

以工程创新为导向的过程流体机械溶气泵案例教学探索

许萧

华东理工大学机械与动力工程学院，上海 200237

摘 要： 溶气泵作为溶解气浮（DAF）技术的核心设备，其设计与运行涉及流体力学、传质过程、机械工程及自动化控制等多学科交叉知识。本文围绕过程流体机械本科课程教学，提出一种“理论－模拟－实验－优化”四位一体的溶气泵案例教学模式，通过真实工业场景导入、多尺度问题分解、虚拟仿真与实体实验结合的方式，系统培养学生解决复杂工程问题的能力。教学实践表明，该模式能够显著提升学生的知识整合能力、创新思维及工程伦理意识，为流体机械类课程的改革提供了可复制的范式。

关 键 词： 过程流体机械；溶气泵；案例教学；工程能力培养

Exploration of Case Teaching of Process Fluid Machinery Dissolved Air Pump Guided by Engineering Innovation

Xu Xiao

East China University of Science and Technology School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai 200237

Abstract： As the core equipment of dissolved air flotation (DAF) technology, the design and operation of dissolved air pumps involve interdisciplinary knowledge such as fluid mechanics, mass transfer processes, mechanical engineering, and automation control. This article focuses on the teaching of undergraduate courses in process fluid machinery and proposes a four in one case teaching mode for dissolved air pumps, which includes "theory simulation experiment optimization". Through the introduction of real industrial scenarios, multi-scale problem decomposition, and the combination of virtual simulation and physical experiments, the system aims to cultivate students' ability to solve complex engineering problems. Teaching practice has shown that this model can significantly enhance students' knowledge integration ability, innovative thinking, and engineering ethics awareness, providing a replicable paradigm for the reform of fluid machinery courses.

Keywords： process fluid machinery; dissolved air pump; case-based teaching; engineering ability cultivation

一、引言

（一）过程流体机械课程的教学挑战

过程流体机械是过程装备与控制工程专业的核心课程，涵盖泵、压缩机、分离设备等关键装备的原理与设计。传统教学模式存在以下痛点：

1. 理论与实践脱节

公式推导占据主导，缺乏对设备实际运行工况（如非稳态流动、多相流耦合）的直观认知。^[1]大部分高校会进行理论知识的讲授，但是会忽略其在实践场景中的应用，使学生在学完理论的相关知识后，在实际的场景当中不会应用，从而很难就业。高校应该通过企业实习或者是模拟实训的方式将学生带入到真实的场景当中，让学生知道自己学习到的知识具体的应用场景是怎么样的，从而对自己学习的知识有一个全新的认识，不会造成理论与实际相脱节的现象，使学生即使绩点成绩较好，但是深入到企业当中发现动手能力不行。

2. 创新思维培养不足

标准化习题训练难以应对工业场景中参数不确定性问题（如

流体物性变化、能量动态转变）。^[2]传统的考核标准是以试卷的形式为主，使学生在练习的过程中也是以习题的训练为主，因为这样才能够更好地进行考试，但是习题只是理论知识的阐述，没有上升到学生的实际操作过程当中，使一些学生虽然不断的刷题、不断的练习，即使是最后的考试成绩有一个好的结果，但是当应用的时候就会发现不能够操作，即使有一些学生能够进行操作，但是只会按照教师讲授的步骤进行操作，不会形成自己创新性的思维方式，更不会提出一些创新型的思维观点，从而降低了学生的创新能力。

3. 工程伦理教育缺位

流体机械的能耗与安全环保存在取舍难题，学生对工程实践领域的取舍权衡缺乏系统性思考。^[3]提高流体机械的效率往往需要投入更多的研发成本和技术革新，而这可能与企业追求短期经济效益的目标相冲突。在实际操作中，为了确保流体机械的安全运行，有时不得不采取一些可能增加能耗的措施。这种权衡使得流体机械的能耗与安全环保之间形成了紧张的关系。^[4]学生对于这一领域的取舍权衡往往缺乏系统性思考，他们可能只关注在学习过程中遇到的单一方面的优化，而忽视了在现实生活中遇到的整体效益的问

题,从而使在实际工程实践中出现只关注单一问题的现象。

4. 单一流体设备无法响应气液两种流体力学知识

液体与气体流体力学知识存在割裂,通常以泵与压缩机两种设备分别响应液体和气体相关知识,无法集中在一种设备。^[5] 泵作为液体传输的主要设备,其设计原理和工作机制主要基于液体的不可压缩性和较高的密度,通过机械能转换为液体的压力能和动能,实现液体的输送。^[6]而压缩机,则是针对气体设计的流体机械,它利用气体的可压缩性,通过减少气体的体积来提高其压力,从而满足气体传输或工艺过程的需求。但是学生在学习的过程中可能将液体与气体流体力学知识割裂的做法没有学习的很透彻,使得出现单一流体设备能否同时响应气液两种流体力学的知识出现很大的困惑,这不仅降低了实践操作的流程,还使学生在反复的过程中降低了对自己的看法。^[7]由此可见,如何打破这一局限,开发出能够同时适应液体和气体流动特性的新型流体设备,成为当前流体力学研究和工程实践中的一大难题。

(二) 案例教学法的优势与溶气泵的典型性

案例教学通过真实问题驱动学习,符合 CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate) 工程教育理念。溶气泵广泛用于工业污水处理的溶气气浮 (Dissolved Air Flotation, DAF) 工艺,溶气泵通过高压将空气强制溶解于水中,形成过饱和溶气水。^[8]当溶气水进入气浮池减压释放时,微小气泡迅速析出并附着于悬浮物 (如油脂、藻类、絮体等),使其浮力大于重力而上浮分离。选择溶气泵作为教学载体具有独特优势:(1) 技术综合性:涵盖流体力学 (液体湍流与层流)、热力学 (气体膨胀压缩)、机械设计 (泵体结构优化) 等知识点。^[9](2) 工程代表性:放大过程中存在的“气泡尺寸不稳定”“能耗激增”等问题,是流体机械设备放大的典型挑战。(3) 社会关联性:溶气泵通过高效溶气与低耗运行,在污水处理、资源回收等领域显著降低碳排放,成为工业水处理领域实现“双碳”目标的关键装备。^[10]

二、溶气泵案例教学的系统设计

(一) 教学目标的多层次构建

知识目标:掌握溶气泵工作原理、关键参数 (压力、气液比) 及放大效应。

能力目标:培养问题分析 (如气泡不稳定性)、CFD 模拟与优化设计能力。

素养目标:强化工程伦理意识 (如能耗与环保的平衡)。

(二) 案例内容

1. 引入工程问题:某污水处理厂溶气泵放大、DAF 系统升级后出现气泡粒径增大、浮选效率下降,需诊断溶气泵故障原因,并且提供解决方案。

2. 理论分析:解析溶气泵循环 (吸气-压缩-溶解-释放) 的热力学过程,采用数值模拟手段模拟不同泵体结构的流场与气泡分布,进一步通过模拟计算和文献验证,获得目前先进溶气泵设备的结构参数与性能参数的对应关系。^[11]

3. 在上述理论基础上,获取该污水处理厂的溶气泵运行参数,

通过绘制工作循环的压力-流量关系图,分析压力波动和流量波动的规律,进而预测压力波动对气泡生成和浮选效率的影响规律。^[12]

4. 提出优化改进的总体思路,在泵前采用预混合设备,提高气泡进入叶轮的连续性和均匀性,形成《溶气泵能效优化方案》报告,解决了工业问题。

(三) 教学流程的闭环设计

1. 课前预习

自学溶气泵文献,分组调研工业案例。在预习阶段,学生们可通过查阅文献、查阅教材以及查阅专业书籍的方式来对溶气泵的结构特点有一个基础的认识,对气液混合机制在不同工业领域当中的应用场景有一个全新的理解。例如:有的学生通过自主学习的方式了解到溶气泵是采用高速旋转的泵叶轮将液体与气体混合搅拌,而且不需要搅拌器和混合器,就能实现气体与液体的充分溶解,溶解效率可达 80% 到 100%。^[13]由此可见,学生通过预习不仅能够了解到即将要学习的相关内容,还能够对自己不理解的部分,有一个充分的认识。在学生预习之后,教师还将学生分成不同的小组,每组选择一个自己小组想要调研的工作案例进行深入分析,使学生能够在实地考察的过程中了解溶气泵在工业现场的应用情况和在实际运行中的性能表现、存在问题以及改进措施。例如:有的学生选择调研溶气泵在污水处理厂的应用情况,更好地了解其是怎么通过产生微细气泡来提高污水的处理效率的;还有的小组对溶气泵在食品加工中的应用进行调研并了解到其是怎么通过精确的控制气液比例来满足不同产品的生产需求的。这种方式能够使学生真实地感受到溶气泵在工业应用中的重要性,并发现其中的问题,每一个小组将所有的理论预习与调研完毕后,需要根据自己的调研结果,提出一个创新型的解决方案和改进意见的 PPT,从而更好地激发学生的团队协作能力和实践能力。

2. 课堂研讨

讨论溶气泵放大效应的物理机制 (如湍动能对气泡尺寸的影响)。当学生预习完毕之后,教师在课堂中还会将学生分成不同的小组,来探讨溶气泵放大效应的物理机制等问题,有的小组选择的是溶气泵放大效应这一问题,经过讨论该小组得出,随着流量、压力、转速等操作条件的不断变化,气泡的尺寸、分布及溶解效率也会发生一定的变化;还有的小组讨论湍动能对气泡尺寸的影响,有的学生说在溶气泵内部,当流体通过叶轮高速旋转产生剪切力和涡旋作用时,会发现湍动能不断的增强,其不仅更好地促进了气液界面的更新,还加速了气体分子向液体内部扩散的现象,还有的学生说强烈的湍流剪切力会撕裂较大的气泡,使其分裂成更小的气泡,从而增加气泡的总表面积,提高溶解效率。^[14]教师通过这种小组讨论的方式,不仅能够加深学生对溶气泵工作原理的理解,还能够激发他们运用所学知识解决实际工程问题的能力,更能将他们培养为具备创新精神的工程技术人才。

3. 模拟实训

通过 CFD 软件可视化气液两相流,分析泵入口设计缺陷。教师为了更好地加深学生的理解,在模拟实训的场景当中,首先让学生通过三维建模软件构建溶气泵及其入口结构的精确几何模型,随后将其导入 CFD 软件中进行气液两相流的数值模拟。这一

过程不仅考察了学生对于基本建模技巧的掌握程度，还能够考察他们理解流体动力学的基本原理的情况，以此来更好地促进学生的全面发展。^[15]其次，教师让学生通过可视化的分析数据来掌握泵入口存在锐角或突然扩张的设计缺陷时，流体在通过这些区域时会发生什么现象？学生们通过操作之后发现会产生强烈的涡旋和湍流，从而增加了能耗，出现气液界面不稳定的情况。最后，教师会让学生自主来调整入口的情况来看会发生什么样的情况。学生通过不断的操作发现这会减少涡旋和湍流的产生，使流体更加平稳地进入泵体，从而提高溶气泵的整体性能。教师通过这样的模拟实训不仅能够让学生更好地掌握 CFD 技术的优化设计方法，还能够让学生通过自己的所学提出一定的改进措施，从而更好地优化该内容。

4. 分析与总结

通过加深气液两相流体力学的认识，以及叶轮泵的运行原理，分析工程问题和科学问题之间的关系，小组展示优化方案，接受跨组质询。当学生通过模拟的实训操作，形成对深气液两相流体力学的深刻认识以及对叶轮泵的运行原理的深刻认识。除此之外，教师还让学生通过小组展示的方式，来优化不同小组提出的措施，从而更好地使学生之间进行学习。当一组学生展示的时候，其他小组于教师会充当评委的角色，对该学生的问题进行质疑，或者是提出不解的地方，从而不断地优化每一组提出的改进措施，使班级所有的学生能够更好地掌握该实践方面的知识。

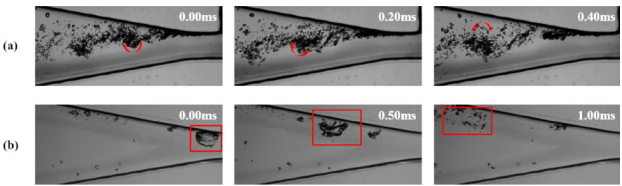
三、教学实施与成效分析

（一）典型学生项目案例

案例名称：基于文丘里效应的溶气泵节能改造

问题发现：结合 Zhang 等多相流泵的研究，溶气泵在流量放大之后，出现气泡变大、泵的振动，主要原因在于进入的气体存在不连续的问题，因此，在泵前增加连续注气混合器是可行的方案，进一步调研了主要的预混合设备，开发了连续注气的文丘里混合管，连续性从 15Hz 提高至 40Hz，成果发表在 Heat and Mass Transfer 期刊。提供了解决溶气泵放大难题的一种创新方案：在

泵进口增设文丘里管，提高大规模溶气泵的升压和产气效率。



>图1 连续注气混合器高速摄像实拍图，（a）优化后的高连续性文丘里管，（b）优化前的低连续性文丘里管

（二）学习效果的多维度评估

评估指标	传统教学班 (均值)	案例教学班 (均值)	提升幅度
专业基础知识掌握程度，以考试客观题成绩为例	30	33	10%
工程应用知识熟练程度，以考试主观题成绩为例	31	40	29%
方案报告完整性，以实验报告评分为例	81	89	10%

（三）课后学生反馈

在课堂教学之外，学生主动查找了国内外溶气泵制造品牌，例如国外的 EDUR、Nikuni 等公司公布了系列化的设计参数，发现国内溶气泵虽然在泵压、单位能耗方面已经追赶甚至超越了国外品牌，但是大流量溶气泵仍然依赖于进口，溶气泵存放大仍然是工业卡脖子难题，激发了对过程流体机械课程的学习兴趣。还有一些通过课程学习，认为“通过溶气泵案例，我第一次意识到课本上的伯努利方程竟然能用来解决污水厂的实际故障！”提高了专业认识和认可水平。

四、结论

溶气泵案例教学通过“真实问题－多模态学习－迭代优化”的闭环设计，有效破解了过程流体机械课程中“知识碎片化”“创新实践弱”的难题。该模式不仅提升了学生的技术能力，更培育了其系统思维与工程责任感，为新工科背景下的装备人才培养提供了可推广的解决方案。

参考文献

[1] G.Z. Kyzas, A.C. Mitropoulos, K.A. Matis, From Microbubbles to Nanobubbles: Effect on Flotation, Processes 9 (2021).
[2] S.Y. Andreev, K.V. Lebedinskiy, S.V. Stepanov, A novel technology for optimizing dissolved air flotation unit efficiency via secondary saturation of the flotation cell with air bubbles and thin-layer settling, Chemical Engineering and Processing – Process Intensification 184 (2023).
[3] R. Ning, S. Yu, L. Li, S.A. Snyder, P. Li, Y. Liu, C.F. Togbah, N. Gao, Micro and nanobubbles-assisted advanced oxidation processes for water decontamination: The importance of interface reactions, Water Res 265 (2024) 122295.
[4] S. Kim, K.-Y. Lee, J.-H. Kim, J.-H. Kim, U.-H. Jung, Y.-S. Choi, High performance hydraulic design techniques of mixed-flow pump impeller and diffuser, Journal of Mechanical Science and Technology 29 (2015) 227–240.
[5] W. Zhang, B. Zhu, Z. Yu, Characteristics of bubble motion and distribution in a multiphase rotodynamic pump, Journal of Petroleum Science and Engineering 193 (2020).
[6] S. Li, X. Liu, J. Yang, J. Bi, X. Xu, Q. Yang, Effect of gas injection location on bubble size from Venturi bubble generators, Heat and Mass Transfer 61 (2025).
[7] 郭建平. 双涡轮压溶释放超微气泡发生器 :CN201610087505.5[P].CN107082465A[2025-03-27].
[8] 黄建平, 彭智新. 高速多相流溶气泵 :CN 201010574889[P].CN 102052354 A[2025-03-27].DOI:CN102052354 A.
[9] 黄建平, 彭智新. 高速多相流溶气泵 :CN201010574889.6[P].CN102052354B[2025-03-27].DOI:CN102052354 B.
[10] 熊集兵. 新型机械散气溶气气浮柱 (NAFC) 的开发与应用 [D]. 青岛建筑工程学院 [2025-03-27].DOI:10.7666/d.Y647820.
[11] 赵玉良, 吕江, 谢凡, 等. 煤热解废水的气浮除油技术 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2019(3):5.DOI:CNKI:SUN:MTJG.0.2019-03-018.
[12] 乔晓宇. 一种高效溶气泵 :CN202122447512.0[P].CN216223391U[2025-03-27].
[13] 任玉维, 李振威, 王维辉. 603D-160L 多相流离心泵叶轮及隔板损坏原因分析 [J]. 通用机械, 2014(2):2.DOI:10.3969/j.issn.1671-7139.2014.02.022.
[14] 许盛辉. 洗涤废水循环利用系统 :CN201811260131.8[P].CN111099761A[2025-03-27].
[15] 马军, 邹景, 朱君涛. 微絮凝、膜过滤与气浮一体化反应装置及其处理低浊微污染水的方法 :CN 201010566493[P][2025-03-27].