

采用机器学习的二甲醚层流燃烧速度预测研究

许凡¹, 陈朝阳¹, 李昭¹, 李倩倩²

(1. 长安大学汽车学院, 710064, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了明确二甲醚层流燃烧速度与混合气初始条件(温度、压力、当量比)之间的关系,基于大量的实验及数值模拟数据,利用机器学习多变量回归算法,建立了二甲醚/空气预混层流燃烧速度随初始条件的拟合关系式。通过与文献及数值模拟结果的对比,发现所建立的函数关系式能够在0.8~1.4当量比、298~373 K初始温度和0.1~1.0 MPa初始压力范围内得到准确的二甲醚层流燃烧速度预测结果。二甲醚层流燃烧速度随初始压力呈负指数关系,随初始温度呈正指数关系,化学当量比时,压力和温度指数的绝对值较小,混合气较浓或较稀时,压力和温度指数的绝对值增大,表明二甲醚层流燃烧速度随初始压力的增大而减小,随初始温度的升高而增大,且在较浓或者较稀的混合气条件下,层流燃烧速度随初始压力和温度的变化更为敏感。研究结果可以为二甲醚发动机数值模拟提供简单准确的层流燃烧速度输入数据,从而节约研究成本和计算时间。

关键词: 层流燃烧速度;二甲醚;模型预测;机器学习;多变量回归

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007008 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0062-06



OSID 码

Prediction on the Laminar Burning Velocity of Dimethyl Ether/Air Mixtures Using Machine Learning

XU Fan¹, CHEN Zhaoyang¹, LI Zhao¹, LI Qianqian²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

(2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To determine the relationship between laminar burning velocity of dimethyl ether (DME)/air mixture and the initial conditions (temperature, pressure, equivalence ratio), the calculation of laminar burning velocity of dimethyl ether/air mixture was formulated using the multivariate regression algorithm of machine learning based on the experimental and simulated results. By comparing with the results of literatures and numerical simulation, it is found that the formula can accurately predict the laminar burning velocity of dimethyl ether/air mixtures under the conditions with equivalence ratio range of 0.8-1.4, initial pressure range of 0.1-1.0 MPa and initial temperature range of 298 - 373 K. The laminar burning velocity of DME has negative exponent relationship with initial pressure but positive exponent relationship with initial temperature, which indicates a decrease of laminar burning velocity of DME with the increase of initial pressure but an increase with the initial temperature. The absolute value of the pressure or temperature index is smaller in the stoichiometric condition, and the value increases as the

收稿日期: 2020-01-16。 作者简介: 许凡(1994—),男,硕士生;陈朝阳(通信作者),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506010);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102229202)。

网络出版时间: 2020-04-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200403.1434.004.html>

mixture becomes richer or leaner, indicating a higher sensitivity of laminar burning velocity of DME to the initial pressure or initial temperature change in this condition. This study may provide simple and accurate input data of laminar burning velocity for the numerical simulation of DME engines to save research costs and calculation time.

Keywords: laminar burning velocity; dimethyl ether; model prediction; machine learning; multivariate regression

目前,化石燃料仍然是我国车用发动机的主要动力来源,随着汽车保有量的逐年增长,由此引发的能源短缺和环境污染问题日益突出,寻找清洁替代燃料和开发内燃机高效低污染燃烧技术是目前发动机领域的研究热点。二甲醚(DME)来源广泛、十六烷值高、燃烧清洁,是柴油机燃料的良好替代产品和添加剂^[1-2]。

层流燃烧速度是燃料的基本燃烧特性参数之一,是湍流燃烧研究的基础,也是发动机数值模拟研究的基础输入参数,对燃料的层流燃烧速度进行准确测定和预测对实际燃烧器设计和改进有非常重要的意义。近年来,各国学者用多种不同方法对二甲醚/空气预混合气的层流燃烧速度进行了测定^[3-9],得到了大量的实验数据,这些数据也促使了二甲醚详细化学反应机理的建立和完善^[10-12]。然而,由于层流燃烧速度与初始条件之间存在复杂的非线性关系,尽管二甲醚的层流燃烧数据很多,但宽广条件下层流燃烧速度与初始条件的定量关系并不明确。燃烧分析软件结合详细化学反应动力学机理能够对混合气的层流燃烧速度进行较为准确的预测,但与发动机数值模拟软件耦合运算时需要耗费大量的时间和内存而影响计算效率。发动机燃烧模拟一直是个难题,缸内实际条件复杂,局部温度、压力、当量比变化多端,与基础实验工况差别较大,局部燃烧速度难以确定,插值计算可能造成较大的误差。因此,有必要建立简单准确的层流燃烧速度预测方法,以满足发动机数值模拟的要求。

机器学习在处理非线性问题方面有特别的优势,近年来被广泛用于工程技术领域中各类复杂问题的研究^[13-14]。本文基于大量的二甲醚层流燃烧速度实验数据及详细化学反应机理模拟结果,用机器学习多变量回归算法,建立二甲醚层流燃烧速度与主要初始条件当量比、初始压力和初始温度之间的准确函数关系式,以得到宽广条件下二甲醚层流燃烧速度预测值,为二甲醚发动机数值模拟提供简单准确的输入参数。

1 研究方法介绍

1.1 层流燃烧速度分析式的建立

预混层流火焰在可燃气体中的传播是最简单的燃烧现象,但其涉及的化学动力学反应以及能量和组分的扩散等传热传质过程相当复杂,因此很难得到其燃烧特性的准确解析式。为了考察层流火焰的燃烧特性与混合气参数之间的关系,必须对基本守恒方程进行一系列的假设和简化,最终得到层流燃烧速度的简单模型。根据一般反应原理,化学反应速率对温度呈阿累尼乌斯依赖关系,当量比、初始温度等的变化对绝热火焰温度有重要影响,从而影响火焰传播速度;初始压力则是通过反应速率、热扩散系数以及未燃气体的密度等影响火焰传播速度。Faghieh等用定容球形火焰法在发动机相关温度和压力下测量了二甲醚/空气混合气的层流燃烧速度,并对数据进行整理,拟合得到如下关系式^[4]

$$S_u = S_{u,0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\gamma \left(\frac{p_u}{p_0} \right)^\beta \quad (1)$$

式中: S_u 为层流燃烧速度; T_u 和 p_u 分别为混合气的初始温度和压力; $S_{u,0}$ 是压力为 p_0 、温度为 T_0 时的层流燃烧速度; γ 和 β 分别为层流燃烧速度的温度和压力指数,用最小二乘法拟合得到。在文献[4]实验条件范围内,这两个指数分别取值为 $\gamma=3.34$, $\beta=-0.568$ 。Metghalchi等通过实验确定了各种燃料/空气混合物在内燃机和燃气轮机中典型温度和压力条件下的层流燃烧速度,并根据实验数据,拟合出了层流燃烧速度与初始燃烧参数之间的经验公式^[15]

$$S_u = S_{u,0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\gamma \left(\frac{p_u}{p_0} \right)^\beta (1 - 2.1Y_{dil}) \quad (2)$$

式中: $T_0=298\text{ K}$; $p_0=0.1\text{ MPa}$; γ 和 β 分别为当量比 ϕ 的一次函数; Y_{dil} 为混合物中稀释剂的质量分数。研究表明,对甲醇、丙烷、异辛烷,以上关系式在实验涉及的条件下有较好的适应性^[15]。

本文基于宽广条件下的二甲醚/空气层流燃烧速度文献数据和文献[15]中的拟合关系式(2),利用

机器学习多变量回归算法,确定了适用于二甲醚层流燃烧速度计算的函数关系式。为了得到更为准确的函数关系式,本文采用如下当量比的 3 次函数来描述温度和压力指数

$$S_{u,0} = \alpha_0 + \alpha_1 \phi + \alpha_2 \phi^2 + \alpha_3 \phi^3 \tag{3}$$

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 \phi + \gamma_2 \phi^2 + \gamma_3 \phi^3 \tag{4}$$

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 \phi^2 + \beta_3 \phi^3 \tag{5}$$

1.2 多变量线性回归算法

回归算法是机器学习中最常见也是应用最广的一种算法,回归算法中试图采用对误差的衡量来探索变量之间的关系。在机器学习领域,回归算法有很多种,其中最为常用的算法是线性回归算法。线性回归是一种监督学习,用自变量与因变量的数据集来训练函数关系式

$$h(\mathbf{X}) = \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{X} = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \cdots + \theta_n x_n \tag{6}$$

式中: $h(\mathbf{X})$ 为因变量; $\boldsymbol{\theta}$ 为训练得出的系数矩阵; $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 分别代表从 1 到 n 个自变量。由式(2)可知,本文所要训练得到的多项式为指数相乘的函数式,与式(6)形式完全不同,同时由于本文研究的是零掺混条件下的二甲醚层流燃烧速度,所以式(2)中关于混合气稀释的部分 $(1-2.1Y_{\text{dil}})$ 不予考虑,从而得到如下函数式

$$S_u = S_{u,0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\gamma \left(\frac{p_u}{p_0} \right)^\beta \tag{7}$$

对式(7)两边同时取对数,得到如下表达式

$$\ln \frac{S_u}{S_{u,0}} = \gamma \ln \frac{T_u}{T_0} + \beta \ln \frac{p_u}{p_0} \tag{8}$$

描述预测值与实际值之间差值的代价函数为

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h(\mathbf{X})_i - y_i)^2 \tag{9}$$

式中: $h(\mathbf{X})_i$ 为第 i 个预测值; y_i 为第 i 个样本值; m 为样本数。代价函数值越小,说明训练得到的函数关系式预测越准确,线性回归训练的目的就是找到代价函数的最小值。

本文利用梯度下降算法进行预测函数求取,原理是不断寻找参数组合使代价函数值不断朝最小值逼近,直至代价函数值收敛到全局最小,当 $n \geq 1$ 时,求导之后,参数的梯度下降算法如下

$$\left. \begin{aligned} \theta_j &:= \theta_j - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ((h(\mathbf{X})_i - y_i) x_{ij}) \\ \text{同步更新 } \theta_j, j &= 0, 1, \cdots, n \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

1.3 数据样本的建立

目前,针对二甲醚层流燃烧特性的研究开展了

很多。陈朝阳等利用定容燃烧弹球形扩展火焰法对不同初始温度和压力下的二甲醚/空气预混合气的层流燃烧速度进行了实验测定,获得了丰富的实验数据^[16],并验证了 Zhao 等发展的二甲醚详细化学反应机理^[10]。本文选取文献[16]中的实验值作为机器学习的基础样本数据,同时为了扩充样本数据,利用 Chemkin-II 数值模拟软件^[17]及 Zhao 等发展的二甲醚详细化学反应机理^[10]对实验温度压力范围内其他条件下的二甲醚/空气预混层流燃烧速度进行了模拟计算,最终得到 133 组 Chemkin 模拟样本,与 35 组实验样本一起,作为机器学习的训练及测试样本集。

2 结果分析

基于样本库中的 35 组实验值和 133 组模拟数值,对式(8)所表述的多变量回归问题进行求解,训练得出各项系数,如表 1 所示。

表 1 拟合系数表

系数	数值	系数	数值	系数	数值
α_0	-110.78	γ_0	0.545 6	β_0	0.160 1
α_1	296.89	γ_1	4.729 0	β_1	-2.256 6
α_2	-144.13	γ_2	-6.127 6	β_2	3.090 5
α_3	4.116 1	γ_3	2.568 4	β_3	-1.275 8

2.1 模型评价

图 1 给出了在 298~373 K 初始温度、0.1~0.6 MPa 初始压力、0.8~1.4 当量比范围内的 168 组二甲醚层流燃烧速度样本值 $S_{u,Y}$ 与本文预测值 S_u 的对比。由图可知,预测值与样本值拟合良好(拟合度 $R^2 = 0.97$),最大误差为 ± 3.5 cm/s,均方差为 1.02,表明模型对样本数据进行了很好的预测,模型准确性良好。

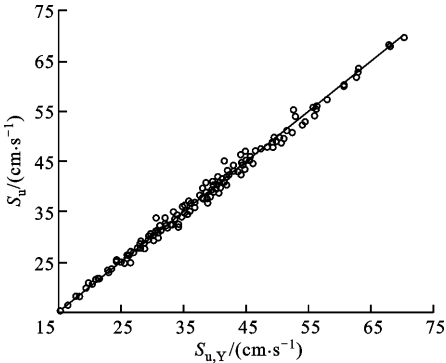


图 1 二甲醚层流燃烧速度样本值与预测值对比

图 2 给出了在初始压力为 0.1 MPa、初始温度

为 298 K 时二甲醚层流燃烧速度的样本值、预测值与文献值^[3,5-7,18-20]的对比。可以看出,本文的预测值与样本值得到了良好的吻合,但与文献值存在一定差异。这主要是由研究方法的不同而引起,吴昊等的研究中有类似报导^[18]。本文预测值与样本值在稀混合气条件时略高于文献值,与 Zhao 等的实验结果^[5]较为接近,在浓混合气时与 Daly 等定容燃烧弹实验数据^[6]更为接近,且处于各文献值的平均值附近,说明本文研究的预测模型可以有效预测常温常压附近的二甲醚/空气预混气体的层流燃烧速度。

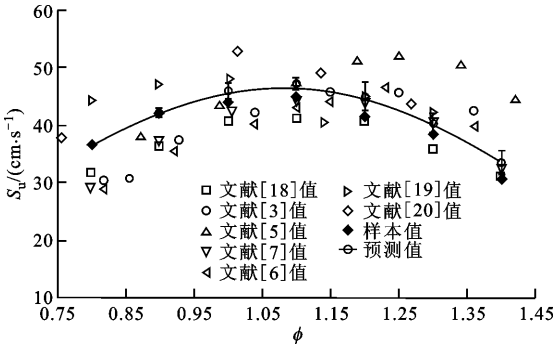


图 2 二甲醚层流燃烧速度预测值与样本值及文献值的对比

2.2 高压条件下模型预测评价

图 3 给出了高压条件 ($p_u=1.0\text{ MPa}$ 、 $T_u=298\text{ K}$)下,二甲醚/空气预混层流燃烧速度的模型预测值、基于 Zhao 等所述机理^[10]的 Chemkin 模拟值以及文献值^[3,21]的对比。由图可知,在高压条件下,模型预测值与 Zhao 等机理的 Chemkin 模拟值仍然达到了良好的吻合,与 Vries 等定容燃烧弹法测得的二甲醚层流燃烧速度值^[21]也非常接近。本文预测值与 Qin 等的文献值^[3]有些差异,但总体趋势相近,表明本文建立的预测模型对 1.0 MPa 的初始压力仍然有较好的适应性。

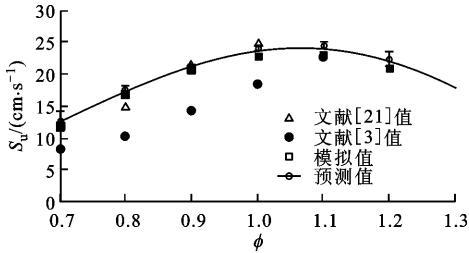


图 3 高压条件下二甲醚层流燃烧速度的预测值与 Chemkin 模拟值及文献值的对比

2.3 初始温度和压力对层流燃烧速度的影响

图 4 给出了初始温度 $T_u=298\text{ K}$,当量比分别

为 0.8、1.0 和 1.2 时二甲醚/空气预混层流燃烧速度随初始压力的变化。从图中可以看出:对于 3 个当量比,在初始压力为 0.1~1.0 MPa 范围内,模型预测值都与 Chemkin 模拟值得到了良好的吻合,说明本文模型多项式可以预测较宽压力范围内的二甲醚层流燃烧速度;3 个当量比下,层流燃烧速度随初始压力增大都呈现指数下降的趋势,其压力指数分别为 $-0.320\ 5$ ($\phi=0.8$)、 $-0.281\ 8$ ($\phi=1.0$) 和 $-0.302\ 1$ ($\phi=1.2$),表明初始压力对层流燃烧速度呈负指数影响关系;在初始压力较小时,层流燃烧速度随初始压力增大而减小的幅度较大,随着初始压力增大,层流燃烧速度减小的幅度逐渐减小;化学当量比时,压力指数绝对值较小,随着混合气变浓或者变稀,压力指数绝对值都会增大,表明在较浓或者较稀的混合气条件下,层流燃烧速度对压力变化更为敏感。

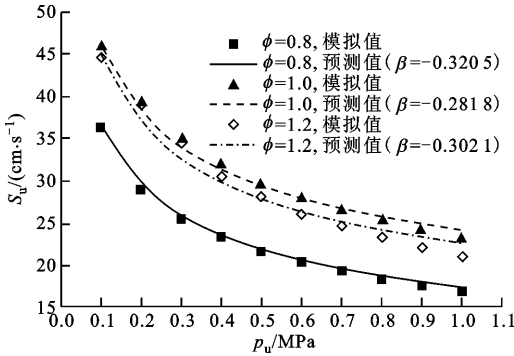


图 4 二甲醚层流燃烧速度随初始压力的变化

图 5 给出了在初始压力 $p_u=0.1\text{ MPa}$,当量比分别为 0.8、1.0 和 1.2 时二甲醚/空气预混层流燃烧速度随温度的变化。从图中可以看出,3 个当量比下的层流燃烧速度都随初始温度升高而增大。从模型预测结果可以看出:初始温度对层流燃烧速度呈正指数影响关系,温度指数分别为 $1.722\ 1$ ($\phi=$

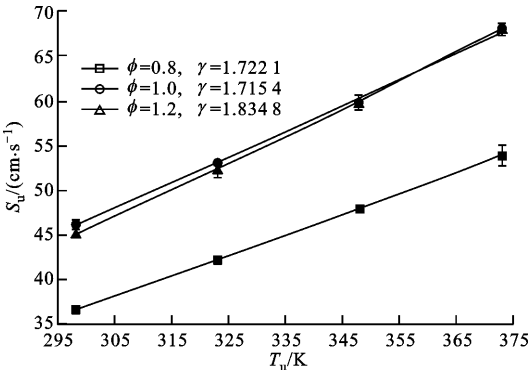


图 5 $p_u=0.1\text{ MPa}$ 时不同当量比下二甲醚层流燃烧速度随初始温度的变化

0.8)、1.715 4($\phi=1.0$)和 1.834 8($\phi=1.2$),化学当量比时,温度指数较小,说明此时温度对于层流燃烧速度影响较小;随着混合气变浓或者变稀,温度指数都会增大,表明在较浓或者较稀的混合气条件下,层流燃烧速度对温度变化更为敏感。

3 结 论

基于大量的二甲醚/空气预混层流燃烧速度实验及数值模拟数据,利用机器学习多变量回归算法对不同初始条件下的二甲醚/空气预混层流燃烧速度进行了模型预测,主要研究结果如下。

(1)建立了二甲醚层流燃烧速度与初始条件的准确函数关系式,模型预测结果与样本值及文献值的对比表明,所建函数关系式在 298~373 K、0.1~1.0 MPa 和 $\phi=0.8\sim 1.6$ 的初始条件范围内有良好的预测能力。

(2)二甲醚层流燃烧速度随初始压力呈负指数关系,化学当量比时,压力指数绝对值较小,随着混合气变浓或者变稀,压力指数绝对值都会增大,表明在较浓或者较稀的混合气条件下,二甲醚层流燃烧速度对压力变化更为敏感。

(3)二甲醚层流燃烧速度随初始温度呈指数关系,化学当量比时,温度指数较小,说明此时温度对层流燃烧速度影响较小;随着混合气变浓或者变稀,温度指数都会增大,表明随混合气变浓或者变稀,温度对二甲醚层流燃烧速度的影响增大。

参考文献:

- [1] ARCOUMANIS C, BAE C, CROOKES R, et al. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: a review [J]. Fuel, 2008, 87(7): 1014-1030.
- [2] KIM M Y, YOON S H, RYU B W, et al. Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system [J]. Fuel, 2008, 87(8): 2779-2786.
- [3] QIN X, JU Y. Measurements of burning velocities of dimethyl ether and air premixed flames at elevated pressures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 233-240.
- [4] FAGHIH M, LI H Y, GOU X L, et al. On laminar premixed flame propagating into autoigniting mixtures under engine-relevant conditions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4673-4680.
- [5] ZHAO Z, KAZAKOV A, DRYER F L. Measurements of dimethyl ether/air mixture burning velocities by using particle image velocimetry [J]. Combustion and Flame, 2004, 139(1/2): 52-60.
- [6] DALY C A, SIMMIE J M, JUDITH W, et al. Burning velocities of dimethyl ether and air [J]. Combustion and Flame, 2001, 125(4): 1329-1340.
- [7] WANG Y L, HOLLEY A T, JI C, et al. Propagation and extinction of premixed dimethyl ether/air flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1035-1042.
- [8] CHEN Z Y, WEI L J, HUANG Z H, et al. Measurement of laminar burning velocities of dimethyl ether-air premixed mixtures with N_2 and CO_2 dilution [J]. Energy and Fuels, 2009, 23(2): 735-739.
- [9] HUANG Z H, WANG Q, YU J R, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures [J]. Fuel, 2007, 86(15): 2360-2366.
- [10] ZHAO Z, CHAOS M, KAZAKOV A, et al. Thermal decomposition reaction and a comprehensive kinetic model of dimethyl ether [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2008, 40(1): 1-18.
- [11] GUO H J, SUN W, HAAS F M, et al. Measurements of H_2O_2 in low temperature dimethyl ether oxidation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(1): 573-581.
- [12] WANG Z, ZHANG X, XING L, et al. Experimental and kinetic modeling study of the low-and intermediate temperature oxidation of dimethyl ether [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4): 1113-1125.
- [13] 田心如, 蔡凝昊, 张志薇. 基于气象因子及机器学习回归算法的夏季空调负荷预测 [J]. 气象科学, 2019, 39(4): 548-555.
TIAN Xinru, CAI Ninghao, ZHANG Zhiwei. Summer air-conditioning load forecasting in Nanjing based on meteorological factors and machine learning regression algorithm [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(4): 548-555.
- [14] 牛晓晓. 基于机器学习及智能算法的柴油机性能预测及优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [15] METGHALCHI M, KECK J C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 191-210.
- [16] 陈朝阳. 二甲醚及二甲醚掺混火焰预混层流燃烧基础研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
- [17] KEE R J, RUPLEY F M, MILLER J A. Chemkin-II;

a Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics: SAND Report 89-8009 [R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Laboratory, 1989.

[18] WU H, HU E J, YU H B, et al. Experimental and numerical study on the laminar flame speed of n-butane/dimethyl ether-air mixtures [J]. Energy and Fuels, 2014, 28(5): 3412-3419.

[19] GIBBS G J, CALCOTE H F. Effect of molecular structure on burning velocity [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1959, 4(3): 226-237.

[20] 张波, 傅维标. 二甲醚火焰传播速度的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(2): 163-166.
ZHANG Bo, FU Weibiao. Experimental study on laminar flame speeds of dimethyl ether and air mixtures [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(2): 163-166.

[21] VRIES J D, LOWRY W B, SERINYEL Z, et al. Petersen laminar flame speed measurements of dimethyl ether in air at pressures up to 10 atm [J]. Fuel, 2011, 90: 331-338.

(编辑 荆树蓉)

《西安交通大学学报》2019 年度优秀学术论文名单

在综合考虑论文的被引用频次、施引文献类型和层次,以及传播时间等因素的基础上,我们从 2017 年、2018 年发表的论文中评选出以下 25 篇,决定授予“《西安交通大学学报》2019 年度优秀学术论文”称号(奖励 1000 元/篇,同时免第 1 作者或通信作者版面费 1 篇,2 年内有效)。

1. 程传奇,郝向阳,李建胜,张振杰,孙国鹏. 融合改进 A~* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划. 2017 年 11 期
2. 王丽华,谢阳阳,张永宏,赵晓平,周子贤. 采用深度学习的异步电机故障诊断方法. 2017 年 10 期
3. 张西宁,雷威,李兵. 主分量分析和隐马尔科夫模型结合的轴承监测诊断方法. 2017 年 6 期
4. 司刚全,李水旺,石建全,郭璋. 采用改进果蝇优化算法的最小二乘支持向量机参数优化方法. 2017 年 6 期
5. 张国和,黄凯,张斌,符欢欢,赵季中. 最大稳定极值区域与笔画宽度变换的自然场景文本提取方法. 2017 年 1 期
6. 李兵,杜俊伟,陈磊,徐海杰,侯春一. 工业机器人 RV 减速器传动误差分析. 2017 年 10 期
7. 陈花玲,罗斌,朱子才,李博. 4D 打印:智能材料与结构增材制造技术的研究进展. 2018 年 2 期
8. 王洪乐,王家序,周青华,熊青春,魏子淇. 基于 BP 神经网络的数控机床综合误差补偿方法. 2017 年 6 期
9. 刘京,杜进芳,武佳,冯江涛,延卫. 吸附浓缩-芬顿氧化法深度处理印染废水. 2018 年 1 期
10. 章军辉,李庆,陈大鹏. 基于 BP 神经网络的纵向避撞安全辅助算法. 2017 年 7 期
11. 刘小民,魏铭,杨罗娜,乔亚光. 内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声影响的研究. 2017 年 12 期
12. 张西宁,向宙,唐春华. 一种深度卷积自编码网络及其在滚动轴承故障诊断中的应用. 2018 年 7 期
13. 孙跃,夏金凤,唐春森,向丽娟. 采用元胞遗传算法的无线电能传输网路寻优. 2017 年 4 期
14. 杨航,刘凌,倪骏康,张诚. 双关节刚性机器人自适应 BP 神经网络算法. 2018 年 1 期
15. 谢萌,马志杰,王全红,刘建超,刘圣华. 聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料发动机燃烧与排放的试验研究. 2017 年 3 期
16. 祁建军,汪文威. 多线程并行构建三支概念. 2017 年 3 期
17. 马朝,何雅玲,袁帆,吕硕,朱桂花. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究. 2017 年 5 期
18. 颜敏炜,张英杰,代博超,李云龙. 采用激光传感器的同轴度检测技术研究. 2017 年 10 期
19. 熊连松,卓放,刘小康,杨苹,许志荣. 静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究. 2017 年 12 期
20. 张立玉,路昭,韦立川,漆鹏程,孟祥兆. 锂电池性能与温度相关性的基础实验研究. 2018 年 5 期
21. 舒帆,屈丹,张文林,周利莉,郭武. 采用长短时记忆网络的低资源语音识别方法. 2017 年 10 期
22. 赵广社,吴思思,荣海军. 多源统计数据驱动的航空发动机剩余寿命预测方法. 2017 年 11 期
23. 高榕,张良,梅魁志. 基于 Caffe 的嵌入式多核处理器深度学习框架并行实现. 2018 年 6 期
24. 刘洲洲,李士宁. 采用压缩感知和 GM(1,1)的无线传感器网络异常检测方法. 2017 年 2 期
25. 吴尚则,秦贵和,刘毅,郭森,戚琦. 车载控制器局域网络总线的动态口令身份认证方法. 2017 年 6 期