

# CAD——一场设计的革命

卢 鐸

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** CAD作为一种高效的生产力手段,正冲击着传统的设计方式,引起了一场设计的革命。本文简要地介绍了CAD使传统设计方式发生质的变化,当今CAD技术的特点、趋势以及应用体会。

**关键词:** CAD; 屏幕样机; 并行工程

## 1 势在必行

CAD技术自问世以来,已走过了25年的历程。CAD技术迅猛地发展,使人们从幻想像魔术师那样进行“设计”的梦想变成了越来越实用、高效的设计手段的现实。

由于CAD技术将计算机高速数据处理、海量存储、形象生动的图像表达及快速通讯等特长和设计人员丰富的经验、分析推理及学习等功能有机结合形成了生产力要素的优化组合。这种人机优化组合的必然结果,使产品质量得到改善,缩短了产品开发的周期以及降低了产品的成本。据美国科学院有关调查报告表明:由于采用了CAD技术,可使产品合格率提高5倍,设计人员对设计问题理解的深度和广度可提高35倍,设计成本减少30%,人工费减少20%,设计周期可缩短60%,生产效率提高60%。这就意味着,与传统设计方式比,每年至少可节省245天!在市场激烈竞争的今天,人们怎能不对CAD技术投以青睐呢!可以说谁拥有CAD及CAM技术手段,谁就能在尽短的时间内推出质量更好、成本更低的产品,谁就能抢上市场。正因为如此,企业界对CAD技术的需求与日俱增,全世界CAD系统的销售额正以15%的速率猛增,仅93年一年就达250亿美元。高科技的迅猛发展,尤其是以计算机及其相关学科为主的信息科学技术日新月异,为CAD技术的应用与推广提供了更加高效、实用的平台。当今,摆在人们面前的抉择已不是用不用CAD手段的问题,而是如何能更好地发挥CAD的作用,使之真正成为高效的“第一生产力”。

## 2 CAD——设计的革命

正如江泽民同志所指出的,计算机辅助设计推动了几乎一切领域的设计革命。这场革命

正冲击着一切落后的传统的设计方式,在设计领域中发挥着越来越大的作用。由 CAD 技术给传统的设计方式和手段带来的巨大变革,主要体现在如下几方面:

1 设计手段—传统设计以制作真实样机为目标驱动,以二维绘图起点,并作为贯彻和体现设计者意图的信息载体串行传递于设计—加工—检测等部门之间。CAD 则是以构造屏幕样机为目标,以三维实体建模为起点,以数据库和网络支撑为特征的并行作业的崭新的设计手段。设计过程实际上就是一个信息处理过程,CAD 是以 3 维实体建模构造“屏幕样机”为起点,通过人机结合交互作业的方式进行设计迭代的信息处理过程。过程中由于充分发挥了人机各自长处、实现优化组合的优势,使设计迭代渐进目标的速率远比手工方式高得多。这不仅是由于 3 维实体模型具有远比二维图形大得多的信息量 (>1000 倍),而且由于构造“屏幕样机”过程中直观、形象及生动的屏幕显示极大地激发设计人员的灵感,使设计人员在人机交互过程中感性和理性认识容易实现更大的升华。3 维实体模型,例如一“屏幕样件”,与一张 2 维零件图相比较,它所载的信息就不单是平面几何信息,它还可告诉设计者构件的空间拓扑和几何关系,外观、颜色、体积、重量、重心、惯性矩等信息,进一步通过工程分析和数控仿真还可知道构件的有关力学性能、动态特性及加工工艺性能等。这些丰富的信息,不仅对设计者本身提供了全方位、纵深的的设计参考,而且也设计组其它成员、工艺人员及管理人员提供了相互切磋的一个良好的公共平台,在这个平台上大家可以共同探讨设计方案可行性及如何实现优化设计等共同感兴趣的问题,有助于更大限度地发挥群体优势。

2 作业方式—传统的设计方式基本上是沿袭古老的串行方式进行的。从图板绘图开始直到样机加工出来,往往要经历一个漫长的过程,经样机测试后才能初步揭示出各方面的矛盾和疵病,不合乎要求的话,再重新修改设计,下图、加工……,显然这种作业方式无法适应激烈的市场竞争。

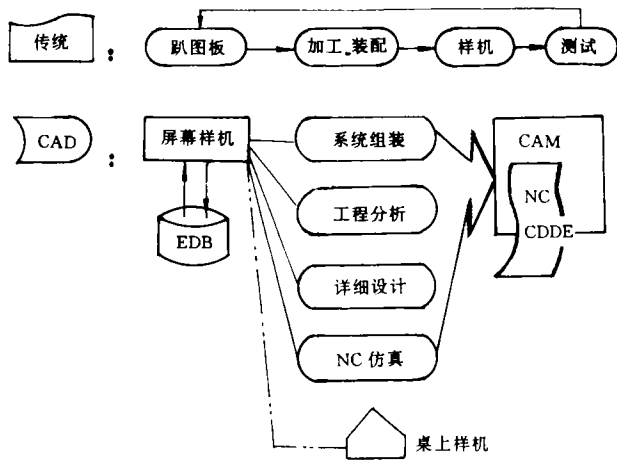


图1 CAD与传统作业方式比较

CAD 作业方式一改昔日串行模式成为实现“并行工程”的一个良好作业平台。在“屏幕样机”构造的基础上,并行地实现系统组装、工程分析、详细工程设计及数控仿真等作业步。并行作业不仅极大地提高了设计的效率,而且使设计组内各有关成员在同一时期内从不同角度揭示设计项目的内在矛盾和缺陷,从而可以使设计人员站在系统的高度、全面地评价设计项目,改进并提高设计质量,提高产品一次

成功的概率。如经并行作业后得到初步满意的结果,可进一步制作“桌上样机”。“桌上样机”可直接由专门的软件通过立体光刻等办法构造。图1所示为二种不同的作业方式。

并行作业中各作业步的功能大体如下所述:

**屏幕样机**—利用特征化实体造型的手段,按着设计人员的意图所构造的“屏幕”上的“样机”,亦称“虚拟样机”。屏幕样机的制作是在基于特征化的 3 维实体造型环境中采用参数

设计方式对 3 维线框、曲面和实体进行定义、构造及屏幕编辑并组装而成。

屏幕样机的作用在于：

(1) 概念设计—由于特征化、参数化的 3 维实体造型具有方便、灵活、直观的特点，使设计人员亲切地感到：“这正是我想要做的东西！”，进而激发创造意欲，使创造性的思维得到更充分的发挥，直实地体现 ‘概念设计’ 的过程；

(2) 屏幕样机作为由高精度公共几何模型造型的产物，提供完备的设计信息：

屏幕样机 { 几何信息—精确的几何参数（基于双精度 Nurbs 几何体生成）及形状特征。  
非几何信息—物理属性、设计规则、变量约束、基准设计历程，等等。

体现上述信息的数据结构被送入一个唯一的统一的产品定义数据库。通过关系式工程数据库管理系统，给并行作业的各个作业步提供当前的数据。因此，屏幕样机不仅作为并行作业的出发点，而且还是各个并行作业步，诸如有限元建模、详细工程设计及数控仿真等的基础和依据。

系统组装—对分布环境下所构造的各屏幕样机实施系统级的装配。系统组装按着先自上而下（即先由总师进行总体规划和布局，然后分解成各下级构造屏幕样机）到自下而上的方式进行工作。系统组装可运用直觉定位及配合关系进行定位及装配。组装后可进行干涉检查，如需要，亦可作实时动画显示，进行机构运动仿真。

工程分析—为了对屏幕样机的性能进行预估和评价，采用数值计算的方法（如：FEM）求出 ‘样机’ 对环境干扰的响应并与设计目标进行比较。工程分析的主要作用是：

- (1) 验证 “屏幕样机” 设计方案的可行性；
- (2) 为使设计方案最佳，进行优化设计。如下图所示：

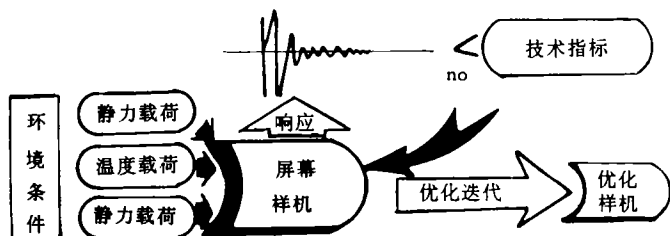


图 2 工程分析作业步示意图

工程分析包括前处理、求解计算及后处理等三部分。对某些高级工程分析软件来说，还包括优化计算功能模块。前处理是对屏幕样机进行有限元网格划分、施加约束和载荷等操作来建立分析计算模型。目前网格划分正朝自动化、智能化方向发展。分析计算功能包括静力分析计算，动态特性及动力学响应求解，温度

场、热应力及变形、电磁场及流体力学等求解计算；此外，工程分析还可求解非线性问题：材料非线性、大变形、间隙、摩擦、蠕变及载荷非线性等实际工程问题。后处理功能主要是为分析计算结果提供直观、通俗的解释手段，如变形图、着色的应力分布、应变能及动能的分布图、动力学特性仿真（振型图及动画演示）、时间历程或频谱响应曲线等等。优化迭代计算功能随着实用化的程度提高，越来越受到人们的关注。优化是利用分析计算的结果，按着设计的目标，自动修改设计变量并反复迭代运算，直到取得设计目标函数的极小值或极大值，使屏幕样机的设计达到满意的结果。目前优化计算多半是是求产品（“屏幕样机”）在技术条件要求范围内的重量或体积最小值或固有频率的最大值。优化的计算方法很多，实际工程应用

程序主要采用变条件极值为无条件极值求解等方法。目前工程分析正朝实用化、高精度、高效化和系统（集成）化方向发展。例如，当前出现的 FFE 法（快速有限元法），采用 P 单元和 r 单元混合的办法使原来要用 12 小时完成的考题（18700 个 4 面体单元，28401 个自由度），只要 4 分钟就可完成；将前后处理程序改用 C 语言编写，运行时间仅为原来的 1/5！工程分析的范畴也已从单一结构力学领域跨入到多学科耦合、系统级的分析计算与仿真。

详细设计—生成“屏幕样机”加工生产用的工程图纸。与传统制图方法不同的是 CAD 绘图可从二种方式获得：其一是由 3 维模型转换成 2 维机械图；其二是直接由 2 维制图生成。由于模型和图纸间数据存在双向相关性，亦即模型数据发生变化时，在 2 维图上亦反映出相应的变化，反之亦然。这种双向相关性为并行作业时数据的一致性起了保障作用。CAD 绘图质量好、效率高是基于如下先进手段实现的：

(1) 图形可直接由实体模型转换得到；

(2) 运用动态引导手段实现变量化的草图设计，草图形状的改变可以通过拖动几何要素或特征实现，其尺寸亦跟着改变；

(3) 灵活、快速的图形编辑功能；

(4) 直观的、动态的图形菜单；

(5) 提供丰富的标准件库、符号库及材料等；

(6) 规范化的几何尺寸与公差标准；

(7) 一体化的图纸管理功能。

NC 仿真—对基于特征的“屏幕样机”进行数控加工制造工艺设计与加工过程仿真。主要功能包括：

(1) 加工环境描述—坯料、零件、刀具、夹具、工作台及机床的实体加工制造环境描述；

(2) 加工工艺规程的设计—选择刀具、确定加工轨迹、自动确定加工“特征”的工艺、标准化的工艺操作及加工工序优化等。

(3) 加工操作仿真—加工状态实时描述，如毛坯在加工过程中演变状态的演示；

(4) 生成 NC 机床加工代码文件（由 G-POST 生成）

“桌上样机”—亦称‘快速样机’。它是由快速样机制造系统利用 3 维光刻等方法将“屏幕样机”制作成真实的产品原型。‘桌上样机’用来作为评价设计完美性的一种快速、廉价的手段，大大加速了新产品开发的进程。由‘屏幕样机’到‘桌上样机’甚至只要数小时即可。构成‘屏幕样机’的实体模型可直接生成桌上样机成型的标准格式文件（STL）并输入到桌上样机成型设备。

3 设计思想—传统的设计思想是建立在随意的、凭经验、凭感觉的基础之上，把设计对象看作是静态的、孤立的，通过低效的手工绘图与构思交互迭代实现其设计思想。采用 CAD 手段则使设计思想跨入必然的、建立在科学的、理性的基础之上，从动态的、系统的观点出发考虑设计对象，通过并行作业的方式，充分发挥人机交互迭代作业的效能实现其设计思想。

4 生产关系—就象瓦特发明蒸气机、珍妮发明纺织机给传统的手工作坊以极大的冲击，使生产关系发生巨大变化那样，当今采用 CAD、CAM 等先进的科技手段同样使传统的设计与加工方式受到严峻挑战。那种以劳动力、机器密集人海战术的生产方式必将逐步被高科技密集型、精干、高效的人机优化组合生产方式所取代，其必然结果是导致社会巨大的进步！我们应以积极进取的姿态投入到这场伟大的变革之中。

### 3 CAD 技术发展走向

1 集成化—CAD 技术发展至今已远远超出当初计算机辅助绘图的范畴,其显著标志之一就是集成化。这种集成体现在信息集成和物理集成上,从集成的方位上看,可分为纵向集成与横向集成。纵向集成主要指从设计→加工制造→检测作业流的一体化,即 CAD/CAE/CAM/CAT 一体化,具有代表性的是 CIMS (计算机辅助集成制造系统)。进入 90 年代,各国工业界纷纷采取措施打破 CAD、CAM、CAT 之间的篱笆,朝着纵向集成的方向迈进。纵向集成因使作业流路径最短,从而使生产率获得极大提高。横向集成主要体现在多学科集成,尤其是系统设计、系统工程分析上跨学科的耦合和集成正向更高层次发展,诸如光、机、电、算一体化在 CAD 应用软件上已经得到实现。由于横向集成使设计人员从系统级的高度进行设计与分析,因而使设计质量从整体上得到改进,大大提高了设计水平与质量。此外,还值得一提的是,随着计算机及相关技术的飞速发展,多媒体技术在 CAD 上的应用也逐渐披露头角,无论是存储信息的实体(如光盘、磁盘等)还是信息实体本身(如:数字、文字、声音、图形及图象等)也都朝着集成化的方向发展,给 CAD 提供更加高效生动的信息处理手段。当前 CAD 系统主要以包括工程项目管理在内的信息集成为主,以数据库和物理分布/逻辑一体的网络支撑为特征。

2 智能化—当前 CAD 技术正朝智能化的方向迈进,致力于使 CAD 由消极、被动“辅助”变为积极、主动“辅助”。目前有的 CAD 应用软件已具有一定的自适应乃至推理功能,尽管这是初步的,不完善的,但却代表了 CAD 技术发展的方向—朝着更高层智能化 AD (自动化设计)方向发展。例如,3 维模型与 2 维图形间双向转换中视图的识别、隐线的自动消除;有限元模型建立过程中网格自适应生成,P 单元按精度要求自动确定阶数;数控仿真时可针对实时提供的状态空间参数自动地优化工艺参数,确定切削深度、走刀速度等等;此外,CAD 应用软件框架体系中还带有设计、工程分析计算、数控仿真等方面的评价体系,结合相关的专家系统及一定程度的推理对设计的“屏幕样机”进行评价,辅助设计人员更好地完成设计任务。

3 实用化—CAD 技术能否为人们接受并推广应用,很大程度上决定于 CAD 的实用化程度。各 CAD 系统制造商致力于实用化的研究,使 CAD 技术的实用化程度有了明显的提高,主要体现在以下诸方面:

- 高精度—提供双精度的几何模型,完备的元件定义数据结构;
- 说“行话”—按着工程师的语言与设计人员对话;如特征参数,设计中用的‘凸台’、‘退刀槽’、‘鱼眼坑’……等等;
- 规范化—程序中设有各种设计、工艺及检测等规范指导设计人员进行实用化设计,如几何尺寸与公差规范,刀具选择及路径确定规范等;
- 标准化—制图标准 (ISO 等)、数据转换标准格式 (DXF、IGES 等) 标准件库、标准符号库;
- 友好介面—简化的菜单、看图操作,一目了然;
- 直观解释—动态引导,生动、形象的工程分析后处理,动态仿真等;
- 快速响应—使人机交互得以顺利进行;

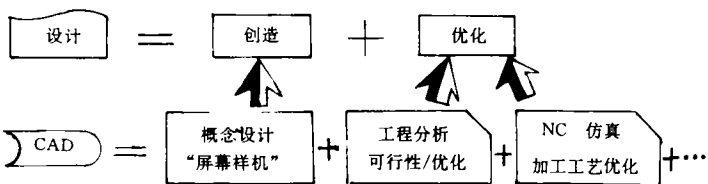
• 本地语言化—如 S7K 软件已有汉化版本。

……等等。上述功能的完善和改进,使 CAD 技术越来越为更大范围的设计人员所欢迎和接受。

4 高效、完备的框架体系—目前 CAD 系统已不单单是提供一个软件包,而是给用户提供一个高效的工作平台,平台由集成化工程数据库管理系统、完备的电子信息模型(应用软件框架体系)及开放的工作环境构成。工程数据库管理系统是工作平台的核心。通过完备的零件定义及先进和数据结构为并行工程的实施提供数据并行相关的保障。电子信息模型可针对用户的需要,按着规模优化的原则构成合理的、实用的应用软件框架体系,不仅供设计小组成员用,而且还供评审小组使用。开放的工作环境是实现“物理分布/逻辑集成”并行作业方式的必要条件,尤其是存在有异种计算机或不同厂家的应用软件时,这种开放性就更是必不可少的了。

## 4 应用体会

长春光机所 CAD 技术的应用主要在光、机、电三个方面,其中光学 CAD 起步较早,至今已 20 年的历史,现已成为光学设计人员得心应手的工具。机械、电子 CAD 应用是从 80 年代后期开始,结合工程项目逐步开展工作,尤其是突出抓住“屏幕样机”构造和“工程分析”二个环节的实际应用。实践使我们对“设计”本身的内涵及与 CAD 的关系有了更进一步的认识,正如下面框图所示:



设计不仅意味着创造新的概念及其实现这种概念的表达,例如,一种新的机构、仪器等,而且还意味着如何使其构造出的概念及其表达能在满足要求的前提下达到最佳。CAD 技术中的以 3

维实体建模构造“屏幕样机”的过程正是辅助设计人员开展概念设计实现创造性思维的过程;CAD 技术中的工程分析及数控仿真是实现结构优化及加工工艺优化的有效手段。

利用 CAD 技术手段,在对空间遥感相机、光电跟踪仪、太阳真空紫外监测仪、弹道相机及动态目标模拟测试架等工程项目的研制开发过程中,通过构造“屏幕样机”、“工程分析”和优化设计等方面的工作,对工程项目的方案选择、论证和评审均提供了有价值的参考和一定的科学依据。通过优化迭代,使结构设计在满足技术要求的前提下实现重量最轻或自然频率最高的目标。例如,某弹道相机的箱体,经优化迭代后,较原方案重减轻了 7%;某旋转测试架在经过 11 次迭代后重量减轻了 27%。为了进一步开展系统级的设计和优化,我们曾分别在机电耦合及光机耦合的工程分析上结合实际工程项目进行了建立模型、分析计算等工作,得到了与实测较为一致的结果。例如,针对如何改善某转台动态刚度问题,根据机械结构的动力学控制方程与伺服控制系统传递函数上的相似性及误差信号闭环特性建立了统一的数学模型,经分析计算,求解出系统自振频率为 73Hz,实测值为 69Hz,结果基本相近。借助后处理程序显示其振型图、动能分布图等直观表示可以很快地找出影响系统动态刚度的薄弱环节。又

如,针对某星光接受器在温度场变化的情况下是否保证精度的问题,根据光学系统与机械结构间几何尺寸的相关性,建立了温度场—机械力学—光学追迹统一求解的模型,经分析计算得到了较为满意的结果,后处理结果显示环境温度的变化对光学系统性能影响的直观解释,进而提出改进设计的方案。

通过实践,使我们深深体会到在市场激烈竞争的今天,CAD 已成为越来越必不可少的技术手段,使我们解决了原来想做而做不到的事(如“工程分析”),有的甚至连想都不敢想的事也做到了(“屏幕样机”),这就使我们能在更短的时间,拿出质量更好、成本更低的设计方案去开发、去占领市场,这种事何乐而不为呢?

## CAD—a revolution in the field of design

Lu E

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun130022)*

### Abstract

As a high efficiency, powerful production tool, CAD technology is impacting the traditional design way and in voking a revolution in the field of design. The characters and the trend of CAD are introduced concisely, “what we learn from CAD” is also described in this paper.

**Key words:** CAD, Virtual prototyping, Concurrent engineering