

商用车轮边电驱动复合线控系统台架试验研究

王应国, 曾繁卓, 竹利江, 李 伟, 刘洋洋, 唐 俊

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 为了验证商用车轮边电驱动总成及其控制系统是否满足整车设计需求, 提出一种由电池模拟器、冷却循环系统、环境模拟箱和飞轮盘等组成的商用车轮边电驱动复合线控系统试验台架, 并阐述试验台架的工作原理、主要技术参数和具体试验方法。可以为整车开发、验证和改进提供技术参考。

关键词: 轮边电驱动; 复合线控系统; 线控制动; 台架试验

中图分类号: U467.5⁺2

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.01.005

Bench Test Research on Composite Wire Control System for Commercial Vehicle Wheel-side Electric Drive

WANG Yingguo, ZENG Fanzhuo, ZHU Lijiang, LI Wei, LIU Yangyang, TANG Jun

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: To verify whether the commercial vehicle wheel-side electric drive assembly and its control system meet the vehicle design requirements, this paper proposes a test bench consisting of battery simulator, cooling cycle system, environmental simulation box, flywheel disk, etc. While describes the working principle, main technical parameters and test methods of the test bench. This can provide technical references for vehicle development, verification and improvement.

Key words: wheel-side electric drive; composite wire control system; brake by wire; bench test

1 概 述

近年来, 汽车电动化和智能化为汽车底盘技术的创新提供了突破口, 以轮边(毂)电机+电子机械制动、轮边(毂)电机+线控液压/气压制动、电机+单轮独立线控液压/气压制动等为代表的电驱动复合线控制动系统, 持续推动电动汽车智能底盘技术体系的演进^[1-6]。由于没有驱动和制动相结合的复合试验台架, 而整车验证试验成本高, 加上相关标准空白, 这些新兴技术暂未得到充分的试验验证, 以致装车应用及产业化还存在诸多挑战^[7]。

在上述电驱动复合线控制动系统技术中, 商用车的“轮边电机+电子机械制动”系统, 以及“轮边电机+线控气(液)压制动”系统, 由于电机安装在车轮旁

边, 相对于轮毂电机, 对车轮非簧载质量的增加以及舒适性的不良影响较小, 也不存在轮毂电机散热相对突出、热管理困难等问题, 其在商用车上的应用及产业化比基于轮毂电机一体化的系统更迅速。

另外, 汽车零部件台架试验与整车道路试验相比, 台架试验具有可控性高、重复性好、成本较低、安全性好、效率高等优点, 在汽车开发过程中扮演着重要的角色。为此, 本文以商用车电子机械制动器(electro mechanical brake, 简称 EMB)+轮边电机复合系统和气压盘式制动器(air disc brake, 简称 ADB)+轮边电机复合系统为研究对象, 介绍其构成和工作原理, 分析整车工况和测试需求, 开发可用于“制动+驱动”的分布式电驱动复合线控系统的测试台架, 并提

收稿日期: 2024-09-24。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2504500)。

第一作者: 王应国(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事汽车智能线控底盘测试技术、汽车线控制动系统测试技术、汽车试验设备开发相关工作。E-mail: ygwang0830@163.com。

出相应的测试方法。

2 研究对象的构成和工作原理

2.1 EMB+轮边电机复合线控系统构成及工作原理

一种典型的商用车装配电子机械制动器的独立悬架轮边电驱桥总成结构示意图如图 1 所示,在驱动桥的两侧对称布置有驱动电机、减速器和制动器。采用双电机驱动,可实现左右轮独立驱动制动控制,具有驱制动一体化、全线控、分布式等特点。

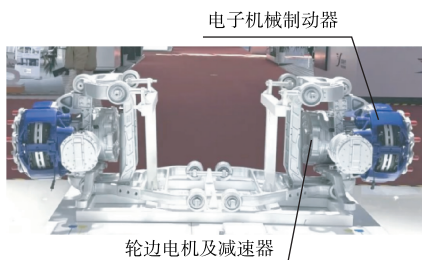


图 1 装配 EMB 的独立悬架轮边电驱桥总成

EMB 是一种新型的现代车辆制动技术,该技术结合了电动驱动和机械制动的优势,可以实现高效、精确和灵敏的制动性能。文献[8]对比介绍了 EMB 与 ADB。EMB 的制动电能由蓄电池提供,通过控制 EMB 电机动作来产生制动力,EMB 系统的整车可完全抛弃现有气压制动系统中的储气筒、气阀和气制动管路等部件,结合轮边电机制动,实现以 EMB 为基础的电驱动复合线控制动系统,进一步提高整车制动响应、冗余安全、减少动力消耗、降低排放等。EMB 系统是汽车线控制动技术发展的必然趋势,也是当前汽车驱制动一体化控制、底盘一体化技术融合等方面的研究热点。

2.2 ADB+轮边电机复合线控系统构成及工作原理

一种典型的商用车装配 ADB 的轮边电驱桥总成结构如图 2 所示。同样在驱动桥的两侧对称布置有驱动电机、减速器和 ADB,采用双电机驱动,可实现左右轮独立驱动制动控制,具有驱制动一体化、全线控、分布式等特点。不同之处是将 EMB 换成了 ADB。

ADB 在商用车上是一种常见的气压制动系统,其工作原理是利用压缩空气作为动力源来产生制动力。为了实现驱动和制动系统的融合控制,整车通过对现有成熟气压制动系统进行升级,以组建电子制动

系统(electronic brake system,简称 EBS),结合轮边电机正向驱动、逆向发电制动,实现以 ADB 为基础的电驱动复合线控制动系统。该系统是线控制动系统的一种过渡产品,在当前 EMB 法规体系不够完善的情况下,其整车应用率更高。

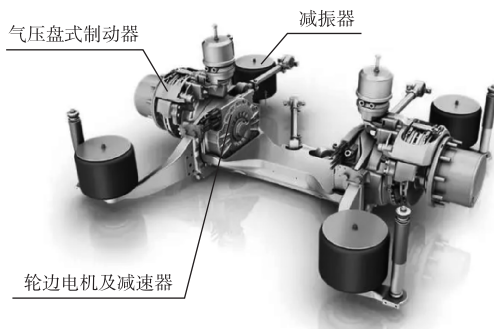


图 2 装配 ADB 的轮边电驱桥总成

3 整车工况和测试需求分析

3.1 整车工况分析

对于装配“EMB+轮边电驱动”或“ADB+轮边电驱动”的整车,汽车的动力由轮边电机通过减速增扭后驱动车轮产生,汽车的制动可以通过气压制动器或电子机械制动器产生摩擦制动力,还可以通过控制轮边电机发电产生电制动力;每一个车轮的驱动和制动均可独立控制,当其中任何一个车轮制动失效,其他车轮还可以实现制动。EMB 系统还可为每一个 EMB 制动卡钳设计双绕组电机,相当于每一个 EMB 制动卡钳都有两个电机,互为安全备份,相较于现有传统制动的冗余设计,更进一步提升了整车制动系统的安全性保障。

配备轮边电机后,整车还可以增加轮边电机的电制动冗余备份,通过控制轮边电机制动实现制动能量回收,提高车辆续驶里程。装配轮边电机的车辆,为了进一步发挥电机在整车控制中的优势,减少摩擦制动颗粒物排放,汽车制动也将从现有的摩擦制动为主、电机制动为辅的设计模式,逐渐发展为电机制动和摩擦制动的双主模式,或以电机制动为主、摩擦制动为辅的控制模式。

3.2 测试需求分析

根据上述整车工况分析,为了充分验证测试对象的驱动性能、摩擦制动性能、电制动性能,以及摩擦制

动和电制动的协同控制策略、驱动和制动系统控制策略、冗余制动、再生制动等, 台架测试需要尽可能地模拟整车工况, 样件安装需要能够模拟整车状态; 试验台需要能够模拟整车载荷、车速、制动踏板输入、加速踏板输入, 能够模拟汽车的加速、滑行和减速制动; 试验台还要能够模拟汽车的行驶环境和极限工况, 如低温环境、高热环境、涉水环境、长下坡制动、陡坡起步等; 能够模拟汽车的某些功能失效, 如机械摩擦制动失效、双绕组冗余电机部分失效、轮边电机电制动失效等; 能够对测试对象的制动车速、制动扭矩、制动气(液)压或电流、制动温度、制动噪声, 以及轮边电机的功率、电压、电流、工作噪声等参数进行测量和分析。

因此, 台架试验项目包括但不限于加速性能试验、制动性能试验、热裂纹试验、高负荷试验、制动冲击试验、温升试验、陡坡起步模拟试验、道路模拟耐久试验、再生制动模拟试验、冗余制动验证等。试件的安装形式可根据不同试验项目选择带轮毂的常规结构(包括带轮胎和不带轮胎)、独立轮边结构、带空气悬架结构或整桥(轴)结构等。

试验依据主要以企业标准和技术规范为主, 可参考的现行公开发布的标准有 QC/T 239—2015《商用车行车制动器技术要求及台架试验方法》^[9]、QC/T 1089—2017《电动汽车再生制动系统要求及试验方法》^[10]、GB/T 34422—2017《汽车用制动盘》^[11]、GB/T 37336—2019《汽车制动鼓》^[12]、GB 40164—2021《汽车和挂车制动器用零部件技术要求及试验方法》^[13]、SAE J2115_202008 *Air Brake Performance and Wear Test Code Commercial Vehicle Inertia Dynamometer*^[14]、SAE J3080_202312 *Inertia Dynamometer Rotor Crack Test Procedure for Air Disc Brakes*^[15]、SAE J3213_202306 *Brake Dynamometer Squeal Noise Test Procedure for Commercial Vehicles with Air Brakes*^[16]、GB/T 18386.2—2022《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第2部分: 重型商用车辆》^[17]等。

4 试验台架开发

4.1 试验台架组成及工作原理

目前, 国内外尚无针对轮边电驱动总成及其控制系统的“制动+驱动”复合测试台架案例。在现有的

相关台架验证技术中, 常用的试验台架有制动器惯性试验台、驱动桥疲劳可靠性台架、减速器寿命试验台、高低温环境试验箱等。但这些都主要是针对单一制动器、单一驱动桥的试验台架。如制动器惯性试验台, 其通过飞轮盘和主轴模拟车辆行驶时的能量, 主要用于模拟汽车实际制动过程, 以评估制动器性能, 是一种用于测试汽车制动器及制动衬片性能的成熟设备, 在评价制动安全、研发新的汽车制动器及摩擦片产品, 以及提升制动器相关零部件品质方面都发挥了重要作用。

基于上述制动器惯性试验台的技术优势, 为了进一步扩展制动器结合轮边电驱动总成的电机、减速器等部件和控制系统的复合试验能力, 本文提出的复合试验台架主要由电池模拟器、冷却循环系统、环境模拟箱、飞轮架、飞轮盘、中间支撑、传动轴、可调样件安装平台、制动(电流/液压/气压)模拟器、扭矩传感器、坡道阻力加载装置、测量控制系统等组成^[18], 其架构如图3所示。

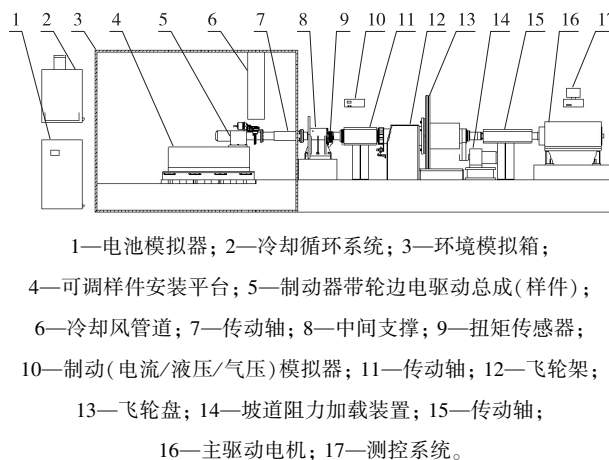


图3 复合试验台架组成架构

该复合试验台工作原理如下: 按照实车安装状态将制动器、轮边电驱动总成及控制器等被试样件安装在试验台架主轴上, 连接好试验样件与控制器、电池模拟器和冷却器之间的电源线、信号线、控制线及冷却循环管路等。利用飞轮盘及台架电机模拟来精确模拟整车载荷; 利用台架电机或电驱动总成电机控制台架主轴转速模拟车速; 利用坡道模拟控制装置和台架电机模拟道路坡道负荷或行驶阻力; 利用制动(电流/气压/液压)模拟器来模拟制动踏板输入; 利

用电池模拟器来精准控制电驱动总成电机及控制器输入的电压和回收再生制动工况下的制动能量;通过冷却循环系统来控制轮边电驱动总成及控制器内部介质温度;通过环境试验舱来模拟各种高温、低温、湿度等极端试验环境^[19]。

4.2 复合试验台主要设计

本台架要考虑覆盖 GB/T 15089—2001《机动车辆及挂车分类》^[20]规定的 M₂、M₃ 类和 N 类车辆用制动器带轮边电驱动总成,以及 O 类车辆用 EMB 或 ADB 总成。相比传统成熟的制动器惯性试验台,主要参数变化如下:①加大了电机功率,用于道路模拟试验;②增加了程控电源,用于 EMB 供电;③增加了环境试验箱,用于极端环境下性能及噪声检测;④增加了冷却循环系统,以保证轮边电驱动总成内部液体介质温度变化与实车状态一致;⑤增加了电池模拟器,以确保轮边电驱动电机的供电状态与实车电池荷电状态相符合;⑥增加了功率分析仪,以分析驱动、制动功率,评估能量消耗等。

试验台的主要参数设计如下:试验台主驱动电机额定功率≥300 kW,试验台最高转速≥1 500 r/min,惯量模拟范围 100~2 600 kg·m²,制动扭矩 0~40 000 N·m,制动电压、电流测控 0~50 V、0~50 A,制动气压加压装置 0~1.3 MPa,制动液压加压装置 0~20 MPa,喷水流量 0~7 L/min,DTV 探头测量范围 0.5~2.5 mm,制动噪声测量范围 30~130 dB(A),静力矩测量系统 0~5 r/min,环境控制系统-40~50 ℃,电池模拟器电压 1 000 V、电流 1 000 A,冷却循环系统温控范围-40~90 ℃,另外配备 6 通道功率分析仪,以及支持 CAN2.0、CANFD 的通讯接口(至少 2 个)。关键参数确定依据如下。

4.2.1 试验转动惯量

试验台的转动惯量参考 QC/T 239—2015 标准^[9]中 6.3 条,按公式(1)进行计算:

$$I = G_m r^2 \quad (1)$$

式中: I 为转动惯量计算值,kg·m²; G_m 为将汽车最大设计总质量按制动力分配比设计值分配给被试制动器所对应车轮承受的那部分质量,kg; r 为车轮滚动半径,m。

4.2.2 试验台主轴转速

试验台主轴转速与车速按公式(2)进行关系换算:

$$n = 2.65v/r \quad (2)$$

式中: n 为制动器惯性试验台主轴转速,r/min; v 为试验车速,km/h。

4.2.3 模拟坡道控制需施加在主轴上的扭矩

模拟坡道控制需施加在主轴上的扭矩与坡道按公式(3)进行关系换算:

$$T_s = G_m \cdot \sin[\arctan(i/100)] \cdot r \quad (3)$$

式中: T_s 为模拟坡道控制需施加的扭矩,N·m; i 为坡道坡度,%。

4.2.4 其他变量

样件外表面的环境温湿度、风速,以及蓄电池电压、电机及控制器电压、流经样件内部的冷却循环介质温度,以及制动电压(电流)、制动气压(液压)等按实际要求或需要的条件加以控制。本台架未考虑制动轮边所受的车辆垂向方向载荷,如有需要可通过加装液压伺服系统加载实现。

5 试验方法

当前,国内外尚无“制动+驱动”相结合的复合台架测试评价标准,根据第 3 章所述的整车工况和测试需求分析,本章选取以下典型项目介绍引入驱动电机后的复合线控系统试验方法。

5.1 加速性能试验

将 EMB/ADB 带轮边电驱动总成(见图 1、图 2,可以是整桥产品,也可以是整桥的 1/2,也可带轮胎)模拟实车状态安装到试验台上,连接好电池模拟器、控制器、冷却循环系统等。试验台主驱动电机处于可自由旋转状态,或处于试验转动惯量电模拟运行状态。首先使制动器处于释放状态,然后模拟电子油门最大开度,通过 CAN 通信方式控制电驱动总成的控制器输出,使得电驱动总成电机启动加速。记录从给定控制器输入信号开始,到试样电机启动直至驱动台架主轴转动达到模拟实际车速 100 km/h 的时间,即百公里加速时间,加速性能测试曲线如图 4 所示。图中 t_1 为加速反应时间,单位为 s; t_2 为车速从 0 到 v 的加速时间,当 v 等于 100 km/h 时,定义为百公里加速时间,单位为 s。根据记录的车速—时间曲线,还可以

测得从加速控制信号发出到电机响应输出转速的时间,即加速反应时间。

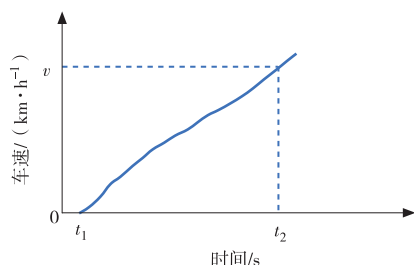


图4 加速性能测试曲线

5.2 陡坡起步模拟试验

将 EMB/ADB 带轮边电驱动总成(见图1、图2,可以是整桥产品,也可以是整桥的1/2,也可带轮胎)模拟实车状态安装到试验台上,连接好电池模拟器、控制器、冷却循环系统等。试验台主驱动电机处于可自由旋转状态。通过 CAN 通信方式操控控制器,模拟踩下制动踏板或驻车工况,使试验台主轴处于锁止状态。根据拟模拟的坡道,按4.2.3节要求计算出相应的扭矩值,并通过坡道模拟控制装置沿倒车方向施加在主轴上。如果控制器处于驻车工况,应通过 CAN 通信方式操控控制器,模拟先踩下制动踏板,再解除驻车工况。

陡坡起步模拟试验时,通过 CAN 通信方式,模拟松开制动踏板,停顿3 s或规定时间间隔后,迅速踩下电子油门踏板至设定开度,使得电驱动总成电机启动,直至主轴转速大于10 r/min,然后解除坡道模拟控制装置对主轴沿倒车方向施加的扭矩。记录松开制动踏板信号、踩下电子油门踏板控制信号、主轴转速和坡道模拟控制装置上施加扭矩等变量随时间变化的关系曲线,如图5所示。图中A为制动保持阶段,陡坡模拟准备阶段;B为制动释放且未踩下油门踏板阶段,上坡辅助功能检查阶段;C为踩下油门踏板,模拟汽车正常起步阶段;D为主轴转速达到10 r/min以上,陡坡起步模拟结束阶段。

观察图5中的记录曲线,从模拟松开制动踏板至踩下电子油门踏板期间,以及油门踏板在设定开度下,控制试验台主轴转速直至达到10 r/min的起步过程中,主轴转速是否出现负数,即观察是否出现后退溜车现象。

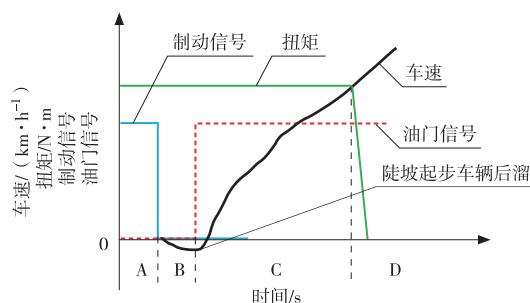


图5 陡坡起步模拟试验曲线

5.3 制动性能试验

将 EMB/ADB 带轮边电驱动总成(见图1、图2,可以是整桥产品,也可以是1/2整桥,也可带轮胎)模拟实车状态安装到试验台上,电驱动总成电机及控制器不参与工作或处于非使能状态,或将制动器总成部分单独进行试验。该部分试验内容属于常规制动性能试验,具体试验方法可参考QC/T 239—2015^[9]、GB/T 34422—2017^[11]、GB/T 37336—2019^[12]等标准要求,此处不再赘述。如果试样制动器为 EMB 电子机械制动器,仅需将标准中规定的制动气压(液压)输入更换为制动电压输入即可。

若需要验证轮边电机的电制动性能,或轮边电机制动与摩擦制动协同控制后的整体制动性能,测试时需使电驱动总成及控制器相关部件处于正常工作状态。对于未接入的信号通道,可通过注入仿真模拟信号、故障信号或屏蔽信号等方式,使测试条件满足测试要求。机械摩擦制动和轮边电机制动协同控制示意图如图6所示,单次全制动过程中,经历了单一轮边电机制动、轮边电机制动和机械摩擦制动复合制动以及单一机械摩擦制动3个阶段。通过制动测试,可以评估车辆制动控制策略的平顺性、舒适性,以及轮边电机制动对续驶里程的贡献。

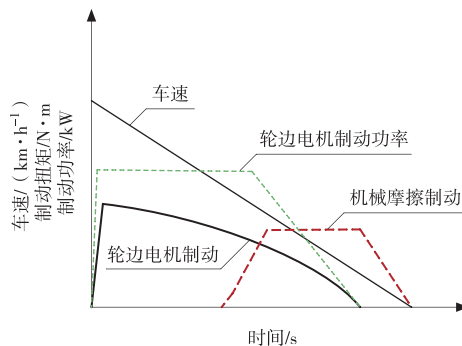


图6 机械摩擦制动和轮边电机制动曲线

5.4 道路模拟耐久试验

将 EMB/ADB 带轮边电驱动总成(可带轮胎)模拟实车状态安装到试验台上,连接好电池模拟器、控制器、冷却循环系统等。试验循环工况可参考 GB/T 38146.2—2019《中国汽车行驶工况 第 2 部分:重型商用车辆》^[21],并根据样件所配车辆类型进行选取,主要包括中国城市客车行驶工况、中国普通客车行驶工况、中国货车($GVW \leq 5\,500\text{ kg}$)行驶工况、中国货车($GVW > 5\,500\text{ kg}$)行驶工况、中国自卸汽车行驶工况和中国半挂牵引车列车行驶工况。亦可根据企业要求制定多级道路谱等试验循环工况。

1) 中国城市客车行驶工况(CHTC-B)。包括低速(399 s)、高速(911 s)2 个速度区间,工况时长共计 1 310 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.1,工况曲线见该标准中的图 1。

2) 中国普通客车行驶工况(CHTC-C)。包括市区(304 s)、城郊(893 s)和高速(603 s)3 个速度区间,工况时长共计 1 800 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.2,工况曲线见该标准中的图 2。

3) 中国货车($GVW \leq 5\,500\text{ kg}$)行驶工况(CHTC-LT)。包括市区(309 s)、城郊(874 s)和高速(469 s)3 个速度区间,工况时长共计 1 652 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.3,工况曲线见该标准中的图 3。

4) 中国货车($GVW > 5\,500\text{ kg}$)行驶工况(CHTC-HT)。包括市区(342 s)、城郊(988 s)和高速(470 s)3 个速度区间,工况时长共计 1 800 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.4,工况曲线见该标准中的图 4。

5) 中国自卸汽车行驶工况(CHTC-D)。包括低速(540 s)、高速(760 s)2 个速度区间,工况时长共计 1 300 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.5,工况曲线见该标准中的图 5。

6) 中国半挂牵引车列车行驶工况(CHTC-TT)。包括低速(473 s)、高速(1 327 s)2 个速度区间,工况时长共计 1 800 s,工况逐秒数据见 GB/T 38146.2—2019 附录 A 中的表 A.6,工况曲线见该标准中的图 6。

为使复合试验台主轴转速对应的试验车速与所选取的 GB/T 38146.2—2019 规定的 CHTC-B、CHTC-C、CHTC-LT、CHTC-HT、CHTC-D 或 CHTC-TT 试验循环工况逐秒数据相对应,并连续运行至规定的循环数,需要通过 CAN 通信方式,在模拟实车状态对应的试验转动惯量要求下,行驶阻力通过复合试验台主驱动电机来模拟,汽车的加速、速度保持或滑行通过模拟电子油门开度控制电驱动总成电机来控制。汽车的减速通过模拟制动踏板开度控制轮边制动器的制动来控制,如果减速过程中有再生制动控制参与,按实车控制器的控制策略进行。

道路模拟试验结束后,按要求检查试样各部件的磨损、开裂、变形、失效等异常情况,以及耐久后的加速、制动、能量回收率等各项性能和功能衰减情况。并根据需要,测算试样在某循环工况下的百公里电量消耗。

5.5 制动能量回收试验

将 EMB/ADB 带轮边电驱动总成(见图 1、图 2,可以是整桥产品,也可以是 1/2 整桥,也可带轮胎)模拟实车状态安装到试验台上,连接好电池模拟器、控制器、冷却循环系统等。开启制动能量回收功能。制动能量回收试验条件如下:①制动初速度: N_1 类车辆为 50 km/h、80 km/h,其他类车辆为 30 km/h、60 km/h。②在规定的制动压力(气压、液压或电流)范围内取不少于 5 个点进行试验,各试验点间的间隔尽量相等,各制动初速度所对应的每种制动压力(气压、液压或电流)各做一次试验。③记录每次制动试验过程中实测的电池模拟器电压和回馈电流,以及每次制动试验的制动初速度、制动初始温度、制动最高温度、制动时间、制动压力和输出制动力矩。

回收的制动能量按公式(4)进行计算:

$$E_1 = 1/3\,600 \times \int_{t_1}^{t_2} (I \cdot U) dt \quad (4)$$

式中: E_1 为单次制动过程中,由再生制动系统回收,最终回馈至电池模拟器的能量, $W \cdot h$; I 为单次制动过程中回馈至电池模拟器的电流, A ; U 为单次制动过程中电池模拟器两端的电压, V ; t_1 和 t_2 为参考 QC/T 239—2015 附录 A 有效制动时间段的开始时间和结束时间, s 。

根据实际需要,也可采用工况法进行制动能量回收效率试验。试验循环工况可参考 GB/T 38146.2—2019^[21],根据试样所配车辆类型选取,试验方法可参考 QC/T 1089—2017B.4 条^[10]。

6 结束语

本文提出了一种制动和驱动相结合的分布式电驱动复合线控制动系统的测试验证台架和方法,弥补了传统的单一的制动部件台架或驱动部件台架测试验证手段的不足。该系统可充分展现出复合台架测试验证可控性高、重复性好、成本较低、安全性好、效率高等优点,为汽车智能线控底盘技术重构相关新兴技术的试验验证和量产装车应用提供了新路径和新方法。

下一步将协同制动器带轮边电驱动总成及控制系统零部件生产企业、整车生产厂和测试装备生产制造厂商制造该测试台架,并进一步完善测试用例和测试方法,制定相关测试标准。为汽车智能线控一体化底盘及产业化赋能,为智能汽车的安全性、舒适性和可靠性提供技术支持。

参考文献:

- [1] 郭耀华,丁金全,王长新,等.商用车底盘线控技术研究现状及应用进展[J].汽车工程学报,2022,12(6):695-714.
- [2] 张利鹏,段嘉瑶,苏泰,等.电动轮驱动汽车空间稳定性底盘协同控制[J].机械工程学报,2022,58(10):209-221.
- [3] 苏亮.分布式电驱动汽车复合制动控制策略研究[J].客车技术与研究,2021,43(1):7-11.
- [4] 张志坚,朱学斌,李静,等.分布式多轮电驱动车辆回馈制动控制策略研究[J].机电工程技术,2022,51(4):110-114.
- [5] 刘刚.轮毂电驱动汽车制动能量回收控制策略研究[J].交通节能与环保,2023,19(1):66-69.
- [6] 靳立强,李星辰,田端洋,等.多轴分布式电驱动车辆电液复合制动控制研究[J].汽车工程学报,2024,14(2):241-254.
- [7] 熊璐,李聪聪,卓桂荣,等.电子机械制动器构型及控制技术发展现状[J].汽车工程,2023,45(12):2187-2199.
- [8] 王应国,曾繁卓,章士华,等.面向商用车 EPB 的气压制动钳总成驻车静特性试验方法与台架实现[J].汽车实用技术,2022,47(19):71-78.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部.商用车辆行车制动器技术要求及台架试验方法:QC/T 239—2015[S].北京:中国计划出版社,2015:1-20.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部.电动汽车再生制动系统要求及试验方法:QC/T 1089—2017[S].北京:科学技术文献出版社,2017:1-12.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部.汽车用制动盘:GB/T 34422—2017[S].北京:中国标准出版社,2017:1-16.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部.汽车制动鼓:GB/T 37336—2019[S].北京:中国标准出版社,2019:1-16.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部.汽车和挂车制动器用零部件技术要求及试验方法:GB 40164—2021[S].北京:中国标准出版社,2021:1-48.
- [14] SAE. Air brake performance and wear test code commercial vehicle inertia dynamometer: J2115_202008[S]. Rev. ed. New York:SAE International,2020:1-12.
- [15] SAE. Inertia dynamometer rotor crack test procedure for air disc brakes: J3080_202312[S]. New York:SAE International,2023:1-25.
- [16] SAE. Brake dynamometer squeal noise test procedure for commercial vehicles with air brakes: SAE J3213_202306[S]. New York:SAE International,2023:1-32.
- [17] 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:重型商用车辆:GB/T 18386.2—2022[S].北京:中国标准出版社,2022:1-16.
- [18] 中国汽车工程研究院股份有限公司.商用车制动器带轮边电驱动总成的试验台架及方法:202210424965.8[P].2022-07-05[2024-09-20].
- [19] 中国汽车工程研究院股份有限公司.采用惯性台架进行制动器带驱动总成的实车模拟试验方法:202211314064.X[P].2023-01-13[2024-09-20].
- [20] 国家机械工业局.机动车辆及挂车分类:GB/T 15089—2001[S].北京:中国标准出版社,2001:2-4.
- [21] 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:重型商用车辆:GB/T 38146.2—2019[S].北京:中国标准出版社,2019:1-80.