

飞行试验湿度参数测试技术研究

宫海波, 徐 茜, 张振华

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 为了确定飞机噪声测试结果的有效性以及对噪声试飞数据进行修正, 设计了一套完整的湿度参数气象测试方案; 方案采用塞斯纳作为气象测试飞机, 针对特定的气象测试需求, 设计了盘旋上升的气象测试轨迹, 并采用露点仪作为湿度测试设备; 该湿度测试方案已经成功应用于 ARJ21-700 飞机噪声合格审定试飞, 是国内相关飞行试验气象测试的首次尝试; 实际的飞行试验结果表明, 该方案能够准确、有效地测量飞行试验湿度等气象数据; 该方案的成功应用, 为今后相关的试飞测试提供了重要的参考价值。

关键词: 相对湿度; 露点仪; 噪声测试

Testing Technology Research of Flight Test Humidity Parameters

Gong Haibo, Xu Qian, Zhang Zhenhua

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to determine the validity of the test results of aircraft noise and correct the noise test data, a complete set of humidity parameters meteorological testing proposal has been designed. The proposal uses a Cessna aircraft as the weather test aircraft. For specific meteorological test requirements, spiraling weather test track has been designed, and the dewpoint meter has been used as the humidity test equipment. The humidity test proposal has been successfully applied in the noise certification test of the ARJ21-700 aircraft, and it's the first attempt in the domestic flight test weather testing. The actual flight test results show that in the flight test, the proposal can measure the meteorological data like humidity accurately and effectively. The successful application of the proposal has provided an important reference value for the flight test in the future.

Keywords: relative humidity; dewpoint meter; noise test

0 引言

ARJ21-700 飞机噪声合格审定试飞在国内属于首次进行, 我院在试验组织实施上与国外常用的方法有所不同, 飞行试验使用 AC 咨询通告中推荐的等效程序进行噪声合格审定试飞。噪声测试的同时需要对试验场的气象条件进行测量, 用于确定飞行试验结果的有效性和对噪声试飞数据进行修正。

CCAR36 部对噪声合格审定的各种物理和环境条件都有相关的规定, 这些条件涉及噪声试验场所、风速/风向和大气的声衰减等等。为了确保符合性试验的一致性, 并使不同型号的飞机在不同地理位置进行的试验具有可比性, 飞机噪声合格审定试验必须在一定的大气环境下进行, 如果大气数据超出相关的规定, 就不可能将试验数据有效地修正到基准条件下, 这样的数据是无效的。实际的飞行试验往往都是在非基准的环境下进行, 非基准气象条件的正确测量, 以及该条件下噪声数据的相关修正, 对于获得正确、一致和可重复的试验结果是至关重要的。因此, 要求从飞机到测量点之间整个传声路径上都要进行温度和相对湿度的气象观测。

1 湿度的概念及测量方法

1.1 湿度的概念

大气是由于空气和一定量的水蒸气混合而成, 湿度是表示大气中水蒸气含量多少的尺度。大气湿度的常用表示方法有绝对湿度和相对湿度两种^[1]。

绝对湿度定义为每立方米湿空气, 在标准状态下 (0 °C, 760 mmHg) 所含水蒸气的重量^[2], 即湿空气中的水蒸气的密度 (字符 ρ 表示, 单位为克/米³)。

$$\rho = \frac{P_n}{R_n T} = 2.169 \times \frac{P_n}{273.15 + \theta_w} \quad (1)$$

式中, P_n 为空气中水蒸气分压力; T 为空气的干球绝对温度; θ_w 为空气的干球摄氏温度; R_n 为水蒸气的气体常数。

相对湿度定义为空气中水蒸汽分压力 P_n 与同温度下饱和水蒸汽分压力 P_b 之比^[3]。

$$\varphi = \frac{P_n}{P_b} \times 100\% \quad (2)$$

1.2 湿度的测量方法

湿度测量始终是世界计量领域中著名的难题之一^[4]。一个看似简单的量值, 深究起来涉及相当复杂的物理、化学理论分析和计算, 湿度测量从原理上划分有二、三十种之多, 常见的测量方法有干湿球法和露点法^[5]。

干湿球法: 属于间接测量方法, 通常有两支温度计组成, 一支用于测量环境空气温度, 另一支用吸湿材料附于测温端, 测量其湿球温度, 再通过环境温度及两者温度差计算出相对湿度值^[6]。从测量原理上来说, 该方法没有考虑气压的影响, 且受到温度计本身精度和相邻温度计示值误差的影响, 容易产生较大的测量误差, 一般测量不确定度在 5% RH~7% RH 的范围内^[7]。

露点法: 通过测定露点温度来确定对应的饱和水蒸气压力, 此时的饱和水蒸气压力即为被测空气的水蒸气分压力, 从而可计算出相对湿度值。露点法可直接得到环境温度、相对湿度以及在此温湿条件下的露点。露点法是测量湿空气达到饱和

收稿日期:2014-03-12; 修回日期:2014-04-17。

作者简介:宫海波(1982-),男,工程师,硕士研究生,主要从事机载测试方向的研究。

时的温度，是热力学的直接结果，精密露点仪准确度可达士 0.2℃，甚至更高。露点法以其准确度高、测量范围宽得到广泛的应用。

2 湿度的测试要求及测试方案

2.1 湿度测试要求

CCAR36 部规定飞机噪声合格审定试验必须在一定的大气环境下进行，在进行噪声合格审定测量过程中，在高于地面 10 m 处与飞机之间的整个传声路径上，大气温度必须在 -10℃~35℃ 之间；相对湿度必须在 20%~95% 之间。如果大气数据超出相关的规定，就不可能将试验数据有效地修正到基准条件下，这样的数据是无效的。同时规定测量系统性能的基准环境条件如下：大气温度 23℃；静态气压 101.325 kPa；相对湿度 50%。

ARJ21-700 飞机使用 AC 咨询通告中推荐的等效程序进行噪声合格审定试飞。在机场附近按照等效程序布置噪声测量点，ARJ21-700 飞机按照事先确定的目标航迹进行模拟起飞和进场飞行试验，测量飞机的飞越、横侧和进场噪声级。实际的飞行试验是在非基准的环境下进行的，为确保符合性试验的一致性，必须把非基准环境的飞行试验数据修正到基准条件下。

因此必须在噪声飞行试验的同时，对试验场的气象条件、大气环境和飞机航迹进行测量，用于确定飞行试验结果的有效性和对噪声试飞数据进行修正。

根据 CCAR36 部对噪声合格审定的各种物理和环境条件的相关规定，气象测试必须从飞机到地面噪声测量点之间整个传声路径上都要进行，而且必须涵盖所有噪声测量点，同时要求在噪声试验期间，每间隔 45~50 min 进行一次气象测试。气象测试的过程中，还必须提供高度、速度和 GPS 经纬度，用于确定地面 10 m 到飞机飞行高度的温度梯度和相对湿度梯度。

2.2 湿度测试方案

2.2.1 气象飞机及飞行航迹

根据测试需求，我们选用赛斯纳 172 飞机作为气象测试飞机，通过在气象测试飞机上加装气象测试设备、压力传感器、GPS 天线和数据采集记录器。在噪声适航审定试飞过程中测试记录试验场的大气参数，以满足噪声适航审定验证试飞对大气参数的测量要求。

根据噪声试验区域及气象参数的测试要求，我们做了相应的气象测试方案，气象飞机在噪声试验区域上空进行大气环境的测试，气象飞机从距地面高度 30 m 开始，以 450 m 为盘旋半径（使得所有噪声测量点都在气象飞机的飞行区域内），螺旋爬升至 850 m 高度，进行大气参数测量。在 ARJ21-700 飞机噪声试验期间，塞斯纳气象飞机每间隔 45~50 min 进行一次气象测试飞行，气象飞机飞行航迹如图 1 所示。

2.2.2 气象测试设备

根据测试要求，气象测试设备必须在气象飞机上实时测试噪声试验区域的气象参数，测试区域的气象条件不稳定，而且任务要求测试大气相对湿度的误差在±2%以内，同时必须考虑气象测试设备在飞机上的安装。因此，气象测试设备采用 137Vigilant 露点仪。

镜面式露点仪测量准确，并且仪器稳定无漂移，因而

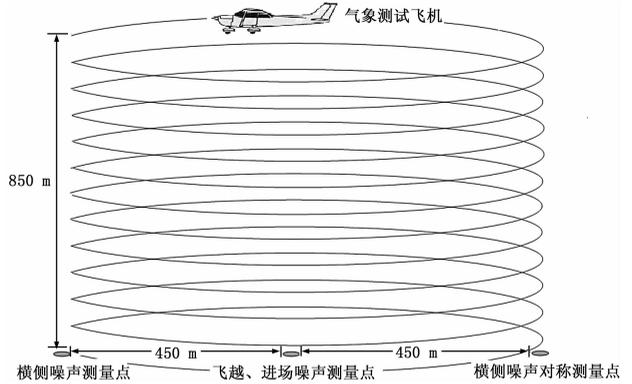


图 1 气象飞机测试航迹示意图

应用比较广泛。镜面式露点仪工作时，被测湿气进入露点测量室时掠过冷镜面，当镜面温度高于湿气的露点温度时，镜面呈干燥状态，此时光电检露装置中光源发出的光照在镜面上，几乎完全反射，由光电传感器感应到并输出光电信号，经控制回路比较、放大、驱动热泵，对镜面致冷。当镜面温度降至湿气露点温度时，镜面上开始结露，光照在镜面上出现漫反射，光电传感器感应到的反射信号随之减弱，此变化经控制回路比较、放大后调节热泵激励，使其制冷功率适当减小，最后镜面温度保持在样气露点温度上。镜面温度由一紧贴在冷镜面下方的铂电阻温度传感器感应，并显示在显示窗上。

3.2.3 测试系统组成及分析

测试系统的组成如图 2 所示。

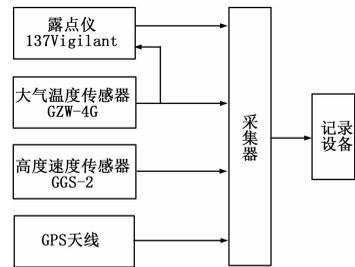


图 2 测试系统组成

如何对噪声试验区域大气中的温湿度，尤其是湿度进行准确的测量，是一个没有先例可以参考的项目，湿度受大气压力以及温度等外界因素的影响比较大，再加上特殊的噪声试验区域的测试环境，这些都增加了湿度测量的难度。

湿度参数受外界因素影响非常大，露点仪在噪声试验区域进行湿度测量，必须考虑特殊的工作环境，这其中最大的一个问题就是传感器的安装。如何选择露点仪探头的安装位置，是我们首先要解决的问题，国外可参考的资料非常少，唯一类似的例子采用的方案是将大气从飞机外引入飞机座舱内部（图 3 所示），露点仪探头安装于飞机内部，通过测量所引入的外界气流来测算外界的大气湿度。

该方案有两个问题需要解决：1) 如何将外界大气引入飞机内部，气流引入点不好控制；2) 如何在飞机内部将引入的大气准确还原为外界的状态从而准确测量湿度值，这期间气流引入装置和飞机座舱所造成湿度参数的测量偏差很难控制。因此无论是方案的实施还是测量精度都无法控制。



图 3 外部引气图

由温度参数的测试方案我们找到了湿度的测试思路, 露点仪测试大气温度采用的是干球温度计, 如果在气象飞机上采用干球温度计来测试大气温度肯定是不可取的, 气象测试飞机具有一定的飞行速度, 此时的干球温度计处于一个速度较高的气流中, 因此无法准确测试大气温度, 气象飞机上我们采用 GZW-4G 型大气总温传感器来测试大气温度。由此我们选用了图 4 所示的具有大气阻滞特性的露点仪探头, 我们将探头安装于飞机机身外部, 所测试的湿度数值更加真实, 方案实施相对简单的多。

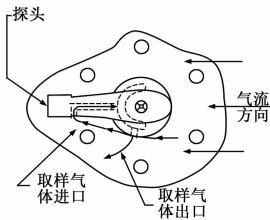


图 4 探头调整气流方向

露点仪探头安装于塞斯纳飞机机翼下方的支撑杆上, 露点仪主控单元安装于飞机座舱后排座椅处, 线缆沿着座舱上方的安装孔进入机翼, 而后沿着机翼支撑杆连接露点仪探头。为了有效测试气象参数, 避免外界气流对露点仪探头的影响, 露点仪探头安装于支撑杆上部 1/3 的位置, 这样可以避免螺旋桨气流影响的同时减小机翼产生的气流影响。

3 飞行试验验证

在 ARJ21-700 飞机噪声合格审定试飞中, 对整个气象测试系统进行了实际的测试验证, 该气象测试方案很好地完成了测试任务。我们的气象测试方案, 无论是传感器的选型、安装还是方案的现场实施都得到了国外专家的肯定。

图 5~图 8 是某一天的连续 4 个架次的飞行试验湿度参数测试结果。

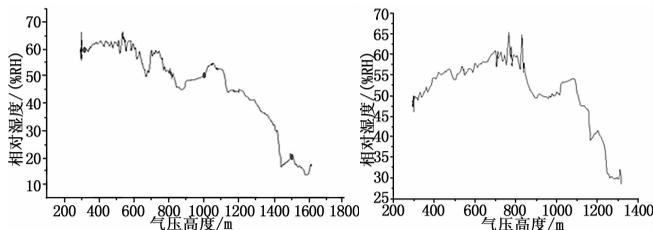


图 5 架次 1

图 6 架次 2

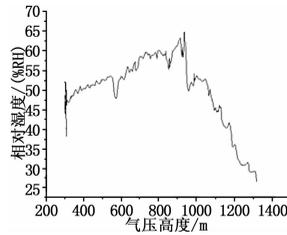


图 7 架次 3

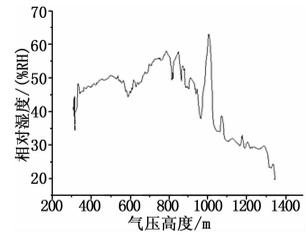


图 8 架次 4

气象飞机测试的同时, 试验现场还有一辆地面气象观测车, 通过与气象观测车以及当地气象部门的观测数据(如图 5 中黑点所示)进行比对, 气象飞机测得的大气相对湿度误差在 $\pm 2\%$ 以内, 大气温度误差在 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。由飞行试验数据可以看出: 1) 大气的相对湿度在大气中的分布几乎没有规律可循, 数值变化不稳定; 2) 大气的相对湿度受温度、风速和大气压力的影响; 3) 大气相对湿度与温度的昼夜变化情况相反, 日出前气温最低, 相对湿度最高, 清晨靠近地面的大气湿度较高, 随着温度的慢慢上升, 靠近地面的大气湿度慢慢减小, 高度更高的大气区域的相对湿度逐渐增大; 4) 雨天过后相对湿度高, 晴朗天气相对湿度低; 5) 大气温度升高, 相对湿度降低, 大气温度降低, 相对湿度增大; 6) 无风的天气, 大气的相对湿度变化相对较稳定, 有风的天气, 大气的相对湿度变化不稳定, 许多区域变化幅度非常大。

湿度是气象测试中最难准确测量的一个参数, 湿度受温度、大气压力以及风速等外界因素的影响, 其测试的精度很难控制。传感器与测试电路的精度以及灵敏度会直接影响湿度测量的准确度, 还有恶劣的测试环境, 这些都造成相对湿度的测试精度不是非常高。

4 结束语

本文所论述的气象测试方案成功应用于 ARJ21-700 飞机噪声合格审定试飞, 其中相对湿度的测试方法研究作为相关测试的首次尝试, 克服了测试环境不稳定、测试参数难测量等困难。该方案的成功应用, 给今后的试飞测试提供了重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 李干英, 范金鹏. 湿度测量 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [2] 张 玥, 陈 勇, 巩 娟. 现代湿度测量方法评述 [J]. 计测技术, 2006, 26 (4): 1-4.
- [3] 张 馨, 乔晓军, 刘 恩, 等. 高精度便携式温湿度露点测量仪的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2006, (3): 9-11.
- [4] 朱向庆, 陈志雄. 远程分布式温湿度实时监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (1): 55-57.
- [5] 吴峰华, 王德福, 姜传贤, 等. 干湿球法湿度测量精度算法研究 [J]. 装备环境工程, 2009, 6 (5): 81-83.
- [6] 孙慧明, 张筱朵, 吴 剑, 等. 基于 MEMS 工艺的压阻式湿度传感器的设计制作 [J]. 传感技术学报, 2008, 21 (5): 769-772.
- [7] 沙占友, 薛树琦, 葛家怡. 湿度传感器的发展趋势 [J]. 电子技术应用, 2003, 29 (7): 6-7.