

前挡风玻璃后方前视摄像头高精度标定算法研究

彭旺, 梁丰收, 陶黎明, 陈平儒, 邹衡君

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:为解决光线经挡风玻璃折射导致的传统标定模型精度差的问题,根据光线折射规律和挡风玻璃姿态建立挡风玻璃的光线折射模型,开发一种前挡风玻璃后方前视相机的高精度标定新算法,并通过仿真试验和实车试验,证明新算法的标定精度显著提高。

关键词:前挡风玻璃; 前视摄像头; 标定精度; 光学模型

中图分类号:U461.7

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)03-0019-06

Research on High-precision Calibration Algorithm for Front-view Camera Behind Front Windshield

PENG Wang, LIANG Fengshou, TAO Liming, CHEN Pingru, ZOU Hengjun

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract:To solve the poor calibration accuracy of traditional camera models caused by light refraction through the windshield, the authors establish a light refraction model of the windshield according to the light refraction law and the windshield posture to develop a new high-precision calibration algorithm for the front-view camera behind the front windshield. The simulation tests and actual vehicle tests prove that the calibration accuracy of the new algorithm is markedly improved.

Key words:front windshield; front-view camera; camera calibration; optical model

前视摄像头作为车辆智能辅助驾驶系统的关键组成部分,不仅可以改善驾驶体验,还可以提高行车安全性^[1-3]。前视摄像头通常位于前挡风玻璃后方,实时监测道路状况、识别交通标志和车辆,预测潜在危险。精确的实时数据在智能辅助驾驶技术中发挥着关键的作用,为车辆实现智能感知和决策提供重要支持。

实时数据是由所摄图像数据经过摄像头内外参变换得到的三维数据。因此,摄像头的内外参数误差会引起实时数据的误差,从而严重影响智能辅助驾驶系统的准确性和鲁棒性^[4-5]。摄像头内外参数的精度与其标定模型密切相关。目前,前视摄像机内外参数的标定一般采用传统相机模型^[6],没有考虑挡风玻

璃对光线折射的影响,从而导致标定的内外参数误差较大。因此,建立前挡风玻璃光线折射模型,开发基于折射模型的前视摄像头高精度标定算法具有重要的理论意义和实践意义。

1 问题分析

1.1 传统相机的针孔成像模型

传统相机的针孔成像模型原理如图1所示。其中, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系; UOV 为成像图像坐标系,单位为像素; $O_w X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系。相机坐标系在世界坐标系的姿态和位置分别用 R 和 T 表示。世界坐标系中的空间点 P 在成像图像坐标系中的投影点为 p 。

收稿日期:2024-03-20。

第一作者:彭旺(1982—),男,高级工程师;主要从事新能源商用车设计研发工作。E-mail: peng.wang@byd.com。

通讯作者:陶黎明(1992—),男,博士;高级工程师;主要从事计算机视觉、智能驾驶研发工作。E-mail: sunrise_lk@163.com。

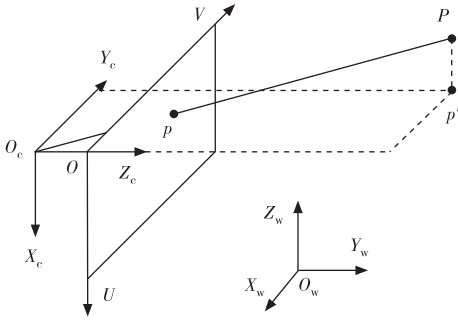


图1 针孔相机成像模型示意图

为了方便矩阵运算,三维空间点 P 和其图像投影点 p 可分别用齐次形式表示为 $P = [x \ y \ z \ 1]^T$, $p = [u \ v \ 1]^T$ 。则,相机成像模型可以表示为^[7]

$$s \cdot p = K [I \ 0] \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} P \quad (1)$$

式中: s 为系数,表示该三维点在相机坐标系下的深度信息; I 为 3×3 的单位矩阵; 0 为三维 0 向量; K 为相机的内参矩阵,用式(2)表示。

$$K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (u_0, v_0) 为成像图像主点在成像图像坐标系中的坐标值; f_u 和 f_v 为与焦距和像元物理尺寸相关的参数值。

另外,成像模型并不是理想的针孔成像模型,还存在切向畸变 δ_x 和径向畸变 δ_y ,即有

$$\begin{cases} \delta_x(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y(x, y) = k_2 y(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 为畸变系数。令 $\delta_p = [\delta_x(x, y) \ \delta_y(x, y)]^T$,则矫正后的传统相机成像模型为

$$p' = p + \delta_p \quad (4)$$

其中, p 和 δ_p 均为非齐次坐标。

1.2 传统标定误差来源分析

装在车辆前挡风玻璃后方的前视摄像头标定误差来源分析如图2所示。其中,灰色立方体表示前挡

风玻璃。传统方法使用式(1)~式(4)所示的针孔相机成像模型标定相机。成像时,三维空间点 P 经过光心后直接在图像上成像,投影为点 p ,光路为直线,如图2中实线所示。但是,实际上光线经过一定结构和厚度的前挡风玻璃时光路变为折线,如图2中点划线所示,投影点为 p' 。显然,两条光路在图像上的投影点并不重合,如果不考虑前挡风玻璃折射,必然会导致标定误差。因此,有必要开发一种挡风玻璃后方前视摄像头的高精度标定方法,提高前视摄像头的标定精度,进而提高智能辅助驾驶感知精度。

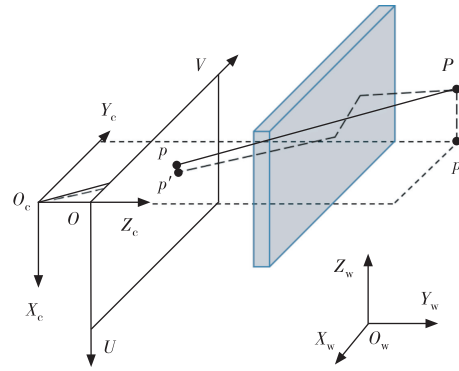


图2 标定误差来源对比图

2 挡风玻璃与相机联合标定

本文提出的前挡风玻璃后方前视摄像头高精度标定方法的整体流程如图3所示,其中,深色框为本文改进的内容。

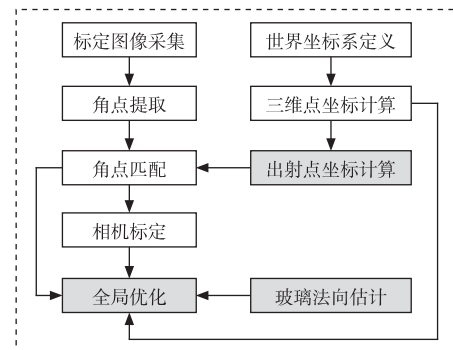


图3 前挡风玻璃后方前视摄像头高精度标定流程图

2.1 玻璃模型分析与简化

前挡风玻璃为曲率不均匀的曲面夹层玻璃。因相机的安装位置不确定,难以对光线透过区域的曲面

玻璃进行建模。而且,使用曲面模型和夹层玻璃折射模型还会增加标定模型的复杂度,产生相机内外参数与玻璃曲面参数的耦合问题。为解决此问题,需对挡风玻璃三维模型进行合理简化。

挡风玻璃后方前视摄像机的镜头离挡风玻璃很近,所以进入镜头的光线均来自挡风玻璃上一块很小的区域。假设相机的水平视场角和垂直视场角均为 90° ,光心距离玻璃2 cm,根据几何关系,可以计算得到光线均来自相机前方玻璃上 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的区域。因此,基于相机实际安装位置及挡风玻璃小曲率的事实,本文将挡风玻璃简化为厚度均匀的平面玻璃。

另外,光线在夹层玻璃中的传播如图4(a)所示,会产生3次折射。但相机参数的标定仅与光线的入射点和出射点有关,所以将夹层玻璃等效为单层玻璃,并用等效折射率来反映夹层玻璃每层的综合影响,保证在入射点相同时具有相同的出射点,如图4(b)所示。等效折射率可以通过计算或测量的方式得到。如果采用计算的方式,需要知道每层材料的折射率,这很难做到。因此,本文从可行性和准确性的角度考虑,采取用折射率测量仪直接测量的方式。后文中提到的折射率均为等效折射率,提到的前挡风玻璃均为不影响标定精度的单层等效玻璃。

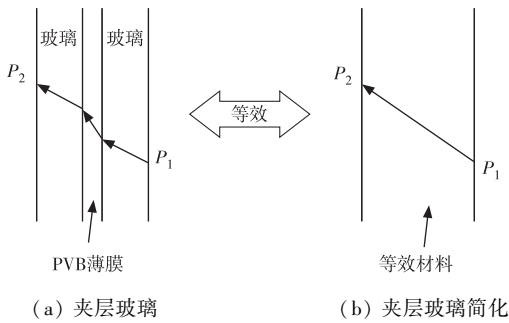


图4 夹层玻璃光线折射简化示意图

2.2 挡风玻璃光线折射模型

前挡风玻璃光线折射几何模型如图5所示。其中, λ_1 、 λ_2 分别为挡风玻璃的外侧和内侧,即光线的入射平面和出射平面, P_1 为入射光线与 λ_1 的交点, P_2 为出射光线与 λ_2 的交点; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为光线在车外空气、挡风玻璃、车内空气中的传播路线, d 为挡风玻璃的厚度, $P_1P_2P'_2P$ 为平行四边形, PP'_2P_2 为 P

P_1P_2 光线传播的等效路径。假设挡风玻璃法向量 $\mathbf{n} = [a \ b \ c]$, a 、 b 、 c 分别为法向量 $\mathbf{n}$ 在相机坐标系下沿 X_c 、 Y_c 、 Z_c 的分量。

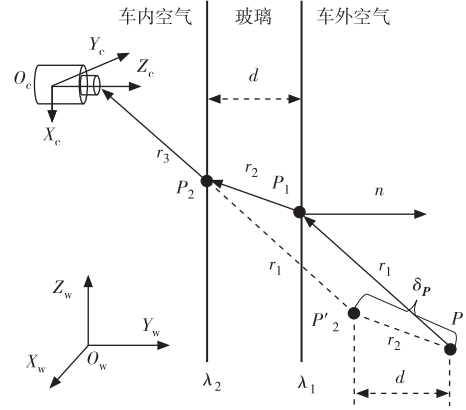


图5 挡风玻璃光线折射模型

根据光心和图像点的几何关系,入射光线和出射光线的方向为

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} \frac{u-u_0}{f_u} & \frac{v-v_0}{f_v} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

假设挡风玻璃的等效折射率为 μ_1 ,空气的折射率为 μ_0 。根据光线折射规律,挡风玻璃中折射光线的方向为^[8]

$$\mathbf{r}_2 = \frac{\mu_0}{\mu_1} \mathbf{r}_1 - \frac{\mu_0 \mathbf{r}_1^T \mathbf{n} + \sqrt{(\mu_0 \mathbf{r}_1^T \mathbf{n})^2 - (\mu_0^2 - \mu_1^2) \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1}}{\mu_1} \mathbf{n} \quad (6)$$

取空气折射率 $\mu_0 = 1$,并代入式(6)得

$$\mathbf{r}_2 = \frac{1}{\mu_1} \mathbf{r}_1 - \frac{\mathbf{r}_1^T \mathbf{n} + \sqrt{(\mathbf{r}_1^T \mathbf{n})^2 - (1 - \mu_1^2) \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1}}{\mu_1} \mathbf{n} \quad (7)$$

结合玻璃厚度 d 及法向量 $\mathbf{n}$,可以得到光线 $\mathbf{r}_2$ 经玻璃折射后的位移变化量 δ_P

$$\delta_P = d \frac{\mathbf{r}_2}{\mathbf{R} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_2} \quad (8)$$

δ_P 为点 P'_2 相对于点 P 的坐标变化量,如图5所示。

因此, P'_2 的坐标为

$$\mathbf{P}'_2 = \mathbf{P} + \delta_P \quad (9)$$

根据式(1)和式(9), P'_2 在图像上的成像点坐标为

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}'_2 \quad (10)$$

在传统成像模型的基础上融入挡风玻璃折射模型可得到更加精确的光线传播路径,且可以将标定参数分为透视模型参数和折射模型参数。而传统的针孔成像模型仅包含透视模型参数,必然会产生折射误差。因此,采用本文提出的方法标定精度更高。

2.3 标定方法

从图5中可以看出,点 P'_2 到相平面的投影符合针孔相机成像模型。因此,相机标定时,首先需要根据式(5)~式(9)计算出出射点 P'_2 的位置坐标,然后用式(10)所示的相机模型进行标定,标定方法有多种^[9-12],本文采用应用最广泛的张正友标定法。

标定时世界坐标系定义在模式已知的棋盘格标定板上,即标定板上的特征点的三维坐标是已知的。由于标定板是平面,所以三维坐标在 z 轴上的分量 $z=0$ 。式(10)可改写成

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $r_{ij}(i=1,2,3,j=1,2)$ 为旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 的第一列和第二列对应的元素; x' 和 y' 分别为点 P'_2 的横坐标和纵坐标。

标定板上的每个点都可得到如式(11)所示的方程。通过多个位置拍摄棋盘格标定板可以解算出相机内参矩阵及每个标定板在相机坐标系下的位置。

3 挡风玻璃及相机位置优化

图像特征提取误差、标定板的制造误差等均会影响标定精度。为进一步提高标定精度,本文提出一种同时优化相机和挡风玻璃参数的算法,即通过优化获得更加精确的相机及前挡风玻璃的参数。算法的核心在于目标函数的建立及初始值的设置。

3.1 目标函数建立

根据式(9),将世界坐标系下三维空间点 P 映射为像平面上的 p_{ij} ,可表示为

$$p_{ij}=f(\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{K}, \mathbf{D}, \mathbf{n}, \mathbf{P}_{ij}) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{P}_{ij}$ 表示第 i 个标定板上的第 j 个空间点坐标; p_{ij} 为点 P_{ij} 在像平面上的投影点坐标; $\mathbf{R}_i$ 和 $\mathbf{T}_i$ 分别为

第 i 个标定板的旋转矩阵和平移向量; $\mathbf{D}=\{k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2\}$ 为畸变系数。

优化的目标是 minimized 重投影误差,因此,目标函数亦可表示为

$$\arg \min_{\Omega} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \lambda \|\overline{p_{ij}} - p_{ij}\|^2 \quad (13)$$

式中: $\Omega=\{\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{K}, \mathbf{D}, \mathbf{n}\}$ 为待优化的参数,即内参 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{D}$,外参 $\mathbf{R}_i$ 和 $\mathbf{T}_i$,玻璃法向量 $\mathbf{n}$; $\overline{p_{ij}}$ 为三维点 P_{ij} 在图像上的实际投影点坐标,可通过对图像进行角点检测得到。

3.2 优化初始值设置

在推导挡风玻璃折射模型时,假设已知玻璃的法向量 $\mathbf{n}=[a \ b \ c]$,但实际上玻璃的法向量很难精确给出。采用粗值标定相机参数必然会导致标定误差。为了解决这个问题,本文设计了一种相机内、外参数及挡风玻璃法向量的联合优化方法。首先,给定相机内参数、外参数、玻璃法向量的初始值,然后建立反投影误差最小的目标函数,最后基于光束平差算法得到优化后的相机内外参数及玻璃的法向量。

以挡风玻璃和相机联合标定得到的相机内、外参数作为相机参数优化时的初始值。相机坐标系的 z 轴与光轴重合, z 轴的正方向与镜头朝向相同,由于相机为前视相机,光轴与挡风玻璃基本垂直,因此,以 $\mathbf{n}_0=[0 \ 0 \ 1]$ 作为挡风玻璃法向量优化时的初始值。

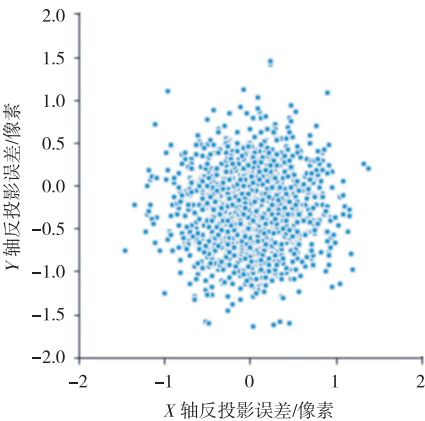
4 仿真及实车验证

为验证提出算法的精度,分别进行仿真试验和实车试验,并与使用传统模型标定的结果进行对比。

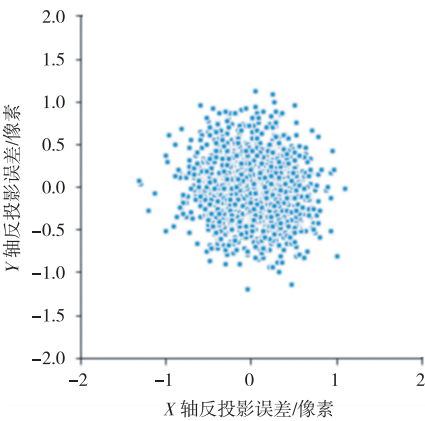
4.1 仿真试验

仿真试验使用棋盘格标定板,角点数为 11×9 ,角点间隔为100 mm。为获得不同位置的标定板图像,定义了10个虚拟相机的投影矩阵,每个投影矩阵对应一张棋盘格图像。虚拟相机的分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 536$ 。为使仿真试验更符合实际情况,在图像点上加入了 $[-0.1, 0.1]$ 之间的随机扰动。使用本文提出的模型和传统模型分别进行3次仿真试验,每个棋盘格角点的反投影误差如图6所示。仿真相机的内参

设定值及两种模型标定得到的内参值见表 1,表中 f_u, f_v, u_0, v_0 为内参矩阵元素, $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 为畸变系数,均无量纲。



(a) 使用传统模型的标定结果



(b) 使用本文提出模型的标定结果

图 6 棋盘格角点反投影误差对比图

表 1 摄像机内参设定值及仿真试验结果对比

参数	设定值	本文模型	传统模型
f_u	1 219. 00	1 219. 58	1 226. 00
f_v	1 219. 00	1 219. 86	1 217. 35
u_0	984. 00	984. 44	988. 93
v_0	800. 00	800. 37	806. 58
k_1	-0. 407 2	-0. 403 3	-0. 134 1
k_2	0. 198 1	0. 389 1	0. 010 8
p_1	0. 004 8	0. 005 9	0. 008 1
p_2	0. 001 6	0. 001 8	0. 002 4
s_1	0. 001 7	0. 001 7	0. 003 9
s_2	0. 000 9	0. 002 4	0. 003 6

从图 6 中可以看出,相较于使用传统模型的标定,使用本文提出的模型标定得到的棋盘格角点的反投影误差更小且更集中。其中,前者的反投影误差均值为-0. 311 像素,标准差为 0. 236 像素;后者的反投影误差均值为 0. 07 像素,标准差为 0. 124 像素。

从表 1 可以看出,本文提出模型的仿真结果更接近设定值。因此,本文在针孔相机模型的基础上增加挡风玻璃折射模型可以提高相机的标定精度。

4. 2 实车测试

进一步进行实车测距试验。使用本文提出的模型与传统模型分别对 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m 处地平面上的标志点进行测量,测量误差均值和标准差见表 2。

表 2 不同距离标志点测量误差均值和标准差 m

距离	误差均值		标准差	
	传统模型	本文模型	传统模型	本文模型
5	0. 27	0. 19	0. 21	0. 16
10	0. 29	0. 21	0. 24	0. 19
15	0. 51	0. 32	0. 30	0. 22
20	0. 60	0. 38	0. 38	0. 35
25	0. 66	0. 40	0. 41	0. 36

由表 2 可以看出,在相同距离的情况下,使用本文提出的标定模型,测量误差均值和标准差均小于传统标定模型,即使用本文提出的标定模型,测量精度更高。

仿真试验和实车试验的结果均充分证明了本文提出的标定模型比传统标定模型的精度更高。

5 结束语

本文建立了挡风玻璃光线折射模型,并基于该模型采用全局优化的策略提出了一种前挡风玻璃后方前视摄像头的高精度标定方法。仿真试验和实车试验表明,标定前挡风玻璃后方前视摄像头时引入挡风玻璃光线折射模型能够提高摄像机的标定精度。

参考文献:

[1] 裴崇利,李泽滨,周雨辉,等. 多感知信息融合的车辆感知

- 方法研究[J]. 客车技术与研究, 2020, 42(1): 19-22.
- [2] 王海涛, 刘慧卓, 张学永, 等. 基于单目视觉的车辆屏显式封闭驾驶舱前视视野重现方法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-10[2024-03-03]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220782>.
- [3] 郭剑鹰, 陈晓, 高升. 高级驾驶辅助系统前视摄像头硬件在环测试[J]. 光学仪器, 2018, 40(3): 22-27.
- [4] 林绿开, 钮倩倩, 李毅. 基于棋盘标定板的优化相机参数标定方法[J]. 计算机技术与发展, 2023, 33(12): 101-105.
- [5] ZHANG Wentao, SONG Huansheng, LIU Lichen. Automatic calibration for monocular cameras in highway scenes via vehicle vanishing point detection[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149(7): 1-11.
- [6] 黄文文, 彭小红, 李丽圆, 等. 相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 9-19.
- [7] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] FENG Mingchi, HUANG Shuai, WANG Jingshu, et al. Accurate calibration of a multi-camera system based on flat refractive geometry[J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9724-9734.
- [9] CANO M A, LAMBERT J, EDAHIRO dahi M, et al. Single-shot Intrinsic calibration for autonomous driving applications[J]. Sensors, 2022, 22(5): 2067.
- [10] 赵云涛, 孙军华, 陈勘, 等. 基于球几何特征的摄像机内参分步标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 558-563.
- [11] 高田. 面向智慧农业的单目摄像头内参标定高度不变性方法[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [12] MARTINS F P, COSTELHA H, BENTO C L, et al. Monocular camera calibration for autonomous driving—a comparative study[C]//2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, 2020: 306-311.

(上接第 14 页)

对特定场景下的充电功率调控问题,对于不同工况和应用场景下的充电策略优化仍有待进一步探讨。例如,考虑到充电站容量和电网稳定性等因素的情况下,需要研究更为智能化和综合化的充电策略。此外,双源电动货车在运行过程中,如何充分利用充电系统的优势提高整车能量利用效率,同时确保电池系统安全、稳定运行,也是未来研究的重要方向^[7-8]。

参考文献:

- [1] 宋一凡, 牡丹丰. 高速公路接触网电力货车受电弓的技术研究[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(11): 54-55.
- [2] 杨思凡. 分布式能源接入下电气化公路能量管理策略研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [3] 金红超. 城市客车燃料电池热管理系统控制策略设计[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [4] 代广贵, 何晋, 张博嘉. 考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 12-22.
- [5] 冯启飞, 霍崇亚, 邱勇, 等. 面向电气化公路的重卡模型研究[J]. 重型汽车, 2023(1): 6-8.
- [6] 闫晓健, 刘建业, 张鹏强, 等. 基于优化算法的混合储能功率分配策略[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(6): 13-17.
- [7] 张磊冲, 胡治国, 司少康, 等. 混合储能单元功率分配策略[J]. 上海电机学院学报, 2023, 26(1): 28-33.
- [8] 毛蕴娟, 朱月阳, 李恒杰, 等. 基于公平权重的电动汽车充电功率分配策略[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(6): 81-87.