

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107318

基于层流流量计的航发燃油流量动态测量技术研究

王筱庐¹, 陈玉春¹, 蒋宇翔¹

(西北工业大学动力与能源学院 西安 710072)

摘要:为解决航空发动机过渡态燃油测量问题,研究了基于层流流量计(LFM)的航空燃油流量动态测量技术。设计了一款量程为0~3 000 mL/min的液体LFM,在小型涡轮喷气式发动机试车台上对其进行了试验,并与科里奥利流量计(CMF)进行了对比,试验结果显示LFM具有优秀的动态特性。当发动机处于稳态时,LFM测量结果与CMF吻合较好,相对误差为-1.25%~1.16%,与LFM校准时-1.24%~1.26%的相对误差相吻合。当发动机处于过渡态时,LFM能很好地跟随泵后油压,而CMF则无法跟随泵后油压,存在大约2 s的滞后。LFM的测量结果能与发动机起动、加/减速时的控制逻辑保持一致。本文研究可为航空发动机试车技术的研究和LFM应用的拓展提供有价值的参考。

关键词:层流流量计;航空发动机;燃油;过渡态;动态测量

中图分类号: TH814 V241 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on fuel dynamic flow measurement technology for aero-engine based on laminar flow meter

Wang Xiaolu¹, Chen Yuchun¹, Jiang Yuxiang¹

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem of aero-engine fuel measurement in transient state, the dynamic flow measurement technology of aero-fuel flow based on laminar flow meter (LFM) was studied. A liquid LFM with a range of 0~3 000 mL/min was designed. The LFM was tested on a small turbojet-engine test bench and compared with a coriolis mass flowmeter (CMF). The test results show that the LFM has excellent dynamic characteristics. When the engine is in a steady state, the LFM measurement results are in good agreement with those of the CMF, and the relative error is -1.25%~1.16%, which is consistent with the relative error of -1.24%~1.26% when the LFM is calibrated. When the engine is in a transition state, the liquid LFM can follow the oil pressure after pump well, while the CMF cannot follow the oil pressure after the pump and there is a lag of about 2 s. The measurement result of the LFM can be consistent with the control logic during starting and acceleration/deceleration. The study in this paper provides valuable references for the research of aero-engine test technology and the expansion of LFM applications.

Keywords: laminar flow element; aero-engine; fuel; transient state; dynamic measurement

0 引言

在航空发动机试车试验中,燃油流量一直是一个非常重要的参数,与航空发动机的性能密切相关,科研人员对燃油流量测量技术的研究也从未停止^[1-2]。目前用于航空发动机燃油流量测量的一般是涡轮流量计^[3]。由于涡轮流量计通常使用水作为校准介质,而试车介质为航

空煤油,容易引入系统误差。因此航空发动机试车台开始选用近年来发展较为迅速的科里奥利流量计(coriolis mass flowmeter, CMF),其可以直接对燃油的质量流量和燃油密度进行测量^[4]。这两种流量计各有优缺点:涡轮流量计性价比较高,对燃油流量的测量精度在1.0%以内;科里奥利流量计对燃油流量的测量精度在0.2%以内,但是价格昂贵,且压损可达几十上百 kPa,很多试车台无法接受这样巨大的压损。

涡轮流量计和科里奥利流量计的结合,基本上可满足航空发动机试车时稳态的燃油流量测量需求。但在面对起动和加减速(慢/快车切换时油门杆移动时间不大于1 s)等过渡态时,涡轮流量计和科里奥利流量计的动态特性并不理想,存在较为严重的滞后。为了解决涡轮流量计和科里奥利流量计动态性能差的问题,诸多研究人员采用了模型预测、信号处理等方法,但这些都属于软测量的范畴^[5]。此外,南京航空航天大学^[6]和中航北京长城计量测试技术研究所的科研人员^[7-8]为了研究涡轮等流量计的动态特性研究建立了燃油动态流量标准装置。

流量计动态性能不佳给航空发动机的研究带来很大不便,本文将尝试使用层流流量计(laminar flow meter, LFM)来解决这一问题。目前关于 LFM 研究的文献较少,主要集中于内燃机进气测量。王伯年等^[9]认为 LFM 可以测量内燃机脉动进气的平均流量。王荣杰等^[10-11]在王伯年的基础上,对脉动进气的瞬时流量测量开展了研究。日本 Kanoto 等^[12]同样在往复式内燃机上对 LFM 进行了研究。根据公开文献,LFM 在测量气体时表现出较好的动态特性。因非线性因素等内在缺陷,整体而言 LFM 的应用领域较为狭窄。王剪等^[13]和黄浩钦等^[14]为削弱非线性因素,各自提出了一种新的几何结构并进行了研究,但距离实用仍有一定的距离。

为了解决航发过渡态燃油流量的测量问题,本文对基于 LFM 的航发燃油流量动态测量技术进行了研究,并在小型涡轮喷气式发动机(以下简称小涡喷)上进行了试验,采用 LFM 直接对燃油流量进行动态测量。本文研究内容对航空发动机的研究,以及对 LFM 的应用推广,均具有积极的意义和参考价值。

文中,第1节将介绍 LFM 的测量原理,包括几何结构和计算模型。第2节将介绍所使用 LFM 的设计,包括各项参数设计和校准。本文将设计好的 LFM 安装到小涡喷试车台上进行了试验,并同 CMF 进行了比对,第3节将详细介绍所使用的试验装置。第4节将对试验结果进行分析,包括小涡喷起动阶段和加/减速过程的测量结果。最后,第5节将对全文进行总结。

1 测量原理

LFM 的一般结构如图1所示,其一次仪表主要为层流元件,二次仪表主要包括差压传感器、温度传感器、压力传感器和测量电路。层流元件通常由若干个尺寸细小的流道组成。根据哈根泊肃叶定律,流体若处于层流状态,则流过层流元件形成的差压和流量成正比。

常见的层流元件有毛细管式和波纹板式的,但此类层流元件的线性度容易受进/出口效应的干扰。为了削弱进/出口效应,改善层流元件的线性度,本文采用了使

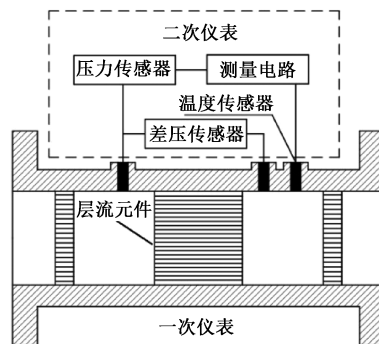


图1 LFM 结构

Fig. 1 LFM structure

用内置引压孔的片式层流元件,两引压孔之间的距离为 l ,引压孔和流道进出口之间的距离分别为 l_i 和 l_o ,如图2所示。该层流元件由交替堆叠的平行薄板和间隔组成,平行薄板之间的空间即为流道,具体可参考作者前期发表的学术成果^[15-16]。

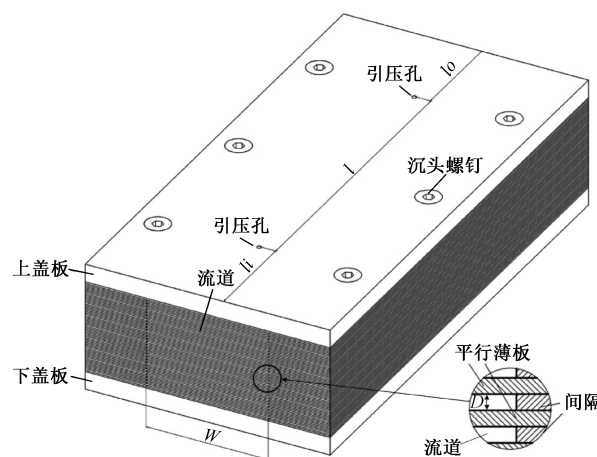


图2 片式层流元件

Fig. 2 Sheet-type laminar flow element

片式层流元件的流道为矩形流道,对应的哈根泊肃叶定律如式(1)所示。一般认为无限长的矩形流道中,流体在雷诺数 $Re < 1\ 100$ 时为层流, Re 的计算式如式(2)~(4)所示:

$$q_v = N \frac{WD^3}{12\mu L} \Delta p \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho d_h u}{\mu} \quad (2)$$

$$u = \frac{q_v}{nWD} \quad (3)$$

$$d_h = 2D \quad (4)$$

式中: q_v 为体积流量, m^3/s ; Δp 为两个引压孔之间的差压,Pa; N 为流道数量; W 为矩形流道的宽,m; D 为矩形

流道的深, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流体平均速度, m/s ; μ 为流体的动力黏度, $Pa \cdot s$; d_h 为水力直径, m 。

若将 LFM 用于非定常流测量,则需要引入无量纲数 Womersley 数 α 来判断流场的脉动程度,当 $\alpha \leq 1.32$ 时可以将非定常流当成准定常流处理, α 计算公式如式(5)所示:

$$\alpha = \frac{d_h}{2} \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\mu}} \quad (5)$$

式中: f 为流体脉动的频率, Hz 。

对于 LFM 而言,无论 LFM 的管道公称直径是多少,其中层流元件的 d_h 均十分微小。这意味 LFM 测量非定常流时的 α 也十分微小,均可以按准定常流处理。即尽管存在流体存在脉动,但流体依然处于层流状态,符合 LFM 测量原理的要求, q_v 和 Δp 之间依旧为线性关系。

2 层流流量计设计

根据测量原理,本文设计了一台流量为 $0 \sim 3\,000\,mL/min$ 的液体 LFM,其一次仪表的各项参数详如表 1 所示。设计时采用 $20^\circ C$ 水的物性参数,下标 max 表示设计最大值。该液体 LFM 的量程设计主要考虑到小涡喷试车时的最大燃油流量。若是需要对 LFM 的量程进行调整,可以选择增加/减少平行薄板的数量,或是改变平行薄板的几何和流动参数。液体 LFM 二次仪表采用的差压传感器频响为 $2\,000\,Hz$,设计的测量电路完成一次流量测量的时间为 $4\,ms$,并设计了一路 $4 \sim 20\,mA$ 高速模拟量输出。

表 1 一次仪表参数

Table 1 The parameters of primary instrument

序号	符号	单位	设计值
1	W	mm	16.6
2	D	mm	0.25
3	d_h	mm	0.5
4	N	—	30
5	u_{max}	m/s	0.4
6	Re_{max}	—	200
7	l	mm	50
8	l_i	mm	5.6
9	l_o	mm	5.6
10	q_{Vmax}	mL/min	3 000
11	Δp_{max}	Pa	3 859
12	f_{max}	Hz	4.5

采用以电磁流量计为标准表的水流量标准装置对所设计的液体 LFM 进行了校准,装置的扩展不确定度为

$U_r(q_{sv}) = 0.34\%$ ($k=2$),校准结果如图 3 所示。在校准的流量范围内,液体 LFM 的相对误差 E_r 为 $-1.24 \sim 1.26\%$ 。根据校准结果,液体 LFM 的仪表系数 K 为 $1.375 \times 10^{-11}\,m^3$,设计值 $K = NWD^3/12l = 1.298 \times 10^{-11}\,m^3$,设计误差为 -5.6% 。

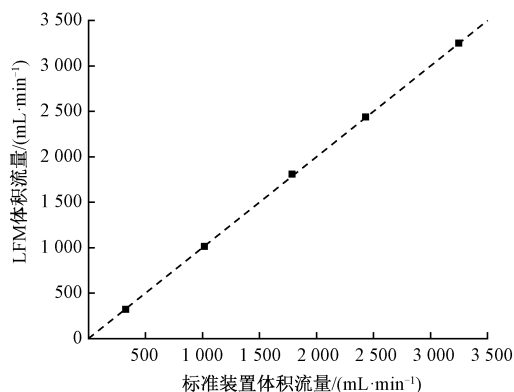


图 3 LFM 校准结果

Fig. 3 Calibration result of LFM

3 小涡喷试车台

为本文用于试验液体 LFM 的小涡喷试车台结构如图 4 所示,供油系统由油罐、过滤、齿轮泵和流量计组成。油罐内的航空煤油经过滤后由齿轮泵加压送入小涡喷,流量计用于流量测量。因液体片式 LFM 按水设计,实际使用时也需要使用介质的动力黏度,并需要根据密度将体积流量换算成质量流量。因采用的燃料为航空煤油,而油品往往属于混合物,其动力黏度和密度采用黏度计和密度计实测,粗估所用液体片式 LFM 测量汽油时对应的量程为 $0 \sim 2.5\,kg/min$ 。

为了验证液体片式 LFM 的性能,在其后串联了一台量程为 $0 \sim 5\,kg/min$,准确度等级为 0.2 级的 CMF 用于比对。试车台配备完整的状态监控系统,包括推力监控、转数监控、温度监控、振动监控和供油监控,用于评价发动机的工作状态。在本文研究中,状态监控主要用于分析供油系统的工作状态。试车台对各信号的采集频率均为 $50\,Hz$ 。图 5 为小型涡轮喷气式发动机试车台照片。

4 试验结果及分析

本文首先对小涡喷加减速过程中的燃油流量进行了动态测量。图 6 为某型涡喷发动机在某次试车试验中的燃油流量曲线,除 LFM 和 CMF 测量曲线外,图 6 中额外增加了泵后油压曲线用于两款流量计动态性能的评价。图 6 包含了试车试验中起动、稳态(慢车至最大状态

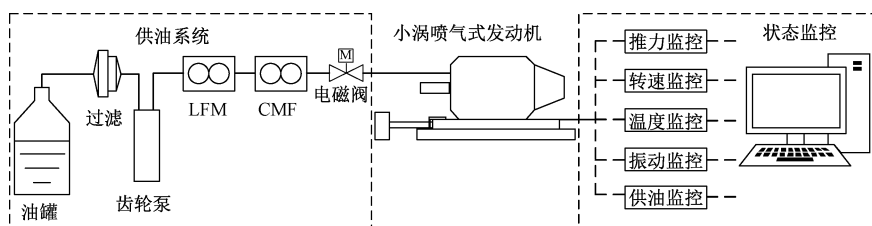


图4 小型涡轮喷气式发动机试车台结构

Fig. 4 Small turbojet-engine test bench

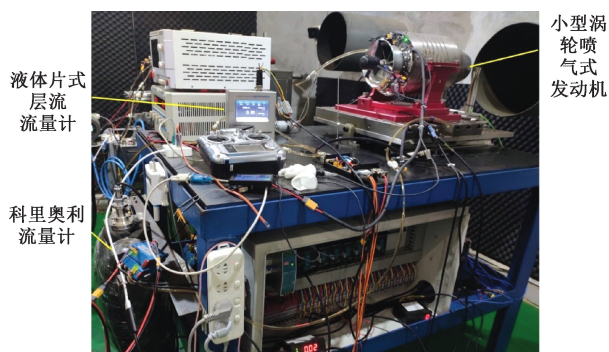


图5 试车台照片

Fig. 5 Photo of the test bench

共12个稳态点)和过渡态(加/减速)的全部内容,整个试

验一共持续约1800s,图6中数据均作了归一化处理(各参数除以本参数在试验中的最大值,以百分比表示)。

根据宏观观察,图6中LFM和CMF对12个稳态点的测量结果吻合较好。因某型涡喷发动机由齿轮泵供油,本身流量带有一点的波动,再加上发动机电子控制单元(electronic control unit,ECU)一直在微调发动机转速,图6中各稳态点的流量曲线均存在轻微波动。为量化分析,取各稳态点30s内瞬时流量的平均值作为LFM和CMF的测量流量。对比两者的测量结果,可得图7。由图7可知,LFM相对CMF的测量误差为-1.25%~1.16%,这一误差分布基本与液体LFM的校准结果相吻合。液体LFM对定常流的测量精度要低于CMF,但表现出较好的重复性。

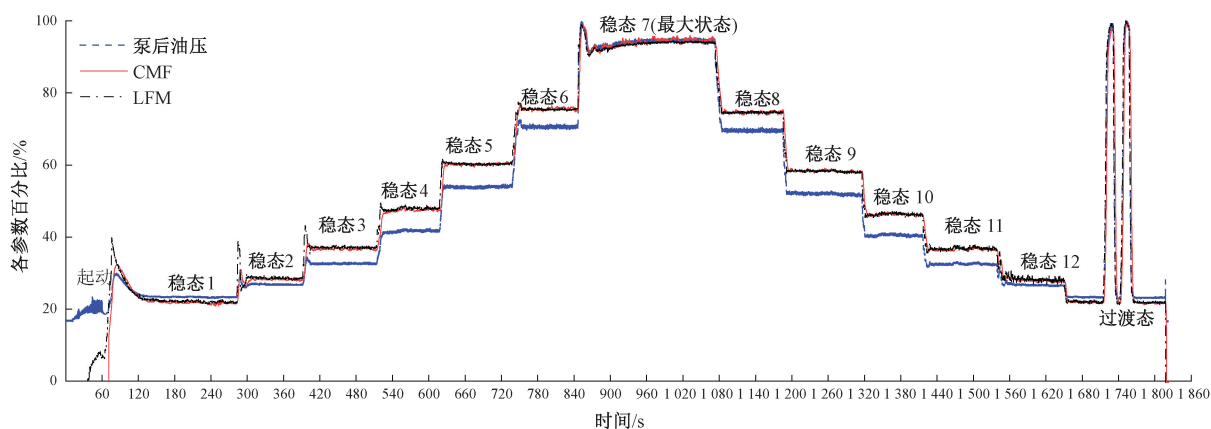


图6 全过程的燃油流量测量结果

Fig. 6 The fuel flow measurement result in the whole process

将图6试验结果的局部展开可获得更多有价值的信息。图8节选了某型小涡喷从稳态5加速至稳态6的测量结果,图9节选了从稳态7减速至稳态8的测量结果。因ECU采用的是发动机转速和燃油流量的闭环PID控制策略,在加/减速过程中为了避免超调,通常会把一个大的调节过程分成若干步小的调节过程进行。图8和9中LFM的测量结果变化趋势基本和泵后油压保持一致,6个台阶很好的体现了ECU的控制策略。相反,CMF测量结果则是一条光滑的曲线,并不能很好的反应这一变

化过程。此外,LFM的测量结果能很好地反映出加速过程中的流量超调量(尖峰),这与泵后油压的超调量相一致;相反,CMF的测量结果则相对平缓,并不能展现这一细节。

图10节选了某型小涡喷从慢车迅速加速至满状态再迅速减速至慢车时的燃油流量曲线,这一阶段的试验是为了获得发动机的过渡态特性,ECU在调节时会以调节速度最快为目标。从图10中可以看出,LFM测量结果很好地跟随了泵后油压,而CMF则滞后泵后油压2s左

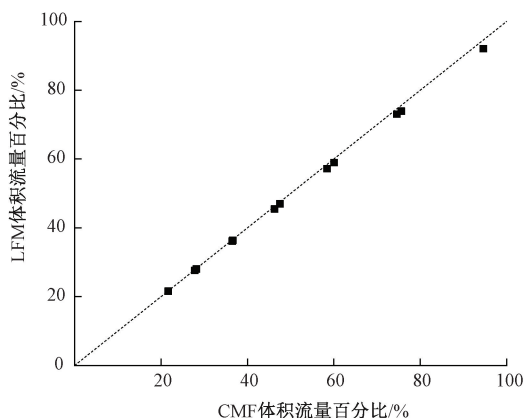


图7 LFM和CMF测量结果对比(稳态)

Fig. 7 Comparison of LFM and CMF measurement results (steady state)

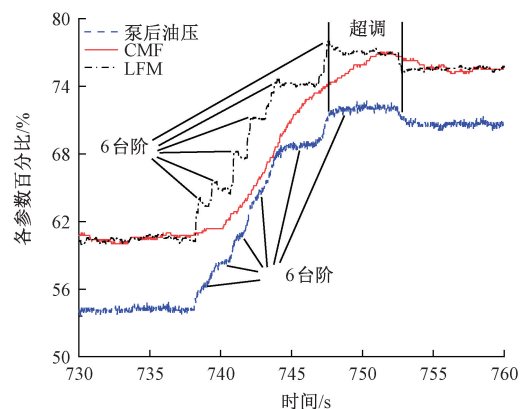


图8 加速过程的燃油流量测量结果

Fig. 8 The fuel flow measurement result in the acceleration process

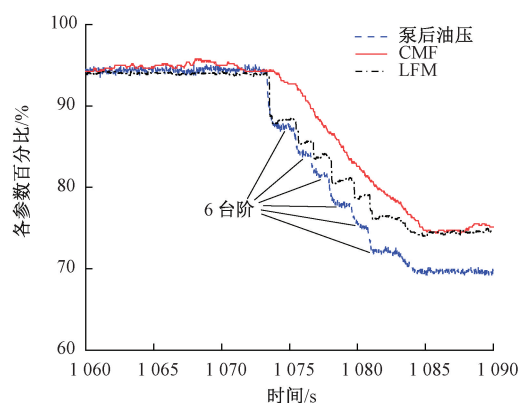


图9 减速过程的燃油流量测量结果

Fig. 9 The fuel flow measurement result in the deceleration process

右。从上述试验结果可知,LFM的动态特性要明显优于CMF。

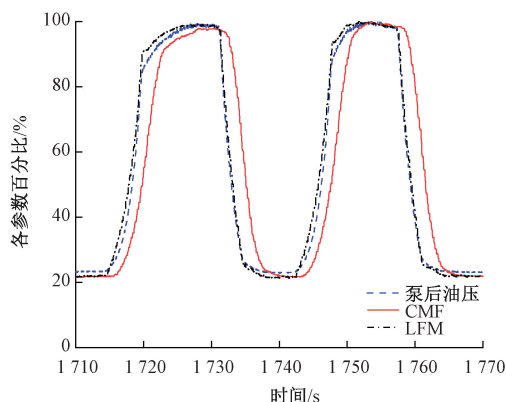


图10 过渡态的燃油流量测量结果

Fig. 10 The fuel flow measurement result in the transient state

此外,本文还使用液体 LFM 对某型小涡喷起动过程的燃油流量进行了动态测量。小涡喷在起动阶段,通常希望通过增加供油量快速提高转速,从而尽早进入慢车状态。若是供油量增加速度过快,将导致排气超温,热悬挂或是富油熄火等不希望发生的情况,导致发动机损坏。因此对起动阶段的燃油流量进行动态测量非常有必要。图 11 为节选的一部分测量结果,分别记录了发动机转速、排气温度、LFM 和 CMF 分别测量的供油量,图 11 中数据均作了归一化处理。从图 11 中可以看出,在转速逐渐提高的过程中,排气温度在 8 s 左右时间内间隔出现了两次超温现象。根据 ECU 的控制逻辑,超温时将对发动机进行保护,停止增加油泵转速,保持供油量不变。当发动机脱离超温状态后,ECU 将继续增加油泵转速,提高供油量。根据测量曲线,LFM 在超温时的测量结果保持不变,脱离超温后测量结果将迅速增大,现象十分明显,同 ECU 的控制结果保持一致。相反 CMF 测量曲线则一直保持着平滑的上升趋势,并未对期间发生的超温做出任何反应。试验结果显示,LFM 可以有效对发动机起动过程的状态进行监控。

本文试验中所采用的 ECU 对油泵的控制周期为 500 ms,每个周期都会通过预设程序判定应该增加还是减少供油量,或者是保持供油量不变。因此可以认为,试验中流经 LFM 的非定常流最大脉动频率不会超过 2 Hz。表 1 中液体 LFM 的 $f_{\max}$ 的设计值为 4.5 Hz,设计时使用的是水的物性参数。而航空煤油的运动黏度要高于水,根据式(4)试验中液体 LFM 的实际 $f_{\max}$ 要优于设计值(例如按 3 号喷气燃料 RP-3 计算, $f_{\max}$ 在 5.5 Hz 以上)。液体 LFM 的 $f_{\max}$ 要远大于所面临的非定常流脉动频率,因此所设计的液体 LFM 可将非定常流视为准定常流,对发动机过渡态燃油流量进行动态测量。图 11 中也呈现出预期的测量结果,在 3~7 s 之间 LFM 的测量结果大致以 500 ms 为间隔阶梯上升,与 ECU 的控制周期相符。推

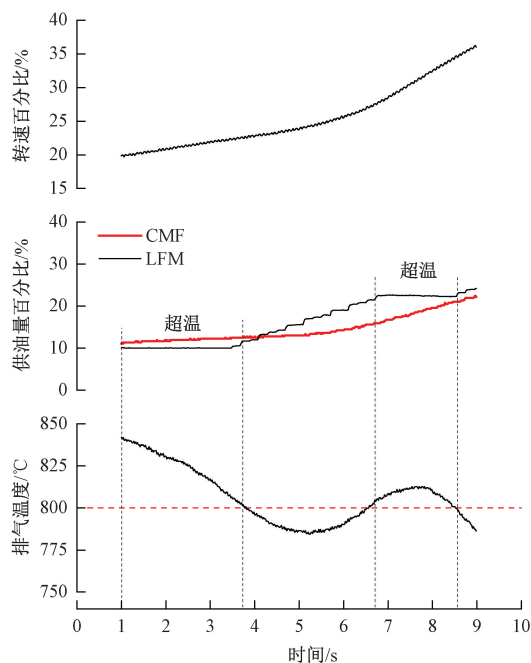


图 11 起动过程的燃油流量测量结果

Fig. 11 The fuel flow measurement result in starting process

而广之,若欲采用 LFM 测量其他非定常流,只需在设计时使 $f_{\max}$ 大于所面临的非定常流脉动频率即可。

5 结 论

为了解决航空发动机过渡态燃油流量测量问题,本文提出并研究了基于层流流量计的航空燃油流量动态测量技术。本文设计了一款量程为 $0 \sim 3\,000\text{ mL/min}$ 的液体 LFM,在小涡喷试车台上对其进行了试验,并与 CMF 进行了比对。文中采用液体 LFM 对小涡喷试车全过程的燃油流量进行了动态测量,并特别研究了起动阶段过程的燃油流量。本文主要研究结果和结论如下:

1) 当发动机处于稳态时,液体 LFM 测量结果与 CMF 吻合较好,相对误差为 $-1.25\% \sim 1.16\%$ 。试验结果与液体 LFM 校准时 $-1.24\% \sim 1.26\%$ 的相对误差一致。液体 LFM 对定常流的测量精度要低于 CMF,但表现出较好的重复性。

2) 当发动机处于过渡态时,液体 LFM 能很好地跟随泵后油压,测量结果与 ECU 的控制逻辑相一致。而 CMF 则无法跟随泵后油压,存在大约 2 s 左右的滞后。

3) 在发动机起动时,液体 LFM 测量结果能与 ECU 的超温保护逻辑相一致,可有效对发动机起动过程的状态进行监控,这是 CMF 无法做到的。

4) 将 LFM 用于非定常流测量时,需要使 $f_{\max}$ 的设计值大于所面临的非定常流脉动频率,LFM 方可将非定常流视

为定常流进行动态测量。

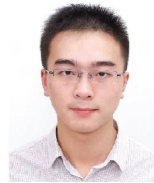
本文研究结果显示,液体 LFM 表现出优秀的动态特性,可有效应用于小涡喷燃油流量的动态测量。基于层流流量计的航发燃油动态测量技术研究,可为航空发动机试车技术的研究提供有效参考,并对拓展 LFM 应用范围有着积极的意义。

参考文献

- [1] 史春雨. 半物理试验起动阶段低温燃油流量计量技术路径探究[J]. 航空发动机, 2016, 42(6):1-8.
SHI CH Y. Measurement technology of fuel flow under low temperature starting in semi-physical test [J]. Aeroengine, 2016, 42(6):1-8.
- [2] 赵涌, 侯敏杰, 陈冕, 等. 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[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(1):5-8+39.
ZHAO Y, HOU M J, CHEN M, et al. Design and verification of an in-situ calibration system for aero-engine fuel flow rate measurement [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 26(1):5-8+39.
- [3] 张志宏. 发动机试验涡轮流量计测量不确定度评定方法[C]. 2012 年航空试验测试技术学术交流会, 2012.
ZHANG ZH H. An evaluating method for measurement uncertainty of turbine flowmeter for aero engine test[C]. Aviation Test and Test Technology Academic Exchange Conference in 2012, 2012.
- [4] 张志宏, 袁世辉, 王敏. 小型发动机高空模拟试验燃油流量测量研究[C]. 2010 航空试验测试技术学术交流会论文集, 2010.
ZHANG ZH H, YUAN SH H, WANG M. Investigation of fuel flow measurement in altitude simulation test for small aero-engine[C]. 2010 Symposium on Aeronautical Test and Testing Technology, 2010.
- [5] 王松, 张天宏, 王建锋, 等. 基于涡轮流量计的动态流量测量方法研究[J]. 测控技术, 2012, 31(11):24-27.
WANG S, ZHANG T H, WANG J F, et al. Study of dynamic flow rate measurement based on turbine flow meter [J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(11):24-27.
- [6] 金鑫. 燃油流量计动态校准系统设计与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
JIN X. Design and experimentation research of a dynamic calibration system of fuel flowmeter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [7] 刘彦军, 张毅治, 张永胜. 燃油流量计在非稳态下计量性能研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1):38-41.

- LIU Y J, ZHANG Y ZH, ZHANG Y SH. Research on measurement performance of fuel flowmeter at unsteady flow [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(1):38-41.
- [8] 张永胜, 于小丽, 刘彦军. 脉动流量下涡轮流量计动态特性流体仿真研究[J]. 计测技术, 2020, 40(4): 27-30.
- ZHAGN Y SH, YU X L, LIU Y J. Study on dynamic characteristics of turbine flowmeter under pulsating flow by fluid simulation [J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(4):27-30.
- [9] 王伯年, 王荣杰, 王利民, 等. 层流流量计设计参数的选择与确定[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(5): 474-476.
- WANG B N, WANG R J, WANG L M, et al. Selection and determination of laminar flow meter design parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000,21(5): 474-476.
- [10] 王荣杰, 王伯年, 张进明. 准定常流法测定瞬时流量的判据研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, (2):150-153, 211.
- WANG R J, WANG B N, ZHANG J M. Study on the criterion for measuring the instantaneous flowrate with the quasisteady flow method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002,23(2):150-153,211.
- [11] 王荣杰, 王伯年, 金玉顺. 准定常流法测量内燃机脉动进气的瞬时流量[J]. 农业机械学报, 2001, (5): 7-9.
- WANG R J. WANG B N, JIN Y SH. Study on the criterion for measuring the instantaneous flowrate with the quasisteady flow method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, (5):7-9.
- [12] KANOTO Y, NAGAI K, KAWA Y, et al. Cycle-to-cycle flow rate measurement on reciprocating HCCI engine using fast-response laminar flow meter [J]. Journal of Environment & Engineering, 2011, 6(1):220-232.
- [13] 王剪, 豆峰, 赵晓东, 等. 差分式层流流量传感技术研究 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (12): 1790-1794+1829.
- WANG J, DOU F, ZHAO X D, et al. Research on the differential type laminar flow sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32 (12): 1790-1794+1829.
- [14] 黄浩钦, 李国占, 赵鹏, 等. 压力位差式层流流量传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(7):72-79.
- HUANG H Q, LI G ZH, ZHAO P, et al. Study on the PPD type laminar flow sensing technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(7):72-79.
- [15] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 小型片式层流流量计研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4):792-796.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Research of small sheet-type laminar flow meter [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38 (4): 792-796.
- [16] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 微小缝隙式层流流量计设计及测量特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11):48-54.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X. Design and easurement characteristic study on micro gap-type laminar flow meter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(11):48-54.

作者简介



王筱庐 (通信作者), 分别在 2013 年和 2015 年于西北工业大学获得学士学位和硕士学位, 现于西北工业大学博士研究生, 主要研究方向为流体测控。

E-mail:15802950087@163.com

Wang Xiaolu (Corresponding author)

received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 2013 and 2015, respectively. Now, he is a Ph. D. candidate at Northwestern Polytechnical University. His main research interest is fluid measurement and control.



陈玉春, 分别在 1989 年、1992 年和 2009 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为航空宇航科学与技术。

E-mail:chych888@nwpu.edu.cn

Chen Yuchun received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 1989, 1992 and 2009, respectively. Now, he is a professor and doctoral supervisor at Northwestern Polytechnical University. His main research interest is aeronautical and astronautical science and technology.