

文章编号:1000-8055(2012)03-0701-06

微型涡轮发动机燃油闭环控制起动方法

徐建国, 张天宏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用微压差方法进行燃油流量测量, 达到低压损、高精度和快速响应的目的。设计了孔板式计量段, 对不同节流孔径的计量段进行了标定试验。试验结果表明: 在设定的测量范围内, 节流孔两侧压差的平方根与流量成线性关系, 与理论分析结果一致。在此基础上, 研究微型涡轮发动机起动过程供油流量闭环控制问题, 设计了单神经元 PID(比例-积分-微分)控制器, 对燃油流量进行了闭环控制试验。与开环控制方法相比, 新的控制方法动态性能好, 调节精度高。最后, 采用单神经元 PID 控制器进行了微型涡轮发动机燃油闭环控制起动试验, 显著提高了起动过程的快速性与可靠性。

关 键 词: 微型涡轮发动机; 燃油计量; 微压差; 孔板; 起动控制

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Start-up method of micro turbine engine with closed-loop fuel flowrate control

XU Jian-guo, ZHANG Tian-hong

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The micro pressure difference method was used to measure fuel flowrate, which has the advantages of low pressure loss, high accuracy and fast response. A new orifice measuring section was designed, and a series of calibration experiments were done with different orifices. The experiments results show that the relation between flowrate and the square root of pressure difference was linear in the flowrate measuring range, which is in accordance with theoretical analysis. On the basis of the measuring method, a single neuron PID (proportion-integration-differentiation) controller was designed and used in the closed-loop control experiments of fuel flowrate. In contrast to open-looped control, this new control method is independent of pump characteristics, power voltage and outlet pressure. It also has good dynamic performance. In the end, the method was used in MTE (micro turbine engine) starting tests, which shows that it improves the quickness and reliability of start-up process dramatically.

Key words: MTE (micro turbine engine); fuel metering; micro pressure difference; orifice; start-up control

在微型涡轮发动机的起动控制过程中, 燃油计量的准确性和快速性直接影响发动机起动过程的品质。以往微型涡轮发动机供油采用开环控制方法, 当油泵特性、电源电压或供油背压等发生变

化时, 会引起供油量的不确定, 进而导致发动机难起动、易悬挂等问题^[1-4]。本文从工程应用的角度对基于微压差的燃油计量方法进行了研究, 设计了一种压损小、精度高、动态响应特性好的微压差

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-02-15

作者简介: 徐建国(1971—), 男, 山西晋城人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机控制、测试技术的研究。

燃油计量装置,并将其应用于微型涡轮发动机的启动控制,显著提高了启动过程的快速性与可靠性。

1 孔板式微压差流量测量方法

目前国内在微小流量测量方面的技术还不够成熟.国外商用微小流量计虽然可以测量出燃油的实际流量,但流量的大小通常只能由其显示终端读出,未留有信号接口实时反馈给控制系统^[5-6].商用微小流量计的另一个主要缺点是频率响应慢.以美国 FloScan Instrument 公司生产的 201A-6 型涡轮流量计为例,其流量最小可测到 20 mL/min.但是,在此流量附近,其输出频率只有 2 Hz 左右.如通过测频或测周的方法获得准确的流量值将耗费 0.5 s 至数秒的时间,不能满足微型涡轮发动机实时控制的需求.此外,这类流量计还存在压力损失大、测量范围窄、价格昂贵等缺点.为此,需要对微小流量测量技术进行研究以满足微型涡轮发动机控制的需要。

1.1 测量原理

根据流体动力学原理,流体在管道中流动会产生压力损失,因此可以通过此压力损失(微压差)间接计算得到流体的流量。

充满管道的流体流经管道档板上的节流孔时,流束将在节流孔处形成局部收缩,流速增加而静压力降低,在节流孔前后形成静压力差(简称压差),如图 1 所示.此压差的大小与流量及流体的物理性质(密度、黏度)有关,流体的流速越大,在节流孔前后产生的压差也越大^[7].因此,可依据孔板前后的压差来计算流量的大小。

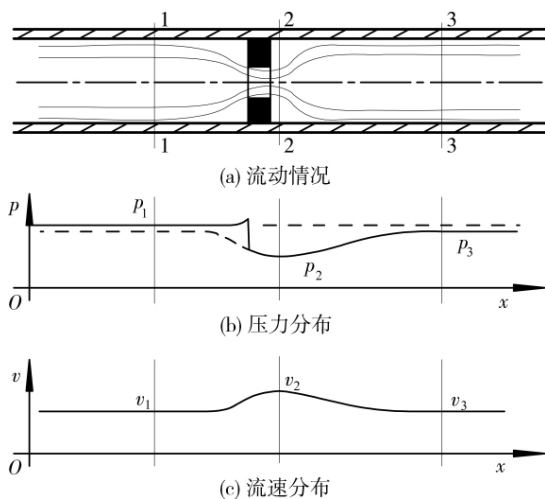


图 1 压差形成原理图

Fig. 1 Forming of pressure difference

假定流体不可压缩,根据流体动力学原理,流量与压差之间具有确定的数学关系:

$$q_m = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (1)$$

$$q_v = q_m / \rho \quad (2)$$

式中 q_m 为质量流量; q_v 为体积流量; β 为孔径比,即节流孔直径 d 与管道内径 D 之比; c 为流出系数; Δp 为孔板两侧压差; ρ 为孔板上游流体的密度。

流出系数 c 是表征孔板节流特性的主要参数,一般通过试验标定得出.当采用标准孔板结构时,也可不进行实测标定,而使用国际标准化组织(ISO)的里德-哈利斯/加拉赫公式(R-G 公式)计算得出^[8].根据 R-G 公式,流出系数 c 是雷诺数 Re 和孔径比 β 的函数,其值随 Re 的增大而减小.对于具有确定结构参数的孔板,在一定的测量范围内,流出系数 c 可近似为常数,于是流量与压差平方根成正比关系。

1.2 结构设计

基于微压差的流量测量装置主要由计量段和微压差传感器两部分组成.计量段用于产生计算流量所需的微压差.通过对计量段结构的合理设计,可以在满足测量精度要求的前提下,使得测量装置在供油回路中产生的压损较小.微压差传感器则用于将压差信号转换为电压信号,其特性直接影响整个装置的测量性能.由于燃油具有腐蚀性,传感器还需具有双端隔离功能.微压差传感器和计量段之间通过软管连接,将计量段两端的微压差信号引入传感器^[9-10].

计量段是微压差测量装置的重要组成部分,其形式选取和结构设计直接影响流量测量的精度.计量段主要有直管式和孔板式两种型式.直管式计量段具有结构简单、容易加工、流量与压差在设计范围内呈线性关系的优点,缺点是其尺寸较大^[9-10].而孔板式计量段虽然结构较复杂,范围度较窄,但其体积小、质量轻,便于在线应用;此外,从工艺角度,孔板容易加工调换,给试验研究带来方便.为此,微压差测量装置的计量段采用孔板结构型式。

计量段结构设计需要考虑以下要求:①满足微型涡轮发动机启动过程燃油流量测量范围的需要;②体积小、质量轻,以利于在线应用;③加工方便.根据这些要求,设计了如图 2 所示的由腔体、孔板及管接头组成的孔板式计量段.计量段采用铝合金材料以减轻其质量.两个腔体通过螺纹装配成一体.孔板设计为独立零件以方便调换,安装

在两个腔体之间,其两侧采用 O 型橡胶圈密封.管接头有 4 个,其中两个与腔体加工为一体,另两个为独立零件.管接头前端加工有锥形突肩,防止软管滑落并起密封作用.

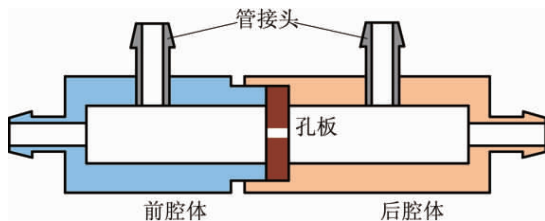


图2 计量段结构示意图

Fig. 2 Structure of measuring section

1.3 标定试验

式(1)和式(2)给出了根据压差计算流量的理论公式,但是式(1)中的流出系数 c 通常需要通过标定试验获得.此外,当流体在计量段腔体内部流动时,由于在管接头附近存在撞击、旋涡等现象,造成能量的局部损失,上述公式的计算结果不再准确.为了提高测量精度,需要对计量段两端的压差与流体流量之间的关系进行实际标定.

依据理论计算结果,在 $0 \sim 10$ kPa 压差范围内,采用高精度流量计分别对 1, 1.2, 1.5, 1.8 mm 4 种孔径的孔板进行了标定试验,标定误差小于 ± 1 mL/min.图 3 是由试验数据拟合得到的一次曲线.

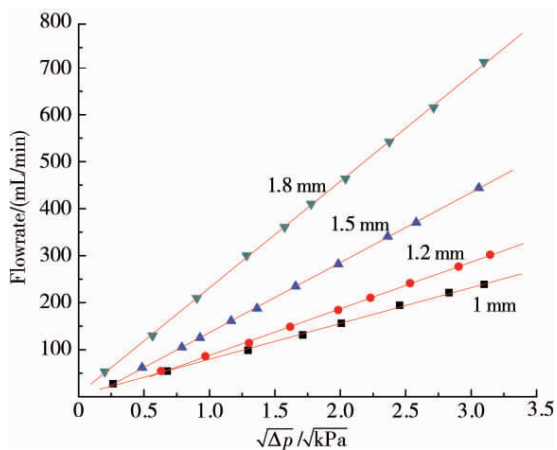


图3 压差的平方根-流量标定试验曲线

Fig. 3 Square root of pressure difference-fuel flowrate calibration curves

从图 3 可以看出,流量与压差的平方根成线性关系.当孔径增大时,流量测量范围也随之增大.在实际应用时,可根据测量范围的需要,选取不同孔径的孔板.1 mm 孔径时流量测量范围为

$30 \sim 230$ mL/min,已经能够满足微型涡轮发动机起动阶段流量测量的需要.

根据拟合曲线可以得到任意压差对应的流体流量,用于燃油流量的闭环控制.需要指出当温度变化时,流体的密度会发生变化,进而影响压差与流量之间的关系.图 3 所示试验曲线是在 20°C 的环境温度下测得.在工程应用中,可在不同环境温度下测得多组压差与流量关系曲线,然后通过插值方法消除环境温度的影响,进一步提高流量的测量精度.

2 燃油流量闭环控制

燃油流量开环控制方法的主要缺点是其输出受到多种因素的影响.例如:出口油压、油泵特性、环境温度以及电源电压等的变化都会影响到其输出.对于这些影响因素,有的可以通过对该因素监测并进行修正补偿消除其影响,如出口油压^[11],其代价是要增加传感器硬件成本和控制器的数据采集及处理等负担.但是,对于电机特性及油泵特性等的变化,则很难进行监测和修正补偿,对于此类因素,只有通过闭环控制才能消除其影响.

2.1 单神经元 PID 控制器设计

对燃油流量精确测量的目的是实现对流量的高品质闭环控制.即基于微压差燃油流量测量装置,采用闭环方法控制供给油泵电机的电压占空比,使实际供油量和期望供油量保持一致.燃油流量闭环控制原理如图 4 所示.

单神经元 PID(比例-积分-微分)控制具有结构简单、鲁棒性好、工作可靠、调整方便等优点.因为具有自学习和自适应能力,能实时对参数进行整定,此方法适应于强干扰、具有非线性和不确定性的控制对象^[12-13].基于对微型涡轮发动机工作条件恶劣的考虑,我们设计了单神经元 PID 控制器来对燃油流量进行闭环调节.控制器的输入是期望流量 F_r 和测量流量 F_m 的偏差信号,输出 $u(k)$ 是电压占空比 PWM 信号. PWM 信号经驱动电路功率放大后,驱动油泵电机,控制油泵供油量的大小.控制器的控制步长取 5 ms.

图 4 中神经元的输入为以下状态量:

$$x_1(k) = e(k) = F_r - F_m \quad (3)$$

$$x_2(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4)$$

$$x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (5)$$

其中 $x_1(k)$ 是流量误差, $x_2(k)$ 是流量误差的 1 阶差分, $x_3(k)$ 是流量误差的 2 阶差分.

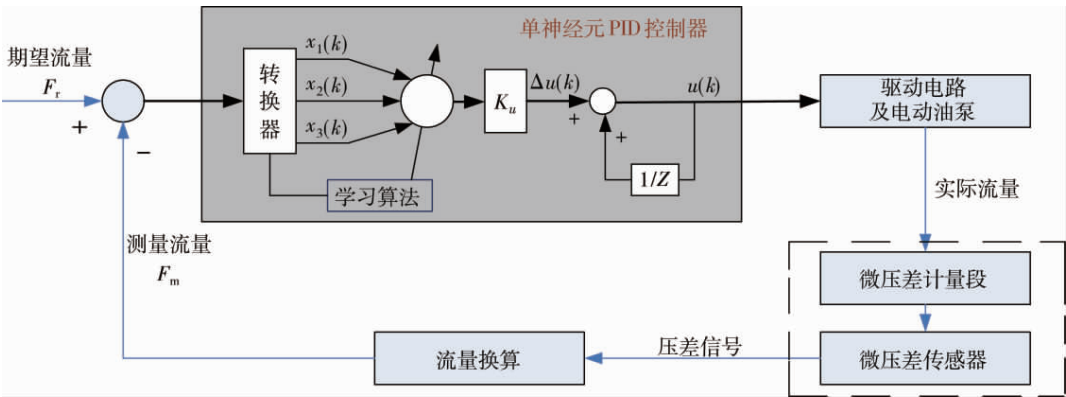


图 4 燃油闭环控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of closed-loop fuel flowrate control

神经元特性取为

$$\Delta u(k) = \frac{K_u \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|} \tag{6}$$

式(6)中, K_u 是单神经元放大系数, 影响控制器的稳定性和快速性. $\omega_i(k) (i=1, 2, 3)$ 为对应于状态量 $x_i(k)$ 的加权系数, 使用有监督的 Hebb 学习规则完成其调整

$$\begin{aligned} \omega_i(k) &= \omega_i(k-1) + \\ &\eta_i e(k-1) u(k-1) x_i(k-1) \end{aligned} \tag{7}$$

式(7)中, $\eta_i (i=1, 2, 3)$ 分别为积分项、比例项和微分项的学习速率.

2.2 验证试验

上述单神经元 PID 控制器 4 个可调参数分

别取值为: 单神经元放大系数 $K_u=9.0$, 积分项学习速率 $\eta_1=0.065$, 比例项学习速率 $\eta_2=1.5$, 微分项学习速率 $\eta_3=0.05$; 采用孔径为 1 mm 的孔板式计量段对闭环燃油流量控制的性能进行了验证试验. 图 5(a) 是方波响应试验曲线, 期望燃油流量 F_r 在 100 mL/min 和 140 mL/min 之间以 4 s 的周期变化. 从图中可以看出, 调节时间小于 0.2 s, 超调量小于 2%. 在稳态时, 实测流量 F_m 围绕期望流量 F_r 在 0.5% 范围内作小幅波动. 单神经元 PID 控制器由于包含积分项, 因此从原理上消除了稳态误差. 此波动是由系统噪声所引起. 在图 5(b) 所示的试验中, 期望燃油流量 F_r 采用频率为 1 Hz 的正弦信号, 实测燃油流量 F_m 在相位上仅落后 0.6 rad, 能较好地跟随期望值的变化.

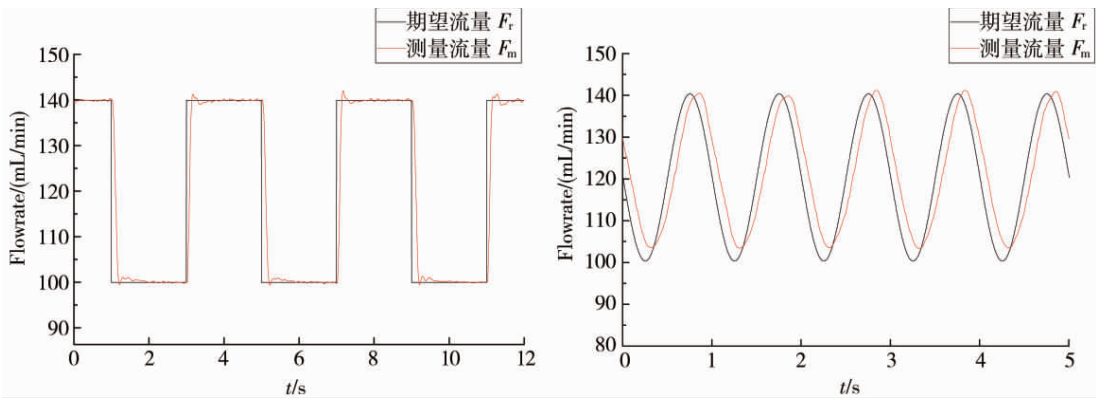


图 5 响应试验曲线

Fig. 5 Response test curves

采用单神经元 PID 控制器对燃油流量进行闭环调节能有效克服开环控制方法的缺点. 从表 1 可见, 在电源电压降低 5% 时, 开环控制的燃油流量误差最大可达 7.07%. 从表 2 可见, 在油泵

连续运行 30 min 后, 油泵电机线圈由于温升发生特性变化, 会导致开环控制的燃油流量误差增大, 最大达到了 8.95%. 从表中数据也可看出, 这两种情况对闭环控制的燃油流量基本没有影响, 其

相对误差在整个测量范围内小于 0.5%.

表 1 电源电压变化对燃油流量的影响

Table 1 Influence of the variation of power voltage

设定流量/ (mL/min)	开环控制 相对误差/%	闭环控制 相对误差/%
60	7.07	0.25
80	4.66	0.27
100	4.40	0.28
120	5.74	0.34
140	6.82	0.21
160	6.72	0.12
180	6.17	0.23

表 2 油泵特性变化对燃油输出的影响

Table 2 Influence of the variation of
motor characteristics

设定流量/ (mL/min)	开环控制 相对误差/%	闭环控制 相对误差/%
60	4.08	0.40
80	3.23	0.27
100	4.24	0.37
120	6.29	0.13
140	8.19	0.25
160	8.64	0.25
180	8.95	0.21

根据上述试验,单神经元 PID 控制器具有较好的动静态特性和抗干扰能力,能够满足微型涡轮发动机起动控制的需要.

3 微型涡轮发动机燃油闭环控制
起动试验

微型涡轮发动机起动是一个复杂的过程.首先由起动电动机带动发动机转子旋转,再向燃烧室供给丙烷气进行预燃.之后,向发动机供给燃油,燃油经蒸发管变为油蒸气,进入燃烧室燃烧做功.起动过程中,随着发动机转速的升高,依次切掉起动电动机和丙烷气,最后单独由燃油燃烧提供动力,直到慢车.微型涡轮发动机起动过程属于过渡态,其供油控制规律一般由试验确定,以保证燃烧过程稳定(不发生富油、贫油和喘振)、尾气温度不超过最大值及起动时间尽量短.

图 6 是以某型微型涡轮发动机为对象所作的起动试验曲线,图 6(a)采用燃油开环控制方式, t_a 为发动机尾气温度, N_g 为发动机转速, P_{la} 为油门杆位置, W_f 为基于微压差流量计在线测量的燃油流量.为了能在一张图上更好地进行对比分析,对 t_a 和 N_g 参数曲线作了缩小处理,对 P_{la} 参数曲线作了平移.图 6(b)采用燃油闭环控制方式, W_{fr} 为自动起动程序设定的期望燃油流量,其他参数同图 6(a).

整个燃油开环控制起动过程用时为 86 s,尾气温度最高达 686 °C.起动过程中,燃油流量通过油门杆位置设定油泵的电压占空比间接控制.从

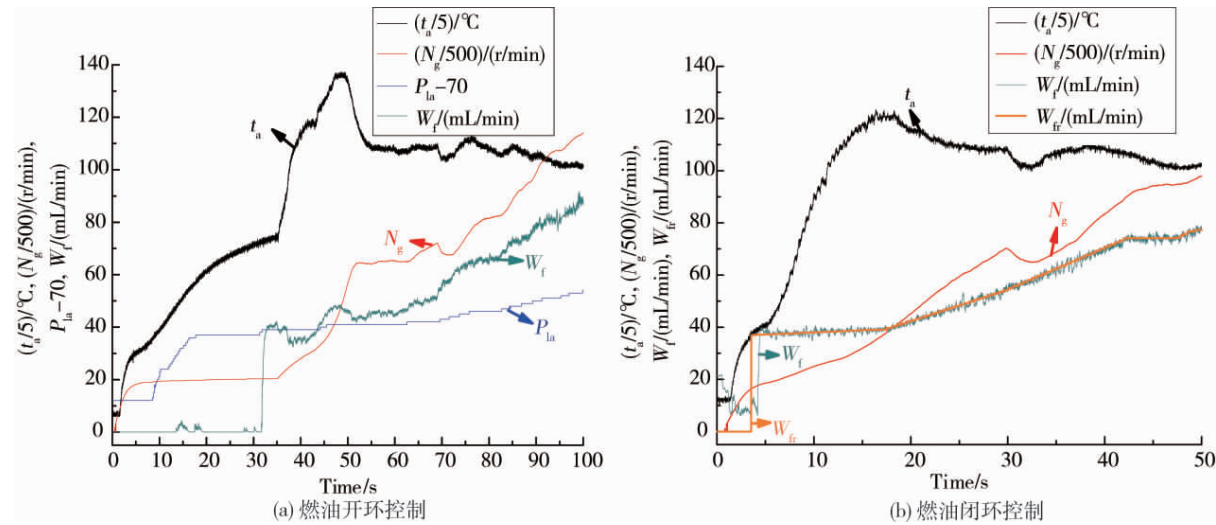


图 6 微型涡轮发动机起动试验曲线

Fig. 6 MTE (micro turbine engine) start-up test curves

图 6(a) 可见, 尽管油门杆位置保持不变或者增大, 但是由于燃烧室压力的变化, 造成燃油流量波动甚至变小, 在燃油刚点燃时刻最为明显. 开环方式由于不能直接准确地控制油泵的实际供油量, 容易造成富油或贫油, 产生喘振、后燃、转速悬挂等问题, 导致起动过程控制困难, 甚至造成起动过程失败.

从图 6(b) 可以看出, 采用燃油闭环控制方法进行微型涡轮发动机起动, 实测燃油流量曲线能够很好地跟踪程序给定的期望燃油流量曲线. 实测燃油流量波动量与图 5 的试验结果相比较有所增大, 最大波动量为 4 mL/min. 这是因为图 5 的结果是在没有干扰的情况下测得, 而在起动过程中燃烧室压力的变化造成供油背压不断变化, 控制算法对油泵的电压占空比进行动态调节形成了流量的波动. 与开环起动相比较, 燃油流量的闭环控制显著提高了起动过程中燃油计量的精确度.

从图 6(b) 可见, 燃油闭环控制起动过程用时仅为 43 s, 比开环起动过程所用时间缩短了一半. 尾气温度最高为 617 °C, 比开环起动的最高尾气温度降低了 69 °C. 此外, 起动过程中, 温度参数曲线和转速参数曲线的波动也明显减少. 燃油流量闭环控制方法明显改善了起动过程的品质, 保证了发动机起动过程的快速性和可靠性.

4 结 论

精确、快速的燃油计量技术对微型涡轮发动机自动起动控制具有重要意义. 采用开环供油方式, 实际供油量受电源电压、油泵出口油压等因素的影响, 并且与油泵特性相关, 容易产生较大的供油偏差. 本文研究了微压差流量测量方法, 设计了孔板式计量段和单神经元 PID 控制器用于对燃油流量的闭环控制. 采用本文提出的燃油流量闭环控制方法进行了起动试验, 试验结果表明该方法明显改善了微型涡轮发动机起动过程的品质.

参考文献:

- [1] 刘源, 黄向华, 张天宏. 厘米级微型涡轮喷气发动机关键控制技术研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 480-484.
LIU Yuan, HUANG Xianghua, ZHANG Tianhong. Research on key control technology of micro turbine engine in centimeter size[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 480-484. (in Chinese)
- [2] Chiang H W D, Hsu C N, Lai A, et al. An investigation of steady and dynamic performance of a small turbojet engine [R]. 2002-GT-30577, 2002.
- [3] Gerendas M, Pfister R. Development of a very small aero engine[R]. 2000-GT-O536, 2000.
- [4] 朴英. 航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 777-782.
PIAO Ying. An analysis of the starting characteristics of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 777-782. (in Chinese)
- [5] 邵东亮, 朱金堂, 孔伟. 液体微流量计量方法研究[J]. 石油仪器, 2005, 19(2): 69-72.
SHAO Dongliang, ZHU Jintang, KONG Wei. Research on the test method of liquid micro flowrate[J]. Petroleum Instruments, 2005, 19(2): 69-72. (in Chinese)
- [6] 陶建军. 微小流量标准装置的研制[J]. 工业计量, 2000, 10(3): 27-28.
TAO Jianjun. The development of standard micro flow measuring instruments[J]. Industrial Measurement, 2000, 10(3): 27-28. (in Chinese)
- [7] 邓茂焕. 节流式差压流量计的发展和现状[J]. 工业计量, 2002, 12(6): 30-32.
DENG Maohuan. Development and current situation of throttle differential flowmeter [J]. Industrial Measurement, 2002, 12(6): 30-32. (in Chinese)
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T2624. 2—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 2 部分: 孔板[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 8-9.
- [9] 糜坤年. 微型涡喷发动机燃油计量控制及实验技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
MI Kunnian. Research on fuel metering and experimental technology for micro turbine engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [10] 张天宏, 糜坤年, 黄向华. 独立于泵特性的低压损微流量计量装置: 中国, ZL200710024646. 3[P]. 2007-11-28.
- [11] 糜坤年, 张天宏. 微型涡喷发动机燃油计量技术研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2137-2141.
MI Kunnian, ZHANG Tianhong. Study on fuel metering for the micro turbine engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2137-2141. (in Chinese)
- [12] 丁军, 徐用懋. 单神经元自适应 PID 控制器及其应用[J]. 控制工程, 2004, 11(1): 27-30.
DING Jun, XU Yongmao. Single neuron adaptive PID controller and its applications[J]. Control Engineering of China, 2004, 11(1): 27-30. (in Chinese)
- [13] 徐英, 徐用懋, 杨尔辅. 时变大纯滞后系统的单神经元预测控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(3): 383-386.
XU Ying, XU Yongmao, YANG Erfu. Single-neuron predictive control for time-variable large delay systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(3): 383-386. (in Chinese)