

基于无人机倾斜摄影的输电线路环水保地物多光谱影像分类研究

支妍力¹, 周宇¹, 程艳辉², 黄渐佳²

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077;

2. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 随着电力系统的发展, 电力线路在电网中的作用越来越重要。为了解决电力线路在实地勘测遇到的问题, 研究构建基于无人机倾斜摄影的输电线路环水保地物多光谱影像模型。首先利用无人机倾斜摄影构建三维模型, 然后将三维模型、多光谱影像检测融合构建模型, 最后利用仿真实验去判断模型的性能。结果表明, 在支持向量机(support vector machine, SVM)和最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LSSVM)两种函数下对不同地物的探测平均精度都能达到90%, 且测试与训练耗时差距不大。同时利用模型对两种不同地形进行残值分布检测, 模型得到的结果都符合测量精度的要求。验证了模型的稳定性, 且完全能够满足实际勘测的要求。

关键词: 无人机; 倾斜摄影; 输电线路; 多光谱影像

中图分类号: TP391.413 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)07-0089-06

Research on Multispectral Image Classification of Transmission Line Ring Water Conservation Features Based on UAV Tilt Photography

ZHI Yanli¹, ZHOU Yu¹, CHENG Yanhui², HUANG Jianjia²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330077, China;

2. Hubei Anyuan Safety & Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: With the development of power system, the role of power lines in the power grid is becoming more and more important. In order to solve the problems encountered in the field survey of power lines, the study constructs a multispectral image model of transmission line ring water conservation features based on unmanned tilt photography. Firstly, a 3D model is constructed using unmanned tilt photography, then the 3D model and multispectral image detection are fused to construct the model, and finally, simulation experiments are used to judge the performance of the model. The results show that the average accuracy of detection of different features under both support vector machine (SVM) and least squares support vector machine (LSSVM) functions can reach 90%, and the difference between test and training time is not large. The model is also used to detect the residual value distribution for two different terrains, and the results obtained by the model meet the requirements of measurement accuracy. The stability of the model is verified, and it can fully meet the requirements of the actual survey.

Keywords: unmanned aerial vehicle; tilt photography; transmission lines; multispectral imaging

0 引言

随着城市化的加速和工业化的推进, 电网建设在全国范围内得到了广泛的应用。输电线路作为电网的重要组成部分, 直接关系到整个电网的运行效率和稳定性。传统的输电线路工程建设需要经过实地勘测和评估, 但随着技术的发展, 采用无人机倾斜摄影技术可以更快速、更准确地获取输电线路的相关信息^[1]。输电线路环水保地物是指输电线路周围环境中与输电线路有关的物体, 包括树木、岩石和土壤等^[2]。传统的分类方法通常存在以下问题: 缺乏细致的分类精度和效率, 需要人工干预, 且无

法对输电线路周围环境进行全面评估。多光谱影像分类可以获取输电线路周围环境的丰富信息, 如土壤、植被、水体等, 可以帮助人们更好地了解 and 掌握输电线路周围环境的状况, 并为环保部门提供有力的支持^[3]。在输电线路环水保地物多光谱影像分类研究中, 多光谱具有以下意义和作用: 地物分类和土壤水分检测。其中地物分类是指多光谱影像可以获取不同波段的光谱反射信息, 通过对光谱反射率进行分析和比较, 可以将地物进行分类。如可以通过不同波段的光谱信息区分出植被、建筑物、水体等地物类型。土壤水分检测是指多光谱影像中的不同波段对土壤水分具有敏感性, 可以通过分析不同波段的光谱反射率来推测土壤水分含量。这对于输电线路环水保地

*基金项目: 国家电力管理科技项目资助(5700-202225178A-1-1-ZN)

收稿日期: 2023-10-11

物分类研究中的水保地物的识别和分析十分重要。研究通过对无人机倾斜摄影获取的输电线路环水保地物多光谱影像进行研究,旨在提出一种准确、高效的分类方法,为输电线路周围环境的评估和保护提供重要参考。

1 基于无人机倾斜摄影的输电线路地物多光谱影像分类模型构建

1.1 基于无人机倾斜摄影技术的三维建模

无人机倾斜摄影技术是一种新型的三维建模技术,它通过无人机搭载相机和传感器,拍摄地面、建筑物和树木等景物的倾斜照片,然后通过计算机三维重建技术对这些照片进行处理和分析,从而构建出真实的三维模型^[4]。在这个过程中,无人机倾斜摄影技术具有精度高、使用灵活和安全的特点,与传统的摄影方法相比,无人机倾斜摄影技术可以通过高度自动化和智能化的操作来实现高效、灵活、安全的三维建模^[5]。在三维建模时利用无人机倾斜摄影测量的流程为:航线设计、航路设计、空域申请、飞行作业、数据检测、数据处理和数据上报等。在利用无人机进行航拍之前,需要向有关部门进行申请、报备,无人机的飞行作业需要通过报备通过后才能进行^[6]。同时无人机飞行前还需要对测区的概况进行了解,然后再对测区的范围进行界定,选择合适的摄影机,再对摄影比例尺和航高进行确定,最后再对拍摄日期以及无人机起降的具体地点等做一个明确的判断。在做好前期研究及其他相关工作后,就需要进行航路及飞行操作的设计。按照三维建模的低空航拍要求,需要对无人机的拍摄参数进行重新设计和调整^[7]。这里主要参数是航高、像片重叠程度、传感器尺寸、感光元件、分辨率、帧率、焦距等,其中航高可用式(1)计算。

$$H = \frac{f \times GSD}{a} \quad (1)$$

式中, f 表示无人机镜头的焦距; GSD 表示地面采样距离(ground sampling distance, GSD); a 表示单像元尺寸。航线参数包括航路方向和航路长度,可用式(2)计算航路方向和航路的长度。

$$\begin{cases} B_x = L_x(1-p_x) \times \frac{H}{f} \\ D_x = L_y(1-q_y) \times \frac{H}{f} \end{cases} \quad (2)$$

式中, B_x 表示实摄长度; L_x 表示传感器的幅长值; p_x 表示无人机飞行重叠度; D_x 表示实际航线的距离; L_y 表示传感器的幅宽值; q_y 表示无人机飞行时的横向重叠度。

像片重叠度是指从一幅图像中获取的像点在图像中的分布情况。它是由图像的像素值和相邻像片中像素值的重叠度组成的。图像的像素值是指这幅图像中每个像

点在图像中的真实位置。通常情况下,一个像片上可能会有多个点需要获取,但是在一个像片中,最重要的点通常是这些点中最突出、最明显的一个。其次,相邻像片中像素值的重叠度是指相邻像片间像点对点之间的关系。每幅图像都有自己独特的颜色和纹理特征,这些特征使得相邻像片之间可以相互区分^[8,9]。一般来说,相邻像片之间的重叠度应该小于或等于1。而航向重叠度是指在无人机拍摄的相同航路上,两个相邻的图像之间所对应的地面图像之间所对应的相同区段。通常,无人机拍摄前后两张照片时,由于其拍摄的地点不同,因此拍摄的照片在同一平面上会出现重叠,而像片中的影像又不会完全相同。在此基础上,将无人机与图像之间的交叠区域与图像整体的长度进行比较,得到的这个比值被称作航向重叠度,而侧边交叠区域则是边线交叠区域的长度与图像整体长度的比值^[10-11]。其中航向重叠度可用式(3)计算。

$$p_x \% = \frac{L_x}{l_x} \times 100\% \quad (3)$$

式中, L_x 表示像片的长度; l_x 航向的重叠影像面积。旁向重叠度可用式(4)计算。

$$p_y \% = \frac{L_y}{l_y} \times 100\% \quad (4)$$

式中, L_y 表示像片的宽度; l_y 表示旁向重叠影像的面积。

无人机倾斜摄影三角测量是一种基于无人机技术的三维测量方法,可以用于获取地面点到无人机之间的三维坐标。无人机倾斜摄影的优点在于能够获取更多的地面信息,使三维重建更加准确,同时无人机倾斜摄影具有很高的空间分辨率和较强的自动化程度。完成拍摄后,可利用自动化处理和计算,从而为三维重建提供更准确的数据,其基本原理如图1。

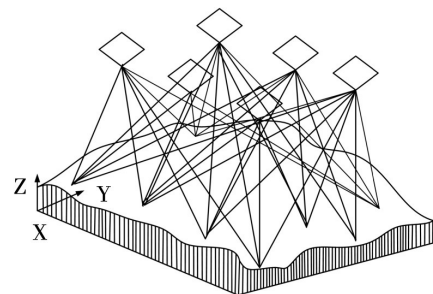


图1 三角光束的拍摄原理

1.2 基于无人机倾斜摄影技术的输电线路地物多光谱影像检测模型的优化

无人机倾斜摄影技术是一种新兴的遥感技术,它可以通过采集地面的倾斜影像来获取高空间分辨率的地物信息。由于其独特的优势,该技术已被广泛应用于土地利用、城市规划、环境监测等领域。在地物检测方面,无人机倾斜摄影技术也发挥了重要作用。无人机多光谱影

像是指通过无人机平台采集到的多光谱数据^[12-13]。这种数据通常包含更多的光谱信息和更高的空间分辨率,因为无人机平台上的传感器可以同时接收多种光谱信号,并将其转换为数字图像。无人机多光谱影像通常包括多个摄像头同时拍摄的图像,每个摄像头都有自己独特的传感器和成像参数^[14]。这些图像被发送到计算机系统中,通过对每个图像进行处理和分析,提取出其中的特征和信息。但无人机拍摄后存在高空间分辨率及高光谱分辨率给后期处理存在大量的数据冗余,这会增加计算的复杂程度,因此需要进行降维处理。

多光谱数据降维的目的是在保证多光谱图像质量的情况下,对多光谱数据进行处理,使其降至最低,以便更容易地进行后续分析和处理。研究采用的多光谱相机的参数包括分辨率、波动范围、光谱带宽、帧率、动态范围、传感器类型和接口。其中分辨率为2 MP (1 920 × 1 080),波段范围为近红外(700 nm-1 100 nm),光谱带宽为20 nm,帧率为60 fps,动态范围为80 dB,选用的传感器为互补金属氧化物半导体传感器。在降维的过程中,降维操作应满足最低的处理要求,同时还要满足原始数据的特征所能表现的最佳精度。数据降维的结果应满足选择出的波段信息量越大越好,波段间相关性越小越好,地物对所选定的波段组合有较大的光谱反应差异。目前,对多光谱数据进行降维的方法有两种,一种是不需要转换的波段选取,另一种是通过转换进行特征提取。在选取波段时,通常利用波段信息量比较法、波段间相关性比较法以及波段数据的熵值法。通常用每一幅像元的灰度标准偏差来表示光谱信息的数量。标准差反映了像素灰度分布的均匀性,均匀性表明像素的信息越多、越丰富;反之亦然,数值越小表示灰度值与平均值差越小,所反映的图像信息也就越小,这里的标准差可用式(5)进行计算。

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n (X_p - \bar{X}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, p 表示图像中第 p 图像的像元; X_p 表示 p 图像的像元的灰度; \bar{X}_i 表示图像波段中 i 灰度的平均值。通常波段之间的冗余度可以用它们之间的相关系数来衡量。相关系数反映了像元灰度在不同波段之间的交叠程度,较大的交叠程度表明像元灰度在不同波段之间的交叠程度较高,且存在较多的冗余信息;反之亦然,当图像在不同波段之间的灰度值较低时,图像中的多余信息较少。比较方法中利用的性系数计算如式(6)。

$$R_{ij} = \frac{\sum_{p=1}^n (X_{ip} - \bar{X}_i)(X_{jp} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{p=1}^n (X_{ip} - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n (X_{jp} - \bar{X}_j)^2}} \quad (6)$$

式中, \bar{X}_i 表示像素 j 的灰度平均值; X_{ip} 表示像素波段中波

段 i 的第 p 像元灰度值; X_{jp} 表示像素波段中波段 j 的第 p 像元灰度值。图像熵值是用每一个像素内的比特数量来代表图像所包含的信息量的一种统计方法,图像的熵值计算可用式(7)表示。

$$E = \sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i \quad (7)$$

式中, P_i 表示 i 像素数与总像素数的比值。

研究充分利用了低空无人机遥感的特性,对图像的光谱特征信息和纹理特征信息进行了提取,并对最佳波段指数进行了综合,对原始波段的有效波段组合进行了选择,最终将这三种信息进行了整合,并对最佳波段组合进行了选择,过程如图2所示。

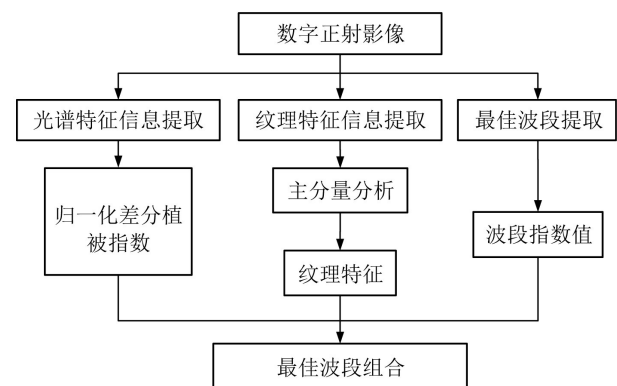


图2 无人机倾斜摄影技术的地物多光谱影像最佳波段的选择流程

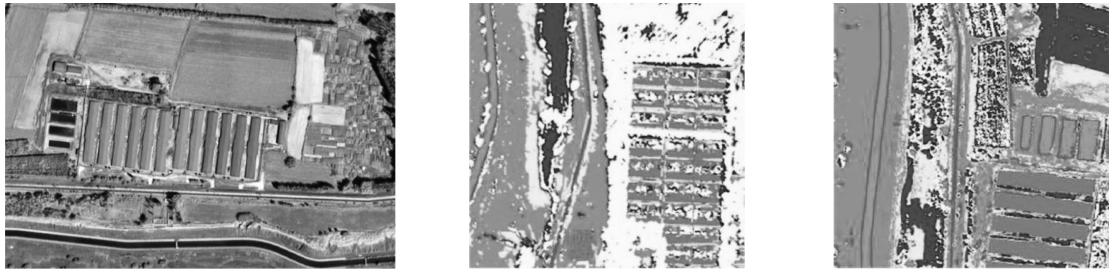
2 基于无人机倾斜摄影技术的地物多光谱影像检测模型性能分析

2.1 基于无人机倾斜摄影技术的三维建模性能分析

为了验证无人机倾斜摄影技术构建的三维模型的性能,研究将拍摄到的原始图片作为数据参考,原始图片如图3所示。

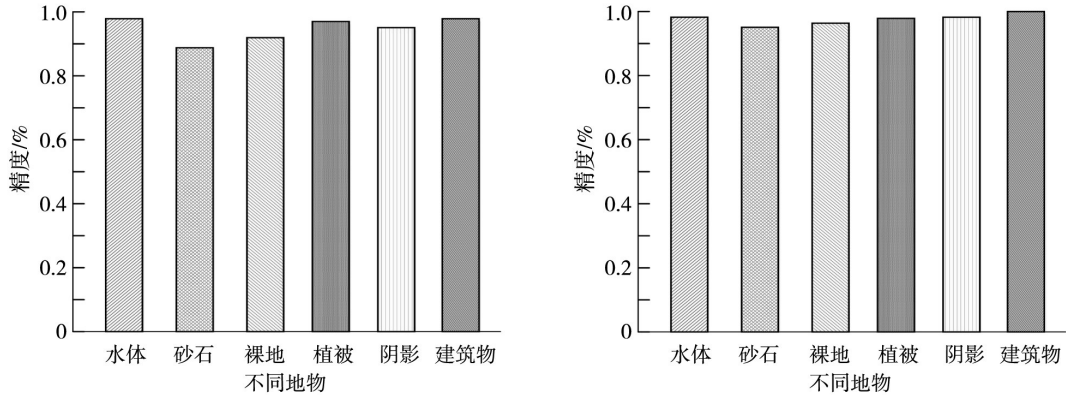
研究在SVM和LSSVM两种函数下进行仿真实验。图4表示模型在两种函数中对不同地物探测的精度。

由图4(a)可知,模型在SVM函数下对不同地物的探测精度不相同,其中水体、砂石、裸地、植被、阴影和建筑物的探测精度分别为98.61%、88.15%、91.06%、95.98%、93.54%和99.03%,这说明模型对建筑物的探测精度最高,对砂石的探测精度最低。由图4(b)可知,模型在LSSVM函数下,水体、砂石、裸地、植被、阴影和建筑物的探测精度分别为99.01%、94.25%、95.66%、96.17%、97.31%和99.83%,其中探测精度最高的也是建筑物,且与SVM函数相比,LSSVM函数下的探测精度更高。由此可以验证无人机倾斜摄影技术构建的三维模型具有较高的探测精度。为了验证无人机倾斜摄影技术构建的三维模型的稳



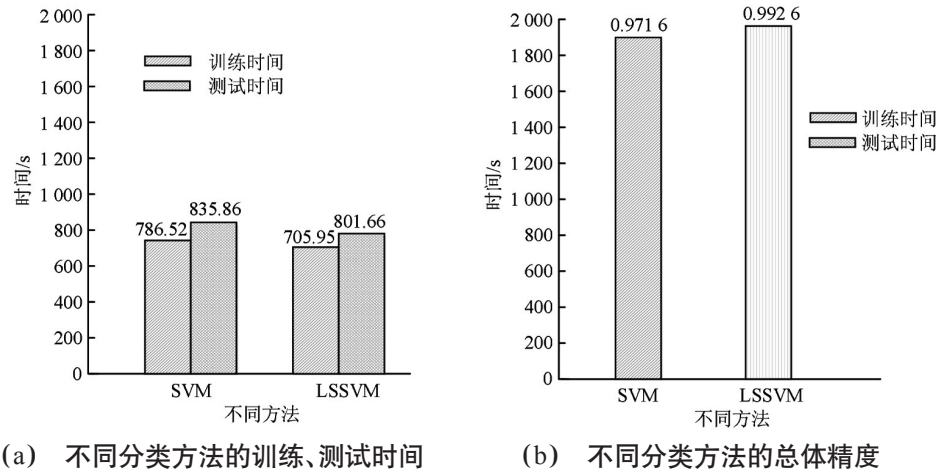
(a) 俯视角原始影像 (b) 左前方倾斜视角影像 (c) 右前方倾斜视角影像

图3 基于无人机倾斜摄影技术的地物多光谱原始图像



(a) 模型在SVM下的精度 (b) 模型在LSSVM下的精度

图4 两种函数对不同地物探测精度对比



(a) 不同分类方法的训练、测试时间 (b) 不同分类方法的总体精度

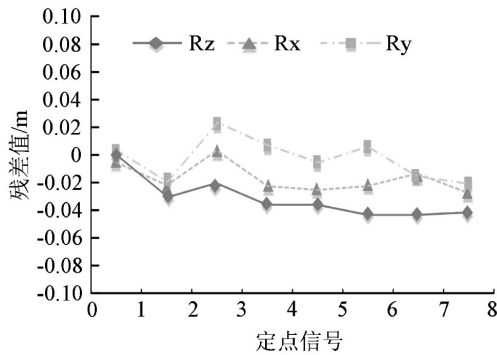
图5 不同分类的消耗时间和总体精度对比

定性,研究通过统计训练时间、测试时间和总体精度去判断,结果图如图5所示。

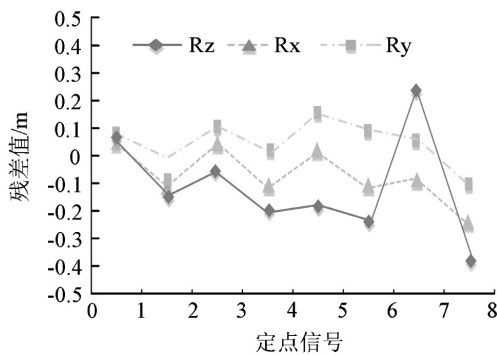
由图5(a)可知,在两种函数训练下,SVM和LSSVM的训练时间分别为786.52s和705.95s;SVM和LSSVM的测试时间分别为835.86s和801.66s。这说明在LSSVM函数训练下,模型能够用更短的时间完成拍摄任务。由图5(b)可知,两种函数的总体精度也存在差异,其中SVM的总体精度为97.16%,而LSSVM的总体精度为99.26%,两者的总体精度相差2.1%。这说明在LSSVM函数下无人机倾斜摄影技术构建的三维模型的稳定性更高。

2.2 基于无人机倾斜摄影技术的多光谱影像检测模型性能分析

为了验证无人机倾斜摄影的输电线路环水保地物多光谱影像检测模型的性能,研究对模型分别选取了两个地物进行仿真实验,然后统计它们的残差和检查点误差进行分析和统计。残差是指其相应的相控点像点坐标与现场测量控制测量坐标值之间的差值。检验点误差是指在现场实测的连接点与检测点坐标之间的差分,又称检测点误差。图6表示A位置的定点信号残值分布图。



(a) A点定向点残值分布图



(b) A检查点残值分布图

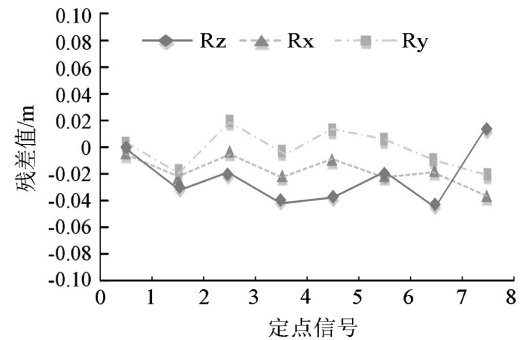
图6 A位置的定点信号残值分布对比

由图6(a)可知,经过计算得到A位置定向点平面中误差0.03 m,高程中误差0.04 m。1:300的定向点中误差最大限差为0.15 m,变形观测点高程中误差的最大限差为0.12 m。由图6(b)可知,通过数据分析和计算得知A位置三维模型定向点误差为0.01 m,变形观测点高程中误差为0.02 m。1:300的定向点中误差最大限差为0.12 m,变形观测点高程中误差的最大限差为0.1 m。这说明模型得到的结果都符合测量精度的要求。图7表示B位置的定点信号残值分布图。

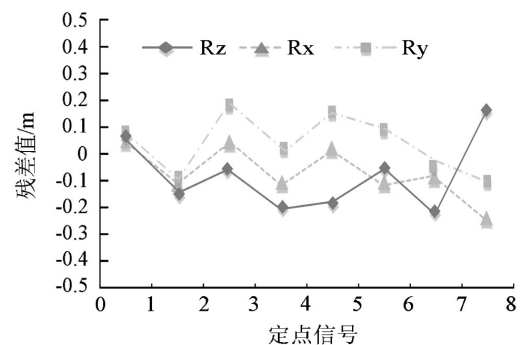
由图7(a)可知,经过计算得到B位置的定向点平面中误差为0.03 m,高程中误差为0.12 m。1:300的定向点中误差最大限差为0.17 m,变形观测点高程中误差的最大限差为0.28 m。由图7(b)可知,通过数据分析和计算得知B位置三维模型定向点误差为0.09 m,变形观测点高程中误差0.12 m。1:300定向点中误差最大限差为0.16 m,变形观测点高程中误差最大限差为0.15 m。这说明模型得到的结果都符合测量精度的要求。为了验证最佳波段组合的性能,研究将原始波段与最佳波段进行对比,将作为两种波段的误差率和运行时间作为对比指标,结果如图8所示。

由图8(a)可知,随着运行次数的增加,组合波段的误差率平均值为4.92%,原始波段的误差率平均值为12.43%,组合波段的误差率平均值比原始波段的低7.51%。由图8(b)可知,组合波段的平均运行时间为35.72 s,原始波段的平

均运行时间为51.37 s,组合波段的平均运算时间比原始波段低15.65 s。这说明最佳波段组合在运行时间和误差率上均有明显的提升。

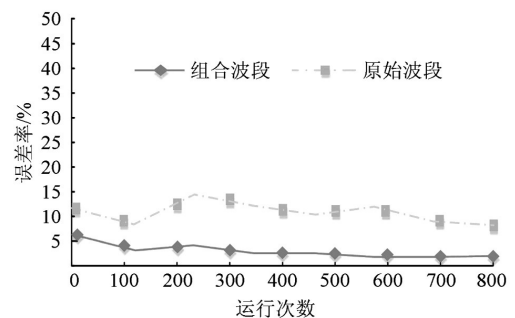


(a) B点定向点残值分布图

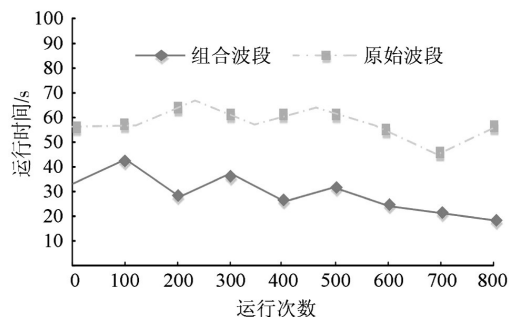


(b) B检查点残值分布图

图7 B位置的定点信号残值分布对比



(a) 不同波段误差率



(b) 不同波段的运行时间

图8 两种波段的误差率和运行时间对比

(下转第163页)