**

## HUNAN UNIVERSITY

毕 业 论 文

|  |  |
| --- | --- |
| **论文题目** | 基于PCI的单自由度振动 |
|  | 平台软件系统设计 |
| 学生姓名 | 曾庆宏 |
| 学生学号 | 201407030414 |
| 专业班级 | 自动1404 |
| 学院名称 | 电气与信息工程学院 |
| 指导老师 | 江未来 |
| 学院院长 | 王耀南 |

2018 年 5月 20日

**湖 南 大 学**

**毕业论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在老师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学生签名： 日期：2018 年 5月 20日

**毕业论文版权使用授权书**

本毕业论文作者完全了解学校有关保留、使用论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本论文。

本论文属于

1、保密 ，在\_\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密√。

（请在以上相应方框内打“√”）

学 生签名： 日期：2018 年 5月 20日

指导教师签名： 日期：2018 年 5月 20日

**摘要**

VR（虚拟现实）技术，可以创建一种体验虚拟世界的人机交互系统。本课题计划并实现一个能够真实高精度再现实际环境的模拟振动平台，通过模拟真实环境中的海浪、地震、滑雪、飞行等，一方面可以为用户提供身临其境的浸入感，另一方面，可以促进VR（虚拟现实）技术在各种结构测试中的应用，例如道路模拟机，房屋结构抗震设计，海况模拟平台，飞行模拟器等等。本文基于单自由度模拟振动平台系统，主要是开发一套用于与系统下位机（控制器）交互、调试的上位机软件系统。

本文首先根据控制精度、控制需求分析了整个系统的结构，之后简单介绍模拟振动平台系统的机械结构、算法设计、硬件电路、以及下位机的软件系统。对于上位机软件系统，本文采用跨平台开发工具Qt进行开发，使其可在Windows系统和Linux系统下运行，首先介绍了其整体设计框架以及用户界面，然后对于上位机软件系统的各个模块：系统管理模块、数据处理模块、通讯模块、数据显示与保存模块，分析了其设计与实现。其中，重点介绍了动态绘图中的生产者-消费者矛盾以及双缓冲解决办法、以及基于TCP/IP应用层的通信协议制定。最后对软件系统的各个模块进行了详细测试。

**关键词：**模拟振动平台、跨平台、双缓冲机制、TCP/IP通信协议、SQL数据库、C++、Qt

**ABSTRACT**

In the field of Virtual Reality(VR) , people can experience virtual worlds through a man-machine interactive system .This topic plan to design a vibration platform, a high precision actual simulation can be reproduced on this platform .By simulating the real environment of sea waves , earthquakes, ski, flight, etc. Through this technology ,on the one hand ,It can provide users with immersion .On the other hand ,It can promote the application which based Virtual Reality(VR) of all kinds of structure test ,such as road simulator ,anti-seismic design of building structure ,sea state simulation platform , the flight simulator , etc. Based on the single-degree-of-freedom simulation vibration platform system ,this paper mainly develops a set of upper computer software system for the interaction and debugging of the system’s lower computer(the controller).

At first, this paper analysis the whole system structure according to the requirements of control accuracy, after this ,the paper briefly introduces the mechanical structure of the simulated vibration platform system, algorithm design, hardware circuit and the software of lower computer system .For upper software system, first of all ,we introduces the design framework and user interface, then for upper computer system modules: system management module, data processing module, communication module, data displaying and saving module, analyses the design and implementation of that .Among them, the author focuses on the producer-consumer contradiction in dynamic drawing and the double buffering solution, and the communication protocol based on TCP/IP application layer .Finally, the software system modules are tested in detail.

**Keywords**: Simulated vibration platform, double buffering, TCP/IP protocol, SQL database, C++

**目录**

[摘要 1](#_Toc9949)

[ABSTRACT 2](#_Toc5529)

[第一章 绪论 3](#_Toc32573)

[1.1 课题背景及研究意义 3](#_Toc19635)

[1.2 国内外研究现状 3](#_Toc349)

[1.3 本设计的主要内容和章节安排 4](#_Toc6060)

[第二章 模拟振动平台系统**总体介绍** 5](#_Toc21899)

[2.1 总体框架 5](#_Toc120)

[2.2 机械设计 6](#_Toc23877)

[2.3 硬件系统 7](#_Toc19599)

[2.4 算法研究 7](#_Toc21068)

[2.5 软件系统 7](#_Toc21068)

[第三章 上位机软件系统设计 8](#_Toc22579)

[3.1 系统架构设计 8](#_Toc2904)

[3.2 数据库设计 9](#_Toc17612)

[3.2.1 SQL数据库简介 9](#_Toc31607)

[3.2.2 概念模型 9](#_Toc23378)

[3.2.3 数据库表设计 12](#_Toc26972)

[3.3 通信协议设计 14](#_Toc19165)

[3.3.1 串口通信简介 14](#_Toc1576)

[3.3.2通信模块总体设计 15](#_Toc27855)

[3.3.3 通信过程 16](#_Toc1905)

[3.3.4 帧结构 17](#_Toc17207)

[第四章 系统实现 18](#_Toc18070)

[4.1 数据库访问模块 18](#_Toc19288)

[4.2 串口通信模块 19](#_Toc14241)

[4.2.1 串行通信基本参数的初始化 19](#_Toc19847)

[4.2.2上位机通信设计 20](#_Toc23621)

[4.3 系统功能模块 21](#_Toc23726)

[4.3.1 基于SQL Server的病人信息管理 22](#_Toc15288)

[4.3.2 训练方案 22](#_Toc2875)

[4.3.3 压力数据图表分析 23](#_Toc28285)

[4.3.4 系统设置 24](#_Toc18507)

[第五章 系统调试及测试 26](#_Toc1366)

[第六章 总结与展望 30](#_Toc12100)

[6.1总结 30](#_Toc3322)

[6.2 展望 30](#_Toc9543)

[参考文献 31](#_Toc15426)

[致谢 33](#_Toc15130)

1. **绪论**

**1.1 课题背景及研究意义**

随着近些年来VR（虚拟现实）技术的发展，其不仅可以用于用户的日常娱乐，而且可以用于在工业生产，基础设施建设中模拟再现一些真实极端环境，从而对各种装置的工程性能进行检验和评判[2]（基于电液振动台的模型参考自适应控制的研究） 。模拟振动平台通过高精度控制算法，可以真实再现地震、道路状况、海浪、以及一些飞行真实场景，有助于实现房屋结构抗震理论研究和实际设计，亦可以实现机动车零部件和整车可靠性实验，对轮船和海洋工程装备制造也有莫大帮助。模拟振动平台高精度实时再现实际环境技术，目前国内外已有公司开始相关研究，但是成品大多来自国外进口。若能将此技术国产化，不仅可以用于我国虚拟现实中实现更深的浸入感，对于国家的国计民生、工业发展也有着重要的意义，有助于推动我国产业的升级

**1.2 国内外研究现状**

* **国内外现状**

模拟振动台是舰船、飞机、海工装备在研发和使用过程中最重要的检验和模拟使用设备，也是汽车底盘、车身、车载电子设备的实验室研究中最重要的一环，同时，在土木工程领域，是建筑抗震性能研究中最重要的设备，但是关键技术一直被美国的MTS公司、英国的Servotest公司垄断，国家每年都要花费十几亿美元外汇从国外购买。由于上述设备集成了机械、电子、液压、传感器、计算机软硬件等多门类的关键技术，使用和维护都比较复杂，从国外购买的设备的使用和售后都非常不便，国防和相关关键部门的设备又不能请美国等西方国家的公司去现场维护，这一切，都极大制约了我国在相关领域的研发进度[8]。

* **(2)发展趋势**

近年来，国内投入到电液伺服模拟平台的专业厂家，研究机构也在逐步增多，中科院力学所、哈尔滨工业大学、华中科技大学、哈尔滨工程大学和浙江大学液压所，都做过类似的科研，发表在足底压力检测领域，国内外科学家都进行了深入的研究和探索。目前正向产品化、精细化方向发展，并注重与医学领域的交叉研究。本课题亦是为了帮助医生解决骨科临床领域遇到的难题，与骨科医生合作开发完成。因此，本课题在康复训练、交叉学科和可穿戴设备领域都具有很大的研究价值。

**1.3 本设计的主要内容和章节安排**

本课题研究设计一套便于与模拟振动平台下位机通讯，调试，便于用户操作的上位机软件系统。本文通过对振动平台的工作需求分析，从而得到上位机软件系统的总体框架，对动态绘图和应用层通信协议进行设计，完成上位机界面和数据库开发。全文章节结构如下：

第一章介绍了本课题的背景、国内外相关研究现状和全文的段落安排。

第二章分析了系统的需求，概括说明模拟振动平台的整体结构。然后，介绍了振动平台的机械结构设计、算法研究、硬件电路、以及软件系统。

第三章是上位机软件系统设计部分，通过对整个系统的控制需求进行分析，根据不同功能，系统由以下四个部分组成——系统管理模块、数据处理模块、通讯模块、数据显示与保存模块分析界面。然后通过分析上位机动态绘图中的生产者-消费者矛盾，得到本系统的数据结构，并应用双缓冲机制解决问题。最后是应用层的通信协议，重点介绍了基于TCP/IP的通信协议以及上下位机的通信过程。

第四章首先介绍了数据库访问技术，并把数据库的添加、查找、更新、删除操作封装成函数。然后设置串口通信参数，介绍了通信实现过程。最后是本系统的用户界面实现过程，重点论述了C#绘制折线图的方法和数据库操作。

第五章是系统的测试与调试，通过对各个界面进行调试，分析康复训练管理系统的各个模块功能。

第六章总结全文，概括本文创新点，并展望本课题的未来。

1. **模拟振动平台系统总体介绍**

**2.1 总体框架**

本项目研究的主要内容为高精度大型模拟振动平台的随机波形控制，而研究内容只要包括四个部分：第一部分从机械系统的角度出发，如何最大限度减小振动台的非线性，研究不同建模对振动台进行控制的影响；第二部分从算法角度出发，在机械角度的基础上，通过算法实现高精度实时复现；第三部分从硬件电路的角度出发，通过全数字工作方式的控制器，实现多通道模拟振动台的随机波实时波形复现，【地震模拟振动台的时域复现控制策略研究】

模拟振动平台主要由振动台体、振动台台面机械系统、位移，加速度，速度传感器、电源、和控制系统组成。模拟振动平台利用传感器采集三参量控制信号，并将其反馈回控制系统，通过不同的控制算法，使得振动平台可以高精度跟踪随机输入波形，从而完美复现波形。系统框图如下所示：

参考

信号

控制

系统

驱动

信号

电动

激振系统

台体及台面机械系统

试件夹具

传感器

控制

信号

上位机软件

调节

信号

43 ye

**2.2 机械设计**

机械与动力部分的设计可以参考市场上成熟额进口产品的设计原则，需要解决的是高频电动伺服动作器的国产化，具体研究内容包括以下三个部分：

* 提高电动伺服动作器的最高响应频率；
* 优化机械结构，减小系统摩擦带来的非线性影响；
* 实现高频响应电动伺服动作器的国产化

本部分的技术关键包括：

1. 振动平台的运动学、动力学建模：

推导振动台运动学、动力学表达式，具体研究振动台位姿随时间的变化规律以及振动台所受力与其运动规律之间的关系

1. 动力结构设计：

利用振动台的动力学模型，用最大功率点相等的方法求取动力机构的参数，选出液压控制元件和液压驱动元件，并检验设计方案是否满足工况要求

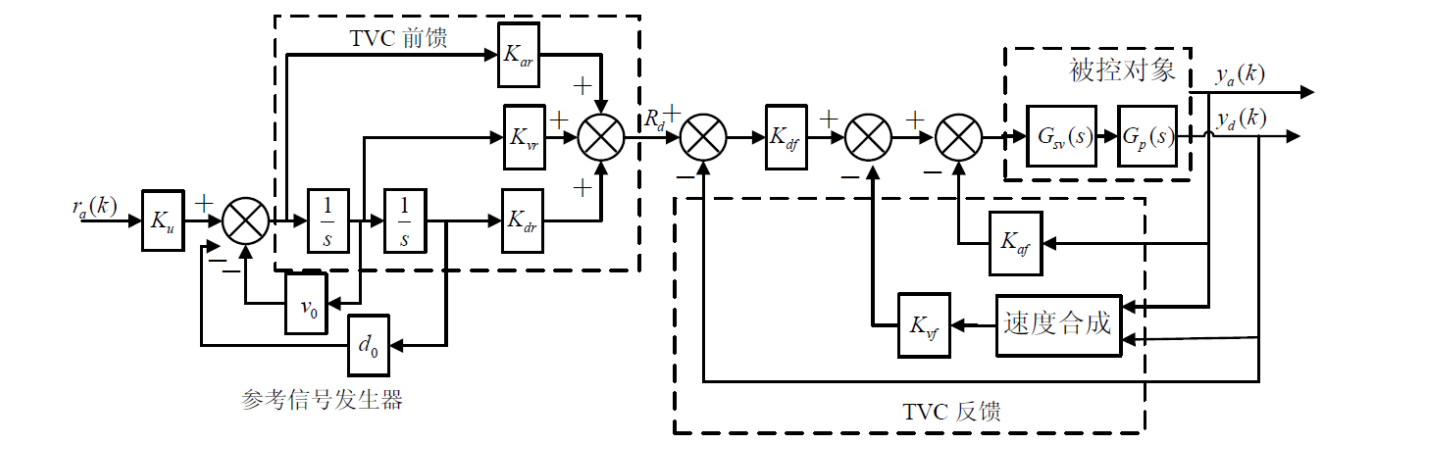
**推导振动台运动学、动力学表达式，运用MATLAB和ADAMS软件分别建立振动台的动力学的数学模型，对模型进行仿真验证。运动学分析是从几何角度去描述和研究物体位置岁时间变化规律，本项目中具体是要研究振动台的位姿随时间变化的规律。振动台是一个复杂的并联机构，对于并联机构在空间的位姿，一般引入有限个变量进行描述，在运动学中对于物体位姿的描述有多种方法，比如：欧拉四元数法、方向余弦坐标、欧拉角坐标、卡尔丹坐标等。本项目拟采用欧拉角坐标方法对振动台的位姿进行描述。**

**2.3 算法研究**

由于模拟振动平台系统存在强耦合，高滞后，采用传统的控制算法效果并不能很好地满足跟踪精度，本项目采用下列控制算法来改善控制效果：

1. 三参量控制算法：

**在设计反馈控制器的过程中，为了补偿振动台在单纯的位移控制情况下工作频宽较窄阻尼较小的缺陷，研究采用三参量控制算法来更好的实现不同频段的加速度、速度、位移控制。而三参量控制中的位移控制用于低频段控制、速度控制用于中频段控制，加速度控制用于高频段控制，从而能够实现增大系统阻尼，拓宽系统工作频宽的目的。其控制框图如下：**



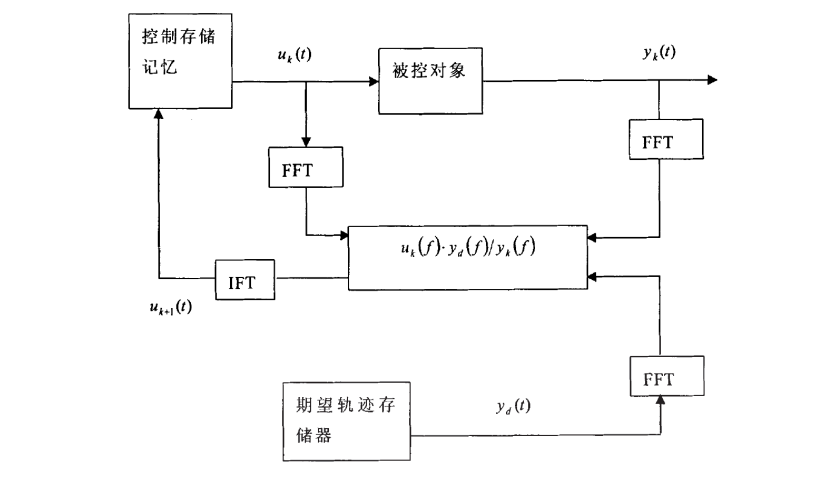
**本项目根据模拟振动平台控制系统的结构和工作性能，对振动台系统进行一定的线性化处理，搭建系统的数学模型。在位移控制的基础上，增加加速度和速度环节，设计三参量反馈控制器和三参量前馈控制器。三参量前馈控制的目的是对消系统位置闭环传递函数中距离虚轴较近的极点从而拓展系统的频宽；三参量反馈控制将在基于位置闭环的基础上，通过加速度反馈和速度反馈来提高系统的阻尼比和固有频率，从而在保证系统稳定性的基础上拓展振动平台系统的工作频宽。**

1. 迭代学习控制算法

**在振动台的控制过程中，由于本系统存在着很大的非线性因素，仅采用伺服控制方法虽然可以控制平台运动，但是系统的输出响应信号与输入的期望信号之间仍然存在较大偏差。因此我们拟在伺服控制系统的外环再增加基于迭代学习控制算法的外闭环构成双闭环控制系统，对驱动信号进行迭代补偿，使系统的响应能够高精度的复现期望的波形信号。**

**迭代学习控制具有严格的数学描述，在对具有较高位置的精度要求、较强的非线性耦合和精确轨迹跟踪控制要求的动力学系统研究中有广泛应用。迭代学习算法在应用于期望轨迹跟踪时，利用前一次的初始信息和不断累积的控制经验得到跟踪控制误差，通过重复学习不断修正下一次的控制量，得到一个有效的输入控制信号，使得被控系统在有限时间和区间上能过比较精确的跟踪期望轨迹。**

**迭代学习控制在结构上包括开环学习和闭环学习，闭环学习在收敛条件、收敛速度和抗干扰能力等方面都优于开环，但是运算量要大于开环，而优于伺服控制系统已经能使系统的稳定性得到保障，因此本项目拟采用开环迭代学习控制律，通过对输入控制信号不断迭代修正以使系统的输出响应跟踪期望的输出波形来模拟预期的振动环境。其原理如图所示：**

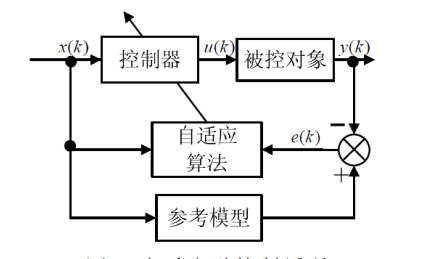


1. 自适应逆控制算法

**在迭代学习控制算法中，需要对系统的频响函数进行估计，并采用逆频响函数对系统进行输入信号的更新，因此振动台系统的频响函数的测量和辨识的精度对于迭代收敛的速度和波形复现的精度会有很大的影响，使得该控制方法可能存在以下问题：(1） 由于系统的频响函数是离线辨识的，在进行试验时认为系统的动态特性是不变的，但是实际中系统可能存在时变；（2）迭代学习控制方法需要进行大量的 FFT和 IFFT 变换来辨识系统的频响函数并产生修正的输入信号，而时域波形复现是瞬态变化的是瞬态变化的，采用 H1 估计法无法实现实时估计系统的频响函数。**

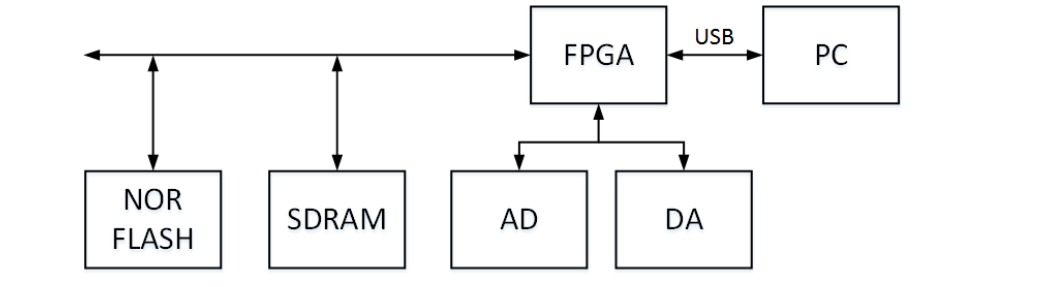
**对此，本项目拟采用自适应逆控制方法，将期望的输出波形信号通过一个补偿滤波器产生被控系统的输入信号，使系统的输出波形收敛于参考波形，从而使振动台输出期望波形。**

**常用的自适应滤波算法包括最小均方误差（LMS）算法和递推最小二乘（RLS）算法两类。最小均方误差（LMS）算法计算量小，易于实现，但存在着收敛精度和收敛速度之间的矛盾，通常采用变步长的策略来解决这一矛盾。递推最小二乘（RLS）算法，具有快速收敛性，但是在计算复杂度和稳定性方面表现较差。本项目将结合两种算法的优缺点具体分析，对两种算法进行算法实现和比较。自适应逆控制原理图如下：**

****

**2.4 硬件系统**

全数字控制器的硬件电路和组成方案如图所示，下面介绍主要模块和工作原理。



1. FPGA

采用高性能的 FPGA 作为整个系统的控制器， FPGA 作为可编程逻辑控制芯片，可以实现系统的 AD、 DA 和 USB、以太网转换接口的需要，同时可以高速进行大量并行计算，为数据处理和信号传输提供硬件支持。

1. 信号的输入与输出采集卡

信号的输入与输出通道包括模拟量通道和数字量通道，使用 A/D 输入通道接受指令参考电压信号以及传感器输出的振动台位移、加速度信号，接收到的信号经 FPGA 的控制算法处理后，由 D/A 模块转换为控制电流/电压信号输出给伺服阀。

1. 硬件部分主要工作原理

如图所示，控制系统中的 FPGA 实现实时闭环控制算法、模拟输入/输出通道的控制、数字输入/输出的控制、并实现了与 USB 接口和以太网口的通讯。系统中具有 NOR FLASH 芯片，从而全数字控制器不但可以作为分布式控制器，由 PC 下载 FPGA 代码，还可以作为嵌入式控制器使用，从 NOR FLASH 中自动加载代码至 FPGA 中。

* 1. **软件系统**
  2. 上位机

全数字控制器的上位机软件提供了友好的人机交互界面，能实现参数设置，实验过程监控，实验数据保存等。 上位机软件按照功能可划分为 4 个模块，即：系统管理模块、数据处理模块、通讯模块、数据显示与保存模块。

系统管理模块功能主要包括:软件系统初始化、控制参数设置、通道参数设置、系统文件管理；

数据处理模块功能主要包括：对PC的消息，参数地址接口进行定义，并通过以太网口与下位机进行消息通讯，实验数据信号的读取和分配等功能；

通讯模块功能主要包括：采用USB和TCP/IP通讯协议和从机互相收发数据，进行通讯。

数据显示与保存模块功能主要包括：实现实验数据信号的实时显示和保存，使用户能够方便地对实验过程进行监控。

* 1. 下位机

下位机实现信号的采集、传输、处理与输出，并利用控制算法实现控制功能，是全数字控制器的核心部分。下位机分为三个层次，即系统管理层、信号层、算法层。

系统管理层是整个全数字控制器的框架，主要调配信号层和算法层完成相应的运算。

信号层的主要功能是在系统管理层的调配下完成信号采集，为算法运算提供数据，同时将算法输出的数据转化为电信号输出，同时将反馈信号和指令信号通过系统管理层发送至 PC。

算法层位于整个程序的最上层，它在信号层提供的数据接口基础上，在系统管理层的调配下完成算法运算，实现控制算法。

1. **上位机软件系统设计**

**3.1 软件系统需求分析**

通过对第二章的振动平台系统各部分的分析，我们得到振动台上位机软件系统需要实现以下功能：

系统与用户的交互，实现试验参数设置、操作命令发送、控制过程监控、数据显示与存储、实验结果产生等功能。

振动平台软件应具有控制功能和辅助功能，可以根据不同的用户需求配置响应的控制器和软件功能。具体功能如下：

1. **控制功能**

* **随机系列**
* **随机试验**
* **随机地震波冲击试验**
* **正弦加随机试验**
* **随机加随机试验**
* **…**
* **冲击系列**
* **典型冲击试验**
* **冲击响应谱试验**
* **瞬态冲击试验**
* **…**
* **正弦系列**
* **正弦试验**
* **谐振搜索与驻留试验**
* **…**

1. **辅助功能**

* 系统校准
* 离线浏览
* 波形编辑器
* 信号报警
* 波形显示
* …

**3.2 上位机软件系统整体架构设计**

**3.2.1 基本功能框图**

通过上一节对系统需求的分析，可以知道振动平台的上位机软件管理系统需要实现以下四个基本功能：

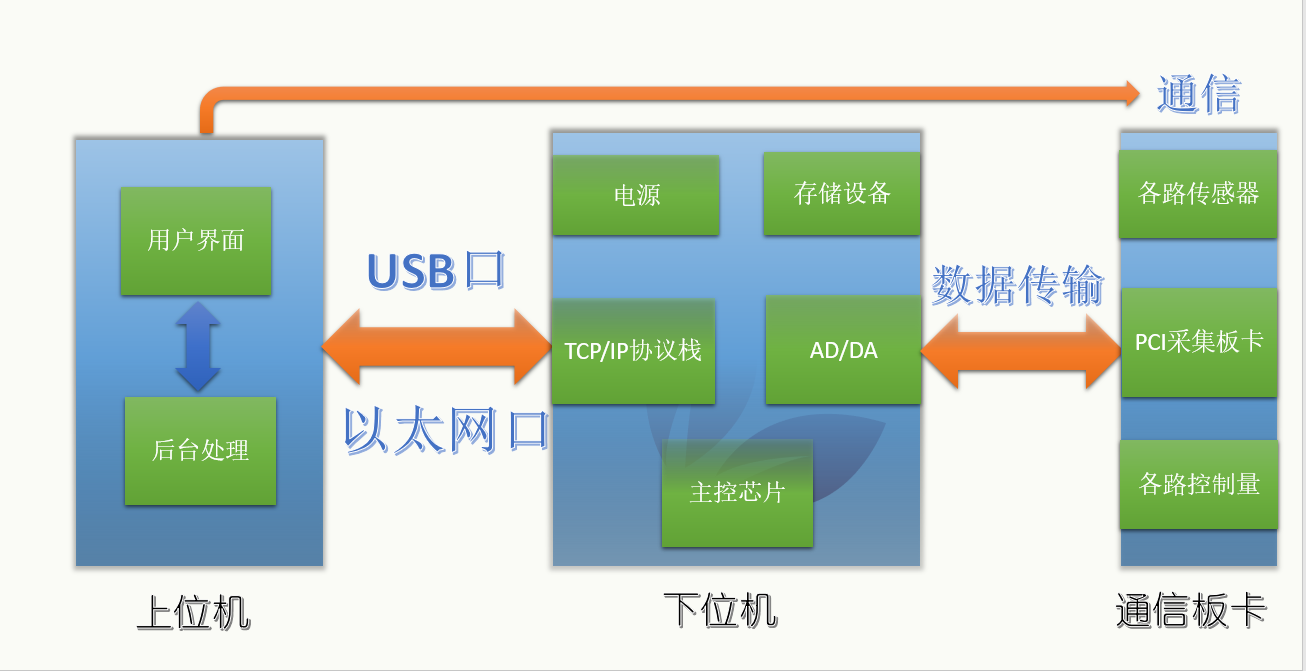
* 读取系统的基本初始化文件，设置本次试验参数等等。
* 本系统通过以太网或USB口，以通信协议的方式将指令下达到对应的控制器中，下位机接收到指令后，立马产生控制动作
* 下位机将振动平台的状态实时上传到上位机，并保存至数据库
* 将振动平台的实时状态以动态曲线绘制成时间表图，根据波形进行试验状态分析

对于以上需要实现的基本功能，我设计了以下四个模块：模拟振动平台基本信息界面、控制参数信息界面、数据图表分析界面以及系统设置界面。

整体框图如下所示：

**3.2.2 总体架构设计**

宏观上来看，振动平台软件系统的主体结构分为下位机设计和上位机设计两个部分，框架如图所示。上下位机用以太网和USB技术实现无线连接，为了保证数据的无差错传输，我们采用基于TCP/IP的通信协议进行数据通讯，严格定义帧结构。上位机是PC端，在Qt中采用C++开发，具有良好的跨平台特性：

****

**3.3 软件开发平台简介**

常见的用于上位机界面开发的语言有C++、C#和VB。采用C++语言开发，程序运行高效，长度也相对简短，可移植性高，。基于C++语言的设计在Qt5开发平台上，利用Qt5固有的开发库，可以方便的进行桌面应用程序的开发设计。除此之外，C++语言还有以下两大优点：C++的基本语法和C语言度相似，对于新手来说上手较快；C++的多态和封装，使得整个系统具有很高的可移植性。

而Qt是桌面，嵌入式和移动的跨平台应用开发框架。支持的平台包括Linux，OS X，Windows，VxWorks，QNX，Android，iOS，BlackBerry,Sailfish OS等, Qt拥有自己的集成开发环境（IDE），名为Qt Creator。它运行Linux，OS X和Windows上，提供智能代码完成，语法高亮，集成帮助系统，调试器和分析器集成以及所有主要版本控制系统（例如git，Bazaar）的集成。Qt跨平台可移植性非常好，故本项目采用Qt和C++进行编写。

**3.3.2通信模块总体设计**

通信技术是康复训练管理系统的关键技术，即上位机如何发送请求到下位机，以及下位机如何反馈数据到上位机。本节重点在于详细解析通信过程中，上下位机的通信协议和通信过程，这部分内容是本课题的重点。



从机2

图3-8 主从结构示意图

康复训练管理系统需要将多位病人的训练方案下载到对应的下位机，同时需要将病人的实时记录上传到数据库中，这就涉及到多机通讯问题。在工程设计中，利用单片机的串行通信接口进行多机通讯通常采用总线型主从控制方式，如图3-8所示。所谓主从控制方式，即在整个系统中，只有一台主机——PC端（上位机），其余的都是从机（下位机）。在物理结构上，主机串行接口的RXD引脚与全部从机的TXD引脚连接，而主机接口的TXD引脚与全部从机的RXD引脚连接。在本课题中，由于采用了蓝牙技术，不是将引脚在通过导线直接相连，而是通过无线连接，其本质是一样的。在主从式通信方式中，主机发送的数据可以被多个从机接收，但是从机发送的信息只能被主机接收。因此，为了识别不同的从机，需要事先对从机进行编号，每台从机的地址占用一个字节（8位二进制），范围是0x00~0xFF。

在主从控制方式中，主机起主导作用。主机先发送请求到从机，从机接收到主机发送来的数据，首先判断所接受的帧是否是正确帧。如果是正确帧，就进入对应的处理函数，并将下位机的数据及时发送到上位机中。在上下位机通信过程中，从机不能主动向主机发送请求，只能被动的接收数据，并对主机的请求进行反馈。主机接收到从机的反馈后，将依据反馈的数据判定是否需要继续发送。

**3.3.3 通信过程**

采用主从控制方式，在上下位机的通信过程中，一个存在四个过程：上位机发送请求、下位机接收数据、下位机发送反馈以及上位机接收反馈，如图3-3所示。其中，上位机发送和下位机接收的数据是相同的，下位机发送和上位机接收的数据是相同的；即➀和➁的数据是同一组数据，➂和④的数据也是同一组数据。

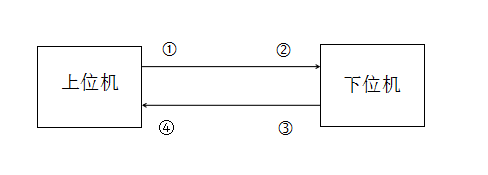


图3-9 通信过程

（1）医生作为用户，在界面输入病人的训练方案等数据。本系统将用户输入的数据封装成帧，通过串口发送到下位机。在封装的过程中，除了医生本身输入的数据，还需要加上起始字符、从机地址、功能码、校验字符等帧头和帧尾。

（2）下位机为了提高效率，采用中断控制方式，将上位机发送来的数据先存到“接收缓冲区”。然后对接收缓冲区中的数据进行扫描判定，判断是否存在符合条件的“正确帧”。

（3）如果找到符合规定的正确帧，下位机将根据功能码将数据及时反馈到上位机。

（4）上位机通过串口接收来自下位机的数据，先把数据放到上位机的“接收缓冲区”，然后再判断是否存在符合条件的正确帧。如果存在正确帧，将根据反馈的数据判断是否需要继续向下位机发送数据。

**3.3.4 帧结构**

为了保证通信过程的无差错传输，我们参照传统的ModBus通信协议，定义完整的帧结构，如表3-5所示。如果接收到的帧严格符合上述定义，则称之为“正确帧”。

表3-5 帧结构

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 起始字符 | 从机地址 | 数据长度 | 功能码 | 数据区域 | 校验字符 |
| 1字节 | 1字节 | N+1字节 | 1字节 | N字节 | 1字节 |

起始字符用于判断一帧数据的开始，本课程设计中，通常规定起始字符为0xFE。为了识别不同从机，需要对从机进行编号。由于采用了主从式机构，从机接收到主机发送的请求，首先判断从机地址是否与自己一致，只有一致才能执行下面操作。特别规定，0x00是广播地址，所有从机都要作出反馈。数据长度包括功能码和数据区域的长度。如果数据区域有N个字节，那么数据长度就是N+1。功能码用于表示该帧需要执行的功能和命令。为了编程方便，在编程前采用宏定义的方式将功能码都用变量来表示。数据区域的长度不等，用于存储用户真正需要发送的数据，例如病人的训练方案、系统时间、传感器采集的压力等。为了防止数据在传输过程中受到干扰而发生错误，我们引入校验字符，通常作为一帧数据的最后一个字节。