

文章编号: 1000-8055(2008)11-2137-05

微型涡喷发动机燃油计量技术研究

糜坤年, 张天宏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 研究微型涡喷发动机供油量的准确计量问题. 通过分析燃油泵的工作机理, 得出油泵的供油量由油泵供电电压、电压占空比和油泵出口油压这三个可变因素决定. 当供油需求量给定后可以根据油泵当前的电压和出口油压计算出对应的电压占空比, 为此对油泵的供油特性进行标定实验和验证实验. 与原先不考虑出口油压的计量方法相比, 这种新的计量方法显著提高了燃油计量精度, 有利于对微型涡喷发动机起动过程控制.

关 键 词: 燃油计量; 微型涡喷发动机; 控制系统; 燃油泵; 实验验证

中图分类号: V233.7; TB114.3

文献标识码: A

Study on fuel metering for the micro turbine engine

MEI Kun-nian, ZHANG Tian-hong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper analyzed how to improve the fuel metering accuracy for the micro turbine engine (MTE). According to the working mechanism of the dynamoelectric gear pump, the fuel flow delivered by the pump is dependent on the amplitude of the supply voltage, the duty cycle of the supply voltage and the output pressure of the pump. When the demanded quantity of the fuel flow is given, the duty cycle of the supply voltage can be calculated from the amplitude of the supply voltage and the output pressure, which is validated by a series of calibration experiments. Comparing with the formal metering method, without consideration of the output pressure, this novel method can improve the metering accuracy distinctly, and will be helpful for the MTE starting process controlling.

Key words: fuel metering; micro turbine engine (MTE); control system; fuel pump; experimental validation

微型涡喷发动机控制系统的一个重要执行元件是实现燃油输送和油量调节的电动燃油泵, 该燃油泵为直流电机驱动的单向齿轮泵^[1-2]. 受体积、重量、成本等限制, 微型涡喷发动机一般通过控制电机转速实现燃油计量, 省去了一般发动机经常采用的定压差计量活门位置控制机构^[3]. 目前微型涡喷发动机在起动过程中仅根据燃油需求

量对油泵的供电电压采用 PWM 方式进行开环斩波控制, 没有考虑油泵出口油压和电机实际转速的影响^[2,4]. 而在发动机的起动过程中燃烧室里的压力是有变化的^[5], 这种变化会影响油泵的出口油压和电机转速, 造成实际供油量偏差较大, 甚至会导致起动失败^[6]. 为此需要研究油泵的供油特性, 寻求一种准确的燃油计量方法.

收稿日期: 2007-10-12; 修订日期: 2008-04-20

作者简介: 糜坤年(1984-), 男, 江苏仪征人, 硕士生, 研究方向为系统仿真与控制.

1 燃油泵的工作机理分析

燃油泵在实际工作中供油量的计算公式为

$$Q=n\times q\times\eta\tag{1}$$

其中 Q 表示油泵的供油量; n 表示油泵的转速, 其大小由油泵供电电压、电压的占空比和油泵出口油压决定; q 表示油泵的每转排量, 其大小由油泵的尺寸结构决定; η 表示油泵供油效率, 它与油泵的齿轮间隙以及出口油压有关。

当燃油泵的具体型号选定以后, 油泵的尺寸结构和齿轮间隙也随之确定. 如果要控制油泵的供油量就必须从油泵供电电压、电压占空比以及油泵出口油压这三个方面入手。

2 燃油泵供油特性的标定实验

为了获取燃油泵的供油特性, 就需要研究油

泵供油量与油泵供电电压、电压占空比及油泵出口油压之间的关系. 为此研制了燃油计量试验装置^[7], 该装置主要实现以下功能:

1) 燃油泵供油特性标定. 油泵供电电压、油泵出口油压、油泵瞬时供油量的测量; 油泵供电电压、电压占空比、油泵出口油压的人工设置。

2) 燃油泵供油特性验证. 油泵供电电压、油泵出口油压、油泵瞬时供油量的测量; 油泵供电电压、油泵供油需求量、油泵出口油压的人工设置。

在微型涡喷发动机的起动过程中, 供油需求量的范围在 0~150 ml/min 之间, 燃烧室的压力变化范围在 0~3 kPa 之间^[2]. 利用燃油计量试验装置, 选 10 V 电压作为油泵的供电电压, 分别标定了油泵出口油压在 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kPa 下的油泵供油量随电压占空比变化而变化的对应关系. 实验数据如表 1 所示。

表 1 不同油压下供油量与电压占空比对应关系数据表

Table 1 Date of the duty cycle of the voltage and the flow capacity under different fuel pressure

油泵参数		数 值							
油泵出口	电压占空比/ %	22	23	24	25	26	27	28	29
油压 0.5 kPa	供油量/ (ml/ min)	36	56	74	90	104	122	135	146
油泵出口	电压占空比/ %	30	31	32	33	34	35	36	37
油压 1 kPa	供油量/ (ml/ min)	42	60	78	90	104	116	129	140
油泵出口	电压占空比/ %	37	38	39	40	41	42	43	44
油压 1.5 kPa	供油量/ (ml/ min)	40	53	70	90	104	115	126	140
油泵出口	电压占空比/ %	43	44	45	46	47	48	49	50
油压 2 kPa	供油量/ (ml/ min)	40	58	75	94	106	118	129	150
油泵出口	电压占空比/ %	50	51	52	53	54	55	56	57
油压 2.5 kPa	供油量/ (ml/ min)	45	60	78	90	100	110	121	133
油泵出口	电压占空比/ %	58	59	60	61	62	63	64	65
油压 3 kPa	供油量/ (ml/ min)	39	60	75	90	104	120	131	142

对表 1 中的实验数据线性插值, 可以在发动机的起动过程中根据给定的供油需求量和测量到的油泵出口油压计算出对应的电压占空比^[2]. 为了使算法简单且便于嵌入到单片机中实现, 采取先分组拟合曲线, 再对曲线插值的方案. 根据油泵的出口油压对表 1 中的实验数据进行分组, 分别拟合了在 500, 100, 150, 200, 250, 300 kPa 这 6 个特定的油泵出口油压下的油泵电压占空比与供油量的关系曲线, 如图 1 所示。

根据给定的供油需求量和测量到的油泵出口油压, 对图 1 中特定油压下的电压占空比和供油量关系曲线进行插值, 以期得到对应的电压占空

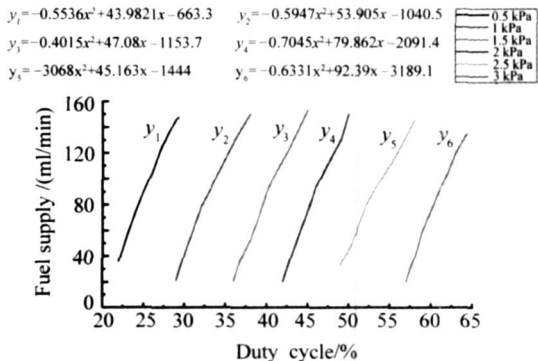


图 1 电压占空比与供油量关系曲线拟合图

Fig. 1 Results of the relationship between the duty cycle of the voltage and the flow capacity

比. 具体插值方法如下:

假设供油需求量为 Q , 此时的油泵出口油压由压力传感器测得为 p_f . 首先根据 p_f 的具体数值来选择用来插值的曲线. 选择的原则是选择压力数值最靠近 p_f 的两条曲线作为插值曲线. 设这两条曲线对应的油泵出口油压为 p_{f1} 和 p_{f2} , 且 p_{f1} 小于 p_{f2} . 根据油泵出口油压在 p_{f1} 和 p_{f2} 下的曲线方程, 可以计算出供油量为 Q , 油压为 p_{f1} 和 p_{f2} 下对应的油泵电压占空比分别为 D_1 和 D_2 . 根据插值算法, 有下列方程

$$\frac{p_f - p_{f1}}{p_{f2} - p_{f1}} = \frac{D - D_1}{D_2 - D_1}$$

(2)

可解出 D 得

$$D = \frac{(p_f - p_{f1}) D_2 + (p_{f2} - p_f) D_1}{p_{f2} - p_{f1}}$$

(3)

例如, 油泵供电电压为 10 V, 油泵出口压力为 120 kPa, 现要求出当供油需求量为 115 ml/min 时所对应的电压占空比.

根据曲线插值原则, 选择油泵出口油压在 100 kPa 和 150 kPa 下的电压占空比与供油量关系曲线作为插值曲线. 图 1 中的曲线拟合已拟合出了油泵出口油压在 100 kPa 和 150 kPa 下的曲线方程.

油压为 100 kPa 时的曲线方程为

$$y_2 = -0.5947x^2 + 53.905x - 1040.5$$

(4)

油压为 150 kPa 时的曲线方程为

$$y_3 = -0.4015x^2 + 47.08x - 1153.7$$

(5)

由方程(4), 可以解出当油泵出口油压为 100

kPa, 供油需求量为 115 ml/min 时所对应的电压占空比为 34.79.

由方程(5)可以解出当油泵出口油压为 150 kPa, 供油需求量为 115 ml/min 时所对应的电压占空比为 41.96.

把上面计算的结果带入式(3)可计算出油泵出口油压为 120 kPa, 供油需求量为 115 ml/min 时所对应的电压占空比为 37.66.

3 燃油泵供油特性的验证实验

3.1 实验验证

用 C 语言编程实现燃油泵供油特性标定实验中的插值算法, 并将代码移植到燃油计量试验装置的控制器中. 通过实验对燃油泵供油特性标定的结果进行验证.

在验证实验中, 调节燃油计量试验装置上的调节旋钮以设定供油需求量, 调节调压阀以改变油泵的出口油压. 比较在不同的油泵出口油压下, 油泵的实际供油量与设定的供油需求量的之间差别, 以验证油泵供油特性的标定结果.

具体实验分为 6 组, 分别在油泵供油需求量为 30, 50, 70, 90, 110, 130 ml/min 下进行. 实验所得到的在不同油泵出口油压下的油泵实际供油量数据如表 2 所示.

以油泵出口油压为 x 轴, 油泵供油量为 y 轴, 把表 2 中的实验数据拟合成曲线, 如图 2 所示.

表 2 验证实验数据表
Table 2 Data of the confirmation experiment

油泵参数		数 值						
供油需求量 30 ml/min	油泵出口油压/ kPa	58	96	137	176	214	253	284
	实际供油量/ (ml/min)	33	27	25	28	35	32	27
供油需求量 50 ml/min	油泵出口油压/ kPa	64	108	147	183	208	242	273
	实际供油量/ (ml/min)	55	52	47	51	46	47	53
供油需求量 70 ml/min	油泵出口油压/ kPa	67	113	143	193	224	252	293
	实际供油量/ (ml/min)	72	72	70	67	64	71	74
供油需求量 90 ml/min	油泵出口油压/ kPa	56	89	124	163	202	239	281
	实际供油量/ (ml/min)	87	90	92	84	86	91	93
供油需求量 110 ml/min	油泵出口油压/ kPa	59	93	121	173	211	244	278
	实际供油量/ (ml/min)	104	112	114	107	105	113	108
供油需求量 130 ml/min	油泵出口油压/ (kPa)	70	106	152	186	219	252	285
	实际供油量/ (ml/min)	131	134	128	125	132	127	129

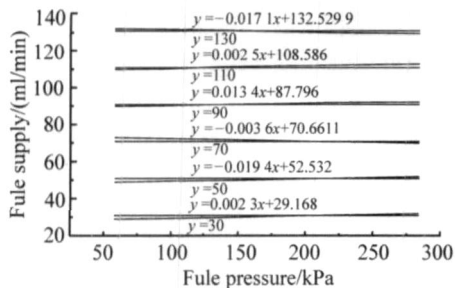


图 2 验证实验数据曲线拟合图

Fig. 2 Results of the data of the confirmatory experiment

从曲线的图像可以看出,在油泵的实际工作中,油泵的实际供油量曲线与设定的油泵供油需求量的曲线基本重合.从曲线的方程可以看出,方程的一次项系数很小,这说明当供油需求量设定后,油泵的实际供油量几乎不受油泵出口油压的影响;方程的常数项与供油需求量的数值十分接近,这说明在油泵的实际工作中,油泵的实际供油量很接近油泵的供油需求量.

验证实验的结果表明,前面的标定实验对燃油泵的供油特性的标定是准确的,实验数据处理过程中的 C 语言代码的编写是科学的.移植了新代码的控制器可以根据油泵的出口油压的变化对电压的占空比进行自动调整,保证了实际供油量符合供油需求量的要求.这表明通过对油泵供油特性的研究,我们对油泵供油量、油泵供电电压、电压占空比和油泵出口油压这四者之间的关系研究已经由定性的估计上升到了定量的计算.

3.2 结果分析

采用了新的计量方法后,燃油计量的准确程度有了显著提高.把分别由现在的计量方法和原先的计量方法所得到的实验数据进行对比分析.

以供油需求量为 110 ml/min,油泵出口油压在 145~205 kPa 范围内变化为例,采用现在的计量方法和原先的计量方法测出的实验数据如表 3 所表示.

以油泵出口油压为 x 轴,油泵供油量为 y 轴,把表 3 中的实验数据拟合成曲线,如图 3 所示.

从图 3 可以看出,当供油需求量给定以后用现在的计量方法所得到的实际供油曲线与供油需求曲线几乎重合.而以原来的计量方法所得到的实际供油曲线会随油泵出口油压的增加而下降,油泵出口油压越大与供油需求量的偏差就越大.这是因为当油泵出口油压增大后,油泵的转速和

油泵的供油效率都会随之下降,而原来的计量方法仍然采用最初的电压占空比,实际供油量必然会减小.

表 3 对比实验数据表

Table 3 Data of the comparative experiment

现方法测出的实验数据		原方法测出的实验数据	
油泵出口 油压/ kPa	实际供油量/ (ml/ min)	油泵出口 油压/ kPa	实际供油量/ (ml/ min)
148	108	151	112
160	112	163	106
176	114	175	95
190	107	189	84
201	105	200	71

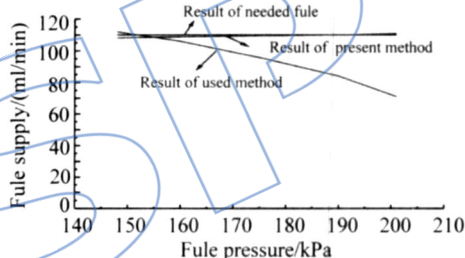


图 3 现方法与原方法计量效果对比图

Fig. 3 Effect of the fuel metering of the present method and the used method

在现在的计量方法中,嵌入到控制器中的控制算法可以根据油泵出口油压的变化对油泵电压的占空比进行修正补偿,使得实际供油量能够满足供油需求量;而原先的计量方法则不具备这种功能.因此现行计量方法的计量精度明显要高于原先的计量方法.

4 结束语

通过对燃油泵供油特性的研究,燃油计量的精确度有了显著提高.在微型涡喷发动机的起动过程中,尽管燃烧室里的压力状态会发生变化,但嵌入到控制器中的控制算法根据压力的变化对油泵电压的占空比进行修正补偿,从而保证了发动机起动过程的快速性与可靠性.

但是,如果燃油泵的工作时间过长,油泵会发热.油泵电机的实际特性因油泵发热而变化,偏离了前面标定试验所得到的特性.油泵特性的改变会导致较大的计量误差,这对重复的起动控制会造成不利影响.因此在以后的工作中有必要对这

种计量方法作进一步的改进.

参考文献:

- [1] Gerendas M, Pfister R. Development of a very small aero engine [R]. 45th ASME international Gas Turbine and Aero-Engine Technical Congress and Exposition, 2000-GT-O536.
- [2] 张天宏, 王继业. 微型涡轮发动机快速原型控制系统 [J]. 航空动力学报, 2007, 22 (2) : 274-279.
ZHANG Tianhong, WANG Jiye. The rapid prototyping control system of micro turbine engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (2) : 274-279. (in Chinese)
- [3] 苏三买. 弹用喷气发动机燃油计量装置的设计 [J]. 机床与液压, 2005, (1) : 64-66.
SU Sanmai. Fuel metering apparatus design for missile turbojet [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2005, (1) : 64-66. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 刘振德, 陈玉春, 蔡元虎. 简单控制规律下涡轮发动机特性的研究 [J]. 推进技术, 2001, 22 (60) : 476-479.
LIU Zhende, CHEN Yuchu, CAI Yuanhu. Research on characteristics of turbojet engine with simple control program [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22 (6) : 476-479. (in Chinese)
- [6] 朴英. 航空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, 2007, 22 (2) : 274-279. (in Chinese)
- [7] 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.
MEI Kunnian. Study on fuel metering and experiment for micro turbine engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)