

涡扇发动机燃油流量测试技术规范 编制说明

2026 年 8 月

中国航发商用航空发动机有限责任公司

涡扇发动机燃油流量测试技术规范编制说明

一、任务来源及计划要求

《涡扇发动机燃油流量测试技术规范（标准立项名称）》标准的编制计划由国家市场监管总局办公厅印发《2025 年国家计量技术规范制定、修订计划》，公文号市监计量发 XX，计划序号为第 XX 项，计划名称为《涡扇发动机燃油流量测试技术规范（标准计划名称）》。根据工作安排，本标准由中国航发商发等主编，编制周期为 2025 年 1 月至 2025 年 12 月。

需求来源：耗油率是评价航空发动机安全性、经济性、环保性的核心指标，一般通过燃油流量及发动机推力数据计算得到。实际飞行试验中发动机推力通过计算获取，只有燃油流量能够通过实际测量获得，因此其测量数据的准确度直接影响到发动机性能指标的评估。CCAR-33R2《航空发动机适航规定》33.7 条款及飞机方客户也明确提出需开展航空发动机稳定状态下燃油流量的精确测量。目前行业内普遍使用涡轮流量计测量航空发动机的燃油流量，实际发动机试验中，涡轮流量计测点位置处介质温度、压力及流量的变化范围大、量程宽。以某型在研发发动机为例，测点位置处的燃油介质温度范围常温~120℃，压力范围常压~8MPa，流量最大达 8000kg/h，国内原有的采用涡轮流量计及其理想实验室校准数据开展燃油流量测量的方法已无法满足要求，因此急需开展大涵道比涡扇发动机飞行试验燃油流量测量方法制定，确保燃油流量测量准确性，为适航符合性验证及发动机性能评估提供有效的数据支撑。

本标准提出了基于涡扇发动机试验复杂工况的涡轮流量计校准 K 系数修正方法和密度修正方法，规定了涡扇发动机稳定状态试验下（100~8000）kg/h 燃油流量测量要求、测量原理、测量系统、测量方法及数据处理修正计算方法、测量精度评定方法等内容。

二、规范制定的目的和意义

为贯彻 CCAR-33R2《航空发动机适航规定》及飞机客户方对涡扇发动机燃油流量精确测量的要求，保障涡扇发动机适航审定和产品交付，提出了本测试规范制定计划。

航空发动机作为现代飞行器的核心动力源，被誉为飞机的“心脏”，其性能不仅关乎飞机的速度、高度和航程，更在安全性、经济性和环保性方面承载着重要的使命。随着民航市场的不断发展，国际民航组织和航空公司都对发动机的低油耗、低排放提出了日益严苛的要求，根据公开资料显示，GE9X 发动机的耗油率比 GE90-115B 降低约 10%，到 2030 年航空发动机的耗油率指标将比 CFM-56 降低 20%以上。

耗油率是评价航空发动机安全性、经济性、环保性的核心指标，一般通过燃油流量及发动机推力数据计算得到。实际飞行试验中发动机推力通过计算获取，只有燃油流量能够通过实际测量获得，因此其测量数据的准确度直接影响到发动机性能指标的评估。CCAR-33R2《航空发动机适航规定》33.7 条款及飞机方客户也明确提出需开展航空发动机稳定状态下燃油流量的精确测量。

涡扇发动机在飞行试验过程中采用了安装在发动机侧的涡轮流量计开展燃油流量测量，但受发动机供油系统空间限制，流量计前后装机管路系统结构复杂，且在整个飞行包线内，测点位置处介质温度、压力及流量的变化范围大、量程宽。以某型在研发发动机为例，测点位置处的燃油介质温度最高可达 120℃，压力最高可达近 8MPa，流量最大达 8000kg/h。国内原有的采用涡轮流量计及其理想实验室校准数据开展燃油流量测量的方法已无法满足要求，因此急需开展大涵道比涡扇发动机飞行试验燃油流量测量方法制定，确保燃油流量测量准确性，为适航符合性验证及发动机性能评估提供有效的数据支撑。

目前行业内普遍使用涡轮流量计测量航空发动机的燃油流量。地面试验时一般将涡轮流量计安装在常温、常压、宽长径比的台架供油管路上进行测量。涡轮流量计按照 JJG 1037-2008《涡轮流量计检定规程》开展理想实验室环境下的校准，获得表征涡轮流量计测量性能的 K 系数，用于实际试验中测得燃油体积流量的修正计算，结合依据 GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）》测得的常温常压下燃油密度，进行燃油质量流量的测量计算。

国际上针对采用涡轮流量计开展燃油流量测量的使用场景，美国航空航天学会发布了通用标准 SAE ARP 4990《TURBINE FLOWMETER FUEL FLOW CALCULATIONS》，该标准指出了涡轮流量计用于燃油流量测量时，需开展符合实际工况的介质温度、压力对仪表性能和介质密度影响的修正计算，但该标准中缺少了燃油流量测量的具体方法及测量精度评定方法。

拟制定的标准与 SAE ARP 4990B 中关于介质密度及涡轮流量计性能修正考虑的影响因素一致，但 SAE ARP 4990B 将温度、压力对介质粘度和流量计内部关键尺寸的影响分开修正，通过配比标准粘度物质校准拟合建立基线。但基于国内目前配比标准粘度物质的技术水平和设备能力现状，在实验室环境下配比不同粘度的标准介质进而开展仪表校准建立修正基线的方法，其精度不满足发动机性能模型修正需求。故本标准将温度、压力作为变量，统一考虑了其对介质粘度和仪表几何尺寸的影响，将流量计置于实际使用工况下开展校准，并进一步给出了飞行试验燃油流量测量方法及测量精度评估方法，可有效指导大涵道比涡扇发动机飞行试验燃油流量精确测量。

航空发动机被誉为现代工业“皇冠上的明珠”，其复杂性和精密性要求极高，

计量测试技术作为保障其性能精准、安全可靠的重要手段，必须遵从工程适用性理念，从理想实验室环境校准走向贴合现场实际使用工况的计量校准。本标准针对航空发动机性能模型修正和验证分解出来的关键参数，建立其具体的测量模型，开展测量影响因素分析并识别影响因素中与校准数据强关联的环节，制定实际使用工况下的校准方法和修正方法，保障飞行试验过程中测量结果的有效性。

三、规范制定的依据

本规范的名词术语定义参考了 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》等标准。

本规范的仪器技术指标及技术方法参考了 JJG1037《涡轮流量计检定规程》、SAE ARP 4990B《Turbine Flowmeter Fuel Flow Calculations》、GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）》、ASTM D4052《Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter》、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》等标准。

此外，本标准研究团队前期针对航空发动机试验工况下燃油流量无法精确测量的技术现状，开展了测量方案制定、试验复杂工况下温度、压力、装机管路结构及安装角度对涡轮流量计测量性能的影响规律研究，识别关键影响因素，进一步开展了试验工况关键影响因素下涡轮流量计 K 系数校准及修正技术研究和试验工况关键影响因素下的燃油介质密度检测和修正技术研究，形成涡扇发动机试验工况下燃油质量流量测量及修正计算方法，进一步研究团队开展了大量且全面的试验工况下涡轮流量计校准试验，积累了大量试验工况关键影响因素对涡轮流量测量性能影响的数据，进一步形成发动机试验燃油流量精确测量方法，填补涡扇发动机试验复杂工况下涡轮流量计校准方法及涡扇发动机试验复杂工况下燃油流量测量方法的空白，以上研究成果为该标准的制定提供大量的数据支撑。具体内容如下：

1 测量工况对流量测量的影响理论分析

基于测量模型进行分析，上述复杂测量工况均对发动机燃油流量的测量性能有一定影响，具体针对各影响因素的影响理论分析如下：

1) 角度及管路影响

流量计安装角度不为 0° 时，涡轮、轴套、蜗杆等零件的自重产生轴向力分量，该分量将增大涡轮流量计的轴承转动阻力，导致影响涡轮叶片转速，进而影响流量计 K 系数。安装角度越大，轴承转动阻力越大，叶片转速越小， K 系数越

小)，在小流量状态下安装角度对流量计的测量性能影响明显，大流量状态下液体与涡轮叶片的摩擦阻力远大于角度造成的轴承传动阻力，该因素影响较小。

流量计前连接管路的直管段部分长径比要求不少于 10，主要作用为对进入流量计的流体进行整流，避免流体的流动不均匀性造成的流量计测量数据的偏差，造成对流量计的测量性数据的影响；目前流量计前连接管路的直管段部分长径比只有 7.36，且直管段前面具有计量活门、管路变径和弯曲等复杂结构，导致进入涡轮流量计进口流场的流动不均匀性较大，复杂流动对涡轮流量计测量性能有一定影响，需进行通过试验进行研究。

2) 温度影响

燃油介质温度主要影响涡轮流量计 K 系数和燃油介质密度，分析如下：

a) 燃油介质温度影响介质粘度

涡轮流量计的工作原理是流动流体的动力驱使涡轮叶片旋转。流体流速与涡轮叶片的转动速度成正比，内置的传感器通过感应涡轮叶片的转动速度使每个经过的叶片产生一个电子脉冲，脉冲的频率与流经流量计的流体体积流率成正比，该比例系数定义为流量计 K 系数。当介质温度发生变化时，介质粘度发生变化，而介质粘度影响流体与涡轮叶片之间的摩擦阻力，影响涡轮叶片转速，导致流量计测量性能 K 系数发生变化，进而影响燃油流量测量的准确性。

b) 燃油介质温度影响涡轮流量计测量元件的关键尺寸

涡轮流量计内部叶片等材质受温度的影响会产生微量的膨胀或者收缩，从而引起涡轮流量计内径、壁厚等的尺寸变化，这将导致涡轮流量计的测量性能 K 系数发生变化，进而影响燃油流量测量的准确性。

c) 燃油介质温度影响介质密度

据相关 RP-3 航空煤油物性研究分析，燃油介质温度对燃油物性-密度有明显影响，温度升高，燃油介质密度会降低，反之，燃油介质密度会升高，因此针对发动机试验中关系的燃油质量流量，温度变化会引起密度变化，从而对燃油流量测量的准确性产生影响。

综上，燃油介质温度对燃油流量测量准确性有较大的影响，具体的影响机理需进一步通过校准试验来进行具体研究。

3) 压力影响

a) 燃油介质压力影响介质粘度

实际飞行试验工况下燃油介质压力(常压~8 MPa)对燃油介质进行压缩，因此对介质粘度有一定的影响。

本次试验所用 RP-3 航空煤油已送至具备 CNAS 资质的实验室进行介质运动粘度以及介质密度的检测（见下图），根据检测数据以及 SAE ARP 4990 《涡轮机械流量计燃油流量计算》中介绍的压力对粘度的修正方法，见公式（1），可

以得到压力变化时介质运动粘度的修正系数 C_{pfv} ，进而得到各介质压力对应的介质运动粘度，计算结果如表 3 所示。

$$C_{pfv} = 10^{\left[P_{gage} * \frac{-0.1479 + 0.58624 * \mu_{Top}^{0.181}}{1000} \right]} / C_{pfd}$$

公式（1）

其中 C_{pfd} 为压力对密度的修正系数， P_{gage} 为实际工况的油压（表压）， μ_{Top} 为动力粘度。



图 1 不同温度下燃油介质的运动粘度与密度

表 1 不同介质压力下运动粘度表

温度℃	常压运动粘度 mm²/s	4MPa C_{pfv}	8MPa C_{pfv}	4MPa 运动粘度 mm²/s	8MPa 运动粘度 mm²/s	8MPa 与常压下运动粘度的相对偏差 %
15	1.760	1.040190	1.083154	1.831	1.906	8.30
18	1.676	1.039575	1.081861	1.742	1.813	8.19
20	1.625	1.039186	1.081041	1.689	1.757	8.10
25	1.507	1.038237	1.079044	1.565	1.626	7.90

根据上表可知，在介质温度为 20℃时，8MPa 与常压下运动粘度相对偏差为 8.10%，根据图 8 不同温度下运动粘度检测数据拟合外插可得 120℃运动粘度为 0.558 mm²/s，则可知常压下 RP-3 航空煤油的运动粘度在介质温度为 120℃ 时与 20℃时相对偏差为 65.7%。得出压力从常压升至 8MPa 对运动粘度变化的影响是常压下温度从 20℃变化为 120℃时对运动粘度影响的 12%左右，分析得到试飞工况下压力变化（常压~8 MPa）对介质运动粘度影响远小于试验工况温度变化（20℃~120℃）对介质运动粘度影响，可以忽略。

b) 燃油介质压力影响涡轮流量计测量元件的关键尺寸

燃油介质压力会对涡轮流量计内部的关键尺寸会产生一定影响，参照 SAE

ARP 4990 计算压力对涡轮流量计几何尺寸的影响。压力对涡轮流量计几何尺寸的修正系数 C_{pr} 和 C_{pK} 计算公式见（4）、（5），压力修正系数 C_{pr} 和 C_{pK} 分别是工作压力(p_{page})、流量计内径(D)、材料弹性模量(E)和流量计壁厚(t)的函数。流量计机身材料为 316 不锈钢，材料弹性模量 E 的值为 160 Gpa，代入公式（4）、（5）可知 C_{pr} 和 C_{pK} 约等于 1，故压力对流量计几何尺寸的影响可以忽略。

$$C_{pr} = [1 + (\Delta p * D)/(E * t)]^2 \quad \text{公式 (2)}$$

$$C_{pK} = [1 + (\Delta p * D)/(E * t)]^3 \quad \text{公式 (3)}$$

综上，压力变化对介质粘度及流量计几何尺寸造成的影响很小，进而对涡轮流量计 K 系数的影响相比远小于温度变化对涡轮流量计 K 系数的影响，以上需要通过试验验证进一步佐证结论。

c) 燃油介质压力影响介质密度

实际飞行试验工况下燃油介质压力(常压~8 MPa)对燃油介质进行压缩，因此对介质粘度有一定的影响。根据 SAE ARP 4990 中引用的 API 石油计量标准手册第 11.2.1 节介绍的燃油密度的压力修正方法，压力对介质密度修正系数 C_{pfd} 的公式为：

$$C_{pfd} = (1 - F * (P_{atm} - P_{eq})) / (1 - F * (P_{op} - P_{eq})) \quad \text{公式 (4)}$$

其中， P_{atm} 为试验工况下的大气压力；

F 为压缩修正系数，与实际介质温度以及介质温度及 15℃下的燃油密度有关；

P_{op} 为实际工况下的介质压力（绝压）；

p_{eq} 为介质的饱和蒸汽压，与介质温度相关。

则实际工况下介质密度 ρ_{op} 见公式(7)，其中 $\rho_{T_{op}}$ 为经过温度修正后的介质密度。

$$\rho_{op} = \rho_{T_{op}} * C_{pfd} \quad \text{公式 (5)}$$

结合公式(6)、(7)分析，随着燃油介质压力的变大，介质密度也会略有增加，影响是否可以忽略需进一步进行研究。

4) 飞行姿态影响

在地面参考系下涡轮流量计的仪表系数 K 仅与本身结构参数有关，可近似为一常数，但飞机飞行时会有俯仰，偏航、滚转运动（即沿 3 个正交轴旋转），将旋转的飞机作为参考系（非惯性系），涡轮流量计会受惯性力， K 系数的测量模型可能不成立，经过分析飞机滚转时无科氏力，飞机俯仰时存在科氏力，但科氏力方向与驱动力方向垂直，流量计不受科氏力影响，飞机偏航时存在科氏力，科氏力方向与驱动力方向同向，流量计受到科氏力的影响。后续将进一

步开展试验，验证偏航产生的科氏力对双涡轮流量计测量性能的影响。

5) 测量模型及精度分配

依据测量模型，试验过程中燃油质量流量 $W_{f,t}$ 的测量精度采用测量结果的离散程度即测量的扩展不确定度来表示。

依据测量模型进行分析，测量不确定度的来源如下：

- a) 输入量 f 引入的标准不确定度；
- b) 输入量 K 引入的标准不确定度；
- c) 输入量 ρ 引入的标准不确定度。

按照 JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》测量不确定度传播律，燃油质量流量 $W_{f,t}$ 的合成不确定度计算公式如下：

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

其中： $u_c(W)$ —被测量 $W_{f,t}$ 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，输入量 K 和 ρ 都是关于 T 的函数，且呈正相关，由于 K 与 T 的函数关系无法确立，故没有办法得到准确的 $r(K, \rho)$ 值，相关系数 $r(K, \rho)$ 在(0,1]之内。

$$\frac{\partial W}{\partial f} = \frac{\rho}{K} \quad \text{公式 (7)}$$

$$\frac{\partial W}{\partial K} = -\frac{f \times \rho}{K^2} \quad \text{公式 (8)}$$

$$\frac{\partial W}{\partial \rho} = \frac{f}{K} \quad \text{公式 (9)}$$

以上数据代入公式 2，可得：

$$u_c(W) = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial f}\right)^2 \times u^2(f) + \left(\frac{\partial W}{\partial K}\right)^2 \times u^2(K) + \left(\frac{\partial W}{\partial \rho}\right)^2 \times u^2(\rho) + 2 \times \frac{\partial W}{\partial K} \times \frac{\partial W}{\partial \rho} \times u(K) \times u(\rho)} \quad \text{公式 (10)}$$

$$\begin{aligned} \frac{u^2(W)}{W^2} &= \frac{u^2(f)}{f^2} + \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\rho)}{\rho^2} + 2 \frac{u(\rho)}{\rho} \times \frac{u(K)}{K} \\ &= \frac{u^2(f)}{f^2} + \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\rho)}{\rho^2} - 2 \times r(K, \rho) \times \frac{u(\rho)}{\rho} \times \frac{u(K)}{K} \end{aligned} \quad \text{公式 (11)}$$

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

$$u_{\text{rel}}^2(W) < u_{\text{rel}}^2(f) + u_{\text{rel}}^2(K) + u_{\text{rel}}^2(\rho) \quad \text{公式 (12)}$$

按照燃油流量 $>300\text{kg/h}$ 时，测量精度不大于测量值的 0.35% 的这个最严苛的测试需求，试飞工况下的测量值的测量精度采用测量结果的离散程度即测量的相对扩展不确定度来表示，被测量 $W_{f,t}$ 的相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(W)=0.35\%$

$$U_{\text{rel}}(W) = k \times u_{\text{rel}}(W) \quad \text{公式 (13)}$$

取包含因子 $k=2$ （表示燃油质量流量参数的最大测量误差有 95% 的概率控制 $U_{\text{rel}}(\dot{M})$ 之内），此时 $u_{\text{rel}}(W)=0.175\%$ 。

故只要满足

$$\sqrt{u_{\text{rel}}^2(f) + u_{\text{rel}}^2(K) + u_{\text{rel}}^2(\rho)} \leq 0.175\% \quad \text{公式 (14)}$$

$$u_{\text{rel}}^2(f) + u_{\text{rel}}^2(K) + u_{\text{rel}}^2(\rho) \leq (0.175\%)^2 \quad \text{公式 (15)}$$

则 $u_{\text{rel}}(W) < 0.175\%$ 。

根据对国内各校准平台及测量系统设备精度等的调研工作及 JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》进行精度分配设计：

- 1) 频率 f 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(f)$ 精度分配为：0.00006%；
- 2) K 系数总的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(K)$ 精度分配为：0.162%， K 系数相对标准不确定度来源包含标准装置引入的相对标准不确定度 0.116%、 K 系数拟合引入的相对标准不确定度 0.024%、燃油介质温度 T 和介质压力测量偏差引起 K 系数偏差引入的相对标准不确定度 0.044%。
- 3) 燃油密度 ρ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\rho)$ 精度分配为：0.054%，相对标准不确定度来源有两个方面：
 - a) 温度对密度的修正引入的相对标准不确定度，此部分精度分配为 0.04%，包括密度检测引入的相对标准不确定度 0.016%，密度拟合引入的相对标准不确定度 0.006%以及燃油介质温度 T 测量偏差引起密度偏差引入的相对标准不确定度 0.04%。

- b) 压力对密度的修正引入的相对标准不确定度，此部分精度分配为 0.014%，包括检测引入的相对标准不确定度 0.009%，拟合引入的不确定度 0.003%以及燃油介质压力 P 测量偏差引起密度偏差引入的相对标准不确定度 0.001%。

2 试验工况对涡轮流量计测量性能的影响研究及修正方法制定

开展发动机试验工况介质温度、压力、流量计前后管路与安装角度等影响因素对涡轮流量计测量性能 K 系数的影响研究。形成复杂工况涡轮流量计校准方法，识别出温度、压力、流量计前后管路与安装角度对 K 系数的影响规律，形成基于试验复杂工况的涡轮流量计 K 系数修正策略，用于试验燃油流量的修正计算。

研究发现：

- 1) **安装角度对涡轮流量计测量性能的影响：**通过涡轮流量计不同安装角度下的常温校准试验研究发现，涡轮流量计的安装角度对其测量性能有一定影响，在 $(-30\sim 15)^{\circ}$ 范围内时，其对涡轮流量计 K 系数影响相对较小，具体数据见图 2。

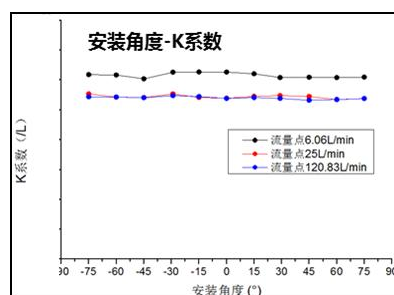


图 2 不同安装角度下各流量点对应的 K 系数

- 2) **安装角度和装机管路对涡轮流量计测量性能的耦合影响：**通过过常温 6.54° 安装角度下带模拟实际试验连接管路工装的流量计的校准试验数据分析发现，数据与常规校准实验的校准数据较为一致，具体见图 3，装机管路对流量计测量数据影响较小，结合 1)，确定涡轮流量计的校准建议应配套涡轮流量计实际试验工况下的安装管路开展，以保持保持与发动机试验工况中的安装管路、安装角度一致。

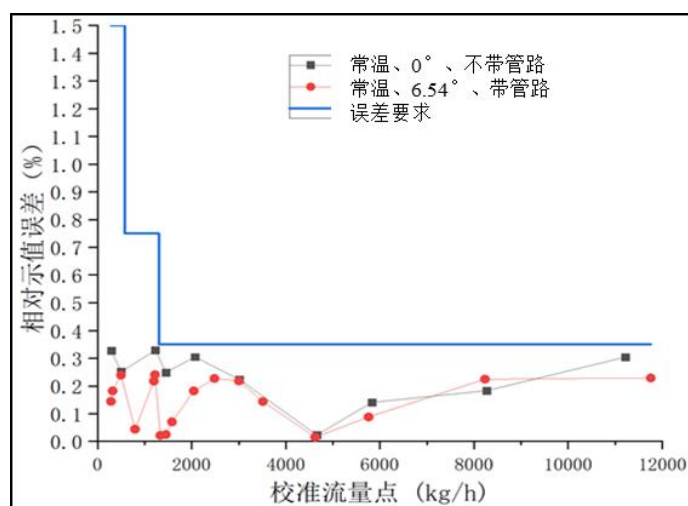


图3 管路对流量计测量性能的影响

- 3) **燃油介质温度对涡轮流量计测量性能的影响:**通过实际安装角度下带模拟装机管路工装的涡轮流量计不同温度下(22℃、40℃、60℃、70℃、90℃)的校准试验数据数据分析发现:介质温度对流量计测量性能(K 系数)有显著影响(见图4a),实际涡轮流量计需开展高温工况下的校准工作,获得高温实际 K 系数,并形成温度与 K 系数的拟合关系为 $K=cT+d$ 的线性关系。
- 4) **燃油介质压力对涡轮流量计测量性能的影响:**通过介质温度为常温、介质压力分别为常压、4MPa、8MPa和10MPa四个点的校准试验数据数据分析发现:在介质压力为常压~8MPa的试验工况下,介质压力变化对 K 系数的影响远小于介质温度变化对 K 系数的影响,可以忽略不计,具体见图4。

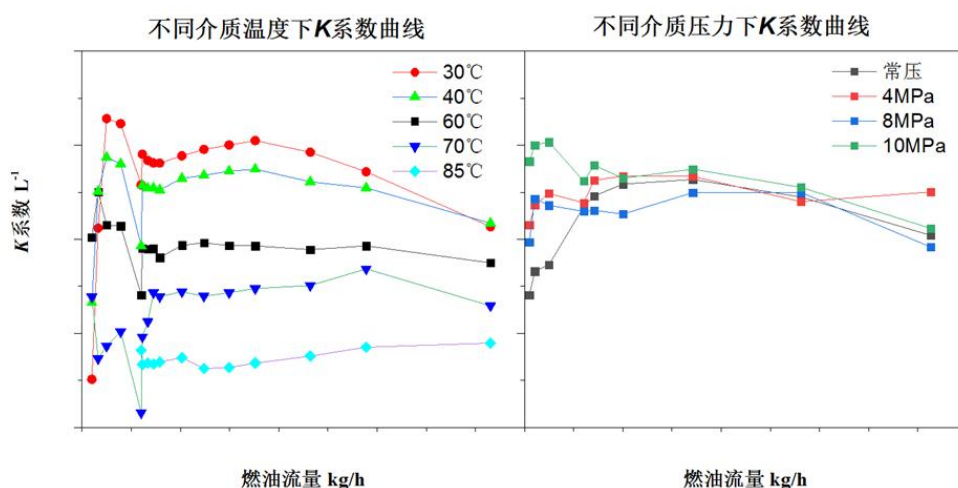


图4 (a) 不同介质温度下流量计 K 系数变化曲线 (b) 不同介质压力下流量计 K 系数变化曲线

- 5) **飞行姿态对涡轮流量计测量性能的影响:**通过6.875L/min、25 L/min、

42.708 L/min、120.83L/min 流量点下、角速度（0~10）deg/s 的偏航、俯仰、滚转状态校准试验数据分析发现：滚转时角速度对流量计频率不造成影响，俯仰和偏航时角速度变化对双涡轮流量计影响的现象一致，随着流量增大，流量计的波动度在减小，即使流量计在角速度突变时流量计输出频率的均值也与角速度为 0 时偏差在万分之几的量级之内，飞机姿态变化对双涡轮流量计燃油流量测量无影响。

- 6) **修正方法制定：**开展实际安装角度下带实际试验连接管路的涡轮流量计的变温校准，形成温度与 K 系数的拟合关系 $K=cT+d$ ，实际试验中，通过介质温度的实时测量实现 K 系数的实时修正。

3 试验工况对燃油介质密度的影响研究及修正方法制定

开展发动机试验工况介质温度、压力影响因素对燃油密度的影响研究。识别出温度、压力、流量计前后管路与安装角度对 K 系数的影响规律，形成基于试验复杂工况的燃油介质密度修正策略，用于试验燃油流量的修正计算。

研究发现：

- 1) **温度对涡轮流量计测量性能的影响：**通过依据 GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法》或 ASTM D4052《Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter》标准方法开展的不同温度下的密度检测试验数据分析发现，基燃油介质密度与温度呈现良好的线性关系 $\rho=aT+b$ ，随着温度增加，密度降低。
- 2) **压力对涡轮流量计测量性能的影响：**参考 GB/T21450《原油和石油产品密度在 638kg/m³-1074kg/m³ 范围内的烃压缩系数》或 API 石油测量标准手册(2.1.2) 11.2.1 《Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 11.2.1 M—Compressibility Factors for Hydrocarbons: 638-1074 Kilograms per Cubic Metre Range》发现，燃油介质压力的变化会对介质密度产生影响，直接参照标准中的修正方法，计算得到压力修正系数 C_{pfd} ，用于进行密度的压力修正，参照 GB/T 35930-2018《化工产品饱和蒸气压的测定 热重法》标准方法，开展平衡蒸汽压 P_{eq} 与飞行工况温度的关系的确定，最终获得两者之间的相互关系为 $\ln P_{eq}=A+B*1/T$;
- 3) **修正方法制定：**最终形成的密度修正公司如下：

$$\rho = (a \times T_{op} + b) * C_{pfd}$$

$$\rho = (a \times T_{op} + b) * C_{pfd} \quad (16)$$

$$C_{pfd} = \left(1 - F \times (P_{atm} - P_{eq})\right) / \left(1 - F \times (P_{op} - P_{eq})\right) \quad (17)$$

$$F = 10^{-4} \times \exp \left(\frac{-1.62080 + 0.00021592 * T_{op} +}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.87096}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.0042092 * T_{op}}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} \right) \quad (18)$$

4 发动机试验燃油质量流量修正策略制定和最终测量模型建立

依据上述研究，最终确定燃油质量流量的修正计算模型如下：

$$W_{f,t} = \frac{f}{c \times T_{op} + d} \times (A' \times T_{op} + B') \quad (19)$$

$$A' = a \times \left(1 - F * (P_{atm} - P_{eq}) / (1 - F * (P_{op} - P_{eq})) \right) \quad (20)$$

$$B' = b \times \left(1 - F * (P_{atm} - P_{eq}) / (1 - F * (P_{op} - P_{eq})) \right) \quad (21)$$

$$F = 10^{-4} \times \exp \left(\frac{-1.62080 + 0.00021592 * T_{op} +}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.87096}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} + \frac{0.0042092 * T_{op}}{\{\rho_{ref,gcc}^2\}} \right) \quad (22)$$

并进一步形成了用于实际发动机试验中的燃油流量修正算法，植入至试验数据处理终端开展试验中燃油流量的实时测量。

5 发动机试验燃油质量流量测量精度评估方法建立

立足燃油流量测量模型，开展三大环节、十五个关键因素的耦合迭代影响评估，形成系统的评估流程，并针对某型号试验燃油流量测量精度进行具体评估，并进一步用于测量精度是否满足型号测量需求的质量评判。

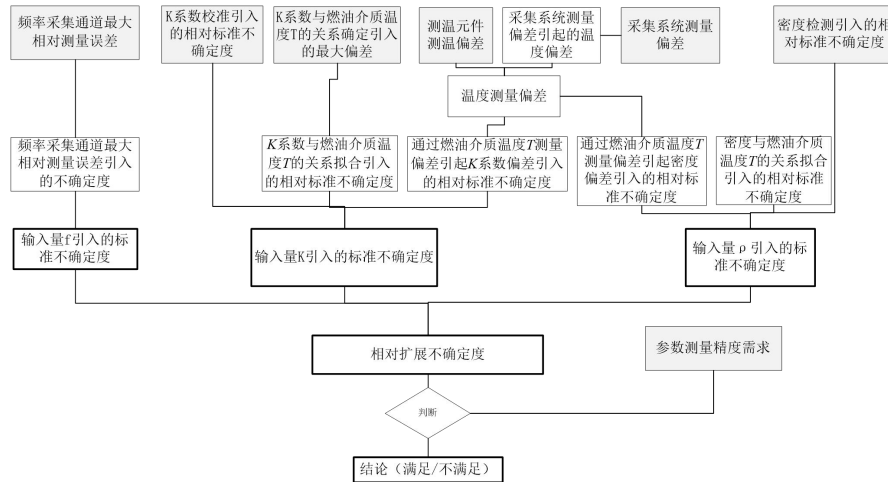


图7 发动机试验燃油流量测量精度评估流程

6 发动机试验燃油流量方法确定及型号应用

1) 测量设备选型

参考 LEAP-1C 等典型机型，采用以涡轮流量计为核心测量元件的燃油流量

测量系统进行发动机侧的燃油流量精确测量。

基于测点工况及测量要求，涡轮流量计测量设备选择美国 COX 公司的双涡轮流量计，具体参数如下：

- a) 设备型号：CDL16-AN-C-RFR；
- b) 设备编号：2302000020、2302000021、2302000022、2302000023、；
- c) 流量测量范围：（0.568~246）L/min，按照常温下 RP-3 航空煤油密度为 0.796 g/cm^3 计算，质量流量范围为（27~11749）kg/h；
- d) 流量测量精度：厂家出厂时在常温下采用粘度为 $1.128 \text{ mm}^2/\text{s}$ 的介质进行校准，最大允许误差为 0.5%，该流量计验收前在国内 14.57°C 环境条件下使用 RP-3 航空煤油进行校准，介质运动粘度 $1.64 \text{ mm}^2/\text{s}$ ，流量计为水平安装，校准数据显示：（100~300）kg/h 范围内最大允许误差为 0.93%，300kg/h 以上时最大允许误差为 0.11%，100kg/h 以下范围未做校准；
- e) 温度使用范围：（-101~165） $^\circ\text{C}$ ；
- f) 可承受介质压力等级：3000 psig(20 MPa)；
- g) 燃油过滤要求：过滤器等级要求为（40~75） μm （CJ1000A 发动机计量活门前安装了等级为 50 μm 的油滤，满足使用要求）；
- h) 流量计尺寸：内径 22.3 mm、外径 25.4 mm、长度 90.42 mm、高度 85.29 mm；
- i) 流量计重量：0.5995 kg；
- j) 流量计流量输出信号：5 VDC 方波脉冲信号；
- k) 流量计内置温度测点，测温元件为热电阻，温度测量精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，温度输出信号为（4~20）mA 模拟信号，测点位置位于双流量计与燃油直接接触的薄壁内壁处；
- l) 该流量计配套线性化仪进行使用，用于流量计输出信号处理，最终形成 5V 方波频率信号，输出值飞行台采集系统进行采集，如图 2 所示。

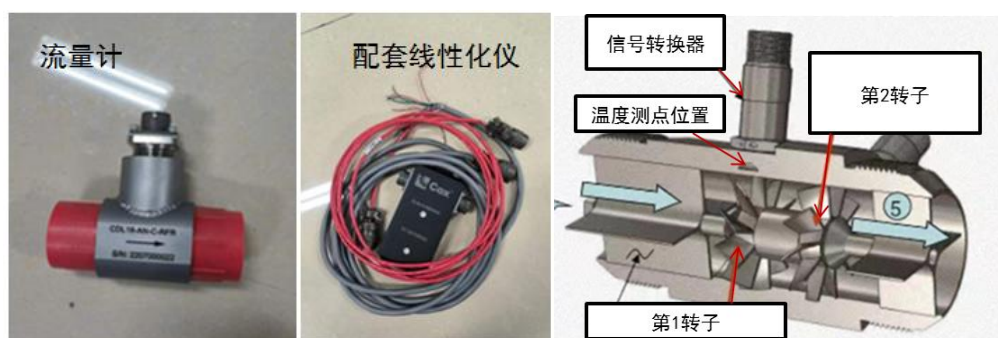


图 8 流量计、配套线性化仪实物图及内部结构图

涡轮流量计流量信号采集设备选用频率采集设备，具体指标如下：

- a) 测量范围（0~100k）Hz；

b) 测量精度：0.0001%。

涡轮流量计温度信号采集设备选用电压/电流采集设备，具体指标如下：

a) 测量范围：（-10~10）V 或（4~20）mA；

b) 测量精度：0.05%。

2) 测量方案

考虑在实际发动机上安装空间的限制，涡轮流量计具体安装方式如图 3 所示，安装角度（流体流向与水平面方向的夹角）为 -6.54° ，前管路长径比 7.36、后管路长径比 5.11。

安装方案引入以下影响因素：

a) 流量计的前管路形状复杂，有计量活门、管路变径和弯曲，且流量计进口连接的直管段长径比为 7.36（常规要求为不小于 10），导致流量计进口截面的速度不均匀度为 9.8%；

a) 安装角度：非常规水平安装，角度为 -6.54° 。

3) 安装方案强度校核

涡轮流量计及其连接管路安装结构的有限元仿真模型及其边界条件如图 9 所示，rbe2 连接点设置固支约束。

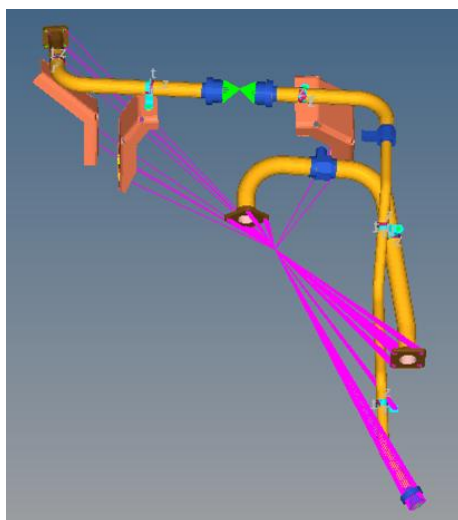


图 9 管路及其安装结构有限元模型

强度分析载荷谱如下图所示。

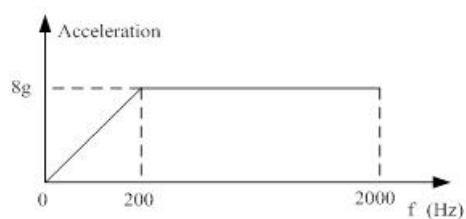


图 10 管路及其安装结构有限元分析载荷谱

强度计算结果表明涡轮流量计连接管路及其安装结构满足强度要求(管路及支架均采用 In625 材料，该材料疲劳极限 276 Mpa)，如图 11 所示。

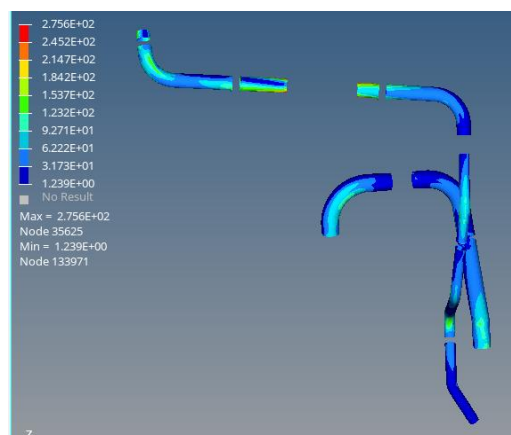


图 11 管路及其安装结构强度计算结果

4) 流量计入口流场分析

涡轮流量计前后连接管路的长径比不符合涡轮流量计实际使用的经验值要求（前管路长径比 10、后管路长径比 5），进一步对流量计进口流场状态进行数值计算分析。

流量计前段的流路选取前端阀门节流元件、管道变径及管道拐弯三处结构，建立与真实试验件相同的三维模型，对于流量计后段的流路选取管道拐弯、变径等结构，建立与真实试验件相同的三维模型，采用 SST k- ω 湍流模型，在管道壁面处设置边界层网格，经过无关性验证网格量为 60 万，壁面 y+分布在 1-10 范围内，符合工程精度要求。

CFD 对流量计入口及出口的流场条件计算结果表明，该设计方案能够使流量计出口、入口处于较为平稳的流场条件中，满足工程需求。

5) 测量不确定度计算

针对某次发动机试验燃油流量测量的不确定度评定结果如下：

取 $k=2$ ，最终计算得到被测量估计值 W 的相对扩展不确定度结果如下表所示：

表 2 不同温度下 K 系数关系

温度	常温（20~35）℃			高温（35~90）℃		
流量 (kg/h)	100~300	300~1150	1150~6000	100~300	300~1150	1150~8000
$U_{rel}(W)$	0.42%	0.26%	0.30%	0.78%	0.28%	0.32%

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，飞行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% 的概率控制在上表的数据内。

6) 测量数据验证

基于最终试验燃油质量流量测量模型和修正计算，开展了某型发动机地面试验及飞行试验验证，数据如表 3~5 所示，发动机侧高精度涡轮流量计经过温度修正的燃油质量流量与安装在燃油间处于常温常压下的同种型号的临港地面台架流量计和安装在发动机入口处的处于常温常压下的同型号的试飞院流量计测得的质量流量进行数据对比，发动机侧高精度流量计与临港台架流量计和试飞院流量计测量值一致性很好， $En < 1$ ，充分证明了基于上述研究形成的试验燃油质量流量测量模型和修正计算方法的可靠性和精确性。

表 3 某型发动机地面试验燃油流量测量数据对比

N2R25Pct%	地面台架流量计与高精度机载流量计测量值一致性 En
97.75	0.40
97.75	0.30
97.13	0.40
96.63	0.30
95.98	0.30
94.82	0.30
94.09	0.10
93.17	0.20
92.12	0.10
91.06	0.10
90.02	0.51
71.97	0.40

6 方法推广和标准形成

《涡扇发动机燃油流量测试技术规范》前期已经形成企业标准及集团标准，并在企业及集团内部进行有效验证。

四、规范制定的主要内容及说明

0、按照 JJF 1071—2010 《国家计量校准规范编写规则》要求，编写了引言部分。

1 范围

本标准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。

航空发动机燃油流量测试方法主要有质量流量传感器、涡轮流量计、燃油流量计量装置等，目前测量精度最高且广为国内外使用的燃油流量测试方法是涡轮流量计测量方法，该方法已在民用航空发动机整机地面试验、高空台试验、飞行试验得到成功应用。本标准适用于采用涡轮流量计开展的涡扇发动机试验燃油流量精确测量。

2 引用文件

列出了本规范引用的文件。

3 术语和定义

针对 K 系数、进口管路、出口管路、 K 系数、安装角度等术语进行说明和定义。

4 概述

描述了发动机燃油质量流量测量必要性及测量的与那里。

5 燃油流量测量

5.1 测量模型

给出了发动机燃油质量流量的计算模型。

5.2 测量要求

明确了测量对象、测量范围、精度和测量的环境工况，基于前期研究，限定流量测量范围不小于 100kg/h、环境工况燃油温度常温~90℃、燃油压力常压~8Mpa。

5.3 测量系统

针对燃油流量测量系统给出硬件选配建议，包括流量、温度、压力测量元件及后端配套采集设备。同时综合考虑飞行试验中低温等环境对介质的影响，对涡轮流量计在发动机上的安装位置进行说明和建议。

6 测量方法

6.1 涡轮流量计输出频率的测量

指出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并对测量精度进行建议。

6.2 燃油温度、压力及大气压力测量

针对大涵道比涡扇发动机飞行试验燃油流量测试系统中的介质温度、压力、大气压力测量方法进行介绍。

6.3 燃油密度测量和修正

6.3.1 密度测量

针对密度测量方法和基于实验工况影响的注意事项进行介绍。

6.3.2 密度的温度修正

详细介绍了密度的温度修正方法和计算公式。

6.3.3 密度的压力修正

详细介绍了密度的压力修正方法和最终的密度修正公式。

6.4 涡轮流量计测量性能校准和修正

6.4.1 涡轮流量计测量性能校准

明确了涡轮流量计校准建议选用的标准装置类型、介质、校准工况（包括飞行试验全包线范围的温度、压力和流量）等，并对涡轮流量计校准配套前后连接管路进行等注意事项进行介绍。

6.4.2 K 系数的修正

明确了涡轮流量计 K 系数进行基于油介质温度 T 、压力 P 的修正计算方法和计算公式。

6.5 燃油流量的修正计算

明确大涵道比涡扇发动机飞行试验中燃油流量测量的修正计算方法。

7 燃油流量测试

指出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。明确给出试验前准备、测试步骤及试验后检查、测试数据的记录等内容。

8 燃油流量测量精度评定方法

指出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。

附录 A 涡扇发动机燃油流量测量原始记录内页格式。

给出了通用的涡扇发动机燃油流量测量原始记录内页格式。

附录 B 涡扇发动机燃油流量测量精度评定示例。

给出了针对某型号试验燃油流量测量精度开展的评定示例。

五、其他需说明的事项

1、验证试验的情况和结果

本标准方法已通过商发企业标准在某型涡扇发动机多次地面试验及飞行试验中应用，应用效果良好。

2、与现行相关法律、法规、规章及标准的协调性

本标准提出的校准方法、合格判据与国外同类标准水平相当。是国内相关

标准的补充和完善。

国内与涡扇发动机燃油流量测量相关的法律、法规、标准主要有 CCAR-33R2《航空发动机适航规定》、JJG1037《涡轮流量计检定规程》、SAE ARP 4990B《Turbine Flowmeter Fuel Flow Calculations》、GB/T 1884《原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）》、ASTM D4052《Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter》、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》。本标准与现有文件无相互冲突的内容。

JJG 1037-2008《涡轮流量计检定规程》指导开展理想实验室环境下的涡轮流量计校准，美国航空航天学会发布了通用标准 SAE-ARP 4990《TURBINE FLOWMETER FUEL FLOW CALCULATIONS》，该标准指出了涡轮流量计用于燃油流量测量时，需开展符合实际工况的介质温度、压力对仪表性能和介质密度影响的修正计算，但该标准中缺少了燃油流量测量的具体方法及测量精度评定方法。

拟制定的标准与 SAE ARP 4990 中关于介质密度及涡轮流量计性能修正考虑的影响因素一致，但 SAE ARP 4990 将温度、压力对介质粘度和流量计内部关键尺寸的影响分开修正，通过配比标准粘度物质校准拟合建立基线。但基于国内目前配比标准粘度物质的技术水平和设备能力现状，在实验室环境下配比不同粘度的标准介质进而开展仪表校准建立修正基线的方法，其精度不满足发动机性能模型修正需求。故本标准将温度、压力作为变量，统一考虑了其对介质粘度和仪表几何尺寸的影响，将流量计置于实际使用工况下开展校准，并进一步给出了飞行试验燃油流量测量方法及测量精度评估方法，可有效指导大涵道比涡扇发动机飞行试验燃油流量精确测量。

3、本标准(编制说明)编制过程中参考资料如下：

- JJG 1001 通用计量术语及定义
- JJG 1059 测量不确定度评定与表示
- JJF 1004 流量计名词术语及定义
- JJG 1037 涡轮流量计检定规程
- GJB 150.1A 军用装备试验室环境试验办法：通用要求
- GB 6537 3 号喷气燃料
- GJB 420B 航空工作液固体污染度分级
- SAE ARP 4990B Turbine Flowmeter Fuel Flow Calculations
- GB/T 1884 原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）
- ASTM D4052 Standard Test Method for Density, Relative Density, and

API Gravity of Liquids by Digital Density Meter

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

六、总结

在校准规范的修订过程中，标准编制团队以国内外技术资料及相关标准、大量试验数据为技术依据，本着科学合理、易于操作和普遍适用的原则进行了起草。希望经过审核，规范将更科学、更全面、更合理。
