为中心,按照下式截取其邻域图像:

$$F_{x_0, y_0}(x, y) = F(x, y), \quad (7)$$

式中,  $x \in [x_0 - R, x_0 + R]$ ,  $y \in [y_0 - R, y_0 + R]$ 。

图像  $F_{x_0, y_0}(x, y)$  的中心为  $(x_0, y_0)$ ,其灰度梯度方向或者法线方向为由向量  $(\Delta x, \Delta y)$  确定的方向

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (8)$$

以  $k$  为斜率,过  $(x_0, y_0)$  的直线表示为:

$$y - kx - (y_0 - kx_0) = 0. \quad (9)$$

直线与  $F_{x_0, y_0}(x, y)$  的交点的集合,定义为  $G_{x_0, y_0}(x, y)$ ,则光条中心点的亚像素位置可由重心法确定<sup>[2]</sup>:

$$x_{\text{Center}} = \frac{\sum_n x \cdot G_{x_0, y_0}(x, y)}{\sum_n G_{x_0, y_0}(x, y)}, \quad (10)$$

$$y_{\text{Center}} = \frac{\sum_n y \cdot G_{x_0, y_0}(x, y)}{\sum_n G_{x_0, y_0}(x, y)}. \quad (11)$$

式中,  $n$  为  $G_{x_0, y_0}(x, y)$  中点的个数。

由以上过程得到的点的集合定义为  $C'(x, y)$ ,由  $C'(x, y)$  确定的光条中心线虽然达到了亚像素级,但是线宽仍然不为 1,因此,需要在求取  $G_{x_0, y_0}(x, y)$  集合的过程中加入判断,如果点  $P_1$  对应的集合  $G_{P_1}(x, y)$  中包含了点  $P_2$ ,则对于点  $P_2$  不必再求  $G_{P_2}(x, y)$ 。这样,即可得到单线条的光条图像的亚像素中心  $C(x, y)$ 。图 5 示出了提取出的光条中心的亚像素位置及其灰度梯度方向。

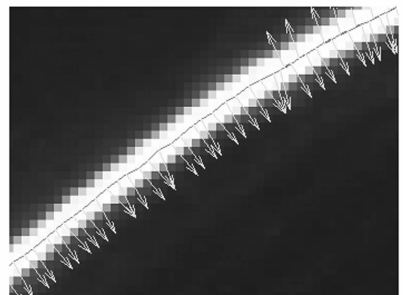
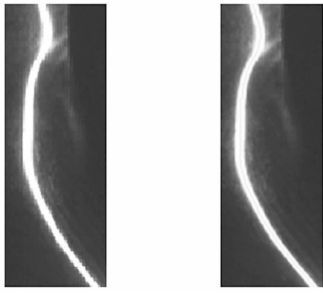


图 5 光条的亚像素中心及其灰度梯度方向

Fig. 5 Central positions of light stripe and their gradients

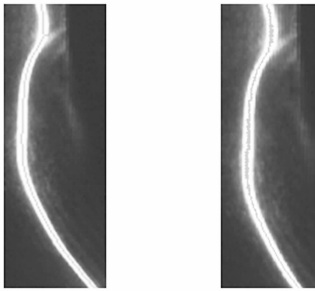
## 4 实验结果

根据上述方法进行了实验。图 6 示出了一幅



(a)原图 (b)本文方法

(a)Original image (b)Method in this paper



(c)细化法 (d)Steger 法

(c)Thinning method (d)Steger method

图 6 不同算法提取光条中心的结果

Fig. 6 Comparison of different methods of central position extractions

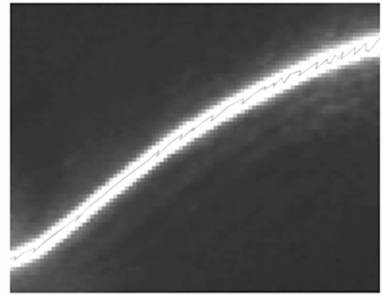
图 6 中,图 6(a)为原始的光条图像,图 6(b)为本文算法得到的结果,可以看出,光条中心的信息完整而准确;图 6(c)为由形态学的细化算法得到的光条中心,细化算法只能得到像素级的骨架,且在环境光偏亮的地方有分叉出现;图 6(d)为由 Steger 算法<sup>[6]</sup>在尺度因子  $\sigma=4$  时求出的光条中心,由于其尺度因子  $\sigma$  对线条宽度的敏感而导致局部出现了锯齿,不能正确反应光条中心。

表 1 提取算法的精度比较

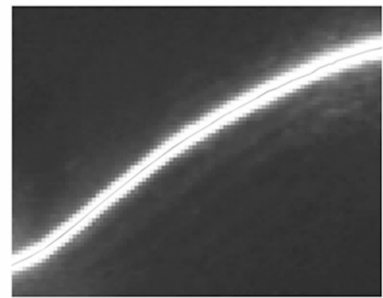
Tab. 1 Comparison of accuracy of extraction methods

本文方法/pixel	形态学方法/pixel
(306.409, 154.080)	(306,154)
(312.337, 149.620)	(312,150)
(315.860, 147.014)	(316,147)
(318.445, 144.870)	(318,145)
(323.407, 140.920)	(323,141)
(331.264, 135.120)	(331,135)

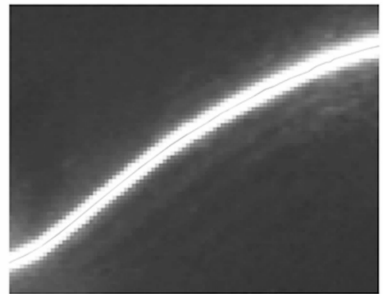
.....  
 (554.823, 106.163) (555,106)  
 (557.116, 108.226) (557,108)



(a)R=3



(b)R=5



(c)R=0

图 7 R 的选取对中心提取的影响

Fig. 7 Extraction results of different R

表 1 分别示出了本文方法与形态学细化法计算得到的光条中心的数据,方法的中心提取精度为亚像素级,形态学细化法的精度为像素级。利用上述方法,对物体进行测量,得到 3 146 点的数据,图 8 示出了误差曲线,在测量范围为 200 mm×200 mm 时,误差(3 $\sigma$ )为 0.057 mm。

表 2 示出了各种算法所需要的计算时间和精度比较,实验中使用的计算机 CPU 主频为 2.4 GHz,图像大小为 768 pixel×576 pixel。可

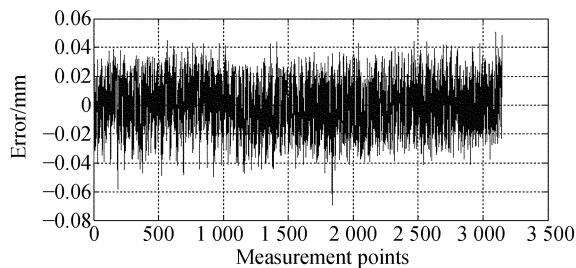


图8 实际测量的误差曲线

Fig. 8 Error curve of real measurement

可以看出,本文的方法耗时约为形态学算法的230%,为Steger算法的10%。

表2 不同提取算法的精度与耗时比较

Tab. 2 Comparison of elapsed-time and accuracy of different methods

方法	本文方法	形态学细化法	Steger方法
耗时/s	0.354	0.156	4.183
精度	亚像素	像素	亚像素

实验证明, $R$ 的选取对算法的检测精度有一

## 参考文献:

- [1] ERNEST O D. *Measurement Systems: Application and Design*[M]. Boston: McGraw-Hill, 2004.
- [2] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. ZHANG G J. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [3] MOREL O, STOLZ C, MERIAUDEAU F, *et al.*. Active lighting applied to three-dimensional reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17):4062-4068.
- [4] PIECHOCINSKI S P, SASIADEK J Z. Experimental determination of relative motion measurement accuracy for an auto-synchronous triangulation scanning laser camera[J]. *SPIE*, 2005, 5791:208-217.
- [5] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7):1124-1129. LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1124-1129. (in Chinese)
- [6] 向长波, 尹传历, 宋建中. 抗干扰的光刀中心提取方

法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1303-1308. XIANG CH B, YIN CH L, SONG J ZH. An anti-disturbing method for extracting light-knife center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1303-1308. (in Chinese)

## 5 结论

本文提出了一种光切法物体三维形貌测量中激光光条中心的亚像素提取方法, 求取图像灰度的偏导数后, 用灰度梯度方向代替曲线的法线方向, 在此方向上求取灰度中心。该方法将光条曲线的法线方向简化为灰度的梯度方向, 省去了求海赛矩阵以确定法向的繁琐步骤, 将计算时间缩短为常规亚像素算法的10%, 利用该算法进行实际测量, 在200 mm×200 mm测量范围下, 误差为0.057 mm。本算法简化了计算, 保证了精度, 满足了测量中对数据处理的精度和实时性的要求。

- [7] 李和平, 李德华, 朱洲, 等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):82-87. LI H P, LI D H, ZHU ZH, *et al.*. Detection of structured light strip center line based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):82-87. (in Chinese)
- [8] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 1998, 20(2):113-125.
- [9] 贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(7):593-597. HE J J, ZHANG G J. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(7):593-597. (in Chinese)

## 作者简介:



贾倩倩(1982—),女,山西大同人,博士研究生,2005年于清华大学获得学士学位,主要从事机器视觉及精密仪器与测试技术等方面的研究。E-mail: gqq@mails. tsinghua. edu. cn



罗秀芝(1968—),女,高级工程师,主要从事机械系统动态测试等方面的研究。E-mail: luoxz@tsinghua. edu. cn

## 导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1970年、1982年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术、MEMS技术、光学测量技术、生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua. edu. cn

## ● 下期预告

## 近红外漫反射光谱应用于土壤锌含量的快速测定

黄富荣<sup>1,2</sup>, 潘涛<sup>1,2</sup>, 张甘霖<sup>3</sup>, 潘贤章<sup>3</sup>, 刘登飞<sup>1,2</sup>

(1. 暨南大学“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广东 广州 510632;

2. 暨南大学广东省高等学校光电信息与传感技术重点实验室, 广东 广州 510632;

3. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

采用近红外漫反射光谱和偏最小二乘法(PLS)建立土壤锌快速分析的定量模型,并进行波段优选。基于单波长模型预测效果将全体样品划分为定标集和预测集。然后采用多元散射校正(MSC)和Savitzky-Golay(SG)平滑方法对光谱进行预处理。选取下列5个波段:全谱400~2 500 nm、400~1 100 nm、1 100~1 900 nm、1 900~2 500 nm、580~900 nm,每个波段分别采用原谱、一阶导数谱、二阶导数谱,共建立了15个定标模型。同时调整SG平滑点数和PLS因子数,每个模型分别进行PLS数值实验,按照预测效果进行优选。结果表明,采用1 900~2 500 nm波段一阶导数谱的模型效果最好,预测相关系数(RP)、RMSEP、RRMSEP分别为0.806,31.0 mg/kg,19.96%。1 900~2 500 nm波段可以代替全谱波段得到更好的预测效果,为设计专用土壤近红外光谱仪提供了依据。