

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF××××—XXXX

涡扇发动机燃油流量测试技术规范

Test Technical Specification of Turbofan Engine Fuel Flow

(初稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局发布

涡扇发动机燃油流量测试技术 规范

Test Technical Specification of Turbofan
Engine Fuel Flow

JJF××××—XXXX

归口单位：全国航空计量测试技术委员会

主要起草单位：中国航发商用航空发动机有限责任公司

北京长城计量测试技术研究所

参加起草单位：四川泛华航空仪表电器有限公司

中国航发控制系统研究所

本规范委托全国航空专用计量测试技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

李洪美 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)
张丽杰 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)
刘彦军 (北京长城计量测试技术研究所)

参加起草人：

顾卫群 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)
胡万俊 (四川泛华航空仪表电器有限公司)
曹 玮 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)
刘剑平 (中国航发控制系统研究所)
黄 成 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)

目录

引 言I

1. 范围 1

2. 引用文件 1

3. 术语和定义 1

4. 概述 2

5. 测量技术要求 2

5.1 测量模型 3

5.2 测量要求 3

5.3 测量系统 3

5.3.1 流量测量系统 3

5.3.2 温度测量系统 4

5.3.3 压力测量系统 4

5.3.3 配套后端数据处理平台 5

6. 燃油流量测量方法 5

6.1 涡轮流量计输出频率的测量 5

6.2 燃油温度、压力及大气压力测量 5

6.3 燃油介质密度测量 5

6.3.1 密度测量 5

6.3.2 密度的温度修正 6

6.3.3 密度的压力修正 6

6.4 涡轮流量计 K 系数的测量 7

6.4.1 涡轮流量计 K 系数校准 7

6.4.1.1 校准用标准装置 8

6.4.1.2 校准用介质 8

6.4.1.3 校准工况 8

6.4.1.4 其他注意事项 8

6.4.2	<i>K</i> 系数的温度修正	8
6.5	燃油流量的修正计算	9
7.	燃油流量测试	9
7.1	测试前准备	9
7.2	测试步骤及试验后检查	10
7.3	测试数据的记录	10
8.	燃油流量测量不确定度评定方法	10
附录 A	涡扇发动机燃油流量测量原始记录内页格式	12
附录 B	涡扇发动机燃油流量测量精度评定示例	13

引 言

JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范的仪器技术指标参考了 JJG1037《涡轮流量计检定规程》、GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）》、GB/T21450《原油和石油产品密度在 638 kg/m³ - 1074 kg/m³ 范围内的烃压缩系数》、GB/T 35930《化工产品饱和蒸气压的测定 热重法》、SAE ARP 4990B《Turbine Flowmeter Fuel Flow Calculations》等标准。

本规范为首次制定。

涡扇发动机燃油流量测试技术规范

1. 范围

本文件规定了基于涡轮流量计的涡扇发动机试验稳定工作状态下不小于100kg/h 燃油流量的测试方法。

本文件适用于采用涡轮流量计开展的涡扇发动机试验复杂工况下的燃油流量测试工作。

2. 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 1001	通用计量术语及定义
JJG 1037	涡轮流量计检定规程
JJG 1059.1	测量不确定度评定与表示
JJF 1004	流量计名词术语及定义
GB/T 1884	原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）
GB/T 21450	原油和石油产品密度在 638 kg/m ³ - 1074 kg/m ³ 范围内的烃压缩系数
GB/T 35930	化工产品饱和蒸气压的测定 热重法

凡是注日期的文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3. 术语和定义

JJF1001、JJF1004 规定的术语和定义以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 进口管路 Inlet pipe

发动机上，与涡轮流量计进口端连接的管路。

3.2 出口管路 Outlet pipe

发动机上，与涡轮流量计出口端连接的管路。

3.3 K 系数 K -coefficient

单位体积的流体流过流量计是流量计发出的脉冲数，/L。（来源于 JJG1037）

3.4 安装角度 Installation angle

涡轮流量计安装固定后其轴向与水平面的夹角。

4. 概述

燃油流量是涡扇发动机飞行试验中极为关键的参数，发动机试验通常采用燃油流量测量系统进行精确测量，该系统包含涡轮流量计、温度传感器、压力传感器、配套的频率、温度、压力采集通道及后端数据处理平台。

涡轮流量计属于体积式流量测量元件，当流体流经涡轮流量计时，流体的冲击力作用于涡轮叶片上，产生旋转力矩，使涡轮克服摩擦力矩和流体阻力矩而旋转。在一定的流量范围内，涡轮的旋转角速度与流体成正比。因此，通过测量涡轮的旋转速度，可以计算出流体的瞬时体积流量。

$$Q = \frac{f}{K} \tag{1}$$

其中： Q —燃油体积流量，L/s；
 f —涡轮流量计输出频率，HZ；
 K —实际工况下单位体积的流体流过流量计时流量计发出的脉冲数，
1/L，需通过实际试验工况下的校准来获得。

用涡轮流量计测量燃油质量流量的基本原理为单位体积的质量(密度)乘以单位时间的体积(体积流量)，得到单位时间的燃油质量流量。

实际发动机试验时，介质温度、压力随着发动机运行状态会发生显著变化，流量计 K 系数和燃油介质密度受介质温度、压力变化会产生变化，因此，涡扇发动机试验时，要实时采集涡轮流量计输出的频率信号及燃油介质的温度、压力信号，结合基于温度压力工况修正后的涡轮流量计校准 K 系数及燃油密度，可通过试验数据处理终端完成航空发动机燃油流量的实时计算及数据获取。测量原理图如图 1 所示。

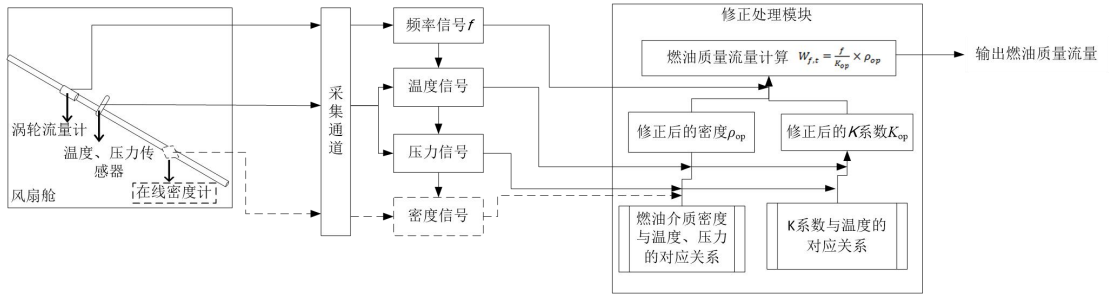


图 1 发动机采用涡轮流量计开展燃油质量流量的测量原理示意图

5. 测量技术要求

5.1 测量模型

在完成涡轮流量计 K 系数校准和燃油密度检测并对压力和温度进行校正后，最终基于发动机试验工况的燃油质量流量的测量模型如下：

$$W_{f,t} = \frac{f}{K_{op}} \times \rho_{op} \quad (2)$$

其中： $W_{f,t}$ —测得的燃油质量流量，kg/h；

f —涡轮流量计的输出频率，Hz；

K_{op} —实际发动机飞行工况下，单位体积的流体流过流量计时流量计发出的脉冲数，即修正用仪表系数，/L；

ρ_{op} —实际发动机飞行工况下，流经涡轮流量计的燃油介质密度，kg/m³。

5.2 测量要求

- 1) 测量对象：燃油流量；
- 2) 测量介质：RP-3 航空煤油；
- 3) 测量范围：不小于 100kg/h；
- 4) 测量不确定度依据具体试验性能指标要求来确定，采用本方法测量扩展不确定度： $>300\text{kg/h}$ 时： $U_{\text{rel}}=0.35\%(k=2)$ 、 $(100\sim300)\text{kg/h}$ 时： $U_{\text{rel}}=1.5\%(k=2)$ （ $100\sim300\text{kg/h}$ ）；
- 5) 环境工况：燃油温度： $20^{\circ}\text{C}\sim90^{\circ}\text{C}$ 、燃油压力： $0.1\text{MPa}\sim8\text{MPa}$ 。
- 6) 频率：测量范围依据涡轮流量计的测量特性确定，测量精度不低于 0.01%；
- 7) 温度：温度范围： $20^{\circ}\text{C}\sim90^{\circ}\text{C}$ ，测量精度不低于 0.5°C ；
- 8) 压力：压力范围： $0.1\text{MPa}\sim8\text{MPa}$ ，测量精度不低于 1%FS；
- 9) 密度：密度覆盖温度及压力范围下的燃油介质密度，检测精度不低于 0.001%。

5.3 测量系统

燃油流量测量系统包含流量测量系统、用于修正的温度及压力测量系统和用于修正计算的配套后端数据处理平台。

5.3.1 流量测量系统

流量测量系统主要包含涡轮流量计和配套频率采集通道，功能为实时测量并采集频率信号，用于流经涡轮流量计的流量计算。

流量测量系统中的涡轮流量计流量测量范围需覆盖流量测量下限 100kg/h，上限依照具体试验测量要求确定。流量计适用的环境温度及压力应涵盖试验工况要求，流量计需通过振动、温度、湿度、电磁干扰等环境可靠性试验。流量计输出的频率信号经配套的频率采集设备进行采集，采集范围需覆盖流量计频率信号输出范围。涡轮流量计的最大允许误差应优于燃油流量测量精度的 1/3，流量测量配套的频率采集设备最大允许误差应控制在满量程的 $\pm 0.01\%$ 以内，且分辨率应比流量计的最大允许误差高出一个数量级。测量系统应参照 JJG1037《涡轮流量计检定规程》及 JJF 2196-2025《通用计数器校准规范》开展周期性校准工作，确保可溯源性。

涡轮流量计应安装在航空发动机燃油控制系统中燃、滑油换热后的管路上，避免燃油介质因发动机低温试验环境结冰导致堵塞情况发生。涡轮流量计的前后采用同口径的长直管路连接，保证前后连接管路的长径比满足前 10 后 5。考虑到发动机机载安装空间有限，如无法满足长径比要求，则前后连接管路配套涡轮流量计一起开展校准工作。部分涡轮流量计会配套提供线性化仪，线性化仪推荐用螺栓紧固安装于发动机风扇机匣的挂架上。

5.3.2 温度测量系统

温度测量系统主要包含温度传感器和后端温度采集通道，功能为实时测量流经涡轮流量计的燃油介质温度，用于 K 系数、密度的修正计算。

温度测量系统的温度传感器应选用 A 级以上的铂电阻温度传感器，测量范围需覆盖发动机整个试验包线内燃油温度的变化范围，后端配套电压/电流采集通道进行信号采集，采集范围需覆盖温度信号输出的电信号范围。安装位置集成于涡轮流量计内部即选择自带温度测点的涡轮流量计进行温度测量，流量计内的温度测点需布置在最接近燃油介质温度的位置，若流量计无自带温度测点，将温度传感器安装于涡轮流量计下游直管段上，温度传感器插入燃油液体的深度需确保感温探头需全部浸入被测燃油中。测量系统应参照 JJG229《工业铂、铜热电阻检定规程》及 JJF 1664《温度显示仪校准规范》开展周期性校准工作，确保可溯源性。

5.3.3 压力测量系统

压力测量系统主要包含油压传感器和后端压力采集通道，功能为实时测量流经涡轮流量计的燃油介质压力，用于密度的修正计算。

燃油压力测量系统中的油压传感器测量范围需覆盖发动机整个试验包线内燃油压力的变化范围，后端配套压力采集通道进行信号采集，采集范围需覆盖油压传感器的测量范围。油压传感器应安装于涡轮流量计下游 5D 后的直管段上。

测量系统应参照 JJG 860-2015《压力传感器(静态)检定规程》及 JJG 875-2019《数字压力计检定规程》开展周期性校准工作，确保可溯源性。

5.3.3 配套后端数据处理平台

配套后端数据处理平台，功能为实现燃油质量流量的实时修正计算和存储。涡轮流量计 K 系数、燃油介质密度与温度、压力的关系及燃油质量流量的计算方法均需提前以计算程序的模式更新集成在后端数据处理平台中，试验过程中，通过上述测量系统测得的温度信号、压力信号、频率信号均需传输到后端的数据处理平台中，进一步进行修正计算，以获得发动机试验实时的燃油质量流量。

此外，需配套机载在线燃油密度计，功能为实时测量流经涡轮流量计的燃油介质密度，如无法实现机载在线燃油密度计的安装及测量，则需开展试验用批次燃油密度检测，并依据实际燃油的温度、压力工况进行修正，获得修正后的密度，用于燃油质量流量的计算。

6. 燃油流量测量方法

6.1 涡轮流量计输出频率的测量

涡轮流量计输出的频率信号采用频率采集通道进行实时测量，需确保频率信号的测量精度和测量分辨率满足 0.01% 的要求。

6.2 燃油温度、压力及大气压力测量

燃油温度测量采用集成在涡轮传感器内部的温度传感器或布置在涡轮流量计下游管路上的温度传感器开展发动机试验过程中的燃油介质温度实时测量，具体位置可依据涡轮流量计本身要求确定。

燃油压力测量采用布置在涡轮流量计下游管路上的油压传感器开展发动机试验过程中的燃油介质压力实时测量，具体位置可依据涡轮流量计本身要求确定。

大气压力测量采用布置在试验台的大气压力计进行实时测量。

6.3 燃油介质密度测量

6.3.1 密度测量

燃油介质的密度测量可采用密度计依照 GB/T1884《石油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）》方法开展。

燃油介质密度受温度影响明显，同时受压力影响。如无法实现机载在线燃油密度计的安装及测量，则需通过开展实际不同温度下的燃油介质密度检测及不同压力、温度下的平衡蒸汽压 P_{eq} 以及可压缩系数 F 检测。最终获得温度-密度的关

系、平衡蒸汽压 P_{eq} 以及可压缩系数 F ，用于实际发动机飞行工况中流经涡轮流量计的燃油介质的密度修正计算。

6.3.2 密度的温度修正

当发动机运行时流经涡轮流量计的介质温度与开展燃油介质密度检测的温度不同时，随着介质温度变化，燃油介质密度会相应发生变化，需对燃油介质密度进行修正计算。如果使用在线数字密度计，则不需要此修正。

燃油介质密度 ρ 与温度 T 的关系通过不同燃油介质温度下的介质密度的检测试验获得（需开展 15℃ 的密度测量），具体检测可依据 GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法》开展，两者之间的相互关系如下：

$$\rho = aT + b \quad (3)$$

其中： ρ —燃油介质密度， kg/m^3 ；

T —燃油介质温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

a —燃油介质密度与温度的拟合关系的斜率；

b —燃油介质密度与温度的拟合关系的截距。

基于燃油介质密度与温度的线性关系，采用实时燃油温度，可计算得出发动机飞行工况下温度修正后的实时燃油密度 $\rho_{T_{op}}$ ，具体计算见公式 4。

$$\rho_{T_{op}} = aT_{op} + b \quad (4)$$

其中： $\rho_{T_{op}}$ —实际发动机飞行工况下，流经涡轮流量计的燃油介质密度， kg/m^3 ；

T_{op} —实际发动机飞行工况下，流经涡轮流量计的燃油介质温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

6.3.3 密度的压力修正

如果发动机运行时流经涡轮流量计的燃油介质压力升高，则燃油介质易受压缩性影响，需对燃油介质密度进行压力修正计算。如果使用在线数字密度计，则不需要此修正。对介质密度进行压力修正，首先需通过传感器测得航空发动机飞行试验状态下的大气压 P_{atm} 、试验工况介质压力 P_{op} ，并需获得该燃油介质的平衡蒸汽压 P_{eq} 以及可压缩系数 F 。

平衡蒸汽压 P_{eq} 可根据采用的航空燃油型号确定的平衡蒸汽压 P_{eq} 与飞行工况温度 T_{op} 的关系计算得到，平衡蒸汽压 P_{eq} 与飞行工况温度 T_{op} 的关系也可通过针对燃油介质的饱和蒸汽压检测试验获得，具体检测试验可依据 GB/T 35930-2018《化工产品饱和蒸汽压的测定 热重法》标准方法开展，两者之间的相互关系如下：

$$P_{eq} = A + B \times 1/T_{op} \quad (5)$$

其中： P_{eq} —燃油介质的平衡蒸汽压力，Pa；

A 、 B —燃油介质平衡蒸汽压力与温度拟合关系的系数；

依据 6.3.2 章节针对燃油介质 15℃ 的密度测量，可获得 $\rho_{ref,gcc}$ ，燃油介质的可压缩系数 F 可参考 GB/T21450《原油和石油产品密度在 638kg/m³-1074kg/m³ 范围内的压缩系数》标准计算获得，具体计算公式见公式 6。

$$F = 10^{-4} \times \exp \left(\frac{-1.62080 + 0.00021592 * T_{op}}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.0042092 * T_{op}}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} \right) \quad (6)$$

其中： F —燃油压缩系数，1/Pa；

$\rho_{ref,gcc}$ —15℃ 下燃油介质密度，kg/m³。

基于以上数据，可采用公式 7 计算燃油介质密度在飞行工况下的压力修正系数：

$$C_{pfd} = \left(1 - F \times (P_{atm} - P_{eq}) \right) / \left(1 - F \times (P_{op} - P_{eq}) \right) \quad (7)$$

其中： C_{pfd} —燃油密度压力校正因子(无量纲)；

P_{atm} —流量计工作状态下的环境大气压力，Pa；

P_{op} —实际发动机飞行工况下，流经涡轮流量计的燃油介质压力，Pa。

依据压力修正系数和发动机飞行工况中流经涡轮流量的燃油介质的实时密度 ρ_{Top} 相乘计算，采用公式 8 可计算得到飞行工况压力和温度修正后的燃油密度 ρ_{op} 。

$$\rho_{op} = \rho_{Top} \times C_{pfd} \quad (8)$$

6.4 涡轮流量计 K 系数的测量

涡扇发动机过程中，流经涡轮流量计的燃油介质的温度变化较大，燃油介质的温度影响燃油介质的粘度，且燃油介质的温度变化对涡轮流量计内部的关键尺寸有影响，介质粘度及涡轮流量计内部关键尺寸均对涡轮流量计的测量性能（采用 K 系数表征）有明显影响。需重点考虑燃油介质温度对涡轮流量计测量性能的影响，开展基于飞行工况的不同燃油介质温度下的涡轮流量计校准工作，获得不同温度下的涡轮流量计 K 系数，形成 K 系数与燃油介质温度 T 的关系，用于实际发动机试验工况中涡轮流量计 K 系数的修正计算。此外，试验过程中流量计安装管路及安装角度对涡轮流量计测量性能也有影响，实际校准过程中也需考虑。

6.4.1 涡轮流量计 K 系数校准

6.4.1.1 校准用标准装置

涡轮流量计通常使用以下标准设备进行校准:

1) 质量法燃油流量校准装置, 校准过程中用于校准流量计的流量会在高精度质量称上完成称重, 获得标准质量。采用此种方法需要注意, 校准中必须考虑燃油介质基于温度、压力的密度修正, 并充分考虑浮力效应, 确保获得准确的校准结果。

2) 体积法燃油变温校准装置, 校准过程中通过测量在精确测量的时间间隔内通过被校准的流量计的已知体积的流体的位移, 获得标准体积流量。采用此种方法需要注意, 校准中必须充分考虑校准标准器由于压力和温度引起的体积变化, 确保获得准确的校准结果。

校准用标准装置的具体技术指标要求如下:

- a) 流量标定范围覆盖 (100~15000) kg/h;
- b) 燃油温度: 20℃~90℃;
- c) 装置的标准不确定度应不大于涡轮流量计最大允许误差的 1/3。

6.4.1.2 校准用介质

- 1) 流体介质采用实际开展涡扇发动机时的燃油介质;
- 2) 燃油介质应为清洁的、无可见颗粒和纤维等物质, 污染度测试不劣于 8 级, 且燃油介质中应不夹杂气体。

6.4.1.3 校准工况

校准时需合理选取校准流量点和基于试验工况的介质温度点。

- 1) 流量校准范围: 不小于 100kg/h, 上限覆盖流量计测量范围;
- 2) 燃油温度: 20℃~90℃。

6.4.1.4 其他注意事项

由于涡轮流量计对安装效果很敏感, 实际标定中需尽量保持与试验工况中的安装管路、安装角度一致。

安装角度可通过角度控制工装确保流量计安装角度与其在发动机上的实际试验工况下的安装角度保持一致。

涡轮流量计标定应配套涡轮流量计实际试验工况下的安装管路开展, 若无法配套送检, 则需配套能模拟实际前后连接管路构型引起的涡轮流量计最恶劣进口流场条件的管路工装连接涡轮流量计进行标定。

6.4.2 K 系数的温度修正

当发动机运行时流经涡轮流量计的介质温度与开展涡轮流量计校准的介质温度不同时，随着试验工况温度变化，涡轮流量计 K 系数会相应发生变化，需对涡轮流量计 K 系数进行修正计算。

首先，依据试验工况下的校准数据，建立涡轮流量计 K 系数与温度 T 的关系，针对流量测量范围比较大的涡轮流量计， K 系数与温度 T 的关系可分流量区间给出，确保数据拟合引入的偏差符合精度要求，两者之间的相互关系如下：

$$K=cT+d \quad (9)$$

其中： c — K 系数与温度的拟合关系的斜率；

d — K 系数与温度的拟合关系的截距。

通过发动机试验过程中实时测量的燃油介质温度 T_{op} ，基于涡轮流量计 K 系数与温度 T 的关系，可采用公式 10 计算得出发动机试验工况下温度修正后的涡轮流量计 K 系数 K_{op} 。

$$K_{op}=cT_{op}+d \quad (10)$$

注：90℃ 以上的 K 系数修正采用外插法进行。

6.5 燃油流量的修正计算

基于燃油介质温度、介质压力、大气压力的实时测量及燃油介质 15℃ 的密度测量结果，可开展燃油质量流量的实时修正计算，修正计算模型如下：

$$W_{f,t} = \frac{f}{c \times T_{op} + d} \times (A' \times T_{op} + B') \quad (11)$$

$$A' = a \times \left(1 - F * (P_{atm} - P_{eq}) / (1 - F * (P_{op} - P_{eq})) \right) \quad (12)$$

$$B' = b \times \left(1 - F * (P_{atm} - P_{eq}) / (1 - F * (P_{op} - P_{eq})) \right) \quad (13)$$

$$F = 10^{-4} \times \exp \left(\frac{-1.62080 + 0.00021592 * T_{op} +}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.87096 + 0.0042092 * T_{op}}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} \right) \quad (14)$$

其中： A' 、 B' —系数，具体计算方法见公式 12、13。

7. 燃油流量测试

涡扇发动机稳态下燃油流量的精确测试主要搭载发动机整体在整机试车台或飞行台上开展。针对燃油流量测试部分主要包含试验前准备、试验步骤及测量数据的记录。

7.1 测试前准备

- 1) 发动机试验前,需依据第六章完成试验用燃油的不同温度的密度检测、饱和蒸汽压检测及涡轮流量计 K 系数的变温校准,形成基于公式 11~14 的燃油流量修正计算关系;
- 2) 将燃油流量的修正计算公式以程序形式提前写入至涡扇发动机试验终端的后端数据处理平台中;
- 3) 涡轮流量计安装前需检查流道,确保无异物且转子可正常转动无卡滞;
- 4) 将涡轮流量计、燃油介质温度传感器、燃油介质压力传感器及大气压力计安装至发动机管路对应位置处,且将各传感器的输出端与相应的后端数据采集通道完成连接,确保连接可靠;
- 5) 针对涡轮流量计配套的线性化仪,需与电源连接并完成规定电压的供电;
- 6) 在发动机试验终端观察频率、温度、压力测量数据是否正常,确保数据正常后可开展后续试验。

7.2 测试步骤及试验后检查

- 1) 根据发动机试车图谱,搭载发动机稳态性能试验开展不同转速下的稳态燃油流量测量,每个转速下,稳定 5 分钟采集数据,采样频率不低于 10Hz;
- 2) 采集数据主要包含涡轮流量计输出频率、流经涡轮流量计燃油介质的温度、压力、大气压力参数的实时数据采集;
- 3) 采集的测量数据实时传输至数据处理终端进行燃油流量参数的修正计算,即可获得试验过程中实时燃油流量的精确测量数据。
- 4) 试验完成后,检查试验数据,识别设备故障;
- 5) 拆解流量计,检查流量计外观完好性及流道内是否有异物,如有异物,应将异物送至后续检验,如无异物,则将流量计进出口两端封闭,进行保存。

7.3 测试数据的记录

测试数据及计算结果均应完成记录,并对每个稳态转速状态下后 30s 的数据进行处理计算,包括但不限于:

- a) 采集信号的工程单位转换;
- b) 伪信号的鉴别和剔除;
- c) 数据按需平均化处理;
- d) 燃油流量的测量不确定度分析。

测试数据记录格式可参照附录 A 执行。

8. 燃油流量测量不确定度评定方法

发动机试验燃油质量流量的测量精度采用参数测量结果的离散程度即测量的扩展不确定度来表示。具体评定方法见附录 B。

附录 A 涡扇发动机燃油流量测量原始记录内页格式

记录编号：

发动机型号：		试验时间：			燃油批次：	
燃油流量测量模型	$W_{f,t} = \frac{f}{c \times T_{op} + d} \times (A \times T_{op} + B)$					
各系数值	A:	B:	c:	d:	A':	B':
涡轮流量计校准证书编号						
燃油物性检测证书编号						
序号	发动机 N1 相对 转速 (%)	测点处燃油 介质温度 T ($^{\circ}\text{C}$)	测点处燃油介 质压力 P (Pa)	大气压力 P_{atm} (Pa)	涡轮流量 计输出频 率 f (Hz)	质量流量 $W_{f,t}$ (kg/h)
本次试验燃油流量测量不确定度：						
附：燃油流量实时修正计算程序：						

附录 B 涡扇发动机燃油流量测量精度评定示例

B.1 测量方法

B.1.1 燃油流量参数测量方法

将带管路的燃油流量测量系统（双涡轮流量计和配套前后装机管路）安装在发动机燃油控制系统计量活门出口后的位置，在发动机运行过程中涡轮流量计通过输出频率实时测量流经的燃油体积流量，涡轮流量计本身自带温度测点同步实时采集介质温度，通过实时介质温度获取实时介质密度，再进一步通过燃油体积流量和介质密度计算出实时的燃油质量流量。

B.1.2 带管路的燃油流量测量系统的溯源方法

带管路的燃油流量测量系统（双涡轮流量计和配套前后装机管路）作为整体系统通过有校准资质认证的机构开展流量校准试验，校准方法采用质量法，将系统通过专用工装安装至高低温试验系统中，在设定校准流量点和温度点下，待温度、压力、流量均稳定后，用标准秤称量设定时间 t 内的燃油质量，采集模块同步采集相同时间 t 内流量计发出的脉冲总数，获得测量流量，校准流量点覆盖（100~6000）kg/h，校准点位 17 个，校准流量点从大到小进行校准实验，各流量点需重复测量 6 次。最终通过校准数据获得不同温度下带管路的燃油流量测量系统在不同流量范围内 K 系数，该系数为系统的测量特性参数，极为关键，用于后续发动机试验时燃油质量流量的测量计算。

B.1.3 燃油介质的密度检测方法

针对试验用批次的 RP-3 航空煤油开展不同温度下的密度检测试验，检测试验依据 ASTM D4052 标准开展，获得介质不同温度对应的密度值，并附检测不确定度。通过检测数据最终拟合形成密度和温度的线性关系，该线性关系较为关键，用于实际发动机试验中实时介质密度的读取及试验时燃油质量流量的测量计算。

B.2 测量模型

采用涡轮流量计及配套数据采集系统组成的测量系统在试验过程中燃油质量流量参数的测量模型如下：

$$W = 3600 \times \frac{f}{K} \times 10^{-3} \times \rho \quad (\text{B.1})$$

其中： $W_{f,t}$ —测得的燃油质量流量，kg/h； $W_{f,t}$

f —涡轮流量计的输出频率，HZ；

K_{op} —实际发动机试验工况下，单位体积的流体流过流量计时流量计发出的脉冲数，

及修正用仪表系数，/L；

ρ_{op} —实际发动机试验工况下，流经涡轮流量计的燃油介质密度，kg/m³。

B.3 测量不确定度来源

由测量模型公式(B.1)可导出燃油质量流量 $W_{f,t}$ 相对标准不确定度计算公式：

$$u_c(W) = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial f}\right)^2 \times u^2(f) + \left(\frac{\partial W}{\partial K}\right)^2 \times u^2(K) + \left(\frac{\partial W}{\partial \rho}\right)^2 \times u^2(\rho) + 2 \times \frac{\partial W}{\partial f} \times \frac{\partial W}{\partial K} \times r(f, K) \times u(f) \times u(K) + 2 \times \frac{\partial W}{\partial f} \times \frac{\partial W}{\partial \rho} \times r(f, \rho) \times u(f) \times u(\rho) + 2 \times \frac{\partial W}{\partial K} \times \frac{\partial W}{\partial \rho} \times r(K, \rho) \times u(K) \times u(\rho)} \quad (B.2)$$

其中： $u_c(W)$ —被测量估计值 Q 的合成不确定度；

$u(f)$ 、 $u(K)$ 、 $u(\rho)$ —输入量 f 、 K 、 ρ 的标准不确定度；

$\frac{\partial W}{\partial f}$ 、 $\frac{\partial W}{\partial K}$ 、 $\frac{\partial W}{\partial \rho}$ —偏导数，又称灵敏度系数；

$r(f, K)$ 、 $r(f, \rho)$ 、 $r(K, \rho)$ —分别为输入量 f 和 K 、 f 和 ρ 、 K 和 ρ 的相关系数估计值。

经分析，输入量 f 和 K 不相关、 f 和 ρ 不相关， $r(f, K)$ 、 $r(f, \rho)$ 的值均为 0。输入量 K 和 ρ 都是关于 T 的一次函数，因此是相关量，相关系数 $r(K, \rho)$ 取最大值为-1。

灵敏系数的计算如下：

$$\frac{\partial W}{\partial f} = \frac{\rho}{K} \quad (B.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial K} = \frac{f}{K} \quad (B.4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \rho} = -\frac{f \times \rho}{K^2} \quad (B.5)$$

以上数据代入公式 2，可得：

$$u_c(W) = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial f}\right)^2 \times u^2(f) + \left(\frac{\partial W}{\partial K}\right)^2 \times u^2(K) + \left(\frac{\partial W}{\partial \rho}\right)^2 \times u^2(\rho) + 2 \times \frac{\partial W}{\partial K} \times \frac{\partial W}{\partial \rho} \times u(K) \times u(\rho)} \quad (\text{B.6})$$

$$\begin{aligned} \frac{u^2(W)}{W^2} &= \frac{u^2(f)}{f^2} + \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\rho)}{\rho^2} + 2 \frac{u(\rho)}{\rho} \times \frac{u(K)}{K} \\ &= \frac{u^2(f)}{f^2} + \left(\frac{u(K)}{K} + \frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

其中： $\frac{u(W)}{W}$ —被测量估计值 Q 的相对标准不确定度，用 $u_{\text{rel}}(Q)$ 表示；

$\frac{u(f)}{f}$ 、 $\frac{u(K)}{K}$ 、 $\frac{u(\rho)}{\rho}$ —分别为输入量 f 、 K 、 ρ 的相对标准不确定度，分别用 $u_{\text{rel}}(f)$ 、 $u_{\text{rel}}(K)$ 、 $u_{\text{rel}}(\rho)$ 表示。

以上带入公式 7，可得：

$$u_{\text{rel}}^2(W) = u_{\text{rel}}^2(f) + (u_{\text{rel}}(K) + u_{\text{rel}}(\rho))^2 \quad (\text{B.8})$$

B.4 标准不确定度分量计算

B.4.1 输入量 f 的相对标准不确定度的评定

试验中采用的频率采集通道的最大相对测量误差为 0.0001%，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，半宽度 $a=0.0001\%$ ，则相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(f) = 0.0001\%/\sqrt{3} = 0.000058\% \quad (\text{B.9})$$

B.4.2 输入量 K 的相对标准不确定度的评定

流量计在不同介质温度下，不同流量点下的 K 系数通过校准试验来获得，根据校准数据形成不同流量范围下 K 系数与燃油介质温度的对应关系，实际试验中通过实时测量的燃油介质温度 T 计算不同温度下的 K 系数，进一步采用 K 系数进行流量计算。因此输入量 K 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(K)$ 来源有：

- a) K 系数校准引入的相对标准不确定度 u_{rel1} ；
- b) K 系数与燃油介质温度 T 的关系拟合引入的相对标准不确定度 u_{rel2} ；
- c) 通过燃油介质温度 T 测量偏差引起 K 系数偏差引入的相对标准不确定度 u_{rel3} ；

$$u_{\text{rel}}^2(K) = (u_{\text{rel1}} + u_{\text{rel2}})^2 + u_{\text{rel3}}^2 \quad (\text{B.27})$$

B.4.2.1 K 系数校准引入的相对标准不确定度

u_{rel1} 由校准后评估的测量相对标准不确定度获得。前期燃油流量测量系统（包括双涡轮流量计和配套前后装机管路，其中前管路长径比 7.36，后管路长径比 5.11）已完成校准工作，并出具了试验报告。试验报告对所有工况下的校准试验进行了单次测量不确定度评定，取各流量段和温度段的最大测量不确定度进行汇总，结果如下：

表 1 K 系数校准引入的相对标准不确定度 u_{rel1}

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
流量（kg/h）	100~300	300~500	500~6000	100~300	300~500	500~6000
u_{rel1}	0.16%	0.085%	0.085%	0.095%	0.095%	0.090%

B.4.2.2 K 系数与燃油介质温度 T 的关系确定引入的相对标准不确定度

u_{rel2} 为 K 系数与燃油介质温度 T 的关系确定引入的相对标准不确定度， K 系数与燃油介质温度 T 的关系确定引入最大的偏差的绝对值为 e_1 ，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，半宽度 $a=e_1$ ，则 u_{rel2} 为：

$$u_{\text{rel2}} = e_1 / \sqrt{3} \quad (\text{B.28})$$

依据校准试验报告的校准数据处理结果进行汇总， e_1 和 u_{rel2} 计算结果如下表所示：

表 1 K 系数与燃油介质温度 T 的关系确定引入的相对标准不确定度 u_{rel2}

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
流量（kg/h）	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
e_1	0%	0%	0.039%	0.43%	0%	0.042%
u_{rel2}	0%	0%	0.023%	0.25%	0%	0.024%

B.4.2.3 通过燃油介质温度 T 测量偏差引起 K 系数偏差引入的相对标准不确定度

实际介质温度采用流量计上的温度传感器进行采集，温度传感器采用热敏电阻进行采集并配套电压信号采集模块进行数据处理和读取，热敏电阻的温度最大测量误差 ΔT_1 为 0.5℃，配套电压信号采集模块测量范围为（0~10）V、精度为 0.05%，采集系统温度信号与电压信号的对应关系为 $T=19*U-40$ ，因此后端数采引起的温度最大测量误差 ΔT_2 为 $19*e_2*10$ 。最终温度参数测量的最大测量误差 ΔT 计算如下：

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = 0.5 + 190 \times 0.05\% = 0.595 \quad (\text{B.29})$$

依据 CJ-1000B.E0JB.004 《CJ1000A 发动机飞行台试验用燃油流量测量系统校准试验报告》3.4.3 章节的 K 系数数据处理结果，在 流量为[1150~6000]kg/h、

温度为 $[22\sim 90]^{\circ}\text{C}$ 下, 形成 K 系数与介质温度 T 的关系拟合, 拟合后的线性关系为 $K=-0.181\cdot T+1475.223$ 。

依据拟合关系, 温度参数测量偏差引起的 K 系数最大测量误差为:

$$\Delta K = 0.181 \times \Delta T = 0.181 \times 0.595 = 0.108 \quad (\text{B.30})$$

实际试验中由于温度测量偏差引起 K 系数最大测量误差 ΔK , 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$, 半宽度 $a=\Delta K$, 则相对标准不确定度 $u_{\text{rel}3}$ 为:

$$u_{\text{rel}3} = \frac{0.108}{K \times \sqrt{3}} = 0.0043\% \quad (\text{B.31})$$

综合可得 $u_{\text{rel}3}$ 的计算结果如下表所示:

表 3 通过燃油介质温度 T 测量偏差引起 K 系数偏差引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}3}$

温度	常温 (20~35) $^{\circ}\text{C}$			高温 (35~90) $^{\circ}\text{C}$		
流量 (kg/h)	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
$u_{\text{rel}3}$	0%	0%	0.043%	0%	0%	0.043%

综上数据, 代入公式 10 可得输入量 K 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(K)$:

表 4 输入量 K 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(K)$

温度	常温 (20~35) $^{\circ}\text{C}$			高温 (35~90) $^{\circ}\text{C}$		
流量 (kg/h)	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
$u_{\text{rel}1}$	0.16%	0.085%	0.085%	0.095%	0.095%	0.090%
$u_{\text{rel}2}$	0%	0%	0.023%	0.25%	0%	0.024%
$u_{\text{rel}3}$	0%	0%	0.043%	0%	0%	0.043%
$u_{\text{rel}}(K)$	0.16%	0.085%	0.11%	0.34%	0.095%	0.12%

B.4.3 输入量 ρ 的相对标准不确定度

燃油介质的密度随介质温度发生变化, 不同温度下的密度测量通过第三方检测机构的检测试验来获得, 根据检测数据形成密度与燃油介质温度的对应关系, 实际试验中通过实时测量的燃油介质温度 T 计算不同温度下的密度 ρ , 进一步采用密度 ρ 进行燃油质量流量计算。因此输入量 ρ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\rho)$ 来源有:

- 密度检测引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}4}$;
- 密度与燃油介质温度 T 的关系拟合引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}5}$;
- 通过燃油介质温度 T 测量偏差引起密度偏差引入的相对标准不确定度

$u_{\text{rel}6}$;

$$u_{\text{rel}}^2(\rho) = (u_{\text{rel4}} + u_{\text{rel5}})^2 + u_{\text{rel6}}^2 \quad (\text{B.32})$$

B.4.3.1 密度检测引入的相对标准不确定度

u_{rel4} 由检测后评估的测量相对标准不确定度获得。前期校准用燃油介质已在中国航发理化实验室完成不同温度下燃油介质的密度检测工作,并出具了检测报告。检测报告对检测结果进行了单次测量不确定度评定,其单次测量的标准不确定度为 0.000116g/cm^3 ($k=2$), 因此 u_{rel4} 计算如下。

$$u_{\text{rel4}} = \frac{0.000025}{\rho} = \frac{0.000025}{0.75} = 0.016\% \quad (\text{B.33})$$

B.4.3.2 密度与燃油介质温度 T 的关系拟合引入的相对标准不确定度

u_{rel5} 为密度与燃油介质温度 T 的关系拟合引入的相对标准不确定度,密度与燃油介质温度 T 的拟合引入最大的相对偏差绝对值为 0.028% ,按均匀分布考虑,取 $k=\sqrt{3}$,半宽度 $a=e_3$,则 u_{rel5} 为:

$$u_{\text{rel5}} = \frac{e_3}{\rho \times \sqrt{3}} = 0.0162\% \quad (\text{B.34})$$

B.4.3.3 通过燃油介质温度 T 测量偏差引起密度偏差引入的相对标准不确定度

B.4.2.3 章节已评估试验中燃油介质温度的最大测量误差为 ΔT ,依据检测结果进行数据拟合形成密度与介质温度 T 的拟合线性关系为 $\rho=-0.000745 \cdot T+0.818$ 。

温度参数测量偏差引起的密度最大测量误差为:

$$\Delta \rho = 0.000745 \times \Delta T = 0.000745 \times 0.595 = 0.000443 \quad (\text{B.35})$$

实际试验中由于温度测量偏差引起密度最大测量误差 $\Delta \rho$,按均匀分布考虑,取 $k=\sqrt{3}$,半宽度 $a=\Delta \rho$,则相对标准不确定度 u_{rel6} 为:

$$u_{\text{rel6}} = \frac{\Delta \rho}{\rho \times \sqrt{3}} = \frac{0.000443}{0.75 \times \sqrt{3}} = 0.034\% \quad (\text{B.36})$$

综上数据,代入公式 15 可得输入量 ρ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\rho)$ 为:

$$u_{\text{rel}}(\rho) = 0.047\% \quad (\text{B.37})$$

B.5 合成标准不确定度的计算

将上述 $u_{\text{rel}}(f)$ 、 $u_{\text{rel}}(K)$ 、 $u_{\text{rel}}(\rho)$ 的计算结果带入到公式 8,可得被测量估计值 W 的相对合成标准不确定度如下:

表 5 输入量 K 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(K)$

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
流量（kg/h）	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
$u_{\text{rel}}(f)$	0.000058%	0.000058%	0.000058%	0.000058%	0.000058%	0.000058%
$u_{\text{rel}}(K)$	0.16%	0.085%	0.11%	0.34%	0.095%	0.12%
$u_{\text{rel}}(\rho)$	0.047%	0.047%	0.047%	0.047%	0.047%	0.047%
$u_{\text{rel}}(W)$	0.21%	0.13%	0.15%	0.39%	0.14%	0.16%

B.6 扩展不确定度的计算

取 $k=2$ ，具体得到被测量估计值 W 的相对扩展不确定度采用公式 24 进行计算，得到结果见表 6 所示：

$$U_{\text{rel}}(W) = k \times u_{\text{rel}}(W) \quad (\text{B.38})$$

表 6 输出量 W 的扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(W)$

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
流量 （kg/h）	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
$U_{\text{rel}}(W)$	0.42%	0.26%	0.30%	0.78%	0.28%	0.32%

最终说明，燃油质量流量参数的最大测量误差有 95% 的概率控制在 $U_{\text{rel}}(W)$ 内。

B.4 结论

燃油质量流量参数的测量精度采用参数测量结果的离散程度即测量的扩展不确定度来表示。依据测量不确定度的校准结果可得，地面试验燃油质量流量参数在不同流量范围及温度下的测量精度有 95% 的概率控制在下表的数据内。

表 7 输出量 W 的相对标准不确定度 $U_{\text{rel}}(W)$

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
燃油质量流量 （kg/h）	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~6000
测量精度	0.42%	0.26%	0.30%	0.78%	0.28%	0.32%