

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2025.04.014

欢迎按以下格式引用:李祥立,常畅,端木琳,等.流体输配管网虚实互动教学方式设计[J].高等建筑教育,2025,34(4):120-130.

# 流体输配管网虚实互动教学 方式设计

李祥立,常 畅,端木琳,王宗山

(大连理工大学 土木工程学院,辽宁 大连 116024)

**摘要:**作为建筑环境与设备工程专业的专业核心课程之一,流体输配管网课程是工科学生学习和掌握各种流体输配过程基本知识和基本设计方法的技术基础课。以大连理工大学持续深化本科教学改革和内涵建设,全面提升人才培养质量为契机,综合流体输配管网课程改进成效和教学方法的不足,对课程资源平台进行改革。结合首批国家级一流课程建设经验,以学生为中心,倡导“面向任务边做边学,基础知识讨论中学,工程案例分析中学”,提出虚实结合的互动教学方式,构建复杂流体网络实体平台,同时定制对应的模拟仿真平台,建立虚实结合的仿真、调节和数据采集互动平台。线上教学完成数据模型和部分仿真模块的定制;线下结合工程实验台,完成自建平台及调节的虚实过程,构建算法、软件仿真、工程试验一体的教学平台。激发学生主动学习的兴趣,调动学习的主观能动性,发展创新思维,培养创新与实践能力。践行科研反哺教学理念,将科研成果有效转化为教学内容,从实际工程和科研问题中精准提炼课程要点,显著提升了课程内容的广度与深度。这不仅有助于学生构建全面的管网系统概念,还融入了一定的复杂度,既充满挑战性,又有效锻炼了学生的自学能力和团队合作能力。虚实结合的教学设计模式,推动现代信息技术与教育教学的深度融合,持续优化教学质量监控与保障体系的改革,进一步完善实践教学体系的建设。

**关键词:**复杂流体网络;虚实结合;互动教学;创新与实践能力;自学和合作能力

**中图分类号:**G482;G642;TU995.3   **文献标志码:**A   **文章编号:**1005-2909(2025)04-0120-11

复杂流体网络分析是流体输配系统分析的重点和难点,传统教学方式以建模推导为主,比较抽象,很难激发学生的学习兴趣和潜能。国外高校没有对应的课程,但在讲授该部分内容时,较多采用软件进行模拟仿真。近年来,国内部分高校相继开展仿真教学工作,如北京工业大学建设的虚拟

修回日期:2024-02-15

基金项目:大连理工大学教学改革基金项目(YB2021042);教育教学改革专项一流课程“流体输配管网项目”(大工教发[2021]24号)

作者简介:李祥立(1973—),男,大连理工大学土木工程学院副教授,博士,主要从事建筑热环境、供热供冷系统、太阳能供热等可再生能源研究,(E-mail)lxl@dlut.edu.cn;(通信作者)常畅(1993—),女,大连理工大学土木工程学院在读博士生,主要从事复杂管网故障诊断研究,(E-mail)1020785784@mail.dlut.edu.cn。

仿真一流课程“空调风系统管网设计与调试虚拟仿真实验项目”<sup>[1]</sup>,天津商业大学成立了“制冷技术与装备虚拟仿真实验教学中心”<sup>[2]</sup>,扬州大学构建了“基于 Dymola 软件建立中央空调系统仿真模型”<sup>[3]</sup>,苏州科技大学开发了“空调实验教学虚拟仿真实验教学平台”<sup>[4]</sup>等。由于复杂流体输配管网如集中供热、供燃气管网规模大,拓扑结构复杂,很难构建完备的虚实结合教学平台,学生学习该部分内容时普遍感觉难、公式推导比较枯燥、看不到计算结果的具体应用、学习积极性不高,因此将虚拟仿真教学与现场实践教学有机结合,是现阶段高校教学的主要发展方向和建设重点<sup>[5]</sup>。

综合课程教学情况的问卷调查分析结果,总结课程建设和教学方法的成效与不足<sup>[6-11]</sup>,前期已增加了线上课程预习、互动和工程案例展示环节<sup>[12]</sup>,已经构建了国家级金课平台,建立了复杂网络分析程序和实验平台,亟需整合三方面的教学资源,将课内学习和课外实验融合,引导学生理论与实际相结合,增加学生对实物的感知,实现教学与实践的深度融合<sup>[13]</sup>。

## 一、管网系统虚实仿真模型建立的必要性

国家虚拟仿真实验教学项目遵循“高阶性、创新性、挑战度”标准,是教育部推出的国家“金课”之一<sup>[14-16]</sup>。虚拟仿真实验教学以教材基础知识为起点,可结合前沿知识和相关领域的的新知识和新方法,充分拓展学生的创新思维和能力。

管网虚实仿真平台的建设与流体输配管网课程知识单元紧密结合(图1),以流体输配管网课程的核心内容流体网络水力计算分析为中心,从简单网到复杂的大规模环状管网,建立覆盖所有建筑设备系统流体网络的仿真模拟实验台,学生可以参与设计、选型、搭建、测试、数据分析、软件应用等各个环节。为此,从三个方面进行课程改革:(1)结合工程实例和建模软件 Revit 完成实验平台设计,并参与设备选型与购买,完成搭建和调试;(2)结合工程实例和实验模型,建立基于 Flowmaster 平台的仿真模型,模拟实验工况,完成模拟参数设置,对比实验测试数据与仿真模拟数据,进行数据处理与分析。最后,针对实际管网运行问题,开发仿真软件,完善数据库,为实际应用奠定基础。

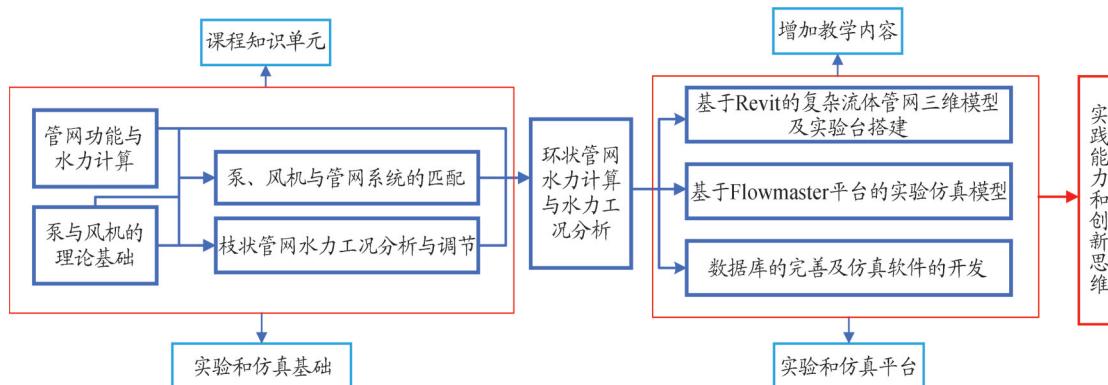


图1 实验仿真和平台及课程相互关系

## 二、复杂管网实验系统

转变“灌输式”理论教学,采用实验教学和理论教学相结合的方式,引导学生将理论知识应用到专业实验中,帮助学生形成创新意识,提高实践能力<sup>[17-19]</sup>。复杂管网实验系统的初期模型设计基于 BIM 软件 Autodesk Revit,可以快速创建三维形状模型,设计复杂的建筑系统。指导学生通过 Revit 进行三维复杂管网建模,直观清晰地展示管网系统。利用 Revit 初步建立复杂管网系统,可参考的

综合管网系统如图2(a)所示。

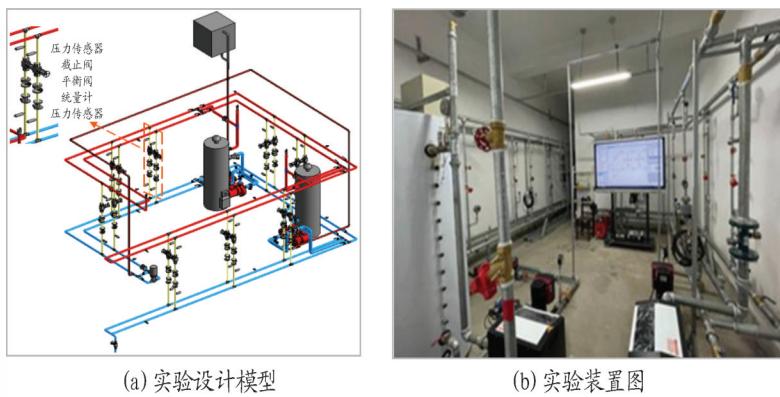


图2 实验系统图

管网课程大作业已经初步培养了学生的设计及计算能力,在此基础上引导学生结合工程实例、书籍案例和规范手册,完成设计系统的水力计算,根据确定的管道参数和设备参数进行设备选型。综合供热管网物理实验的实验装置主要包括电锅炉、膨胀水箱、水泵(循环水泵、补水泵)、管网、测量仪表等。测量设备及控制仪表包括压力传感器、温度传感器、电磁流量计、超声波热量表、变频控制柜等,如表1所示。根据现场测量工况和实验需要,采用分体式电磁流量计和分体式电磁热量表,方便精确读数。高位膨胀水箱为方形不锈钢水箱,尺寸为500 mm×500 mm×500 mm,安装在循环水泵入口处,实现实验系统的定压与补水。

综合学生的探讨方案和教学需求,培养学生的发散思维能力,实验系统设备前后均设置阀门和可拆卸部件,可根据实验需要改变泵的台数及电锅炉数量等,实现多种供热模式。前期实验主要关注压力和流量,后期可加装负荷模拟器和空调设备,全面监测负荷和参数。在完成设备及材料准备工作的基础上,引导学生了解实际工程的施工方式,完成实验台的搭建。

综合供热管网验台是多热源环状三维立体管网(图2(b)),实验系统由供热热源、实验管网和在线数据采集系统三部分组成。热源采用电锅炉,两台电锅炉可作为单热源或双热源控制三个环路,同时在回水管道设置了可启闭的管道泵,可近似为第三热源,也可用于管网水力平衡调节。实验环状管网选用镀锌钢管,管道及局部构件之间采用螺纹连接。管段多处配备活接等可拆卸部件,以便于改造。供回水管道分别设置了控制球阀,可根据实际需求灵活调整管网布置方式(如对称或非对称)以及管路的流向等。管道的阻力通过球阀模拟,各用户的阻力则采用截止阀来模拟。此外,安装了一对平衡阀(包括静态和动态)以实现用户流量和压力的调节。为方便模拟用户测工况,供回水干管之间依次安装进口压力传感器、截止阀、平衡阀、电磁流量计、出口压力传感器。回水管设置了故障单元,该故障单元可拆卸、可更换、可旋转,故障点采用多种设置形式(圆形、不规则形状等)。在供回水管道的不同位置对称安装了12个可调节直径的泄漏点,可模拟单点及多点泄漏等异常工况。在线数据采集系统主要由监测点、NI数据采集模块、变频控制柜等实时进行数据采集,并监测信号趋势,构建运行及故障数据库,为后续验证分析奠定基础。

综合供热管网实验台能够通过改变热源的投入数量,进行单热源和多热源管网实验。实验管网由三个主环路组成,每个环路均配备特定的阀门开关。通过调节各环路阀门的开闭状态,可实现枝状、单环、多环管路的控制。学生可根据对课堂工程案例的理解程度,自由组合热源数量与管路类型,从单热源枝状管路逐步进阶到多热源多环管网,并对不同类型的管网进行水力和热力工况的模拟操作与调节。

表1 测量设备及仪表参数

设备及仪表	图例	规格	型号
电锅炉		功率:8 kW	
控制柜		功率:2.2 kW	MT500-7R5G/011PT4
循环水泵		流量:6.9 m³/h 扬程:12.2 m~19.8 m 功率:0.55 kW 转速:3380 r/min	CRE5-2
管道泵		流量:1.5~3 m³/h 扬程:5 m~8 m 功率:0.37 kW 转速:2860 r/min	MAGNA3 32-60F
压力传感器		量程:0~1 MPa 精度:0.2% FS	MTPFU
温度传感器		量程:-200~600°C 精度:0.5级	
智能数字压力表		量程:0~1 MPa 精度:0.2% FS	JST-SY100
数据采集仪		采样率:250 k S/s 分辨率:16 位 通道数:32	RK-9205

续表

设备及仪表	图例	规格	型号
分体式电磁流量计		量程:0~4.5 m³/h 精度:0.5级	JST-LD-20F
分体式超声波热量表		精度:1%	TDS-100

### (一) 基于压力、流量和瞬变流方法的管网故障诊断实验台

(1)在管网系统设计时,预留多个临时压力测点;在故障工况时,可通过计算与实验测试结果,得到最优化测点布置方案,为管网设计提供普适性策略,并根据选定的压力测点数据,解决故障工况下的实际问题。

(2)在管网系统不同环路的不同位置(供回水干管、支管、节点等)设置可调节泄漏孔直径的泄漏管段,并在前方安装阀门控制泄漏量,通过数据采集系统实现泄漏数据的实时测量,得到泄漏发生时的水力特性参数(流量,压力等)的变化规律,并根据数据分析结果判断泄漏源位置。

(3)采用低强度瞬变流动激发器,可产生类似阀门关闭引起的瞬变水击波的效果,从而避免使用传统的方法(阀门快速关闭等)产生的不易控制等问题。用于管网系统泄漏瞬变检测,通过水击波变化的特征可对管网系统诊断,确定故障的产生与位置;管道因弯曲或机械压力会变形致使管道堵塞,通过管道堵塞后水力瞬态流动的变化与特性,分析并判断管道堵塞的位置;管网拓扑结构及规模对瞬变水击波有一定的影响,可研究实际水击压力波的波形畸变和衰减过程。

### (二) 基于水力、热力平衡调节管网实验台

(1)研究不同工况下(单、双热源单环和双环等)多热源综合环状管网的水力和热力特性,分析热网运行过程中,调节泵的转速以及各处(热力站、用户、供回水干管)阀门开度时热网的非稳态水力响应特性。供水干管和回水干管调节不一致时(只改变一侧干管上的阀门),研究整个管网供热用户的负荷变化。

(2)针对热网的水力失调问题,实验热力系统一次热网采用分布式供热(一次侧:变频水泵+水力平衡管组合),二次热网采用可调节混水供热(二次侧:引射阀+变频水泵),达到水力平衡和节能的目的。

(3)针对热网系统的热力平衡问题,在管道多处设置了温度传感器,可根据在线采集系统采集的温度、压力和流量等数据,分析管道散热损失对热力失调问题和节能降耗的影响。

综合供热管网实验台具备多种功能模式,能够促进学生思维的发展。每种模式都与课程的核心知识点紧密对应,学生可以根据自己的能力水平选择感兴趣的实验模式,并以小组合作的方式参与实验。通过亲身参与整个测试和调试过程,加深对课程知识点和课堂大作业工程案例的理解。

## 三、复杂管网系统虚拟仿真模型的建立

带领学生认识和学习 Flowmaster 软件,根据复杂管网实验系统,建立基于 Flowmaster 软件平台的 1:1 虚拟复杂管网仿真模型(图 3);鼓励学生根据模拟需求对 Flowmaster 软件进行二次开发,快捷

实现系统 Flowmaster 模型及工况数据的更改和计算求解。鼓励学生不拘于实验采集系统和模拟软件数据结果,使用 Origin、Matlab 等绘图及数据分析软件对同工况的实验数据与仿真数据进行对比分析,更准确地完成信号的统计、处理,曲线拟合以及峰值分析等工作。设置讨论和总结环节,针对实际管网运行问题,开发仿真软件,完善数据库,为实际应用奠定基础。此部分内容也可培养学生的科研兴趣。

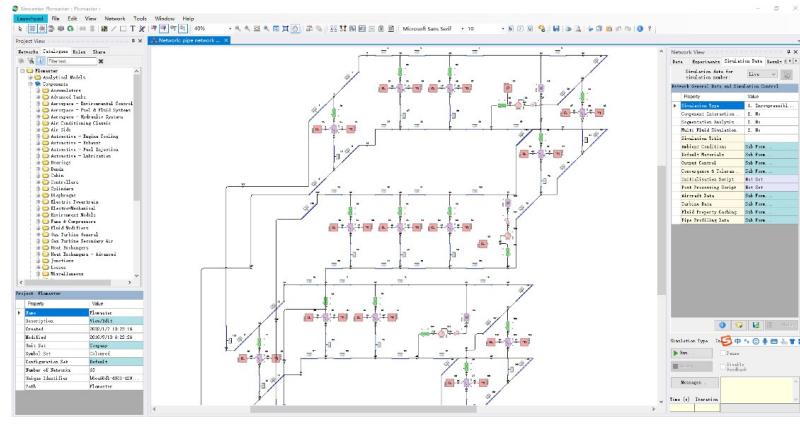


图3 仿真软件操作界面

### (一) 复杂管网系统虚拟仿真软件介绍

Flowmaster 软件可用于建立管网系统的仿真模型,它是一维流体系统仿真计算工具,可以快速有效地建立精确系统模型,完成管网系统的稳态和瞬态分析。Flowmaster 对各种管网系统均可以进行精确的压力、流量、温度、流速分析,帮助用户快速评估并优化系统设计。该软件支持与多种仿真平台的联合仿真,已与 Matlab、Star-CD、Ansys Fluent 和 Excel 等主流软件实现了完备接口集成,支持 COM、MpCCI、NET、XML 等多种通讯协议接口,并可拓展至 PDM、SDM、TDM 等平台。Flowmaster 软件可以对求解器(稳态,瞬态等)和计算模型进行封装,可根据实验和模拟需求对管网系统工况、参数和模型进行快速更改,实现多种工况的自动求解;自动检查计算结果,使整个仿真模拟自动化,从而提高工作效率。此外,还方便对流体输配管网进行运行、故障工况模拟和水锤计算分析。总体而言,Flowmaster 的功能完全满足流体输配管网教学中各种任务的定制需求,以及工程系统仿真模拟和数据分析需求。

### (二) 复杂管网系统虚拟仿真建模过程

#### 1. 仿真模型的搭建

仿真软件内含有许多种类组件,如管段类、阀门类、泵类、边界源类等。根据设计方案选择适合的类元件,通过节点和连接线连接,Flowmaster 内置各种监测和自动控制器,可控制泵的转速、阀门开度等,监测元件代替传感器监测温度、流量、压力等变量。对模型管网系统进行仿真模拟时,用逻辑节点连接各个组件,用流量和压力组成的线性方程组来表征流体的流动特性。

#### 2. 仿真模型参数设定

Flowmaster 软件通过对多各种元件进行线性化处理,将仿真管网系统的复杂问题转变为节点的压力流量设置等问题,克服了传统方法的繁琐计算,使流体输配管网中的瞬变问题更容易求解和分析。针对复杂流体仿真系统中的节点、管段和元件,仿真软件均配备了相应的网络模型视图。在视图中,用户可以直接设置组件数据、变量参数及求解方法。为确保参数的精确性,软件还设有可编辑模块,便于录入组件的曲线和方程。此外,用户亦可自行编写脚本,构建与流体系统相匹配的模型。该编辑模块兼容多种编程语言,包括 C#、VB.NET、J#、VB Script 和 JavaScript 等。

### 3. 仿真模型的计算和运行

选择适当的模拟类型(如可压缩、不可压缩稳态或瞬态等),设定时间步长等运行参数。在仿真系统模型检测和编译成功后,启动计算。若运行结果不收敛,可根据错误报告调整输入数据参数和日志文件,直至成功运行。通过计算结果监视窗口,可实时观测变工况下管路各处的参数变化,并根据提示信息持续优化模型,确保其合理性和可靠性。

### 4. 仿真模型的计算结果查看和导出

计算结果存储于软件的数据库中,用户可通过选择所需绘制的组件及其结果类型,以表格或图像形式进行呈现。此外,仿真软件配备了报告生成功能,能够生成包括错误报告、警告报告、用户结果报告以及输入数据核对报告在内的多种报告,以便于用户分析仿真计算的准确性。

## (三) 管网系统虚拟仿真软件的基本计算原理

管网系统的各个元件通过逻辑节点相互连接。为了降低分析难度,将各元件进行线性化处理,进而求解出各节点及支路的压力和流量。利用流量和压力这两个关键因素,构建线性方程组,通过求解该方程组来实现管网系统的仿真模拟。在仿真系统中,阻力元件需分为正阻力元件(如管道及各类管件的流体阻力)和负阻力元件(如水泵的流体阻力)。整个系统的求解过程基于矩阵方法,在元件的使用和开发过程中,需满足以下几项方程条件。

### 1. 流动阻力方程

有进出口的元件,进口和出口的压力差等于介质的流动损失系数与密度和速度平方乘积的一半:

$$p_1 - p_2 = \xi \frac{\rho}{2} v^2 \quad , \quad (1)$$

式中: $p_1$ 、 $p_2$ 分别为元件的进、出口压力,单位bar; $\rho$ 为介质的密度,单位kg/m<sup>3</sup>; $v$ 为流体的流速,单位m/s; $\xi$ 为元件中的介质在液体流动方向上的损失系数。

### 2. 质量守恒方程

流经元件两个出口的流量相等,等于出口截面积与当前截面介质流速的乘积:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad , \quad (2)$$

式中: $v_1$ 、 $v_2$ 分别为截面1、截面2介质流速,单位m/s; $A_1$ 、 $A_2$ 分别为截面1、截面2的面积,单位m<sup>2</sup>。

### 3. 压力损失方程

介质流经组件两点间的压力损失等于进、出口的总压差与高差水头之和:

$$\Delta p = \left( p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} \right) - \left( p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \right) + \rho g (s_1 - s_2) \quad , \quad (3)$$

式中: $p_1$ 、 $p_2$ 分别为位置1、位置2的静压力,单位Pa; $s_1$ 、 $s_2$ 分别为位置1、位置2的中心处标高,单位m; $\frac{\rho v_1^2}{2}$ 、 $\frac{\rho v_2^2}{2}$ 为位置1和位置2的动压力,单位Pa。

### 4. 换热方程

元件的进出口温度差等于介质在此处的热交换值与质量流量和定压比热的商,即能量守恒定律:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{mc_p} \quad , \quad (4)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$ 分别为元件的进、出口温度,单位°C; $Q$ 为元件处介质的吸热或放热功率,单位kW; $m$ 为介质的质量流量,单位kg/s; $C_p$ 为介质的定压比热,单位kJ/kg。

为模拟系统的求解过程,建立由三个两端口元件组成的模型,共含3个节点,如图4所示,计算过程如下:

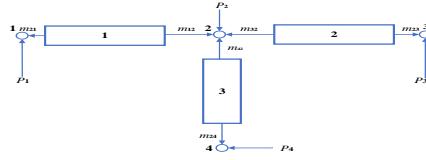


图4 管网仿真系统模型

在三个两端口的元件组成管网仿真系统模型中,每个元件都可以建立线性方程组,如式(5)、式(6)、式(7)所示。

元件1:

$$\begin{aligned}\vec{m}_{12} &= a_{11}^1 P_1 + a_{12}^1 P_2 + a_{13}^1 \\ \vec{m}_{21} &= a_{21}^1 P_1 + a_{22}^1 P_2 + a_{23}^1\end{aligned}\circ \quad (5)$$

元件2:

$$\begin{aligned}\vec{m}_{32} &= a_{11}^2 P_3 + a_{12}^2 P_2 + a_{13}^2 \\ \vec{m}_{23} &= a_{21}^2 P_3 + a_{22}^2 P_2 + a_{23}^2\end{aligned}\circ \quad (6)$$

元件3:

$$\begin{aligned}\vec{m}_{42} &= a_{11}^3 P_4 + a_{12}^3 P_2 + a_{13}^3 \\ \vec{m}_{24} &= a_{21}^3 P_4 + a_{22}^3 P_2 + a_{23}^3\end{aligned}\circ \quad (7)$$

利用三个元件的流量公式,对每个节点构建质量守恒方程式(8)、式(9)、式(10)、式(11)。

节点1:

$$\vec{m}_{21} = a_{21}^1 P_1 + a_{22}^1 P_2 + a_{23}^1 \circ \quad (8)$$

节点2:

$$\vec{m}_{12} + \vec{m}_{32} + \vec{m}_{42} = a_{11}^1 P_1 + (a_{12}^1 + a_{12}^2 + a_{12}^3) P_2 + a_{11}^2 P_3 + a_{11}^3 P_4 + a_{13}^1 + a_{13}^2 + a_{13}^3 \circ \quad (9)$$

节点3:

$$\vec{m}_{23} = a_{22}^2 P_2 + a_{21}^2 P_3 + a_{23}^2 \circ \quad (10)$$

节点4:

$$\vec{m}_{24} = a_{22}^3 P_2 + a_{21}^3 P_4 + a_{23}^3 \circ \quad (11)$$

各个节点的质量方程,可以用矩阵进行统一表示,如公式(12):

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其分析矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_{21}^1 & a_{22}^1 & 0 & 0 \\ a_{11}^1 & (a_{12}^1 + a_{12}^2 + a_{12}^3) & a_{11}^2 & a_{11}^3 \\ 0 & a_{22}^2 & a_{21}^2 & 0 \\ 0 & a_{22}^3 & 0 & a_{21}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{m}_{21} - a_{23}^1 \\ \bar{m}_{12} + \bar{m}_{32} + \bar{m}_{42} - a_{13}^1 - a_{13}^2 - a_{13}^3 \\ \bar{m}_{23} - a_{23}^2 \\ \bar{m}_{24} - a_{23}^3 \end{bmatrix} \circ \quad (13)$$

以上矩阵中包含的系数均可由相应的元件参数确定。在管网整体系统模型计算过程中,首先根据设定的初始流量进行首次求解,从而获得各个节点和元件的压力值。随后,依据这些压力值构建方程,推导出新的流量方程,原矩阵中对应的系数将自动更新。系统通过不断求解新方程,实现反复迭代。当最终结果满足预设的残差值时,迭代过程终止,从而获得模拟计算结果。

#### (四) 开发 Flowmaster 仿真软件并完善数据库

Flowmaster 采用专业的数据库管理工具 SQL Server 来存储和读写各类数据,包括组件数据、系统参数、模型数据、性能数据、模块及脚本数据等。SQL Server 凭借其强大的搜索和管理功能,确保了数据的开放性和共享性。多个用户终端能够安全地共享数据资源,并持续地整合多种工况数据信息,同时根据具体需求进行编辑和定义。然而,Flowmaster 软件对计算结果中的 mdf 文件大小设定了 10G 的上限(适用于 SQL 2010 及以上版本),这在流体管网的瞬态分析计算过程中,经常导致内部存储不足,进而使迫使计算过程被迫终止。因此,对数据库进行完善和扩充显得尤为重要。

## 四、结语

复杂流体管网系统是流体输配管网课程的重点和难点,学生普遍对环状管网的水力计算及水力工况分析感到陌生和枯燥,导致课堂参与度低,课后自学和完成大作业的积极性不高。基于多年教学经验和相关科研项目的研究,我们构建了一个集复杂流体管网水力算法、软件仿真、工程实验平台于一体的教学平台和教学模式。目前,教学方式的设计已顺利完成,并尝试进入教学实践阶段。该平台旨在引导学生根据实际工程问题和流体网络分析的基本原理,从设计、仿真软件系统搭建、实例实验台测试、数据分析等多个环节入手,全面了解管网系统的设计、故障处理、计算应用等方面。

通过小组讨论、质疑、师生互动等方式,鼓励学生深入分析问题,设计多种方案并从中判定正确结果。倡导学生不拘泥于课本知识,激发其兴趣和创新意识,使教学过程既直观又可操作,从而培养学生的动手能力和自主创新能力。以任务为导向,学生可以结合课程所学,切实参与课程实践,利用已有知识和经验,自主尝试解决新问题,探求新知识。力求做到凡是学生能够自己解决的问题,鼓励主动参与。同时,这一过程将加深学生对流体输配管网课程基础知识的理解,发展创新思维,最终达到培养学生创新与实践能力的目标。

虚实结合的教学设计方式旨在推动教学发展,提升教学能力和手段,提高教学质量。复杂管网系统虚实仿真教学涵盖了实验系统的设计、搭建和仿真计算模型的创建。这种教学方式打破了传统教学模式的束缚,深化了学生对流体输配管网课程基础知识的理解,推动了创新思维的发展,提升了学生理论联系实际的能力,并引导学生掌握分析与解决问题的方法,培养了运用专业原理思考问题的良好习惯。遵从本专业提出的“转教为启,变教为导;促学强思,兼学重悟”专业教育核心理念,进一步巩固和提升了“做中学与学中做”<sup>[20]</sup>的教学效果。

#### 参考文献:

- [1] 孙育英,吴旭,王伟,等. Dymola 空调风平衡调试虚拟仿真实训平台开发[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(7): 75–79.
- [2] 孙欢,陈剑波,邹同华. 虚拟仿真实验教学中心的建设与应用[J]. 实验室科学, 2017, 20(3): 145–148.
- [3] 汪峰,邢云,杨卫波,等. 基于 Dymola 的建筑中央空调系统仿真实验与教学[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4):

147–152.

- [4] 刘润东, 王俊淇, 孙志高, 等. 空调实验教学虚拟仿真平台的建设与应用[J]. 中国现代教育装备, 2021(19): 28–31.
- [5] 王宏宇, 丁建宁, 许桢英, 等. 虚实结合实践教学的现状分析与发展探究[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(7): 11–16.
- [6] 肖益民, 宫卓, 高祥睽. 流体输配管网课程教学情况调查分析[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(2): 109–115.
- [7] 全贞花, 杜伯尧, 孙育英, 等. 基于问卷调查的《流体输配管网》课程教学思考[J]. 教育教学论坛, 2020(14): 296–298.
- [8] 李俊梅, 孙育英, 乔雅心. 建筑环境与能源应用工程专业虚拟仿真实验教学的实践探索[J]. 高等建筑教育, 2021, 30(3): 165–170.
- [9] 赵彪, 余占清, 朱桂萍, 等. 基于教研相融和翻转课堂的新工科教学改革实践——以“能源互联网中能量转换与互联设备”课程为例[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3490–3501.
- [10] 端木琳, 袁鹏丽, 王宗山, 等. 建筑环境与能源应用工程专业自主研究型实验平台建设[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(5): 17–20.
- [11] 张登春, 郝小礼, 于梅春, 等. 新工科背景下建筑环境与能源应用工程专业创新型人才培养模式探索[J]. 高等建筑教育, 2022, 31(3): 57–62.
- [12] 端木琳, 安辉, 张晋阳. 流体输配管网多媒体课件制作与教学实践初探[J]. 高等建筑教育, 2004, 13(1): 94–96.
- [13] 肖益民, 宫卓, 高祥睽. 流体输配管网课程教学情况调查分析[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(2): 109–115.
- [14] 教育部. 关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知(教高函[2018]5号)[Z]. 2018.
- [15] 熊宏齐. 国家虚拟仿真实验教学项目的新时代教学特征[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(9): 1–4.
- [16] 刘金库, 卢怡, 张敏, 等. 科研成果向虚拟仿真实验教学一线转化的模式——以首批国家级虚拟仿真实验教学一流课程建设为例[J]. 化学教育(中英文), 2022, 43(10): 58–61.
- [17] 张琤, 李明, 高航. 地方高校创新创业人才培养体系构建与实践[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 17–20.
- [18] 葛涛, 付双成, 刘文明. 创新创业教育背景下高校实验室建设管理研究[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(4): 275–278, 281.
- [19] 冼进, 毕盛. 基于创新性综合实验的嵌入式教学研究[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(4): 82–85.
- [20] 舒海文, 端木琳, 李祥立. “做中学”理念在暖通空调课程教学中的探索与实践[J]. 高等建筑教育, 2016, 25(6): 95–99.

## Design of a virtual–actual interactive teaching method in the course of fluid network for transportation and distribution

LI Xiangli, CHANG Chang, DUANMU Lin, WANG Zongshan

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China)

**Abstract:** Fluid network for transportation and distribution is a core course of building environment and facilities engineering. It is a technical basic course for engineering students to learn and master the basic knowledge and design methods in the process of various fluid transmission and distribution. Taking the opportunity to further deepen the undergraduate teaching reform and connotation construction of Dalian University of Technology, and comprehensively improving the quality of talent training, the course resource platform is reformed in view of the deficiencies in the fluid network for transportation and distribution course. In combination with the construction experience of the first batch of national first-class courses, taking students as the center, advocating learning by doing through task-oriented approaches, learning by discussing basic

knowledge, and learning by analyzing engineering cases, a virtual-actual interactive teaching method is proposed, and an entity platform of complex fluid network is constructed. At the same time, the corresponding simulation platform is customized, and a virtual-actual interactive platform of simulation, regulation and data collection is established. Online teaching completes the customization of data model and some simulation modules. Offline, combined with the engineering test-bed, the virtual-real process of self-built platform and regulation is actually completed, and a teaching platform integrating algorithms, software simulation and engineering test is built. Students' interest in active learning is stimulated, their subjective initiative in learning is mobilized, their innovative thinking is developed, and their innovation and practical abilities are cultivated. We practice scientific research to feed teaching, transform scientific research results into teaching content, and refine the main points of the course from actual engineering and scientific research problems, which strengthens the breadth and depth of the course content. It helps students establish the concept of pipe network system with a certain degree of complexity, which is challenging and exercises students' self-learning and cooperation abilities. The teaching design promotes the deep integration of modern information technology with education and teaching, continuously improves the reform of teaching quality monitoring and guarantee system, and improves the construction of practical teaching system.

**Key words:** complex fluid network; virtual-actual integration; interactive teaching; innovation and practical ability; self-learning and cooperation ability

(责任编辑 梁远华)