

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.070

基于转矩模型的柴油机功率在线测试方法研究

唐琦军¹ 常宏博¹ 蒋 蘋¹ 罗 锋² 郑帅帅¹

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 广西玉柴机器股份有限公司, 玉林 537000)

摘要: 针对拖拉机耕作过程柴油机输出功率不易精准测量的问题, 基于柴油机燃油控制策略的转矩模型, 对雷沃拖拉机在理论速度为 5.7 km/h 和 8.9 km/h 的耕地过程的柴油机功率进行了在线测量。将在线测量的指示功率与燃烧分析仪测量的指示功率进行了对比, 结果表明: 在拖拉机耕作速度较稳定的一段区间内, 在线测量的指示功率平均值误差为 2.99%, 但瞬时值严重失真; 分析发现喷油量和喷油时刻的变化是引起功率测量偏差较大的主要原因。为了提高柴油机输出功率在线测量的精准度, 利用 GT-Power 模型得到了该柴油机 12 个典型工况的空燃比和喷油时刻与转矩的定量关系, 并提出利用喷油量修正系数和喷油时刻修正系数对在线测量方法进行修正。优化后方法的测试结果表明: 拖拉机稳定运行阶段柴油机功率平均值误差为 0.88%, 瞬时值误差明显改善。

关键词: 柴油机; 功率测量; 转矩模型; 试验

中图分类号: TK427 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0571-08

Online Measurement Method of Diesel Engine Power Based on Torque Model

TANG Qijun¹ CHANG Hongbo¹ JIANG Pin¹ LUO Feng² ZHENG Shuaishuai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537000, China)

Abstract: The output power of diesel engine is one of its important performances. For the individual components of an engine, the accurate output power can be measured through the dynamometer. However, it is not easy to accurately measure the output power of the diesel engine during tractor ploughing. Based on the torque model of the diesel fuel control strategy, the output power of the diesel engine was measured online during the Lovol tractor ploughing process with the theoretical speed of 5.7 km/h and 8.9 km/h. The indicated power of the torque model was compared with that of the combustion analyzer. The test results showed that when the tractor's ploughing speed was relatively stable, the error of the average value of the indicated power was 2.99%, but the instantaneous value became distorted seriously. It was found that the changes in the fuel injection amount and the injection timing are the main reasons for the large deviation in power measurement. To improve the accuracy of the online measurement for diesel engine output power, the quantitative relationships between the fuel injection quantity, fuel injection time and torque under 12 typical working conditions were obtained by using the GT-Power model. Then, the correction coefficients of fuel injection quantity and fuel injection time were used to optimize the original measurement method. The optimized results showed that under the stable operation, the average measurement error of diesel engine output power is 0.88%, and the instantaneous value's error was reduced significantly. It can be learned that optimizing the fuel injection strategy of the diesel engine is an important way to improve the performance of the diesel engine during tractor ploughing.

Key words: diesel engine; power measurement; torque model; test

0 引言

目前先进车用柴油机喷油控制策略多基于转矩

模型算法^[1-2], 基本过程是控制单元首先根据柴油机当前状态参数预估一个指示转矩, 再根据指示转矩与燃油参数得到喷油量和喷油时刻, 最后通过执

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金项目(2019JJ50276)和湖南省教育厅优秀青年项目(17B122)

作者简介: 唐琦军(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农机动力匹配及优化研究, E-mail: tangqijun293@126.com

行器控制柴油机运转。文献[3]对转矩模型的高压共轨柴油机控制策略进行了修正,利用试验对优化后的控制策略进行了验证,改善了柴油机输出转矩的跟随特性。文献[4]对柴油机过渡工况的喷油控制策略进行了优化,采用开环和前馈PID相结合的控制策略改善了柴油机瞬态的响应性。可见,车用柴油机基于转矩模型实现喷油控制是当前的主流技术和研究热点。

农业机械作为典型的非道路移动机械,通常搭载柴油机作为动力源,柴油机输出功率的大小对农机性能至关重要^[5-6]。因土壤物理机械性质差异性较大,农机作业过程载荷变化较大,作业过程载荷与柴油机输出功率之间的定量变化关系尚不明确^[7]。文献[8-10]利用农机CAN数据记录仪获得了拖拉机作业过程转矩百分比、柴油机转速等参数,对拖拉机动力性和经济性进行了评估。文献[11-12]开发了一套拖拉机性能参数记录装置,对整机作业过程柴油机功率进行了测量,并提出了时间因子以及对拖拉机作业过程柴油机性能参数进行了估算。文献[13]利用Matlab/Simulink建立了轨压控制模型,其中轨压控制采用了前馈控制加反馈控制,研究表明模糊自适应PID控制器在目标轨压突变时的响应性和跟随性以及稳定工况下轨压的稳定性方面都优于传统的增量式PID控制器。文献[14-15]研究了神经网络模型,利用柴油机转速、燃油流量和排气温度预测柴油机输出转矩。文献[16-17]研究了柴油机转速、PTO(动力输出轴)功率、耕深和挡位对拖拉机油耗的影响。文献[18]利用相位差式转矩传感器构建了船式旋耕埋草机转矩测试系统,该系统具有非接触、测量范围大、易于操作等优点,可以广泛应用于农业及工业机械功耗的实时检测。文献[19]利用Labview开发了一套船舶柴油机功率测量系统,实现了对船舶运行过程柴油机功率的监控。

综上所述,目前利用CAN总线上的转矩信号测量农用柴油机功率的应用较多,但没有对该方法在耕作过程的测试精准度进行评估。神经网络方法测量功率需要大量数据进行训练,并且较难实现在线测量。在农机具连接处安装转矩或拉力传感器可测量农机功率,但实际只得到农机具功耗,若要测量柴油机的功率,应在柴油机输出端安装转矩传感器,但是对于大部分拖拉机而言,柴油机、变速器、动力输出轴等常集成一体,不易加装测量装置。笔者及所在的科研团队^[20-21]提出了一种内燃机瞬变过程参数的精准检测方法,并实现了汽车行驶工况发动机输出功率的测量。本文借助该方法,以雷沃拖拉机

搭载的柴油机为研究对象,基于转矩模型法实现柴油机功率在线测量,利用燃烧分析仪对测试结果进行校验,并对测试方法进行优化。

1 拖拉机耕作工况柴油机功率在线测试方法

(1) 转矩模型法

如图1所示,是本文柴油机喷油控制策略中指示转矩的计算流程。在转矩模型中同时会计算需求转矩,即柴油机飞轮端输出的转矩,结合转速便可以计算柴油机功率;类似利用指示转矩和转速可以求得指示功率。为了后文描述方便,将这种测量柴油机功率的方法称为转矩模型法。由图1可知,需求转矩由驾驶员需求转矩、外部需求转矩及柴油机状态决定。驾驶员需求转矩通过柴油机转速和油门踏板位置在柴油机标定MAP图中插值求得;外部转矩在整车标定过程中通过CAN总线传给ECU(电子控制单元),主要包括空调、压缩机、油泵、电器设备消耗的转矩;柴油机运行状态有启动、怠速、加减速、巡航等。需求转矩加上机械损失转矩得到柴油机指示转矩,然后根据ECU内部标定的指示转矩与喷油MAP计算喷油特征参数。

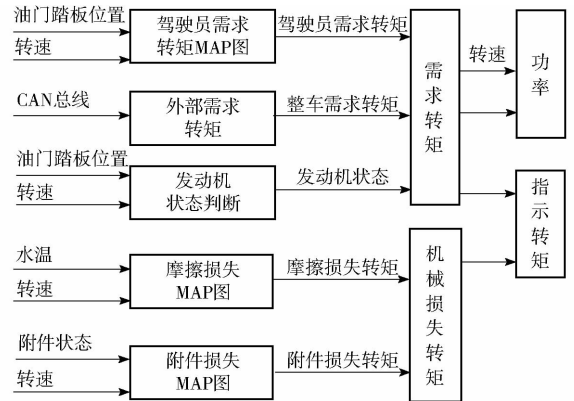


图1 转矩模型法流程图

Fig.1 Schematic of torque model method

(2) 示功图法

本文试验过程在柴油机气缸内安装Kistler型瞬态缸压传感器,在飞轮旁安装角标仪,前者获得缸内压力数值,后者得到曲轴转角数值,即可以得到柴油机工作过程的 $p-v$ (压力-容积)示功图。柴油机指示功率计算公式为

$$P_i = \frac{\int_{-360}^{360} p dv}{v_s} \quad (1)$$

$$v = \frac{\pi D^2}{4} r \left[1 - \cos\theta + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\theta}) \right] \quad (2)$$

$$P_i = \frac{p_i n v_s i}{120} \quad (3)$$

式中 P_i ——指示功率,kW

p_i ——平均指示压力, MPa
 p ——实测缸压, MPa
 dv ——气缸瞬时容积, L
 v_s ——气缸排量, L
 D ——气缸直径, mm
 r ——曲柄半径, mm
 λ ——曲柄连杆比
 n ——发动机转速, r/min
 θ ——曲轴转角, ($^\circ$)
 i ——气缸数量

本文将这种测量指示功率的方法简称为示功图法。示功图法直接测量了柴油机的气缸压力, 得到最准确的指示性能参数, 因此, 本文以示功图法的测量值作为校核转矩模型法的基准。

2 拖拉机耕作工况柴油机功率测试

2.1 研究对象

本文以雷沃欧豹 M1204-D 型拖拉机搭载的柴油机为研究对象, 拖拉机和柴油机的参数如表 1 所示, 该拖拉机在我国北方地区有广泛应用。

表 1 雷沃拖拉机的主要参数

Tab. 1 Specification of Lovol tractor

参数	数值/类型
整备质量/kg	4 155
整车尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 530×2 050×2 810
轮胎规格(前轮/后轮)	11.2-24/16.9-34
挡位数(前进+倒退)	16+8
驱动形式	四轮驱动
柴油机类型	直列、四缸、涡轮增压、电控
柴油机额定功率(转速)/kW(r/min)	105(2 200)
柴油机缸径(行程)/mm	108(132)
柴油机排放水平	国Ⅲ

2.2 测量设备

本文试验的主要测试设备如表 2 所示。试验采用开源 ECU, 试验前将转矩模型法求功率的算法写入 ECU 内, 实现在线测量。燃烧分析仪测量气缸压力和曲轴转角, 并可对数据进行分析。氧传感器安装在排气总管上, 测量柴油机混合气浓度, 转速传感器和 GPS 仪分别测量柴油机的转速和拖拉机的耕地速度。因测量参数类型多, 自主开发了一套软、硬件控制系统, 将所有测量参数集成到一台便携式计算机上进行统一控制, 确保各参数测量始点一致。

2.3 试验测量

图 2 是搭建的拖拉机作业过程柴油机运行参数测试系统示意图。通过调研确定比较适合五铧犁耕

表 2 主要测试设备及参数

Tab. 2 Main equipment and parameters in test

名称	型号	测量精度
ECU	BOSCH	
燃烧分析仪	AVL-IndiCom	
气缸压力传感器	Kistler6125C11	$\pm 0.4\%$ FS
氧传感器	BOSCH-LSU4.9D	± 0.008
转速传感器	霍尔传感器	$\pm 0.1\%$ FS
GPS 仪	Speedbox-RTK	0.05 km/h

作的速度范围是 5~10 km/h, 结合拖拉机的挡位特性, 本文选取 5.7 km/h 和 8.9 km/h 两个理论行驶速度开展试验研究, 并控制耕作深度为 23 cm。试验在山东省邹平县孙镇全泉农机专业合作社农场旱地进行, 该试验田为轻壤褐土, 种植冬小麦(已收割, 有约 25 cm 麦茬)。

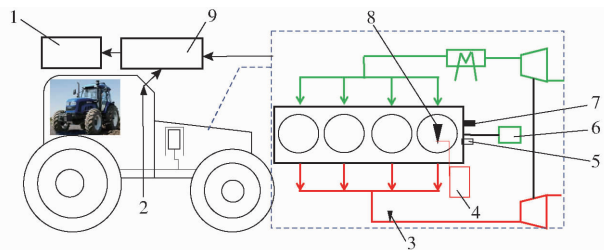


图 2 柴油机运行参数测试系统示意图

Fig. 2 Test system of diesel engine work parameters

1. 计算机
2. GPS 仪
3. 氧传感器
4. 燃烧分析仪
5. 角标仪
6. 开源 ECU
7. 转速传感器
8. 气缸压力传感器
9. 数据采集器

3 拖拉机耕作工况柴油机功率测试结果分析

3.1 运行数据

启动拖拉机和参数测试系统, 挂挡、加速运行至目标速度(5.7 km/h 和 8.9 km/h), 然后固定手油门位置, 进行耕地试验。如图 3a 和图 3b 分别是柴油机转速和进气压力随时间的变化规律, 5.7 km/h 和 8.9 km/h 的试验分别在 23.47~67.22 s 和 30.25~56.15 s 手油门位置固定, 拖拉机进行匀速耕地。由图可知, 柴油机怠速和拖拉机按理论速度耕地的阶段, 柴油机的转速几乎没有变化; 柴油机怠速阶段, 进气压力也几乎没有变化, 但是拖拉机按理论速度耕地的阶段, 进气压力出现一定的波动。在拖拉机按理论速度耕地过程, 挡位确定、手油门位置固定, 驾驶员期待拖拉机和柴油机稳定运行, 进气压力的变化主要是田间作业环境的特点造成, 比如载荷变化、车轮打滑、拖拉机振动等原因。压力的波动一定会引起其他参数的变化, 后文重点研究拖拉机耕地过程柴油机的功率测量。

3.2 柴油机指示功率分析

图 4a 和图 4b 分别是转矩模型法得到的拖拉机

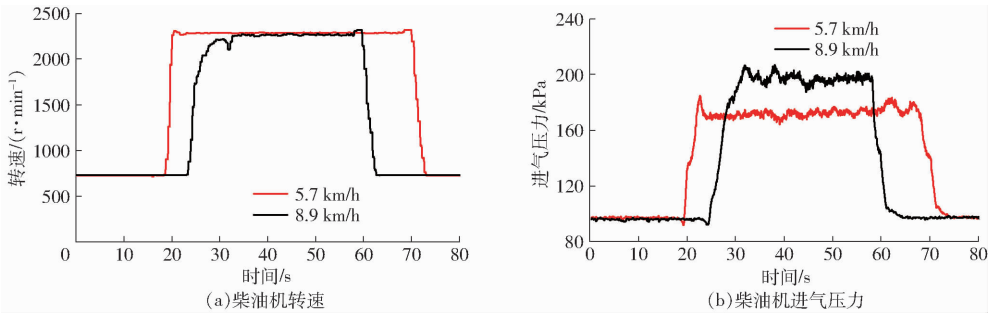


图3 拖拉机作业过程的运行参数

Fig. 3 Parameters of tractor under field operating conditions

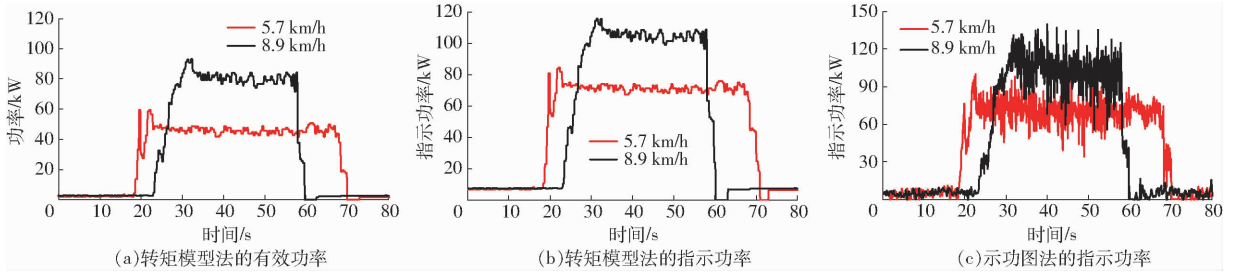


图4 拖拉机耕作过程柴油机功率和指示功率

Fig. 4 Diesel engine power of tractor during ploughing

耕作过程柴油机的功率和指示功率,图4c是利用示功图法得到的指示功率。由图可知,在柴油机怠速阶段,转矩模型法测得的柴油机指示功率几乎不变,在手油门位置固定的耕地阶段,柴油机功率和指示功率有较小波动;在柴油机怠速阶段,示功图法测得的柴油机指示功率有较小波动,在手油门位置固定的耕地阶段,柴油机指示功率变化显著。

循环变动率常用来表示试验内某参数任意点的值相对于平均值的变化率,广泛用于评价发动机的循环变动状况。定义公式

$$C_{cov} = \frac{\delta_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{其中 } \delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (6)$$

式中 x_i ——任意点的参数值

\bar{x} ——试验段内参数的平均值

δ_x ——标准偏差

N ——发动机测试循环数

C_{cov} ——循环变动率

为了分析转矩模型法的误差,引入均方根误差,公式为

$$\varphi_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i})^2}{N}} \quad (7)$$

式中 x_{1i}, x_{2i} ——转矩模型法和示功图法的参数值

φ_x ——均方根误差

表3为对手油门位置固定时间段内柴油机指示功率的统计分析。由表可知,两次试验转矩模型法指示功率比示功图法分别大2.83%和2.99%;示功图法得到的指示功率循环变动率分别为11.06%和12.35%,远大于转矩模型法,说明试验柴油机功率本来有较大波动,但是转矩模型法未能反映真实的变化。两次试验转矩模型法相对于示功图法的均方根误差分别为8.36 kW和12.76 kW。示功图法实测了气缸压力,传感器精度高,设备先进,是发动机指示性能参数最准确的测量方法。与示功图法相比,转矩模型法得到的指示功率平均值误差不大,但是指示功率循环变动率误差较大。同理,转矩模型法测量柴油机有效功率也存较大误差。

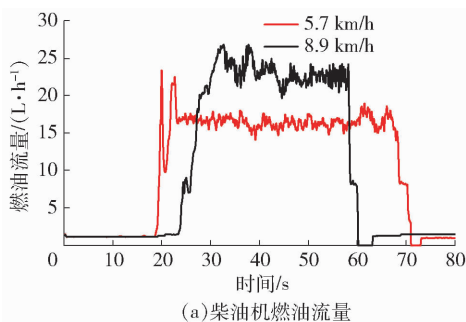
表3 不同方法下柴油机指示功率

Tab. 3 Statistics for tractor working parameters

方法	平均值/kW		循环变动率/%	
	5.7 km/h	8.9 km/h	5.7 km/h	8.9 km/h
转矩模型法	72.46	107.24	2.94	3.35
示功图法	70.46	104.13	11.06	12.35

对试验过程柴油机其他参数进行分析发现,影响指示功率变化的主要原因是喷油量和喷油时刻的变化。图5a和图5b分别是燃油流量和燃烧始点的变化规律,图5a与图4c对比发现两者的变化趋势一致,说明喷油量的变化是引起指示功率变化的重要原因;图5b中柴油机怠速和拖拉机稳定耕作阶段燃烧始点出现较大波动,燃烧始点的变化必然与喷油时刻有关系。耕作过程转速波动很小,因此,农机

作业过程柴油机指示转矩的变化与喷油量和喷油时刻的变化密切相关。喷油量和喷油时刻出现偏差有两方面的原因,一方面是拖拉机在耕地过程复杂的



边界条件促使柴油机自主调整所致,另一方面是因为整机振动、执行器控制偏差等因素导致的误差所致。

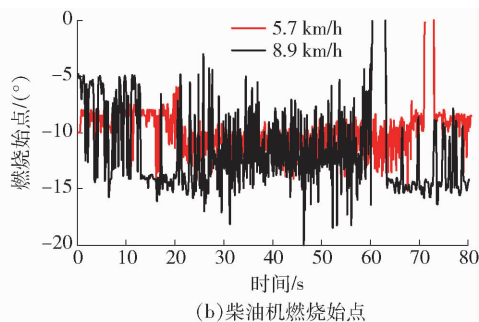


图5 柴油机性能参数

Fig. 5 Performance of diesel engine

4 拖拉机耕作工况柴油机功率测量方法优化

(1) GT-Power 仿真研究

对该拖拉机搭载的柴油机进行了单独的台架试验,获得了柴油机性能参数的万有特性数据。根据柴油机结构数据和台架性能数据,建立了 GT-Power 模型。前文研究表明喷油量和喷油时刻是影响转矩模型法测量功率的主要因素,利用 GT-Power 模型得到柴油机空燃比(空气与燃料质量的比值,便于绘图分析)和喷油时刻与转矩的定量关系,然后对转矩模型法进行优化。

为了在整个柴油机工作范围内有适应性,选择有代表性的工况点进行仿真研究。“柴油机十三工况”常用来评估其综合性能,包括 1 个怠速工况和 3 个转速,每个转速 4 种负荷。转速的选取原则是:外特性上功率为 50% 额定功率所对应的转速为零,在超速时,功率降到 70% 额定功率所对应的转速为 100%。测试转速分别为上述定义的 25%、50% 和 75%。因为怠速工况柴油机不输出功率,因此本文只针对 12 个非怠速工况进行仿真计算。根据定义和柴油机的台架数据得到 3 个转速分别为 1 375、1 770、2 165 r/min,为了方便校核模型选择如表 4 所示的 12 个仿真计算工况,按照转速由低到高,负荷由小到大编号为工况 2~13。首先,根据台架测试

数据校核了 GT-Power 模型。然后以各工况空燃比和喷油时刻原始值为基准分别进行扫描计算,空燃比的间隔为 2,喷油时刻的间隔为 2°曲轴转角。

表 4 GT-Power 模型计算的边界条件

Tab. 4 Boundary conditions of GT-Power model

转速/ (r·min ⁻¹)	功率/kW			
	25% 负荷	50% 负荷	75% 负荷	100% 负荷
1 400	19.5	39.0	58.5	78.0
1 800	24.8	49.5	74.3	99.0
2 200	25.5	51.0	76.5	102.0

图 6a 和图 6b 分别是空燃比和喷油时刻对转矩的影响规律。由图可知,空燃比增大转矩减小,喷油时刻推迟或提前转矩均减小,原模型喷油时刻对应最大转矩。

由图 6 可知,当柴油机的喷油量和喷油时刻不同时,转矩差异较大。为了分析转矩的变化量,本文以任意计算工况转矩 T 与原始工况转矩 T_0 的比值定义为喷油量修正系数 α ,公式为

$$\alpha = \frac{T}{T_0} \quad (8)$$

图 7a 是喷油量修正系数随喷油量变化率的变化规律,喷油量变化率增大修正系数增大,原始工况修正系数等于 1,对应喷油变化率为 0,两者的关系为

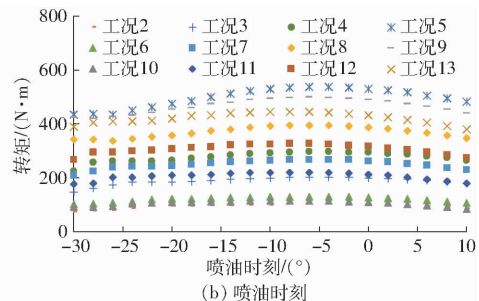
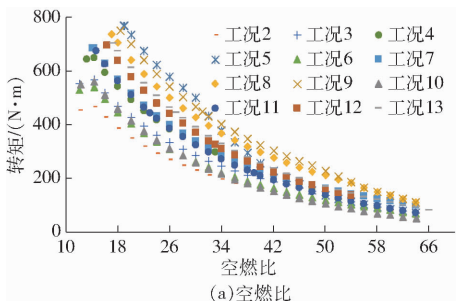


图6 喷油策略对柴油机转矩的影响

Fig. 6 Influence of injection strategy on torque of diesel engine

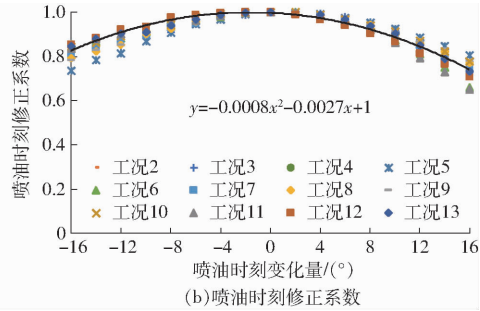
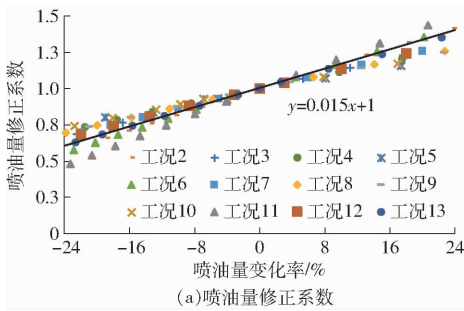


图7 转矩模型法的喷油修正系数

Fig. 7 Fuel injection correction factor of torque model method

$$\alpha = 1 + 0.015x_f \quad (9)$$

类似的改变喷油时刻,任意计算工况的转矩与原始工况转矩比值定义为喷油时刻修正系数 β ,公式为

$$\beta = \frac{T}{T_0} \quad (10)$$

如图7b所示,是喷油时刻修正系数随喷油时刻变化量的变化规律,喷油时刻偏离原始值修正系数减小,原始工况修正系数等于1,两者的关系为

$$\beta = 1 - 0.0027x - 0.0008x^2 \quad (11)$$

式中 x ——喷油时刻相对原始值的变化量,喷油时刻推迟为正值,反之为负值

(2) 转矩模型法优化

转矩模型法是利用柴油机喷油控制过程预估的需求转矩和转速求解功率,该方法的特点是可以实现在线测量,且测量成本低,但转矩模型法获得的平均功率略大于真实值,瞬时值不能详细反映柴油机的真实变化过程。为了提高该方法的测量精度,利用图7的喷油量修正系数、喷油时刻修正系数对图1的转矩模型法进行了修正,新的转矩模型法计算功率的示意图如图8所示。通过转速和油门开度在预存的柴油机MAP表里插值求得该工况喷油量和喷油时刻作为原始值,再结合实际喷油量和喷油时刻,进而可以求得喷油量修正系数和喷油时刻修正系数,分别乘以总需求转矩,再结合转速求得柴油机功率。利用这两个系数对功率进行修正,本质上是一种反馈控制的原理,即循环结束后根据氧传感器判断出上一个循环的喷油偏离原始值的程度,以及喷油时刻偏离原始值的程度,根据GT-Power得到的经验公式进行功率修正。

利用图8的计算方法对前文试验的转矩模型法进行了修正。图9是修正后的转矩模型求得的指示功率,相对于修正前如图4b的指示功率,修正后的功率展示了更多的细节。图9与图4c差异较图4b与图4c有了明显改善。两次试验转矩模型法相对于示功图法的均方误差根分别为5.17 kW和8.41 kW。

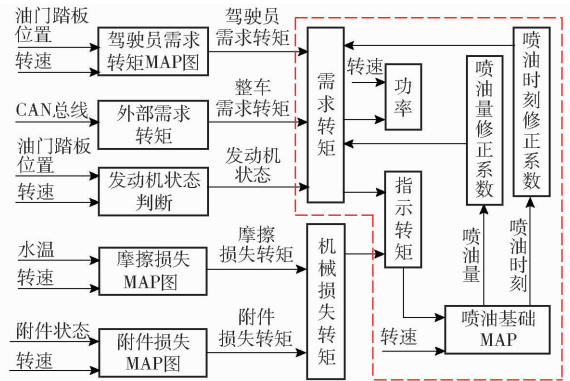


图8 修正后的转矩模型法计算功率示意图

Fig. 8 Schematic of the modified torque model method

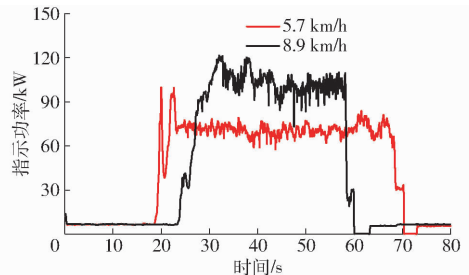


图9 修正后柴油机指示功率曲线

Fig. 9 Indicated power of diesel engine

手油门位置固定时间段内修正后的转矩模型法在作业速度5.7、8.9 kg/h时得到的指示功率平均值为71.08、103.59 kW,对应循环变动率分别为7.56%、9.00%。修正后的转矩模型的指示功率平均值较示功图法大0.88%和小0.52%,误差略有减小,两种方法的循环变动率比较接近,说明修正后的方法展示了更多的细节。

修正后方法测量的柴油机功率如图10所示,作业速度为5.7 km/h和8.9 km/h的两种试验,在转速稳定时间段内平均功率为47.06 kW和78.24 kW,与图4a相比展示了更多的瞬变过程。可见,修正后的转矩模型法测量功率更加准确。

5 结论

(1) 利用柴油机喷油控制策略的转矩模型测量其功率在拖拉机匀速行驶阶段的平均值误差较小,

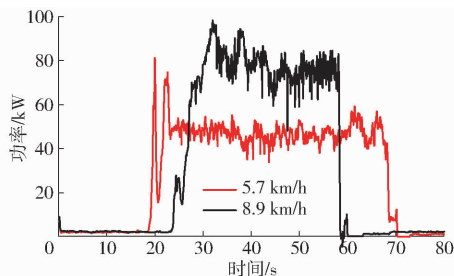


图 10 修正后柴油机功率曲线

Fig.10 Power of diesel engine

指示功率平均值误差为 2.99%, 但是瞬时值偏差较大, 未能反映作业工况下柴油机工作过程。

(2) 拖拉机作业过程柴油机喷油量和喷油时刻的波动是引起功率波动的主要原因。一方面是复杂的边界条件促使 ECU 自主调节运行参数, 另一方面是因为执行器的控制不精准。

(3) 利用 GT - Power 模型计算得到了柴油机常用工况喷油量和喷油时刻与输出转矩的定量关系: 瞬变状态喷油量增大, 柴油机转矩增大, 喷油时刻偏离最佳时刻, 柴油机输出转矩减小。

(4) 利用喷油量修正系数和喷油时刻修正系数对转矩模型法测量功率进行了优化, 指示功率平均值误差为 0.88%, 提高了柴油机功率在线测量的精准度。

参 考 文 献

- [1] GERHART J, HÖNNINGER H, BISCHOF H, et al. A new approach to functional and software structure for engine management systems-BOSCH ME7[J]. SAE International Journal of Engines, 1998, 107: 1173 - 1184.
- [2] LIVSHIZ M, KAO M, WILL A. Validation and calibration process of powertrain model for engine torque control development [C]//SAE 2004 World Congress & Exhibition, 2004 - 01 - 0902.
- [3] 周哲, 张振东, 尹丛勃, 等. 基于转矩模型的高压共轨柴油机控制策略[J]. 汽车工程, 2017, 39(11):1245 - 1251. ZHOU Zhe, ZHANG Zhendong, YIN Congbo, et al. Control strategy for high pressure common rail diesel engine based on torque model[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(11):1245 - 1251. (in Chinese)
- [4] 张康平. 基于目标扭矩的车用柴油机过渡工况控制策略[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [5] 温昌凯, 谢斌, 杨子涵, 等. 基于功率密度的大功率拖拉机变速箱壳体疲劳分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6):389 - 396,404. WEN Changkai, XIE Bin, YANG Zihan, et al. Fatigue analysis of gearbox shell of high horsepower tractor based on power density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):389 - 396,404. (in Chinese)
- [6] 王培, 孟志军, 安晓飞, 等. 拖拉机功率与深松作业效率关系研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):87 - 90. WANG Pei, MENG Zhijun, AN Xiaofei, et al. Relationship between agricultural machinery power and agricultural machinery subsoiling operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):87 - 90. (in Chinese)
- [7] 刘孟楠, 周志立, 徐立友, 等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2):358 - 366. LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):358 - 366. (in Chinese)
- [8] 刘传茂. 拖拉机 CAN 数据解析存储系统的设计与研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [9] 刘洪利, 王熙. 基于 CAN 总线的拖拉机机组作业性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):30 - 34. LIU Hongli, WANG Xi. Analysis of tractor working performance based on CAN bus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):30 - 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s005&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.005. (in Chinese)
- [10] 白钰. 基于 CAN 数据的拖拉机作业报告单生成技术研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
- [11] JANULEVIČIUS A, JUOSTAS A, PUPINIS G. Engine performance during tractor operational period[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 68:11 - 19.
- [12] JANULEVIČIUS A, ŠARAUSKI S E, ČIPLIENNE A, et al. Estimation of farm tractor performance as a function of time efficiency during ploughing in fields of different sizes[J]. Biosystems Engineering, 2019, 179:80 - 93.
- [13] 辛喆, 李亚平, 张云龙, 等. 柴油机高压共轨系统轨压模糊控制与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊):34 - 41. XIN Zhe, LI Yaping, ZHANG Yunlong, et al. Fuzzy control and experiment of rail pressure for high-pressure common rail system of diesel engine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.):34 - 41. (in Chinese)
- [14] VANDECHALI M R, ABBSPOUR-FARDDM H, ROHANI A. Development of a prediction model for estimating tractor engine torque based on soft computing and low cost sensors[J]. Measurement, 2018, 121:83 - 95.
- [15] MARIA de L A, TANG Y, ANGEL L R, et al. Estimation of indicated torque for performance monitoring in a diesel engine [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Advances in Neural Networks—Volume Part II. Springer-Verlag, 2013:489 - 499.
- [16] NAIK V S, RAHEMAN H. Factors affecting fuel consumption of tractor operating active tillage implement and its prediction

- [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2019, 12(4):548–555.
- [17] 傅生辉, 李臻, 杜岳峰, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的拖拉机传动系统匹配优化[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 356–364.
FU Shenghui, LI Zhen, DU Yuefeng, et al. Matching optimization for tractor powertrain based on improved NSGA-II algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11):356–364. (in Chinese)
- [18] 王志山. 基于 LabVIEW 的船式旋耕埋草机功耗检测研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010.
- [19] 许艳梅. 基于 Labview 的船舶柴油机功率测量系统开发[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(8A):94–96.
XU Yanmei. Development of marine diesel engine power measurement system based on Labview[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(8A):94–96. (in Chinese)
- [20] 刘敬平, 赵智超, 唐琦军, 等. 一种内燃机瞬变过程状态与性能参数的准确检测方法[J]. *内燃机学报*, 2014, 32(1): 65–71.
LIU Jingping, ZHAO Zhichao, TANG Qijun, et al. A diagnostic and analysis method for process and performance parameters of ic engines under transient operation conditions[J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(1):65–71. (in Chinese)
- [21] 唐琦军. 汽油机瞬态工况性能测评及数值仿真方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.