

2012 年大功率柴油机国际技术交流研讨会专题报道

船舶柴油机监测诊断技术研究及其应用

余永华^{1,2}, 杨建国^{1,2}

- (1. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063;
2. 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 介绍并分析了国内外成熟的监测诊断系统及其特点, 详细阐述了柴油机各种监测诊断方法的原理及应用, 包括瞬时转速法、热力参数法、振动分析法、声发射监测法和磁传感监测法, 最后介绍了多参数多方法的船舶柴油机综合监测诊断系统。

关键词: 船舶柴油机; 监测诊断; 故障

中图分类号: TK428 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)02-0001-06

Research and Application on Marine Diesel Engine Monitoring and Diagnosing Technology

Yu Yonghua^{1,2}, Yang Jianguo^{1,2}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;
2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: The mature monitoring and diagnosing systems both home and abroad and their characteristics are analyzed. The principles and application of monitoring and diagnosing method for diesel engines are expounded in detail, including transient speed method, thermal parameters method, vibration analysis method, acoustic emission inspection method and magnetic sensing method. In the end, the integrated monitoring and diagnosing system for marine diesels employing multi-parameters and multi-methods are introduced.

Keywords: marine diesel engine; monitoring and diagnosing; failure

0 前 言

柴油机是船舶的主要动力源, 是船舶的心脏。由于柴油机的结构复杂, 工作条件恶劣, 随着柴油机强载度的提高, 发生故障的可能性也在增大, 一旦发生故障, 不仅会影响整个船舶的安全航行, 造成巨大的经济损失, 甚至会危及人身安全, 造成严重的后果。开展船舶柴油机监测诊断技术研究, 有利于及时发现故障征兆, 提高柴油机的安全性和可靠性, 缩短维修期, 也是船舶节能环保的重要技术手段。船舶柴油机监测诊断是“智能型柴油机”的三大核心技术之一, 因此, 受到了国内外学者的广泛关注。

国外著名船舶柴油机厂商和研究机构已推出有较成熟的监测诊断系统; 我国在这方面也开展了大量的基础性研究, 但成熟应用较少。

1 国外主要监测诊断系统

1.1 COCOS-EDS 监测诊断系统

MAN 公司的 COCOS-EDS (Computer Control System—Engine Diagnosis System) 主要有四个功能, 即: 数据记录、监测、诊断和趋势分析。主要监测涡轮增压器及其滤器系统、空气冷却器、燃油滤器、滑油温度、冷却水温度、排温、气缸爆压、废气锅炉等的状态, 从过滤器堵塞到一个重大故障前的各种迹象都可以被监测到。系统监测和记录上述参数, 并提供给用户作进一步的评估分析。

系统的诊断是基于柴油机的工作状态, 以工作参数为参考, 主要解释故障的症状, 寻找可能导致柴油机故障的原因或查找实际故障原因, 并建议应采取的维护措施。当柴油机的工作参数与正常状态下的参数有较大的偏差时, EDS 会自动咨询其诊

断数据库,生成诊断报告来描述引发这些症状的可能原因,并提供切实可行的纠正建议和措施。有时 EDS 会根据目前初步诊断的结果,要求船员提供更多的详细信息,然后生成一个最终的诊断。

1.2 Wartsila MAPEX 监测诊断系统

Wartsila(New Sulzer)公司 MAPEX 监测系统能实现柴油机的状态监测和维修决策制定。其状态监测部分主要包括五大模块:SIPWA-TP、MAPEX-PR、MAPEX-CR、MAPEX-TV 和 MAPEX-AV。

SIPWA-TP (Sulzer Integrated Piston-ring Wear-detecting Arrangement with Trend Processing)采用磁电式传感器,可以连续监测主机活塞环的运行工况,并将测得的数据存储在监控系统中,以曲线或图表的方式给出活塞的磨损趋势,为轮机管理人员提供科学数据。

MAPEX-PR (Monitoring and Maintenance performance enhancement with expert knowledge piston-running reliability indicator)是在 SIPWA-TP 的基础上,通过连续监测主机缸壁稳定、扫气温度、缸套冷却水进出口温度、主机转速及负荷等运行参数,连续监测大缸径二冲程柴油机活塞环运行工况的监测系统。

MAPEX-CR(Combustion Reliability)主要通过监测气缸压力来分析柴油机的燃烧性能,通过测量各缸的气体压力,提取最高燃烧压力、压力升高比和平均指示压力等特征值,可以实时了解柴油机缸内燃烧的状态,以防止活塞环、泵油器和轴承等关键零件的失效。

MAPEX-TV/AV(Torsional Vibration / Axial Vibration Detection)则可连续测量计算柴油机的一阶和二阶扭转振动幅值、纵振幅值,具有失火监测、扭振测试、纵振测试、防止由恶劣海况或操作引起的误报警等功能。

1.3 EUB-CDS 柴油机故障诊断系统

德国 EUB 研究所开发的 EUB-CDS (Complex diagnosis system)柴油机故障诊断系统,能实现对船舶柴油的综合诊断,包括 7 个子系统:CPA (Cylinder Pressure Analysis)气缸压力分析系统、IPA(Injection Pressure Analysis)燃油喷射压力分析系统、PRA(Piston Ring Analysis)活塞环磨损监测系统、SAS(Scuffing Alarm System)气缸拉缸报警系统、LMS(Leakage Measurement System)气阀漏气监测系统、TMS(Torque Measurement System)力矩测量系统和 PM(Performance Monitor)柴油机与螺旋桨匹配性能监测系统。

1.4 LEMAG 柴油机性能分析系统

LEMAG 公司是德国历史最悠久的柴油机测量仪器生产厂家之一,该公司开发了一系列用于船舶柴油机故障诊断的产品。Premet Online System(柴油机运行工况在线监测系统)是其中之一。该系统要在柴油机各缸内安装 LEMAG Premet 型压力传感器,并在飞轮端处安装光电编码器测量飞轮转角信号,得到每度曲柄转角对应的气缸压力信号,通过对该信号的进一步分析,实现主机一些常见故障诊断。

当然,除以上介绍的各种监测系统之外,还有其他的故障诊断系统,如挪威 KONSBERG 公司开发的一系列发动机监控系统以及 KYMA 公司开发的 Kyma Diesel Analyzer 系统,均在实船上得到了广泛的应用。

2 船舶柴油机故障诊断方法

船舶柴油机故障监测与诊断的技术方法主要有振动法、热力参数分析法、油液分析法、瞬时转速法、温度分布法及红外测温法等。但最常用的是热力参数分析法、油液分析法和振动分析法以及瞬时转速法。此外,声发射诊断技术和磁传感技术也逐步得到应用。随着诊断技术的发展,新的诊断方法不断开发出来,如基于专家系统的智能化诊断方法、基于神经网络的诊断方法等。

2.1 基于瞬时转速的柴油机监测诊断技术

当柴油机正常运行时,瞬时转速会在一个不大的范围内变化,且会呈现规律性的波动。然而,当柴油机某缸发生故障时,瞬时转速这种规律性的波动会遭到破坏,且容易被测量出来,由此可监测柴油机的运行状态。

研究中小型柴油机瞬时转速的波动规律,可以将轴系简化为一个刚体,根据各缸的总切向力矩对刚体的作用进行分析。大型船舶柴油机,由于结构尺寸大,轴系激励复杂,柴油机瞬时转速的波动受到轴系扭转振动的影响较大,因此需要将轴系看作柔性体进行分析。图 1 是以 MAN B&W 6L16/24 型柴油机为主动、长轴系动力装置为对象,应用基于柔性体模型,第 2、4 缸在正常工况、做功能力下降 10% 和 20% 时柴油机瞬时转速波动率计算分析结果。可以看出各缸瞬时转速波动率峰值的变化与柴油机各缸工作的平衡性相关,可用于监测柴油机各缸的工作状态。瞬时转速监测法一般分为三类:波形分析法,转矩估计法和多特征综合法。

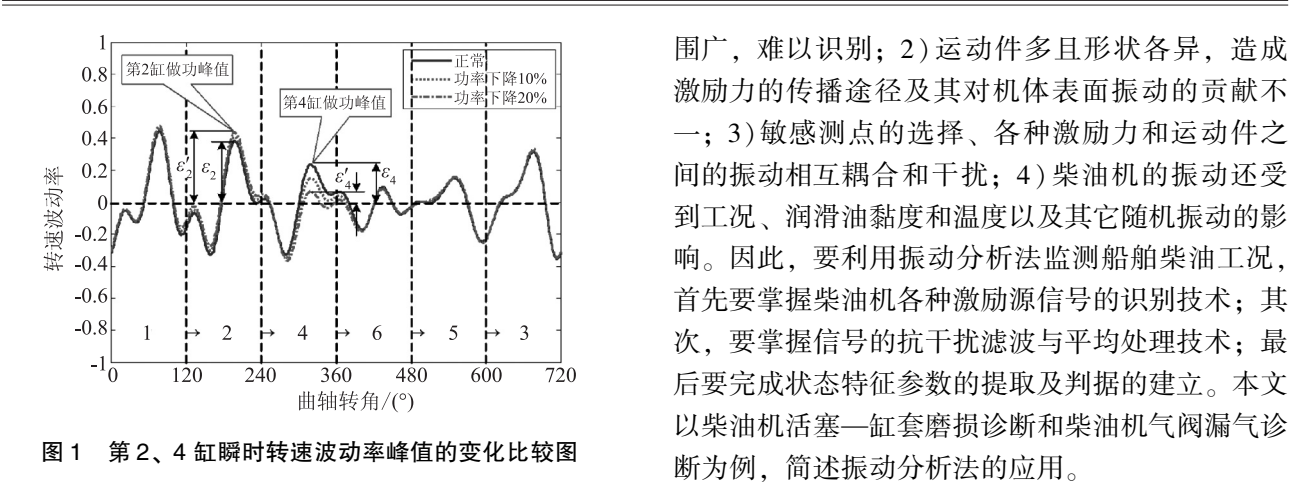


图1 第2、4缸瞬时转速波动率峰值的变化比较图

2.2 柴油机热力参数监测诊断技术

热力参数分析法是利用船舶柴油机工作时热力参数的变化来判断其工作状态。这些参数包括气缸压力示功图、排气温度、转速、滑油温度、冷却水进出口温度及排放等。热力参数分析法着重对柴油机性能好坏做出判断，其中示功图包含的信息量最多，根据示功图可以计算指示功、压力升高率和压缩压力，可以判断燃烧质量的好坏及各缸功率是否平衡。一般从示功图中提取平均指示压力、最高燃烧压力、最高燃烧压力相位、压缩压力、膨胀压力等故障特征参数监测柴油机性能。图2为MAN B & W 6L16/24型柴油机不同故障下的示功图仿真计算结果。

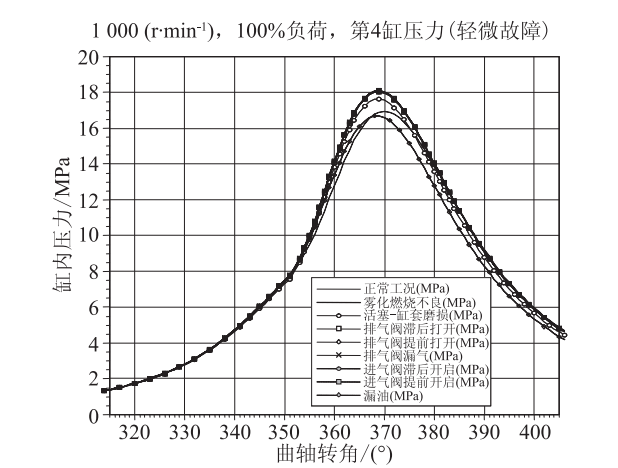


图2 不同故障示功图仿真结果

因此，结合计算机仿真技术和现场测试，监测柴油机热力参数的变化规律是诊断柴油机故障的有效途径之一。

2.3 振动监测诊断技术

振动分析法就是利用船舶柴油机在工作时产生的振动信号，经测试、数据分析及处理，对主要运动件的状态进行诊断的方法。该方法具有诊断速度快，能实现在线诊断等特点。振动分析法诊断船舶柴油机的技术难点有：1) 激励力众多、且频率范

围广，难以识别；2) 运动件多且形状各异，造成激励力的传播途径及其对机体表面振动的贡献不一；3) 敏感测点的选择、各种激励力和运动件之间的振动相互耦合和干扰；4) 柴油机的振动还受到工况、润滑油黏度和温度以及其它随机振动的影响。因此，要利用振动分析法监测船舶柴油工况，首先要掌握柴油机各种激励源信号的识别技术；其次，要掌握信号的抗干扰滤波与平均处理技术；最后要完成状态特征参数的提取及判据的建立。本文以柴油机活塞—缸套磨损诊断和柴油机气阀漏气诊断为例，简述振动分析法的应用。

2.3.1 活塞-缸套磨损诊断

柴油机活塞-气缸套磨损振动诊断机理为：不同间隙(磨损状态)状态下，侧推力将引起活塞横向撞击气缸套的撞击能量和活塞的横向运动相应变化，使得撞击点位置等随之发生变化；激励源的变化使得机身振动的总振级、振动信号功率谱分布及振动总能量等参数均发生变化；根据机身表面振动响应特征的变化反过来可以诊断活塞—缸套的磨损状态。

图3为某柴油机中修前后机身振动信号的功率谱图，由于中修前后活塞—气缸套的磨损状态差别较大，可以看出两者在功率谱上差异也很明显，表明机身振动信号应用于活塞—缸套磨损状态监测诊断是有效的。

2.3.2 柴油机气阀漏气诊断

柴油机工作时，缸盖系统承受的主要激励力有五个：进、排气门开启和关闭的四个冲击力以及缸内气体压力，因此缸盖振动信号能有效反应气阀工作状态。大量研究表明，缸盖系统可以看成是一个频不变系统，其内外表面具有非常接近的频率特性，并且认为上述各激励力彼此之间是线性无关的。图4所示为某机不同气阀状态下缸盖振动信号功率谱比较图。从图中可以看出，气阀不同状态下振动信号功率谱图差异十分明显。

2.4 声发射诊断技术

声发射是指材料受外力或内力作用产生变形或断裂时，以弹性波的形式释放出应变能的现象。固体在内部发生缺陷或即将发生缺陷状态下，如果外部作用发生改变时会产生声发射。所以，声发射信号包含着丰富的材料内部缺陷或损伤的信息。声发射监测法就是利用信号处理技术分析声发射信号，判断材料内部的状态。由于材料产生的声发射信号具有很宽的频率带宽，信号频率可以达到数 MHz，因此声发射信号蕴含着丰富的信息，已被广泛地应用于机械设备监测中。

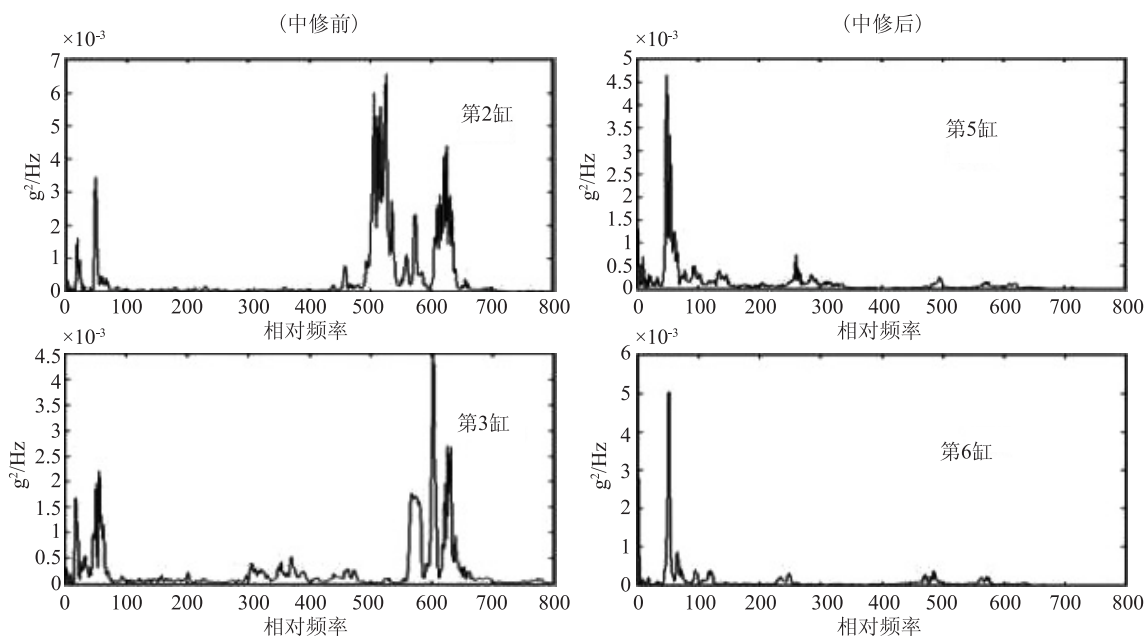


图 3 中修前后某机机身振动信号功率谱比较

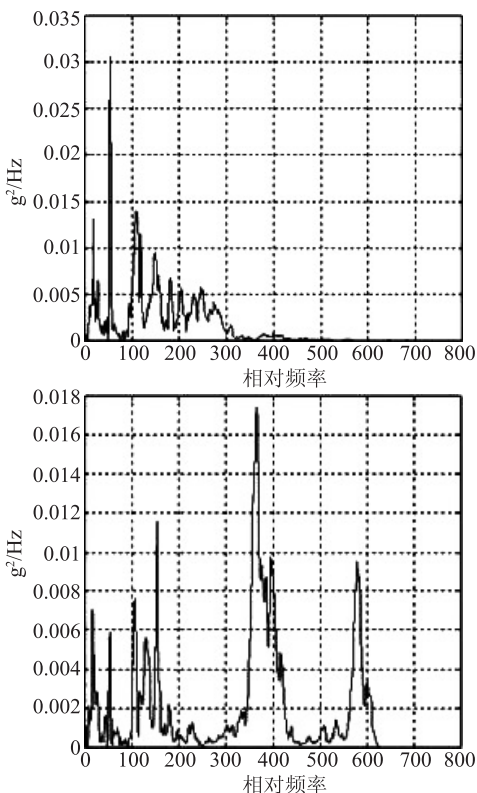


图 4 不同气阀状态下缸盖振动信号功率谱

下面以声发射技术诊断柴油机气阀状态为例说明声发射技术的应用。图 5 是气阀撞击时，柴油机缸盖的声发射信号仿真结果，可以看出排气阀落座力会在气缸盖上产生纵波、横波、表面波、反射波和模式转换波，因此声发射幅值会随着落座力增加而增加。

以 MAN B & W 6L16/24 为试验对象，采集气缸

盖声发射信号后进行分析，可确定该型柴油机缸盖声发射信号激励源主要有：排气阀关闭、进气阀关闭、排气阀开启和燃烧，如图 6 所示。试验表明，声发射技术可以有效诊断船舶柴油机气阀状态。

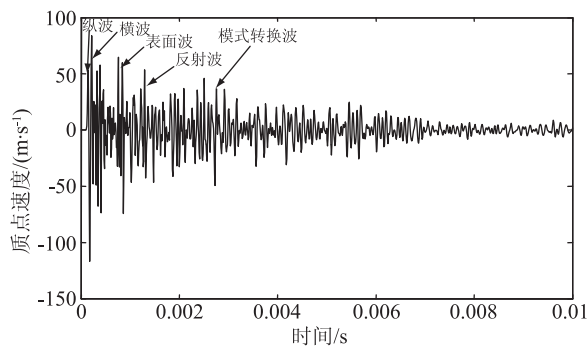


图 5 缸盖声发射计算结果

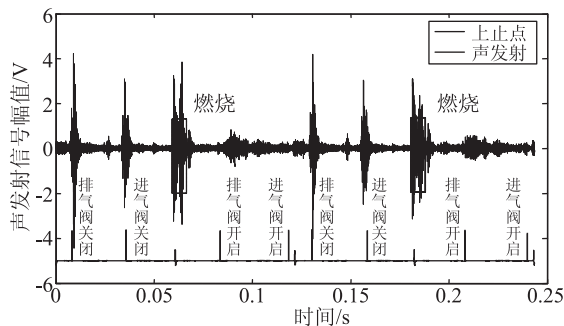


图 6 1 000 (r · min⁻¹)，75% 负荷下 4# 缸声发射信号

2.5 磁传感监测诊断技术

磁性传感监测法是目前比较常用的、先进的船舶柴油机监测诊断技术。目前该方法主要应用于活塞环磨损监测，该法主要通过检测磁场的存在和大

小，来间接判断活塞环的磨损状态。目前能够对船用柴油机活塞环磨损进行在线监测的有 Wartsila 公司的 SIPWA-TP 系统和德国 EUB-CDS 系统中的 PRA 模块以及武汉理工大学开发的船用柴油机活塞环磨损监测系统。

磁阻传感器是实现磁传感监测最重要的环节，它由四个铁磁合金带组成惠斯顿电桥，电源端通电后在电桥中有电流流过，同时在电桥上施加一个垂直电流方向的外加磁场，这会使二个相对放置的电阻器阻值增加，另外二个电阻器的阻值减小，这样就输出与磁场变化一致的电信号，如图 7 所示。将磁阻传感器安装在缸套上后，传感器内部的永久磁铁会磁化活塞环，随着活塞环的往复运动，传感器与活塞环之间磁场强度会呈现规律性的波动。当活塞环被磨损后，体积减小，其被磁化后产生的磁场会相应减少，这一变化会使外加磁场发生变化，从而被传感器感测，进而实现活塞环磨损识别。

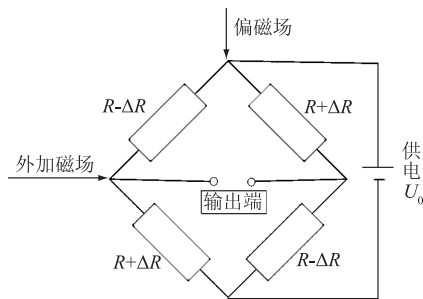


图 7 磁阻传感器内部电路示意图

图 8 和图 9 分别为某柴油机活塞环磨损监测的仿真计算与试验结果。

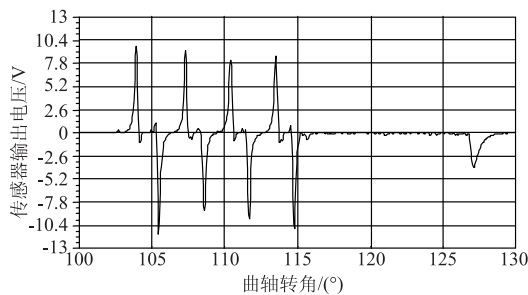


图 8 仿真信号波形图

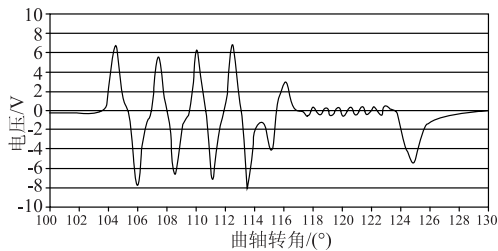


图 9 实测信号波形图

对比两图可以看出，该方法监测活塞环的磨损是有效的，测试信号的幅值和波动规律与活塞环的工作状态密切相关。

当然，随着计算机技术及故障诊断技术的发展，在柴油机故障诊断中，除了上述几种外，还发展了诸如基于专家系统、神经网络和模糊识别的智能故障诊断方法；随信息处理和计算机等技术的发展，这些方法也在不断发展。

3 多参数多方法的船舶柴油机综合诊断系统

对于现代船舶柴油机故障诊断系统而言，多参数和多方法的综合诊断系统是其发展趋势之一。船舶柴油机综合诊断系统是将热力参数法、瞬时转速法、气缸压力示功图、声发射法、活塞环监测法、轴系振动法、轴功率法及船舶运行性能监测法进行集成，实现包括柴油机在内的动力装置综合监测诊断。图 10 为多参数多方法的船舶柴油机综合诊断系统的构成。

该系统主要由以下几个模块组成：

(1) 热力参数监测模块：测量滑油、燃油、冷却、进排气和增压等系统运行状态情况，直接或间接的以工作温度、压力、功率和效率指数来反映。通过提取和挖掘柴油机部件和工作过程中的热力参数可以判断某些组件和系统的运行情况。

(2) 瞬时转速监测模块：完成柴油机一个工作循环内的瞬时转速计算，实现柴油机的动力平衡性监测和诊断。

(3) 气缸压力示功图监测模块：通过测量到的气缸压力数据，计算 P-φ 和 P-V 示功图及各缸主要性能指标(指示压力、最高燃烧压力、最高燃烧压力角、膨胀压力、压缩压力、压力升高值和转速)，在此基础上进行柴油机性能的监测与诊断。

(4) 声发射监测模块：测量缸盖的声发射信号，经处理与分析，可实现柴油机气阀漏气故障的监测与诊断。

(5) 轴系振动监测模块：由数据采集模块得到的数字信号，经一系列数学计算和处理，得到瞬时转速波形、扭振时域波形和扭振频域波形，监测柴油机的一阶和二阶扭转振动的幅值。

(6) 轴功率监测模块：通过相位差式轴功率测试系统计算出轴功率、平均转速和输出扭矩值，进行柴油机性能的监测与诊断。

(7) 船舶运行性能监测模块：利用流量传感器测得单位时间动力装置燃油消耗量，结合船舶的实

时航速, 轴功率、燃油消耗量评估船舶的运行性能, 并进行工况优化及提出经济航速。

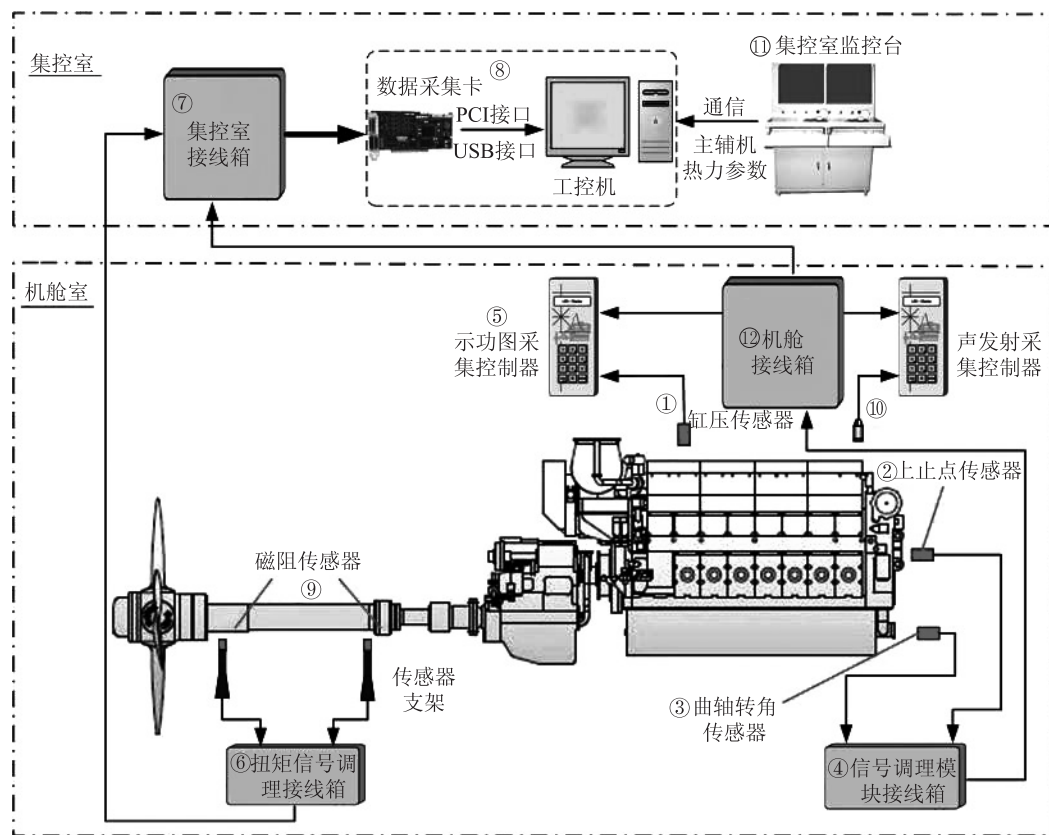


图 10 综合诊断系统原理图

4 结束语

船舶柴油机故障诊断是一门多学科交叉的综合技术, 单一的诊断技术难以有效地监测柴油机故障信息, 现代的诊断系统往往融合多种诊断技术, 以实现柴油机各个系统乃至重要部件的综合诊断, 但是智能诊断技术还不够成熟, 有些故障还难于诊断, 因此柴油机故障诊断技术必须依赖于测试技术、传感技术、自动化技术、信息处理技术等的发展而不断发展。

参考文献

- [1] 杨建国, 周轶尘. 内燃机振动监测与故障诊断[M]. 大连, 大连海运学院出版社, 1994.
- [2] 李晓伟. 船舶柴油机故障诊断方法的研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(5): 215-218.
- [3] 郭江华, 侯馨光. 船舶柴油机故障诊断技术研究[J]. 中国航海, 2005, 4(65): 75-78.
- [4] 黄麟, 林叶春, 李大亮. 计算机控制故障监测系统在船舶柴油机中的应用[J]. 船电技术, 2012(6): 19-22.
- [5] 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.
- [6] 余永华, 杨建国. 船舶柴油机数字化监测与诊断系统设计与实现[J]. 船舶工程, 2007, 29.
- [7] 黄巧莺. 船舶柴油机活塞环磨损磁监测技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [8] 陈杰. 基于支持向量机的柴油机故障诊断技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.