

基于激光点云的隧道形变分析方法

张立朔, 程效军

同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要 随着激光扫描技术精度和效率的提高,可获得高精度点云的地面三维激光扫描技术已被广泛应用于地铁隧道变形监测、结构构建等领域。但在测量的隧道数据中,有很多来自隧道上的附着物的数据须要剔除,以便对隧道进行变形分析。基于三维激光扫描数据,以运营中的地铁隧道为研究对象,提出了一种断面分析方法。针对数据中存在的大量粗差,提出了以残差 1 范最小为平差准则的椭圆拟合方法,利用自适应的阈值剔除粗差。采用分段圆弧代替整体椭圆进行断面分析。对提取的断面进行了形变分析,实验结果表明,该方法能够剔除数据中的粗差,采用分段圆弧分析能准确反映隧道的形变。

关键词 测量; 摄影测量与遥感; 隧道变形分析; 1 范最小; 自适应阈值; 激光点云

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0404004

Tunnel Deformation Analysis Based on Lidar Points

Zhang Lishuo, Cheng Xiaojun

College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract With the improvement of the accuracy and efficiency of laser scanning technology, three-dimensional (3D) terrestrial laser scanning (TLS) technology, which can obtain high precise points-cloud, has been applied in the field of deformation monitoring of subway tunnels, structures building and other fields. However, the data contains many outliers, which are produced by pipe and bolt holes and should be removed for deformation analysis. Based on the 3D TLS technology, taking the subway tunnel in operation as the research object, we propose a new cross section analytical method. We use an ellipse fitting method based on 1-norm minimum residual algorithm to deal with the points which are not on the tunnel cross section. An adaptive threshold selection method is introduced to filter the points which are not on the tunnel cross section. Circular arcs model, instead of overall oval model, is adopted to analyze the deformation of subway tunnel. Deformation analysis of the extraction cross section is tested. The results indicate that this method can eliminate gross errors in the data and the cross section method using circular arcs model can more accurately reflect the tunnel deformation.

Key words measurements; photogrammetry and remote sensing; tunnel deformation analysis; 1-norm minimum; adaptive threshold; lidar points

OCIS codes 120.1880; 280.3640; 110.6880; 110.3000

1 引 言

上海市轨道交通线路为地面、高架和地下结构,其中地下结构分为开挖施工的矩形结构和盾构法施工的圆隧道管片拼装结构。其中交通圆隧道由宽度为 1.2 m 的圆环通过纵向固定螺栓连接而成,各圆

环由 5 块管片通过横向固定螺栓固定拼装而成。若隧道发生变形,由于管片的刚度较大,圆隧道结构的变形首先表现为管片拼装缝处的拉张和挤压,导致管片两端的碎裂和止水带失效,引起的后果将不堪设想。因此,对圆隧道结构进行变形监测是十分必要的。近年来,随着我国城市地铁工程建设规模的

收稿日期: 2017-08-14; 收到修改稿日期: 2017-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)

作者简介: 张立朔(1991—),男,博士研究生,主要从事摄影测量与遥感方面的研究。E-mail: 1240730246@qq.com

导师简介: 程效军(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事摄影测量与遥感方面的研究。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

扩大,利用三维激光扫描仪进行地铁隧道变形监测已成为当前研究的热点。许多学者将三维激光扫描仪应用于地铁隧道变形监测领域,并取得了一些成果。Lindenbergh 等^[1]利用地面激光对长约 100 m 的隧道进行了变形监测实验,利用点云分割方法提取合适的点进行变形监测,提高了变形监测精度。van Gosliga 等^[2]对一条圆柱形隧道进行变形监测,首先使用拟合算法拟合出圆柱模型,然后利用统计测试方法对隧道变形监测数据进行统计分析。谢雄耀等^[3]利用隧道点云进行三维建模,使隧道变形可视化。李理等^[4]利用最小二乘算法拟合椭圆,然后利用拟合的椭圆进行极坐标分析,获得隧道变形情况。Walton 等^[5]也是利用最小二乘算法拟合椭圆,然后分别利用断面数据和拟合的椭圆进行分析。李健等^[6]运用基于向量差异的点云分割算法对点云数据进行抽稀,使用抽稀后的点云数据构建地铁隧道模型,对隧道进行整体变形分析。刘燕萍等^[7]对点云数据进行切片,利用最小二乘算法获得切片的圆心和半径,分析隧道的收敛变化。王令文等^[8]以隧道设计中轴线为基准提取隧道横断面,结合扫描仪获得的影像数据进行断面收敛、渗水、裂缝等分析。Tan 等^[9]利用三维激光扫描数据的几何信息和强度信息实现管壁附着物的剔除。李家平^[10]采用分段圆弧拟合法提取断面水平弦长来分析隧道断面变形,证明分段圆弧拟合法更适用于隧道断面检测。陈茂霖等^[11]提出了一种基于几何信息的点云自动拼接方法来实现点云的自动拼接。蔡越等^[12]分析了影响地面三维激光扫描点云精度的因素。现有文献多利用最小二乘算法拟合椭圆,而最小二乘算法不具有抗差性。比较实测点至拟合圆心的距离与理论半径,把距离大于设定阈值的观测点作为粗差进行剔除,该方法受限于阈值的选择,存在剔除过多或过少等情况。整体按椭圆拟合的方法欠严密,大量观测数据表明,每个管片变形均可按弧段去拟合,变形多在相邻管片的拼接处集中体现,断面按多个弧段顺接的方式分析更合理。

本文提出了以残差 1 范最小为平差准则的椭圆拟合方法和一种自适应的粗差剔除阈值选择方法。采用分段圆弧代替整体椭圆进行断面分析,从而得到该时期内隧道管片的变化情况。

2 断面分析

对不同监测时期提取的断面轮廓线进行椭圆拟合,然后滤除非隧道断面点,并采用分段圆弧进行断

面变形分析。

2.1 椭圆拟合

实际扫描作业中,由于障碍物遮挡或受隧道空间扫描角度的限制,会出现部分非隧道管片的点云数据。利用 1 范最小来拟合椭圆,然后利用椭圆模型剔除非隧道管片点云。对隧道断面进行椭圆拟合,采用间接平差的方法求取各点的拟合误差和标准差。平差计算中的观测值为椭圆上各点坐标 (x_i, y_i) $(i=1, 2, 3, \dots, m)$,参数为椭圆中心坐标 (x, y) 以及椭圆长短半轴 a, b ,根据平面椭圆方程建立间接平差的函数模型:

$$\frac{(x_i - x)^2}{a^2} + \frac{(y_i - y)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

由此可得误差方程:

$$v_i = \frac{(x_i - x)^2}{a^2} + \frac{(y_i - y)^2}{b^2} - 1, \quad (2)$$

将(2)式线性化,可得

$$v_i = b_{i1} \Delta x + b_{i2} \Delta y + b_{i3} \Delta a + b_{i4} \Delta b - l_i, \quad (3)$$

式中, $b_{i1} = \frac{2(x_i - x_0)}{a_0^2}$, $b_{i2} = \frac{2(y_i - y_0)}{b_0^2}$, $b_{i3} = \frac{2(x_i - x_0)^2}{a_0^3}$, $b_{i4} = \frac{2(y_i - y_0)^2}{b_0^3}$, $l_i = 1 - \frac{(x_i - x_0)^2}{a_0^2} + \frac{(y_i - y_0)^2}{b_0^2}$, $i=1, 2, 3, \dots, n$, $\Delta x, \Delta y, \Delta a, \Delta b$ 为椭圆中心坐标和长短半轴改正值, x_0, y_0, a_0, b_0 为椭圆中心坐标和长短半轴初值。

将(3)式转换为矩阵形式:

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{n4} \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_n]^T$ 。

依据残差的 1 范数最小,即 $\min(\sum |\mathbf{v}|)$, 求出 $\hat{\mathbf{X}}$, 并将 $\hat{\mathbf{X}}$ 代入(4)式,求得各点拟合椭圆的残差 \mathbf{v} 。

使用交替方向乘子 (ADMM) 法来获得满足残差 1 范数最小的椭圆参数估计值,具体迭代过程^[13]如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^{k+1} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T (\mathbf{L} + \mathbf{z}^k - \mathbf{u}^k) \\ \mathbf{z}^{k+1} = S(1/\rho, a) (\mathbf{B}\mathbf{X}^{k+1} - \mathbf{L} + \mathbf{u}^k), \\ \mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k + \mathbf{B}\mathbf{X}^{k+1} - \mathbf{z}^{k+1} - \mathbf{L} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $S(k, a) = \begin{cases} a - \kappa, & a > \kappa \\ 0, & |a| \leq \kappa, \rho \text{ 为经验值。} \\ a + \kappa, & a < -\kappa \end{cases}$

2.2 阈值的选择

参考文献均采用最小二乘拟合椭圆柱或者椭圆的方法进行粗差剔除。根据最小二乘计算的中误差,采用2倍或者3倍中误差的方法剔除误差。这种方法依托统计经验,假设数据服从高斯分布,但是实际情况中,原始点云中有很多不属于隧道断面上的点,如盾构环片上的连接螺栓孔螺帽、注浆孔、电缆、照明设备等附着物。这些非隧道点的存在,使得利用2倍或3倍中误差作阈值的方法不合理。大量实验表明,运用1范最小作为平差准则后获得的残差绝对值,从小到大排列成折角型,前面的大部分数据上升平缓,后面上升比较快,如图1所示。图1中横坐标表示序号,纵坐标表示残差绝对值或者距离。选择数据开始剧烈上升的位置作为阈值,因此提出的自适应阈值选择方法如下。

- 1) 保留残差小于0.09 m的点,把这些残差按绝对值从小到大排列,以点序号为横坐标、残差绝对值为纵坐标,形成一个顺序点集(图1中黑色点);
- 2) 连接首尾两个端点构成一个线段,分别计算其余点到该线段的距离(图1中红色点);
- 3) 选择距离最大的点,则该点的纵坐标即为选择的阈值。

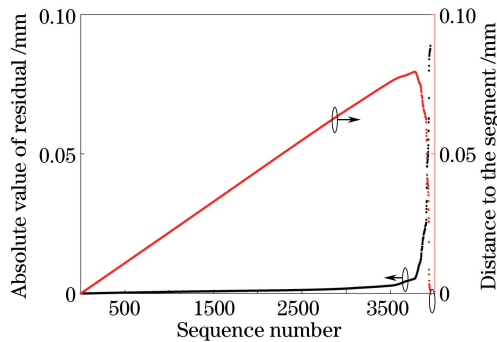


图1 残差绝对值和对应距离

Fig. 1 Absolute values of residual and the corresponding distance

2.3 分段圆弧分析

在利用测量数据构建隧道模型时,常拟合为圆或者椭圆模型来描述断面的形状。但是在实际测量中发现,无论是利用圆还是椭圆,描述隧道断面形状都不够准确。由于每个拼装环片都是整块灌注,发生形变的可能较小,而变形大多发生在拼装的接缝位置。因此,将隧道圆的各个拼装环片单独按照一个圆弧来拟合,然后利用圆心、半径、起始终止角度来对拟合后的各个圆弧的空间位置和相互关系进行描述。这种办法不仅更为接近真实情况,还可以提

供更为丰富的结果。如图2所示,隧道由5个环片拼装而成,环片1、2、4、5对应的圆心角为65°,环片3对应的圆心角为16°。

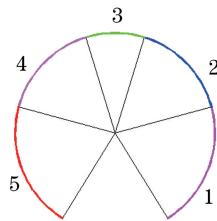


图2 隧道拼装环片

Fig. 2 Tunnel segment

对剔除非隧道点后的断面数据按照图2的环片设计值进行拟合,单个环片结构变形较小,因此可以看成是一段圆弧,对1、2、3、4、5段圆弧分别进行拟合,得到5个圆弧的圆心 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_5, Y_5)$ 。考虑到天顶上海鸥块较短、数据点少、权重较小,最后使用1、2、4、5弧段的圆心的重心作为该断面的中心 $C(x_0, y_0)$,其中 $x_0 = \frac{\sum x_i}{4}, y_0 = \frac{\sum y_i}{4}$ 。该断面上一点到隧道拟合中心 $C(x_0, y_0)$ 的距离 D 可以写为

$$D = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2}, \quad (5)$$

变形量 d 可以写为

$$d = D - R. \quad (6)$$

对于上海地铁隧道, $R = 2.75$ m, d 为正,偏向圆外,表示伸张; d 为负,偏向圆内,表示压缩。

3 实验及分析

选择上海市地铁10号线虹桥二号航站楼到龙溪路区间某段隧道作为实验研究区,该区域位于繁忙的主干道上,地面上高层建筑物林立,地下管网稠密,容易发生隧道变形。实验使用三维激光扫描仪(FARO Focus^{3D} X330型)对隧道进行扫描,最大扫描距离为330 m,垂直/水平步长为0.009°,激光发射频率为48.8万 s^{-1} 。

3.1 椭圆拟合实验

从原始扫描数据提取的断面如图3所示,红色表示一些粗差点(非隧道点)。从实验数据中可以看到,非隧道点较多。分别用最小二乘、随机采样一致性椭圆拟合(RANSAC)算法和1范最小进行椭圆拟合,结果如图4所示。图4中,用1范最小拟合的椭圆用红色表示,最小二乘拟合的椭圆用蓝色表示,RANSAC方法拟合的椭圆用绿色表示。通过对比

可以看出,用1范最小拟合出的椭圆能够更好地吻合隧道断面轮廓,而最小二乘和RANSAC方法拟合的隧道断面椭圆在非隧道点较多的地方出现了偏离,表示非隧道点的存在引起了拟合偏差。

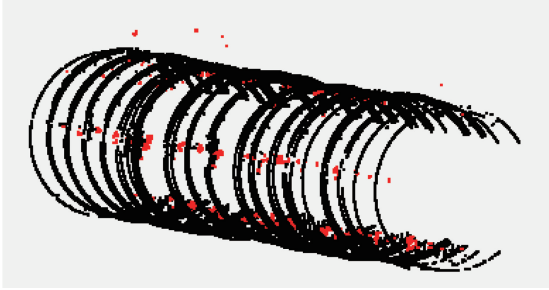


图3 隧道断面
Fig. 3 Tunnel cross sections

3.2 粗差别除实验

在实验中,首先排除较大的粗差(残差大于0.1 m),然后计算最小二乘椭圆拟合中误差 σ ,设定阈值进行去噪。实验中选择阈值分别是 $\sigma, 2\sigma, 3\sigma$,本文方法计算的阈值为 t 。实验结果如图5所示,图5(b)为本文方法的结果,图5(c)、图5(d)、图5(e)为最小二乘椭圆拟合并根据中误差 σ 剔除非隧道点的结果。从图5可以看出,当阈值选择 σ 时,隧道整体点云分布不均匀,存在非噪声点被去除情况,出现点云缺失;当阈值选择 2σ 或 3σ 时,隧道点云中仍有大量螺栓孔和电缆等混杂点存在;而利用本文方法进行非隧道点滤除,隧道点云均匀分布,螺栓孔、电缆等冗余点和混杂点均被删除,去噪效果较好。

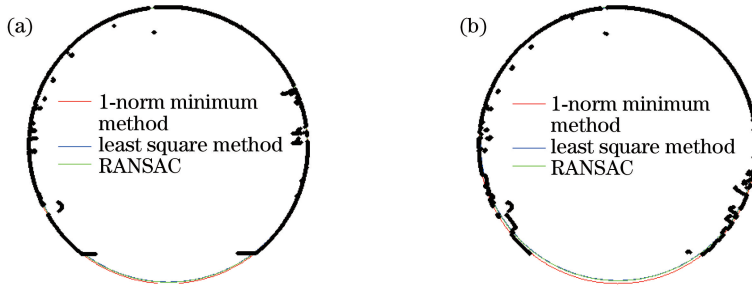


图4 断面椭圆拟合比较。(a)断面1;(b)断面2
Fig. 4 Ellipse fitting of (a) cross section 1 and (b) cross section 2

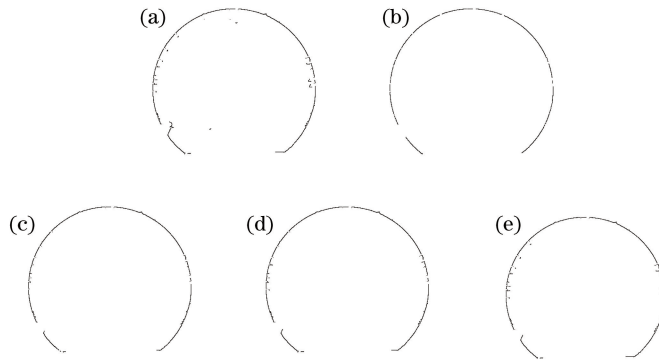


图5 非隧道点滤除结果($t=0.0074\text{ m}, \sigma=0.0212\text{ m}$)。(a)原始断面(7730点);(b)本文方法结果(6497点);(c) σ 滤除结果(6924点);(d) 2σ 滤除结果(7179点);(e) 3σ 滤除结果(7365点)

Fig. 5 Data filtering ($t=0.0074\text{ m}, \sigma=0.0212\text{ m}$). (a) Original scanning data (7730 points); (b) filtering data (6497 points) with adaptive threshold t ; (c) filtering data (6924 points) with σ ; (d) filtering data (7179 points) with 2σ ; (e) filtering data (7365 points) with 3σ

3.3 变形分析

利用椭圆拟合获得的椭圆中心和分段圆弧拟合得到的中心进行隧道断面变形分析。图6为隧道断面的变形情况,其中图6(a)为利用椭圆拟合得到的椭圆中心,图6(b)为利用本文方法获得的中心。从图6可以看出,两种方法都可以反映隧道断面的变

形情况,由于地面建筑物对隧道顶部的压力要远远大于两侧受到的压力,隧道竖直方向上的变形程度大于水平方向的变形程度,隧道上部和下部内缩,两侧伸张,整个隧道断面呈扁平状椭圆。比较图6(a)、(b)可以看出,环片拼装部位变形较大,因此利用分段圆弧分析更接近真实情况。

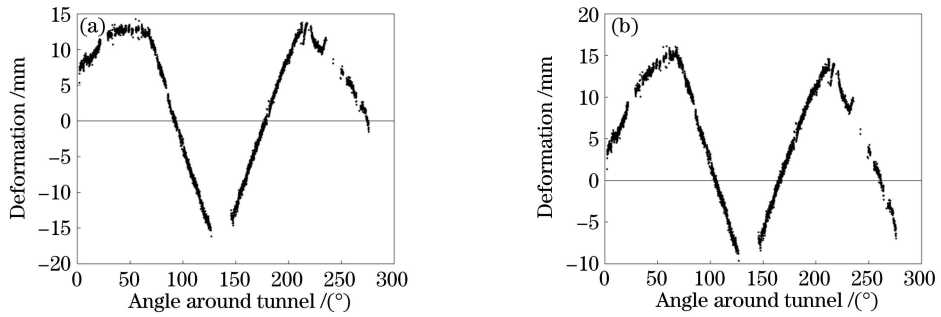


图 6 隧道断面变形情况。(a)椭圆断面分析；(b)分段圆弧中心断面分析

Fig. 6 Deformation of tunnel section. (a) Elliptical cross section analysis; (b) circular arcs cross section analysis

4 结 论

提出了基于激光点云的隧道断面形变分析方法。对实验研究区采集的扫描断面数据进行基于 1 范最小的椭圆拟合,利用基于自适应的阈值选择方法滤除非隧道点,通过分段圆弧拟合得到断面的中心点,计算断面点到中心点的距离并与设计值作比较,最终得到了隧道断面的形变情况。实验验证了利用 1 范最小作为平差准则来拟合椭圆可以有效减小粗差。分析拟合残差的特点来选择阈值能够有效地剔除非隧道点。根据隧道管片的设计拼装和受力情况,利用每段管片圆弧的中心得到断面中心,并以此计算每个位置上的变形,这种方法更符合实际情况。

参 考 文 献

[1] Lindenbergh R, Pfeifer N, Rabbani T. Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring [C] // Proceedings of ISPRS Workshop, Laser scanning, 2005, 36: 3.

[2] van Gosliga R, Lindenbergh R, Pfeifer N. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning [C]. IASPRS, 2006 (XXXVI): 167-172.

[3] Xie X Y, Lu X Z, Tian H Y, *et al.* Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214-2224.
 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.

[4] Li C, Lu X P, Zhu N N, *et al.* Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(9): 1056-1062.

李理, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1056-1062.

[5] Walton G, Delaloye D, Diederichs M S. Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2014, 43(7): 336-349.

[6] Li J, Wan Y C, Jiang M H, *et al.* Tunnel deformation monitoring based on the terrestrial laser scanning [J]. Geospatial Information, 2012, 10(1): 14-17.
 李健, 万幼川, 江梦华, 等. 基于地面激光技术的隧道变形监测技术 [J]. 地理空间信息, 2012, 10(1): 14-17.

[7] Liu Y P, Cheng X J, Jia D F. Tunnel convergence analysis based on 3D laser scanning [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(3): 74-77.
 刘燕萍, 程效军, 贾东峰. 基于三维激光扫描的隧道收敛分析 [J]. 工程勘察, 2013, 41(3): 74-77.

[8] Wang L W, Cheng X J, Wan C H. Study on the 3D laser scanning technology for tunnel inspection [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(7): 53-57.
 王令文, 程效军, 万程辉. 基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究 [J]. 工程勘察, 2013, 41(7): 53-57.

[9] Tan K, Cheng X J, Ju Q Q. Combining mobile terrestrial laser scanning geometric and radiometric data to eliminate accessories in circular metro tunnels [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(3): 030503.

[10] Li J P. Horizontal chord length testing of single circle shield tunnel based on point clouds [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resource & Electric Power, 2015, 27(4): 53-59.
 李家平. 基于点云数据的单圆盾构隧道水平弦长检测 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2015, 27(4): 53-

59.

- [11] Chen M L, Lu W X, Wan Y C, *et al.* Automatic registration of terrestrial point clouds without additional information[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0414003.
陈茂霖, 卢维欣, 万幼川, 等. 无附加信息的地面激光点云自动拼接方法[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0414003.
- [12] Cai Y, Xu W B, Liang D, *et al.* Impacts of different factors on accuracy of point cloud obtained from terrestrial three-dimensional laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 092801.
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 不同因素对地面三维激光扫描点云精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092801.
- [13] Boyd S, Parikh N, Chu E, *et al.* Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations & Trends © in Machine Learning, 2011, 3(1): 1-122.