

# 产品研制开发 CAD/CAE/CAM 技术路线与应用

卢 镔 杨洪波 王延风 牛晓明 吴清文

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 阐述了CAD/CAE/CAM技术在产品研制开发中的技术路线及应用特点,着重介绍了虚拟产品构造及综合设计评价技术在产品开发中的作用,结合实际工程任务及产品开发的经验体会说明应用CAD/CAE/CAM技术的优越性。

**关键词** 虚拟产品 综合设计评价 并行工程

## 1 引言

随着科学技术迅猛的发展,市场竞争的加剧,使我们正面临着严峻的挑战:我们能否承担高难技术项目?能否在尽短的时间内研制出市场需要的质量好价格便宜的产品?在某种意义上说,这是一涉及到企业生死存亡重大问题。为了战胜这一挑战,企业纷纷考虑调整进取姿态,致力于市场开拓及改进生产力手段以增强对市场快速响应能力。当前所掀起的CAD热潮,就是面对挑战所采取的一种对策。人们现在所关注的问题,早已不是用不用CAD/CAE/CAM技术,而是如何能用好这一先进生产力工具的问题。经过多年来CAD/CAE应用实践,使我们逐渐认识到:要想用好CAD/CAE/CAM技术,不仅仅要掌握技术本身,更重要的是要有一个相应的、合理的作业模式,一条行之有效的技术路线。在开发空间光学仪器过程中,面对高难度、高水平、高质量地快速响应夺标论证及设计制造的挑战,我们采取了一条与传统方式完全不同的技术路线。

## 2 CAD/CAE/CAM 技术路线

为了能更有力地参与项目夺标,增强竞争的实力,我们以高水平、高质量、快响应研制开发

产品为目标, 运用 CAD/CAE/CAM 技术手段, 采取了如下的技术路线, 见图 1。

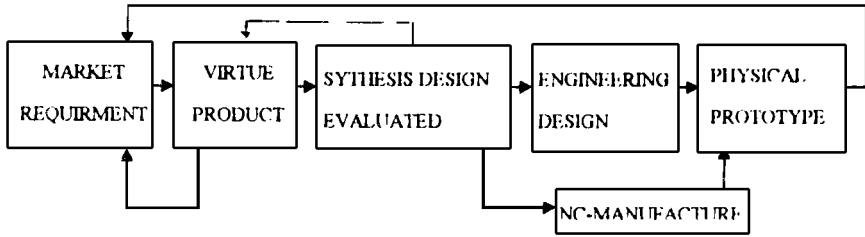


Fig. 1 CAD/CAE/CAM operating route

这条技术路线是利用计算机辅助手段, 在产品研制开发过程中充分发挥人机各自优势并实现优势互补, 形成优化组合的高效生产力。新技术路线与传统方式相比, 最大的区别在于:

- 以构造虚拟产品为驱动, 尽短时间内对市场作出初步响应, 形成与市场闭环, 更有针对性的把握用户需要;
- 以并行工程方式, 实施构造虚拟产品——综合设计评价迭代, 最大限度揭示未来产品在各种工况下内在规律, 改进设计, 消除隐患, 提高产品研制开发一次成功的概率;
- CAD/CAM 一体化, 对虚拟产品的关键件进行数控仿真并生成加工代码可直接进行 NC 加工, 极大提高生产率;
- 虚拟产品的 3D 模型可直接转为 2D 图形, 使绘工程图的时间大大节省。

由市场需求及技术发展状况决定产品的大体定位, 通过制作虚拟产品(数字化“产品”)及综合设计/评价, 可以很快确定这种定位是否合理, 如外观、功能、性能及技术先进性等, 如可行, 则进一步通过虚拟-综合设计/评价的多次迭代充分揭示产品生命周期各阶段及各环节内在联系与制约, 消除一切未来在生产及应用过程中可能出现的隐患, 求得合理及最佳的设计参数组合, 然后再转入详细工程设计进而实现真实物理样机制作。我们的做法是: 首先用参数设计及自由建模的方法构造待开发产品的“虚拟产品”; 接着对该“产品”进行各种相关的系统组装, 工程分析计算, 机构运动仿真及数控加工仿真等综合设计/评价, 经过多次综合设计/仿真分析迭代, 实现可行性论证, 进而达到优化设计的目标; 最后将关键零件数控仿真生成的加工代码传送到 NC 加工中心进行加工, 其余非数控加工件则由 3D 模型转成 2D 图进一步进行详细工程设计, 然后送交车间进行物理样机生产与装配。为更充分地发挥这一技术路线的效能, 我们着重抓好如下关键技术。

## 2.1 关键技术之一: 虚拟产品构造

在研制与开发新产品初期, 从 3D 实体建模出发, 以构造未来产品的“虚拟产品”(亦叫屏幕样机)为目标, 实现由概念设计到生成数字化“产品”的设计过程。虚拟产品是在构造 3D 实体模型的基础上赋予一定的产品属性, 不仅具有生动直观的形象, 而且具有“产品”相关的品质参数, 如未来产品的重量, 选用的材料, 公差配合及运动构件的运动状态等等。利用复合建模技术为构造虚拟产品带来极大的灵活性, 大大地提高了设计小组成员针对不同零件特点建模的效率。设计过程实际上是一种信息处理过程, 设计人员往往通过既有形象思维又有逻辑思维的方式实现这种处理过程, 只有当设计手段可以使设计对象很容易地形象化表达及更大程度地

被量化时,才能使这种信息处理高效化。虚拟产品构造过程大大地促进了设计人员的形象思维和逻辑思维能力,并且可以集思广益,很方便地汲取其它有关设计人员,工程分析人员,工艺人员,管理人员乃至用户等各方面的意见,使其设计至臻完善;传统方式则是以 2D 出图为出发点,研制物理样机为目标的设计研制过程。由于 2D 仅仅是 3D 空间的子域,2D 图形所载的信息远不如基于由 3D 模型构造的虚拟产品所载的信息丰富,因而设计人员的创造性思维得不到更充分的发挥,并且由于 2D 图形表达的直观性差,甚至会导致理解上的二义性或多义性,造成误解,影响各类有关人员对待开发产品研制开发的意见的交流。

通过构造虚拟产品不仅使设计工作者过去的梦想变成现实:在屏幕上真正实现了“所想即所得”,而且可以在早期设计阶段就能知道以往要到产品研制开发后期才能得到我们感兴趣的参数,如我们在多种产品的研制开发中,由于及早的得到“产品”的有关外观形状、结构布局、重量、重心、转动惯量、机构运动轨迹、装配及动态干涉状况等信息,使设计者做到心中有数,加快设计的进程,缩短了研制周期,大大提高了设计质量。以某空间光学仪器产品为例,说明虚拟产品的功能。

通过虚拟产品制作,我们初步可以得到:

- 仪器的外观模型:具有动态、体视观察功能;
- 仪器各构件装配关系模型及装配干涉状态;
- 动态装配过程描述;
- 仪器与基座连接方式;
- 仪器结构基本物理参数:

仪器重量 = 195kg ,

仪器重心位置 ( 相对侧摆/ 前后摆转轴交点) ( 略)

绕侧摆回转轴转动惯量  $I_{yy} = 75\text{kg} \cdot \text{m}^2$

绕前后回转轴转动惯量  $I_{xx} = 107\text{kg} \cdot \text{m}^2$

- 仪器结构选用材料及属性

又如,在某机载变焦距摄像机研制开发中,通过构造虚拟产品,成功地解决了仪器动平衡设计,其不平衡力距小于  $1\text{g} \cdot \text{cm}$ ,远小于指标要求,产品研制一次成功,受到军方好评。在 863 成像光谱仪及三线阵 CCD 相机等产品的研制中,用构造虚拟产品的手段,很好地解决了光机结构合理布局方案、光路中遮拦与杂光、重量与重量分配、与星船联结形式及仪器外观造型问题等。

## 2.2 关键技术之二:综合设计评价

如何在产品研制开发生命周期的早期阶段,尤其是方案与工程设计阶段,尽早揭示内在相互制约的各种设计变量间的关系,寻求最佳设计参数的组合,消除隐患,提高一次成功的概率,缩短研制周期及降低开发成本是摆在从事产品研制开发的科技人员面前紧迫的必须回答的问题。这类问题不仅涉及到结构单元的布局、材料的选取、结构强度、刚度、稳定性、加工工艺的可行性、产品的可维修性及可靠性,而且还涉及到光、机、电等各子系统相互间匹配性等等诸多相互关联的因素。若想尽快地找到能满足上述诸多相互关联与制约因素的折衷设计参数,仅凭经验及靠传统的设计手段是极其困难,有的甚至根本无法实现。为了尽快地找到能同时满足上述诸多相互关联与制约因素的折衷设计参数,我们在构造虚拟产品的基础上,进行综合设计评

价,经过多次构造虚拟产品——综合设计评价的迭代,逐渐逼近合理解,进而在可行基础上最终实现优化设计。

综合设计/评价是指在构造虚拟产品的基础上,以并行作业的方式同时对“产品”从不同有关方面进行设计、分析与仿真,然后加以综合评价,如系统装配、机构运动仿真、系统工程分析及数控加工仿真与代码生成等,设计小组成员在各自工作站上同时进行3D建模,构造虚拟产品,并在此基础上并行开展系统组装/机构仿真/工程分析/NC仿真等作业。

并行工程作业方式不仅提高了工作效率,更重要的是由于实现了综合设计而使设计质量大大地得到改进。例如,在研制某种空间光电产品时,为了确保光学系统的高分辨率及成像质量,在初步构造虚拟样机的基础上,针对消除杂光及摆动机构转动惯量要小且工作时无动态干涉的要求,利用装配模块及机构仿真模块进行光机装配及机构运动仿真;与此同时,针对空间恶劣环境,为防止机械动态干扰造成视轴抖动,利用FEM(PATRAN, ANSYS)进行动态特性分析及随机振动动态位移响应求解;为防止空间热环境影响导致光机结构视轴漂移,进行了瞬态温度场分析及热弹性分析;为保证其中复杂箱体加工工艺可行,同时还进行了数控加工仿真。由于并行工程基于同一个产品数据库管理(PDM-IMAN)及网络环境下作业,设计成员间可以就那些决定“产品”功能及性能的结构要素间拓扑关系,轮廓形状,尺寸大小及材料选取等相互制约的设计变量进行更新协调以尽快求得折衷的,合理的参数数值,如同联立方程求解一样,经过若干综合设计/分析仿真迭代,很快在可行域内找到“通解”,从而最大限度地避免了以往那些通常要到产品开发后期加工制造与装配阶段,或者到作极其昂贵的空间环境试验时才能暴露出的一些隐患,这样一来不仅大大的提高了设计的质量,提高了一次成功率,而且缩短了研制开发的周期,使我们在仅仅三个月的时间就完成了以往靠传统作业方式至少要花一年时间完成的任务。由于减少返工及未来试验的次数,使研制开发的费用大大降低。

实践证明,以并行工程作业方式,采用CAD/CAE/CAM技术进行综合设计评价在产品的研制与开发中发挥着越来越重要的作用。下面结合某空间光学仪器研制开发,阐述并行作业的各环节,进一步说明综合设计评价的作用。

### 2.2.1 光机电系统装配

空间光学仪器主要由光学系统,机械结构以及电子系统等三部分组成。这三部分分别由不同工程题目组进行设计,通过系统装配在设计阶段实现了:

- 揭示未来实际物理装配过程中构件可能发生干涉区域;
- 确定消除杂光光栏合理尺寸,观察消杂光的效果;
- 综合考虑电子器件的合理安放,寻求导线铺设的最佳路径。

### 2.2.2 光机系统仿真

- 机构运动仿真通过对仪器机构运动仿真,实现:

- 精确地描述了仪器摆动扫描镜侧摆及前后摆运动的轨迹及相应的运动参数;
- 检验光学切换机构,调焦机构,快门机构及输片机构动态工作状态,考核方案可行性,获取有关运动参数,确定合理设计参数;
- 动态干涉检查;
- 为确定仪器防护屏障箱体轮廓尺寸提供设计依据;
- 为仪器角动量平衡设计提供参考。

### · 光学系统工作原理动态描述

通过对光线的传播过程进行动态仿真,清楚地描述空间光学仪器长焦距非共轴折反式光学系统的工作原理。

### · 仪器摆动过程像面成像与目标关系的动态仿真

通过对仪器在扫摆过程中出现像/物失配的情况进行仪器摆动光束扫描仿真,说明像移补偿的必要性及侧摆与前后摆顺序对像移补偿的影响。

## 2.2.3 系统工程分析

工程分析是 CAD/CAE 综合设计的重要组成部分,不仅对仪器在空间恶劣环境下是否能满足性能指标的品质加以评价,而且对合理地选取设计参数起着极为重要的作用。工程分析主要目标是考核空间光学仪器结构(虚拟样机)在发射及运载环境条件下是否不破坏及不产生残余变形,在空间工作环境条件下,保持机械稳定性,确保视轴不抖动,以及在空间温度场变化时保持光学系统中光学元件间的相对位置和镜面面形精度的尺寸及形状稳定性。空间光学仪器工程分析内容如图 2 所示。

### · 静态刚度

空间光学仪器在空间无重力环境条件下,由于重力释放将导致光学元件相对位置变化及光学元件面形变化,如结构设计不当会使分辨力降低,成像质量变坏。因此,空间光学仪器结构必须具有足够的静态刚度。仪器结构静态刚度好坏主要用仪器结构的在自重作用下的光学元件相对位置变化和镜面变形是否超出许用指标来判别。某空间光学仪器光学元件在自重载荷作用下相对位置变化结果可列表说明(从略)。

### · 动态刚度

空间光学仪器结构仅仅满足静态刚度合格的要求是不够的,因为仪器还要受到运输过程中振动载荷作用,发射运载过程中的冲击与过载载荷作用以及在轨道运行时由于展开或调整太阳帆板时所带来的机械扰动等动态载荷,其中影响最大的是发射运载过程中的冲击与过载载荷。因此,空间光学仪器必须设计成具有良好动态刚度。衡量仪器结构动态刚度好坏主要从如下两方面考核:

#### a 仪器结构动态特性

仪器结构动态刚度由其动态特性决定,即仪器结构的自然频率  $F_n$  及相应的振型(,其低阶频率越高,模态密度越稀疏,仪器结构的动态刚度也越高。动态特性分析主要以结构模态分析为主,通过模态分析可以得出:

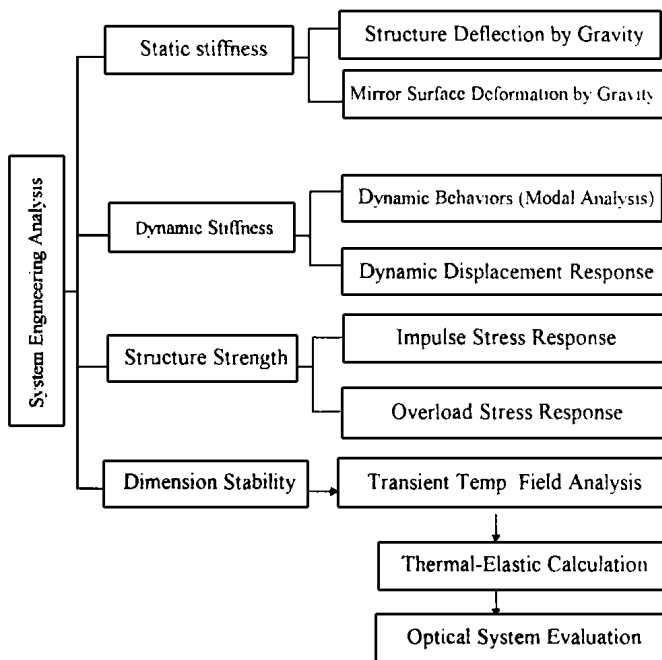


Fig. 2 Optical instrument engineering analysis

(1) 空间光学仪器结构动态刚度。

(2) 通过振型仿真可以直观地观察到仪器结构的薄弱环节, 提出合理刚度分配方案, 或通过灵敏度分析进一步实现结构刚度优化设计。

表 2 所示为某仪器结构的自然频率, 振型及应变能分布情况(从略)。

b 仪器结构在环境动态激励作用下位移响应

模态分析仪考核空间光学仪器结构固有的力学特性, 在环境动态载荷激励作用下是否满足仪器性能指标要求, 还须进行位移响应求解来考核。响应求解的重点在于发射运载阶段, 通过随机振动及低频振动响应求解, 探明仪器结构在由基础输入的不同功率谱密度(PSD) 载荷作用下位移与应力响应, 判断结构是否会满足指标要求。

· 结构强度

为确保仪器在发射运载过程中不破坏, 不产生残余变形, 必须保证仪器结构具有足够的强度, 即在冲击与过载载荷作用下仪器结构应力响应(最大主应力)必须小于相应材料的许用强度应力  $\sigma_b$  及许用微屈服应力  $\sigma_{micro}$ , 如表 3(从略)。

· 尺寸稳定性

如何保证空间光学仪器在空间工作状态下, 保持仪器结构尺寸稳定, 尤其是在空间恶劣温度环境条件下, 要求做到仪器系统视轴(LOS)不发生漂移, 光学镜头及光学系统的波前畸变(WFE)小于许用值, 是设计工作者面临的极其重要的关键技术。为了探明温度环境对光学仪器 LOS 及 WFE 的影响的规律及寻求合理热设计的途径, 进行了如下工作:

(1) 确定仪器及光学元件的许用温差范围及随时间变化波动的要求, 为热控设计提供依据;

(2) 在空间温度环境条件下仪器内瞬态温度场变化及结构位移响应。

通过瞬态温度场仿真得知仪器结构内温度分布随时间变化的规律:

- 光学元件温度场分布;
- 观察仪器及关键构件的热惯性;
- 热交换方式对动态温度分布的影响;
- 内部热源对动态温度分布的影响;
- 为热控设计提供依据;
- 检验热控效果(通过温度分布及温度波动状况检验)。

通过热弹性仿真, 了解到:

- 在瞬态温度场作用下仪器结构的变形规律;
- 检验热控效果(通过仪器热变形及镜面畸变检验)。

#### 2.2.4 数控加工仿真与 NC 代码生成

针对虚拟产品中的关键零件, 进行刀具及夹具选择、加工环境模拟及加工过程仿真, 实现加工工序及有关工艺参数优化, 并且生成加工代码可直接传输给数控加工中心, 进行高精度加工。通过 NC 加工仿真, 提供一个虚拟加工环境和形象的加工过程描述, 可更直观地审视所设计产品的加工可行性, 工艺合理性。作为综合设计评价中的重要一环, 对虚拟产品设计参数的确定起着至关重要的影响。

目前我所已形成一体化的 CAD/CAM 工作平台, 实现了由虚拟产品(虚拟关键零件)到真

实物理产品(真实零件)的直接连通,极大地提高了生产效率。以光学仪器中常用的变焦距凸轮为例,原先靠传统手段加工一个变焦距凸轮至少需要一星期时间,而现在一天就可以干5个同样变焦距凸轮,使生产效率提高25倍以上。由于是在CAD/CAM一体化平台上作业,产品研制开发走最短路径,减少了大量中间环节及人为影响因数,使产品质量和效益都有了明显的提高。

综合设计评价的核心在于综合,综合的依据建立在:

- 产品合格与否的判据及影响因素加权。

- 站在系统的高度,以动态的观点综合评价产品的性能。我们研制开发的产品大都为光机电整机系统,决定整机性能的有光、机、电、算等诸方面影响因素,这些影响并不是孤立地、静止地起作用,而是相互制约,实时、共同作用。我们在综合设计评价中致力于整机光机电系统动态性能分析,例如,某一精密伺服跟踪转台,要求具有良好的动态特性,以往这样的问题仅仅从机械角度或只从伺服控制系统角度考虑,机电双方相互推委对转台动态刚度低的责任,后来经建立机电一体化的二阶系统动态特性分析模型,联立求解,找到了影响系统动态性能的规律。分析计算结果表明与实际测试结果基本一致。又如,环境温度变化将会严重影响空间光学仪器分辨力,为此,我们进行了光、机、热系统瞬态分析,揭示了环境温度变化对光学仪器温度分布瞬态变化的规律、光学仪器结构瞬态热变形的规律以及相应的光学系统性能变化等规律,根据这种影响的规律找出对策,改进了设计并提出了热控方案。

- 以CAD/CAE/CAM产品工程数据库(PDM)及计算机网络平台为支撑,保证数据的唯一性及相关性。

### 2.3 关键技术之三:CAD/CAE/CAM系统集成

CAD/CAE/CAM系统集成是实现由虚拟产品到实际产品这一高效技术路线的基础。我们初步做到了CAD/CAE/CAM技术集成,使由CAD技术构造虚拟产品、由CAE技术为主进行综合设计评价及CAM技术的数控加工仿真到实际NC加工,形成一有机整体;在建立工程数据库及计算机网络的基础上,实现了CAD/CAE/CAM的信息集成;更为重要的是我们已形成了从事CAD/CAE/CAM工作配套的技术队伍,初步实现了人的集成,形成了一支能协同作业的快速响应队伍。

### 2.4 关键技术之四:工程数据库与计算机网络

从研制虚拟产品直到真实产品生成,整个过程都是建立在工程数据库及计算机网络平台支撑环境下运行的。工程数据库主要承担产品的数据管理,包括虚拟产品开发过程中版本控制、综合设计评价过程中各环节间数据转换,提供镜头库、材料库、标准件库、电子元件库等功能。计算机网络承担并行工程运做时各题目组间数据通讯,此外,通过INTERNET网建立了与外界交换信息的渠道,不仅使我们借助这个窗口了解国内外(目前主要是国外)同类产品市场状况及发展水平,而且就工程中的技术难点可以向国内外同行请教或直接下载有关程序,如光机工程分析接口程序就是从网上下载得到的。我们切实的体会到网在信息的扑获和交流中正发挥着越来越必不可少的重要作用。

### 3 应 用

自从 1988 年我所首次引进 CAD 工作站以来, 1992 年、1995 年又相继二次扩充、升级工作站与数控加工中心等设备, 配备了国际一流的光机电 CAD/CAE/CAM 软件, 如 CODEV、S7K、UGII、IDEAS、PATRAN、MOLDFLOW 及 CADENCE 等, 同时根据实际工作需要又自我开发了大量应用软件及数据库, 如光学设计软件包 GOSA、汉化 S7K 机械设计软件、光机参数化设计、光学镜头数据库及常用电子元件数据库软件等, 现已初步形成具有一定规模的光、机、电 CAD/CAE/CAM 及数控加工应用平台, 在实际工程及产品研制开发中发挥越来越重要的生产力作用。多年来, 运用 CAD/CAE/CAM 技术, 我们先后成功地完成或正在完成若干国家重大工程项目及市场需求产品的方案论证、虚拟产品构造、综合设计评价及数控加工等任务, 其中包括:

空间光电工程、国家 863 高科技项目、国防工程项目、工业设备(如, 激光熔敷机、往复式抽油机等)、医用设备(如, CO<sub>2</sub> 激光治疗仪、透视仪等)、民用产品(如, 活体指纹检测仪、家用汽水发生器等)。

大量工程及产品研制开发实践使我们切实体会到 CAD/CAE/CAM 技术 给我们带来的好处:

(1) 实现了许多以前想做却无法做到的事, 如所想即所得的“虚拟产品”; 及早、全面地揭示隐患的“综合设计评价”; 实现研制开发走最短路径甚至无图加工的 CAD/CAM 集成技术等。

(2) 研制开发产品效率明显提高, 表现在如下几方面:

- 方案论证所用时间只要传统方式的几分之一, 并且由于采用构造“虚拟产品”及“综合设计评价”等手段, 使论证的质量有了极大的提高, 为赢得市场及重大工程项目夺标提供了有利的武器;

- 为详细工程设计带来极大方便, 通过由虚拟产品的 3D 模型直接转为 2D 几何图形, 使出图时间大大缩短, 一般只需原来出图时间的四分之一;

- 由于 CAD/CAM 集成, 使设计与加工形成最短路径, 提高工效 30 倍以上。

(3) 增强了竞争实力, 体现在如下两方面:

- 具有适应市场竞争的快速响应能力: 应变快, 多品种, 高质量及低成本地推出新产品, 根据市场的需要, 我们在短短几周甚至几天时间就先后构造出活体指纹仪、医用透视仪、激光治疗仪、激光熔覆机及油田用抽油机等虚拟产品, 受到用户好评, 赢得市场;

- 增强争夺国家重大工程项目的实力: 具有强有力的攻关能力, 通过计算机仿真、工程分析计算等手段可以深入地探讨有关技术难点并提出解决方案。如空间光学仪器的热控问题, 振动问题等;

(4) 通过实际运用, 培养了一支以年轻人为主体的 CAD/CAE/CAM 技术应用队伍, 作为种子队, 为未来的发展及更大范围的推广, 打下了良好的基础。

## Technical Route and Application of CAD/CAE/CAM on R & D of Products

LU E, YANG Hong-Bo, WANG Yan-Feng, NIU Xiao-Ming, WU Qing-Wen  
(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

This paper describes the technology route and the characters of application in R & D of products by means of CAD/CAE/CAM technology, and it emphasis on the effects of Virtual Products and synthesis design / assessment in the development of products. The advantages of using CAD/CAE/CAM technology for practical engineering project and product development are also mentioned with practice experience.

**Key words:** Virtual Product, Synthetic design assessment, Concurrent engineering

卢 镔 男, 1941 年生, 长春光机所光电工程部 CAD/CAE/CAM Lab. 研究员。