



## 3D 打印综合实践教学平台建设

杜平, 汤彬, 张秀海, 罗勇, 王群, 马运, 韦思健

(清华大学基础工业训练中心, 北京 100084)

**摘要:** 3D 打印是一种以增材制造为主要特点的新兴产品制造技术, 对社会多个行业和领域带来了深刻影响, 近些年许多高校逐渐开始研究探索将此技术应用于课程教学中。针对目前普遍存在的教学内容单一、教学时间受限、教学方法落后等问题, 基于清华大学基础工业训练中心的 3D 打印综合实践教学平台, 探讨了具体的建设经验, 从多样化模型设计、传统和新兴工艺结合、线上数字资源开发、科研项目结合等方面进行了创新。该平台在多门课程的教学实践与学生科创活动中起到了重要的支撑作用, 学生的工程思维、创新能力、设计能力和自主学习能力都得到了很好的锻炼和提高。

**关键词:** 3D 打印; 增材制造; 实践教学; 创新创业

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230354

## Construction of 3D Printing Practical Teaching Platform

DU Ping, TANG Bin, ZHANG Xiuhai, LUO Yong, WANG Qun, MA Yun, WEI Sijian

(Fundamental Industry Training Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** 3D printing is an emerging product manufacturing technology characterized by additive manufacturing, which has a profound impact on multiple industries and fields in society. In recent years, many universities have gradually begun to research and explore the application of this technology in the curriculum teaching. In response to the common problems such as the single teaching content, limited teaching time, and outdated teaching methods, a 3D printing practical teaching platform was constructed in the Fundamental Industry Training Center of Tsinghua University. This paper discusses the construction experience and innovation in the diverse model design, combination of the traditional and emerging technologies, the online digital resource development, and the research project integration. The platform has played an important role in the teaching practice of many courses and students' scientific and technological innovation activities, and students' engineering thinking, innovation ability, design ability and independent learning ability have been well exercised and improved.

**Key words:** 3D printing; additive manufacturing; practical teaching; innovation and entrepreneurship

3D 打印是一种通过材料逐层添加制造三维物体的变革性、数字化增材制造技术<sup>[1-2]</sup>。它最早出现于 20 世纪 80 年代, 并逐渐在航空航天、生物医疗、汽车、建筑、影视、工艺品等许多领域得到广泛应用。3D 打印技术生产过程无须任何模具等专用工具, 只需将零件的数字模型输入计算机, 无需人工编程, 根据离散、堆积原理, 在模型的直接驱动下完成材料的有序堆积, 自动完成零件的成形制造。这种将三维制造降低到二维加工的思维方式是制造领域中的重大突破, 运用此技术不仅可以加工复杂表面和镂空结构的异形件, 而且设计制造一体化大大缩短了新产品的开

发周期。此外, 3D 打印对未来人类生活方式也将产生重要影响, 它能够实现从想象到现实的延伸, 跨越虚拟世界与实体世界的鸿沟, 开创产品创新设计和创新制造的革命。

为抢占这一技术及产业发展的战略制高点, 世界各国纷纷将 3D 打印列为未来优先发展方向, 制定了发展规划及扶持政策<sup>[3]</sup>。3D 打印技术作为制造业领域正在迅速发展的一项新兴技术, 其在教育领域亦有深刻的意义。将 3D 打印技术应用到教学实践过程中, 对学生的动手能力、创新能力及创新思维等的培养都有重要的促进作用<sup>[4-6]</sup>。3D 打印能够将课本上抽象的知识实物化地展现在

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-08-19

基金项目: 清华大学本科生教育教学改革经费(53412280123)。

作者简介: 杜平(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事智能制造、3D 打印、机器人等方面的研究。E-mail:

duping@tsinghua.edu.cn

学生面前,实现触觉教学,以激发学生的学习兴趣。学生可以充分发挥创意构思,依托3D打印技术对产品进行个性化定制和创新设计。此外,3D打印技术加工成本低、生产周期短,可以在学生创新创业活动中快速开发产品原型。

3D打印具有很强的动手实践属性,所以开设相关课程必须要建设相应的实践教学平台,如设计软件的选择和3D打印机采购。但是在教学平台的建设过程中,目前主要存在以下3个问题。

#### 1) 教学内容单一

目前高校3D课程主要以工程训练项目形式开展,课程主要对象为工科学生。但是教学内容单一,项目种类稀少,学生被动选择教学内容,缺乏自主选择权。另外,教学层次没有针对不同专业学生进行精细化的区分,这样不利于不同学科、不同学习能力学生的分层化培养。

#### 2) 教学时间受限

3D打印的整个工作流程包括模型设计、导入打印机、设置打印参数、打印及后处理。课程内容受学时所限,基础理论只能做个简单概论,加上老师的实训教学,学生可自主进行设计与打印实操的时间很短,通常只能学习到最普通的塑料打印工艺,无法进行更深入的学习。

#### 3) 教学方法落后

基础理论知识以教师讲授为主,实践操作教学以实训指导教师现场演示为主。教学方法仍采用传统课堂中的填鸭式教学方式,没有将学生放到教学过程的主体地位。虽然“讲授—示范—个别辅导”式的教学方法可以在较短的时间内把知识和技能传授给学生,但忽视了大学生在实践活动中的主动性与创造性,容易养成思考惰性与对教师的依赖性,以致在面对具体问题时,“坐、等、靠”现象非常普遍,不利于学生自主学习能力和创新能力的培养。

针对以上问题,本文基于清华大学基础工业训练中心的3D打印综合实践教学平台,探讨了相关的建设经验,从多样化模型设计、传统和新兴工艺结合、线上数字资源开发与科研项目结合等方面进行了创新。

## 1 平台总体设计

清华大学基础工业训练中心是首批入选国家级工程训练示范中心的单位之一,近些年积极将

工程训练的教学内容从传统的制造工艺为主,扩充为涵盖广义制造过程、反映信息技术与制造技术深度融合的先进制造系统。3D打印则是能够与产业变革紧密结合、体现智能制造新业态的一个非常典型的代表技术<sup>[7]</sup>。中心最早于2008年就引进了第一台3D打印机,经过学习使用和在2010年成立了3D打印实验室,并开始在金工实习等课程中加入3D打印实践单元。经过十几年的建设,开发了3D打印和逆向工程等多个教学环节,并配套了丰富的硬件设备和软件资源。在此基础上,基于3D打印技术的综合实践教学平台初步完成建设,并成功应用到多门国家级和校级精品课程的教学以及学生科创服务,获得了良好的教学效果。

平台的主要设计思想是建成一个资源共享平台,整合基础理论知识、3D打印工艺技术、设计建模软件、打印机硬件等资源。以实际问题为引导,通过3D打印机与实验相结合的边学边做的方式掌握原理,利用3D打印实现具体案例,综合应用所学知识实现创新设计。平台的资源不仅可供教师在课程教学中使用,学生在课下也可以进行自主探索式的学习,从而更全面培养学生的思考、自学、动手、解决问题以及创新创造能力。

平台的主体架构如图1所示。

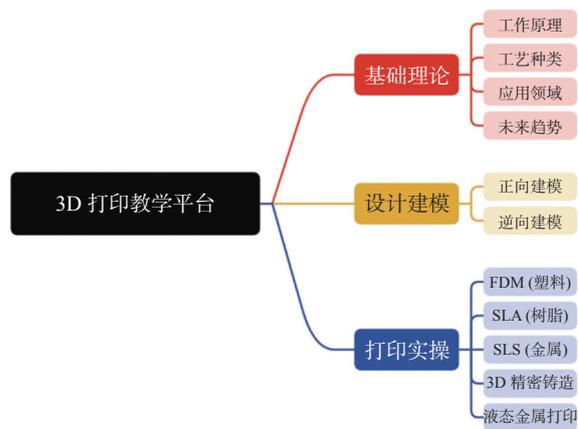


图1 平台主体架构

#### 1) 基础理论

基础理论部分包括3D打印技术的原理、工艺种类、特点、应用领域和未来发展趋势的讲授。根据原材料的物理形态,主流3D打印工艺可划分为丝线材料的挤出熔融成型、液态材料的光聚合成型,以及粉末材料成型3大类。平台目前包含如下工艺的教学内容:熔融沉积工艺(fused deposi-

tion modeling, FDM)、立体光刻(stereo lithography, SLA)、数字光处理 (digital light processing, DLP)、选择性激光烧结(selected laser sintering, SLS)、多射流熔融 (multi-jet fusion, MJF), 多喷头打印 (multi jet printing, MJP)。

2) 设计建模

3D 打印是原生的数字化技术, 必须以数字模型作为输入。三维结构的设计包含两种方法: 正向设计从创意概念草图开始, 使用建模软件生成, 本教学平台建设了基于 3D One、Solidworks, Fusion 360 的 3 个软件的教学方案; 逆向设计是从一个已有的实物入手, 通过数据采集设备转化为数字模型, 本教学平台利用 Creafom 公司的 Handyscan 和 Metrascan 激光扫描仪, 实现从手持扫描到搭载机器人自动扫描的各种任务。

3) 打印实操

实验室配备多种型号的打印机用于学生实际操作, 如图 2 所示。其中数量最多的是基于 FDM 工艺的塑料打印机, 可以保证每个学生亲自上机—加载模型—设置打印参数—打印完成—后处理完整工序。此外, 实验室还配备了多台工业级打印机, 如基于 SLA 工艺的树脂打印机、基于 MJF 工艺的尼龙打印机、基于 SLM 工艺的金属打印机。由于这类设备操作较为复杂, 一般是学生设计好模型, 由老师完成打印再交给学生做后处理。3D 精密铸造工艺是传统铸造技术与 3D 打印技术结合的先进铸造技术, 液态金属打印技术则是利用在室温下可保持液态的特殊合金制作创意电路作品。这些打印工艺极大地丰富了教学平台的教学案例, 能有效提高学生的学习兴趣 and 体验感。

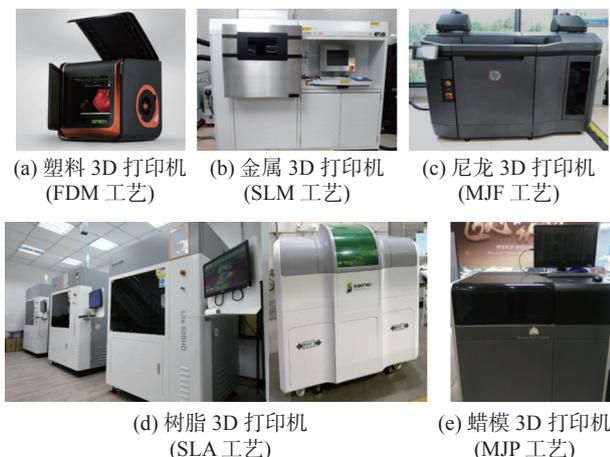


图 2 实验室的 3D 打印设备

2 平台主要创新点

针对线上远程教学的需求, 教学团队通过详细研究, 整合三维模型设计、远程打印、慕课资源 3 个方面进行了全新的教学设计。

1) 正向建模技术

本平台提供从低到高 3 个层次的软件来满足不同类型课程及学生的设计需求(如图 3 所示)。3D One 面向非理工科的初学者, 界面简单, 操作容易上手; Solidworks 属于专业的工程类设计软件, 适合有工程制图基础的理工科学生, 并且对最终作品的尺寸和精度有一定要求; Fusion 360 则是一款同时具备参数化建模和自由曲面两种建模功能的新型软件, 此外还有面向增材制造的特殊结构(镂空点阵、衍生式设计)设计功能, 同时集成了电路制作、加工仿真、动画、渲染等高级功能, 适合更加综合性的复杂产品设计。

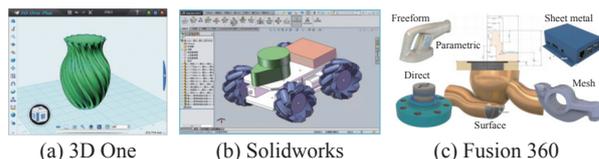


图 3 三维建模软件

2) 逆向建模技术

逆向设计是另一种高效获取数字模型的方法, 其中光学式的三维扫描仪是使用最便捷的一种数据采集设备, 如图 4 所示。本教学平台拥有业界领先的 Creafom 公司的 Handyscan 和 Metrascan 激光扫描仪。其中 Handyscan 是手持式扫描仪, 需要定位标点建立基准坐标系, 操作人员手持完成零件的扫描。而 Metrascan 可装到机械臂上, 配合 C-Track 光学跟踪装置及 Metrologic 自动化三维检测软件, 可搭建出自动扫描系统, 并进行快速批量检测。



图 4 逆向扫描设备及建模过程

### 3) 3D 精密铸造

3D 精密铸造是将石膏型精密制造技术与 3D 打印技术相结合的一种先进铸造技术方法,如图 5 所示。首先由学生自主定制设计一件工艺品(如截止、耳环、吊坠、胸针等),导入高精度蜡模 3D 打印机制作蜡模,然后灌制石膏浆料制成石膏型壳,再通过高温焙烧工艺进行脱蜡处理,最后进行熔炼浇注,得到金属材质的成品<sup>[8]</sup>。本技术很好地体现了 3D 打印个性化制造和快速原型制造的特点。

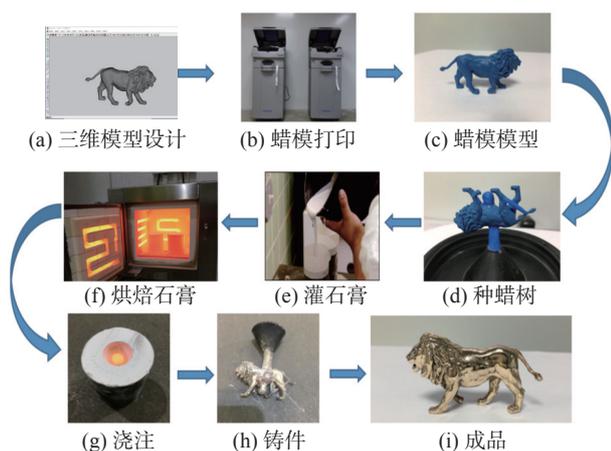


图 5 3D 精密铸造工艺流程

### 4) 液态金属打印

液态金属指在室温附近或更高一些的常温下呈液态的金属,又称低熔点金属。典型的有镓基、铋基金属及其合金,因其安全无毒、性能卓越,正成为异军突起的革命性材料。液态金属在常温下可流动、导电性强、热学特性优异、易于实现固液转换<sup>[9-10]</sup>。传统电子制造工艺繁杂,涉及从基底材料制备到形成互连所需的薄膜沉积、刻蚀、封装等环节,消耗了大量的原料、水、气和能源。新型液态金属打印设备通过印刷方式可在各种基材甚至人体皮肤上直接制造出目标电路、元器件、集成电路和终端功能器件。实验室配备的液态金属打印机通过打印电路、装配电子元件、封装后得到创意电子画作品,如图 6 所示。此外,液态金属制作的电路,可以在常温下实现超柔性和可拉伸性,使用平板印刷法制作发光电路到服装上,最终实现高性能、美观且舒适性较好的可穿戴柔性电子发光服饰<sup>[11]</sup>。

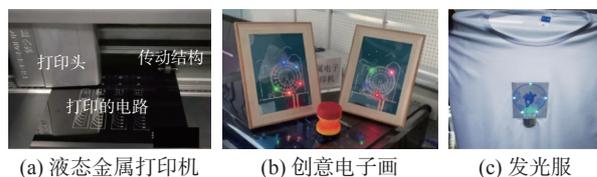


图 6 液态金属打印机及作品

### 5) 线上教学手段

近年来,传统的线下教学受到了很大影响。平台按照学校要求,新建了一系列线上教学手段,有力地保证课程同质等效。

① 制作了预先安装好多个 3D 建模软件的 VMware 的虚拟机系统,通过中心的工业云平台快速批量部署。免去了学生自己电脑上安装和设置授权的繁琐步骤,通过网络直接访问即可使用。

② 通过在实验室的电脑上安装远程控制软件和摄像头,使线上学生实现远程操作 3D 打印机完成作品的加工,极大提升了学生的课程参与度<sup>[12]</sup>。

③ 在线机械制造实习慕课录制了包含“3D 打印技术概论”和“FDM 打印机操作”两个视频,可以供学生自主学习、课前的预习和课后的回看,达到更加完整的学习体验。

### 6) 科研项目支撑

紧密联系国家重大战略需求,团队充分利用本平台的资源,与中国航空工业集团合作,承接了国家科技重大专项子课题“某软件增材制造结构设计”和“AI 与 CAD 技术融合”,对镂空点阵结构和拓扑优化做了深入研究,如图 7 所示。3D 打印的制造成本对设计的复杂性不敏感,适合制造复杂形状的产品,如一体化结构、仿生学设计、轻量化点阵结构、薄壁结构、梯度合金、复合材料等。它能以近净成形的方式来获得零件毛坯,在机床上进行小余量的切除就可以获得想要的零件,极大地减少了材料的浪费。同时可以通过拓扑优化、创成式设计实现以最少的材料达到最佳的性能<sup>[13-14]</sup>。

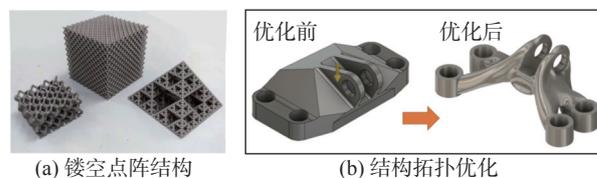


图 7 镂空点阵结构及拓扑优化

### 3 主要设备技术指标

3D 打印教学平台主要设备技术指标如表 1 和表 2 所示。

表 1 3D 打印及逆向扫描设备

	产品种类	厂家型号	台数
3D 打印机	塑料 3D 打印机	太尔时代 UP BOX	20
	树脂 3D 打印机	联泰 Lite 600	3
	树脂 3D 打印机(全彩)	赛纳 J401 Pro	1
	尼龙 3D 打印机	HP Jet Fusion 4200	1
	金属 3D 打印机	EOS M280	1
	蜡模 3D 打印机	Solid scape	2
	蜡模 3D 打印机	3D Systems Projet MJP 2500W	1
三维扫描仪	液态金属打印机	梦之墨 DP-1	3
	激光扫描仪	Creaform Handyscan 700	2
	激光扫描仪	Creaform Metrascan 750	1

表 2 扫描仪参数对比

	Handyscan 700	Metrascan 750-R/Elite
重量	0.85 kg	1.38 kg
尺寸	122 mm×77 mm×294 mm	289 mm×235 mm×296 mm
测量速率	480 000 次/s	480 000 次/s
扫描区域	275 mm×250 mm	275 mm×250 mm
光源	7 束激光十字线/(加额外 1 束)	7×7 条激光十字线(外加 1 条直线)
激光类别	2M(对人眼安全)	2M(对人眼安全)
分辨率	0.05 mm	0.05 mm
精确度	0.03 mm	0.03 mm
基准距	300 mm	300 mm
景深	250 mm	200 mm
部件尺寸范围(建议)	0.1~4 m	0.2~6 m
连接标准	1×USB 3.0	1×USB 3.0
操作温度范围	15~40 °C	5~40 °C
操作湿度范围(非冷凝)	10%~90%	10%~90%

### 4 建设成效

本教学平台整合了多种先进的 3D 打印技术,针对不同的专业和层次开设了多门定制的课程和教学单元,平均每年服务 1500 多名学生,选课学生遍及理工、人文社科、美院、医学、经管等多个专业。服务的课程主要包括传统工程实践类课程“机械制造实习”中的 3D 打印单元(4 学时)、“实验室科研探究”中的三维扫描单元(4 学时),通识教育类课程“制造工程体验”中的 3D 打印单

元(8 学时),以及专门讲授 3D 打印技术的课程“个性化 3D 设计与实现”和“3D 打印创意设计与制造”(各 32 学时)。通过这些课程的学习,学生在知识运用、能力培养和价值塑造 3 个层面都得到了很好的锻炼和培养。

#### 1) 知识运用

在现代设计思维模式的指导下,学生根据自身和社会需求,进行头脑风暴,形成创意,然后使用三维建模软件完成设计,再使用 3D 打印机进行快速原型制造,使设计和制造变得随心所欲。部分学生的优秀作品如图 8 所示。

#### 2) 能力培养

以“做中学、学中做”为基本教学理念,通过项目制的学习方式,让学生适应的信息化学习环境,充分利用各种条件和资源实现其作品。在这一过程中,学生除了要考虑作品的功能需求外,还要考虑作品的人机适用度、安全因素、外观艺术等工程文化因素,同时融入绿色设计、节能环保、法律意识等工程文化理念,使学生的自主学习能力、动手能力、团队协作和从大局观考虑问题的能力得到了很好的培养。通过对选课学生的问卷调查里可以看出,学生对所学知识和能力认可度很高,如图 9 所示。



图 8 部分学生优秀作品

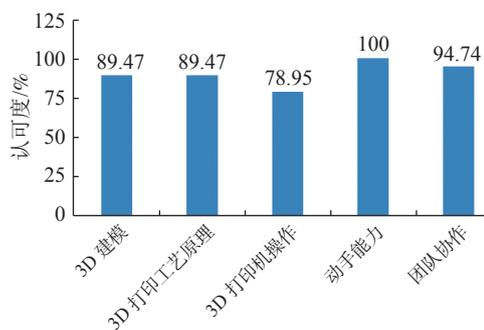


图 9 学生调查问卷反馈结果

### 3) 价值塑造

将“首创、开源、共享”的创客文化融入相关课程教学和科创活动中,充分利用平台丰富多样的教学资源,为学生提供定制化的服务,如学科竞赛、创新创业、专利申请及科技论文等。课程中涌现出的创意新颖、有技术含量的项目团队,鼓励参加相关赛事(如清华大学3D打印大赛、清华工匠大赛、中国好创意暨全国数字艺术设计大赛等)。通过课赛结合模式,提升了学生对项目的成就感和收获度。

## 5 结束语

3D打印技术在教学的创新应用中具有重要作用,它构建了知识与技能、理论与实践的桥梁,可增加学生动手机会和丰富教师的教学方式。基于3D打印技术的实践教学平台使得3D打印的独特优势成功地在教学中得到应用。通过整合平台丰富的资源,以及多层次课程体系的建设,学生的工程思维、创新能力、设计能力和自主学习能力都得到了很好的锻炼提高。这对培养面向未来的具有广度的理论知识和深度的3D打印应用知识的创新型高端人才有重要意义。

### 参考文献

- [1] 王磊,卢秉恒.我国增材制造技术与产业发展研究[J].中国工程科学,2022,24(4):202-211.
- [2] 卢秉恒.增材制造技术:现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
- [3] 万勇,黄健.国外增材制造发展政策与研究进展概述[J].新材料产业,2016(6):2-6.
- [4] 崔二娟,吴亚辉.新工科背景下3D打印课程教学改革与实践[J].实验科学与技术,2020,18(5):115-118.
- [5] 谭跃刚,陈章念,张帆,等.3D打印创新教学实验室及其应用[J].实验室研究与探索,2016,35(9):246-249.
- [6] 尚雯,谭跃刚,张帆,等.面向大学生创新教育的3D打印教学实验平台研究与应用[J].中国轻工教育,2016(3):73-76.
- [7] 李双寿.新时代新业态新工科工程训练教学体系创建[J].高等工程教育研究,2023(1):33-36.
- [8] 马运,汤彬,杜平,等.3D打印精密铸造在实践教学中的应用[J].铸造技术,2020,41(8):798-800.
- [9] 刘静.液态金属科技与工业的崛起:进展与机遇[J].中国工程科学,2020,22(5):93-103.
- [10] 刘静.液态金属:无尽的科学与技术前沿[J].科学,2022,74(2):14-18.
- [11] 高英,杜平,韦思健,等.液态金属柔性可穿戴发光服装设计 with 制作[J].电子元器件与信息技术,2022(10):41-45.
- [12] 杜平,张秀海,郭敏,等.3D打印课程线上远程教学探索[J].中国现代教育装备,2022(23):4-6.
- [13] 梁雄,杜平,朱丽君,等.面向增材制造的镂空点阵结构设计模块分析[J].制造技术与机床,2021(3):44-48.
- [14] 梁雄,杜平,朱丽君,等.面向增材制造的拓扑优化设计模块分析[J].制造技术与机床,2021(5):76-80.

编辑 钟晓