

虚拟仿真实验辅助“电除尘”实验教学*

贾沛 吴燕玲 邱丹丹

(武汉工程大学资源与安全工程学院 湖北 武汉 430073)

(收稿日期:2022-08-23)

摘要:电除尘实验是通风除尘课程一个重要的专业实验,针对课程理论性强、耗时长、理论基础与实践操作相对脱节等特点,构建了虚拟仿真实验辅助电除尘实验教学,将电除尘的电场、流场等抽象概念可视化,实现了实验操作与电除尘基本原理知识点的完美融合,有效提高了电除尘实验教学质量。

关键词:电除尘;虚拟仿真;实验教学

近年来,雾霾天气频繁出现极大地制约了人民群众对美好生活的向往,国家对通风除尘类工程技术专业人才的需求愈发凸显,高校对安全工程、环境工程以及建筑环境与设备工程等相关专业人才培养提出了更高的要求^[1]。

针对空气净化,特别是微细颗粒物净化的新理论、新技术、新方法不断涌现,其中电除尘技术是目前公认较为成熟、高效、节能的一种技术^[2]。因此,在通风除尘类课程学习中,一般会开设电除尘实验,实验内容涉及静电学和空气动力学等多学科的理论知识。由于常规的电除尘实验过程仅通过除尘效率去评判电除尘器的性能参数,缺乏对电除尘基础理论知识体系的表述^[3]。此外,电除尘实验理论性强、耗时长,导致学生在有限的学时内过多关注操作动手能力,而忽略了理论联系实际的综合应用能力和创新创业能力的培养,因此学生的学习兴趣往往不高。

考虑到电除尘实验教学的特殊性,本文尝试将虚拟仿真技术辅助开展实验教学,不仅有助于培养学生理论联系实际的综合应用能力和创新创业能力,也可有效地降低实验成本,使得实验课堂教学更加高效^[4-5]。

1 常规电除尘实验过程及其特点

1.1 电除尘基本原理

该电除尘实验主要考查的是通过经典多伊奇

(Deutsch)效率公式评价电除尘器的除尘性能^[6]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A\omega}{Q}\right) \quad (1)$$

式中: η 为电除尘器的除尘效率,以%计; A 为收尘极板面积,以 m^2 计; Q 为烟气处理量,以 m^3/s 计; ω 为粒子驱进速度,以 m/s 计。

式(1)中,收尘极板面积和烟气处理量为电除尘器的结构参数和运行参数,当除尘设备工作工况确定后其值相对固定。因此,工业上提高电除尘器效率的主要途径是提高电场中荷电粒子的驱进速度,而电场中荷电粒子在静电力作用下,驱进速度的表达式为

$$\omega = \frac{C_m q E}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

式中: C_m 为库宁汉修正系数; q 为粉尘荷电量,以 C 计; E 为电场强度,以 V/m 计; μ 为动力粘度,以 $\text{Pa}\cdot\text{m}$ 计; d_p 为粉尘粒径,以 m 计。

由式(1)和(2)可知,理论状态下电除尘器除尘效率的影响参数主要包括:收尘极板面积、烟气处理量、粉尘荷电量、电场强度、粉尘粒径和大气环境参数等。此外,由于经典多伊奇效率公式是基于一系列假设得到的理论公式,而实际上电除尘器除尘效率还受烟气化学成分、烟气温湿度、粉尘空间浓度分布、气流均匀度、设备阻力和漏风率等多种因素的影响。

* 2021年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目,项目编号:B2021082;武汉工程大学教学研究项目,项目编号:X202063、X2021066。

作者简介:贾沛(1980-),女,硕士,讲师,研究方向为工业通风与除尘。

1.2 实验过程

电除尘实验一般包括实验准备阶段、静态参数测试阶段、效率测试阶段、实验数据分析阶段等基本实验过程。

(1) 实验准备阶段

在电除尘器动力系统开启前,需要对测试粉尘的理化特性,以及除尘装置的结构尺寸进行分析测试.一般包括:真密度、堆积密度、安息角(滑移角)、比电阻、粒径分布、润湿性、黏附性、燃爆性等粉尘理化特性;电除尘器本体、电极、管道、弯头等结构配件的几何尺寸参数。

(2) 静态参数测试阶段

在外加电压施加前,仅开启风机,对管网系统的经济技术指标进行分析测试.一般包括:动力曲线(流量-频率)、风压曲线(风阻-流量)等。

(3) 效率测试阶段

开启风机、对电极施加外加电压,测试电除尘器的除尘效率.为评判不同参数对电除尘器除尘效率的影响趋势,在实验中通过改变风机运行工况、荷电工况等,测试多影响因素下电除尘器的除尘效率曲线.一般包括:效率-收尘极板面积曲线、效率-风速(烟气处理量)曲线、效率-电场强度曲线、效率-粒径曲线、效率-湿度曲线等。

(4) 实验数据分析阶段

实验结束后,将在不同测试工况下记录的实验数据整理成图表,并对照公式(1)、(2)进行初步解析,分析单因素或者多因素对电除尘器除尘效率的影响趋势。

1.3 实验特点

(1) 理论性强

由电除尘基本原理分析可知,虽然经典多伊奇效率公式结构比较简单,只涉及简单的静电学和空气动力学等数理类学科知识,但是实际上公式中的每一个状态参数并不独立.例如,简单的温度变化就直接影响到烟气处理量、库宁汉修正系数、粉尘荷电量、电场强度和动力粘度等参数.因此,若要系统地理解电除尘基本原理,必须基于扎实的数理基础,进行复杂的数学推导,从而获取各状态参数之间的相

互影响规律.当然,由于电除尘器涉及的静电学和空气动力学的概念大都比较抽象,学生通过简单的预习、操作和数据分析等环节很难得到直观的理解。

(2) 实验耗时长

在测试过程中,为减小实验误差,同种工况下单个测试数据一般测试3~5次,取其平均值.为准确评估某一影响因素对除尘效率的影响趋势,一般取5个有效测试数据绘制成图。

通过合理的小组分工,在实验准备阶段、静态参数测试阶段和实验数据分析阶段的实验用时相对较少.然而,由于电除尘器高效率的优势在实验中会导致出口浓度太低,以至于为获取一个稳定的有效数据,单次采样时间一般在0.5 h以上.因此,获取1个有效数据实验测试耗时约1.5 h,绘制1个单因素除尘效率的影响曲线需连续测试约7.5 h.如果为绘制多影响因素下电除尘器的除尘效率曲线,则测试时间远远超过实验学时。

(3) 理论基础与实践操作相对脱节

开设电除尘实验的目的是通过实验环节进一步掌握电除尘基本理论知识,培养学生的动手能力和理论联系实际的能力.然而在给定的实验学时内,学生耗费了大量的时间和精力完成单调的实验操作,以至于在实验数据分析阶段投入的时间很少,也就导致实验数据分析与电除尘基本原理的贴合度不高,造成本末倒置,实验效果不理想。

2 虚拟仿真实验辅助电除尘实验教学

2.1 虚拟仿真电除尘实验设计

电除尘实验的本质是通过实验过程加深对电除尘机理的掌握程度,而常规实验中学生耗费大量的时间和精力在效率测试阶段,其主要过程为重复的数据采样.因此,针对电除尘实验教学的特点,引入虚拟仿真实验辅助电除尘实验教学^[7]。

(1) 实验课程前,基于电除尘机理搭建虚拟仿真实验模型,通过改变工况参数,测试不同工况下除尘效率,并基于数值模拟结果初步得到效率随各影响因素的变化规律曲线.该部分知识点可以结合理论课程的学习,在实验课程的预习报告环节完成。

(2) 实验课程中,正常完成前置的实验准备阶段和静态参数测试阶段的测试;但在效率测试阶段,每组仅需完成一次不同工况的单因素、单点的数据采样。

(3) 实验课程后,学生将本组单因素单点数据采样结果带入虚拟仿真实验模型对初始计算结果进行修正,从而得到多因素作用下的电除尘效率变化规律。同时,也可以与其他小组之间的实验模型、测试数据进行相互对比和验证。

实验教学过程在培养学生实际动手操作能力的基础上,充分发挥学生的主观能动性,对提升学生的创新创业能力有极大的帮助。因此,虚拟仿真实验辅助电除尘实验教学实施后,学生主动参与电除尘实验教学环节的积极性大大提升,取得了良好的教学效果。

2.2 可视化实验教学

为保证电除尘装置的气密性,以及考虑到实验的安全性,极板等核心构件密封在壳体内,电场、流场的基本过程在实验过程中无法观测。而虚拟仿真技术能将不可见的电场、流场参数在软件中可视化,如图1所示(以空间电荷为例)。将电场分布、流场分布等抽象概念具象化,学生在理解后对电除尘理论知识点的兴趣大幅提升。

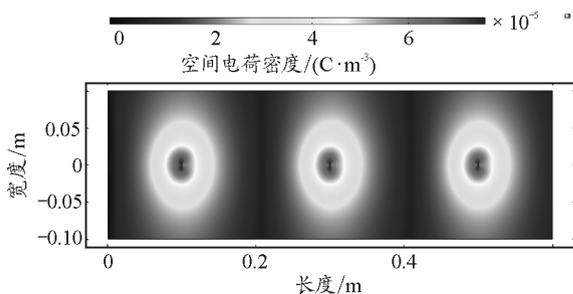


图1 电除尘器内空间电荷可视化示意图

在图1中,能清晰地表征常规线-板电极为典型的不均匀电场^[8];空间电荷分布为在电晕线处出现最大值,然后向四周急剧降低,在电除尘器进出口、收尘极板处降低为零。空间电荷出现极值的位置,与经典静电理论中观测到辉光放电的位置一致。同时,通过电场的可视化,也能将电晕过程中听到的杂乱的“滋滋”声准确地通过空间电荷分布定位到电晕

线附近。

2.3 多影响因素电除尘效率变化规律

通过将收尘极板面积、烟气处理量、外加电压、异极距、线间距、粉尘进口浓度等参数输入虚拟仿真软件,计算软件能快速得到设定工况下的电场、流场分布情况,如图2所示(以效率-外加电压曲线为例),从而能大大节约实验的操作时间。

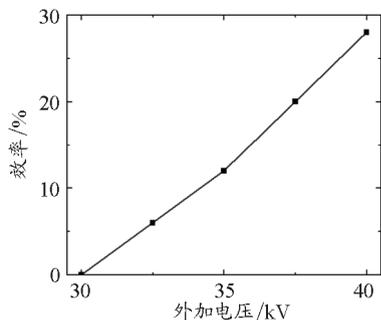


图2 电除尘效率-外加电压变化曲线

图2中测试了外加电压对电除尘器效率的影响规律:电除尘的除尘效率随着外加电压的增加而增加,其主要原因是增加外加电压不仅有利于电场中粉尘的充分荷电,也直接提高了电场强度,导致电场中荷电粒子驱进速度的增加,从而提高了电除尘器的除尘效率。从数值模拟结果可知:虚拟仿真实验的计算结果能很好地表征电除尘的多伊奇效率公式,从而能更直观地表征出各参数对除尘性能的影响。同理,改变其他电场、流场或者电除尘器结构参数,同样也得到对应的除尘效率变化曲线^[9]。

通过虚拟仿真实验辅助电除尘实验教学,将抽象的电场、流场可视化,可以帮助学生更加直观地认识电除尘基本原理,激起了学生对于后续知识体系探索的兴趣。此外,虚拟仿真实验能完美地解释电除尘的多伊奇效率公式,从而加深对电除尘知识体系的掌握程度。当然,也可以结合指导教师关于空气净化学科发展前沿的研究课题,基于该虚拟仿真实验平台设置一些“开放性、设计性、研究性”的学生创新创业课题,鼓励学生积极参与,在训练动手操作能力的基础上,也强化理论联系实际的综合应用能力和创新创业能力培养,为后续专业课程学习和创新创业科研训练打下坚实基础。

(下转第103页)

y 和 x 进行替换, 得: $a^3 = 0.000\ 07\ T^{1.998\ 9}$, 即 $\frac{a^3}{T^{1.998\ 9}} = 0.000\ 07$. 其公转周期 T 的指数 1.998 9 与 2 仅相差 1.1%, 说明围绕行星运动的卫星也遵循开普勒第三定律的表达形式.

3 得出结论

开普勒第三定律不仅适用于“行星绕太阳的天体系统”, 也适用于“小行星、彗星绕太阳的天体系统”和“卫星绕行星的天体系统”, 这说明开普勒运动定律具有普遍性. 因此, 可以把开普勒第三定律的内容表述为: 绕同一中心天体的所有行星的轨道的半长轴的三次方 (a^3) 跟它的公转周期的二次方 (T^2) 的比值都相等, 即 $\frac{a^3}{T^2} = K$, 开普勒常数 K 的大小只与中心天体有关.

4 总结和反思

相同的原始数据, 采用不同的科学处理方法所得到的结果有所不同. 第一种方法采用以地球的公转轨道半径为单位长度、公转周期为单位时间, 在一定范围上减小计算工作量, 同时也能够让学生体验开普勒时代缺乏现代计算工具, 只能花费大量时间手工计算, 其过程之艰辛不言而喻; 第二种方法借助

现代计算机, 对原始数据进行拟合处理, 所得结果不仅更精确, 花费的时间也更少. 通过这样的探究过程, 不仅锻炼了学生的计算能力, 也充分发挥了计算机在探究过程中的作用, 培养了学生利用现代信息技术处理数据的能力, 提高了学生的科学素养.

带领学生重走开普勒第三定律的发现过程, 是非常有价值意义的教学, 能够培养学生的科学探究能力. 局限于传统课堂难以实时获取到真实天文数据的情况, 教师应该时时关注现代信息技术的发展对教学的影响, 并有意识地把现代信息技术的优势与课堂教学相结合, 其中不少的天文软件例如 Star Walk2 就能弥补教学中的不足, 学生不仅能从中获得天体的运动数据, 也满足了学生漫游宇宙、发现宇宙的知识需求, 提高了课堂学习兴趣, 实现了学生自主探究的课程理念. 在高中阶段, 实际的天文观测并不现实, 以及各地的教育水平和教学资源差距太大, 短时间内弥补这种不足是困难的, 因此天文软件在课堂中使用是非常有必要的^[2].

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2018: 78-80.
- [2] 刘斌. 信息技术在中学天文科普中的应用[J]. 软件导刊(教育技术), 2010(3): 32-33.

(上接第 98 页)

3 结束语

在教学过程中, 针对电除尘实验理论性强、耗时长、理论基础与实践操作相对脱节等特点和不足, 借助虚拟仿真平台, 构建了虚拟仿真实验辅助“电除尘”实验教学过程, 通过实验案例在实现电场、流场可视化的同时, 也将实验操作、数据分析等环节与电除尘基本原理完美的融合. 使学生初步具备使用现代科学技术手段解决复杂工程问题的能力, 从而实现课程教学的目的.

参考文献

- [1] 阚哲, 李凤实, 王晓蕾, 等. 安全工程类创新型人才培养模式探讨[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 229-231.
- [2] 刘学军, 胡汉芳, 郇建国, 等. 2020 年电除尘行业发展评

述和展望[J]. 中国环保产业, 2021(3): 23-27.

- [3] 徐俊磊, 许淑惠, 王曦, 等. 细颗粒物电凝并实验与拓展研究[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(8): 173-178.
- [4] 李怀慎, 夏能弘, 刘蓉晖, 等. 虚拟实验助力“电磁场”课程教学[J]. 中国电力教育, 2021(9): 54-55.
- [5] 杨亚玲, 马驰. 虚拟仿真技术在大学物理课程教学中的应用研究与展望[J]. 物理通报, 2021(3): 36-38.
- [6] 李东阳, 刘玺璞, 张超. 低低温电除尘器除尘效率公式的修正[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2 623-2 630.
- [7] 杨军鹏, 安小宁. 基于 COMSOL Multiphysics 的静电场仿真分析[J]. 物理通报, 2020(1): 99-100, 103.
- [8] 周武, 洪亚军, 李世远, 等. 双区静电除尘器的除尘效率影响因素和理论公式研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(10): 1 135-1 139.
- [9] 周春霄, 刘柏谦, 王萌琦, 等. 静电除尘器性能影响因素 DOE 实验分析[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 115-121.