

先进复合材料的CAE虚拟技术

CAE Virtual Technology for Advanced Composites

中国一航北京航空材料研究院 益小苏 李宏运 连建民 唐邦铭 李雪芹 彭 勃
中国一航飞机强度研究所 沈 真

国际先进复合材料技术目前的发展更倾向于利用虚拟的设计-制造-验证一体化环境,将真实的设计、制造、材料、验证、应用乃至维修和全寿命管理等诸多环节统一起来,从而最大限度地缩短新品研制周期,降低研制成本,提高产品的市场竞争力,在这个过程中,CAE技术已成为国防工业创新设计以及数字化设计、制造技术的核心之一。

以碳纤维增强复合材料为代表的先进复合材料技术起源于国防领域,同样,计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)技术也起源于国防领域。在我国,航空先进复合材料已有近30年的发展历史,这也恰是CAE技术在我国航空工业的应用历史。可见,先进复合材料技术与CAE技术有着天然的内在联系,事实上,它们之间的本质联系就是材料工程数据体系。

先进复合材料技术发展现状

复合材料技术是一项具有战略意义的国防关键技术,在一定程度上,先进复合材料的研究水平和应用程度是一个国家科技发展水平的代表,特别是在飞机制造业,各种先进的飞机无不与先进的材料技术紧密联系在一起。以武装直升机为例,复合材料在先进武装直升机上的用

量已高达50%(重量比)左右,复合材料应用的部位已从整流罩、地板、整体壁板等次承力结构向旋翼、框、梁等主承力结构方向发展,其典型代表有NH-90、波音-360、V-22、RAH-66等机型。

随着复合材料在飞机上应用比例的加大,在复合材料制造领域,先进的数字化设计制造技术和计算机辅助工程技术等得到了广泛应用。铺层、下料、浸渍、成型、固化等工序的模拟技术和CAD/CAM/CAE技术的运用,大大降低了开发制造成本,提高了开发和制造效率。如今复合材料的制造技术正朝着自动化、低成本、整体化、数字化的方向发展。

在我国,复合材料技术还没有达到数字化设计和制造的程度。目前,我国国防工业复合材料产品的生产主要采用传统的设计和制造技术,与国外先进水平有很大的差距,而其中

一个很重要的原因是缺乏成熟的数字化工程环境的支持。事实上,国外的研究和应用成果已经表明,在复合材料构件的设计制造过程中,不仅要采用单项数字化设计制造技术,而且要建立集成的数字化设计制造环境,分别从计算机软、硬件和先进的复合材料设计、制造技术角度出发,融合所有设计和制造的数字化过程,打通复合材料构件数字化生产线,实现产品数据从复合材料构件设计到最终交付的顺畅传递。国际先进复合材料技术目前的发展更倾向于利用虚拟的设计-制造-验证一体化环境,将真实的设计、制造、材料、验证、应用乃至维修和全寿命管理等诸多环节统一起来,从而最大限度地缩短新品研制周期,降低研制成本,提高产品的市场竞争力,在这个过程中,CAE技术已成为国防工业创新设计以及数字化设计、制造技术的核心之

一。

先进复合材料数据技术与体系

要想应用 CAE 技术提升我国先进复合材料技术的发展,基础条件和重要前提是研究、发展和建立与此相适应的复合材料数据技术和数据体系。

1 复合材料数据体系建设是实现数字化技术的基础

科学数据是科技创新的重要源泉。基础性科学数据作为科技活动发展的基础和成果,是科学技术滚动发展的平台。一个好的科学思想、理论假说和应用技术,必须在掌握大量前人资料和科学数据的基础上才能形成,同时也必须在大量相关数据的支撑下才能被证实。对科学数据进行系统化的综合分析,进而促进新的科学思维的产生,是实现科技创新的重要方式,也有利于推动交叉学科的发展。特别是当代科学技术的发展明显呈现出大科学、定量化和注重过程研究等特点,越来越依赖于系统的、高可信度的基本科学数据及其衍生的数据产品。而科学研究工作本身也就是科学数据的生产过程。

在材料应用研究工作中,包括先进复合材料在内,材料数据作为现有研究成果的体现和未来研究工作的依据,在整个科研工作中都起着非常重要的作用。但是,材料数据本身作为一种资源还没有得到应有的重视、开发和利用。

2 先进国家的国家级材料数据管理体系和运行模式

先进国家非常重视材料数据管理和应用系统的建设和维护。到目前为止,在美国国防部国防技术信息中心(DTIC)的领导下,美国已建立了 13 个国家级的数据系统,形成了庞大的国防工业数据管理和应用体系,为美国国防工业保持世界领先的竞争力和可持续发展立下汗马功劳。

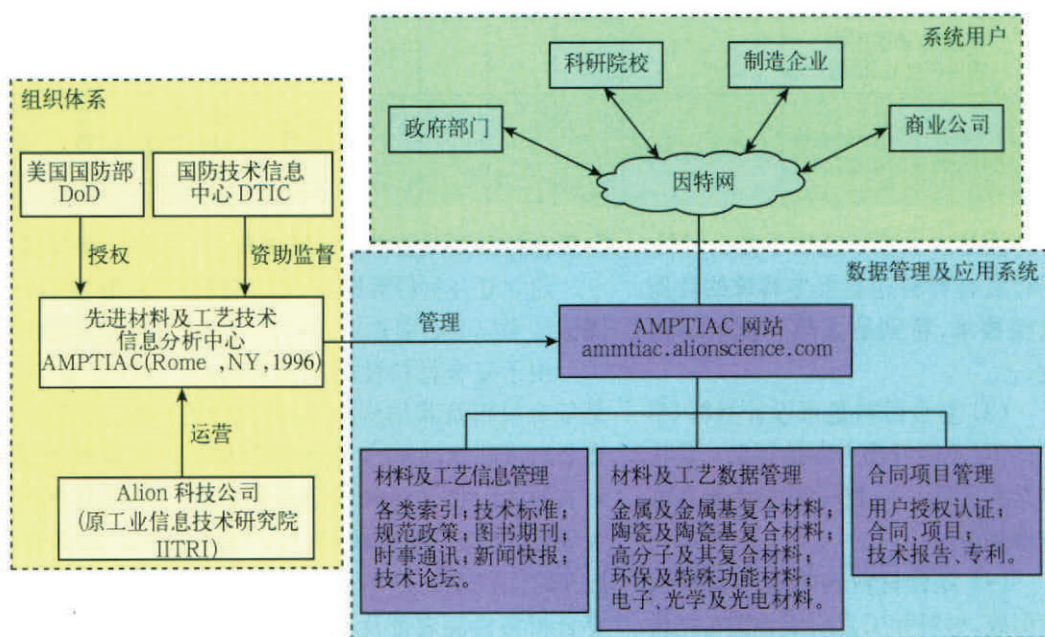
分析美国在材料数据管理和应用技术方面的先进经验,可以总结出以下 3 个重要启示:

(1) 由政府及国防部积极推动和资助,由 AMPTIAC 这样的专业机构进行商业化运作和管理,具有完善的组织体系;体系的发展伴随着新材料的出现不断扩充、兼并、组合和完善;网络化数据管理已成为主要手段,实现了跨时间、跨地域的数据共享。

(3) 由材料和信息技术 2 方面专家合作进行数据收集、评估、包装、标准实施、数据库开发等工作。注重服务,服务范围包括技术咨询、调查、培训,相关材料技术报告的汇编、出版和发行等。

3 我国有关工程材料数据库的历史经验

我国国防工业也曾研究建立过各种材料数据库,有过一些经验教训。首先,常把建设数据库作为一个独立的课题或一个单位内部的科研项目,没有面向用户、面向市场,也没有考虑商业化的运作,因此市场和用户的认知度低,难于推广。其次,由于认识的水平、数据的质量还不够高,致使低质量或无用的数据压库,数据库不能发挥效益。数据库系统的开发也没有充分利用 IT 行业的发



美国国防系统的数据应用体系和数据库

(2) 材料数据管理范围涵盖了金属及金属基复合材料,陶瓷及陶瓷基复合材料,高分子结构及高分子基复合材料,电子、光学及光电子材料,环境保护及特殊功能材料等五大类;既有处于试验和开发阶段的材料数据,也含有许多已知、成熟、有价值的材料信息。

展成果,数据库本身的技术水平低,网络化水平低,因此数据库的服务功能弱、寿命短。最后,数据管理的诸多方面,如系统性、准确性、可靠性、可追溯性、安全性、知识产权保护、授权访问应用等未予以充分考虑,数据来源和应用范围受到了制约。

4 复合材料数据的特殊性

根据美国军用复合材料手册 (MIL-HDBK-17F), 先进复合材料技术和复合材料数据的特点包括:

(1) 复合材料包括基体和增强材料, 性能表征必须从组分开始。

(2) 由于复合材料的失效机理与金属材料完全不同, 金属的性能测

结构证实等分别给出试验矩阵。

(7) MIL-HDBK-17F 还规范了不同批次、不同时间、不同实验室的同一复合材料体系试验结果的数据可追踪性, 不同厚度数据的归一化处理, 异常数据的剔除原则, 数据统计处理的方法等原则和操作步骤。

MIL-HDBK-17F 及 ASTM D 30 下属复合材料标准不断地更新, 反映了美国复合材料领域在这方面的研究进展。典型的例子是单向层压板拉伸和压缩性能的测定, 单向带直边矩形试样对制备状态有严格要求, 而且破坏部位往往会在非测量段(夹持

表1 复合材料体系典型层压板 ([45/0/-45/90]_{ns}) 力学性能表征所要求的试验矩阵

序号	力学性能	试验标准	试验件数量									试验件总数	数据种类	备注	
			-55℃干态		室温干态		ETW1		ETW2		ETW3				
			批数	每批数量	批数	每批数量	批数	每批数量	批数	每批数量	批数				每批数量
1	开孔拉伸强度	ASTM D 5766	1	6	1	6						12	S		
2	开孔压缩强度	ASTM D 6484			1	6					1	6	12	S	
3	挤压强度	ASTM D 5961			1	6					1	6	12	S	
4	含冲击损伤压缩强度(冲击能量为 6.7 J/mm)	ASTM D 7136 ASTM D 7137			1	6						6	S		
5	含冲击损伤压缩强度(阈值)				1	10						10	S	同样试件	
6	含冲击损伤压缩破坏应变(阈值)				1	10									
7	静压痕损伤阻抗(最大接触力和相应的损伤尺寸)	ASTM D 6264			1	6						6	S		

试方法基本上都不适用于复合材料; 同时复合材料还有很多特殊的性能表征要求, 特别是湿热和抗冲击性能。

(3) 复合材料是可设计材料(不同比例、不同纤维方向的铺层), 其基本结构元素——层压板的性能表征非常复杂。

(4) 复合材料的结构与材料同步形成, 材料和工艺的变异性对材料(同时也是结构)性能具有重要影响。

(5) 国际范围仍缺乏复合材料及其结构的设计和使用经验, 必须采用积木式的试验验证, 因此试验种类和数量远超过金属。

(6) 复合材料性能数据必须包括: 材料筛选、材料取证、材料验收、材料等同性和结构证实; 除单独性能表征的标准化外, 针对材料筛选、材料取证、材料验收、材料等同性和

5 复合材料测试技术与标准体系

建立复合材料数据库, 复合材料测试技术标准必须先行。

由于复合材料性能测试和表征是复合材料及其结构研制与生产的重要组成部分, 如此复杂多变的内容对其质量保证和结构验证有着极其重要的影响, 同时在研制、生产成本以及时间成本上占有很大比重, 因此复合材料性能表征及其标准化一直是复合材料领域的主要研究方向之一。

标准化包含 2 方面内容, 即性能测试的范围和方法(包括试验标准、数量及数据处理方法等) 以及针对不同应用情况建议的试验矩阵, 见表 1。

随着复合材料及其结构研究的深入以及应用范围的不断扩大, 标准化的研究也在不断深入和发展。

区), 使得试验结果偏低, 分散性大。采用 MIL-HDBK-17F 的正交铺层试样试验和折算方法, 对试样制备要求低, 破坏部位一般出现在测量段, 而且分散性小。另外, 压缩性能一直是最难测量的, 国内迄今仍在执行 1983 年制订的标准, MIL-HDBK-17F 的多种新方法比国内目前现在使用的方法好得多。

6 复合材料制件设计、制造的独特性和工艺验证

(1) 复合材料是各向异性材料, 具有可设计性, 树脂含量、铺层厚度、铺设方向以及各个方向的铺层所占的比例等均作为设计参数。复合材料性能的设计包括选材、层合板强度和刚度的铺层剪裁优化设计等, 复合材料制件的设计包括损伤容限设计、连接设计等, 这些设计建立在细观力学、弹性力学等的基础上, 并考虑特

殊服役条件(如温度、湿度和高周疲劳影响等)对性能、结构完整性及其稳定性的影响。

(2) 复合材料制件在成型零件的同时也完成材料制造的工艺特点,决定了复合材料制件制造时必须同时考虑设计、材料、工艺、制造、检测/无损检测、实验验证等综合因素。复合材料特殊的制备过程和生产过程将显著影响复合材料制件的结构与性能,譬如制造缺陷、工艺宽容度等,这些因素必须在复合材料制件制造过程中统筹考虑。在复合材料制件的研制或生产过程中,质量监控和无损检测占有重要地位,复合材料和制件的质量与人员、设备、方法、环境等因素密切相关,受控环节和数据非常多。

(3) 复合材料制件制造工艺方法多种多样,为保证产品质量,每种制造工艺方法都应该进行工艺设计、计算机数值模拟仿真和工艺过程优化等。在完成样件制造后,还必须进行综合实验验证,将综合验证的结果反馈给设计、材料、工艺制造和检测等主要环节,形成闭环控制。

因此,复合材料制件的工程化应用是一个庞大而复杂的系统工程,迫切需要综合应用现代计算机技术的

CAD、CAE、CAM、CAPP 和 数 字 化 的 数 据 库 技 术 等 进 行 统 筹 管 理。

7 复合材料制件设计、数据库建设与知识管理系统

复合材料制件的设计与金属制件的设计相比,涉及到更多的数据、规律、经验和知识,其性能更依赖于试样、元件、结制件和全尺寸部件等多层次的积木式的验证试验,需要数字化、信息化工具的支撑,还需要借助数字化平台进行管理。

数据库的核心是优质的数据和高效的数据管理和应用,而优质的数据来源于对材料的测试、分析和模型化工作,涉及大量的经验和知识,即便是照搬 MIL-HDBK-17F,要从上千页的手册里找到合适的方法和技术也不是一件简单的事,同时还需要进行大量的“What-If”分析和多方法或技术的平衡和优化,因此,就产生了对经验和知识进行管理和开发利用的问题。这个技术在国际上亦具有前瞻性。

现阶段的可行方案之一是依托虚拟开发环境,将数据获得、产生、分析、应用等不同阶段的测试条件、测试参数变化、材料状态变化、材料参数变化、载荷边界条件变化等与流程相关的所有数据保留在关系型数

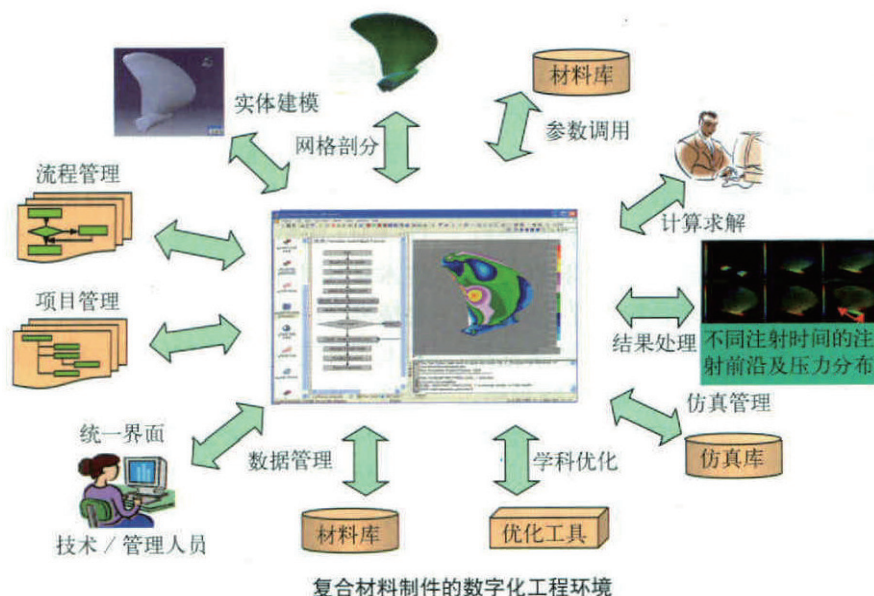
据库中,经数据挖掘、总结、抽取和 PLM 下的知识定义技术、管理技术,形成一个数字化、基于数据库的知识库。

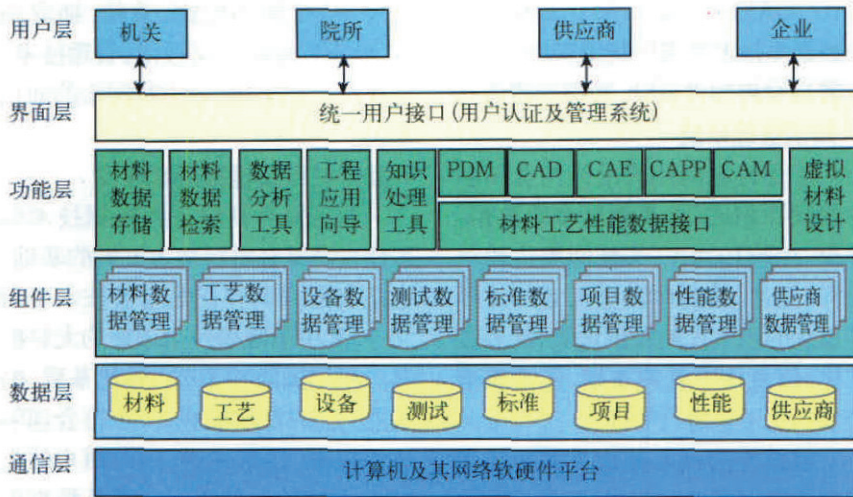
8 复合材料工程数据库建设

先进复合材料工程数据技术体系建设是复合材料技术发展的基础,也是我国目前存在的重大技术瓶颈之一,其中蕴藏着技术创新的大好机遇。根据国防科工委“强化基础、提高能力”的发展战略,一个符合国际通用标准、技术先进、面向用户的先进复合材料工程数据体系及数据库的建设工作正在进行中,其载体是一个航空工业众多单位联合的科研和用户团队。这个体系的发展目标是建立一个复合材料工程数字化协同研制平台。这个平台将以网络系统为载体,面向领导机关、大专院校、科研单位、材料供应商和转包生产者以及相关企业等各类用户,在与国际接轨、统一的技术标准平台上,分数据层、组件层、功能层和界面层等多个层面,开发先进的工程化数据环境,并与国防工业现行的各类 CAE 工程软件互连,支撑先进复合材料的研究、复合材料制件的设计和制造以及规模化生产与可持续发展。

这个复合材料工程数字化协同研制平台的核心是一个复合材料工程数据库(Composites Engineering Data Base, CEDBase),这个库下面包含“材料性能数据库”、“材料设计数据库”、“材料制造数据库”、“无损检测数据库”、“技术标准库”和“复合材料工程知识库”等 6 个参考库。通过网络,工程数据库将分别与有关用户(如上级机关、科研院校、企业等)建立联系。

数据库的材料数据基础是统一的先进技术标准和测试技术规范。因此,在深入对比研究和分析了目前我国仍在运行的各种标准规范基础上,整理、归纳和发展了符合我国国情并且与国际先进标准接轨的相应





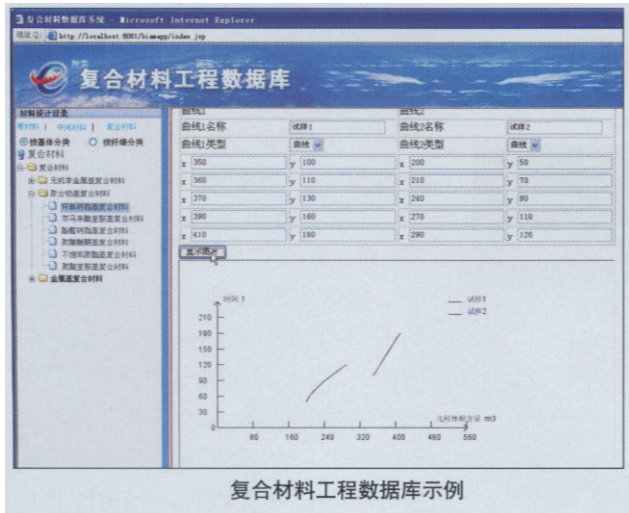
某复合材料工程数字化协同研制平台的架构

技术标准体系初稿,形成相关材料测试、试验的技术方法体系。进一步地,分材料层次(增强材料、基体材料、预浸料、芯材、面板材料、复合材料等)和环境条件,研究、测试和分析了一定数量的关键复合材料的物理、化学和力学性能,通过单点数据、表格、曲线、图像等形式,给出相应的材料性能谱。

这个复合材料工程数据库的优点是覆盖主要的材料品种,覆盖从应力-应变曲线到流变、从光谱特性到疲劳特性等各种材料结构和性能数据,并针对每个用户的具体需求,按照批次、质量、设计参数、CAE材料数据,R&D数据等进行恰当组合。根据ISO 17025质量管理程序要求,所有数据都具有可追溯性,库

里保存所有数据关联信息,包括试验数据、原始数据、典型数据、统计数据以及工艺与试验方法等。必要时,数据的采集可以直通材料测试实验室,新的材料参数将自动在实验室现场获得,并被通过基于网络的界面上上传到系统中。详细的测量数据都将被保存为全数字化格式,完全满足严格的ISO 17025数据报告标准,从而实现无纸化办公并使数据保持实时更新。系统还能够存储材料模型参数等,支持各种高端CAE与设计应用软件,而无须为了适合软件需要而进行单位换算,也不用针对各种应用而专门进行数据后处理工作。数据扩充机制能够方便地增加数据类型和格式,综

合全局和局部安装,实现无缝扩充。出于数据安全考虑,每一项数据都设置机密等级,对数据的访问是权限受控的,可以根据需要确定谁可以浏览这些数据,确定公开或者隐藏该数据等,并可以控制谁可能装载、编辑和出版数据等。访问日志将即时监控



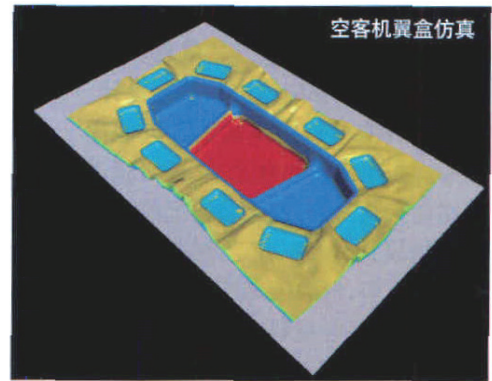
复合材料工程数据库示例

每一个用户。在用户终端,用户可以将数据导出为Excel、CAE、MatML和Matlab等多种格式,允许特定用户和域来控制 and 访问自己的数据,并根据需要确定数据信息的价值,进行数据趋势分析以及其他评估,或自动总结和审查数据等。

先进复合材料 CAE 技术应用案例

先进复合材料工程数据技术、数据库与CAE技术系统具有辩证统一的内在联系。

在复合材料数据技术和数据体系的支撑下,我国国防先进复合材料CAE技术的目标是实现由模拟量设计、制造向数字化设计、制造的转变,同时推进实现虚拟设计、制造先于真



实设计、制造,虚拟设计、制造与真实设计、制造同步发展的创新模式,带动我国国防复合材料技术的科技进步与跨越式发展。

一个典型的复合材料制件研制的物理流程既包括传统的预浸料成型制造,也包括先进的树脂转移模型(RTM)成型制造过程,其中,RTM技术被认为是低成本复合材料的重要技术之一,美国政府将RTM技术列入了其先进复合材料计划,并组织开展了大量的研究工作,同时,民用复合材料界在生产成本、生产周期和环保新要求的压力下也出现了RTM研究和应用的热潮。目前,RTM技术已经在航空航天、基础设施、汽车工业和军事工业中获得了较广泛的

应用。

以船用全复合材料螺旋桨推进器的研制为例,介绍在先进复合材料工程数据环境下的CAE应用技术,用到的CAE数模软件环境链将先于物理研制进行复合材料制件的数字化建模和虚拟设计分析,虚拟样机及其产物结构与性能的分析(通常是一个缩比件或模型制件)以及虚拟制造,这通常是1:1制件的工艺模拟和产物分析等。

首先,以模型缩比的船用螺旋桨推进叶片的外形几何数据为基础,进行复合材料单个叶片的结构设计和应力-应变分析。这个分析可以直接从数据库里选材,进行性能比较,同时进行有限元建模和分析,确定叶片的碳纤维铺层结构(应用LAMINATE-ADVISOR),最后,根据应力分析结果选择织物和树脂,确定模型复合材料构件的纤维体积分含量等。

在结构设计和力学分析基本完成后,数模生成叶片的几何模型及数控加工文件,然后在不同厚度处进行铺层曲面展开和覆盖分析(应用QUICK-FORM),包括复合材料铺层剪裁、下料和铺贴(应用PAM-FORM)等。将这些制造数据输入到数字化加工机械(如数字化的激光切割机等),就可以进行碳布切割、剪裁,然后将这些铺层在定型模具内逐

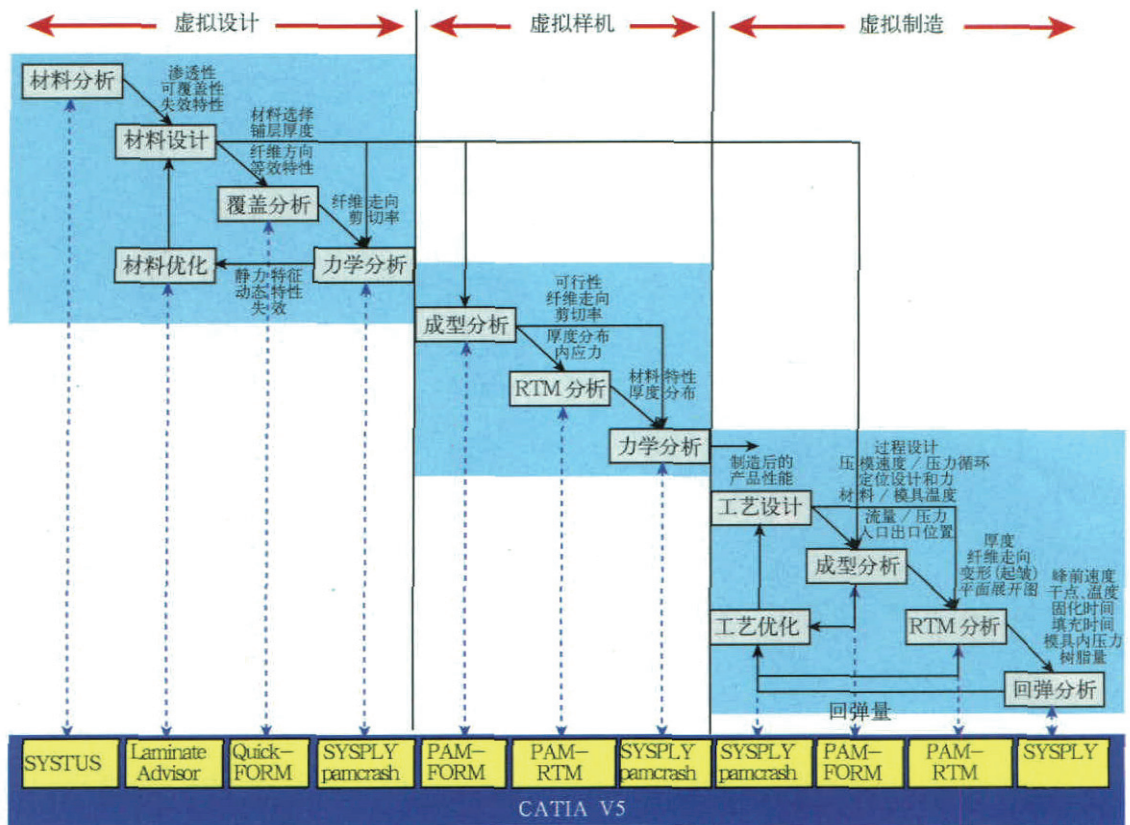
层铺贴、固定,借助合适的定型剂进行施工,并进行真空袋定型预制,得到干态、近净型的模型船用螺旋桨叶片预制件。如此,就完成了模型叶片的虚拟设计和物理设计这样两个互相交叉的流程。

根据初步确定的模型RTM模具(应用PAM-RTM),这个模型叶片预制件的RTM工艺过程可以在CAE环境下进行,这个过程当然不仅仅针对模型叶片,也包括真实的1:1叶片。通过模拟,可以确定模具设计的正确性和可能的流动充填缺陷等。如此,又完成了模型叶片的虚拟和物理设计以及虚拟和物理样机这样的流程。

1:1船用大型全复合材料推进螺旋桨。

结束语

全面推进国防制造业特别是国防先进复合材料的制造技术进步,大幅度提升国防企业国际竞争力的必由之路是实现数字化,必须建立实用、先进的复合材料工程数据技术体系和数据库系统,并同时采用先进的CAE技术。这是一个体系庞大、内容浩瀚、技术复杂的系统工程。本文从复合材料的工程数据问题和CAE虚拟设计、样机和制造仿真问题这两个侧面入手,尝试论述了有关的进展,介绍我们自己及其合作伙伴的工



CAE数模软件环境链(资源来源:BIAM/LAC-ESI复合材料仿真技术联合实验室)

在叶片虚拟和物理设计、虚拟和物理样机及其优化的基础上,将叶片预制件放入真实的RTM模具,即可以进行真实叶片的RTM成型物理制造试验。在模型桨叶试验的基础上进行放大,成功制成我国第一个

作,并适当展望了发展远景。

对先进复合材料的研制单位来讲,材料技术创新和制造技术创新是根本,先进的CAE系统是必须积极运用的工具,两者的结合必将催生新的发展机遇。(责编 金卯)