·实验教学与教学实验·

制冷压缩机性能实验台的开发与教学应用

何诗洁，蔡德华*，何国庚，丁国忠，叶晓明

（华中科技大学 能源与动力工程学院，武汉 430074）

摘要：为了更好地将理论知识与工程实践相结合，针对能源与动力工程专业学生开设了“制冷剂压缩机性能实验”专业综合性实践教学项目。对标国家标准建立了基于第二制冷剂量热器法和制冷剂液体流量计法的压缩机性能实验台架，设计了实验教学内容，探索了实验教学关键点。通过该实验项目使学生了解制冷压缩机性能实验的原理与方法，掌握制冷系统的调节和控制规律，进而强化工程思维，提升解决工程问题的能力。

关　键　词：制冷压缩机；性能实验；实验教学；实验装置

中图分类号：TH45; G642　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12179/1672-4550.20240316

Development and Teaching Application of a Performance Test Bench for Refrigerant Compressors

HE Shijie, CAI Dehua*, HE Guogeng, DING Guozhong, YE Xiaoming

（School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China）

Abstract: To better integrate theoretical knowledge with engineering practice, a comprehensive practical teaching project, the “Refrigerant Compressor Performance Experiment”, was established for energy and power engineering students. A compressor performance test bench based on the second refrigerant calorimeter method and refrigerant liquid flow meter method was developed in accordance with national standards. The experimental teaching content was designed and the key teaching points were explored. This experimental project enables students to understand the principles and methods of refrigerant compressor performance testing, master the regulation and control of refrigeration systems, thereby strengthening their engineering thinking and enhancing their ability to solve engineering problems.

Key words: refrigerant compressor; performance test; experimental bench; experimental teaching

随着新一轮科技革命和产业变革的加速进行，对高素质工程技术人才的需求日益迫切。为满足国家战略发展新需求和国际竞争新形势，各大高校积极探索和实践“新工科”，切实担当起培养卓越工程师的重大使命[1–4]。华中科技大学能源与动力工程学院提出了基于优质平台群的“基础认知型、基础设计型、专业综合型、研究创新型”四层次创新人才培养实践教学体系[5–7]。其中强调实验平台要建设成综合性平台，满足学生多层次的实践学习需求，以综合提高学生的分析、判断、解决问题的工程实践能力和创新能力。

制冷是能源与动力工程专业中的一个重要方向。压缩机作为制冷系统的“心脏”，为制冷系统运行提供动力，压缩机的容积效率和性能系数直接决定了制冷系统的制冷能力和经济性[8]。且在制冷行业中压缩机性能测试是新机型研制、产品质量检验和配套设计等过程中不可或缺的环节。因此，为了增强学生对压缩机性能的理解，开设压缩机性能实验项目显得格外重要，多所高校也在压缩机性能实验课程上做了诸多探索。文献 [9] 开发了蒸汽压缩式制冷循环热力计算的虚拟仿真实验台，促进学生在实践过程中理解理论知识，但是对学生工程实践及动手能力锻炼稍显不足；文献 [10] 设计了变工况制冷压缩机实验台用于制

收稿日期：2024−06−14

基金项目：华中科技大学实验技术研究项目(HZKJSYJSXM2024M072)。

作者简介：何诗洁，硕士，工程师，主要从事制冷实验教学及实验技术方面的研究。E-mail: 504564126@qq.com

*** 通信作者：**蔡德华，博士，副教授，主要从事制冷与低温技术方面的研究。E-mail: 490316551@qq.com

冷压缩机课程教学，该实验台进行了较大简化，测试方法仅采用第二制冷剂量热器法，且各工况参数不能实现自动和手动精确控制，可开展实验项目有限；文献 [11] 开发了制冷压缩机性能测试实验台，能够实现自动和手动操作，满足本科生教学需要，但是未充分考虑不同制冷量和不同制冷剂对实验台架的需求，学生开展探索性实验需求不能满足。

为满足学生工程实践能力和创新能力培养需求，一方面严格对照国家标准建立制冷压缩机性能实验台，开展压缩机性能实验，实现理论知识与行业工程实际的衔接，培养本科生的工程实践能力；另一方面，结合目前行业研究方向，对制冷压缩机性能实验台的蒸发盘管、电气部件、制冷剂管路等进行了优化设计，满足进行不同制冷量、不同制冷剂压缩机的探索性研究需求，培养本科生创新能力，切实落实“新工科”建设对人才培养的综合性要求。

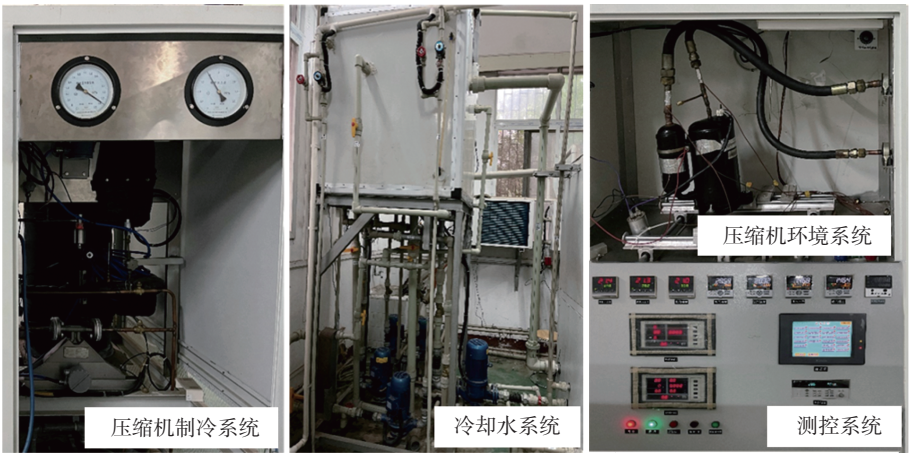
1　实验台架

1.1　实验测量基本原理

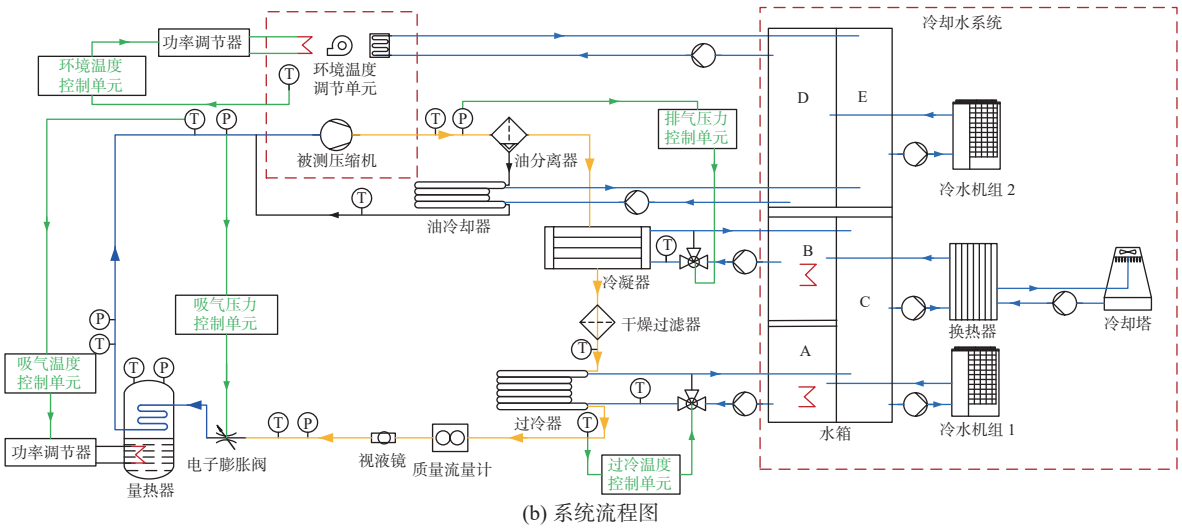
根据 GB/T 5773−2016 容积式制冷剂压缩机性能试验方法的规定，为了保证测量结果的准确性，压缩机性能试验应采用测量原理和测量量均不同的两种方法（即 X 法和 Y 法）同时进行测量，且 X 法和 Y 法试验结果之间的偏差应在±4%以内[12]。其中第二制冷剂量热器法测试模式最接近制冷系统真实运行状态，制冷剂液体流量计法最方便易行，因而本系统中选取第二制冷剂量热器法作为主测法，制冷剂液体流量计法作为辅测法。

1.2　实验台架

本实验台由压缩机制冷系统、冷却水系统、压缩机环境系统及测控系统组成，如图 1 所示。



(a) 实验台实物图



(b) 系统流程图

图 1　制冷压缩机性能实验台及系统流程图

1.2.1　压缩机制冷系统

主要包括被试压缩机及冷凝器、过冷器、电子膨胀阀和带有蒸发盘管的量热器构成的制冷循环。此外，在过冷器后端设有质量流量计以测量制冷剂流量，为了保证测量精度，在压缩机制冷剂出口设有油分离器分离润滑油。量热器中第二制冷剂为 R22，量热器中蒸发盘管分为管径不同的 3 组盘管以满足不同制冷量压缩的测试需求，量热器中加热器分为两组，功率分别可在 0~7.5 kW 调节；冷凝器采用壳管式冷凝器，换热面积 2 m^2；过冷器和油冷却器采用套管式冷凝器。

1.2.2　冷却水系统

用于为压缩机制冷系统提供合适温度和流量的冷却水。主要设备有多容腔水箱、板式换热器、冷却塔、冷水机组 1、冷水机组 2 等冷却部件，冷却水加热器和过冷水加热器等加热部件，分别用以调节水箱内冷却水和过冷水温度。还包括用于调节经过冷凝器和过冷器水流量的冷凝器供水三通阀和过冷器供水三通阀，以及水泵等输水部件。其中，水箱尺寸 0.90 m×0.95 m×1.00 m，板式换热器换热面积 1.82 m^2，冷水机组 1 额定制冷量 3.7 kW，冷水机组 2 的额定制冷量 3.5 kW，冷却水加热器和过冷水加热器的功率可在 0~9 kW 调节，冷凝器水泵流量 11.4 m^3/h，扬程 20 m，其余水泵流量 4.0 m^3/h，扬程 15 m。

1.2.3　压缩机环境系统

用于维持压缩机周围环境温度在设定温度。主要设备有机箱、电加热器、风机盘管。压缩机放置在一个与其他部件隔开的可封闭的机箱内，通过电加热器和风机盘管调节机箱环境温度。其中风机额定风量 510 m^3/h，电加热器加热功率调节范围为 0~4.5 kW。

1.2.4　测控系统

主要包括温度、压力、流量和功率的测量装置，数据采集系统及可编程逻辑控制器(programmable logic controller，PLC)等，通过调节电子膨胀阀、量热器电加热器、冷凝器供水三通阀、过冷器供水三通阀、机箱电加热器以实现对吸气压力(蒸发温度)、吸气温度、排气压力(冷凝温度)、过冷度和环境温度的调节和控制，保证压缩机稳定运行在实验工况。为了方便数据采集与数据处理，开发了测控软件，其界面如图 2 所示。

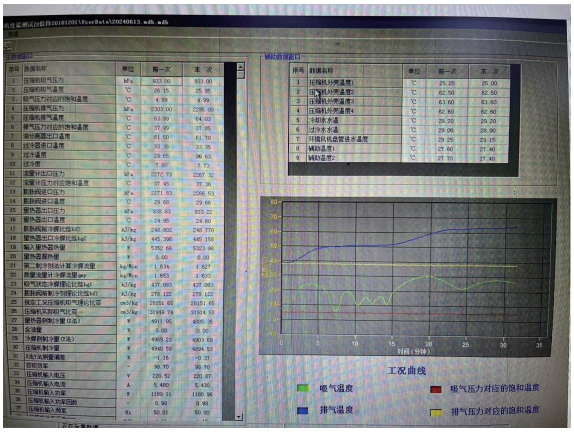


图 2　压缩机性能实验台测控软件界面

1.3　实验台架验证

选取测试工况为吸气温度 18.3 ℃、冷凝温度 44.3 ℃、蒸发温度 7 ℃、过冷度 4.3 ℃、压缩机环境温度 20 ℃。通过调节电子膨胀阀、量热器电加热器、冷凝器供水三通阀、过冷器供水三通阀、机箱电加热器，使蒸发温度、吸气温度、冷凝温度、过冷度和环境温度控制在目标温度允许偏差范围内。此时通过测控系统读取系统运行的关键参数并记录，如表 1 所示。

表 1　典型测试数据

参数	数值
吸气压力/ kPa	998.32
吸气温度/ ℃	18.31
排气压力/ kPa	2 684.47
过冷器出口温度/ ℃	39.96
过冷度/ ℃	4.34
膨胀阀进口压力/ kPa	2 662.64
膨胀阀进口温度/ ℃	39.28
量热器出口压力/ kPa	998.21
量热器出口温度/ ℃	17.33
量热器加热器平均功率/ W	5 102.95
质量流量计流量/(kg·min^{-1})	1.85
压缩机输入功率/ W	1 347.01
机箱环境温度/ ℃	20.34
环境温度/ ℃	22.32
量热器第二制冷剂压力/ kPa	970.07
量热器第二制冷剂温度/ ℃	22.31

根据 GB/T 5773−2016 容积式制冷剂压缩机性能试验方法法规中的压缩机各性能参数的计算规范和要求[12]，对上述测试工况下压缩机制冷量、性能系数(coefficient of performance，COP)和容积效率等关键性能进行计算，数据如表 2 所示，得

到压缩机制冷量为 5.15 kW， COP 为 3.82，容积效率为 0.87。且第二制冷剂量热器法和质量流量计法两种测量方法测量偏差为 2.83%，小于法规要求 4%，测量结果有效，验证了压缩机性能实验台性能符合国家标准要求。

表 2　典型数据处理

参数	数值
膨胀阀前制冷剂比焓/(kJ·kg^{-1})	264.65
量热器出口制冷剂比焓/(kJ·kg^{-1})	434.81
第二制冷剂量热器法制冷剂流量/(kg·min^{-1})	1.80
质量流量计制冷剂流量/(kg·min^{-1})	1.85
吸气状态制冷剂理论比焓/(kJ·kg^{-1})	435.94
膨胀阀前制冷剂理论比焓/(kJ·kg^{-1})	266.00
规定工况压缩机吸气比容/(cm^3·kg^{-1})	28247
实际工况压缩机吸气比容/(cm^3·kg^{-1})	28138
量热器漏热量/ W	0.04
第二制冷剂量热器法制冷量/ W	5076.68
质量流量计法制冷量/ W	5222.42
压缩机制冷量/ W	5148.55
测量偏差Δ/%	2.83
COP	3.82
容积效率	0.87

2　教学实践

2.1　教学设计

为充分尊重学生的认知过程，基于实验装置设计了基础性实验、拓展性实验和开放性实验三层次于一体的实验教学体系，实现学生从掌握实验原理、学会设备操作及数据处理方法，到开展基本规律性研究学习，到基于研究项目的探索性学习，三位一体地培养学生的综合能力。

2.1.1　基础性实验

基础性实验的目的是掌握制冷压缩机性能实验原理和方法，掌握制冷系统主要工况参数控制规律和调节方法，掌握压缩机性能实验数据处理与分析方法。为了充分锻炼学生动手能力，激发学生独立思考，除了测试该压缩机的额定工况点外，教师还设置若干自由工况，使每位学生均能独立完成一个自由工况下压缩机性能测试及数据处理，从而提高实践教学效果。

2.1.2　拓展性实验

压缩机性能受蒸发温度、冷凝温度、过冷度、过热度、转速等参数的影响，因而掌握压缩机性能随关键参数变化的规律，并用于系统设计和控制策略优化，是提升制冷系统综合能效的关键。在学生掌握压缩机性能实验的基本原理和测量方法，以及仪器设备的基本操作和使用，能够进行数据分析和处理的基础上，为了进一步锻炼学生的实践能力和综合分析能力，开设了若干拓展性实验，主要包括以下 4 项。

1）变蒸发温度和冷凝温度性能实验。学生可通过调节电子膨胀阀和冷凝器供水三通阀开度，调节吸气压力和排气压力，从而实现对冷凝温度和蒸发温度的调节，以掌握随着冷凝温度降低，制冷量增大，压缩机耗功减小，制冷系数增大，排温降低的变化规律；理解随着蒸发温度升高，质量流量、制冷量和制冷系数均增大的变化规律。引导学生探索冷凝温度的降低和蒸发温度的提高将受制于冷凝器和蒸发器中的传热过程，使学生理解在制冷系统的设计时合理选择蒸发温度和冷凝温度。

2）过冷度对系统性能的影响规律实验。学生通过调节过冷器供水三通阀开度，调节经过过冷器的过冷水流量，从而实现对系统过冷度的调节，探索过冷度对压缩机性能的影响规律。通过实验，一方面使学生理解过冷度增大所带来的单位质量制冷量增加和压缩机制冷系数提高的收益；另一方面也使学生观察到实验台架中由于受过冷水温度和流量的限制，过冷度的增加有其上限，且增加了系统能耗。

3）无效过热与有效过热对系统性能的影响规律实验。首先，学生通过开启位于量热器出口至压缩机入口之间管路的伴热带，使得压缩机的吸气温度升高，理解无效过热的概念，以及无效过热所导致的压缩机功率增加、排气温度增加、制冷系数降低等不利影响；其次，学生通过增大量热器中加热器的功率，实现压缩机吸气过热，使学生进一步掌握吸气过热，以及吸气过热对不同制冷剂的不同影响规律，理解设置回热循环的实际意义；再次，通过调节量热器中加热器功率以调节压缩机的吸气温度，掌握 R410 等工质随过热度增加，制冷系数增加的变化规律，同时了解过热度增加将受限于压缩机最高排温。

4）变频压缩机性能实验。针对应用日益广泛的变频压缩机，本实验台可通过调节压缩机电动机的频率从而调节压缩机转速，研究压缩机的变频特性，引导学生理解变频压缩机的节能原理[13–14]。

2.1.3 开放性实验

对于学有余力且有兴趣开展科学研究的学生，本实验台架也可一定程度上满足其自由探索的需求。如为了保护臭氧层，关于新型制冷剂的研究广泛开展，而其中部分制冷剂如 R290 等存在易燃易爆等安全风险[15–16]。本实验台架中电气部件均达到防爆等级要求，还设置了压力开关、高低压保护、实验安全互锁、安全报警等装置，使实验台能够用于不同制冷剂压缩机的性能研究；另外，本实验台架的量热器中蒸发盘管分为 3 路，采用不同管径对应不同制冷量压缩机，能够满足 0.5~5.0 HP 不同制冷量压缩机的实验需求。

2.2 教学关键

本实践项目属于专业综合型实验，目前主要针对能源与动力工程专业制冷方向三年级本科生开设。为了加强学生对实验原理的理解，提高学生工程实践能力，本课程采用小班教学模式，平均学生人数为 6 人，4 学时。先修课程除了热力学、传热学、流体力学、工程测试技术等专业基础核心课程外，还包括制冷原理与装置、制冷压缩机技术等制冷方向核心课程。该实验项目综合性较强，实验教学过程中 4 个方面环环相扣，提高学生的综合能力。

2.2.1 注重夯实基础知识

压缩机是制冷系统中的核心部件，压缩机性能测试离不开制冷系统。通过教师对压缩机实验系统的讲解以及学生对系统的观察摸索，促进学生加深对制冷系统中关键零部件的工作原理、结构及作用的理解。教师给定测试工况，学生通过压焓图或者 Refprop 等工程应用软件查询制冷剂的物性参数，促使学生回顾工程热力学及制冷原理与装置中制冷循环、工质热物特性、二元溶液相平衡等知识，并加以实际应用，从而掌握制冷领域中基础工程工具的使用，为以后的工作学习奠定了坚实的基础。

2.2.2 注重拓展学习广度和深度

在本实验项目中，通过调节量热器加热器功率、电子膨胀阀开度、冷却水三通阀开度、过冷水三通阀开度使得压缩机吸气温度、吸气压力、排气压力和过冷度稳定在规定的测试工况下。实际调节过程可发现，该系统并非多个相互独立的单输入单输出系统，而是相互耦合的多输入多输出系统，且各参数的时间响应特性不同。如随着电子膨胀阀开度的增大，压缩机吸气压力随之升高，与此同时压缩机排气压力也升高，压缩机吸气温度降低。本实验虽为稳态实验，但在调节过程中教师要注重引导学生观察系统参数的动态变化，并促使学生通过压焓图分析变化原因以及主要和次要影响因素，加深学生对制冷系统动态特性的理解。另外，教师设定若干测试工况点，一组学生即可获取 6 个不同工况点的测试数据，引导学生分析压缩机性能随冷凝温度、蒸发温度、吸气压力、过冷度等工况参数的变化规律，以进一步加深对制冷系统变工况特性的理解。

2.2.3 注重培养工程思维

实验安全是一切工程实践的前提。

1）设计安全。如在系统中设置了制冷系统高低压保护、量热器高低压保护等，以避免系统压力过高超过耐压极限引发安全事故。

2）操作安全。如开启冷水机组前需要先开启冷冻水泵，以避免管路中出现冰堵等；实验结束后，需手动调整膨胀阀的开度，使高低压侧压力平稳恢复平衡，以避免大压差造成低压侧的冲击损坏。

另外，工程实验是建立在实验数据获取和实验数据分析之上，传感器是数据的来源，控制器是获取有效数据的关键，通过本实践项目，促使学生了解热科学中涉及的温度、压力、流量等传感器；通过温度调节仪，了解 PID 控制原理、PID 参数选取和调整。通过该实践项目，增强学生对工程实践的感性认识，培养学生的工程思维。

2.2.4 注重培养学生解决问题能力

根据测试系统中所测的压力、温度、功率和流量等基本参数，计算压缩机的两大关键性能参数容积效率和制冷性能系数 COP，及计算两种测试方法的偏差，最后分析引起测量偏差的原因，并提出实验系统的改进建议。如在本实验系统中，流经冷凝器的冷却水和流经过冷器的冷却水分别存储在水箱的两个相邻隔间中，由于隔板的绝热性能较差，冷凝器冷却水和过冷器冷却水的温度相互影响，无法独立控制，使得在测试工况压力较高时，冷却水温如果设置较低，冷凝器三通阀开度较小，容易控制不稳；冷却水温如果设置较高，过冷器三通阀开度较大也无法满足过冷度要求，这增加了系统调控的难度和测量偏差，也限制了测试工况的范围。该过程促使学生完成

理论知识学习、分析反思总结、工程问题解决的完整循环，实现对学生综合能力的考查和锻炼。

2.3　教学效果

制冷剂压缩机性能实验项目目前已经连续开设两年，每年结束后学生会从学习兴趣、理论知识理解和工程实践等多方面对课程进行综合评价。90% 的学生表示通过该实验项目，更好地理解了制冷系统关键零部件、压缩机制冷循环、压缩机运行特性及其影响规律等，能够促进课堂所学理论知识的融会贯通；96% 的学生表示对工程实践能力提升较大，尤其是很多同学提到的系统开发和系统操作过程中的安全措施及安全操作，这在工程实践中非常重要但理论课关注度不够高；95% 的学生表示该实验项目收获较大，与理论课程联系紧密，同时接轨行业，学习兴趣高；部分学生在教师引导下参与实际项目，应用该台架进行课题研究。因此，基于两年的教学实践数据，学生反馈良好，达到了较好的实践教学效果。

3　结束语

为了更好地将课堂教学与行业应用对接，针对能源与动力工程专业学生开设“制冷剂压缩机性能实验”专业综合性实践教学项目，对标国家标准建立了基于第二制冷剂量热器法和制冷剂液体流量计法的压缩机性能实验台架。设计了实验教学内容，总结了实验教学重点，提高了学生的工程素养和综合能力。

参 考 文 献

[1] 罗远新, 王树新, 李正良, 等. 创新引领, 特色发展: 重庆大学新工科教育的探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2023(3): 31−36.

[2] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究, 2017(3): 1−6.

[3] 郝莉, 康国政, 何诣寒, 等. 新时代工程教育改革: 挑战与模式设计[J]. 高等工程教育研究, 2023(3): 16−30.

[4] 王国强, 李俊, 杨晨, 等. 基于低品位能源梯级利用的实验教学平台[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 224−227.

[5] 叶晓明, 陈刚, 成晓北, 等. 构建基于优质平台群的四层次创新人才培养实践教学体系[J]. 高等工程教育研究, 2019(S1): 30−33.

[6] 成晓北, 王晓墨, 罗小兵. 工程教育认证背景下能源动力类专业改革的探索[J]. 高等工程教育研究, 2019(S1): 11−13.

[7] 王晓墨, 陈刚, 成晓北. 新工科背景下能源动力类专业建设探索与实践: 以华中科技大学能源与动力工程专业为例[J]. 高等工程教育研究, 2019(S1): 9−10.

[8] 吴业正, 李红旗, 张华. 制冷压缩机[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[9] 孙皖, 马在勇, 刘江岩, 等. 蒸气压缩式制冷循环热力计算的虚拟仿真实验设计[J]. 大学教育, 2024, 13(14): 81−86.

[10] 赵美, 臧建彬, 蔡炜, 等. 变工况制冷压缩机性能测试精品实验项目建设与实践[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(8): 240−242.

[11] 刘晔, 钱苏昕, 张兴群. 基于开放实验教学的制冷专业创新实践能力培养探讨[J]. 创新创业理论研究与实践, 2023, 6(24): 138−142.

[12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 容积式制冷剂压缩机性能试验方法: GB/T 5773—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[13] 刘华, 熊建国, 余凯, 等. “双碳” 背景下多联机技术发展探讨[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 84−92.

[14] 李海军, 张中来, 苏之勇, 等. 压缩机转速对空气源热泵冷热水机组性能影响[J]. 热科学与技术, 2023, 22(2): 174−180.

[15] 马松, 赵李曼. HFC 及其混合物作为 R22 替代制冷剂的应用分析[J]. 冷藏技术, 2021, 44(4): 40−44.

[16] 彭杰, 孙志利, 师雅博, 等. 轻型商用制冷行业制冷剂替代进展[J]. 冷藏技术, 2021, 44(3): 1−8.

编辑　葛晋