

网络化开放式快速控制原型系统^①

黄光普^② 吴 祥 俞 立^③

(浙江工业大学信息工程学院网络化控制系统实验室 杭州 310023)

摘 要 针对网络化控制系统的理论分析、算法研究和产品开发的辅助设计需求,提出一种网络化开放式快速控制原型(RCP)系统,该系统具有结构简单、成本低、部署方便、可扩展性强等诸多优点。首先,基于 Raspberry Pi 和 STM 32 开源硬件构建了双嵌入式的轻量级即连即用目标机。其次,基于 Simulink 仿真环境设计了系统参数在线实时修改功能,可大幅简化参数调节过程。再者,基于 TCP/UDP/IP 协议设计了网络化控制模式,使用个人计算机(PC)作为控制器构建了通用型开放式半实物仿真系统。最后,以磁悬浮球为控制对象搭建了网络化控制实验平台,通过实验案例验证了系统的有效性和优越性。所设计的 RCP 系统可有效助力网络化控制系统分析和设计过程,同时可用于各类科研和教育课程实验中,具有良好参考和应用价值。

关键词 快速控制原型(RCP); 网络化控制; 半实物仿真; Raspberry Pi; 磁悬浮球

0 引 言

网络化控制系统通过网络连接被控对象、控制器、传感器和执行器,具有结构简单、通信速率高、可扩展性强、网络集成性高等诸多优点,一直是控制领域研究和应用的热点方向^[1],如网络化鲁棒控制^[2-4]、网络时延和丢包问题^[5-7]、网络化运动控制^[8,9]、网络化模型预测控制^[10]以及近年兴起的云/雾控制系统^[11-12]等。在早期的网络化控制系统分析和算法研究过程中,由于缺乏合适的实验平台,大部分的研究仅限于纯理论分析和仿真实验^[2,5-6],研究成果的实际应用效果往往无法得到有效验证,这对系统的开发和应用带来了一定阻碍。近年来,网络化控制系统实验平台得到越来越多的重视。文献[3]和文献[4]分别设计了一种网络化电机控制实验平台,验证所提出鲁棒控制器的有效性。文献[8]设计了一种网络化多轴运动控制平台,并研究了其高精度轮廓跟踪控制问题。文献[9]设计了

一种网络化多轴同步控制平台,解决了其高性能同步控制问题。文献[12]为了对比分析云控制和雾控制的性能,设计了基于两自由度机械臂的对比实验。文献[13]和文献[14]描述了一种部署在广域网上的网络化控制系统实验室,包含有倒立摆、磁悬浮、电机等各类网络化控制系统教学和研究平台。在上述实验平台的支撑下,可直接观察分析系统和算法的性能,根据实验结果进行修改完善,优化系统理论设计和应用开发过程。然而,上述网络化控制实验平台基本属于定制化设计,大多用于特定对象和算法的设计开发,实验平台的开放性和移植性较差,很难被其他学者复制。因此,设计一款结构简单、通用性高、开放式和可复制的网络化控制系统实验平台具有较好的应用价值和参考意义。

在控制系统的研发过程中,快速控制原型(rapid control prototype, RCP)^[15]利用数字化虚拟控制器构建对实际物理对象控制的半实物仿真系统,可快速实现对所设计控制器或者控制算法的实验验证,

① 国家自然科学基金-浙江两化融合联合基金(U1709213)和浙江省重点研发计划(2020C01109)资助项目。

② 男,1991年生,博士生;研究方向:网络化运动控制;E-mail:masterhgp@hotmail.com。

③ 通信作者,E-mail: lyu@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2021-04-26)

研究人员可基于实验结果进行优化设计,从而节约实验测试成本,缩短研发周期。因此,由于 RCP 半实物仿真系统在控制系统算法设计和理论验证过程中带来的便利性,被广泛应用于机电控制^[16]、电力系统^[17]、电动汽车^[18]、教学仪器^[19]等各个领域。一些研究机构和商业公司相继提出了多个 RCP 软硬件系统,如德国的 dSPACE^[20]、加拿大的 RT-LAB^[21]等。文献[22]对当时的商业 RCP 系统进行了较为全面的对比分析,所设计的 RCP 系统包含 PC 机算法设计中心(主机)、基于高性能计算机的算法运行中心(目标机)以及 I/O 接口板,在实时性、采样周期和接口多样性方面表现出良好性能。然而,商业 RCP 系统往往考虑应用和性能的完备设计,采用 PCI/ISA 总线方式设计 I/O 板卡,存在价格昂贵、依赖性、可移植性差等诸多问题,导致其推广受限。因此,基于免费和开源软硬件系统和资源设计 RCP 系统成为有效解决手段^[23]。同时,利用嵌入式微处理器替代高性能计算机设计低成本、结构简便的 RCP 系统成为新的发展方向。文献[24]设计了基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的目标机控制器,并采用 PXI 系统和 LabVIEW 软件开发了上位机仿真平台。文献[25]基于 Raspberry Pi 设计了信号处理教仪平台,在个人计算机(personal computer, PC)上利用 Matlab/Simulink 仿真工具设计搭建控制算法框图,并转换成 C 语言代码,下载到目标机中实现实时控制。文献[26]基于 Arduino Due 控制板设计了开源和低成本的 RCP 系统,直接将 PC 作为算法设计和运行中心,并采用 USB 接口连接 PC 机和 I/O 板,无需编译和下载过程,实现了更加通用化的设计,可推广应用于高校实验课程教育中。文献[27]采用实时嵌入式处理器作为虚拟设备模型,设计了用于辅助信息物理系统协调器的设计和仿真的 RCP 系统,有效缩短算法和产品设计时间。然而,现有设计中并没有适用于网络化控制研究和开发的 RCP 系统。因此,面向当下网络化控制系统的高速发展需求,设计相应的网络化开放式 RCP 系统十分必要。

综上所述,本文基于嵌入式架构设计开发一款低成本、免费开源的网络化开放式 RCP 系统,设计

了基于 Raspberry Pi 和 STM32 微处理器的双嵌入式目标机,采用 Matlab/Simulink 仿真软件作为 PC 机控制系统设计工具,采用 TCP/UDP/IP 通信协议连接控制系统和目标机,同时以磁悬浮球为被控对象设计了实验装置。本文主要工作和贡献如下。

(1) 所设计 RCP 系统采用开源硬件和免费软件工具开发,基于嵌入式和网络化架构,具有成本低廉、体积小巧、部署方便、开放性好、可移植性强等优点,可实现参数的在线修改和可视化;目标机通过以太网与 PC 机连接能实现即连即用,可广泛应用于网络化控制领域各类算法和产品的辅助设计过程中,以及作为教学仪器在控制工程实验教学中推广应用。

(2) 基于所设计嵌入式目标机,一方面可将控制算法仿真框图进行编译后下载到目标机中进行本地计算和运行,将所设计 RCP 切换为本地控制模式;另一方面,可将 PC 机与目标机之间的局域网替换为广域网(如引入云计算服务),将 RCP 系统转变为云控制模式,用于辅助云控制的理论研究。

(3) 设计了 2 个网络化控制实验案例:1)典型网络化预测控制算法,验证 RCP 系统有效性;2)基于观测器思想补偿时变时延引起不确定性理论方法,通过实验对该理论进行了验证,表明了 RCP 系统的优越性。

1 系统概述

本节对所设计的网络化开放式 RCP 系统整体架构(如图 1 所示)进行详细说明。系统主要由 2 部分组成:(1)PC 机控制系统,搭载 Windows 操作系统,安装有 Matlab/Simulink 仿真软件环境,主要实现算法仿真框图的设计开发以及网络数据发送和接收;(2)嵌入式目标机,由 Raspberry Pi 数据处理中心以及 STM 32 驱动模块组成。前者负责与控制系统进行数据交换,根据预先设定的数据格式对网络通信数据进行打包以及解包,并记录时间戳用于系统网络通信时延的计算,并且是 RCP 系统处于本地模式时的算法计算中心;后者与被控对象进行交互,负责模拟控制量的输出和控制对象的实时状态

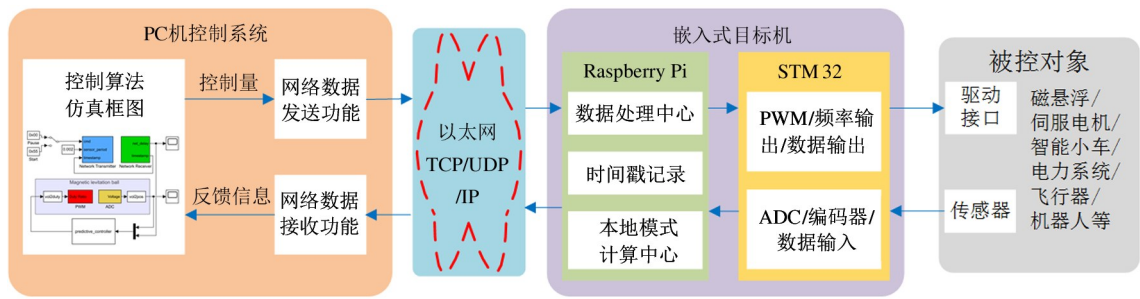


图1 网络化开放式 RCP 系统架构图

信息采集。PC 机控制系统与目标机之间通过以太网连接,采用 TCP/UDP/IP 协议实现数据通信;目标机与控制对象之间通过信号线进行连接;通过设计不同驱动接口,则被控对象可以连接各类机电系统、信息物理系统等,具有非常良好的通用性。

根据网络化 RCP 系统架构,系统工作流程如图 2 所示。其中,步骤 S2、S3 和 S4 运行于 PC 机控制系统的 Matlab/Simulink 环境中,步骤 S1 ~ S5 运行于嵌入式目标机中。首先,在 PC 机控制系统的 Matlab/Simulink 环境中设计好控制算法仿真框图和程序,随后运行 RCP 系统进行算法测试验证。主要流程步骤如下。S0:系统初始化过程,目标机完成初始化配置后向 PC 机发送确认标识符,Simulink 程序接收到确认位后开始执行控制算法仿真函数;S1:目标机按照给定采样周期采集被控对象状态数据,并通过以太网发送给 PC 机控制系统;S2:Simulink 函数接收来自目标机的反馈数据,并更新仿真函数相应数据;S3:控制算法根据新的反馈数据量进行计算

得到新的控制量输出,并将其转换为实际控制值;S4:将得到的实际控制值数据通过以太网发送给目标机;S5:目标机接收到实际控制值并将其转换得到实际模拟控制输出发送给被控对象;最终,实现对被控对象的网络化控制。

根据上述工作流程,RCP 系统在网络化/云控制模式下,无需对算法仿真框图进行编译和下载,可实现控制算法的开放式设计,且在仿真系统运行过程中能实时修改算法参数,调试过程非常简单,能很好地辅助各类网络化系统的设计开发。在 RCP 系统处于本地控制模式时,由 Simulink 构建的控制算法需要先通过自动代码生成器生成 C 语言代码,编译后下载到 Raspberry Pi 中,Raspberry Pi 作为算法计算中心实时运行,并通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)与 STM 32 驱动模块进行交互,实现对被控对象的本地控制。

2 系统硬件和软件设计

本节将详细介绍所提出的网络化开放式 RCP 系统的硬件(嵌入式目标机)和软件(PC 机控制系统软件)的设计过程。

2.1 嵌入式目标机设计

本系统所设计的双嵌入式架构目标机硬件由 Raspberry Pi 3B 和 STM 32 驱动模块两部分组成,其硬件电路如图 3 所示。Raspberry Pi 3B 是一台信用卡大小的单板计算机,配备 Broadcom 公司的 BCM2837 四核心 64 位处理器,运行主频为 1.2 GHz;是一款基于 ARM Cortex-A53 内核微控制器的计算机,具有 1 GB 的随机存取存储(RAM)、40 针通用输入输出(general-purpose input/output, GPIO)、2.4 GHz WIFI

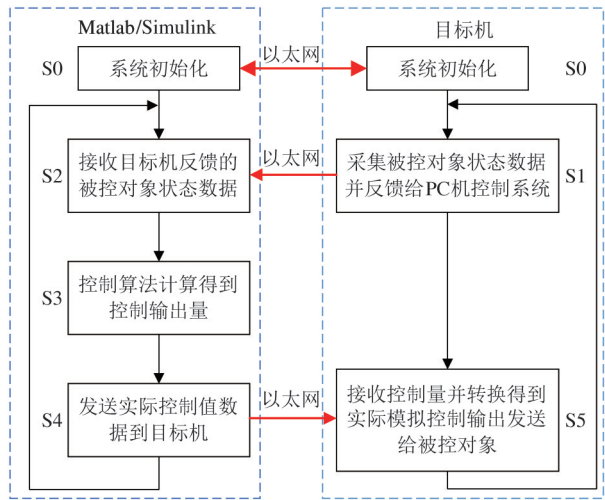


图2 系统工作流程图

模块、100 Mbps 以太网接口等。STM 32 驱动模块采用 ST 公司的 STM 32 F 103RBT6 微处理器, 基于 ARM Cortex-M3 内核, 最高频率为 72 MHz, 拥有 48 个具有复用功能的 GPIO、多通道 12-bit 分辨率的高速(采样间隔可达 1 μ s)模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)接口、带死区和刹车功能的专用电机控制脉冲宽带调制(pulse width modulation, PWM)接口, 以及最高支持 18 Mbit/s 的 SPI 接口。系统设计中采用 Raspberry Pi 3B 以及 STM 32 的主要原因如下。

(1) 两者都是开源平台, 使用广泛, 资料丰富且价格便宜, 不会带来经济负担。

(2) 两者尺寸都相对较小(最大长度为 85 mm), 使得系统硬件模块小巧轻便, 无任何其他硬件资源依赖性, 可随身携带。

(3) Raspberry Pi 3B 拥有强大的计算能力, 可以运行安装 PREEMPT RT 补丁的 Linux 系统来进行实时控制。同时, 自带 100 Mbps 以太网接口以及 2.4 GHz WIFI 模块, 拥有高速网络通信能力。

(4) STM32 驱动模块基于 ARM Cortex-M3 内核, 具有嵌套向量中断控制器(NVIC), 拥有丰富的外设和 PWM 输出接口, 方便实现对各类被控对象的驱动控制和数据采集。

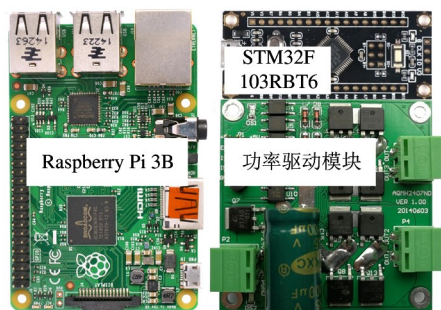


图 3 嵌入式目标机硬件实物图

2.2 系统软件设计

网络化 RCP 系统的软件设计主要包括 Simulink 仿真功能模块以及目标机处理函数程序设计。Simulink 仿真功能模块采用 S-Function 开发, 使用 C 语言代码进行编写, 设计有网络通信功能、PWM 和频率输出功能、ADC 和编码器数据采集功能、I/O 控制功能; 其中网络通信功能包含有网络数据发送器

(network transmitter) 和网络数据接收器(network receiver), 可实现预定格式的网络数据快速交换; I/O 控制功能包含有数据输入(data input, DI)和数据输出(data output, DO)功能; 各功能模块根据数据输入和输出属性可分类列出, 如图 4 所示。从而, 控制算法设计人员只需关注算法设计过程, 无须花费时间在各类外围设备功能的开发上。

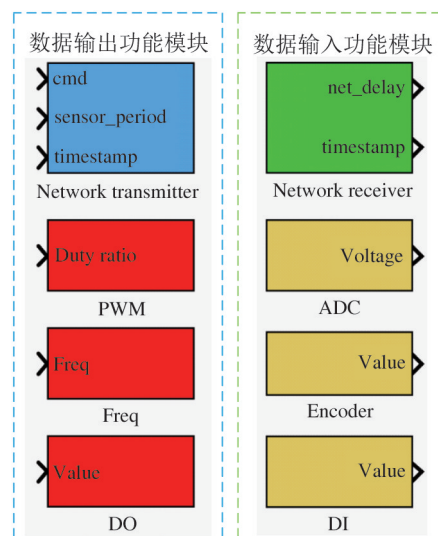


图 4 RCP 系统的 Simulink 仿真功能模块

嵌入式目标机处理函数设计中包含 Raspberry Pi 和 STM32 驱动模块两部分, 相关功能函数采用 C 语言开发。Raspberry Pi 主要开发有 TCP/UDP/IP 协议用于与 PC 机实现以太网通信, 开发有 SPI 接口功能实现与 STM32 的串行数据通信, 还开发有本地模式下的算法运行 API 接口实现本地实时控制。STM32 驱动模块开发有 SPI 接口、PWM 输出、ADC 数据采集、编码器采集、I/O 控制功能等, PWM 输出控制驱动模块输出实际控制值, ADC 和编码器功能负责采集被控对象的实时状态信息, 从而构建 RCP 系统与被控对象的完整控制闭环。

综上所述, RCP 系统软件设计过程简单, 对编程开发人员要求较低, 确保了系统具有较好的可复制性和移植性。系统启动后, 首先对网络通信 IP 及端口参数进行设置, 确保系统通信回路畅通; 随后设置系统控制(采样)周期和 I/O 类型, 配置相应的定时器参数和外设接口; 当目标机完成初始化后发送确认标识位到 PC 机控制系统, 完成握手确认后算

法仿真程序进入循环运行状态,RCP 系统程序运行流程如图 5 所示,具体步骤描述如下。

- (1) Raspberry Pi 的定时器作为 RCP 系统的基础时钟,以设定的采样周期 T 向 STM32 发送数据采集请求。
- (2) STM32 接收到采集请求后立即通过外设接口采集被控对象(传感器)实时数据,并通过 SPI 接口发送给 Raspberry Pi。
- (3) Raspberry Pi 接收到反馈的状态信息后,记录实时时间戳 t_{1i} ,并按照定义的协议格式将状态信息和时间戳等数据打包通过以太网发送给 PC 机控制系统。
- (4) Simulink 接收到反馈状态信息后进行算法计算,得到新的控制量输出,并通过以太网发送给 Raspberry Pi。
- (5) Raspberry Pi 接收到新的控制量,记录时间戳 t_{2i} ,并将其通过 SPI 接口发送给 STM 32 驱动模块。
- (6) STM32 将控制量转换成实际控制值,如转换成 PWM 占空比大小从而控制输出电压值。

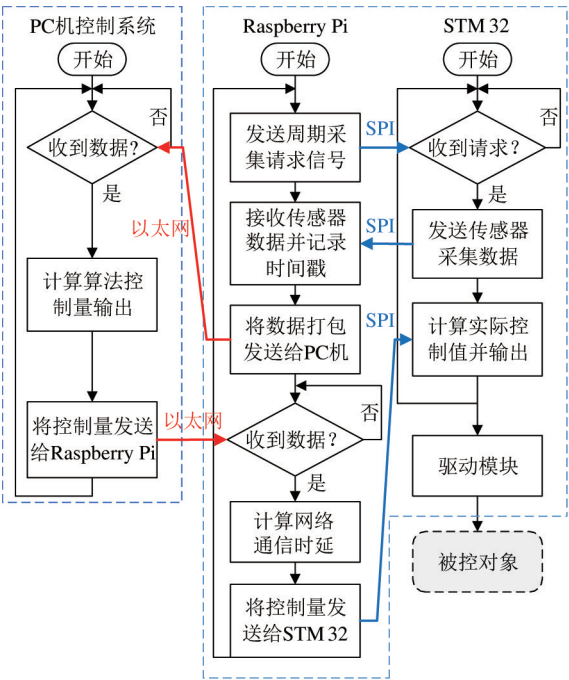


图 5 系统程序运行流程图

因此,所设计 RCP 系统中 PC 机控制系统负责完成系统初始化配置交互过程,Raspberry Pi 作为系

统程序循环运行的起点,STM 32 驱动模块根据配置参数可初始化不同的外设和采集接口,从而可方便地将系统切换为本地模式,同时外接不同的被控对象,最大化系统的通用性。

PC 机控制系统中设计了网络数据发送器和接收器实现与目标机之间的数据通信,其数据包格式如图 6 所示。发送器数据包格式包含 1 个字节指令数据、1 字节控制(采样)周期设置数据、2 字节 I/O 模块类型数据、8 字节时间戳数据和 20 字节控制量数据。接收器数据包格式包含 5 字节传感器采样数据、8 字节时间戳数据和 5 字节网络通信时延数据。

网络数据发送器:				
1 字节	1 字节	2 字节	8 字节	20 字节
指令数据	控制周期	I/O 类型数据	时间戳	控制量数据

网络数据接收器:		
5 字节	8 字节	5 字节
传感器数据	时间戳	网络时延

图 6 网络通信数据包格式

综上所述,本文所提网络化开放式 RCP 系统从控制系统、嵌入式目标机和系统软件设计多个方面保证了系统方案具有非常高的通用性、可复制性、开放性和可移植性,主要体现在以下几个方面。

- (1) 通用性体现在所设计的网络化开放式 RCP 系统可接入不同的被控对象设备,如磁悬浮、倒立摆、伺服电机、飞行器、机器人等,实现其网络化控制;同时,系统还可以切换为本地模式和云控制模式,进一步拓展了其通用性。
- (2) 可复制性体现在 PC 控制系统直接采用 Simulink 作为算法设计工具,硬件采用了使用极为广泛的低成本开源平台,系统软件设计过程简单,对编程开发人员要求低,从而使得其他学者或者开发人员可参考本文系统方案进行简单、快速的复制设计,没有成本压力以及开发授权问题。
- (3) 开放性体现在 Simulink 工具支持各种功能模块的组合,具有很高的开放性,同时用户可方便地在 PC 机端进行二次开发以满足各种不同的需求。也可以使用其他的软件平台作为 PC 机控制系统的设计工具,例如 SCILAB、Python、Qt 以及微软基础类

库(MFC)等,以满足不同的上层人机交互设计。

(4) 可移植性体现在系统软件程序都是基于 ANSI C 以及 POSIX 标准开发的,可以很方便地迁移到其他软硬件平台中运行,如 Rock Pi、Orange Pi 或者 Beagle Bone Black 等,从而可将实验编译程序快速移植到产品研发过程中。

值得说明的是,本文方案的目标机硬件采用了由 Raspberry Pi 和 STM 32 组成的双嵌入式架构。如前文所述,部分学者基于 FPGA、Raspberry Pi 和 Arduino Due 进行目标机硬件的设计开发。基于 FPGA 的目标机可以进行并行计算,具有较强的计算性能,并且支持创建各种自定义 I/O 外设,但仅支持数字 I/O,同时相对价格也较高;此外,FPGA 的开发

语言为硬件描述语言 Verilog HDL,导致其开发难度相对较大,可复制性以及可移植性差。基于 Raspberry Pi 目标机具有较强的运算性能以及较低的价格,但其只带有数字 I/O,大幅限制了其应用场景,使其通用性受限。基于 Arduino Due 的目标机价格较低,具有丰富的数字和模拟 I/O,但是其微处理器性能有限,无法满足高速、复杂的控制应用需求。因此,本文方案与基于 FPGA、Raspberry Pi 以及 Arduino Due 的目标机方案对比如表 1 所示,本文方案采用的双嵌入式架构设计综合了其他方案的优点,具有性能强、成本低、开发简单、通用性和可移植性好、模拟和数字接口丰富等诸多优势。

表 1 本方案与基于 FPGA、Raspberry Pi、Arduino Due 等方案的对比

目标机	性能	价格	开发难度	可移植性	通用性	I/O 接口
Raspberry Pi + STM 32	强	便宜	易	好	好	数字/模拟
FPGA	强	昂贵	难	差	差	数字
Raspberry Pi	一般	便宜	易	好	差	数字
Arduino Due	弱	便宜	易	一般	一般	数字/模拟

3 网络化磁悬浮 RCP 系统

为了验证所设计的网络化开放式 RCP 系统的有效性和优越性,本文设计搭建了一套网络化磁悬浮控制系统(如图 7 所示)。磁悬浮装置由电磁铁、激光传感器和空心铁球组成;控制系统通过调节电磁铁的电流,使铁球稳定在指定位置或沿着期望轨

迹运动,激光传感器用于检测铁球的实时位置。网络化磁悬浮 RCP 系统中的 PC 机控制系统配置为:处理器 Intel(R) Core i5-7500,CPU 主频 3.0 GHz,内存 8 GB,操作系统 Windows10,软件平台为 Matlab R2019B;PC 机与目标机处于同一局域网中,两机之间采用 UDP/IP 协议进行通信,对应的 IP 地址分别为 192.168.135.100 和 192.168.135.107。

嵌入式目标机中的 Raspberry Pi 具有高频精确定时器功能,作为网络化 RCP 系统的时间基准,从而可以精确测量网络化系统的网络通信时延大小。设置系统控制(采样)周期 $T = 2\text{ ms}$,测量得到某一段时间内的时延大小如图 8 所示。由图 8 可知系统时延具有典型时变特性,且出现有低频的大时延现象。下面建立网络化磁悬浮 RCP 系统模型,用于后续实验验证过程。磁悬浮系统本地模型可以描述为如下形式

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x = [x_1 \ x_2]^T$ 为系统状态, x_1 和 x_2 分别表示

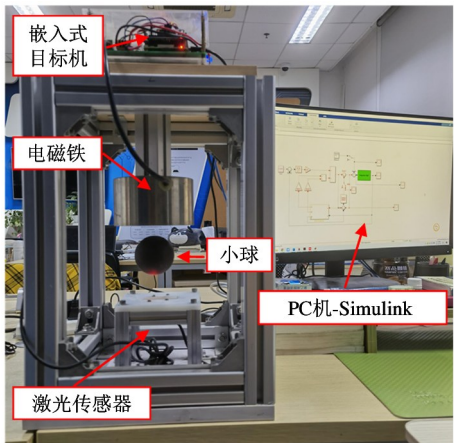


图 7 网络化磁悬浮 RCP 系统实物图

小球的位置和速度; u 、 y 分别为系统的输入和输出; A 、 B 、 C 均为常值矩阵。显然,网络通信时延会对系统控制性能带来影响,分别考虑存在时变短时延和时变长时延情况下的网络化系统模型。

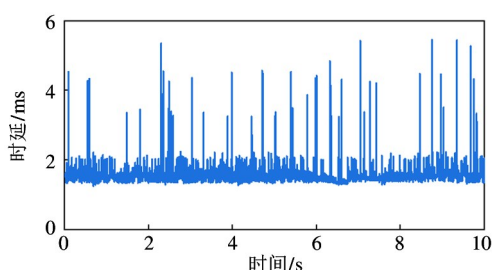


图8 网络化 RCP 系统通信时延

3.1 时变短时延情形

考虑时变短时延情形,此时网络时延 τ_k 满足 $0 \leq \tau_k \leq T$, 由于传感器采用时间驱动模式,控制器以及执行器采用事件驱动模式,可得到时变短时延情形下的系统控制输入时序图如图9所示。

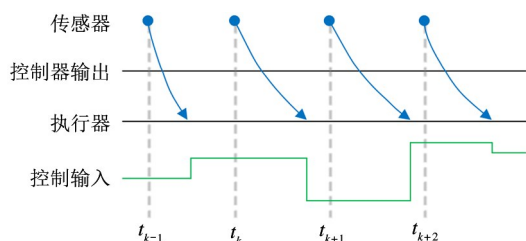


图9 短时延情形下控制输入时序图

将时变短时延描述为如下形式:

$$\tau_k = \tau_0 + \Delta\tau_k \quad (2)$$

其中 τ_0 和 $\Delta\tau_k$ 分别表示 τ_k 的标称值部分和不确定部分。由图9可知,在每个控制周期内至多有2个控制量作用在被控对象上,即

$$u(t) = \begin{cases} u(t_{k-1}) & t \in (t_k, t_k + \tau_k] \\ u(t_k) & t \in (t_k + \tau_k, t_{k+1}] \end{cases} \quad (3)$$

以采样周期 T 对系统离散化,同时考虑网络时延 τ_k 的影响,具有时变短时延的网络化控制系统可描述为

$$x(k+1) = A_g x(k) + B_g u(k) + d(k) \quad (4)$$

其中 $A_g = e^{AT}$, $B_g = \int_0^{T-\tau_0} e^{A\sigma} B d\sigma$, $d(k)$ 具体形式如下所示。

$$\begin{cases} d(k) = A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B u(k) \\ \quad + (B_0 - B - A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B) u(k-1) \\ A_0 = e^{A(T-\tau_0)}, \quad \Theta(\Delta\tau_k) = \int_0^{-\Delta\tau_k} e^{A\sigma} d\sigma \\ B_0 = \int_0^T e^{A\sigma} B d\sigma \end{cases} \quad (5)$$

3.2 时变长时延情形

针对控制系统时变长时延情形,即 $\tau_k > T$, 首先做如下假设。

假设1 假设时延是有界的,即 $T < \tau_k < d_M T$, d_M 为正整数。此假设符合实际系统特征。

假设2 假设执行器总是使用当前控制周期内最先到达的控制量,且控制量不会发生时序错乱。由于采用的是 UDP/IP 传输方式,不会对发送错误或者失败的数据进行重新传输,故控制量的下发都是按照先后顺序的,不会发生错序的情况;由于执行器采用事件驱动模式,为了避免执行器频繁动作,因此执行器总是使用当前周期内最先到达的控制量。如果在当前控制周期内执行器未接收到新的控制量,则采用上周期控制量进行计算,故此假设合理。

根据上述假设,时变长时延情形下的系统控制输入时序如图10所示,则时变长时延可描述为式(6)形式。

$$\tau_k = nT + \tau_0 + \Delta\tau_k, \quad 1 \leq n < d_M \quad (6)$$

可得知每个控制周期内至多有2个控制量作用在被控对象上,即

$$u(t) = \begin{cases} u(t_{k-n-1}) & t \in (t_k, t_k + \tau_k] \\ u(t_{k-n}) & t \in (t_k + \tau_k, t_{k+1}] \end{cases} \quad (7)$$

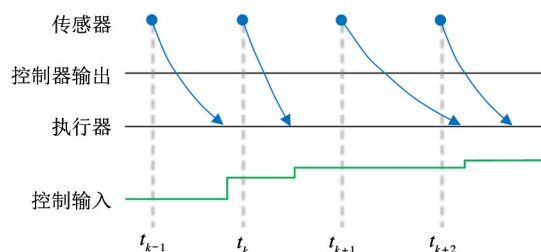


图10 长时延情形下控制输入时序图

那么可以得到具有时变长时延的网络化控制系统模型:

$$x(k+1) = A_g x(k) + B_g u(k-n) + d(k) \quad (8)$$

其中 $A_g = e^{A\tau}$, $B_g = \int_0^{T-\tau_0} e^{A\sigma} B d\sigma$, $d(k)$ 由下式给出

$$\begin{cases} d(k) = A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B u(k-n) \\ \quad + (B_0 - B - A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B) u(k-n-1) \\ A_0 = e^{A(T-\tau_0)}, \Theta(\Delta\tau_k) = \int_0^{-\Delta\tau_k} e^{A\sigma} d\sigma \\ B_0 = \int_0^T e^{A\sigma} B d\sigma \end{cases} \quad (9)$$

值得说明的是,当取系统式(8)中的 $n=0$, 系统式(8)退化为系统式(4)。因此,结合式(4)和(8),可得到具有有界时变时延的网络化控制系统模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_g x(k) + B_g u(k-n) + d(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ d(k) = A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B u(k-n) \\ \quad + (B_0 - B - A_0 \Theta(\Delta\tau_k) B) u(k-n-1) \end{cases} \quad (10)$$

其中 $n \in \mathbb{N}$, $0 \leq n < d_M$ 。在本地模式下,采用系统辨识方法得到模型参数分别为

$$A_g = \begin{bmatrix} 1.001 & 0.002 \\ 0.9643 & 1.001 \end{bmatrix}, B_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0015 \end{bmatrix}。$$

4 实验案例

本节基于网络化磁悬浮 RCP 系统,设计了 2 个实验案例,分别对文献[8]和文献[10]中针对网络化系统的理论方法进行实验验证。文献[10]提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的网络化预测控制策略,是网络化控制理论中的典型算法,通过该算法实验验证所设计 RCP 系统的有效性。文献[8]提出了基于等价输入干扰(equivalent input disturbance, EID)方法补偿网络化时变时延的策略,通过数字仿真验证了其有效性。然而由于其网络化实验平台的限制,无法对上述理论进行独立实验验证。本文通过对上述理论方法进行实验,验证所设计系统的优越性。在 PC 机控制系统的 Simulink 环境中搭建算法仿真框图如图 11 所示,其中控制算法可以通过 Simulink 自带的功能

模块实现,也可以通过 S-Function 模块编程实现。为了加快仿真的计算速度,给出示例中的控制算法均采用 C 代码编写的 S-Function 模块实现。显然可知,针对不同的控制算法实验设计只需要替换 S-Function 模块即可,这保证了 RCP 系统的便捷性、开放性和通用性。

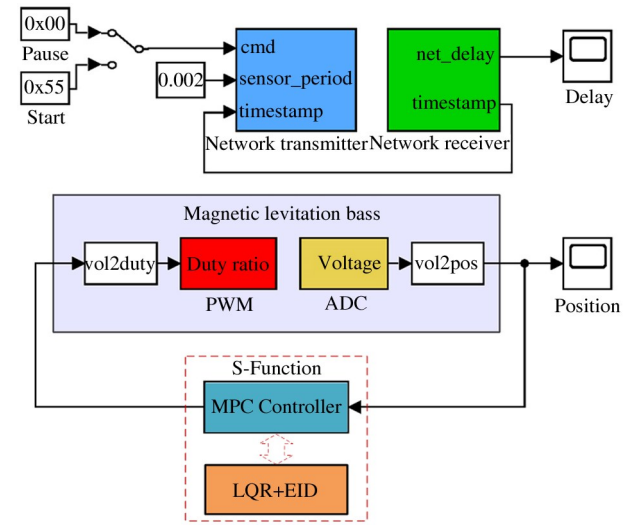


图 11 控制算法仿真框图

4.1 网络化 MPC 控制实验

文献[10]所提出的网络化 MPC 控制方法主要思想是将网络通信时延处理为系统控制(采样)周期的整数倍,采用 MPC 计算得到多步预测的系统控制输入,并将其打包成一个数据包通过以太网发送到执行器端。那么执行器可根据网络通信时延大小选择相应预测步长的控制输入作为当前实际控制量发送给被控对象,从而主动补偿网络通信时延对控制系统的影响。网络化 MPC 控制器设计步骤如下所示。

(1) 确定时延上界 d_M 。

(2) 计算状态反馈增益 K 。 K 可以通过极点配置以及线性二次型调节(linear quadratic regulator, LQR)等方式设计,需要满足 $A_g + B_g K$ 为 Schur 稳定矩阵。

(3) 构造预测控制输入集 $U(k)$, 具体形式为

$$U(k) = \begin{bmatrix} Kx(k) & K(A_g + B_g K)x(k) & \cdots \\ \cdots & K(A_g + B_g K)^{d_M}x(k) \end{bmatrix}$$

由图 8 可知,实验环境下的网络通信时延 $\tau_k <$

6 ms, 由于采样周期 $T = 2$ ms, 因此取 $d_M = 3$ 。代入系统模型参数 A_g 以及 B_g , 采用 LQR 方法设计状态反馈增益 $K = [716.18 \quad 71.77]$, 小球位置控制实验结果如图 12 所示。实验结果表明, 小球在平衡位置(45 mm)只有较小幅度的波动, 具有较好的稳定性, 验证了文献[10]提出的网络化 MPC 控制理论, 也说明了所设计网络化 RCP 系统的有效性。

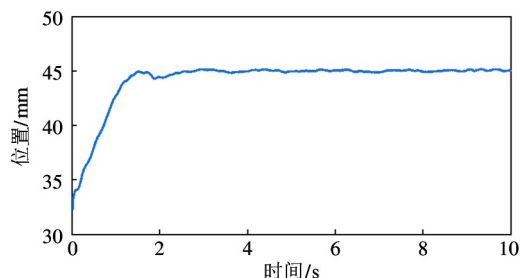


图 12 网络化 MPC 控制实验

4.2 基于 EID 时延补偿理论方法实验

文献[8]提出了基于扰动观测器(EID)的网络化系统时变时延补偿方法, 其主要是将时变时延带来的不确定性等效为系统的网络扰动, 采用 EID 思想将网络扰动等效为系统输入端的干扰, 并在控制量中对其进行补偿, 从而消除网络时延给系统带来的影响。

为了更加清晰地说明该理论的正确性, 此处设计了本地模型下的线性二次型最优控制(LQR)、网络系统的 LQR 控制以及基于 EID 的 LQR(LQR + EID)控制 3 种实验。采用 LQR 方法设计状态反馈增益 $K = [716.18 \quad 71.77]$, EID 观测器增益 $L = [1.9002 \quad 472.3421]^T$ 以及滤波器时间常数 $T_s = 0.01$ 。实验结果如图 13 所示。显然, 根据本地模式和网络化控制模型下的 LQR 控制实验结果对比可知, 时变时延带来的不确定性影响使得磁悬浮球位

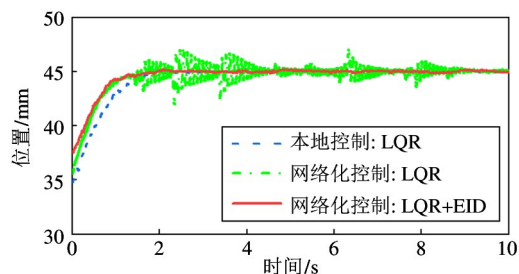


图 13 LQR 控制器本地控制和网络化控制效果图

置在平衡点附近发生了较大波动, 使得系统控制性能下降; 然而, 引入 EID 扰动补偿策略后, 网络化控制模型下的系统位置控制性能基本与本地模式一致。总结得出, 实验结果与文献[8]中的理论和仿真结果一致, 验证了其理论正确性, 同时也说明了本文所设计网络化 RCP 系统的优越性。

5 结 论

本文采用开源的硬件和软件环境搭建了一套网络化开放式 RCP 系统, 设计了双嵌入式目标机架构, 采用以太网连接 PC 控制系统和目标机, 具有结构简单、开放性好、成本低、部署方便、可扩展性强等诸多优点, 并以磁悬浮球为被控对象设计了网络化 RCP 实验平台。本文对系统硬件设计和软件控制流程进行了详细介绍, 并设计了 2 个代表性网络化理论算法实验, 表明了所提 RCP 系统在算法设计中的便捷性和辅助开发中的优越性。本文所设计网络化开放式 RCP 系统可用于各类网络化控制系统理论分析和产品研发过程, 具有良好辅助设计价值。

参考文献

- [1] ZHANG X M, HAN Q L, GE X, et al. Networked control systems: a survey of trends and techniques [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 7(1): 1-17
- [2] ZHANG W A, LI Y U. A robust control approach to stabilization of networked control systems with short time-varying delays[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(1): 87-91
- [3] 刘义才, 刘斌, 高俊. 基于 LMI 方法的网络化保性能 PID 控制[J]. *高技术通讯*, 2020, 30(2): 166-176
- [4] QIU L, SHI Y, PAN J, et al. Robust control for a networked direct-drive linear motion control system: design and experiments [J]. *Information Sciences*, 2016, 370: 725-742
- [5] ZHANG W A, YU L. BIBO stability and stabilization of networked control systems with short time-varying delays [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(3): 295-308
- [6] HU Z, DENG F, XING M, et al. Modeling and control of

- Itô stochastic networked control systems with random packet dropouts subject to time-varying sampling [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(8): 4194-4201
- [7] LI T, ZHANG W A, YU L. Improved switched system approach to networked control systems with time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 27(6): 2711-2717
- [8] WU X, SHE J, YU L, et al. Contour tracking control of networked motion control system using improved equivalent-input-disturbance approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(6): 5155-5165
- [9] WANG Y W, ZHANG W A, YU L. GESO-based position synchronization control of networked multi-axis motion system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(1): 248-257
- [10] ZHANG J, XIA Y, SHI P. Design and stability analysis of networked predictive control systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 21(4): 1495-1501
- [11] 夏元清. 云控制系统及其面临的挑战[J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 1-12
- [12] ZHAN Y, XIA Y, VASILAKOS A V. Future directions of networked control systems: a combination of cloud control and fog control approach[J]. *Computer Networks*, 2019, 161: 235-248
- [13] LEI Z, ZHOU H, HU W, et al. Unified 3D interactive human-centered system for online experimentation: current deployment and future perspectives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(7): 4777-4787
- [14] LEI Z, ZHOU H, HU W, et al. HTML5-based 3D online control laboratory with virtual interactive wiring practice [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 14(6): 2473-2483
- [15] HOGAN D, ALBIOL-TENDILLO L, KELLEHER B, et al. Rapid-prototyping and hardware-in-the-loop laboratory platform for development and testing of electro mechanical actuator controls[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(17): 4133-4137
- [16] 夏振兴, 代伟, 赵大勇, 等. 桌面机械臂快速控制原型系统设计与开发[J]. 控制工程, 2021, 28(1): 84-92
- [17] SENTHILNATHAN K, ANNAPOORANI I. Implementation of unified power quality conditioner (UPQC) based on current source converters for distribution grid and performance monitoring through LabVIEW simulation interface toolkit server: a cyber physical model[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2016, 10(11): 2622-2630
- [18] XIONG R, DUAN Y, CAO J, et al. Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real time power management method for an all-climate electric vehicle [J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 153-165
- [19] WERTH W, FALLER L, LIECHTENECKER H, et al. Low cost rapid control prototyping a useful method in control engineering education[C] // Proceedings of the 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, Opatija, Croatia, 2020. 711-715
- [20] NAIK N V, SINGH S P. A comparative analytical performance of F2DTC and PIDTC of induction motor using DSPACE-1104[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7350-7359
- [21] NOUREEN S S, ROY V, BAYNE S B. An overall study of a real time simulator and application of RT-LAB using Matlab simpowersystems[C] // Proceedings of the 2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference, Long Beach, USA, 2017: 1-5
- [22] GREPL R. Real-Time control prototyping in Matlab/Simulink: review of tools for research and education in mechatronics[C] // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, Istanbul, Turkey, 2011: 881-886
- [23] CHAMORRO O J, OTOYA L D G, MARULANDA J F F. Rapid control prototyping with Scilab/Scicos, RTAI-Lab for the mic955 training module of the feedback instruments[J]. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 2018, 13(3): 85-92
- [24] 吴爱华, 赵不赓, 茅靖峰, 等. 基于快速控制原型的风力发电半实物仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(3): 482
- [25] PASOLINI G, BAZZI A, ZABINI F. A raspberry pi-based platform for signal processing education[sp education][J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(4): 151-158
- [26] LEE Y S, JO B, HAN S. A light-weight rapid control

- prototyping system based on open-source hardware [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 11118-11130
- [27] MARANTOS C, SIOZIOS K, SOUDRIS D. Rapid prototyping of low-complexity orchestrator targeting cyber physical systems: the smart-the rmost at use case [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 28 (5): 1831-1845

Networked open rapid control prototyping system

HUANG Guangpu, WU Xiang, YU Li

(College of Information Engineering, Networked Control System Laboratory,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Aiming at the auxiliary design requirements including theoretical analysis, algorithm research, and product development for networked control systems, a networked open rapid control prototyping (RCP) system is proposed, which has many advantages such as simple structure, low cost, convenient deployment, and strong expansibility. Firstly, a dual embedded lightweight, plug-and-play target is built based on Raspberry Pi and STM 32 open-source hardware. Secondly, the online real-time modification function of system parameters is designed based on the Simulink environment, which can greatly simplify the parameter adjustment process. Furthermore, a networked control mode is devised based on TCP/UDP/IP protocol, and a general open hardware-in-the-loop simulation system is constructed using a personal computer (PC) as the controller. Finally, a networked control experimental platform is built with a magnetic levitation ball, and the effectiveness and superiority of the system are verified by experimental cases. The RCP system can effectively assist the analysis and design process of the networked control systems and can be used in various scientific research and educational course experiments, which has good reference and application value.

Key words: rapid control prototyping (RCP), networked control, hardware-in-the-loop, Raspberry Pi, magnetic levitation ball