

# 纯电动客车制动系统的能耗优化

何朝东, 顾杰, 徐长飞, 贡蓓璐, 林佳景

(金龙联合汽车工业(苏州)有限公司, 江苏苏州 215000)

**摘要:**提出通过优选电动空气压缩机的型号及提高后桥主减速器制动扭矩以降低纯电动客车能耗的方案,并进行理论分析和试验测试。

**关键词:**纯电动客车; 制动系统; 电动空气压缩机; 能耗优化

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)04-0032-03

## Energy Consumption Optimization of Braking System for Pure Electric Buses

HE Chaodong, GU Jie, XU Changfei, YUN Beilu, LIN Jiajing

(Higer Bus Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:**The authors propose a scheme to reduce the energy consumption of pure electric buses by optimizing the electric air compressor model and increasing the braking torque of the rear axle main reducer, then do the theoretical analyses and experimental tests.

**Key words:**pure electric bus; brake system; electric air compressor; energy consumption optimization

随着纯电动城市客车渗透率的提高,其节能技术也越来越受到重视。为降低能耗,需要充分挖掘每一个能量消耗单元的潜力。本文从电动空气压缩机(以下简称“电动空压机”)的选型和提高后桥主减速器制动扭矩两个方面来降低纯电动城市客车制动系统的能耗。

## 1 电动空气压缩机结构形式及能耗

### 1.1 电动空气压缩机结构形式

纯电动城市客车采用电动空压机为制动系统提供能量。其结构形式按驱动电机与空压机的连接方式可分为直驱式和皮带传动式,按空压机形式可分为有油活塞式、无油活塞式和无油涡旋式。

整车控制器根据整车制动系统的压力控制电动空压机工作状态,当整车制动系统压力小于 0.75 MPa 时,电动空压机启动打气;当达到干燥器的卸荷压力(1.05 MPa)后,电动空压机停机。打气过程中电动空压机将消耗一定能量。根据驱动电机 MAP 图,电机工作转速设计在电机的高效区间,以降低能

耗。

空压机“比功率”是指空气压缩机 1 min 内压缩 1 m<sup>3</sup> 空气所要消耗的输入功率,是判断空压机是否节能的重要指标之一,“比功率”越低的空压机越节能。

### 1.2 能耗效果对比

#### 1.2.1 空压机形式及参数

试验车为一辆 12 m 气簧悬架纯电动城市客车,储气筒容积为 120 L<sup>[1-2]</sup>。

选用 4 款电动空压机进行能耗对比,其形式及参数见表 1,其中驱动电机全部采用永磁同步电机,空压机分为无油活塞和有油活塞。从表 1 可以看出,理论上 RL3 型号的电动空压机比功率值最低,能耗最优。

表 1 电动空压机形式及参数对比

形式及型号	功率/ kW	排量/ (L·min <sup>-1</sup> )	比功率/ (kW·min·m <sup>-3</sup> )
无油活塞 NL1/ RL1	4/3	360/240	10.9/10.2
有油活塞 RL2/RL3	3/4	240/380	11.3/10.0

收稿日期:2022-01-25。

第一作者:何朝东(1977—),男,工程师;主要从事底盘制动系统和转向系统的研究设计工作。E-mail:hecd@higer.com。

### 1.2.2 台架试验

使用整车制动系统模拟台架进行电动空压机的能耗测试。其中储气筒容积设定为 100 L,模拟台架压力启停区间设定如下:区间一 7.5~10.5 bar、区间二 7~10 bar、区间三 7~9.5 bar。其台架测试能耗结果见表 2。

表 2 不同压力值区间能耗对比 kW·h

型号	区间一	区间二	区间三
NL1	0.021 9	0.021 6	0.019 8
RL1	0.022 4	0.022 1	0.020 2
RL2	0.021 3	0.021 1	0.020 3
RL3	0.019 7	0.021 5	0.017 9

从表 2 可以看出,RL3 的综合能耗表现最好。

### 1.2.3 电动空压机的选型优化

将上述 4 款电动空压机在同一辆车上进行打气能耗测试,储气筒容积都为 100 L,压力启停点都为 7.5~10 bar<sup>[3]</sup>。能耗测试结果及产品价格见表 3。

表 3 不同类型电动空压机单次打气能耗与价格

型号	能耗/kW·h	价格/元
NL1	0.033	7 000
RL1	0.034	6 000
RL2	0.047	4 500
RL3	0.033	4 700

从表 3 可以看出,电动空压机选型优化时,只有 RL2 和 RL3 型比较合适。目前标配的产品为 RL2 型<sup>[4]</sup>,通过综合考虑,可以采用 RL3 型代替,原因如下:按纯电动客车一年行驶 30 000 km、城市工况每 2 km 打气一次进行计算,可以节约能耗  $30\ 000/2 \times (0.047-0.033) = 210$  (kW·h)。按照市场电价 1.2 元/kW·h 及服务费 0.5 元/kW·h 计,每年可以节约 357 元。即用 RL3 型替代 RL2 型,不到一年就可以抵消多出的空压机购买成本。

## 2 后桥主减速器制动扭矩提升及效果

制动能量回馈可实现能源再利用,有效提升电动汽车续航里程,后桥主减速器制动扭矩的大小影响到能量回馈的多少。后桥主减制动扭矩曲线的梯度及控制逻辑在此不作讨论,只对提升后桥主减制动扭矩

值进行研究。

### 2.1 当前现状分析

纯电动车辆制动的过程,通过制动总泵的电控部分可以将车辆的动能转化为电能,并将这部分电能储存到电池中。制动能量的回馈可以节约车辆的能耗,增加车辆的续航里程<sup>[5]</sup>。

在采取了提高后桥主减产品零部件精度、减少后桥主减内齿轮接触应力、提高主减齿轮支撑刚性的措施后,后桥主减制动扭矩承受能力得到提升,能够承受驱动电机更大的制动反拖扭矩。有关对比见表 4,可以看出,纯电动车型的后桥主减速器制动扭矩均得到了提升。

表 4 后桥主减速器制动扭矩对比

驱动桥吨位/t	制动扭矩/N·m	
	内燃车型	纯电动车型
8	1 000	1 400
11	1 800	2 200
13	2 000	2 200

### 2.2 制动能量回馈理论分析

以 12 m 纯电动城市客车为例,电机驱动扭矩为 2 500 N·m,电机的驱动扭矩就是电机的反拖扭矩。原内燃车型的后桥主减速器制动扭矩为 1 800 N·m,主减速器经过改进后可以承受 2 200 N·m 的制动扭矩,如图 1 所示,增加的区域面积即表示增加的整车制动反馈能量<sup>[6]</sup>,通过电机对电池充电实现能量回收,减少能耗。

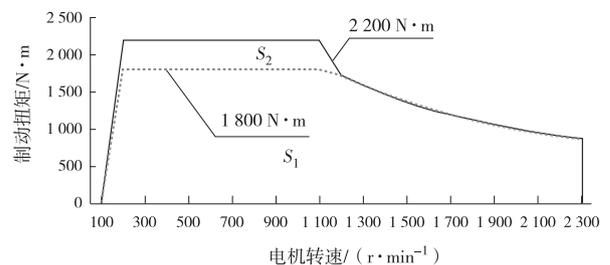


图 1 后桥扭矩提升电机特性曲线对比

1) 原制动反馈能量  $E_1 = \int_0^{2\ 300} T_1/9\ 550 \cdot dn$ , 即=原制动区域面积  $S_1/9\ 550$ 。

2) 优化后制动反馈能量  $E_2 = \int_0^{2\ 300} T_2/9\ 550 \cdot dn$ , 即=优化后制动区域面积  $S_2/9\ 550$ 。

式中： $T_1$ 、 $T_2$  均为制动扭矩，扭矩值分别在 0~1 800 N·m 和 0~2 200 N·m； $n$  为电机转速。

优化后的制动反馈能量增加  $(E_2 - E_1) / E_1 \times 100\% = 14\%$ 。

### 2.3 试验数据分析

选用一辆 12 m 纯电动城市客车进行试验，驱动电机制动扭矩从原来的 1 800 N·m 提升至 2 200 N·m，根据《EB-PAC 全国新能源公交车性能评价赛项目细则》中的路谱，按照细则中循环工况测量制动系统气耗及整车能耗，测量结果见表 5。

表 5 制动系统气耗和整车能耗结果

测试状态	次数	气耗/L	整车能耗/kW·h
电机制动扭矩提升前	1/2	60/58	3.529/3.479
电机制动扭矩提升后	1/2	49/51	3.237/3.248

1) 电机制动扭矩提升前、后的制动系统平均气耗<sup>[7]</sup>分别为  $V_1$ 、 $V_2$ ， $V_1 = (60 + 58) / 2 = 59$  (L)， $V_2 = (49 + 51) / 2 = 50$  (L)。则制动系统能耗降低  $(V_2 - V_1) / V_1 \times 100\% \approx 15.25\%$ 。

2) 电机制动扭矩提升前、后的整车能耗分别为  $E_3$ 、 $E_4$ ， $E_3 = (3.529 + 3.479) / 2 = 3.504$  (kW·h)， $E_4 = (3.237 + 3.248) / 2 = 3.243$  (kW·h)。则整车能耗<sup>[8-9]</sup>降低  $(E_3 - E_4) / E_3 \times 100\% \approx 7.45\%$ 。

可以看出，在循环工况下提升后桥制动扭矩后，可以减少制动系统的耗气量，所节约的能耗占制动系统能耗的 15% 左右，占整车能耗的 7% 左右，节能效

果明显。

### 3 结束语

本文对电动空压机的选型和提升后桥主减速器制动扭矩的能耗优化方案效果进行理论分析和试验测试，为纯电动城市客车的能耗降低提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 王望予. 汽车设计:第 4 版[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:273-274.
- [2] 唐瑜亮,杨晓云. 纯电动程师客车电动空压机与储气筒容积匹配分析[J]. 汽车电器,2020(10):6-10.
- [3] 尹永福. 电动汽车电机复合制动控制系统研究[J]. 微型电脑应用,2021(1):118-120.
- [4] 袁帅,潘效龙,姜辉,等. 整车空压机取气型式研究[J]. 客车技术与研究,2019,41(4):33-35.
- [5] 余学伟. 电动压缩机技术在电动车上的应用研究[J]. 新能源汽车,2016(12):15-17.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国公安部. 机动车运行安全技术条件:GB 7258—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:26.
- [8] 罗溶. 电动车再生制动系统研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(6):8-10.
- [9] 刘春晖,张坤. 浅谈电动汽车再生制动能量回收技术[J]. 汽车实用技术,2021,46(15):195-197.