

Multi-objective Optimization of EV Path Planning under Complex Constraints

Longhu Song Yuanwei He*

Hunan Traffic Engineering College, Hengyang, Hunan, 421009, China

Abstract

With the increasingly severe global shortage of resources and environmental pollution, as well as the rapid development of new energy vehicle technology, electric vehicles (Electric Vehicles, EVs) in logistics distribution, urban travel and other fields of increasingly extensive applications. However, the short range of electric vehicles, the long charging time and the few charging facilities make the problem of path planning of electric vehicles complicated and challenging. This paper focuses on the path planning of electric vehicles under complex constraints, and puts forward a multi-objective optimization strategy, aiming to reduce logistics cost, improve distribution efficiency and reduce carbon emission through scientific and reasonable path planning, and provide theoretical support and practical guidance for the wide application of electric vehicles.

Keywords

complex constraints; electric vehicle; path planning; multi-objective

复杂约束下电动汽车路径规划的多目标优化研究

宋龙虎 贺沅玮*

湖南交通工程学院, 中国·湖南 衡阳 421009

摘要

随着全球资源紧缺与环境污染问题的日益严峻,以及新能源汽车技术的快速发展,电动汽车(Electric Vehicles, EVs)在物流配送、城市出行等领域的应用日益广泛。然而,电动汽车的续航里程短、充电时间长、充电设施少等特性,使得电动汽车的路径规划问题变得复杂且具有挑战性。论文聚焦于复杂约束下的电动汽车路径规划问题,提出多目标优化策略,旨在通过科学合理的路径规划,降低物流成本、提高配送效率、减少碳排放,为电动汽车的广泛应用提供理论支持和实践指导。

关键词

复杂约束; 电动汽车; 路径规划; 多目标

1 引言

随着城市化进程的加快和电子商务的蓬勃发展,城市物流配送需求急剧增加,城市交通拥堵和尾气污染问题日益严重。在此背景下,电动汽车作为一种环保、节能的交通工具,逐渐受到人们的关注和青睐。然而,电动汽车的广泛应用仍面临诸多挑战,其中路径规划问题尤为关键。

【基金项目】2024年湖南省自然科学基金项目《复杂约束下的电动汽车路径规划方法研究》(项目编号: 2024JJ8051)。

【作者简介】宋龙虎(1989-),男,中国湖南衡阳人,硕士,副教授,从事计算机、电子商务研究。

【通讯作者】贺沅玮(1988-),男,中国湖南邵阳人,硕士,副教授,从事智能制造研究。

2 复杂约束条件对电动汽车路径规划的影响

复杂约束条件对电动汽车路径规划的影响是显著且多方面的。这些约束条件不仅增加了路径规划的复杂性,还直接影响了电动汽车的行驶效率、续航里程以及充电需求等方面。以下是一些主要复杂约束条件及其对电动汽车路径规划的具体影响。

2.1 电量与续航里程约束

电动汽车的续航里程相比传统燃油车较短,且受电池性能、驾驶习惯、路况等多种因素影响,因此在规划路径时,必须充分考虑电动汽车的剩余电量和预计行驶距离,以避免在行驶过程中出现电量耗尽的情况。由于续航里程有限,电动汽车在行驶过程中可能需要中途充电。这要求路径规划系统能准确识别充电站的位置,并合理规划充电站点和充电时间,以确保车辆能按时到达目的地并满足后续的行驶需求^[1]。

2.2 时间窗约束

在物流配送等应用场景中,电动汽车需要在指定的时间窗内完成配送任务。这要求路径规划系统能够灵活调整行

驶路线和速度,以确保车辆能够在规定时间内到达各个配送点。此外,时间窗约束还涉及到充电时间的安排。在规划路径时,需要考虑到充电桩的充电效率、车辆排队等待时间等因素,以最小化对配送时间的影响。

2.3 道路交通与行驶环境约束

道路拥堵会延长电动汽车的行驶时间,增加能耗和充电需求。路径规划系统需要能够实时获取交通信息,并避开拥堵路段,以提高行驶效率。同时,不同的行驶环境对电动汽车的能耗和续航里程有不同的影响。例如,上坡路段会增加能耗,而下坡路段则可以通过能量回收系统为电池充电。因此,在规划路径时,需要充分考虑这些环境因素。

2.4 车辆载重与能耗约束

车辆载重越大,行驶过程中的能耗也会相应增加。因此,在规划路径时,需要根据车辆的实际载重情况来调整行驶速度和路线,以优化能耗和续航里程。

2.5 充电设施与充电策略约束

充电设施分布:充电设施的分布直接影响电动汽车的充电便利性和充电效率。在规划路径时,需要充分考虑充电桩的位置、数量和充电速度等因素,以确保车辆能够及时充电并满足行驶需求。

充电策略选择:不同的充电策略对电动汽车的行驶效率和成本有不同的影响。例如,快速充电虽然可以缩短充电时间,但可能会对电池造成一定的损害;而慢速充电则对电池更为友好,但充电时间较长。因此,在规划路径时,需要根据实际情况选择合适的充电策略。

3 在复杂约束下电动汽车路径规划的多目标优化方法

随着电动汽车的普及和交通网络的复杂化,电动汽车路径规划已成为一个多目标、多约束的优化问题。这一问题的解决不仅关系到能源的有效利用,还涉及环境保护和用户满意度的提升。在复杂约束下,如何设计有效的多目标优化方法,是当前研究的热点之一。

3.1 问题定义与目标建模

首先,明确电动汽车路径规划的目标函数。通常包括以下几个方面:

①最小化能耗:电动汽车的能耗是路径规划中的重要考量因素,直接关系到电池的续航能力。②最小化行驶时间:用户通常期望行程时间最短,这要求规划的路径能够避开拥堵和延误。③最小化经济成本:包括电费、过路费等直接经济成本。

同时,问题定义中还需要考虑一系列约束条件:

①电池电量约束:路径规划必须确保车辆在到达目的地时仍有足够的电量。②充电桩约束:路径中可能需要包含充电桩,以补充电池电量。③时间窗口约束:某些任务或目的地可能有特定的时间要求。④交通规则约束:遵守交通法规,如单行道、限速等^[2]。

3.2 多目标优化算法的选择

针对上述问题的复杂性,传统的单一目标优化算法往

往难以胜任。因此,需要采用多目标优化算法,如遗传算法、粒子群优化、模拟退火等。这些算法能够在多个目标之间寻找平衡解,提供一个帕累托最优解集,供决策者选择。

3.3 约束处理技术

在多目标优化过程中,如何处理约束是一个关键技术。常见的约束处理方法包括:

惩罚函数法:将约束条件转化为目标函数的惩罚项,通过调整惩罚系数来控制约束的严格程度。

在外罚函数法中,近似最优解一般只能近似地满足约束条件,对于某些实际问题这样的近似最优解释不可接受的。内罚函数法是一类保持严格可行性的方法。其基本思想是:严格要求迭代点在可行域内移动,当迭代点接近可行域边界时,有无穷大的障碍,迫使迭代点返回可行域的内部。

考虑不等式约束的优化问题,可行域内部记做:

$$D^0 = \{x \in R^n | c_i(x) < 0, i = 1, 2, \dots, l\}$$

记:

$$B(x) = - \sum_{i=1}^l \ln(-c_i(x))$$

定义如下的内罚函数:

$$P(x, r) = f(x) + rB(x) = f(x) - r \sum_{i=1}^l \ln(-c_i(x)) = f(x) - r \sum_{i=1}^l \ln(-c_i(x))$$

其中, $r > 0$ 是参数。显然,当 x 在可行域内部时, $B(x)$ 为整数,当 $r \rightarrow 0$ 时, $P(x, r)$ 的极小点就会趋近优化问题的极小点。至少有一个 $c_i(x) \rightarrow 0$, 会导致 $B(x)$ 剧烈增大,迫使极小值点落在可行域内部。原优化问题转化为以下形式:

$$\min P(x, r), x \in R^n$$

$$s.t. \quad c_i(x) < 0, i = 1, 2, \dots, l$$

使用内惩罚函数时,可行域由 $D = \{x \in R^n | c_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, l\}$ 变为 D^0 。内罚函数称为内点法。 $B(x)$ 为对数障碍函数。

修复算法:在种群迭代过程中,对违反约束的解进行修复,使其满足约束条件。

多目标进化算法中的约束处理:通过特定的遗传操作和选择机制,保证新生成的解满足所有约束。

3.4 算法实现与验证

在算法设计完成后,需要在实际场景中进行验证。通过收集真实数据,构建模拟环境,对算法进行测试和调整。同时,可以与其他算法进行对比分析,评估其在不同情况下的性能表现。

4 复杂约束条件分析

在电动汽车路径规划中,了解和分析各种复杂约束条件是设计有效优化方法的前提。以下是对这些约束条件的详细分析。

4.1 电动汽车技术特性约束

在电动汽车路径规划的复杂约束条件分析中,电池续航里程限制和充电桩分布与充电时间要求是两个关键性的因素,它们对电动汽车的行驶路线和效率有着决定性的影响。

电池续航里程限制：电动汽车的电池容量是衡量其续航能力的主要指标。单次充电后，电动汽车能够行驶的最大距离受到电池容量的限制。这意味着在路径规划时，必须确保车辆在电池电量耗尽之前能够到达下一个充电站或者最终目的地。这一约束要求路径规划系统必须能够准确预测电池消耗，考虑到实际行驶中的各种影响因素，如路况、天气、驾驶模式等，以及预留出足够的电量应对突发情况。此外，路径规划还应该考虑到电池的剩余电量，以避免因电量不足而导致的行程中断或延误^[1]。

4.2 运营环境约束

在电动汽车路径规划的复杂约束条件分析中，道路交通状况和时间窗口限制是两个核心要素，它们对路径规划的效率和效果有着直接而深远的影响。

4.2.1 道路交通状况

道路交通状况的多变性对电动汽车的行驶速度和能耗构成了挑战。拥堵路段会导致车辆长时间低速行驶，这不仅增加了行程时间，还可能因为频繁的起停而增加能源消耗。施工区域的存在则可能迫使车辆绕行，增加了行驶距离和潜在的能耗。限行政策可能会限制某些车辆在特定时间和地点的通行，这需要路径规划时预先规避这些区域。因此，路径规划系统需要具备实时或预测性的交通信息处理能力，通过智能算法动态调整路线，以避开拥堵、施工区域和限行路段，从而避免不必要的延误和能源浪费。

4.2.2 时间窗口限制

时间窗口限制是指客户对服务或交付有特定的时间要求，例如必须在某个时间段内到达或离开某个地点。这种限制要求路径规划不仅要考虑空间上的最优路径，还要考虑时间上的合理安排。如果电动汽车不能在规定的时间内到达或离开，可能会导致服务失败，影响客户满意度，甚至产生额外的成本（如延迟罚款）。因此，路径规划系统需要能够精确计算行程时间，考虑到交通状况、充电时间以及可能的意外情况，确保能够在客户要求的时间窗口内完成任务，从而提高服务质量和客户满意度。

4.3 经济与社会约束

在电动汽车路径规划的复杂约束条件分析中，运营成本和环保要求是两个至关重要的方面。

4.3.1 运营成本

电动汽车的运营成本不仅仅是一个经济指标，它还直接关联到企业的盈利能力和市场竞争力。能耗是运营成本的主要组成部分，它与电动汽车的行驶距离、载重、驾驶习惯等因素密切相关。充电费用则受到电价、充电站费率、充电效率等因素的影响。此外，电动汽车的维护成本，包括定期保养、更换部件等，也是不容忽视的经济因素。在优化路径时，需要综合考虑这些成本因素，通过选择最优的行驶路线、合理安排充电计划、提高车辆维护效率等方式，实现成本的最小化，从而提升运营的整体效益。

4.3.2 环保要求

在全球气候变化的背景下，减少碳排放已成为国际社会的共同目标。电动汽车作为一种清洁能源交通工具，其推广使用有助于减少对化石燃料的依赖，降低温室气体排放。然而，仅靠电动汽车的推广是不够的，路径规划时还需要考虑如何进一步优化能源使用，比如通过智能充电管理减少电网高峰负荷、利用可再生能源充电、优化行驶速度以减少能耗等方式，来减少环境影响。此外，路径规划还可以结合城市交通规划，通过设计低排放区域、鼓励拼车、优化公共交通系统等措施，共同推动城市交通系统的绿色转型。

5 多目标优化模型构建

在构建电动汽车路径规划的多目标优化模型时，我们需要考虑多个相互关联且可能相互冲突的目标，以确保整体规划的经济性、效率和环境友好性。以下是一些关键的优化目标设定：

①最小化总行驶距离：通过优化路径，减少不必要的行驶距离，从而降低能源消耗和运营成本。②最小化总充电时间：合理规划充电站点和充电时机，减少因充电等待时间对总体行程的影响。③最大化客户满意度：确保按时交付货物或服务，满足客户的时间和质量要求，提升服务质量和品牌形象。④能耗最小化：通过优化驾驶策略和路径选择，减少能源消耗，降低运营成本，同时也有助于环境保护。⑤碳排放最小化：优化路径和驾驶方式，减少碳排放，符合绿色环保的社会发展趋势。

在实际应用中，这些目标可能需要根据具体情况进行权衡和调整。例如，在某些情况下，为了保证客户满意度，可能需要牺牲一定的行驶距离或充电时间。因此，多目标优化模型应具备灵活性，能够根据不同的应用场景和需求进行调整。

此外，模型的构建还需要考虑实际操作中的约束条件，如道路交通状况、时间窗口限制、车辆和电池的性能限制等。通过综合考虑这些因素，可以构建出更加实用和高效的多目标优化模型，为电动汽车的实际运营提供科学指导。

6 结语

综上所述，在复杂约束条件下，对电动汽车的路径规划进行了深入探讨，充分认识了电动汽车在续航里程、充电时间、充电站位置、车辆载重限制等多方面的独特性及其对路径规划的影响。这些复杂性不仅增加了路径规划的难度，也推动了我们对于新型路径规划理论的迫切需求。

参考文献

- [1] 潘丽.基于机器学习的智能新能源汽车路径规划算法研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(5):156-159..
- [2] 马浩东.基于深度强化学习的智能汽车路径规划研究[D].吉林:吉林化工学院,2024.
- [3] 衣承志.面向复杂场景的自动驾驶汽车路径规划算法研究[D].长春:长春工业大学,2024.