·实验教学·

基于实验教学复用的大功率电机实验台的设计与实现

胡　玮，熊永前，杨　军

（华中科技大学 电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘要：研制了一套 HZDJ-2 型电机学及电力拖动综合实验台，该电机实验台为电机学和电力拖动控制系统两门课程提供实验教学复用的大功率机组实验教学平台，能够实现各类电机稳态运行和特性测定，以及各类传统电力拖动系统控制规律和静、动态性能测定等实验内容。电机实验台自主设计了大功率电机驱动电源、可组合的电机机组以及集成式可调交直流 RLC 负载箱，采用了一系列新技术和新方法，使得其在实验内容设计和实验规模方面，相较于国内同类实验设备处于领先地位。该电机实验台的设计与实现方法在电气工程专业本科教学改革中具有较好的借鉴和推广价值。

关　键　词：电机实验台；实验教学复用；大功率电机驱动电源；可组合的电机机组；集成式可调交直流 RLC 负载箱

中图分类号：G640　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12179/1672-4550.20210441

Design and Realization of High-power Motor Experimental Table Based on Experimental Teaching Reuse

HU Wei, XIONG Yongqian, YANG Jun

（School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China）

Abstract: A set of HZDJ-2 motor experimental table is designed and developed to provide high-power experimental teaching platform for experimental teaching reuse of the courses of “electrical machinery” and “control system of electric drives”, which can realize the steady-state operation and characteristic measurement of various motors, as well as the control law and static and dynamic performance measurement of various traditional electric drive systems. The experimental table is independently designed with a high-power motor driving power supply, a combinable motor unit, an integrated adjustable AC/DC RLC load, and adopts a series of new technologies and methods, which makes the motor experimental table in a leading position compared with similar domestic experimental teaching platforms in terms of experimental content design and experimental scale. The design and realization of the motor experimental table has a good reference and promotion value in the undergraduate teaching reform for electrical engineering specialty.

Key words: motor experimental table; experimental teaching reuse; high-power motor driving power supply; combinable motor unit; integrated adjustable AC/DC RLC load

在电气工程学科的本科教学体系中，电机学和电力拖动控制系统均是重要的基础课程，其中电机学是电气工程学科本科生的必修专业基础课，电力拖动控制系统是选修专业核心课。两门课程既有各自的独立性也有紧密的衔接性：电机学主要研究各类电机的基本类型、基本理论以及运行原理和运行特性；电力拖动控制系统主要研究以驱动电机为核心的直流调速系统和交流调速系统的工作原理、运行原理以及控制规律和控制策略。在大部分高校电气工程专业培养中电机学是电力拖动控制系统的先修课[1−6]。两门课程实验共同涉及的知识点很多，且具有很强的互补性和递进关系[7−11]。

对于两门课程实验的实验装置而言，目前国内教学设备企业生产一类小功率实验教学平台，可以实现电机学和电力拖动控制系统的实验教学

收稿日期：2021−09−07；**修回日期：**2022−03−05

作者简介：胡玮(1973−)，男，博士，高级工程师，主要从事电力电子学、电机学和电力拖动控制系统等方向的研究。
E-mail: huwei@hust.edu.cn

复用。这类平台可以完成以上两门课程的一般性实验内容，且全部采用小功率机组进行设计(额定功率在 150 W 左右)[12−16]。这类小功率实验教学平台制造成本较低，在实验过程中的不安全因素较少。但其大部分实验曲线较差，无法与课堂上学习的理论完全对应，也无法完成同步电机稳定运行、同步发电机并网的稳定性等重要的实验内容。而求取各类电机的稳定和极限数据，对于学生学习和理解相关课程是相当重要的。另外，采购国内教学设备企业生产的这类通用型实验教学平台，只能按照厂家已开发的实验内容给学生安排实验教学，这种实验授课方式既无法实现学生的差异化培养，也无法满足国家对各高校双一流学科建设的要求。

为解决以上问题，华中科技大学电气与电子工程学院自主设计研制了一套 HZDJ-2 型电机学及电力拖动综合实验台(以下简称实验台)，于 2019 年研制成功并投入教学使用。该实验台为学院电机学和电力拖动控制系统两门课程提供实验教学复用的实验教学平台，其特点是采用大功率实验教学机组进行设计，包含了定制化的大功率直流电机、三相异步电动机、三相同步发电机、单相及三相组式变压器和三相芯式变压器，其参数和特性完全符合教材的要求，学生在实验过程中可以获取与教材基本对应的实验曲线，避免了小功率实验教学平台实验曲线较差的传统问题。同时大功率实验教学机组的启动、停车等常规实验操作过程也帮助学生进一步加深对电机结构和特性的理解，提供了实验教学设备上的真实感。在实验内容方面，实验台通过自主设计的大功率电机驱动电源、可组合的电机机组和集成式可调交直流 RLC 负载箱并采用了一系列新技术和新方法，扩展了传统小功率实验教学平台可开出的实验项目，实验内容覆盖了电机学和电力拖动控制系统两门课程的大部分教学内容。实验台自投入使用以来，已为学校不同院系的本科生开展了各类实验教学服务，获得学生的一致好评。

1　大功率电机实验台的设计

实验台实物如图 1 所示。其框架结构由优化布局的操作控制台、反复试制定型参数符合电力设备范围的电机工作台、集成式可调的交直流 RLC 负载箱组成。

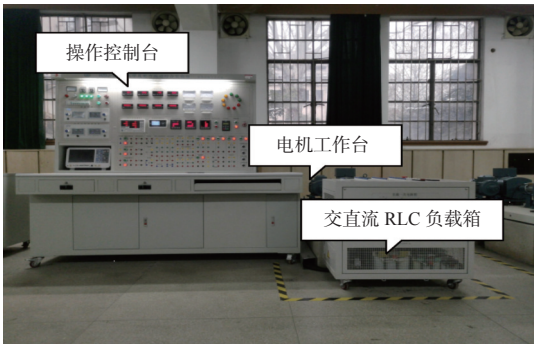


图 1　HZDJ-2 型电机学及电力拖动综合实验台图片

操作控制台是学生的接线、操作和数据记录工作区，也是实验台的主体结构，由总电源保护控制区、监测仪表区、电机驱动电源区、测试仪表区、数字示波器区和学生接线区等部分组成。总电源保护控制区包含有三相和单相输入保护装置、输入指示灯、实验台急停按钮和实验台照明等实验设备，它是实验台电源总控和过流保护的区域。监测仪表区包含有数字式直流电压、电流表，数字式交流电压、电流表，指针式交流电压、电流表等实验装置，其中数字式直流电压、电流表用于测量直流电机的电枢电压(电流)、励磁电流(电压)以及三相同步发电机的励磁电流(电压)，数字式交流电压、电流表和指针式交流电压、电流表均作为不同电机机组运行时的监测仪表，监测仪表区是实验教师进行巡视时的主要观察区域，通过检测仪表显示的数值和电机运行时的状态，教师可以准确判断学生的实验过程是否正确。电机驱动电源区包含有自主研发的直流电机电枢电源和励磁电源，三相同步发电机励磁电源以及变频器，其中直流电机电枢电源和励磁电源分别为直流电机提供直流电枢电压和直流励磁电流，三相同步发电机励磁电源为三相同步发电机提供交流励磁电流，变频器为三相异步电动机提供不同工作模式的交流驱动。它们共同实现了实验台的课程实验教学复用。其中直流电机电枢电源可实现直流电动机开环控制和转速、电流双闭环控制之间的切换，直流电动机开环控制能够完成直流电动机稳态运行及工作特性测定，转速闭环控制能够完成直流电动机 V-M 调速系统控制规律和静、动态性能测定，而变频器能够完成三相异步电动机稳态运行及工作特性测定以及 VVVF 变频调速系统起动、调速、工作特性和机械特性测定。测试仪表区包含有三相电参数测量仪、转速转矩测量仪、三相电压和电流表等实验

设备，其中三相电参数测量仪用于测量实验过程中三相电压、电流、有功功率和无功功率等电参数值，转速转矩测量仪用于测量不同机组实验过程中的实时转速、转矩和输出功率，三相电压、电流表用于测量大功率装置如三相调压器等的实时输出电压、电流值。测试设备区是学生记录数据的主要观察区域。数字示波器区包含有数字示波器，主要用于测量电机运行时的电压、电流波形以及不同工况条件下的速度曲线。学生接线区包含有监测仪表区和测试设备区中各类仪表和设备的接线端子，直流电机、三相异步电动机和三相同步发电机的接线端子，单相、三相组式变压器和三相芯式变压器的接线端子，直流、交流接触器的接线端子，三相调压器接线端子，电网输出端接线端子，负载箱接线端子，同步指示灯接线端子，取样电阻接线端子以及波形测量端接线端子。学生接线区是学生实验过程中的实际操作区域。

电机工作台是实验教学机组安装、固定和运行的工作区，由额定功率为 2.2 kW 的工业用直流电机、三相异步电动机、三相同步发电机和扭矩转速传感器等部分组成，并且采取特别定制的方式，使得电机性能参数符合课程教学的要求。交直流 RLC 负载箱是交、直流发电机组负载，由可调节参数和输出功率的三相交流电阻负载、三相交流电感负载、三相交流电容负载和直流电阻负载等部分组成。电机工作台和交直流 RLC 负载箱共同为电机学和电力拖动控制系统两门课程的不同实验内容提供大功率实验机组和负载。实验台组成结构如图 2 所示。

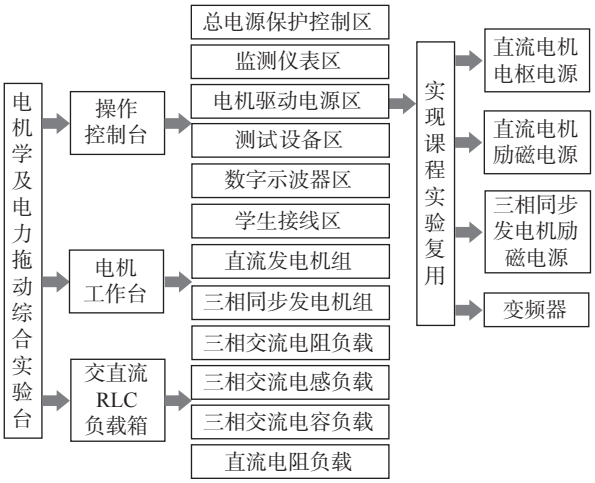


图 2　实验台组成结构

实验台的主供电方式为三相供电，五线连接。包括三根相线(A、B、C 三线)、一根工作零线(N 线)，以及一根与实验台外壳连接的保护接地线(PE 线)。其主要为需要三相供电的设备提供电力，在操作控制台上包括三相调压器、三相电网输出端、变频器和直流电枢电源，在电机工作台上包括三相异步电动机和三相同步发电机，以及交直流 RLC 负载箱等。以上这些设备通过各自的交流接触器与电网三相端相连接，均可单独控制其开通及关断。电机实验台主电路线路图如图 3 所示。

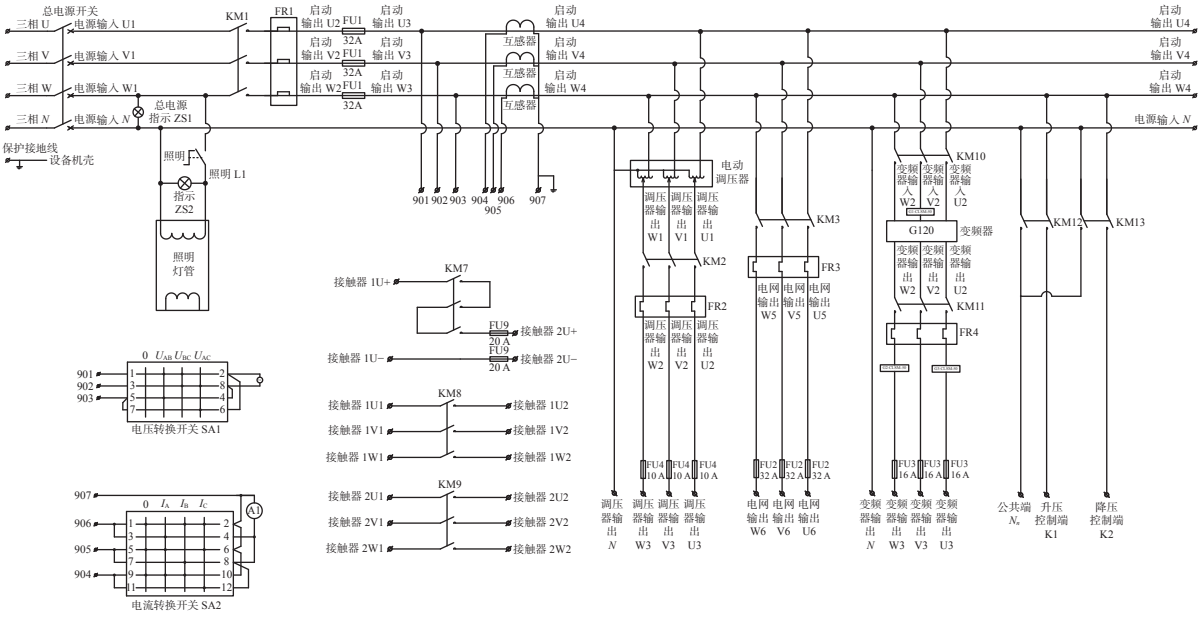


图 3　实验台主电路线路图

实验台另外提供一路单相供电，为操作控制台上需要单相供电的设备提供电力，包括数字式交直流电压、电流表，直流励磁电源，同步励磁电源，扭矩转速传感器测量仪表，示波器等。同时，单相供电还为实验台提供操作电源，为实验台各区块需要三相供电和单相供电设备的输入输出控制按键提供电力，包括主电路控制、三相调压器输出控制、三相电网输出控制、直流电枢电源控制、同步励磁电源控制、直流励磁电源控制、直流接触器控制、交流接触器控制、变频器输入输出控制和降压控制等。实验台操作电源线路图如图 4 所示。

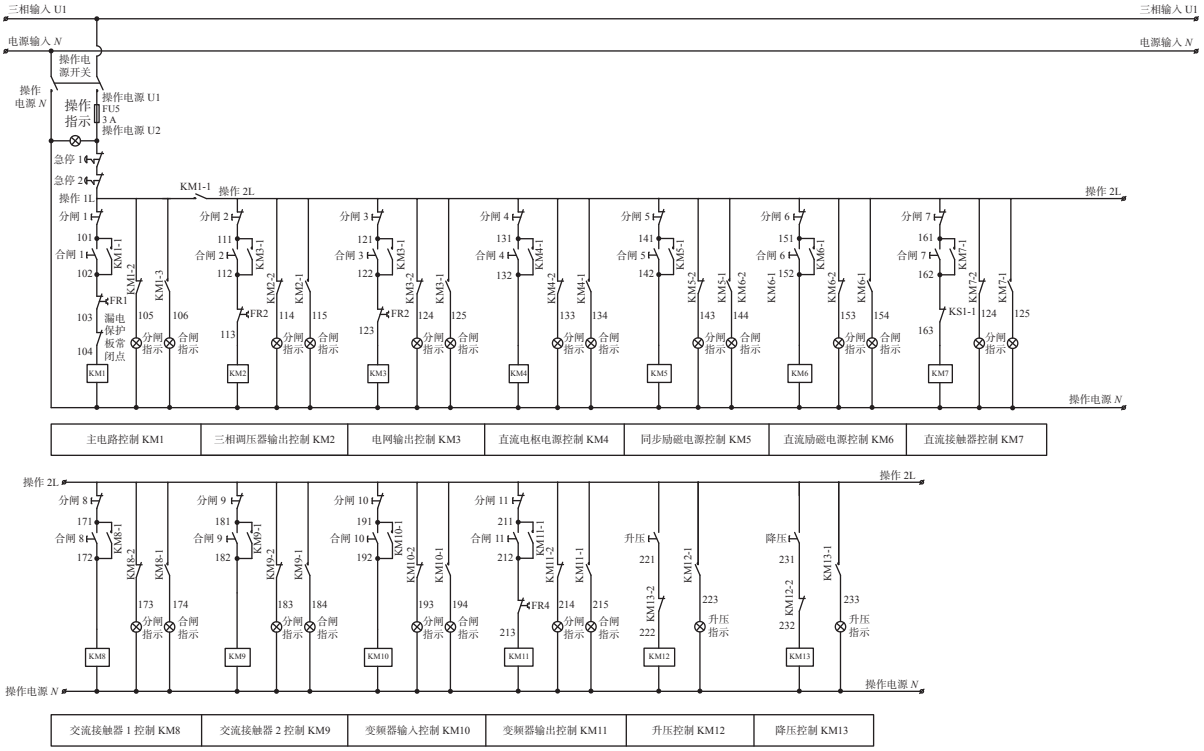


图 4　实验台操作电源线路图

2　创新的实验内容设计

实验台为电机学和电力拖动控制系统两门课程开设 15 个实验项目，实验设置符合电气工程专业实验教学的发展方向，在实验设计和实验规模方面，相较于国内的同类实验设备处于领先地位。

具体而言，目前电机实验台在电机学课程实验方面可开设 4 个必做实验项目和 9 个选做实验项目。必做实验项目包括直流电动机起动、调速、工作特性和机械特性测定；单相变压器空载、短路和三相变压器联结组；三相异步电动机空载、短路和工作特性测定；三相同步发电机并网运行、有功调节、无功调节和 V 形曲线测定。选做实验项目包括直流发电机空载特性和负载特性测定；单相变压器空载电流波形测定；组式变压器和芯式变压器带单相负载运行；三相变压器并联运行；三相同步发电机空载和短路运行；三相同步发电机零功率因数负载运行；三相同步发电机外特性测定和调整特性；三相同步发电机低转差法测量直轴和交轴同步电抗；三相同步发电机瞬态参数测定。实验台在电力拖动控制系统课程实验方面可开设 2 个必做实验项目，包括直流电动机 V-M 调速系统起动、调速、工作特性和机械特性测定；三相异步电动机 VVVF 变频调速系统起动、调速、工作特性和机械特性测定。选做实验为适应不同层次的课堂教学要求，满足学有余力的学生深入学习各类电机以及交、直流电机控制相关知识的需要。另外，通过电机实验台配置的各类实验模块，学生也可以在实验教师指导下进行自主设计性实验。

通过实验台配置的各类实验模块以及自主设计的一系列基本实验、选作实验和自主设计性实验，能够激发学生的学习兴趣和深入思考，有利于学生在实验过程中主动参与、加强互动及合作交流。能够养成学生实事求是、严肃认真、细致

踏实的科学作风和良好的实验习惯。能够巩固加深课堂所学的理论知识，以及运用基本理论分析、处理实际问题的方法。按照实验台目前可开设的实验内容，已编制了新版《电机学实验指导书》和《电力拖动控制系统实验指导书》，能够满足不同资质的学生从验证性实验到设计性实验的需要。

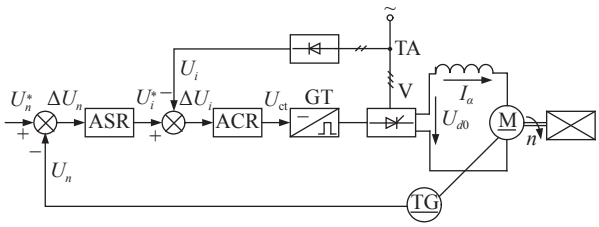
3　自主设计的实验教学设备

为实现大功率机组实验教学和电机学、电力拖动控制系统两门课程的实验教学复用，以及扩展可开出实验项目的需求，实验台自主设计了大功率电机驱动电源、可组合的电机机组以及集成式可调交直流 RLC 负载箱，同时采用了一系列新技术和新方法，提升了实验台的整体建设水平。

3.1　大功率电机驱动电源实现课程实验复用

为实现电机学和电力拖动控制系统两门课程实验教学的复用功能，实验台自主设计了一套大功率直流电机电枢电源、直流电机励磁电源和三相同步发电机励磁电源，主要为电机机组运行提供电枢电压和励磁电流。其中直流电机电枢电源为直流电机运行提供电枢电压，考虑到课程实验教学复用，直流电机电枢电源的设计以实现直流电动机转速闭环和电流闭环的双闭环 V-M 调速系统为核心，该调速系统能够进行平滑的速度调节，具有较宽的调速范围，调速系统在工作范围内能够稳定工作，非常适合学生在电力拖动控制系统课程学习时作为直流调速系统的实验内容。双闭环 V-M 调速系统原理图如图 5(a)所示，该调速系统包含了速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR，电流调节器 ACR 输出的移相触发控制电压 U_{ct} 通过对触发电路 GT 的控制角 α 的控制，实现晶闸管可控整流桥 V 输出电枢电流 I_α 可控。在额定励磁电流的条件下，直流电动机的转矩与电枢电流 I_α 成正比，控制了 I_α 就等于控制了直流电动机的转矩进而就可控制其转速 n。因此，速度调节器 ASR 可根据速度误差 ΔU_n 来给出电流指令信号，由电流执行环节去达到直流电动机升(或降)速的目标，进而实现转速的调节及控制[17−19]。

直流电动机电枢电源图片如图 5(b)所示，该电枢电源由两个部分组成，左侧是由触发电路 GT、晶闸管可控整流桥 V 和滤波电感组成的开环直流电动机电枢电源；右侧是由速度调节器 ASR、电流调节器 ACR 和采样、比较电路组成的数字闭环调节器。在设计数字闭环调节器时，速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 均采用数字 PI 调节方式进行设计，数字闭环调节器以速度调节器 ASR 作为主闭环系统，把电流调节器 ACR 设计为一个电流随动子系统，即使得 I_α 能够尽快地跟随 ASR 的输出量 U_i^* 变化，实现对直流电动机转矩和转速的控制。数字闭环调节器可在操作面板上进行目标转速 n 和速度调节器 ASR 的 P 和 I 参数的设定。为方便实验数据的测定，操作面板上还设置了一系列的信号采样点，可供采样的信号包括给定转速、积分参数、PI 参数等重要实验数据，方便学生通过数字示波器进行测量。当通过电源选择开关把数字闭环调节器关闭时，直流电动机电枢电源在开环模式下工作，此时电枢电源通过旋钮设定移相触发控制电压 U_{ct} 控制触发电路 GT 的控制角 α，进而实现电枢电流 I_α 可控。



(a) 双闭环 V-M 调速系统原理图

(b) 直流电机电枢电源图片

图 5　可实现课程实验复用的直流电机电枢电源

3.2　可组合的机组配置实现实验项目最大化

国内教学设备企业生产的电机实验教学平台通常采用固定机组的方式进行实验教学，即不同的实验内容分别选择厂家提供的对应的实验机组。这种方式通常适用于小功率实验机组，而对于大功率实验机组，则需要考虑电机和转矩转速测量装置复用的问题，通过可组合的机组配置能够提高设备和实验场地利用率，实现可开出实验项目的最大化。

在实验台的设计过程中，综合考虑电机学和电力拖动控制系统课程的实验教学内容，在电机工作台上配置了三台额定功率为 2.2 kW 的工业级电机，包括直流电机、三相异步电动机和三相同

步发电机，以及一台共用的扭矩转速传感器。三台电机可以组合成两套不同的实验教学机组，其一是由直流电动机拖动三相同步发电机组成的三相同步发电机组，如图 6 所示。该机组可应用于直流电动机和三相同步发电机的参数测量及稳定运行特性测定等实验内容。其二是由三相异步电动机拖动直流发电机组成的直流发电机组，如图 7 所示。该机组可应用于三相异步电动机和直流发电机的参数测量及稳定运行特性测定等实验内容。电机实验台通过专业设计的滑轨实现了不同运行机组之间的切换和固定，可以满足直流发电机、直流电动机、三相异步电动机、三相同步发电机四种电机类型的实验内容。另外，电机实验台还配置了三台单相变压器和一台三相芯式变压器。三台单相变压器可组合成一台三相组式变压器，从而可以开展单相变压器、三相组式变压器和三相芯式变压器带单相负载及并联运行等实验内容。通过仔细设计各实验教学机组的参数和机械布局，电机实验台以最少的实验教学机组和实验教学设备实现最大化的实验项目。

3.3　RLC 负载箱实现实际工况条件模拟

国内教学设备企业生产的通用电机实验教学平台通常采用三相阻性负载箱或三相灯柜作为实验机组的负载，这种方式简化了各类机组运行的实际工况条件，不利于学生理解电机学和电力拖动控制系统课程的理论教学内容。

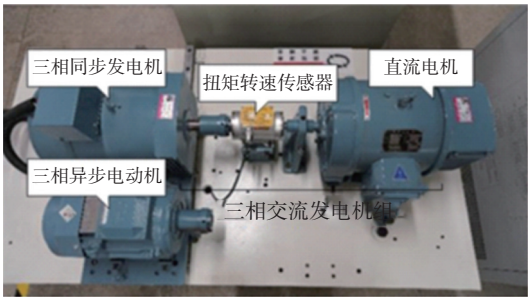


图 6　三相同步发电机组图片

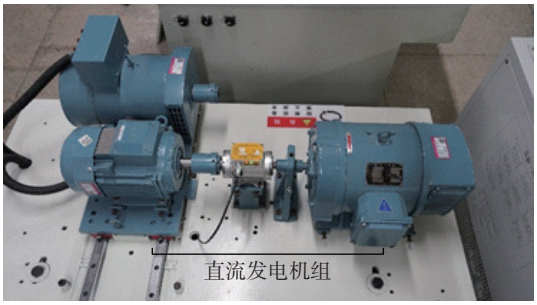


图 7　直流发电机组图片

为更好地模拟各类机组运行的实际工况条件，扩展可开出的实验项目，电机实验台自主研制了一套大功率集成式可调交直流 RLC 负载箱。负载箱一次电路图如图 8 所示。

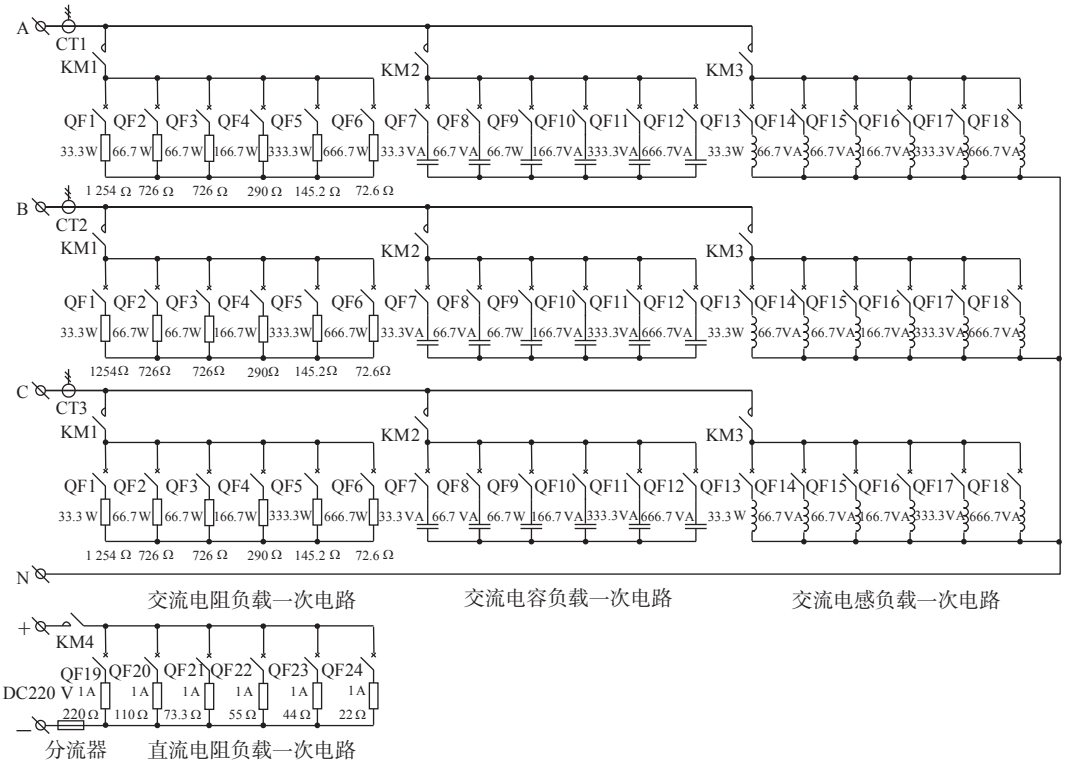


图 8　大功率集成式可调交直流 RLC 负载箱

该负载箱包括三相交流电阻负载、三相交流电感负载、三相交流电容负载和直流电阻负载，三种三相交流负载额定电压和最大功率均为 380 V/4 kW（或 380 V/4 kVA），直流电阻负载额定电压和最大功率为 220 V/3.3 kW。负载箱可以通过交流接触器 KM1~KM3 和交流断路器 QF1~QF18 自由组合为不同阻抗和不同功率的三相交流负载，也可以通过直流接触器 KM4 和直流断路器 QF19~QF24 组合为不同功率的直流电阻负载，方便不同的实验教学要求。负载箱图片如图 9 所示，四种交直流负载集成在一个负载柜上，还配置了相应的测量仪表和开关装置，同时配置了风扇散热功能，具备温度过热自动报警保护功能。在三相交流电感负载方面，通过多次样机研制实现了在 1.2 倍额定电压工况条件下电感负载电抗值基本不变，最小负载功率因数控制在 0.13 以下。

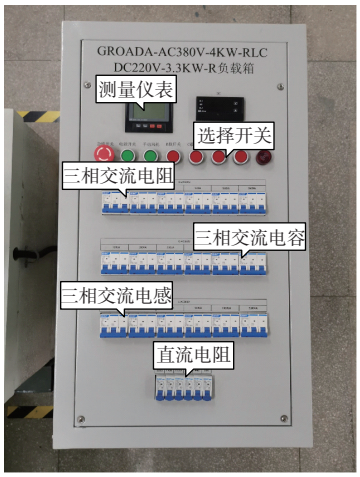


图 9　大功率集成式可调交直流 RLC 负载箱

4　结束语

本实验台为电气工程专业的学科基础课电机学和专业核心课程电力拖动控制系统提供了复用的大功率实验教学平台，能够完成直流电机、三相异步电动机、三相同步发电机和变压器等各类电机的稳态运行、特性测定和参数辨识，以及直流电动机 V-M 调速系统、三相异步电动机 VVVF 变频调速系统控制规律和静、动态性能测定等各类实验内容。实验台自主设计了大功率电机驱动电源、可组合的电机机组以及集成式可调交直流 RLC 负载箱，采用了一系列新技术和新方法，使得其设计水平领先于国内同类实验装置。通过一年多以来的实验操作证明：实验台易于操作、性能稳定、通用性好、安全可靠，能够完全满足以上两门课程对学生专业综合能力培养的要求。实验台的设计与实现方法在电气工程专业本科教学改革中具有较好的借鉴和推广价值。

参 考 文 献

[1] 董淑惠, 李永刚. 《电机学》课程教学方法改革探究[J]. 高教学刊, 2020(27): 147−150.
[2] 许瑾, 蒋林, 赵万明. 以能力培养为目标的电机学课程改革[J]. 高教学刊, 2020(25): 121−124.
[3] 李翠萍, 李书权, 陈继开, 等. 提升能力培养的电机学教学改革探索[J]. 教育现代化, 2020, 7(38): 34−37.
[4] 于焰均, 朱焜秋, 孙宇新. “电力拖动自动控制系统”课程的教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2018, 40(3): 40−42.
[5] 韩谷静, 吴雨川, 秦亮, 等. “电力拖动自动控制系统”课程的教学模式研究[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(S1): 125−127.
[6] 於锋, 吴晓, 吴晓新, 等. 工程教育专业认证下电力拖动自动控制系统课程教学改革[J]. 教育现代化, 2018, 5(51): 59−60.
[7] 肖金凤, 龚学余, 王有香. 电机学精品课程建设的实验教学改革研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 125−128.
[8] 胡亚娟, 苏韬. 《电机学》实验课程教学方法的改进[J]. 教育教学论坛, 2013(47): 22−23.
[9] 赵翠华. 电机实验教学的探索[J]. 中国电力教育, 2008(21): 141−142.
[10] 齐文娟, 徐青菁, 孙佳, 等. 电机学实验教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 229−232.
[11] 曹建平. 基于 OBE 理念的电力拖动自动控制系统实验教学改革探索[J]. 中国教育技术装备, 2005(S1): 35−36.
[12] 谢慕君, 俞雪林, 牛晓升. DKSZ-Ⅲ电机实验装置的数字化改造[J]. 电气电子教学学报, 2010, 32(4): 101−102.
[13] 陈西玉, 郑群. 教学仪器系列介绍（三）——电机系统教学实验台[J]. 电气电子教学学报, 1999, 21(4): 93−95.
[14] 李晓宁, 胡天友, 葛一楠, 等. 电力拖动综合实验台的研制[J]. 实验科学与技术, 2005(z1): 113−114.
[15] 贾艳丽, 陈松立. DTZT-1电机与拖动综合实验台的研制[J]. 实验室研究与探索, 2002, 21(3): 58−59.
[16] 张伟, 陈西玉. MCL-Ⅱ型电机电力电子及电气传动教学实验台[J]. 电气电子教学学报, 2002, 24(6): 109−112.
[17] 朱杰, 周超群. V-M双闭环直流调速系统的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2013(17): 182−183.
[18] 刘文宇. 基于V-M双闭环直流调速系统设计[J]. 科技广场, 2015(3): 92−95.
[19] 祁汭晗. 直流V-M双环不可逆调速系统调节器的设计[J]. 电气自动化, 2012, 34(5): 1−3.

编辑　张莉