

出国考察报告

(七) 81—10

美国宇航结构设计与分析 发 展 概 况

一九八一年八月

美国宇航结构设计与分析发展概况

沈以明 汪炳麟

美国航空与宇航学会、机械工程师学会、土木工程师学会及直升飞机学会主办的“结构、结构动力学和材料会议”基本上每年召开一次。今年是第22届会议，又是AIAA成立五十周年，因此文章很多，会议格外隆重。许多文章是预示八十年代发展动向的。通过参加会议和参观有关的高等学校和工厂对当前空间结构的结构分析、结构设计的发展动向有所了解。现选取四个专题介绍如下：

- 一、计算机辅助设计的进展情况。
- 二、结构模态分析技术的动向。
- 三、两种新的热防护系统。
- 四、有关复合材料的发展、分析、工艺概况。

一、计算机辅助设计的进展动向

(一) 国外 CAD 技术的回顾

在西方 CAD (Computer Aided Design) 技术早在七十年代初就见诸报导。“NASA 结构分析程序”即 NASTRAN (NASA STRuctural ANalysis) 早在七〇年秋就被美国政府解密，而应用于各种公用的工程上。NASTRAN 是一种通用的结构分析计算程序，是由 NASA 的 Thomas G. Butter 负责在 1964 年开始研究，头五年就化费了三、四百万美元。结果产生了一种大规模的程序 (150000 Fortran 卡片)，使它具有了很广的解题能力。现在，在兰利研究中心 (Langley Research Center) 的 NASTRAN 系统管理办公室 NSMO (NASTRAN System Management Office) 指导下进行着改进与维修计划。它可以进行十二种类型的分析。

1. 静力分析；
2. 包括惯性释放 (Inertia Relief) 的静力分析；
3. 具有微分刚度 (Differential stiffness) 的静力分析；

4. 屈曲分析；
5. 非线性材料分析；
6. 正则模态 (Normal Modes) 分析；
7. 直接复本征值分析；
8. 模态复本征分析；
9. 直接瞬态分析；
10. 模态瞬态分析；
11. 直接频率和随机共振；
12. 模态频率和随机共振。

NASTRAN 的元素有：梁（杆）、拉杆、剪切板、扭转板、平面应力元素、板弯曲元素、一般的壳体元素、锥壳元素、双曲壳（环形元素）、轴对称固体元素、标量元素 (Scalar Element)、及一般元素。

NASTRAN 分析都是用直接刚度矩阵位移法。它可以用 IBM 360、370 系列、SRU 1108 和 CDC 6000 系列的计算机。

NASTRAN 在国外应用已很普遍，也有许多改进型（如美国控制数据公司的改进型的 NASTRAN 程序等）。这种情况是和他们拥有数量众多的大容量电子计算机这一特点相一致的。NASTRAN 用于航空结构分析和空间飞行器结构分析常有所板导。如图 1 就是一个直升飞机机身的结构分析计算模型图。把机身分成了 343 个元素（由薄膜、梁、杆组成），共 115 个节点，450 个自由度。求出了它的频率和模态。

另一个使用较多的结构计算程序就是动力分析自动系统 ASKA 程序 (Automatic System for Kinematic Analysis)。它也是一种专用于结构分析的大型通用软件单元 (Software package)，所用的方法也是有限元位移法。是由西德斯图加特大学航空与宇航结构静动力研究所建立起来的。具体负责人是 Argyris 和他的同事。ASKA 所使用的语言也是 FORTRAN 语言。因此它所适用的计算机也是板广泛的，可以用 IBM 360 系列、370 系列、CDC 6000 系列 Univac 1108 等。

ASKA 可以用于线性静力、线性动力学分析（称为 DYNAN 即 Dynamic Analyzer 之简称）。非线性问题只有少数可以应用。如材料非线性、几何非线性等。

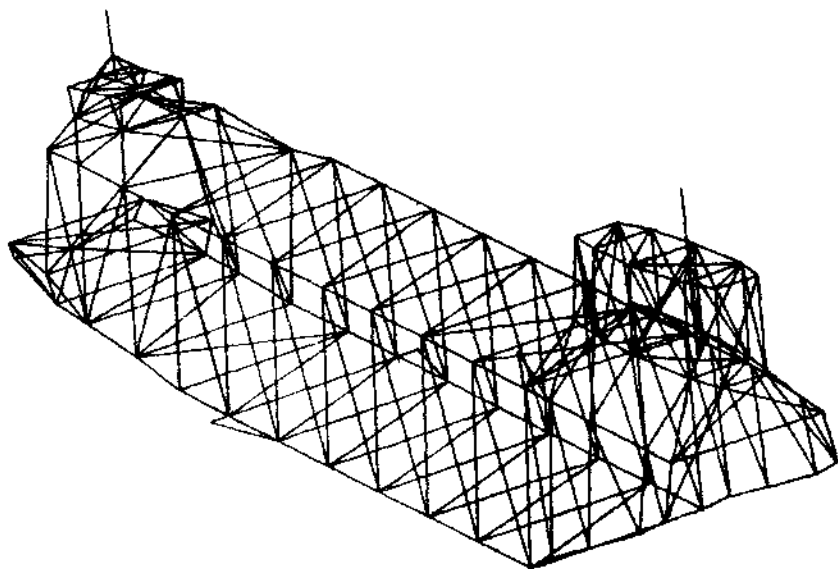


图1 飞机机身结构分析计算模型图

ASKA 程序是由所谓“段”(Segments)组成的。在程序执行期间它们被输入磁芯。段分为“根段”(root segments 总保留在磁芯中)、第一段、第二段等(当需要时,它们可以输入磁芯并复盖别的段)。

ASKA 元素共有 41 种,可分为凸缘元素、薄膜元素、板弯元素、壳元素、环元素、梁元素及三维元素。

ASKA 所能解决的问题类型有:

1. 平面应力问题;
2. 板弯曲和壳体问题;
3. 三维问题;
4. 动力学问题。

图2所示是一个多层甲板的计算模型。它已被简化为各向正交异性 QUAM 4 元素,用 FLA 2 元素组合而成。

作为第一次近似,假定弹簧刚度为无穷大,质量集中于半个结构的 26 个主节点。对于对称振动求得的前二阶频率 (21.6Hz 和 27.8Hz) 非常接近于实验数据 (22Hz 和 27Hz)。

ASKA 的“预”处理和“后”处理是需要用户来做的。而且是必须做的。

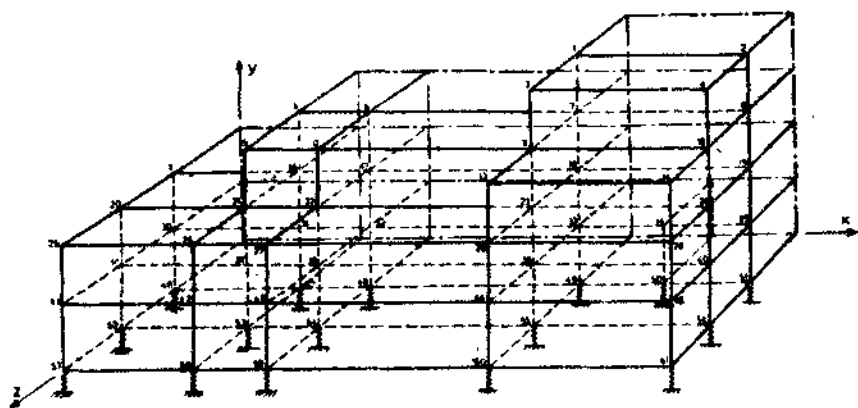


图2 甲板室的计算模型

除了以上两种著名的大型通用结构分析程序而外，还有DAISY程序（是由Arizona大学的H.A.Kamel建立并由洛克希德导弹和空间公司的导弹系统部发展的）、STARDYNE系统（是由MRI即Mechanics Research Inc力学研究公司发展起来的）、STRUL程序（由土木工程系统实验室发展起来的）、MARC程序（由燃烧工程公司CEI建立和发展的，专用以解决非线性大位移静力问题，如压力容器）等。

这些程序究竟那些通合于我们之急需，又符合我们的设备情况，便于我们的人员培训呢？我们是带着这种心情参加会议并和有关工程技术人员探讨的。

（二）从会议上看到的动向：IPAD 和 CAE

从会上发表的文章看以及和一些工程技术人员探讨的意见看，现在CAD已向着更高的阶段发展，即向着跨学科综合性程序发展。编制数据输入的自动化程序减轻设计、分析人员的准备工作量。尽量使用各种“预”信息处理机和“后”信息处理机，进行数据的预处理和后处理。建立数据管理系统避免重复的运算。大型计算机和小计算机综合使用以充分发挥各种计算机的效率，等等。下面我们举一种IPAD软件系统来加以说明。

IPAD(Integrated Programs for Aerospace-Vehicle Design)是航空和宇航飞行器设计的综合程序。最早释密见诸报导在1979年。但当时还不是一个完整的软件系统。经过逐步完善和发展，现在已构成IPAD软件系统。它不是单个学科的专用程序，而是跨学科的。

用来处理和综合跨学科的数据和程序。可以减轻设计人员输入数据的准备工作。由于一个复杂的航空与宇航结构的设计涉及到结构、空气动力学、推进等学科，所以在设计过程中需要各学科之间数据的交流和综合，直到产生一个最佳方案。以往，每个学科分别有了自己的专用程序。但是在各学科程序的格式协调方面却很少考虑。后来在这方面不断地努力，企图做到在计算机内进行自动的数据交换。如用于飞机机翼结构的DAWNS (Design of Aircraft Wing Structures)就是这样一种程序，由于计算机容量限制，其模型是很粗糙的，不能进行深入的研究。以后又有SAVES 综合程序 (Sizing of Aerospace Vehicle Structure)，这是在结构学科范围内的一种综合程序，在各程序间的数据交换是用卡片和磁带来完成的。再往后有了ISSYS (Integrated Synergistic Synthesis System) 综合迭加合成程序。

IPAD 则是为了通用目的建立起来的。它是一种相互作用的计算系统，用来处理涉及到跨学科设计数据的程序。图3代表了计划的IPAD系统的程序方框图。表示了设计、分析、和制造过程。IPAD系统有一个数据库管理系统 (Data Base Management System)，也叫做RIM系统 (Relational Information Management System)。它能贮存和管理大量的数据。在数据库中的数据包括设计准则、人力一览表 (Manpower Scheduling)、价格情报、工艺档案手册等。它可以由许多不同方法组成以适应不同用户的需要。它的容量受到计算机硬件配备的限制。RIM 在设计各个阶段 (方案设计阶段、初步设计阶段、正样设计阶段) 都适用。它帮助综合和组织与设计有关的数据。RIM 是IPAD 的情报信息处理机 IPIP (IPAD Information Processor) 放在主计算机内。而结构设计、分析程序 SPAR 则放在小计算机中。到目前为止，有关生成和翻译关于设计准则、外形参数、剖面性质和材料性质、载荷数据的程序还没有编入IPAD系统中，因此还需要用人工把磁带数据输入数据库。在运算之前，执行控制系统 (Executive Control Program) 询问用户关于结构分析的类型、其设计判定和数据需要。预信息处理机从RIM数据库中检索数据并使之格式化以适合于输入SPAR (结构分析程序)。输入之后进行运算。其运算结果又由“后”信息处理机整程使之格式化并输出到RIM 数据库中。但是现在试图把这种系统发展成“普遍有限元模型制造者” (generalized

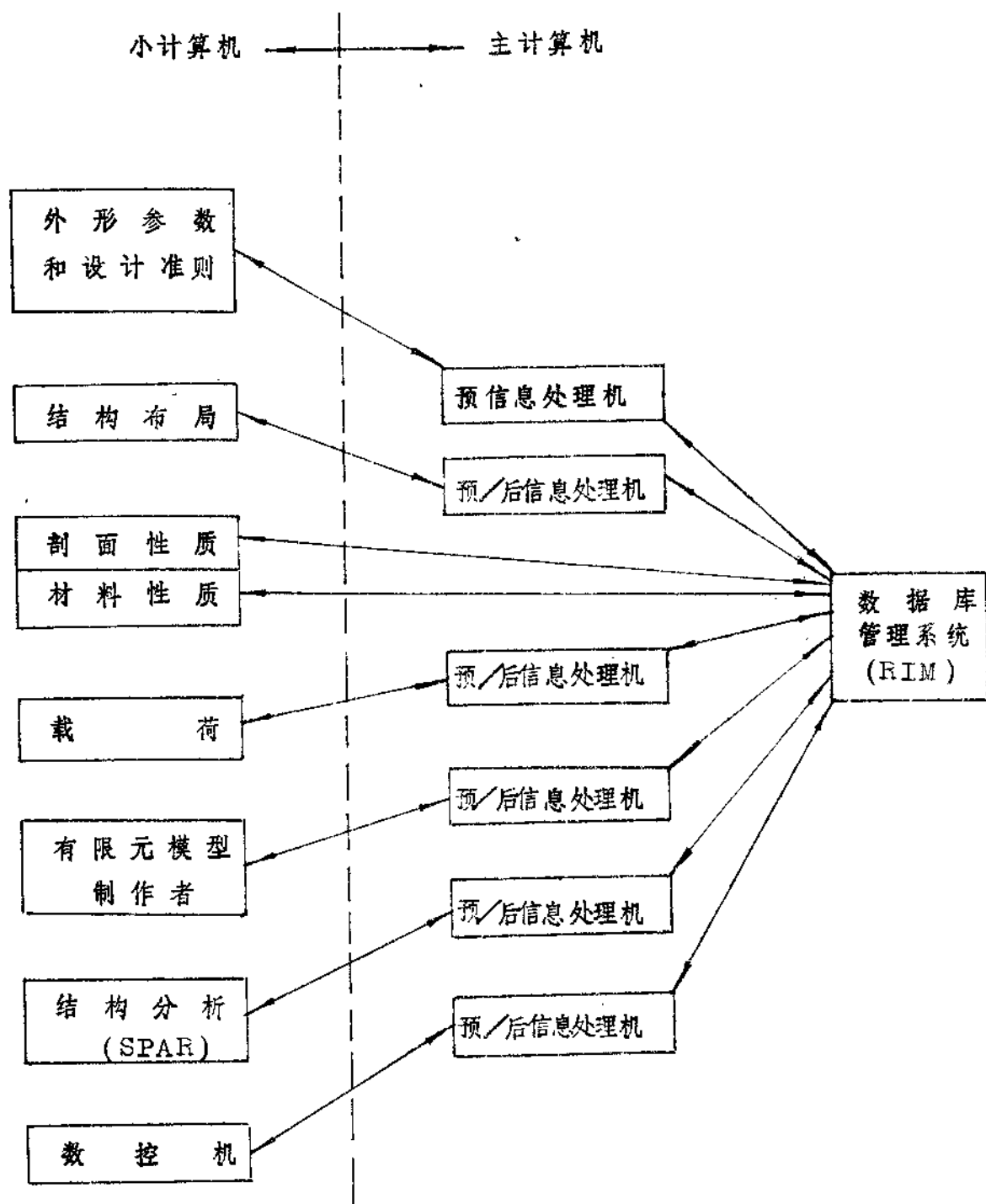


图 3 计划的 IPAD 内部设计过程方框图

finite element modeler)。它将利用基本几何和设计数据（在AD-2000内生成并贮存于RIM中的数据）。利用AD-2000的辅助设计能力来进行结构设计，不仅能生成结构的几何形状（geometry），而且可以给各种实体和元素以指定的设计特性。这种几何和设计特性的数据可以从AD-2000数据库中检出放在一些专门的文件中。由于AD-2000是放在小计算机中而RIM是在主计算机内，所以专门有一种软件用以转移这些数据文件。“后”信息处理机AD2RIM把数据格式化使它适于输入RIM，打开RIM数据库，把这些数据加到各种实体事先指定的关系式中，随即关上数据库AD2RIM是一种Fortran程序，它能通过Fortran取数子程序（Fortran — Callable Subroutines）来存取和修正RIM数据库。其关系式由用户来确定。用户和RIM的相互作用如图4所表明那样。现在已具备了恢复的能力，即把这些数据恢复为直线、三角形、平行四边形、直纹面（Ruled Surfaces）的能力。还正在发展恢复肋面和机身隔据的方法。

接点（joints）或节点（nodes）是用信息处理机JNTSET从基本几何数据中（AD-2000中生成并贮存在RIM中的数据）检索出来的。JNTSET是Fortran界面信息处理机。它消去AD-2000给出的重复的座标，剩下RIM控制语句的独特的节点，然后分类和计数再存入RIM以便检索。目前能做到的只限于生成直线、三角形、平行四边形元素的顺序接点位置。还不能生成由若干元素组成的表面和曲线的顺序接点位置。

与AD2RIM类似的SPARIN是一种预信息处理机。SPARIN从RIM中取出有关数据，建立适于输入SPAR的关系式。产生SPAR输入文件。它包含物性数据（材料性质、剖面性质、梁轴系统、接点位置、约束条件、元素联结性及载荷。还有结构分析所专用的静力、动力、屈曲、振动或瞬态的数据）。还有需用人工插入的文件。

有时，用JNTSET所得的顺序接点位置过于复杂。这时，也可以用一种ADSPAR程序使SPAR直接与AD-2000联系。这种ADSPAR利用AD-2000生成的基本几何数据生成线段、三角形、平行四边形的节点位置和元素联结性，直接输入到SPAR中，并进行运算。今后还计划把ADSPAR和JNTSET合并为一个信息处理机。

关于IPAD系统的概况大致如上所述。我们所见到报导的应用有三个实例。

小计算机 ————— 主机计算机

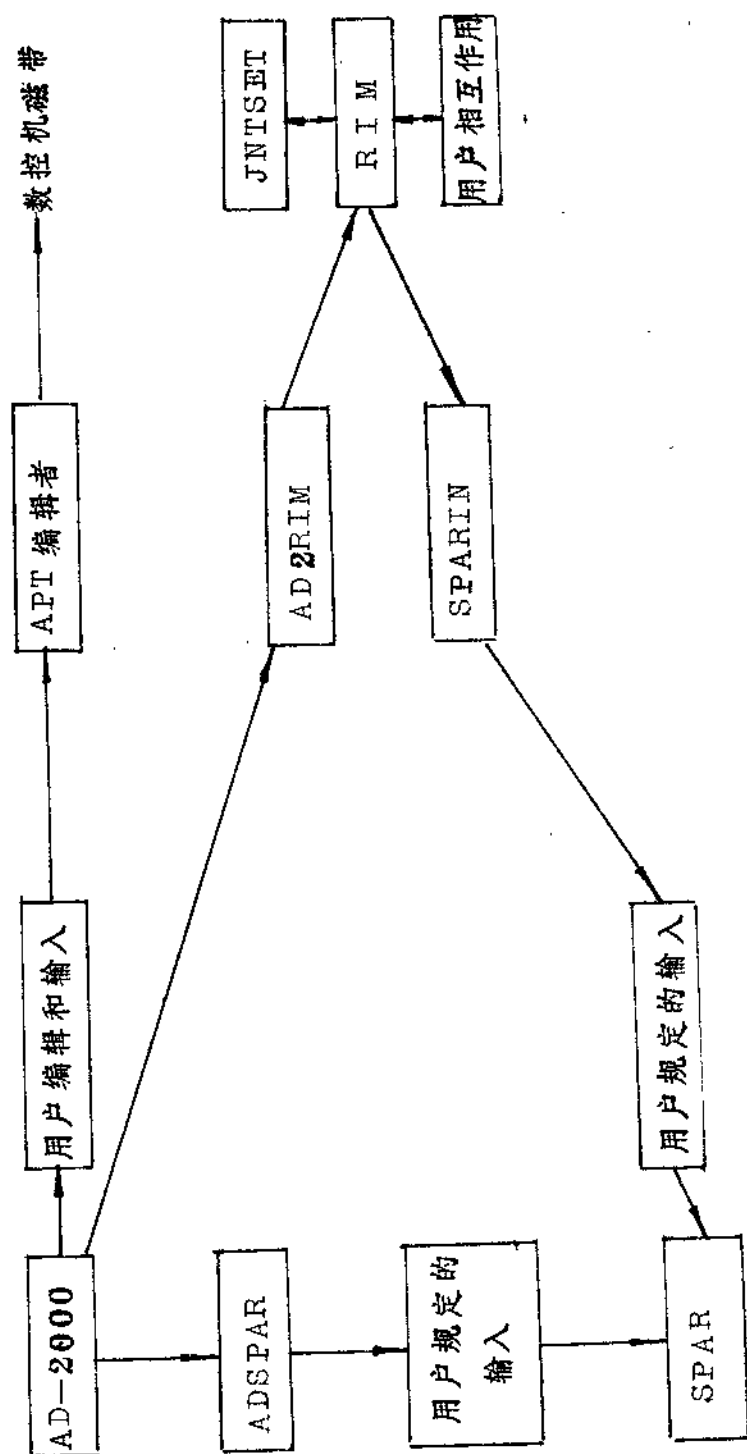


图 4 现有的 IPAD 内部设计过程方框图

1. 大型空间系统的研究。
2. NASA 的跨音速风洞机翼设计。
3. 土木工程结构。

大型空间结构分析的情况正如图 5 所示，利用 IPAD 系统来分析其振动特性。这个大型空间结构由一维轴向元素重复而构成的。由于结构的重复性，因此仅需确定基本的结构元素和其装配关系，然后复制这些元素即可。（如图 6 所示）。

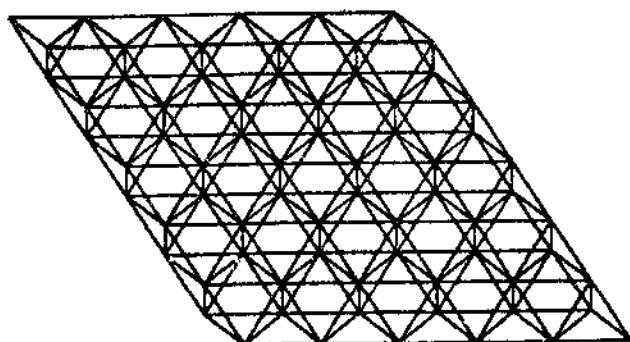


图 5 大面积空间结构离散的有限元模型

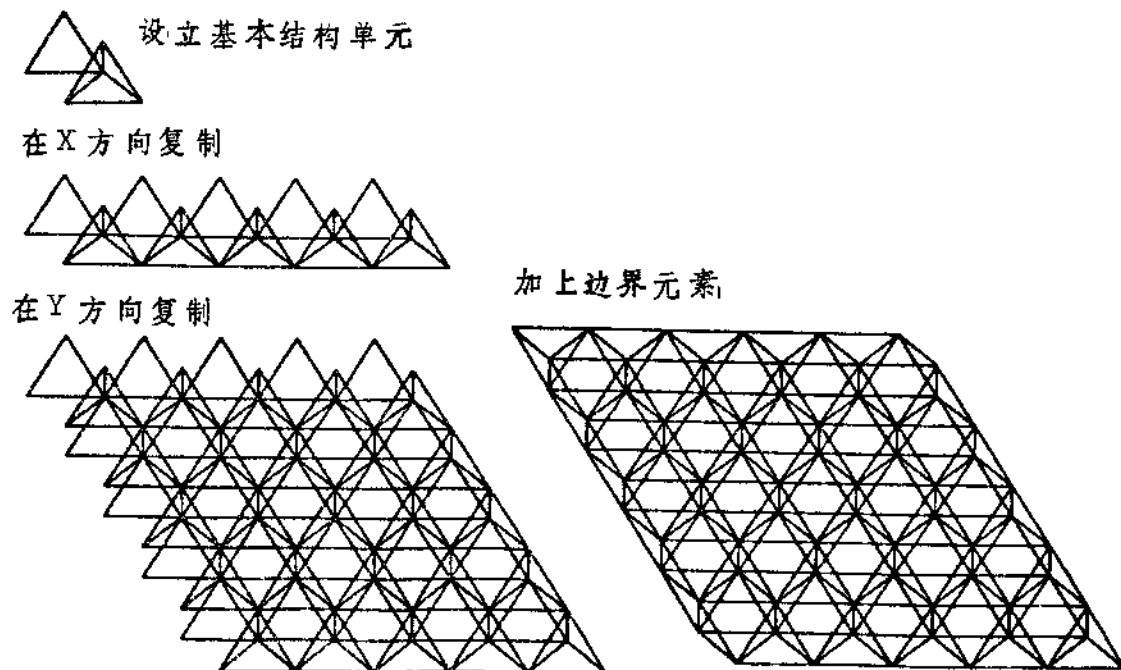


图 6 大面积空间结构的生成

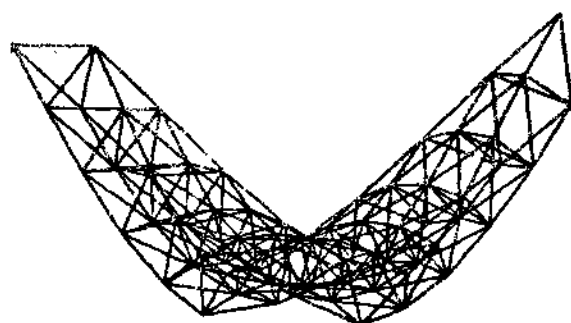


图7 大面积空间结构的基本模态形状

几何数据由小计算机转移到主计算机，然后由AD2RIM存入数据库RIM。JNTSET则从RIM中取数形成一组顺序节点，再存回数据库中。SPARIN信息处理机从RIM中取出这些几何数据和顺序节点关系式并形成SPAR输入文件。输入之后，SPAR程序即开始运算。得到了该结构的振动特性。基本模态如图7所示。

关于土木工程技术非常类似于我们的某些结构。也是据架——板条结构 (Frame-Panel Structure)。

IPAD 还在不断改进。如正在建立一种信息处理机。用户通过它可以向RIM询问并显示图形或把结果列表显示，还可编入能描述航空和宇航结构载荷的程序。在AD-2000中放入一个后处理机，使之能适应各种原因所要求的设计修改。

从上面对IPAD系统的简单叙述不难看出它的特点是发展了各式各样的信息处理机 (这些信息处理机本身用的都是Fortran语言)，以此减轻设计和分析人员输入数据的准备工作。而这样准备在目前对我们还是极其费时的。另外一个特点是IPAD有一种综合能力，能把以前各个学科的简单用途的分析、设计程序加以综合后产生多用途的设计、分析能力。而这种能力是由于建立了DBMS (或称RIM) 这个数据库管理系统而获得的。实际上，这个数据库中的数据除了手册和设计准则数据之外都是各种学科程序输出的结果。总之，这样做的结果，就使得设计、分析人员可以节省出更多时间。这就是计算机帮助设计的根本目的吧！即把人们从简单的重复性劳动中解放出来，使之用在更富有成效的思考上。

八十年代的发展前景又是什么呢？下面我们介绍一种 CAE (Computer-Aided Engineering)，即计算机帮助工程的设计原则。这是会议上作为展望八十年代计算技术进一步介入工程设计而发表的。对于其细节还并不十分清楚。但其原则却是清楚的。

CAE 这一术语表示了和今日工程设计有很大不同的设计路线。它不是计算机的信息处理机，也不是一组终端硬件，更不是软件编码线，而是一种设计原则。这种设计原则是基于八十年代的需要而提出来的，他们认为面临八十年代挑战的中心问题是生产率，就是耗费的工时（从设计到生产）以及产品质量，即市场竞争能力。而 CAD 技术（计算机辅助设计）、CAM (Computer Aided Manufacture) 这些单一的自动化过程已不能满足需要。八十年代所需要的是“革命”而不是“渐进”。这个革命就是 CAE。这个革命类似于最近在电子工业中已经完成的革命，即在实际生产之前就能模拟产品的性能。他们认为在八十年代里要求在机械工程领域内完成类似的工作。

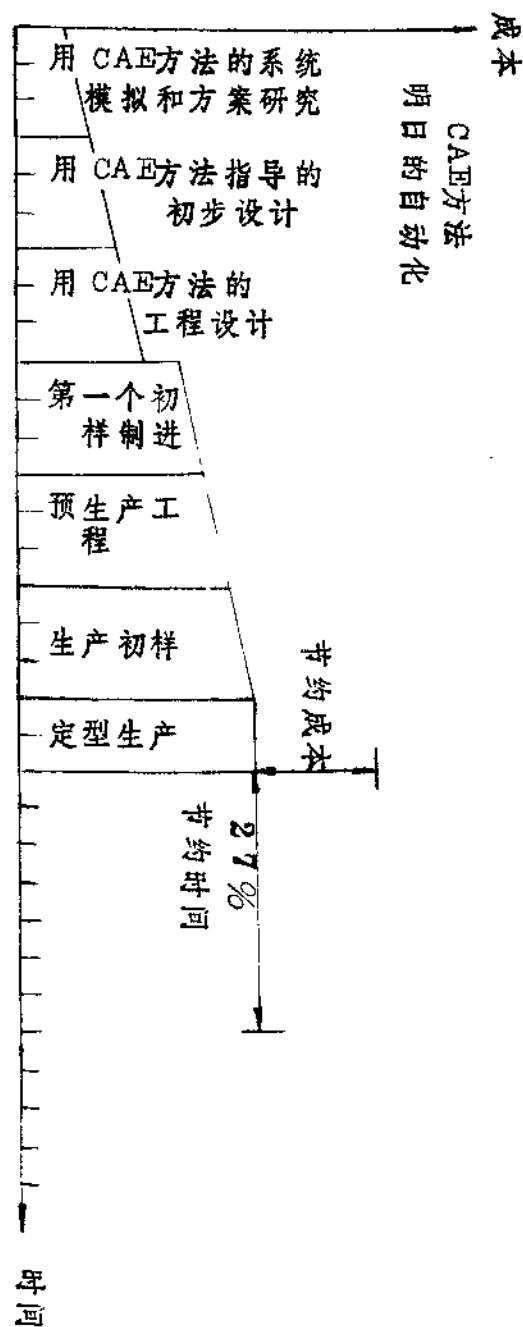
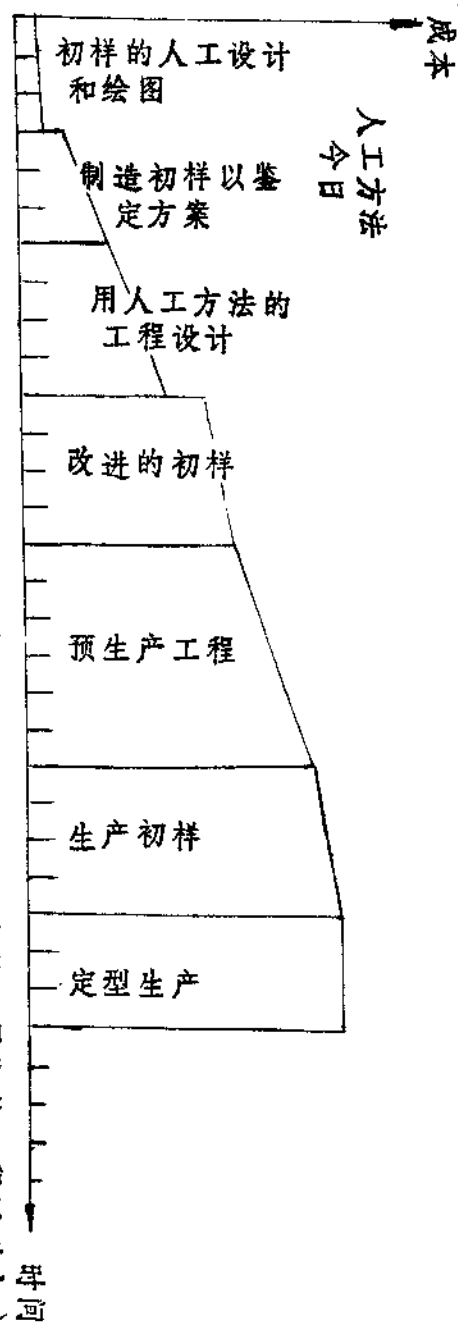
CAE 设计原则是把三个工程要素在产品研制的每一个阶段都综合考虑，使之能得到低工时消耗、低成本和良好的工艺性，从而提高产品质量和市场使用价值。这三个工程要素是：

1. 应用（性能、结构的完整性、可靠性、成本等）。
2. 装备（硬件、软件）。
3. 技术、数据和情报管理。

目前在机械工业中，初样 (prototype) 是用以估计产品质量和产品性能所必须的基本样品。而 CAE 逼近法则借助于计算机选择方案的能力，把重点放在产品方案设计阶段。广泛地利用分析手段和试验技术，在计算机内实现产品设计的迭代法。这样，设计人员就能够早日在计算机内研究并得到优良的产品结构设计，初样还是需要的，并不能完全被取代。但是由于采用了 CAE 就可以减少初样的数目。和今日传统的“人工”方法 (Manual Method) 相比，其节约时间和成本如图 8 所示。

图 8

CAE 方法和人工设计方法的比较 (表明在 CAE 方法中重点放在早期的工程活动上)



CAE 逼近法包括了五个阶段。如图 9 所示：

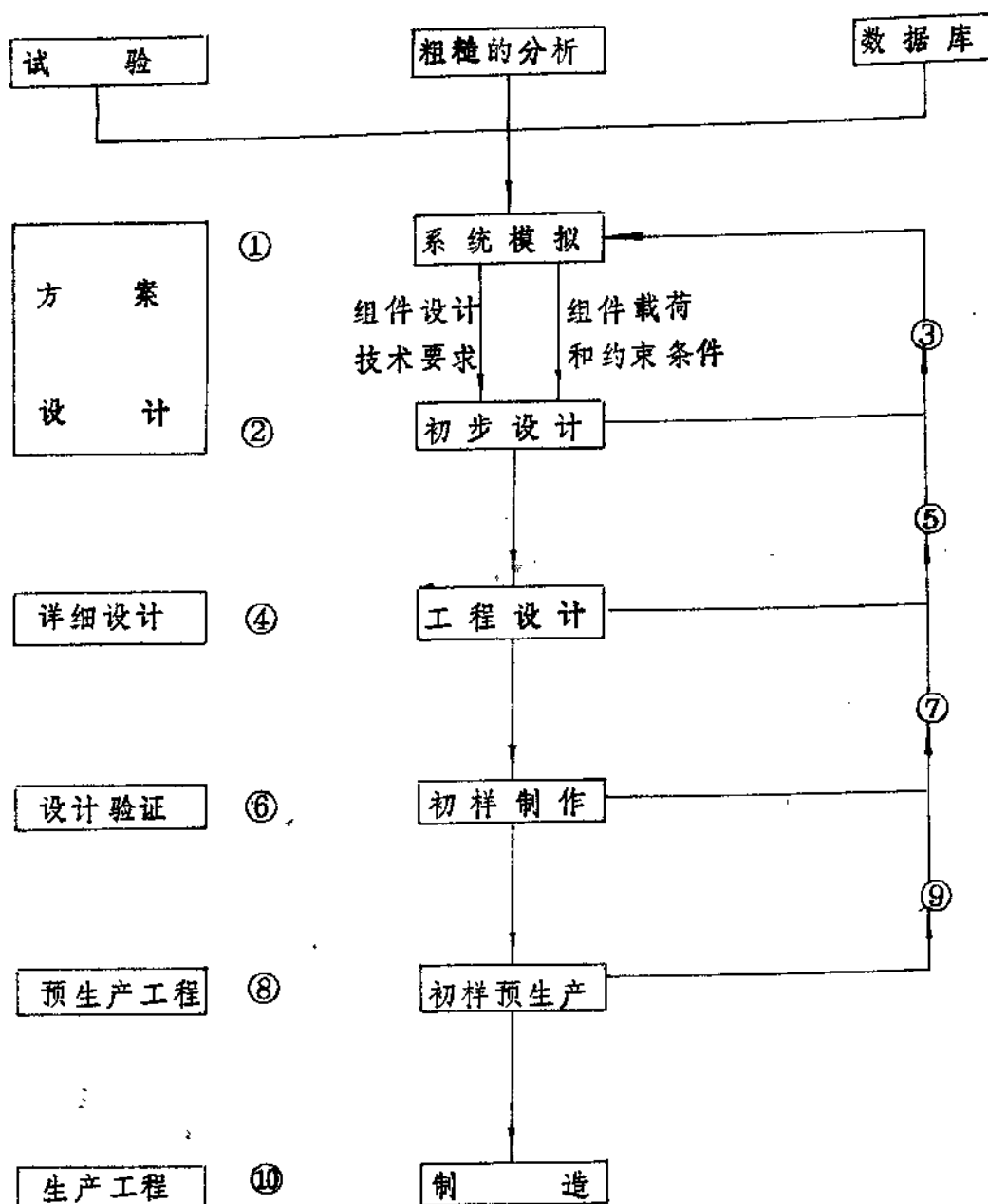


图 9 CAE 基本原理的设计阶段

1. 方案设计 (Concept Design)

这个阶段要装配一个模型，模拟整个产品和系统的特性。总的系统模拟包括系统的组件和近似的组件间连接，如图 10 所示。

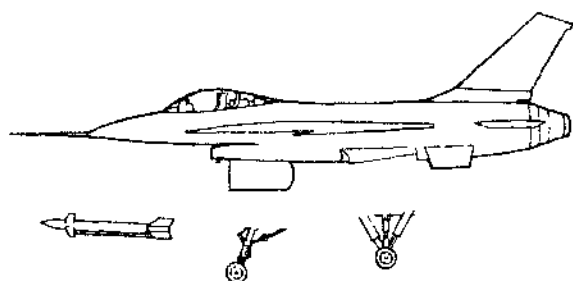


图 10 包含单独组件的系统模型

各组件的数据可以通过有限元分析、模态试验或直接从数据库中取出，加以集中。这样可以广泛利用公共的零部件资料。这种方法十分灵活，它允许设计人员改进系统方案设计一直到他满意为止。

在这个阶段中要进行组件的初步计算，并用迭代法反复输回到系统模型中以改进系统并确定组件方案的可行性。

2. 详细设计 (Detailed Design)

在这一阶段对关键组件要用更详细的有限元模型 (图 11)。哪些组件是关键性的呢？这就是由前一阶段所得的情报和方案来确定的。对于这些关键性组件必须用更详细的模型进行更详细的探讨。把这些更详细的组件模型重新放回系统模型中去确定其联结特性，改进系统使之能更好地承受设计载荷、约束条件和环境条件，从而进一步降低费用和提高效能。

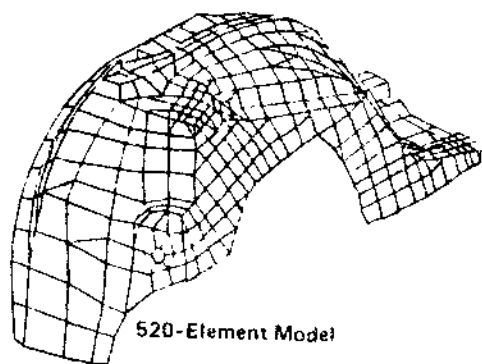


图 11 用于分析复杂有限元模型

3. 设计验证阶段 (Design Verification)

在这个阶段主要是制作一个初样用以试验系统和组件。但不是去评定设计方案，而只是去验证以前的预示的结果。由于前一阶段采用了迭代法，因此这一阶段的结构变化将是很少很少的。时间和费用将大大节约。

4. 预生产阶段 (Preproduction Engineering)

在这个阶段主要是制作一个初样用以试验系统和组件。但不是去评定设计方案，而只是去验证以前的预示的结果。由于前一阶段采用了迭代法，因此这一阶段的结构变化将是很少很少的。时间和费用将大大节约。

在这阶段中的主要内容是从工艺上（如数控磁带、工具设计、工艺流程、质量控制等）来考虑初样。由于前几个阶段中迭代法的应用，因此这一阶段中上面所设的几个工艺方面可以平行地迭行（以代替今日的顺序作业）。这样，时间和成本的节约在这一阶段更为明显。而且与今日传统相比，绘图已不是设计与制造间传递情报的唯一手段了。

5. 生产阶段 (Production Engineering)

由于在前几个阶段中使用了迭代法，取得了大量数据和设计经验。因此，当某种原因（如调整工艺设备）要求设计作相应修改时，设计人员可以很容易实现这种修改，从而节约许多时间和费用。他们称之为“柔性设计”。如果没有CAE“柔性设计”这种能力，到了这个阶段修改设计将是设计人员最讨厌的事情。目前传统的设计过程不可能进行这种迭代法。

多方面因素的探讨结合成一个有效的CAE系统。可以用一个CAE矩阵来表示（见图12）。

CAE系统还要求对大、中、小型计算机统一分配使用，组成一个计算机网络。复杂的问题用大型计算机。其次用中型计算机（例如IBM 4300系列和DEC VAX11/780）。而一般的问题用小型计算机。

（三）走我们自己的路——我们的一点看法

上面迭过两个典型的计算技术分别介绍了目前美国CAD技术发展情况和八十年代CAE的前景。目前我国的设计和国外相比还是有一段差距的，大型计算机很少，使用还很不普及。软件设计也处在一个早期阶段，离开组成计算机网络还是较远的。因此，当前我们应该结合实际情况选择一条切实的途径逐步赶上这个先进水手。在与会期间，友好人士向我们推荐的正是我们现在已经在开展工作的一条途径，即以中小型计算机为主，使用SAP程序。

SAP (Structural Analysis Program) 结构分析程序，是美国普及和流行的程序之一。因为没有专利，在别的国家也广泛使用。SAP程序是由美国加州大学Berkeley分校的E.L.Wilson负责编制的。它比较简单，没有复杂高级的语句，程序结构模块化。易于掌握，一般经十天、半个月的训练即可学会。1972年公布了SAP II。1973年公布了SAP IV。目前我们使用的是SAP V。证明其迭俗易懂，逐合我国的情况，

