

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.001

某武器系统燃涡控制组合的国产化研究

姜广顺, 冯云, 曹佩武, 余硕, 吴千秋
(空军二十三厂研究所, 北京 102200)

摘要: 为实现燃涡控制组合的国产化功能替换, 提出一种基于逆向工程方法和数字信号处理器(digital signal processor, DSP)技术的新方法。采用该方法, 通过破译显示通讯协议, 对控制组合功能和 workflow 进行反设计, 并从硬件和软件 2 个方面进行验证。目前, 国产化控制组合已用于工厂装备修理和部队装备的维护保障, 并能满足引进装备的正常使用要求, 对不同机组的兼容性均优于国外采购的同类备件。

关键词: 燃气涡轮发电机组; 控制组合; 国产化

中图分类号: TJ05 **文献标志码:** A

Research on Localization of Control Assembly in Certain Type Gas Turbo-Generator Set

Jiang Guangshun, Feng Yun, Cao Peiwu, Yu Shuo, Wu Qianqiu
(Institute, No. 23 Factory of PLA Air Force, Beijing 102200, China)

Abstract: In order to realize the localization function replacement of control assembly used in the gas turbo-generator set of a certain imported weapon system, a new method is proposed based on reverse engineering method and technology of digital signal processor (DSP). This method is used to uncover the control assembly function and working procedure through cracking display and communication protocol. The result is verified from the aspect of hardware and software. At present, the localized control assembly has been used in a factory and in the army to guarantee equipment maintenance and support, and can meet the gas turbo-generator set's normal requirement. It surpasses purchased assembly from abroad in systems compatibility.

Key words: gas turbo-generator set; control assembly; localization

0 引言

某引进型号武器系统主战装备的自主供电设备主要采用燃气涡轮发电机组, 该发电机组体积小、重量轻, 可独立装配在各主战装备载车上, 是保障武器系统机动作战的重要装备之一^[1]。随着武器装备使用年限的增长, 作为燃气涡轮发电机组核心设备的控制组合(以下简称“燃涡控制组合”)存在故障率增高, 备件消耗量大, 对外采购困难等问题。为了保证引进装备的正常使用要求, 充分发挥其作战效能, 必须开展备件国产化研制。

由于燃涡控制组合信号种类多, 工作原理以及时序关系复杂, 特别是电路中采用了部分掩模 PLD 芯片和 ASIC 专用器件, 这些器件在外方芯片生产厂家完成功能烧写后出厂, 目前尚未掌握其内部结构, 更无采购渠道。显然, 采用“一一替换”的研仿模式是行不通的, 必须对燃涡控制组合在不同工作状态下的输入、输出信息进行系统的测试、分析和处理, 尽可能得到其完整、准确的控制时序和 workflow 后, 对其进行功能替代。因此, 笔者采用逆向工程方法和数字信号处理器(digital signal

processor, DSP)技术, 实现燃涡控制组合的国产化。

1 原燃涡控制组合

燃涡控制组合由处理器板、模拟信号采集板、开关量输入板、开关量输出板、冗余备份板和电源板组成, 是一个集数据采集、控制和显示输出为一体, 具有复杂逻辑功能的处理控制单元。该组合产生燃气涡轮发电机起动、冷起动、假起动的循环图表^[2]; 处理采集到的温度、转子转速信号, 进而控制燃烧室供油量, 调节发动机转子转速; 在供电设备处于危险状态时, 输出故障信号。

2 原燃涡控制组合的功能分析和反设计

2.1 显示通讯协议的破译

通过与显控台连接, 实现对燃涡控制组合控制指令的输入, 利用逻辑分析仪测试控制组合的输出码, 结合显控台的显示信息, 反复进行测试、分析和对比, 破解了控制组合显示通讯的编码规则, 信号时序关系如图 1。输出显示信号由 1 路同步时钟信号和 4 路串-并行数据信号组成, 数据传输频率为 50 Hz, 包括 17 组 4 位数据信息, 分别用来显

收稿日期: 2011-10-03; 修回日期: 2011-11-02

作者简介: 姜广顺(1967—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事装备维修和保障技术研究。

示排气口温度、发动机转速百分比、起动次数、故障信息等。

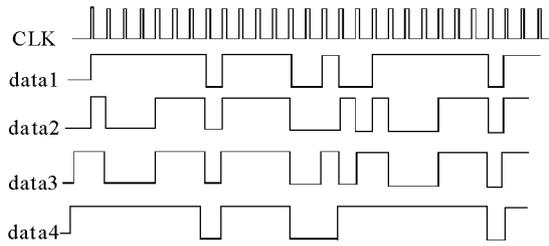


图 1 信号时序关系图

2.2 燃气涡轮发电机组起动特性研究

燃气涡轮发电机组的起动和工作流程控制，主要通过控制组合实现，而且起动时间、起动温度、工作温度、工作过程中转速等过程控制参数必须满足规定的指标要求。一个机组在不同状态下的起动和工作控制曲线均不相同，而且由于引进装备累计

工作时长短不一，不同机组的起动曲线也不尽相同，因此，燃气涡轮发电机组的起动和工作控制算法是整个开发过程的难点之一。解决办法如下：

1) 归纳和分析起动数据信息，总结燃涡控制组合的控制规律。

利用研发的测试仿真系统，采集不同机组不同条件下的起动曲线，总结出燃气涡轮发电机组起动的一般性控制规律。这一规律只是对机组起动控制过程的概略性描述，还不能直接用于机组的起动控制，需要采用其它方法对算法进行完善和优化，起动曲线见图 2。其中，从 T 时刻控制组合接收“起动”指令开始到起动成功不能超过 50 s；起动成功后转子转速达 100%，不能超过 102%；起动过程中排气口温度不能超过 750 °C，起动成功后排气口温度不能超过 680 °C；燃油量由电压信号控制，电压信号为负使燃油量减小，信号为正使燃油量增加。

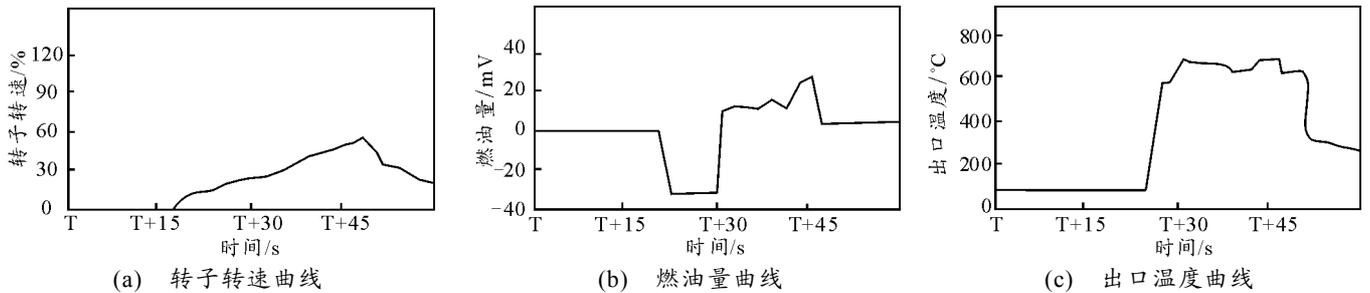


图 2 控制组合起动曲线

2) 建立仿真模型，对控制算法进行推理和验证燃气涡轮发电机组工作的仿真模型见图 3。

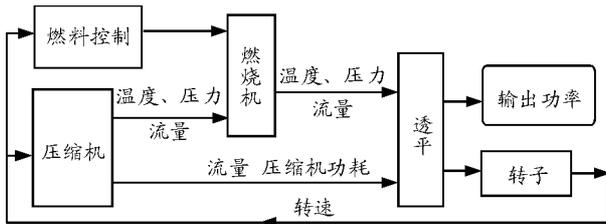


图 3 燃气涡轮发电机组仿真模型

燃气涡轮发电机组的控制过程主要是在特定的时间要求内，通过改变燃料量来控制转子转速，同时，对出口温度有所限定。出口温度受燃料量和转速的影响，燃料量通过出口温度和转速的反馈进行相应调节。

燃气涡轮发电机组正常运行时，通过改变燃烧室的供油量来控制透平出口温度 TB 不超过其最大设定值 TB_{max} 。当 $TB < TB_{max}$ 时，燃料量只受转速控制系统控制；而当 $TB = TB_{max}$ 时，燃料量只受最高温度限制系统控制。转速控制系统和最高温度限制系

统通过小值选择器决定合适的燃料消耗量，即比较 2 个系统所要求的燃料量取较小值，使得机组运行在安全范围之内。因此，对于燃气涡轮发电机组来说，转速和透平出口温度采用联合控制方式实现，供油量控制过程如图 4。其中， n_g 为设定转速， TB_g 为设计工况时的透平出口温度。

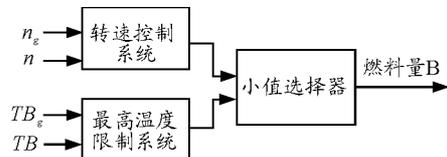


图 4 供油量控制过程图

3 国产化燃涡控制组合硬件设计

3.1 国产化燃涡控制组合硬件组成

国产化燃涡控制组合主要包括主处理器电路板，开关量输入/输出板、备份处理器电路板以及 2 块电源板。其中主电路板由 DSP 处理电路、模拟采集输入电路、存储电路和接口电路等组成。国产化燃涡控制组合硬件组成如图 5。

处理器采用 TI 公司专门为工业应用而设计的 TMS320F2812 型 DSP 处理器, 该 DSP 采用多组总线技术实现并行运行机制, 指令周期缩短到 6.67 ns, CPU 的最高频率为 150 MHz, 提高了控制器的实时控制能力; 采用高性能静态 CMOS 技术, 内核电压

为 1.8 V, 减小了控制器的功耗; 片内有高达 128 K 的 Flash 程序存储器、看门狗定时器模块、16 路 12 位 A/D 转换器 (ADC 模块) 和串行通信接口 (SCI) 模块。该芯片的采用不仅简化了硬件电路, 而且提高了系统的运算速度、控制速度和可靠性^[3]。

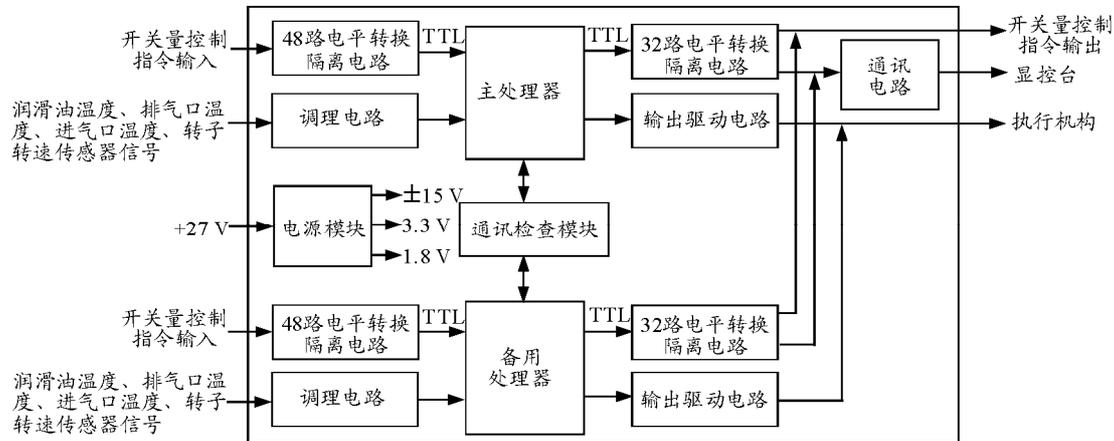


图5 国产化燃涡控制组合硬件组成

模拟量输入输出通道包括 2 个热敏电阻通道 (测量润滑油和进气口温度)、1 个热电偶通道 (测量排气口温度), 它们与 CPU 在同一个电路板上, 无需隔离。Π-119 型热敏电阻信号的采集方法是向电阻施加 3 mA 左右的恒流源, 热敏电阻的阻值变化范围在 30~150 Ω 之间, 采集电阻上的变化电压, 将电压进行放大和偏置送入 DSP 的片内 A/D 转换器。由于测量的是油温和气温, 对精度的要求不高。T-38-3Π 型热电偶信号的测量方法是将毫伏信号放大送入 DSP 的片内 A/D 转换器, 通过片内的转换器, 将模拟电压信号转换为数字信号, 再经过计算得到出口温度。为确保数据的准确, 采取软件零点修正和增益修正措施。

发电机转速脉冲通过发电机转速传感器输出。脉冲频率与发电机转速成正比, 当转速达到 100% 时, 脉冲频率为 4 000 Hz。转速脉冲输入通道的处理方法是转速脉冲信号直接进入比较器, 通过整形, 送入 DSP 计数通道, 计算出频率, 再通过一定的算法得出转速。由于该信号与 CPU 在同一个电路板上, 不需要进行隔离处理。

开关量输入/输出板, 包括 48 路光隔离开关量输入电路与 32 路光隔离开关量输出电路, 从抗干扰的角度考虑, 对输入和输出的开关量信号进行了光电隔离, 光电耦合器采用器件 6N140。

电源板采用两组隔离的电源模块, 为设备提供双路可靠、稳定的直流 +15 V 和 -15 V 电压。将 +15 V 电压降为 3.3 V 和 1.8 V 供 DSP 和 I/O 电路使用,

可独立拆卸更换。

3.2 硬件设计中解决的问题

1) 对原燃涡控制组合不同批次产品的兼容性设计

在国产化燃涡控制组合试样与装备对接试验时发现, 引进装备中不同批次的燃涡控制组合, 负载接点信号、离合信号、起动电压检测信号存在差异, 同一种控制组合并不能在 2 种机组上都正常工作, 存在不兼容问题。例如, 起动电压检测信号和离合信号在某一批次的装备上使用的是开关量信号, 而在另一批装备上使用的却是模拟电压信号, 同一种采集电路无法对 2 种情况做出处理。为此, 在国产化燃涡控制组合中采用 2 套采集电路对上述信号进行处理, 并对软件部分进行了适应性改进, 克服了引进装备中燃涡控制组合兼容性方面存在的问题。

2) 冗余热备份功能设计

为提高工作的安全性和可靠性, 原燃涡控制组合通过一套复杂的电路设计, 具有冗余备份功能, 但备份功能只能按工序起动燃气涡轮发电机组, 且控制程序按时间程序规定, 不参考转子转速, 不能输出显示转速的信息, 故只能在机组维修过程中使用, 不能代替主通道执行训练和战备操作。国产化燃涡控制组合采用双机热备份机制, 提供一套完整的备份系统, 紧急情况下, 替代主通道完成燃涡控制组合的所有功能, 升级了原控制组合的冗余备份功能。

4 国产化燃涡控制组合软件设计

软件设计是国产化燃涡控制组合研制的重要组成部分，组合的性能在很大程度上取决于软件的设计质量。主控软件的开发和调试在 TI 公司 DSP 集成开发环境 CCSC2000 下进行，采用 Visual C++ 进行整个控制软件的设计开发。

燃气涡轮发电机组的起动是一个复杂的动态过程，燃涡控制组合各工作状态的信号时序是按照时间和发动机转子转速参数 2 个标准进行设置，而转子转速、排气口温度、控制燃油调节器等的模拟信号都是动态的，且互相影响。燃涡控制组合实时采集这些信号后进行软件处理分析，发出各控制指令，实时校正。因此，软件处理也是一个动态控制过程，需要预先编入燃气涡轮发电机组最佳工作状态程序算法，根据实际机组的工作状态实时进行负反馈调整。燃涡控制组合的处理器软件部分采用 PID 控制方法，以燃涡机组排气口温度和转子转速作为 PID 控制系统的因变量，油门输出作为自变量，根据动态特性变化及时调整比例系数和微、积分系数以达到控制油门喷油量的目的。

燃气涡轮发电机组起动过程算法的数学描述为：

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (1)$$

传递函数为：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (2)$$

式中： $e(t)$ 是与排气口温度和转子转速有关的输入函数； $u(t)$ 为控制油门变化量的输出函数； K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容，根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。燃涡控制组合控制软件能够根据排气口温度不同、转子转速的不同，自动进行参数整定，以达到控制燃涡起动和工作的目的。参数“智能”整定算法依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数，然后通过工程实际进行调整和修改，最后得到符合燃涡起动的参数整定值。

软件开发遵循自顶向下的设计思想，采用模块化方式，特定的模块完成特定的功能^[4]。控制组合的功能通过在主程序中对其它子程序的调用来完成。主程序流程图如图 6，控制软件的功能结构如图 7。

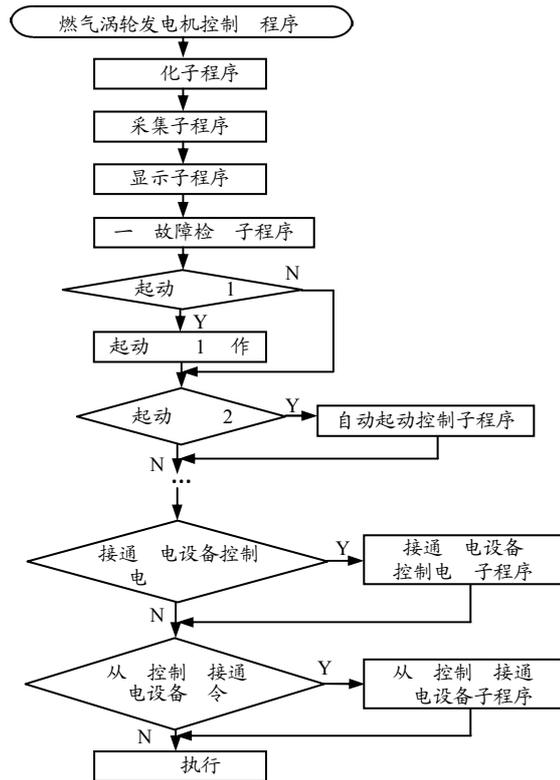


图 6 主程序流程图

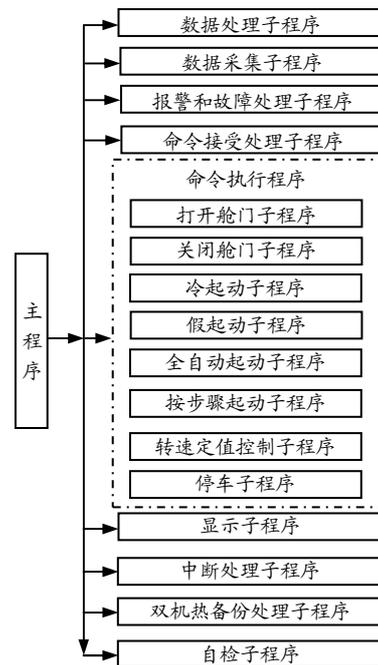


图 7 控制软件的功能结构

5 结束语

目前，研制的国产化燃涡控制组合已在工厂装备修理及部队装备维护保障中得到应用检验，结果表明：该组合能满足引进装备的正常使用要求，且对不同机组的兼容性均优于国外采购的同类备件。

(下转第 14 页)