

基于 NI cRIO 的柴油机转速控制的半实物仿真

贾 军, 梁述海

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了开展柴油机信号的监测研究和开发柴油机的控制算法, 选用与柴油机数学模型类似的直流电动机作为控制对象, 构建了一个以 NI cRIO 为核心监控装置的柴油机半实物仿真试验平台。初步运用 PID 控制算法, 在 3 种 LabVIEW 编程环境中进行了仿真测试, 并给出了在实时响应最高的现场可编程门阵列(FPGA)环境下编写的监控程序。测试结果显示, 柴油机仿真对象直流电动机的转速控制实时性好、精确度高, 这为开展柴油机实物的控制研究奠定了良好的基础。

关键词: 半实物仿真; 柴油机; 直流电动机; cRIO; PID; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP392; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)11-1332-04

Semi-physical simulation of speed control for diesel engine based on NI cRIO

JIA Jun, LIANG Shu-hai

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at surveillancing diesel engine and developing control algorithm for diesel engine, a DC motor was chosen as controlled object, owing to a similar mathematical model with diesel engine. Centering on NI cRIOs, a semi-physical simulation platform for diesel engine was built. PID control algorithm was initially adopted, and the simulation was implemented in three different LabVIEW environments. The monitor program was given under the application environment named field programmable gate array (FPGA) which costs the shortest responding time among the three environments. According to these tests, speed control of DC motor which functions as the simulation object for diesel engine is timely and accurate, and the result establishes a good foundation for further research on the control of diesel engine.

Key words: semi-physical simulation; diesel engine; DC motor; cRIO; PID; field programmable gate array (FPGA)

0 引 言

现代船舶中最常用的是柴油机动力装置, 其在动力性和经济性方面具有独特的优势, 因此, 充分运用计算机和网络技术, 开展对柴油机的监控技术研究有着极其重要的意义。柴油机转速的闭环控制算法是柴油机监控技术的核心, 它的开发过程主要通过 3 种途径: ①建立柴油机和控制器的数学模型, 利用计算机仿真平台进行全数字仿真; ②将监控装置连接柴油机, 直接开发柴油机控制程序; ③选用或构造类似柴油机数学模型的物理装置与监控装置组成仿真系统,

进行半实物仿真。

开发过程的 3 种途径具有各自的优缺点, 适用于开发研究的不同阶段。直接对柴油机进行控制, 费用高、风险大, 适合在仿真和测试工作完成后运用; 全数字仿真经济实惠, 广泛用于初步研究中, 近年来, 神经网络、遗传算法等智能控制理论均在柴油机控制中实现仿真, 但是仿真应用到实际中常会引发一系列的问题^[1-2]; 半实物仿真则综合前两种途径的优势, 高效、风险小、经济性好, 而且将研究成果运用到柴油机监控中可达到事半功倍的效果^[3]。

本研究选用与柴油机数学模型类似的直流电动

机作为被控对象,采用以 cRIO 为核心的 NI 硬件监控装置,构建柴油机转速闭环控制的半实物仿真试验平台,初步运用 PID 控制策略对直流电动机进行控制,用于柴油机的信号监测和控制算法的研究与开发。

1 模型的比较

船舶柴油机及其调速系统是典型的复杂系统,难以用合适的数学模型来准确表达。柴油机转速控制系统如图 1 所示。目前,常采用达朗贝尔原理在某一平衡点的柴油机模型,通过线性化方式进行简化。考虑的因素不同,可以得到不同的简化模型。这类模型通常比较简单、精度低,但计算速度快,一般只能在要求不高的场合使用,适合对柴油机转速控制作初步的研究^[4]。

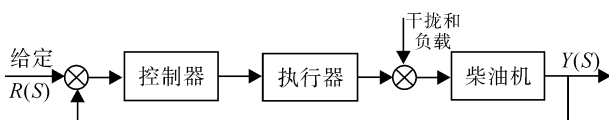


图 1 柴油机转速控制系统框图

1.1 柴油机模型

考虑以柴油机齿杆位移为输入,柴油机转速为输出的单输入、单输出系统,同时考虑延迟并作线性化处理,可将柴油机近似为一个一阶惯性加延迟环节。

非增压柴油机的运动方程可描述为:

$$T_a \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \eta(t - \tau) - \lambda(t) \quad (1)$$

式中: T_a —柴油机时间常数, $\omega(t)$ —柴油机曲轴的转速, $\eta(t)$ —控制供油量的齿条位移, $\lambda(t)$ —柴油机负载和干扰引起的扰动, τ —齿条位移的纯滞后时间。

若设扰动 $\lambda(t) = 0$, 对式(1)进行拉普拉斯变换, 可得柴油机转速 $\Omega(s)$ 与齿条位移 $H(s)$ 的传递函数, 即由一个一阶惯性加延迟环节构成的柴油机简化模型。如下:

$$\frac{\Omega(s)}{H(s)} = \frac{e^{-\tau s}}{T_a s + 1} \quad (2)$$

对于增压柴油机, 增压器对整个装置的动态特性有很大影响, 可像 Fowler 一样增加对应的模型。由于实际系统是非线性的, 线性化模型的参数与工况有很大关系, 当研究大幅变动工况时, 可以采用分段或分区线性化模型, 近似为此模型^[5]。

1.2 直流电动机模型

直流电动机模型通常简化为:

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_1 u_a(t) - K_2 M_c(t) \quad (3)$$

式中: T_m —电动机机电时间常数, $\omega(t)$ —电动机转速, $u_a(t)$ —电动机电枢电压, $M_c(t)$ —折合到电动机轴

上的总负载转矩, K_1 、 K_2 —电动机相关系数。

在式(3)中, 若令 $M_c(t) = 0$, 通过拉普拉斯变换, 可得电动机转速 $\Omega(s)$ 与电枢电压 $U_a(s)$ 的传递函数, 即由一个一阶惯性环节构成的直流电动机简化模型^[6]:

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_1}{T_m s + 1} \quad (4)$$

比较式(2)和式(4)可知, 柴油机和直流电动机转速模型均可简化为一阶系统模型。通常柴油机齿条位移的纯滞后时间 τ 值较小, 若忽略 τ , 直流电动机与柴油机模型相似, 而且可以通过更换直流电动机附加的同轴飞轮质量块来改变电动机的转动惯量, 用来模拟不同类型的柴油机。

2 硬件构成

半实物仿真平台采用 NI 公司 PXIe 1062Q 机箱、PXIe 8108 控制器作为开发管理平台, 采用 cRIO-9114 机箱、cRIO-9024 控制器及 AO 9264 模块和 AI 9205 模块等组成现场监控装置。该监控装置适应恶劣环境, 抗冲击性能好, 能够应用于实验室以及机舱环境的实时控制、各种信号的同步采集及处理等。PXIe 1062Q 为提供每插槽 1 GB/s 的专用带宽和超过 3 GB/s 的系统带宽的 8 槽机箱; PXIe 8108 控制器配备 2.53 GHz 双核 T9400 处理器、800 MHz DDR2 内存和 1 GB/s 的系统带宽, 可显著缩短 PXI Express 和基于 CompactPCI Express 自动化系统的测试时间; cRIO-9114 是一款八槽嵌入式机箱, 采用 Xilinx Virtex-5 可重新配置的 I/O(RIO)FPGA LX110 核心, 能高效执行特定任务, 同步执行并行任务, 具有高的可靠性; cRIO-9024 控制器为 800 MHz Freescale 工业实时处理器, 能可靠执行 LabVIEW Real-Time 应用程序, 实现实时控制、数据分析、记录和通信等功能; AO 9264 模块和 AI 9205 模块作为 cRIO 上可热插拔的 I/O 模块, 具有内置式信号调理功能, 分别提供 16 路模拟输出和 32 路模拟输入通道, 每通道均可直接与传感器和激励器相连。

本研究设计的直流电动机转速监控试验平台硬件结构图如图 2 所示, PXIe 1062Q 机箱内配置 PXIe 8108 控制器、外接显示器, 作为整个控制程序的开发管理平台, 在监控应用软件中承担初始参数的设置、状态参数及图表的显示、数据纪录和实验过程的管理; 通过以太网线连接 cRIO-9114 机箱, 该机箱配置

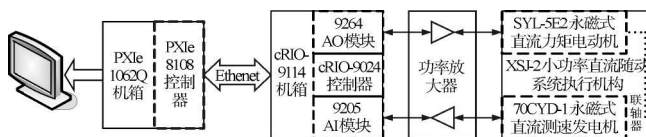


图 2 直流电动机转速监控试验平台硬件结构图

cRIO-9024 控制器, 插有 9264 AO 模块和 9205 AI 模块, 实现控制信号输出和测量信号的采集; 被控对象选用清华大学的小功率 SYL-5E2 型永磁式直流力矩电动机, 通过联轴器与 70CYD-1 型永磁式直流测速发电机相连; 采用学校自制的功率放大器, 将 AO 模块输出的控制信号功率放大后驱动电动机, 并对测速发电机的转速信号进行处理。

3 控制的实现

3.1 控制算法简介

船舶柴油机的控制算法, 根据船舶航行的各种工况和柴油机所承担的负载特性进行设计和选择。本研究选用自动控制领域最常用的 PID 控制, 利用 LabVIEW 编程实现算法, 其算法如下:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (5)$$

式中: $u(t)$ —输出量, $e(t)$ —偏差量, K_p —比例系数, T_i —积分时间常数, T_d —微分时间常数。

在 PID 调节规律中, K_p 起主要作用, T_i 起消除静差的辅助作用, 而 T_d 则起抑制偏差变化的辅助作用。

3.2 LabVIEW 软件介绍和程序设计

LabVIEW 采用图形化编程方式, 提供丰富的界面控件和驱动程序, 是一个功能强大的应用程序开发及调试环境。根据柴油机半实物仿真试验平台的硬件配置, 可以在 3 种应用环境下进行 LabVIEW 编程设计: 运行在 PXI 机箱的主机 VI、运行在 cRIO 实时控制器的 Real-Time VI 和 FPGA I/O 端口的 FPGA VI。不同的编程环境, 实现的功能不同。

PXI 机箱通过传统的 DAQmx 驱动实现触发式 I/O 任务, 而在 cRIO 硬件平台上, 可利用 LabVIEW FPGA 直接通过 I/O 节点函数完成读/写模拟或数字通道; cRIO RT 控制器定时较 PXI 嵌入式控制器精确, 一般是微秒级的, 而 FPGA 操作位于硬件层, 逻辑可靠, 实时响应可以达到纳秒级。对于直流电动机这种简单的被控对象, 使用传统 PXI 嵌入式控制器或者 RT 控制器就已足够, 考虑日后拓展到更复杂的船舶自动化监控系统, 对几种编程环境均进行了运用。

在程序设计中, PID 控制模块可选用 LabVIEW 控制与仿真工具包中的 PID 图标直接进行配置, 并且在前面提到的 3 种编程环境中均能实现。本次试验对 3 种环境中的 PID 控制均进行了尝试, 下面是在实时响应最高的 FPGA 环境下编写的直流电动机转速 PID 监控程序:

FPGA VI, 是直流电动机转速监控程序的核心部分, 完成包括 I/O 端口连接(含控制信号输出和测量信号的采集)、PID 控制模块, 程序框图如图 3 所示。运行在 cRIO RT 控制器上的 Real-Time VI, 是连接 FPGA 的转速监控主程序, FPGA VI 中的输入控件和显示控件可作为寄存器, 在程序中进行读取和写入, 并建立

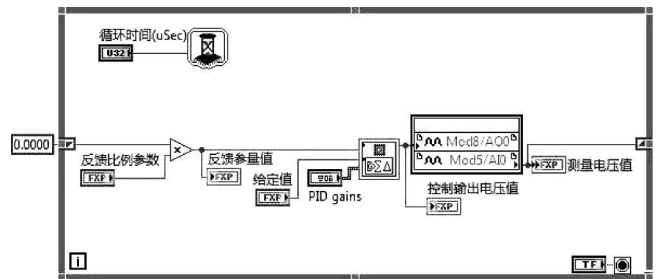


图 3 FPGA VI 框图

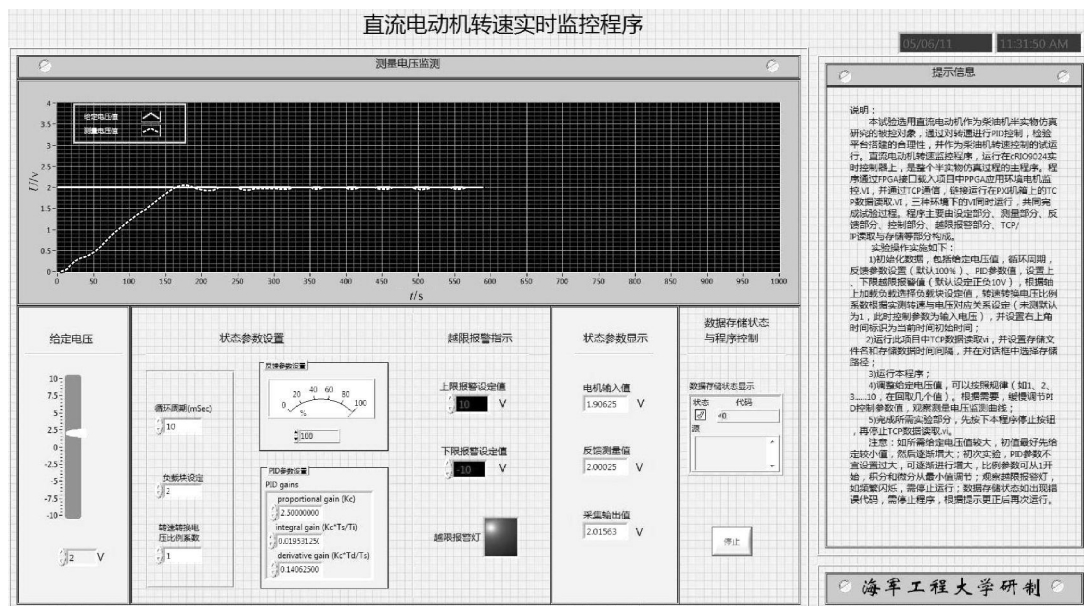


图 4 转速监控主程序前面板(Real-Time VI)

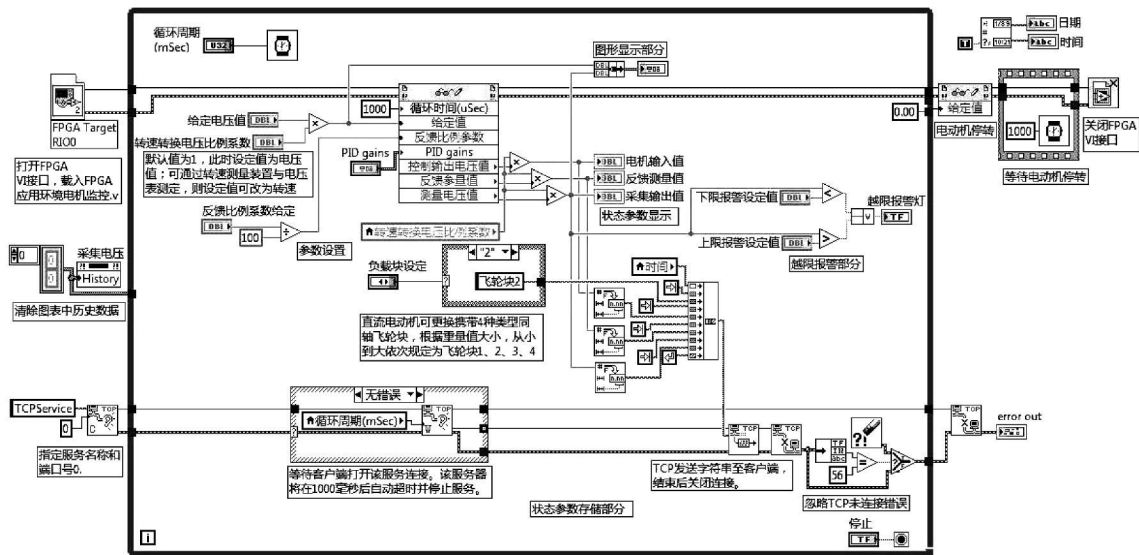


图 5 RT 转速监控主程序程序框图(Real-Time VI)

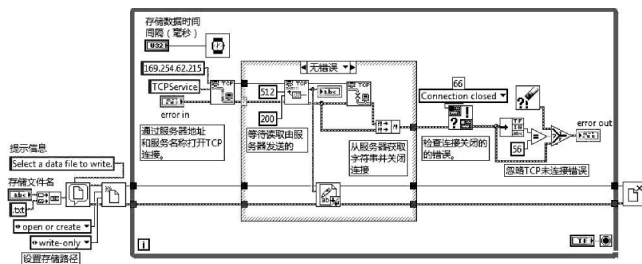


图 6 主机 VI 框图

FPGA VI 和 Real-Time VI 的通信同步; 由于 RT 控制器存储空间有限而不支持文件存储, 对采集的大量实时数据, 本研究采用 TCP/IP 通讯方式将数据传递至主机 VI 进行存储, 以便于数据的查询; 程序包括用户界面设计、初始参数设置、图形显示和状态参数的存储、TCP 发送、超限报警和辅助管理等部分, 程序的前面板界面和框图设计分别如图 4、图 5 所示; 运行在 PXI 机箱中的主机 VI, 主要完成 TCP 数据读取与存储, 程序框图如图 6 所示。

更换质量更大的直流电动机同轴飞轮块后, 调节 PID 参数, 前面板图表显示界面如图 7 所示, 同图 4 前面板中图表信息相同, 给定电压值初设定为 2 V, 变化

曲线为测量电压值。

3.3 实验分析

笔者针对上述实验, 分析如下:

(1) 设定不同的 PID 控制参数, 观察转速监控主程序前面板的状态参数显示控件和测量电压监测图表, 可以看到: 采用纯比例控制, 控制及时, 调节比例参数始终存在静差; 采用比例积分控制, 测量值最终能稳定于给定值, 但控制时间相对较长, 积分参数设置过大会出现饱和现象; 采用比例微分控制, 相对纯比例控制, 静差减小, 但不能消失, 由于微分环节的抑制偏差作用, 系统稳定性得到提高, 控制时间减短; 图 4 采用 PID 控制, 根据“先比例、然后积分、最后微分”的策略对 K_p 、 T_i 、 T_d 共 3 个参量进行整定, 通过调节, 直流电动机转速控制效果良好。这些现象与 PID 控制的特点一致^[7]。

(2) 更换质量大的直流电动机同轴飞轮块后, 仍采用图 4 PID 控制参数, 直流电动机转速控制过渡过程时间过长, 控制很不理想。根据被控对象惯性较大的特征, 调节增大比例和微分参数, 控制效果得到改善, 如图 7 所示。将其与图 4 中图表界面比较, 明显大

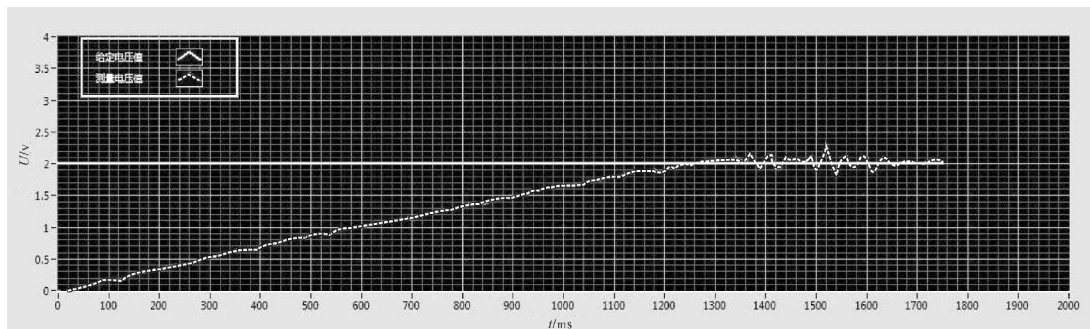


图 7 更换飞轮质量块后的测量电压监测图

(下转第 1353 页)

接,通过串口调试工具实时显示用户的心率信息,并利用该系统分别测试了几组数据,如图 9 所示。



图 9 系统运行测试

根据数据显示,用户在按摩的过程中,由于心率状态发生改变,系统模糊控制器会根据其心率变化信息和模糊控制规则,自动选择相应的 PWM 脉冲幅度,从而调节电机的电枢电压,改变电机的转速,即按摩强度。

4 结束语

本研究在借鉴国内外智能按摩椅领域的最新研究成果的基础上,提出了一种基于模糊控制的按摩椅控制方法,并详细介绍了模糊控制器的设计、硬件电路的组成和系统软件的设计,最后对系统运行进行了跟踪测试,实验结果证明该系统实现了由用户心率感应自动调节按摩,为按摩椅智能化的发展提供了可靠的借鉴。另外由于系统测试的用户群体有限,在按摩控制算法上还有待于继续研究,以期实现自学习、自适应的按摩。

参考文献(References):

- [1] 谢涛,黄鸿.按摩机器人的结构设计及运动学仿真[J].现代制造工程,2007(7):105-107.
- [2] 杨洁.腰椎牵引整复按摩机控制系统的设计[J].西安:陕西科技大学机电工程学院,2008.
- [3] 彭斐.恒温培养箱的模糊控制[J].机电工程,2009,26(4):84-86.
- [4] 夏长亮.无刷直流电机控制系统[M].北京:科学出版社,2008.
- [5] DALDABAN F,USTKOYUNCU N,GUN Y K. Phase inductance estimation for switched reluctance motor using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. **Energy Conversion and Management**,2006,47(5):485-493.
- [6] 袁威,陈勇,何国胜.基于模糊控制的二阶倒立摆[J].重庆邮电大学学报,2006,18(2):247-250.
- [7] 张国良,曾静,柯熙政.模糊控制及其 Matlab 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [8] 马磊.基于模糊 PI 控制的推进电机调速研究[D].武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2006.
- [9] DELP S,LOAN J P. A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement[J]. **IEEE Computing in Science and Engineering**,2000(2):46-55.
- [10] ZHANG Yang,TIAN Zhi-xue,JIN Yin-li,Expressway entrance control based on fuzzy arithmetic[J]. **Journal of Chang'an University**,2002,22(6):65-68.

[编辑:张翔]

(上接第 1335 页)

质量飞轮块较小质量的上升时间长,这是由于直流电动机同轴飞轮块的改变引起电动机转动惯量变化,而直接影响公式(4)中电动机的机电时间常数造成的。

4 结束语

本研究选用与柴油机数学模型类似的直流电动机,作为柴油机半实物仿真的控制对象,通过 LabVIEW 设计编程,初步采用 PID 控制策略对电动机进行转速监控,测试了 PID 3 个参数对被控对象的影响,并通过更换飞轮质量块模拟了不同柴油机的控制效果,为开展柴油机实物的信号监测和控制算法研究奠定了基础。另外,本实验采用的以 cRIO 为核心的 NI 硬件监控装置,实时控制效果好,并可同步进行多路模拟和数字信号采集,对开展船舶机舱自动化的控制研究有较好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 刘西全,江国和,杨松林.基于遗传算法的船舶柴油机转速控制系统仿真研究[J].华东船舶工业学院学报:自然科学版,2005,19(2):10-14.
- [2] 汤积仁.神经网络 PID 控制在柴油机调速系统中的应用[J].煤矿机械,2010,31(1):201-204.
- [3] 夏极.柴油机变参数 PID 控制及半实物仿真[J].船海工程,2006(6):65-67.
- [4] 郭江华.舰用柴油机建模方法综述[J].船舶工程,2005,27(2):58-61.
- [5] FOWLER A. Microcomputer based simulation of marine propulsion systems[J]. **Transactions on Institute of Marine Engineers**,1988,95(5):18.
- [6] 胡寿松.自动控制原理[M].5版.北京:科学出版社,2007.
- [7] 万曼影.轮机自动化[M].上海:上海交通大学出版社,2007.

[编辑:张翔]