

# MDOE风洞试验方法研究

## Review of Modern Design of Experiment Methods in Wind Tunnel Test

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心

**摘要:** 在介绍OFAT风洞试验方法和MDOE风洞试验方法概念的基础上, 探讨研究了两种试验方法理念的本质区别; 简述了MDOE风洞试验方法具体实施的三个过程; 归纳分析了MDOE风洞试验方法的应用实例、效能评估和发展前景; 意在为国内风洞试验领域科研人员拓展思路、创新方法提供参考。

**关键词:** 风洞试验方法; 现代实验设计; 风洞试验

**Keywords:** wind tunnel test methods; modern design of experiment; wind tunnel test

### 0 引言

风洞试验是航空航天飞行器空气动力学研究中普遍采用的主要手段之一。自上个世纪前半叶风洞大规模建设、风洞试验方法逐步成熟以来, 在风洞试验领域至今仍普遍采用传统的风洞试验方法, 该方法为人们了解空气动力

学知识和飞行器的发展作出了贡献。随着时代和科学技术的发展, 以美国为代表的航空航天发达国家已经感觉到, 目前普遍采用的传统风洞试验方法的潜能已基本得到充分挖掘。为了满足21世纪和未来航空航天飞行器发展的需要, 提高风洞试验效率和试验数据的精

准度, 降低风洞试验成本和飞行器研制周期, 需要另辟新径, 寻求新的、更为科学的风洞试验研究方法。

### 1 MDOE风洞试验方法

#### 1.1 OFAT方法和MDOE方法

风洞试验同其他领域科学试验一

正常运转过程中从中压转子取功。该结构不但使发动机易于起功, 而且在慢车及大于慢车时能提高压气机(高压和中压)的喘振裕度, 航程大于9200 km可至少节省燃油6%。

遛达XWB是否采用了中压转子传动附件还没明确的相关报道, 但遛达XWB具有遛达系列中效率最高的涡轮系统, 增加了1级中压涡轮, 使得中压涡轮成为2级并提高了中压涡轮的性能, 为中压转子取功创造了更加有力的条件, 由此推测遛达XWB应与遛达1000均采用了中压转子传动附件结构。

#### 3.11 其他创新性技术

遛达XWB发动机拥有先进的发动机状态监控系统。为提高推力, 应用了

罗·罗公司双轴发动机E3E的部分技术。其他创新性技术还包括: 中压涡轮和高压涡轮上使用升级材料, 对高压涡轮进行改进设计, 并且升级中压涡轮的热障涂层等。

### 4 结束语

整个遛达系列发动机技术传承性强, 推力范围宽, 市场涵盖面广, 几乎可以满足现有各类大型商用飞机的动力需求, 技术与市场都相当成功。 

#### 参考文献

[1] 李杰. 创新, 让遛达之河不息: 解析罗·罗商用发动机发展之路[J]. 航空世界, 2009(1).

[2] 李杰. LEAP-X发动机的创新性技术[J]. 航空科学技术, 2011(4).

[3] 李杰. 后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片综述[J]. 航空制造技术, 2009(17).

[4] 李杰. 遛达发动机及其第五阶段燃烧室[J]. 航空科学技术, 2011(1).

[5] 李杰. 现代航空发动机分区燃烧策略分析[J]. 航空科学技术, 2011(3).

[6] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

[7] 索德军. Trent XWB发动机研制特点[J]. 航空发动机, 2010(5).

样,都是通过改变试验系统的一些独立变量,来获得试验对象的定量反应。对风洞试验而言,这些独立变量就是模型姿态参数、模型控制面参数和流场参数,需要定量测量的就是作用在模型上的力和力矩、压力分布和温度分布等。通过风洞试验获得模型气动特性数据,以便预测真实全尺寸飞行器上的气动载荷。

目前,风洞试验普遍采用的试验方法是调整风洞流场各参数到预定值,然后在只改变模型一个变量,如攻角,同时锁定试验模型其余姿态变量的条件下,获取随该变量变化的模型气动性能,这就是OFAT(一次一个参数变化)方法。该方法为风洞试验领域长期以来普遍采用的方法,通常也称为“传统设计的方法”。

1997年,美国航空航天局(NASA)兰利研究中心开始倡导一种新的试验方法来替代OFAT方法,这就是现代实验设计(MDOE)方法。早在1935年,Fisher就出版了《实验设计》一书,该书已有多个更新版本。相比之下,NASA倡导的新方法相对年代较近,并引入了计算机模拟技术等现代科学成果,故称之为MDOE方法,即现代试验设计方法。MDOE方法包括形式实验设计、实验和实验分析三个过程。

### 1.2 OFAT方法和MDOE方法本质区别

目前,风洞试验普遍采用OFAT方法,它是一种基于数据(data-based)的、以数据为中心(data-centric)的方法。人们普遍的试验理念是风洞被视为“工厂”,风洞试验数据则是“产品”,有效的风洞试验就是在保证质量条件下,最大限度利用资源,生产最多的风洞试验数据。MDOE方法的风洞试验理念则将“知识”视为风洞试验研究的基本产品,风洞试验研究的目标是获取对模型气

动性能的认识而不是获取大量试验数据。OFAT方法和MDOE方法的本质区别如下。

1) 风洞试验的理念不同,采用OFAT方法的风洞试验是以获取大量试验数据为目标,而MDOE方法的风洞试验是以获取特定科学推论为目标,前者关注“数据”,后者关注“知识”。

2) 风洞试验的指导原则不同,OFAT方法强调组成整个试验研究过程中的单个任务,注重单个数据点的质量和以数据采集率定义的生产率,而MDOE方法则是一种以过程为导向的方法,引入了集成研究质量和生产率的概念。

由于两种方法在理念和指导原则上的本质不同,导致了风洞试验的做法不同。传统的OFAT风洞试验方法试图通过覆盖面尽可能广的试验参数组合来测量某变量对气动载荷的影响,所看重的是直接大量获取风洞试验数据,强调的是通过改进风洞模拟的真实性和测试手段来提高试验数据的精度。MDOE方法则是以形式实验设计为基础,通过做少量必要的风洞试验来建立科学推论。该方法强调通过合理设计试验和精选少量精度高的试验来提高获取数据的精度。

### 1.3 MDOE方法的三个步骤

MDOE方法主要包括三个步骤:形式实验设计、实验和实验分析。

#### 1) 形式实验设计

风洞试验的形式设计与其他工业实验过程一样,它从输入一些参数开始并由此获得输出结果。形式设计过程的结果就是一个风洞试验运行表。设计过程的输入包括试验目的清晰陈述,该目的是以需要测量的特定响应变量、需要操控的特定独立变量以及各变量变化的精度范围来表述

的;输入包括为达到试验所需精度估算的数据量、定量估算的响应变量的方差、试验需要的解析度和试验研究者的推论风险容忍度(inference risk tolerance);输入也包括一些在设计过程中非常有用但非必需的信息,如:以前的数据、过去的经验以及与自变量和因变量相关的函数关系等。

通常,人们不知道气动系数随攻角、马赫数、模型控制面偏转角等变化的确切函数关系的形式,也就是写不出这个准确数学模型的形式。但可以在自变量一定的变化范围内,用曲线拟合技术来任意地逼近这个确定的函数关系。

#### 2) 实验

设计过程的输出就是一个经过仔细设计的风洞试验运行表,该表就是进行试验过程的输入,试验据此进行。该过程的输出是获得经过确认的自变量和因变量函数关系,由此可以适当地预测因变量对应自变量(一定的范围变化)的响应变化情况。

在该过程中,MDOE方法和目前采用的OFAT方法关键的区别在于数据点的采集顺序不同。OFAT方法的典型做法是顺序设置独立变量变化,通常是等间隔变化,这种做法的弊端是我们得到的响应函数不仅是独立变量的函数,同时也是时间单向增加变化的函数。在复杂的现代化风洞中,许多其他因素随时间也在发生着细微的变化,OFAT的顺序试验方法没有有效的方法分离这些影响。

鉴于OFAT顺序试验方法应对系统偏差和不明误差源的弱点,MDOE方法采用分块、随机和重复技术来应对控制误差,而不是OFAT方法采用“除一个变量外,保持其他所有都不变”的策略。独立变量表按随机的顺序执行。按照这个误差控制策略,独立变量就不会随时间

系统地变化。因此,就消除了上述OFAT方法中时间的影响。另外,MDOE方法在数据采集阶段拥有更多的量化分析手段和技术。

### 3) 实验分析

由描述设计目标和研究问题的输入,实验设计过程得到风洞试验运行表;依据试验运行表,进行试验过程得到一组自变量和因变量的数学模型;实验分析过程的目的是根据实验获得的数学模型回答最初的研究问题。

对MDOE方法来说,精心设计的试验实际上本身就是一个分析。因为在进行试验过程中,伴随已经进行了相当多的分析,并及时进行了必要的修正干预。MDOE方法通用的一些分析包括:总响应面分析、导函数分析、干扰分析、图表分析、识别基础模型、多目标优化和设备性能评估

## 2 MODE风洞试验方法应用实例

### 2.1 MDOE方法校准风洞

NASA兰利研究中心20英寸M6风洞是兰利气动热动力学实验室(LAL)主力风洞,OFAT方法校准风洞需要大量的试验车次(上百次)和费用,为了节约费用,1995年该风洞只校准了总压/总温包线中右边线的6个点。2005年,该风洞采用MDOE方法进行了校准,与过去的校准相比,拓展了风洞运行包线内的校准范围,提高了效率和校准精度,降低了校准周期和成本。MDOE方法使经常性的风洞校准成为可能。

此外,2001年,兰利研究中心采用MDOE方法对国家跨声速风洞(NTF)壁压进行了校准研究。

### 2.2 MDOE方法型号试验

2011年,NASA兰利研究中心统一规划风洞(UPTW)对某地空导弹以前的试验数据(采用OFAT方法)进行复

核,研究了采用MDOE方法改进导弹类模型风洞试验质量和生产率问题。

风洞试验的数据量取决于试验的性质,典型的测力(力矩)、测压试验通常用MDOE方法设计为响应面建模(RSM)试验。通过RSM试验,建立独立变量(攻角、马赫数等)与响应变量(力、力矩)的数学模型。根据MDOE方法的原理进行试验设计,如果已知关于该数学模型形式的任何“知识”,那么就可以简化建立该数学模型所需的试验数据。但通常大多数风洞试验的数学模型在试验前是未知的,因此MDOE方法常用通用的泰勒级数多项式拟合。

两种方法的试验结果表明,根据MDOE方法的质量保证策略,试验数据量可减少80%,风洞吹风时间减少50%;MDOE方法的力和力矩值的标准误差小于单点OFAT方法测量的标准误差。

### 2.3 MDOE方法校准天平

MDOE是美国NASA兰利研究中心为改进航空航天研究的质量和提提高生产率而倡导的一种科学试验方法,已成功运用于兰利中心的许多学科领域,其中包括天平校准。

美国NASA兰利研究中心的天平校准装置是一种单矢量加载系统(SVS),兰利中心根据该校准装置的条件,发展了二次方和三次方校准实验设计方法。通过新集成的硬件系统和应用MDOE方法优化校准过程。相比传统的校准方法,MDOE天平校准方法产生的数据点较少,获得的数据信息品质更高。

德国/荷兰DNW风洞的科研人员在其自动天平校准机上,根据MDOE原理,开展了天平校准方法研究。在天平校准研究中,传统OFAT方法完成

一台六分量天平校准,加载矩阵用了734个点,而MDOE方法应用加载矩阵点减少到了103个点。研究结果表明:传统校准需要的加载量是MDOE方法的7倍;MDOE方法校准点和验证点相比,准确度较好。

DNW目标是使MDOE天平校准方法成为一种成熟可靠的标准天平校准方法。

### 2.4 其他

MDOE方法还被用于优化气动布局、气动数据库建设、噪声试验,意大利航空航天研究中心(CIRA)也用MDOE方法进行了高超声速转换试验研究。

## 3 MDOE风洞试验方法应用效果分析

NASA兰利研究中心统一规划风洞(UPWT)进行了某飞机模型试验,试验测量了一定攻角、马赫数、雷诺数范围内机翼扭转角变化产生的气动力结果。图1是采用MDOE方法和OFAT方法需要的数据量和吹风时间的比较。同样的试验,MDOE方法只需要20个点,而OFAT方法需要330个点;同时MDOE方法所需的吹风时间大约是OFAT方法的60%。

图2是该试验结果精度比较,MDOE方法在大幅度缩减试验点的条件下,二者的结果的精度还是有可比性的,不存在量级上的差别。

图3是采用MDOE方法1年资源

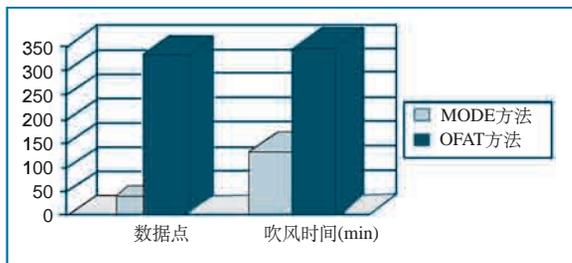


图1 MDOE方法和OFAT方法风洞试验数据量和时间比较

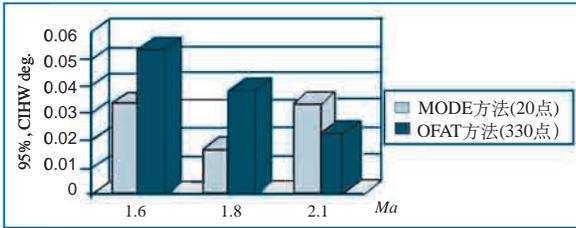


图2 MDOE方法和OFAT方法风洞试验精度比较

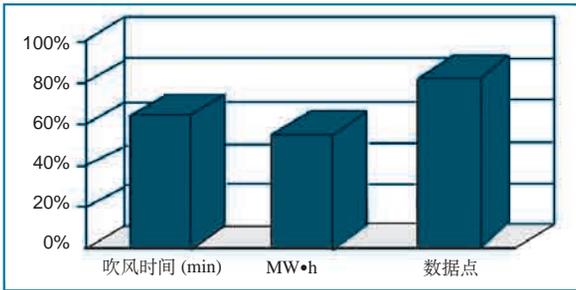


图3 MDOE方法风洞试验平均资源节约量

节约量的评估。为了评估,在相同的风洞进行了一系列MDOE方法和OFAT方法的背对背对比试验,资源的消耗按照吹风时间(min)、总数据量、消耗的电能(MW·h)三个指标来量化。评估比较试验在NASA兰利中心的14ft×22ft亚声速风洞、16ft跨声速风洞、统一规划超声速风洞进行,为时1年(1997年1-12月),进行了4个低、跨、超对比试验。

## 4 结论

1) MDOE风洞试验方法更加符合目前我国倡导的科学发展的理念。低碳经济、节能环保、可持续性是当前世界对各行各业生产和发展提出的总要求,航空航天领域也不例外。尽管国内外大多数人的风洞试验观念还是吹风次数越多越好,MDOE风洞试验方法已经向目前广泛使用的OFAT风洞试验方法发起了挑战。

2) MDOE风洞试验方法完全替代目前普遍采用的OFAT风洞试验方法尚需时日,但NASA兰利中心认为,MDOE

方法终将成为风洞试验普遍采用的标准方法。自上个世纪前半叶风洞试验诞生以来,风洞试验领域至今普遍采用OFAT风洞试验方法。尽管OFAT风洞试验方法有很多自身无法克服的弊端,但已被人们的“习惯”给“忽略”了。MDOE方法需要改变风洞试验从业人员“观念”,更新知识技术。

3) MDOE方法正越来越多地应用于风洞试验领域的各个方面。检索近年来的国外资料可

以看出,MDOE方法在风洞试验、气动布局研究、模型设计优化、数据库建设、天平校准、计算模拟等方面都有应用,人们对MDOE方法的认识逐步提高,用MDOE方法的理念处理空气动力试验研究领域问题正在被越来越多的人接受。美国NASA兰利研究中心已应用现代实验设计方法完成了100多例风洞试验。

4) MDOE方法将促进风洞试验设备和试验技术的创新发展。目前,风洞试验设备和技术是按OFAT方法要求发展起来的,有些方面不能满足MDOE风洞试验方法的要求,如风洞运行参数的某些随机变化能力、分析工具等,这就对风洞技术的创新发展提出了要求,必将促进风洞技术的发展和人们知识水平的提高。

5) 国内风洞试验领域尚未见有MDOE方法研究。MDOE方法是一种科学的方法,是风洞试验方法的一次革命,代表风洞试验方法发展方向,应尽早开展MDOE风洞试验方法的应用研究和评估。

## 参考文献

[1] Deloach R. Comparison of resource requirements for a wind tunnel test designed with conventional vs. modern design of experiments methods[R]. AIAA 2011-1260.

[2] Deloach R. Applications of modern experiment design to wind tunnel testing at NASA Langley Research Center[R]. AIAA 98-0713.

[3] Deloach R. The modern design of experiments: a technical and marketing framework[R]. AIAA2000-2691.

[4] Deloach R. Productivity and quality enhancements in a configuration aerodynamics test using the modern design of experiments[R]. AIAA 2004-1145.

[5] Rhode M N., Hypersonic wind tunnel calibration using the modern design of experiments[R]. AIAA2005-4274.

[6] Underwood P J. National transonic facility wall pressure calibration using modern design of experiments[R]. AIAA-2001-0171.

[7] Luner J J. Modern design of experiments techniques to optimize a leading edge extension[R]. AIAA-2003-0655.

[8] Dowgillo R M. Using modern design of experiments to create a surface pressure database from a low speed wind tunnel test[R]. AIAA2004-2200.

[9] Landman D. A wind tunnel external balance calibration using design of experiments[R]. AIAA 2007-1604.