

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209889

五分量短舱内阻测力天平的研制

李勇 郭举光 赵晓光 赵长辉 黄研清

(中国航空工业空气动力研究院 沈阳 110034)

摘要: 为实现对民机短舱内流阻力的精确测量,需要开展短舱内阻测力天平的结构设计研究。在总结分析常规结构天平的使用问题的基础上,采用大刚度、具有力放大功能的天平元件作为基本敏感单位,多个天平元件组合测量多维力的方法,成功研制一台五分量测力天平。天平的刚度较常规柱梁结构天平提升7倍,天平的准度指标达到国军标合格水平。风洞试验中天平各元回零良好,动态性能稳定,测量载荷规律合理,阻力测量精度达到0.000 1水平。为民机短舱内流阻力测量的测力天平研制提供了借鉴与参考。

关键词: 短舱内流阻力;风洞试验;测力天平

中图分类号: V211.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 53510

The study of five components nacelle internal flow resistance force balance

Li Yong Guo Juguang Zhao Xiaoguang Zhao Changhui Huang Yanqing

(AVIC Aerodynamics Research Institute, Shenyang 110034, China)

Abstract: In order to measure the nacelle internal flow resistance accurately, It is necessary to study the structural design of the nacelle internal flow resistance balance. On the basis of summarizing and analyzing the usage of conventional balance, we adopt the method of great stiffness, force amplification function elements as basic sensitive unit, combining multiple balance elements, development of five-component force balance successfully. The stiffness of the balance is seven times higher than that of the conventional column-beam balance, the veracity index of the balance is up to the standard of the GJB. In the wind tunnel test, each element of the balance returns to zero well, the dynamic performance is stable, and the law of measuring load is reasonable, The precision of resistance measurement reaches 0.000 1 level. It provides a reference for the development of the force balance for measuring the nacelle internal flow resistance of civil aircraft.

Keywords: nacelle internal flow resistance; wind tunnel test; force balance

0 引言

面对日益激烈的国际竞争,减小民用客机的巡航阻力,提升其经济性能显得越发重要^[1-4]。短舱作为民机的重要组成部分,其内流的阻力大小将对飞机总体阻力系数具有重要的影响。有必要针对不同的短舱的内流阻力进行深入研究^[5],研究手段主要是CFD计算法与风洞试验测量法。目前风洞内阻测量主要是采用测压耙进行压力的测量,但测压耙存在对通气模型管道出口处的气流产生干扰、测点固定捕获流场信息误差大的问题^[6]。为此需要开展短舱内阻测力天平研究,进行短舱内流阻力直接测量,以提高测量的精度^[7]。

由于短舱结构限制,测量只能采用环式天平结构^[8-9]进

行测量,且因为短舱内流阻力载荷较小,采用单分量天平测量会带来其他载荷量较大的干扰无法修正的问题,测量误差会很大。因此只能采用五分量测力天平进行测量,而常规结构五分量测力天平的测量元件多为柱梁结构,其具有的主要问题是天平刚度较弱,受载变形量较大,不仅不能较好保证短舱内型面的试验时的模型姿态,还会造成短舱内外型面预留变形间隙过大产生的串流及密封问题。为此项目组研发一种新型的五分量短舱内阻测力天平可有效的解决上述问题。

1 天平设计载荷直径的选取

采用CFD计算方法对短舱的内涵道载荷进行估算并选取天平的设计载荷如表1。根据模型尺寸确定环式天平

收稿日期:2022-05-10

内径 138 mm 外径 144 mm。

表 1 天平设计载荷

项目\单元(N,Nm)	Y	M_z	X	Z	M_y
天平设计载荷	40	3.6	40	40	1.8

2 天平结构原理

由于天平测量载荷较小,为了得到较大的信号输出的同时具有较好的刚度,项目组参考杠杆原理,采用八个力放大结构将测量感应应力放大,同时利用力放大结构的铰支连接的大刚度特性来提高天平的整体刚度。通过被测载荷拉、压悬臂梁得到测量应力,利用各敏感元件在感应各载荷时的变形方向的不同,进行组合实现各载荷的力的分解,进而实现对各载荷的测量。结构如图 1。

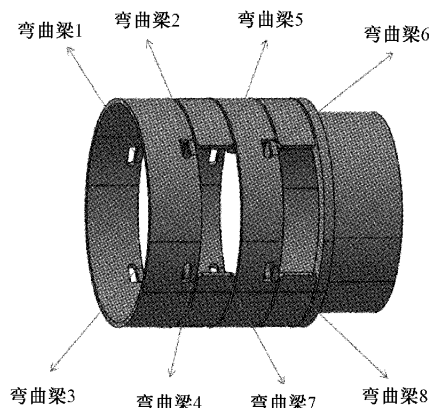


图 1 五分量短舱内阻测力天平结构

2.1 阻力测量原理

在阻力作用下测量元件 1、2、3、4、5、6、7、8 均产生同向的弯曲变形。应变计算如式(1)。

$$\epsilon_x = \frac{6XL_4L_1}{4EL_5bh^2} \quad (1)$$

2.2 俯仰力矩测量原理

在俯仰力矩作用下,弯曲梁 1、2、5、6 变形方向相同,弯曲梁 3、4、7、8 变形方向相同且与弯曲梁 1、2、5、6 相反。应变计算如式(2)。

$$\epsilon_{M_z} = \frac{6M_zL_4L_1}{8EL_3L_5bh^2} \quad (2)$$

2.3 升力测量原理

在升力作用下,弯曲梁 1、2、7、8 变形方向相同,弯曲梁 3、4、5、6 变形方向相同且与弯曲梁 1、2、7、8 相反。应变计算如式(3)。

$$\epsilon_y = \frac{6YL_6L_4L_1}{8EL_3L_5bh^2} \quad (3)$$

2.4 偏航力矩测量原理

在偏航力矩作用下,弯曲梁 1、3、5、7 变形方向相同,弯曲梁 2、4、6、8 变形方向相同且与弯曲梁 1、3、5、7 相反。应

变计算如式(4)。

$$\epsilon_{M_y} = \frac{6M_yL_4L_1}{8EL_2L_5bh^2} \quad (4)$$

2.5 侧力测量原理

在侧力作用下,弯曲梁 1、3、6、8 变形方向相同,弯曲梁 2、4、5、7 变形方向相同且与弯曲梁 1、3、6、8 相反。应变计算如式(5)。

$$\epsilon_{M_x} = \frac{6ZL_6L_4L_1}{8EL_2L_5bh^2} \quad (5)$$

式(1)~(5)中, Y 、 M_z 、 X 、 Z 、 M_y 是天平测量的五分量载荷, ϵ_x 、 ϵ_{M_z} 、 ϵ_y 、 ϵ_{M_y} 、 ϵ_z 是天平各载荷分量的应变, E 为天平材料的弹性模量,其余为结构尺寸参数如图 2。

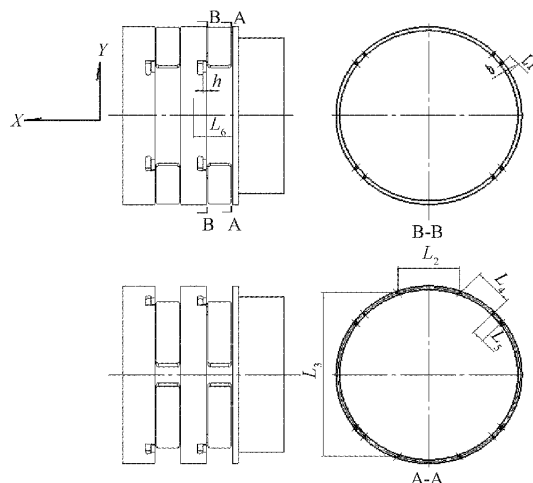


图 2 五分量短舱内阻测力天平尺寸参数图

3 天平设计应变有限元验证计算

采用材料力学经验公式对天平各测量元件尺寸进行调整及优化后采用有限元法进行验证计算。天平各元设计应变达到 $150 \mu\epsilon$ 满足风洞应变天平的设计规范要求,天平设计应变云纹图如图 3~7。

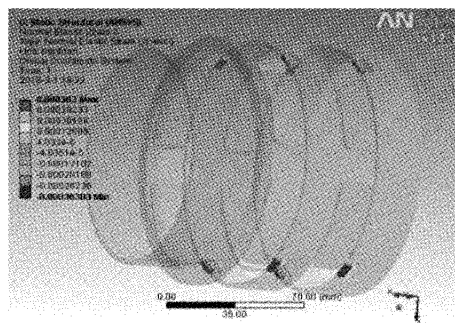


图 3 升力作用下测量梁应变云图

4 天平刚度有限元计算

采用 ansys 软件对常规结构的天平及新研制的天平的刚度进行计算,常规天平的满载变形量为 0.28 mm 左右,

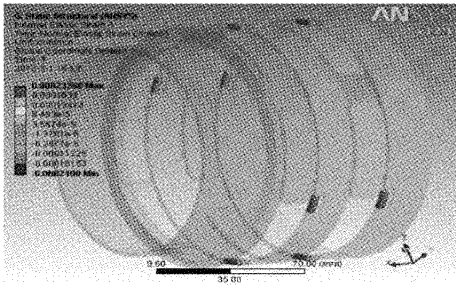


图 4 俯仰力矩作用下测量梁应变云图

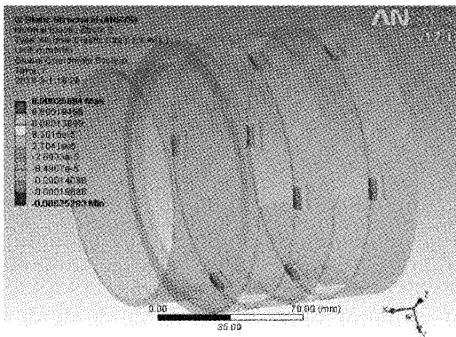


图 5 侧力作用下测量梁应变云图

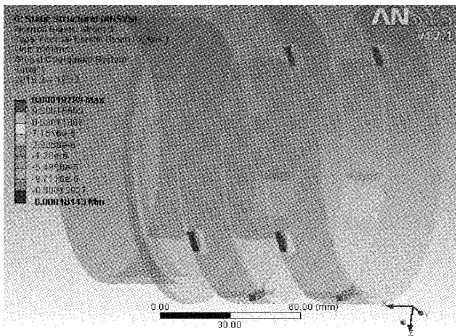


图 6 偏航力矩作用下测量梁应变云图

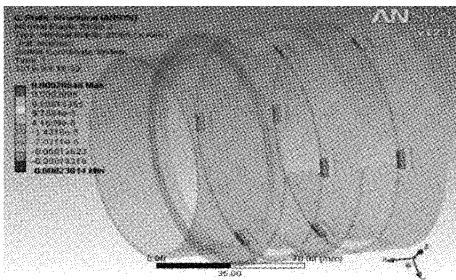


图 7 阻力作用下测量梁应变云图

采用力放大结构的天平满载变形量为 0.03 mm 左右。如图 8、9。

5 天平粘贴组桥

在天平的 8 个弯曲梁上各粘贴 4 片应变片,组成 8 个

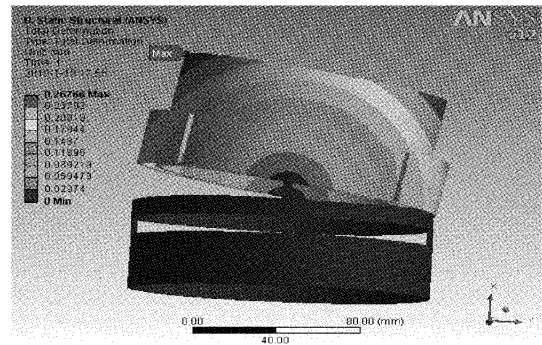


图 8 常规结构的天平刚度云图

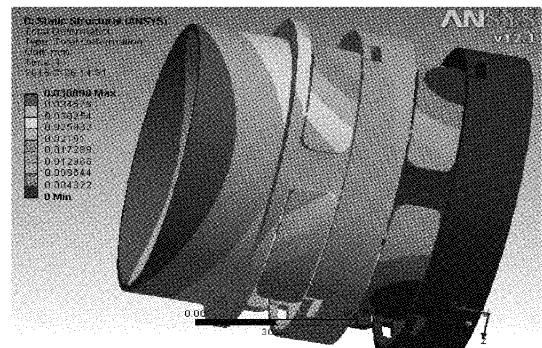


图 9 新型结构天平刚度云图

独立的弯矩测量惠斯通电桥^[10],通过 8 个电桥的组合得到测量的 5 个分量的载荷。组桥后天平各力计算公式如式(6)~(10)。

$$X = F_x(\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_6 + \Delta U_7 + \Delta U_8) \quad (6)$$

$$M_z = F_{M_z}(-\Delta U_1 - \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 - \Delta U_5 - \Delta U_6 + \Delta U_7 + \Delta U_8) \quad (7)$$

$$Y = F_y(\Delta U_1 + \Delta U_2 - \Delta U_3 - \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_6 - \Delta U_7 - \Delta U_8) \quad (8)$$

$$M_y = F_{M_y}(-\Delta U_1 + \Delta U_2 - \Delta U_3 + \Delta U_4 - \Delta U_5 - \Delta U_6 + \Delta U_7 + \Delta U_8) \quad (9)$$

$$Z = F_z(\Delta U_1 - \Delta U_2 + \Delta U_3 - \Delta U_4 + \Delta U_5 - \Delta U_6 + \Delta U_7 - \Delta U_8) \quad (10)$$

式(6)~(10)中, Y, M_z, X, Z, M_y 是天平测量的五分量载荷, $F_x, F_{M_z}, F_y, F_{M_y}, F_z$ 是天平各载荷分量的系数矩阵, $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta U_6, \Delta U_7, \Delta U_8$ 是天平 8 个弯曲梁的桥路输出电压。

6 天平校准

天平校准选用气动院 BCR-3 天平校准系统进行地轴系单元校准^[11-12],通过标定干扰量系数进行各分量载荷的解耦^[13-14]。天平校准准确度指标均达到了国军标的合格水平。如表 2 所示。

表 2 力放大结构天平校准准确度指标

项目\单元	Y	M_z	X	Z	M_y
绝对误差(δ)/N·M	0.128	0.007 9	0.072	0.120	0.004 5
相对误差(σ)/%	0.32	0.22	0.18	0.30	0.25
极限误差($3\cdot\sigma$)/%	0.94	0.66	0.54	0.90	0.75

7 天平动校风洞实验

本次实验于气动院 FL-3 风洞进行,试验模型采用 DLR-F6 民机标模模型,短舱模型安装结构如图 10。以 $M=0.8$ 时试验重复性的形式给出天平动校结果。试验结果表明本天平精度合格,达到国军标合格指标范围。天平

试验精度详如表 3。

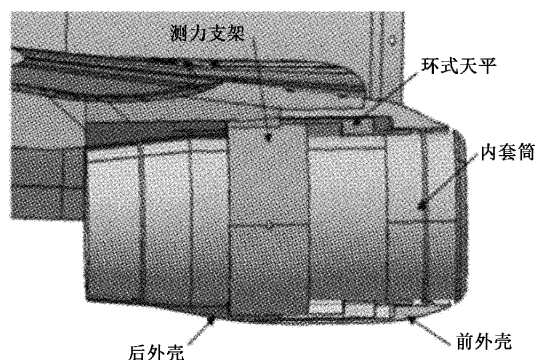


图 10 短舱内阻测量方案图

表 3 天平动校试验精度

$\alpha/(\circ)$	σ_{Cz1}	σ_{my1}	σ_{Cy}	σ_{mz}	σ_{Cx}
-4	0.000 29	0.000 12	0.001 04	0.000 67	0.000 12
-2	0.000 48	0.000 11	0.001 08	0.000 73	0.000 09
-1	0.000 16	0.000 09	0.000 93	0.000 55	0.000 11
0	0.000 36	0.000 13	0.000 85	0.000 40	0.000 09
1	0.000 35	0.000 14	0.000 78	0.000 37	0.000 06
2	0.000 43	0.000 08	0.000 91	0.000 33	0.000 09
4	0.000 43	0.000 13	0.001 03	0.000 41	0.000 08

8 试验结果分析

从有限元模拟计算结果可以看出天平的纵向刚度提高 7 倍左右,这对于改善试验时由于模型自重产生变形及受载变形的影响问题有很大帮助。同时由于整体的刚度提升,力放大结构的环式天平的各元之间的耦合干扰量也明显减小。使得天平的校准准确度也有了显著的提高,常规结构设计的天平准确度指标在 0.7% 左右,而本设计的天平准确度指标各元均优于 0.32%,试验中关注度最高的阻力分量准确度指标达到 0.18%,这对于后续的风洞测量试验十分有利。从天平的动校试验结果可以看出,天平在受到气流冲击后依然保持较好的稳定性,七次的重复性指标阻力精度可以达到 0.000 1 水平,满足进行正式风洞试验的指标要求。

9 结 论

天平的力放大结构的设计是合理的,测量应变得到了有效的放大,校准过程中天平输出信号稳定且随载荷变化线性度较好。

天平总体结构布局比较合理,天平在粘贴组桥后较好的实现了天平各测量量的独立分离,天平的刚度得到了较大的提高。

五分量短舱内阻测力天平设计是成功的。在实验时,天平各元回零良好,动态性能稳定,动校精度达到了国军

标的合格水平。

参考文献

- [1] 姜澄宇,宋笔锋.从国外民机重大研究计划看我国大型民机发展的关键技术[J].航空制造技术,2008(1):28-33.
- [2] 龚志斌,杨士普,张辉,等.民机先进翼尖装置气动特性对比研究[J].飞行力学,2011,29(5):27-30.
- [3] 张冬云,张美红,王美黎,等.翼吊布局民机短舱位置气动影响研究[J].空气动力学学报,2017,35(6):781-786.
- [4] 陈科甲,白俊强,朱军.发动机短舱对翼身组合体跨音速气动特性影响研究[J].航空计算技术,2010,40(1):63-66.
- [5] 张元辉,王强.发动机短舱内外流场与结构温度场耦合计算[J].飞机设计,2009,29(1):30-36.
- [6] 舒海峰,何超,郭雷涛,等.高超声速通气模型喷管出口气流参数测量试验技术研究[J].实验流体力学,2017,31(6):86-92.
- [7] 许晓斌,舒海峰,谢飞,等.通气模型内流道阻力直接测量技术[J].推进技术,2013,34(3):311-315.
- [8] 贺德馨.风洞天平[M].北京:国防工业出版社,2001:67-200.
- [9] 贺德馨.风洞天平技术论文集[M].中国空气动力研究与发展中心,1998:50-72.

- [10] 郭鹏腾,王瑾. 基于改良惠斯通电桥和滑动滤波算法的电子秤设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 97-101.
- [11] 刘永昌. 浅谈应变天平校准方法的比较[J]. 气动实验与测量控制, 1988(2): 17-20.
- [12] 欧阳万. 风洞天平校准的因子法、正交法及单元校[J]. 气动实验与测量控制, 1991, 5(1): 66-70.
- [13] 周山, 刘利平, 高建宇, 等. 三维力传感器静态解耦方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 181-187.
- [14] 姚斌, 张建勋, 代煜, 等. 用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 147-153.

作者简介

李勇, 高级工程师, 主要研究方向为天平和模型设计。

E-mail: fanfenddy@hotmail.com