第37卷第2期 河 北 科 技 大 学 学 报 Vol. 37，No. 2
2016年4月 Journal of Hebei University of Science and Technology Apr. 2016

文章编号：1008-1542(2016)02-0139-07 doi：10.7535/hbkd.2016yx02005

基于质心广义力监测的发动机故障诊断新方法

徐传燕，富文军，曹凤萍

（山东交通学院汽车工程学院，山东济南 250023）

摘 要：发动机的故障诊断大多只针对某一特定类型的故障，分析对象的特征与故障的映射关系不明确，且提取的特征通用性不好，导致发动机故障诊断发展缓慢，至今尚没有一套成熟的诊断系统可应用于实际。分析了基于振动的发动机故障诊断的国内外研究动向，提出将质心广义力作为汽车发动机故障诊断的分析对象，明确发动机故障诊断分析对象的特征与故障的映射关系，对于开辟发动机故障诊断方法的新途径具有重要意义。

关键词：内燃机工程；发动机；故障诊断；广义力；映射关系；振动

中图分类号：U464.1；TN911.7 **文献标志码：**A

A new method for engine fault diagnosis based on generalized force at the center of gravity of engines

XU Chuanyan，FU Wenjun，CAO Fengping

（School of Automotive Engineering，Shandong Jiaotong University，Jinan，Shandong 250023，China）

Abstract：At present，most of the engine fault diagnosis is specific to a particular type of failure，and the mapping relationship between the analysis object features and the faults is not clear，so that the extracted features have poor universality，resulting in slow development of engine fault diagnosis，and there is no a mature diagnosis system can be used in practical application. Vibration based engine fault diagnosis research trends are analyzed both at home and abroad. The generalized force at C. G.（the center of gravity of engine）is proposed to be the analysis object for engine fault diagnosis，and clear mapping relationship between the analysis object features and the faults is achieved. It is significant for developing new engine fault diagnosis methods.

Keywords：internal combustion engine engineering；engine；fault diagnosis；generalized force；mapping relationship；vibration

《机械工程学科发展战略报告(2011—2020)》将重大产品和重大设施运行的可靠性、安全性和可维护性关键技术列为重要的研究方向[1]，而发动机作为工程机械的心脏，其性能的好坏直接关系到工程机械整个系统运行的动力性、经济性、可靠性和安全性。随着发动机自动化程度的不断提高、工作性能的不断完善，其结

收稿日期：2015-07-25；修回日期：2016-01-16；责任编辑：陈书欣

基金项目：国家自然科学基金(51405272)；交通运输部应用基础研究项目(2013319817190)；长安大学重点实验室开放基金(310822151117)

作者简介：徐传燕(1981—)，女，山东济南人，副教授，博士，主要从事机械设备故障诊断、工程信号处理方面的研究。

E-mail：xcy@sdjtu.edu.cn

徐传燕，富文军，曹凤萍.基于质心广义力监测的发动机故障诊断新方法[J].河北科技大学学报，2016，37(2)：139-145.

XU Chuanyan，FU Wenjun，CAO Fengping. A new method for engine fault diagnosis based on generalized force at the center of gravity of engines[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2016，37(2)：139-145.

构也变得越来越复杂，工作条件也十分恶劣，发生故障的可能性大大增加，诊断难度也越来越高。为确保发动机安全运行，提高其可靠性和安全运转率，必须不断提高对发动机的运行状态监测和故障预测与诊断能力，在故障发生的早期就把它排除，防止其继续发展造成更大的损失。因此，如何在不拆检的情况下，迅速准确地判断出故障的类型和位置，是目前发动机故障诊断研究的重点和难点。

实现发动机运行状态监测、故障预测与诊断的前提是选取合理的监测和分析对象，以便在发动机运行动态信号中准确提取出故障征兆，因此监测对象必须对故障具有较高的敏感性、稳定性、唯一性和便易性：当故障产生时，监测对象的特征能够随之发生改变；环境和工况的改变不会影响其特征的变化；对应不同的故障，监测对象具有不同的特征；监测对象还应便于获取，能够在发动机的运转条件下直接测试。对于发动机状态监测来说，监测对象的测试和特征变化还应具有实时性的特点。发动机绝大部分故障的直接表现是在发动机质心广义力的变化方面。发动机质心广义力对故障的敏感度高，受外部环境与测试条件的影响较小，因此将发动机质心广义力作为状态监测与故障诊断的监测对象，对于完善发动机故障诊断方法具有重要的理论指导意义和实用价值。

1 基于振动的发动机故障诊断研究现状

虽然众多学者对发动机机械方面的故障诊断进行了研究，其发展依然较缓慢，至今仍没有一套通用的诊断系统可应用于实际。目前，这方面的故障诊断技术手段以性能参数分析技术、油液分析技术、噪声分析技术以及振动诊断技术为主[2-5]，其中以振动诊断技术的研究为热点。性能参数分析技术只能对有限的功能状态进行监测，在故障早期预警与故障精确诊断方面存在缺陷；油液分析技术对传感器等硬件的依赖度较高，分析结果有一定的滞后性，精确判断故障部位的能力不足；噪声分析技术作为一种非接触式诊断技术，对机械设备特定部位的特定故障模式能够实现实时监测和准确诊断，但适用范围有限，均无法应用于发动机的实时在线监测。

振动分析法[6-10]通过测取发动机工作过程中缸盖或缸体的振动信号，并对其进行分析处理提取故障特征，得出振动信号特征参数，根据特征参数变化规律判断发动机的故障。

1996年，英国曼彻斯特大学GU等[11]在实验的基础上，得出柴油机喷油器的振动主要由针阀开启、落座时的撞击和高压燃油流动引起，他们通过在喷油器顶部或座上吸附振动传感器，采集振动信号，利用时频分析、包络分析，对上述参数进行估计，实现了燃油系统的故障诊断。SAMIMY等[12]利用时频分析方法研究了内燃机爆燃敲缸故障的诊断，采用Choi-Williams分布以减少交叉干扰项，使得不同工况下的时频分布区别更加明显，故障特征显著。1999年，刘世元等[13]利用发动机缸盖和喷油器、气门摇臂座、螺栓等部件的振动信号，着重分析了缸盖振动信号的时间特性和循环波动性，并提出了消除波动性的一些措施。2002年至2003年，中国科学技术大学的研究人员应用发动机振动信号对发动机故障诊断进行了较为深入的研究[14-16]，他们对发动机常见异响故障(活塞敲缸响、活塞销响、气门响、气门挺杆响、曲轴轴承响及连杆轴承响等)的产生机理进行了分析，主要采用时域法和频域法对发动机表面振动信号进行分析，并给出了发动机常见故障信号的特征提取和识别方法。2006年，文献[17]采用倒频谱法基于缸盖表面振动加速度信号对缸内压力进行了重构，即根据已知的振动加速度信号和缸内压力信号获得系统的传递函数，基于传递函数实现缸内压力的重构。赵纪元等采用实验的方法，从缸盖系统所受的激励和响应两方面进行分析，指出缸盖系统最主要的激励力是气门落座冲击和气体压力，利用缸盖响应高频部分能量的变化来检查排气门漏气故障，取得了较为满意的结果。2009年，MERKISZ等[18]指出，在活塞运动方向上的燃烧时段，机体的振动加速度信号对燃烧激励最为敏感，发生失火故障时，燃烧时段振动加速度信号幅值明显减小，利用活塞运动方向上的机体振动加速度信号的幅值变化可实现失火故障检测。2012年，BARELLI等[19]直接测试缸盖表面的振动加速度信号，利用离散小波变换和巴什瓦定理分析加速度信号的能量分布诊断缸内燃烧故障。2013年，杜灿谊等[20-21]基于缸盖振动加速度信号的振幅波动，监测发动机失火故障，以缸盖振动时域信号冲击，监测配气机构气门间隙过大和凸轮轴承松脱等故障。2014年，SHARMA等[22]提取缸体振动加速度信号，计算信号的样本标准差、样本方差、峭度等统计特性，通过多种决策树算法筛选信号特征，区分发动机正常与失火故障。

随着信号处理技术的发展，在发动机故障特征提取方面有了很多新方法，如短时傅里叶变换、小波分析、

Gabor 展开、HHT 变换、支持向量机等,其中应用非常广泛的是小波分析,它是一种有效的非稳态信号分析处理方法[23-24]。夏勇等[25-26]通过对发动机缸盖振动信号的小波包分解得到时频图,运用图像处理技术对发动机的状态进行监测,另外,小波分析在状态预测、信噪分离、动态测试过程诊断中也有成功的应用。

基于振动分析的发动机故障诊断方法,由于分析测试设备完备、诊断结果较可靠、便于实时诊断等诸多优点,受到广大学者的关注,但是作为基于响应信号的故障诊断方法,受发动机结构、环境、温度等外部条件的影响和传感器的安装位置的影响较大,只对特定的发动机、少数的部件和故障类型比较有效,缺乏普适性[27]。2013 年,王国彪等[28]指出虽然单故障诊断通常容易实现,但在推广使用时,其精度不高、泛化能力不强和通用性较差,制约了其在工程中的应用。文献[26]提出,可以利用气缸压力信号进行气门间隙监测与故障诊断,气缸压力信号二进小波分解的尺度信号中包含有大量的气门间隙状态信息,但是直接对气缸压力进行监测在传感器的安装方面有一定的困难,而且对于与燃烧无关的一些机械故障,从气缸内压力信号中无法判定故障的类型与位置。

现有的各种发动机故障诊断方法都有一定的局限性,而发动机质心广义力中包含大量的发动机运行状态信息,既包含了机械磨损等方面的信息,也包含了各缸的燃烧状况信息,发动机质心广义力的变化与发动机故障之间存在一定联系,因此,发动机质心广义力包含的故障信息,对于提高故障诊断的可靠性具有重要意义。

2　发动机质心广义力的研究现状

发动机质心广义力主要通过将发动机简化为六自由度刚体动力学模型计算得到[29],在计算中考虑的主要因素是气缸内气体爆炸力、旋转惯性力和往复惯性力所产生的激励。2006 年,聂君臣等[30]理论分析了摩托车汽油机不平衡力随曲柄转角的变化,并分析了各不平衡力幅值在频域内随转速的变化趋势。王辉[31]和李双虎等[32]分别对直列四缸发动机的主要激振源进行了计算仿真分析。2008 年,KIM 等[33]建立 CAE 模型分析计算发动机的质心广义力。以上方法均需将气体爆炸力作为已知参数分析倾覆力矩,实际中这一参数难以精确获得。此外,理论计算公式通常未考虑实际发动机与附件的耦合,进行模型分析时必然会造成计算结果与工程实际存在一定偏差,且在有些情况下偏差会很大。

工程应用中通常采用测试频响函数矩阵,利用矩阵求逆法获取发动机质心广义力,测试不同结构位置的频响函数构成频响函数矩阵[34]。2007 年,OTSUKA 等[35]采用频响函数矩阵求逆法识别单缸船外发动机质心广义力。定义一组发动机运动产生的等效力,采用频响函数求逆法识别出等效力再通过线性结构模型转换到质心处,但频响函数测量的准确性缺乏验证,由于噪声影响等原因可能存在较大误差。由于矩阵求逆会引起病态问题[36],导致病态误差,SAS 等[37]指出通过求逆得出的发动机质心广义力结果对频响函数矩阵的条件数很敏感。2007 年,YUAN 等[38]利用奇异值分解解决发动机质心广义力间接估计时的病态问题。TAO 等[39]测试所有悬置点的振动速度获取发动机质心处的广义力,由于缺乏准确的相位信息而利用相位差来代替,使得问题的求解变为复杂的非线性超定方程,文献中只对仿真信号进行了精度分析,并没有考虑噪声影响,也没有实验验证。2006 年,宋志顺[40]测试各缸体上振动加速度提取质心处广义力,但将相位全部假设为零,导致识别结果产生较大误差。2009 年,杨志坚等[41-42]测试各悬置点的振动加速度信号提取发动机的质心处广义力,并引入离散频谱校正技术准确提取加速度的幅值相位信息,直接识别出发动机激励力,但试验验证过程中缺乏准确参数导致验证结果不准确。2010 年,HAFIDI 等[43]提出通过测试悬置两侧(减震前、后)的振动加速度经两次积分获取相应位移差,利用求逆法间接计算发动机质心广义力。2013 年,李淑静等[44]在直列六缸柴油机上布置振动加速度传感器获取柴油机整机振动质心广义力,并分析了测试参数误差对广义力识别结果的影响。利用统计直方图法处理试验数据,但振动信号幅值和相位的提取不够精确,统计直方图测试样本不够丰富。2015 年,XU 等[45]将发动机简化为多刚体动力学模型对发动机质心广义力识别方法进行了仿真验证,由于模型简化了误差,除垂向载荷与计算结果接近,其他方向的激励误差较大,且质心广义力识别的实验验证结果缺乏可靠性。综上可见,以试验法获取发动机质心广义力,不可避免的需要进行广义矩阵求逆,从本质上来说,病态矩阵的形成一方面来自于测量误差,另一方面来自于用离散频谱分析方法提取振动响应的幅值和相位时的分析误差。因此,从源头上改善矩阵求逆条件的方法,即减小测量和分析误差将是研究的重点。

为进一步提高识别精度，研究连接附件及弹性体模态对发动机质心广义力识别方法的影响，对现有的发动机质心广义力识别方法进行识别精度的精密试验验证，为识别精度提供有力证据是重要的研究方向。

3　发动机故障与质心广义力的变化

3.1　故障发动机质心广义力变化

发动机绝大部分故障的直接表现是在发动机质心广义力的变化方面。以直列四缸四冲程发动机为例分析部分发动机故障与质心广义力的变化关系。根据文献[46]的分析，各气缸的干扰力矩与第1缸同谐次的干扰力矩的相位等于简谐次数乘以该气缸与第1气缸间的发火间隔角，因此，知道了发火顺序，即可画出该发动机各气缸 v 次干扰力矩的相位图，对于发火顺序为1—4—2—3的四缸四冲程发动机各次干扰力矩相位图如图1所示。

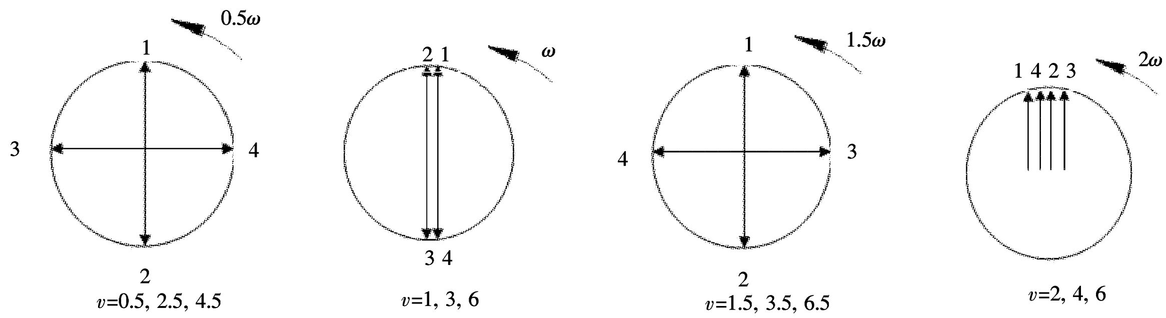

图1　四缸发动机的干扰力矩相位图

Fig.1　Four-cylinder engine interfering moment phase image

以曲轴方向为纵向，活塞运动方向为垂向，在正常稳定工作状况下，由图1四缸发动机的干扰力矩相位图可见，由于各缸之间的惯性力相互抵消，发动机质心处受到的横向质心广义力应基本为0，垂向质心广义力主要为2阶，1阶质心广义力基本为0，但当发动机活塞或连杆不均匀磨损时，横向和垂向质心广义力均会出现明显的1阶激励力。如果气门间隙过大，垂向质心广义力会出现明显的1.5阶次，发动机转速较高时，其幅值甚至超过2阶次。

3.2　发动机质心广义力故障诊断方法分析

由发动机质心广义力进行故障诊断的关键是建立故障特征库。从两方面进行特征提取：一方面，从理论推导发动机出现故障时质心广义力相对正常时的特征，并通过发动机仿真模型验证理论推导结果；另一方面，通过故障模拟试验识别出故障发动机的实际质心广义力，并与正常发动机的实际质心广义力作对比，提取出故障。从实测的质心广义力中提取出故障特征后，初步得到诊断结果，再通过理论分析验证诊断结果，最后通过拆检进行验证，验证成功后将故障特征存入特征库中，如果诊断失败则由拆检结果重新进行特征分析，得到故障特征后存入特征库，以便下次能成功诊断出同样的故障。发动机质心广义力故障诊断方法流程图如图2所示。

4　结　语

总结了基于振动的发动机故障诊断方法的研究现状，并分析了其局限性，鉴于发动机质心广义力对故障的敏感度高，受外部环境与测试条件的影响较小等特点，提出将发动机质心广义力作为发动机故障诊断的分析对象，建立分析对象特征与故障之间的明确映射关系，为发动机故障诊断开辟新途径。

为实现基于质心广义力的发动机故障诊断，还需重点进行如下两方面的研究。

1）对发动机质心广义力的识别精度进行实验验证。消除连接附件及弹性体模态对发动机质心广义力识别方法的影响，对发动机质心广义力识别方法进行精密的实验验证，是保障故障诊断可靠性的基础。

2）对发动机出现故障时质心广义力的特征进行理论推导，建立故障特征库。

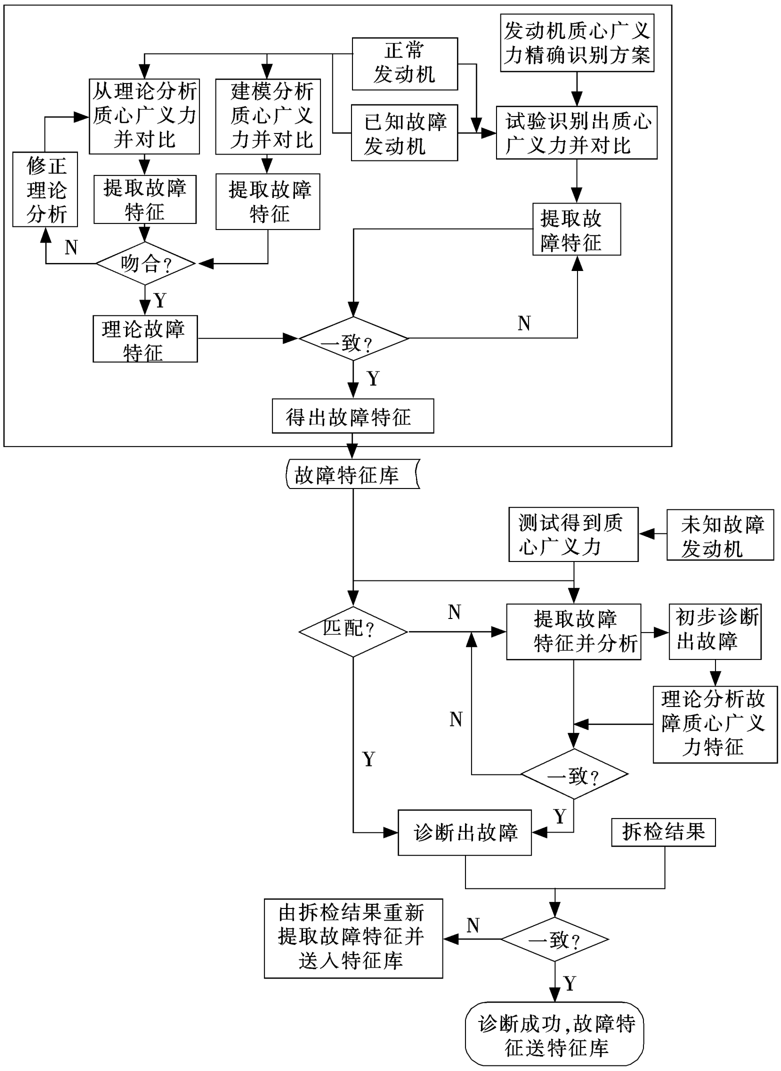

图 2　发动机质心广义力故障诊断方法

Fig. 2　Method of engine fault diagnosis by generalized force at C. G.

参考文献/References：

[1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011—2020)[M]. 北京：科学出版社，2010.

[2] 李映颖，谭光宇，陈友龙. 基于飞行数据的航空发动机健康状况分析[J]. 哈尔滨理工大学学报，2011，16(5)：43-46.
LI Yingying，TAN Guangyu，CHEN Youlong. Research on the analysis of physical condition of aero-engines with flight data[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology，2011，16(5)：43-46.

[3] 严新平，张月雷，毛军红. 在线油液监测技术现状与展望[J]. 润滑与密封，2011，36(10)：1-3.
YAN Xinping，ZHANG Yuelei，MAO Junhong. Development status and research spots of on-line oil monitoring technology[J]. Lubrication Engineering，2011，36(10)：1-3.

[4] 廖世勇，米林，石晓辉，等. 基于分形理论的内燃机噪声信号分析[J]. 内燃机工程，2010，31(2)：59-63.
LIAO Shiyong，MI Lin，SHI Xiaohui，et al. Study on internal combustion engine noise based on fractal theory[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering，2010，31(2)：59-63.

[5] 何必海，马向东，郎振. 民用航空发动机振动监测方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究，2012，25(2)：59-62.
HE Bihai，MA Xiangdong，LANG Zhen. Investigation of civil aero-engine vibration monitoring method[J]. Gas Turbine Experiment and Research，2012，25(2)：59-62.

[6] JIN Xiangyang，YANG Hanlin，WANG Heteng. Fault diagnosis for civil aviation engine test based on the vibration signal[J]. Procedia Engineering，2012，29：3002-3006.

[7] YAN Ruqiang，GAO R X，CHEN Xuefeng. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines：A review with applications [J]. Signal Pro-

cessing，2014，96(5)：1-15.

[8] 李敏通. 柴油机振动信号特征提取与故障诊断方法研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2012.
LI Mintong. Research on Diesel Engine Vibration Signal Feature Extraction and Fault Diagnosis Methods[D]. Yangling：Northwest A & F University，2012.

[9] 任庆霜，司景萍，梁红波，等. 基于振动信号的发动机故障诊断方法分析[J]. 公路与汽运，2010(3)：22-25.
REN Qingshuang，SI Jingping，LIANG Hongbo，et al. Engine faulty diagnosis method analysis in the basis of vibration signal [J]. Highways & Automotive Applications，2010(3)：22-25.

[10] 唐娟. 基于振动信号评价柴机油机缸内燃烧状态的研究[D]. 济南：山东大学，2010.
TANG Juan. Combustion Estimation of Diesel Engines Based on Vibration Signal[D]. Jinan：Shandong University，2010.

[11] GU F，BALL A D. Diesel injector dynamic modelling and estimation of injection parameters from impact response Part 2：Prediction of injection parameters from monitored vibration[J]. Proceedings of the International of Mechanical Engineerings Part D：Journal of Automobile Engineering，1996，210(44)：303-312.

[12] SAMIMY B，RIZZONI G. Mechanical signature analysis using time-frequency signal processing：Application to internal combustion engine knock detection [J]. Proceedings of the IEEE，1996，84(9)：1330-1343.

[13] 刘世元，杜润生，杨叔子. 内燃机缸盖振动信号的特性与诊断应用研究[J]. 华中理工大学学报，1999，27(7)：48-50.
LIU Shiyuan，DU Runsheng，YANG Shuzi. The characteristic analysis of vibration signal measured on engine cylinder head and its applications to fault diagnosis[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology，1999，27(7)：48-50.

[14] 贾继德，孔凡让，姜斯平，等. 应用振动信号诊断汽油机磨损故障[J]. 汽车工程，2002，24(2)：149-151.
JIA Jide，KONG Fanrang，JIANG Siping，et al. Fault detection in gasoline engine by the vibrations analysis method [J]. Automotive Engineering，2002，24(2)：149-151.

[15] 孔凡让，贾继德，李志远，等. 连杆轴承故障的诊断研究[J]. 中国机械工程，2003，14(6)：494-497.
KONG Fanrang，JIA Jide，LI Zhiyuan，et al. Research on diagnosis of engine connecting rod bearing[J]. China Mechanical Engineering，2003，14(6)：494-497.

[16] 孔凡让，贾继德，李志远，等. 活塞销故障的诊断研究[J]. 振动与冲击，2002，21(1)：83-85.
KONG Fanrang，JIA Jide，LI Zhiyuan，et al. Study on diagnosis of engine piston pin bearing wear fault[J]. Journal of Vibration and Shock，2002，21(1)：83-85.

[17] 姚建军，向阳，周勇，等. 基于倒频谱方法的柴油机气缸压力识别[J]. 航海工程，2006(1)：37-39.
YAO Jianjun，XIANG Yang，ZHOU Yong，et al. Identification of cylinder pressure of diesel engine based on the cepstral analysis[J]. Ship & Ocean Engineering，2006(1)：37-39.

[18] MERKISZ J，TOMASZEWSKI F，SZYMAŃSKI G，et al. Application of the time-frequency selection of the vibration signal for misfire sensing in diesel engines[J]. Berichte Aus Dem Julius Kühn-Institut，2009：10-14.

[19] BARELLI L，BARLUZZI E，BIDINI G，et al. Cylinders diagnosis system of a 1 MW internal combustion engine through vibrational signal processing using DWT technique [J]. Applied Energy，2012，92：44-50.

[20] 杜灿谊. 基于建模仿真与振动分析的发动机故障诊断方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2013.
DU Canyi. Study of Automotive Engine Fault Diagnosis Based on Model Simulation and Vibration Analysis[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2013.

[21] 杜灿谊，杨志坚，丁康. 小波分析在发动机失火监测中的应用[J]. 振动、测试与诊断，2011，31(3)：318-322.
DU Canyi，YANG Zhijian，DING Kang. Monitoring method for engine misfire based on wavelet analysis[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2011，31(3)：318-322.

[22] SHARMA A，SUGUMARAN V，DEVASENAPATI S B. Misfire detection in an IC engine using vibration signal and decision tree algorithms [J]. Measurement，2014，50：370-380.

[23] ZHU K P，WONG Y S，HONG G S. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring：A review and some new results [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture，2009，49：537-553.

[24] WANG Xia，LIU Changwen，BI Fengrong，et al. Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension [J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2013，41(1)：581-597.

[25] 夏勇，商斌梁，张振仁，等. 基于小波包与图像处理的内燃机故障诊断研究[J]. 内燃机学报，2001，19(1)：62-68.
XIA Yong，SHANG Binliang，ZHANG Zhenren，et al. Research on fault diagnosis for internal combust ion engines using wavelet packet and image processing[J]. Transactions of Csice，2001，19(1)：62-68.

[26] 夏勇，张振仁，商斌梁，等. 基于小波分析与气缸压力的气门故障诊断[J]. 内燃机工程，2001，22(1)：23-27.
XIA Yong，ZHANG Zhenren，SHANG Binliang，et al. Fault diagnosis for the valve train based on wavelet analysis and cylinder pressure [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering，2001，22(1)：23-27.

[27] 余红英. 机械系统故障信号特征提取技术研究[D]. 太原：中北大学，2005.
YU Hongying. Study on Feature Extraction Technique in Fault Signal of Mechanical System[D]. Taiyuan：North University of China，2005.

[28] 王国彪，何正嘉，陈雪峰，等. 机械故障诊断基础研究“何去何从”[J]. 机械工程学报，2013，49(1)：63-72.

WANG Guobiao, HE Zhengjia, CHEN Xuefeng, et al. Basic research on machinery fault diagnosis:What is the prescription[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(1):63-72.

[29] 王峰. 汽车动力总成悬置系统振动分析及优化设计[D]. 上海:上海交通大学,2008.
WANG Feng. Vibration Analysis and Optimal Design of Automotive Powertrain Mounting System[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2008.

[30] 聂君臣,范子杰. 摩托车汽油机不平衡力幅值的研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2006,35(6):21-24.
NIE Junchen, FAN Zijie. Study on the amplitude of motorcycle engine unbalance force[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle,2006,35(6):21-24.

[31] 王辉. 直列四缸发动机的振源分析与仿真[J]. 机械工程与自动化,2009(5):53-55.
WANG Hui. Analysis and simulation of vibration source of certain inline four-cylinder engine[J]. Mechanical Enginerring & Automotion,2009(5):53-55.

[32] 李双虎,樊文欣,赵艳涛,等. 用两种软件对比分析四缸发动机振源[J]. 噪声与振动控制,2010(1):139-142.
LI Shuanghu, FAN Wenxin, ZHAO Yantao, et al. Comparative analysis of vibration source of four-cylinder engine using two commerical codes[J]. Noise and Vibration Control, 2010(1):139-142.

[33] KIM S J, KIM S G, OH K S,et al. Excitation force analysis of a powertrain based on CAE technology[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008,9(6):703-711.

[34] VERHOEVEN J. Excitation force identification of rotating machines using operational rotor/stator amplitude data and analytical synthesized transfer functions[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 1988,110(3): 307-314.

[35] OTSUKA T, OKADA T, IKENO T,et al. Force identification of an outboard engine by experimental means of linear structural modeling and equivalent force transformation[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007,308(3/4/5):541-547.

[36] CHOI H G, THITE A N, THOMPSON D J. Comparison of methods for parameter selection in Tikhonov regularization with application to inverse force determination[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 304(s3/4/5):894-917.

[37] SAS P, WYCKAERT P. Indirect force determination based upon matrix inversion: A study on statistical and deterministic accuracy[C]// Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering. Leuven:[s. n.], 1994:1049-1065.

[38] YUAN Chunhui, ZHU Xianming, ZHANG Guoliang, et al. Indirect engineering estimation of force excited by machinery vibration sources of ship[J]. Journal of Ship Mechanics,2007,11(6):961-973.

[39] TAO J S,LIU G R,LAM K Y. Excitation force identification of an engine with velocity data at mounting points[J]. Journal of Sound & Vibration,2001,242 (2): 321-331.

[40] 宋志顺. 汽车动力总成半主动悬置和悬置系统解耦稳定性设计方法[D]. 广州:华南理工大学,2006.
SONG Zhishun. Automotive Powertrain Semi-active Suspension and Suspension System Stability of Decoupling Design Method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2006.

[41] 杨志坚. 离散频谱校正理论研究及其在发动机振动分析中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2009.
YANG Zhijian. Theoretical Research on Spectrum Correction and its Application in Excitation Force Identification of an Engine[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2009.

[42] 杨志坚,丁康,徐传燕. 基于离散频谱校正的发动机激励力识别方法仿真研究[J]. 振动工程学报,2010,23(6):660-664.
YANG Zhijian, DING Kang, XU Chuanyan. Simulation of engine excitation force identification based on discrete spectrum correction[J]. Journal of Vibration Engineering,2010,23(6):660-664.

[43] HAFIDI A E,MARTIN B,LOREDO A,et al. Vibration reduction on city buses: Determination of optimal position of engine mounts[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2010,24(7):2198-2209.

[44] 李淑静,闫兵,孙梅云,等. 测试参数误差对内燃机激振力识别精度的影响[J]. 柴油机,2013,35(5):16-21.
LI Shujing,YAN Bing, SUN Meiyun, et al. The effect of measurement error on the recognition accuracy of exciting forces of ICE[J]. Diesel Engine,2013,35(5):16-21.

[45] XU Chuanyan,CAO Fengping. Engine excitation force identification on the basis of discrete spectrum correction[J]. Mathematical Problems in Engineering,2015(6):1-11.

[46] 汪长明. 车辆发动机动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1990.