

# RTX 和 TM4C 微控制器的扭矩加载控制器设计

田彦云, 黄向华

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 针对电涡流测功机的扭矩加载实验问题, 开发了一种基于 ARM 的嵌入式控制器。选取 TM4C 微控制器为 CPU, 以功率 MOSFET 为功率驱动器件, 利用 PI 算法, 采用 RTX 实时操作系统实现了对电涡流测功机扭矩加载的闭环控制, 并结合电涡流测功机进行了扭矩加载实验。实验结果表明: 该控制器具有加载性能好、结构简单及可靠性高等优点, 具有较高的工程应用价值。

**关键词:** ARM; RTX; 实时操作系统; 电涡流测功机; 扭矩加载控制器

**中图分类号:** TP19

**文献标识码:** A

## Torque-loading Controller Based on RTX and TM4C

Tian Yanyun, Huang Xianghua

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the torque-loading problem of the reddy current dynamometer, a new embedded controller based on ARM is developed, which takes TM4C as the CPU and power MOSFET as power driver. The design achieves closed-loop control of torque-loading controller for reddy current dynamometer using the PI control algorithm and RTX real-time operating system. The experiment results show that the controller has the advantages of high loading performance, simple structure, high reliability and so on, and it has great value in engineering application.

**Key words:** ARM; RTX; real-time operating system; reddy current dynamometer; torque-loading controller

## 引言

电涡流测功机主要用于测试发动机的功率, 也可作为齿轮箱、减速机、变速箱的加载设备, 用于测试它们的传递功率。扭矩加载控制器的稳定性及测量的准确性将直接影响工程人员对结果的分析判断。研制出控制品质优良的扭矩加载控制器, 将提升国产测功机的技术水平, 并促进发动机及其测控行业的发展。

近年来, ARM 内核微控制器发展迅速, 其性能高、耗电少、成本低, 具备 16/32 位双指令集。本文选择 TI 公司的 TM4C 系列芯片, 其拥有 Cortex-M4 内核, 具备多个高精度定时器, 可以输出多路互补且带有死区时间控制的 PWM 波形, 满足电涡流测功机的控制需求。

对于扭矩加载系统来说, 除了要求有强大的通用功能外, 还需要其具有良好的实时性能, 以满足控制系统实时采样和实时通信的要求。在众多实时软件中, Windows 实时扩展平台 RTX 是其中较为突出的一种。RTX 修改并扩展了 Windows 系统的硬件抽象层 (HAL), 形成与 Win-

dows 操作系统并列的实时子系统, 将原有系统的线程间切换时间消耗缩短到几  $\mu\text{s}$ 。考虑到扭矩加载系统任务的复杂性, 传统的单任务循环式的程序控制模式难以满足需求, 本文采用嵌入式操作系统 RTX 实现扭矩加载控制, 简化了系统设计。

## 1 系统总体方案设计

本系统采用的是兰菱机电 (海安) 有限公司的 DW-16 型电涡流测功机, 其具有结构简单、转动惯量小、制动力矩大、运行速度高、稳定性好、动态响应快等优点。DW 系列盘式电涡流测功机, 主要用来测量动力机械的特性, 尤其是中小功率和微小功率的动力加载测试, 同时其也可作为其他动力设备的吸功装置。

扭矩加载控制器系统原理框图如图 1 所示。扭矩加载控制器根据上位机给定的扭矩指令, 与实时采集的扭矩传感器信号作对比, 通过 PI 控制产生相应的 PWM 信号, 输入到电流驱动模块, 从而实现对电涡流测功机的输出扭矩的闭环控制。变频器通过接收上位机给定的转速指令,

控制伺服电机的旋转,从而控制电涡流测功机的转速。除此之外,扭矩加载控制器还具备转速检测与电流检测模块,保证了系统运行的稳定性。

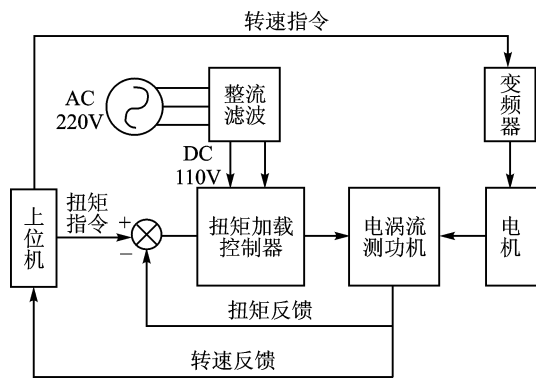


图 1 系统原理框图

## 2 系统硬件设计

### 2.1 控制器硬件总体结构

现有的加载系统使用 PLC 与上位机进行通信,这是一个间接的通信过程,必须通过 OPC 服务器进行中转,使得系统通信延迟高达 140 ms。其在实时性、可扩展性和智能化等方面存在局限性,难以保证系统的可靠运行,不能满足工业自动化控制不断发展的要求。

控制器硬件总体结构图如图 2 所示。为了提高系统的开放性,扭矩加载控制器硬件电路采用核心板加底板架构。由于扭矩加载系统的实时性要求较高,因此必须选择运算速度快且可靠性高的处理器。TM4C 具备强大的数据处理能力和高运行速度,满足定时

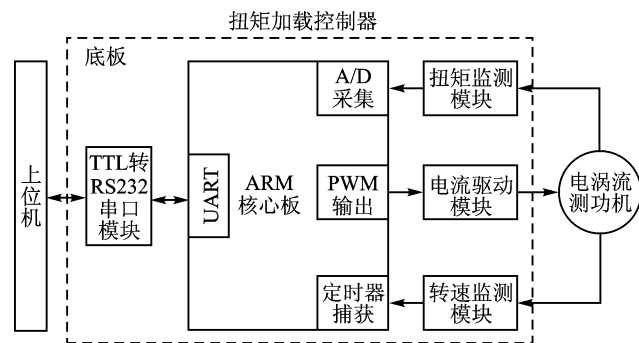


图 2 控制器硬件总体结构图

和通信要求,因此几乎承担了整个控制器全部的逻辑控制。控制器的 ARM 核心板即为 TM4C 的最小系统,其外设都以插座的形式预留给底板。底板电路由扭矩监测模块、电流驱动模块、转速监测模块及 TTL 转 RS232 串口模块等部分组成。

### 2.2 电流驱动模块设计

电流驱动电路如图 3 所示。考虑到系统的高频率及大电流的工作要求,扭矩加载控制器采用 IR 公司的 IR-FP460 功率 MOSFET 芯片作为直流斩波器件,以 TX-KA962F 驱动器为核心,设计了驱动保护电路的方案。相比于传统的大功率 IGBT 驱动芯片, TX-KA962F 驱动器可由 24 V 单一电源供电,最高开关频率可达 60 KHz,也可根据需要调节盲区时间、软关断的速度、故障后再次启动的时间。一旦出现短路信号,驱动器将软关断 IGBT,封锁输入信号,提高了整个系统的稳定性与安全性。

虽然一定的 PWM 信号占空比对应一定的测功机负

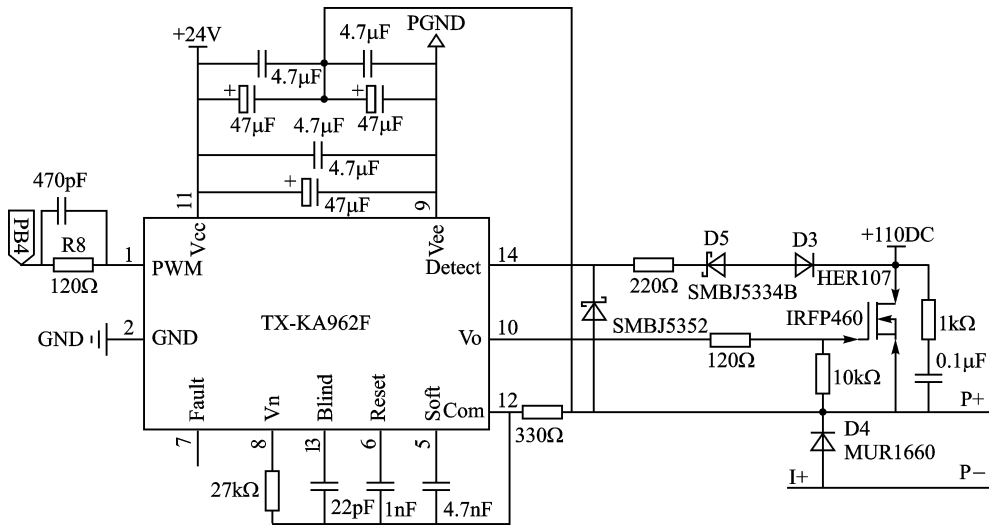


图 3 电流驱动电路

载,但由于 PWM 控制信号的占空比与测功机负载并不成比例,因此对驱动电流大小进行监测是很有必要的。电流监测模块如图 4 所示,采用霍尔电流传感器 ACS712,实现了对驱动电流的高精度采集。

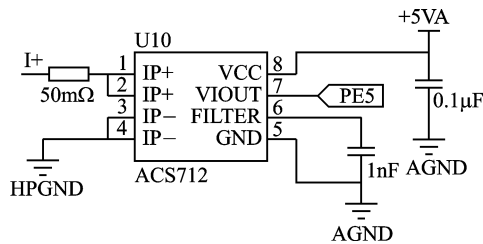


图 4 电流监测模块

本系统采用的 DW16 型电涡流测功机,其额定电流为

5 A。为保证系统的安全性与稳定性,需针对电路进行过流保护。当 TX-KA962F 驱动芯片 14 脚对 12 脚端的电压大于所设定的保护阈值电压时(即驱动电流大于测功机额定电流时),芯片内部将进行软关断,7 脚输出低电平报警信号,通过光耦将调理后的信号传送给控制电路。故障信号监测模块如图 5 所示。

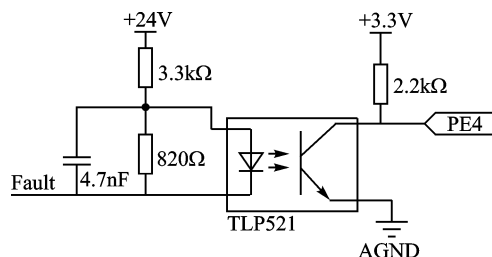


图 5 故障信号监测模块

## 2.3 转速监测模块设计

在扭矩加载试验系统中,转速和扭矩是最关键的两个参数,其测量精度极大地影响着最终的控制效果。转速测量采用欧姆龙公司的 EE-SX672 型传感器,接收的脉冲信号频率在数值上与原动机的转速相同。转速监测电路利用高速光耦 TLP521 实现信号的调理功能。

## 2.4 扭矩监测模块设计

电涡流测功机摆动部分通过测力臂架把偏转力作用在 TJL-1 S 型拉力传感器上,由它转换成与扭矩大小成正比的电压信号,经过 AD623 电压信号进行放大,传送给 TM4C 的 A/D 输入通道进行采集与处理。

## 3 系统软件设计

软件开发采用 Keil 软件的集成开发环境。基于 RTX 的程序设计是将一个大的应用程序分成多个相对独立的任务来完成。定义好每个任务的优先级后,RTX 对这些任务进行调度和管理。本程序设置系统时钟节拍为 50 Hz,共分为 3 个任务(task1、task2、task3),优先级分别为 127、120、110,通过使用函数 `os_sys_init()`、`os_tsk_pass()`、`os_dly_wait()` 来实现各个任务之间的切换。

task1 为扭矩控制任务,主要负责 PI 控制及检测故障信号,一旦检测到低电平故障信号,则输出占空比为 0 的 PWM 控制信号,其延时 1 个节拍进入就绪态,即 20 ms 执行一次;task2 负责串口接收并解析上位机数据,并对转速、扭矩和电流信号进行测量,其延时 2 个节拍进入就绪态,即相当于 40 ms 执行一次;task3 为串口发送任务,其延时 3 个节拍进入就绪态,即相当于 60 ms 执行一次。具体工作流程如图 6 所示。

控制算法是控制系统的核心,直接决定了控制系统的控制精度与性能。考虑到扭矩旋转时存在不可消除的

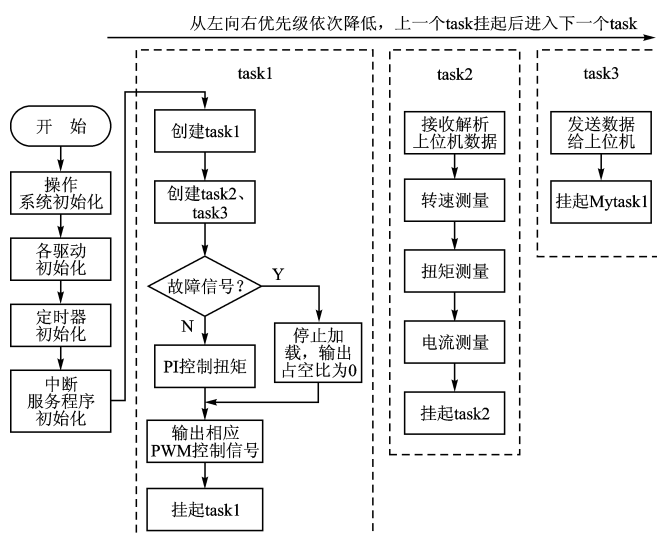


图 6 RTX 中软件工作流程图

振动,经测试发现只需采用比例和积分控制就可以达到较好的效果,因此最终采用了增量式 PI 控制算法。同时,为了避免扭矩测量噪声的影响,软件中对反馈信号加了惯性滤波。

扭矩加载控制器在接收上位机发送的数据时需要对数据进行验证,具体接收通信协议如下所示:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0xEB	0x90	K <sub>p</sub>				K <sub>i</sub>		torque_give		校验字		

由于控制参数往往需要根据经验反复整定,而且起初并不能确定其量级大小,为了快速方便地进行控制参数整定,此处串口数据采取浮点数格式传输,相对于用整型数传输没有精度损失。

## 4 实验结果和分析

一般的反馈控制都存在稳态抗扰能力与动态响应速度之间的矛盾,为了提高系统的调节速度,同时保证系统的超调、静态调节精度与抗扰度都在允许的范围内,需通过大量实验进行 PI 参数整定。

实验采用的电涡流传感器功率为 16 kW,最大转速为 13 000 r/min,额定电流为 0~5 A。原扭矩加载系统的闭环响应曲线如图 7 所示。由图可知,原系统存在的通信延迟和控制参数选择不恰当等原因,导致其控制精度较低,不符合工程应用的要求。

在本控制器作用下,实验结果曲线如图 8 所示。对数据段中所存的数据进行统计,可以得出如下的性能指标:系统扭矩闭环控制精度优于 2%,阶跃响应稳定时间小于 2 s,过渡比较平稳,到稳态时超调量较小。响应曲线存在波动是因为电机旋转使得设备台面不可避免地有振动,影

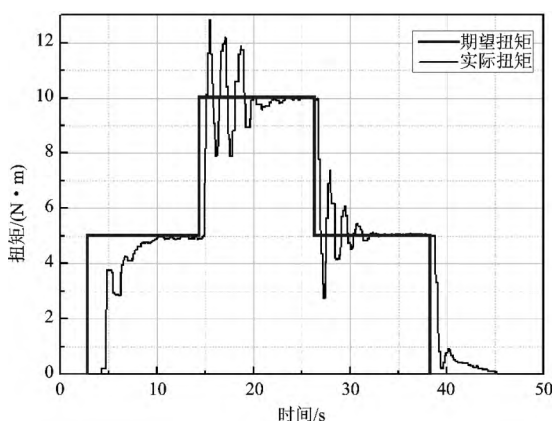


图7 原加载系统扭矩响应曲线

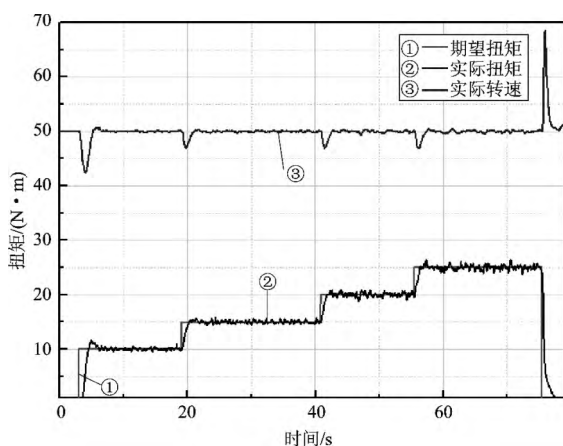


图8 扭矩加载控制器的扭矩响应曲线

响了传感器的精度。由实验结果的分析可知,该扭矩加载控制器具有良好的动态性能和控制精度,符合系统设计的要求。

## 结 语

综合考虑系统所需实现的功能、硬件的工作环境的基础上,完成了基于 RTX 实时操作系统和基于 ARM 的以 TX-KA962F 驱动器为核心的扭矩加载控制器。设计中充分考虑系统的实时性问题、电磁兼容问题,提高了系统的可靠性。实验表明,该扭矩加载控制器能较好地解决现有系统中存在的通信延迟问题,且具备很好的动、静态性能。

## 参考文献

- [1] 田颖,陈培红,聂圣芳,等. 功率 MOSFET 驱动保护电路设计与应用[J]. 电力电子技术,2005(1):73-74,80.
- [2] 张寅,袁刚. 基于 ARM 的双电机控制实验平台设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2013(12):9-11.
- [3] 张雷. 基于 RTX 全软件数控系统的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006.
- [4] 王晓秋. EXB841 的缺点及其改进措施[J]. 电力电子技术,1994,28(3):28-59.

田彦云(硕士研究生),主要从事航空发动机控制系统设计与仿真;  
黄向华(教授),研究方向为航空动力装置计算机测控系统等。

(责任编辑:杨迪娜 收稿日期:2015-06-08)

## 科世达与英飞凌赋予汽车第六感

在 2015 年国际车展(IAA)上,科世达(Leopold Kostal GmbH & Co. KG)展示了基于摄像头且融合英飞凌科技股份有限公司专业技术的驾驶员辅助系统。该系统能检测到驾驶员是否显示困倦(打瞌睡)迹象或注意力不集中,而汽车会立即做出响应,譬如通过振动座椅或警告音。驾驶员注意力越不集中,汽车就越会提起注意。为了快速和准确地做出响应,辅助系统和紧急制动系统可在潜在紧急情况发生之前自动激活。

### 第六感:借助 REAL3 3D 图像传感器芯片实现立体成像

摄像系统的核心是 3D 图像传感器芯片,该芯片基于飞行时间(ToF)原理,可以测量红外光从摄像头到物体所需的往返时间,该时间与物体的距离直接相关,较之其他 3D 测量方法,通过 ToF 可以直接测量深度数据,不需要通过复杂算法来确定。此外,在生产过程结束时,带 REAL3 的 3D 摄像头还可轻松和永久地进行校准,并且只需要校准一个镜头(单摄像头架构)。因此,它们相对较小,不受车辆振动的影响。

### 自主和半自动驾驶使附加功能变得重要

由于数据质量很高,所以 3D ToF 摄像头在车内的目的并不仅仅用于检测司机头部位置和眨眼,它们可用于通过手部运动或身体姿势控制信息娱乐系统或空调,车辆能为每位乘客单独设置安全气囊。此外,还可以在车外实现全新辅助和安全功能,如开门辅助设备,在收费停车场或在家停车时,能防止打开的车门撞上另一辆车、墙壁或天花板。