

# 航空发动机与 CAE

**[摘要]** 本文简要阐述了航空发动机的发展历程及我国航空发动机行业的历史与现状，指出 CAE 在航空发动机技术发展中的特殊地位，并简要阐述了 CAE 的发展及技术概况；同时，文章罗列了一部分航空发动机设计中的典型 CAE 问题，并指出 ANSYS 在航空发动机行业具有的独特优势。

## 1. 航空发动机行业概况

1903年12月17日，美国莱特兄弟实现了人类历史上首次有动力、载人、持续、稳定和可操作的重于空气飞行器的飞行。这使得几千年来由少数人从事的飞行探索事业在后来的百年中发展成为对世界政治、经济、军事和技术，甚至人们的生活方式都有重要影响的航空业。

因此，从狭义上说，发动机是航空器飞行的动力，是航空器的“心脏”；从广义上说，发动机是航空事业发展的推动力，对航空器的性能和研制有着决定性的影响。

### 1.1. 世界航空发动机发展历史

航空发动机百余年的发展历史大致可分为两个时期：第一个时期从莱特兄弟的首次飞行开始到二次世界大战结束为止。这个时期内，活塞式发动机统治了40年左右的时间。第二个时期是从二次世界大战结束至今，燃气涡轮发动机取代了活塞式发动机，居航空动力的主导地位，开创了喷气时代。在燃气涡轮发动机的60多年发展历程中，大致经历了四次更新换代：

- 第一代是单转子亚音速喷气发动机。这一代发动机大多数在20世纪30~40年代研制，40年代末50年代初投入使用。压气机采用离心式和轴流式两种，总增压比在5左右，单管燃烧室，单级涡轮；推重比3左右。有代表性的机种有：美国的J47(TG-190)、前苏联的VK-1和法国的阿塔(Atar)发动机。
- 第二代是超声速涡喷发动机。这些发动机在第一代发动机的基础上有了许多创新，大都在50年代研制。主要技术特点是：双转子、进口导流叶片可调、超声速压气机、高温涡轮、推重比达到5左右。用这一代发动机装配的飞机都是超声速战斗机。代表机种有：美国的J79和前苏联的R11-300R。
- 第三代是超声速涡扇发动机。这一代发动机的研制始于60年代，主要技术特点是：涡扇发动机、核心机技术，2D设计、环形燃烧室、气冷涡轮、结构完整性设计、新材料、推重比8。这一代发动机的成长得益于全世界各种大型试验设备的建设、计算技术和制造技术的发展。用这一代发动机装配的飞机都是高性能超声速战斗机。代表机种有：美国的F404和F100、前苏联的AL31F和RD33、英国的RB199和法国的M88-2。
- 第四代是先进技术涡扇发动机。这一代从80年代中期开始发展，目前仍处于研制阶段。主要技术特点是：结构简单，抗撞击能力强，具有良好的耐久性可维护性；增加了不加力条件下的持续超声速巡航能力、采用2D喷管的有限矢量推力能力和隐身能力。第四代发动机的推重比为9~10。代表机种有：美国的F119、前苏联的AL-41F和英国的EJ200。

航空燃气涡轮发动机在60多年的发展历史中经历了众多技术进步，如下表所示：

表 1 航空燃气涡轮发动机的技术进步

年代	40~50年代	60~70年代	80~90年代	21世纪初期
机种	涡喷, 涡桨, 涡轴	涡喷, 涡桨, 涡轴, 涡扇	涡喷, 涡桨, 涡轴, 涡扇	涡喷, 涡桨, 涡轴, 涡扇
主要新技术	轴流压气机	超级合金	超音速巡航	超高推重比(15~20)
	加力燃烧室	轻量化设计	计算流体力学	超高涵道比(10~15)
	双位喷管	可调喷管	矢量喷管	超音速短距起飞/垂直着陆(STVOL)
	双转子结构	航改地面燃气涡轮	复合材料	变循环发动机
	高空模拟试验	高推重比(8)	全数字电子控制	多/全电发动机
	可调静子	高涵道比(4~8)	飞行-推进综合控制	陶瓷和碳-碳材料
	钛合金	计算结构力学	全寿命成本	系统级数字仿真设计
	3倍马赫数	三转子/单元体结构	优化设计/隐身设计	经济承受性设计
	气冷高温涡轮	数字电子控制	部件级数字仿真设计	

目前,美、英第一、二代均已退役,第三代是现役主力机种。由于其性能先进,且还在不断改进改型,服役期比第一、二代长很多,估计将使用到2010年左右,俄、法、日、印、韩等国第二、第三代并存,以第三代为主。

第四代战斗机是美、苏冷战对抗时期开始研制的,原计划90年代中期装备部队。自苏联和华约解体后,是否还需要继续发展,在美国和西欧开展了一场大辩论。许多国会议员提出,将F15、F16经现代化改装后,就可以达到应付未来“地区冲突”的要求。在此影响下,德国曾一度退出欧洲战斗机EF2000发展计划。但辩论的结果认为:F15、F16经改装后,不能跨越“代”的鸿沟。为了满足“全球到达,全球力量”的战略目标,发展第四代战斗机是必须的。这场辩论使第四代战斗机的装备时间推迟了十年左右。第四代战斗机具有隐身、过失速机动、不加力超声速巡航、短距起降、超视距多目标攻击和装备更先进的航空电子与武器系统等许多特点,较之第三代具有全面优势。美国将以联合战斗机JSF和F22这两种第四代战斗机轻重搭配跨入21世纪,从2003年起陆续装备部队,全面取代现役的第三代战斗机,成为美国、部分西方国家、甚至我国部分周边国家和地区21世纪上半叶的主战机种。

西方各国对航空动力技术的预先研究一向给予极大重视,开展了一系列大型研究计划。如美国军方早从50年代中期就开始实施航空推进技术探索发展计划;70年代初至80年代又相继实施了先进战术战斗机发动机计划(ATFE)、先进涡轮发动机燃气发生器计划(ATEGG)和飞机推进分系统综合计划;70年代末以来,美国政府(由NASA主持)也先后实施了发动机部件改进计划、高效节能发动机计划(E3)、先进螺旋桨计划和发动机热端部件技术计划(HOST)。正是这些研究计划,为各种先进军、民用发动机提供了坚实的技术基础,才使得美国达到了当今世界的领先水平,使军、民用发动机跨上了一个又一个技术新台阶。航空动力行业已成为世界各航空强国的军事工业和国民经济的重要支柱产业之一。

美国在研制第四代F119发动机的同时,从1988年起的15年内又投入50亿美元巨资,由军方与政府联合主持实施“综合高性能发动机技术计划”(即IHPTET计划);英国则着手进行先进军用核心发动机第II阶段计划(ACME-II)。其共同目标是利用计算流体力学(CFD)、结构力学、燃烧、传热、新材料、新工艺、电子调节和计算机仿真等方面的最新成就,使推进系统的能力在现有基础上翻一番,预计2020年后有可能研制出第五代推重比为15~20的发动机。这意味着他们用15年左右的时间,在推重比、耗油率、成本等方面取得的技术进步,相当于过去30~40年的成就,充分表明世界航空发动机技术呈现加速发展态势。

## 1.2. 我国航空发动机发展历史

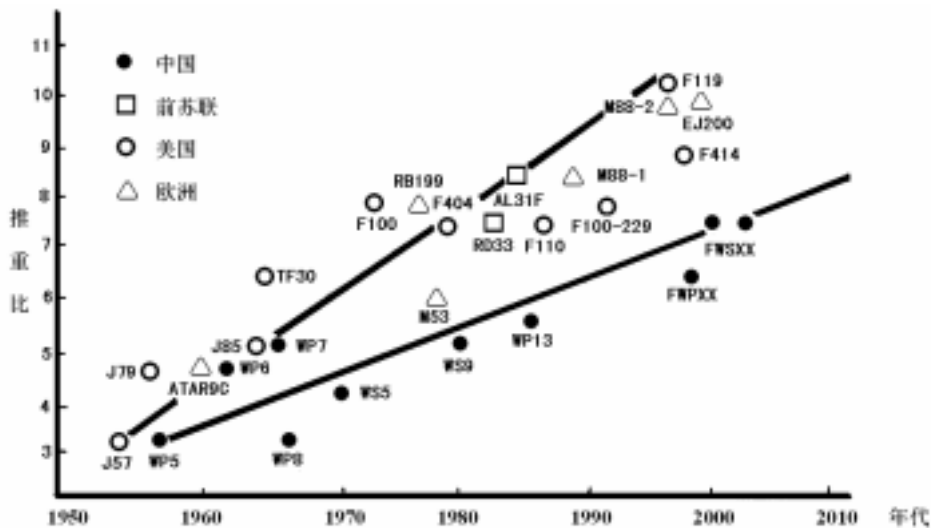
我国航空动力行业经过几十年的建设,从无到有,由小到大,在维护修理、测绘仿制、批量生产、改进改型、民机开发等方面均取得很大成绩。新机研制和预先研究也取得可喜进展,共生产了近60000万台各型发动机,为建立一支强大的人民空军、海军和陆军航空兵,保障国家安全和促进国民经济建设做出了重大贡献。

但是,航空动力长期在测绘仿制中徘徊,走了不少弯路,与加速发展的世界先进水平相比,我国航

空发动机大大落后了。我国现役军机大量使用的发动机，大都是仿制前苏联的产品或者是其改进改型，推重比为5~5.5左右，仅相当于国外早已淘汰的第二代水平；民机动力方面，目前生产的仍是仿制前苏联50~60年代的中小型涡桨发动机，干线民航机大涵道比涡扇发动机基本上还是空白；在航改燃机方面，80年代在成熟的航空发动机基础上改型了6种型号，生产了百余台，但仅占我国近800万千瓦燃机总装机容量的5%左右；从80年代初开始的高性能发动机关键技术预研，虽取得一定进展，但距工程应用还有一段较长的路要走；80年代中期开始研制的某发动机，虽已实现首飞，但距设计定型尚需时日。综合评估我国航空动力的总体技术水平，较国外相差一代半，落后约25~30年，而且这种差距还有进一步拉大的危险。

我国航空发动机落后，已成为严重制约整个航空工业快速发展的“瓶颈”，这是不争的事实。造成这种局面的原因很多，“冰冻三尺，非一日之寒”，客观上航空发动机技术十分复杂，研制难度很大，花钱多，周期长，我国工业和技术基础相对薄弱，预研和型号经费投入不足；主观上对航空发动机研制的复杂性和规律性认识不足，对预研工作重视不够，技术储备少；摊子大，战线长，力量分散，型号品种多。在国际形势出现变化和动力技术快速发展的新形势下，却未能及时进行必要的结构调整和技术改造；引进仿制机种过多且大都是当时该国的二、三流产品；对引进技术未能很好地组织消化、吸收和创新；对预先研究、打基础重视不够，预研投资强度太低，结果使基础薄弱，技术储备不足，许多关键技术没有提前突破，型号研制成了“无米之炊”，久攻不下，为了满足飞机对发动机的需求而不得不再来一轮新的引进、仿制，从而陷入“恶性循环”；在管理上，缺乏稳定、权威的中长期发展规划；在工业基础方面没有安排好提前突破先进的关键材料和制造工艺；等等。

事实上，早在上世纪60年代，周恩来总理就指出：我们的飞机得了“心脏病”。40多年过去了，这种状况并没有实质性的好转，国内民航干线客机动力已全部被国外所占领，而新研军机因没有自行研制的先进动力可用，不得不买装国外发动机。我军装备因动力而受制于人，形势十分严峻。根治飞机“心脏病”已刻不容缓，这是摆在我们面前严肃而又紧迫的任务。下图表明，从军用航空发动机最重要的性能指标“推重比”来看，我国航空发动机与国外发达国家对比呈现出剪刀差的落后趋势，我国航空发动机仿制生产起于50年代初，起步并不算晚，而70年代以后差距愈加大，与世界航空发动机技术的加速发展态势形成巨大的反差！



世界军用航空发动机发展趋势

值得特别指出的是，我国周边国家日本早就与美国合作生产第三代F110发动机，并参与世界一流水平的大型民用涡扇发动机的国际合作研制，目前又正在与美、英合作研制飞行速度5倍声速的HYPR-9组合循环发动机，力图在高超声速推进技术领域抢占领先地位。印度自行研制的GTX-35VS双转子涡扇发动机，推重比7.5左右，预计2002年将装在他们自行设计的LCA轻型战斗机上首飞（后改用美国的F404-F2发动机）。他们计划在未来几年内对其现有的780架各型作战飞机进行大规模更新换代，使现役第三代

飞机由目前的230架增加至560多架，还准备引进50架装有推力矢量喷管的俄制SU-30MKT战斗机，并计划在15年内生产150~200架。台湾地区虽未独自研制航空发动机，但在美国人帮助下，合资研制了FTE1042涡扇发动机，并成功地应用于“经国号”轻型战斗机（装备130多架）。此外继购买150架F16A/B之后，又引进60架幻影2000-5，明显地提高了装备水平，增强了空军实力。可以说，我国空军（包括海军航空兵和陆军航空兵）的装备，除了数量上仍占一定优势之外，其技术水平已经或即将被这些周边国家和地区赶上和超过。这种严峻的形势，对我国国家安全已构成严重威胁。对此我们应有高度警惕和足够的认识。

### 1.3. 新世纪我国航空动力具有良好的发展机遇

虽然我国还没有一台自行研制的发动机投入使用，但经过半个世纪的努力，我们进行了多个型号研制，开展了推重比8和推重比10发动机这两项大型预研工作，建成了包括大型高空台在内的基本配套的试验设施，形成了较强的制造加工能力。特别是改革开放20多年来的快速发展和对外合作，为21世纪航空动力的快速发展打下了较坚实的技术和人才基础。

过去航空产品的设计主要是依赖于各种试验，使得航空产品尤其是航空发动机的研制周期长、耗资多、风险高。近年来，由于信息技术特别是计算机辅助工程仿真（CAE）和计算流体力学（CFD）技术的发展以及大量试验数据的积累，20世纪90年代以来，在西方航空发达国家引发了一场设计技术的“革命”，初步实现了从“传统设计”向依靠计算机数学模型优化计算和虚拟现实仿真“预测设计”的转变，从而大大减少了试验工作量，提高了设计的成功率，既节约了经费，又缩短了研制周期。使发动机的研制周期从过去的10~15年缩短到6~8年甚至4~5年，试验机也从过去的40~50台减少到10台左右。

我们若能牢牢抓住这个机遇，在我国预研和型号已取得成果的基础上，再加大力度引进、消化一些国外的先进软件，建立一套中国自己的航空动力设计体系和数值仿真系统，提高设计“起跑线”，发挥“后发优势”，不再重复西方几十年所走过的老路。这是我国航空动力走出困境，以较少的投入、较快的速度缩短与国际先进水平差距的有效途径，也是实现跨越式发展的难得机遇。

## 2. 计算机辅助工程分析（CAE）概况

计算机辅助工程分析（CAE）技术自上个世纪60年代投入商业应用以来，其发展和应用一直与计算机技术以及包括航空发动机在内的实际工程和产品设计的发展密不可分。CAE的基本概念就是将用理论计算无法实现的复杂分析对象（连续的无限自由度问题）离散成一系列“基元”（有限自由度问题），在此基础上构造一系列非常复杂的、相互关联的“方程组”来近似表达分析对象的内在本质，利用计算机的先进计算能力解算这些“方程组”以获得计算结果。

由于现代产品设计和工程设计的强烈需求，CAE技术自其诞生之时起就一直处于高速发展之中，而且得到工业界甚至政府相关部门的高度重视。比如，美国于1998年成立了工程计算机模拟和仿真学会（Computer Modeling and Simulation in Engineering），其它国家也成立了类似的学术组织，以推动CAE开发和应用技术的快速发展。早期的CAE主要指结构有限元分析（FEA）、机构运动学分析和动力学分析，也就是局限于计算结构力学范畴，后来逐步发展到计算流体力学（CFD）（包括计算热力学、计算化学等）、计算电磁学（CEM）等这样一些主要的学科领域。

### 2.1. 关于计算结构力学

力学是一门具有悠久历史的经典学科，它研究通常尺寸的物体在受力下的形变、以及速度远低于光速的运动过程的一门自然科学，是物理学、天文学和许多工程学的基础，按照其研究对象的不同，有固体力学、流体力学和一般力学三个分支。

近代力学的基本理论和基本方程在19世纪末20世纪初已基本完备了，后来的力学家大多致力于寻求各种具体问题的解。但由于许多力学问题相当复杂，很难获得解析解，用数值方法求解也遇到计算工作量过于庞大的困难。通常只能通过各种假设把问题简化到可以处理的程度，以得到某种近似的解答，或是借助于实验手段来谋求问题的解决。

第二次世界大战后不久，第一台电子计算机在美国出现，并在以后的20年里得到了迅速的发展，到



20世纪60年代出现了大型通用数字电子计算机。这种强大的计算工具的出现使复杂的数字运算不再成为障碍，为计算力学的形成奠定了物质基础。计算力学就是根据力学中的理论，利用现代电子计算机和各种数值方法，解决力学中的实际问题的一门新兴学科。它横贯力学的各个分支，不断扩大各个领域中心力学的研究和应用范围，同时也在逐渐发展自己的理论和方法。

1960年，美国克拉夫首先提出了有限元法，为把连续体力学问题化作离散的力学模型开拓了宽广的途径。有限元法的物理实质是：把一个连续体近似地用有限个在节点处相连接的单元组成的组合体来代替，从而把连续体的分析转化为单元分析加上对这些单元组合的分析问题。有限元法和计算机的结合，产生了巨大的威力，应用范围很快从简单的杆、板结构推广到复杂的空间组合结构，使过去不可能进行的一些大型复杂结构的静力分析变成了常规的计算，固体力学中的动力问题和各种非线性问题也有了各种相应的解决途径。计算结构力学就是研究结构力学中的结构分析和结构综合问题。结构分析指在一定外界因素作用下分析结构的反应，包括应力、变形、频率、极限承载能力等；结构综合指在一定约束条件下，综合各种因素进行结构优化设计，例如寻求最经济、最轻或刚度/强度最大的设计方案。

时至今日，计算结构力学的应用范围已扩大到工程力学和应用力学的多个分支领域，典型的计算结构力学CAE分析范畴包括：

- ✓ 通用线性/非线性（几何非线性、材料非线性、边界/单元非线性）结构静力学分析；
- ✓ 通用线性/非线性结构动力学分析（瞬态动力、模态、谐响应、响应谱和随机振动分析等）；
- ✓ 复合材料/疲劳寿命/断裂力学/机构运动学分析；
- ✓ 高速碰撞动力学/爆炸力学分析；
- ✓ 结构形状最优化/拓扑最优化设计与分析；
- ✓ .....

## 2.2. 关于计算流体力学

流体力学是力学的一个分支，它主要研究流体本身的静止状态和运动状态，以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。与固体力学一样，流体力学的研究也经历了长远的发展历史，其中最具有代表意义的事件包括：18世纪中叶，欧拉采用连续介质的概念，把静流体中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无粘流体的运动，因而成为流体力学主要创始人；1845年斯托克斯推导出粘性流体的一组基本运动方程，这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程（简称N-S方程），它是流体力学的理论基础，欧拉方程正是N-S方程在粘度为零时的特例。

流体力学的基本方程组非常复杂，在考虑粘性作用时更是如此，如果不靠计算机，就只能对比较简单的情形或简化后的欧拉方程或N-S方程进行计算。20世纪30~40年代，对于复杂而又特别重要的流体力学问题，曾组织过人力用几个月甚至几年的时间做数值计算，比如圆锥作超声速飞行时周围的无粘流场就从1943年一直算到1947年！

上个世纪六十年代，与用于结构力学计算的有限元方法差不多同时发展起来的有限差分法在流体力学计算领域开始得到广泛利用，并形成了“计算流体力学”。其中有代表性的工作是美国哈洛等人提出的一套计算方法，尤其是其中的质点网格法（即PIC方法）；1963年哈洛和弗罗姆成功地用电子计算机解决了流体力学中有名的难题——卡门涡街的数值模拟。其后陆续出现了有限体积法、用于流体计算的有限元法、分步杂交法、格林函数法、基于有限元的有限体积法、边界元法等等多种多样的计算流体力学数值解法。

与计算结构力学的发展一样，计算流体力学的应用范围已经从单纯的流场计算发展到涉及计算热力学、计算化学等诸多相关领域，典型的计算流体力学分析范畴包括：

- ✓ 定常/非定常、有粘/无粘、牛顿/非牛顿、不可压/可压、层流/湍流、理想流体/真实流体分析；
- ✓ 单组分/多组分/多相流分析（欧拉多相流、拉格朗日多相流、自由表面、凝固和沸腾等）；
- ✓ 绝热流/传热流分析（粘性加热、对流/传导/热辐射）
- ✓ 化学反应/爆炸/爆燃/燃烧分析（气体燃烧、油燃烧、煤燃烧、Nox模型和烟灰等）
- ✓ .....

## 2.3. 关于计算电磁学

自1785年库仑创建了描述了两个微小带电体之间作用力与其电量及间距的关系的库仑定律以来,相继由奥斯特在1820年发现了电流产生的磁场,同年,安培计算了两个电流之间的作用力;1831年法拉第又发现电磁感应现象,创建了电磁感应定律,说明时变磁场可以产生时变电场;最具历史意义的是1873年麦克斯韦在系统地总结了前人电磁学理论的基础上,提出了涡旋电场和位移电流假说,这两个假说的核心思想是:变化的磁场可以激发涡旋电场,变化的电场可以激发涡旋磁场,并以严格的数学方程描述了电磁场应该遵循的统一规律,这就是著名的麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程组预言了电磁波的存在,后来在1887年被赫兹的实验所证实,从而在人类科学史上第一次揭示了电场和磁场的内在联系,建立了完整的电磁场理论体系,而这个理论体系的核心就是麦克斯韦方程组。

从原则上说,由经典电磁理论体系出发,根据边界条件求解麦克斯韦微分或积分方程组,可以解决涉及电磁场的所有问题。但实际上,与固体力学和流体力学一样,使用经典解析方法仅能处理为数不多的简单典型问题。因此,以上个世纪60年代大型通用数字电子计算机的出现为基石,以实际工程和理论上需要解决的大量复杂电磁问题为有效需求,计算电磁学由此而发展并完善起来。

计算电磁学的基本原理是:电荷、电流与电磁场的关系由麦克斯韦方程组决定,麦克斯韦方程有积分表达和微分表达两种方式,其未知量是电场强度(E)、磁场强度(H)、电通量密度(D)、磁通量密度(B)。给定了源(电荷与电流)和边界条件(电场与磁场在边界上的值),可以用数值方法求解麦克斯韦方程,从而得到电场和磁场在不同时刻和位置的值,这一过程称为电磁场数值计算,或者计算电磁学。计算电磁学在电子工程尤其是微波与天线工程中有重要地位。现有的电磁场数值计算方法主要包括求解微分方程的有限元法(FEM)和时域有限差分(FDTD)等,求解积分方程的有矩量法(MoM)和物理光学法(PO)等。典型的计算电磁学分析范畴包括:

- ✓ 静态/低频谐波/瞬态磁场分析、静态/低频谐波/瞬态电场分析;
- ✓ 电路/电流传导/场路耦合分析;
- ✓ 高频时谐电磁场分析(电磁波传播、辐射和散射);
- ✓ 高频模式电磁场分析(谐振腔);
- ✓ .....

## 2.4. 关于多物理场耦合计算

我们单纯采用前述计算结构力学、计算流体力学(包括计算热力学)以及计算电磁学等对特定对象的相关特性进行计算机模拟分析时,事实上都必然存在或多或少的假设或影响因素的忽略,比如,单纯的流体分析无法考虑由于流体压力导致的结构变形反过来对流场本身的影响(流动边界的变化)、单纯的电磁分析也无法考虑电磁力导致的结构变形反过来对电磁场本身的影响等等,类似的情况是广泛存在的。因此,现代的CAE分析技术越来越重视将多种不同的计算技术结合起来共同分析一个特定的问题,也就是多物理场耦合分析。

多物理场耦合分析本身涉及诸多难点,比如,场与场之间的耦合特性可能是双向的(强耦合),这种问题最直接的解决办法就是在数值离散的矩阵级别就综合所有场量之间的影响关系(通常称为直接耦合计算),一次计算就获得最终结果,但这样处理会导致很大的程序设计问题:任何耦合计算都需要编制专门的耦合算法,无法利用现成的单场分析程序;另外一种解决办法就是各场单独计算,场间进行参数传递,通过多次往复迭代和收敛检查以求的最终结果(如果是单向耦合,则无需多次迭代),但这样处理所涉及的问题一是如何准确地进行场间完整的参数传递,二是迭代计算会导致过大的计算工作量。经过多年的发展,现代多物理场耦合分析程序在上述两种耦合计算方法上都取得了重大突破,已经可以非常准确地处理大量的需要耦合场分析的实际工程问题。典型的多物理场耦合分析范畴包括:

- ✓ 结构/温度耦合分析、结构/流体耦合分析、结构/电场以及结构/磁场耦合分析;
- ✓ 流体/电场耦合分析、流体/磁场耦合分析、温度/电磁场耦合分析;
- ✓ 结构/温度/流体/电磁场全耦合分析;
- ✓ .....

### 3. 航空发动机研制中的典型 CAE 问题

如前所述，计算机辅助工程分析技术已经在西方航空发达国家引发了一场设计技术的“革命”，在航空发动机领域更是如此。其最直接的效益就是：大大减少试验工作量、提高了设计成功率、节约研制经费、缩短了研制周期。

现代航空发动机设计对CAE分析的要求呈现三大趋势：一是对分析的精度要求越来越高、二是需要分析的对象越来越庞大和复杂（系统级分析）、三是对多物理场耦合分析尤其是流固耦合分析的需求越来越多。下面简单罗列一些航空发动机研制过程中的典型CAE问题以供参考，在下面几个章节中，我们会针对这些问题予以更详细的说明并提出ANSYS的解决方案。

- ✓ 与结构力学分析相关的典型问题有：
  - 压气机和涡轮的叶片、轮盘等重要构件在考虑温度、气动力、高速旋转离心力等载荷作用下的强度、振动以及高低周疲劳计算；
  - 高低压转子系统以及与支撑结构相耦合的转子系统在考虑温度、气动力、高速旋转离心力和陀螺力矩等载荷作用下的动力特性（转子动力学）和不平衡响应计算；
  - 齿轮、轴承、传动轴、机匣、管路系统以及其它辅机系统在相应复杂载荷和约束条件下的结构强度、振动、疲劳计算；
  - 叶片鸟撞、包容性、抗异物损伤等高度非线性结构动力计算；
  - .....
- ✓ 与计算流体力学分析相关的典型问题有
  - 单/多级风扇、单/多级压气机、单/多级涡轮、进气道、喷管等零部件气动计算；
  - 燃油喷射和雾化、燃烧室/加力燃烧室燃烧分析；
  - 涡轮盘、涡轮叶片、燃烧室、喷管冷却分析；
  - 飞机/发动机匹配气动计算，以及多相流模拟发动机地面吞水试验；
  - .....
- ✓ 与计算电磁学分析相关的典型问题有
  - 多/全电发动机耐高温高性能磁悬浮轴承、启动发电机等关键零部件电磁特性计算；
  - 电气化传动附件电磁特性及 EMC/EMI 计算；
  - .....
- ✓ 需要高性能计算的多物理场耦合计算问题示例
  - 风扇和压气机叶片的气动-结构耦合分析；
  - 涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室以及喷管的气动-热-结构耦合分析；
  - 磁悬浮轴承、启动发电机电磁-热-结构耦合分析；
  - .....

### 4. ANSYS 在航空发动机行业的总体优势

ANSYS 系列软件在航空发动机领域具有的整体优势是非常明显的：以结构 - 热分析为主，涵盖整个结构 - 热 - 流体 - 电磁 - 声学等全范围的耦合场分析功能是航空发动机所在的“热流体机械”行业 CAE 分析的“事实标准”，ANSYS 的 CFX TASCFlow 软件模块在航空发动机所在的“旋转机械”行业的计算流体动力学分析领域占据了超过 90% 的市场份额！在航空发动机行业，ANSYS 的总体优势体现在：

#### 4.1. ANSYS 的技术优势

- **仿真类型全面**

ANSYS 满足自然界的四大场——位移场、温度场、流场、电磁场的分析需求，具有 FEA/CFD/CEM 单场分析能力，而且每一部分的分析能力都非常强大，是 ANSYS 的三大技术支柱。



## • 多场耦合仿真

CAE 技术涵盖了计算结构力学、计算流体力学、计算电磁学等诸多学科专业，而航空发动机的设计对这几个学科专业都有强烈的耦合场分析需求。一般的 CAE 软件通常都只能解决某个学科的问题，用户需要配置一系列由不同公司开发的、具有不同应用领域的软件组合起来以解决其实际工程问题。这不但增加了用户投资，而且很多耦合场问题会由于不同软件间不能有效准确地传递数据而无法真正实现耦合仿真计算。能否真正完成全面耦合场分析，已经成为现代 CAE 软件所追求的目标。

ANSYS 软件作为融结构、电磁、热、流体分析技术于一身的仿真系统，不但拥有为业界认可的单场分析模块，而且由于出自同一家公司的模块，数据传输不存在瓶颈，各场之间可以自由耦合分析。由于其他公司通常只提供每个单场程序，所以多场耦合无从谈起。许多 CAE 公司曾经试图与互补领域的公司在项目中联合形成耦合解决方案，但不同公司的软件产品在数据库方面的巨大差异决定了这种联合所能解决的问题相当有限。

## • 协同仿真环境

ANSYS 符合现代 CAE 世界的协同趋势，提供整合多类 CAE 技术及数据的协同平台——协同仿真环境 Workbench。其他 CAE 公司提供的技术以孤立核心技术为主，没有产品与 ANSYS 协同仿真环境的相对应。

## • 研发全过程仿真

现代 CAE 软件开发商众多，推出在不同研发阶段使用的 CAE 软件。有些软件专门适用于研发前期校验，提供初级的、最常用的功能，面向设计工程师。有些软件适合于设计后期虚拟样机仿真，提供完善的功能、全面的用户可控制性，面向专职分析工程师和分析专家。也有适合于某专业或行业的专用软件，提供专用化的菜单界面和功能，提高分析效率。

这三个层面的 CAE 软件繁多，尤其前期设计阶段的 CAE 校验工具不下几十种，使用户具有广阔的选择余地。现在需要解决的一个问题是 CAE 校验工具的“技术攀升撞墙”问题。许多公司提供设计前期 CAE 校验工具但不提供设计后期虚拟样机仿真系统，在设计公司发现目前的工具不满足分析需求，希望扩展分析能力（“技术攀升”）时，只能到另一家 CAE 提供商那里购买适用于设计后期虚拟样机仿真的 CAE 系统。这样同一个研发过程不同阶段所采用的软件之间数据格式不同，通常不能兼容。也就是说，进行了前期校验的仿真模型在后期的虚拟样机仿真不能继续使用，而需要重新建模。

ANSYS 公司不仅提供的这些不同层次的软件，而且这些软件皆基于统一的底层技术，是一个产品线上的不同层次的模块，数据的良好兼容得到保证，实现前端分析工具向后端分析工具在技术平顺攀升。

## • 高效并行计算

在硬件支持方面，ANSYS 不但在基于 Intel-Windows 架构的微机、基于 RISC-UNIX 架构的工作站、巨型向量计算机上都能够正常工作，而且还提供统一的用户交互界面、统一的软件功能、统一的数据库以及网络浮动运行能力。

现在，ANSYS 软件超越了计算机平台的概念，可在 MPP 群机系统、SMP 及其构成的星群系统、局域网连接的工作站/PC 机群、不同机型及操作系统的混合网络上并行计算。ANSYS 在航空发动机设计中常见的并行计算实例诸如多级风扇/压气机/涡轮/甚至燃烧室的联合气动计算、发动机整体结构强度/刚度/动力学分析等等。

并行计算技术是现代所有 CAE 软件提供商追求的目标，但从并行效率上讲都不理想。尤其现代计算机硬件技术的发展速度并不亚于软件技术的发展，即便是像 ANSYS 这样处于国际领先地位的软件仍然有较大发展空间。

## 4.2. ANSYS 的应用优势

正是鉴于 ANSYS 在航空发动机行业的如上技术优势，世界各大航空发动机研制单位几乎均已 ANSYS 作为其标准 CAE 分析软件，比如：

2000 年 3 月，ANSYS 与 Pratt&Whitney 公司签署协议并共同发表声明，使 ANSYS 成为 Pratt&Whitney 公司的标准分析软件：“……Pratt&Whitney 公司选择 ANSYS 的原因之一是其独特的耦合场分析能力，



Pratt&Whitney 目前使用了超过 100 套的 ANSYS 软件，并在继续增加，.....，将 ANSYS 作为 Pratt&Whitney 的‘标准化分析软件’的基础性工作之一就是要在 Pratt&Whitney 的所有工程仿真领域都把 ANSYS 作为首选工具使用，这项工作的关键部分包括继续巩固 ANSYS 的使用并‘逐步停止使用’Pratt&Whitney 当前正在使用的其它分析工具，进而形成一个更平顺而高效的研发环境，.....”，该声明的部分原文如下：

CHICAGO, IL: March 14, 2000 - ANSYS, Inc. (Nasdaq: ANSS), a leading Global provider of advanced computer-aided engineering (CAE) software solutions, today announced that Pratt & Whitney, has standardized on ANSYS® software to help reduce analysis cycle times and advance analysis techniques. .... One of the reasons they chose ANSYS was because of its unique abilities in coupled-field analysis. Pratt & Whitney currently utilizes over 100 seats of ANSYS software and has steadily been growing ..... Elements of the standardization initiative include working with ANSYS as a primary tool for all engineering simulation. A key part of this effort includes the consolidation and "phase out" of other analysis tools currently in use at P&W to provide a smoother and more efficient development environment.....

再比如，2000 年 8 月，ANSYS 与 EDS 公司就 Rolls-Royce 采购 ANSYS 软件一事签署协议并共同发表声明(EDS 是 Rolls-Royce 的 IT 服务集成商)：“根据此协议，到 2005 年，ANSYS 公司将成为 Rolls-Royce 首选的有限元分析 (FEA) 软件供应商。ANSYS 公司是第一家与 Rolls-Royce 公司合作如此密切的 FEA 软件供应商，此协议更加巩固了这一长期稳固和成功的合作关系。.....，‘ANSYS 公司是全球计算机辅助工程领域的先驱，此协议使 EDS 所支持的 Rolls-Royce 公司各部门或附属机构采用这一技术，’ EDS 的项目经理 John Rang 说：‘ANSYS/Multi physics 软件包是工业界的‘事实标准’，尤其在核工业和能源工程的核心领域。其强大的功能使航空部门受益颇多。ANSYS 软件允许工程师们在产品开发的设计阶段进行分析，这样可使他们就产品的设计、材料和制造等进行早期决策，可大大加快产品投入市场的速度。’，.....”，该声明的部分原文如下：

SOUTHPOINTE, PA: August 1, 2000 - ANSYS, Inc. (Nasdaq: ANSS) announces today a worldwide agreement with Electronic Data Systems (EDS) for the use of ANSYS® software within Rolls-Royce plc. Through this agreement, ANSYS, Inc. becomes the principal finite element analysis (FEA) provider through 2005. ANSYS, Inc. is the first FEA analysis provider to achieve such unparalleled status with Rolls-Royce, and this agreement consolidates a long standing and successful relationship. The agreement was negotiated on behalf of Rolls-Royce by EDS, the Rolls-Royce IT service provider.

“ANSYS, Inc. is a world leader in computer-aided-engineering and this agreement gives any Rolls-Royce division or affiliate supported by EDS access to this tremendous technology,” said John Rang, program manager, EDS. “The ANSYS/Multiphysics(tm) package is the de-facto standard for industrial business, especially in the core areas of nuclear and power engineering, and its formidable functionality offers benefits for the Aerospace Division. Because ANSYS software allows engineers to perform analysis during the design phase of product development, it enables them to make early, intelligent decisions about their design, materials, and manufacturing that will significantly accelerate product time-to-market.”