

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.03.006

基于实际场景的电动汽车能量回收优化研究*

林欢,何润,黎炜琛,汪爱军,王哲
(上汽通用五菱汽车股份有限公司,广西柳州 545007)

摘要:为降低整车能耗并提升续航里程,该文以某款纯电动汽车的能量回收系统为研究对象展开研究,通过对比传统电动车的真空助力制动系统和智能制动系统,优化了不同系统的制动能量回收扭矩策略,并分析了两种制动系统的能量回收率。在对中国工况进行分析的基础上引入实际驾驶场景路况,通过仿真分析和台架测试对整车能耗和能量回收率进行了对比。结果表明:中国工况和实际驾驶场景工况智能制动系统的能量回收率比真空助力制动系统分别高1.4%和1.1%,整车百公里电耗分别降低0.7%和0.6%,达到了降低整车能耗的目的。

关键词:电动汽车;能量回收率;ibooster;EVP

中图分类号:U469.72

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)03-0019-04

Research on Energy Recovery Optimization of Electric Vehicles based on Driving Scenarios

LIN Huan, HE Run, LI Wei-chen, WANG Ai-jun, WANG Zhe

(SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd, Liuzhou 545007, Guangxi, China)

Abstract: In order to reduce the vehicle energy consumption and improve the driving range, this paper takes the energy recovery system of a pure electric vehicle as the research object, compares the vacuum assisted braking system (EVP) and intelligent electro-hydraulic braking system (ibooster) of traditional electric vehicles, optimizes the braking energy recovery torque strategies of different systems, and analyzes the energy recovery rates of the two braking systems. On the basis of the analysis of Chinese operating conditions (CLTC-P), the actual driving scenario (R-cycle) road conditions are introduced, and the vehicle energy consumption and energy recovery rate are compared through simulation analysis and bench test. The results show that the energy recovery rate of ibooster under CLTC-P and R-cycle conditions is 1.4% and 1.1% higher than that of EVP, and the power consumption of the vehicle per 100 km is reduced by 0.7% and 0.6% respectively, achieving the purpose of reducing the energy consumption of the vehicle.

Key words: electric vehicles; energy recovery rate; ibooster; EVP

0 引言

近年来,新能源电动汽车以其节能环保、使用成本低等特点正逐渐在汽车市场掀起消费热潮,其与传统能源汽车的销量差距逐渐缩短。但是电动汽车充电时间长、里程焦虑等问题也成为电动汽车全面普及的主要障碍^[1]。提升充电功率、增加电池容量和提高电芯密度成为解决上述问题的首选措施。然而,这些技术成本较高,限制了其大规模应用。

随着汽车电气化和智能化技术的发展,一些低成本、高效的节能措施被逐渐应用到新能源汽车上。其中,制动系统优化成为应用较为普遍的一种措施,它可以将制动能量转化为电能,实现能量高效利用。制动系统分为真空助力制动系统和智能制动系统,真空助力制动系统由于设计简单以及适用范围广已经被广泛应用于电动汽车。智能制动系统兼容智能辅助驾驶以及智能制动力分配,是一种很有前景的电动汽车节能降耗技术^[2-3]。

1 工作原理

1.1 能量回收原理

当电动汽车滑行减速或者踩下制动减速时,驱动电机由电动状态转变成发电状态,电机转子切割磁感线做功产生电能,电能通过逆变器存储于动力电池中,实现能量回收,进而实现对电动车工作效能的提升。有研究表明:与没有能量回收对比,具有能量回收系统的整车续航能力能够提升20%以上^[4]。

1.2 EVP制动原理

真空助力制动系统(Electronic Vacuum Pump, EVP)由真空泵、真空罐、真空泵控制器(ECU)以及真空助力器等组成^[5]。具有EVP系统的车辆在车辆启动以后,真空泵ECU进行自检,如果真空管内的真空度小于设定阈值,则真空压力阀处于工作状态,电动真空泵开始工作。当真空度大于等于阈值,真空泵经过一定的延时后停止工作。待下一次制动消耗真空度后,电动真空泵再次工作,循环往复。即EVP通过

* 收稿日期:2023-11-27

作者简介:林欢(1989-),男,广西玉林人,中级工程师,研究方向:整车动力经济性能集成。

真空助力产生制动。

1.3 ibooster 制动原理

智能制动系统(Intelligent Brake System, 简称 ibooster)由制动液储液罐、制动踏板传感器、制动主缸、电动助力电机和控制单元(ECU)等组成^[6]。当驾驶员踩下制动踏板时,ibooster 系统的制动踏板传感器将制动位移传递给 ECU,助力电机产生助力扭矩。此时,驾驶员输出的制动需求并未直接对制动主缸产生机械推力。助力扭矩通过减速机构的齿轮产生放大作用的推力,推动制动主缸产生制动压力。即 ibooster 通过液压及电机的助力产生制动力。

2 整车动力学分析

当车辆在平直路面行驶时,坡道阻力为零,行驶阻力包括空气阻力,滚动阻力和加速阻力^[7]。根据不同工况,具体分析公式如下。

2.1 驱动工况

当车辆为驱动工况时,根据车辆动力学可得:

$$\frac{T_d i \mu}{r} = mgf + \frac{C_D A}{21.12} u^2 + \sigma ma \quad (1)$$

式中: T_d 是电机驱动扭矩,Nm; i 是主减速器的速比; μ 是传动系统效率; r 是轮胎的滚动半径; m 是车辆的测试质量,kg; g 是重力加速度, m/s^2 ; f 是轮胎滚动阻力系数; C_D 是空气系数; A 是整车迎风面积, m^2 ; u 是整车行驶车速,km/h; σ 是轮胎旋转惯量换算系数; a 是整车的加速度, m/s^2 。

2.2 制动工况

当车辆处于制动工况时,根据车辆动力学可得:

$$T_c + \frac{T_r i \mu}{r} = mgf + \frac{C_D A}{21.12} u^2 + \sigma ma \quad (2)$$

式中: T_c 是机械制动扭矩,Nm; T_r 是电机反拖扭矩,Nm;以上扭矩是负值或者零。

2.3 滑行工况

当车辆处于带档滑行工况时,电机产生反拖制动扭矩,根据车辆动力学可得:

$$\frac{T_r i \mu}{r} = mgf + \frac{C_D A}{21.12} u^2 + \sigma ma \quad (3)$$

式中: T_r 是电机反拖扭矩,Nm; i 是主减速器的速比; μ 是传动系统效率; r 是轮胎的滚动半径; m 是车辆的测试质量,kg; g 是重力加速度, m/s^2 ; f 是轮胎滚动阻力系数; C_D 是空气系数; A 是整车迎风面积; u 是整车行驶车速,km/h; σ 是轮胎旋转惯量换算系数; a 是整车的加速度, m/s^2 。

3 能量回收扭矩控制策略

针对两种不同制动系统的 ESC(Electronic Stability Controller,即车身电子稳定控制系统)匹配标定,需要制定不同的能量回收控制策略,以便兼顾整车减

速过程的驾驶感受以及制动效果,同时保证能量回收效果最大化^[8]。

3.1 滑行工况能量回收扭矩分配

当车辆进入滑行工况,整车控制器(VCU)需要根据当前车速信号请求电机目标扭矩,以便电机控制器执行该扭矩。如果车速较低(小于5 km/h),则不必回收该能量,请求扭矩值为0 Nm。如果车速较大,则根据 ESC 允许的最大扭矩赋值。当车速大于40 km/h,回收扭矩不宜过大,因为回收扭矩过大会导致 ESC 或者 ABS 介入,产生不舒适感。当车速再增加,则回收扭矩需要适当减少,因为高速行驶时,车辆靠惯性滑行的续航价值高于能量回收再行驶的续航^[9]。因此,车辆带档滑行过程的回收扭矩可以查找当前车速表得到,如表1所列。不同车速可以利用线性插值得到。为了避免不同驾驶员的制动习惯导致的差异,该策略不引入不同踏板开度的扭矩差异。

表1 滑行能量回收扭矩

车速/(km/h)	回收扭矩/Nm	车速/(km/h)	回收扭矩/Nm
0	0	40	395
7	120	80	310
20	310	100	225

3.2 制动工况能量回收扭矩分配

当车辆进入制动工况,整车控制器监测到制动踏板开度需求,会请求电机目标扭矩。相对于滑行制动模式,踏板制动模式的制动扭矩需求更大,因此需要赋值更大的回收扭矩。并且车速较低时,就应该达到最大的回收扭矩,以便兼顾制动安全需求^[10]。同样为了避免不同驾驶习惯,该策略未引入不同制动踏板开度的扭矩差异。制动能量回收扭矩如表2所列。

表2 制动能量回收扭矩

ibooster 制动回收扭矩		evp 制动回收扭矩	
车速/(km/h)	回收扭矩/Nm	车速/(km/h)	回收扭矩/Nm
0	0	0	0
10	438	10	64
20	501	20	118
40	466	40	158
80	233	80	122
100	186	100	115

4 整车能耗仿真分析

4.1 仿真参数

以 SGMW 某款纯电动汽车为基础车型研究两种制动系统的消耗和回收能量,该车相关参数如表3所列。

表3 基于 Amesim 的仿真参数

指标项	参数	数值
整车	整备质量/kg	1 100
	主减速比	8.2
	轮胎滚动半径/mm	299
	风阻系数	0.38
	迎风面积/m ²	2.5
最高车速/(km/h)	最高车速/(km/h)	100
	峰值功率/kW	50
	峰值扭矩/Nm	140
驱动电机	峰值转速/(r/min)	8 400
	额定电量/kWh	28
动力电池	额定电压/V	300

4.2 仿真模型

基于 Amesim 软件搭建的整车扭矩分配仿真模型如图 1 所示。将两种制动系统的能量回收控制策略导入模型中,计算不同工况下两种制动系统的回收能量和循环能耗,从而比较两者的能量回收水平。

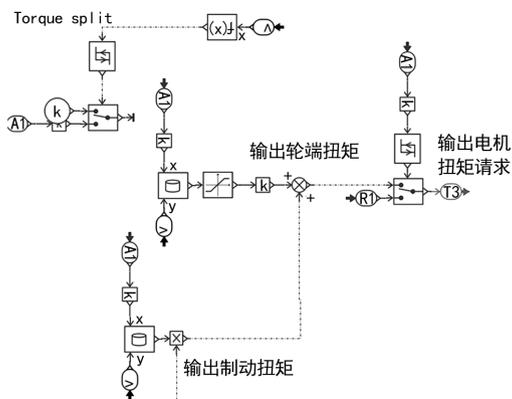


图1 整车扭矩分配仿真模型

4.3 仿真工况

目前国内纯电动乘用车续航认证测试应用的是中国工况(CLTC-P),如图2所示,其包括了低速、中速和高速3个速度区间,平均车速37.5 km/h,总共行驶时间是1 800 s。

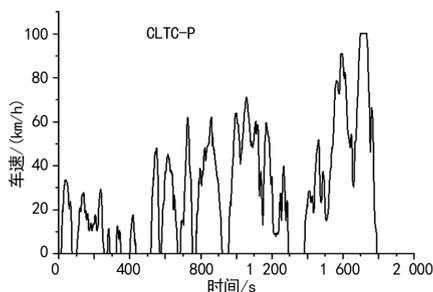


图2 中国工况(CLTC-P)曲线

在此工况的基础上,选取了国内某段典型路况进行仿真,行驶区间包括了中心拥堵路段、城郊快速路以及高速公路,平均车速39.1 km/h,共同构成了实际驾驶场景路况(R-cycle),如图3所示,该工况共计2

354 s,反映了实际用户综合出行的路况。

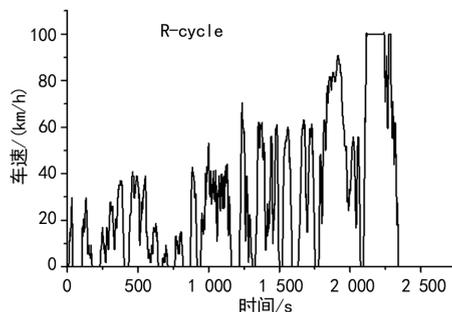


图3 实际驾驶场景路况(R-cycle)曲线

4.4 仿真分析结果

能量回收率=电池回收的电量/电池消耗的总电量,该回收率包含滑行回收和制动回收工况。仿真分析为单循环模式,仿真分析结果如表4、5所列。仿真结果显示,ibooster系统在CLTC循环工况中的回收能量比EVP系统高0.8 Wh,循环过程中能量回收率高2.1%。而实际用户行驶的R-cycle工况中,能量回收率比CLTC工况高,这表明,影响能耗高低的一个重要因素是平均行驶车速。

表4 CLTC-P 工况仿真结果

制动系统	百公里电耗	单循环回收	能量回收率
	/kWh	能量/kWh	/%
ibooster	9.262	0.363	30.2
EVP	9.336	0.355	28.1

表5 R-cycle 工况仿真结果

制动系统	百公里电耗	单循环回收	能量回收率
	/kWh	能量/kWh	/%
ibooster	10.923	0.742	36.8
EVP	11.058	0.732	35.3

5 试验验证

为分析能量回收的准确性,分别运行4次CLTC-P和R-cycle循环,取其平均值作为评价指标。测试结果如表6、7所列。得益于ibooster更高的制动回收扭矩策略,CLTC-P和R-cycle工况ibooster的能量回收率比EVP分别高1.4%和1.1%。

表6 CLTC-P 工况测试结果

制动系统	百公里电耗	单循环回收	能量回收率	平均值
	/kWh	能量/kWh	/%	/%
ibooster	9.297	0.365	29.6	29.7
	9.269	0.363	29.6	
	9.231	0.365	29.8	
	9.231	0.365	29.8	
EVP	9.375	0.358	28.2	28.3
	9.326	0.358	28.3	
	9.304	0.360	28.5	
	9.304	0.360	28.5	
	9.277	0.356	28.4	

表7 R-cycle 工况测试结果

制动系统	百公里电耗	单循环回收	能量回收率	平均值
	/kWh	能量/kWh	/%	/%
ibooster	10.895	0.756	37.4	36.4
	10.902	0.728	35.7	
	11.022	0.769	37.2	
	11.074	0.734	35.4	
EVP	11.102	0.743	35.6	35.3%
	11.063	0.747	35.6	
	11.020	0.744	35.7	
	10.965	0.719	34.3	

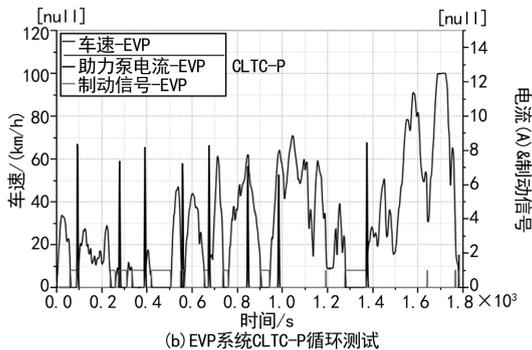


图6 CLTC-P 工况循环测试

对比车速和扭矩信号,仿真分析和台架测试的过程数据重合度较好,如图4、5所示。

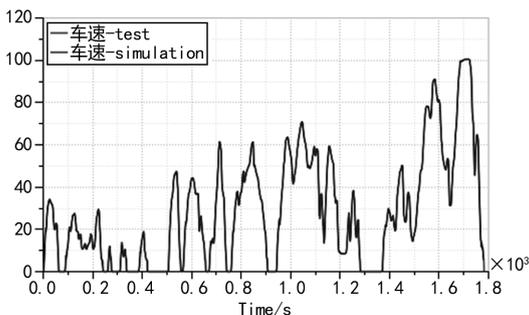


图4 CLTC-P 工况仿真与实测车速对比

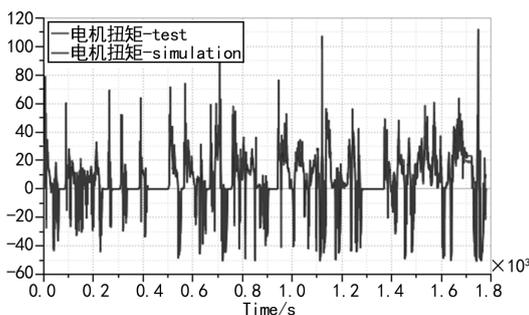
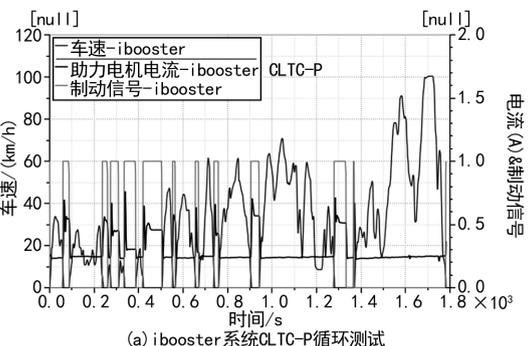


图5 CLTC-P 工况仿真与实测扭矩对比

如图6所示为ibooster和EVP在CLTC-P工况的测试过程数据,ibooster助力电机在车速为零的制动过程中一直工作,工作电压约为0.25 A。EVP仅在真空度不足时才工作,峰值电流约8.5 A。真空泵和助力电机工作电流反映了两者的工作状态差异。



(a) ibooster系统CLTC-P循环测试

6 结论

以某款纯电动汽车的能量回收系统为研究对象,对比传统电动车的真空助力制动系统(EVP)和智能电液制动系统(ibooster),分析两种制动系统的能量回收率和整车能耗,结论如下。

(1) 得益于更高的制动回收扭矩,ibooster比EVP制动能量回收率更高,CLTC-P和R-cycle工况下,ibooster的能量回收率比EVP分别高1.4%和1.1%。

(2) ibooster系统在制动过程中,助力电机一直工作,工作电流约0.25 A,峰值电流约为0.7 A;EVP仅在真空度不足时才工作,峰值电流约为8.5 A。

(3) 在实际驾驶工况中,由于驾驶平均车速较高,加减速更加频繁,能量回收率较高,因此应用智能电液制动系统比真空助力制动系统更能实现高效节能。

参考文献:

- [1] 张俊智,吕辰,李禹瞳,等.电驱乘用车制动能量回收技术发展现状与展望[J].汽车工程,2014,36(8):911-918.
- [2] 张欢欢.某电动汽车ibooster智能刹车系统设计研究[J].汽车实用技术,2021,46(22):32-37.
- [3] 囤金军,宋金香.电子液压制动助力器设计与控制策略研究[J].山东交通科技,2019(3):149-152.
- [4] 谢飞,秦永法.新能源汽车再生制动控制策略研究综述[J].机械传动,2020,44(9):169-175.
- [5] 李银刚.基于电动真空助力的纯电动汽车电液复合制动系统研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [6] 陈超.基于ibooster和ESC的纯电动车制动能量回收控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [7] 余志生.汽车理论[M].5版.北京:机械工业出版社,2009.
- [8] 孙庆乐,于海波,李贺龙,等.电动汽车滑行工况能量回收策略探究[J].车辆与动力技术,2020(2):1-5.
- [9] 王计广,李孟良,徐月云,等.电动汽车制动能量回收系统评价方法研究[J].汽车技术,2014(12):35-39.
- [10] 李青.电动汽车能量回收扭矩控制策略[J].机电技术,2022(2):65-67.