

工程图学内涵的变化与发展

于海燕¹, 彭正洪², 何援军³, 王生泽¹

- (1. 东华大学机械工程学院, 上海 201620;
2. 武汉大学城市设计学院, 湖北 武汉 430072;
3. 上海交通大学计算机系, 上海 200240)

摘 要: 工程图学是研究工程图样表达与技术交流的一门学科。图形计算及数字化制造等技术的飞快发展, 正在改变着工程图的呈现介质、应用范围、交流主体、甚至工程图本身的定义。这些变化正在刷新着工程图学的内涵, 同时, 也正在重塑人们对工程表达与交流的认知。为此, 本文力图挖掘工程图学在变化中的共性基础理论, 分析其变化中的发展规律与趋势, 并讨论数字化制造背景下的工程图学的发展定位以及与发展相适应的工程图学知识体系。最后给出与此相适应的教学定位、教材规划以及教学模式。

关 键 词: 工程图; 工程图学; 内涵; 画法几何

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2018050990

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2018)05-0990-06

Changing and Developing of Connotation on Engineering Graphics

YU Haiyan¹, PENG Zhenghong², HE Yuanjun³, WANG Shengze¹

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China;

3. Department of Computer Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Engineering graphics is a discipline for technological expression and communication with engineering drawings. The rapid development of graphics computing as well as digital manufacturing has been changing engineering graphics for its present medium, application scope, communicating objects and even the definition of engineering drawing. These tremendous changes are refreshing the connotation of engineering graphics and at the same time are remodeling our conception of engineering representation and communication. This paper will try to discover common fundamental theory and analyze regularity and trend in the changing complex. The development orientation of engineering graphics is discussed and a knowledge system is constructed in line with digital manufacturing. Finally, suggestions for education orientation, series textbook planning and teaching pattern for engineering graphics are proposed.

Keywords: engineering drawings; engineering graphics; connotation; descriptive geometry

在国家标准《学科分类与代码》, 工程图学为“工程与技术科学基础学科”下的二级学科^[1]。在普通高校工程图学课程教学基本要求中, 也明确指出: 工程图学是研究工程图样表达与技术交流的

一门学科; 与工程图学学科相对应的是工程图学课程, 是普通高校本科工科专业重要的工程基础课程。

随着图学学科以及工程技术的发展, 工程图学

收稿日期: 2018-01-18; 定稿日期: 2018-03-23

基金项目: 中国科学技术协会《大数据背景下“大图学”学科体系建设研讨会》项目(2017XSHY006)

第一作者: 于海燕(1974-), 女, 黑龙江海林人, 副教授, 博士。主要研究方向为 CAD/CG。E-mail: yuhy@dhu.edu.cn

也在经历巨大变化。在成图介质方面,由原来的图纸变为计算机图形显示,由二维平面表达向三维实体模型构造变化。在应用对象方面,表达对象的尺度和复杂度都在变化,面向全生命周期的三维数字化产品设计、3D打印、基于图像的建模等理念与技术,正在快速地重塑和刷新研究者与普通用户对工程表达的认知。已有或将有的变化主要呈现有:

(1) 参与工程交流的对象发生变化。计算机的介入不仅改变了原先的制图工具,也改变了参与工程。传统的工程图,参与交流的对象是工程技术人员;在设计、分析、加工过程中需要人的思维与计算机图形软件者两个终端的直接连接,需要以人机交流为对象;甚至需要以计算机内部间的机-机为交流对象。

(2) 工程图的含义发生变化。针对不同的交流对象,工程图表达与交流的目的和方式必然需要改变。因此,工程图的含义或定义也需随之更新。这不仅仅是二维工程图与三维工程图的简单区分。

(3) 制图标准与规范发生变化。工程几何表达、加工方式与加工要求等的变化,必将导致制图规范与标准的变化。

本文将沿着工程几何的脉络,着重分析工程图学万变不离其宗的理论基础;循着工程表达与交流变化的规律,重点讨论数字化制造背景下,工程图学的发展与定位问题。旨在抛砖引玉,在图学学科建设背景下,为工程图学的发展与学科建设的深入讨论与研究提供一些参考。

1 工程图的发展

如果将自然景象、虚拟景物以及与计算机模型等统称为“形”,那么,不论是拍摄的照片、视频还是计算机生成的图形、图像,都是“形”在某一特殊画面上的展现。形是三维的;图是形在某种介质上的投影与映射,是二维的。因此,二维图形是客观存在的,不会消失或被取代。传统的二维工程图,将来则有可能被其他表达方式改变或取代。

中国图学学会在中国科协的支持下,于2014年发布《2012-2013图学学科发展报告》,首次提出了构建图学学科,并给出了图学的定义:图学是以图为核心、研究将形演绎到图,由图构造形的过程中图的表达、产生、处理与传播的理论及其应用的科学^[2]。

工程图学是图学学科的重要分支,是工程图的理论基础。参照图学的定义,在图学学科体下,工程图学的定义可扩展为:以工程图为核心,研究将工程中的形演绎到工程图,再由工程图构造工程形的过程中图的表达、产生、处理与传播的理论、技术及其应用的学科。

与工程图学及工程应用相对应,工程图的内涵与外延也在扩展。数字化设计制造背景下,三维几何模型信息贯穿产品的全生命周期,并在不同环节加注相应的工程标注或进行适当模型转换以满足当前生产环节需要。因此,工程图的内涵不应局限于二维图纸。参与工程交流的对象不仅仅是工程技术人员,可以扩展到人-机或机-机间的几何或物理模型间的交流。随着图形技术、数字化制造技术以及与之相适应的表达标准的完善,二维工程图将来可能会被其他表达方式改变或取代。目前,不应拘泥或执着于二维、三维表达或是将来可能出现的新的表达形式,可以根据表达对象及生产环节需求,结合现有技术规范,设计单一或多种表达形式结合的工程表达形式。

2 工程图学的发展

2.1 理论基础的发展

在计算机出现以前,图的产生主要依赖于手工绘制。工程图学的理论基础是画法几何学^[3-5],其是几何学的一个分支,源于工程实际,蒙日将其总结提炼为一门学科,有效解决了当时战争中工程修建问题。画法几何主要应用正投影及各种投影变换方法,采用多个视图(常用的为两投影面体系与三投影面体系),在图纸上表达、求解空间几何问题。此外,斜投影以及中心投影也是画法几何学的内容之一。

随着计算机科学与技术的快速发展,图的绘制方式发生巨大的变化。计算机绘图、造型、建模等的相关理论与方法丰富了图学学科的内容,出现了计算机图形学、数字图像处理等学科。工程表达与图形生成技术不断推出,并在工程上得到应用。在掌握计算机制图、造型技术的同时,相关的计算机图形/图像学相关理论,如计算机中几何的表达与组成原理、三维模型的建立原理、基于草图或图像的建模等,是否应该作为工程图学的理论基础,以及传统与现代的理论基础的关系与结合问题,都值得探讨。

2.1.1 共性理论基础——几何构造层次关系与投影对应关系

画法几何学对工程几何的逐层构造以及基于投影的2D/3D对应原理，也同样是计算机三维建模的理论基础。图1给出了计算机中构造工程几何以及几何化思路求解几何问题的原理。可以看出，与工程图学传统理论基础一样，计算机构造工程几何的主要原理也是由点、线、面、体逐层构造出各种工程几何。三维建模中常用的拉伸、旋转、放样、扫描等也是在二维平面图基础上获得三维特征。计算机建模中，也需要对三维形体进行分析，将复杂形体分解为若干简单形体后，分析构造特征及对应的平面几何的特点、形状和大小。没有较强的形体分析以及基于投影的空间与平面的对应能力，即使对照实物，也很难正确构建出复杂的工程几何形体。

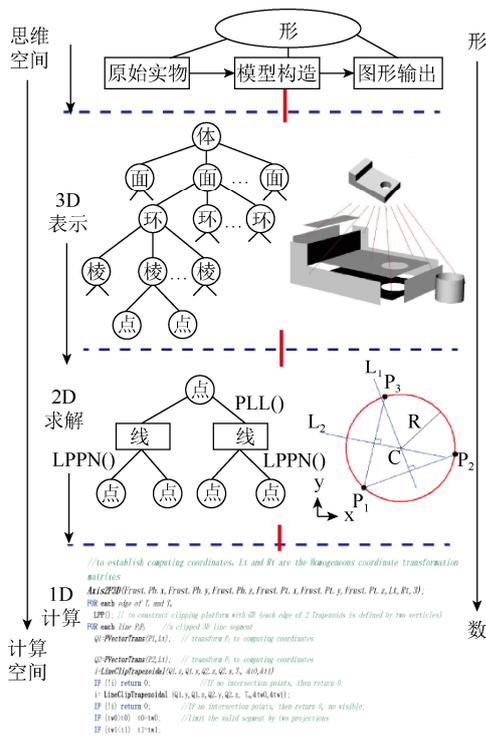


图1 计算机中构造工程几何及几何化求解原理

2.1.2 共性技术基础——基本几何问题的求解

工程几何大都由直线段、圆弧、曲线等基本几何通过各种关系构造。在二维制图(二维工程图或三维建模中的平面草图)中，都需要熟悉基本几何求解原理。例如，已知圆上的三点或已知圆心和半径都可以确定一个圆，已知两个圆弧和切圆半径，可以求出切圆圆心，尺寸标注的合理性也是如此。文献[6]根据几何求解原理，总结归纳了各种常用几何元的尺寸标注方法，既可指导手工绘图也是计算机

实现智能标注的重要参考。

制图工具的改变(如尺规、CAD软件中的一个图标或其他工具)，影响制图的繁易程度，但对几何图形分析的要求是一致的。如果找不出或不能给出充分的已知条件，很难得到预期的几何图与拓扑结构。但是，三维建模对二维图绘制要求更高，要满足参数化后拓扑关系不变，制图顺序和过程都要严格满足几何要求。因此，基本几何问题的求解原理，是制图中的不变性技术基础。

2.1.3 共性规范标准基础——工程信息的完备表达方法

工程图学，除了需要准确无歧义表达工程几何信息外，还要表达各种与加工制造等有关的技术要求信息，如尺寸公差、几何公差、表面结构以及各种常见工艺结构、特殊表示法等。现有制图规范标准已经做了很好地提炼总结和表述，为三维或将来其他表达提供了很好的基础。可以在研究现有标准原理基础上，针对新的表达方法改进。例如，三维标注，也同样需要无歧义地表达出以上各种工程信息；3D打印产品的误差检测与传统加工方式不同，在研究检测方式的同时，也可参照研究对应的技术要求的标注形式。因此，工程信息的完备表达方法，是变化中的工程图学制定规范标准的不变基础。

2.2 教学发展

美国从20世纪80年代末期在国家自然科学基金(national science foundation, NFS)资助下研究有关工程图学的教学改革问题^[7-9]。其主要工科院校早在90年代初就提出了与信息社会相适应的现代工程图学体系，将工程图学、设计学、计算机图学融为一体。近年，在工程回归背景下，美国一些高校将工程图学定位为设计表达的工具，不单独开设工程图学课程，仅在用到时讲解相关内容，在实践中学习；还有一些学校将之归为“图学交流(graphics communication)”，系统介绍各种图的投影与表达原理和技术^[10-12]。欧洲一些高校则单独开设《画法几何》课程，注重理论基础的教學与研究^[13]。

在课程设置上，有些高校将工程图学由一门课程扩展为系列课程，并与数学计算、计算机图形原理以及数字化设计课程相互衔接，形成以工程应用为主线、理论与实践并重的工科本科课程体系。例如，斯坦福大学开设的与工程图学直接相关的系列课程有：Engineering Drawing and Design(包括学习三维软件SolidWorks)、Design Sketching、Computer-Aided Product Creation、

Computer Integrated architecture/Engineering/Construction (A/E/C)等;数学及计算机软件基础相关课程有: Partial Differential Equations in Engineering、Mathematical Foundations of Computing、Programming Methodology for engineering、Computer Graphics、Computational Imaging and Display等;数字化设计相关课程有: Digital Design Principles and Applications、Modeling and Advanced Concepts等。

国内,工程图学的改革包括传统的工程制图课程和计算机二维绘图、三维建模等课程群,也有高校将其整合,形成所谓的“现代工程图学”或“3D工程图学”等。对制图技术或教学体系的讨论较多,并主要集中在三维建模技术与二维制图技术的地位与关系上^[14]。一方面,现有对课程(群)改革的系统性研究不够深入,定位不够清晰。另一方面,各高校大都削减原有课时,同时需要加强工程实践能力。因此,工程图学的理论基础内容相对削减较多,应用性远多于理论性,甚至成为几乎没有理论的“工具课”,影响整个学科的良好发展。

2.3 应用需求的发展

在工业4.0背景下,制造业正在经历变革。我国先进制造领域十三五纲要中,要求推进数字化与智能化制造进程^[15-16]。国内大型企业,已经启动从数字化设计、制造、装配、工程管理等全生命周期的数字化制造工程。产品表达的方法、技术手段以及与此衔接的设计、加工制造方式都在经历变革。数字化产品的定义与表达,不再仅仅是工程设计结果的呈现,而是全生命生产周期数字化的源头与载体。在新的社会需求和科技进步的推动下,作为专业基础核心课程与设计载体的工程图学学科应承担起新的挑战与使命。

传统的工程图学主要侧重于对工程对象的几何与工程信息的完备表达,经历了手工绘图、二维计算机绘图、三维实体建模等3个阶段。现有大型三维设计软件由于历史原因,已经很难满足面向全生命周期的数字化制造与智能设计要求,国内外大型企业均开始重视软件平台研发的投入,拓展新的功能模块或研发新的支撑平台^[17-18]。此外,在工程设计需求与图形处理与计算技术发展的双重推动下,国际上已经着手设计面向智能设计的新一代CAD引擎系统^[17],并已组建跨国研究团队,重新开发CAD系统的基础计算算法^[18]。新一代CAD将综合各种先进技术与手段,解决目前商业CAD软件与后

续环节的集成、模型转换以及稳定性与计算速度问题,并以支持智能设计为核心,使设计手段更简捷。

随着三维表达、虚拟装配以及CAD软件等技术和工具的智能化改进,表面上,工程图学的门槛似乎在不断降低。实质上,却是对工程图学的要求在不断提高,蕴含着巨大挑战。现阶段对工程图学新的要求分析如下:

(1) 产品复杂度增加、生产周期缩短、精度要求提高,需要调度各种手段、媒介、载体和计算等技术(纸、电脑、网络、大数据处理、增强现实、普世计算等)增进工程技术人员间的交流,并打通人-机甚至机-机的交流通道。

(2) 工业生产的分工越来越细,通用CAD软件很难满足要求,需要研发适应本单位的产品结构和工艺等的专业模块或软件系统,而这需要兼具工程图学与计算机软件能力的人才。

(3) 工程设计表达的维度层次不断扩展,从零件图、装配图到流水线、数字化工厂等,需要根据不同工程交流目标对其进行工程表达设计,这些都需要专门的知识和技术。

3 应对策略

3.1 学科定位

从工程图学的内涵与外延分析来看,对工程图学的要求在改变和提高。在图学学科体系下,需要从理论、技术、标准、应用等4个层面,构建工程图学完整的知识体系,完善二级学科。

(1) 理论层面。以画法几何学的投影法为基础,掌握点、线、面、体的表示与逐级构造原理;掌握基本几何问题的求解原理。提炼画法几何、计算机图形学、工程几何中几何元表示、求解、构造和表达的共性理论。

(2) 技术层面。梳理尺规作图原理,结合计算机几何构造特点,提炼共性技术,给出现有制图技术特点与规律。例如,通过三角板、圆规、丁字尺的组合可以绘制出各种工程图纸,这种用极少的工具组合实现复杂功能的手工构图的原理在计算机制图中也有应用,也是智能CAD技术的发展目标之一。此外,形体分析也是制图的共性技术基础。在计算机建模中,更要强调形体分析与图形分析。了解其原理与规律不但可以提高制图效率,还可培养构型能力,对新的工具也将有更好的适应性。

(3) 标准层面。二维制图标准可以完备简捷地表达各种传统的设计、加工等工程信息，以此为基础，提炼工程表达所需的几何图形与物理符号表示规律，完善三维表达的规范和标准，如面向加工的三维建模、公差标注与传递等规范标准。

(4) 应用层面。在以上共性理论、技术及标准基础上，根据不同工程应用对象特点，构建出若干应用分支，给出其特有的应用技术与标准规范。在每个应用分支下，细化工程图表达要求，建立相应的表达规范。

3.2 教学定位

结合工程教育规律特点和规律制定工程图学学科的教学体系。现代意义上的工程教育起源于18世纪的欧洲工业革命，随着世界科技变革与格局的变化，历经了强调技术教育、“工程科学化”与“回归工程”3个阶段：①20世纪30-40年代前，以欧洲为代表，强调技术教育、工程实践；②第二次世界大战后到20世纪90年代，美国引领下的工程教育科学化，过分强调科学基础理论与教育，忽视了工程实践的重要性；③20世纪90年代初美国提出“回归工程”运动，重视工程实际以及工程知识的系统性，即重视大工程教育。

借鉴以上工程教育发展过程，结合我国制造业发展战略部署，我国本科工科基础教育应该综合以下3方面的教育和培养：工程实践能力、科学的思维与创新方法、职业道德与社会责任感。具备前两个层次要求，学生毕业后将能由就业胜任向创新引领发展，即从会走到走得远。而职业道德和社会责任感的培养则让学生在职业生涯中走得对。

落实到工程图学学科教学定位上，应该注重学生综合能力的提高，而不仅仅是“画”、“读”工程图的技能性学习。随着软、硬件更新速度的加快，制图技术也不断更新，在学校掌握的制图技能(包括各种软件和硬件工具的使用)到工作时很可能已经淘汰。因此，学习能力的培养至关重要。这种学习能力应该是建立在对图学理论与技术基础的融会贯通上，即培养学生建立起完整的工程图学知识体系。在教学体系设计中，应重视基础理论与实践能力的协调互促，强调学科内在的共性基础与发展规律性，而非仅技能性学习。

3.3 教材建设

根据学科体系，工程图学的教材也按照基础理论、技术、规范标准、应用等4个层次建设。

(1) 基础理论教材。讲述工程几何的构造关系和规律，包含点-线-面-基本体-组合体的构造过程，以及2D-3D的转换、构造求解等对应关系。以画法几何学为基础，扩展到计算机中工程几何的构造原理与方法，旨在让学生了解计算机表述工程几何的基本原理和规律。“工欲善其事，必先利其器”，让学生知其然，且知其所以然，在学习新的工具软件时更能得心应手。还应培养学生具备基本的CAD功能模块开发基础。因此，基础理论教材应综合画法几何学、计算机图形学以及CAD开发基础等教材，并以工程几何表达为主线。《图学计算基础》^[19]提供了图学计算基础原理与算法，可以在此基础上，将画法几何学与图学计算相融合，打造适应工程图学发展的理论基础教材。

(2) 技术基础教材。讲述三维工程几何构造以及工程产品表达的基本技术与规范。教材应不受某种软件工具束缚，在基础理论基础上，系统介绍面向制造的三维建模的共性流程与规范，产品表达的要求、方法与技术流程；介绍各种表达方法，二、三维工程图中技术要求的标注方法，一般零部件的二、三维表达以及常用及标准零件表达；数字化流水线及工厂模型的制作要求与技术等。

(3) 标准规范的制定。根据新的工程表达交流需要，完善现有标准规范，研制新的标准规范。如面向三维设计的三维建模规范和标准、技术要求(尺寸公差、几何公差、表面结构等)的三维标注规范和标准、三维表达视角的选用规范。工程制图技术和需求的变化将会越来越快，因此，应提炼工程表达所需的规范标准的共性和规律，让学生了解标准规范制定的原理和方法，在对规范的理解的基础上记忆应用，也将对新的标准规范有更好的适应性。

(4) 应用教材建设。针对不同应用领域特点，编制专门性指导教材，如机械、建筑、水利、电子等，甚至可以根据设计表达要求，再做不同尺度及加工方式的细分。

3.4 培养模式

根据教学定位，应采用以项目或案例教学模式开展教学实践，并根据不同教学层次，细化适应其特点的教学模式。在基础理论与技术层面，以研究型学习为主；在应用层面，则以工程实践型学习为主。采用高校教师、领域专家、企业工程技术人员相结合、学术讲座、技术讨论、实践项目等多种形式贯穿教学活动。理论学习、实验、工程实践各成

体系,又能在教学中融合互促,形成良性反馈机制;高校与研发机构、工程企业三者联动,建立开放教学生态环境。

4 结束语

本文在图学学科建设背景下,在分析我国制造业转型及国际工程教学发展规律的基础上,阐述了工程图学发展趋势,探讨了工程图学内涵及外延,提出了新的工程图学知识体系,为构建完整的工程图学学科体系提供研究基础。主要观点如下:

(1) 面向现在及未来一段时间的制造业发展需求,重新规划工程图学科定位,旨在构建完整的工程图学知识体系,为培养具有扎实基础理论、未来视野及学习能力、创新能力的工程图学人才打下基础。

(2) 分析工程图学相关领域及其本身的各种变化趋势,提取其中的不变性及变化规律,作为工程图学的理论与技术规范基础。

(3) 从形与图以及3D与2D的关系,分析工程图学的内涵与外延;从发展的角度,构建工程图学的共性知识体系。以画法几何及几何构造原理统一理论与技术基础,解决传统与现代理论技术冲突与衔接问题。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.中华人民共和国国家标准 GB/T13745-2009 [EB/OL]. [2018-10-01]. <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=4C13F521FD6ECB6E5EC026FCD779986E>.
- [2] 中国图学学会. 2012-2013 图学学科发展报告[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- [3] MIGLIARI R. Descriptive geometry: from its past to its future [J]. Nexus Network Journal, 2012, 14(3): 555-571.
- [4] ROEVER W H. Descriptive geometry and its merits as a collegiate as well as an engineering subject [J]. The American Mathematical Monthly, 1918, 25(4): 145-159.
- [5] CIGOLA M. Distinguished figures in descriptive geometry and its applications for mechanism science [M]. Berlin: Springer Press, 2016: 1640-1718.
- [6] 于海燕,秦鹏飞,何援军. 机械图样的智能化尺寸标注方法[J]. 工程图学学报, 2000, 21(2): 14-19.
- [7] BARR R E, JURICIC D. The engineering design graphics (EDG) curriculum modernization project - a white paper summary [EB/OL]. [2018-10-01]. [http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri:\(0766224c115fa4aeca7179fe92da48ae\)&filter=sc_long_sign&sc_ks_para=q%3DModernization+of+engineering+design+graphics+laboratories&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&_us=730854329154710193](http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri:(0766224c115fa4aeca7179fe92da48ae)&filter=sc_long_sign&sc_ks_para=q%3DModernization+of+engineering+design+graphics+laboratories&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&_us=730854329154710193).
- [8] 雷环,爱德华克劳利. 培养工程领导力,引领世界发展——麻省理工学院 Gordon 工程领导力计划概述[J]. 清华大学教育研究, 2010, 31(1): 77-83.
- [9] 尹玉波,蔡建平. 中美工程图学类课程体系及实验教学对比研究[C]//第五届机械类课程报告论坛论文集,北京: 高等教育出版社, 2010, 5: 43-47.
- [10] 李培根. 工程教育需要大工程观[J]. 高等工程教育研究, 2011(3): 1-3.
- [11] 梁瑛娜. 国外工程图学教育及 CDIO 理念对我国图学教育改革的启迪[J]. 教育教学论坛, 2015(26): 65-66.
- [12] 赵婷婷,买楠楠. 基于大工程观的美国高等工程教育课程设置特点分析——MIT 与 STANFORD 的比较研究[C]//2005 高等教育论坛. 北京: 中国工程院出版, 2006: 105-116.
- [13] RODRÍGUEZ J C, DÍAZ R A F, CARRIEGOS M V. Automatic generation of moodle questionnaires to assess learning of descriptive geometry [C]//International Symposium on Computers in Education. New York: IEEE Press, 2015: 201-204.
- [14] 童秉枢,田凌,冯涓. 10 年来我国工程图学教学改革中的问题、认识与发展[J]. 工程图学学报, 2008, 29(4): 1-5.
- [15] 中共中央组织部. 国家中长期人才发展规划纲要: 2010-2020 年[M]. 北京: 党建读物出版社, 2010.
- [16] 人民出版社. 国家中长期教育改革和发展规划纲要: 2010-2020 年[M]. 北京: 人民出版社, 2010.
- [17] ZENG Y, HORVATH I. Fundamentals of next generation CAD/E systems [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(10): 875-878.
- [18] EFI F, MONIQUE T. The computational geometry algorithms library CGAL [J]. ACM Communications in Computer Algebra, 2015(49): 10-12.
- [19] 何援军. 图学计算基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 1.