性能与排放

火焰进气预热塞电加热特性分析

张乾坤[1]，樊　丰[2]，王　奘[3]，杜　巍[1]

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081;2. 中国人民解放军驻 5460 厂军事代表室,河北 石家庄 050081;3. 河北华北柴油机有限责任公司,河北 石家庄 050081)

摘　要: 在自行建立的火焰进气预热塞试验台上,研究了不同通电电压、空气流速、环境温度下火焰进气预热塞的电加热特性,得出预热塞电功率、预热塞电热棒表面温度随加热时间的变化规律。结果表明:随着时间的推移,预热塞的电功率表现出先期快速下降,后期缓慢下降的特性;预热塞电热棒表面温度表现出先期快速上升,后期缓慢上升的特性。随着通电电压的增大,电功率先期下降的速度越快,电热棒表面温度先期上升的速度越快,加热 90 s 时,预热塞的电功率和电热棒表面温度随着电压的增加而近似线性增加;随着空气流速的增加或环境温度的下降,电热棒表面温度先期上升的速度变慢,加热 90 s 时,电热棒表面温度随着空气流速的增加或环境温度的下降而近似线性下降。

关键词: 火焰进气预热塞;电加热特性;电功率;表面温度

中图分类号:TK423.4^{+}4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001 - 4357(2018)02 - 0030 - 06

Study on the Electro-Thermal Characteristics with an Flame Inlet Preheating Plug

Zhang Qiankun[1], **Fan Feng**[2], **Wang Yan**[3], **Du Wei**[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Military Representative Office of PLA in 5460 Factory, Hebei Shijiazhuang 050081;
3. Hebei Huabei Diesel Engine Co., Ltd., Hebei Shijiazhuang 050081)

Abstract: The electro-thermal characteristics of the flame inlet preheating plug under the conditions of different power supply voltage, air flow rate and ambient temperature were studied on the self-established test platform for flame inlet preheating plug. And the change laws of the preheating plug's electric power and the electro-thermal bar's surface temperature with heating time were measured. The results indicate that as time goes by, the electric power of the preheating plug shows rapid decline in the early period and slow descent afterwards; moreover, the surface temperature of the electro-thermal bar shows rapid increase in the early stage and slow rise in the later stage; with the increase of the voltage, the faster the electric power decreases in the early period, and the more rapidly the surface temperature of the electro-thermal bar increases in the early period; when the heating time is 90 s, the electric power of the preheating plug and the surface temperature of the electro-thermal bar increases almost linearly with increased voltage; with the increase of the air flow rate or the decrease of the ambient temperature, the electro-thermal bar's surface temperature increases slowly in the early period, and when the heating time is 90 s, the surface temperature of the electro-thermal bar decreases almost linearly with increased flow rate or decreased ambient temperature.

Key words: flame inlet preheating plug; electro-thermal characteristics; electric power; surface temperature

收稿日期: 2017-06-03; **修回日期**: 2017-10-10

基金项目: 国家部委预研项目 (40402040101)。

作者简介: 张乾坤(1993 -), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机燃烧、排放与环境效应, 649583680@qq.com。

0 引　言

低温起动性能是柴油机的重要性能之一，影响柴油机的运行性能及寿命[1-2]。在低温条件下，由于进气温度低、燃油温度低、机体温度低，致使压缩终了的温度低，燃料雾化不良，燃烧恶化，甚至不燃烧，从而导致动力性差、经济性差、起动困难、排放污染严重[3-5]。进气预热是提高低温起动性能的方法之一，通过对进气加热，提高压缩终了的温度和压力，改善燃油雾化，缩短滞燃期，提高着火概率，改善 HC 排放[6-7]。

进气预热主要分为电热进气预热及火焰进气预热两种。电热进气预热装置完全靠电能加热空气，耗电量大；而火焰进气预热装置是通过电加热棒或电热丝点燃表面的柴油进而加热进气的，耗电量小，加热的温度范围大。多年来，国内外学者在进气预热方面开展了大量研究，F. Payri 等人在环境温度 -20 ℃的条件下，采用高压金属电热塞预热进气 11 s，可使柴油发动机转速在 1.14 s 之内从 0 升高至 1 150（r · min^{-1}），起动后转速在 ±70（r · min^{-1}）波动，碳烟峰值为 9 m^{-1}[8]。北京理工大学的杜巍等人在环境温度 10 ℃的条件下，采用火焰进气预热塞预热进气，使进气温度提高 18.5 ℃，输出扭矩平均增加了 8.4%，起动时间和扭矩波动明显减小，转速升高率和最大燃烧压力增大，燃烧过程得到明显改善[9]。军事交通学院的董素荣等人计算了 WD615.77 柴油机不同温度下起动时所需火焰进气预热装置的供热量。研究表明：环境温度每下降 10 ℃，WD615.77 柴油机顺利起动所需的火焰进气预热装置供热量升高 3%；且通过计算与试验发现：火焰进气预热装置能辅助柴油机在环境温度高于 -36 ℃范围内起动[10]。江苏大学的罗涛等人在 -35 ~ -20 ℃环境温度下，基于一台四缸增压柴油机，研究了火焰进气预热塞的燃油流量对低温起动的影响，发现：火焰塞的燃油流量为 7 ~ 10（mL · min^{-1}）时预热效果最佳[11]。总后车船研究所的袁雄等人在 -30 ℃环境温度下，对火焰进气预热塞的安装位置进行了优化试验，发现：平均进气温度增大到 55 ℃，火焰进气预热塞的伸长量为 20 mm，安装位置顺气流倾斜 20°时，发动机的低温起动性能较好[12]。

火焰进气预热塞是安装在发动机进气管中的一种进气预热装置。其原理为：火焰预热塞内部的电加热棒通电后被加热，温度升高到一定值时，高温的电加热棒将泵入火焰塞中的柴油点燃，并间接对进气管内的空气加热。电加热棒的表面温度决定着燃油是否能够被点燃以及燃烧加热情况，而电热棒表面温度又受通电电压、环境温度、进气管内空气流速等影响。

本文基于火焰进气预热塞试验平台，以某款预热塞（图 1）为研究对象，试验研究了不同通电电压、空气流速、环境温度对预热塞电加热特性的影响，即电热棒的表面温度、电功率在不同条件下的变化规律，为进气预热系统的设计和控制提供指导。

图 1　火焰进气预热塞

1 试验系统

试验平台包括供气子系统、供油子系统、供电子系统、数据采集子系统和控制子系统，具体见图 2。

（1）供气子系统包括空气滤清器、风机、管道、燃烧室。供气系统为预热塞的燃烧提供流动空气。空气流速通过变频器改变风机转速来控制。

（2）供电子系统包括 220 V 电源、稳压电源、配电箱。供电系统为风机、电动输油泵、预热塞、供油电磁阀、仪表等供电。火焰塞电压通过稳压电源调节旋钮控制。

（3）供油子系统包括油箱、油泵、油滤、油管。供油子系统为火焰塞燃烧供油。油压通过变频器改变油泵转速来控制。

（4）数据采集子系统包括采集软件、温度传感器、压力传感器、空气流量计、二次仪表等。数据采集子系统对空气流量、温度、气压、电流等数据进行采集、存储和处理。

（5）控制子系统包括控制开关、控制旋钮、变频器、时间控制器等。控制子系统对整个试验台的运行进行控制，确保试验平台的正常工作。

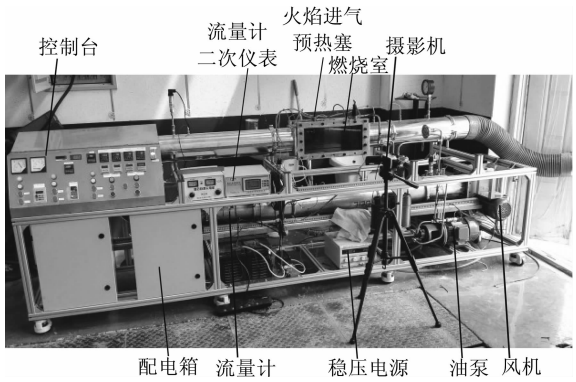

图 2　试验平台

2　试验内容和试验方法

试验过程中保持其它条件不变，分别改变电压、空气流速、环境温度，并在相应的条件下通电加热 90 s，采集预热塞电流、内部电热棒表面温度随时间的变化数据。

（1）变电压试验中，通过稳压电源调节旋钮改变预热塞的通电电压，电压变化范围 16 ~ 24 V。蓄电池的满电压为 24 V，但车用发动机起动时或低温条件下通常会低于 24 V，因此选择电压变化范围为 16 ~ 24V。

（2）变空气流速试验中，通过变频器改变风机转速来调节空气流量，进而改变预热塞所处位置的平均空气流速。根据空气流量、管径、空气温度、压力可以计算出预热塞所在位置的平均空气流速，平均空气流速的变化范围为 0 ~ 10.5（m · s^{-1}）。其中，风速变化范围基于某型号柴油机从起动到怠速过程进气管内的空气流速得到。

（3）变环境温度试验在不同试验室温度下进行，环境温度分别为：1、23、28 ℃（通过温度传感器测量），以测试火焰进气预热塞在环境温度 0 ~ 30 ℃时的工作情况。

试验中测量不同条件下火焰进气预热塞的通电电流、内部电热棒表面温度随时间的变化值，并进一步分析得到不同条件下预热塞的电功率、电热棒表面温度的变化规律。

3　试验结果分析

3.1　电压对电加热特性影响

3.1.1　电压对电功率的影响

图 3 示出了空气流速为 4.7（m · s^{-1}），不同电压下火焰进气预热塞电流随时间的变化规律。由图中可以看出：同一电压下，随着加热时间的增加，预热塞的通电电流逐渐下降，并可分为快速下降和缓慢下降二个阶段，40 s 时刻为转折点，这主要是由于预热塞内部阻抗的变化引起的。不同电压时，电压越大，电流越大，30 s 之前电流的下降速度越快，30 ~ 40 s 之间电流基本相同，90 s 时电流的变化也不大。

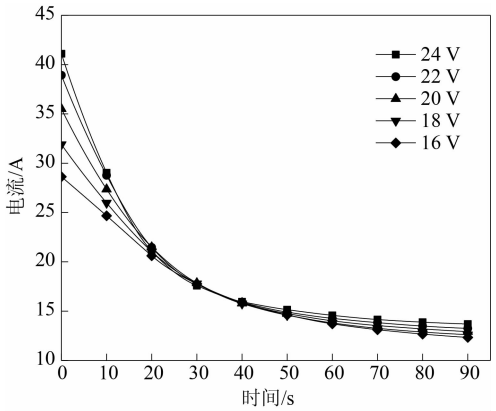

图 3　不同电压时预热塞电流随时间的变化规律

图 4 示出了空气流速为 4.7（m · s^{-1}），不同电压时预热塞电功率随时间的变化规律。由图中可以看出：同一电压下，随着加热时间的增加，预热塞的电功率曲线可分为快速下降和缓慢下降二个阶段，40 s 时刻为转折点。不同电压时，电压越大，电功率越大，40 s 之前电功率的下降速度越快，而 40 s 之后电功率随时间的变化速率相同。

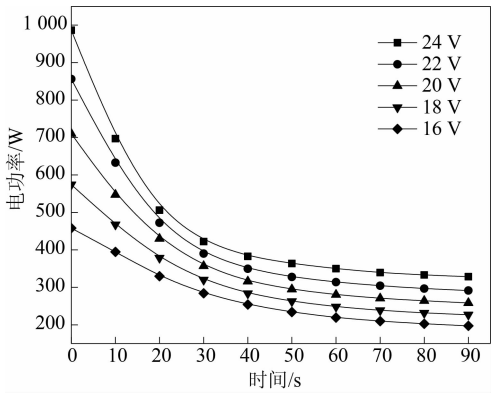

图 4　不同电压时预热塞电功率随时间的变化规律

图 5 示出了空气流速为 4.7（m · s^{-1}），加热 90 s 时预热塞电功率随电压的变化规律。由图中可以看出：电压从 24 V 降至 16 V 时，预热塞电功率从 328 W 降至 197 W，降低了 131 W，且随电压近似线性变化。

3.1.2　电压对电热棒表面温度的影响

图 6 示出了空气流速为 4.7（m · s^{-1}）、不同电压时预热塞电热棒表面温度随时间的变化规律。从图中可以看出：同一电压下，随着加热时间的增加，预热塞的温升曲线分为快速上升和缓慢上升二

个阶段，40 s 到达转折点后温升变化较小。由于预热塞产生的热量由电功率决定，所以，电压越大，电热棒表面温度越高，随时间上升的速率越快，而 40 s 后电功率变化都很小。

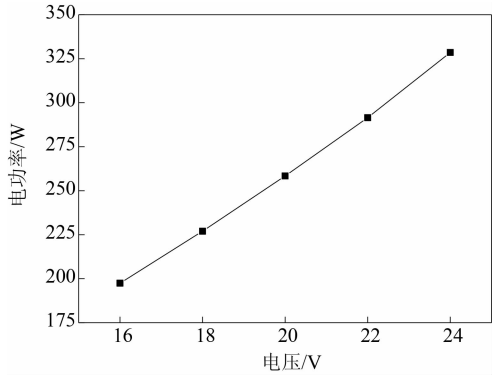

图 5　加热 90 s 时预热塞电功率随电压的变化规律

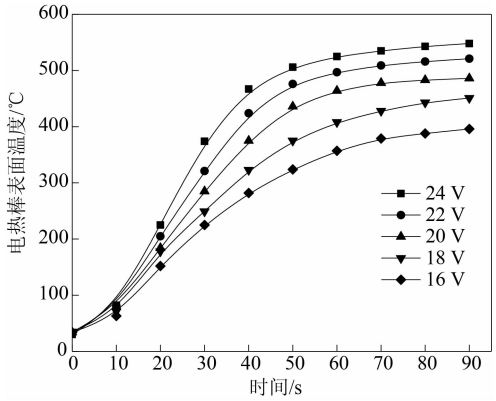

图 6　不同电压时电热棒表面温度随时间的变化规律

图 7 为空气流速为 4.7（m · s^{-1}），加热 90 s 时预热塞电热棒表面温度随电压的变化规律。由图中可以看出：电压从 24 V 降至 16V 时，电热棒表面温度从 548 ℃降至 396 ℃，降低了 152 ℃，且随电压近似线性变化。

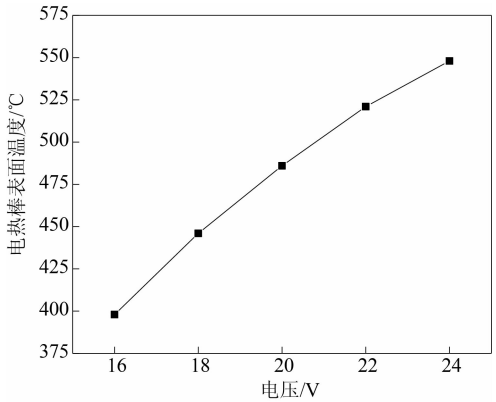

图 7　加热 90 s 时电热棒表面温度随电压的变化规律

3.2　空气流速对电加热特性影响

3.2.1　空气流速对电功率的影响

图 8 为不同空气流速时预热塞电功率随时间的变化规律。从图中可以看出：同一流速下，随着加热时间的增加，预热塞的电功率下降可分为快速下降和缓慢下降二个阶段。初始电功率为 986 W，随着加热时间的增加，电热棒表面温度上升，电阻增大，电功率快速下降，40 s 转折点后电功率缓慢下降，90 s 时降为 326 W。不同空气流速下，火焰进气预热塞的电功率曲线基本重合，只与加热时间有关。

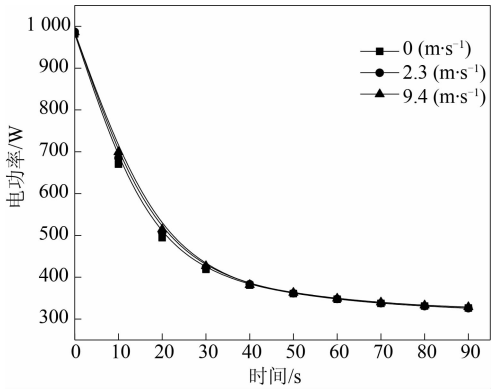

图 8　不同流速时电功率随时间的变化规律

3.2.2　空气流速对电热棒表面温度的影响

不同空气流速下，电热棒表面温度快速上升阶段和缓慢上升阶段的转折点不同。随着空气流速增加，散热速度加快，散热量增加，转折点时刻提前。如，空气不流动时的温升转折点为 50 s 左右；流速为 10.5（m · s^{-1}）时的转折点为 30 s 左右（图 9）。

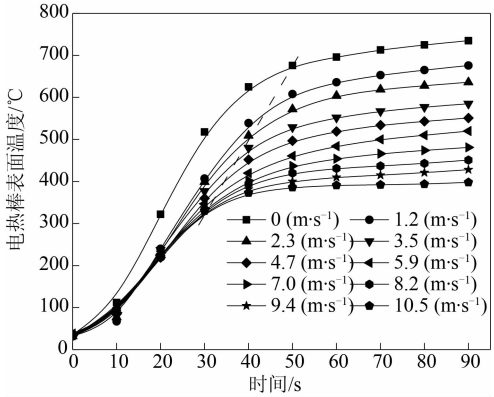

图 9　不同流速时电热棒表面温度随时间的变化规律

图 10 为加热 90 s 时预热塞电加热棒表面温度随空气流速的变化规律。从图中可以看出：空气流速越大，气流带走的热量越多，火焰塞积聚的热量越少，加热相同时间后电热棒表面温度越低。空气

流速从 0（m · s^{-1}）增大到 10.5（m · s^{-1}）的过程中，电热棒表面温度从 735 ℃降至 398 ℃，近似线性递减。

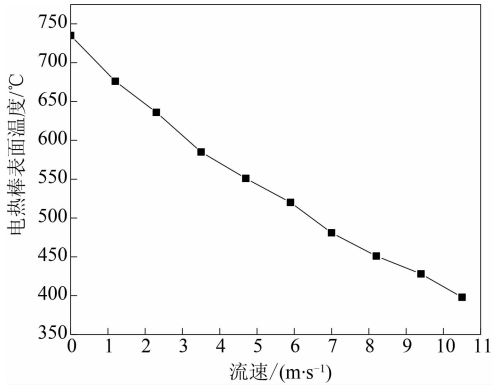

图 10　加热 90 s 时电热棒温度随空气流速的变化规律

3.3　环境温度对电加热特性影响

3.3.1　环境温度对电功率的影响

图 11 为空气流速为 5（m · s^{-1}），不同环境温度时火焰进气预热塞电功率随时间的变化规律。从图中可以看出：同一环境温度下，随着加热时间的增加，预热塞电功率下降可分为快速下降和缓慢下降二个阶段。40 s 以前，电功率由 1 200 W 快速降至 434 W，40 ~ 90 s 期间缓慢降为 374 W。不同环境温度下，火焰进气预热塞的电功率曲线基本重合，只与加热时间有关。

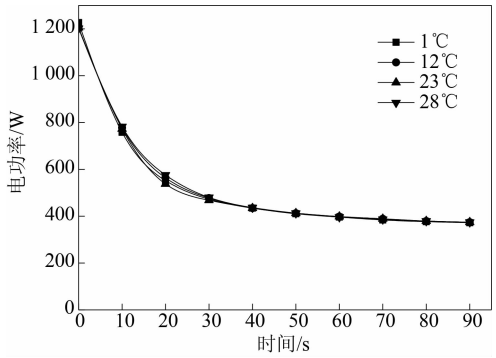

图 11　不同环境温度时电功率随时间的变化规律

3.3.2　环境温度对电热棒温度的影响

图 12 为空气流速为 5（m · s^{-1}），不同环境温度时电热棒表面温度随时间的变化规律。从图中可以看出：同一环境温度下，随着加热时间的增加，40 s 之前预热塞的温度快速上升，40 s 以后缓慢上升。不同环境温度下，环境温度越低，电热棒温升速度越慢，达到平衡温度的时间越长。

图 13 为加热 90 s 时预热塞电热棒表面温度随环境温度的变化规律。从图中可以看出：环境温度越低，散热量越大，加热相同时间时火焰预热塞电热棒温度越低。环境温度从 28 ℃降至 1 ℃的过程中，电热棒温度从 604 ℃降至 515 ℃，且近似线性下降。

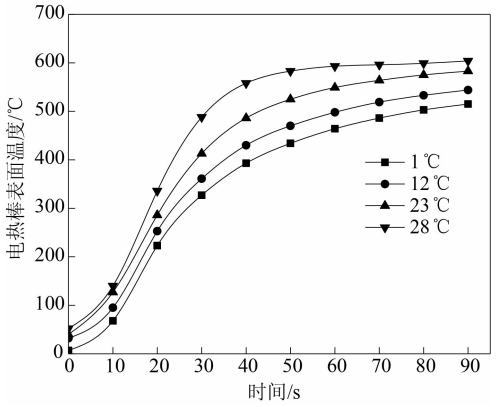

图 12　不同环境温度时电热棒温度随时间的变化规律

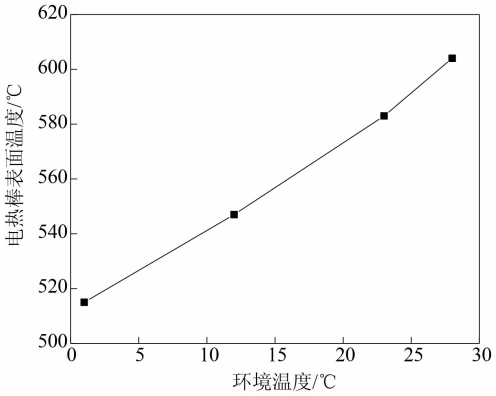

图 13　加热 90 s 时电热棒温度随环境温度的变化规律

4　结　论

（1）在不同条件下，随着时间的推移，预热塞电功率均表现出先期快速下降，后期缓慢下降的特性；预热塞电热棒表面温度呈先期快速上升，后期缓慢上升的特性。

（2）随着预热塞通电电压的增大，电功率先期下降速度越大；电热棒表面温度先期上升的速度越快。加热到 90 s 时，预热塞的电功率和电热棒表面温度均随电压的增加而近似线性增加。

（3）随着空气流速的增加，电功率变化不大，但是电热棒表面温度先期上升的速度变慢。加热到 90 s 时，电热棒表面温度随空气流速的增加而近似线性下降。

（4）随着环境温度的下降，电功率变化不大，但是电热棒表面温度先期上升的速度变慢。加热到 90 s 时，电热棒表面温度随环境温度的下降而近似线性下降。

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. 柴油机低温起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、低温对柴油机起动性能影响分析 [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起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. 进气预热对柴油机起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起动性能影响的研究 [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起动的研究 [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] 坏境保护部、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：中国坏境科学出版社，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.