

# 舰船柴油机缸内工作过程监测系统设计与实现

许友林 陈丹丹 熊 玲

(91872 部队 北京 102442)

**摘 要:** 柴油机缸内工作过程监测是准确掌握柴油机工作状态,及时发现早期故障隐患的重要手段。介绍了舰船柴油机缸内工作过程监测技术应用现状,提出了柴油机缸内工作过程监测系统的设计方案,针对该监测系统在设计及研制过程中存在的高温动态压力传感器、数据采集模块、数据分析处理方法、系统故障诊断与预警等主要技术难题,给出了具体实现方法。通过对船用柴油机热工性能实际监测与诊断分析应用表明,该系统具有良好的柴油机热工性能分析和故障诊断实用价值。

**关键词:** 柴油机;性能监测;示功图;传感器

**中图分类号:** TK427    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.2010

## Design and implementation of in-cylinder working processes monitoring system for marine diesel engines

Xu Youlin Chen Dandan Xiong Ling

(PLA Unit: 91812, Beijing 102442, China)

**Abstract:** Monitoring the working process of diesel engine cylinder is an important means of the accurate grasp of the diesel engine working status, and timely detection of early fault hidden trouble. This paper introduces the monitoring technology application situation for working process in marine diesel cylinder, puts forward a design scheme of monitoring system of the working process in diesel engine. Aiming at the main technical problems of high temperature dynamic pressure sensor, data acquisition module, data analysis and processing method, system fault diagnosis and early warning in the monitoring system's design and development process, it gives the specific realization method. Based on the actual application to marine diesel engine thermal performance monitoring and diagnosis analysis, it shows that the system is of good practical value to diesel engine thermal performance analysis and fault diagnosis.

**Keywords:** diesel engine; performance monitoring; indicator diagram; sensor

### 1 引 言

柴油机以其热效率高、可靠性好等特点,目前广泛应用于机车、船舶等行业中,特别是在船用动力装置中更是占据主导地位。对其进行故障预测与健康管理技术作为实现视情维修和自主保障的重要技术手段<sup>[1]</sup>,柴油机性能分析是健康评估的重要内容,它与健康管理相结合,将其可靠性提升到一个全新的高度。在舰船柴油机的性能分析上,通常采用柴油机的各平均参数测量和监控仪表等监测方法。但缺少掌握柴油机工作工程参数的监测,无法全面了解柴油机性能,不能及时发现柴油机故障及其早期隐

患。而目前故障诊断研究大多数集中于故障检测与定位,故障参数辨识考虑较少,主要是因为参数辨识需要较多的诊断信息<sup>[2]</sup>。

柴油机缸内工作过程是柴油机实现热功转换的核心过程,该过程的优劣直接影响到柴油机功能实现和工作效率。对柴油机缸内工作过程实施监测,可以提供表征其机械负荷和动力负荷的最高燃烧压力、压力升高率等重参数数据,在柴油机性能指标与燃烧过程之间建立起量化关系,并为准确预测出其运行性能积累必要的数据资料。通过监测柴油机缸内工作过程动态变化情况,早期发现柴油机缸内工作性能劣化、诊断

收稿日期:2014-04

与此有关的故障。

## 2 柴油机缸内工作过程监测技术现状

低速柴油机缸内工作过程监测的主要手段是采用机械示功器测量示功图,根据示功图的形态判断柴油机缸内过程的优劣和存在的问题。由于受到机械示功器频响的限制,对于中高速柴油机只能采用爆压表测量最高压力、结合排温对柴油机缸内工作过程进行监测。由于这种传统的监测手段所包含的信息量有限,示功图的优劣以人的主观判断为准,存在着极大的或然性。近年来,随着传感技术和信号处理技术的发展,如各种滤波技术、各种谱分析技术,人工智能的系列技术,专家系统、神经网络等,以及其他技术在诊断中的应用,使设备诊断技术逐渐完善<sup>[3-4]</sup>。

在热力参数诊断方面,德国、日本、美国和挪威等航运业先进的国家先后开发了舰船柴油机性能诊断系统,如挪威 KYMA 公司研制的 Marine Performance Monitoring 已先后在十余艘船舶主机上得到应用,取得了良好的监测与诊断效果。以 LEMAG 公司 Preme 系列、ABB 公司 Cylmate<sup>®</sup> System 系列、奥地利 AVL 公司系列产品、德国 FEV 公司生产的 FEVIs 系列等电子示功器逐渐进入大型柴油机测试管理领域<sup>[5]</sup>。这些电子示功器采用电测技术和计算机技术精确测量柴油机示功图,通过对示功图的一般分析获得循环功、最高压力、最高压力时的曲轴转角等参数。

国内从事内燃机测试技术的力量发展较快<sup>[6]</sup>,如大连海事大学研制的柴油机示功图自动测取装置<sup>[7]</sup>、西安交通大学开发的内燃机燃烧分析仪<sup>[8]</sup>。这些系统都包括高速数据采集系统和软件两部分,但在应用软件开发上各有特点,能满足一般放热规律研究的需要,为利用示功图计算燃烧过程提供了技术支持。

ABB 公司的 Cylmate<sup>®</sup> Systems 采用电磁式压力传感器,由于一阶固有频率过低,仅适用于低速柴油机。LEMAG 公司的 Premet Online 和 Kongsberg Maritime AS 公司的 ENGINE CONDITION MONITORING 采用的敏感元件是 LGT(钽酸镓镧)的压电式传感器,可在 350℃ 以下可靠工作,适用于中高速柴油机,而连续工作时间有限制。

虽然燃烧分析仪来分析工作过程具有很大的优势,但是国内柴油机热工分析仪因关键技术弱,市场主要被国外的系列产品所占据,价格非常昂贵,使用操作不方便,维修困难。目前国内在研制便携式燃烧分析仪方面还不是很成熟,在应用于船用柴油机的便携式示功器还比较少。

## 3 柴油机缸内工作过程监测系统设计方案

实现对柴油机工作性能准确掌握和故障模式及时判断,需要针对柴油工作过程在线综合监测技术进行研究。

在制定柴油机工作过程监测系统设计方案时,首先,根据柴油机工作状态在线综合监测的技术需求,确定总体功能设计方法,在此基础上,再从技术实现的软、硬件技术设计 2 方面分布制定方案。总体设计思路如图 1 所示。

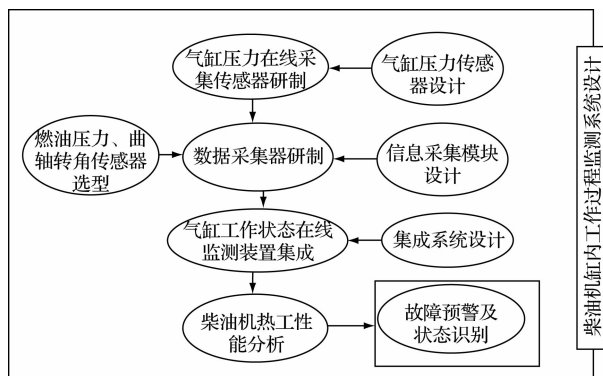


图1 柴油机缸内工作过程监测系统设计方案

### 3.1 总体功能设计方案

根据柴油机缸内工作过程监测以及及时发现故障、准确判定性能快速变化的实际需要,制定柴油机缸内工作过程监测系统所需实现的主要功能:

1) 柴油机各缸示功图、燃油喷射压力和曲轴转角获取功能。包括:各缸示功图、燃油喷射压力以及曲轴转角同步采样,定时间间隔持续采集功能和单次采集功能。

2) 采用数据库技术对示功图和燃油喷射压力及相关数据进行管理、查询、修改和导出与导入等。

3) 示功图的燃烧分析与特征值提取功能;燃油喷射压力特征值提取功能。

4) 示功图和燃油喷射压力特征值超限报警功能和故障诊断功能。

5) 示功图和燃油喷射压力与特征值的横向与纵向比较功能。

### 3.2 硬件组成设计

柴油机在线式电子示功器除了具有示功图测量与分析功能之外,还具有燃油喷射压力测量功能。本系统的硬件由以下各部分组成:超高温高压动态压力传感器、燃油喷射压力传感器、曲轴转角传感器、数据采集模块和上位计算机。具体情况如图 2 所示。

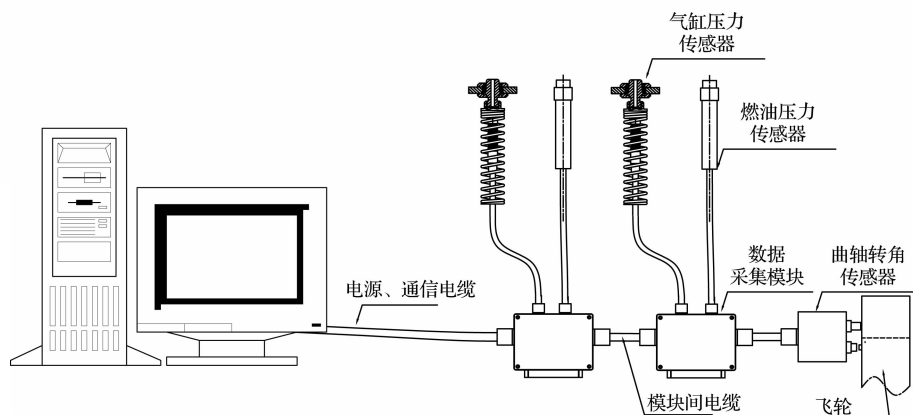


图2 监测系统数据采集模块接线示意

### 3.3 系统软件功能设计

系统软件如图3所示,由3大部分组成:数据采集与分析、数据管理和系统设置。

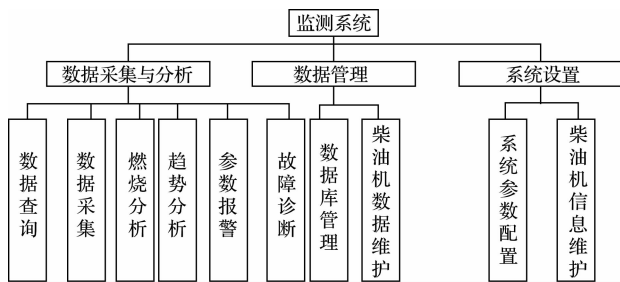


图3 软件功能模块

“数据采集与分析模块”:数据采集最多可以连接254个数据采集模块,同时控制多台柴油机的数据采集流程,并可实现单次采集和定时采集2种数据采集模式;数据分析方面,对采集的气缸压力和燃油喷射压力进行分析,获得柴油机整机参数、缸内过程参数、燃油喷射压力参数等,并对各参数进行参数超限提示,根据参数超限状态,就负荷平衡、空气不足、供油定时错误、雾化不良、爆燃、供油装置异常6种故障做出诊断分析。

“数据管理”:分别实现历史数据的查询、数据的导出、导入;数据库选择、备份等功能。

“系统设置”:实现发动机信息、舰船信息、系统配置信息的设置与管理。

## 4 系统开发主要技术难点及其实现

实施柴油机缸内工作过程在线监测,需要解决传感器研发、信息处理、综合集成等一系列关键技术的应用研究。主要技术难点及实现方法如下。

### 4.1 传感器设计

传感器是监测系统的关键部件,可靠性、稳定性、精确度等性能指标对系统工作质量起重要的作用<sup>[9]</sup>。该系统所需3类传感器。根据国内外实际,对系统最核心的超高

温动态压力传感器进行研发,下面着重介绍超高温动态压力传感器设计开发。

根据舰船柴油机缸内压力测量实际需求,针对压力传感器技术上要求量程大于等于250 MPa,最高工作温度大于等于450℃,测量精度高于1%。

#### 1) 材料的优选

在传感器设计开发过程中,在敏感元件材料、壳体材料、绝缘材料的优选中,通过多种材料性能试验的对比分析,制定了优选方案。

敏感元件材料:选用Kistler公司的超级晶体;壳体材料:选用特种高温耐蚀材料,由国内钢铁研究所专门炼制;绝缘材料:选用纯度99.9%的三氧化二铝陶瓷,由相关厂家专门烧制。

#### 2) 结构设计

传感器结构采用传统经典结构,如图4所示。

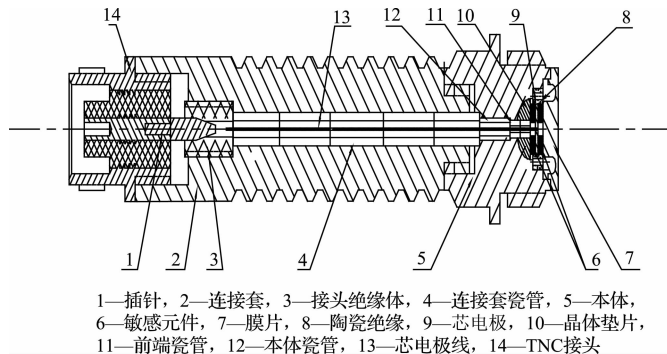


图4 超高温高压动态压力传感器结构

利用敏感元件6的压电效应,采用2片超级晶体10,在2片晶体之间设中心电极9,在提高灵敏度的同时减小加速度影响。

传感器膜片7采用厚膜设计,以提高膜片的疲劳寿命;为消除膜片厚膜设计而产生的较大安装应力,确保敏感元件受力均匀,在敏感元件的背面设置一半球型垫片10;本体5和膜片7通过激光焊,使结合面接触为一体;高

温部分的绝缘采用高温绝缘陶瓷4。其他部分采用聚四氟乙烯,传感器头部和接插件之间加入一连接套2。

### 3) 误差影响消除设计

为降低温度变化对气缸压力传感器的输出影响,将传感器的膜片弹性槽移到外侧,减少了热膨胀对膜片的影响。

### 4) 该传感器技术指标

该传感器拥有自主知识产权。通过大量实验验证与实际使用表明,能够在25 MPa压力、450℃下长时间稳定工作,800℃以下不发生不可逆转的性能改变,一阶固有频率30 kHz,灵敏度130 pC/MPa,误差小于1%FS,实现气缸压力的精确测量。

## 4.2 数据采集模块设计

数据采集模块的核心是CPU和A/D转换器。

### 1) CPU选择

根据1%的测量精度要求,10位A/D就可满足要求,但是考虑到压电式压力传感器的特点,分辨率4096,A/D最小误差达到0.025%的12位A/D比较合适。柴油机工作过程的监测需要采集大量数据,并对数据进行处理,以采集柴油机36转的数据为例,数据采集量高达202 kByte,所以,数据采集模块必须具有较大的数据存储器。由于采用CAN2.0总线协议,所以,数据采集模块应该具有CAN2.0控制器。

根据以上3个要求,从最大限度简化数据采集模块的结构、提高可靠性的角度出发,广泛使用的、嵌入式工业系统的主流芯片——飞利浦的LPC1766成为最佳选择。

### 2) 数据采集模块电路设计

数据采集模块的电路由电源电路、模拟信号调理电路、通信电路、计算机电路组成。与外界实现1000 V隔离,确保安全。

电源电路:数据采集模块输入电源+24 VDC,主电源采用隔离电压1000 V的DC电源,输出±5 V作为模拟电路、通信电路、曲轴转角传感器的电源,其中+5 V电源又通过变换产生+12 V燃油喷射压力传感器激励电源、3.3 V的CPU电源和3 V的A/D基准电源。

气缸压力信号预处理电路:气缸压力信号经过电荷放大、抗混滤波、高通滤波、基准电压调整,进入CPU的A/D转换器。

燃油喷射压力信号预处理电路:燃油喷射压力信号经过电压转换,进入CPU的A/D转换器。

曲轴转角信号预处理电路:上止点触发信号和齿轮传感器信号经过迟滞回线触发器调理,送入CPU的外中断。

CAN通信电路:CPU的CAN信号,经过1500 V隔离的CAN驱动器进入CAN2.0现场总线。

通过设计制作,该数据采集模块具有12位A/D对气缸压力和燃油喷射压力以0.5°曲轴转角的角度分辨率进行30个工作循环的数据采集,数据按循环平均后上传上位机;数据采集模块和上位机之间采用CAN2.0协议组

网,在1台计算机控制下能够实现多台柴油机、不多于253个气缸的示功图和燃油喷射压力的同时测量。

## 4.3 数据分析处理方法

柴油机缸内工作过程在线监测系统引入燃烧分析技术对所示功图进行放热规律计算,并根据放热规律计算的结果提取一系列特征值,用于柴油机的状态评估和故障诊断,使该系统具有了其他电子示功器所没有的分析能力。

### 1) 示功图的燃烧分析<sup>[10-11]</sup>

该系统首先对获得的各个气缸的示功图进行一般分析,获得循环功、最高爆炸压力、最高爆炸压力位置、压力升高率和着火点位置等特征值,再将各个气缸的循环功进行累加、乘以转速获得柴油机整机的指示功率,整机的指示功率减去同转速下的空车指示功率获得整机的有效功率。

再根据示功图压缩过程曲线拟合、并外推整个压缩和动力冲程的理论纯压缩、膨胀曲线,获取最高压缩压力特征值。

再将示功图代入柴油机缸内能量平衡方程:

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{d(Gu)}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} \quad (1)$$

式中: $dQ_B$ 为气缸中工质单位曲轴转角的放热量(瞬时代放热率); $dQ_w$ 为气缸中工质与燃烧室壁面单位曲轴转角的换热量; $G$ 为气缸中工质的质量; $p$ 为瞬时气缸压力; $u$ 为气缸中工质的比内能; $dV$ 为气缸瞬时容积变化; $d\varphi$ 为柴油机曲轴转角变化。

求解方程(1),获得瞬时代放热率、累计放热率百分比、燃烧温度。

最后,按照预混燃烧、扩散燃烧和后燃3个阶段计算各自的放热量,以及提取上止点后30℃的累积放热百分比,得到示功图的所有特征参数。

根据燃油喷射压力曲线,提取供油定时、最高喷射压力、供油持续角和高压油管残余压力4个特征值。

### 2) 上止点修正技术

上止点的确定是柴油机缸内过程测量的关键。本项目采用以下方法获取上止点修正值。

缸内压缩过程是多变过程,可用式(2)表示:

$$pv^n = C \quad (2)$$

式中: $p$ 为压力; $v$ 为容积; $n$ 为多变指数; $C$ 为常数。

设测量的压缩过程函数是:

$$p = f(a) \quad (3)$$

式中: $a$ 为曲轴转角。

根据测量所得的压缩过程参数和式(3),可以求出多变指数:

$$n = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{\ln v_1 - \ln v_2} \quad (4)$$

根据多变指数和柴油机的压缩比可以求得理论的压缩过程:

$$p_c(a_c) = \frac{p_0 v_0^n}{v(a_c)^n} \quad (5)$$

式中:  $p_c(a_c)$  为  $a_c$  曲柄转角时的压力;  $v(a_c)$  为  $a_c$  曲柄转角时的容积, 当:

$$\Delta p_{\min} = \sum_0^{180} |f(a) - p_c(a + TDC)| \quad (6)$$

TDC 就是上止点修正值。

该方法经过数十台柴油机示功图参数的测试验证。

#### 4.4 系统故障诊断与报警设计与实现

该系统通过监测柴油机示功图、燃油喷射压力和曲轴转角, 对示功图燃烧分析后, 获得以下参数:

整机参数: 转速、指示功率、总循环功等。

缸内过程参数: 循环功、最高爆炸压力、最高爆炸压力位置、压力升高率、瞬时放热率、累计放热率、燃烧温度、着火点位置等。

燃油喷射压力参数: 供油提前角、最高压力、喷油结束时间、高压油管残余压力等。

在此基础上, 制定对柴油机缸内工作过程的故障诊断和报警。

##### 1) 参数报警设计

该系统参数报警值分为绝对参数报警值和相对参数报警值 2 种。

绝对参数报警: 该报警以柴油机外特性为依据, 对超限参数进行报警, 并把报警结果写入报警记录表。这类参数包括柴油机: 柴油机有效功率、单缸循环功、爆压和供油定时等;

相对参数报警: 一方面, 该类报警建立在同一台柴油机各个气缸工作应该一致的基础上, 当某一气缸的某个参数超过所有缸同参数平均值的百分数时报警; 另一方面, 通过建立统计分析的数学模型, 制定柴油机性能参数的相对报警阈值。

各参数报警阈值可以根据机型特点设定, 除发动机额定功率、额定转速、最高燃烧压力之外, 软件设置有默认值。

##### 2) 柴油机缸内工作过程故障诊断

为了实现及时、准确发现柴油机故障早期征兆, 通过上述分析获得柴油机热工性能参数, 并对柴油机热工故障模式进行分析的基础上, 确定柴油机热工性能主要故障与对应的性能参数, 建立了柴油机气缸工作状态故障诊断逻辑关系<sup>[12]</sup>。

通过建立柴油机性能参数与故障模式之间相关关系的分析模型, 充分利用现场实时/历史数据库, 为系统的异常状态分析与故障诊断提供了知识化信息。系统在线地展示了系统参数的动态变化过程, 反映出系统运行的健康状态。

## 5 实例分析

上海航道局航浚 9001 和航浚 9002 的情况与基隆轮

相似, 用该系统测试之前航速只能达到 4 节, 主机输出功率只能达到 1 250 kW, 前浚 9002 主机调整前示功图如图 5 所示。

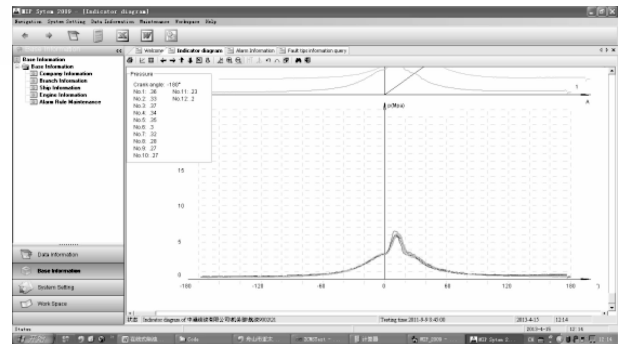


图 5 航浚 9002 主机调整前示功图

调整供油提前角后主机输出功率达到速要求, 1 830 kW, 工作正常后的示功图如图 6 所示。满足了长江口航道疏浚的最低航速要求, 估算耗油率下降了 27 g/kWh, 日节油可达 1.1 t, 减少二氧化碳排放 3.2 t, 效益显著。

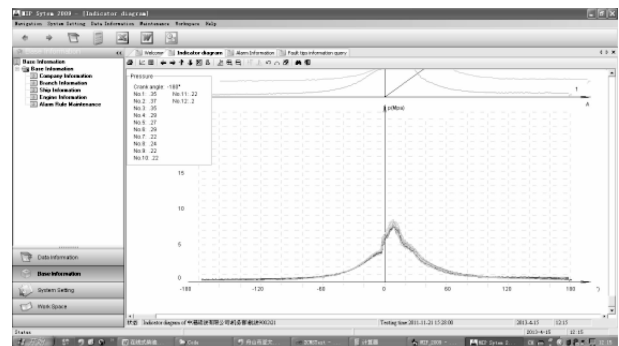


图 6 航浚 9002 调整后示功图

## 6 结 论

该舰船柴油机缸内工作过程监测系统的性能指标和可靠性能满足舰船大型柴油机工作过程的监测要求, 部分功能优于国内外同类产品。该系统引入燃烧分析技术用于柴油机状态评估和故障诊断, 充分发掘了监测系统所获得的测试信息, 为更有效、准确判定柴油机性能和故障诊断提供技术支持。对有效减少柴油机在亚健康下的工作时间, 提高柴油机工作性能具有非常重要的社会和经济效益。

### 参 考 文 献

- [1] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 自动驾驶仪 PHM 系统健康评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1765-1772.
- [2] 马翔楠, 徐正国, 王文海, 等. 模拟电路性能退化型故障诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013,

27(1):32-37.

- [3] 常勇,胡以怀. 柴油机振动监测及故障诊断系统[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(1):93-96.
- [4] 白广来. 船舶柴油机智能监测与智能诊断的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2003.
- [5] 李向荣, 苟晨华, 孙柏刚, 等. 柴油机喷雾混合过程数值模拟的发展与现状[J]. 车用发动机, 2004, 150(2): 1-6.
- [6] 余永华. 船舶柴油机瞬时转速和热力参数监测诊断技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- [7] 张立梅, 程勇, 吴波, 等. 多功能内燃机分析仪的研究开发[J]. 内燃机学报, 1991, 9(2):25-29.
- [8] 袁泉. 柴油机性能监测系统的开发与试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2005.

- [9] 尤文坚. 现代传感器输出特性拟合技术研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(3):25-27.
- [10] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [11] 王洪锋. 船用智能化柴油机热力参数监测与诊断技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- [12] KARLSSON L, SOBEL J. Stroke by stroke measurement of diesel engine performance on board[C]. CI-MAC, 2004.

#### 作者简介

许友林, 1967年出生, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备状态监测与故障诊断技术。

E-mail: xymm119@sohu.com

(上接第41页)

- [7] 林伟明, 胡云堂. 基于YUV颜色模型的番茄收获机器人图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):176-180.
- [8] SYAHRIR W M, SURYANTI A, CONNSYNN C. Color grading in Tomato Maturity Estimator using image processing technique [C]. 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009:276-280.
- [9] 钟玉琢, 乔秉新, 李树青. 机器人视觉技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1995:77-78.

- [10] 吴成茂, 张干. 灰度级加权的直方图模糊熵阈值分割法[J]. 西安邮电大学学报, 2013, 18(5):8-13.

#### 作者简介

刘琼, 1984年出生, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为图像处理、语义网、智能搜索、数据库等。

E-mail: liuqiong-021004@163.com

史诺, 1985年出生, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为机电一体化技术等。

E-mail: shinuo7241@sina.com