

某款纯电动城市客车再生制动系统能量回收效果实测探究

何盛君, 黄宜山, 陈莹莹, 陈锡清, 裴小欢, 谭 威

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:再生制动系统是提升纯电动城市客车能量利用效率的关键技术之一。本文基于 CHTC-B 标准工况, 选取一款纯电动城市客车作为测试对象, 采用底盘测功机、功率分析仪与整车环境舱等设备, 系统测试并分析了其再生制动能量回馈率与回收率。研究结果表明: 样车的平均再生制动能量回馈率为 58.97%, 处于行业中等水平; 而其再生制动能量回收率达到 64.51%, 显著高于行业平均值。进一步分析发现, 能量回馈率偏低主要受电池 SOC 状态限制, 而能量回收率则更能准确反映再生制动系统对整车能耗的实际改善效果。本研究不仅量化评估了再生制动系统的性能, 还揭示了回馈率与回收率之间的差异及影响因素, 为新能源汽车再生制动系统的优化设计与性能评价提供了重要参考。

关键词:纯电动城市客车; 再生制动系统; 能量回收率; 检测

中图分类号: U469.72; U463.23 文献标志码: A DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.06.008

Measuring and Exploring the Energy Recovery Effect of Regenerative Braking System of a Pure Electric City Bus

HE Shengjun, HUANG Yishan, CHEN Yingying, CHEN Xiqing, PEI Xiaohuan, TAN Wei

(CRRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The regenerative braking system is one of the key technologies for improving the energy utilization efficiency of pure electric city buses. Based on the CHTC-B standard cycle, this research selects a pure electric city bus as the test vehicle, uses equipment such as a chassis dynamometer, a power analyzer, and an environmental chamber to systematically test and analyze the regenerative braking energy feedback rate and recovery rate. The results show that the average regenerative braking energy feedback rate for the test vehicle is 58.97%, which is at a medium level of the industry. Its regenerative braking energy recovery rate reaches 64.51%, significantly higher than the industry average. Further analysis reveals that the relatively low energy feedback rate is mainly constrained by the battery SOC. Whereas the energy recovery rate more accurately reflects the actual improvement effect of the regenerative braking system on the vehicle's energy consumption. This research not only quantitatively evaluates the performance of the regenerative braking system but also reveals the differences and influencing factors between the feedback rate and recovery rate, providing important references for the design optimization and performance evaluation of regenerative braking systems in new energy vehicles.

Key words: pure electric city bus; regenerative braking system; energy recovery rate; detection

随着我国新能源汽车产业的迅猛发展, 消费者对新能源汽车的接受度在不断提升, 但目前里程焦虑问题仍然普遍存在。新能源车企也一直致力于通过节能降耗来提升车辆续航里程, 而使用再生制动系统对车辆制动能量进行回收是降低新能源汽车能量消耗

量、提高车辆续航里程的有效手段之一。尤其是在重型商用车领域, 因车辆自重及载重大, 在行车制动时会将大量的动能进行转化。相关研究表明, 在典型公交行驶工况下, 城市客车有 50%~65% 的能量会在制动过程中被消耗^[1], 对此过程的动能回收利用对于提

收稿日期: 2025-04-02。

第一作者: 何盛君(1992—), 男, 助理工程师, 主要从事车辆经济性相关测试及研究工作。E-mail: Heshengjun.cy@crrec.cc。

升车辆续航里程就显得尤为关键。

不同于传统车辆, 新能源汽车的再生制动系统在车辆制动时, 通过电机工作在发电模式, 将整车动能转化为电能并储存到动力电池中, 从而实现能量的再生利用^[2-5]。对于新能源汽车而言, 再生制动系统的能量回收效果主要受以下三类因素影响:

1) 驾驶行为与工况条件。驾驶员紧急刹车(制动强度大)会导致机械制动介入比例升高, 从而降低回收效率; 车辆频繁启停、中低速制动的城市工况则为再生制动系统提供了更多回收机会, 有利于提升能量回收效率; 高速制动时虽然动能大, 但受电机发电效率和系统功率的限制, 部分能量通过摩擦制动耗散, 导致回收率下降。

2) 车辆设计与技术参数。电机及控制器(逆变器)的发电效率和功率上限直接影响动能回收率; 同时, 车辆既定的能量管理策略、制动力分配逻辑及电池充电能力的调节也会对能量回收系统产生制约^[6-7]。

3) 外部环境条件。温度对电池充放电的影响, 以及风阻和轮胎滚阻对车辆动能的影响, 均会使再生制动能量回收效果出现不同程度的折扣。

当前再生制动技术已从基础回收阶段迈向智能协同阶段。随着该技术的快速发展, 其评价方法也受到广泛关注。国内外研究人员已提出多种系统性的评价方法, 这些方法反映了不同的研究重点, 各具优势与局限。文献[8]以纯电动轿车为研究对象, 提出了制动能量回收率、节能贡献度和续航里程贡献度三个指标, 并给出了相应的计算方法; 文献[9]研究了客车的能量流, 提出制动能量回收率和制动能量回收贡献率两个指标及其计算方法。尽管已经提出了许多评价方法, 但国内外尚未建立商用车的普适性评价体系。

本文选用再生制动能量回馈率和再生制动能量回收率两个指标, 对一款纯电动城市客车再生制动系统的能量回收效果进行测试研究。通过这两个指标, 可以直观地了解车辆再生制动系统的工作效率和节能效果, 从而方便研究人员对车辆再生制动系统进行评价。

1 再生制动系统能量回收效果测试

1.1 测试样品

本次测试样车的基本信息见表1, 测试照片如图

1所示。

表1 样车基本情况

项目	参数/描述
样车类型	纯电动城市客车
再生制动系统类型	B型
整备质量	11 910 kg
最大设计总质量	18 000 kg
动力电池类型	磷酸铁锂
动力电池电量	350.07 kW·h
设计最高车速	69 km/h
驱动形式	分布式驱动(轮边电机)



图1 测试照片

1.2 测试设备

数据采集设备主要为美国宝克重型底盘测功机和日本日置功率分析仪, 通过整车环境舱控制测量环境, 所用设备主要参数见表2。

表2 测试设备主要参数

设备名称	主要技术参数
底盘测功机	1) 惯量模拟范围: 1 500 ~ 50 000 kg, 惯量模拟精度: $\pm 0.2\% F.S.$; 2) 牵引力: 0 ~ 42 093 N, 误差: $\leq \pm 0.1\% F.S.$; 3) 速度: 0 ~ 150 km/h, 误差: $\leq \pm 0.02\% km/h$; 4) 道路载荷模拟精度: $\pm 1\% F.S.$; 5) 计时误差: $\leq \pm 0.005\% s$; 6) 系统响应时间: $< 100\ ms$ 。
功率分析仪	1) 直流电压测量范围: 0 ~ 1 000 V, 误差: $\leq \pm 0.5\%$; 2) 直流电流测量范围: 0 ~ 1 000 A, 误差: $\leq \pm 0.5\%$; 3) 整机精度: 0.5%。
整车环境舱	1) 温度范围: $-40 \sim 60\ ^\circ C$; 2) 温度偏差: $\leq \pm 2\ ^\circ C$; 3) 温度均匀度: $\leq 2\ ^\circ C$; 4) 温度波动度: $\leq \pm 2\ ^\circ C$ 。

1.3 测试环境及方法

为探究样车在既有车辆设计及技术参数下的再生制动系统能量回收效果,需尽可能控制驾驶行为与工况条件,以及外部环境条件这两类因素,以减小其对再生制动系统能量回收效果的影响。因此,测试的行驶工况选择和环境条件控制均按照 GB/T 18386.2—2022^[10] 执行,以便对不同车辆的测试结果进行横向比较。

由于样车属于纯电动城市客车,测试时应采用适用于城市客车的 CHTC-B^[11] 标准工况。该工况包括低速和高速两个速度区间,总时长为 1 310 s,总里程为 5.49 km,其中匀速行驶比例仅为 22.60%。这符合城市客车运行时频繁加速、减速及怠速的实际情况。测试时,驾驶员严格按照工况曲线的目标车速进行车辆控制,以确保工况曲线跟随误差在允许范围内(车速±3 km/h,时间±1 s),从而减小驾驶行为对测试结果的影响。

本次测试的底盘测功机的阻力系数设定为 $A=966.9$ 、 $B=4.24$ 、 $C=0.203$ 。这些数值是根据车辆的最大设计总质量,从 GB/T 27840—2021^[12] 给出的阻力系数推荐表中查得。为减小外部环境对测试结果的影响,测试全程由整车环境舱控制环境温度,确保车辆在 $(23\pm 5)^\circ\text{C}$ 的标准环境下运行。此外,轮胎气压、用电装置启闭、REESS 充放电要求等车辆运行条件及试验程序均按照 GB/T 18386.2—2022^[10] 执行。

1.4 再生制动能量回馈率测试

再生制动能量回馈率,是指制动过程中动力电池实际回收的能量与理论上可回收的总制动能量之比。该指标用于表征在特定硬件参数与控制策略下,再生制动系统的能量回收能力。在计算该指标时,本文以动力电池端的输入能量作为实际回收能量的测量依据。

再生制动能量回馈率按照式(1)计算。

$$\eta = E_1/E_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为再生制动能量回馈率; E_1 为 1 个循环试验中测量的再生制动系统回收的能量, kW·h; E_2 为 1 个循环试验中再生制动系统理论最高可回收能量^[13], kW·h,按照式(2)计算。

$$E_2 = \frac{h \cdot \sum_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} |E_i|}{3600}, E_i = \begin{cases} 0 & (F_i > 0) \\ F_i \cdot d_i & (F_i \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 为效率修正系数,取 95%; t_{start} 为试验开始时刻; t_{end} 为试验结束时刻; F_i 为试验车辆从 $i-1$ 时刻到

i 时刻的牵引力, N,按照式(3)计算; d_i 为试验车辆从 $i-1$ 时刻到 i 时刻的行驶距离, m,按照式(4)计算。

$$F_i = f_0 + f_1 \left(\frac{v_i + v_{i-1}}{2} \right) + f_2 \frac{(v_i + v_{i-1})^2}{4} + (1.03 \times m) a_i \quad (3)$$

式中: v_i 为试验车辆在 t_i 时刻的目标车速, km/h; m 为测试质量, kg; f_0 、 f_1 、 f_2 为试验车辆的道路载荷系数; a_i 为试验车辆从 $i-1$ 时刻到 i 时刻的加速度, m/s^2 ,按照式(5)计算。

$$d_i = \frac{(v_i + v_{i-1})}{2 \times 3.6} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{3.6 \times (t_i - t_{i-1})} \quad (5)$$

为减小测量误差,能量回馈数据进行 3 次重复测试,能量回馈率取 3 次计算结果的算术平均值。再生制动能量回馈实测数据见表 3,3 次测试数据按照式(1)计算得到的能量回馈率分别为 58.5%、60.1%、58.3%。据此,取平均值为 58.97%。

表 3 再生制动能量回馈测试数据

测试次数	测试参数	测试结果/kW·h
第 1 次	E_2	3.480
	E_1	2.036
第 2 次	E_2	3.642
	E_1	2.189
第 3 次	E_2	3.666
	E_1	2.137

1.5 再生制动能量回收率测试

再生制动能量回收率是指在开启与关闭再生制动系统两种状态下,储能装置输出总能量之差,与关闭再生制动系统时输出总能量的比值,该比值直接体现了再生制动系统对车辆能量的回收程度。分别在车辆开启和关闭能量回收功能的状态下进行电池总输出能量测试。

再生制动能量回收率按照式(6)计算。

$$\eta' = \frac{E_3 - E_4}{E_4} \times 100\% \quad (6)$$

式中: η' 为再生制动能量回收率; E_3 为再生制动系统开启时测量的电池总输出能量, kW·h; E_4 为再生制动系统关闭时测量的电池总输出能量, kW·h。

实测 E_3 为 478.001 kW·h, E_4 为 290.557 kW·h,按照式(6)计算得到能量回收率为 64.51%。

2 测试结果分析

根据《电动客车再生制动系统技术要求和试验方法》标准起草组 2024 年 11 月发布的《标准征求意见稿编制说明》^[14] 中公布的行业验证数据, 测试样车的再生制动能量回馈率为 58.97%, 处于行业验证数据的中等水平。

在 3 次测试中, 车辆动力电池的初始 SOC 分别设定为 99%、98% 和 97%, 该设定已远超征求意见稿中车辆充电状态 (SOC ≥ 90%) 的最低要求。然而, 正是这种较高的初始 SOC, 使得电池工作于通常认为会限制最大可回收电流的区域 (SOC > 95%), 从而降低了制动能量的回收效率, 这是本次测试中能量回馈率偏低的一个主要原因。此外, 驱动系统的具体硬件参数与控制策略也可能对测试结果产生影响。在 3 次回馈率测试中, 第 2 次的结果略优于第 1 次和第 3 次。考虑到环境与车辆状态基本稳定, 这一差异主要源于驾驶行为的改变 (第 2 次测试中紧急制动操作较少), 使再生制动系统得以在更有利的条件下工作。

再生制动能量回收率因缺乏相关的行业数据作为参考, 无法准确评价该结果在行业中的水平。但在文献 [14] 中有一个“可用再生制动能量续驶里程贡献率”指标, 与本文中的再生制动能量回收率类似。该指标的计算方法为: 开启与关闭再生制动系统时车辆续驶里程的差值, 与关闭系统时续驶里程的比值。

该指标的行业平均值为 33.2%。虽然电池能量回收率与车辆续驶里程贡献率不可按照 1:1 换算, 但因本次测试中动力电池的能量基本用于克服行驶阻力和制动, 可据此判断能量回收率 64.51% 高于行业平均水平。这一结果也侧面反映了能量回馈率低的原因, 极有可能是测试时 SOC 过高限制了动力电池充电电流。

3 结束语

本文简述了影响新能源汽车再生制动能量回收效果的主要因素, 并选用再生制动能量回馈率和回收率两个指标, 对某款纯电动城市客车的再生制动系统进行了测试评价。该评价方法重点关注再生制动系统在特定条件下的能量回收效果。在进行不同车辆的比较时, 可以直观地感受到其再生制动系统技术水平的高低, 但也存在一定的局限性。主要有以下两点不足: 一是未考虑车辆实际应用场景下的能量流。例

如, 在实际行驶中, 车辆会因空调、水冷系统等部件的耗能导致可回收能量减少, 从而降低能量回收率。二是未能体现再生制动系统对车辆续驶里程的贡献。高效的能量回收并不代表高效的能量利用。

为改善评价方法的局限性, 后续可开展车辆在典型环境温度 (如冬季、夏季平均气温) 下的能量回收效果测试研究, 并增加再生制动系统能量回收对续驶里程的贡献率指标, 以综合评价整车能量回收和能量管理水平。

参考文献:

- [1] 李静, 户亚威, 朱为文, 等. 纯电动公交客车再生制动控制策略研究[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 202-205.
- [2] 孟秋红, 郭京波. 再生制动技术在汽车中的应用[J]. 天津汽车, 2007(3): 19-21.
- [3] 黄璇, 张树培, 王国林. 再生制动系统道路试验数据分析[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 138-141.
- [4] 张俊智, 陆欣, 张鹏君, 等. 混合动力城市客车制动能量回收系统道路试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 25-30.
- [5] 孙文, 张涵睿, 张津硕, 等. 新能源汽车再生制动能量回收研究综述[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(4): 470-480.
- [6] 楚博士, 王奎洋, 王渝甬. 轮毂电机再生制动与摩擦制动力分配策略研究[J]. 内燃机与配件, 2024(15): 1-5.
- [7] 马什鹏, 张刘锋, 马永娟, 等. 再生制动能量回收研究综述[J]. 汽车文摘, 2021(8): 19-26.
- [8] 初亮, 刘达亮, 刘宏伟, 等. 纯电动汽车制动能量回收评价方法研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(4): 471-479.
- [9] 仇斌, 陈全世. 电动城市公交车制动能量回收评价方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 80-85.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第 2 部分: 重型商用车: GB/T 18386.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1-15.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况 第 2 部分: 重型商用车: GB/T 38146.2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1-80.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 重型商用车燃料消耗量测量方法: GB/T 27840—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-30.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 乘用车循环外技术/装置节能效果评价方法 第 4 部分: 制动能量回收系统: GB/T 40711.4—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-15.
- [14] 交通运输部标准起草组. 电动客车再生制动系统技术要求和试验方法 (征求意见稿) 编制说明[R/OL]. (2024-12-18) [2025-03-21]. <https://jst.mot.gov.cn/zxd/seekPublicAdvice/pagePublishAdviceStdList/973>.