

面向动力需求的汽油机性能与油品组分关联性分析

李银隆¹, 韩永强¹, 孙运才², 徐林勋², 孙兴玉²

(1. 吉林大学 内燃机系, 长春 130025; 2. 山东京博新能源控股发展有限公司, 山东 256500)

Correlation analysis of gasoline engine performance and oil product composition based on power demands

LI Yinlong¹, HAN Yongqiang¹, SUN Yuncai², XU Linxun², SUN Xingyu²

(1. Internal Combustion Engine Department, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. Chambroad New Energy Holding Development Co., Ltd, Shandong 256500, China)

Abstract: In order to explore the factors and ways of affecting the dynamic performance of internal combustion engines, the engine performance tests under steady-state conditions were carried out based on a full-parameter controllable special engine test platform, and a correlation study of engine dynamic performance parameters based on BP neural network was proposed. Determine the typical combustion process parameters such as ignition advance angle, air-fuel ratio, combustion phase, and combustion duration as dependent variables in the middle layer, normalize the indicators, and establish an input layer based on BP neural network (engine control parameters, oil quality, etc.) -intermediate layer (combustion process parameters)-output layer (engine output power) correlation analysis model, the correlation coefficient is used to evaluate the correlation between each index parameter, which provides a reference for reverse fuel design oriented to internal combustion engine mechanical performance. The research shows that the input layer independent variable with the strongest correlation with the engine performance is the ignition advance angle, and the global correlation coefficient is 0.946; the correlation coefficients between the five oil products and the engine performance are all less than 0.2, which has a very weak correlation.

摘要: 为探究影响内燃机动力性能的因素和影响途径,基于全参数可控特种发动机试验平台开展了稳态工况下的发动机性能试验,提出基于BP神经网络的发动机动力性能参数关联性研究。确定以燃烧相位、燃烧持续期、累计放热量、平均指示压力等典型的燃烧过程参数为中间层因变量,将指标进行归一化处理,建立基于BP神经网络的输入层(发动机控制参数、油品)-中间层(燃烧过程参数)-输出层(发动机输出功率)的关联性分析模型,以相关系数评价各指标参数间的相关性。研究表明,与发动机性能相关性最强的输入层自变量为点火提前角,相关系数为0.946;五种油品与发动机性能的相关系数均小于0.2,具有极弱的相关性。

关键词: 油品组分; 燃烧参数; 神经网络; 关联性分析

Key words: fuel components; Combustion characteristics; neural net; correlation analysis

中图分类号: TK464 文献标识码: A

0 概述

影响发动机性能的因素主要包括发动机控制参数和油品参数,而燃烧过程对于发动机性能至关重要^[1]。为探究影响内燃机动力性能的因素和影响途

径,借助燃烧过程参数指标作为中间层因变量,以发动机控制参数和油品参数作为输入层自变量,以发动机输出功率作为输出层,对输入层-中间层-输出层之间的关系进行探究。

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976077);

作者简介: 李银隆(1996-),男,博士生,主要研究方向为内燃机高效清洁燃烧, E-mail:15553988370@163.com;

孙运才, E-mail:yuncaisun@chambroad.com。

BP神经网络作为一种非线性运算方法,能够将输入与输出指标进行精确的描述并作为样本进行学习,输入与输出指标的BP神经网络的映射模型^[2]。Huang MJ等人提出了一种融合了对模糊交易数据挖掘算法(MFTDA)和基于自适应网络的模糊推理系统(ANFIS)的修改的知识发现模型,该模型可以更为有效地发现模糊数据库中的隐式知识,并将其简洁地呈现出来^[3]。张媛等研究发现运用改进NARX神经网络的方法,更适于用来分析接触线表面不平顺和弓网接触力间的关联性^[4]。门飞宇等人研究了Bagging集成学习方法与神经网络算法集成算法对燃料电池性能的预测,研究发现Bagging神经网络集成算法具有较好的鲁棒性,应用范围更广泛^[5]。

本文基于BP神经网络建立输入层(发动机控制参数、油品)-中间层(燃烧过程参数)-输出层(发动机输出功率)的关联分析模型,定量分析三者之间关联性,为面向内燃机机械性能的逆向燃料设计提供参考。

1 试验方法

本文基于全参数可控特种发动机试验平台开展了稳态工况下的发动机性能试验。各项发动机控制参数基于95#市售汽油调整至最优值。

1.1 试验条件

发动机试验台架测控系统如图1所示。试验台架使用凯迈公司的CAMA电涡流测功机,测控系统为CAMA测控系统。在发动机曲轴前端安装角标仪测量并输出曲轴位置信号,与缸压信号一同输入到燃烧分析仪中。本研究使用李斯特公司的AVL燃烧分析仪,内置电荷放大器信号调理模块,系统可直接处理曲轴转角信号与缸压信号。能够获取实时缸压曲线、放热率曲线、压升率和燃烧相位等主要燃烧参数。实验台架使用冷却液外部循环装置控制冷却液温度位于 $80^{\circ}\text{C} \pm 5$ 范围内。进气端使用中冷装置控制进气温度稳定在 $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。所有试验工况点采集频率20Hz,发动机稳定运行4分钟后开始采集数据。缸内压力采集200循环的平均值。所有实验设备及其参数信息如表1所示。

表1 试验设备及其参数信息

名称	型号	生产厂家
电涡流测功机	CW440E	凯迈(洛阳)机电
进气恒温系统	Toceil ZL-3000	上海同圆

冷却液恒温		组装
机油恒温系统	PMCU300A	凯迈(洛阳)机电
空气流量计	Sensyflow-P	SENSYCON
油耗仪	FP-2240H	日本ONO SOKKI
空燃比仪	LA4-4.9_E	德国ETAS
燃烧分析仪		奥地利AVL
尾气分析仪	HFR500	英国Cambustion
发动机电控	4Chan Neo	美国Alpha X

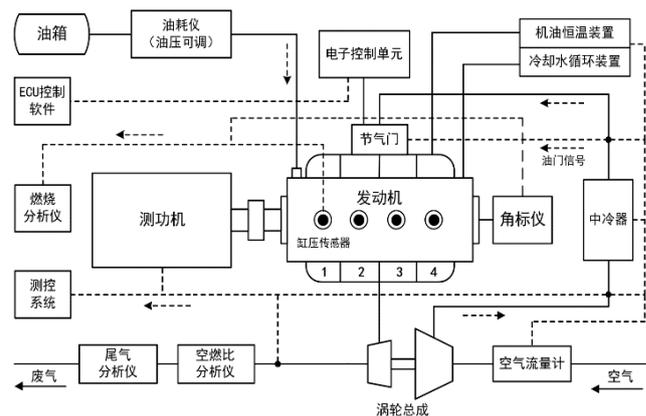


图1 发动机试验台架测控系统

1.2 试验工况

基于低转速小负荷的发动机稳定性测试工况、中等转速负荷下的市用工况、高转速大负荷的发动机动力性测试工况,每种油品选取三个转速、三个负荷率共9个试验工况。详细发动机试验工况见表2。基于燃料与发动机的实际抗爆性能以及前期试验结果,确定点火提前角基于原机初始值 $\pm 7^{\circ}$ CA。

表2 发动机试验工况表

名称	参数
转速	1500 rpm、3000 rpm、5000 rpm
负荷率	10%、70%、100%

1.3 试验油品

试验以十种不同组分的油品作为试验燃料,燃料涵盖烷烃、芳烃、醇类、醚类,各组分掺混方式以发动机输出功率为优先目标,掺混比例高于常规燃料的掺混比例范围,乙醇掺混比例最高为85%,甲苯掺混比例最高为60%,MTBE掺混比例最高为40%,各油品组分的掺混比例见表3。

表 3 油品组分及掺混比例

油品序号	烷基化	甲苯	乙醇	甲基叔丁基醚 (MTBE)	异丙醇
1#	40%		60%		
2#	60%		40%		
3#		40%	60%		
4#	60%	40%			
5#	40%	60%			
6#	15%		85%		
7#		15%	85%		
8#	60%			40%	
9#		60%		40%	
10#	60%				40%

1.4 试验结果

基于试验用发动机的改装特性，低转速负荷下发动机的性能输出不在高效率区间，因此以 5000r/min、100% 负荷发动机工况对比各燃料的性能差异。以 1# 燃料扭矩为 100%，各燃料扭矩对比关系如图 2 所示。1# 燃料的发动机输出扭矩最高，8# 燃料的扭矩最低。6# 燃料的输出扭矩与 1# 燃料的输出扭矩比较接近，这两种燃料均以烷基化和乙醇两种组分进行掺混，除掺混 MTBE 和异丙醇组分的燃料，含有烷基化或乙醇的燃料输出扭矩总体更高。

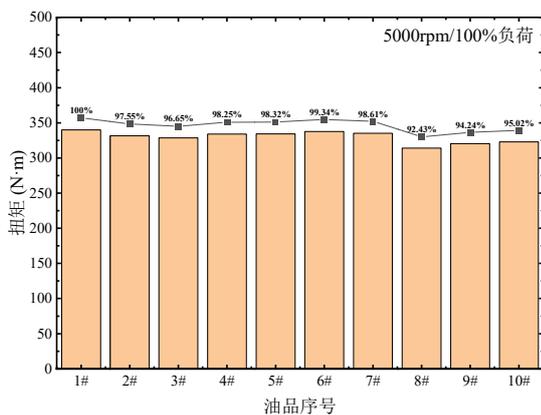


图 2 不同燃料扭矩对比

2 基于神经网络的关联模型

2.1 神经网络模型的构建

搭建的神经网络模型包括输入层、隐含层和输出层，分别以发动机点火提前角、实际空燃比、油品组分及掺混比例作为输入层自变量参数，以发动

机输出功率作为输出层参数；以燃烧过程参数为中间层因变量。各发动机工况下 274 个试验数据点中 70% 用于训练神经网络模型，以确保模型非线性的准确度，余下试验数据分别用于对神经网络的验证和测试，以验证神经网络的泛化能力和预测精度。输入层 7 个参数的量纲不同，会对隐含层各节点初始权值和阈值的选取造成一定的影响，为了消除不利影响和提高训练神经网络的收敛性，需要对输入参数进行归一化处理，将输入参数处理为介于 (0, 1) 之间的数值。归一化公式如下：

$$\bar{x} = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (1)$$

式中： \bar{x} 为归一化后的结果； x 为输入层 5 个参数中的任一个；分别为该参数的最大值和最小值。

2.2 隐含层的选择与误差度量

研究表明，单层隐含层的神经网络已经可以实现对真实输出结果任意精度的逼近，因此本研究采用单层隐含层。隐含层节点的确定常采用经验公式和试凑法相结合的方法^[6]。经验公式为

$$n = \sqrt{n + m} + a, 1 \leq a \leq 10 \quad (2)$$

式中： n 为输入层节点数； m 为输出层节点数； a 为常数。

本研究采用贝叶斯正则法计算预测误差函数以训练神经网络模型，对算法中的权值、阈值和节点等相关信息进行初步设定。据图 3 迭代过程的均方误差可知，第 54 次迭代时预测值和实际值的迭代误差达到最小值，且其后的 6 次迭代的均方误差均大于第 54 次迭代，迭代终止。神经网络模型结构见图 4。以发动机控制参数与输出功率为例进行模型的训练结果如图 5 所示，训练、测试过程中的相关性系数与全局相关性系数基本一致，因此结果仅以全局相关性系数进行分析。

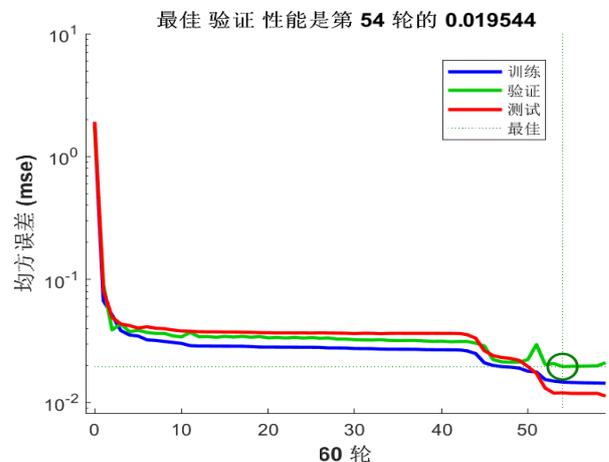


图 3 迭代过程均方误差

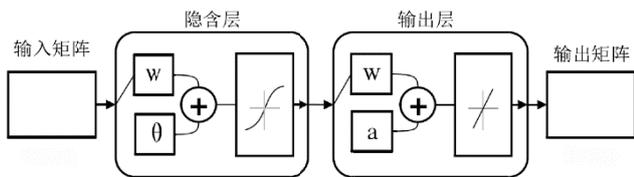


图4 神经网络模型结构

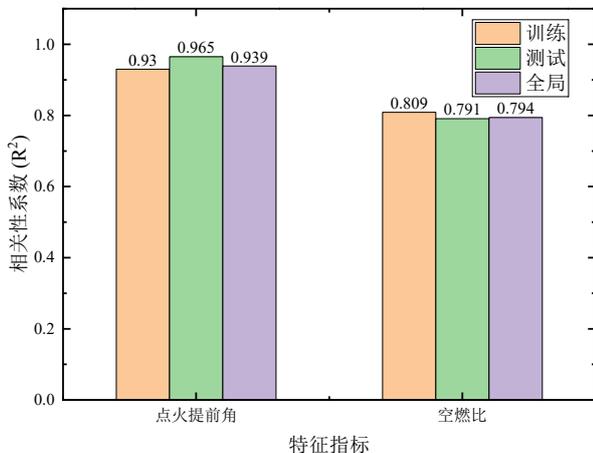


图5 训练过程对比

3 基于关联模型的结果分析

发动机输出功率一方面由发动机控制系统决定，另一方面由油品参数决定，基于神经网络关联分析模型，本节分别对输入层-输出层（发动机输出功率）、输入层-中间层、中间层-输出层三层关系进行关联性分析，对自变量-因变量-发动机输出功率三者间的关系进行探究。

首先对输入层自变量与输出层之间的关系进行分析，自变量包括发动机控制参数和油品参数。然后对输入层自变量与中间层因变量之间的关系进行分析，因变量为燃烧过程参数。其次对中间层因变量与输出层之间的关系进行分析。最后分析三者之间的关联性，探究影响发动机性能的途径及方式。三者之间的关联性分析流程如图6所示。

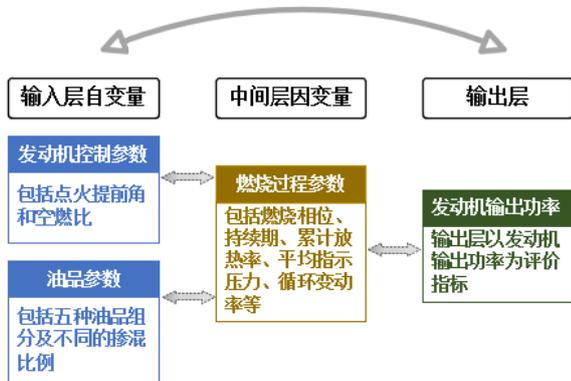


图6 关联性分析流程

3.1 各层指标关联性分析

影响汽油机燃烧过程的自变量包括发动机控制参数和油品参数。点火提前角和空燃比是两个重要的发动机控制参数，点火提前角决定了燃烧的始点，空燃比决定了混合气的混合质量和燃烧速度；本文中针对油品的研究包括烷基化、甲苯、乙醇、MTBE、异丙醇五种油品的组分及掺混比例。上述输入层自变量与输出层之间的相关系数如图7所示，点火提前角与发动机输出功率的相关系数为0.946，具有极强相关性，空燃比与发动机输出功率的相关系数为0.762，具有强相关性，五种油品与发动机输出功率的相关系数均小于0.1，认为具有极弱的相关性。

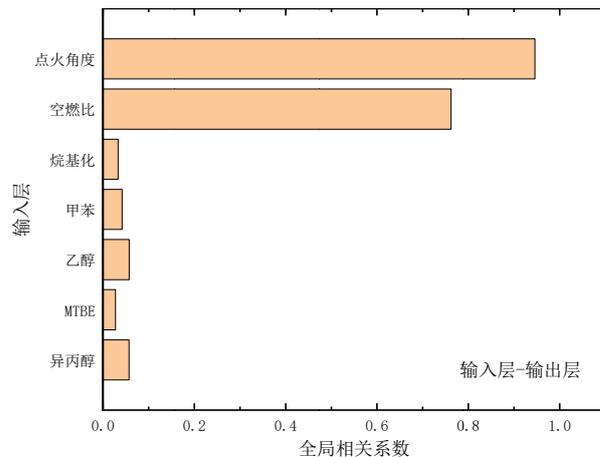


图7 输入层与输出层关联性

描述汽油机燃烧过程的参数包括燃烧相位、燃烧持续期、累计放热率、平均指示压力、循环变动率等。以上述燃烧过程参数作为因变量，因变量与发动机输出功率的相关系数如图8所示。平均指示压力和累计放热量与发动机输出功率的相关系数分别为0.988、0.992，具有极强相关性，燃烧相位、燃烧持续期、循环变动率与发动机输出功率的相关系数在[0.55, 0.62]区间内，具有中等相关性。

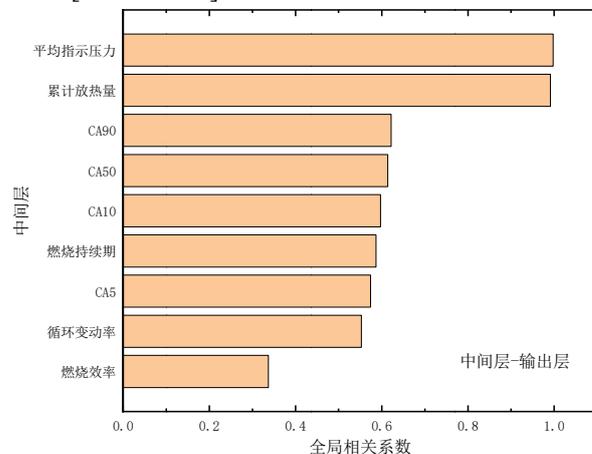


图8 中间层与输出层关联性

影响燃烧过程的自变量与上述因变量之间的相关系数如图 9 所示。点火提前角与平均指示压力、累计放热量、CA5、CA10、CA90、燃烧持续期循环变动率的相关系数均大于 0.9，具有极强相关性，空燃比与平均指示压力、累计放热量的相关系数分别为 0.724、0.741 具有强相关性，五种油品组分中，乙醇与燃烧相位的相关系数在[0.2, 0.4]区间内，具有中等程度相关性，与平均指示压力和累计放热量的相关系数小于 0.062，具有极弱相关性，其他油品组分与因变量的相关系数均小于 0.2，具有极弱相关性。

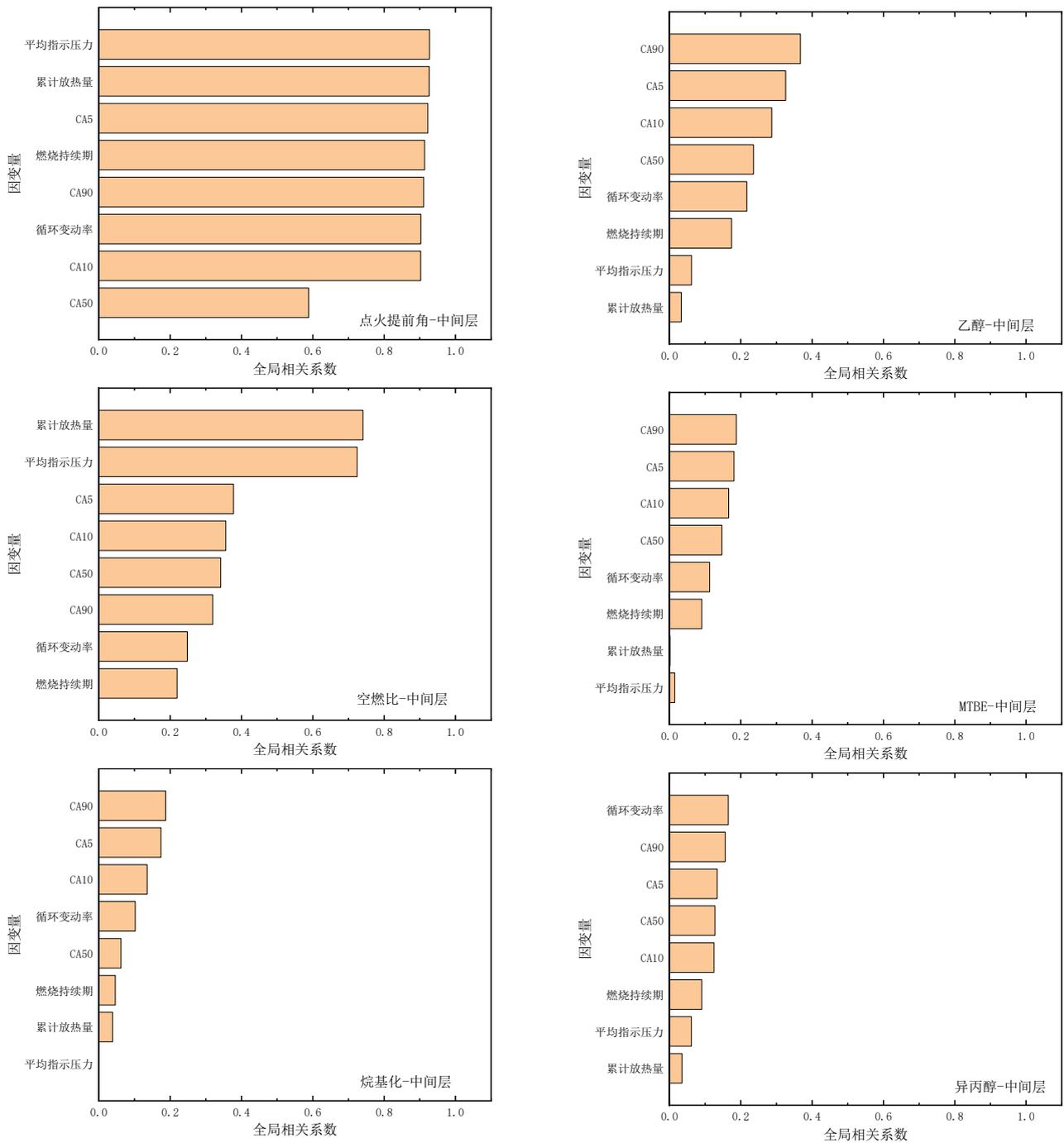


图 9 输入层与中间层关联性

3.2 发动机性能影响途径分析

选则与发动机输出功率关联性最强的五个燃烧过程参数对输入层-中间层-输出层之间的关系进行分析,五个燃烧过程参数与发动机输出功率的相关性从大到小为平均指示压力、累计放热量、CA90、CA50、CA10。表4显示了输入层自变量与上述五个中间层因变量及输出层之间的相关系数,表头中‘1’表示输入层,‘2’表示因变量,‘3’表示输出层,表中的数值为相关系数。从表中可以看出,在所有的‘2-3’层中,相关系数大于0.9时,对应的‘1-3’层相关系数与对应的‘1-2’层中最大的相关系数比较接近,因此可以认为输入层与输出层的相关程度取决于输入层与中间层中因变量与输出层关联性最强的参数之间的相关程度。

综上所述,各自变量通过影响燃烧过程中的平均指示压力和累计放热量进而影响发动机的输出功率;点火提前角与发动机输出功率的关联性最强,空燃比与发动机输出功率的关联性其次,油品组分及掺混比例与发动机输出功率的关联性极弱。

表4 各层之间的相关系数对比

1	2	1-2	2-3	1-3
点火提前角	平均指示压力	0.92747	0.99783	0.94567
	累计放热量	0.92624	0.99151	
	CA90	0.91119	0.62207	
	CA50	0.58828	0.61387	
	CA10	0.90262	0.59721	
空燃比	平均指示压力	0.72441	0.99783	0.76234
	累计放热量	0.74074	0.99151	
	CA90	0.31938	0.62207	
	CA50	0.34205	0.61387	
	CA10	0.35606	0.59721	
烷基化	平均指示压力	2.58E-32	0.99783	0.032975
	累计放热量	0.038641	0.99151	
	CA90	0.1874	0.62207	
	CA50	0.06237	0.61387	
	CA10	0.13561	0.59721	
甲苯	平均指示压力	0.059675	0.99783	0.041824
	累计放热量	0.015816	0.99151	
	CA90	0.12412	0.62207	
	CA50	0.11911	0.61387	
	CA10	0.09451	0.59721	
乙醇	平均指示压力	0.062005	0.99783	0.057253

	累计放热量	0.033052	0.99151	
	CA90	0.36724	0.62207	
	CA50	0.23532	0.61387	
	CA10	0.28652	0.59721	
	平均指示压力	-0.01494	0.99783	
M T B E	累计放热量	-0.00127	0.99151	-0.02745
	CA90	0.18764	0.62207	
	CA50	0.14716	0.61387	
	CA10	0.16606	0.59721	
	平均指示压力	0.061283	0.99783	
异丙醇	累计放热量	0.03522	0.99151	0.057168
	CA90	0.15618	0.62207	
	CA50	0.12763	0.61387	
	CA10	0.12499	0.59721	
	平均指示压力	0.061283	0.99783	

4 结论

(1)与发动机性能相关性最强的输入层自变量为点火提前角,全局相关系数为0.946;五种油品与发动机性能的相关系数均小于0.2,具有极弱的相关性;中间层因变量与发动机性能相关性最强的是平均指示压力和累计放热量,相关系数均大于0.99,具有极强的相关性;点火提前角与中间层因变量的相关性最强,相关系数基本分布在[0.9, 0.95]区间内。

(2)自变量对发动机性能影响的途径是通过影响燃烧过程中的平均指示压力和累计放热量进而影响发动机的输出功率。

(3)本文以发动机动力性能为例开展了各项指标参数之间的关联性分析,研究方法不仅适用于发动机动力性能,同样适用于发动机经济性、排放特性的研究。

参考文献:

- [1] 沈义涛. 汽油品质对发动机性能影响的试验研究与数值模拟[D]. 清华大学, 2009.
- [2] 李静, 李方义, 周丽蓉, 等. 基于BP神经网络的产品生命周期评价敏感性分析[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 666-671.
Li Jing, Li Fangyi, Zhou Lirong, et al. Sensitivity analysis for life cycle assessment of product based on backpropagation neural network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 666-671.

-
- [3] Huang M J, Tsou Y L, Lee S C. Integrating fuzzy data mining and fuzzy artificial neural networks for discovering implicit knowledge[J]. Knowledge-Based Systems, 2006, 19(6):396-403.
- [4] 张媛, 秦勇, 程晓卿, 庞学苗, 邢宗义. 基于改进 narx 神经网络的接触线表面不平顺与弓网接触力关联分析方法[J]中国铁道科学(3期) .
- [5] 闰飞宇, 李伟卓, 杨卫卫, 等. 基于 Bagging 神经网络集成的燃料电池性能预测方法 [J] 中国科学, 2019, 000(004):P. 391-401
- [6] 郝志勇, 刘伟, 夏玮, 等. 基于 BP 神经网络的吸运风机故障诊断 [J]. 工程设计学报, 2012, 19(1):57-60, 66.
Hao Zhiyong, Liu Wei, Xia Wei, et al. Fault diagnosis of the fan with air suction based on BP neural network[J]. Journal of Engineering Design, 2012, 19(1):