

2011 年大功率柴油机国际技术交流研讨会专题报道

柴油机电控技术研究及应用

宋恩哲

(哈尔滨工程大学, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 系统阐述了自主开发的柴油机系列化电子控制系统的结构和功能、突破的关键技术以及电子控制系统的开发及应用情况。与国际先进控制系统的对比表明: 主要技术指标相当, 部分功能和性能有所改进提高, 在冗余切换平稳性、瞬态调速率指标上, 明显优于国外产品。同时, 还简单介绍了柴油机电控单体系的研究进展及取得的成果。

关键词: 柴油机; 电控技术; 应用

中图分类号: TK424. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 4357(2011)04 - 0016 - 05

Research and Application of Diesel Engine's Electronic Control Technology

Song Enzhe

(Harbin Engineering University, Heilongjiang Harbin 150001)

Abstract: The construction, functions, and key technical breakthrough of independently - developed diesel engine series electronic control system and its development and application situations are introduced. Comparison with international advanced control systems show that the main technical parameters are equal, some functions and performances have been improved, redundancy switching stability and transient speed droop are even considerably better than foreign products. Moreover, the research progress and achievements of diesel engine electronic unit pump are briefly introduced.

Keywords: diesel engine; electronic control technology; application

0 引 言

柴油机因具有功率覆盖面宽、效率高、能耗低、使用维修方便等特点, 一直被广泛应用于国民经济建设的各个领域。但随着世界能源危机的日益突出、环境污染的日益严重及对动力装置自动化水平要求的日益提高, 对柴油机性能提出了更高的要求, 同时也对柴油机优势地位提出了更高的挑战。采用综合电子控制技术是解决上述问题的有效方法, 并且电子控制技术水平已经成为衡量柴油机先进性的重要标志和提高柴油机产品核心竞争力的主要措施。该技术也一直被国外企业视为核心技术, 同时国外企业借助这些技术优势占领了我国柴油机电控的大部分市场, 特别是高端应用领域更是国外产品的天下, 获取了巨大的经济效益。因此, 开展柴油机控制技术的研究, 突破制约技术发展和产品

应用的关键技术, 提高我国在该领域的技术水平, 并赶超国际先进水平, 研制具有自主知识产权的柴油机综合电控系统迫在眉睫, 对于摆脱目前柴油机发展受制于人的局面具有十分重要的意义, 也是我国实现从造船大国向造船强国转变的必由之路。

但是, 要突破柴油机电控技术瓶颈, 研发具有自主知识产权的柴油机综合电控系统, 确实面临很多问题。综合电控系统功能要求多, 结构和逻辑关系复杂, 虽然我们多年来一直从事相关领域技术研究, 国内同行也有一些研究可供借鉴, 但与国外相比, 无论是在电控系统设计经验、数据积累, 还是在研究条件上, 还存在相当大的差距。在这种局面下, 哈尔滨工程大学组织力量对柴油机电子控制系统进行攻关, 经过近十年艰苦卓绝的努力, 研制成功系列化柴油机综合电控系统, 申请 40 余项发明专利, 该项目获 2010 年国家技术发明二等奖。新一代柴油机电控单体泵燃

油喷射系统研发也取得阶段性研究成果，已经在河南柴油机重工有限公司生产的 TBD234V8 和 TBD236V6 柴油机上配机成功，并已产品化。

1 柴油机电控系统结构和功能设计

针对 16V396 系列柴油机推进和电站应用的要求，电控系统的设计要兼顾推进与电站两种用途。推进用系统为 E 型，系统的功能是：实现柴油机的电子调速、缸排断油控制、相继增压控制、安保及齿轮箱控制以及参数监视等功能，同时与上层驾控、操作系统具有通讯接口，可以接受上层遥控操作指令，输出柴油机、齿轮箱等机舱设备的运行参数和故障信息。系统的连接关系如图 1 所示。

E 型综合电控系统组成包括用户连接系统 CCS、调速与监控系统 ECS、机旁操纵箱 LOP、柴油机接线箱 ETB、执行器以及多种传感器等。

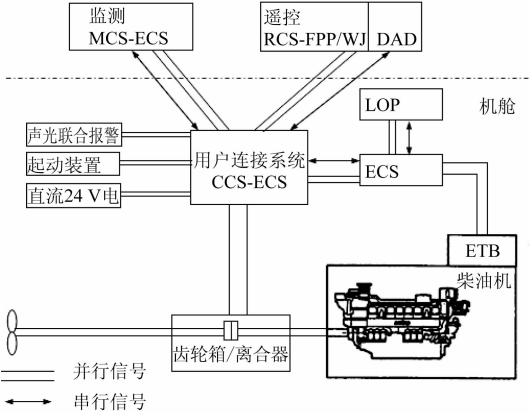


图 1 ECS 系统各组成部分连接关系图

(1) 调速与监控单元

调速与监控单元的主要功能有监测、调节、控制与通讯等。

监测功能包括对柴油机的运行状态参数进行检测与处理，当产生越限或故障时进行报警或产生安保控制动作；监视齿轮箱离合器的工作状态，以调节柴油机工作状态；监视系统自身工作状态。

调节功能主要有：当负载变化时，维持柴油机转速稳定；当设定值由操作者改变时，调节柴油机的转速达到设定值；转速设定用机旁操纵箱上的按钮或由遥控信号完成；在安保停机情况下使柴油机自动停机；通过优化运行，降低排放及燃油消耗；防止柴油机过载；供油限制功能，综合考虑柴油机转速、增压器切入个数、增压空气压力、增压器转速等参数，限制柴油机的最大供油量。

控制功能包括柴油机的起动控制、停机控制、急停风门控制、相继增压控制、缸排断油控制、齿

轮箱离合器控制等。

(2) 机旁操纵箱

机旁操纵箱是显示和控制操作单元。显示系统工作状态、柴油机运行检测数据、齿轮箱工作状态等，实现对发动机起动、停机、测试以及齿轮箱离合器的控制操作。

(3) 用户接线箱

提供与柴油机或机舱内其它设备(齿轮箱、起动装置、测量传感器、闪光灯、喇叭)相连的接口；对信号进行隔离和调理；控制齿轮箱在机旁操纵和遥控操纵两种方式下的切换。

(4) 柴油机接线箱

柴油机接线箱是综合电控系统与柴油机控制终端执行机构、监测传感器之间的接口部件。

(5) 执行机构

执行器根据控制系统的输出调节燃油泵齿条位置。

(6) 传感器

包括转速、压力、温度等柴油机控制与状态监测传感器。

电站用柴油机综合电控系统基本结构与推进用综合电控系统类似，系统结构如图 2 所示。另外为了满足系统高可靠性工作要求，柴油机调速与监控单元采用热冗余方式，即采用两组调速与监控单元，一组处于工作状态，另一组处于热待机(备用)状态，当工作单元出现故障(如死机、关键传感器与执行器故障)时，备用系统自动切换到工作状态，维持柴油机正常运行。另外还增加单缸排温测试 ETB2，可以对 16 个气缸的排气温度进行监测。

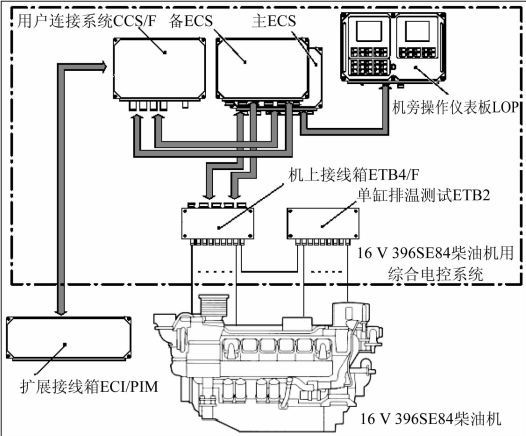


图 2 冗余热备份柴油机综合电控系统组成

2 关键技术

柴油机综合电控系统的研发涉及控制、机械、

电子、电磁等多学科知识，自主研制柴油机综合电控系统需要解决很多技术问题。

(1) 高精度自适应转速调节技术

柴油机具有典型的非线性、时变性特征。传统的 PID 控制虽然简单可靠，使用方便，易于实现，在工业控制领域特别是柴油机控制领域得到了广泛应用，但其参数调整麻烦、适应性不强等缺点也非常明显。近年来，模糊控制、神经网络控制、自适应控制等各种智能控制研究活跃，特别是自适应理论，由于可以对控制对象进行实时反馈调整控制，在工业控制上得到了相当重视，但国内在柴油机调速控制领域尚没有具体的产品实际应用的报道，国外对这一技术在柴油机上的具体应用掌握在一些大公司如 MTU 等手中，作为公司的技术秘密，国内尚难以获悉这一技术的关键资料。鉴于此种情况，结合本项目的研究情况和研究背景，瞄准国际上高端技术，突破现有技术瓶颈，高起点进行柴油机调速控制技术开发，为柴油机调速控制新技术的推广、成熟应用开辟新的局面。

针对柴油机调速的要求，在本项目综合电控系统调速控制中选择了基于 Widrow-Hoff 算法的自适应调整 + PID 控制策略，即在实际柴油机转速偏离目标转速范围较远时采用 Widrow-Hoff 算法对 PID 参数进行实时优化调整，加速供油量修正速度和幅度，使柴油机转速尽快恢复到目标转速；当柴油机稳定运行时，柴油机实际工作转速与目标转速较近，采用经典 PID 固定参数控制，使柴油机保持良好的稳态特性。另外，针对发电用柴油机转速的高精度控制要求，采用负载前馈技术与参数自适应技术相结合，既提高了柴油发电机组的动态性能，同时兼顾了稳态性能。转速控制与综合优化策略流程示意图见图 3。

实际应用表明，利用本技术实现的柴油机综合电控系统在转速调节上性能稳定，特别是在舰艇推进大范围转速调节、突加突卸、增压器切换与缸排断油等变工况条件下很好地兼顾了调节的快速性和稳定性。转速波动率 $\leq \pm 0.2\%$ ，瞬态调速率 $\leq \pm 5\%$ 。

(2) 柴油机综合优化控制技术

项目研究的综合电控系统应用对象为 MTU396 系列 16 缸柴油机，燃油控制采用双燃油泵，停止一个燃油泵的供油可以实现 8 缸断油控制，在低速、小负荷时可以仅一个燃油泵工作，从而提高柴油机的经济性和改善排放；增压系统为两个增压器，低速小负荷时由于废气流量不足，只有一个增压器工作，以提高增压器工作效率，高速大负荷时

为保证进气量需要两个增压器都工作。作为推进用柴油机，还涉及离合器的正向、反向啮合和空车控制；在不同数量增压器投入工作或者增压器的切入切出发生故障，以及齿轮箱离合器的工作状态发生变化时，燃油系统的控制也要做相应协调调整，以保证柴油机的稳定可靠工作。因此，整个 ECS 系统实质上是将燃油控制、增压器控制和齿轮箱离合器控制集中为一个大的控制系统，对各个系统进行综合协调优化控制，实现柴油机的稳定工作和整体性能最佳。

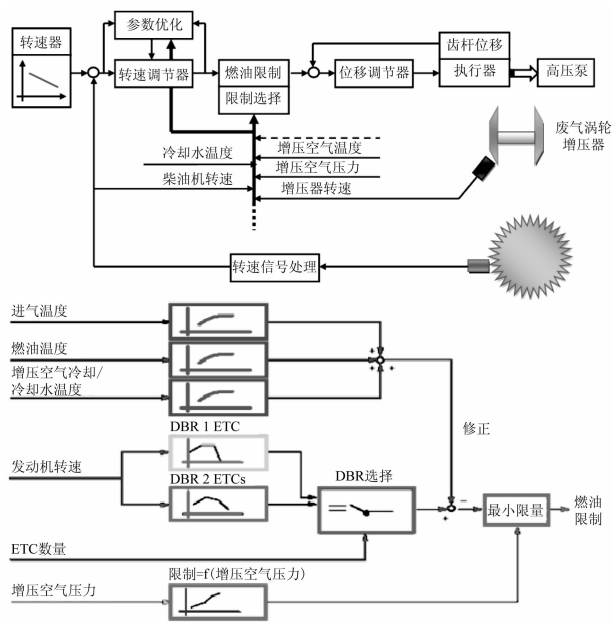


图 3 转速控制与综合优化策略

为了实现 ECS 的综合优化控制，重点要解决增压器切入切出控制、燃油泵的断油控制、切换时的平稳控制、燃油系统和增压系统的切换点优化、离合器啮合时的柴油机协调控制等关键技术问题。

增压器的相继增压控制以及缸排断油控制都存在如何选取切换点问题，即多输入、多目标、多约束的综合优化问题。在本项目中，为了保证柴油机、增压器能获得最佳的工作性能，对切换点的优化选取采用了仿真模拟计算的方式进行。另外，还分析了进气压力、温度等环境因素对柴油机性能的影响规律，制定了在各种环境条件下的燃油限制修正 MAP，根据不同的控制目标对柴油机的燃油控制采取不同的优化策略。通过采用这些技术，很好地平衡了柴油机在不同运行工况下动力性能、经济性与排放指标等参数。

(3) 冗余热备份技术

双机热备份是提高舰船柴油机控制系统可靠性的最有效方法。双机热备份技术是一种实时数据备

份技术，由该技术组成的发动机控制系统由两个控制系统组成，一个做主系统，另一个做备份系统，两个系统同时运行，并通过信息共享来交换数据。当主系统发生故障时，备份系统自动接管主系统的工作。通过突破冗余设备的故障诊断、故障系统隔离、切换控制的可靠性、切换过程的平稳性等关键技术，实现了发动机控制系统的“无扰切换”。

针对柴油机控制系统涉及的输入、输出信号数量多，类型复杂，既有开关量多输入输出，又有各种模拟信号的特点，在保证主、备系统工作的协调性、切换的平稳性，避免发生故障的控制系统对工作系统的干扰等问题，提出了基于复杂逻辑的系统状态识别方法。该方法的核心思想是主、备系统分别通过可编程逻辑器件对系统状态进行编码交换与识别处理，特征码由多位数字信号组成，有效避免系统故障可能导致的状态处理电路误动作的问题，同时对不同的故障类型采用不同的特征编码，提高了系统冗余处理的稳定性和可靠性。冗余逻辑电路具有IO隔离与处理器复位信号输出，结合IO接口电路与系统复位电路设计，工作系统可以在待机系统故障的情况下主动隔离、屏蔽故障系统的输出信号，并尝试复位故障系统。图4为冗余系统接口及控制逻辑示意图。

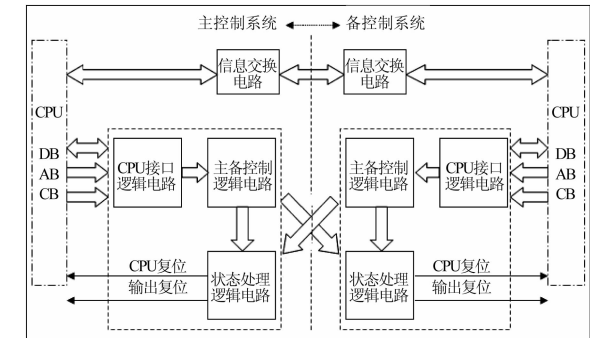


图4 冗余系统接口及控制逻辑

实际试验应用、试验证明：采用本项冗余技术实现的冗余式柴油机综合电控系统故障诊断准确、及时，主备系统切换控制稳定、可靠，切换过程柴油机转速波动 $\leq \pm 0.5\%$ ，波动持续时间 $<1\text{ s}$ ，详见图5。

(4) 执行器设计技术

执行器是柴油机控制系统的关键执行部件，要求具有功耗低、可靠性高、响应速度快、工作能力大、一致性好等特点，因此，执行器的特性直接影响整个柴油机电控系统的性能。

根据执行器的性能要求，对电磁和力矩电机执行器的基本原理、电磁场、电磁力与温度场－电磁

场相关性等进行了理论分析和多学科仿真计算研究，对电磁和有限转角直流力矩电机设计方法进行系统、规范化理论研究，建立了电磁与有限转角直流力矩电机性能匹配算法和参数化设计方法。并利用上述设计方法，设计、开发了系列化电磁执行器和有限转角直流力矩电机执行器(图6)，可以实现功率10 000 马力以下柴油机的电子控制。

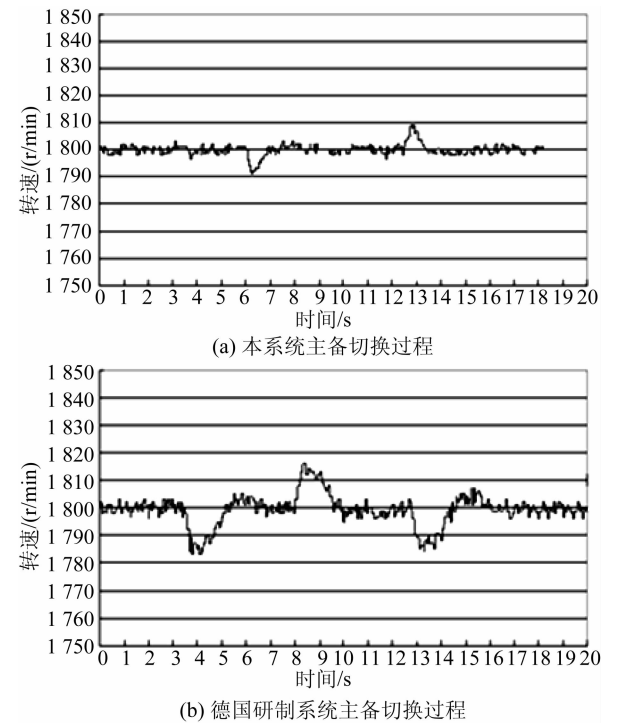


图5 冗余热备份系统切换过程转速波动情况



图6 系列化执行器

(5) 可靠性与工程化技术

要实现自主研制的柴油机综合电控系统投入实际应用，避免只能在试验室进行原理验证的局面，必需解决可靠性与工程化问题。

可靠性指标的保证既是个技术问题，更是一个组织管理问题。在设计阶段，对可能出现的故障、危害进行风险分析，并研究相应的改进设计措施，不断优化系统软件、硬件与结构设计。在柴油机综合电控系统的结构设计上，针对传统控制系统开发模式存在风险大、费用高和周期长等问题，采用现代“V”模式开发流程，建立控制系统从概念设计到试验验证的一体化仿真开发平台，满足现代柴油机控制系统高效、精确、快速的设计要求，可以最大限度减少样机系统试制次数，提高设计和开发效率。

在解决这些技术问题基础上，按照模块化、智能化和通用化的原则，对系统的功能进行合理分解，对于提高系统的工程化水平和可维性具有重要作用。另外，为保证柴油机综合电控系统的可靠性，根据各部分功能、工作条件与可靠性要求，通过采取关键部件冗余，以至控制器采用热备份等冗余技术，使柴油机综合电控系统的可靠性满足应用要求。

表 1 国产 ECS 系统与德国 ECS 系统对比

序号	内容	国产 ECS	德国 ECS	结论
1	油耗率/g/(kW·h)	208	211	经济性好
2	烟度/FSN	1.1	1.2	排放低
3	转速波动率	≤ ±0.2%	≤ ±0.3%	转速波动小
4	冗余切换平稳性	≤ ±0.5%	≤ ±1%	切换更平稳
5	瞬态调速率	≤ ±5%	≤ ±7%	性能更好
6	总线接口	冗余 CAN + RS422	RS422	技术更先进
7	集成“黑匣子”	有	无	功能更完善
8	转速恢复时间/s	<3	<3	性能相当

研制的柴油机电控系统还推广应用于民用船舶、出口船、铁路机车、工程机械等领域的柴油机控制。随着石油资源的日益枯竭和排放法规的日益严格，柴油机电控技术具有良好的应用前景。

4 电控单体泵系统研究情况

根据柴油机技术发展需求和电控喷油技术的发展趋势，哈尔滨工程工程大学通过率先开展船用电控单体泵系统技术的研究，突破了船用柴油机电控单体泵燃油喷射系统的数值仿真技术、关键部件研制与参数设计技术、控制系统开发及匹配标定技术。研制的电控单体泵燃油喷射系统已成功匹配 TBD234、TBD314 型 8 缸柴油机(图 8)，达到了

3 应用情况

研制的系列化柴油机电子控制系统已通过配机性能试验、可靠性耐久考核、电磁兼容性和环境适应性等试验(图 7)，并已应用在 16V396 系列柴油机(TE54 柴油机用 ECU2A、SE84 柴油机用 R082、TE94 柴油机用 ECS/E、SE84 柴油机用 ECS/F)、MWM604BL6 柴油 机、MWM20V620 柴油 机、16PA6 柴油机、MTU20V956TB92 柴油机。



图 7 系统配机试验与型式试验

对国产电控系统与国际先进控制系统(德国 MTU 公司的 ECS)进行了功能与性能的对比，表 1 为对比结果。结果表明：主要技术指标相当，国产电控系统在部分功能和性能上有所改进提高，在冗余切换平稳性、瞬态调速率指标上，国产电控系统明显优于德国系统。

Tier 2 排放法规的要求，并且电控单体泵燃油喷射系统已经通过油泵试验台的 1 000 h 可靠性试验。

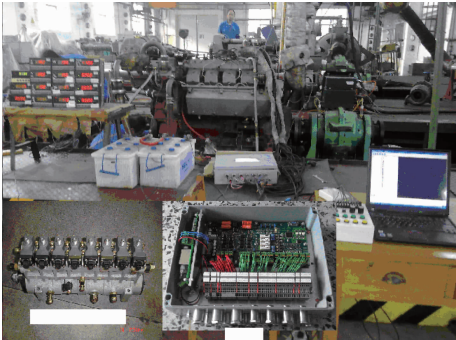


图 8 研制的电控单体泵系统匹配 TBD234 柴油机