

新型核电应急柴油发电机组调速控制器 开发与试验

龚 嫒, 王 园, 方泽立

(中船动力研究院有限公司, 上海 201206)

摘 要: 针对核电应急柴油发电机组开发一种新型调速控制器。在分析控制功能需求的基础上, 开展总体方案设计、硬件设计、软件开发及配机试验。为了验证调速控制器的功能及性能, 分别进行怠速启动试验、额速启动试验、在有速降模式下的稳态负荷试验、在无速降模式下的稳态负荷试验和在无速降模式下的快速变载试验。配机试验结果表明该调速控制器功能完善、性能良好, 具有一定的应用前景。

关键词: 核电; 发电机组; 调速控制器; 柴油机

中图分类号: TK424.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)01-0039-05

Development and Test of New Emergency Diesel Engine Generator Set Speed Governor for Nuclear Power Station

GONG Man, WANG Yuan, FANG Zeli

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: A new speed governor for emergency diesel generator set used in nuclear power station was developed. Based on the analysis of control function requirements, the overall scheme design, hardware design, software development and engine matching test were carried out. In order to verify the function and performance of the speed governor, the idle start test, rated speed start test, steady-state load test with speed drop mode, steady-state load test without speed drop mode were carried out respectively. The test results show that the speed governor has perfect functions and good performance, and has certain application prospect.

Key words: nuclear power; generator set; speed governor; diesel engine

0 引言

在国家政策的推动和引导之下, 我国的核电站发展迅速。截至 2020 年, 我国投入运营的核电站有 16 座, 全年发电量占全国发电总量的 4.94%。根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》, 至 2025 年, 我国核电运行装机容量将达到 7 000 万 kW^[1]。

核电应急柴油发电机组的作用是在核电站的厂用电源发生故障时, 提供应急电源, 确保安全稳定堆和防止关键设备损坏。应急柴油发电机的可靠性和可用性对于堆芯损坏频率具有重大的影响。2011 年的福岛核电事故已充分证明了应急柴油发电机组对核安全的重要性^[2-3]。调速控制器是核电应急柴油发电机组的核心控制部件, 是核安全的重要仪控设备^[4]。

1 开发背景

在我国，核电调速控制器长期以来依赖进口。中广核集团在役机组的机型、数量以及配备的调速器情况如表 1 所示。

表 1 在役机组情况

序号	机型	主机数量/台	调速器类型
1	PA、PC	42	E19600 控制器+Europa 执行器
2	UD45	16	Woodward 控制器+Woodward 执行器
3	MTU	16	ECS 调速器+MTU 执行器

可以看出，开发研制具有自主知识产权的核电调速控制器迫在眉睫。为此，基于核电柴油机组的常用型号及控制需求，采用数字化技术，开发一套新型调速控制器。该调速控制器功能完善、性能可靠，适用于目前在役的 PA、PC 及 UD45 柴油机。

2 总体方案设计

柴油机调速控制器的工作原理是接收外部转速设定指令，根据主机反馈的实际转速，进行处理和运算，输出控制信号，驱动执行器动作，从而控制发动机的油门实现 0~100% 的调节。调整控制器须提供柴油机应急、额速、怠速等 3 种启动模式，孤岛运行和速降运行两种运行模式。调速器在柴油发电机组孤岛运行模式下采用无差调节，在速降模式下采用有差调节。

目前在役的核电应急柴油机组 PA、PC 及 UD45 主要装配 Europa 电液执行器及 Woodward 电液执行器，控制信号分别为 0~1 A 和 0~200 mA。随着电力电子技术的发展，电动执行器的应用范围越来越广泛。为此，在满足以上控制需求的基础上，本方案又扩展了电动执行器的控制功能，驱动电流须达 5 A。另外，UD45 核电柴油机还须具备负荷分配的功能，即实现“二拖一”。

基于上述需求分析，新开发的调速控制器采用数字电路设计，通过芯片及软件代码实现控制算法。从安全角度出发，硬件采用冗余设计，在控制信号输出、转速采集、开关量输入输出等通道上均采用冗余通道设计。控制算法采用优化比例积分微分（proportional-integral-derivative，PID）控制，应用“转速大选”策略（在两台柴油机的转速信号中选择转速高者并传输），在转速闭环调节的基础上实现负荷分配功能。同时基于系统功率及应用场景，电动执行器驱动模块采用单独模

块设计，与调速控制器匹配使用。为便于系统标定与测试，开发了上位机软件。该软件与调速控制器、驱动模块及调速执行器共同构成柴油机调速系统。调速控制器设计原理如图 1 所示。

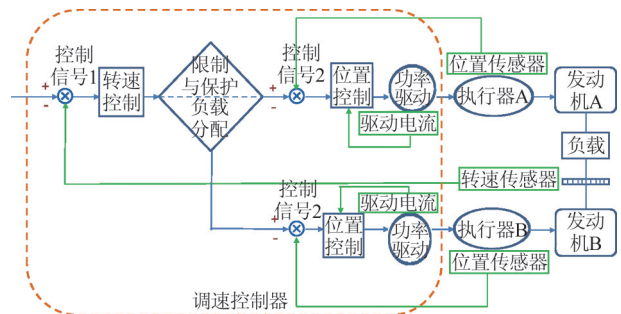


图 1 调速控制器设计原理

3 硬件设计

核电调速控制器安全等级为 1E 级，对硬件的安全功能提出了较高的要求。本项目中的硬件按照 RCC-E 1993、IEC 61000、GB/T 2423 等规范和标准设计。

主控芯片采用 TMS570 微处理器，该芯片适用于安全关键型应用，有灵活的实时控制外设及强大的通信接口。硬件电路系统包括开关量输入模块、频率输入模块、4~20 mA 模拟量输入模块、开关量输出模块、4~20 mA 输出模块、执行器驱动模块及 485 和 CAN 通信模块。硬件通道采用冗余设计，硬件电路模块为全隔离设计，且各模块供电电源也相互隔离，提高了调速控制器硬件的安全性。硬件电路系统框图如图 2 所示。

4 软件开发

国际原子能机构（International Atomic Energy Agency，IAEA）要求包括计算机软件在内的所有仪表和控制系统均应依据其实施功能的安全重要性进行分类。参照标准 IEC 60880: 2006 及 IEC 61226: 2009，按安全重要性对核电厂安全重要仪表和控制系统的功能进行分类，包括 A 类、B 类和 C 类。A 类安全级别最高，该类功能失效会直接诱发事故，引发不可接受的后果，故此类功能要求具备高可靠性。据此，调速控制器软件按照 A 类标准设计，采用基于 V 模型的设计方法。为实现复杂系统产品的虚拟综合开发与物理制造、反复试验的有机结合^[5]，图形建模、快速原型和代码自动生成等开发技术贯穿整个设计流程，包括系统设计和仿真、自动代码生成、连续测试与验证等。V 型开发流程见图 3 所示。

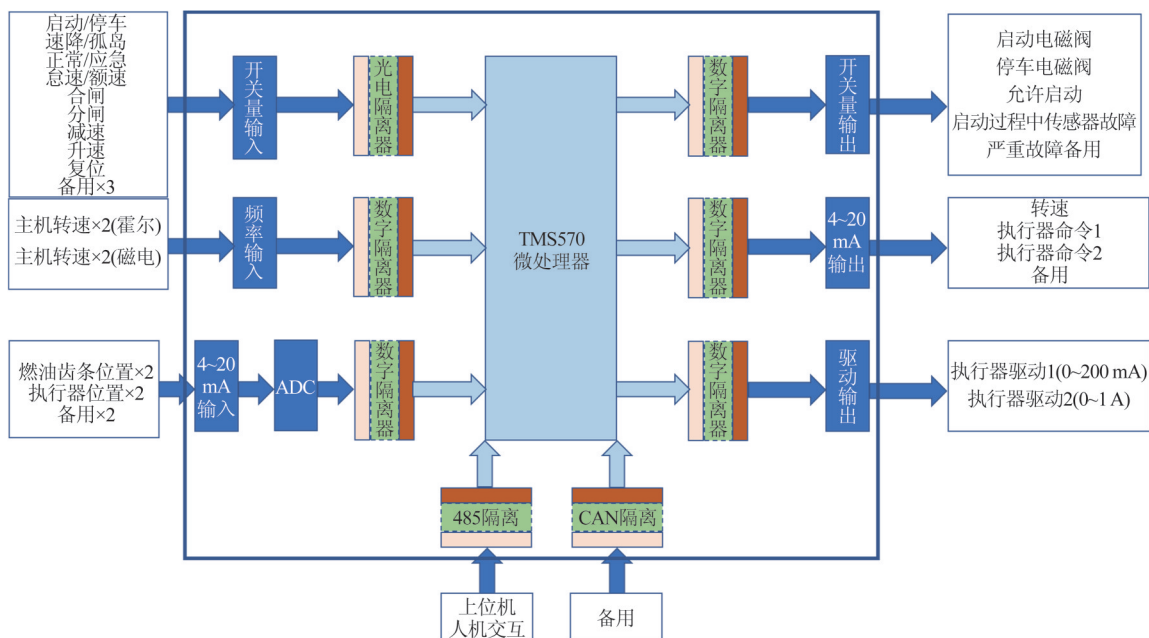


图2 硬件电路系统框图

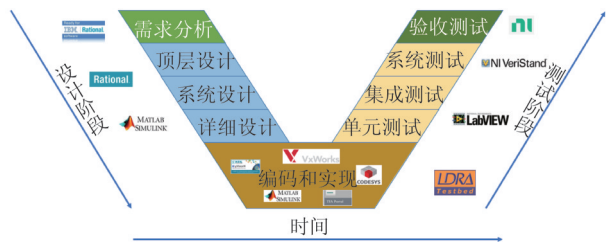


图3 V型开发流程

根据调速控制器的设计需求，软件功能主要包括：应急/正常、怠速/额定命令处理；发动机状态判断及处理；升速、降速命令处理；合闸/分闸命令处理；齿条位置控制；转速输入读取及处理；开关量输入读取及处理；模拟量输入读取及处理；开关量输出计算及处理；模拟量输出计算及处理。

应用层软件主要采用 Simulink 来搭建模型，Simulink 以信号流在模块间传输的方式建模，便于搭建控制模型；具有测试、控制器设计等成熟的工具包，方便设计和开发。模型测试完成后，应用 Embedded Coder 软件自动生成 C 代码。Embedded Coder 可生成用于大规模生产的嵌入式处理器的可读、紧凑和快速的 C 和 C++ 代码，可精确控制生成的函数、文件和数据，提高代码效率，并促进与遗留代码、数据类型和校准参数的集成^[6-9]。代码生成后，利用 LDRA Testbed 软件测试工具进行静态测试、单元测试、集成测试及确认测试。

上位机主要用于对调速控制器进行实时参数显示、重要参数曲线趋势监测、参数配置、数据保存及回放、报警列表显示等。上位机软件采用

组态软件来实现，通过 485 Modbus 协议与调速控制器进行数据通信，实现参数监测及参数配置。

5 配机试验

试验用柴油机为某型 16 缸中速柴油机，满载功率为 4 720 kW，怠速为 400 r/min，额定为 1 000 r/min。本次配机试验匹配的执行器为我公司自主研发的电动执行器 EA-E01N，输出转矩 $\geq 28 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。为了验证调速控制器的功能及性能，分别进行怠速启动试验、额定启动试验、在有速降模式下的稳态负荷试验、在无速降模式下的稳态负荷试验、在无速降模式下的快速变载试验等。图 4 为试车台集控室调速控制器安装图。



图4 调速控制器现场安装图

5.1 怠速启动试验

怠速启动试验可验证调速控制器怠速启动控制能力。将调速器设定在怠速模式下，升降速率设定为 5 r/s，启动机组，并且在柴油机启动完成

后进行升降速操作。先通过升速指令将柴油机缓慢升速至可调范围内的最大转速1 000 r/min，再通过降速指令将柴油机缓慢降速至怠速，然后停车。要求柴油机能够稳定在400 r/min，转速波动率≤0.5%，在降速过程中稳至400 r/min即不再降速。试验过程中的相关数据如表2所示，试验结果满足试验要求。

表2 柴油机怠速启动试验记录

工况	转速 设定值/ (r·min ⁻¹)	初始速率/ (r·min ⁻¹)	末速/ (r·min ⁻¹)	用时/s	是否 达到 设定值	升降速率 误差是否 小于1%
稳定怠速	400	—	—	—	是	—
升速	1 000	400	1 000	120.01	是	是
降速	400	1 000	399	120.32	是	是

注：“—”代表无此项。

5.2 额速启动试验

额速启动试验可验证调速控制器额速快速启动的能力。将调速器设定在额速模式下，慢速启动模式测试时启动升速设置为30 s，快速启动模式时启动升速设置为10 s。启动柴油机，启动完成后，运行1 min，停车。要求柴油机能够顺利启动并且直接升速至额定转速1 000 r/min，转速波动率≤0.5%，系统无报警。记录柴油机启动后的稳定转速，记录柴油机启动时的启动空气压力，记录柴油机从接到启动指令开始直至升速至额定转速的时间。试验数据如表3所示，试验结果满足试验要求。

表3 柴油机额速启动试验记录

项目	慢速启动模式（30 s）		快速启动模式（10 s）	
	参数	是否合格	参数	是否合格
启动稳定转速/ (r·min ⁻¹)	1 001	合格	1 000	合格
启动空气压力/ MPa	2.9	合格	2.9	合格
升至额速时间/s	30.70	合格	9.86	合格

5.3 在有速降模式下的稳态负荷试验

在有速降模式下的稳态负荷试验可验证调速控制器在有速降模式下的稳态带载情况。将调速控制器设定在有速降模式下，速降率设置为2%，启动柴油机并且使柴油机稳定在额定转速，然后在15%、25%、50%、75%负荷下分别持续运行5 min。记录柴油机转速，合格标准见表4。

表4 在各负荷下的合格转速

序号	负荷/%	合格转速/ (r·min ⁻¹)	备注
1	15	997±2.5	±2.5 r/min是考虑到柴油机0.5%的正常转速波动范围对测试记录的影响
2	25	995±2.5	
3	50	990±2.5	
4	75	985±2.5	

试验过程中的相关数据如表5所示，试验结果满足试验要求。

表5 在有速降模式下的稳态负荷试验记录

项目	参数			
负荷/%	15	25	50	75
功率/kW	708	1 180	2 360	3 540
设定速降值/%	2			
设定转速/ (r·min ⁻¹)	1 000	1 000	1 000	1 000
实际转速/ (r·min ⁻¹)	995	995	988	983
速降误差/%	2	0	2	2
水力测功器读数/ (kN·m)	6 795.38	11 325.63	22 811.74	34 391.66
是否合格	合格			

5.4 在无速降模式下的稳态负荷试验

在无速降模式下的稳态负荷试验可验证调速控制器在无速降模式下的稳态带载情况。将调速器设定在无速降模式，启动柴油机并使柴油机稳定在额定转速，然后在15%、25%、50%、75%负荷下分别持续运行5 min，要求转速波动率≤0.5%，且加载后不应出现转速降。相关数据如表6所示，试验结果满足试验要求。

表6 在无速降模式下的稳态负荷试验记录

项目	参数				
负荷/%	15	25	50	75	100
功率/kW	708	1 180	2 360	3 540	4 720
设定转速/ (r·min ⁻¹)	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
实际转速/ (r·min ⁻¹)	998	999	999	999	999
速降/%	0				
水力测功器读数/ (kN·m)	6 774.95	11 280.28	22 560.56	33 840.84	45 121.12
是否合格	合格				

5.5 在无速降模式下的快速变载试验

在无速降模式下的快速变载试验可检查调速控制器在负载快速变化条件下的响应情况。在无速降模式下启动柴油机，将柴油机调整至空载额定转速状态，在水力测功器允许的范围内将柴油

机快速加载至 50% 负荷，待转速稳定后，持续运行 5 min，再在水力测功器允许的范围内快速卸载至最小负荷。要求在加载过程中柴油机转速不低于 950 r/min，在减载过程中柴油机不会发生超速（瞬态调速率 $\leq 7\%$ ）。相关数据如表 7 所示，试验结果满足试验要求。

表 7 在无速降模式下的快速变载试验记录

项目	测试值/ ($r \cdot \min^{-1}$)	合格判据	是否合格
稳定转速	998	> 950	是
最高转速	1 028	在减载过程中柴油机未发生超速	是

6 结论

(1) 采用基于 TMS570 微处理器全隔离的硬件电路设计方法可以满足核电调速控制器硬件的功能要求，并提高运行的安全稳定性。

(2) 基于 V 型设计方法可以有效提高调速控制器的软件开发效率、减少开发时间、节约开发成本。

(3) 所设计的调速控制器功能完善、性能良好，能够实现在役 PA、PC 及 UD45 机组的控制要求，具有一定的市场应用前景。

参考文献

- [1] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R/OL]. (2021-03-13) [2021-07-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 陈耀东, 周拥辉, 石俊英, 等. 福岛核电厂 3 号机组严重事故模拟分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (增刊 1): 283-289.
- [3] 藤成俊夫. 福岛第一核电站堆芯裸露事故中的燃料行为分析[J]. 国外核动力, 2011 (4): 23-28.
- [4] 季同盛. 核电应急柴油发电机组抗震分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
- [5] 张新, 李彪. 基于 V 型串联混合动力客车整车控制器的开发[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57 (9): 106-109.
- [6] 陈经纬, 李霞, 孙庆乐. 基于 Simulink 的整车控制器软件系统开发[J]. 车辆与动力技术, 2021 (2): 33-38.
- [7] 杨雪春. 基于 Simulink 的柴油机可变涡流控制系统仿真建模研究[J]. 通化师范学院学报, 2021, 42 (6): 10-17.
- [8] 王中鲜, 赵魁, 徐建东. MATLAB 建模与仿真应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [9] 张德丰. MATLAB Simulink 建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 55-61.
- [6] 李孟孟, 侯献军, 刘博. 电控喷油器参数对喷油规律的影响[J]. 北京汽车, 2016 (4): 1-3, 37.
- [7] 欧大生, 张静秋, 欧阳光耀, 等. 高压共轨电控喷油器偶件间隙设计及试验研究[J]. 内燃机工程, 2008, 29 (4): 11-15.
- [8] 申通. 煤油泵轴尾机械密封副端面特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] 谢露, 郑安文, 姜烽, 等. 独立润滑喷油器针阀偶件润滑与泄漏特性研究[J]. 机床与液压, 2013, 41 (11): 23-27.
- [10] 郭大庆. 高压共轨喷油器针阀偶件密封特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [11] 刘胜吉, 王建, 高宗英. 柴油机针阀偶件高压泄漏量的试验与计算分析[J]. 农机化研究, 2006 (12): 218-219, 222.
- [12] 贺玉海, 蒋乾. 船用低速柴油机电控喷油器多参数优化匹配[J]. 内燃机工程, 2020, 41 (6): 78-85, 94.
- [13] 吴帅, 王长鹏, 苏艳, 等. 18CrNi4WA 钢渗碳针阀体开裂失效分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15 (7): 75-79.
- [14] 袁长军, 刘宗昌. 针阀体组织及使用寿命的研究[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36 (2): 26-30.
- [15] 陈云霞, 赵安, 康锐. 非电产品寿命分析和试验方法研究[C]//中国运筹学会可靠性分会第九届可靠性学术会议论文集. 长沙: 中国运筹学会可靠性分会, 2013: 205-211.
- [16] 金江善, 方文超. 船用柴油机电控喷油器高速电磁阀耐久性研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (9): 91-95.

(上接第 38 页)