

测功机系统的研究综述

周腊吾, 郭浩, 赵晗, 马勉卓

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 用于动力机械设备功率和转矩测量的测功机系统主要由测功电机、测力机构及控制系统组成, 广泛应用于机械传动零部件的性能测试。简述了测功机系统在当前工业领域中的重要性, 概述了测功机系统的分类, 并简要对比分析了各类测功机的优缺点, 介绍了各类测功机系统的构成、工作原理及应用场景, 总结了测功机系统几种经典的控制策略, 最后介绍了测功机在变速器、齿轮箱、发动机及汽车底盘性能测试中的具体应用。

关键词: 测功机; 结构组成; 控制策略; 应用场景

中图分类号: TM 933.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)12-0001-09

doi: 10.12177/emca.2020.166

A Review of Research on Dynamometer System

ZHOU Lawu, GUO Hao, ZHAO Han, MA Mianzhuo

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The dynamometer system for the measurement of power and torque of power machinery equipment is mainly composed of dynamometer motor, dynamometer mechanism and control system. Such systems are widely used in performance testing of mechanical transmission components. The importance of the dynamometer system in the industrial field is briefly described. The classification of dynamometer systems is summarized, and the advantages and disadvantages of all kinds of dynamometers are analyzed. The structure, principle and application scenarios of the current dynamometer systems are introduced. Several classic control strategies of dynamometer systems are summarized. Finally, the application of dynamometer in the performance test of transmission, gearbox, engine and automobile chassis is introduced.

Key words: dynamometer; structure composition; control strategy; application scenarios

0 引言

测功机是一种动力机械设备功率和转矩的测量设备, 广泛应用于电机性能测试、机械传动零部件性能测试以及发动机性能测试等领域^[1-3]。测功机应用于电机性能检测和调试, 可以模拟和控制被测电机的负载, 与被测电机通过轴连接器连接, 以测量电机的电流、电压、转矩、转速等参数。测功机作为机械传动零部件性能测试(如自动变

速器)的加载装置, 可以模拟道路工况进行变速器性能测试、车辆传动系统性能匹配以及控制策略的研究^[4]。在模拟实船试验中, 测功机作为推进电机的负载来推进电机带动螺旋桨在场地中进行负载试验; 在车辆测试时, 测功机是负荷车的动力吸收装置, 对车辆动力性能、起停和热平衡进行测试。在检测汽车发动机性能时, 电力测功机广泛应用于发动机台架和底盘测功系统中; 发动机台架试验可以对发动机进行动力性、可靠性、经济

收稿日期: 2020-09-22; 收到修改稿日期: 2020-10-25

作者简介: 周腊吾(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机电器及其控制。

郭浩(1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电机系统及其控制。

赵晗(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术。

性、耐久性等各种试验和排放测试;汽车底盘测功机可用于汽车的动态测试,检测汽车在带载运行条件下可能遇到的故障,并且可以测试不同工作情况下的尾气排放。

本文描述了测功机的分类和结构拓扑,介绍了电力测功机的 PID 控制策略、矢量控制策略、直接转矩控制策略及模糊控制策略。最后,分析了测功机在电机性能测试、机械传动零部件性能测试、发动机性能测试等方面的应用现状与发展前景。

1 测功机的分类与结构

1.1 测功机的分类

测功机主要分为水力测功机、磁滞测功机、磁粉测功机、电涡流测功机、电力测功机,电力测功机又分为直流、交流 2 种电力测功机,交流电力测功机又分为交流同步电力测功机、交流异步电力测功机以及交流双馈电力测功机。

作为功率吸收性测功机,水力测功机优点是功率吸收范围广、持续工作性好、稳定性高、经济性好等。但水力测功机存在体积大、性价比低,只有在大转矩区段才能稳定工作的缺点。

磁滞测功机结构上相对简单、高速性能好、检测相对稳定、精度高,工作时很少用到如变频电源等辅助设备。但磁滞测功机和水力测功机一样,同样是吸收功率型测功机,其内部能量均将转变成热能形式散发。只有小功率同步电动机的机械特性测试才选用磁滞测功机来完成^[5]。

磁粉测功机具有体积小、力矩大、转动惯量小等优点,而且加工容易,施加和调节转矩方便,适用于动态转矩测量。磁粉测功机是功率吸收型机械,为提高运行功率,采用外施风冷和通水冷却。选用时,被测电机的额定转矩应是磁粉测功机的三分之一,过大会影响其测量精度^[6]。

电涡流测功机跟上述测功机一样,也是功率吸收型测功机,优点在于其测试系统简单、操作性强、测试精度高、内部结构稳定性较好、经济性好等,但电涡流测功机本身的缺点是结构复杂、运行可靠性低。

电力测功机以其操作简单、调速过渡稳定、可靠性高等显著特点,雄踞电机、机械传动设备及发动机性能测试设备的主导地位。电力测功机的特

性曲线如图 1 所示,加载过程中,当从超低转速加载到额定转速时为恒扭矩特性,从额定转速加载到最高转速时为恒功率特性,与多数机械负载的负载特性一致,满足被测发动机多种工况测试的要求。

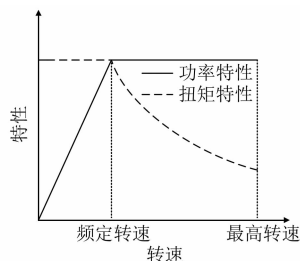


图 1 电力测功机的特性曲线

1.2 测功机的结构

1.2.1 水力测功机的结构

水力测功机结构如图 2 所示。将水力测功机主机安装在一个可以自由移动的机架上,牵引架牵引行走走到各测试地点^[7]。测功机主轴与被测负载的动力输出轴连接好,即可以测试该负载的发动机功率。

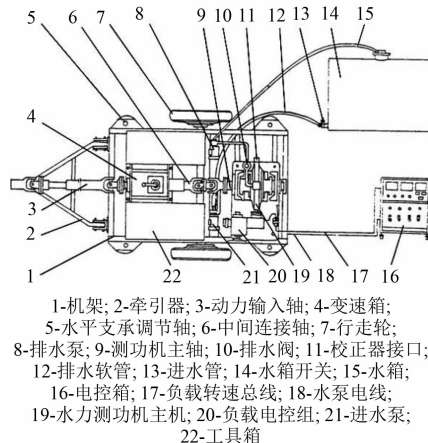


图 2 水力测功机结构图

1.2.2 磁滞测功机的结构

磁滞测功机结构如图 3 所示。磁滞测功机是由悬架在外轴承座上的磁滞制动器,应变梁转矩传感器、光电转速传感器和转矩放大器等所组成^[8]。

磁滞制动器的薄壁转子杯在被测电机转轴联轴器的带动下转动。当励磁绕组通电后,内外定子极性相反,在这个磁场中旋转的转子杯被磁

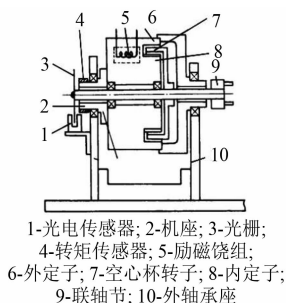


图3 磁滞测功机结构图

场反复磁化,并产生磁滞损耗,形成制动转矩。在内外定子上产生与制动转矩相反的转矩,促使定子顺转子旋转方向偏转,此偏转转矩为被测转矩。

应变梁转矩传感器安装在制动器后部的机座上,定子旋转方向偏转时,应变梁会相应发生形变,当形变后应变电阻桥不再平衡,输出直流电压,低噪声高精度放大器可以将电压放大到需求的转矩数值。

测速光栅安装在磁滞测功机的转轴末端,如果转轴转动,测速光栅促使光电断续器产生脉冲,转轴每转动一圈,光电断续器产生 60 个脉冲,经过整形放大,被测转速会直接显示在数码管上。

1.2.3 磁粉测功机的结构

磁粉测功机结构如图 4 所示。转轴的前伸出端用连接套与测试支架相连,可以接受被测机构的驱动扭矩。前轴伸出端上安装转速传感器^[9]。转子工作极面做成圆锥角,定子后轴伸出端上安装有定标用的砝码盘、力传感器及天平杆。磁粉填充在定子与转子之间的工作间隙中。测功机转子前轴伸出端上安装有转速传感器,力传感器安装在定子后轴伸出端上。

1.2.4 电涡流测功机的结构

电涡流测功机结构如图 5 所示。由电枢和励磁线圈、感应盘、矫正装置及测力装置组成^[10]。转子同轴安装的励磁线圈通直流电后会有磁通通过,因为在气隙和电枢体内表面产生交变磁场,所以会感应出“涡流”。转子在“涡流”和磁场的耦合作用下产生制动转矩,在电枢上产生同样的力矩,并被力矩传感器传输出来。

1.2.5 直流电力测功机的结构

直流电力测功机结构如图 6 所示。

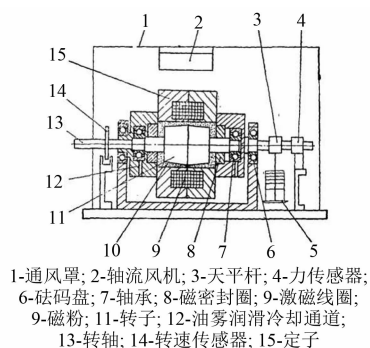


图4 磁粉测功机结构图

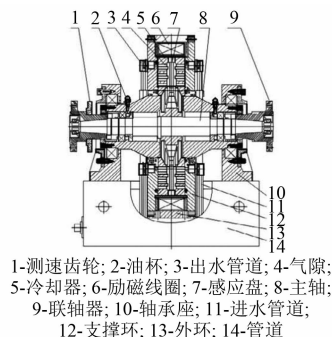


图5 电涡流测功机结构剖面图

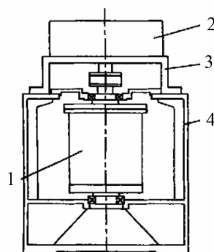


图6 直流电力测功机结构图

箱体支架上垂直安装着直流电机,电机尾部支撑采用角接触轴承,以承受电机重力^[11]。试验时,被测发动机安装于箱体支架上,直流电力测功机在发动机工作时产生的离心力、往复惯性力、侧向力等会引起振动,影响测量精度。为了降低振动,测功机支架采用铸铁箱体式结构,受力面上有加强筋。

1.2.6 交流电力测功机的结构

交流电力测功机的测试负载工况多样、种类繁多,对应有满足各种不同负载的需要的交流同步电力测功机、交流异步电力测功机及交流双馈

电力测功机系统的方案。

交流电力测功机结构如图 7 所示。交流电力测功机既可以作为发电机运行,也可以作为电机运行^[12],运行在发电状态测功时,发出的电功率被负载电阻所吸收。

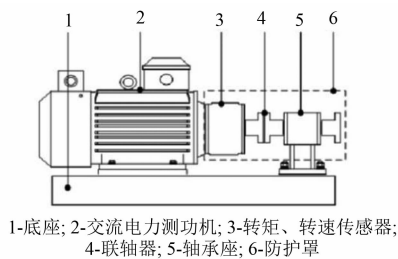


图 7 交流电力测功机结构图

交流同步电力测功机系统原理如图 8 所示。被测负载作为原动机,原动机驱动测功机,相应的接触器 C 断开、接触器 D 闭合,整流器 5 给测功机提供直流励磁,测功机作同步发电机运行,所发出的任意频率的交流电被整流器 3 整流,通过逆变器转变为与电网同频同相的交流电,输送给电网。在负载作为被试机械时,此时接触器 D 断开、接触器 C 闭合,测功机作电动机运行,定子接三相电网,转子绕组通过整流器 3 和逆变器将产生的转差功率馈送回电网。

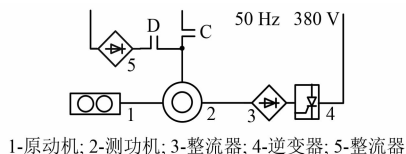


图 8 交流同步电力测功机系统原理图

交流异步电力测功机系统原理如图 9 所示。当原动机拖动测功机运行时,原动机提供的机械能使测功机转速超过同步转速,进入发电运行状态,并将电能输送给电网。

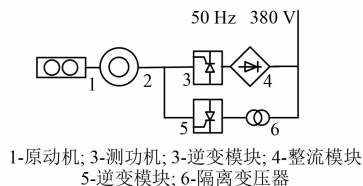


图 9 交流异步电力测功机系统原理图

交流双馈电力测功机结构如图 10 所示。主

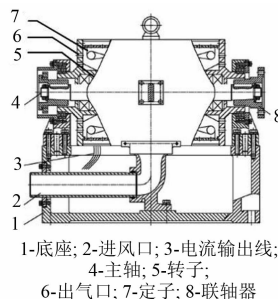


图 10 交流双馈电力测功机结构图

要由测力部分、校正部分、旋转部分及摆动部分构成^[13]。由图 10 可知,感应盘形似直齿轮,闭合磁通在励磁绕组通电时会形成周期性变化的气隙磁密,定子感应产生电动势不仅能发出电能,而且能同时产生制动转矩,外环及传力臂将该转矩传至测力装置上,力矩的大小通过力矩传感器转换成电信号输出,从而完成转矩的测量。

交流双馈电力测功机方案,既能高效地回收电能,又能达到较高的性价比。试验过程中,原动机驱动交流双馈电力测功机,测功机的定子连接到电网,转子绕组与三相变频器相连。由电机原理可知:

$$f_1 = pf_m \pm f_2 \quad (1)$$

式中: f_1 为电网的频率; p 为电机的极对数; f_m 为转子的机械频率,由原动机转速决定; f_2 为转子的电源频率。

当 $f_2 = f_1$ 时,转子速度为零。 $f_2 = 0$ 时,转子转速为同步转速。当 $0 < s < 1$ 时,电机为亚同步运行,若此时电机处于发电运行状态,则原动机将机械功率输送给电机,滑差功率被变频器通过转子输送给电机,而电能则通过定子端直接输送给电网。

2 测功机系统的控制策略

2.1 PID 控制策略

PID 控制是最早发展起来的工业控制算法,具有原理简单、鲁棒性好、可靠性高等特点,被广泛应用于工业过程控制,但在测功机 PID 控制系统中,传统 PID 控制器参数整定困难,难以很好地适配不同的运行工况^[14-15]。文献[16]提出了一种发动机性能测试系统用电涡流测功机的控制策略,采用状态空间 PID 控制,与传统的 PID 控制相比,具有很好的有效性和可控性。

另外,针对测功机系统的多耦合、大惯性非线性系统,传统 PID 控制很难精准控制,而模糊 PID 控制对此可以灵活的在线自动调整^[17-19]。文献[20]引入直流电力测功机模糊 PID 参数控制策略。模糊 PID 控制器的构造如图 11 所示。其模糊推理过程本质上是一个模糊控制器,其输入量为偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$,输出结果为 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 。因此,模糊推理过程可以参考常规模糊控制器,采用模糊化、模糊规则、反模糊化的设计思想。

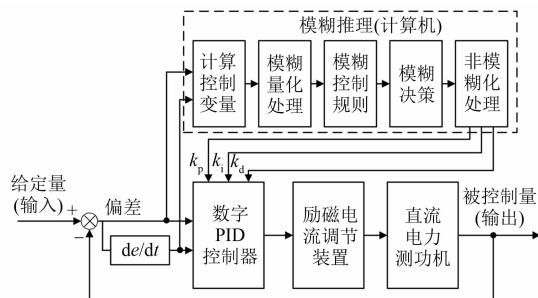


图 11 模糊 PID 控制器基本原理图

2.2 矢量控制策略

矢量控制又称磁场定向控制,是通过模仿直流电机的控制,以转子磁场来定向,达到对交流电机的转速和磁链控制的完全解耦控制,具有与直流电机相当的调速性能^[21]。在不同坐标系下将电机定子电流进行矢量替代,从而将电流分解为可以分别控制的 2 个分量:励磁分量和电磁转矩分量^[22]。

文献[23]基于传统的矢量控制理论,提出一种前馈解耦的感应电机矢量控制方法,得到的测功机改进矢量控制图如图 12 所示。通过转子磁链观测器与转矩观测器可以得到磁链与转矩的反馈值,并计算得到功率的反馈值,内环为电流环。通过前馈解耦控制,反馈补偿了交叉耦合电动势,并且为了减少前馈解耦对电机参数的需求,用模糊自适应控制器来取代传统 PI 控制器,大大减少了补偿项对控制数据的依赖性,提高了系统的稳定性。

2.3 直接转矩控制策略

测功机的矢量控制系统复杂,且易受测功电机参数变化的影响^[24],因此直接转矩控制技术作为一种高效的新型交流变频调速技术迅速发展起来,解决了转子磁场定向控制时产生的控制参数稳定性差、转子磁链测量精度低、矢量变换操作过程繁琐多变等问题^[25-26]。

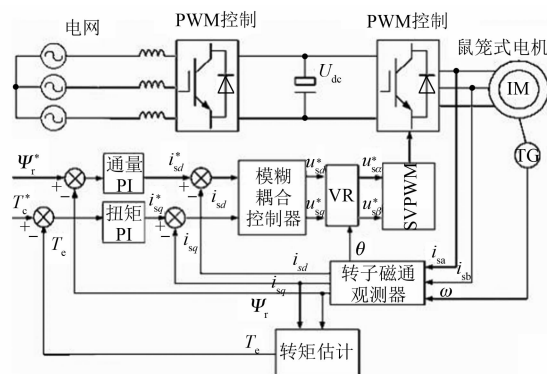


图 12 测功机的改进矢量控制图

文献[27]中的交流电力测功机采用典型的直接转矩控制技术,详细分析了 n/M 模式的控制算法。 n/M 模式系统框图如图 13 所示。图 13 中, $G_{mt}(s)$ 为关于测功电机转矩的传递函数, $G_{pn}(s)$ 为被测发动机油门关于转子转速的传递函数,虚线框为闭环控制系统,且设计了 3 个反馈控制电路:虚线框 C 为发动机油门控制电路,虚线框 B 为发动机转矩控制电路,虚线框 A 为测功电机转速控制电路。双闭环转矩调节系统由油门内环控制电路和发动机转矩外环控制电路共同构成。

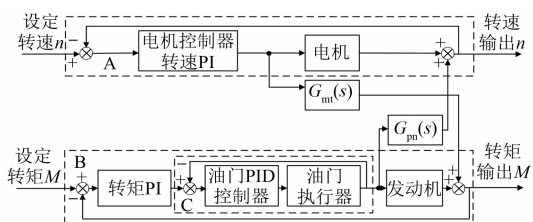


图 13 n/M 模式系统框图

2.4 模糊控制策略

模糊控制方法是一种新型计算机智能控制策略,以模糊语言变量、模糊集合论以及模糊逻辑为基础^[28]。模糊自适应 PID 控制器跟踪性能优良,超调量相对较小,控制精准度比传统控制方式高,系统调节速度也更快,可以精确调整 PID 参数,大大提高了动态过程中的控制精度^[29]和系统参数的响应速度^[30]。

文献[31]提出基于模糊逻辑的直接转矩控制系统。基于模糊逻辑的测功机直接转矩控制系统框图如图 14 所示。可以识别并计算电磁转矩误差的幅值和方向,并能识别确认磁链的扇区,最

终达到施加电压空间矢量的目的。

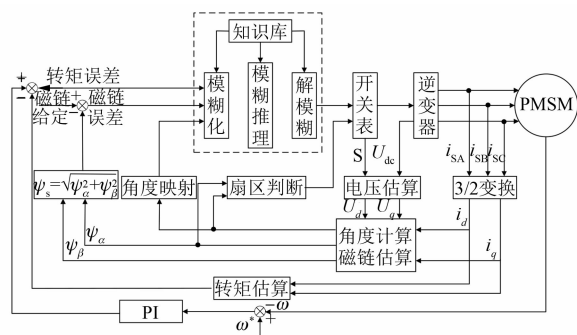


图 14 基于模糊逻辑的测功机直接转矩控制系统框图

3 测功机系统的应用现状与发展趋势

3.1 电机性能测试领域

测功机适合各种不同类型的电机参数测试,具有动态延迟低、设计结构选择性多、能耗低、运行过程稳定等优点,同时具有良好的转速和转矩控制性能^[32-33]。测功机的电压、频率、功率、效率等额定值的选择应按机电一体化的原则,从系统最优出发来确定^[34]。测功机由于需要频繁地启动和停车、加速和减速,其负载要求和技术性能等有着特殊性,故其性能与普通工业电机不同^[35]。

在电动汽车(EV)性能测试领域,文献[36]建立了由 EV 驱动电机与测功机组成的试验台架,分别从驱动循环模式和驾驶员模式对 EV 进行测试,结果表明,2 种情况下的车辆阻力计算准确。中山大学团队设计了一套先进的 EV 电动性能试验台,并在文献[37]中介绍了试验台的结构、基本参数和工作原理,提供了一种利用电力测功机模拟 EV 惯性的方法:匹配给定道路条件下应存在的扭矩,并使用扭矩反馈给电机控制器以保持适当的扭矩。为了解决 EV 道路情景仿真,文献[38]搭建了一种借助电力测功机对拖式 EV 日常道路情景仿真的试验模型,可以同时驱动电机稳定性试验和暂态连续循环情景模拟。

在混合动力电动汽车(HEV)性能测试领域,文献[39]针对锂电池与超级电容双能源电混混合动力系统,研发了以交流电力测功机为测试工具的混合动力系统仿真模拟试验模型。文献[40]设计了一种基于 CAN 总线的 HEV 底盘测功机,提高了 HEV 和汽车总成的水平,为 HEV 能量利用试验评价提供了研究平台和思路。文

献[41]提出了基于分块结构设计 HEV 动力综合试验模型的方法,可以更迅速更便捷地匹配不同 HEV 动力类型组合需要的场景。文献[42]开发了虚拟仿真弱 HEV 动力综合模拟平台,通过电力测功机对发动机运行全过程的模拟,仿真实现了起停一体化驱动电机和测控模块。

在燃料电池混合动力汽车(FCV)性能测试领域,中国交通科学技术研究院与清华大学合作建立了一个配备重型底盘测功机的实验室。设计了底盘测功机实验室的总体框架,研究了 3 种氢耗测量方法,开发了实验室氢耗测量系统,并介绍了底盘测功机实验室的应用情况,重点对氢耗测量系统的准确性和运行稳定性进行了测试^[43]。

3.2 机械传动零部件性能测试领域

变速器和扭矩传动机构在机械推进系统中的应用迅速增加^[44]。变速器使汽车的动力性能和经济性能得到大幅提升,自动变速器的性能测试变得越来越重要。文献[45]以电涡流测功机为加载装置,设计了一种关于汽车液力自动变速器的仿真模型,并对前进挡和后退挡的失速转速以及调速控制器的主油压进行测试,测试结果均符合设计需求。文献[46]基于 AVL 测功机系统搭建了电机系统试验台架,实现了台架测量数据同步与集成控制,并实现了基于试验台架的车用电机系统性能参数测试方法,为电动汽车车用电机系统开发与测试提供了借鉴,为整车试验奠定了测试数据基础。文献[47]以虚拟仪器技术、控制技术和传感器技术为基础,辅以测功机、驱动电机、采集卡等硬件设备,设计了一种测试控制系统,能够快速简便地测试自动变速器的运行工况。

开发自动变速器的关键是离合器的自动控制,离合器控制性能优劣直接影响自动变速器工作性能乃至整车的起步过程和更换档位的体验。文献[48]利用交流电力测功机和辅助设备模拟道路工况和整车惯量,设计了一套自动离合器综合性能测试装置。

在船舶推进系统性能测试领域,文献[49]利用电力测功机作为推进电机负载,设计了一种能量互补反馈的电机模拟平台,解决了水池试验消耗资源大等问题,且通过能量互相补偿反馈减少了能源消耗。文献[50]研发了一种船舶混动电推进系统的仿真平台,利用该平台,能够判断能量

控制方法是否匹配现场实际操作,并且可以进一步解决内部控制结构的优化问题,大大加快了混动船舶电推进系统应用到实际船舶的速度。

在逆变器性能测试方面,文献[51]利用高带宽电枢电流控制的直流电力测功机模拟机械负载,设计了一种商用交流逆变器现场调试和性能评估的高性能测试设备。

负荷车辆是一种常用的路况情景模拟测试设备,可以检验车辆的热能平衡状态、车辆的动力推进、车辆的负载刹车过程以及车轮轮毂的质量情况等^[52]。文献[53]针对底盘测功机电模拟研究存在模拟模型不精确的问题,研究了底盘测功机电模拟原理,分析了汽车在道路工况和测试工况下的动力学行为,建立了底盘测功机加载装置阻力电模拟的数学模型,基于快速原型的底盘测功机加载平台,完成了底盘测功机恒速测功试验。文献[54]阐述了负荷车辆以及电力测功机的工作过程,对比分析了电力测功机在保持频率不变时恒转矩调速和恒功率调速的不同特点,介绍了电力测功机在负荷车辆中的应用状况。文献[55]介绍了载有电力测功机的负荷车辆构造,检测了车辆动力性、热平衡能力、刹车过程等,优化了整车性能。

3.3 发动机性能测试领域

发动机台架试验可以较准确地衡量发动机动力特性和经济情况,是一种必需测试设备^[56]。发动机台架测试可以快速检验发动机各操控系统的运行状态和动态响应过程,准确采集必要的工况数据^[57]。美国威斯康星大学麦迪逊分校动力系统控制研究实验室建立了一种先进的暂态测功发动机检验模型,并在文献[58]中描述了该系统,给出了虚拟车辆瞬态测功系统的开环和闭环半实物仿真试验结果。为了优化目前交流异步电力测功机系统转速和转矩的检测过程、降低试验系统的成本消耗,文献[59]提出了一种以无轨迹卡尔曼滤波算法(UKF)为理论基础的交流异步电力测功机系统间接测量策略,简化了发动机传动设备等的输入输出功率检测方式。

汽车底盘测功机是一种重要的室内台架测试平台,通过控制模拟负载与加载装置,用转鼓表面仿真道路平面的情景状况,模拟现实生活中车辆遇到的各种路况。并且可以和尾气分析仪、尾气

烟度计、转速测速仪以及智能控制系统有机结合测量不同工况下的汽车尾气排放^[60]。文献[61]利用摩托车上路运行时与道路的位移关系,将摩托车运行过程中的实际工况相应地转移到车辆底盘测功机上,可以实现室内场地测试车辆性能以及汽车尾气污染物排放量。文献[62]介绍的安装在三轴六轮车辆上的底盘测功机,可实现单轴、双轴或三轴驱动,满足了常见中小型汽车的测试仿真。文献[63]提出了基于移动机器人的底盘测功机设计策略,轮式移动机器人底盘测功机可测试和分析移动机器人的动力性能、滑轮功率以及能量损失。文献[64]以电力测功机为负载,提出了模拟汽车道路制动特性的等效转动惯量试验方法,针对汽车底盘测功机阻力仿真试验过程中,测量数据的非线性波动会导致仿真精度降低的问题,提出了一种快速、高精度的阻力仿真试验自补偿方法,增加输入数据的非线性空间估计作用因子和补偿因子,提高了系统的响应速度和仿真精度。文献[65]提出了一种反拖模拟挂车测量测功机自身损耗功率的方法,并实际对某型工程机械进行底盘动力性能测试和试验数据分析,评价了机械底盘的传动效率与发动机的输出功率。

4 结 语

本文在简述测功机系统的功能、分类及基本结构的基础上,系统总结了电力测功机包括PID控制、矢量控制、直接转矩控制及模糊控制等多种控制策略。最后,阐述了测功机系统在电机性能测试、机械传动零部件性能测试及发动机性能测试3个领域的应用现状和发展趋势。

【参 考 文 献】

- [1] 李宗帅,董春,刘颜. 国内外电力测功机发展现状[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(5): 1.
- [2] 周腊吾,张桂香,曾利权,等. 交流电力测功机的方案研究[J]. 电机技术, 2004(1): 32.
- [3] 马瑞海,王丽芳,张俊智,等. 带随机网络时滞补偿的测功机动态负载模拟[J]. 汽车工程, 2020, 42(5): 700.
- [4] 程广伟,周志立,邓楚南. 履带车辆液压机械无级变速器试验台测控系统研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(4): 656.
- [5] 黄凯,袁先达. 小功率同步电动机的同步牵入时间

- 及牵出转矩检测系统[J]. 微特电机, 1998, 26(2): 35.
- [6] 黄佩佳, 邵媛, 徐秉俊, 等. 小功率电动机加载方式简析[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(5): 45.
- [7] 武华, 任宪忠, 邢国庆, 等. 移动式水力测功机架稳定性设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1996, 8(4): 64.
- [8] 邵蕊娜. 基于磁滞测功的小功率电机 B 法能效检测系统研究[J]. 微特电机, 2015, 43(7): 105.
- [9] 张铁民, 黄鹏焕, 黄沛盛, 等. 轮毂式永磁直流测功机系统的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 829.
- [10] 曲博野, 陈钢. 基于电涡流测功机的负荷车结构设计[J]. 科技创新导报, 2012(36): 48.
- [11] 张树军, 任京乐, 吉学东, 等. 立式直流电力测功机的研制[J]. 小型内燃机与摩托车, 2001(4): 44.
- [12] 刘建国. 交流电力测功机及其控制系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [13] 张志刚, 张桂香, 刘腾, 等. 电力测功机转矩影响因素模糊灰色关联分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 693.
- [14] 李树珉, 李琨, 武朋辉. 电涡流底盘测功机模糊 PID 控制算法研究[J]. 中国测试技术, 2008, 34(2): 108.
- [15] 田颖, 曾贤波, 卢青春. 电涡流测功机控制器控制算法研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26(6): 58.
- [16] NAHARI T, JOELIANTO E, SUYATMAN S. An eddy brakes dynamometer control system design using state space based PID controller[C]//2012 IEEE Conference on Control, Systems & Industrial Informatics, 2012.
- [17] 郭磊, 陈文会, 刘小民. 模糊自适应 PID 在汽车底盘测功机中的仿真研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(7): 76.
- [18] 刘爱平, 陈鸿蔚. 交流异步电力测功机的模糊 PID 控制[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2013, 23(1): 5.
- [19] 李树珉, 高睿, 马效, 等. 汽车排放检测时测功机控制算法研究[J]. 中国测试, 2010, 36(5): 15.
- [20] 张为春, 曾祥军. 基于模糊 PID 控制的汽车底盘模拟测功机测控系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 17.
- [21] 张楠. 基于异步电机改进矢量控制的交流电力测功机系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [22] 赵进. 汽车变速器试验台驱动控制系统研究与仿真试验分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.
- [23] ZHANG N, ZHANG W. Research on an energy feedback power dynamometer based on improved vector control[C]//2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012.
- [24] 杨家强, 黄进. 一种基于 PWM 整流器和异步电机直接转矩控制的新型动态电力测功机[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1223.
- [25] 刘述喜, 王明渝, 范杰, 等. 异步测功机直接转矩控制动态负载研究[J]. 微电机, 2007, 40(12): 78.
- [26] 陈鸿雁, 李山, 廖仕利. 基于直接转矩控制的交流测功机研制[J]. 机床与液压, 2005(4): 125.
- [27] 田颖, 金振华, 聂圣芳, 等. 交流电力测功机控制系统研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(1): 125.
- [28] 袁文华, 龚金科, 袁福强, 等. CJD 交流电力测功机的研制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(2): 195.
- [29] ZHANG W, QU F, WANG X. Development of the MCG-200 simulated chassis dynamometer based on fuzzy-PID[C]//2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008.
- [30] 李文礼, 石晓辉, 施全, 等. 车辆动力总成试验台动态模拟控制方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(2): 278.
- [31] 王明渝, 张忠强. 模糊直接转矩控制的永磁同步电机在测功机中的应用[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(3): 56.
- [32] 李茂森. 交流测功机在电机性能测试中的应用[J]. 电机与控制应用, 2005, 32(8): 62.
- [33] GRANTHAM C, TABATABAEI-YAZDI H. A novel power electronic machineless dynamometer for load testing and efficiency measurement of three-phase induction motors[C]//Proceedings of IPEMC 2000, Third International Power Electronics and Motion Control Conference, 2000.
- [34] ZHOU L, WEI Y, HUANG S, et al. Design and research on variable-frequency speed-regulating electric power dynamometer motor[C]//ICEMS' 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2001.
- [35] 陈积先, 张华树, 孟辉, 等. 电动汽车用电机及控制器测试系统研制[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 68.
- [36] FAJRI P, AHMADI R, FERDOWSI M. Control approach based on equivalent vehicle rotational inertia suitable for motor-dynamometer test bench emulation of electric vehicles[C]//2013 International Electric Machines & Drives Conference, 2013.

- [37] ZHA H, ZONG Z. Emulating electric vehicle's mechanical inertia using an electric dynamometer[C] // 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010.
- [38] 周美兰, 张小明, 刘占华, 等. 电动汽车道路工况模拟测试平台[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(1): 81.
- [39] 郑悦, 谢长君, 黄亮, 等. 锂电池与超级电容混合动力汽车系统在环综合测试[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 821.
- [40] ZHAO S, LI N. Chassis dynamometer for hybrid electric vehicle based on controller area network[C] // 2012 Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing, 2012.
- [41] 王伟华, 金启前, 曾小华, 等. 混合动力汽车动力总成试验台研究[J]. 中国公路学报, 2005(2): 103.
- [42] 徐艳民, 陈黎明, 郭孔辉. 弱混合动力汽车动力总成试验测试系统开发[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(2): 87.
- [43] CHEN M, JIN Z, LU Q, et al. A chassis dynamometer laboratory for fuel cell hybrid vehicles and the hydrogen consumption measurement system[C] // 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.
- [44] RODIC M, JEZERNIK K, TRLEP M. Control design in mechatronic systems using dynamic emulation of mechanical loads[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005.
- [45] 李庆, 罗锡文, 陆华忠, 等. 汽车液力自动变速器试验台的计算机测试系统[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(2): 110.
- [46] 王欢. 基于 AVL 测功机的车用电机台架试验研究[J]. 机电工程技术, 2018, 47(2): 11.
- [47] 罗小青. 基于虚拟仪器的自动变速器测控系统研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(4): 509.
- [48] 张志刚, 石晓辉, 刘栓起, 等. 自动离合器综合性能试验系统开发与试验[J]. 机械设计, 2015, 32(7): 25.
- [49] 郭昊昊, 刘彦呈, 任俊杰. 基于异步电力测功机的船舶推进电机控制[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(2): 96.
- [50] 高迪驹, 黄晓刚, 孙彦琰, 等. 混合动力船舶电力推进试验平台设计[J]. 中国航海, 2014, 37(2): 15.
- [51] HEWSON C R, SUMNER M, ASHER G M, et al. Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of AC inverters[C] // 1998 Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998.
- [52] 王天颖, 项昌乐, 李明喜. 装备液黏测功机的负荷车特性研究[J]. 工程机械, 2008, 39(2): 6.
- [53] 李强, 赵学平, 张晓瑞, 等. 基于快速原型的底盘测功机阻力电模拟研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(1): 7.
- [54] 熊祖品, 张亚, 谢亚玲. 交流电力测功机在负荷拖车上的应用[J]. 专用汽车, 2014(2): 72.
- [55] 周超军, 肖成诚, 甘瑞, 等. 基于交流电力测功机的负荷车结构设计[J]. 专用汽车, 2018(3): 85.
- [56] WANG J, WU M, JIANG P, et al. Application of DC electric dynamometer in the PTO power test of tractors[C] // 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011.
- [57] 李梅, 王君萍. 发动机台架试验的测试技术[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(增刊 1): 260.
- [58] BABBITT G R, MOSKWA J J. Implementation details and test results for a transient engine dynamometer and hardware in the loop vehicle model[C] // Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, 1999.
- [59] 吴绪成, 胡芳, 张桂香, 等. 基于 UKF 的交流异步电力测功机软测量模型[J]. 计算机仿真, 2010, 27(11): 286.
- [60] 李炳焕, 刘少杰. 汽车底盘测功机阻力模拟方法的研究[J]. 工程与试验, 2020, 60(2): 3.
- [61] 甘永梅, 姜庆明, 王锐钰, 等. 交流底盘测功机电控系统的设计[C] // 第 11 届全国电气自动化电控系统学术年会论文集, 2002.
- [62] 陈东雷, 高世伦, 余江胜. 底盘测功机控制系统的开发[J]. 汽车工程, 1998(3): 139.
- [63] MRÓZ P, BROL S. Concept of chassis dynamometer for wheeled mobile robots[C] // 2013 International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems (SELM), 2013.
- [64] LV Y, HE W, HOU M, et al. Emulation and experimental study of drum dynamometer for simulating the vehicle's road braking[C] // 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.
- [65] 赵玮, 王强, 何晓晖. 基于测功机的工程机械底盘动力性能实验误差分析与方法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(5): 151.