



基于 Python 的 3D 打印计算机辅助制造 实验教学

林志伟, 栾丛丛, 王郑拓, 马超虹

(浙江大学 机械工程学院, 杭州 310000)

摘要: 针对目前国内高校计算机辅助制造教学仍以商业软件应用技能培训为主的问题, 提出了基于 Python+3D Printing+CAM 路径规划的计算机辅助制造实验教学方案。以易学易用的 Python 语言为编程开发语言, 以操作简单安全的 3D 打印为数控加工应用对象, 指导学生自主开发一套小型实用的 3D 打印 CAM 系统, 实现 3D 打印路径规划的各环节算法, 包括模型切片、轮廓拼接、填充路径生成、支撑生成与优化、端面封闭、NC 代码生成等, 最后在 3D 打印机上对开发的 CAM 系统进行测试、完善。该方案具有一定的通识性, 适用于理工科各专业。

关键词: 计算机辅助制造; Python; 3D 打印; 路径规划; 教学改革

中图分类号: TH164

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20210537

Experimental Teaching of 3D Printing Computer-aided Manufacturing with Python

LIN Zhiwei, LUAN Congcong, WANG Zhengtuo, MA Chaohong

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the teaching of computer-aided manufacturing (CAM) in domestic colleges and universities still focuses on the training of commercial software application skills, this paper puts forward a reform scheme of practical teaching of CAM based on Python+3D Printing+CAM path planning. Taking the easy-to-learn and easy-to-use Python language as the programming language, and the simple and safe 3D printing as the application object of numerical control (NC) machining, this paper guides students to independently develop a set of small and practical 3D printing CAM package, realizing 3D printing path planning algorithms including model slicing, profile splicing, filling path generation, support generation and optimization, end face sealing, NC code generation, etc. Finally, the CAM system is tested and refined on the 3D printer. The teaching reform program has a certain degree of generality, which is suitable for all majors of science and engineering.

Key words: CAM; Python; 3D Printing; path planning; teaching reformation

工业软件是指应用于工业领域, 可提高工业研发设计、业务管理、生产调度和过程控制水平的相关软件和系统, 它将人类上百年积累的工业流程和知识以软件的形式进行封装和展示, 是当代工业制造的神经和大脑^[1]。目前, 工业软件仍是我国工业领域的“卡脖子”难题之一, 是我国从制造大国走向制造强国的最大短板^[2-3]。知识产权保护不足、核心技术羸弱以及人才严重缺位是制约我国工业软件发展的三大瓶颈。

作为制造领域工业软件的重要一环(如图 1 所

示), 计算机辅助制造是一门制造工程技术和计算机技术紧密结合、相互渗透而发展起来的综合性学科, 是计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)的后道工序, 其发展水平直接体现了一个国家的制造业现代化水平。广义的计算机辅助制造是指利用计算机手段完成产品从原材料到成品的整个生产制造过程; 而在学术或工业界, 计算机辅助制造一般特指刀具路径规划, 输入零件和工艺信息, 输出数控程序, 即 NC(numerical control)代码。

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2022-03-07

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E050027); 浙江省高校实验室工作研究项目(ZD202001)。

作者简介: 林志伟(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事计算机方面的研究。E-mail: zjzhylin1986@163.com

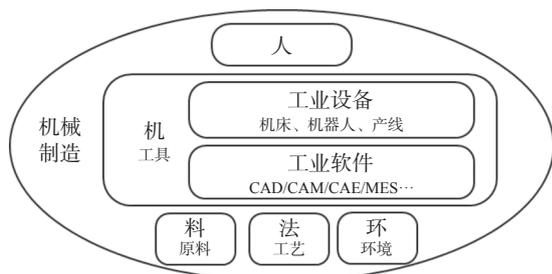


图1 CAM在工业软件及制造业中所处的位置

中国是一个制造业大国，也是一个CAM技术需求和应用大国。目前，我国CAM技术的发展尚处于起步阶段，常用的CAM软件大都从国外引进，核心技术受制于人。培养CAM软件创新型研发人才，开发自主可控的CAM软件，补齐我国工业软件短板，是十四五期间的重要任务之一。

1 CAM教学现状与存在的问题

高校是培养计算机辅助制造应用和研发方面人才的摇篮。目前，国内各大高校的机械类专业都已将计算机辅助制造课程纳入培养计划，将其设置为专业必修或选修课程，并对其开展了教学研究。如文献[4]提出了基于熔融沉积成型(FDM)的级进模CAD/CAM综合教学实验方案，首先进行级进模CAD设计，然后将数字模型导入CAM软件Simplify 3D进行切片，最后在3D打印机上打印零件。文献[5]构建了模具CAD/CAE/CAM一体化实验教学体系，加强了模具CAD、CAE、CAM三者之间知识的衔接，实现了真正意义上的设计性、综合性、创新性，在实际教学应用中取得了良好的效果。

此外，文献[6]以鼠标和手机零部件为例探索了CAD/CAM综合性训练方法，内容包括概念设计、CAD造型、工艺规划、CAM编程等。文献[7]利用CEREC 3D CAD/CAM系统，采用PBL教学法，使学生掌握CAD/CAM系统相关知识。文献[8]介绍了基于Web的CAD/CAM教学系统与加工仿真系统的设计方法和主要功能。文献[9]利用电脑雕刻机的易学、易用、经济、实用等特点，提出了基于电脑雕刻机的CAM实验教学方法。文献[10]基于企业实际产品开发过程，提出CAD/CAE/CAM综合训练目标和实施流程，采用综合训练成果公开展示和答辩的考核方式，进行成果等级评价。文献[11]探索了CAD/CAM多情境教学模式，通过合理创设教学情境，使学生沉浸式地对

典型工程实例进行学习，并在实践环节中完成对关键知识的深耕和对核心技术的掌握。

综上，目前国内高校机械类专业CAM教育课程体系及配套教材大致涵盖CAM基础概念讲解、机械零件CAD建模、商业CAM软件应用、数控工艺训练与加工实践等内容^[12-16]，极少涉及CAM技术核心层面内容(即刀具路径规划算法实现)，学生知其然，而不知其所以然。当前国内高校在CAM教学方面的不足之处在于过分侧重工程实践和应用技能培训，无法满足国内对机械人才，特别是CAM软件研发方面人才的培养需求，从而导致我国CAM人才短缺，制约我国工业软件的发展。

培养CAM软件创新型人才的关键：一是拓展CAM教学内容和模式，从单一的以商业CAM软件应用为主的教学模式向CAM软件应用+CAM路径规划算法实验教学模式拓展；二是拓宽CAM受教育人群，面向机械、计算机、控制乃至所有理工科专业开设CAM通识教育课，只有增加受教育人群基数，人才才能脱颖而出。

为此，本文拟开展计算机辅助制造实验教学改革探索和研究。以语法简单、易学易用的Python语言为编程工具，结合3D打印这一当下热门、方便、安全的数控加工应用，面向机械类专业高年级本科生开展Python+3D Printing+CAM路径规划实验教学，包括模型切片、轮廓拼接、填充路径生成与优化、支撑生成与优化、端面封闭、NC代码生成等核心算法，最后在3D打印机上对CAM系统进行验证和改进。学生通过该课程学习和实践，可加深对CAM概念的理解，掌握路径规划基础算法，同时练习Python编程语言和3D打印机操作方法。

2 CAM路径规划教学方案设计

2.1 应用对象选择

CAM是衔接CAD和数控加工的桥梁，其本质是根据输入的模型，在工艺参数的约束下，利用数学和图形学的基本方法，在工件上规划合理加工路径。无论是传统的以切削、铣削为代表的减材制造，还是近年来新兴的以3D打印为代表的增材制造，都需要CAM技术支持，且涉及的路径规划原理大同小异。减材制造设备昂贵，且操作及加工过程存在一定的危险性；而FDM桌面式3D打印操作简单、方便，安全可靠，无需专人指

导, 成本更为低廉, 受众面更广。为降低路径规划算法验证难度, 本研究选用 FDM 3D 打印为 CAM 路径规划算法应用对象。

2.2 编程语言选择

CAM 路径规划算法实现依赖计算机编程。考虑到 CAM 路径规划是一项计算密集型任务, 需要消耗大量计算资源, 因此执行效率较高的 C/C++ 语言是 CAM 路径规划的最佳实现语言。但 C/C++ 语法复杂, 语言本身学习和使用难度较大, 需要耗费大量时间精力。Python 语言具有语法简单、容易上手、免费开源等特点。为降低课程编程难度, 提高学生学习和自信心, 本研究选用 Python 语言作为 CAM 路径规划算法的编程实现语言。

Python 语言易学易用, 大部分学生只要掌握基础数学知识便可开始本课程学习, 因此该课程具有一定通识性, 可推广至其他理工科专业。此外, Python 接近伪代码的语言风格可以方便教师以直观的方式展示 CAM 算法原理和流程, 同时这种展示方式是直接可执行的, 所见即所得。

2.3 教学内容规划

面向 3D 打印的 CAM 路径规划主要包含模型切片、填充路径生成、支撑生成、NC 代码生成等核心流程, 如图 2 所示。其中切片算法是 3D 打印 CAM 核心算法之一, 作用是将三维模型简化为二维轮廓数据。对每层切片轮廓, 需要在其内部规划填充路径以驱动打印机喷头运动, 填充材料。填充路径的形式和参数设置直接影响打印效率和质量。对包含悬臂结构的三维模型, 需要在其下方添加支撑结构, 否则打印过程中悬臂结构容易坍塌, 导致打印失败。

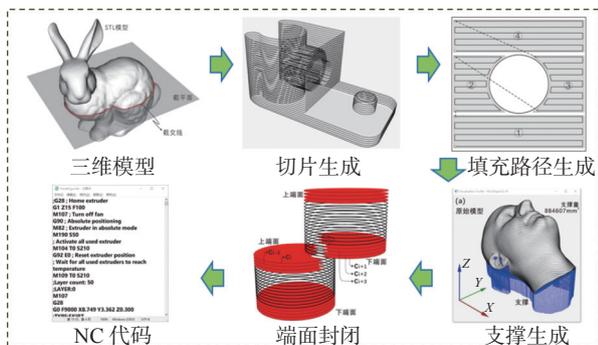


图 2 CAM 路径规划实验课程任务

通过对上述 3D 打印 CAM 核心流程地进一步展开、细化和梳理, 构建 3D 打印 CAM 实验教学三大模块, 即基础模块、进阶模块和提高模块, 如图 3 所示。

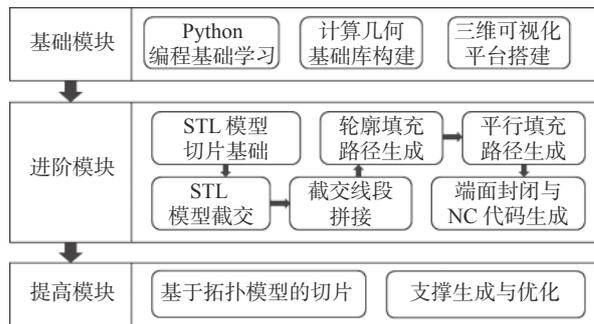


图 3 CAM 路径规划实验课程内容

2.3.1 基础模块

基础模块的作用是帮助学生奠定进一步学习的基础, 主要任务包括 Python 编程基础学习、计算几何基础库构建以及三维可视化平台搭建。

1) Python 编程基础学习。Python 在课程中的定位是一种实现 CAM 算法的工具, 它具有语法简单、上手容易的特点。考虑到大部分理工科学生在大一、大二阶段已学习过 C 语言(或其他编程语言), 具有一定的编程基础和编程思维, 因此本课程只需用少量课时介绍 Python 语法即可, 包括列表、字典等数据结构, 流程控制(选择、循环), 以及模块封装等。

2) 计算几何基础库构建。CAM 路径规划的本质是利用代数、几何以及计算机图形学的基本理论和方法, 对三维模型进行几何操作, 生成合理加工路径。因此, 构建一个简单实用的计算几何库是实现复杂路径规划算法的第一步。计算几何基础库包含点、线、面、向量、矩阵等基础几何元素, 平移、缩放、旋转等基础几何变换方法, 以及求交、求距、包含关系等基础几何算法。基础几何库使用 Python 语言编程实现, 其中点、向量、矩阵使用齐次坐标表示。

3) 三维可视化平台搭建。CAM 算法的设计开发过程是一个不断试错、完善的过程, 在开发过程中, 学生最好能够实时查看算法运行的三维可视化结果, 以判断算法成败或优劣, 做出相应改进。可用于几何可视化的软件库很多, 如 OpenGL、DirectX、OpenCasCade 等, 为方便 Python 语言调用, 本课程选用 VTK 为几何可视化平台, 在介绍 VTK 可视化流程的基础上, 使用面向对象编程思想对 VTK 进一步封装, 方便后续使用。

2.3.2 进阶模块

进阶模块是 3D 打印 CAM 实验教学的主体部分, 讲授如何根据输入的三维模型生成打印路

径, 主要任务包括 STL 模型切片基础、STL 模型截交、截交线段拼接、轮廓填充路径生成、平行填充路径生成以及端面封闭与 NC 代码生成。

1) STL 模型切片基础。STL 模型是由一系列三角面片按“边对边、点对点”的规则拼接围成的封闭三维模型, 是 3D 打印模型的事实标准。这部分主要介绍 STL 模型数据格式, 为方便学生快速入门, 使用简单的暴力算法(brute force)实现 STL 模型截交计算, 即使用一系列高度指定的平行平面截交 STL 模型中的每个三角面片, 在此基础上, 使用暴力算法对得到的散乱截交线段进行拼接, 在每层切片上生成封闭轮廓, 并对轮廓的顺逆时针方向进行调整。

2) STL 模型截交。考虑到使用暴力算法截交计算效率不高, 该部分介绍两种高效的 STL 模型切片截交优化算法, 即扫描平面法和层高匹配法。其中扫描平面法首先对三角面片由下至上进行排序, 并利用增量求交的思想加速截交速度; 而层高匹配法则利用二分法思想将层高值分配给各个三角面片, 从而加速截交速度。利用以上两种方法, 可大幅提高 STL 模型的截交计算效率。

3) 截交线段拼接。STL 模型中面片存储的无序特性直接导致了截交线段的无序性。截交线段拼接的目的就是将每层切片上散乱无序的线段根据首尾相接的原理拼接成若干封闭轮廓。该部分介绍了两种高效的散乱线段拼接优化算法, 即基于字典序排序的拼接算法和基于字典查询法的拼接算法, 两种算法使用相同的顶点数据结构(链结点), 从不同角度将拼接算法的效率从平方量级提升至线性量级。

4) 轮廓填充路径生成。3D 打印过程就是在每层切片轮廓内部填充打印材料, 因此需要事先生成填充路径。目前 3D 打印广泛使用的填充路径有两种: 轮廓填充路径和平行填充路径。其中轮廓填充路径基于切片轮廓等距偏置生成, 因此, 平面轮廓的等距偏置算法至关重要。这部分内容首先介绍平面轮廓等距偏置的基本原理, 在此基础上引入第三方库解决偏置问题, 同时介绍不同层级轮廓路径的连接问题。

5) 平行填充路径生成。为提高打印效率, 同时保证打印精度, 在实际 3D 打印中, 一般在轮廓外围填充轮廓路径, 而在其内部填充平行路径, 如图 4 所示。平行填充路径的生成原理是在填充

区域内部裁剪一组等距平行线。这部分内容首先介绍一种高效的基于扫描线法的平行路径生成算法, 然后对填充区域进行分区, 并对各部分平行路径按“之”字形(zig-zag)连接。

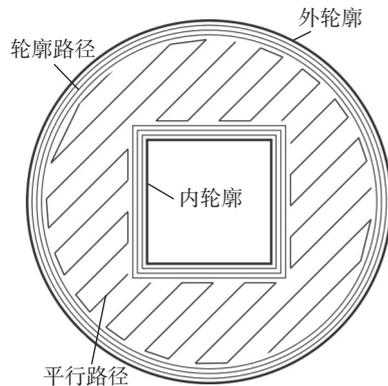


图 4 由轮廓路径和平行路径组成的混合填充路径

6) 端面封闭与 NC 代码生成。在 3D 打印中, 对模型上的端面(如上、下端面), 必须采用密实填充方式, 保证模型表面封闭。该部分内容主要介绍基于切片轮廓数据的模型端面识别方法, 在此基础上, 结合常用 FDM 3D 打印工艺, 生成可直接驱动打印机的 NC 代码。

2.3.3 提高模块

提高模块是为对 3D 打印 CAM 路径规划非常感兴趣, 同时又学有余力的同学准备的深入学习模块, 主要任务包括基于拓扑模型的切片和支撑生成与优化两个部分。

1) 基于拓扑模型的切片。为补充上述进阶模块中的“STL 模型截交”和“截交线段拼接”算法, 这部分内容考虑使用半边数据结构, 首先将普通的 STL 模型转化为拓扑模型, 建立模型中顶点、棱边、面片的相互索引关系。在此基础上, 从当前种子面片出发, 利用追踪法, 不断索引与当前截平面相交的三角面片并计算截交线段。基于拓扑的切片方法将面片截交和线段拼接两个过程融为一体, 相对规模更大的模型, 具有更高的切片效率。

2) 支撑生成与优化。在 3D 打印中, 对尺度相对较大的悬臂结构, 一般需要在其下方添加支撑材料, 以免工件坍塌而导致打印失败。为此, 需要首先对三维模型进行分析, 找出模型上需要添加支撑的空间区域。这部分内容介绍支撑区域的识别方法, 在此基础上, 使用平面布尔运算获得切片的上支撑区域并在其内部规划支撑路径。

考虑到模型需要的支撑量多少和模型摆放角度直接相关, 这部分内容还将介绍基于粒子群算法的支撑量优化方法。

2.4 教学组织形式

2.4.1 课程目标

CAM 路径规划是一门实践性极强的课程, 为加深学生理解, 培养学生实践能力、自主研发能力及创新能力, 制定如下课程目标: 指导学生运用所学的代数、几何等数学理论, 结合机械制造、数控加工、计算机编程等技术, 针对 3D 打印等数控应用对象, 研究路径规划关键算法, 独立开发一套小型使用的 CAM 系统, 最后在 3D 打印机上对 CAM 系统及生成的路径进行加工验证和修改完善。

2.4.2 课时安排

一方面, CAM 路径规划实践教学是一项系统工程, 完成以上介绍的全部教学内容需要消耗较多课时; 另一方面, 考虑到该课程教学不需要专门仪器、设备, 学生仅需电脑便能完成大部分编程实践, 而这部分工作可作为课后作业让学生在课后完成, 因此, 该课程总课时具有较大伸缩量。总体而言, 开设 CAM 路径规划实践课程总课时数应不少于 32 课时, 以 64 课时为最佳。

以 64 课时为例, 除去 Python 学习、计算几何基础库构建、CAM 路径规划算法实践等教学内容之外, 另可安排 8 个学时引导学生对 3D 打印路径规划领域的开放性问题(如模型抽壳、模型排样、轻量化打印等)进行探索研究, 此外可安排 4 个学时对自己生成的 NC 代码进行 3D 打印实践, 最后可安排 4 个学时举行期末答辩会。

2.4.3 课堂教学

CAM 路径规划课堂教学主要包括学生跟随实践和学生自主实践两种形式。

1) 跟随实践。以计算几何这一通用基础库构建为例, 教师端使用多媒体方式将讲台电脑屏幕投射到学生端, 一边使用 Python 语言上手编写 Point、Vector、Matrix(即点、向量、矩阵)等几何基础类型, 实现相应函数, 一边介绍其中包含的数学原理, 如向量点乘、叉乘原理等; 学生跟随教师节奏实现编写相应代码。

2) 自主实践。以 STL 模型切片为例, 在教师使用 PPT 讲解了 STL 切片原理之后, 引导学生自主设计相应数据结构、流程及算法, 编写程序代码, 实现 STL 模型切片。鼓励学生以 2~3 人为一

小组组队, 合作完成老师布置任务, 以提高课堂效率, 同时培养学生团结协作能力。

3 课程特色分析

1) 趣味性。本课程基于热门的 Python 编程语言, 结合有趣好玩的 3D 打印应用, 深入浅出地介绍并实现 3D 打印路径规划方法, 具有较强的趣味性。

2) 系统性。本课程从搭建基础计算几何库及三维几何实体可视化平台着手, 涵盖 3D 打印路径规划涉及的模型截交、截交线段拼接、模型拓扑切片、轮廓路径生成、方向路径生成、填充方向优化、打印支撑生成、打印支撑优化、模型端面识别及 NC 代码生成等各环节, 介绍了一系列通用、简洁、高效的规划算法。

3) 基础性。本课程涵盖计算几何中点、向量、矩阵等基础类型的构建以及空间几何实体相交、包含等关系的判断方法, 扫描平面快速截交算法, 半边结构及基于拓扑模型的追踪切片方法, 平面曲线偏置算法, 平面区域布尔运算等。

4) 科学性。本课程介绍了一系列高效、稳定、实用的路径规划算法, 如基于层高匹配的 STL 模型快速截交算法、基于字典查询法的截交线段快速拼接算法、平面曲线包含关系快速确定方法、平面区域分区方法、填充方向优化方法、基于改进粒子群算法的打印支撑量优化方法。

5) 拓展性。本课程涉及的相关路径规划算法具有一定的拓展性, 只要稍加改进, 便能推广至数控车铣削路径规划、工业机器人路径规划、激光加工路径规划以及其他通用路径规划应用(如扫地机器人路径规划、AGV 路径规划等), 如图 5 所示。

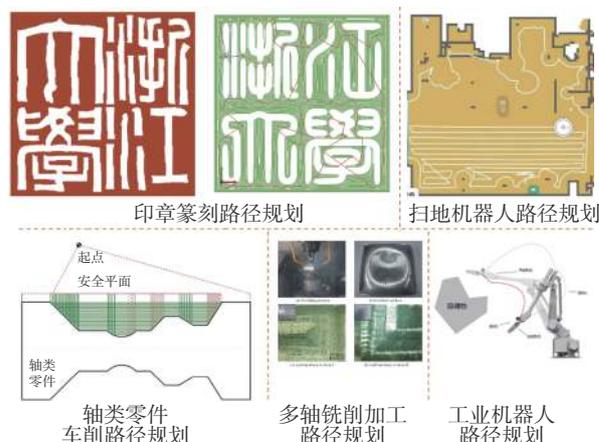


图 5 课程 CAM 路径规划拓展应用

4 实施案例

2019年,浙江大学机械工程学院对本科专业进行了调整,将原机械工程、机电工程、工业工程3个专业合并为一个机械工程专业。在新的培养方案中,开设面向大四本科学生的机电系统综合实验课程,在该课程中,又分设制造、机电、工业管理等模块化实验课程,每位学生选做其中1~2个模块实验,完成共计64课时的实验。

其中针对制造模块,已开设64课时的CAM路径规划实验课程。该课程使用自编教材《计算机辅助制造实践——Python实现三维打印路径规划》^[17],指导学生使用Python语言,从零开始搭建一个用于3D打印的CAM系统,并为此专门建设多媒体互动智慧实验室,方便老师学生在课上互动展示。该实验课程每年受益学生人数约100人。

5 结束语

以CAD/CAM为代表的工业软件是十四五期间我国需要重点补齐的短板之一。为加强我国在CAM方面的创新研发能力,人才培养是关键。但目前国内高校的CAM教育仍以应用技能培训为主,无法满足我国对CAM软件人才的培养需求。本文介绍了目前浙江大学机械工程学院正在实践的基于Python+3D Printing+CAM的计算机辅助制造教学改革,以简单安全的3D打印为数控应用对象,以易学易用的Python为编程实现语言,将包含模型切片、填充路径生成、支撑生成、NC代码生成等内容的CAM路径规划实践融入课堂教学,指导学生针对输入的三维模型,设计相应算法,输出NC代码,最后在3D打印机上验证完善。

考虑到本文介绍的CAM路径规划实践课程具有一定的基础性和通识性,包含Python、3D打印、CAM算法等时下热门元素,该课程同样适用于理工科其他专业,特别是计算机、控制、机器人、电气等专业。

参考文献

[1] 隆云滔,黄婷婷,罗训. 国产工业软件如何突围[J]. 小

康, 2021(4): 22-23.

- [2] 郭琦. 工业软件:“制造强国”的最大短板[J]. 中国中小企业, 2019(11): 70-71.
- [3] 赵飞宇. 云架构CAD软件及其关键技术与应用综述[EB/OL]. [2021-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210421.1702.031.html>.
- [4] 俞彦勤,刘辉,樊自田. 级进模CAD/CAM综合教学实验探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 156-159.
- [5] 俞彦勤,刘辉,邹佳鹏. 模具CAD/CAE/CAM一体化教学实验研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3): 210-213.
- [6] 胡义刚,沈永刚. CAD/CAM综合性训练的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(6): 131-134.
- [7] 吴丹,李苏伶,周雯雯. CAD/CAM系统引入口腔修复实验教学中的方法和效果评价[J]. 中华医学教育探索杂志, 2011, 10(11): 1401-1403.
- [8] 周虹. 基于Web的CAD/CAM教学与加工仿真系统[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(1): 75-77.
- [9] 陈胜,章海,李静敏. 雕刻机在CAM实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(4): 65-67.
- [10] 夏红梅,甄文斌,王红军,等. 基于企业产品开发过程的“机械CAD/CAE/CAM综合训练”方法研究[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(9): 183-186.
- [11] 于源,于洪杰,汪晓男,等. 计算机辅助设计与制造多情境教学模式探索[J]. 教书育人, 2020(5): 96-98.
- [12] 曹建树,王殿君,代峰燕,等. 应用型本科“CAD/CAM”课程的教学改革与实践[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 105-107.
- [13] 王其兵,文西芹,王智明,等. CAD/CAM工程实践教学研究[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(4): 146-148.
- [14] 王宏. CAD/CAM/CNC三位一体合成系统的研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(2): 54-56.
- [15] 蒙艳玫,张书涛,卢福宁. CAD/CAM/CNC综合实验教学平台的研究与开发[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(11): 86-88.
- [16] 刘洪波. 应用三维CAD/CAM软件训练学生工程设计能力[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(6): 94-96.
- [17] 林志伟,傅建中. 计算机辅助制造实践——Python实现三维打印路径规划[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 2021.

编辑 张莉