

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.015

基于机载 LiDAR 系统的电力线点云提取方法研究

张智前, 叶周润, 欧鑫, 肖信峰

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对野外地形高度起伏大、走向复杂、杆塔形式多样且点云密度不均匀等造成电力线点云提取精度低的问题,文章提出一种自动化精度高的新型电力线点云提取方法。根据电力线走向对整体点云进行分块处理;使用迭代高程阈值法计算得到最佳高程分割阈值,将地面点、地物点与电力线点进行分割;采用 DBSCAN 密度聚类法聚类出杆塔点并进行剔除,对于误分到杆塔点的部分电力线点结合点云高程搜索进一步提取出来;使用欧式聚类法对单根电力线点进行精提取。实际输电线路点云数据实验表明,该方法电力线总提取精度为 99%,实现了电力线点云的自动、高效提取,可满足实际电力巡检生产需求。

关键词:机载 LiDAR;电力线提取;复杂地形;点云;DBSCAN 密度聚类

中图分类号:P237

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)08-1103-06

Research on power line point cloud extraction algorithm based on airborne LiDAR system

ZHANG Zhiqian, YE Zhouyun, OU Xin, XIAO Xinfeng

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem of low extraction accuracy of power line point cloud caused by high fluctuation of field terrain height, complex trend, diverse forms of towers and uneven density of point cloud, a new power line point cloud extraction method with high automatic accuracy is proposed. The whole point cloud is segmented according to the power line direction. The iterative elevation threshold method is used to calculate the optimal threshold value of elevation segmentation, and the ground point, ground object point and power line point are segmented. DBSCAN density clustering method is used to cluster and eliminate the tower points, and part of the power line points mistakenly assigned to the tower points are further extracted by searching. Euclidean clustering method is used to extract single power line points. According to the actual transmission line point cloud data experiment, the total power line extraction accuracy of this method is 99%, the automatic and efficient extraction of power line point cloud is realized, and the actual demand of power inspection can be met.

Key words: airborne LiDAR; power line extraction; complex terrain; point cloud; DBSCAN density clustering

0 引言

我国国土面积辽阔,人口数量基数大。近年来随着国民经济的不断发展,架空输电线路里程不断增加,电网结构日益复杂,长距离输电线路电

力巡检面临着极大的挑战。传统的电力巡检方式存在人员危险度高、人力物力消耗大、效率低下等问题,而无人机机载激光雷达技术可以快速自动高效获取地面地物高精度三维点云信息,在电力巡检方面具有快速化、低成本、低危险性等优势,

收稿日期:2022-01-11;修回日期:2022-03-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41904010);安徽省自然科学基金资助项目(2008085MD115)

作者简介:张智前(1996—),男,安徽潜山人,合肥工业大学硕士生;

叶周润(1984—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者,E-mail:yezhourun329@hotmail.com.

因此近年来无人机机载激光雷达技术在电力巡检方面得到了广泛的应用。

目前,无人机电力巡检主要分为电力线提取^[1-6]、电力线危险高度分析^[7-8]以及电力线三维重建^[9]3个方面,其中电力线提取作为主要研究内容近年来受到国内外众多学者关注。文献[10]将电力线点云投影到XY平面后使用K-means进行聚类提取;文献[11]将电力线点云分段投影到XY平面后使用RANSAC提取;文献[9]将电力线点云投影到平面进行二维Hough变换,再使用分段K均值聚类采样精提取。上述文献均将点云投影到平面再进行处理,存在绝缘子处提取效果差且易将多根电力线错分为1根的问题。文献[12]对整体点云进行子空间分割处理后根据密度特征提取;文献[13]对原始点云进行子空间分割后基于倾斜角度平均值提取。上述文献均对点云进行子空间分割,解决了地形起伏问题但存在处理效率低的问题。文献[14]分离出候选点后将其转化为二值化图像并进行形态学优化,再使用区域增长精细化提取;文献[15]对整体点云垂直处理预测电力线位置并使用3D区域生长法分割候选点;文献[16]通过寻找种子点使用区域生长法提取。上述文献均使用区域生长法提取电力线点,存在无法精确提取绝缘子点与对原始点云密度要求较高的问题。文献[17-19]使用随机森林以及马尔科夫随机场通过自举样本学习,采用机器学习方法提取,准确度较高且处理速度快,但存在需要大量训练样本与先验知识且对不同环境适应能力差的问题。

针对上述问题,本文提出一种新型电力线点云提取方法。对点云分块采用改进的迭代高程阈值法滤除地面点与大部分地物点,解决了因地势起伏过大引起的传统高程阈值法滤波效果差的问题;对于滤除杆塔点时存在的将电力线点误分到杆塔点的问题,通过结合点云高程搜索将误分的电力线点提取出来。

1 激光雷达电力线提取

本文提出的基于机载LiDAR系统的电力线激光雷达点云提取方法流程如图1所示。该方法首先按点云走向依据距离进行分块,采用迭代高程阈值法滤除地面点与大部分地物点;然后对于含杆塔点的分块点云,使用DBSCAN密度聚类滤除杆塔点,其中被误分到杆塔类的电力线点结合高程变化提取出来;最后采用欧式聚类方法对整

体电力线点进行精细提取。

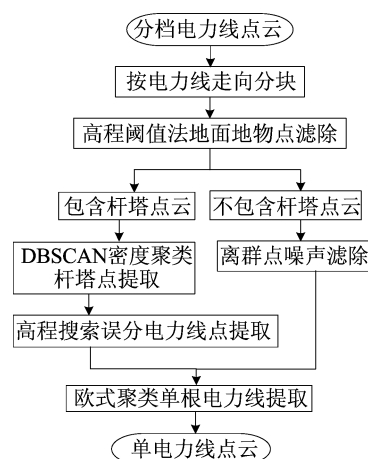


图1 电力线点云提取流程

1.1 整体点云分块

机载激光雷达所获取的点云数据主要包括电力线、电力杆塔、植被房屋和地面等,由于点云数据量大,对整体点云进行处理效率低;同时对于地势起伏较大的数据使用传统高程阈值法滤除地面地物点,会存在地势较高处地面地物点无法滤除或滤除效果差的问题。针对这一问题,对整体点云依据电力线走向进行分块处理。

1) 电力线走向判断。目的是确定分块方向,防止将电力线纵向分割。先对整体点云的最大最小XY坐标进行计算,再计算最大最小XY坐标的差值 Δ_{xy} 确定电力线走向是X方向还是Y方向。 Δ_{xy} 计算公式如下:

$$\Delta_{xy} = (X_{\max} - X_{\min}) - (Y_{\max} - Y_{\min}) \quad (1)$$

其中: X_{\max} 、 X_{\min} 分别为最大和最小X坐标; Y_{\max} 、 Y_{\min} 分别为最大和最小Y坐标。当 Δ_{xy} 为正值时,将点云按照X走向进行分块;当 Δ_{xy} 为负值时,将点云按照Y走向进行分块。

2) 确定分割距离分块。目的是解决因地势起伏较大引起的地面地物点难以滤除的问题。选择合适的分割距离对于后续处理至关重要,分割距离过大会导致分割效果不明显,分割距离过小会加重程序运算的负担影响效率,一般分割距离选择为50m,根据地形起伏坡度大小的不同可适当增加或减少分割距离。

1.2 电力线粗提取

粗提取的目的是为了滤除地面点与大部分的地物点,为下一步的精提取打好基础。电力线粗提取采用迭代高程阈值法对分块点云进行处理,处理流程如下:

1) 点云平均高程计算。计算出点云的平均高程 H 作为分隔阈值将点云分割为上下点云, H 的计算公式如下:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (2)$$

其中: h_i 为第 i 点云高程; n 为总点云数量。

2) 上下点云分割。以点云平均高程为阈值分割上下点云, 上点云为电力线点云, 下点云为地物地面点点云。

3) 上下点云平均高程均值计算。分别计算上下点云平均高程, 再求出其均值 H_m , H_m 计算公式如下:

$$H_m = \frac{H_u + H_d}{2} \quad (3)$$

其中: H_u 为上点云平均高程; H_d 为下点云平均高程。

4) 最佳阈值迭代计算。将上下点云平均高程均值 H_m 作为步骤 1) 中的点云平均高程 H , 继续步骤 2) 和步骤 3), 迭代计算直至收敛, 最后获得的平均高程为最佳高程分割阈值, 分割所获得的上点云即为单一的电力线点云。

1.3 电力线精提取

经过粗提取之后, 包含电力杆塔的点云存在电力线点、绝缘子点与部分杆塔点, 需要单独进行处理。在滤除电力杆塔的过程中存在将部分与杆塔相近的电力线点误分到电力杆塔的情况, 为了更精细完整地提取电力线点, 需将误分的电力线点与绝缘子点分离, 进而提取完整的单根电力线。

1.3.1 误分杆线聚类分离

为了完整地将电力杆塔进行滤除, 使用 DB-SCAN 密度聚类提取杆塔点云, 扫描半径的设置不可过小, 否则会存在将部分与绝缘子相连接的电力线点云误分到电力杆塔类的情况。电力杆塔的结构导致其在同一水平坐标下有多个不同高程点云, 而误分电力线点云由于是架空线在不同的水平坐标下只存在一个高程点云, 因此可以对分类的杆塔点云进行高程搜索, 进而将误分的电力线点云分离出来。高程搜索原理如图 2 所示, 处理流程如下:

1) 设置搜索半径 r , 半径内最小点的数量 $\min P_{ts}$, 最大点的数量 $\max P_{ts}$, 遍历搜索点云, 若目标点云搜索半径内点的数量小于 $\min P_{ts}$ 或大于 $\max P_{ts}$, 则将其标记为噪声点。

2) 剔除所有噪声点云。

3) 随机提取一个非噪声点为种子点, 对此种子点进行半径搜索, 统计搜索半径内点云最大最小高程。若最大最小高程差小于 0.5 m, 则将此种子点与其搜索半径内所有点云归类到误分的电力线点云类中; 否则将其归类到电力杆塔点云类中。

4) 设置新的种子点, 重复进行步骤 3), 直至所有非噪声点完成分类。

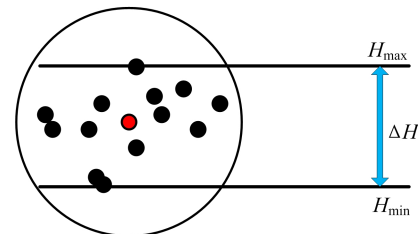


图 2 高程搜索原理示意图

1.3.2 电力线聚类

将电力杆塔进行剔除之后, 所保留的点云为电力线点和部分杆塔噪声点。由于每根电力线相互平行且间距较大, 若要得到完整的单根电力线, 可以使用欧式聚类的方法对单根电力线进行精细提取。欧式聚类根据点与点之间的邻近距离来判断两点是否属于一类, 对于平行电力线的几何空间特征, 可以有效地将单根电力线进行提取, 对多根电力线分割效果明显。欧式聚类提取流程如下:

1) 随机选取一点作为种子点, 设置搜索半径进行搜索, 将所有与种子点距离在搜索半径内的点与种子点归为一类。

2) 选取类中除种子点外的另一点, 重复步骤 1) 进行搜索归类直至没有新点加入类中。

3) 再随机选取一点作为新的类的种子点, 重复步骤 1) 和步骤 2), 直至所有点都加入了自己所属于的类中。

2 实验与分析

本文以 Microsoft Visual Studio 2017 为实验平台, 结合 PCL 库以及 libLAS 库完成电力线激光点云提取算法设计。实验平台的配置为: DELL 工作站, CPU 为 Intel 酷睿 i510500, GPU 为 NVIDIA GeForce GTX 1660 SUPER。为了验证算法的可行性, 采用 3 段不同地形条件下野外架空输电线路机载激光点云数据进行实验测试。线路 1 为平坦地形条件下点云数据, 线路总

长度为 1.45 km, 线路走向为直线型, 点云总数量为 4 540 016 个, 点云平均密度为 91 点/m², 共有 14 根电力线, 2 个不同类型的电力杆塔, 同档水平电力线水平投影平均距离为 0.6 m。线路 2 为高坡度地形条件下点云数据, 线路总长度为 3.5 km, 线路走向为折线型, 点云总数量为 7 210 145 个, 点云平均密度为 64 点/m², 共有 14 根电力线, 4 个不同类型的电力杆塔, 同档水平电力线水平投影平均距离为 0.5 m。线路 3 为混合地形条件下点云数据, 线路总长度为 1.75 km, 线路走向为直线型, 点云总数量为 7 854 169 个, 点云平均密度为 89 点/m², 共有 14 根电力线, 3 个不同类型的电力杆塔, 同档水平电力线水平投影平均距离为 0.6 m。

原始点云数据如图 3 所示。

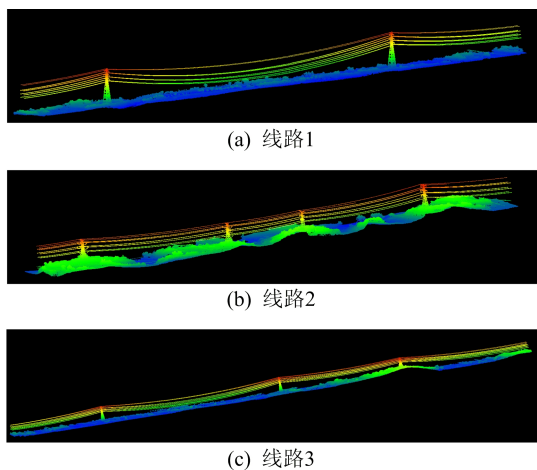


图 3 原始点云高程渲染图

地面地物点滤除结果如图 4 所示。

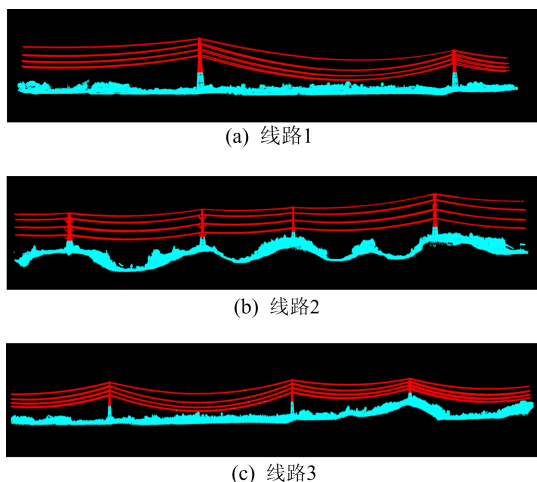


图 4 地面地物点滤除结果

图 4 中: 红色为包含电力线点的上半部分点

云; 青色为应该滤除的地面点、地物点以及靠近地面的部分杆塔点。由图 4 可知, 通过使用改进后的迭代高程阈值法将分档输电线路点云数据进行分块处理, 无论在平原地带还是坡度较大的山地区域, 都可以实现电力线点云与地面点的分离。

电力杆塔粗提取结果如图 5 所示。图 5 中: 红色为电力线点云; 黄色为粗提取的杆塔点云; 青色为已经滤除的地面地物点以及部分杂点。从图 5 可以看出, 通过使用 DBSCAN 密度聚类的方法基本可以将电力杆塔完整地提取出来, 然而会将与电力杆塔相连接的部分电力线点云与绝缘子点云聚类到电力杆塔类中, 因此需要采用高程搜索处理将误分的电力线点云从电力杆塔类中提取出来, 为下一步电力线精提取做好准备。

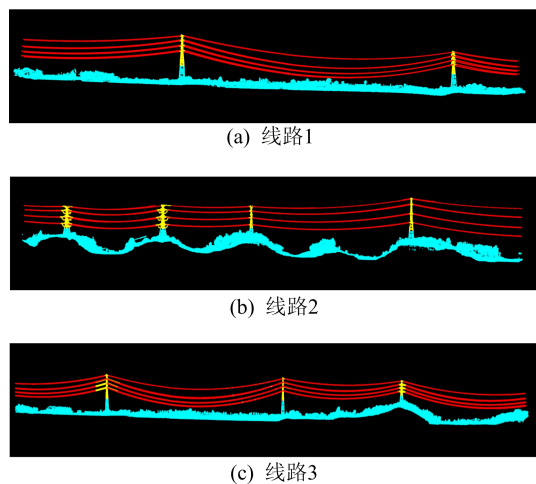


图 5 电力杆塔粗提取结果

电力线提取结果如图 6 所示。

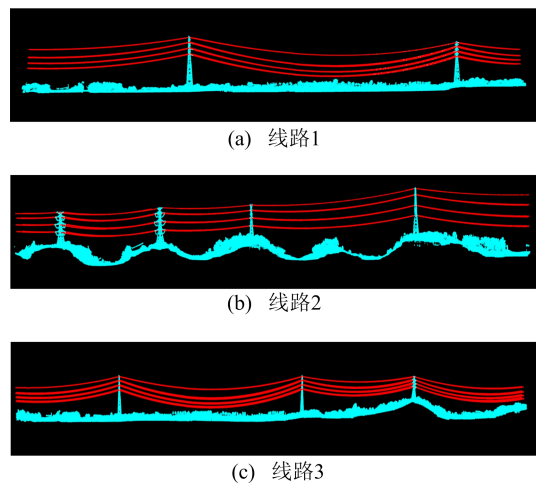


图 6 电力线提取结果

图 6 中: 红色为提取出的电力线点; 青色为除电力线点以外的点。从图 6 可以看出, 本文的电

力线点云提取算法可以准确完整地将电力线点云提取出来,同时提取的电力线基本可以延伸到绝缘子处,满足实际生产中电力线提取要求。

为了进一步验证本文电力线点云提取的准确性,对原始数据中电力线点进行手动提取,同时使用 TerraSoild 软件处理原始数据提取电力线点,以手动提取结果为基准分析本文方法与软件提取结果的提取率。本文方法提取的电力线基本完整,各股电力线比较清晰,而使用软件提取的电力线有较多缺失,尤其是在绝缘子处以及悬链线最低处漏提取较为严重。3 种方法对比分析结果见表 1~表 3 所列。

表 1 线路 1 电力线提取对比分析结果

提取方法	手动提取	软件提取	本文方法提取
提取数目	82 300	76 939	81 556
提取率/%	100.0	93.5	99.1
提取时间/s	914	485	24

表 2 线路 2 电力线提取对比分析结果

提取方法	手动提取	软件提取	本文方法提取
提取数目	59 400	53 004	58 801
提取率/%	100.0	89.2	99.0
提取时间/s	1 352	716	41

表 3 线路 3 电力线提取对比分析结果

提取方法	手动提取	软件提取	本文方法提取
提取数目	135 147	123 897	133 887
提取率/%	100.0	91.7	99.1
提取时间/s	1 178	632	33

从表 1~表 3 可以看出,软件进行提取电力线的提取率为 90%左右,而本文方法提取电力线的提取率为 99%以上,高于软件提取效果。对于总点云数量为百万级别的数据进行电力线提取,手动提取一般耗时十几分钟,软件提取和传统提取方法时间一般为分钟级,而本文方法将处理时间控制在秒级。本文方法着重于电力杆塔绝缘子处电力线的精细化提取,粗提取出电力杆塔后结合高程搜索能准确地将电力线与杆塔进行分离,防止造成整根电力线缺失的情况,保证高提取率的同时也大大提高了自动化程度。

3 结 论

本文提出了一种自动化程度高、准确高效的电力线激光点云提取方法。在地面地物点滤除过程中改进了传统的高程阈值法,通过对整体点云

进行分块处理后再进行高程阈值的迭代计算,解决了传统高程阈值法在坡度变化较大区域提取效果差的问题,提高了滤波算法在各种不同地形条件下的适用性。在电力线精提取过程中设计了一种新型的针对绝缘子处电力线点云的提取方法,通过高程搜索处理对误分到杆塔类的电力线点进行进一步提取,从而保证了绝缘子处电力线点提取的准确性与完整性,提高了整体电力线提取的精度。实验结果表明,本文的基于机载 LiDAR 系统的电力线点云提取方法可以应对各种不同地形条件,具有较好的鲁棒性,电力线提取精度较高,满足实际电力巡检生产需求,可以应用于野外架空输电线路的点云数据处理中。

[参 考 文 献]

- [1] 陈驰,麦晓明,宋爽,等. 机载激光点云数据中电力线自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 4(12): 1600-1605.
- [2] 杨业,李宏宁. 基于机载 LiDAR 点云数据的电力线自动提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 41-46.
- [3] CHEN X H, DAI J Q, HE Y R, et al. Power line extraction and analysis based on LiDAR[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 42: 91-96.
- [4] 麻卫峰,王金亮,王成,等. 一种基于机载 LiDAR 点云电力线自动提取方法[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(1): 39-44.
- [5] 麻卫峰,王金亮,王成,等. 电力线点云精细提取与重建的模型残差实现[J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 60-66.
- [6] 麻卫峰,王成,王金亮,等. 激光点云输电线精细提取的残差聚类法[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 883-892.
- [7] 陈驰,彭向阳,宋爽,等. 大型无人机电力巡检 LiDAR 点云安全距离诊断方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2723-2730.
- [8] 徐博,刘正军,王坚. 基于激光点云数据电力线的提取及安全检测[J]. 激光杂志, 2017, 38(7): 48-51.
- [9] 朱依民,田林亚,毕继鑫,等. 基于无人机机载 LiDAR 的电力线点云提取与重建[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 554-560.
- [10] 林祥国,宁晓刚,段敏燕,等. 分层随机抽样的单档电力线 LiDAR 点云聚类方法[J]. 测绘科学, 2017, 42(4): 10-16.
- [11] 王平华,刁晓环,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, 171.
- [12] 沈小军,秦川,杜勇,等. 复杂地形电力线机载激光雷达点云自动提取方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 982-987.
- [13] 李靖,钱建国,王伟玺,等. 基于机载激光点云的电力线自动提取方法[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 362-366.
- [14] 李晓峰,胡川,尹洪,等. 基于机载 LiDAR 点云的电力线自动提取[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 220-224.
- [15] ZHOU M, LI K Y, WANG J H, et al. Automatic extrac-

- tion of power lines from UAV LiDAR point clouds using a novel spatial feature[J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2019, 4: 227-234.
- [16] 游安清,潘旭东,赵平,等.激光雷达电力巡线点云自动分类方法研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1077-1083.
- [17] KIM H B, SOHN G. Random forests based multiple classifier system for power-line scene classification[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 38: 253-258.
- [18] SOHN G, JWA Y, KIM H B. Automatic powerline scene classification and reconstruction using airborne lidar data[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012(13): 167-172.
- [19] 王杰栋,张良.基于线性体素分割的机载 LiDAR 点云数据电力线提取[J]. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(7): 38-42.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 1069 页)

试验对比发现,经滑模控制器实现的差动转向控制策略,可通过差动力矩的计算和分配,车辆稳定性和响应性较传统线控汽车有大幅提升;而通过路径跟踪控制器补偿的前轮额外转角,使得汽车在综合控制下进一步提升了车辆的响应性和稳定性。在 2 个典型工况中,综合控制策略下的车辆实际横摆角速度和理想横摆角速度的误差大幅下降;综合控制策略下的车辆实际路径和期望路径误差亦得到有效控制。证明本文设计的控制策略有效提升了分布式电驱动整车在行驶时的稳定性和路径跟踪的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 景晖.基于差动转向的分布式直驱电动汽车鲁棒控制方法研究[D].南京:东南大学,2017.
- [2] 周兵兵.基于差动转向的四轮独立驱动电动汽车路径跟踪控制研究[D].南京:东南大学,2018.
- [3] 胡涛.轮毂电机电动汽车转向动力学及控制策略研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [4] 杨阳.基于滑模变结构控制理论的 AFS 与 DYC 集成控制[D].长沙:湖南大学,2019.
- [5] 罗正.电动轮驱动汽车差动助力转向与稳定性协调控制[D].长春:吉林大学,2019.
- [6] 魏高琳.基于横摆特性的横摆力矩与主动前轮转向集成控制策略研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [7] 汤钧涵.轮毂电机驱动车辆差动转向转矩分配策略研究[D].北京:北京理工大学,2020.
- [8] 王军年,郭德东,颜庭旭,等.电动汽车差动助力转向与主动前轮转向协调控制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(3): 777-783.
- [9] YAN C, WANG J M. Design and evaluation on electric differentials for overactuated electric ground vehicles with four independent in wheels motors[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 61(4): 1534-1542.
- [10] TAHAMI F, KAZEMI R, FARHANGHI S. A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2003, 52(3): 683-692.
- [11] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [12] WANG H B, HU C L, CUI W, et al. Multi-objective comprehensive control of trajectory tracking for four-in-wheel-motor drive electric vehicle with differential steering[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 62137-62154.
- [13] 龚建伟.无人驾驶模型预测控制[M].北京:北京理工大学出版社,2020.
- [14] 华敏.智能化全线控电动车辆的自主跟踪控制研究[D].长春:吉林大学,2019.

(责任编辑 张 镛)