

第 2 章 从手工到自动化——现代图形技术的兴起

2.1 新形势到来之前

多少年来，人们习惯用图表达思想、表达生活，这主要是因为它具有直观性和形象化的特点。随着生产和科学技术的发展，图的用途也更加广泛了。

然而，绘图方法却长期停留在手工业的落后状态，远远满足不了实际的需要。为此发明了许多绘图工具。例如：丁字尺、三角板、圆规、专用绘图仪器、成套的绘图模板等。模板法绘图的原理是将工程图样中常用的图形和符号刻在透明塑料片上，再用铅笔或针管笔沿孔边移动，从而画出所需画的各种形状的精确图形。图

2-1-1 为螺母模板，可用来画圆和标准螺母。模板法对提高专业图纸绘图速度和质量是比较有效的，因此得到了广泛的应用。然而当图形的尺寸较大时，使用模板法就有困难，所以人们又发明了转印法。图 2-1-2 为画圆的转印膜，它的原理是一端作圆心孔，用插针固定圆心，另一端按所需的半径尺寸按一定的级数钻上插笔孔，即可按半径尺寸要求作圆。据不完全统计，仅画椭圆一项就发明了 20 多种绘图工具。由于不断地改进绘图工具，因此改善了绘图工作条件，也提高了绘图效率和图面质量。

生产的发展对绘图精度和速度提出了更高

的要求，有些复杂的图形单纯用简单的绘图工具画是比较困难的，必须用更精密的绘图机械才能实现。1879 年坎波从理论上证明了：所有的代数平面曲线，用适当的连杆机构可完成其绘图工作，这为自动绘图提供了理论上的依据。此后，由于精密机械的发展，创造出绘制平面曲线的各种绘图机械。

从手工绘图到用精密机械绘图，在绘图方法上是一个很大的进步。在实践中不断地出现各种各样的复杂图形，有待人们去解决。但有些图形只是从绘图方法上去实现还是不够的，甚至是不可能的。为此，必须从理论上深入研究各种图形的性质和规律，也就是用数学的方法研究图形。

在实际工作中也常常是把绘图和计算结合起来，即所谓形数结合。实践证明：任何一个图形，都可以用数学方程表示它、讨论它；反之，数学问题也可以用图形来描绘。这就为形与数结合奠定了理论基础。

在实践中如何实现这一理论，也不是一件很容易的事，因为有一些图形（包括曲面等等）的数学表达式是很复杂的，用人工计算是很困难的，有些甚至在短时间内不能完成的。由于受到了计算时间的限制，就直接影响到对复杂图形的研究与表达。所以在计算机出现之前，图形技术难于有所超越。

2.2 几个起点

2.2.1 绘图自动化

五十年代初期，人们根据数控机床的原理，设想用绘图笔代替数控机床上的刀具而发明了世界上第一台平板绘图机，随后又根据打印机的原理研制出世界上第一台滚筒式绘图机，这就开始了由计算机辅助绘图仪代替人工绘图的历史。这不仅仅使古老的绘图技术有了突破性的发展，而且使应用计算机进行自动绘图成为可能。

绘图机的主要功能是根据给定的数据，高速、高精度地将图形绘制出来，而带有坐标读取装置的绘图机，还能根据图形给出其坐标值的功能。前者是将数据变为图形，后者是将图形变为数字。一般说来，除了最简单的情况和复杂的立体图形，以及随机参数处理外，平面图形的处理总可以归纳为：按某一给定方程绘出相应的曲线，或者将给定参数的一些离散点连成一光滑曲线。前者如三次方程： $x^3+3x^2-4x-5y=0$

如图 2-2-1 所示。后者如极坐标方程： $\rho = a\sin(n\phi)$ ，按照给定参数绘制平面图，如图 2-2-2 所示。

不论是给定方程也好，或给定离散点的参数也好，问题的性质都是一样的，其基本元素均为点，所以解决点的变化规律则是问题的主要方面。然而，按方程或离散点编制的程序，还不能直接由绘图机执行，因为任何绘图机都不可能直接产生任意形状的曲线，一般只能直接形成一次曲线（直线）、二次曲线（圆弧、抛

物线)等。因此,由方程或离散点构成的复杂曲线,必须经由计算机处理,并在满足精度要求的前提下,以直线、圆弧、或抛物线线段去分段逼近此曲线。通常,这类绘图处理程序只是程序设计系统的一部分,它还必须跟其它工作,诸如造船工业中的数学放样研究、或航空工业中的理论外形计算、或汽车设计中的审势相密切配合。因此自动绘图机与计算机一起组成了自动绘图系统。

由计算机控制的自动绘图机的出现,使图学工作进入了一个崭新的阶段。无论从图学理论、绘图方法方面都产生了巨大的变化。在计算机科学、应用数学、图学等学科的基础上,综合发展成为一门新的学科—计算机图学。

计算机图学的研究对象是运用计算机的先进技术,对图形进行数学处理,进而研究图学领域中各种理论和实践问题。它不同于单纯用几何方法研究图形的各种几何学,也不同于用一般数学计算来研究各种图形的纯数学方法,而是用计算机便于处理的数学方法(计算数学)来研究各种图形及空间关系等,并把计算机处理的结果送到绘图机绘出图来。因此,计算机图学把形和数很好的结合起来,做到了从图学理论到绘图实践的完美的统一。

2.2.2 图形显示和人机对话

早期的计算机绘图模式为被动式绘图模式。被动式绘图是指用户输入绘图对象的基本参数之后,由计算机进行自

动处理，直到图纸绘制完毕。如果要修改图形，必须修改源程序或数据。然而，在工程实际中，由于情况的变化或人的认识的不断提高，往往需要对所绘出的图形进行动态修改。因此，希望在利用计算机进行设计的过程中，设计者与计算机之间不断地进行对话。在绘图过程中，图形显示在屏幕上，设计者利用输入设备输入各种命令或数据，以人一机对话方式随时修改图形，直到满意为止，最后由图形输出设备输出绘制的图形。这种能够动态地修改所获图形的处理技术称为交互型绘图技术。交互型绘图技术先进，操作灵活，适应性强。由于它把人的创作性与计算机的高速、准确性有机地结合起来，因此它是工程技术人员绘制图形的理想方法。

交互型绘图系统是计算机绘图系统中比较先进和完善的一种系统形式，是计算机通信最自然的方式之一。它是

以计算机为核心设备，以图形显示器和交互式图形学为基础，具有图形生成、图形编辑和图形显示的能力，可以实现人机交互作业的计算机系统。通过各种输入设备，使设计人员在图形终端上能够完成类似于在图纸上完成的设计工作，图 2-2-3 所示是一个说明交互型绘图系统的概念化框图。

一个典型的交互型绘图系统的硬件组成如图 2-2-4 所示。它包括五个主要部分：计算机、显示处理器(DPU)、显示器(CRT)、交互式输入设备(如键盘、鼠标器、光笔、图形输入板等)和输出设备（如打印机、绘图机）。

计算机即主机是系统的核心设备，所有的图形软件都要在主机上执行，它完成图形数据的计算和处理，并协调各部分的工作。

显示处理器(Display Process

Unit 即 DPU)是一种专门用途的 CPU。它执行一系列显示命令，在 CRT 显示器上显示该命令序列描述的图形。显示命令序列又称为显示程序，它由用户调用图形程序产生。

图形显示器是系统又一重要输出设备，有各种型式，一般采用阴极射线管(Cathode Ray Tube

即 CRT)的图像生成原理，产生屏幕图形，图形可以供用户修改。

图形输入设备是交互式绘图系统中实现人机交互设计的工具。其作用是向计算机方便地输入图形数据和各种控制命令，从而调用各命令所对应的程序执行并生成图形；或对已有的图形进行拾取和编辑处理。

图形输出设备主要是绘图机和打印机。

在配置了上述图形输入输出设备的交互式绘图系统上，用户能够直接使用图形与计算机对话，以达到特定的目的。

一个交互型绘图系统，除了配置硬件之外，还必须配置成套的软件才能有效的工作。图形系统的软件是由基本图

形软件包、图形应用程序和应用数据结构组成。

基本图形软件包是由一组图形子程序构成。它提供图形处理和编辑功能，通过调用图形程序库或绘图命令，可以在显示器上生成各种图形实体（如生成线、弧、专用符号以及球、立方体等基本图形元素），可以对图形实体进行各种操作和控制（即可进行图形几何变换、修改和调整几何模型、消除隐藏线等），以实现用户与计算机之间的对话。它是交互型绘图系统的基础软件。

图形系统的功能最终反映在具体设计问题的图形应用程序上，即根据绘图的具体任务，安排一系列的绘图命令，用户不必像编制高级语言程序一样去编制程序，而是利用图形软件包中提供的菜单命令集，从中去选择一系列命令，用命令和命令中的选择项，去完成作图和修改的任务。用户只需了解每条命令的含义和用法，而不必深入了解图形软件包的内部结构就完成绘图设计任务。

应用数据结构实质上是一些数据文件（或数据库结构），其中保存着构造图形的一个或多个对象的全部描述信息。这些信息中有说明对象所有组成部分的形状和大小的几何信息和拓扑信息；有说明对象图形的色彩、纹理、表面性质等属性信息；以及一些材料、单价、加工要求等非几何数据。在计算机绘图技术中感兴趣的主要是图形的几何信息，如形状、大小、位置、结构等，对图形几何特征描述的数据（或者作图过程）已预先存放在应用数据结构中，绘图时从中提取有关数据即可。

交互型绘图系统支撑软件很多，如美国

SDRC 公司的 I-DEAS 软件, EDS 公司的 UG II 软件, Matra

Datavicion 公司的 EUCLID-IS 软件, CDC 公司的 ICEM 软件, 法国索达公司的 CATIA 软件等。适用于微机的交互式绘图软件有 AutoCAD、CADKEY、CADPLAN、PD、3D-Product、Micro-CADAM 等。最近几年我国许多单位相继推出了各种二维交互式绘图系统, 如 PCAD、GH-InteCAD、CCAD、PICAD 等。在众多的微机图形软件中, 美国 Autodesk 公司开发的 AutoCAD 绘图软件是目前最流行、应用范围最广的软件之一。它使用 C 语言编写, 采用基于向量浮点运算的坐标系统, 精度可达 1015×1015 , 它能根据用户的指令迅速准确地绘出所需的图形, 通过局部编辑和修改, 最后绘出清晰而精确的图纸; 它配有 AutoLISP 语言, 并支持 VB、VC

等高级程序开发语言, 供用户开发自己的绘图命令和菜单; 该软件还提供多种手段, 供用户开发图形库; 还能同高级语言和数据库进行信息交换, 并配有多种外部设备驱动程序, 使用非常方便。

交互技术是流行的常规处理方法, 它实际上成为整个链条中的一个柔性环节, 可以弥补技术方面尚未解决的功能上的不足, 又可以发挥人的多方协调的主动性, 使相关技术早日系统化,

目前交互技术正朝着参数化、智能化、自动化和一体化技术方向发展。

2.2.3 复杂形体表面的生成

曲面造型是 CAD（计算机辅助设计）和计算机图形学中最活跃、最关键的学科分支之一。这是因为三维形体的几何表示处处都要用到，从飞机、汽车、船舶、叶轮的流体动力学分析，家用电器、轻工产品的工业造型设计、服装、皮鞋的三维打样和款式设计，山脉、水浪、云彩的自然景物模拟、地形、地貌、矿藏、石油分布的地理资源描述，人体外貌和内部器官的 CT 扫描数据三维重构，科学计算中的应力、应变、温度场、速度场的直观显示等等，无不**需要强有力的曲面造型工具**。由于实际问题不断对曲面有新的要求，近二十年来，有关曲线和曲面的文章、专著层出不穷。1963 年美国波音飞机公司的佛格森将曲线曲面表示成参数矢量函数形式，并用三次参数曲线构造组合曲线，用四个角点的位置矢量及其两个方向的切矢量定义三次曲面。1964 年美国麻省理工学院的孔斯用封闭曲线的四条边界定义一块曲面。而有关 B 样条的理论早在 1946 年由舍恩伯格提出，但论文直到 1967 年才发表。1971 年法国雷诺汽车公司的贝塞尔（Bezier）发表了一种用控制多边形定义曲线和曲面的方法。同期，法国雪铁龙汽车公司的德卡斯特里奥也独立地研究出与贝塞尔类似的方法。1972 年，德布尔给出了 B 样条的标准计算方法。1974 年，美国通用汽车公司的戈登和里森费尔德将 B 样条理论用于形状描述，提出了 B 样条曲线、曲面。1975 年，美国锡拉丘兹大学的佛斯普里尔在其博士论文中提出了有理 B 样条方法。80 年代后期，美国的皮格尔和蒂勒将有理 B 样条发展成为非均匀有理 B 样条（NURBS）方法，并已成为当前自由曲线和曲面描述的最广为流行

的技术，用 NURBS 可统一表示初等解析曲线、曲面以及有理与非有理 Bezier、非有理 B 样条曲线、曲面，通过调整控制顶点和权因子，可以灵活地改变曲面的形状。个别控制顶点和权因子的调整只影响曲面形状的局部修改。B 样条基函数具有计算稳定、快速的优点。NURBS 曲面包含在由它的控制顶点构成的凸包内，并且可以方便地等价转换成对应的贝塞尔曲面，因此拥有贝塞尔曲面的一切优异特性。用 NURBS 曲面来表示自由曲面，解决了曲面的完全确定及其数字化问题，使所有的工程形象在数字表示方面得到了统一。这使有关曲面的设计、分析与计算达到了前所未有的高度。

2.3 衍生、辐射

2.3.1 走向成熟

作为现代图形技术最主要的组成部分—计算机图形学的发展已相对成熟，70 年代中末期所提的目标和展望都已达到或超越。目前，一些新的分支和领域正在形成。

科学计算可视化。计算机技术的飞速发展和广泛使用，涉及各行各业如天体物理、生物学、气象、数学、空气动力学、医学图像等领域的大量数据，对人脑分析这些数据的能力提出了挑战。我们知道，复杂的数据以视觉形式表现是最容易理解的，因为图形图像是沟通思维的最自然手段之一。人类大脑具有高度的处理视觉信息的能力，大脑具有的大约 100 亿条神经元中有一半专为视觉

服务，与接受数字信息相比，大脑接受视觉形象的能力要大的多。科学计算可视化的基本思想就是从准备数据、实施计算到表达结果都用图形或图像来完成或表现，最后结果还可以用具有真实感的动态图形模拟来描述。因此，可视化是一种工具和方法，它将“不可见的”变为“可见的”，丰富了科学发现的过程，给人们以深刻与意想不到的洞察力。在很多领域使科学家的研究方式发生根本变化。

虚拟现实系统。虚拟现实系统，又称之为虚拟现实环境，是指由计算机生成的一个实时三维空间。用户可在其中自由的运动，随意观察周围的景物，并可通过一些特殊的设备与虚拟物体进行交互操作。在此环境中，用户看到的是全立体彩色景象，听到的是虚拟环境中的声响，手或脚可以感受到虚拟环境所反馈给它的作用力，由此是用户产生一种身临其境的感觉。

虚拟现实技术主要研究交互式实时三维图形在计算机环境模拟方面的应用。此项技术的研究开始于六十年代，但发展较为缓慢，几乎很少被大家所注意。直到八十年代后期，由于小型液晶显示和 CRT 显示技术、高速图形加速技术、多媒体技术及跟踪系统等方面的进步，以及图形并行处理、面向对象的程序设计方法的发展，虚拟现实的技术变得活跃起来，尤其是近几年，虚拟现实的研究工作进展较快，并已在航天、建筑、医疗、教育、艺术、体育等领域得到初步应用。

真实感图形技术。通过利用一定的光照模型和辐射度算法，在使用显示设备描绘图形时，把三维信息经过某种投

影变换，辅以颜色和纹理，通过处理物体表面的明暗效应，从而生成和照片一样的物体真实图形。

计算机动画技术。计算机动画技术是将图形图案或者其中的一部分显示在屏幕上，并且按照一定的规律或者预定的要求在屏幕上移动、变换，从而使计算机显示出的图形动态的变化。计算机动画技术是图形技术各方面综合的结果。动画技术增强了显示输出图形的真实感。动画技术在工程模拟、教学和游戏等应用场合起到了很发作用。在计算机图形学中，通常把画面上的活动部分成为“动画对象”，

实际上，动画是动画对象重复的进行图形变换操作的结果，图形的操作过程可以由多种办法实现。一般情况下，用程序来实现这种变换。显示出动画对象的图形，然后进行变换，并擦除原来的图形，再将变换后的图形显示出来，如此循环下去，类似动画影片的制作过程。

2.3.2 广泛应用

目前现代图形技术已成为产品和工程设计及新一代生产技术发展的核心技术。在国外，应用 CAD 技术最早的部门是航空和航天、汽车和造船等大型制造业。随着计算机的硬件和软件技术的发展，CAD 系统的价格不断下降，而性能不断地提高，特别是微机和工作站的问世，极大的扩展了 CAD 技术的应用领域，也使得中小企业也有经济能力应用 CAD 技术。所以，CAD 技术正逐步由大型企业和军工企业向中小型和民用企业扩展和延伸，根据美国

1985 年对 1 万台工作站的调查，拥有 6 台或 6 台以下工作站的企业约占 50%，而拥有 100 台以上工作站的企业占 4.0%。据统计，到 80 年代末 CAD 技术的应用已进入 90 个工业领域，还在不断扩展着。现在应用得比较成熟的是机械、电子、轻纺和建筑等工业领域，已有一批基础软件和专业软件商品化。下面从几个主要领域来讨论它的应用情况。

1) 航空和航天

航空工业是国内外最早应用 CAD 技术的领域之一。早在 60 年代，美国的洛克希德公司就研究开发用于飞机设计的 CAD 软件。CADAM 就是该公司研制的大型 CAD 软件。首先应用该软件成功地设计各型战斗机。在设计中首先应用计算机辅助几何外形设计，将机翼、机身的几何外形用数学加以描述并存于计算机中；然后用交互式图形系统进行设计、绘图，并进行结构设计及计算；最后，根据几何与加工数据绘制工装模具图纸或者相应的数控加工纸带。我国的航空航天部门早在 70 年代中期就已开始使用 CAD 技术。现在西安和成都等飞机制造工业公司都建立了飞机设计 CAD 系统。航天部不仅 CAD 设备先进，而且 CAD 技术的应用推广工作也搞得很好。

2) 造船工业

造船工业也是国内外应用 CAD 技术较早的部门之一。与飞机设计相类似，在设计中首先是 CAD 技术对船体外形作计算机辅助几何外形设计；然后以船体外形几何数据为依据，计

算出船体零件图并生成切割钢板所需的数控纸带。我国的造船工业也是应用 CAD 技术较好的领域之一。早在 1973 年，我国的造船工业就已引进了大型 CAD 系统，开始研制用于船体设计的 CAD 软件。该系统可提高船体钢板切割下料的精度，每艘万吨级的船舶就此一项节约钢材约 150~200 吨。另外船舶管道 CAD 系统对管路布置、干涉检查起到很好的作用，提高了设计效率。

3) 轻纺和服装工业

CAD 技术在轻纺工业中，主要是用于花布和地毯的花纹图案与色彩的设计，而在服装行业中的应用主要是服装款式的设计、排料和放样及衣料裁切等。

应用花纹图案和调色软件系统，设计师可以灵活方便而迅速地设计出花布和毛毯的彩色花纹图案以及进行调色，并能把设计好的图案实时显示在显示器上供用户挑选或进一步修改，使用十分方便。

在服装设计中，首先使用服装款式设计 CAD 软件进行款式的设计，其中包括各种各样的款式和布料及布料颜色的选择。通过交互设计技术，最后可以获得最佳的服装款式。该软件要具有较强的曲线和曲面的处理功能。服装的排料和放样是在款式设计之后。即在获得各衣片的形状和数据后，把这些数据输入到排料和放样软件系统中，然后通过优化排料，显示出最紧凑的合理的布料较省的排料图形。布料的剪裁系统实际上是一个数控线切割的软件系统。在切割时，首先将布料固定在工作台上，然后用计算机控制刀

具的运动轨迹。这样切割比较均匀准确，预留的余量较小，从而节约布料。

4) 建筑工程

CAD 技术在建筑方面的应用主要是：总体布局（如一个工厂的设计，用 CAD 系统确定厂房、办公用房、生活用房和交通道路及绿色等方面的平面布置图）。在总体布局的基础上然后对房屋的外形和结构及内部的装饰设计、通风和供热及照明设备的布置、结构件的力学结构等进行分析。应用 CAD 技术来处理这些工作不仅可以提高设计效率，更主要的是使设计结果能达到最优化，还可以节省建设费用。所以，CAD 技术已成为建筑方面重要的新技术之一。

艺术领域中 CAD 技术的应用也非常广泛。

艺术的范围很广，仅就轻工业产品的工业造型、陶瓷等艺术品的外形设计，地毯等艺术品的外形设计，地毯或其他织物的图案设计，服装、皮鞋的款式等用 CAD 技术进行，不仅有着实用价值，而且有着很高的艺术价值。

电影拍摄中利用 CAD 技术已有十余年的历史。据报导，美国好莱坞电影公司有着世界上最大的 CAD 系统，它主要利用 CAD 技术构造布景，可以利用虚拟现实的手法设计出人工不可能做到的布景，不仅大量节约人力、物力，降低电影拍摄的成本，而且还可给观众造成一种新奇、古怪、难以想象的环境。80 年代初期放映的美国电影，如星球大战、外星人以及近几年放映的侏罗纪公

园等科幻片，大量利用了这一手法，获得了极大成功，得到了很高的票房收入。

计算机造型技术不仅在电影艺术中，而且在现实生活中也极其有用。如一项大型建筑工程，在刚刚处于设计阶段时，就能向公众作一详细的介绍，让关心这一工程的公众能了解，能接受这一方案，甚至对方案提出意见。最典型的例子是日本关西航空港和香港新机场的设计。由于不能凭着图纸向公众作介绍，所以，他们把航空港的设计用 CAD 技术输入计算机中，计算机里就有了航空港的全部模型，这样在晚上电视黄金时间里，放映模拟人们乘坐飞机到机场上空、着陆、进入航空港、候机大厅等全过程，使人们在“虚拟现实”里体会到新航空港的整个设计思想，这是用通常的沙盘模型不可能实现的。

计算机造型技术还有一个十分重要的用途，即用来设计训练飞行员的飞行模拟器前的景物。解决在地面上训练飞行员，犹如在空中训练一样，其关键是视觉效果。利用 CAD 技术构造虚拟景物（天空、地面、山峰、树木等）达到训练目的，这种软件是及其昂贵的。美国 IvanSutherland 公司研制的飞行模拟器软件，仅使用权就需 800 万美元一套，价值之高，我们只能“望洋兴叹”

计算机造型技术还帮助美国亚特兰大取得第 26 届奥运会的举办权。据报导，当亚特兰大市奥申委把十几分钟有关该市情况介绍的录像片送到国际奥委会时，使奥委会评委们吃惊的是，他们看到的不仅是当时该市的现代城市建筑、发达的交通，而且还看

到了那些正在设计中的，也就是还在蓝图上的一幢幢崭新的、现代化大型体育场馆也耸立在亚特兰大市内，评委们可以到这些设计新颖、设施齐全，尚在工程师头脑中构思的场馆中去参观，领略一下亚市的新风光。评委们还看到了用计算机技术制作的运动员，高举熊熊燃烧着的火炬，进入第 26 届奥运会开幕式主会场（计算机制作）的壮丽场面。也许亚特兰大市正是用这一高新技术，出奇制胜，把那些位坐高官、爱挑剔的评委们降服了。

动画和广告制作充分利用了计算机造型技术，实质上也是一种虚拟现实技术。这方面的研究工作主要来自高等学校，如美国的 Cornell 大学，麻省理工学院，Ohio 州立大学、西德的 Karlsruhe 大学，日本的广岛大学等。加拿大的国际动画获奖作品——脱尼·特·彼尔特里计算机制作的动画片，它形象生动地模拟一个人弹琴的情形，弹钢琴者略有夸张，但描述的动作细腻，表情丰富。仅十几秒的影片，花了三年时间，投资达 300 万美元。瑞士动画专家 Nadia

Thalmann 和 Daniel

Thalmann 教授长期从事人物动画的研究和创作，成就突出。他们的研究课题有说话口型和脸部表情的控制、头发造型、服装形态的力学分析、人体姿势的模拟和行走路径的自适应规划等。日本广岛大学的中前荣八郎教授多年来一直从事自然景物的模拟，象日光、水色、阵雨、晨雾等。现在又很快转移到科学视算的研究，模拟电磁场的动态物理过程等。这些动画片的研制并不是一种奢

侈的娱乐，它同样是一种高技术。它体现了现代高技术研究的相互渗透和利用，这些都是与 CAD 技术密切相关的。事实上这些研究已经覆盖了 CAD 技术中的很多前沿领域，可以产生巨大的技术、经济和社会效益。