



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114046862 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 20

(21) 申请号 202111397364.4

(22) 申请日 2021.11.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114046862 A

(43) 申请公布日 2022.02.15

(73) 专利权人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72) 发明人 符江锋 李童 蒋瑶 赵志杰

王凯 张晓博

(74) 专利代理机构 西安维赛恩专利代理事务所

(普通合伙) 61257

专利代理师 张瑾

(51) Int. Cl.

G01F 25/10 (2022.01)

(56) 对比文件

CN 110793599 A, 2020.02.14

EP 1975576 A1, 2008.10.01

US 2003145662 A1, 2003.08.07

EP 0468793 A2, 1992.01.29

GB 201301342 D0, 2013.03.13

王朝蓬; 苗禾状; 左泽敏; 高扬. 双转子燃油流量计校准试验及结果. 工程与试验. 2014, (第04期), 全文.

赵涌; 侯敏杰; 陈冕; 郭杰. 航空发动机高空模拟试验燃油流量原位校准系统设计与检验. 燃气涡轮试验与研究. 2013, (第01期), 全文.

审查员 陈雨露

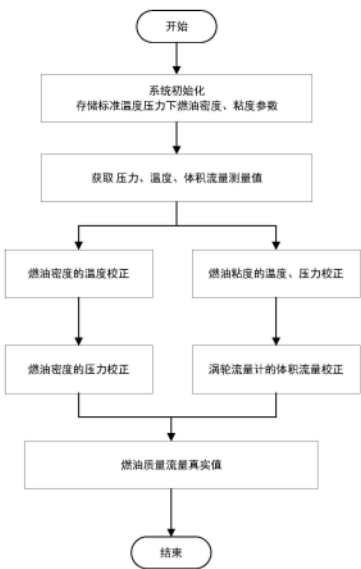
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

航空发动机燃油质量流量计量校正方法及
计量校正系统

(57) 摘要

本发明属于航空发动机燃油调节领域, 具体涉及一种高精度燃油质量流量计量校正方法。本发明利用温度、压力对燃油的密度的影响, 进行燃油密度的温度、压力校正补偿, 得到校正后的密度; 再利用温度、压力对燃油粘度的影响, 对涡轮流量计的体积流量进行温度、压力校正补偿, 得到校正后的体积流量值; 最终根据校正后的密度和校正后的体积流量值得到真实的燃油质量流量, 作为航空发动机燃油流量的控制指标, 能够提高燃油质量流量的计量精度。



1. 一种高精度燃油质量流量计量校正方法,其特征在于,所述方法包括:获取燃油工作状态下的温度 T_{op} 、压力 P_{op} ;利用获取的温度、压力分别对燃油参考密度 ρ_{ref} 进行校正,得到温度对密度的校正因子 VCF 、压力对密度的校正因子 C_{pfd} ;根据校正因子 VCF 、 C_{pfd} 和密度 ρ_{ref} 的乘积得到校正后的密度;

利用燃油粘度随温度的变化关系,得到温度校正后的燃油粘度 ν_{Top} ;利用动态粘度系数 μ_s 和 C_{pfd} ,确定粘度的压力校正因子 C_{pfv} ;利用燃油粘度 ν_{Top} 、压力校正因子 C_{pfv} 的乘积得到温度、压力校正后的粘度 ν_{op} ;利用 ν_{op} 确定燃油粘度对应的Roshko数 Ro_{op} ;

根据检定装置得到涡轮流量计特性的Strouhal-Roshko校准曲线,利用校准曲线和Roshko数 Ro_{op} 确定Strouhal数 St_{op} ;利用确定的Strouhal数 St_{op} 确定燃油工作状态下真实的k因子值 Kop ;根据涡轮流量计的频率 f 、k因子值 Kop 得到温度压力校正后的体积流量;

根据温度压力校正后的体积流量与校正后的密度得到真实的质量流量;

所述温度对密度的校正因子 VCF 的计算公式为,

$$VCF = \exp\left(-\alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T * \{1 + 0.8 * \alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T\}\right)$$

其中, $\alpha_{F,T_{ref}}$ 为燃油参考温度下的燃油热膨胀系数, $\Delta T = T_{op} - T_{ref}$, T_{ref} 为燃油参考温度;

所述压力对密度的校正因子 C_{pfd} 的计算公式为,

$$C_{pfd} = (1 - F * (p_{atm} - p_{eq})) / (1 - F * (p_{op} - p_{eq}))$$

其中, F 为燃油可压缩性校正因子, P_{atm} 为标准大气压力, P_{eq} 为平衡压力;

所述粘度的压力校正因子 C_{pfv} 的计算公式为,

$$C_{pfv} = \left[10^{\left\{ P_{gage} * \left(-0.1479 + 0.58624 * \left\{ \mu_s^{0.1811} \right\} / 1000 \right\} \right) \right] / C_{pfd}$$

其中, P_{gage} 表示表压力、 μ_s 表示动态粘度系数;

所述利用 ν_{op} 确定燃油粘度对应的Roshko数 Ro_{op} ,具体包括:

根据燃油工作温度和涡轮膨胀系数确定工作温度下涡轮流量计的温度校正因子 C_{tr} 和 C_{tk} ;再根据指定涡轮流量计的口径 D 、材料的弹性系数 E 和流量计的壁厚 t 分别确定压力校正因子 C_{pr} 和 C_{pk} ;

根据校正后粘度 ν_{op} 、涡轮流量计的频率 f 、温度校正因子 C_{tr} 、压力校正因子 C_{pr} 计算得到Roshko数 Ro_{op} ;

$$Ro_{op} = (f / \nu_{op}) * C_{tr} * C_{pr}$$

2. 根据权利要求1所述的燃油质量流量计量校正方法,其特征在于,燃油工作状态下真实的k因子值 Kop 的计算公式为,

$$K_{op} = St_{op} / (C_{tk} * C_{pk})$$

3. 根据权利要求1所述的燃油质量流量计量校正方法,其特征在于,真实的质量流量 $W_{f,t}$ 的计算公式为:

$$W_{f,t} = 3600 * (f / K_{op}) * 1.0E-3 * (\rho_{ref} * VCF * C_{pfd}); \text{质量流量 } W_{f,t} \text{ 的单位为Kg/h.}$$

4. 一种高精度燃油质量流量计量校正系统,利用权利要求1至3任一所述的计量及校正方法,其特征在于,所述系统包括:密度校正模块和体积流量校正模块;

密度校正模块,根据获取的燃油工作状态下的温度 T_{op} 、压力 P_{op} 确定温度对密度的校正

因子VCF、压力对密度的校正因子 C_{pfd} ,以对燃油参考密度进行校正补偿;

体积流量校正模块,首先根据温度、压力校正后的粘度 v_{op} 确定燃油工作状态下真实的k因子值 Kop ,然后根据涡轮的频率 f 、k因子值 Kop 对燃油的体积流量进行校正补偿;

质量流量的计算模块,根据校正补偿后的体积流量与校正补偿后的密度的乘积得到真实的质量流量 $W_{f,t}$ 。

航空发动机燃油质量流量计量校正方法及计量校正系统

技术领域

[0001] 本发明属于航空发动机燃油调节领域,具体涉及一种高精度燃油质量流量计量校正方法。

背景技术

[0002] 燃油是飞机发动机主要能源,发动机在各个飞行状态下都需要可靠、连续、精确的燃油流量供往燃烧室燃烧产生推力。而实际工作状态中,不同飞行条件、飞行状态下所需的燃油流量是不同的,需要对发动机的燃油流量进行精确的调节和计量。涡轮流量计是一种体积流量计,由于燃油的密度、粘度等属性受发动机外界环境温度、压力的影响会发生显著的变化,这给燃油质量流量的计量带来了困难。为此,本发明提出一种基于体积流量、介质温度、工作压力的燃油质量流量计量及校正方法,以实现燃油质量流量的精确计量。

发明内容

[0003] 本发明的目的:提出一种基于温度、压力校正的燃油质量流量计量校正方法,利用温度、压力对燃油的密度的影响,进行燃油密度的温度、压力校正补偿,得到校正后的密度;再利用温度、压力对燃油粘度的影响,对涡轮流量计的体积流量进行温度、压力校正补偿,得到校正后的体积流量值;最终根据校正后的密度和校正后的体积流量值得到真实的燃油质量流量,作为航空发动机燃油流量的控制指标。

[0004] 本发明的技术方案:一方面,提供一种高精度燃油质量流量计量校正方法,所述方法包括:获取燃油工作状态下的温度 T_{op} 、压力 P_{op} ;利用获取的温度、压力分别对燃油参考密度 ρ_{ref} 进行校正,得到温度对密度的校正因子VCF、压力对密度的校正因子 C_{pfd} ;根据校正因子VCF、 C_{pfd} 和密度 ρ_{ref} 的乘积得到校正后的密度;

[0005] 利用燃油粘度随温度的变化关系,得到温度校正后的燃油粘度 ν_{Top} ;利用动态粘度系数 μ_s 和 C_{pfd} ,确定粘度的压力校正因子 C_{pfv} ;利用燃油粘度 ν_{Top} 、压力校正因子 C_{pfv} 的乘积得到温度、压力校正后的粘度 ν_{op} ;利用 ν_{op} 确定燃油粘度对应的Roshko数 Ro_{op} ;

[0006] 根据检定装置得到涡轮流量计特性的Strouhal-Roshko校准曲线,利用校准曲线和Roshko数 Ro_{op} 确定Strouhal数 St_{op} ;利用确定的Strouhal数 St_{op} 确定燃油工作状态下真实的k因子值 Kop ;根据涡轮流量计的频率 f 、k因子值 Kop 得到温度压力校正后的体积流量;

[0007] 根据温度压力校正后的体积流量与校正后的密度得到真实的质量流量。

[0008] 可选地,温度对密度的校正因子VCF的计算公式为,

$$[0009] \quad VCF = \exp(-\alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T * \{1 + 0.8 * \alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T\})$$

[0010] 其中, $\alpha_{F,T_{ref}}$ 为燃油参考温度下的燃油热膨胀系数, $\Delta T = T_{op} - T_{ref}$, T_{ref} 为燃油参考温度。

[0011] 可选地,压力对密度的校正因子 C_{pfd} 的计算公式为,

$$[0012] \quad C_{pfd} = (1 - F * (p_{atm} - p_{eq})) / (1 - F * (p_{op} - p_{eq}))$$

[0013] 其中,F为燃油可压缩性校正因子, P_{atm} 为标准大气压力, P_{eq} 为平衡压力。

[0014] 可选地,粘度的压力校正因子 C_{pfv} 的计算公式为,

$$[0015] \quad C_{pfv} = \left[10^{\left\{ P_{gage} * \left(-0.1479 + 0.58624 * \left\{ \mu_s^{0.181} \right\} \right) / 1000 \right\}} \right] / C_{pfd}$$

[0016] 其中, P_{gage} 表示表压力、 μ_s 表示动态粘度系数。

[0017] 可选地,利用 v_{op} 确定燃油粘度对应的Roshko数 Ro_{op} ,具体包括:

[0018] 根据燃油工作温度和涡轮膨胀系数确定工作温度下涡轮流量计的温度校正因子 C_{tr} 和 C_{tk} ;再根据指定涡轮流量计的口径D、材料的弹性系数E和流量计的壁厚t分别确定压力校正因子 C_{pr} 和 C_{pk} ;

[0019] 根据校正后粘度 v_{op} 、涡轮流量计的频率f、温度校正因子 C_{tr} 、压力校正因子 C_{pr} 计算得到Roshko数 Ro_{op} ;

$$[0020] \quad Ro_{op} = \left(\frac{f}{v_{op}} \right) * C_{tr} * C_{pr}。$$

[0021] 可选地,燃油工作状态下真实的k因子值Kop的计算公式为,

$$[0022] \quad K_{op} = St_{op} / (C_{tk} * C_{pk})。$$

[0023] 可选地,真实的质量流量 $W_{f,t}$ 的计算公式为:

$$[0024] \quad W_{f,t} = 3600 * (f / K_{op}) * 1.0E-3 * (\rho_{ref} * VCF * C_{pfd}); \text{质量流量 } W_{f,t} \text{ 的单位为Kg/h。}$$

[0025] 另一方面,提供一种高精度燃油质量流量计量校正系统,利用如上所述的计量及校正方法,所述系统包括:密度校正模块和体积流量校正模块;

[0026] 密度校正模块,根据获取的燃油工作状态下的温度 T_{op} 、压力 P_{op} 确定温度对密度的校正因子VCF、压力对密度的校正因子 C_{pfd} ,以对燃油参考密度进行校正补偿;

[0027] 体积流量校正模块,首先根据温度、压力校正后的粘度 v_{op} 确定燃油工作状态下真实的k因子值Kop,然后根据涡轮的频率f、k因子值Kop对燃油的体积流量进行校正补偿;

[0028] 质量流量的计算模块,根据校正补偿后的体积流量与校正补偿后的密度的乘积得到真实的质量流量 $W_{f,t}$ 。

[0029] 本发明的技术效果:通过利用温度、压力对燃油的密度的影响,进行燃油密度的温度、压力校正补偿,得到校正后的密度;再利用温度、压力对燃油粘度的影响,对涡轮流量计的体积流量进行温度、压力校正补偿,得到校正后的体积流量值;最终根据校正后的密度和校正后的体积流量值得到真实的燃油质量流量,提高燃油质量流量的精度;

[0030] 相比于传统的直接采用质量流量计,本发明可以燃油工作状态的温度、压力和燃油的参考密度,可以直接得到燃油的质量流量,可以取代质量流量计的使用,在提高测量精度的同时、降低成本。

附图说明

[0031] 图1是传统涡轮流量特性曲线(因子曲线);

[0032] 图2是涡轮流量计Roshko/Strouhal曲线;

[0033] 图3是校正逻辑示意图。

具体实施方式

[0034] 发动机燃油与控制系统在装机前应进行燃油高低温条件下的模拟飞行试验,发动机控制系统以质量流量作为燃油流量的控制指标,而控制系统计量流量通常采用在等压差状态下调节计量活门通流面积的方法实现体积流量控制。涡轮流量计作为试验中的优选传感器,易受介质的温度、压力、黏度等因素的影响。由于试验的测量环境与涡轮流量计检定条件要求的环境存在较大差异,燃油粘度等因素对流量测量过程中会产生偏差。

[0035] 涡轮流量计采用涡轮进行测量,当被测流体流过传感器时,在流体作用下,液体流向与涡轮的叶片存在一定的偏角,涡轮受力旋转,其转速正比于管道液体的平均流速,传感器将液体流速转换成与瞬时流量成正比的频率 f 信号;本实施例,频率 f 表示涡轮流量计的脉冲频率。在一定的范围内,涡轮流量计所测量的体积流量 Q 与 f 成正比; $Q=f/K$ 。传统的涡轮流量计是通过 K 因子曲线,如图1所示,即 K 与 f/v 的函数关系来确定体积流量;其中, v 表示燃油粘度。

[0036] 本发明提出一种基于温度、压力校正的燃油质量流量计量校正方法。通过使用Strouhal (斯特劳哈尔数、 St_{op}) 与Roshko (罗什科数、 Ro_{op}) 来量化涡轮流量计的流量特性,进行涡轮流量计所测体积流量的压力、温度校正;再与校正后的燃油密度相乘,即可求得真实燃油质量流量。以下为本发明的具体实施方式:

[0037] 实施例1

[0038] 本实施例,结合图3所示,提供一种高精度燃油质量流量计量校正方法,所述方法包括以下步骤:

[0039] 步骤1:通过航空发动机试验器的传感器获取燃油工作状态下的温度 T_{op} 、压力 P_{op} 。设定燃油的参考密度值、参考粘度值在常温状态下是已知的;涡轮流量计的口径 D 、材料的弹性系数 E 和流量计的壁厚 t 是已知的。

[0040] 步骤2:考虑燃油实际工作温度对密度的影响,对样本密度测量值进行校正。实际上,燃油的密度不仅与燃油温度相关,而且还与燃油热膨胀系数相关。燃油热膨胀系数 $\alpha_{F,T_{ref}}$ 是参考温度下的燃油参考密度 ρ_{ref} 的函数,其中 K_0 、 K_1 是燃油常数;函数关系式为

$$\alpha_{F,T_{ref}} = \frac{K_0}{(\rho_{ref}^2)} + \frac{K_1}{\rho_{ref}}。$$

[0041] 温度对密度的校正因子VCF,用于燃油密度的温度修正,得到温度校正后的密度 $\rho_{Top} = \rho_{ref} * VCF$ 。具体计算过程如下:

$$[0042] \quad \Delta T = T_{op} - T_{ref}$$

$$[0043] \quad \alpha_{F,T_{ref}} = \frac{K_0}{(\rho_{ref}^2)} + \frac{K_1}{\rho_{ref}}$$

$$[0044] \quad VCF = \exp\left(-\alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T * \{1 + 0.8 * \alpha_{F,T_{ref}} * \Delta T\}\right)$$

[0045] 其中, T_{op} 表示燃油工作状态下的温度; T_{ref} 为燃油参考温度。

[0046] 步骤3:考虑到在发动机工作过程中,需要建立起一定压力的燃油并通过燃油喷嘴输送到燃烧室点火燃烧,燃油受到可压缩性的影响,因此应对密度项进行压力校正。校正过程是根据计算得到的参考温度下的燃油参考密度,平衡压力以及测量得到的燃油工作温

度,计算出燃油可压缩性校正因子。通过可压缩性校正因子将燃油压力校正到环境标准大气压,然后再校正到实际工作压力下,从而获得实际燃油压力对密度的校正因子 C_{pfd} ,具体计算公式为:

$$[0047] \quad C_{pfd} = (1 - F * (p_{atm} - p_{eq})) / (1 - F * (p_{op} - p_{eq}));$$

$$[0048] \quad \text{其中,平衡压力 } p_{eq} = 0.010 * \left(10^{6.284 - 1991.3 / (T_{op} + 273.15)} \right); p_{atm} \text{ 表示标准大气压;}$$

[0049] p_{op} 表示燃油工作状态下的压力。

[0050] 燃油可压缩性校正因子 F ,

$$[0051] \quad F = \left(\exp \left(-1.62080 + 0.00021592 * T_{op} + 0.87096 / \left\{ \rho_{ref,gc}^2 \right\} + 0.0042092 * T_{op} / \left\{ \rho_{ref,gc}^2 \right\} \right) \right) / 100000$$

[0052] 其中,比例缩小后的参考密度 $\rho_{ref,gc} = \rho_{ref} / 1000$ 。

[0053] 步骤4:根据校正因子 VCF 、 C_{pfd} 和密度 ρ_{ref} 的乘积得到校正后的密度 ρ_{op} ,计算公式为: $\rho_{op} = \rho_{ref} * VCF * C_{pfd}$ 。

[0054] 步骤5:考虑到温度、压力的变化可能对粘度带来的影响,因此对燃油的粘度进行校正。燃料粘度对涡轮流量计的流量特性有重大影响;而运动粘度也会随温度和压力而变化,因此在流量计校准过程中以及针对实际发动机工况必须进行适当的校正。

[0055] (1)温度校正后的燃油粘度 ν_{Top}

[0056] 粘度和温度之间符合如下对数关系: $\log \log Z_s = A - B \log T_{s,abs}$; Z_s 表示在 $\log - \log$ 的粘度值, $T_{s,abs}$ 表示热力学温度值。故要确定斜率 B 和截距 A 至少需要测量两个不同温度下的粘度。其中, A 、 B 可有如下公式计算得到,其中 $T_{s1,abs}$ 、 $T_{s2,abs}$ 表示选取的两组任意的热力学温度值;

$$[0057] \quad B = \{ \log(\log Z_{s1} / \log Z_{s2}) / \log(T_{s2,abs} / T_{s1,abs}) \}$$

$$[0058] \quad A = \log \log Z_{s1} + B \log T_{s1,abs};$$

[0059] 本实施例,介质为航空三号燃料,故 A 、 B 为已知参数。因此,在 A 、 B 恒定的情况下,仅需使用燃料工作状态温度即可确定实际工作温度下的粘度。

[0060] 燃油粘度关于温度校正的具体计算过程如下:

$$[0061] \quad \nu_{Top} = AZ_{Top} - \exp(-0.7487 - 3.295 * AZ_{Top} + 0.6119 * AZ_{Top}^2 - 0.3193 * AZ_{Top}^3)$$

[0062] 其中,中间变量 $AZ_{Top} = Z_{Top} - 0.7$; $Z_{Top} = (10)^{(10)^{(A - B \log T_{op,abs})}}$, Z_{Top} 表示 $\log - \log$ 域下温度校正下的粘度;燃油工作状态的热力学温度 $T_{op,abs} = T_{op} + 273.15$ 。

[0063] (2)粘度的压力校正因子 C_{pfv}

[0064] 对于燃油粘度的压力修正,根据上述计算得到的温度校正后的燃油粘度 ν_{Top} 、以及表压力、动态粘度系数和计算出密度的压力校正因子 C_{pfd} 来计算出燃油粘度的压力校正因子 C_{pfv} ,具体计算过程如下所示:

$$[0065] \quad C_{pfv} = \left[10^{\left\{ P_{gage} * \left(-0.1479 + 0.58624 * \left\{ \mu_s^{0.181} \right\} \right) / 1000 \right\}} \right] / C_{pfd}$$

[0066] 其中, P_{gage} 表示表压力,表压力又称相对压力,是相对标准大气压的相对压力值; μ_s 表示动态粘度系数。

[0067] 本实施例, $\mu_s = \rho_{Top, gcc} * v_{Top}$, 其中比例缩小后的燃油工作状态密度 $\rho_{Top, gcc} = \rho_{Top} / 1000$; $P_{gage} = P_{op} - P_{atm}$ 。

[0068] (3) 温度、压力校正下的燃油粘度 v_{op} , 计算公式为,

$$[0069] \quad v_{op} = v_{Top} * C_{pfv}。$$

[0070] 步骤6: 燃油工作状态下真实的k因子值 K_{op} 的估计

[0071] (1) 涡轮流量计校正因子的估计

[0072] 根据燃油工作温度和涡轮膨胀系数确定工作温度下涡轮流量计的温度校正因子 C_{tr} 和 C_{tk} ; 再根据指定涡轮流量计的口径 D 、材料的弹性系数 E 和流量计的壁厚 t 分别确定压力校正因子 C_{pr} 和 C_{pk} ; 具体计算过程如下,

[0073] 根据工作温度和涡轮膨胀系数确定工作温度下涡轮流量计的温度校正因子 C_{tr} 、 C_{tk} ; 其中, α_1 表示涡轮流量计的热膨胀系数, 为已知常数。

$$[0074] \quad C_{tr} = (1 + \alpha_1 * \Delta T)^2 \approx 1 + 2 * \alpha_1 * \Delta T$$

$$[0075] \quad C_{tk} = (1 + \alpha_1 * \Delta T)^3 \approx 1 + 3 * \alpha_1 * \Delta T$$

[0076] 再根据指定涡轮流量计的口径 D 、材料的弹性系数 E 、流量计的壁厚 t 确定压力校正因子。其中, 压力变化 $\Delta p = p_{op} - p_{cal}$; p_{cal} 表示标准过程中流量计中燃油的绝对压力值;

$$[0077] \quad C_{pr} = [1 + (\Delta p * D) / (E * t)]^2$$

$$[0078] \quad C_{pk} = [1 + (\Delta p * D) / (E * t)]^3$$

[0079] (2) 利用 v_{op} 确定燃油粘度对应的Roshko数 Ro_{op}

[0080] 根据校正后粘度 v_{op} 、涡轮流量计的频率 f 、温度校正因子 C_{tr} 、压力校正因子 C_{pr} 计算得到Roshko数 Ro_{op} ;

$$[0081] \quad Ro_{op} = (f / v_{op}) * C_{tr} * C_{pr}。$$

[0082] (3) 确定燃油工作状态下真实的k因子值

[0083] 根据检定装置得到涡轮流量计特性的Strouhal-Roshko校准曲线, 如图2所示, 利用校准曲线和Roshko数 Ro_{op} 确定Strouhal数 St_{op} , 求取实际工作状态下的k因子值 K_{op} ,

$$[0084] \quad K_{op} = St_{op} / (C_{tk} * C_{pk})$$

[0085] 步骤7: 根据温度压力校正后的体积流量与校正后的密度得到真实的质量流量, 计算公式为

$$[0086] \quad W_{f, t} = 3600 * (f / K_{op}) * 1.0E-3 * (\rho_{ref} * VCF * C_{pfd});$$

[0087] 其中, 温度压力校正后的体积流量为 f / K_{op} ; 温度、压力校正下的密度值为 $\rho_{op} = \rho_{ref} * VCF * C_{pfd}$ 。

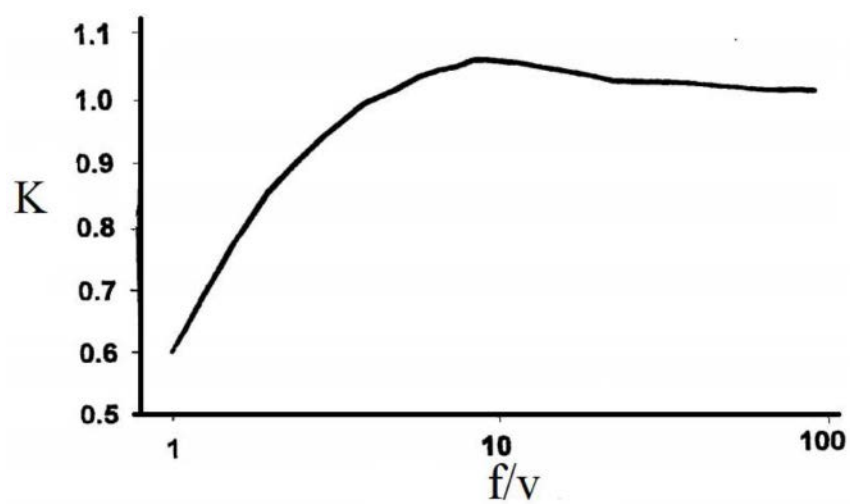


图1

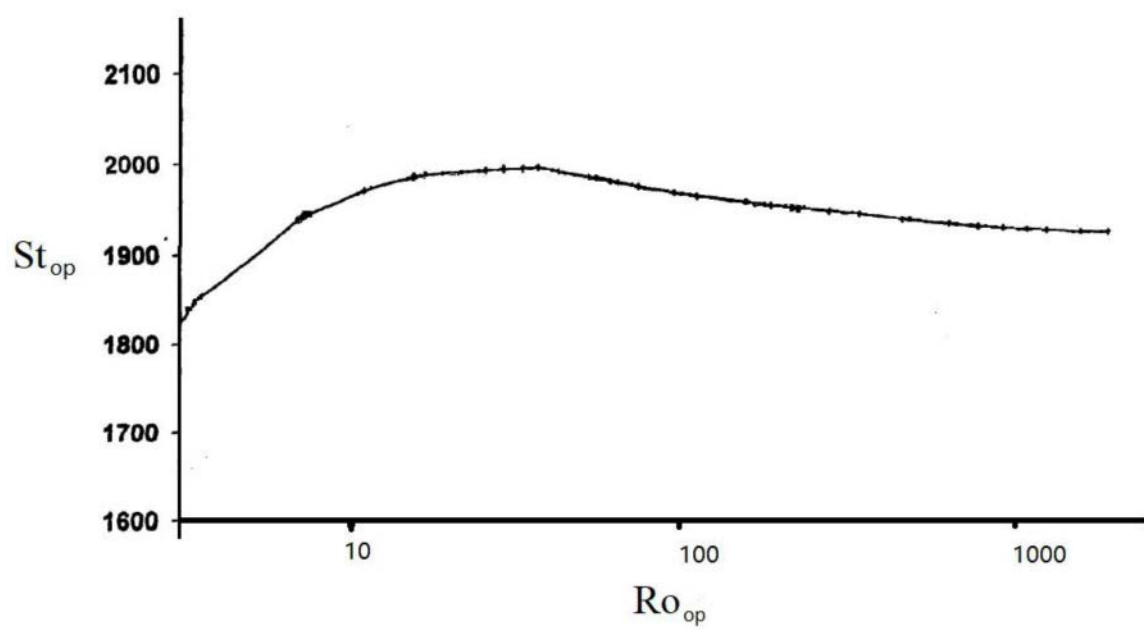


图2

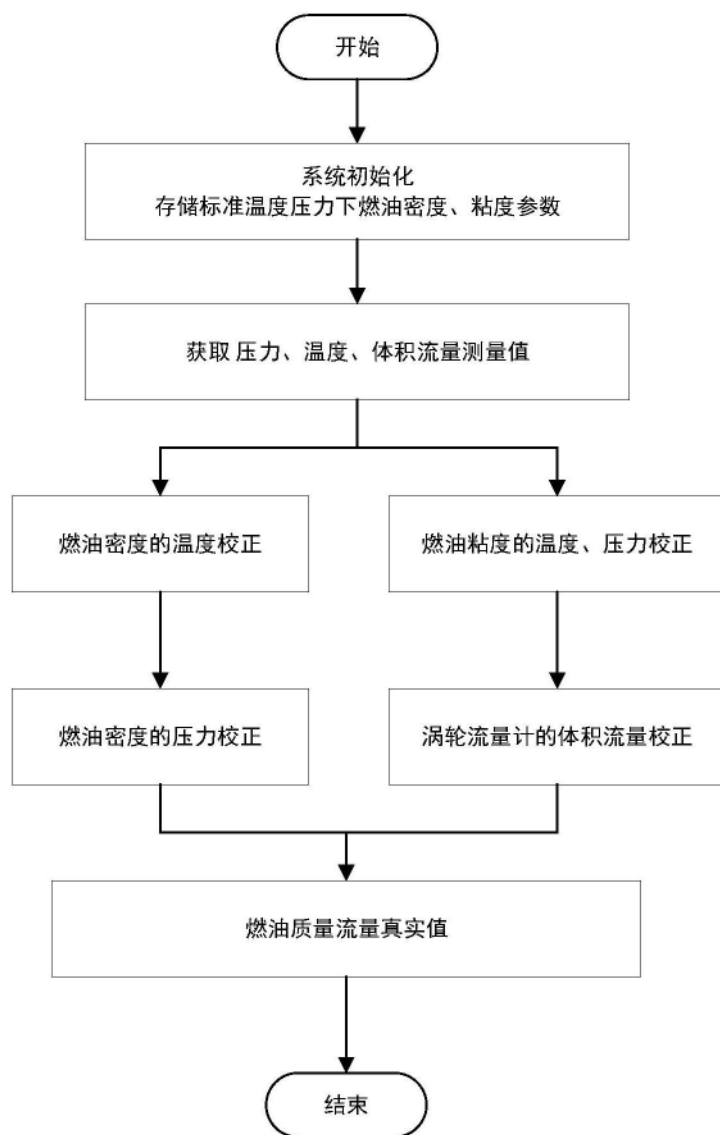


图3