

# CFD技术及其在大飞机研制中的应用

CFD and Its Application in Large Aircraft Development

北京航空航天大学国家 CFD 实验室 阎超 都彦喆



阎超

博士、教授、博士生导师，主要从事 CFD 领域的研究工作。发表论文 89 篇，专著 4 部。先后获得“中国青年科技奖”、国家科技进步三等奖，入选教育部“跨世纪优秀人才培养计划”，享受国务院政府特殊津贴，被授予“有突出贡献专家”称号。

大型运输飞机是指起飞总重量超过 100t 的各类用途的大型军民用航空运载类飞机，其研制能力是衡量一个国家科技水平、工业水平等综合国力的重要标志。目前，世界上只有美国、欧盟和俄罗斯具有大型民用客机的研制生产实力，而真正具有国际市场竞争能力的只有美国和欧盟。与此同时，在快速反应、快速机动、大量消耗物资的现代战争中，大型军用运输机已成为战争胜负的重要因素之一，其数量和运载效能也是衡量一

个国家快速反应能力的重要标志。经过近 30 年的迅速发展，今天的 CFD 已经成为飞机、导弹、飞船等航空航天飞行器研制中一种主要的气动分析和设计工具。CFD 以其快速、经济、高效、适用面广、约束少、数据详尽等特有的优势改变了传统的气动设计方法，成为航空航天飞行器研制中无可替代的有力工具。

个国家快速反应能力的重要标志。

进入 21 世纪，我国要实现建设航空强国的目标，迫切需要打开大型运输飞机发展的突破口，以满足国家安全和国民经济建设的双重急需，并带动我国科技水平、工业水平的大幅度提高。

大型运输机气动力分析技术是在先进理论方法和成功工程实践的基础上形成和发展起来的，属航空发达国家对我们封锁的关键技术。直到 20 世纪 70 年代，在飞机气动力设计工作中，在采用的设计手段上，风洞试验是主要的，甚至可以说是唯一能获得可靠的气动数据的手段，计算通常只是简单意义上的工程估算。但是，随着计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）和大容量计算机的发展，试验和计算在设计工作中的相对地位在不断改变。形成这种改变的主要依据是：由于过去传统的设计方法往往需要给出上百种设计方案进行对比选型试验，风洞试验工作量非常惊

人，需要很长的设计周期，耗资亦十分浩大。据国外资料统计，现代飞行器气动力设计所需的风洞试验需求较过去成量级的增长，如果不大规模开发和采用 CFD 技术，单单完成这些风洞试验就需耗费 5 ~ 10 年的时间。另外，风洞试验受到试验设备及试验技术的限制，并不能准确模拟某些飞行状态下的流动情况。到目前为止，风洞设备模拟能力的种种限制并没有本质的改观。

而另一方面，从 20 世纪 70 年代末开始，由于 CFD 计算方法不断突破和计算机技术的快速发展，CFD 进入了蓬勃发展的新时期。其主要标志之一是 CFD 开始越来越多地被应用到以航空航天飞行器的研究和设计为代表的流体力学、空气动力学实际工程中。

## CFD 与航空

经过近 30 年的迅速发展，今天的 CFD 已经成为飞机、导弹、飞船等航空航天飞行器研制中一种主要的

气动分析和设计工具。CFD以其快速、经济、高效、适用面广、约束少、数据详尽等特有的优势改变了传统的气动设计方法,成为航空航天飞行器研制中无可替代的有力工具。

美国Northrop公司在研制YF-17与YF-23的过程中风洞试验与数值计算工作量的变化:1966~1974年YF-17研制期间,共进行了近13500h的风洞试验,当时还没有可用的CFD技术;而1982~1990年对性能要求更高、外形更复杂的YF-23研制期间,CFD计算用了近15000h,风洞试验只用了近5500h,减少了约60%的试验工作量,总的成本大大降低,缩短了相对研制周期,而且由于CFD可以方便地修改飞机外形和流动条件,扩大了优化设计的范围,因而可以获得优异的设计性能。

2004年,波音公司的E. N. Tinoco说:“在现代商业飞机的成功设计中,CFD的有效应用是一个关键因素。CFD在商业飞机设计中的应用革命化地改变了气动设计方法……在飞机发展中,CFD的应用越来越多,这并不是因为它本身技术上的推动,而是因为市场竞争的结果。现在,CFD是气动设计过程的主要部分,另外还包括风洞和飞行试验。在显著缩短飞机研发周期方面,CFD是主要保证因素。如果我们希望保持竞争力,就别无选择。”

1998年,Lockheed Martin公司的P. Raj在一篇题为《21世纪的飞机设计》的论文中指出:人们之所以聚焦CFD,首要的原因是在飞机设计的每一个阶段,CFD都扮演着中心的角色。

在世界CFD的发展史上,美国国家宇航局(NASA)一直是最大的推动者,当然也是最大的受益者。NASA对于CFD的发展及其应用一直给予高度的重视:“以NASA的观点,CFD是流动模拟和预估的一

个令人兴奋的新工具,一个本质上没有任何别的地面模拟技术固有限制的工具”。NASA总部计划通过CFD技术将发动机和飞行器的设计时间和费用减少一半。

CFD技术的广泛应用已经使现代飞行器的设计方式发生了根本的改变:在方案设计和初步设计阶段,数值计算已成为主要的设计手段,风洞试验仅仅对最终选定的设计方案进行有限的校核。在飞机详细设计阶段,CFD技术又可作为精确校核计算和进行风洞试验数据修正、风洞及飞行相关性研究的重要手段,指导和补充风洞试验。在许多情况下,数值计算甚至可以直接提供设计数据。

CFD技术的使用,大大减轻了风洞的负担,使风洞试验用于解决更为重要方面的问题及进行必要的验证,大大缩短了设计周期,节约了经济成本,确保了飞机的高性能设计指标,对飞行器气动设计方式带来了深刻的变化,产生了巨大的社会效益。目前,CFD技术与风洞试验相辅相成,已成为现代飞机气动设计的两大重要技术手段,CFD技术在飞机设计中的应用水平已经成为评价飞机设计先进水平的主要标志。

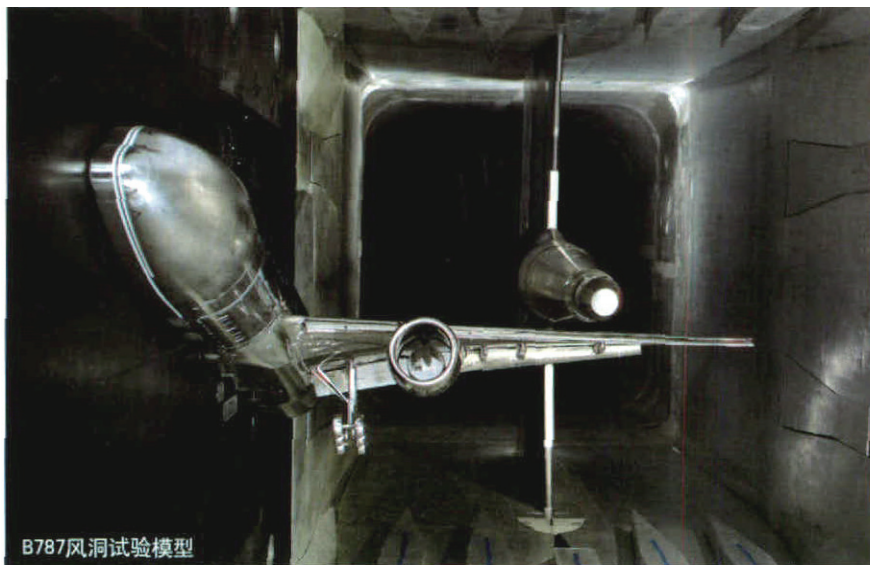
在现今的美国航空航天领域,CFD约占气动设计工作量的70%,而风洞试验的工作量只占30%。无

论从节省研制费用、缩短设计时间出发,还是从提高设计水平出发,在本世纪,由于计算机和CFD技术的进一步发展,CFD将给气动设计带来更大的革命。未来飞行器性能确定,将依赖于在“虚拟风洞(采用CFD技术)”数据基础上产生的“虚拟飞行”,这将是飞行器研制的主要发展方向。

### CFD在大型民机研制中的应用

航空领域是CFD应用的传统领域也是应用最为成功的领域之一。今天,CFD已经成为大型民机研制中流动问题研究、气动设计的主要手段之一。

发动机在飞机上的合理吊挂对于飞机的结构、动力、气动等都有很大影响,发动机及其喷流和机身、机翼之间有着很强的流动相互作用,会诱发附加的流动阻力包括干扰引起的诱导阻力和机翼下表面超声速区引起的波阻等。在波音公司,20世纪90年代前主要依靠风洞试验研究发动机的吊挂,但模拟发动机喷流的试验难度大、费用高、周期长,也无法给出流动相互作用的机理性和规律性的解释。所以传统的做法是将发动机尽可能远离机翼和机身,这样做又导致了结构的复杂和重量的增



B787风洞试验模型

加。这种吊挂设计一般要进行几十次的风洞试验,每次试验耗资约15万美元。90年代以后,利用CFD,可以很清晰地刻画出带喷流的发动机和机身、机翼之间的流动干扰机理和规律,从而优化出最佳的发动机吊挂方案,逐渐实现了近距离布置。现在,CFD方法逐渐取代了吊挂风洞试验,PW4098、GE90-115B等吊挂设计已经不再进行风洞试验,而完全由CFD完成。这显著地缩短了设计周期,节省了研制费用,提高了设计质量。

在波音商业飞机部,为了支持各种产品,每年要运行超过2万次CFD作业。其中85%的作业是由CFD研究小组以外的生产工程师完成的。CFD方法能以数小时或数天,而不是以前的数周或数月的时间提供及时的结果。

CFD变革了机翼的设计方法,传统的依赖经验和大量风洞试验的“试错法”(Cut-and-Try)已经被依赖CFD模拟的“反设计方法”和“多点优化方法”所取代。这些新方法更快捷、更经济,更重要的是这些新方法设计出的机翼性能比传统设计有了显著的改进。传统的“试错法”需要设计几十个机翼进行大量风洞试验,而新的CFD设计方法,只需要设计出2~3个性能最好的机翼,再放到风洞里进行试验验证和最终选型。

同样,空客系列飞机在设计过程中从一开始就使用了全机N-S方程流场计算程序。又如波音公司在发展B777的详细设计阶段通过全机复杂构型气动计算发现,发动机喷流使增压装置的效率大为降低,经调整发动机安装方案,成功地解决了这一问题。

波音公司在研制B777和新一代B737飞机时广泛使用了CFD技术。归纳起来说,CFD的应用包括:机翼设计、机身-发动机吊挂设计、

副翼和襟翼的设计、垂尾和后体的设计、机头与驾驶室设计、机翼-机身的连接等。

欧盟、空客公司等同样对CFD寄予重托。使用CFD产生设计用的数据,而风洞试验主要用于性能检验,并更多地专注于生成数据库用以进行方法验证确认。已计划通过广泛使用CFD,到2015年使常规风洞试验减少一半。

### 国内CFD研究与应用情况

我国运输类飞机的发展过程实际上是一段测绘、仿制、改进的历史。例如改进原苏联20世纪五六十年代的运输机,组装生产美国七八十年代的麦道干线飞机等。迄今为止,我国还没有一个飞机研究所设计过任何大型飞机。在大型飞机设计上,我们不具备研制经验和手段。特别对一些关键的设计技术,由于预先的基础研究做得不够,因此自力更生地发展大型运输机,不仅要依赖于现有飞机研制基地的潜力还要依靠国内各行业的综合能力,对相关重大基础问题进行重点攻关,才能确保我国大型运输机研制成功。

“七五”以来,我国的CFD技术得到了较大的发展,先后研究和开发了翼型设计分析、机翼设计分析、机身组合体分析、全机CFD计算软件研究等方面的计算分析软件。经过多年的不懈努力,在克服了大量的技术难点后,开发了一系列可用于大型运输机气动研究和设计、机翼设计计算的CFD软件。这些软件系统,总体上达到国际90年代中期的先进水平,且拥有我国自主知识产权,可以在我国的大型军民用运输机部件气动力设计中发挥重要作用。

近几年,国内也引进了部分国外CFD商业软件,进行航空航天飞行器流场计算,并在型号研制中取得了一定的效益。但是,这些引进的商业程序普遍存在着精度低、计算效率

低、可靠性差、无源代码等缺点。事实上,西方国家向我们推销的CFD软件往往是他们的低端产品。而真正在飞机设计中发挥核心作用的那些“IN HOUSE”程序,国外各大飞机公司都严格保密,我们是买不到的。为了发展我国的民族飞机工业,不受制于人,必须脚踏实地地研究自己的CFD计算方法和程序。

这里给出一个我们课题组使用自己的CFD软件的计算实例:M6机翼CFD计算。

M6机翼是一个著名的经典实验模型,在国际上被广泛用作CFD考核计算模型。我们采用不同CFD格式计算了不同的流动条件。

从试验结果可以看出,我们的计算结果精度可靠,其精度同国际上已经发表的相关计算结果一致,而计算效率远远高于商业CFD软件。这说明,我们的CFD软件同西方CFD软件相比,在计算精度等方面并无大的差距,并且在计算效率和可靠性等方面具有优势。

### 结束语

CFD给飞行器气动设计方式带来了深刻的革命性变化,CFD技术与风洞试验相辅相成,已成为现代飞机气动力设计的两大重要技术手段,CFD的重要性和实用性应当得到重视。

CFD在飞机研制中的作用越来越大、越来越成功,欧美的发展历程启示我们应该重视CFD的研究和应用。在大型民机的研制中,在节省研制经费、缩短研制周期、提高研制质量等方面,CFD都具备它独有的优势可以发挥十分重要的作用。

我国在CFD计算精度、可靠性等方面,基本上已经达到欧、美国家的先进水平,在我国大型民机研制中,应该相信我们自己的CFD能力着力开发,为大飞机的研制作出应有的贡献。(责编 依然)