

文档编号: HB-RAG-WT-20240617

版本: 1.0

发布日期: 2025-06-17

编制部门: AI 知识库构建组 (模拟空气动力学科研部)

批准人: (模拟)

生效日期: 发布即生效

**适用范围:** 本规范适用于为构建本地知识库及测试 RAG 系统效果而设计的低速 ( $Ma \leq 0.4$ )、亚音速 ( $0.4 < Ma \leq 0.8$ )、跨音速 ( $0.8 < Ma \leq 1.2$ ) 风洞试验流程、数据采集与处理、模型安装、安全要求等通用技术要求。模拟对象为常规航空器部件及全机模型。

## 1. 引言 (Introduction)

**\* 1.1 目的 (Purpose):** 本规范旨在为构建风洞试验相关本地知识库提供标准化、结构化的专业文档内容,并用于后续 RAG (检索增强生成) 系统的效果测试与评估。其内容模拟真实风洞试验规范的核心要素。

**\* 1.2 范围 (Scope):** 规定风洞试验前准备、模型安装、试验运行、数据采集、数据处理与修正、报告编写、安全与质量保证等环节的基本要求。涵盖气动力、压力分布、流场显示等基础测试类型。

**\* 1.3 规范性引用文件 (Normative References):** (模拟引用, RAG 可检索)

\* HB 1234-202X 《风洞应变天平校准规范》

\* HB 5678-202X 《风洞试验数据不确定度评估指南》

\* AIAA S-071A-1999 《风洞试验的质量评估》

\* ISO 12345:2010 《流体流动测量 - 术语和符号》 (部分相关术语)

**\* 1.4 术语与定义 (Terms and Definitions):**

- \* **风洞 (Wind Tunnel):** 一种产生可控气流以模拟飞行器或其他物体周围空气流动的实验设备。
- \* **试验段 (Test Section):** 风洞中进行模型测试的区域，气流品质需满足要求。
- \* **参考点 (Reference Point):** 模型上定义力和力矩参考的特定点，通常为重心或模型顶点。
- \* **马赫数 (Mach Number, Ma):** 气流速度与当地声速之比。
- \* **雷诺数 (Reynolds Number, Re):** 表征流体惯性力与粘性力相对重要性的无量纲参数， $Re = (\rho * V * L) / \mu$  ( $\rho$ : 密度,  $V$ : 速度,  $L$ : 特征长度,  $\mu$ : 动力粘度)。
- \* **攻角 (Angle of Attack,  $\alpha$ ):** 模型参考轴线与来流方向在垂直对称面内的夹角。
- \* **侧滑角 (Sideslip Angle,  $\beta$ ):** 模型参考轴线与来流方向在水平对称面内的夹角。
- \* **阻塞效应 (Blockage Effect):** 模型占据试验段横截面积比例过大导致的气流加速和流场畸变。
- \* **支架干扰 (Sting Interference):** 模型支撑系统对模型周围流场及气动力的影响。
- \* **原始数据 (Raw Data):** 直接从传感器（天平、压力传感器等）读取的未经修正的测量值。
- \* **修正数据 (Corrected Data):** 对原始数据进行各种因素（如阻塞、支架干扰、温度效应等）修正后的数据。
- \* **数据不确定度 (Data Uncertainty):** 表征测量结果离散程度的参数，表示真值可能存在的范围。

## 2. 试验类型 (Test Types) (RAG 可检索具体试验细节)

- \* **2.1 测力试验 (Force and Moment Measurement):** 使用应变天平测量模型整体的升力 (Lift)、阻力 (Drag)、侧力 (Side Force)、俯仰力矩 (Pitching Moment)、滚转力矩 (Rolling Moment)、偏航力矩 (Yawing Moment)。

\* **2.2 测压试验 (Pressure Measurement):** 在模型表面布置压力测点，测量局部静压分布。

\* **2.3 流场显示试验 (Flow Visualization):** 使用技术（如油流、丝线、纹影、粒子图像测速 PIV）观察模型表面或周围流场结构（分离区、激波位置等）。

\* **2.4 动导数试验 (Dynamic Derivative Tests):** 测量模型进行强迫或自由振荡时的非定常气动特性导数。

\* **2.5 铰链力矩试验 (Hinge Moment Measurement):** 测量操纵面（如副翼、方向舵、升降舵）绕其铰链轴的力矩。

### 3. 试验前准备 (Pre-Test Preparation)

#### \* 3.1 试验大纲 (Test Plan):

\* 明确试验目标、模型状态（几何外形、控制面偏角）、测试参数范围（ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Ma$ ,  $Re$ ）、所需测量数据类型、数据精度要求。

\* 制定详细的试验矩阵（参数组合序列）。

#### \* 3.2 模型与支撑 (Model and Support System):

\* **3.2.1 模型要求:** 几何精度符合 HB XXXX 要求；表面光洁度满足试验要求；测压孔位置准确、无堵塞；天平安装接口匹配。

\* **3.2.2 支撑系统:** 选择合适的支杆（直支杆、弯支杆）及变角机构（攻角机构、侧滑角机构）。记录支杆几何尺寸、安装角度。评估并计划进行支架干扰修正。

#### \* 3.3 仪器配置 (Instrumentation Setup):

\* **3.3.1 应变天平 (Balance):** 选择量程、精度合适的天平。按 HB 1234-202X 进行校准，获取校准公式和矩阵。检查零点漂移。安装牢固，保证电气连接可靠。

\* **3.3.2 压力传感器 (Pressure Transducers):** 选择量程、精度合适的传感器。进行系统标定（零点、灵敏度）。布置扫描阀系统（如使用）。确保管路无泄漏、响应时间满足要求。

\* **3.3.3 数据采集系统 (DAQ):** 设置合适的采样频率、滤波设置。进行通道标定

和系统零点采集。确保同步性。

\* **3.3.4 流场显示设备:** 按要求设置相机、光源、示踪粒子等。

\* **3.4 风洞状态检查 (Wind Tunnel Checkout):** 确认动力系统、控制系统、安全联锁、数据系统工作正常。进行空风洞流场品质（速度场、湍流度）测试（如有要求）。

## 4. 模型安装与对准 (Model Installation and Alignment)

\* **4.1 安装流程:** 严格按操作规程将模型安装到支撑系统上。确保所有连接（机械、电气）安全可靠。

\* **4.2 几何对准 (Geometric Alignment):**

\* 使用激光跟踪仪或经纬仪精确测量并调整模型在试验段中的位置。

\* 确保模型参考轴线与风洞轴线（或设定的参考线）重合。

\* 精确设定初始攻角 ( $\alpha_0$ ) 和侧滑角 ( $\beta_0$ )。

\* 记录所有安装几何参数（模型位置、支杆角度、初始  $\alpha/\beta$ ）。

\* **4.3 零点采集 (Zero Reading):** 在风洞静止状态下，采集天平、压力传感器等所有测量通道的零点数据。

## 5. 试验运行 (Test Execution)

\* **5.1 启动与稳定 (Startup and Stabilization):**

\* 按规程启动风洞，逐步达到目标马赫数/动压。

\* 等待气流参数（Ma, Re, 总压  $P_0$ , 总温  $T_0$ ）稳定达到设定值并保持规定时间（通常 $\geq 30$  秒）。

\* **5.2 参数调节与数据采集 (Parameter Variation and Data Acquisition):**

\* 按照预定的试验矩阵，依次改变攻角 ( $\alpha$ )、侧滑角 ( $\beta$ )、马赫数 (Ma) 或其它控制参数（如舵偏角  $\delta$ ）。

\* 每次改变参数后，等待足够时间（通常 $\geq 10-15$  秒）让流场和测量信号稳定。

\* 触发数据采集系统，记录稳定状态下的数据。记录时间长度应足够包含多次数据块（如 10 秒，采样率 100Hz 则记录 1000 点）。

\* 同时记录风洞运行参数（Ma, Re,  $P_0$ ,  $T_0$ , 静压  $P_\infty$ , 密度  $\rho$ , 湿度等）和模型状态参数（ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  等）。

### \* 5.3 重复性与检查点 (Repeatability and Check Points):

\* 在关键状态点（如  $\alpha=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ , 设计 Ma）进行重复性测试（至少 3 次）。

\* 在试验开始、结束和关键状态变化前后设置检查点，验证数据一致性。

\* 5.4 流场显示运行 (Flow Visualization Runs): 在选定的状态点，按相应技术规程（油流、PIV 等）进行操作和数据/图像记录。

\* 5.5 应急程序 (Emergency Procedures): 严格遵守风洞安全规程。遇模型振动过大、载荷超限、设备故障等异常情况，立即按规程执行紧急停车。

## 6. 数据采集与记录 (Data Acquisition and Recording)

\* 6.1 数据内容: 原始电压/数字信号、风洞参数、模型状态参数、时间戳、试验点标识符、操作员记录（异常情况备注）。

\* 6.2 数据格式: 使用结构化、带时间戳的标准格式（如 HDF5, NetCDF 或预定义的二进制/ASCII 格式）。包含完整的元数据（通道名称、单位、标定信息、试验条件等）。

\* 6.3 数据存储: 实时存储到本地服务器，并进行异地备份。确保数据完整性和可追溯性。

\* 6.4 数据日志 (Data Log): 详细记录每个试验点的运行参数、模型状态、采集时间、操作员、备注信息。

## 7. 数据处理与修正 (Data Processing and Correction)

### \* 7.1 原始数据处理 (Raw Data Processing):

\* 对原始电压信号应用天平校准公式或压力传感器标定系数，计算物理量

（力、力矩、压力）。

\* 对每个数据块（如 10 秒）进行平均，计算平均值和标准偏差（评估随机不确定度）。

\* 剔除明显野值。

\* **7.2 气动系数计算 (Aerodynamic Coefficient Calculation):** 使用以下公式计算无量纲系数:

\* 升力系数  $CL = \text{Lift} / (q * S)$

\* 阻力系数  $CD = \text{Drag} / (q * S)$

\* 俯仰力矩系数  $CM = \text{Pitching Moment} / (q * S * c)$  ( $c$  为参考弦长)

\* 压力系数  $Cp = (P_{\text{local}} - P_{\infty}) / q$

\* (其中  $q = 0.5 * \rho * V^2$  为动压,  $S$  为参考面积)

\* **7.3 主要修正项 (Key Corrections):**

\* **7.3.1 阻塞修正 (Blockage Correction):** 修正模型阻塞导致的气流加速效应（常用方法: Hackett, Maskell）。

\* **7.3.2 支架干扰修正 (Sting Interference Correction):** 修正支杆对流场和气动力的影响（常用方法: 映像法、试验修正法、CFD 辅助法）。

\* **7.3.3 流场梯度修正 (Flow Field Gradient Correction):** 修正试验段内存在的速度/压力梯度影响。

\* **7.3.4 平均气流偏角修正 (Flow Angularity Correction):** 修正试验段气流固有的微小攻角/侧滑角偏差。

\* **7.3.5 温度/浮力修正 (Temperature/Buoyancy Correction):** (对低速风洞尤其重要) 修正气流温度变化引起的密度变化对模型（特别是大模型）产生的浮力效应。

\* **7.3.6 壁面干扰修正 (Wall Interference Correction):** (对跨音速风洞尤其重

要) 修正风洞壁面 (实壁或开/闭孔壁) 对模型流场 (特别是激波位置) 的影响 (常用方法: 基于线性理论的方法、壁压信息法)。

\* **7.4 修正后数据:** 清晰区分并存储原始数据、中间处理数据和最终修正后的气动系数数据。

## 8. 不确定度分析 (Uncertainty Analysis)

\* **8.1 要求:** 按 HB 5678-202X 和 AIAA S-071A-1999 的要求, 对关键气动系数 (如  $C_{Lmax}$ ,  $C_{Dmin}$ ,  $C_m$ ) 进行系统不确定度和随机不确定度评估。

\* **8.2 来源:** 考虑风洞参数 ( $Ma$ ,  $Re$ ,  $P_0$ ,  $T_0$ )、模型几何 (尺寸、安装角)、测量仪器 (天平、压力传感器标定、DAQ)、数据处理 (修正方法) 等引入的不确定度分量。

\* **8.3 报告:** 在最终报告中给出关键结果的不确定度估计值。

## 9. 试验报告 (Test Report)

\* **9.1 内容要求:** 报告应包含:

\* 试验概述 (目标、日期、地点、风洞、模型)

\* 风洞和模型详细描述 (示意图、照片)

\* 试验设备清单及标定状态 (天平、传感器、采集系统)

\* 试验矩阵和运行条件范围

\* 数据处理与修正方法详细说明

\* 不确定度分析结果

\* **核心结果:** 气动系数曲线图 ( $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_m$  vs  $\alpha/\beta/Ma$ )、关键压力分布图 ( $C_p$  vs  $x/c$ )、重要流场显示图像及其分析

\* 结论与观察到的现象分析

- \* 原始数据归档信息

- \* **9.2 格式:** 结构清晰，图表规范，包含所有必要元数据。

## 10. 质量保证与安全 (Quality Assurance and Safety)

### \* 10.1 质量保证 (QA):

- \* 试验全过程需有质量人员监督或执行关键点检查（模型安装、仪器标定、数据采集、修正过程）。

- \* 执行独立的数据复查。

- \* 遵守本规范和所有引用文件的要求。

### \* 10.2 安全 (Safety):

- \* 严格遵守风洞设施的所有安全操作规程。

- \* 模型设计需满足风洞强度要求，并通过安全评审。

- \* 进行载荷监控，设置安全联锁阈值。

- \* 试验前进行安全检查清单确认。

- \* 所有人员需接受安全培训。

## 11. 数据归档与管理 (Data Archiving and Management)

- \* **11.1 归档内容:** 原始数据文件、处理后的中间数据文件、最终修正数据文件、试验报告（最终版和草案）、试验大纲、模型图纸（简化版或关键尺寸）、仪器标定证书、安装记录、数据日志、流场显示原始图像/视频、元数据文档。

- \* **11.2 格式要求:** 使用开放、可长期读取的格式（如 PDF, HDF5, NetCDF, CSV, TIFF/PNG）。

- \* **11.3 元数据 (Metadata):** 所有数据文件必须附带详细元数据，包含试验标识、时间、条件、参数、处理历史、责任人等。



\* **11.4 存储与备份:** 数据需存储在受控的服务器或存储系统中，实施定期备份（本地+异地）和版本控制。

\* **11.5 访问权限:** 设定不同用户的数据访问权限级别。