航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jan. 25 2019 Vol. 30 No.1 8-13

NASA风洞测试需求预测方法评述

张波*
中国航空规划设计研究总院有限公司，北京 100120

摘　要：近20年来，美国航空工业界十分关注美国国家航空航天局(NASA)应该维持怎样的风洞群。按照时间顺序对相关讨论的研究梳理出三种测试需求的预测方法。基于用户需求调查的需求预测方法最为直接，但是其客观性和准确性容易受到受访对象自身立场和经验水平的制约；基于模拟仿真的预测方法有望将不确定性因素纳入考虑，得到比平均值更有意义的区间估计；基于功能替代的预测方法实现了功能与需求的对接，有利于统筹和调度风洞的使用。后两种预测方法都需要扎实的统计数据基础。

关键词：风洞；测试需求；预测方法；航空工业；模拟仿真

中图分类号：V216.7　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.30.002

风洞试验是气动特性数据的重要来源，风洞群是航空航天工业的重要基础设施，由于其昂贵的造价和运营成本，使得建设部门必须谨慎地在使用需求与建设规模之间寻求平衡。这就需要对风洞试验需求进行比较准确的预测。美国国家航空航天局(NASA)在这方面开展了一些研究，相关做法和经验对于国内航空工业而言，具有十分重要的借鉴意义。

冷战结束后，美国航空工业新型号数量越来越少。据兰德公司的统计[1]，从20世纪50年代到80年代，美国航空工业实现首飞的新机型从55种迅速减少为不到10种。与此同时，美国在航空科研方面的投入也大幅度降低。从1998年起，NASA每年的航空科研经费投入总额呈现出长期下降趋势[2]。上述变化导致NASA风洞的年使用时数也呈现出明显的递减趋势。NASA 2010年的研究表明[3]，从2003年到2011年，参与航空测试计划(Aeronautics Test Program，ATP)风洞的年使用时数(User Occupancy Hours，UOHs)从大约28000h减少到大约9000h，降幅高达68%。面临着封存、关闭冗余科研设施的巨大压力[4]，NASA需要认真地思考，未来对它们还有多少实际需求，现有的设施能否满足需要，以及应该怎样进行补充或调整。在这方面，美国的相关研究经历了从统计到预测、从局部到整体的发展过程。

1 基于用户需求调查的风洞使用需求预测

2006年，美国正式颁布了《国家航空研发政策》[5]。该政策制定了指导美国2020年前航空科技研发的原则和目标，明确了政府各部门在其中的职责和任务，并要求NASA、国防部、联邦航空局(FAA)等部门在国家科技委员会(NSTC)的协调下共同制订《国家航空研发与相关基础设施规划》。

NSTC下属的航空科学和技术子委会(ASTS)专门负责组织制定上述《国家航空研发与相关基础设施规划》。为配合ASTS开展工作，美国航空航天协会(AIAA)下属的地面测试技术委员会(GTTC)专门成立了工业航空测试设施工作组，就大型地面试验设施(主要是风洞)战略发展问题听取工业界的意见，以便于为NASA和国防部等运营大型地面试验设施的机构制订相关战略计划提供参考。

工作组的成员本身来自美国各大航空制造企业，他们大多数都是部门主管，并且在产品研发、测试等领域积累了非常丰富的经验，这使得他们可以从所在企业的产品和技术发展的两个角度，比较权威和专业地提出未来的风洞测试需求。工作组在梳理既往风洞使用情况的基础之上，结合企业未来的产品和技术发展需求，预测了未来5年(2008—2013)的风洞使用需求[6]。由于风洞测试

收稿日期：2018-09-12；退修日期：2018-11-09；录用日期：2018-12-05
*通信作者：Tel.：010-62038220　　E-mail：tigerzb@263.net
引用格式：Zhang Bo.Review on the NASA wind tunnel testing needs forecasting methods[J].Aeronautical Science & Technology，2019，30(01)：8-13. 张波.NASA风洞测试需求预测方法评述[J].航空科学技术，2019，30(01)：8-13.

需求具有十分显著的波动性，工作组的预测值采用了5年平均值的形式，结果见表1。

表1 美国航空工业界提出的2008—2013年风洞测试需求（年平均使用小时数）

Table 1 Wind tunnel testing needs 2008—2013 proposed by U.S. aeronautical industry (average annual usage hours)

飞行器种类	低速（Ma<0.4）	跨声速（Ma<1.6）	超声速（Ma<5）	高超声速（Ma≥5）	备注
通用航空	200	0	0	0	
商务喷气机（5~20座级）	1250	1250	150	0	
支线喷气机	500	550	0	0	
商业运输机	2850	4500	0	0	含大型商务喷气机
战斗机	2400	2900	900	450	含无人机
军用运输机和加油机	2050	1400	0	0	
战略轰炸机	1250	1100	350	0	含无人机
亚轨道飞机	0	0	0	0	无预测
空天往返飞行器	200	600	950	350	
传统直升机	2050	150	0	0	
倾转旋翼机	1200	0	0	0	
吸气发动机驱动的航空武器	350	850	150	0	含靶机
火箭发动机驱动或无动力的航空武器	400	1000	900	700	含靶机
动力系统	750	1400	750	200	含内部空气动力学测试和集成
技术验证机及其他	300	350	150	0	技术验证，独立于型号项目
侦察平台	900	850	50	0	
总计	16650	16900	4350	1700	

不难看出，工作组的预测方法是一种基于用户需求调查的统计方法。这种方法的优点主要是直截了当，但是其可信度取决于许多主观因素，如受访者是否全面掌握了相关信息，在做出基于上述信息的判断时是否秉承了客观公正的立场，以及个人经验与客观实际的符合程度等。由于上述主观因素的存在，预测结果的可信度无法得到有效地佐证。

此外，即使可以排除上述各种主观因素的不利影响，由于受访者基于经验的预测过程不是透明的，一旦外部情况发生变化，就需要费时、费力地重新召集相关专家重新预测，不便于根据情势变化及时更新预测结果。

2 基于模拟仿真的风洞使用需求预测

兰德公司提出的基于蒙特卡罗模拟仿真的风洞使用需求预测模型[7,8]可以较好地克服前述方法的不足。基于概率计算的仿真模型能够充分地将风洞使用需求预测过程中所面临的两大类不确定因素纳入考虑范围，并且其预测的结果是更有意义的、设定置信度下的区间估计。

风洞使用需求预测面临来自管理层和技术层的两大类不确定因素。来自管理层的不确定因素主要有：一是重大项目最终实施的可能性，以及项目启动的确切时间；二是这些项目具体包含的内容（不同的项目通常需要不同的风洞设施）。技术层不确定因素主要表现为测试时间受到技术方案的影响。

兰德公司将上述两类不确定因素分别加以考虑。对于管理层的不确定因素，通过政府、军方和主承包商的高层领导预判未来重大型号项目的开展情况来量化。例如，通过调研上述高层人物，可以预计未来10年中需要风洞试验的型号项目和科研活动的启动时间和实施概率。对于技术层的不确定因素，可以通过专业技术人员的技术分析和相关研发活动的历史统计数据来量化。美国航空航天协会（AIAA）发布的092-2-2003号标准中列出了各类风洞测试时间的统计数据[9]，见表2。

兰德公司认为，这种将风洞测试需求分析的不确定性划分为“管理层不确定性”和“技术层不确定性”的做法有以下好处：

（1）有利于高层管理人员和具体的技术人员分别对不确定性的概率做出估计。

（2）有利于按照不同的周期来对两种不确定性的大小进行更新。其中，“管理层不确定性”每年一次；“技术层不确定性”每5年一次。

（3）可以通过改变“管理层不确定性”来做测试需求的敏感性分析，为高层决策人员提供决策支持。

表2 AIAA标准(092-2-2003)中各种风洞试验时间的统计数据

Table 2 Various wind tunnel testing hours statistics listed in AIAA standard (092-2-2003)

	模型类型	试验目标	平均风洞试验时间/h*
概念设计阶段	低速力和力矩(高升力)	起降性能,操稳特性	500~1000
	高速力和力矩	巡航性能,高速操稳特性	500~1500
	独立进气道和静态进气道模型	进气道概念设计	200~700
	静态出气口模型	喷管性能	200~500
发展/验证阶段	低速力和力矩	起降性能,操稳特性	250~3500
	高速力和力矩	巡航性能,高速操稳特性	250~3500
	气动载荷模型	结构载荷	300~1000
	颤振模型(低速和高速)	颤振间隙/气弹效应	800~1000
	进气口/机体模型	进气口集成效应/进气口吸气系统性能	500~1500
	武器分离模型	安全外挂脱离/武器精确投送	2500~5000
	尾旋模型	尾旋改出	500~2000
	喷流效应模型	喷流对飞行器性能、操稳特性的影响	500~1000

注:此处的试验时间实际是用户占用时间(UOHs),包括模型安装、风洞试验和模型拆除的时间总和。表格中的两个数分别为正态分布中90%置信区间的下限值和上限值。

值得说明的是,AIAA提供的风洞测试时间统计数据中只有部分数据被按照"低速"和"高速"分别给出,其他数据对此未加区分。对于这些没有针对速度细分的数据,兰德公司采取了"低速"与"高速"平分的做法,并且"高速"试验的时间还进一步等分为"跨声速"和"超声速"的试验时间。见表3,对于一个发展/验证阶段的超声速战斗机项目而言,它对风洞测试的总需求等于(250, 3500) + [(300, 1000) + (800, 1000) + (500, 1500) + (2500, 5000) + (500, 2000) + (500, 1000)] /2 = (2800, 9250),其中超声速和跨声速的测试需求各占一半。

在确定了重大项目是否以及何时实施,以及各种不同类型的项目对风洞试验需求的统计模型后,可以得到表3所示的基础数据,为蒙特卡罗仿真模拟提供输入条件。模拟仿真的结果如图1所示(模拟次数设为50000次)。可以看出,各年测试时间的95%置信区间上限通常都会明显地高于平均值。可见,如果完全按照平均值来确定建设规模将有可能面临规模不足的困境。

可以看出,与基于用户需求调查的预测方法相比,基于

表3 假想的风洞测试需求预测基础数据

Table 3 A set of hypothesized data for wind tunnel testing needs forecasting

年度	预计开展的项目					数据来源
	A	B	C	D	E	
1	80%				100%	高层领导
2			100%		100%	
3					100%	
4		50%			100%	
5				60%	100%	
6	50%				100%	
7					100%	
8					100%	
9				20%	100%	
10					100%	
持续时间/年	2	5	3	8	1	技术人员/技术手册
测试时间90%置信区间下限	2800	2000	1500	1600	1600	
测试时间90%置信区间上限	12000	9800	8000	9000	4000	
测试时间平均值[1]	7400	5900	4750	5300	2800	参数计算
测试时间标准方差[2]	2797	2371	1976	2249	730	

注:1,平均值 = (90%置信区间下限 + 90%置信区间上限) /2;2,标准方差 = (90%置信区间下限-90%置信区间上限) /1.6449

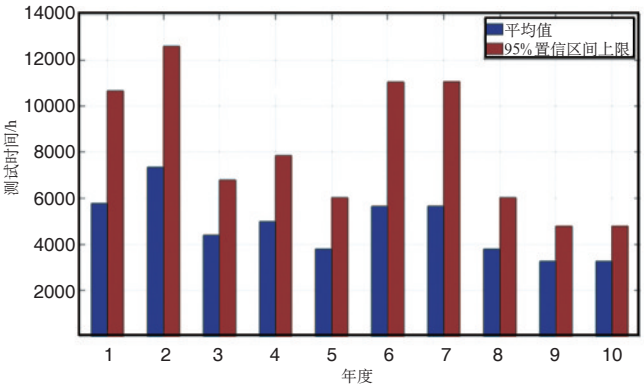

图1 各年测试时间的预测

Fig. 1 Testing time forecast for various years

模拟仿真预测方法大大减少了对专家经验的依赖,预测的依据和过程都比较透明,在客观性和科学性上优势十分明显。此外,由于它能够给出指定置信度下的区间估计,可以为建设规模的风险分析提供有力的支持。

但是,基于模拟仿真的预测方法工作量较大。一方面它需要设施运行管理单位事先地做好相关使用数据的记录、整理和积累工作;另一方面也需要在预测过程中对于上

述大量基础数据进行细致深入的统计分析，建立起相应的统计模型。

3 基于功能替代的风洞使用需求预测

在减少冗余，缩减风洞设施规模的努力中，兰德公司发现了基于设施来预测未来需求的弊端，提出了基于功能替代的风洞使用需求预测模型[10]。兰德公司指出，以往在风洞测试需求的预测中忽视了许多风洞在功能上有所重叠并可相互替代的事实，容易导致产生各种风洞都必须保留的假象。为此，应当在基于设施提出需求预测的基础之上，对这些需求按照测试功能重新汇总，得到基于功能的需求测试。兰德公司搭建了风洞未来需求框架（Future Needs Framework，FNF），将NASA基于设施的需求预测转换为基于功能的需求预测。

FNF模型包含两大基本的模块：设施/功能映射表和设施功能用量表。其中，设施/功能映射表按照不同的风洞测试目的（功能）对NASA现有的各种风洞设施进行了梳理，表4展示了兰德公司对NASA亚声速风洞的梳理情况。

设施功能用量表是在设施/功能映射表的基础之上建立的，它反映了各风洞中各种测试的用时比例，表5展示了NASA亚声速风洞的设施功能用量。兰德公司认为该表中各种测试的用时比例并非一成不变，它需要根据实际使用情况的统计数据进行定期更新。

表4 NASA亚声速风洞的设施/功能映射表

Table 4 A facility/function mapping for NASA's subsonic wind tunnel

一般测试	大型，高雷诺数	艾姆斯3.6m高雷诺数压力风洞
	超大型，常压	国家全尺寸空气动力学风洞群
	大型，常压	兰利4.3m×6.7m常压风洞
		兰利3.6m常压实验室
特殊测试	推进模拟	格伦2.7m×4.6m推进风洞
		国家全尺寸空气动力学风洞群
	远场声学	国家全尺寸空气动力学风洞群
	近场声学	格伦2.7m×4.6m常压推进风洞
		兰利4.3m×6.7m常压风洞
	尾旋	兰利6.1m垂直尾旋风洞
	小湍流	兰利小湍流压力风洞
	运动性	兰利4.3m×6.7m常压风洞

借助于设施功能用量表，可以将基于设施的需求预测转换为基于能力的需求预测。例如，假设某年格伦冰风洞、兰利3.6m常压实验室、兰利4.3m×6.7m常压风洞三个风洞的需求预测分别为1000h、1500h和2000h，那么可以推算出该年对大型常压类风洞测试需求的总量为1000×10%＋1500×100%＋2000×80%＝3200h。

将来自不同机构或方法的基于设施的需求预测通过FNF模型转换为基于能力的风洞使用需求预测后，可以得到不同的结果，由此可以分析得到不同能力需求预测的最小值、平均值和最大值，见表6。

表5 NASA亚声速风洞的设施功能用量表

Table 5 Facility/Function usage of NASA's subsonic wind tunnel

		艾姆斯3.6m高雷诺数压力风洞	格伦2.7m×4.6m常压推进风	格伦冰风洞	兰利3.6m常压实验室	兰利4.3m×6.7m常压风洞	兰利6.1m垂直尾旋风洞	兰利小湍流压力风洞
大雷诺数	大型，高雷诺数	100%						
	中型，高雷诺数							
	小型，高雷诺数							
常压	超大型，常压							
	大型，常压			10%	100%	80%		
	中型，常压							
	小型，常压							
特殊测试	推进集成，含气流模拟		50%					
	舱载/分级分离							
	运动/颤振模拟					10%		
	半模测试							
	地面效应测试							
	旋翼机测试							
	远场声学							
	近场声学		50%			10%		
	尾旋						100%	
	小湍流							100%
	结冰			90%				

表6 亚声速风洞测试能力的需求预测

Table 6 Testing needs forecast for subsonic wind tunnel

试验能力		最小值/h	最大值/h	平均值/h
大雷诺数	大型,高雷诺数	0	0	0
	中型,高雷诺数	0	0	0
	小型,高雷诺数	0	0	0
常压	超大型,常压			
	大型,常压	800	1600	1175
	中型,常压	0	0	0
	小型,常压	0	0	0
特殊测试	推进集成,含气流模拟	500	600	525
	舱载/分级分离	0	0	0
	运动/颤振模拟	100	200	138
	半模测试	0	0	0
	地面效应测试	0	0	0
	旋翼机测试	0	0	0
	远场声学	0	0	0
	近场声学	600	700	663
	尾旋	50	250	75
	小湍流	0	0	0
	结冰	1800	2000	1900
总需求		3850	5350	4475

按照测试功能的分类,将不同风洞的可用测试时间和上述预测的结果叠加到一起,可以清晰地看出各类风洞测试的可用测试时间是否满足未来的测试需求,为满足这些需求需要哪些风洞,以及各风洞的过剩能力。如图2所示,可以看出NASA的亚声速风洞可以满足自身未来所有的使用需求,而且除了大型常压风洞试验有可能需要使用兰利的4.3m×6.7m常压风洞和3.6m常压实验室两个风洞以外,其余的试验都可通过一个风洞予以保障。此外,格伦2.7m×4.6m常压推进风洞的剩余能力较多,推进集成和气流模拟试验所需的测试时间(最多大约600h)仅仅占其可用测试时间(将近3600h)的17%。对于它过剩的能力,最好的用途是用于开展近场声学方面的试验,从而缓解兰利4.3m×6.7m常压风洞可能面临的巨大压力。

兰德公司提出的FNF模型打破了基于设施预测需求的传统思路,可以为统筹设施建设、科学调度设施使用提供一定的支持。不过,这种方法在把基于设施的使用需求转换为基于能力的使用需求时,完全依赖历史统计数据来做概率性划分的做法需要大量历史统计数据的支持,对于新技术需求驱动下建设的新设施,这种方法并不适用。

4 结束语

能力建设需求预测是保障航空科技工业发展的重要工作。科学的能力建设需求预测是提高能力建设效率,优化能力组成,充分发挥现有能力效能的重要手段,应当得到高度的重视。

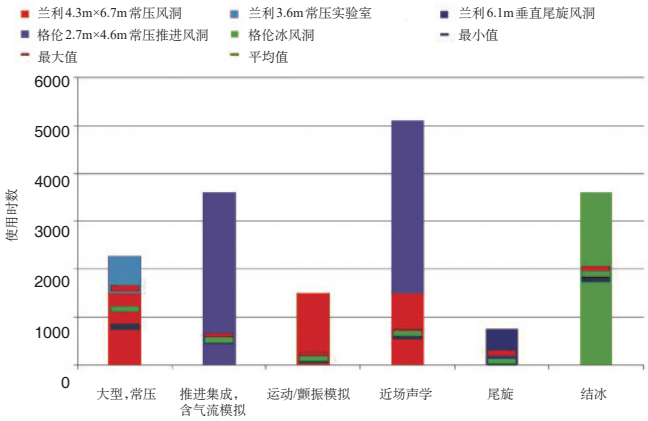

图2 NASA风洞基于功能的可用测试时间分布与预测的需求对比

Fig. 2 NASA wind tunnels' available testing times based on function compared with forecasted needs

在上述三种需求预测的方法中,基于用户需求调查的需求预测方法最为直接,并且依然是一种常用的方法。但是,这种方法的客观性和准确性容易受到受访对象的立场和经验水平的制约。另外,当涉及到的受访对象数量较多时,这种方法实施的难度较大。此外,对于需要定期更新的需求预测而言,容易发生受访对象更替而引入"系统误差"的问题。

利用概率模型将多种不确定性因素纳入需求预测模型,可以降低对专家和管理层意见的依赖程度,可以给出更有意义的区间估计,因此预测的透明度、客观性和科学性都明显地优于基于用户需求调查的预测方法,值得深入的研究和推广。这种方法需要大量的历史统计数据来构建概率模型,因此,需要建立完善的统计制度,开展大量的日常统计和分析工作。

航空科研设施建设,使用的成本高、规模过于庞大将会给国家和企业带来沉重的负担,不利于行业的持续发展。在能力规划建设的过程中,要做好统筹规划和建设工作,尽可能地避免能力冗余和过度的重叠。为此,应当建立起以功能分类为基础的设施使用预测和统计工作,以此来分析建设需求。

参考文献

[1] Antón P, Gritton E, Mesic R, et al. Wind tunnel and propulsion test facilities: An assessment of NASA's capabilities to serve national needs[M]. Santa Monica, California: RAND Corporation, 2004.

[2] Committee on the Assessment of NASA Laboratory Capabilities. Capabilities for the future: An assessment of NASA laboratories for basic research [M]. Washington D.C.: The National Academies Press, 2010.

[3] Marshall T. An overview of the NASA aeronautics test program strategic plan [DB/OL]. (2017-12-20). http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100019560.pdf.

[4] Melanson M, Chang M, Baker W. Wind tunnel testing's future: a vision of the next generation of wind tunnel test requirements and facilities [C] // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including New Horizons Forum and Aerospace Exposition , Orlando, Florida, 2010.

[5] National Science and Technology Council. National aeronautics research and development policy [DB/OL]. (2018-8-30). http://www. nasa. gov / pdf / 293693main_national_aeronautics_rd_policy_dec_2006.pdf.

[6] AIAA Ground Test Technical Committee. Infrastructure recommendations for implementation of executive order 13419 national aeronautics research and development [R]. AIAA Ground Test Technical Committee, 2008.

[7] Ohlandt C, Antón P, Kallimani J, et al. Monte Carlo model of national wind-tunnel demand [C] // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace, Orlando, Florida, 2011.

[8] Kallimani J, Ohlandt C, Osburg J. Long-term estimates of U.S. national wind tunnel demand for NASA Aeronautics Test Program (ATP) using a probabilistic model [C]// 50th AIAA Aerospace Science Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, 2012.

[9] AIAA. Standard 092-3-2003 Wind tunnel testing part2: practitioner's volume [S]. Reston, VA: AIAA, 2003.

[10] Kallimani J, Ohlandt C, Antón P, et al. Future test needs of U.S. national wind tunnels for NASA's aeronautics test program: an approach for mapping ground test facility usage projections into capability projections [C] // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace, Orlando, Florida Exposition, 2011.

作者简介

张波(1974—)男，博士，高级工程师。主要研究方向：设施规划。

Tel: 010-62038220

E-mail: tigerzb@263.net

Review on the NASA Wind Tunnel Testing Needs Forecasting Methods

Zhang Bo*

China Aviation Planning and Design Institute Group Co. LTD., Beijing 100120, China

Abstract: In the last two decades, U.S. aeronautical industry was concerned about what a wind tunnel cluster NASA should maintain. This paper sequentially studied the relevant discussions, and reviewed three testing needs forecasting methods. The method based on user polls is straightforward, but its objectivity and accuracy is prone to be limited by interviewee's position and experience. The method based on simulation can take into some uncertainties, and the interval estimation it provides is usually more meaningful than a mere average. The method based on function substitution provides a link between function and need, which is advantageous for usage planning and scheduling. The latter two methods require concrete usage statistics.

Key Words: wind tunnel; testing needs; forecast method; aeronautical industry; simulation

Received:2018-09-12； **Revised:** 2018-11-09； **Accepted:** 2018-12-05

***Corresponding author.Tel. :** 010-62038220 **E-mail:** tigerzb@263.net