

# 发动机动力模拟风洞试验中的空气桥技术

章荣平<sup>1,2</sup>, 王勋年<sup>1,2</sup>, 黄勇<sup>2</sup>

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力学研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:** 介绍了发动机动力模拟风洞试验中的空气桥设计技术和影响修正方法. 通过自由度分析, 选择了合理空气桥布局, 采用有限元方法对空气桥关键受力梁进行了优化, 建立了空气桥天平一体化数值模拟技术, 使得空气桥和天平刚度更加匹配. 通过这些设计及优化使得空气桥的作用力最小, 并具有较强的克服压力影响、温度影响的能力. 通过试验建立了空气桥附加刚度影响、内部压力影响、温度影响和内部流量影响的修正方法, 进一步减小了空气桥对天平的影响. 在  $8\text{ m} \times 6\text{ m}$  低速风洞进行了某大展弦比飞机全模涡扇动力模拟器(TPS)短舱动力模拟试验. 试验结果重复性好, 阻力系数精度达到0.0003, 和相关文献吻合. 这表明空气桥技术是成功的, 满足了 TPS 短舱动力模拟试验要求.

**关键词:** 风洞试验; 发动机模拟; 动力影响; 空气桥; 涡扇动力模拟器

中图分类号: V211.7

文献标志码: A

## Air bridge technology for engine power simulation test in wind tunnel

ZHANG Rong-ping<sup>1,2</sup>, WANG Xun-nian<sup>1,2</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
2. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

**Abstract:** The design technology and correction method of the air bridge for engine simulation test in wind tunnel were presented. The layout of the air bridge was determined according to freedom analysis. By finite element analysis, the key beams of air bridge were optimized. The rigidity of the air bridge and the balance was matched based on air bridge and balance assembly numerical simulation. These design and optimization minimized the applied force of the air bridge and improved the capacity for overcoming pressure and temperature effect. The rigidity effect, pressure effect, temperature effect and mass flow effect of the air bridge were corrected by serial tests. These corrections further minimized residual force of the air bridge. A high aspect ratio airplane full-span turbofan powered simulators (TPS) test was conducted in  $8\text{ m} \times 6\text{ m}$  low speed wind tunnel. The test results were good in repeatability. The standard deviation of drag coefficient was 0.0003. The test results also agreed well with related papers. The air bridge technology is thus proved successful and can meet the requirement of TPS nacelle power simulation test.

**Key words:** wind tunnel test; engine simulation; power effect; air bridge; turbofan powered simulators (TPS)

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 空气动力学国家重点实验室基金(SKLA2009A0103)

作者简介: 章荣平(1981-), 男, 安徽庐江人, 助理研究员, 硕士, 主要从事低速风洞试验技术研究.

为了降低结构质量、提高有效载荷,现代运输机动力装置(涡扇、螺旋桨等)多采用近耦合安装形式.动力装置与机翼、挂架及尾翼之间存在非常复杂的干扰流场.现代的飞机设计发展了飞机-发动机一体化设计方法,这种设计方法对提高飞机的性能以及安全性具有重要作用.在风洞中进行飞机带动力模拟试验是开展飞机-发动机一体化设计的主要手段<sup>[1]</sup>.为在风洞中模拟涡扇发动机,发展了引射式短舱、TPS 短舱等多种模拟技术;为在风洞中模拟螺旋桨发动机,发展了空气马达驱动螺旋桨模拟技术.

这些发动机动力模拟试验技术在欧美国家得到了大力发展,并广泛应用,如“空中客车”和“波音”系列飞机在风洞中开展了大量的 TPS 短舱动力模拟试验,大型运输机 A400M 和预警机 E-2 系列在风洞中开展了空气马达驱动螺旋桨动力模拟试验<sup>[2-4]</sup>.动力模拟风洞试验已经成为现代飞机设计中不可缺少的试验项目.我国自主研制的 ARJ21 飞机也在国外进行了 TPS 短舱动力模拟试验.为了满足我国以大飞机为代表的一系列飞机型号研制的迫切需要,急需发展和完善发动机模拟技术.国内中国空气动力研究与发展中心、中国航空工业空气动力研究院等单位都在积极发展和完善发动机模拟技术<sup>[5-8]</sup>.

和真实发动机不同,风洞中的发动机模拟装置多采用高压空气驱动.为了驱动发动机模拟装置,需要采用专用管路传输高压空气.动力模拟技术必须要解决的难题是管路既要能输送高压空气,又对天平测力的影响较小且稳定,且同时还能克服高压空气的内力、温度效应.空气桥就是目前解决这一难题最先进的技术,是动力模拟试验技术的关键技术之一,广泛应用在 TPS 短舱动力模拟、引射短舱动力模拟、喷流模拟、空气马达驱动螺旋桨模拟等试验中<sup>[9-10]</sup>,也可推广应用至发动机、喷管测试领域<sup>[11-13]</sup>.

本文以 8 m×6 m 低速风洞中的全模 TPS 短舱动力模拟试验为例,介绍了空气桥的设计和修正技术.

### 1 空气桥技术要求

1) 精度要求:对风洞试验精度不产生明显影响,综合试验精度应当满足国军标要求.

2) 准度要求:动力模拟试验目的之一就是获得发动机进排气的干扰阻力.为评估干扰阻力,阻力系数的精度要达到 0.0005.对于 8 m 量级低速

风洞,来流马赫数为 0.2 时,飞机模型 0.0005 的阻力系数约相当于 4 N 的载荷,因此空气桥引起的测量误差要控制在 4 N 以内.

3) 空间要求:两路空气桥安装空间直径为 0.38 m.

### 2 空气桥设计技术

空气桥设计首先要确定柔性单元的结构形式,然后把各种柔性单元连接起来,既能满足空间要求,又能使空气桥的刚度最小.为了使得空气桥的对天平测力的影响最小,需要对空气桥进行自由度分析,让空气桥的自由端能够在所需要的方向上刚度较小,近似认为其可以自由移动.对于全模 TPS 短舱动力模拟试验,因为要测量 6 个分量的力、力矩,空气桥就要有 6 个自由度<sup>[14]</sup>.

8 m×6 m 低速风洞全模 TPS 短舱动力模拟试验空气桥采用的是内压式柔性节,如图 1 所示,它主要由金属波纹管 and 浮动环等组成.柔性节具有两个角度自由度,可以绕 y, z 轴作小角度旋转.该空气桥布局采用的是矩形布局,如图 2 所示,它使用了 3 个柔性节,其中 2 个横置,1 个竖置.它具有 6 个自由度,对天平的影响小,并且自身具有较强的克服压力影响、温度影响的能力.

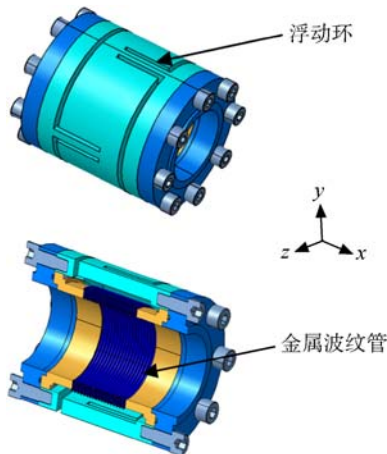


图 1 内压式柔性节

Fig. 1 Cardan link with bellow under internal pressure

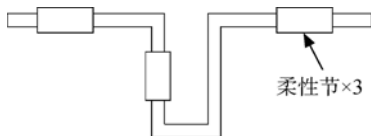


图 2 矩形空气桥布局

Fig. 2 Rectangular air bridge layout

在上述设计的基础上,采用有限元方法对空气桥关键受力梁进行了优化设计,对空气桥和天平进行一体化设计,如图3所示,评估了空气桥对天平测力的影响,优化了空气桥和天平的位置关系,并使得空气桥和天平刚度更加匹配<sup>[15]</sup>.最后,综合考虑模型内部空间、内部设备及空气桥的技术要求,完成了空气桥的设计,如图4所示,空气桥总共两路,对称安装于天平两侧.

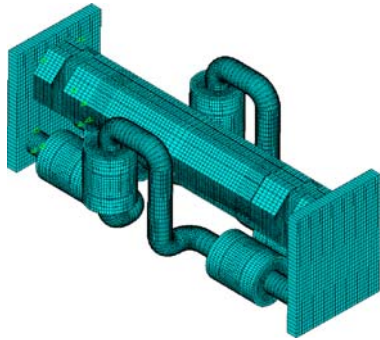


图3 空气桥/天平组合体计算

Fig. 3 Air bridge-balance assembly calculation

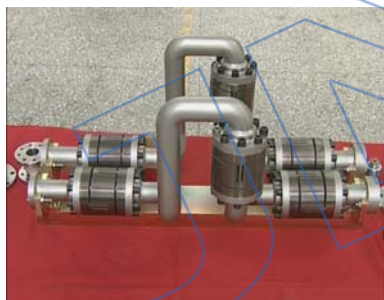


图4 空气桥照片

Fig. 4 Photograph of air bridges

### 3 空气桥修正技术

通过空气桥修正技术,进一步修正空气桥的影响量.空气桥的影响主要包括空气桥附加刚度影响、压力影响、温度影响和内部流动影响<sup>[14]</sup>.

#### 3.1 空气桥附加刚度影响修正

空气桥附加刚度影响通过空气桥与天平组合校准来扣除.该校准试验在轴系校准装置上进行,如图5所示.该校准装置配有滑轮、钢带及天平支座和3套加载头,分别适用于法向力量级为3,10 kN和25 kN的天平静校.该装置刚性好,安装精度高.

图6、图7给出了部分施加标准载荷校准时,空气桥对天平输出的影响曲线,图6中,纵坐标  $V$



图5 空气桥与天平组合校准

Fig. 5 Calibration of air bridge-balance assembly

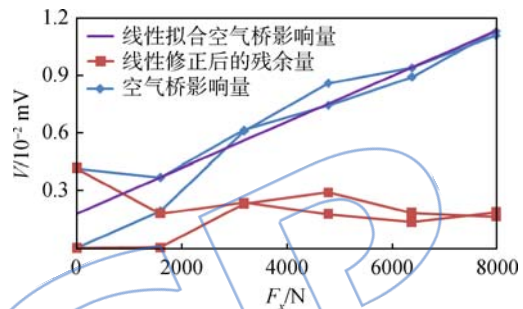


图6 施加  $F_x$  空气桥对 X 通道的影响

Fig. 6 Effect of air bridge on X channel applying  $F_x$

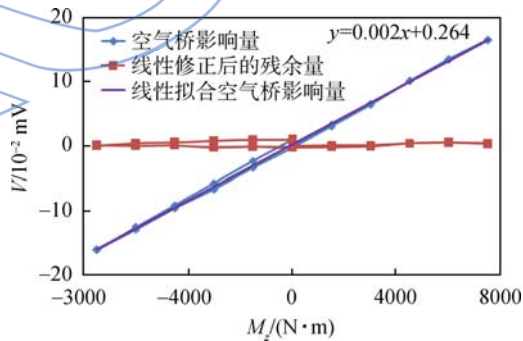


图7 施加  $M_x$  空气桥对 X 通道的影响

Fig. 7 Effect of air bridge on X channel applying  $M_x$

为天平输出电压,横坐标  $F_x$  为  $x$  分量载荷.图中可以看出,空气桥的影响量较小,且具有很好的线性.实际应用时,采用天平空气桥组合体加载数据计算校准公式,就扣除了空气桥的附加刚度影响.表1给出了空气桥对天平精准度的影响,由表1可知,空气桥附加刚度对天平的精准度几乎无影响.

#### 3.2 空气桥内部压力影响修正

空气桥内部压力影响主要表现为内部压力对空气桥刚度影响以及内部压力引起的作用力.该影响也是在校准装置上通过空气桥与天平组合加载来扣除.

表 1 空气桥附加刚度对天平精准度的影响  
Table 1 Effect of air bridge added stiffness on balance accuracy

状态	精准度	$F_y$	$F_x$	俯仰力矩 $M_z$	$F_z$	偏航力矩 $M_y$	滚转力矩 $M_x$
无空气桥	精度/%(FS)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
	准度/%(FS)	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
带空气桥	精度/%(FS)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
	准度/%(FS)	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1

加载结果表明,内部压力对空气桥的刚度影响很小,可以忽略.内部压力( $p$ )引起的作用力见图 8,从图中可以看出,内部压力引起的作用力具有较好的线性,通过线性修正能够将压力影响控制在1N以内.

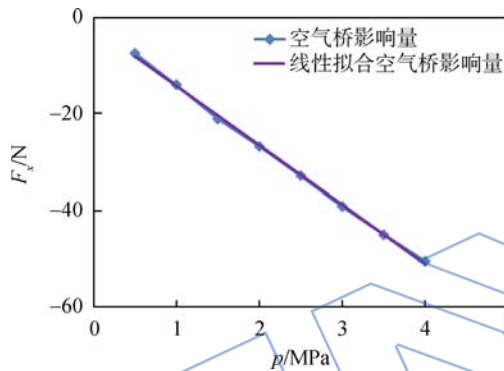


图 8 空气桥内部压力影响  
Fig. 8 Pressure effect of air bridge

### 3.3 空气桥温度影响修正

在空气桥上布置 8 个温度传感器对空气桥温度影响进行修正.采用高压加热气体对空气桥进行加热后,记录天平输出随空气桥温度变化关系,建立修正公式.

图 9 是温度传感器位置变化后天平  $F_x$  输出随空气桥温度变化曲线,可以看出,天平读数变化与空气桥温度线性关系较好,通过线性修正能够

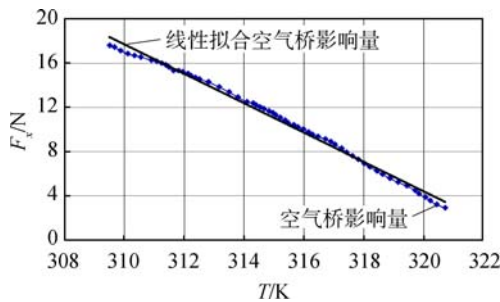


图 9 空气桥温度影响  
Fig. 9 Temperature effect of air bridge

将温度影响控制在 1 N 以内.

### 3.4 空气桥内部流动影响修正

空气桥的内部流动影响通过标准喷管喷流试验获得,试验图片见图 10.将空气桥及天平安装于机身内部.采用高压气源供气.高压空气经供气管路流经空气桥后,通过标准喷管排出.标准喷管的推力以及空气桥的流动影响作用力通过天平测量.通过两次喷流试验组合分解出空气桥的流动影响作用力.一次标准喷管的喷流方向沿机身轴线向前,记为 A 状态,另外一次将标准喷管旋转 180°,使其喷流反向,记为 B 状态.

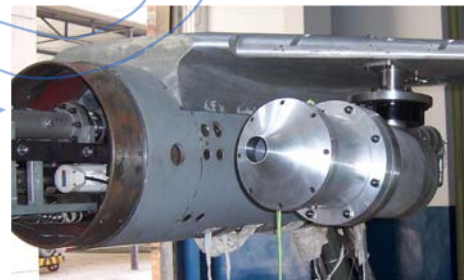


图 10 空气桥流动影响试验  
Fig. 10 Air bridge flow effect test

A 状态和 B 状态空气管桥路内部气流的流动是相同的,因此其对天平产生的附加作用力也相同,用符号  $\Delta F_x$  表示. A 状态和 B 状态标准喷管推力是相反的,当喷流流量、温度以及周围环境参数相同时,其推力大小是相同的,因此将 A 状态喷管推力记为  $F_{cn}$ , B 状态的喷管推力记为  $-F_{cn}$ . A 状态和 B 状态的天平受力如下:

A 状态

$$F_{xA} = F_{cn} + \Delta F_x \quad (1)$$

B 状态

$$F_{xB} = -F_{cn} + \Delta F_x \quad (2)$$

可得到空气桥的流动影响作用力

$$\Delta F_x = (F_{xA} + F_{xB})/2 \quad (3)$$

图 11 给出了空气桥内部流动对天平  $F_x$  的影

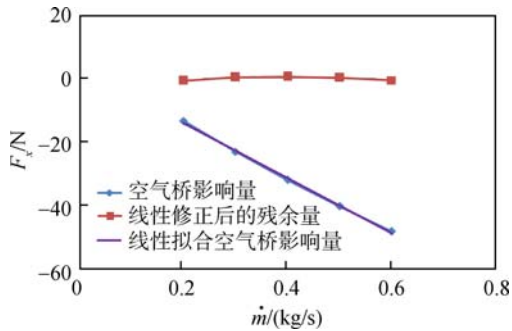


图 11 空气桥流动影响

Fig. 11 Flow effect of air bridge

响.由图可知,空气桥的流动影响作用力跟质量流量成线性关系,通过线性修正能够将内部流动对  $x$  分量的影响控制在 1 N 以内.

### 3.5 空气桥影响综合修正

在实际的试验中,空气桥的流动影响、压力影响、温度影响是耦合在一起的.近似认为这几种影响是可以线性叠加的,分别进行线性修正.根据误差传递理论,综合修正后,空气桥对天平测量的影响量控制在 4 N 以内,能够满足低速全模 TPS 短舱动力模拟试验的要求.

## 4 试验验证

在  $8\text{ m} \times 6\text{ m}$  风洞进行了某大展弦比飞机 TPS 短舱动力模拟试验.试验重复性试验精度纵、横向分量皆在国军标合格指标之内,阻力系数  $C_d$  综合精度达到 0.0003.图 12 给出了该飞机起降状态阻力系数随 TPS 转速  $n$  的关系曲线,与文献[16]获得的结果吻合,规律合理,这对建立的空气桥技术进行了验证.

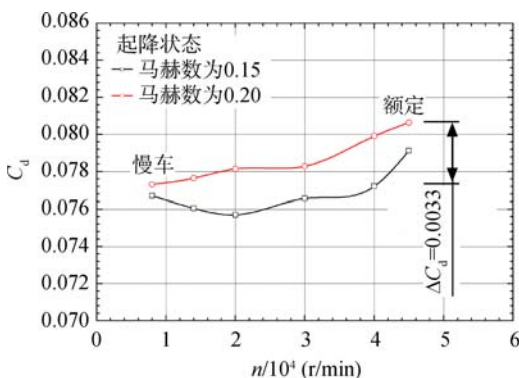


图 12 阻力系数-TPS 转速曲线

Fig. 12 Curves of drag coefficient and TPS rotational speed

## 5 结论

本文主要介绍了发动机动力模拟风洞试验中的空气桥的设计和修正技术,有以下几点结论:

1) 在选择合理空气桥布局的基础上,采用有限元方法对空气桥关键受力梁进行了优化设计,建立了空气桥天平一体化设计技术.

2) 通过试验建立了空气桥附加刚度影响、内部压力影响、温度影响和内部流动影响的修正方法.

3)  $8\text{ m} \times 6\text{ m}$  低速风洞全模 TPS 短舱动力模拟试验阻力系数综合精度达到 0.0003,动力影响量规律合理,验证了空气桥的设计和修正技术.

## 参考文献:

- [1] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] Desplas P H, Bonnaud D, Gatard J, et al. Test of the A400 motorized model in the ONERA modernized F1 wind tunnel[R]. AIAA-2006-3645, 2006.
- [3] Philipsen I, Hoeijmakers H. An overview of advanced propeller simulation tests in the German-Dutch wind tunnels (DNW)[R]. AIAA-2002-2920, 2002.
- [4] Philipsen I, Hegen S. Advances in propeller simulation testing at the German-Dutch wind tunnels (DNW) [R]. AIAA-2004-2502, 2004.
- [5] 徐铁军,郝卫东,李聪,等. 气动院校准箱工作原理分析及 TPS 校准目标量的获得方法[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(4): 99-104.  
XU Tiejun, HAO Weidong, LI Cong, et al. Analysis of operative principles of calibration tank in CARIA and acquired methods of objective parameters in TPS calibration [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(4): 99-104. (in Chinese)
- [6] 芮伟,易凡,杜宁,等. 2.4 m 跨声速风洞 TPS 测控系统设计与实现[J]. 实验流体力学, 2008, 22(4): 72-75.  
RUI Wei, YI Fan, DU Ning, et al. Design and realization of TPS measurement and control system for 2.4 m transonic wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(4): 72-75. (in Chinese)
- [7] 熊能,林俊. 2.4 m 跨声速风洞带 TPS 测力试验数据精度要求分析[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(3): 42-46.  
XIONG Neng, LIN Jun. An analysis of data accuracy of force measurement testing with TPS in 2.4 m transonic wind tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(3): 42-46. (in Chinese)
- [8] 陶洋,刘光远,张兆,等. 高速风洞带动力模拟试验 TPS 短舱唇口设计[J]. 航空动力学报, 2013, 28(5): 1081-1085.  
TAO Yang, LIU Guangyuan, ZHANG Zhao, et al. Engine nacelle lip design for high speed TPS wind tunnel tests[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(5): 1081-1085. (in Chinese)

- [9] Philipsen I, Hoeijmakers H. Improved air-supply line bridges for a DNW-LLF A380 model (RALD 2000)[R]. Darmstadt, Germany: Third International Symposium on Strain Gauge Balances, 2002.
- [10] Philipsen I, Hoeijmakers H. A new balance and air-return line bridges for DNW-LLF models (B664/RALD 2001) [R]. California: Fourth International Symposium on Strain Gauge Balances, 2004.
- [11] 罗华云, 赖传兴, 王月贵, 等. 喷管模型试验器六分量天平校准技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 67-73.  
LUO Huayun, LAI Chuanxing, WANG Yuegui, et al. Six-component balance calibration technology for nozzle model testing facility[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 67-73. (in Chinese)
- [12] 付尧明, 王强, 额日其太, 等. 矢量喷管六分量测力试验台的研制[J]. 流体力学实验与测量, 2002, 16(1): 87-93.  
FU Yaoming, WANG Qiang, Eriqitai, et al. Development of the six-component force measuring balance for thrust vectoring nozzle testing[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(1): 87-93. (in Chinese)
- [13] 马彬, 刘宇, 戴梧叶. “瓦”状塞式喷管的实验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 248-252.  
MA Bin, LIU Yu, DAI Wuye. Experimental research on tile-shaped aerospike nozzles [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 248-252. (in Chinese)
- [14] Ewald B. Transport configuration wind tunnel tests with engine simulation[R]. AIAA 84-0592, 1984.
- [15] 章荣平, 王勋年, 黄勇, 等. 低速风洞全模 TPS 试验空气桥的设计与优化[J]. 实验流体力学, 2012, 26(6): 49-53.  
ZHANG Rongping, WANG Xunnian, HUANG Yong, et al. Design and optimization of the air bridge for low speed full-span TPS test [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(6): 49-53. (in Chinese)
- [16] Kooi J W, de Haij L, Hegen G H. Engine simulation with turbofan powered simulators in the German-Dutch wind tunnels[R]. AIAA-2002-2919, 2002.