2019 年 8 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)04-0703-06

激光雷达在电力巡线应用中的计算方法

韩晓言¹,何静²,游安清²

(1.国家电网 四川省电力公司,四川 成都 610041; 2.中国工程物理研究院 应用电子学研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:针对激光雷达在电力巡线中的深度应用,通过数学建模,对基于三维激光点云的输电杆塔倾斜、电力线弧垂、多电力线交叉跨越、电力线周围净空排查等巡线作业重点关注的参数 建立计算方法,克服了激光雷达常规内业数据处理中过份依赖专用商业软件的问题。用实际激光 点云数据进测试,效果良好,进一步提升了激光雷达在电力巡线中的优势和效能。

关键词:激光雷达;电力巡线;三维点云

中图分类号: TP301.6 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201904.0703

Algorithms in Lidar patrolling electric power transmission lines

HAN Xiaoyan¹, HE Jing², YOU Anqing²

(1.Sichuan Electric Power Company, State Grid, Chengdu Sichuan 610041, China;2.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For deep application of Lidar to patrolling electric power transmission lines, mathematical models are set up to calculate some important parameters in the task, including inclination of electric power transmission towers, bending of power lines, distance between crossing lines, safe space check around lines and so on. The problem that internal data process of Lidar system heavily depends on special commercial software is solved to some extent. All the models are tested with practically measured 3D Lidar point cloud and their fitness is proved, which helps to promote the advantages and effectiveness of Lidar in patrolling power lines.

Keywords: Lidar; power lines patrol; 3D point cloud

激光雷达是快速获取大幅面景物数据的有效手段,在电力巡线业务中有高效、非接触测量等独特优势。文献[1-2]介绍了激光雷达电力巡线的原理与数据处理方法,以及在相关 500 kV 电力线路勘测中的应用情况;文献[3]分析了电力巡线中机载激光点云数据处理的关键技术和难点。这些文献着重于介绍用商业软件进行数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字正射影像模型(Digital Orthophoto Map, DOM)、断面图制作的一般方法,但对激光雷达在电力巡线中的深层应用^[4-9],如计算输电杆塔的倾斜、输电线的弧垂、多线交叉跨越、线路净空排查等,很少有深入研究。Terrasolid 等专用商业软件中有一些功能能完成类似任务,但需要大量的人工交互,效率不高,而且作为独立软件,它们无法集成到具体项目的用户应用软件中去。鉴于此,本文从数学和物理层面对激光雷达中的电线点云特征参数的计算方法进行比较深入的研究,以作为用户软件设计的依据。

1 激光雷达巡线系统

激光雷达巡线系统一般由 6 部分组成:飞行平台、激光扫描仪、惯性导航系统、航拍相机、系统控制器、 数据处理软件,如图 1 所示。激光扫描仪获取地面点相对扫描仪中心的距离和方向角,其工作参数包括:波长 905 nm,测距范围 200 m,精确度 20 mm,测量速度 10 kHz,光束发散角 2.7 mrad;旋转棱镜式扫描,扫描角 ±40°,扫描速率 5~60 线/秒。惯导系统获取飞行平台在空间的位置和姿态;航拍相机获取地面的二维影像图; 数据解释软件对激光扫描拍照得到的数据进行融合、解算和解释,获得激光点云在三维空间的坐标,并对景物 进行分离和分类,然后作深层计算和分析,如杆塔倾斜、电线弧垂、线周净空排查、违章建筑检测等。

收稿日期: 2017-07-08; 修回日期: 2018-01-29 *通信作者: 游安清 email:anqingyou@163.com

2 输电线杆塔倾斜计算

输电杆塔的倾斜量是考察杆塔状况的一个重要参数, 定义为杆塔中轴线与地面重力垂线的夹角。激光雷达直接 获得杆塔的点云数据,即杆塔上许多离散点的三维坐标。 要计算杆塔的倾斜量,首先要对杆塔的点云进行三维空间 直线拟合,得到杆塔的主轴线矢量,再求该矢量与地面垂 线 的 夹 角 。 为 此 , 记 一 个 杆 塔 的 点 云 为 {*P_i*(*x_i*,*y_i*,*z_i*)(*i* = 1,2,…,*N*)}(*N* 为一个杆塔上的点数)。假设 杆塔是前后、左右对称体,其主轴直线方程可表示为:



$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}$$
(1)

式中: (*x*₀, *y*₀, *z*₀)为直线上的任意一点; (*l*,*m*,*n*)为直线的方向矢量。直线拟合的目的就是确定这 6 个量。为此, 在式(1)中用 *z* 表达 *x*,*y*, 得:

$$\begin{cases} x = \frac{l}{n}(z - z_0) + x_0 = Az + B\\ y = \frac{m}{n}(z - z_0) + y_0 = Cz + D \end{cases}$$
(2)

式中: A = l/n; $B = x_0 - Az_0$; C = m/n; $D = y_0 - Cz_0$ 。于是三维空间中的直线拟合就变成了 2 个二维平面的拟合, 然后再求交线。根据最小二乘法, 可得式(1)~(2)的拟合系数 A, C:

(3)

$$\begin{cases} A = \frac{n \sum_{i=1}^{n} z_i x_i - \sum_{i=1}^{n} z_i \sum_{i=1}^{n} x_i}{n \sum_{i=1}^{n} z_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} z_i)^2} \\ C = \frac{n \sum_{i=1}^{n} z_i y_i - \sum_{i=1}^{n} z_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n \sum_{i=1}^{n} z_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} z_i)^2} \end{cases}$$

于是,杆塔主轴直线的方向矢量可表示为(A,C,1),此 矢量与竖直向上线(即 z 轴正向)的夹角为:

$$\gamma = \tan^{-1}(\sqrt{A^2 + C^2/1})$$



Fig.2 Point cloud of power lines and towers 图 2 输电线与杆塔点云

此角度即为杆塔的倾角。图 2 为激光雷达对某输电线路进行实际巡线测绘得到的激光点云,包括 10 个杆塔。按上述数学模型计算,得到这些杆塔的倾角如表 1 所示。由表 1 可见,多数杆塔的倾斜量很小,最大不超过 3°。

(4)

Table1 Inclination of towers										
number of tower	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
inclination $\gamma/(^{\circ})$	1.98	1.09	2.97	0.95	1.29	0.60	1.87	0.60	2.69	1.75

3 输电线弧垂计算

输电线弧垂是输电线形状的一个重要描述参数。要计算弧垂,必须先确定输电线的形状曲线。在无风条件下,输电线只受自身重力和杆塔的搭挂拉力作用,此时,输电线会在竖直面内形成一条悬链线。悬链线在数学上可以用双曲余弦函数表示:

$$z = M \cosh \frac{X}{M} + N = \frac{M}{2} \left(e^{\frac{X}{M}} + e^{-\frac{X}{M}} \right) + N$$
(5)

式中: *M*,*N* 为悬链系数; *z* 与激光点云的原始坐标 *P*(*x*,*y*,*z*)中的 *z* 含义相同,值相等; *X* 为原始坐标绕 *z* 轴逆时 针旋转 θ 角后,各点在悬垂面内的横坐标:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$
(6)

式中 θ 为输电线在水平面内投影直线与原 x 轴正向的夹角,可通过在水平面内对输电线进行 Hough 变换拟合得 到。经此变换后,输电线上各点新的纵坐标变成常数,即 $Y=C_0$, C_0 为坐标原点到投影直线的距离。

式(5)的双曲余弦函数为指数函数,计算很不方便,考虑用抛物线进行近似。为此,先考察抛物线与双曲余 弦函数的差别。抛物线方程一般式为:

$$z = aX^2 + bX + c \tag{7}$$

设 2 种曲线都过 3 点: (-r,0),(r,0),(0,s),即都是关于 z 轴对称、交 X 轴于 ±r 处、交 z 轴于 s 处、开口向上的凹弧。将 3 点坐标代入式(7)得:

$$0 = ar^{2} + br + c$$

$$0 = ar^{2} - br + c$$

$$s = a \cdot 0^{2} + b \cdot 0 + c$$
(8)

可以解得: *a* = -*s*/*r*²; *b* = 0; *c* = *s*。 再将 3 点坐标代入双曲余弦线方程得:

$$\begin{cases} 0 = \frac{M}{2} (e^{\frac{r}{M}} + e^{-\frac{r}{M}}) + N \\ s = \frac{M}{2} (e^{\frac{0}{M}} + e^{-\frac{0}{M}}) + N \end{cases}$$
(9)

可以解得:

第 4 期

$$\begin{cases} \frac{r}{M}(e^{\frac{r}{M}} + e^{-\frac{r}{M}}) + 2s - 2M = 0\\ N = s - M \end{cases}$$
(10)

式(10)中第一子式是关于 M 的超越方程,可用牛顿迭代法求解:

$$\begin{cases} M_{n+1} = M_n - f(M_n) / f'(M_n) \\ f(M) = M(e^{\frac{r}{M}} + e^{-\frac{r}{M}}) + 2s - 2A \\ f'(M) = (1 - \frac{r}{M})(e^{\frac{r}{M}} + e^{-\frac{r}{M}}) - 2 \end{cases}$$
(11)

为定量给出这 2 种曲线的差别,取一条实测高压电线参数的近似值:半跨 r = 250 m,弧垂 s = -10 m,于是可以完全确定 2 种曲线方程。按方程得到两曲线的形状如图 3(a)所示(图中圆圈组成的线为按抛物线得到的结果,黑色线为按双曲余弦线得到的结果),两者之差如图 3(b)所示。



从图 3 可以看出, 抛物线与双曲余弦线的形状几乎完全重合, 最大差 0.001 33 m, 相对于 |s ⊨ 10 m 的绝对 弧垂, 相对差只有万分之 1.33, 属非常小量。因此可以认为用抛物线代替双曲余弦线来描述输电线形状是可行 的, 这是后续计算的基础。

设在输电线所在的竖直面内,已知输电线两端的坐标为 $P_1(X_1,z_1)$, $P_2(X_2,z_2)$,它们满足式(7)所描述的抛物 线;记 P_1P_2 弧上离 P_1P_2 连线最远的点为Q(坐标未知),定义Q到 P_1P_2 连线的距离d为电线的绝对弧垂, $\lambda = d/|P_1P_2|$ 为电线的垂度。于是可以推导电线弧垂和垂度计算的数学模型。

设 P₁P₂ 直线的斜率为K,可算得:

对式(7)求导,可得抛物线上任意一点 t 处的切线斜率为:

$$k_t = 2aX_t + b \tag{13}$$

由于抛物线上距离 P_1P_2 线最远的 Q 点处的切线应平行于 P_1P_2 线,所以有:

$$k_o = 2aX_o + b = K \tag{14}$$

由此可求出切点 Q 的坐标:

$$\begin{cases} X_{Q} = (K - b) / (2a) \\ z_{Q} = aX_{Q}^{2} + bX_{Q} + c \end{cases}$$
(15)

式中a,b,c可由在竖直面内对输电线进行抛物线拟合得到。

由于 P₁P₂线方程为:

$$z - z_1 = K(X - X_1)$$
(16)

故, Q到 P_1P_2 的距离(即绝对弧垂)为:

$$d = \frac{\left|KX_{Q} - z_{Q} + (z_{1} - KX_{1})\right|}{\sqrt{1 + K^{2}}}$$
(17)

P₁P₂线段的长度为:

$$L = |P_1P_2| = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$
(18)
最后可得抛物线的垂度:

λ=d/L (19) 图 4 为按此计算模型对一段实际输电线进 行拟合的结果,图中红点代表杆塔点云,绿点 代表电线点云,蓝线是按抛物线拟合得到的输 电线。由图可以看出,抛物线拟合与输电线的 真实形状非常吻合。

表 2 为各条线的跨度与垂度信息。由表 2 可以看出, *L*₃线组的垂度最大,其中又以 *L*₃₋₂线的垂度最大,与图 4 中的直观感觉相符。



Fig.4 Parabolic fitting of power lines 图 4 输电线的抛物线拟合

Table2 Span and bend calculation of power line											
number of line	L_{1-1}	L ₁₋₂	L ₁₋₃	L ₂₋₁	L ₂₋₂	L ₂₋₃	L ₂₋₄	L_{3-1}	L ₃₋₂	L ₃₋₃	L_{3-4}
bend D/m	7.36	8.16	7.83	0.94	1.11	1.06	0.89	7.99	15.81	15.03	14.97
bend percentage $\lambda/\%$	2.13	2.37	2.30	0.74	0.86	0.82	0.72	1.66	3.24	3.09	3.07
span L/m	344.9	344.9	340.0	127.1	129.2	129.3	123.1	482.1	487.5	486.0	488.2

4 交叉跨越计算

交叉跨越是指不同走向的 2 条输电线路在高度上的差别,在电力巡线中用于衡量 2 组交叉线间的间距是否满足要求。将式(6)代入式(7),并结合表达式 $Y = C_0$,可得一条输电线在激光点云原始三维坐标系中的方程为:

$$\begin{aligned} &\left(z = a(x\cos\theta + y\sin\theta)^2 + b(x\cos\theta + y\sin\theta) + c \\ -x\sin\theta + y\cos\theta = C_0 \end{aligned}$$
 (20)

式中a,b,c,C, θ均为已知量(含义与求法见前文)。

令 $m = \cos\theta$, $n = -\sin\theta$, 则式(20)简写为:

$$\begin{cases} z = a(mx - ny)^2 + b(mx - ny) + c \\ nx + my = C_0 \end{cases}$$
(21)

其在水平面内的投影为直线:

$$nx + my = C_0 \tag{22}$$

第 17 卷

2条走向不同的空间抛物线在地面投影,得到2条相交的直线,其交点J(x,y)由联立方程组确定:

$$\begin{cases} n_1 x + m_1 y - C_1 = 0\\ n_2 x + m_2 y - C_2 = 0 \end{cases}$$
(23)

2条空间抛物线上投影点为 *J* 的点分别为 $P_1(x, y, z_1)$ 和 $P_2(x, y, z_2)$, 定义高度差 Δ*H* = $|z_1 - z_2|$ 为交叉跨越距离。

2 条交叉跨越线的方程经式(23)求出 J 点坐标 J(x,y)后,代回式(21)的第一子式,求出 P₁, P₂的竖坐标 z₁, z₂,即可得交越距离 ΔH 。对某段交叉跨越输电线的交越距离进行了实际计算,求得 P₁和 P₂的精确坐标 P₁(504 327.4,3 495 417.1,644.8)和 P₂(504 327.4,3 495 417.1,636.0),以及其交越距离为 8.8 m。

5 净空排查计算

净空排查是指输电线周围是否存在树木、房屋等地物与输电线过分接近的情况。传统的净空排查主要靠巡 线员实地人工勘测,效率低,劳动强度大,结果也不准确。激光雷达在这方面具有独特优势,非常高效,直接 从激光点云中进行数据分析即可精确地获得是否存在净空越阈情况,对存在净空越阈的地方进行自动报警,并 给出越阈点的净空距离。

给定阈值 r,所有地物点(不包括杆塔点)中到电线的距离小于 r 的点就是越阈点。由于输电线是曲线,求点 到曲线距离的过程非常复杂。因此不直接求点到曲线距离,而改将输电线离散成若干点,计算待考察点到输电 线上各点的距离,只要与其中一个输电线点的距离小于阈值 r,就证明该考察点到输电线的距离小于 r。此过程 等于判断是否存在满足式(24)的点 P(x,y,z):

 $\begin{cases} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 < r^2 \\ \forall (x_i, y_i, z_i) \mid z_i = a(px_i - qy_i)^2 + b(px_i - qy_i) + c \end{cases}$ (24)

具体排查过程中,并不需要把所有待考察点都与每个电线点进行求距运算。可以采用包围盒原理进行算法加速^[4]:对每个电线点用边长为r的包围盒选出盒内考察点,排除盒外点,然后对选出点进行求距运算。这样,需要与各个输电线点进行求距运算的考察点大幅减少。即,将判决式(24)扩展成:

$$\begin{cases} -r < x - x_i < r; \ -r < y - y_i < r; \ -r < z - z_i < r \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 < r^2 \\ \forall (x_i, y_i, z_i) | z_i = a(px_i - qy_i)^2 + b(px_i - qy_i) + c \end{cases}$$
(25)

图 5 为对某段激光雷达实测输电线路进行的 净空排查结果,图中绿点是树木等地物和杆塔点 云,蓝点是输电线以及少量错分类的杆塔点云, 红色圆圈圈起来的红点就是净空排查查得的越阈 点,即与输电线过分接近的地物点,实验使用的



图 5 净空排查算法输出的结果

净空阈值为r=1m。传统人工巡线方式的净空排查既费时又费力,而且容易漏警,尤其是在深山高林中,这时激光雷达巡线方法的高效、自动化优势可充分体现。

6 结论

本文对激光雷达巡线系统中的杆塔倾斜、电线弧垂、交叉跨越、净空排查等重要参数进行了理论推导和数 学建模,得出理论解析式。与激光点云专业处理软件 Terrasolid 相比,本文提出的方法能给出这些物理参数的 显式表达式,而不只是数值结果。这些理论解析对电力巡线自动化有很好的帮助,本文算法已经用于实际电力 巡线中,提升了激光雷达电力巡线的优势和效能,取得了良好的社会和经济效益。

参考文献:

[1] 林昀,吴敦,李丹农. 基于机载激光雷达的高精度电力巡线测量[J]. 城市勘测, 2011(5):71-74. (LIN Yun,WU Dun,LI Dannong. High precise surveying of power line patrol based on airborne lidar[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(5):71-74.)

- [2] 林祥国,张继贤. 架空输电线路机载激光雷达点云电力线三维重建[J]. 测绘学报, 2016,45(3):347-353. (LIN Xiangguo, ZHANG Jixian. 3D power line reconstruction from airborne liDAR point cloud of overhead electric power transmission corridors[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2016,45(3):347-353.)
- [3] 王和平,夏少波,谭弘武,等. 电力巡线中机载激光点云数据处理的关键技术[J]. 地理空间信息, 2015,13(5):59-63.
 (WANG Heping,XIA Shaobo,TAN Hongwu, et al. Key technologies of airborne laser point cloud process in power line patrol[J]. Geospatial Information, 2015,13(5):59-63.)
- [4] 游安清,韩晓言,潘旭东,等. 一个输电线系统净空排查算法的优化过程[J]. 计算机工程与应用, 2014,50(17):259-262.
 (YOU Anqing,HAN Xiaoyan,PAN Xudong, et al. Optimizations of spatial distance check algorithm in power transmission system[J]. Computer Engineering and Applications, 2014,50(17):259-262.)
- [5] 陈文棋,范强,罗俊,等. 基于 OGRE 的国网电力巡线软件的设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(4):
 613-618. (CHEN Wenqi,FAN Qiang,LUO Jun, et al. Design and realization of state grid power line software based on OGRE[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(4):613-618.)
- [6] 王平华,习晓环,王成,等. 机载激光雷达数据中电力线的快速提取[J]. 测绘科学, 2017,42(2):154-158. (WANG Pinghua, XI Xiaohuan,WANG Cheng, et al. Study on power line fast extraction based on airborne lidar data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,42(2):154-158.)
- [7] 杨浩,游安清,潘文武,等. 车载激光雷达三维点云重构与漫游方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(4):579-583. (YANG Hao,YOU Anqing,PAN Wenwu,et al. Reconstruction of 3D point cloud based on vehicle-borne lidar and research on roaming methods[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(4):579-583.)
- [8] 刘平,窦延娟,陈曦鸣. 比选飞行平台载小型激光雷达电力工程应用研究[J]. 中国电业, 2014(9):5-7. (LIU Ping,DOU Yanjuan,CHEN Ximing. Comparison of different flight platforms based small lidars and their application in power engineering[J]. China Electric Power, 2014(9):5-7.)
- [9] 韩立,余代俊,何延龙. Lidar 在四川某地电力选线项目中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2014,37(4):86-88. (HAN Li,YU Daijun,HE Yanlong. The application of lidar of route choice of electric power program in a certain area of Sichuan[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014,37(4):86-88.)

作者简介:



韩晓言(1965-),男,浙江省舟山市人,博 士,高级工程师,主要研究方向为智能电网技 术.email:450737713@qq.com. **何** 静(1981-),男,四川省绵阳市人,学 士,工程师,主要研究方向为通信技术.

游安清(1975-),男,湖北省咸宁市人,博 士,高级工程师,主要研究方向为计算机视觉.

(上接第 685 页)

[15] SOUMEKH M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms[M]. Buffalo,NY:Wiley, 1999.

作者简介:



刘加方(1991-),男,湖北省随州市人, 在读博士研究生,主要研究方向为宽带新体制 雷达及信号处理.email:jiafangliu@163.com. **张云华**(1967-),男,昆明市人,研究员, 博士生导师,主要研究方向为宽带新体制雷达 及信号处理、星载微波遥感器、新型天线技术.

董晓(1987-),男,河北省邢台市人,助 理研究员,主要研究方向为压缩感知雷达、宽 带成像雷达.