

电子管理系统对现代发动机结构性能的影响

陆威崙

(MTU 上海办事处, 上海 200030)

摘 要: 就电子技术对现代发动机增压系统、燃油系统以及发动机的特性曲线、排放技术和运行监控等方面的影响进行了深入分析, 从而对电子技术对现代发动机技术发展的影响给出了一个比较完整的概念, 以期对发动机的智能化发展有进一步深刻认识。

关键词: 发动机; 电子技术; 智能化

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)02-0006-06

Effects of Electronic Management Systems on Structure and Performance of Modern Diesel Engines

Lu Weilun

(MTU Shanghai Office, Shanghai 200030)

Abstract: Effects of electronic technology on turbocharging systems and fuel systems of diesel engines, as well as on the performance map, exhaust emission technology and monitoring-control systems are discussed. A relatively complete image of electronic technology in diesel engine field is obtained, which is expected to help people have profound insight on the development of intellectualization of engines.

Keywords: engine; electronic technology; intellectualization

0 引 言

当今世界经济和科技的发展对发动机技术提出了越来越高的要求。高的功率密度和低的燃油消耗是两项一贯的要求。近数十年来环境污染成了一个越来越严重的问题, 因此对发动机排放的限制也越来越严格。问题的复杂性还在于降低排放的措施往往和提高功能指标和经济性指标的措施相矛盾; 另一方面, 在大多数情况下发动机是变工况运行的, 因此还要求这些良好的功能和经济性指标及低的排放指标不仅仅能在一种或几种工况下达到, 而是希望在全工况下都能尽量完美。理论和实践的研究都表明: 现代电子技术是实现所有这些要求的唯一途径。

发动机电子管理系统这一名称比较稳定的形成是在 20 世纪 90 年代。在此之前电子技术局部性地

应用于发动机, 主要是用作电子调速器。在电子技术得到应用之前, 采用的是非电子的电气调速器, 其与机械、液压式调速器一起构成了调速器的三大种类。随着电子技术的发展, 其在发动机领域的应用逐渐超出了仅仅是调速的作用; 特别是电子喷射技术的应用, 需要燃油的喷射与发动机的相应工况相匹配, 于是产生了对发动机整个工作过程进行全面控制的发动机电子管理系统。这一系统通常包括发动机控制单元、信号采集和执行系统以及通信总线系统; 现在, 这种系统广义地甚至还包括发动机的监测控制和遥控系统。电子管理使许多发动机技术得以实现, 随着其进一步向智能化发展, 这些技术将越来越完善, 并且还将促使新的技术产生。

本文对电子管理系统中的若干电子技术在发动机上所涉及的方面进行探讨, 希望对电子技术给发动机技术发展带来的深刻影响给出一个比较完整的

收稿日期: 2014-11-27

作者简介: 陆威崙(1943-), 男, 研究员, 主要从事发动机应用工程工作, E-mail: luweilun2@126.com。

概念, 由此对发动机的智能化发展能有进一步的认识。

1 实现对增压系统的智能化控制

1.1 顺序增压

众所周知, 对于增压发动机, 无法做到在整个发动机转速—负荷范围内增压器与发动机都有最好的匹配, 即如果在高转速—负荷段将发动机调整到最佳的状态, 则在低转速—负荷段发动机的性能可能会变得恶劣; 反之亦然。因此通常只能在高、低转速—负荷区采取有偏向的折中做法。而采用电子管理以后, 可以使增压器在发动机的整个转速—负荷范围都能有较好的兼顾。例如, MTU 公司的顺序增压技术就是通过减少低转速或低负荷时参与工作的增压器数来达到全转速—负荷范围内增压器和发动机的良好匹配的。而根据发动机的工况适时地自动调整 (增加或减少) 参加工作的增压器数的功能是由发动机的电子管理系统实现的。

以 MTU20V8000 发动机为例进行说明^[1]。为了减小增压器的尺寸, 20 缸的发动机装用了 4 台增压器, 其中 2 台是基本的 (图 1), 也即在任何工况下都工作的增压器, 而另外两台则是根据负荷和转速的情况确定是否参加或退出运行。从图 2 给出的性能曲线可以看出分别有 2 台、3 台、4 台增压器参与工作的区域分布情况。增压器工作的切入和退出由液压缸驱动排气阀板的开、关实现, 而液压缸的动作则是由电子管理系统操纵电磁阀控制的。就顺序增压功能而言, 电子系统实现这种功能并不困难, 关键是相关元件的耐久性, 在正常工作的阶段, 电磁阀必须要能经受住上万次甚至数万次的开、关动作的考验。

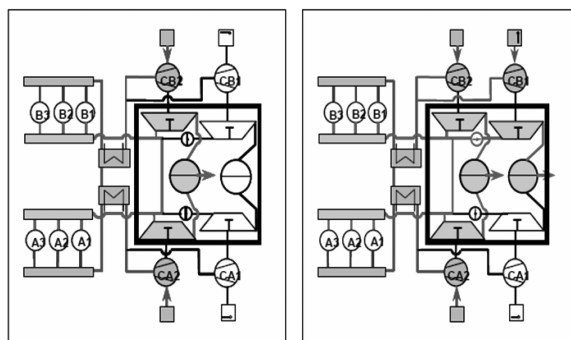
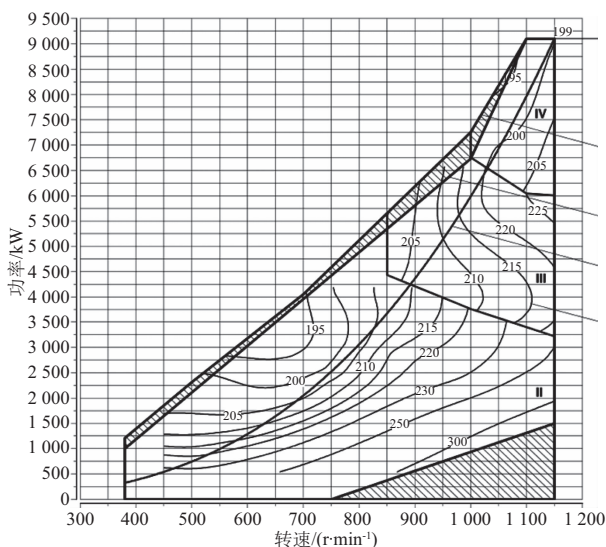


图 1 MTU8000 发动机的顺序增压

图 1 MTU8000 发动机的顺序增压

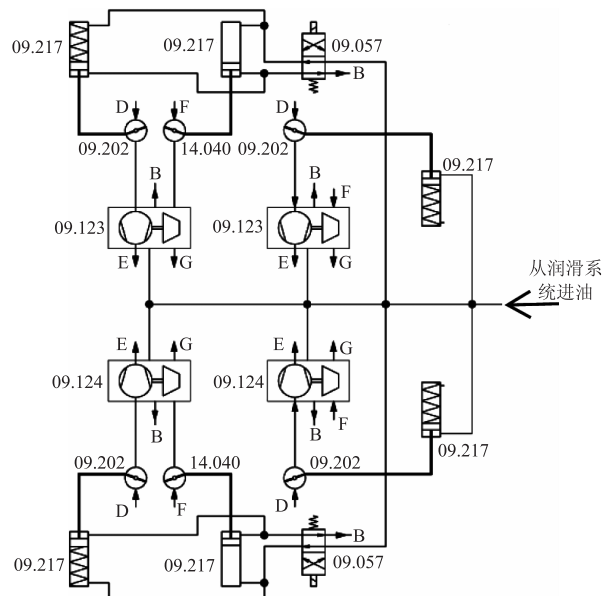
图 3 给出了增压系统的控制简图。液压驱动的油来自发动机的润滑系统。增压器要退出运行时, 电磁阀 09.057 接通作为执行机构液压缸 09.217 的油

路, 在由排气通断阀板 14.040 切断该组排气管路的同时, 由空气阀板 09.202 关闭进气道 (图示位置)。



II-两台基本增压器运行; III-三台增压器运行; IV-四台增压器运行

图 2 顺序增压的性能曲线



E-燃烧空气出口; D-燃烧空气进口; G-涡轮废气出口;

F-涡轮废气进口; B-滑油回油

09.217-顺序增压执行机构; 09.057-顺序增压电磁阀; 09.123-左侧增压器; 09.124-右侧增压器; 09.202-空气阀板; 14.040-排气通断阀板

图 3 MTU 20V8000 增压系统顺序增压控制

为使增压系统能更精确地提供发动机所要求的空气量, 有些发动机在顺序增压的基础上加装了进气回气阀 (blow over valve), 图 4 给出了其工作原理。

区域 II 是进气回气阀打开工作的区域。这时由于发动机的负荷降低, 对进气的需求量减少, 回气阀打开后, 部分进气进入排气系统并排出。发动机运行时电子控制系统根据设定的转速、供油量信号自动控制回气阀的开、闭。

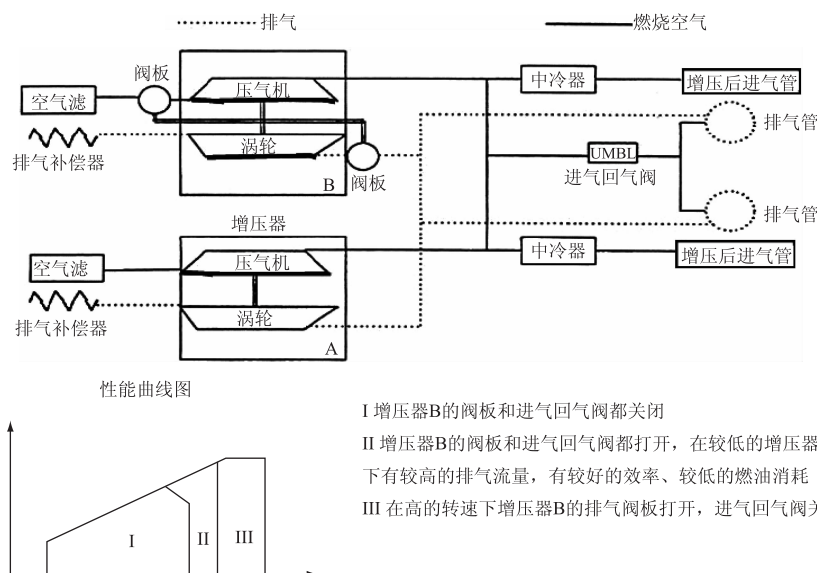


图 4 带进气回气阀的顺序增压

1.2 两级增压系统

两级增压系统的采用最初是为了满足发动机强化、提高单机功率的要求。但近年来，其目的更多地是为了改善排放的需要。

MTU 公司是最先采用两级涡轮增压技术的发动机制造商之一。20 世纪 80 年代初，为了满足大型舰船对柴油机单机功率的要求，MTU 公司在原来 1163TB02 机型的基础上采用了两级增压技术，推出了新的 1163TB03 系列柴油机。新机型的增压压力从原来的 0.31 MPa 提高到 0.49 MPa，从而使发动机在缸径、行程不变的情况下最大功率从 5 200 kW 提高到 7 400 kW。但由于两级增压系统结构复杂、价格昂贵，所以在此后很长时间内 MTU 公司虽然又开发了 2000、4000 和 8000 等系列柴油机，但都没有采用两级增压技术。然而，这种情况在近年来却被突破。

在铁路系统，为满足欧洲 2012 年实施的 EU stage III B 排放要求，继电子控制共轨燃油系统后，MTU 又开发了采用两级涡轮增压的 4000R04 系列柴油机。而在船用领域，则对原 1163TB03 系列发动机进行了进一步的改造，开发了 1163M04 系列发动机。以电子控制共轨燃油系统代替了原来的传统燃油系统，且进一步完善两级增压系统，使其增压压力提高到了 0.56 MPa。采用两级增压可以有效地解决其它减排措施所带来的副作用，所以 MTU 公司准备对用于工业、建筑和移动领域的 1600、2000、4000 发动机都采用两级增压^[2]。

近来 MAN 公司也对其 1988 年推出的 MAN 48/60 发动机进行改进，采用两级增压，推出了 MAN

18V48/60TS 机型，这种改进主要是出于降低 NO_x 排放的需要。由于采用了米勒循环，需要提高进气压力。通过两级增压使增压压力提高到 0.6 MPa，同时使燃油消耗在每缸功率为 1 050 kW 时降低到 171.1 ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)， NO_x 排放量达到 1 480 ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$) 的水平，从而使该机型成为强劲而经济的清洁发动机^[3]。由于增压器尺寸较大，仅高压级增压器装在发动机上，低压级增压器则装在单独的支架上。两级增压采用串联式系统，即全部空气进气都流过串联的低压和高压增压器；在每级增压后可以经过冷却器冷却，以降低进入气缸的空气温度。

与常规的一级增压相比，两级增压系统结构要复杂得多，特别是高低压增压器的布置上常受到空间的限制。而在电子管理系统方面复杂性并不增加很多。表 1 给出电子管理系统对增压系统实施的主要管理功能。

表 1 电子系统对增压系统的管理功能
(不同机型对以下项目可有选择)

传感器信号	电子系统执行功能
增压器进气温度	显示, 判断、执行功率补偿
气缸进气温度	显示, 判断、执行进气预热
增压空气(气缸前)压力	显示, 报警
中冷器冷却水温度	显示、报警
每缸排温	显示、报警, 降功率运行
增压器后排温	显示、报警
出入增压器滑油压力	显示、报警, 降功率运行
涡轮转速	显示, 降功率运行
顺序增压 (转速、供油量信号)	根据功率/转速设定控制增压器切入、退出运行; 进气回气阀开、闭。

2 额外增加发动机功率的功能

2.1 特性曲线的超越

有时为了某种特殊需要, 例如改善船舶加速性, 要求发动机能短暂提高某转速下的功率, 也即能超越特性曲线短暂地工作, 电子管理系统就能通过电子编程很好地实现这种功能。图 5 所示为 Wartsila 某型发动机的特性曲线, 曲线 1 为正常工作的功率曲线, 而曲线 2 即为仅允许短暂工作的极限曲线。加速时能按曲线 2 短时工作, 之后会自动回到曲线 1^[4]。

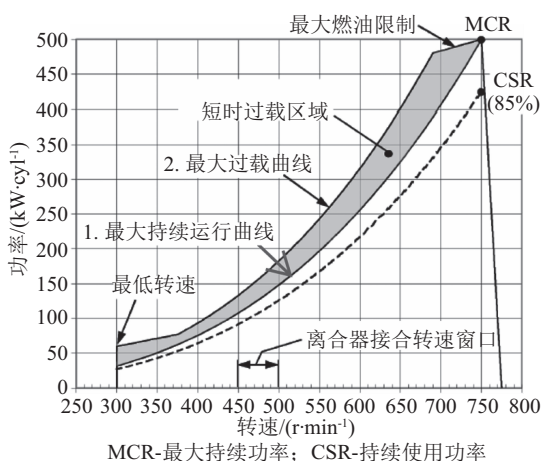


图 5 Wartsila 某型发动机的特性曲线图

发动机制造商所提供的功率曲线总是低于发动机的最大功率极限曲线, 所以这种特性曲线的超越也是以不超过最大功率极限曲线为条件的。

2.2 补偿环境条件变化对发动机功率的影响

当环境条件变得不利时, 发动机功率会降低, 所以这种性质的功率补偿实际上也属于额外地增加了发动机的功率。

根据 ISO3046 的规定, 船用发动机的标定功率是在 25 ℃ 空气温度、25 ℃ 海水温度的环境条件下测定的, 而在大多数情况下实际的使用条件是与此有异的。众所周知, 温度升高时, 由于空气密度的降低, 发动机功率会下降。采用电子管理系统后, 通过传感器感知外界温度的变化, 然后通过编程在一定范围内调整供油量, 从而维持原标定功率值或适当减少功率降低值。当然, 在这种情况下单位功率的燃油消耗量会有所增加。表 2 给出了几种 MTU 机型当环境空气温度从 25 ℃ 变化到 45 ℃, 海水温度从 25 ℃ 变化到 32 ℃ 时最大功率调整和燃油消耗增加的情况。有些机型不能恢复到原标定功率值, 仅可使功率有一定程度的提高, 这是由于燃油的增加已经达到限制值的缘故。

此外当海拔高度变化时, 通过压力传感器感知大气压力的变化, 也可以在经过电子系统的运算后进行功率的自动补偿。

表 2 几种 MTU 机型环境空气温度/海水温度从 25 ℃/25 ℃ 变化到 45 ℃/32 ℃ 时功率和燃油消耗的调整

机型	功率降低比率	燃油耗增加比率
S4000M73	0	2%
S4000M93	3%	2%
20V1163TB93	3%	1.5%
20V1163M94	3%	2%
20V8000M01	0	2%

3 改变特性曲线的形态

通过电子系统编程, 各转速下在允许的范围内设定不同的供油量就可获得不同的功率-转速特性曲线。MTU 公司最早在其船用发动机上推出了具有在一定转速范围内保持获得最大功率的平台形态的功率-转速特性曲线, 这种特性曲线使低转速时的功率增高, 增大了螺旋桨推进曲线左侧与特性曲线所围的面积, 从而更有利于船舶的加速。而对在较低转速具有阻力峰值的高性能船来说, 则更易克服峰值, 实现飞升。目前有若干其它品牌的柴油机也采用了这种做法。

图 6 给出了 CAT C32 发动机的功率-转速曲线, 可见从 1 800 ~ 2 300 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 都能获得最大功率 (1 342 kW), 曲线显得非常丰满^[5]。

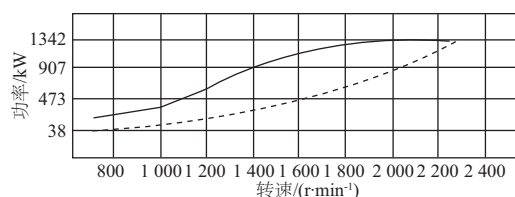


图 6 CAT C32 发动机的特性曲线

4 电子管理功能与现代燃油供给系统

电子技术的采用彻底颠覆了统治柴油机领域一百年的 Bosch 供油系统, 带来了柴油机供油方式的重大革命。

在 Bosch 系统中, 对应不同的加油齿杆位置可以画出不同的转速-功率曲线。对自然吸气式发动机, 当齿杆处于最大加油量位置时, 所画出的转速-功率曲线处于诸多曲线的最外面, 所以称为外特性曲线, 它表示了发动机的最大能力。由于燃油和空气的供给是由两套不同的系统分别控制的, 而由于结构上的困难, 无法在各种转速下把这种控制联

系起来。所以在整个转速范围内,在大部分区域无法实现燃油和空气供给的最好匹配,不能发挥出发动机最好的动力性能。对于增压柴油机,其处于最外层的转速-功率曲线是由一段最大供油曲线和若干排烟、排温、喘振等限制曲线组成的^[6]。这条曲线通过试验做出,在实际操作中除了最大供油一段外,要由操作者通过操作加以控制,因此同样存在燃油和空气供给不能获得最好匹配的问题。

另一方面,为了获得最好的燃烧效果,特别是当前为了达到更低的排放,要求对燃烧过程进行所希望的控制。这就对供油时刻、供油规律提出了要求,并且这种要求是随工况变化的。而电子技术使这些要求得以实现,总的来说电子系统可以使燃油系统实现以下功能。

(1) 随发动机工况、环境条件变化,合理调整喷油正时;

(2) 随发动机载荷的变化,调整喷油量;

(3) 可实现不同的喷油规律及多次喷射;

(4) 在某些情况下可对喷油压力进行调整。

为了适应苛刻的排放法规,采用共轨式燃油系统似乎已经成为大多数柴油机技术发展的共同趋势,该系统将燃油高压的产生和燃油喷射的控制完全分开,储存在共轨中的燃油高压可以不受发动机转速的影响,从而可以在低转速时也获得高的喷射压力。而燃油的喷射是由电磁阀控制的,喷油的时刻、方式和喷油量可通过调整电磁阀的通断进行改变。把电磁阀调整所要求的参数预先设定在电子系统中,传感器感受到这些参数的变化时,便能通过电子编程实现相应的控制。

某些型号的 Caterpillar 发动机采用液压驱动的电子单体喷油器系统(HEUI),燃油高压由与喷油器做成一体的泵产生。如图 7 所示,液压油作用于泵体内活塞的大端,则小端一侧的燃油便产生高压引起喷射。电子系统根据工况的变化控制液压油的压力,就可使喷油压力在一定范围内变化。

5 电子技术和发动机的排放

发动机的减排在理论上的问题解决后,技术上的实施是以电子技术为依托的。

众所周知,柴油机的减排技术总体可以分为机内措施和机外措施两大类。机内措施一般包括空气供给和燃油供给两方面,电子技术在其中的应用前已述及,不再重复。

机外措施目前用得较多的是选择性催化还原技术(SCR)和粒子过滤器技术(DPF)。

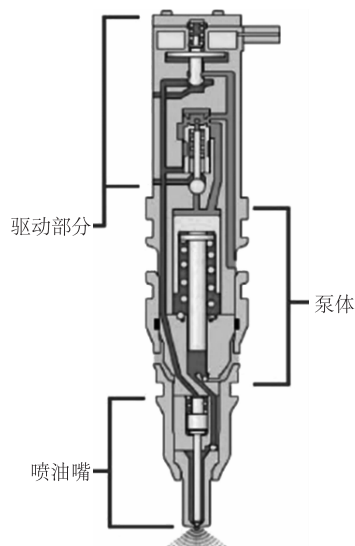


图 7 Caterpillar 发动机的电子单体喷油器

5.1 选择性催化还原(SCR)

这项技术的原理是在发动机排气中加入还原剂使之与氮氧化物反应,生成氮和水,达到减少 NO_x 排放的目的,其关键是还原剂量的确定。还原剂的量取决于排气中氮氧化物的含量,后者与发动机的载荷、转速、排气温度等相关,是动态变化的。电子系统通过传感器感受相关参数的变化,进行精确计算后确定所需还原剂的量,并控制还原剂定量系统精确地向排气喷入所需的还原剂。

5.2 粒子过滤器(DPF)

存在于排气中的粒子通过过滤器加以过滤。由于排气的高温,通常过滤器用陶瓷材料制造,滤过的粒子借排气的高温自行烧去。但当排气温度不够高时,会有粒子积聚在过滤器上。当过滤器上粒子积聚到一定程度时就要设法去除。电子系统通过探测过滤器上下游的压力差来判定粒子的沉积程度。MTU 采用了一个排气道温度管理系统,当温度低时设法提高温度,其做法是增加燃油后喷射、降低空燃比或推迟主喷射始点^[7]。

Caterpillar 公司采用了 ACERT 技术。电子控制模块 ECM 探测到粒子积聚达到一定程度后会由 CRS 再生系统自动喷射出精确的燃油量,使碳粒加热氧化而去除^[8]。

无论是 SCR 或 DPF 技术,都极具智能化的特色,如果没有电子技术是无法实现的。

6 发动机的运行与监控

上述功能众多的电子技术必须综合起来,形成一个总的信息共享、统一指挥的发动机电子管理系统。这个系统保证了发动机的正常运行、监测和控

制, 这是现代发动机最重要的特点。

这个系统的工作内容包括: 温度、压力、转速、喷油量、液位等各种参数的采集; 参数的相关运算以产生各种指令; 指令的传输与执行; 相关参数的监测显示; 发动机工作情况的记录; 电子系统的自检; 报警; 运行操作。因此必须包括以下主要组成部分。

(1) 发动机电子控制中心

不同的制造商对此有不同的称呼, 如发动机控制单元(ECU)、发动机控制模块(ECM)等。该部分的储存设备中设定了发动机的各种要求, 决定了发动机的工作状态; 采集的所有参数也会传输到这里, 同时会进行相关的比较、运算, 并发出指令。

(2) 传感器

传感器感受各种物理量并将其转变为电信号, 传输到发动机的电子控制中心。由于实现电子控制所需要的参数众多, 现代发动机上安装的传感器数量和种类是很多的。感受的物理量包括温度、压力、位移等。信号种类可以是模拟量、二进制量、开关量, 用于显示仪表的通常为模拟量, 开关量或二进制量则多用于报警。图 8 给出了 MTU 20V8000M71 发动机的部分传感器布置图, 其密集程度由此可见一斑^[9]。

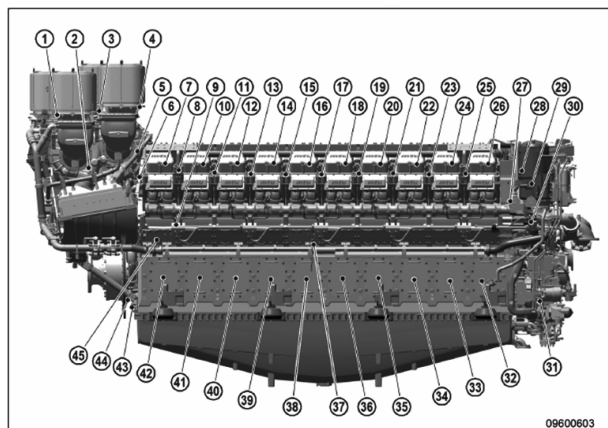


图 8 MTU 20V8000M71 发动机部分传感器布置图

(3) 显示、报警、操作台面(箱)

操作台面安装所有的显示仪表、报警声光指示以及发动机操作控制按键。所有这些元件都借电缆和电子控制中心相连, 接受来自电子控制中心的信息, 并向其反馈操作指令。

(4) 发动机监控的扩展

由于采用了电子管理系统, 只需提供信号的接口, 就可方便地将对发动机的监控进行扩展。通常与电子控制中心相连的接口安装在位于发动机旁的控制箱内, 由此再通过总线系统连接到各扩展部位, 就能实现在各扩展部位对发动机的监控。

7 结束语

综上所述, 在现代柴油机中许多重要的功能都要借助电子技术来完成, 其中许多功能在过去是无法实现的。各种电子技术的联合作用形成了一个电子管理系统, 这个系统使得现代柴油机逐步向智能化的方向发展。

参考文献

- [1] MTU. MTU Series 8000. MIM 05 172 (52 1E)2/07[R].
- [2] 陆威嵩. MTU 柴油机减排的工程实践[J]. 柴油机, 2012,34(3):1-7.
- [3] Dick Amos. Two-stage turbocharging is finding favour in the market[J]. Marine Propulsion, Oct/Nov, 2011.
- [4] Wärtsilä. Wärtsilä 32 Product Guide 4/2012[R].
- [5] C32Acert, Marine Propulsion. LEHM0114-01 (3-14), 2014 Caterpillar, <https://marine.cat.com>.
- [6] 陆威嵩. 现代船用柴油机特性曲线的研讨[J]. 柴油机, 2005,27(4):15-20.
- [7] Guido Schaeffner, Klaus Rusch, Daniel Chatterjee, et al. Diesel particulate filter: Exhaust after treatment for the reduction of soot emission[R]. Aug. 2011, MTU Friedrichshafen GmbH.
- [8] CAT 新 ACERT 承诺[J]. 柴油机, 2007,29(1):57.
- [9] Operating Instruction, Diesel Engine 20V8000M70, 20V8000M71. MS 15000/03E 2013-11[R].