

非道路电控柴油机排放耐久台架试验的替代法研究

高树征¹, 徐一红², 刘芳¹, 吕殿祥³, 孟庆芦⁴

(1. 山东交通学院, 山东 济南 250357; 2. 山东管理学院, 山东 济南 250357;
3. 广东德力柴油机有限公司, 广东 佛山 528303; 4. 山东鑫亚工业股份有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要:从节能降耗和能量回收的角度,研究了非道路电控柴油机排放耐久台架试验法的等效工程替代法,探讨了等效试验的判定原则,建立起初步的数值关系模型。基于ECU采集的柴油机运行相关参数,同时结合标定和校准数据库,计算电控柴油机的输出功和燃油消耗量。台架试验与工程替代试验的对比测试在电控共轨188F型柴油机上进行。结果表明:工程替代法精度上能满足一般工程需要。从而证明了在一定条件下,非道路电控柴油机的排放耐久试验采用工程等效替代法技术上是可行的,应用价值巨大。

关键词:电控柴油机;排放耐久试验;工程替代法

中图分类号:427+.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4357(2018)02-0025-05

Study on Substitution Method of Emission Durability Bench Test for Non-Road Electronically-Controlled Diesel Engines

Gao Shuzheng¹, Xu Yihong², Liu Fang¹, Lyu Dianxiang³, Meng Qinglu⁴

(1. ShanDong JiaoTong University, Shandong Jinan 250357;
2. Shandong Management University, Shandong Jinan 250357;
3. Guangdong Delux Diesel Engine Co., Ltd., Guangdong Foshan 528303;
4. Shandong Xinya Industrial Co. Ltd., Shandong Liaocheng 252000)

Abstract: To achieve the saving, reduction and recovery of energy, the equivalent engineering alternative method of non-road diesel engine emission endurance bench test was studied. The determination principle of equivalent test was discussed, and the preliminary numerical relationship model was established. Based on the operation parameters of diesel engines collected by ECU, and combined with calibration database, the output power and fuel consumption of electronically controlled diesel engine were calculated. The bench test and engineering alternative test was carried out on an electronically-controlled common rail 188F diesel engine. The results show that the engineering alternative method could meet the normal engineering requirements. Therefore, it is proved to be feasible to apply the engineering equivalent alternative method to the emission endurance test of non-road electronic controlled diesel engine under certain conditions, and is very valuable in application.

Key words: electronically-controlled diesel engine; emission endurance test; engineering alternative method

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 国家社会科学基金项目(16BGL181); 山东省高校科研发展计划(科技)项目(J13LC51); 山东省高校科研发展计划(科技)项目(J14LN17); 山东省科技厅星火计划项目(2011XH17006); 济南市高校院所自主创新计划项目(201401213)。

作者简介: 高树征(1972-), 男, 应用技术研究员, 主要研究方向为内燃机测试、排放控制、燃烧系统优化、电控燃油系统标定及非标测试设备开发等, gszsir@163.com。

0 引 言

自 GB20891-2014 排放法规实施以来,为满足更严格的尾气污染物排放限值要求,柴油机生产企业纷纷选择技术升级。其中柴油机电控技术在改善柴油机动力性、经济性和排放性方面效果显著,得到了广泛应用。

GB20891-2014 排放法规提出了对柴油机排放耐久性考核的技术要求,例如:功率大于 37 kW,耐久考核时间应不低于 2 000 h。此外,GB20891-2014 附件 BD. 2.1 条款明确规定了“在发动机台架上运行耐久性试验”。发动机台架虽然能够保证耐久试验的普适性,但是我国目前进行这些耐久试验的发动机台架绝大多数都是水力测功机台架,功率越大越是如此,柴油机耐久试验消耗的燃油全部都变成热能,白白耗散掉了。而能够回收耐久试验产生的能量,并进行逆变发电的交流电力测功机台架,由于价格高昂,目前应用极少。非道路用柴油机的特点是产品品种多样,用途广泛,生产企业众多,功率覆盖范围从几千瓦到几兆瓦。如果从产品的技术开发验证性耐久试验算起,一直到正式的排放法规认证耐久试验完成,这期间消耗的燃油总量非常大,大功率柴油机更为明显。这些能量如果都成为无用功,浪费严重,不符合节能减排的社会发展趋势。所以研究排放耐久台架试验的等效工程替代法,具有非常大的实用价值。

电控柴油机为这种等效工程替代法的研究提供了强大的技术支撑和简单的实现手段。因为电控柴油机采用了科技含量更高的数字化电控技术(电子传感器、电子控制器和电子执行器)取代原有的机械控制技术,具有了更高的控制精度和更齐全的控制功能。这种高新技术的换代,使柴油机得以数字化,从而可以用软件的手段来实现传统试验模式中必须要靠硬件来完成的功能。

1 电控柴油机的数字化优势

电控柴油机的最大特点是控制方式实现了电气化和数字化,比机械控制方式更快速准确,功能全面。电控柴油机中各种电子传感器采集转速、油门、温度、压力等信号,经 AD 模块转换成数字量传递给 ECU 控制器,ECU 控制器将这些输入信号数字量按某种控制策略进行计算,得到输出信号数字量,经 DA 模块转换后传递给各种电子执行器,从而实现对柴油机工况的调整和控制。显然,电控柴油机的所有工作状态,在 ECU 控制器中都是数

字化的。这种数字化柴油机能够在全转速范围内和全负荷范围内实现对喷油量和喷油正时的全程可准确控制,获得最佳燃烧状态。此外,通过 ECU 控制器的监控软件,可以监测显示电控柴油机运转中各参数数值,存储有关使用状况信息的历史记录,供故障诊断、排查、分析等各种用途。而且,电控柴油机的数据通讯以 CANBUS 技术为主,遵循 J1939 国际公认标准协议,可以据此开发具有专门用途的 ECU 信息采集与记录处理软件。

2 耐久试验的等效性原则

非道路柴油机的排放耐久试验是在已经成型的产品上进行的排放劣化特性试验,通过周期性测试并记录耐久试验期间的排放试验结果,计算确定排放指标的劣化趋势和有效寿命期终点的排放值。按 GB20891-2014 规定要安排 5 个以上间隔点的台架排放试验。这种耐久试验不同于一般意义上的产品整机或零部件安全性和耐久性考核试验,其前提条件是整机和零部件的可靠性已经通过验证,试验重点是确定产品的排放劣化特性和寿命期终点的排放值。之所以要求这种排放耐久性试验在测功机台架上进行,主要是为了保证试验的普适性,即试验可控性和试验精度的保证。台架试验是量化模拟真实动力机械的实际工作状况,其试验循环工况的选取应符合柴油机的使用特性。所以如果能够实现在真实动力机械上准确量化其工作状况,而且并不刻意要求试验时间的节省,这种排放耐久试验也不一定非在测功机台架上进行。电控柴油机的所有工作状态在 ECU 控制器中都是以数字量的形态呈现的,并且可以通过 ECU 监控软件读取、记录和存储,这种特性是研究排放耐久试验的等效工程替代法的技术基础。

当然,不管采用何种工程方法来替代台架试验方式,都应该达到和 GB20891-2014 规定的标准方法同样的试验效果,也就是要遵循试验的等效性原则。不同的试验方法中,如果柴油机发出的功的总和相同,则认为它们符合“等功原则”;如果柴油机消耗的燃油总和也相同,则认为它们符合“等油耗原则”。柴油机的输出功和燃油消耗量之间存在相关性,但一般优先用等功原则来判断试验的等效性。

3 数值关系模型研究

3.1 模型的分析建立

根据内燃机原理:柴油机输出功与燃油消耗量

之间的关系可以用下列公式来表达:

$$W_e = \frac{Z}{2n} \eta_m \eta_i m_f H_u \quad (1)$$

式中: W_e 为单缸循环功; Z 为活塞行程数; n 为转速; m_f 为循环供油量; H_u 为燃油热值; η_m 为机械效率; η_i 为指示效率。

柴油机的性能参数中有效输出功率也可以通过测功器的吸收功率计算得到, 其公式为:

$$N_e = 2\pi n M_e / 1\,000 \quad (2)$$

式中: N_e 为有效输出功率; π 为圆周率; n 为转速; M_e 为扭矩。

由 (1) 式可得: $N_e = W_e \frac{2n}{Z} = \eta_m \eta_i m_f H_u \quad (3)$

以单缸柴油机为例, 综合 (2) 和 (3) 式, 得 $N_e = 2\pi n M_e / 1\,000 = \eta_m \eta_i m_f H_u \quad (4)$

(4) 式清晰表明了 in 柴油机和燃油特性确定的情况下, 功率 N_e 、扭矩 M_e 、转速 n 、循环油量 m_f 这 4 个参数所具有的对立关系。因此对于电控柴油机来说, 只要获知了 ECU 控制器中实时的“转速 (n)”和“循环供油量 (m_f)”的信息, 就能计算确定“输出功率 (N_e)”和“扭矩 (M_e)”的大小, 从而实现电控柴油机脱离测功台架, 仅依靠 ECU 信息的采集和处理, 也能间接确定其输出的有效功率。

在工程实践中, 必须将 (4) 式简化应用。具体方法是: 依据电控柴油机的台架试验测量数据, 并加以统计整理, 构建出一套“转速 (n) _ 扭矩 (M_e) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 实测油耗量 (m_h) _ 实测功率 (N_e)”的对立关系基准数据表和误差波动范围修正表, 形成查询数据库。这样数据库中的每一组转速 (n) 和 ECU 监控油量 (m_u), 都确定了电控柴油机的一个运行状态点, 以及这个状态点所对应的输出功率和燃油消耗量。

3.2 模型的计算研究

一般意义上的电控柴油机的 ECU 监控油量 (m_u) 是单缸每循环喷油量。如果以每个工作循环为最小单位, 则可以构建出“转速 (n) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 循环功”的瞬态数值关系模型, 通过电控柴油机逐个工作循环的数据累加计算就可以得到总功。但实际上, 即使柴油机处于非常稳定的工作状态, 其工作循环也是在瞬态波动变化着的, 每个工作循环之间都存在着微观上不可忽视的误差。这种瞬态数据的累加会成倍地放大微观累计误差值, 造成瞬态数据计算结果与实测统计平均值结果之间的巨大差异。因此, 必须要从实测数据的

宏观统计入手, 进行“转速 (n) _ 扭矩 (M_e) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 实测油耗量 (m_h) _ 实测功率 (N_e)”对应关系模型数据库的构建, 使其能够与测功机和油耗仪的实测数据相一致。

3.3 模型的试验校准

使用“转速 (n) _ 扭矩 (M_e) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 实测油耗量 (m_h) _ 实测功率 (N_e)”对应关系模型数据库之前, 必须要通过台架试验校准, 使之能符合实测结果。校准试验所用的测功机控制方式要设置成“转速/扭矩”模式。试验前首先要在柴油机的全转速范围内划分足够数量的转速点, 然后在每一个固定转速下的全负荷范围内划分足够数量的扭矩点。每一个转速点和扭矩点组成的试验工况, 要在稳态下测量足够长的时间, 计算出这段时间内的转速 (n)、ECU 监控油量 (m_u)、实测功率 (N_e)、实测油耗量 (m_h) 的累计平均值, 以及各个参数的波动变化率。所有的这些转速点和扭矩点组成的试验工况的实测值, 就构成了校准后的“转速 (n) _ 扭矩 (M_e) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 实测油耗量 (m_h) _ 实测功率 (N_e)”的对立关系模型数据库。利用校准后的数据库模型, 辅以适当修正系数, 必要的插值算法, 就可实现根据转速 (n) 和 ECU 监控油量 (m_u) 的信息, 通过数据库查询和修正计算, 确定输出功率大小和消耗油量。

3.4 模型的其它修正

从理论公式 (4) 可以看到: 要对模型进行精确的修正是很困难的, 比较简单的做法是引入一些工程经验系数来构建误差修正数据库, 来补偿由于压力、温度等外界环境影响以及零部件性能老化等因素造成的模型计算误差。但对于排放耐久性试验, 有一种非常有利的情况, 就是整个耐久试验期间要安排 5 个以上间隔点的台架排放试验来确定排放劣化趋势, 这些中间测试点的试验数据, 也为模型数据库提供了连续的校准修正, 以及正确的误差补偿。

3.5 模型的结果计算

模型结果计算的原理是设置一个固定的采样间隔时间, 并假定连续采样的两个工况之间呈线性变化, 取二者的平均值作为采样间隔时间内不变的数量, 通过数据的累加计算得出最终结果。仍然以单缸电控柴油机为例, 如果通过校准试验确定了其“转速 (n) _ 扭矩 (M_e) _ ECU 监控油量 (m_u) _ 实测油耗量 (m_h) _ 实测功率 (N_e)”的关系模型数据库, 则根据 ECU 监控软件连续采集的转

速 (n) 和监控油量 (m_u) 信息, 调用模型数据库计算得到输出的总功和燃油总消耗量。

$$\text{总功} = \sum_{m=1}^n \frac{\text{模型功率}_k \times \text{修正系数}_k + \text{模型功率}_{k+1} \times \text{修正系数}_{k+1}}{2} \times (\text{时刻}_{k+1} - \text{时刻}_k)_m \quad (5)$$

$$\text{总油量} = \sum_{m=1}^n \frac{\text{模型油耗}_k \times \text{修正系数}_k + \text{模型油耗}_{k+1} \times \text{修正系数}_{k+1}}{2} \times (\text{时刻}_{k+1} - \text{时刻}_k)_m \quad (6)$$

式中: k 表示第 k 个采样时刻, m 表示两个相邻时刻差的计算编号, n 表示采样时刻间隔的总数。

其它可能用到的计算公式有:

$$\text{一个工作循环的时间 (s)} = 120 / \text{转速 (r} \cdot \text{min}^{-1}) / \text{活塞冲程数} \quad (7)$$

$$\text{单缸每循环实测供油量 (mg)} = \text{油耗仪流量 (mg} \cdot \text{h}^{-1}) / \text{缸数} / \text{转速 (r} \cdot \text{min}^{-1}) / \text{冲程数} / 30 \quad (8)$$

4 试验验证及结果分析

4.1 验证试验方案设计

由于实际应用的复杂性, 验证试验的方案只选取了一种最简单的情况, 即恒速用途的单缸柴油机。样机型号为 188F, 单缸风冷, 高压共轨电控系统, 标定功率 6.6 kW, 标定转速 3 600 (r · min⁻¹)。

进行对比试验的两台样机型号相同, ECU 数据相同, 台架试验数据差异极小。其中一台样机 (1#) 作为标准样机, 安装在测功台架上, 按恒速 5 工况循环运行 500 h 台架耐久试验。另一台样机 (2#) 作为台架耐久试验工程替代方案的研究样机, 以水泵为工作负载, 按恒速单工况持续运行模式, 进行 500 h 等效耐久试验。耐久试验等效性的判定优先采用“等功原则”, 并辅以“等油量原则”做参考依据。

此外, 1#和 2#两台样机按照“等功原则”在整个耐久试验期间分别进行 6 次台架排放测试, 同时进行台架性能试验的数据比对, 并根据试验结果来评估每台样机的状态变化情况和性能差异大小, 以此来判定两台样机的等效耐久比对试验的可信性和准确性。

以水泵为工作负载的 2#样机, 为了排除实际应用中的干扰, 保证试验过程的稳定性和数据处理的简单化, 在每个耐久时间段内只持续运行一个固定的工况点; 并且为了保证试验结果的普适性, 专门为 2#样机设计了两种不同的运行工况, 在不同的耐久时间段内交替进行这两种不同工况的试验, 以进行分析验证工作。为数据对比方便起见, 2#样机的两种不同的运行工况点均参

照 1#样机的恒速 5 工况循环中相对应的运行工况点来选定。

表 1、表 2 列出了两台对比试验样机的耐久工况设计和有关参数的对比情况。

表 1 测功台架 500 h 标准耐久试验工况设计 (1#样机)

工况号	1	2	3	4	5
转速 (r · min ⁻¹)	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
负荷率	100%	75%	50%	25%	10%
功率/kW	6.61	4.95	3.32	1.65	0.66
小时油耗/ (kg · h ⁻¹)	1.84	1.43	1.08	0.87	0.71
ECU 监控油量/ (mg · cyc ⁻¹)	20.35	14.68	8.14	5.47	3.58
ECU 监控轨压/MPa	83.1	74.7	38.5	36.2	32.1
ECU 主喷提前角/°CA	4.34	3.59	7.41	10.28	10.88
运行时间/min	15	75	90	90	30
累计总功/ (kW · h)	15.63				
累计消耗油量/kg	5.53				
累计 ECU 监控油量/kg	4.93				
监控油量累计值/实测油量累计值	0.89				

表 2 抽水泵 500 h 等效耐久试验工况设计 (2#样机)

工况类别 (单点持续)	A 工况	B 工况
转速/ (r · min ⁻¹)	3 600	3 600
负荷率	75%	50%
功率/kW	4.93	3.31
小时油耗/ (kg · h ⁻¹)	1.45	1.11
ECU 监控油量/ (mg · cyc ⁻¹)	14.71	8.19
ECU 监控轨压/MPa	74.5	38.2
ECU 主喷提前角/°CA	3.59	7.41
运行时间/min	190	280
累计总功/ (kW · h)	15.61	15.45
累计消耗油量/kg	4.59	5.18
累计 ECU 监控油量/kg	5.03	4.13
监控油量累计值/实测油量累计值	1.10	0.80

说明: 2#样机的 A、B 工况是以和 1#样机的 5 工况循环试验的累计总功相等为原则单独设计的

综合表 1 和表 2 的数据, 可以看出以下几点:

(1) 2#样机的 A 工况、B 工况分别取自 1#样机的第 2 工况、第 3 工况, 这样非常有利于两台样机的试验数据对比, 以及样机状态变化后的差异性判断。

(2) 1#样机进行完一个标准 5 工况试验循环的运行总时间是 300 min, 累计总功 15.63 (kW · h); 根据等功原则: 2#样机只按 A 工况运行需 190 min, 累计总功 15.61 (kW · h); 只按 B 工况运行需 280 min; 累计总功 15.45 (kW · h)。依照这个时间比例进行放大, 就可得到各个样机不同工况下的耐久试验运行时长。

(3) 不同工况下的 ECU 监控油量和实测油量之比差异较大, 不仅反映出 ECU 的监控油量只是一个名义值, 并没有经过实测校正; 还反映出不同工况下的机械效率和燃烧热效率的不同。

(4) 专门引入了参数“ECU 监控油量累计值/实测油量累计值”, 这个比值在对比试验中具有重要作用, 可用来辅助判断耐久试验期间两台样机的状态变化情况和性能的一致性。

4.2 1#样机测功台架耐久试验

在测功机台架上进行 1#样机耐久试验, ECU 监控软件同步采集记录每个工况下的转速、ECU 监控油量、ECU 监控轨压、实测功率、实测油耗、运行时间等参数; 并对测量数据进行分析处理, 比较验证每个工况下的 ECU 监控油量波动范围与实测功率波动范围的对应关系。耐久试验过程中, 每个试验时间段结束后计算有关数据的累计值, 进行试验结果的评估和分析。

分析试验数据可得出: 500 h 耐久试验期间, 1#样机的“模型总功累计值/实测总功累计值”的比值变化范围为 0.95 ~ 1.01, 说明输出总功的计算值和实测值的误差不超出 $\pm 5\%$; 而“监控油量累计值/实测油量累计值”的比值变化范围为 0.88 ~ 0.90, 基本以表 1 的数值 0.89 为平均值, 且波动轻微, 说明 1#样机状态正常, 并进一步从“等油耗原则”的角度辅助证明了模型计算总功的正确性。

4.3 2#样机抽水泵负载等效试验

2#样机以抽水泵为工作负载进行等效耐久试验。通过 ECU 监控软件观察和记录 2#样机的工作状态参数, 并调整和锁定 2#样机的电子油门位置, 使之稳定运行在设定的工况点。根据该工况点的模型数据库, 采集 ECU 监控信息, 计算 2#样机功率和累计输出的总功。此外, 对 2#样机消耗的燃油总量进行实测, 作为试验等效判断的参考数据。

分析试验数据并加以对比得出: 500 h 耐久试验期间, 2#样机计算得到的“累计模型总功”和 1#样机非常一致, 说明输出总功的计算值和实测值基本一致。另外, 在 A 工况下, 2#样机的“监控油量累计值/实测油量累计值”的比值为 1.10, 和表 2 的数值 1.10 完全一致; 而在 B 工况下, 2#样机的“监控油量累计值/实测油量累计值”的比值变化范围为 0.78 ~ 0.79, 和表 2 的数值 0.80 差别很小。这些数据都说明 2#样机状态正常, 通过模型计算得出的总功正确。

4.4 两台样机的状态对比试验

每个耐久时间段終了, 在测功台架上进行 1#和 2#两台样机的对比测试。试验工况选择标定转速下 100%, 75%, 50% 负荷点, 每个工况都测量记录转速、功率、实测油耗量、ECU 监控油量等参数。通过这三个工况点的试验数据的比较, 确定 1#和 2#两台样机对比试验样机的状态变化情况是否正常, 以保证试验结果的可信性和准确性。

分析试验数据得出: 500 h 耐久试验期间, 1#样机和 2#样机的性能变化差异极小, 其中功率最大差异不超出 $\pm 2\%$, 燃油消耗量最大差异不超出 $\pm 5\%$, 而 ECU 监控油量差异不超出 $\pm 2\%$, 这些数据充分证明了两台对比样机的一致性和对比试验结果的可信性。

4.5 试验结果综合分析

综合以上数据分析, 可得到对比试验验证结果如表 3 所示。可以看到: 利用模型计算间接测功的误差不超出 $\pm 5\%$, 计算出的燃油消耗量的最大误差也在 $\pm 5\%$ 以内。利用模型数据库来间接测功的精度基本能满足工程要求; ECU 监控油量和实测油耗量之间具有非常明显的线性对应关系。也表明: 利用电控柴油机的数字化技术优势来革新传统试验方式的工程实践是完全可行的。

表 3 1#和 2#样机的耐久试验结果数据综合分析

参数名称		模型总功累计值/实测总功累计值			监控油量累计值/实测油量累计值		
样机编号		1#	2#[注]		1#	2#	
试验工况		5 工况循环	A 工况	B 工况	5 工况循环	A 工况	B 工况
模型数据库的标定结果		1.00	1.00	0.99	0.89	1.10	0.80
耐久试验 段划分/h	0 ~ 100	0.95	/	1.00	0.88	/	0.78
	100 ~ 200	1.00	0.99	/	0.89	1.10	/
	200 ~ 300	1.01	/	0.99	0.89	/	0.79
	300 ~ 400	0.98	1.02	/	0.90	1.10	/
	400 ~ 500	0.99	/	1.00	0.90	/	0.79

注: 基于等功原则, “模型总功累计值/实测总功累计值”的计算栏中, 2#样机的“实测总功累计值”用 1#样机的“模型总功累计值”来代替, 这样也便于比较 1#和 2#的“模型总功累计值”的差别。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 李德桃. 柴油机低温启动的基础研究和改善措施 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 靳尚杰, 王振涛, 丁仕峰, 等. 低气压、低温对柴油机启动性能影响分析 [J]. 军事交通学院学报, 2010, 12 (2): 63-66.
- [4] WEILENMANN M, FAVEZ J Y, ALVAREZ R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43 (15): 2419-2429.
- [5] TIAN J Y, XU H M, SAKUNTHALAI R A, et al. Low ambient temperature effects on a modern turbocharged diesel engine running in a driving cycle [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2014, 7 (3): 726-736.
- [6] 苏岩, 刘忠长, 韩永强, 等. 进气温度对直喷式柴油机冷启动初始期燃烧和排放的影响 [J]. 内燃机工程, 2007, 28 (6): 28-32.
- [7] RAMADHAS A S, Xu H, LIU D, et al. Reducing cold start emissions from automotive diesel engine at cold ambient temperatures [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16 (12): 3330-3337.
- [8] PAYRI F, SERRANO J R, RODRIGUEZ L F, et al. Study of potential of intake air heating in automotive DI diesel engines [R]. SAE Paper 2006-01-1233, 2006.
- [9] 杜巍, 黄伟伟, 何圣华, 等. 进气预热对柴油机启动过程动力性能影响的试验分析 [J]. 车用发动机, 2015 (2): 28-32, 39.
- [10] 董素荣, 张恒超, 靳尚杰, 等. 进气预热对车用柴油机低温启动性能影响的研究 [J]. 军事交通学院学报, 2009, 11 (6): 41-44.
- [11] 罗涛, 王忠, 王林, 等. 采用进气火焰预热柴油机低温启动的研究 [J]. 内燃机工程, 2006, 27 (5): 37-40.
- [12] 袁雄, 李文奎, 王俊涛. 火焰进气预热塞安装位置的优化试验研究 [J]. 重型汽车, 1994 (2): 13-15.

(上接第 29 页)

5 结 论

利用电控柴油机的数字化技术优势, 通过建立“转速 (n) — 扭矩 (M_e) — ECU 监控油量 (m_u) — 实测油耗量 (m_h) — 实测功率 (N_e)” 的对应关系模型数据库, 进而实现间接的功率测量和计算的等效工程替代法, 在一定条件下, 其精度能够满足工程需要。

非道路电控柴油机排放耐久台架试验法的等效工程替代法在试验无用能量的回收、试验成本的节省、减排降耗等方面优势明显, 具有巨大的实践应用价值, 但其普适性须要大量的工程应用研究试验数据来证明和支撑。

参考文献

- [1] 环境保护部、国家质量监督检验检疫总局. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法 (中国第三、四阶段): GB20891-2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [2] 李铁军. 柴油机电控技术实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 王尚勇. 现代柴油机电控喷油技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 刘永长. 内燃机原理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [5] 饶运涛. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.