

29th CIMAC 大会综述专栏

大功率发动机监控系统及智能运维等技术的发展

周思敏, 牟俊超

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 基于2019年CIMAC大会,介绍了大功率发动机测量与监测、性能优化、控制系统及智能运维等方面的最新技术与产品。指出:气体机及双燃料发动机的研制已成为明显趋势;大型机器的全生命周期管理是当今热门研究方向;燃烧闭环控制是船用柴油机追求的目标之一。

关键词: 大功率发动机;监控;智能

中图分类号: TK427、TK428 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)01-0018-04

Development of Monitoring System and Intelligent Operation and Maintenance for Large Power Engines

Zhou Simin, Mou Junchao

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Based on the information from 2019 CIMAC, the latest technology and products of measurement and monitoring, performance optimization, controlling system and intelligent operation and maintenance are introduced. It is pointed out that: the development of gas engines and dual fuel engines has become an obvious tendency; the whole-life management of large engines is a hot research direction currently; combustion closed-loop control is one of the target of marine diesel engine development.

Key words: large power diesel engine; monitoring; intelligent

0 引言

2019年6月10日至14日第29届CIMAC大会在加拿大温哥华成功召开,本次会议为期5天,主要涉及领域包括节能减排、低碳燃烧、混合动力、数字化等。笔者有幸参加了本次大会交流,感受颇深。以下就本次大会在测量与监测、性能优化、控制系统及智能运维等方面,相关公司的一些新技术、新产品做介绍。

1 测量与监测

(1) CMR公司:通过持续监测燃气质量,提高奥托气体发动机的效率和排放性能^[1]。

使用液化天然气储罐的蒸发气作为船用燃料,气体质量常常会发生变化,因此,混合气质量随发

动机负载变化而变化。气体发动机大多遵循奥托循环,而奥托原理对甲烷指数很敏感。甲烷指数高的气体能够平稳地燃烧,而甲烷指数低的气体则容易在燃烧室内多个位置自动点火而发生爆震。

为了克服与奥托原理和快速气体质量变化有关的燃烧爆震问题,CMR公司设计了一种新的传感器——NIRIS NG,用于分析燃气发动机入口处的天然气成分。该传感器基于近红外光谱法,通过探测器分析传感器自身发出的光以及发动机供给管内气体发出的光,基于待分析组分的浓度不同,吸收的辐射能不同,经计算处理,得出气体成分的相关参数。测量数据可通过CAN通讯提供给发动机,可用于优化点火正时和其他有关控制参数。

(2) IMES公司:开发了一种用于高效气体机热力控制的鲁棒性极高的缸压传感器^[2]。

收稿日期:2019-11-20

作者简介:周思敏(1989—),工程师,主要研究方向为柴油机电控技术,632823266@qq.com。

针对新的二冲程发动机和四冲程气体机, 须非常精确地了解每个气缸燃烧过程的当前状态, 以实现可靠的控制和监测。因此须研制出耐用、精度高, 且具有长期稳定性的缸压传感器。

IMES 公司开发了一种新的膜结构, 该结构具有很高的强度和很好的测量性能。通过热机械分析模拟热冲击误差, 并通过有限元模拟进行优化。基于有限元模拟, 开发了专门设计的压力传递测量元件, 及一种新的用于测量弹簧的基于陶瓷设计的粘合基座。这种特殊设计的陶瓷可以承受高达 400 °C 的温度。陶瓷粘合区域通过电线连接到信号调节单元。

对于大型发动机应用而言, 压力传感器的寿命是一个相当大的挑战。因为该类内燃机工作环境复杂而恶劣, 不容易重现, 对压力传感器的寿命要求非常高。因此, 为了在开发过程中取得有意义的结果, 必须进行加速耐久性试验, 以确定并确保传感器在使用期间的鲁棒性和准确性。该种缸压传感器已在 BIT Viking 号船上的两台瓦锡兰 6L50df 发动机上进行了长时间运行试验。

(3) Vir2sense 公司: 物理辅助虚拟 NO_x 传感器的研制与应用^[3]。

当前, 全球排放法规日趋严格。针对 NO_x 减排, 船用柴油机普遍采用选择性催化还原法。其中, 尿素的添加量须根据排气流中的 NO_x 流量来确定, 而目前尚无发动机能准确获取该信息。

确定 NO_x 流量最直接的方法是测量排气中的 NO_x 浓度。对于船用柴油机来说, 由于其尾气中含硫量和灰分高, 容易导致传感器中毒。有报告显示: 直接在船用柴油机排气中测量氮氧化物, 传感器寿命低于 85 h。

针对此问题, Vir2sense 公司研制出一种简单、可靠的物理辅助虚拟传感器, 用于连续监测发动机的 NO_x 排放。通过 Modbus 通讯, 将 ECU 中的进气压力和温度、进气门正时、发动机转速、喷射始点 (SOI)、燃油压力和燃油量或喷射持续时间传给 PVS (Physically-assisted Virtual Sensor, 物理辅助虚拟传感器) 单元。在 PVS 单元中建立传热模型、点火延迟模型、放热率模型、虚拟压力传感器和 NO_x 模型。在必要时, 开启外部 NO_x 传感器对模型进行自动修正。

(4) Miba Gleitlager 公司: 开发出一种新的轴承状态在线监测技术^[4]。

由于发动机智能管理系统的使用, 使得对运行过程中的发动机部件进行监控的需求大增。系统对

于在线诊断和避免故障停机的需求也随之增加。

Miba Gleitlager 公司研发出了一种轴承状态在线监测技术, 包括主轴轴承和连杆轴承以及测量信号的无线传输技术。通过这种方法, 可以确保发动机在所有条件下安全运行, 并预测所需的维保计划。

该轴承监测系统由轴承类特定传感器、一个包含 A/D 转换器的遥测系统、传输和接收器组成, 可工作在热油、高加速度和空间限制等特殊环境中, 并使用自带电池供电。且为了减少数据的传输量, 已在发送器上进行了 A/D 转换。

2 性能优化

(1) 川崎重工: 一款川崎绿色气体发动机及预测诊断维修系统的现场经验^[5]。

川崎研发的绿色气体发动机交付应用范围很广: 从最大超过 100 MW 的分布式发电厂到私人发电系统和热电系统。通过改善缸内燃烧并减少摩擦损失, 最新的 KG-18A-V 发动机效率高达 49.8%; 从启动到 100% 输出的时间由 6 min 降低到 100 s; 市场上最长运行小时数已达 53 000 h。

该型机在监控诊断方面具备以下特征: ①拥有多变量分析系统。该系统基于质量工程理论, 对整个电站情况进行监测; 通过机器学习所有参数实现自动诊断, 可以检测到未知的故障模式。②拥有阈值监测系统 (the system that monitors the values by threshold), 可灵活改变诊断条件, 并进行更具体的诊断。③拥有全状态监控系统。该系统不须要为每个参数设置阈值, 而是通过学习每个站点传输的所有操作数据, 自动建立参考状态, 并监控与参考状态的偏差。由于它将每个设备的多变量数据作为一个索引进行监控, 可以轻松比较多个设备的状态, 也可以从大量设备中识别出疑似故障的设备, 然后制定维护计划。全状态监测系统的诊断结果按与参考状态的偏差, 由大至小进行排序, 并显示在仪表板上, 以便识别电站中出现故障迹象的位置。④拥有专家诊断系统。专家诊断系统是工程师可以主动干预的系统, 其根据已知的故障模式建立详细的诊断逻辑, 可以实现准确的预测诊断, 并具有在故障信号检测的同时显示可能的故障部件和维修计划及建议的功能。专家系统包含了工程师可以用来选择和组装诊断逻辑的各种类型的诊断逻辑块。

此外, 为了实现更复杂的诊断, 开发了一个使用 GUI (Graphical User Interface, 图形用户界面) 的诊断逻辑创建系统。通过该系统, 工程师可以在专家系统中添加新的诊断逻辑, 而无须使用特定的

编程语言编写复杂的代码。

(2) 瓦锡兰: 智能海洋生态系统的发动机控制^[6]。

2017 年秋, 瓦锡兰提出“智能海洋生态系统战略”; 2018 年, 进一步发起了“海洋觉醒”全球倡议: “将世界海洋和能源工业彻底转变为一个高效、生态健全和数字连接的生态系统”。瓦锡兰指出: 发动机作为动力源在效率、排放、可用性、自主运行方面存在重要发展机会; 并从控制系统设计方面提出了优化发动机全生命周期性能的方法; 探讨控制系统如何与周围的动力系统进行交互, 进而与船舶、云端和海岸相连接, 成为智能海洋生态系统的重要组成部分。

20 世纪 70 年代, 瓦锡兰的中速机控制系统 (UNIC) 首先被用做机旁监测报警系统, 到现在已发展到第四代。该中速机控制系统包括数百个测量点和多缸控制功能, 并引入了与周围其他系统的交互功能。

第一代 UNIC 使用 DSP (Digital Signal Processor, 数字信号处理器) 实现快速控制; 新发布的第二代 UNIC 使用 FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 来实现循环间的燃烧控制。系统硬件采用模块化和可扩展的架构; 软件则基于 WMAP (Wartsila Modular Application Platform, Wartsila 模块应用平台) 进行应用功能模块设计开发。

在基于循环的闭环控制方面, 用于优化发动机和燃烧控制的关键传感器之一是缸压传感器。2008 年起瓦锡兰发动机引入缸压传感器。从缸压信号中可获得发动机的大量工作信息, 为诊断和控制带来了新的机会。

瓦锡兰气体机还配备一个用于爆震检测的气缸加速度传感器作为备用, 在更换发生故障的压力传感器之前, 此爆震传感器将启用安全操作功能。

瓦锡兰多年前已开始收集发动机的数据。基于最新一代电子控制单元和传感器的新功能, 以及快速测量气缸压力等过程, 可不断生成大量数据。如, 对于 1 200 r/min 的 6 缸瓦锡兰发动机, 测量数据量约为 193 GB/d。

与此同时, 对数据的有效分析利用, 为减少浪费, 提高可靠性、安全性和运营效率等提供了可能性。面对大量数据通信应用, 还须从发动机设计到退役的整个系统生命周期内解决网络安全方面的问题。

关于未来的发展, 瓦锡兰给出了以下几个

方向:

①发动机控制: 从缸压信号中分析细节并应用分析结果, 将在未来十年内得到发展和成熟。

②系统集成: 对于系统控制, 越来越多的关注将放在不同组件到系统的横向集成上。这些系统作为产品独立运行。

③基于模型的控制和机器学习: 发动机控制系统的进一步改进将在基于模型的控制系统中进行, 以提高控制系统在不同工作条件下, 以及发动机使用寿命内的鲁棒性, 并减少须要校准的 MAP。

④发动机自主运行控制: 许多行业的一个明显趋势是向自治系统发展。

(3) 哈尔滨工程大学: 微喷引燃气体机控制系统开发和性能优化^[7]。

该校的研究实现了双燃料发动机 (基于一台六缸共轨机改造) 控制策略 (燃料模式管理、被动燃料模式切换、转速和轨压的闭环控制), 并对双燃料发动机的中低负荷特性进行了试验研究。基于模型对控制参数进行了标定, 并开展了排放和性能试验研究。

(4) 瓦锡兰: 用于发动机优化控制的燃气在线质量测量^[8]。

近些年, 天然气作为燃料在电厂和船用发动机上越来越受欢迎, 但由于天然气管道或液化天然气燃料中的气体成分不尽相同, 会对发动机的性能产生影响, 因此须实时测量分析气体质量以对发动机的性能进行主动控制。对此, 瓦锡兰开发了一种可连续测量和分析气体质量的方法。

当气体甲烷值下降, 工作区域接近爆震极限时, 必须限制发动机负载过高、压力过大、温度过高以避免爆震。在这种情况下, 通常采取以下应对措施: 根据预设的甲烷值、进气温度、BMEP 或负载 MAP 进行降载; 采用改变增压压力、可变进气正时、改变进气温度、改变点火正时、缸内喷水、EGR 等手段避免发动机发生爆震。

该在线燃气质量测量系统适应温度变化和振动等恶劣环境; 在一定程度上免维护和保养; 不须要频繁校准和设备清洗; 可实现 8 000 ~ 16 000 工作小时无人看管; 价格可承受。

3 控制系统

(1) 伍德沃德: LECM (Large Engine Control Module, 大型发动机控制模块) 作为下一代发动机控制平台, 适应大型发动机市场的时代变化^[9]。

伍德沃德的 LECM 提供了一种可扩展的体系结

构,能够灵活地定制控制硬件体系结构,可满足柴油机、气体机及双燃料发动机控制等各种应用的需求。软硬件均采用模块化设计,硬件可以根据需要进行组合。

LECM 的主控模块执行发动机的主要控制功能,具有强大的处理器和扩展的 I/O 口以及以太网。辅助模块是一个多用途单元,24 路 AD 通道可配置为爆震信号(支持硬件 FFT)、热电偶信号、0~5 V 或 4~20 mA 的信号;可用作爆震控制单元、实时燃烧诊断和控制单元、高级爆震单元(20 路爆震信号+2 路缸压信号)、热电偶信号处理单元。电子点火/喷射驱动器模块可用于 20 缸的点火或喷油控制。

该控制系统的开发环境为 MotoHawk 和 GAP(Graphical Application Programmer,图形应用程序)。MotoHawk 是 Matlab/Simulink 的一个附加组件,可实现 CAN 接口、故障诊断、复杂的 I/O(如燃油喷射顺序和发动机同步)以及实时操作系统配置(如任务优先级和连续数据传输)。GAP 比 MotoHawk 抽象层级更高,也提供 RTOS 和 I/O 抽象接口,并可用在目标硬件上进行代码调试。

(2) MAN:通过复杂的控制策略减少排放^[10]。

在控制策略方面,MAN 主要针对大型二冲程船用柴油机开发了断缸技术和新一代 EGR 系统。

大型发动机在低负荷运行时,其性能和排放均较差,通过断缸技术可以提高发动机的性能并改善排放。

传统的 EGR 技术在柴油机加速时易导致冒黑烟,因为排气中氧浓度测量延迟较长(10~20 s),导致 EGR 响应不及时。而新一代 EGR 系统包含了一个废气氧浓度控制器和一个空燃比限制器。

4 智能运维

当今,智能运维已是发动机寿命周期管理方案开发的关键驱动力。全生命周期管理的核心是故障诊断与机器维护。

(1) MAN 公司在故障诊断方面利用物联网技术,在发动机运行生命周期优化策略中,在以下几方面做研究:怎样将船上和岸上的数据互通;诊断发动机异常运行的几率和响应能力;来自岸上专家的远程操作指导;防止潜在的误操作等。在机器维护方面,MAN 公司研制了 3D+AR 发动机维护程序,用智能眼镜呈现维护信息。轮机工程师可以在发动机现场获得 3D 组件、文本、图表、检查表、

视频等方面的指导,使查找必要信息所花费的时间最小化。将在大修期间出错和可能导致发动机停机的风险降到最低。通过混合增强现实技术和视频会议,专家还能够参与实时故障排除。

(2) AVL 部署了一个综合仿真平台,涵盖了控制和诊断策略以及状态监测系统。仿真平台主要由三部分组成:基于“数字孪生”的发动机实时模型,控制及故障诊断、状态监测系统以及维护功能。

(3) 通用电气(GE)运输公司的远程诊断系统可实时向客户和服务团队发出警报,监控大型机车性能;实时干预以避免道路故障或电力损失;还可向客户提供维修地点、人员和备件的相关信息。

(4) WinGD 公司将数据收集监控(DCM)单元系统纳入了发动机供应范围,为每台发动机定制基于数字孪生的发动机性能监测、部件故障预测方案。故障排除应用程序向客户提供出现警报或故障时如何解决问题的说明,并生成问题报表、相关警报列表,识别涉及的部件并自动提供受影响部件的图纸和文档。当预测到特定部件寿命结束时,系统将通知操作员允许及时交付更换部件;创建零件订单以请求外部供应商交货。该系统还可以与岸上及其它船只共享数据。

(5) Heims 公司开发了基于物联网技术的发动机管理解决方案;并计划在二十年内实现全生命周期的发动机智能维护。

(6) 针对零部件故障诊断与设备维护,OMT 公司研发了一款可适应喷油器高压、高温运行环境的低成本传感器。该传感器可利用控制容积压力信号来识别喷油器的重要动作,实时监测运行数据,诊断喷油器异常及预测喷油寿命。

5 总结

从本文介绍的测量与监测、性能优化、控制系统及智能运维等几方面的技术发展可见:气体机及双燃料发动机的研制已成为明显趋势;大型机器的全生命周期管理已是当今热门研究方向;燃烧闭环控制是船用柴油机追求的目标。

参考文献

- [1] FLOT P, MESLATI A, DIGNETON M. Improving efficiency and emissions of Otto gas engines by continuously monitoring fuel Gas quality [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 026.

(下转第 36 页)

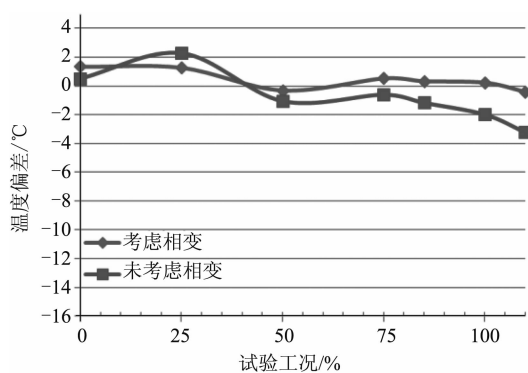


图 6 空冷后进气温度偏差 (环境: 33 °C, 35%湿度)

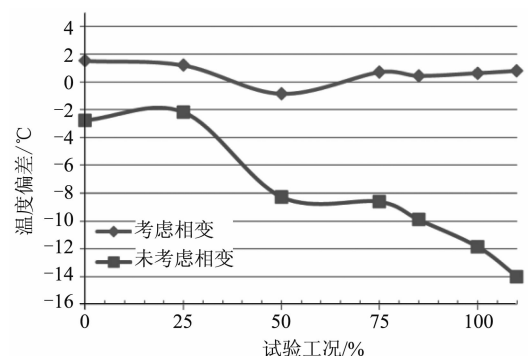


图 7 空冷后进气温度偏差 (环境: 40 °C, 65%湿度)

5 结论

通过对相变空冷器元件的计算验证和实际应用分析, 得到以下结论:

(1) 所开发的相变空冷器元件功能达到设计预期, 在原有的 Flowmaster 换热模型基础上, 可进一步计算出含湿量、冷凝量、潜热等相变结果。

(2) 基于所开发的相变空冷器元件的计算结果与理论值符合性较好, 偏差满足工程应用精度要求。

(3) 在实际使用中, 在高温、高湿环境条件下, 采用所开发的相变空冷器元件可有效提高气侧出口温度计算的准确性, 减小因相变带来的仿真误差。

参考文献

- [1] 陆家祥. 柴油机涡轮增压技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 严家驊, 余晓福. 水和水蒸气热力性质图表 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(上接第 21 页)

- [2] NEUMANN S, BIENWALD M. New development of an extremely robust cylinder pressure sensor for thermodynamic control concepts on high efficient gas engine [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 016.
- [3] KYRTATOS P, BARRR C, ROTZ V B. Development and application of a physically assisted virtual sensor (PVS) for NO_x emissions [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 285.
- [4] HAGER G. A new technological approach to onboard bearing condition monitoring [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 220.
- [5] IMAI T, FUJIHARA K, YOKOO A, et al. Field experience of KAWASAKI green gas engine and maintenance system utilizing predictive diagnosis system [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 224.
- [6] RÖSGREN J, VUOLLET T, HYVÖNEN J, et al. Engine controls as part of a smart marine ecosystem [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 210.
- [7] ZHAO G F, SONG E Z, YAO C, et al. Control system development and performance optimization for micropilot ignited gas engine [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 246.
- [8] PARK H, KYRTATOS P, BOLLA M, et al. Gas online quality measurement for optimized engine control [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 019.
- [9] VENKATARAMANAN S, VLIETSTRA A, BOOM R. LECM as the next-generation engine control platform for changing times in large engine market [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 385.
- [10] MOSER M, BUSK K, LOCKNER E, et al. Emissions reduction through sophisticated control strategies [C]. CIMAC, 2019, Paper No. 172.