

台架使用中的热膜式空气流量计修正方法研究

刘逢春, 张俊, 朱锐锋, 孙学东, 张永青

(中国北方发动机研究所, 山西 大同 037036)

摘要: 介绍了 ABB 热膜式空气流量计的工作原理, 引入参比流量计对超差流量计进行误差提取。利用压气机特性曲线剔除因工况不一致引入的流量测量误差。分析了超差流量计信号处理单元对非线性误差修正的不足, 建立了流量计偏差多项式拟合模型, 基于极值理论提取出多项式系数, 并应用于二次仪表。结果表明, 经过修正后的空气流量计满足计量检定要求。

关键词: 柴油机; 空气流量计; 误差修正

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)01-0053-04

Correction Method for Thermal Mass Air Flowmeter in the Application of Test Bench

Liu Fengchun, Zhang Jun, Zhu Ruifeng, Sun Xuedong, Zhang Yongqing

(China North Engine Research Institute, Shanxi Datong 037036)

Abstract: The principle of ABB thermal mass flowmeter is introduced. Error extraction of ultra difference flowmeter was carried out with the employment of the reference meter, and characteristic curve of compressor was employed to exclude air flow measurement errors because of inconsistent conditions. Analysis of the disadvantages of ultra poor flowmeter signal processing unit in the the nonlinear error correction was carried out. Flow deviation polynomial fitting model was established, and extreme value theory was extracted based on polynomial coefficient, and applied to Secondary Apparatus. The results show that the revised air flow meter could meet the measuring inspection requirements.

Keywords: diesel engine; air flow meter; error correction

0 引言

空气流量作为柴油机台架试验中主要测量参数, 在国标和行业标准中多数试验对其测量的准确度均有明确规定^[1,2]。特别是当前空气污染日益严重, 对汽车尾气排放要求越来越严格。对于电子控制喷射式发动机, 为了在各种运行工况下都能获得最佳空燃比, 必须正确地测定每一瞬间吸入发动机的空气量, 并作为电控单元 (ECU) 计算和控制喷油量的主要依据。热膜式流量计由于响应速度较快, 测量范围宽, 可靠性高, 安装简单, 气阻小等优点, 被广泛应用于台架试验中。但是热膜式流量

计受进气环境的影响, 长期使用后因进气污染, 影响测量精度。

本文针对某 ABB 型热膜流量计长达 6 年使用后, 流量计呈现非线性偏差, 无法继续投入使用的问题进行了相关分析, 最终利用后处理二次仪表进行误差补偿, 恢复使用。

1 ABB 热膜式流量计工作原理^[3]

图 1 所示为某型热膜式空气流量计测量原理示意, 其主要建立在热平衡原理基础上。

当气体流过测量探头后, 带走了加热器表面的

热量, 加热器为了恒定温度, 根据温度反馈的结果, 对加热器电压电流调整, 维持设定的温度值。这里将加热的电压电流换算为加热功率, 加热功率与气体流过的质量流量存在一定的关系。通过标定将气体的质量流量与加热功率对应曲线存入处理单元, 从而构成了热膜式空气质量流量测量装置。该种测量方式须要经常对探头表面进行清洁, 以保证设备的精度。但是随着流量计长期使用后, 探头感应部件表面锈蚀, 存在流量与加热功率标定曲线与实际关系曲线不一致的问题, 从而引入了流量测量偏差。

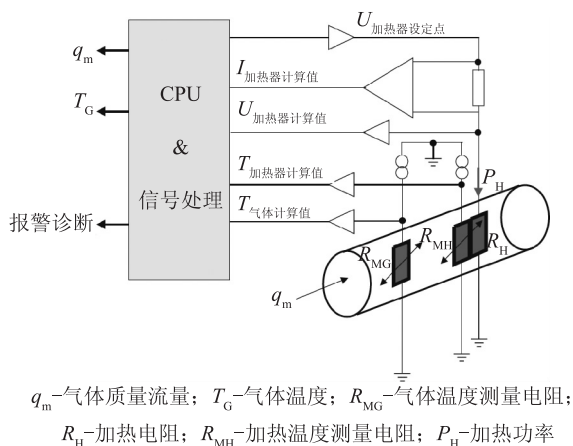


图 1 流量计测量原理图

在流量计信号处理单元中内置了“server”权限, 可调整标定因子(SE)及流量零点(SE), 用于在标定时对流量计进行参数调整, 标定因子参数初始值为 1.000, 流量零点参数初始值为 0.000。当流量计误差满足一阶线性关系时可对其调整。

2 超差流量计误差提取试验设计

2.1 试验室条件

试验室进气系统控制指标见表 1 所示。

表 1 试验室进气系统控制指标

控制参数	指标
进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	25 ± 0.1
进气湿度	$20\% \pm 1\%$
进气压力/kPa	100 ± 0.5

试验室辅助系统控制指标见表 2 所示。

表 2 试验室辅助系统控制指标

控制参数	指标
进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	75 ± 1
中冷器出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	50 ± 1

2.2 试验用发动机及测量条件

验证流量计偏差试验用发动机为某型增压发动机, 这是因为非增压发动机不在同一时刻进行试验时, 发动机状态的变化(如水温、油温等)与空气流量之间的关系较难获取, 需要依赖于复杂的热力学计算过程; 且所需计算参数较多, 在参数测量过程中存在多次引入的测量系统误差, 较难保证修正后的精度。而选用增压发动机其优点为压气机叶轮与废气涡轮叶轮属同轴运转, 将发动机等效为燃气动力源整体, 两次试验的发动机状态不一致性直接表现在增压器转速变化和增压压比变化, 利用试验获得的压气机特性曲线图可直接获得发动机工况不一致引入的空气流量测量偏差。

增压器测速装置采用激光光强法^[4], 激光探头通过压气机壳开孔方式安装于叶轮紧固螺钉法线侧。传感器输出信号直接接入高速频谱分析仪, 频率分辨率为 0.1 Hz, 因此可获得较高的增压器转速测试精度。

用作参比测量的空气流量计型号与须修正流量计型号一致, 检定曲线见图 2 所示, 在 20 ~ 3 200 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)测量范围内, 精度优于 0.5%。其他测量参数及精度指标见表 3 所示。

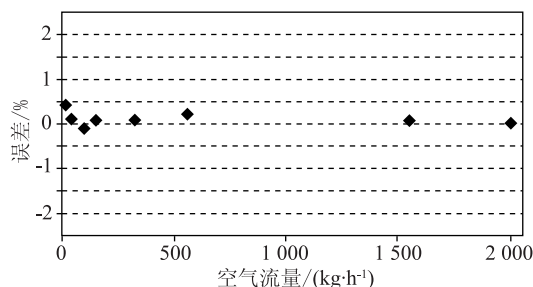


图 2 空气流量计检定曲线

表 3 试验过程测量参数及精度

测量参数	测量范围	准确度
发动机转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	0 ~ 4 000	± 1
发动机扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	$\pm 3\,000$	± 5
压气机口静压/kPa	-10 ~ 0	± 0.05
压气机后压力/kPa	0 ~ 300	± 1.5
增压器转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	0 ~ 120 000	± 1
参比空气流量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	0 ~ 3 200	± 9

2.3 试验设计

依照流量计测量范围分档, 进行发动机工况选择。测量工况点不少于 7 个点。发动机预热后进入运行工况(见表 4 所示)。

表 4 发动机试验工况

工况	发动机转速/(r·min ⁻¹)	发动机扭矩/(N·m)
1	800	10
2	1 723	13
3	1 900	409
4	1 900	953
5	1 900	1 470
6	1 900	1 868
7	2 200	1 748

3 流量计误差分析

3.1 因工况变动引入的误差剔除

图 3 示出两次试验增压器转速和空气流量数据曲线对比。从图中可知在 1 900 (r·min⁻¹)、1 868 (N·m) 工况点，两次试验增压器转速相差最大，差值可达 3 000 (r·min⁻¹)，其他转速工况点增压器转速均有不同程度的偏差，若直接引用两次试验所测空气流量进行超差流量计修正，存在因工况不一致引入的误差，较难保证修正后空气流量计测量的准确度。因此，须要将两次试验结果折合成同一状态下进行对比。

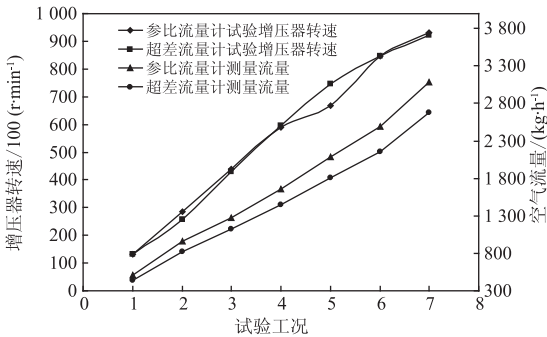


图 3 两次试验参数对比

将压气机的性能曲线输入计算机中，输入时，把性能曲线中的 4 个参数中的压比 π_b 和折合空气流量 q_{mb} 划分为 $i \times j$ 个间隔，把压气机效率 η_b 和转速 n_b 分别用式(1)、(2)两个二维数组输入，利用二维线性插值最终获得图 4 所示空气流量随增压器转速变化曲线，提取出对应于超差流量计试验时空气流量计算值，实现两次试验工况空气流量对比的一致性。

$$\eta_b = f(q_{mb} \sqrt{T_a/p_a}, \pi_b) \tag{1}$$

$$n_b = f(q_{mb} \sqrt{T_b/p_b}, \pi_b) \tag{2}$$

3.2 超差流量计误差分析

由于流量计信号处理单元内部具有线性修正功能，所以首先对线性修正的适用性进行研究。在剔除因工况变动引入的误差后，构建超差空气流量计

误差线性回归模型 $y = 0.13x + 2.06$ ，见图 5 所示。对超差流量计进行线性误差补偿，则有不不确定计算模型：

$$u_{rel} = u_{rel}(z) + u_{rel}(c)$$

$u_{rel}(z)$ 为参比流量计测量引入的误差， $u_{rel}(c)$ 为超差流量计线性修正后引入的误差。通过标准差计算获得 $u_{rel}(c) = 0.6\%$ ，最终确定线性修正后的流量计不确定度 $u_{rel} = 0.3\% + 0.6\% = 0.9\%$ ，其中因修正引入的误差占总权重的 67%。若以线性误差补偿，超差流量计需要降级使用，因此线性修正法不适用于该流量计。

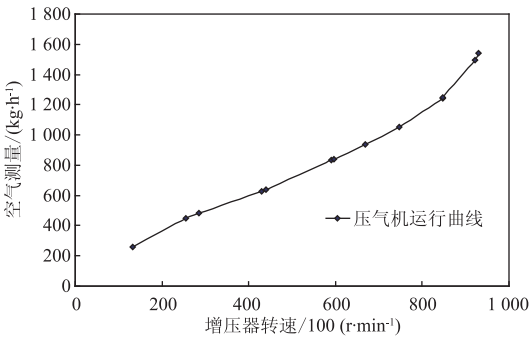


图 4 增压器压气机运转特性

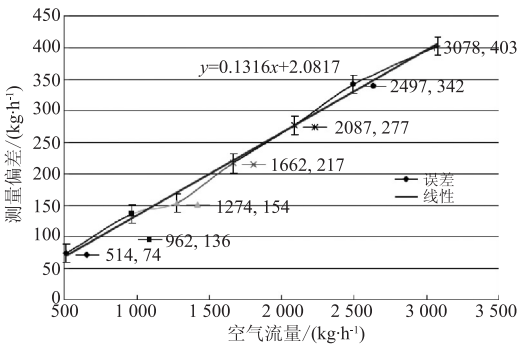


图 5 超差流量计线性修正

4 基于多项式拟合算法的非线性误差处理

利用多项式拟合流量计偏差方法，出发点源于多项式系统对于一般非线性系统在硬件上较易实现，且国内有成品的二次仪表，仅需要提取出对应阶数下的多项式系数并输入仪表中。

设超差流量计偏差的函数关系 $y = f(x)$ 的一组为 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, 7$)，其中 x_i 为理论真值， y_i 为流量测量偏差，欲求一个 m ($m < 7$) 阶的多项式(3)，必须使得偏差(4)的平方和(5)为最小。

$$P_m(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \tag{3}$$

$$r_i = P_m(x_i) - y_i, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \tag{4}$$

$$R = \sum_{i=0}^7 r_i^2 = \sum_{i=0}^7 [P_m(x_i) - y_i]^2 \tag{5}$$

根据极值理论, 要使 R 达到极小, 必有:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial a_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial R}{\partial a_m} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则可以得到 $m+1$ 阶正则方程组:

$$\begin{cases} a_0(n+1) + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i + \dots + a_m \sum_{i=0}^7 x_i^m = \sum_{i=0}^7 y_i \\ a_0 \sum_{i=0}^7 x_i + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i^2 + \dots + a_m \sum_{i=0}^7 x_i^{m+1} = \sum_{i=0}^7 x_i y_i \\ \dots \\ a_0 \sum_{i=0}^7 x_i^m + a_1 \sum_{i=0}^7 x_i^{m+1} + \dots + a_m \sum_{i=0}^7 x_i^{2m} = \sum_{i=0}^7 x_i^m y_i \end{cases} \quad (7)$$

解方程组可得各阶多项式系数, 从而求得多项式拟合曲线 $P_m(x)$, 见图 6 所示。对超差流量计进行多项式误差补偿后, 同理计算不确定度, 结果 $u_{\text{rel}} = 0.3\% + 0.2\% = 0.5\%$, 修正引入的误差占总权重的 40%, 且修正后的流量计测量精度在认证允差范围内。

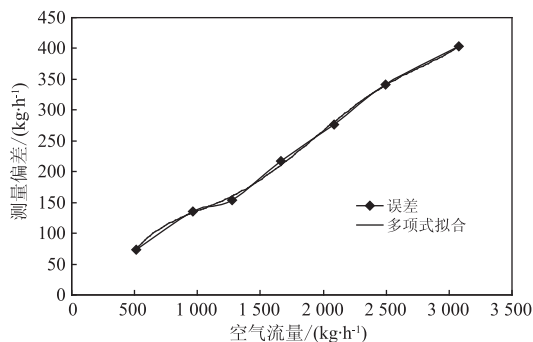


图 6 超差流量计多项式修正

5 计量检定验证

对修正后的流量计经过某计量院试验室检定后, 获得图 7 所示检定曲线, 检定不确定度 $u_{\text{rel}} = 0.5\%$, 满足 0.5 级使用要求。由图 7 可知, 修正后的流量计在 $645 (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 检定点偏差较大, 为 $12 (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 。这是由于用作参比流量计在该点有

相对较大的误差, 且为正差(见图 2 所示), 与利用多项式进行非线性拟合在该流量点修正后偏差一致, 同样为正差(见图 6 所示), 从而导致在该点偏差较高。因此要提高修正精度, 需要参比空气流量计具有较高准确度。

本次修正中由参比流量计引入的不确定度权重占 60%, 修正后的流量计检定结果在准确度边界上。因此, 在选定用作参比流量计时, 需要优于被修正流量计设计准确度等级 2/3 范围内。

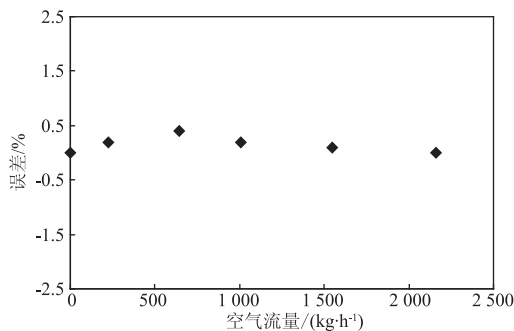


图 7 修正后的流量计检定结果

6 结 论

验证了利用多项式拟合进行非线性空气流量计修正的可行性。通过对长期使用后的流量计进行修正, 可有效延长流量计使用寿命, 从而降低试验成本。

为了获得高的修正精度, 需要选用较高准确度的参比流量计。可以利用不确定度计算的方法, 计算出用作参比流量计在整个修正过程中引入不确定度所占的权重, 作为选择依据。

参考文献

- [1] GB/T 6072.3-2003, 往复式内燃机 性能 第 3 部分; 试验测量[S].
- [2] JB/T 9747-2005, 内燃机空气滤清器性能试验方法[S].
- [3] ABB Automation Products GmbH. Thermal mass flowmeter [R]. 2005.
- [4] 刘逢春. 增压器转速测速系统设计[A]. 中国测试年会[C]. 2012:18-20.