

知网个人查重服务报告单 (全文标明引文)

报告编码:BC20260526193849019561195

检测时间:2026-05-26 19:20:05

篇名: 小型电动车辆动能释放装置设计

作者: 张炜迪

检测类型: 毕业设计

比对截止日期: 2026-05-26

检测结果

去除本人文献复制比: 4.7% 去除引用文献复制比: 4.7% 总文字复制比: 4.7%

单篇最大文字复制比: 1.0% (杨欢-初稿1)

重复字符数: [998] 单篇最大重复字符数: [218] 总字符数: [21260]

4.7% (998) 4.7% (998) 小型电动车辆动能释放装置设计\_第1部分 (总21260字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 小型电动车辆动能释放装置设计\_第1部分 总字符数 21260

相似文献列表

去除本人文献复制比: 4.7% (998) 去除引用文献复制比: 4.7% (998) 总文字复制比: 4.7% (998)

1	杨欢-初稿1	1.0% (218)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否
2	带执行器故障不确定性系统的迭代学习控制研究-0401	0.8% (173)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否
3	液压控掘机油耗及效率多目标优化策略研究	0.8% (170)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2023	是否引证: 否
4	静水环境中水下溢油浮射流模拟研究	0.7% (152)
	杨期 - 大学生论文联合比对库 - 2022	是否引证: 否
5	李盈萱毕业论文	0.7% (152)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否
6	公路常用减速设施使用技术研究	0.6% (122)
	黄佳 - 东南大学硕士学位论文 - 2012	是否引证: 否
7	基于MG2580的无线视频监控系统的硬件设计与实现	0.5% (114)
	张治军 - 桂林电子科技大学硕士学位论文 - 2013	是否引证: 否
8	基于云边协同模式下化工园区配电网故障诊断技术研究	0.5% (114)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2023	是否引证: 否
9	电动机再生电能回收深化控制与节能效果研究	0.5% (114)
	韩浩学 - 北京建筑大学硕士学位论文 - 2016	是否引证: 否
10	纯电动汽车再生制动控制策略研究	0.5% (114)
	刘煦 - 电子科技大学硕士学位论文 - 2015	是否引证: 否
11	电动车永磁无刷直流电机控制系统研究	0.5% (114)
	张栋 - 武汉理工大学硕士学位论文 - 2013	是否引证: 否
12	电动汽车永磁电机主驱动器母线电容主动放电控制策略研究	0.5% (114)
	杨昊林 - 浙江大学硕士学位论文 - 2022	是否引证: 否
13	电动汽车母线电容主动放电控制策略研究	0.5% (114)

	张晓军 - 浙江大学博士学位论文 - 2022	是否引证：否
14	<u>电控液压制动系统及其制动能量回收控制策略的研究</u> 谭智慧 - 武汉理工大学硕博学位论文 - 2016	0.5%(114) 是否引证：否
15	<u>基于CAN总线的地铁列车动态地图显示系统的开发与实现</u> 李晟 - 北京工业大学硕士学位论文 - 2012	0.5%(114) 是否引证：否
16	<u>-孟超 - 一种新能源汽车防抱死制动系统设计docx (1)</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.4%(86) 是否引证：否
17	<u>SQP算法是怎么一步步求解带约束的非线性优化问题的？CSDN文库</u> 佚名 - 互联网文档资源 - 未知	0.4%(81) 是否引证：否
18	<u>李轲毕业论文5.9</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.4%(78) 是否引证：否
19	<u>智能变电站继电保护状态监测装置的研制</u> 潘建亚 - 东南大学硕士学位论文 - 2017	0.3%(66) 是否引证：否
20	<u>基于人性化设计理念的城市小型清扫车设计探究</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.3%(64) 是否引证：否
21	<u>四轮轮毂电动汽车制动能效性滚动优化控制研究</u> 徐薇 - 吉林大学博士学位论文 - 2020	0.3%(63) 是否引证：否
22	<u>(终版降重)移相全桥ZVS直流变换器设计 - 副本</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.3%(59) 是否引证：否
23	<u>073020236张然20KW新能源旅游观光车驱动电机设计</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.3%(59) 是否引证：否
24	<u>【最优化理论】序列二次规划SQP理解和例题代码_序列二次规划算法-...</u> 佚名 - 互联网文档资源 - 未知	0.2%(52) 是否引证：否
25	<u>SQP算法及其Python实现:详解与应用_序列二次规划(sqp)算法-CSDN博客</u> 佚名 - 互联网文档资源 - 未知	0.2%(52) 是否引证：否
26	<u>超级电容储能的电动车再生制动控制策略研究</u> 王晓亮 - 江苏大学硕士学位论文 - 2013	0.2%(49) 是否引证：否
27	<u>毕业论文定稿4.27-李勇良</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2023	0.2%(49) 是否引证：否
28	<u>电动汽车驾驶员制动意图识别方法研究</u> 周恒平 - 太原理工大学硕士学位论文 - 2020	0.2%(48) 是否引证：否
29	<u>CDMA系统中功率控制及分布式算法研究</u> 刘学军 - 西安理工大学硕士学位论文 - 2008	0.2%(40) 是否引证：否
30	<u>基于虚拟直流电机的双有源全桥DC-DC变换器优化控制策略研究</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2023	0.2%(40) 是否引证：否
31	<u>镍氢动力电池软件仿真平台研究</u> 付文利 - 重庆邮电大学硕士学位论文 - 2011	0.2%(40) 是否引证：否
32	<u>CMOS射频集成电路中的关键电源技术研究</u> 吴雨桐 - 电子科技大学博士学位论文 - 2018	0.2%(40) 是否引证：否
33	<u>电磁-液压复合制动系统防抱死控制技术研究</u> 刘学军 - 江苏大学博士学位论文 - 2014	0.2%(39) 是否引证：否
34	<u>轮毂电机电动汽车电磁、再生及摩擦复合制动与ABS集成系统研究</u> 苑磊 - 江苏大学博士学位论文 - 2022	0.2%(39) 是否引证：否
35	<u>纯电动汽车再生制动控制策略的研究</u> 李坤 - 江苏大学硕士学位论文 - 2011	0.2%(39) 是否引证：否
36	<u>锂离子电池纯电动汽车能耗及再生制动工作效能研究</u> 程云峰 - 江苏大学硕博学位论文 - 2016	0.2%(39) 是否引证：否
37	<u>浅谈HXD3型机车常见故障分析及对策</u> 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	0.2%(38) 是否引证：否

38	藏医疾病分类及其临床应用研究	0.2%(38)
	索南仁青 - 青海大学硕士学位论文 - 2015	是否引证: 否
39	藏医“子宫虫病”的临床诊治研究	0.2%(38)
	仁青吉 - 青海大学硕士学位论文 - 2015	是否引证: 否
40	李格格-分布式驱动电动汽车复合制动系统仿真研究	0.2%(38)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否
41	A型地铁电力牵引系统设计	0.2%(38)
	杨洪玺 - 大学生论文联合比对库 - 2022	是否引证: 否
42	基于数值来判断非线性系统的可控性研究	0.2%(38)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否
43	非线性共轭梯度法在不同优化问题中的应用研究	0.2%(38)
	佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	是否引证: 否

原文内容

小型电动车辆动能释放装置设计  
学号: 02022421  
姓名: 张炜迪  
学院: 机械工程  
专业: 机械工程  
指导教师: 魏文鹏、王奕焜  
起止日期: 2026.1-2026.6  
(  
202  
6  
年  
5  
月日  
)  
东南大学毕业(设计)论文独创性声明  
本人声明所呈交的毕业(设计)论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。  
论文作者签名: 日期: 年 月 日  
东南大学毕业(设计)论文使用授权声明  
东南大学有权保留本人所送交毕业(设计)论文的复印件和电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外,允许论文被查阅和借阅,可以公布(包括刊登)论文的全部或部分内容。论文的公布(包括刊登)授权东南大学教务处办理。  
论文作者签名: 导师签名:  
日期: 年 月 日 日期: 年 月 日  
(  
I  
)  
东南大学本科毕业论文(设计)AI工具使用情况说明表  
课题名称 小型电动车辆动能释放装置设计  
学 号 02022421 姓 名 张炜迪  
是否使用生成式人工智能 是 ☐ 否  
工具、版本号 使用范围 使用过程 章节(页码)  
选择是: ☐ 文本生成及内容修改 ☐ 数据、图表分析、代码调试 ☐ 其他: 请具体说明 优化算法代码调试 21  
选择否:  
学生诚信申明 本人郑重声明,上述关于生成式人工智能使用情况的陈述真实无误,已对使用此类技术的所有细节进行了全面且诚实的报告。本人深知学术诚信的重要性,如有任何隐瞒或虚假之处,愿承担学术不端行为带来的相关惩处。 学生签名:  
年 月 日  
指导教师意见 意见: 指导教师签名: 年 月 日  
摘 要  
针对小型电动车在再生制动过程中,当动力电池处于高荷电状态、满电状态或电池支路异常断开时,回馈电能难以及时吸收、易引起直流母线电压升高并影响制动安全性的问题,本文围绕制动能量主动释放控制方法展开研究。  
首先,分析了小型电动车再生制动受限工况下的车辆动能变化、电机发电特性、母线电压变化及制动电阻泄放机理,建立了制动能量回收与能量释放系统的动力学与功率平衡模型。  
其次,以道路坡度和车辆速度为工况变量,以单个电机最优制动力矩和泄放支路最优占空比为优化对象,采用序列二次规划

算法在MATLAB平台上离线求解不同工况点下的最优参数,生成最优转矩曲面和最优占空比曲面。

再次,基于MATLAB/Simulink平台搭建系统仿真模型,将离线生成的参数表导入系统,通过查表方式完成典型工况下的控制验证,并对母线电压、车辆速度、泄放功率及制动响应进行分析。

最后,完成了主控、电源、采样、MOS驱动及通信等模块的硬件原理设计与PCB设计,并为后续样机测试和实车验证提供硬件基础。

研究表明,所提出的方法能够在电池无法吸收回馈能量的条件下,实现较为合理的制动力矩与泄放占空比分配,使车辆速度平滑收敛,并在一定程度上抑制母线电压升高、改善泄放功率调节效果。

关键词: 小型电动车, 再生制动, 制动电阻, 序列二次规划, 能量释放控制

ABSTRACT

In the regenerative braking process of small electric vehicles, when the battery is in a high state of charge, fully charged, or electrically disconnected, the recovered energy cannot be absorbed in time. This may cause the DC bus voltage to rise rapidly and threaten braking safety. To solve this problem, this paper studies an active energy release control method for small electric vehicles.

First, the variations of vehicle kinetic energy, motor generating characteristics, DC bus voltage, and braking resistor dissipation mechanism under constrained regenerative braking conditions are analyzed, and the dynamic and power balance models of the energy recovery and release system are established.

Then, with road slope and vehicle speed taken as operating variables, and the optimal single-motor braking torque and optimal duty cycle of the dissipation branch taken as optimization variables, a Sequential Quadratic Programming method is adopted in MATLAB to solve the optimal parameters offline and generate optimal torque and duty-cycle maps.

After that, a MATLAB/Simulink simulation model is built, and the offline-generated maps are imported into the system for lookup-table-based verification under typical operating conditions.

Finally, the hardware schematic and PCB of the system are completed, providing a hardware basis for subsequent prototype testing and vehicle verification.

The results show that the proposed method can provide a relatively reasonable allocation of braking torque and dissipation duty cycle when the battery cannot absorb regenerative energy, enabling the vehicle speed to converge smoothly while suppressing DC bus overvoltage and improving dissipation power regulation.

KEYWORDS: Small Electric Vehicle; Regenerative Braking; Braking Resistor; Sequential Quadratic Programming; Energy Release Control

目 录

摘 要 II

ABSTRACT III

目 录 IV

第一章 绪论 1

1.1 课题背景和意义 1

1.2 研究现状 3

1.2.1 制动能量控制国外研究 3

1.2.2 制动能量控制国内研究 5

1.2.3 当前研究的不足之处与课题出发点 6

1.3 本文研究内容 7

第二章 小型电动车制动能量流动与动能释放控制的基本原理 9

2.1 电动车制动过程中的能量转换基础 9

2.2 再生制动下电机发电机理 10

2.3 电池受限工况下的能量流动与母线泄放原理 11

2.4 动能释放控制中的功率平衡关系 14

2.5 SQP算法基本原理 15

第三章 基于MATLAB/Simulink的能量释放系统仿真 17

3.1 软件介绍 17

3.2 总体研究思路与仿真模型构建 17

3.3 基于MATLAB的离线优化与控制曲面生成 19

3.3.1 优化问题的建立 20

3.3.2 参考值与初始点构造 21

3.3.3 目标函数构造 21

3.3.4 约束条件设置 22

3.3.5 控制曲面的生成与输出 22

3.4 基于Simulink的典型工况结果验证 24

3.4.1 3° 坡道减速并稳定到15km/h工况 25

3.4.2 10° 坡道减速并稳定到25km/h工况 27

3.4.3 不同初始速度与目标速度下的扩展性 29

第四章 能量释放系统电气原理图及硬件设计 30

4.1 电源系统设计 30

4.2 主控模块设计 31

4.3 信号采集与MOS管控制模块设计 32



4.4 CAN收发模块设计	33
4.5接口与辅助电路设计	34
4.6 PCB设计	35
第五章 总结与展望	37
5.1工作总结	37
5.2工作展望	37
参考文献	38
致 谢	40

(  
III  
)

## 第一章 绪论

### 1.1课题背景和意义

(a) (b)

图1-1小型电动车示意图

随着新能源技术的发展以及绿色低碳出行理念的推广，小型电动车在园区运输、景区观光、休闲娱乐、短途代步和工业搬运等场景中的应用逐渐增多，典型车型包括电动观光车、电动卡丁车、高尔夫球车、小型清扫车以及小型物流无人车等，部分典型车辆如图1-1所示。与大型新能源汽车相比，小型电动车具有结构紧凑、成本较低、运行灵活等特点，更适合低速、短距离和固定区域内使用。但这类车辆也存在电池容量有限、热管理能力较弱、系统冗余不足等问题，在长坡、连续制动或满电运行等情况下，更容易出现回馈能量无法及时吸收、母线电压升高等问题，因此其制动系统设计需要同时兼顾安全性、稳定性和能量处理能力。

在小型电动车制动过程中，再生制动可以利用电机的发电作用，将车辆运动中的一部分机械能转化为电能，并回馈到动力电池中，从而提高能量利用率，减轻机械制动负担。其基本能量流动关系如图1-2所示。车辆减速时，轮毂电机处于发电状态，产生的电能经过逆变器整流后进入直流母线，再由母线流向蓄电池，完成制动能量回收。

但再生制动并不是在所有情况下都能稳定工作。当动力电池处于高荷电状态、满电状态，或者由于故障、保护动作、接触器断开等原因无法继续吸收回馈能量时，电机产生的电能就难以及时进入电池。这部分能量会暂时积聚在直流母线上，使母线电压快速升高，严重时可能引起驱动系统过压保护、功率器件电压应力增大，甚至导致制动性能下降。针对这种情况，需要在母线侧设置制动电阻等能量释放支路，为多余电能提供消耗路径，保证系统运行安全。

图1-2制动能量回收与释放系统结构框图

相较于乘用车和商用车，小型电动车在长下坡、连续减速等工况下，更容易遇到再生制动受限的问题。工程上通常会在直流母线侧并联制动电阻，把不能回收的多余电能转化为热能消耗，用来限制母线电压继续升高，保证系统安全运行。常见制动电阻如图1-3所示。传统制动电阻多采用简单的阈值导通方式，即母线电压超过设定值后接入制动电阻，电压下降后再退出。该方式结构简单，工程实现也比较方便，但控制过程偏被动，泄放功率难以根据车辆当前速度、道路坡度和目标速度进行调节，容易造成母线电压波动较大、泄放过程不够平顺，甚至影响车辆减速稳定性。

图1-3常见制动电阻示意图

因此，本文针对小型电动车在高SOC、满电及电池支路异常断开等情况下的再生制动安全问题，开展能量释放控制方法研究。本文希望通过制动电阻泄放支路，对无法进入电池的多余能量进行处理，同时兼顾母线电压抑制、泄放功率调节和车辆减速平顺性。该研究可为小型电动车在特殊工况下的制动安全设计提供参考，也能为后续系统实现打下一定基础。

### 1.2研究现状

目前，电动汽车和微型电动车的再生制动技术已经比较常见，它的主要作用是把制动过程中的一部分能量重新利用起来，从而改善车辆续航和降低能量损失。围绕这一方向，国内外已经有不少研究，内容主要集中在制动力分配、回收效率提升、电池充电限制以及不同车型工况适配等方面[1-3]。

#### 1.2.1制动能量控制国外研究

国外在再生制动和制动能量管理方面研究较早，早期主要关注机械制动与再生制动之间的分配问题，后续逐渐发展到多约束条件下的优化控制。现有研究普遍认为，再生制动不能只追求回收效率，还要同时考虑制动安全、电池状态、轮胎附着条件以及高压系统约束等因素。尤其在紧急制动、高SOC或复杂路况下，如果一味提高回收功率，反而可能影响车辆稳定性，或者增加电池侧的工作压力。

Salari等针对轮毂电机电动车提出了一种再生制动管理算法，将电池健康、高压系统限制、SOC范围和制动安全等因素纳入控制约束，并利用两阶段非线性预测控制方法计算再生制动力矩。该研究说明，再生制动控制已经不再只是简单分配电机制动力，而是需要在车辆安全、电池安全和能量效率之间进行综合权衡。其结果表明，在考虑多种约束后，车辆制动距离和续驶里程均可得到改善，这对本文后续研究受限工况下的能量处理具有一定参考意义[4]。

在自动驾驶和智能控制场景下，Park等研究了自动驾驶电动车再生制动能量回收的性能潜力。他们认为，车辆减速度曲线和再生制动力占比都会影响最终回收能量，若能够同时规划减速过程和制动力分配，就有可能获得比传统最大再生转矩策略更好的效果。该研究对本文有一定启发：制动能量管理不应只看某一瞬间的回收功率，还要结合车辆速度变化过程进行整体考虑[5]。

除了直接回馈至电池的研究外，国外也有学者关注制动能量的其他储存和转移方式。Atangulova等针对由直流网络供电的电动车辆，分析了不同制动能量回收装置的特点，并提出将能量回收装置与直流供电网络结合的方案，用于提高能量利用率和稳定直流网络电压。该类研究虽然对象与本文的小型电动车不同，但其关注点同样涉及制动能量在电气侧的疏导和管理问题，对理解母线能量平衡具有一定参考价值[6]。

从产业应用角度看，国外车企较早将再生制动集成控制技术应用于实车。以丰田Prius为例，该车型较早将再生制动与ABS、整车制动控制系统结合，在保证制动安全的前提下实现能量回收，其车辆外观如图1-4所示。随着电控制动技术的发展，Bosch iBooster等电控制动助力系统开始被广泛应用，该系统能够根据车辆制动需求协调电机再生制动与液压制动，使制动响应更加迅速，也为再生制动能量回收提供了更好的执行基础，其结构如图1-5所示。

图1-4日本丰田普锐斯

图1-5德国博世iBooster再生制动集成系统

整体来看,国外再生制动技术已经从单纯追求能量回收,逐渐发展为兼顾制动安全、踏板感觉、执行器协调和整车控制集成的综合制动系统。但现有研究和产业应用的主要目标仍然是提高回收效率和优化制动力分配,对于电池满电或支路异常断开后,如何通过外部耗能支路主动释放多余能量,相关研究仍然较少。

### 1.2.2制动能量控制国内研究

国内在再生制动控制和能量回收策略方面起步稍晚,但近年来发展较快。现有研究主要围绕复合制动、制动力分配、电池约束、驾驶意图识别以及整车仿真验证展开。

在小型低速车辆方面,李祺灏以纯电动代步车为对象,对电子刹车系统和能量回收策略进行了研究。该研究从代步车制动系统结构、车辆动力学和制动力分配等角度出发,建立了电子刹车与能量回收控制策略,为小型车辆制动控制提供了一定参考。其研究对象与本文关注的小型电动车较为接近,不过研究重点仍放在常规能量回收和电子刹车控制上,对电池无法吸收回馈能量时的泄放控制讨论较少[7]。

秦亚宁围绕纯电动汽车复合制动能量回收优化控制开展研究,分析了制动力分配约束、电机工作状态、电池SOC和最大充电功率等因素对再生制动力的影响,并引入驾驶员制动意图识别与双模糊控制策略,用于改善复合制动能量回收效果。这类研究说明,国内再生制动控制已经从简单的固定比例分配,逐渐转向考虑驾驶行为、电池状态和多控制器结构的综合控制[8]。

此外,周壮、周正钊等围绕微型电动车制动能量再生模拟试验和复合再生制动控制进行了研究,对低速车辆制动能量回收特性及复合制动控制提供了参考[9,10]。

电池状态对再生制动的影响也是国内研究的重要方向。孙龙等针对低温环境下电动汽车制动能量回收影响因素进行了分析,指出温度、SOC和空调负载等因素会影响电池充放电性能,进而改变再生制动能量回收效果。崔俊杰等则从自适应能量回收角度出发,结合车辆行驶状态、道路条件和驾驶场景对能量回收策略进行优化。上述研究表明,电池状态和外部工况对再生制动有明显影响,能量回收控制不能脱离实际运行条件单独设计[11,12]。

与本文关系更近的是制动电阻和泄放装置相关研究。孙晓霞等针对混合动力车用制动电阻散热性能进行了试验研究,分析了散热功率和迎面风速对电阻温升的影响;吴志东围绕机车制动电阻装置散热设计,对大功率制动电阻的温升和流道问题进行了讨论;江峰等则基于Icepak对制动电阻模块散热进行优化设计。这些研究更多集中在制动电阻热设计和散热性能方面,能够为泄放电阻选型和热安全分析提供参考,但对小型电动车场景下“车速—坡度—泄放功率—制动力矩”之间的控制匹配涉及较少[13-15]。

总体来看,国内外现有研究已经在再生制动能量回收、复合制动协调和电池约束控制方面形成了较多成果,但研究目标大多仍围绕“如何尽可能多地回收能量”。当电池处于高SOC、满电或支路异常断开状态时,回馈能量无法进入电池,此时系统更需要解决的是“如何把多余能量安全、平稳地释放出去”。这正是本文研究的切入点。本文面向小型电动车受限再生制动工况,引入制动电阻泄放支路,重点研究坡度和车速变化下制动力矩与泄放占空比的匹配关系,为小型电动车动能释放装置设计提供参考。

### 1.2.3当前研究的不足之处与课题出发点

综合国内外研究现状可以看出,再生制动控制和能量回收策略已经有较多研究基础。现有成果主要集中在制动力分配、再生制动与机械制动协调、电池充电约束、驾驶意图识别以及复合制动控制等方面,对提高车辆能量利用率、改善制动平顺性和提升制动安全性具有一定意义。不过,从小型电动车再生制动受限工况来看,现有研究仍存在一些不足。

现有研究大多默认动力电池具备一定的充电接受能力,研究重点更多放在如何提高能量回收效率上。实际运行中,电池并不总是能够稳定吸收回馈能量。当电池处于高SOC、满电、低温保护、过流保护,或者电池支路因故障、保护动作等原因断开时,再生制动产生的电能难以及时进入电池。若车辆仍处于下坡或连续制动状态,多余能量会在直流母线侧积聚,导致母线电压升高,严重时可能触发控制器过压保护,影响制动连续性。对于这类“能量无法回收”或“回收受限”的工况,现有研究关注相对较少。

研究对象方面,当前再生制动研究多以乘用车、客车、混合动力汽车和双电机电动车为主。这类车辆通常具有较完善的整车控制系统、制动冗余系统和热管理条件。相比之下,小型低速电动车、电动卡丁车、景区观光车、小型清扫车和物流车等车辆结构更简单,电池容量、散热能力和控制冗余能力较弱,在长坡、连续减速或满电下坡等工况下,更容易出现回馈能量无法吸收、母线电压升高和制动稳定性下降等问题。已有研究虽然开始关注小型低速车辆的电子制动与能量回收,但整体仍以常规回收和制动力分配为主,对异常条件下的主动泄放控制涉及较少。

工程中常见的制动电阻或泄放回路多采用电压阈值导通方式,即母线电压超过设定值后接入制动电阻,电压下降后退出。这种方式结构简单、实现方便,但控制过程偏被动,难以根据车速、坡度、目标速度和系统功率状态主动调节泄放功率。泄放功率过小,母线电压仍可能继续升高;泄放功率过大,又可能造成车辆减速过快、制动力变化不平顺或电阻温升过高。

基于上述问题,本文将研究重点放在小型电动车再生制动受限条件下的能量主动释放控制。本文在传统再生制动研究基础上引入制动电阻泄放支路,面向高SOC、满电及电池支路异常断开等工况,研究坡度—车速条件下制动力矩与泄放占空比的匹配关系。通过MATLAB离线优化求解控制参数,并在Simulink中进行动态验证,以期实现电池无法吸收回馈能量时的母线电压抑制、车辆速度稳定和多余能量合理释放,为小型电动车动能释放装置设计提供参考。

### 1.3本文研究内容

本文以小型电动车为研究对象,面向再生制动过程中动力电池处于高荷电状态、满电状态或电池支路异常断开时,回馈能量无法被及时吸收的问题,开展制动能量释放控制方法研究。研究重点不再局限于常规再生制动能量回收效率的提升,而是进一步关注受限工况下如何通过制动电阻支路实现母线电压抑制、车辆减速稳定以及泄放功率合理分配。

本文主要研究内容如下:

(1) 分析小型电动车再生制动与能量释放的基本机理。结合车辆制动过程中的动力学关系,对电机发电特性、动力电池吸收能力、直流母线电压变化以及制动电阻泄放原理进行分析,明确电池无法吸收回馈能量时系统内部的能量流动关系,为后续控制方法建立提供基础。

(2) 建立面向坡度—车速工况的参数求解模型。以道路坡度和车辆速度作为主要工况变量,以泄放支路占空比和工作母线电压作为优化变量,在满足制动安全、母线电压限制和功率平衡等条件下,采用SQP算法在MATLAB中进行离线求解,再通过功率关系得到对应制动力矩,形成占空比曲面和对应制动力矩曲面。



(3) 搭建MATLAB/Simulink仿真模型并进行典型工况验证。按照“MATLAB离线计算、Simulink动态验证”的思路，将离线得到的控制参数表导入仿真模型，通过二维查表输出目标制动力矩和泄放占空比，并对车辆速度、母线电压、泄放功率、电磁转矩以及制动电阻温度等结果进行分析，验证控制方法的作用效果。

(4) 完成能量释放系统硬件原理图及PCB设计。结合控制需求，对主控模块、电源模块、信号采集模块、MOS管驱动模块、CAN通信模块和接口电路进行设计，完成PCB布局，并为后续样机测试和系统验证提供硬件基础。

本文整体研究流程如图1-6所示。通过上述研究，形成一套面向小型电动车再生制动受限工况的能量释放控制思路，可为相关动能释放装置设计和后续工程应用提供参考。

图1-6 论文总体结构框图

## 第二章 小型电动车制动能量流动与动能释放控制的基本原理

### 2.1 电动车制动过程中的能量转换基础

电动车在行驶过程中，动能是借由车轮的旋转表现出来的，其动能取决于整车质量跟车速。车一旦进入制动，那些本来维持它向前运动的机械能，就会逐渐地减少下去。这部分能量并不是凭空消失的，它可以有不同的去处。在传统的机械制动里，车辆动能主要是通过摩擦副转变成为热量，再散到四周的环境里。而对那些具备再生制动能力的电动车来说，有一部分机械能能够经过电机的反向工作，被转换成为电能，随后再被输送进电池，或者其他电气支路之中[16, 17]。

从能量守恒角度看，车辆制动过程并不是单纯的“减速”，而是一个机械能重新分配的过程。设车辆质量为 $m$ ，车速为 $v$ ，则车辆平动动能可表示为

(2.1)

当车辆减速时，动能随时间减小，其变化率可表示为

(2.2)

由于制动过程中 $<0$ ，因此车辆动能持续减少。减少的动能一部分转化为机械摩擦热，一部分通过电机转换为电能，具体比例则取决于电机、电池、功率变换器以及整车控制策略的工作状态。

在车辆动力学分析中，制动作用通常可归结为作用在车轮上的总制动力矩。当车轮等效半径为 $r$ ，总制动力矩为 $T$ 时，其对应的制动力为

(2.3)

若忽略复杂轮胎滑移效应，则车辆纵向动力学可近似表示为

(2.4)

其中，为滚动阻力，为空气阻力，为坡道角。该式表明，车辆减速度不仅与制动力矩有关，还与坡度和阻力条件密切相关。

也正因如此，制动能量的流向和大小并非固定不变，而是随工况变化而变化。

进一步从功率角度分析，制动功率可表示为

(2.5)

其中， $\omega$ 为电机或车轮等效角速度。该关系说明，在相同制动力矩下，车速越高，制动功率越大；而在相同制动功率需求下，车速下降会导致所需制动力矩发生变化。因此，在电动车制动研究中，速度、力矩、功率三者之间始终是相互耦合的基本量。

### 2.2 再生制动下电机发电机理

电机之所以既能驱动车辆，又能在制动时发电，本质上在于电机是一种可逆的机电能量转换装置。当电能输入电机时，电机输出电磁转矩并驱动车辆前进；当外部机械系统反过来拖动电机旋转时，电机又可将机械能转换为电能输出至直流侧，这一过程即为发电运行。

从电磁感应原理看，电机转子在磁场中旋转时，绕组中会产生反电动势。对于永磁同步电机，其反电动势与转速近似满足

(2.6)

其中， $k_e$ 为反电动势系数， $\omega$ 为电机角速度。车辆正常驱动时，逆变器向电机提供电流，电机输出正向电磁转矩；而在再生制动状态下，车轮通过传动系统反拖电机旋转，若控制系统使电磁转矩方向与转速方向相反，则机械功率将由机械侧流向电气侧，电机进入发电工况。

从功率关系看，电机电磁功率可表示为

(2.7)

其中， $T_e$ 为电磁转矩。如图所示：当 $T_e > 0$ 而 $\omega < 0$ 时，机械侧功率通过电机转换后输送至电气侧，此时电机工作于再生制动区间。

因此，再生制动的本质条件可以概括为：车辆具有一定运动速度，电机存在可建立反向电磁转矩的控制条件，且电气侧存在可以吸收该电能的回路。电机四象限运行关系如图2-1所示，其中驱动区和制动区的区别主要体现在转速与转矩方向的组合关系上。

图2-1电机四象限运行图

电动车制动时，电机也可以反过来工作。车辆减速后，车轮会带着电机转动，如果控制器给出反向转矩，电机就会产生制动力。以永磁同步电机为例，控制中通常通过 $q$ 轴电流来调节转矩大小。当转矩方向和转速方向相反时，车辆的一部分机械能会被电机转换成电能，先进入直流母线，之后再根据电池状态进行处理。如果电池还能吸收，这部分能量就回到电池；如果电池不能吸收，就需要通过泄放支路消耗掉。

再生制动虽然能回收能量，但它不是任何时候都能正常发挥作用。电机、逆变器和线路本身会有损耗，轮胎附着条件也会限制制动力。更重要的是，电池并不是一直都能充电。当SOC较高、温度异常或允许充电电流受限时，即使电机还能发电，电能也可能进不了电池。此时如果还继续产生回馈能量，母线电压就可能升高。所以再生制动控制不能只盯着回收多少能量，还要看车辆制动是否稳定，电池和母线电压是否处在安全范围内。

### 2.3 电池受限工况下的能量流动与母线泄放原理

在电动车再生制动过程中，动力电池一般是主要的能量接收端。正常情况下，车辆减速产生的机械能经电机转化为电能，再经过逆变器进入直流母线，最后由母线流向动力电池，实现对电池的充电。其基本能量流动路径如图2-2所示。

图2-2正常工况下再生制动能量流动路径

当电池状态正常，且允许充电电流满足要求时，再生制动产生的电能可以被电池及时吸收，母线侧不会出现明显能量积累，母线电压也能保持在较合理范围内。若忽略线路和器件损耗，电池吸收功率可表示为

(2.8)

其中，为电池端电压，为电池充电电流。由此可以看出，电池能否继续吸收回馈能量，与电池端电压、允许充电电流及当前工作状态密切相关。

实际运行中，电池并不总是处于理想充电状态。当电池处于高SOC、满电、温度过高或过低、内部故障、连接异常、充电电流受限等情况时，电池对回馈能量的吸收能力会明显下降，严重时甚至近似为零。此时车辆虽然仍处于减速或下坡状态，电机也可能继续向直流侧输出电能，但这部分能量已经难以及时进入电池，系统能量流动路径随之发生变化。

从电力电子等效角度看，直流母线可以看作连接电机、逆变器、电池及其他电气支路的中间能量通道。母线本身并不是无限容量的能量接收端，通常可等效为具有一定储能能力的直流支撑环节，这部分储能主要由母线电容体现。母线侧能量变化可表示为

(2.9)

其中，为母线等效电容，为母线电压，为电机发电功率，为电池吸收功率，为其他电气负载功率，为外部耗能支路消耗功率。

当电池异常导致显著减小甚至近似为零时，若系统中又缺少足够的耗能通道，则有

(2.10)

此时电机产生的再生电能大于系统当前能够消耗的功率，多余能量只能暂时积聚在直流母线侧，使母线电容储能增加，表现为母线电压升高。母线电压持续升高会增加逆变器和功率器件的电压应力，严重时还可能触发控制器过压保护，使再生制动过程被迫中断。对于长坡、连续减速或满电下坡等工况，这一问题更加明显。

为避免多余能量长期积聚在母线侧，系统通常需要设置能量释放支路。制动电阻泄放是一种较常见的处理方式，其基本思路是在直流母线侧并联耗能电阻，并通过MOS管等功率开关控制支路通断。当母线侧能量过剩时，控制器使泄放支路导通，多余电能便通过制动电阻转化为热能消耗，从而重新建立系统功率平衡。电池不同状态下的能量流动关系如图2-3所示

(a) 正常行驶状态 (b) 正常再生制动状态 (c) 电池断开状态

图2-3 电池不同状态下再生制动能量流动示意图

若泄放电阻等效阻值为 $R$ ，在理想连续导通条件下，泄放功率可表示为

(2.11)

若考虑PWM开关调制，占空比为 $D$ ，则平均泄放功率可近似表示为

(2.12)

该式说明，泄放支路的耗能能力同时受到母线电压、等效电阻和占空比的影响。母线电压越高，在相同电阻下泄放能力越强；占空比越大，制动电阻在一个周期内导通时间越长，平均耗能功率也越大。

对于本文研究的小型电动车来说，能量释放控制并不是简单地把制动电阻接入母线，而是要根据车辆速度、坡度和母线侧功率状态合理调节泄放强度。若泄放功率过小，母线电压仍可能继续升高；若泄放功率过大，又可能带来制动力变化过快、车辆减速不平顺以及电阻温升过高等问题。因此，后续需要进一步分析机械侧输入功率、电气侧耗能功率和车辆减速过程之间的关系，为控制参数求解提供依据。

#### 2.4 动能释放控制中的功率平衡关系

动能释放控制之所以重要，根本原因在于车辆机械侧和电气侧存在动态耦合。车辆在坡道、减速和再生制动过程中，机械能的流入速度并不是恒定不变的，而耗能支路的释放能力也会随着母线电压和控制量变化而变化。因此，仅靠固定电阻或固定占空比并不能在所有工况下维持理想的功率平衡。

从坡道工况看，车辆重力沿坡向分量所对应的机械输入功率可表示为

(2.13)

若再考虑车辆主动减速，还需要额外提供使车辆动能下降的功率。设车辆减速度大小为 $a$ ，则对应的附加制动功率为

(2.14)

于是，系统在制动过程中所需要处理的总机械功率可表示为

(2.15)

当电池可正常吸收时，这部分功率中的一部分可以进入电池；当电池不能吸收时，则必须由其他电气支路承担。若主要依靠耗能电阻，则需要满足

(2.16)

即

(2.17)

该关系式是动能释放控制中的一个关键功率平衡表达式。它揭示了以下几点基本规律：

- (1) 坡度越大、车速越高，重力输入功率越大，系统需要更大的耗能能力。
- (2) 在相同坡度下，如果希望车辆减速更快，则附加制动功率增大，对应的耗能需求也随之提高。
- (3) 当车速降低时，尽管重力功率和减速功率都可能下降，但为了维持相应制动力矩，控制量未必同步减小，因为耗能能力还受到母线电压变化影响。

(4) 若 $P_{brake} > P_{resistor}$ ，则多余功率将继续堆积在母线侧，导致母线电压上升；若 $P_{brake} < P_{resistor}$ ，则母线侧储能会被持续消耗，母线电压趋于下降。

因此，动能释放控制不能只看泄放支路是否接通，而要重点关注功率是否匹配。控制目标也不是让制动电阻一直以最大功率工作，而是根据车速、坡度和母线电压等状态，调节泄放强度，使车辆机械侧输入功率和电气侧消耗功率尽量保持平衡。

#### 2.5 SQP算法基本原理

序列二次规划 (Sequential Quadratic Programming, SQP) 是一种常用的非线性约束优化方法。它的基本思路是，在当前迭代点附近，把原本较复杂的非线性问题近似成一个二次规划问题，先求出当前步的搜索方向，再不断更新变量，使结果逐渐接近最优解。

图2-4 序列二次规划算法原理框图

一般形式的非线性约束优化问题可写为

(2.18)

其中，为待优化变量，为目标函数，和分别为不等式约束和等式约束。



SQP方法通常基于拉格朗日函数

(2.19)

在第次迭代时，于当前点 $k$ 附近构造一个二次规划子问题：

(2.20)

其中，为搜索方向，为拉格朗日函数Hessian矩阵的近似。求得后，再通过步长搜索更新变量：

(2.21)

上述过程不断重复，直到结果满足收敛要求。

SQP方法适合求解带约束的非线性优化问题，尤其适用于目标函数较复杂、约束条件较多的情况。它在每次迭代时都会根据当前点重新构造近似问题，并更新搜索方向，所以在工程计算中具有较好的求解稳定性。对于本文研究的制动力矩、车速、母线电压和泄放占空比等变量耦合问题，直接用解析方法求解较困难，将其转化为约束优化问题后，采用SQP方法进行离线计算更便于实现。

对车辆制动和能量管理问题来说，很多变量之间并不是独立的。例如，制动力矩会影响车辆减速度和车速变化，车速又会影响功率需求，而母线电压和占空比共同决定泄放支路的耗能功率。直接用解析方法求解这类问题比较困难，因此本文将其转化为带约束的非线性优化问题，并采用SQP方法进行离线求解。

### 第三章 基于MATLAB/Simulink的能量释放系统仿真

#### 3.1 软件介绍

本课题仿真实验采用MATLAB/Simulink作为主要仿真平台。MATLAB具有较强的数值计算、矩阵运算和程序实现能力，可用于完成相关数学模型建立、控制量离线计算以及仿真数据处理与分析。Simulink采用图形化建模方式，能够方便地构建车辆、电机、动力电池、直流母线及能量释放支路等模块的系统模型，并对系统运行过程进行仿真分析[18-21]。

#### 3.2 总体研究思路与仿真模型构建

从整体研究思路来看，本文采用“MATLAB离线优化、Simulink动态验证”的方式开展仿真。也就是说，先在MATLAB中根据坡度和车速等工况参数，利用SQP算法求解不同工况下的最优占空比和最优制动力矩，再将计算结果整理成二维查表数据，导入Simulink仿真模型中调用。这样可以避免在Simulink动态仿真过程中反复执行优化求解，减少计算量，也能让控制规律的生成和系统动态验证两个环节更加清楚。

本文仿真模型建立在永磁同步电机双电流环控制系统基础上。模型中设置，并取消速度外环，采用直接输入的方式控制电机输出转矩，从而近似实现转矩制动控制。仿真中主要参数见表3.1。

表3.1 仿真关键参数设置

序号	项目	单位	数额
1	整车质量	kg	160
2	电池电压	V	48
3	电机类型	/	永磁同步电机
4	极对数	/	4
5	泄放电阻阻值	$\Omega$	1
6	电池初始SOC	/	99.99
7	泄放电阻比热容	J/kg	447
8	车轮半径	m	0.1
9	车轮传动比	/	1

系统总体仿真模型如图3-1所示。模型中设置两个二维Lookup Table模块，以车辆当前速度和坡度作为查表输入，分别输出离线优化得到的泄放占空比和目标制动力矩。目标制动力矩进一步换算为，作为电机 $q$ 轴电流参考值输入双电流环。控制过程中，与实际反馈电流经PI调节后得到 $q$ 轴电压信号，同时 $d$ 轴电流输出 $d$ 轴电压，两者经过逆Park变换和SVPWM调制后生成六路驱动脉冲信号，输入逆变器控制永磁同步电机。电机在给定负载条件下输出电磁转矩、转子角度、机械转速及三相电流，三相电流再经过Clarke变换和Park变换得到与，形成完整的电流反馈闭环。

图3-1 动能释放系统Simulink总体仿真建模

直流侧电路里，逆变器和动力电池之间并联了母线电容，并且设置了一条由MOS管和制动电阻组成的泄放支路。电池支路那边装有开关，用来模拟电池没法吸收回馈能量的情形，包括高SOC、满电或是连接出了异常这些状态。控制器会查表得出PWM占空比，再去调节MOS管的导通比例。这样制动电阻就按某个强度参与耗能，泄放功率的大小也因此受到调控。模型还根据泄放电阻的参数算出了制动电阻的耗散功率，并把功率值反馈到温度模块（图3-2），用这个来模拟制动电阻在持续工作条件下热量量的积累过程[22, 23]。

图3-2 升温计算仿真建模

#### 3.3 基于MATLAB的离线优化与控制曲面生成

为了避免在Simulink动态仿真过程中反复执行优化求解，本文先在MATLAB中完成离线优化计算。程序以目标速度 $v_f$ 为已知条件，在速度—坡度二维工况空间内逐点建立局部优化问题，求解对应工况下的控制输入。计算完成后，将不同工况点的结果整理为二维查表数据，再导入Simulink模型中进行调用。

本文选取当前车速和道路坡度作为主要工况变量。其中，速度网格取0~30km/h，坡度网格取0~15°。在每一个速度—坡度工况点上，程序结合车辆质量、车轮半径、母线电压范围、减速度限制以及泄放功率约束等参数进行求解，最终得到该工况下较优的泄放占空比和单个电机制动力矩。SQP算法的基本求解流程如图3-3所示。

图3-3 SQP算法求解流程图

##### 3.3.1 优化问题的建立

本文当前离线优化程序并未直接把转矩和占空比分别作为两个独立优化对象，而是将占空比 $D$ 与工作母线电压 $U$ 作为同一个优化问题中的两个决策变量，即

(3.1)

其中， $D$ 为泄放支路占空比， $U$ 为当前工况下用于计算泄放功率的工作母线电压。这样处理的目的是，将泄放功率、车辆减速度和制动力矩之间的关系统一到同一个预测模型中，而不是先单独指定占空比，再反推转矩。

程序采用的基本功率关系为

(3.2)

(3.3)

其中， $P_{\text{brake}}$ 为泄放功率， $P_{\text{in}}$ 为坡道输入功率， $R$ 为泄放电阻阻值， $m$ 为整车质量， $g$ 为重力加速度， $v$ 为车辆速度， $\theta$ 为道路坡度角。这里的 $v$ 在计算中换算为m/s。

当泄放功率大于坡道输入功率时，多余部分相当于车辆减速所消耗的功率，可得到参考减速度

(3.4)

对应的总制动力矩可表示为

(3.5)

其中， $r$ 为车轮半径。由于本文仿真模型中采用单个电机转矩作为控制输入，程序会根据系统结构进一步得到单个电机所需制动力矩 $T_b$ ，并将其换算为后续电机控制所需的 $i_{\text{qref}}$ 。

车辆速度在预测窗口内按下式递推：

(3.6)

由上述关系可以看出，占空比并不是孤立决定泄放强度的量，转矩也不是额外单独指定的量。占空比改变后，泄放功率会发生变化，车辆减速度和所需制动力矩也会随之改变。因此，本文将 $D$ 和 $U$ 放在同一优化问题中求解，再通过功率平衡和速度预测关系得到对应转矩，这样能够使控制量之间的关系更加一致。

### 3.3.2 参考值与初始点构造

为了提高SQP算法的求解效率，程序在每个工况点求解前会先构造一个具有物理意义的初始点。具体来说，先根据当前速度与目标速度之间的差值估算参考减速度 $a_{\text{ref}}$ ，再结合速度相关关系给出参考工作母线电压 $U_{\text{ref}}$ ，最后根据参考泄放功率反推出参考占空比 $D_{\text{ref}}$ 。

参考占空比可由下式得到：

(3.7)

并将其限制在 $0 \sim 1$ 的范围内。这样得到的并不是最终优化结果，而是当前工况下一个较合理的初始猜测值。与完全随机给定初始值相比，这种方式能让算法从更接近实际控制需求的位置开始搜索，减少无效迭代，也能降低求解结果不稳定的可能。

从实际意义看，车辆速度高于目标速度较多时，系统需要较大的减速度，泄放支路也需要具备更强的耗能能力；当车辆接近目标速度后，参考减速度降低，泄放占空比和制动力矩也应逐渐向稳态值靠近。初始点的构造正是围绕这一控制规律展开的。

### 3.3.3 目标函数构造

在目标函数设计上，本文重点考虑速度跟踪性能和控制量合理性两个方面。程序中首先通过预测模型计算未来短时窗口内的速度响应，再以该响应与目标速度之间的偏差构造全程速度跟踪项：

(3.8)

为了使车辆最终能够尽量稳定在目标速度附近，目标函数中还设置了末端速度误差项：

(3.9)

其中， $v_f$ 为目标速度， $v(N)$ 为预测窗口末端速度。前者用于约束整个减速过程，后者用于强调末端速度是否能够靠近目标值。

除速度项外，程序还设置了占空比参考偏差项和工作电压参考偏差项：

(3.10)

(3.11)

这样可以避免优化结果过度偏离当前工况下的物理参考值，使控制量变化更加平稳。程序还对母线等效能量变化和占空比幅值进行适当约束，避免出现母线电压取值过高或占空比无意义增大的情况。

综合来看，目标函数并不是单纯追求某一个变量最大或最小，而是在“速度能够收敛到目标值”和“控制输入保持合理”之间寻找平衡。因此，本文所称的最优占空比和最优转矩，是在当前模型、目标函数和约束条件下得到的综合较优结果，并不是脱离约束的绝对最优值。

### 3.3.4 约束条件设置

为了保证求解结果能够用于实际系统，程序中设置了明确的边界约束和非线性约束。占空比的取值范围为

(3.12)

工作母线电压限制为

(3.13)

其中， $U_{\text{min}}$ 和 $U_{\text{n}}$ 分别表示母线电压允许范围的下限和上限。上述边界约束可以保证优化得到的控制输入始终处于系统可实现范围内。

非线性约束主要根据预测窗口内的计算结果设置。在整个预测过程中，单个电机制动力矩不能超过电机允许上限，车辆减速度也不能超过设定的最大减速度，同时还需要避免出现明显的反向加速趋势。这样处理是为了使求解结果不仅在数学上满足条件，带入仿真模型后也能保持较平顺的速度和转矩响应。

这些约束并不是在求解完成后再单独检查，而是在SQP求解过程中直接参与计算。也就是说，每一个工况点得到的结果，都是在占空比、母线电压、转矩和减速度等限制条件下求得的。

### 3.3.5 控制曲面的生成与输出

在完成单个工况点求解后，程序将该点对应的最优占空比、单个电机制动力矩以及相关中间结果分别存入对应数据表。随后对全部速度—坡度网格进行遍历，即可得到完整的最优占空比曲面和最优转矩曲面。

最终，程序将速度网格、坡度网格、最优占空比表、最优转矩表数据输出至MATLAB工作区，并进一步保存为后续仿真所需的数据文件。这样处理后，Simulink在运行过程中不需要再次执行SQP求解，只需根据当前坡度和当前速度进行二维查表，即可得到对应控制量。

以目标速度 $v_f=15\text{km/h}$ 、初始速度 $v_{\text{start}}=30\text{km/h}$ 为例，离线优化得到的最优占空比曲面和单个电机最优转矩曲面分别如图3-4和图3-5所示。



图3-4 30km/h减速至15km/h工况下最优占空比曲面

图3-5 30km/h减速至15km/h工况下单个电机最优转矩曲面

从图中可以看出，占空比和转矩均随坡度、速度变化而改变，并不是固定值控制。坡度较大时，车辆下坡输入功率增加，系统需要更高的泄放能力和更大的制动力矩来维持目标速度；车辆速度逐渐接近目标速度后，转矩和占空比逐步向稳态控制量过渡。该结果与车辆下坡减速和稳速控制需求基本一致，说明离线优化得到的控制曲面具有一定工况适应性。这一节主要是把后续仿真需要用到的控制参数先算出来。程序先给定目标速度，再把坡度和当前车速作为输入工况，对占空比D和工作母线电压U进行求解。求出这两个量之后，再根据功率关系和速度变化情况得到对应的制动力矩。这样处理后，就可得到一组随车速和坡度变化的占空比表和制动力矩表。

在MATLAB中完成控制曲面生成后，将离线得到的占空比表和制动力矩表导入Simulink模型。仿真过程中，二维查表模块根据当前坡度和车速输出对应控制量，此时Simulink只负责动态验证，不再参与优化求解。本文主要观察车辆速度、母线电压、电磁转矩、泄放占空比、泄放功率和制动电阻温度等变化，用来判断该控制方法在典型工况下的实际效果。

### 3.4 基于Simulink的典型工况结果验证

为验证离线优化查表控制在不同极限条件下的适应性，本文在MATLAB中完成控制曲面生成后，将最优占空比表和最优转矩表导入Simulink模型，并通过二维查表模块按照当前坡度和车速实时调用控制量。此时，Simulink不再参与优化求解，主要用于验证离线优化结果在动态模型中的实际控制效果。验证工况主要包括两类：一类是假设坡道足够长、车辆需要在长时间内下坡过程中完成减速并稳定在目标速度附近，用于考察控制方法在连续泄放和稳速条件下的表现；另一类是坡度较大的陡坡工况，用于模拟短时间内系统承受较高回馈功率输入的极限情况，重点观察控制方法在高负荷条件下对母线电压和泄放功率的调节能力。验证过程中，本文主要观察车辆速度、母线电压、电磁转矩、泄放占空比、泄放功率和制动电阻温度等变量的变化情况，从而判断该控制方法是否能够满足减速稳定、母线电压抑制和能量释放的要求。

#### 3.4.1 3°坡道减速并稳定到15km/h工况

(a) 车速 (b) 母线电压

(c) 电磁转矩 (d) 泄放占空比

(e) 泄放功率与重力功率 (f) 制动电阻温度

图3-6 3°坡道减速至15km/h工况响应曲线

为了检验控制方法在缓坡长坡下的效果，本文用3°坡道作为长坡工况做了仿真，目标车速定在15km/h。这个坡度不大，下坡时重力输入的持续功率有限，正好适合用来观察方法在常规长坡减速和稳速过程中的调节表现。仿真结果见图3-6。

从车速曲线上看，车辆初始速度约30km/h。在控制作用下，速度逐渐下降，大约9s后稳定在15km/h左右。减速过程平稳，没有出现大的超调，也未发生持续的振荡。电磁转矩在前段一直维持反向制动状态，之后随着车速降低而慢慢减小，最终停在较小的制动力矩上。这一规律与缓坡长坡工况的需求是对应的：前期要靠较大的制动力矩来让车辆减速，后期只需提供一个能与坡道输入相平衡的制动力，车速就能维持在目标值附近。

仿真刚开始时，母线电压比较高。泄放支路一投入工作，电压就渐渐降了下来，最后稳定在约30V。这表示电池不再吸收回馈能量的时候，泄放支路能够及时把多余的能量消耗掉，避免母线电压一直往上升。占空比在前期做过小幅调整，随后逐渐升高，稳定在0.4附近。看得出，泄放支路并不是用一个固定的占空比在运行，它会照着车速和功率的需要去调节。3°坡道输入的功率本来就小，系统要求的泄放强度整体不高，因此母线电压和车速都可以保持稳定。

分析功率曲线可以发现，减速刚开始时，泄放功率大于重力功率。这个阶段系统需要额外地去消耗车辆的动能，所以车速才会不断下降。当车辆靠近目标速度时，两者的差值慢慢缩小，到了后期基本进入平衡状态，车速也就跟着稳住了。制动电阻的温度从初始值开始逐步上升，到15s时到了约60℃。这样的温升处在可接受的范围以内，说明在这个工况下，泄放支路虽说一直在工作，但热负荷并不算高。

综合来看，在3°坡道工况下，车辆能够从30km/h平稳减速至15km/h附近，母线电压没有持续上升，泄放功率也能逐渐与坡道输入功率接近平衡。仿真结果说明，离线优化得到的转矩和占空比查表量在缓坡长坡条件下能够起到一定的速度控制和能量释放作用。

#### 3.4.2 10°坡道减速并稳定到25km/h工况

(a) 车速 (b) 母线电压

(c) 电磁转矩 (d) 泄放占空比

(e) 泄放功率与重力功率 (f) 制动电阻温度

图3-7 10°坡道减速至25km/h工况响应曲线

为进一步观察控制方法在较大坡度下的表现，本文选取10°坡道作为陡坡工况进行仿真，目标速度设定为25km/h。与3°长坡工况相比，该工况下坡道重力分量明显增大，车辆下坡过程中输入到系统的机械功率更高，对电机制动力矩和泄放支路功率调节能力提出了更高要求。需要说明的是，该工况主要用于验证控制方法在短时间高负荷条件下的适应性，并不等同于车辆长期连续运行工况。仿真结果如图3-7所示。

从车速曲线可以看到，车辆初始速度约为30km/h，在控制作用下较快下降，并在约3s后稳定在25km/h附近。相比3°长坡工况，该工况达到目标速度的时间更短，主要是因为目标速度较高，所需减速幅度较小。车速稳定后整体波动较小，说明查表得到的制动力矩能够与坡道输入功率形成较好的平衡。电磁转矩在初期保持较大的反向制动值，随后随着车速接近目标逐渐减小，最终稳定在约 $-14N \cdot m$ 附近。由于10°坡道输入功率较大，稳速阶段仍需要较高制动力矩，这也符合陡坡工况的实际需求。

母线电压在仿真初期峰值接近85V，随后在泄放支路作用下下降，并稳定在约58V左右。与3°工况相比，10°工况下母线电压峰值更高，说明坡度增大后回馈能量输入更强，母线更容易被抬升。后续电压没有继续上升，而是逐渐进入稳定区间，说明泄放支路能够承担较大的能量释放任务。占空比在初期明显上升，随后稳定在约0.55左右，明显高于3°工况，说明坡度较大时系统需要提高泄放支路的工作强度。

看功率曲线的话，初期的泄放功率接近2800W，重力功率的峰值大约在2200W的样子。在减速的那个阶段，泄放功率是比重力功率要大的，车辆动能就因此被进一步消耗掉，车速也就可以降下来。等进到稳速的阶段以后，两者慢慢地靠近，系统差不多就达到了功率的平衡。这个功率水平，跟单个电机大概500W的额定功率比起来，是要高出不少的，它也超过了单个电机约1200W的峰值功率范围。因此，把这个结果当作一种短时极限工况下的控制验证来看，而不应该把它理解



成长期 连续工 作的那 种状态。

制动电阻温度在15s内持续升高，最终接近130℃。相比3° 工况，陡坡下电阻温升更明显，说明较大坡度下泄放支路热负荷增加较多。实际应用中，如果车辆长时间处于类似工况，需要结合电机允许功率、制动电阻额定功率、散热条件以及温度保护策略进行限制，避免电机和电阻长期处于过载状态。

总体来看，在10° 坡道工况下，车辆能够由30km/h减速并稳定在25km/h附近，母线电压在出现较高峰值后逐渐回落并保持稳定。仿真结果说明，离线优化得到的转矩和占空比查表量在较大坡度下仍能发挥作用；同时从功率和温升结果也可以看出，该 工况已经接近系统高负荷边界，更适合作为控制方法的短时极限验证。

#### 3.4.3 不同初始速度与目标速度下的扩展性

除了前面说到的那两类比较典型的工作情况，本文的方法还具备另外一种能力。就是去修改MATLAB离线程序当中所设定的初始速度和目标速度这些参数，这样便可以生成跟新参数对应的那个控制曲面。这个新的曲面能够再被拿到Simulink 里面 去，进行下一步的验证工作。所以在第三章那里展示出来的“30km/h 到 15km/h”那个曲面，其实只是作为一个 有代 表性 的例 子来 用的，并不是只能够被限制在某一个固定的速度组合上。

这一特点说明，本文提出的离线求解—在线验证方法具有较好的可扩展性。不同道路条件和不同控制目标下，只需重新设置参数并生成新的查表数据，无需改动Simulink主模型结构，即可完成新的工况验证。这对于后续工况扩展、参数对比以及 控 制 规律迭代都具有实际意义。

### 第四章 能量释放系统电气原理图及硬件设计

本章基于前面的小型电动车刹车动能回收与释放控制系统理论分析，进行了刹车电阻泄放硬件电路设计，包括高压电源输入、电压与温度采集、CAN通信、电机控制以及核心泄放模块等关键部分，为后续控制系统的实现提供硬件基础。系统原理图设计与PCB布局均在立创EDA平台上完成，系统总体电气结构如图4-1所示。

图4-1 总体电气结构图

#### 4.1 电源系统设计

图4-2电源系统原理图

电源系统原理图如图4-2所示。本系统以48V电池电压作为输入电源。由于主控芯片和采样、通信等电路都属于低压控制部分，因此需要先将48V降压为5V，再由5V稳压得到3.3V。其中，5V主要作为后级稳压电路的输入，3.3V用于给STM32主控及相关 低 压控制电路供电。

前级降压部分采用U3018芯片实现，外围由电感L1、二极管D1和滤波电容等器件组成Buck降压电路，用于完成48V到5V的转换。

电感L1主要用于储能和平滑电流，二极管D1起续流作用，输出端电容用于减小纹波，使输出电压更加稳定。图中的D2及相 关 阻 容器件位于反馈和保护支路中，用于辅助电源电路稳定工作。

得到5V电压后，电路再通过AMS1117-3.3输出3.3V，为主控芯片和低压采样、通信电路供电。稳压器输入端和输出端均接有滤波电容，用于减小电源波动。这样处理后，控制板可以由48V输入得到所需的5V和3.3V电源，满足系统低压部分的基本供电要求。相关器件参数主要参考U3018和AMS1117的数据手册，并结合控制板实际需求进行选取。

#### 4.2 主控模块设计

图4-3主控模块原理图

主控模块原理图如图4-3所示。主控模块采用STM32F042F6P6TR作为核心控制器，负责采集母线电压和温度信号，并输出MOS控制信号，同时完成CAN通信和程序调试等功能。该芯片工作电压为3.3V，因此其VDD和VDDA均接入3.3V电源。

在外围电路中，R4与C7构成复位电路，用于保证上电后单片机能够正常复位启动；R5将BOOT0引脚下拉到地，使芯片默认从Flash启动。时钟部分采用8MHz外部晶振Y1，配合C11、C12构成振荡电路，R6作为反馈电阻用于提高起振稳定性。C8、C9、C10接在3.3V电源侧，主要起去耦和滤波作用，用来减小电源噪声对主控工作的影响。

接下来是IO口分配。PA0接入母线电压采样信号VBUS\_ADC，PA4接入温度采样信号TEMP\_ADC，PB1输出MOS\_CTRL信号，用于控制后级能量释放支路。PA13和PA14作为SWDIO和SWCLK，用于程序下载和调试；PA9和PA10分别连接CAN\_RX和CAN\_TX，用于外部通信。通过这些引脚分配，主控芯片可以完成电压和温度采集、MOS控制信号输出以及CAN通信等基本功能。

#### 4.3 信号采集与MOS管控制模块设计

图4-4信号采集与MOS管控制模块原理图

信号采集与MOS管控制模块原理图如图4-4所示。该部分主要包括温度采样、母线电压采样和泄放回路MOS控制。温度采样中，TEMP信号通过上拉电阻R7接至3.3V，并通过电容C13接地滤波，之后送入TEMP\_ADC接口。母线电压采样采用电阻分压方式，由R8和R10构成分压网络，将高压侧电压降低到主控芯片能够采集的范围，再送入VBUS\_ADC接口。R9主要用于限流和输入保 护，避 免 高压信号直接进入主控芯片。

MOS控制部分采用“光耦隔离+三极管驱动”的结构。主控输出的MOS\_CTRL信号先加到光耦U5输入侧，R11为光耦输入限流电阻；光耦输出侧导通后，经R13送入三极管Q2基极，R14用于下拉，R15用于稳定三极管基极电位。Q2导通后，将驱动信号送到功率MOS管Q1，实现对释放支路的控制。Q1选用Nmos管——SUM90N10，其源漏两端分别接在HVIN与泄放支路中，用于控制释 放 电 阻 是否接入电路。R12接在光耦输出侧上拉到3.3V，R16与R17则接在MOS管控制支路上，主要用于稳定驱动状态并辅 助 MOS 可靠 关断。

这种结构的优点是控制部分与高压侧之间通过光耦进行了隔离，可以减小高压开关过程对主控电路的影响；同时利用三极管对光耦输出信号进行放大，使其能够满足MOS管开关控制的需要。整体电路结构比较直接，便于实现，也符合本系统对 能 量 释 放 控制的基本要求。

#### 4.4 CAN收发模块设计

图4-5 CAN收发模块原理图

CAN收发模块原理图如图4-5所示。CAN通信部分采用SN65HVD230作为收发器，用于完成主控芯片与CAN总线之间的电平转换和差分信号收发。主控芯片的CAN\_TX和CAN\_RX分别与收发器相连，其中TXD用于发送，RXD用于接收，VCC接3.3V电源，C14为电 源 去耦电容，用于减小电源噪声对通信电路的影响。

在总线侧，CAN\_H和CAN\_L之间采用分裂终端结构。R21和R22均为60Ω，中间节点通过C15接地，等效形成120Ω终端匹配，同时对总线共模干扰也有一定抑制作用。R20和R23为0Ω电阻，主要作为预留调试位置，便于后续根据通信情况进行调整。U4的S引脚通过R18接地，R19预留未接入，对应高速通信模式。CAN\_H和CAN\_L端口处增加了PESD1CAN静电保护器件

，用于抑制外部静电冲击和瞬态过压，提高通信接口的可靠性。

#### 4.5 接口与辅助电路设计

图4-6 接口与辅助电路设计原理图

**接口与辅助电路原理图如图4-6所示。**该部分主要包括外部接口、程序下载接口和状态指示电路。P3为CAN通信接口，引出CAN\_H、CAN\_L和GND，便于与外部设备进行总线连接；P5为主控芯片下载调试接口，引出DIO、CLK、3.3V和GND，可用于程序烧录和在线调试。P4为电压采样输入接口，接入VDC和GND；P6为温度采样输入接口，用于将外部温度信号送入控制板。P7、P8、P9分别用于引出高压输入HVIN、高压地H\_GND和释放电阻接口RELEASE\_RES，为系统与外部功率回路连接提供接口。

在辅助电路部分，D3和D4为状态指示灯，分别串联限流电阻R24和R25，用于显示系统上电和运行状态。其中一只指示灯直接接至3.3V电源，另一只由LED信号控制，可用于观察主控输出状态，方便调试和故障判断。P10~P13为预留接口，可用于后续功能扩展或测试。底部的R26和L2设置在两侧地之间，用于低压控制地与高压功率地之间的连接和调试，其中R26提供直流参考通路，L2用于改善两侧地之间的高频连接特性，减小功率开关过程对控制电路的影响。

#### 4.6 PCB设计

图4-7 PCB设计原理图

图4-8 PCB实物图

完成系统原理图后，本文对控制板进行了PCB布局与布线设计。设计时主要考虑了电源电流路径、高低压区域隔离、开关干扰和散热等问题，使控制板能够满足基本工作要求。系统PCB布局及实物图如图4-7和4-8所示。

在PCB布局中，整板按照电路功能和电压等级进行了分区。左侧主要放置主控、采样和CAN通信等低压控制电路，右侧主要放置电源输入、MOS控制和能量释放等高压及功率部分。这样布置可以尽量拉开高低压电路之间的距离，减少高压侧开关动作对低压控制电路的影响。板上两侧地分别进行铺铜处理，并通过电阻、电感构成的连接网络相连，在保证参考地关系的同时，降低高压侧噪声直接耦合到低压侧的可能性。

在电源和泄放器件附近，较大电流经过的区域采用了较大面积铺铜处理，例如高压输入端、MOS控制支路和泄放电阻连接区域。这样可以减小走线电阻和压降，提高电流承载能力，也有利于热量扩散。对于电流较大的走线，布线时尽量加宽线宽，并减少不必要的绕线，从而降低导通损耗。

开关电源部分对周围布局也进行了处理。电感下方未进行铺铜，并尽量避免在其下方和周围布置信号线，主要是为了减小电磁场对采样和控制信号的影响。整板铺铜区域设置了较多接地过孔，用于连接上下层铜皮，降低接地阻抗，并改善电流回流路径。整体来看，该PCB在高低压隔离、功率回路布线和抗干扰方面进行了基本处理，能够满足本系统控制板的使用要求。

### 第五章 总结与展望

#### 5.1 工作总结

本文针对小型电动车再生制动过程中，动力电池处于高SOC、满电或电池支路异常断开时，回馈能量难以及时吸收、直流母线电压容易升高的问题，开展了制动能量释放控制方法研究。

论文分析了小型电动车制动过程中的能量转换关系、电机再生发电机理以及电池受限工况下的能量流动特性，明确了电池无法吸收回馈能量时，通过制动电阻泄放支路释放多余能量的基本思路。

在控制方法方面，以道路坡度和车辆速度作为主要工况变量，以单个电机制动力矩和泄放支路占空比作为控制量，建立了基于SQP算法的离线优化求解方法。通过MATLAB计算不同工况下的最优制动力矩曲面和最优占空比曲面，为后续仿真控制提供查表数据。

仿真验证方面，用MATLAB/Simulink搭了一个能量释放系统的模型。离线优化得到的数据被导入进去，控制量靠着二维查表来实时调用。典型工况跑下来的结果说明，这个方法做到了制动力矩和泄放占空比的协调控制。车速会慢慢收敛到目标值附近，母线电压升高的情况也被抑制住了一些。

硬件设计方面，完成了系统的电气原理图和PCB设计。电路主要包含了电源、主控、信号采集、MOS管驱动与泄放控制、CAN通信还有接口这些模块。这就为后面的样机调试和实车验证，提供了硬件上的基础。

总体来看，本文完成了理论分析、离线优化、仿真验证和硬件设计等工作，形成了一套面向母线电压抑制和车辆稳速制动的能量释放控制思路。需要指出的是，本文仿真中的陡坡工况主要用于短时极限验证，后续仍需结合样机测试和实车数据进一步完善工程验证。

#### 5.2 工作展望

**由于研究时间及实验条件的限制**，所以这篇文章的工作还是留了一些做得不够的地方。接下来可以把不同车辆的质量、不同制动工况下面系统的运行特性都考虑进来，去做更进一步的验证。另外，现在的控制策略也还可以在上面接着做些优化。试着把车辆动力学特性跟能量管理策略绑得更紧密一点，**把系统的能量利用效率提上去**，同时也让运行稳定性变得更好。

#### 参考文献

- 梅洁阳, 汪伟, 薛洪信. 电动汽车制动能量管理研究[J]. 上海电气技术, 2024, 17(2):26-31+7.
- QIU C Q, WAN X S, WANG N, et al. A novel regenerative braking energy recuperation system for electric vehicles based on driving style[J]. Energy, 2023, 283:129055.
- 朱腾, 魏洪元, 徐京京. 新能源汽车再生制动系统能量回收特性研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(10):108-110.
- SALARI A H, MIRZAEINEJAD H, MAHANI M F. A new control algorithm of regenerative braking management for energy efficiency and safety enhancement of electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276:116564.
- PARK Y, PARK S, AHN C. Performance potential of regenerative braking energy recovery of autonomous electric vehicles[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2023, 21(5):1442-1454.
- ATANGULOVA A, KOMSHILOV K, SENNIKOVA A, et al. Method for recovery of vehicle braking energy with electric drive powered by DC network and device for its implementation[J]. Transportation Research Procedia, 2023, 68:967-972.
- 李祺灏. 纯电动代步车电子刹车系统及能量回收策略研究[D]. 电子科技大学, 2021.

DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.002875.

秦亚宁. 纯电动汽车复合制动能量回收优化控制策略研究[D]. 盐城工学院, 2025.

DOI:10.44381/d.cnki.gycit.2025.000274.

周壮. 微型电动车制动能量再生模拟试验系统技术研究[D]. 山东交通学院, 2024.

DOI:10.27864/d.cnki.gsjtd.2024.000234.

周正钊. 电动汽车复合再生制动系统控制策略研究[D]. 湘潭大学, 2024. DOI:10.27426/d.cnki.gxtdu.2024.002502.

孙龙, 王文皓, 孙颖, 等. 低温环境下电动汽车制动回收影响因素分析[C]//第三十二届中国汽车工程学会年会论文集. 2025:482-487.

崔俊杰, 肖阳, 王海峰. 纯电动汽车自适应能量回收技术的优化及试验研究[J]. 专用汽车, 2025(7):3-6.

DOI:10.19999/j.cnki.1004-0226.2025.07.002.

孙晓霞, 王义春, 邵春鸣, 等. 混合动力车用制动电阻散热性能试验研究[J]. 车辆与动力技术, 2015(3):25-29.

DOI:10.16599/j.cnki.1009-4687.2015.03.006.

吴志东. 机车制动电阻装置散热设计探讨[J]. 机车电传动, 2010(5):75-76.

DOI:10.13890/j.issn.1000-128x.2010.05.016.

江峰, 郝清亮, 张波, 等. 基于Icepak的制动电阻模块优化设计[J]. 船电技术, 2025, 45(4):20-23.

DOI:10.13632/j.meee.2025.04.002.

HE Q, YANG Y, LUO C, et al. Energy recovery strategy optimization of dual-motor drive electric vehicle based on braking safety and efficient recovery[J]. Energy, 2022, 248:123543.

LI L, ZHANG Y B, YANG C, et al. Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 111:299-314.

李中望, 徐婉婷, 林伟. 一种基于MATLAB的电动车回馈制动方法分析与研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(3):326-330. DOI:10.13501/j.cnki.42-1569/n.2019.09.020.

李鹏伟, 李海鸽, 刘昕, 等. 基于SimuLink的纯电动汽车建模与仿真[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(22):5-11+23.

DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2025.022.002.

汤高攀, 刘国平, 戴海鹏. 基于CRUISE的某纯电动汽车建模与仿真[J]. 汽车零部件, 2025(7):10-13.

DOI:10.19466/j.cnki.1674-1986.2025.07.003.

张宗杰, 张昭斌, 张善炜, 等. 基于AVL CRUISE的纯电动轻型商用车性能仿真[J]. 重型汽车, 2025(4):9-10.

李清明, 胡官阳, 徐铮铮, 等. 电动汽车集成模块化热管理系统设计与性能测试[J/OL]. 机械工程学报, 1-10[2026-01-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20251106.1623.006>.

来杰, 李红. 电动汽车驱动电机零部件的结构优化与热管理[J]. 汽车电器, 2025(11):24-26.

DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2025.11.060.

致 谢

感谢父母的支持, 朋友们的帮助。

感谢速羽动力公司和东南大学提供的环境和资源, 指导老师们的指导。

感谢一直努力的自己。

东南大学本科毕业设计(论文)

6

(

I

)

说明: 1. 总文字复制比:被检测文献总重复字符数在总字符数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比:去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字符数在总字符数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比:去除系统识别为作者本人其他文献后, 计算出来的重合字符数在总字符数中所占的比例

4. 单篇最大文字复制比:被检测文献与所有相似文献比对后, 重合字符数占总字符数比例最大的那一篇文献的文字复制比

5. 复制比按照“四舍五入”规则, 保留1位小数;若您的文献经查重检测, 复制比结果为0, 表示未发现重复内容, 或可能存在的个别重复内容较少不足以作为判断依据

6. 红色文字表示文字复制部分;绿色文字表示引用部分(包括系统自动识别为引用的部分);棕灰色文字表示系统依据作者姓名识别的本人其他文献部分

7. 系统依据您选择的检测类型(或检测方式)、比对截止日期(或发表日期)等生成本报告

8. 知网个人查重唯一官方网站:<https://cx.cnki.net>