

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.01.028

基于经济线的柴油机节能控制方法研究

陈建华¹, 穆希辉^{2*}, 杜峰坡², 吕 凯¹

(1. 军械工程学院 机电系, 河北 石家庄 050000; 2. 中国人民解放军总装备部 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要:为解决工程车辆用柴油机在动力匹配控制中最佳经济线的优化问题,将 Matlab 的矩阵运算、三维曲线绘制和等值线等方法应用到曲线模拟中,通过曲线回归法优化了工程车辆用柴油机万有特性曲线模拟仿真求取方法,具有原理直观、物理意义明确、工作量小、模拟精度高等优点。通过基于经济工作线节能控制法,开展了小型履带搬运车用某柴油机的万有特性曲线分析,建立了电子控制和柴油机燃油曲线之间的关系,提出了在实际操作中的节能应用中基于最佳经济线的控制方法,实现了柴油机在各种工况下的电子节能控制。在小型履带试验车上对燃油消耗情况进行了评价,进行了油耗跑车试验。研究表明,该方法通过闭环反馈控制自动匹配柴油机油门,提高了燃油效率,是实时调节柴油机工作在经济区域的有效途径。

关键词:柴油机;万有特性;最佳经济线;Matlab;仿真 节能

中图分类号:TP301.6;U463

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)01-0129-04

Power saving control theory of diesel engine based on economical curve

CHEN Jian-hua¹, MU Xi-hui², DU Feng-po², LV Kai¹

(1. Department of Electromechanical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China; 2. Research Institute of Ordnance Technology, Chinese PLA General Armament Department, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to find the most economical curve of the diesel engine in the power match control of construction vehicle, the Matlab's matrix operation, 3-D graphics drawing and equivalent method was investigated. After the analysis of the universal characteristic curve, the relationship of electric-control and engine was established. A method was presented to realize energy saving control based on the most economical curve for the real operation. The value of fuel consumption were evaluated on the vehicle, the effect of control were tested. The experimental results show that it is an effective way to improve the vehicle's matching identity and ensure its working point in the economic region.

Key words: diesel-engine; universal characteristic curves; most economical curve; Matlab; simulation; power-save

0 引 言

工程机械工况复杂、负载变化频繁而引起发动机转速波动大。研究柴油机的节能控制是有效防止柴油机熄火、改善燃油效率的一种途径^[1]。发动机万有特性是发动机几个主要特性参数之间相互关系的一种综合特性,研究柴油机参数控制能为工程车传动系统的动力匹配和优化提供分析依据^[2]。苏秀平等人^[3]针对不同工况挖掘机功率损失形式提出了柴油机恒阻力

矩控制节能控制原理;李仲兴等人^[4]通过对混凝土泵车恒功率节能研究提出了柴油机与 HST 的匹配区间设定法,一定程度促进了柴油机节能控制在实际工程中的应用;陈丰峰等人^[5]研究了基于负荷传感控制的泵控定量系统,该系统以负荷阀为感应元件,自动控制泵流量和柴油机参数以减少了能量浪费,董宁宁等人^[6]总结了工程机械混合动力的结束特点和发展趋势,提出了不同的能量回收率和燃油利用率解决策略。

上述研究大多数局限于理论研究,难以在工程实

收稿日期:2013-09-05

作者简介:陈建华(1989-),男,浙江金华人,主要从事无人载具遥操作与系统控制方面的研究. E-mail:chenjhua@zju.edu.cn

通信联系人:穆希辉,男,研究员,博士生导师. E-mail:18633468486@163.com

际中得到实际的应用。为此,基于 Matlab 的某柴油发动机的万有特性曲线,本研究通过曲线推导出基经济工作线节能控制方法,并将之应用于小型履带搬运车上,用实验方法证明该法在实际应用中可以简化控制系统,提高燃油经济性。

1 万有特性优化模拟

1.1 万有特性在遥操作中的应用

遥操作系统使驾驶员的工作从随车驾驶室解放成定点操作。然而这样的遥控操作也自然地使人脱离了具体的驾驶体验,发挥不了已有的丰富驾驶经验,容易使发动机加油过度或者不足,造成动力浪费或者熄火。在遥操作系统中,电磁信号通常被转化成车载控制器的电信号,以控制各个执行机构,这样的机电控制为遥操作系统的动力匹配和电子节能控制提供了便利^[7]。

具体的柴油机和传动系统动力匹配如图 1 所示,无线发射器给定油门信号,通过无线传播传递到控制器上,控制器按照预设最佳经济工作线确定柴油机输出到传动系统的转速和扭矩,并且通过闭环反馈实时修正偏差,保持输出特性^[8]。最佳经济工作线往往需要根据发动机的等耗油率曲线来确定,也就是万有特性曲线。

1.2 万有特性数学公式推导

本研究在二维坐标内做出若干条等耗油率曲线(也有等功率曲线),组成曲线族,它可以用于分析各种工况下发动机的燃油经济型。应用最广的发动机的

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & \cdots \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & \cdots \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_d & y_d & x_d^2 & x_d y_d & y_d^2 & \cdots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{Z}$ 的每行数值代表某转速下的燃油特性曲线,整个 $\mathbf{Z}$ 即为坐标 (x, y) 的函数。 $\mathbf{Z}$ 的行列数 d 与多项式阶数 s 关系如式(3)所示:

$$d = \frac{(s+1)(s+2)}{2} \quad (3)$$

在 Matlab 进行插值计算时,首先需要通过试验测定发动机在各个转速下的扭矩和对应的燃油消耗。本研究建立表格数据,通过 Matlab 的读取文件命令把试验数据导入到 Matlab 中,计算回归参数矩阵 $\mathbf{Z}$,利用 mesh 命令绘制的万有特性三维曲面图如图 2 所示。本研究利用 contour 命令绘制不同燃油率的等高线,其中等高差值可以自定义,仅影响行程疏密程度而已。

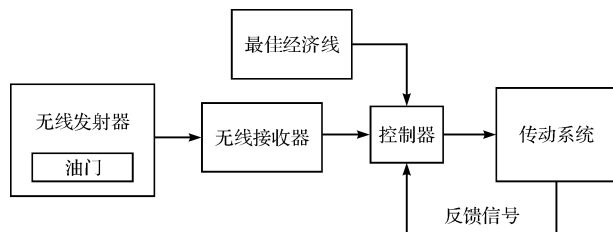


图 1 遥操作中节能控制系统框图

万有特性是将发动机的燃油消耗作为发动机转速和扭矩的函数,其关系式如式(1)所示:

$$g_e = f(n_e, T_e) = \sum_{j=0}^s \sum_{i=0}^j A_i \left[\frac{1}{2}(j+1)(j+2) - j - 2 - i \right] M_e^i n_e^{j-i} \quad (1)$$

式中: g_e —燃油消耗量, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; n_e —转速, r/min ; T_e —扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; A_i —多项式系数; s —多项式阶数。

通过实验采集每个三维对应点然后输入到计算机获得万有特性是不可能的,为此需要优化万有特性曲线模拟方法。在不增加工作量的前提下,本研究测试从最低转速到最高转速、最小扭矩到最大扭矩典型工况下的具有代表性数据,采用曲面拟合的方法求取式中参数。在多项式拟合中,通常每一个变量的阶次均不宜超过 5。

1.3 万有特性的绘制

柴油机通常通过负荷特性采用曲面拟合方法做出万有特性图,其实质是拟线性回归问题,确定平面观测点的回归模式为^[9]:

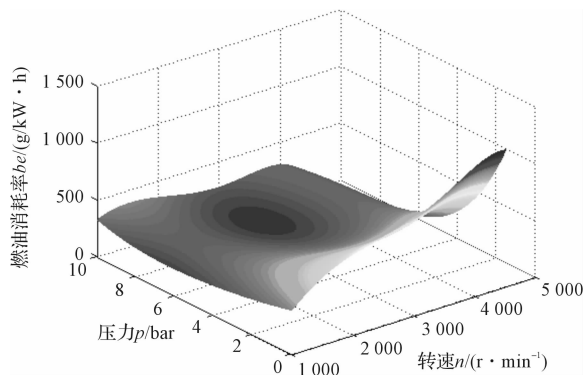


图 2 万有特性三维曲面

等高线在转速—压力坐标中投射就形成了万有特性燃

油等高曲线图,如图3所示。

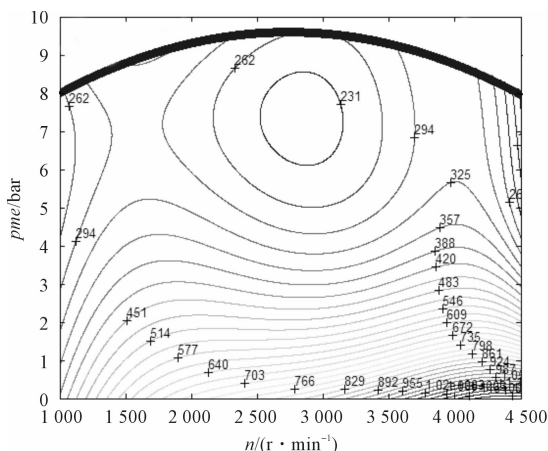


图3 万有特性燃油等高曲线

根据万有特性等高曲线图,可以看出发动机在各种工况下的经济性,其经济性实质就是万有特性曲面图的等高线的形状及分布情况:

(1)最内层的等油耗曲线包围区域是燃油最经济区域,曲线越向外,经济性越差。一般地,柴油机的最佳经济区域总是在扭矩最高和转速中高区域,并非在额定转速附近。

(2)等油耗封闭曲线横向宽度长,说明在相当的燃油率下具有较宽的转速范围,转速适应性好。

(3)等油耗封闭曲线纵向宽度长,说明在相当的燃油率下其具有较宽的负荷范围,扭矩适应性好。

2 基于经济工作线节能控制法

2.1 最佳工作曲线的意义

一般地,柴油机可以在万有特性曲线外特性内的任一点工作,可是为了提高车辆的燃油经济性、动力性,就要规定发动机工作点轨迹,使工作点沿着一条最佳经济工作线工作。

在发动机的每个运行功率下,等功率曲线和等油耗曲线的切点为该功率下的经济工作点,各经济工作点的连线即为发动机的经济工作曲线,发动机工作时,将工作点设在经济工作曲线附近,就会提高燃油利用率,达到节能目的。

2.2 最佳工作曲线的绘制

理论上,最佳经济曲线是等功率曲线和等油耗曲线切点连线,这样的连线可能是十分复杂曲折的,无法指导实际工作。为此需要对最佳工作线进行优化,考虑到某些工况并不是常用工况,如能快速穿过这类区域,更加符合常用工况下的燃油经济性控制,避免了长期在非经济区工作,达到了工程机械实际使用要求^[10-11]。

在万有特性曲线中,笔者通过绘制等功率曲线,在完整的万有特性曲线中标定典型的最佳工作点,并对这些点插值来求出最佳经济线,等功率曲线和最佳经济工作线如图4所示。

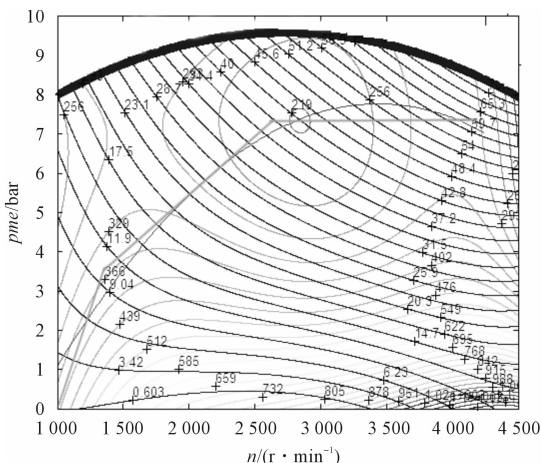


图4 等功率曲线和最佳经济工作线

(1)在发动机低速低功率区域,即怠速1 000 r/min ~ 1 500 r/min之间、功率在3 kW ~ 9.04 kW,最佳经济线沿着366耗油曲线工作,这样避免陷入402和439高耗油区中。

(2)在发动机中速中高功率区域,即1 500 r/min ~ 3 500 r/min之间、功率在9.04 kW ~ 51.2 kW,这是常用工况,基本沿着切点连线工作,使得功率上升总能尽量早地进入到更加节能的燃油区域,如图4所示,基本落在了最经济区域。

(3)在发动机高速高功率区域,即高于2 500 r/min和功率在51.2 kW ~ 65 kW,考虑到扭矩随转速下降,笔者采用稍降低扭矩的控制策略,但是总体仍能保证落在经济区域附近。

(4)有时候为了方便下一步控制和编程工作,也可以用分段的线段来作为经济工作线,可以使加油过程直观方便,又能在大部分工况保持在经济区,如图4中的多段线组成的工作线所示。

3 燃油经济性试验比较

本研究采用上述方法,HST排量和柴油机油门根据控制曲线自动匹配。实验中用一辆1.4 t重载重500 Kg履带车,加注20 L柴油,先后用人工操作和自动控制进行强度跑车实验,直到油箱耗油结束,记录时间。本研究在记录发动机转速和液压系统压力进行燃油换算时,每隔15 s记录一次测试速度和测试扭矩,总共记录时间为整车行驶一圈的时间(假设每圈行驶情况相同)。实验数据如表1所示。

表 1 燃油消耗实验数据

自动控制			人工操作		
测试转速/(r·min ⁻¹)	测试扭矩/(N·m)	预测消耗/(kg·h ⁻¹)	测试转速/(r·min ⁻¹)	测试扭矩/(N·m)	预测消耗/(kg·h ⁻¹)
1 656	44.2	5.23	1 743	46.2	6.82
1 954	50.0	7.51	2 188	58.2	9.50
2 033	51.8	7.77	1 879	55.5	9.9
2 385	66.2	9.40	2 420	57.2	11.7
2 257	62.5	8.79	2 200	58.1	9.05
1 934	51.7	7.09	1 765	52.4	8.30
1 765	45.1	6.57	1 911	50.0	6.94
1 663	41.5	5.04	1 643	41.7	5.04
1 536	37.5	4.22	1 766	40.2	5.98
平均值		6.85	平均值		8.13
燃油时长/min		135	燃油时长/min		113

行驶履带车在环形实验厂跑车,由于地形和坡度原因,外负载变化频繁。手工操作当然还与操作员本身的驾驶经验有关,该实验中驾驶员为培训 2 个月的中级驾驶员,从实验数据可以看出,由于抖动和对地形判断失误造成的不匹配,引起了燃油大大增加,相对于自动控制燃油消耗增加了 18.7%,而由于采用基于经济工作线节能控制法,系统能根据外界负载实时查询微机储存数据,通过对比,达到了较好的节能控制结果。

4 结束语

本研究通过曲线回归法优化了工程车辆用柴油机万有特性曲线模拟仿真求取方法,其具有原理直观、物理意义明确、工作量大、模拟精度高等优点。本研究解决了柴油机工况复杂、非线性度高、难以准确提取万有特性的难题,通过多段一维折线改进了柴油机工作油耗,确立了经济工作线,为工程机械燃油控制提供了指导。通过基于经济工作线节能控制法,实现了柴油机在各种工况下的电子节能控制。实验结果表明,通过闭环反馈控制,自动匹配柴油机油门,提高了柴油机的燃油效率。

参考文献 (References):

[1] 朱鸿雷,吴一青. 节能技术在机械工厂设计中的应用[J].

机电工程,2009,26(12):115-117.

[2] 陈俊华. 柴油机环保技术的发展现状及动态[J]. 机电工程技术,2002,31(6):22-23.

[3] 苏秀平,李威,王禹桥,等. 液压挖掘机柴油机-泵环节功率损失分析及对策[J]. 机床与液压,2009,37(12):104-107.

[4] 李仲兴,王申旭,江洪,等. 混凝土泵车动力系统功率节能匹配的研究[J]. 机械设计与制造,2011(6):76-78.

[5] 陈丰峰,柴光远,郑大腾. 液压装载机机电液一体化节能控制[J]. 起重运输机械,2005(1):22-24.

[6] 董宁宇,殷晨波,张子立,等. 混合动力工程机械与氢动力发动机的研究进展[J]. 机电工程,2011,28(11):1300-1305.

[7] 高峰,高宇,冯培恩,等. 挖掘机载荷自适应节能控制策略[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(9):1036-1040.

[8] 苏会芳,高文中,刘进志,等. 工程机械柴油机油门节能控制系统设计[J]. 工程机械,2011,42(4):31-37.

[9] 朱伟伟. 发动机特性建模方法的选择[J]. 现代车用动力,2007(2):27-30.

[10] 郑劲,丁雪兴. 柴油发动机故障诊断技术研究与应用[J]. 机械,2012,39(6):67-70.

[11] 崔荣健. 柴油机技术现状及发展展望[J]. 船电技术,2009,29(12):43-47.

[编辑:李辉]

本文引用格式: