

哈尔滨工业大学

毕业设计

论文题目 直线电机驱动的运动
控制系统设计

译文题目 Linear Motor Control
System Design

专 业 自动化

学 号 1042510115

学 生 姜海蓉

指 导 教 师 马洁

答 辩 日 期 2008.07.01

摘 要

本文是以开发面向半导体封装的高速、高精度系统为目标，以两自由度的高速、高精度 XY 平台为控制对象，进行了由直线电机驱动的单轴的运动控制系统的设计。

本文首先对由交流永磁同步直线电机驱动的机电运动控制系统进行了系统辨识，选择频谱丰富且能够持续激励的伪随机信号作为输入信号。将驱动器设置在模拟力矩模式下，利用计算机将伪随机信号发送给运动控制卡，并通过运动控制卡的 A/D 转换器将其转化为模拟电压输出给驱动器，并利用驱动的编码器等价输出采集位置反馈信号。将输入数据和采集到的输出数据在 Matlab 的系统辨识工具箱中进行系统辨识，得到系统的传递函数模型。

在系统的数学模型建立后，基于所建立的模型进行控制器的设计。采用速度环、位置环双环控制模式，通过对 PI 控制器、PDF 控制器和 PDFF 控制器的性能比较，选择 PDFF 控制器作为速度环的控制器，PID 控制器作为位置环的控制器，并利用基本 CRS 算法对速度环和位置环上的控制器参数进行整定。

将整定好参数的控制器在 Matlab 的 Simulink 工具箱中进行仿真。将仿真得到的符合系统性能要求的控制器应用于实际系统中，进行调试。

关键词 直线电机 系统辨识 PDFF 控制器 CRS 算法

Abstract

In order to develop a high-speed and high-precision positioning system for semiconductor packaging, this dissertation takes the high-speed and high-precision XY platform as the controlled objects, designing a single-axis motion control system driven by the linear motor.

First of all, this dissertation makes system identification for the mechanical and electrical motion control system driven by the AC permanent magnet synchronous linear motor. Choose the informative and persistent exciting signal, the Pseudo-Random Binary Signal as the input in the process of identification. Set the driver to be analog torque mode, and use the computer to transmit the input signal to the motion control card. Through the A/D converter of the card, the signal becomes analog voltage signal which is to be delivered to the driver. Use the equivalent output of the driver to get the position feedback signal. Then use the system identification toolbox of Matlab to get the transfer function model.

After the model has been established, this dissertation designs a controller based on the model. The controller has two control loops, the velocity loop and the position loop. From comparison of PI controller, PDF controller and PDFF controller this dissertation choose the PDFF controller as the controller of the velocity loop and PID controller as the controller of the position loop. Then this dissertation uses the basic CRS method to tune the parameter of the velocity loop controller and the position loop controller.

After getting the parameters of the controllers, this dissertation use Simulink toolbox of Matlab to do the simulation with the model and the controller. Then use the controller which can meet the performance requirements in the actual system, then to debug it.

Keywords linear motor system identification PDFF controller
CRS algorithm

目录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 国内外在该方向的研究现状及分析	1
1.2.1 直线电机的建模	2
1.2.2 直线电机的运动控制	3
1.3 本文主要研究内容	3
第 2 章 系统组成	5
2.1 概述	5
2.2 执行元件	5
2.3 功率放大元件	7
2.4 测量元件	9
2.5 控制器	9
2.6 系统硬件构成	11
2.7 本章小结	11
第 3 章 永磁同步直线电机的系统辨识研究	12
3.1 引言	12
3.2 系统辨识的方法	13
3.2.1 系统辨识的步骤	13
3.2.2 系统辨识工具	16
3.2.3 模型结构选择	17
3.3 系统辨识实验设计	18
3.3.1 输入信号的选择	18
3.3.2 采样周期的选择	22
3.3.3 其他条件选择	23
3.4 直线电机系统辨识	24
3.4.1 数据采集	24
3.4.2 辨识结果分析	26

3.4.3 模型准确性验证	28
3.5 本章小结	29
第 4 章 控制器设计方法研究	30
4.1 引言	30
4.2 控制器设计	30
4.2.1 PID 控制器	30
4.2.2 PI 控制器	32
4.2.3 PDF 控制器	33
4.2.4 PDFF 控制器	34
4.3 CRS 算法整定控制器参数	35
4.4 本章小结	36
第 5 章 系统实现	37
5.1 速度环仿真及实验结果分析	38
5.2 位置环仿真及实验结果分析	41
5.3 本章小结	44
结论	45
致谢	46
参考文献	47
附录 1	49

第1章 绪论

1.1 课题背景

传统的机床和芯片封装设备多采用旋转电机，旋转电机在做直线运动时，需要通过齿轮、带、滚珠丝杠等传动装置，进行力矩、速度等运动方式的变换。由于有中间传动装置，所以整部机器存在着体积大、效率低、精度差等问题，已经远远不能满足现代微电子封装产业的技术需求^[1]。与旋转电机相对应，直线电机是一种利用电能产生直线运动的电机，它可以直接驱动机械负载作直线运动。直线电机驱动的进给系统取消了中间机械传动环节，提高了驱动系统的进给速度、加速度、刚度和定位精度，它结构简单，噪声低，行程不受限制。它通过电能可以直接产生直线电磁推力，在运动过程中初级与次级间无直接机械接触，所以电机无机械磨损，能够很好地满足现代微电子封装技术的发展需求^[2-3]。

本课题的目的是针对微电子封装设备的应用，设计出利用直线电机驱动的高速高精度的XY平台。XY平台是众多机械的基本组成模块，如机床、微电子封装设备等。随着微电子向小型化、大规模持续迅猛发展，要求封装设备精度越来越高，速度（加速度）越来越快，现有的设备难以持续满足这一要求，必须研究新型的高速高精度的封装设备。

1.2 国内外在该方向的研究现状及分析

直线电机的发展经历了漫长的历史。早在1845年Wheat Stone就提出和制作了略具雏形的直线电机。当时是想用它来推动织布机上的梭子，不过没有成功，但这一想法导致了现代电磁炮的产生。在1905年，有人提出用直线电机作为推动列车的动力，虽然当时由于其在经济性，可靠性等方面没有竞争力，未能实现。可是研究人员却对这个想法给予了持续的关注，近几十年来，磁悬浮列车终于在德国、日本等国建立起试验和试运行线路，获得了试验性的应用和成功。1945年，美国西屋电气公司首先研制成功电力牵引飞机弹射器，随后，美国利用直线电机制成用作抽汲钾、钠等液态金属的电磁泵。1954年，英国皇家飞机制造公司利用双边扁平型直流直线电机制成了发射导弹的装置。

但是这个时期直线电机始终没有能够得到真正的应用。直至20世纪50年代中期,控制、材料技术的飞速发展和新型控制元器件的不断出现为直线电机的广泛应用打开了方便之门。这一时期世界各国出现了许多直线电机的产品,例如美国XYNETICS公司生产的自动绘图仪、法国生产的直线电机记录仪、Edwards of Enfield公司生产的铝和有色金属工业用的新型挤拉机、日本三洋公司生产的直线电机驱动的电唱机、英国Herbert Morris公司生产的桥式吊车、传送带和一般机械搬运设备等。同时,直线电机理论也取得了很大的发展,有关的文献和书刊不断出版,基于电磁场理论的直线电机分析与计算的文章也被陆续报导,超声波直线电机、微步距直线电机、薄膜直线电机等新原理直线电机也不断涌现。特别是近10年来,随着机床向高速化、精密化方向的发展,直线电机开始被用于机床伺服进给系统中,而且发展十分迅速。

国外直线电机从诞生到现在已经经历了从探索实验、开发应用到实用商品化三个阶段,近年来发展迅速。我国直线电机的研究和应用发展是从70年代开始的,经过各大高校和科研院所的研究,直线电机的控制技术也有了飞速的发展,正向伺服化、小型化、高推力化大踏步前进,逐渐应用于高速高精度的机电运动控制系统之中^[4]。

1.2.1 直线电机的建模

对于直线电机驱动的机电运动控制系统的建模,国内外许多学者都进行了相关的研究,并取得了显著的成果。高速高精度系统呈现非线性、高阶次、多变量、快时变、强耦合等特点,因此这类系统的模型比较难以建立,丁汉^[5]等利用各种动力学理论和控制理论对此类系统的建模进行了深入的研究。Shigeru Futami^[6]等则利用动力学行为的计算机仿真与牛顿-欧拉法相结合的方法对系统进行建模,研究由交流直线电机驱动的采用滚珠导轨的精密定位平台的微动力学问题,并根据其微动力学特性,分别在平台粗定位和精定位时实施有效地控制。M.Jouaneh^[7]等利用参数辨识法,建立了XY平台的动力学模型,并利用频率响应试验数据所描述的动力学特性来建立数学模型,在此基础上设计了带有PID闭环控制器和切比雪夫低通滤波器的控制器,所设计的闭环控制系统的稳定时间是开环系统的三分之一。

虽然对于直线电机驱动的系统可以采取很多方法进行数学模型的建立,如采用机理建模、系统辨识建模、机理分析和系统辨识相结合的建模方法。但是由于直线电机驱动的机电系统在运动时可能存在摩擦阻力的影响和电机

本身边端效应等的影响，无法通过机理建模准确地建立系统的模型，而采用系统辨识的方法进行系统建模可以得到较准确的模型。

1.2.2 直线电机的运动控制

直线电机与旋转电机不同，存在边端效应，钟扬^[8]等人基于矢量控制的思想，提出了PID控制与现代控制理论相结合的改进控制技术。直线电机直接驱动XY定位平台在高加速度运动时需要承受巨大振动，为解决此问题，Z.Z.Liu^[9]等利用基于定量反馈理论(QFT)的跟踪控制策略，其内环是速度控制器，外环是位置控制器，另有一自动调节的反馈补偿器，并专门设计了高阶速度控制器来抑制共振，基于上述控制策略的XY定位平台最大加速度可达到6.8g。也就是在建立好模型并验证符合要求后，要通过仿真选择合适的控制器，即对速度环、位置环的控制器进行设计。从现在工业领域的应用情况来看，在速度环上采用PI控制器、PDF控制器或PDFF控制器都可以得到很好的效果，在位置环上则多采用PID控制器。并可以根据系统的需求加入前馈或引入一些辅助控制方法，或在系统的适当环节上加入滤波器。

直线电机优点虽多，却也还有一些缺陷，直线电机的齿槽效应和端部效应会引起推力波动^[10]，推力波动会使直线电机在控制上比较困难，并且难以达到所需要的定位精度和重复精度，这也是目前直线电机没有广泛应用的一个重要原因。

总的来说，虽然在精密定位平台控制中，各种智能控制方法已有人作了相关的研究，有一些经验可借鉴，但在实际中尚有些问题没有得到很好的解决，应用上仍受到限制。相对来说，PID控制器简单、易行且便于实施，目前仍是工业中广泛应用的有效控制方法，但其实时性和参数调节繁琐。因此针对实际情况，寻找合适的控制策略，是研究XY定位平台机电耦合控制系统控制方法的关键。而以PID控制策略为基础，加以扩展和开发的相关控制方法，就具有了相对较高的现实意义^[11-13]。

1.3 本文主要研究内容

本文主要以直线电机驱动的XY平台的一个轴为控制对象进行直线电机驱动的机电运动控制系统的设计。

该系统所要达到的性能指标为：

- (1) 定位精度小于 $5\mu\text{m}$;

- (2) 最大加速度大于 5g;
- (3) 调整时间小于 0.01s。

全文编排如下：

第 1 章 课题的研究背景和意义，综述国内外相关领域研究概况，并提出主要研究内容。

第 2 章 系统组成。对直线电机驱动的机电运动控制系统进行方案设计，选择系统所使用的执行元件、驱动器、测量元件和控制器。

第 3 章 直线电机建模。建立直线电机驱动的运动控制系统的数学模型，通过系统辨识的方法建立被控对象的传递函数模型。

第 4 章 控制器设计。对各种控制器进行比较，选择适合本系统的控制器，并提出用于控制器参数整定的 CRS 优化算法。

第 5 章 系统实现。将由 CRS 算法整定好参数的控制器，在 Matlab 的 Simulink 工具箱中进行仿真，验证其可行性。将验证可行的控制器应用于实际系统之进行实验和调试。

第2章 系统组成

2.1 概述

一个完整的运动控制系统一般是由控制器、功率放大元件、执行元件和测量元件组成，其中控制器一般由计算机和运动控制卡组成，其结构如图 2-1 所示：

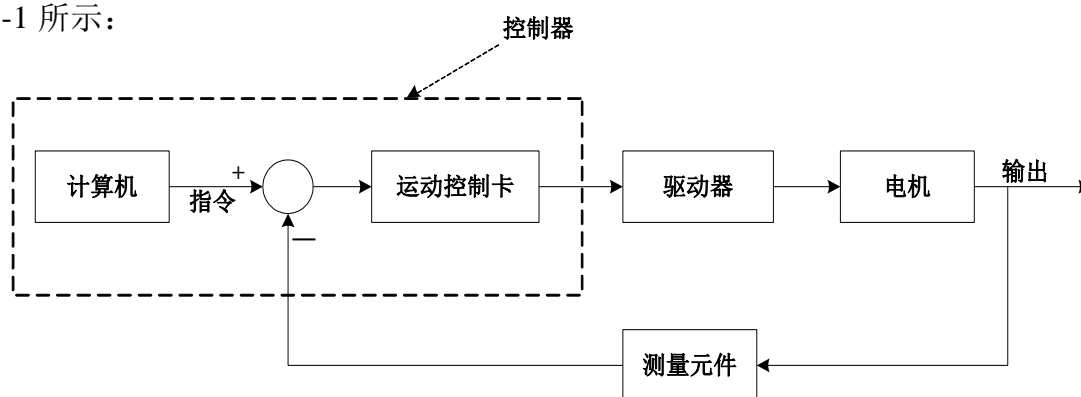


图 2-1 运动控制系统结构图

（1）控制器：其作用是将分析、计算所得出的运动命令以数字脉冲信号或模拟量的形式送到电机驱动器中。控制器通常是由计算机+运动控制卡、具有运动控制功能的 PLC、数控系统(CNC)或单片机系统等组成。

（2）执行元件：运动控制系统中常用的执行元件一般为电机，包括各种旋转电机和直线电机，其优点是受控性能较好，精度高。

（3）功率放大元件：其功能是进行功率变换，并驱动电机根据上位控制指令运动。

（4）测量元件：有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅尺、磁尺及激光干涉仪等。其作用是将检测到的位置信号反馈到控制器或驱动器中，构成半闭环或全闭环控制^[14]。

2.2 执行元件

在运动控制系统中一般选用电机作为系统的执行元件，包括旋转电机或直线电机，下面将两种电机进行对比以得到本文所要选取的执行元件。

（1）旋转电机

旋转电机种类很多，包括直流电机、步进电机、交流伺服电机等许多种类不同型号的电机，旋转电机是目前在各种自动化设备中应用最广的执行元件，它操作简单、控制方法成型、所需驱动器成本低、应用角度测量元件进行位置检测容易实现、安装容易且对安装的环境要求低。但是由于旋转电机必须采用滚珠丝杆作为中间传动部件，所以它存在以下方面的缺陷：

（i）旋转电动机输出要经过联轴器、滚珠丝杆等多个中间环节。传动链中存在多个误差源，增加的系统惯量，使系统动态响应变慢，难以提高运动平台的响应速度；

（ii）传动环节的死区、摩擦、形变，使系统非线性因素急剧增加，导致定位精度进一步提高变得困难，对于行程极短的封装操作，滚珠丝杆的弹性及传动中的死区、摩擦使极小空间的运动精度变成不可预测。

（2）直线电机

可以看出应用旋转电机的结构很难满足微电子封装设备中对于高速、高精度的要求。直线电机虽然存在齿槽效应和边端效应，并且安装要求高，但是由于直线电机是以直接驱动的方式，克服了传统的“旋转电机+滚珠丝杆”结构在高速高精平台应用中的诸多缺陷，因此在对速度和精度要求高的领域仍然有着广泛的应用，它的优点如下所示：

（i）采用直线电机驱动的传动装置，它不需要任何转换装置而直接产生推力，因此，它可以省去中间转换机构，简化了整个装置或系统，保证了运行的可靠性、传递效率提高、制造成本降低易于维护。

（ii）普通旋转电机由于受到离心力的作用，其圆周速度受到限制，而直线电机运行时，它的零部件和传动装置不像旋转电机那样会受到离心力的作用，因而它的直线速度可以不受限制。

（iii）直线电机是通过电能直接产生直线电推力的，它在驱动装置当中，其运动时可以无机械接触，使传动零部件无磨损，从而大大减少了机械损耗，例如直线电机驱动的磁悬浮列车就是如此。

（iv）旋转电机通过钢绳、齿条、传动带等转换成直线电机是靠电磁扒力驱动装置运行的，故整个装置或系统噪声很小或无噪声，运行环境好。

（v）直线电机结构简单，且它的初级铁心在嵌线后可以用环氧树脂等密封成整体，所以可以在一些特殊场合中应用，例如可在潮湿甚至水中使用；可在有腐蚀性气体或有毒、有害气体中应用。亦可在几千度的高温下或零下几百度的低温下使用^[15-16]。

通过以上分析为满足本文所述运动控制系统对于高速高精度的要求，选定直线电机作为该系统的执行元件，为满足本文所要设计的运动控制系统的设计指标，所需的直线电机的主要参数为：最大加速度 5g，最大推力 500N。

经过对于市面上各种直线电机性能和价格的比较，本文选用的直线电机为美国科尔摩根公司生产的 PLATINUM (DDL) IL18-075 型号的无铁心交流永磁同步直线电机，其结构如图 2-2 所示。该电机的峰值推力为 900N，推力常数为 64.2N/Arms，线圈总成质量为 0.91kg，可以看出以上各参数已经能够很好的满足系统的设计要求。

科尔摩根公司的 PLATINUM (DDL) 直线电机采用已获得专利的电磁设计，具有最高单位体积的额定推力、高电机常数（等于低的热损失）。此类电机的高推力使其非常适合对高质量负载进行加速和移动，并在机加工或施加推力的同时保持刚度。由于电机没有铁心或用于缠绕线圈的长槽，使其具有零齿槽效应、非常轻的质量以及在线圈总成与永磁体之间绝对没有吸引力，这些特性非常适合需要极低轴承摩擦力、轻载荷高加速度以及能在极小的恒定速度下运行（甚至是在超低速度下）的场合，此种电机拥有适合平稳运动要求的极低的推力和速度的波动，定位精度仅受反馈分辨率的限制，通常可达到微米以下的分辨率。

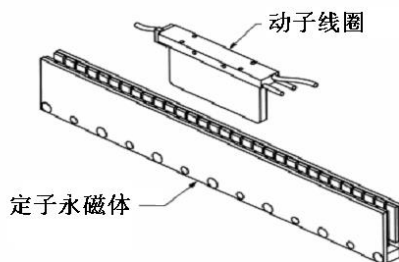


图 2-2 科尔摩根交流永磁直线电机结构图

2.3 功率放大元件

因为本系统的执行元件已经选用了美国科尔摩根公司的直线电机，所以本系统的驱动器也采用与之配套的产品，即采用美国科尔摩根公司生产的 SERVOSTAR_CD 直线电机专用伺服驱动器，其结构如图 2-3 所示，它的主

要特点如下：

(1) 组成

它的其核心处理器为一个 40MHz 的高性能 DSP, 电流环的更新速度可达到 62.51 μ s。驱动器支持网络连接，单一网络上最多可以连接 32 个驱动器，可以接受霍尔传感器，温度传感器的信号。

(2) 接口

驱动器具有 C1、C2、C3、C4 四个外部连接端口。C1 口为串行口，用于和计算机连接，用于对驱动器的检测和设置，基于驱动器对电机的运动控制，驱动器内的软件升级；下载宏代码，使驱动器在脱机时自动运行。C2 口用于反馈信号的连接，用于连接光栅尺，霍尔传感器和温度传感器信号。光栅尺的输出可以是数字信号，也可以是模拟正弦信号，用于将驱动器检测到的位置信号传送给运动控制器，以完成伺服控制。霍尔传感器用来辨别电机运动的方向，提高系统的定位精度和电机性能。温度传感器实时检测电机的温升，起到过热保护作用。对于霍尔信号和温度信号，由伺服驱动器来进行处理。C3 口用于控制命令输入和电机运行状态的输出，可以接收运动控制器输出的 $\pm 10V$ 控制电压。C4 端口为编码器输入端口，可以与标准的光栅尺端口相连接。为方便用户使用，科尔摩根公司推出的 Motion Link 软件是专门为该公司生产的驱动器而设计的，利用该软件，通过控制计算机的串口，可以方便的对伺服驱动器进行检测。

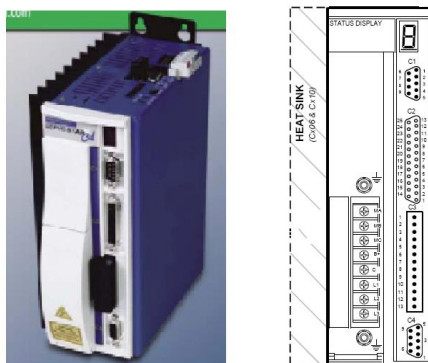


图 2-3 SEWRVOSTAR_CD 驱动器结构图

(3) 控制结构

SERVOSTAR 提供了高性能电机控制，可在 DSP 内控制最多 4 个截然不同的闭环系统：电流环、换向环、速度环和位置环。其中速度环是集成在驱动器内部，根据所选电机的不同加入一些补偿参数，换向环是提供驱动器霍尔换向用的，速度环和位置环是提供给用户进行控制器参数设定的。

2.4 测量元件

由于本系统以直线电机为执行元件的运动控制系统，所以应采用测量直线位移的元件，这类元件有直线感应同步器、电子尺、长度计和直线光栅尺等，其中直线光栅尺精度最高，而本系统对于精度的要求很高，所以在本系统中选用直线光栅尺作为测量元件。直线光栅尺测量直线位移是不存在任何附加的机械传动元件，在直线光栅尺位置控制环中已包括了所有进给机构。安装在滑板上的直线光栅可以检测出机械传递误差并能在控制系统电路中予以修正，可以消除潜在的误差源。

直线光栅尺分为封闭式直线光栅尺和敞开式直线光栅尺，封闭式直线光栅尺的读头和尺身是集成在一起的，需用在特定的设备中测量指定直线位移，而敞开式直线光栅尺则允许用户自行安装尺身和读头以进行所需要直线位移的测量，所以在本系统中应采用敞开式直线光栅尺。

敞开式直线光栅尺的厂家也有很多，综合性能和价格的考虑，在本系统中最终选用了德国海德汉的 LIP27 系列敞开式直线光栅尺，其结构如图 2-4 所示，该光栅尺测量步距小、精度高、重复性好并且安装非常容易，它的精度等级为 $\pm 1\mu\text{m}$ ，测量长度为 100mm，最高运动速度为 30mm/min.



图 2-4 海德汉敞开式直线光栅尺

2.5 控制器

在运动控制系统中一般采用PC机+运动控制卡的模式作为系统的控制部分，基于价格和性能的考虑在本系统中选用固高公司的GT-400-SV-ISA-G型号的运动控制卡和联想的计算机构成系统的控制器，它的主要特点如下：

（1）总线与通信：

GT 系列运动控制卡以IBM-PC 及其兼容机为主机，提供标准的ISA 总线和PCI 总线两个系列的产品。在任何一款产品上可以提供RS232 串行通讯和PC104 通讯接口，运动控制器提供C 语言函数库和Windows 动态链接

库，实现复杂的控制功能。用户能够将这些控制函数与自己控制系统所需的数据处理、界面显示、用户接口等应用程序模块集成在一起，建造符合特定应用要求的控制系统，以适应各种应用领域的要求。

(2) 控制结构：

固高公司生产的GT_400 系列运动控制卡，可以同步控制四个运动轴，实现多轴协调运动，采用GT系列运动控制卡的实物如图2-5所示。其核心ADSP2181 数字信号处理器和FPGA 组成，可以实现高性能的控制计算，采用GT-400系类运动控制卡组成的控制系统如图2-6所示。它适用于广泛的应用领域，包括机器人、数控机床、木工机械、印刷机械、装配生产线、电子加工设备以及激光加工设备等。



图2-5 固高GT系列运动控制卡实物图

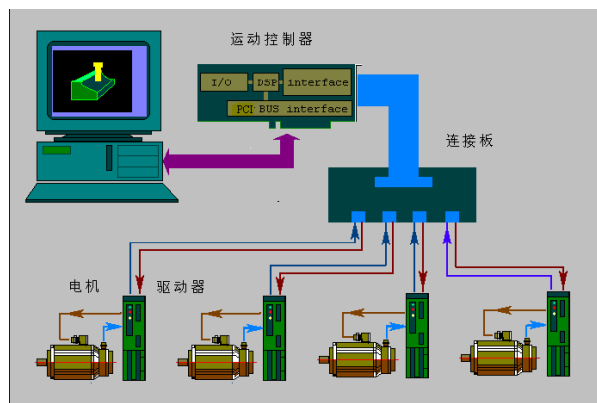


图 2-6 采用 GT-400 系列运动控制卡组成的控制系统示意图

(3) 实时性：

固高公司的GT_400系列控制卡采用了具有40MHz频率的DSP作为主控芯片，因此具有很高的处理速度，可以对采集到的数据进行实时的处理。

2.6 系统硬件构成

将上文中所选择的系统控制器、功率放大元件、执行元件和测量元件组合就够成了直线电机驱动的机电运动控制系统，该系统的硬件构成示意图如图 2-7 所示。

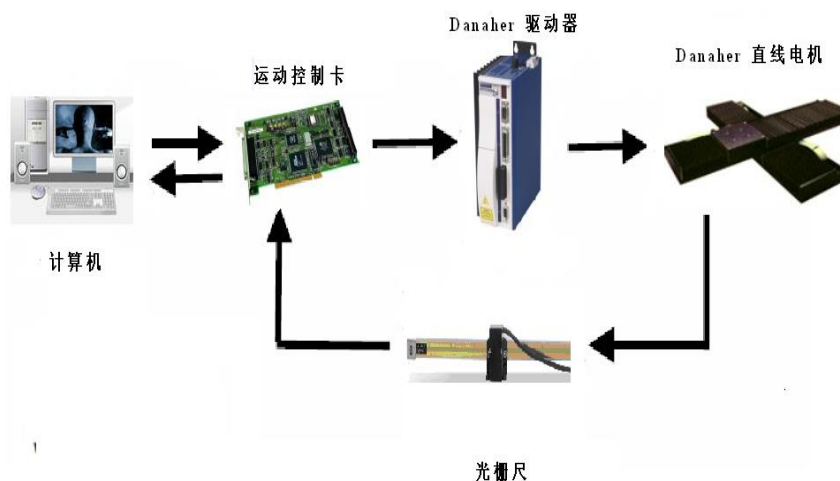


图 2-7 系统的硬件构成示意图

2.7 本章小结

本章介绍了本文所述的运动控制系统的总体设计方案以及控制器、功率放大元件、执行元件和测量元件的选择过程，并且介绍了运动控制系统各个组成部件的功能。

最终选择的控制器是计算机与固高的运动控制卡，功率放大元件是 Danaher 的驱动器，执行元件是 Danaher 的无铁心交流永磁同步直线电机，测量元件是海德汉公司的敞开式直线光栅尺，由以上部件搭建起的运动控制系统也就是以后章节辨识和控制的对象。

第3章 永磁同步直线电机的系统辨识研究

3.1 引言

系统辨识通常是指通过观测系统过程的输入—输出的关系以确定其数学模型。1978年瑞典著名学者 L.Ljun 给出系统辨识的定义：“辨识的三个要素即数据、模型类和准则，辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择一个与数据拟合的最好的模型。”该定义强调了系统辨识的三个基本要素，其中数据是指系统的输入输出数据，模型类则定义了模型的基本结构类型，准则即为评价模型与输入输出数据拟合程度的量度标准。

历史上，由于要求设计一个较好的控制系统，而提出了系统辨识的问题。在大部分实际系统中（如工业控制过程），为了设计一个有效的控制方案，有关系统及其环境的先验信息是很不充分的，我们常常需要用实验的方法来确定某些重要的物理参数，如传热系数、化学反应率、阻尼系数等。随着最优和自适应控制理论的发展，高精度的系统模型就更加需要了。例如，在自适应系统设计中，为了保持系统性能在任何时候都是最优，常常需要修改一个装置及其环境的某些时变参数值。动态系统参数的估计在其它工程上的应用还包括有通讯频道的探测，系统和故障的测试等等。

图 3-1 描述了系统辨识的一个过程。我们需寻找的系统模型是一个数学表达式，它表示了任何时候输入和输出的关系。为了获得这个模型，我们可以用各种输入信号来测试系统并观测其响应，然后，处理输入—输出数据，获得模型。根据对系统事先了解的程度，我们将系统辨识问题分成两类。

（1）完全辨识问题：即意味着我们完全不了解系统的任何基本特性，例如是线性还是非线性，无记忆还是有记忆等等。显然，这是一个极难解决的问题。通常要得到任何有意义的解之前，必须对系统做出某种假定，因此这类问题也称之为黑箱问题。

（2）部分辨识问题：在这类问题中系统的某些基本特性，例如线性度、频带宽度等假定是已知的，但是我们不知道动态方程的阶次或有关的系数，这类问题称之为灰箱问题，当然，它比黑箱问题容易解决。

实际上，我们遇到的大多数工程系统及工业过程都属于后一类。在一般

情况下，我们对系统的结构有很多的了解，因此可以推导出系统动力学的特定的数学模型。在这种情况下，只要确定模型方程中一组参数就可以了，从而模型化问题被简化为参数辨识问题。

因为大多数的系统辨识问题可以简化为参数辨识问题，所以参数辨识是一个最重要的问题。从系统理论的观点来看，精确地测量出输入与输出数据以后，就能准确地判断并获得系统模型方程中的未知参数。但是，实际上输入与输出数据要受到噪声的影响，而且模型方程本身也有误差，这就像系统本身有随机干扰一样，所以系统参数的确定，本质上讲是一个统计问题，即要寻求一个特殊的数学模型，它能与有噪声的观测数据相互拟合^[17]。

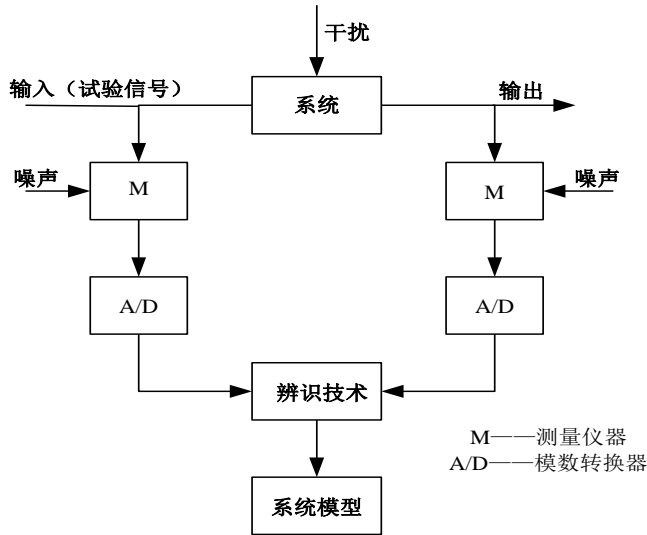


图 3-1 系统辨识问题的方框图

3.2 系统辨识的方法

系统辨识包括辨识步骤的研究、辨识工具的选择、模型类的选择和模型阶数的选择，要进行系统辨识首先要确定以上信息。

3.2.1 系统辨识的步骤

系统辨识的步骤主要包括先验知识，实验设计、数据预处理，模型结构的确定、模型参数估计、模型阶次估计、模型验证和模型评价八个方面。图

3-2 说明了系统辨识的一般步骤。

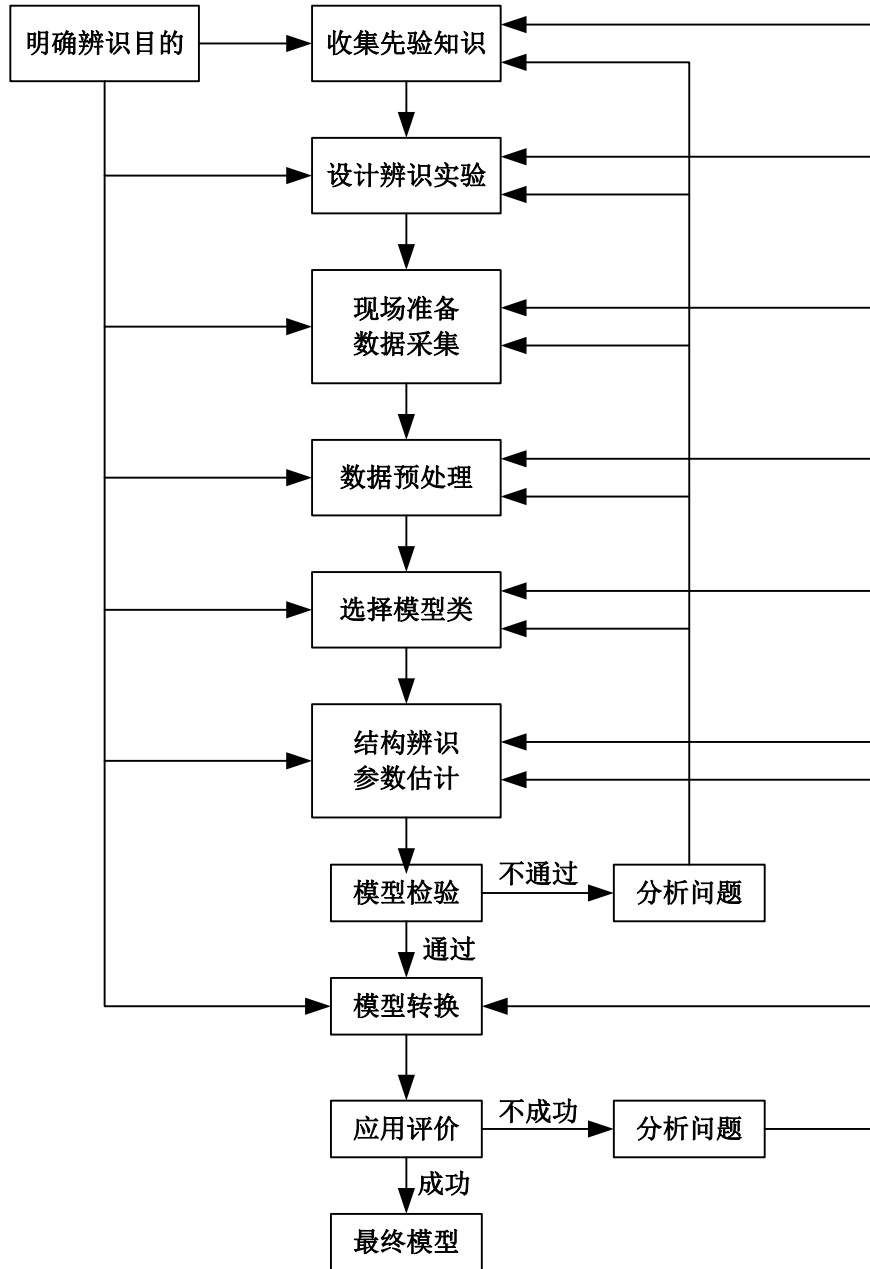


图 3-2 系统辨识的一般步骤

(1) 先验知识

这一步为执行辨识任务提供尽可能多的信息。为此，我们首先应从各个方面尽可能的了解待辨识的系统；其次再在系统上作某些预备性试验以便获得必须的信息，对辨识目的的了解，常能提供模型类型、模型精度和辨识方法

的约束。如果用经典控制理论分析和综合系统，则常要求一个非参数模型（如脉冲相应、频率响应或阶跃响应模型）；如果要用现代控制理论给系统进行二次性能指标下的最优控制、Kalman 滤波，则应选用状态模型；如对系统进行自适应控制，选用差分模型更为合适。状态模型和差分模型是以参数数目和参数值大小的差别来描述不同动特性的系统的，故他们属于参数模型。在模型精度方面要求在自适应控制中用的辨识算法可以粗糙一些，但是为了进行跟踪辨识，要求在自适应控制中使用的辨识算法的计算效率要高；对确定性系统以及用于预报的模型精度要求更准确些。

（2）实验设计

在实验设计这一步中，我们需要确定以下参数或选项：输入信号的类型和参数（幅度、频率等）、采样时间和采样频率、辨识时间（即数据长度）、开环或闭环辨识、离线或在线辨识。在做决定时最重要的标准便是要尽可能多的包含过程特性的内在信息。

（3）数据预处理

输入输出数据通常都含有直流成分或低频成分，用任何辨识方法都无法消除它们对辨识精度的影响。此外，数据中的高频成分对辨识也是不利的。因此，对输入输出数据一般都要进行零均值化和剔除高频成分的预处理。处理得好的话能显著的提高辨识的精度。

（4）模型类型和结构选取

模型结构辨识包括模型结构的假定和模型结构参数的确定这两部分内容。模型结构假定就是根据辨识的目的，利用已有的知识对具体问题进行分析，确定一个假定模型，再用模型鉴别方法选出可用的模型来。

（5）模型参数估计

模型参数辨识的方法有很多种，其中最小二乘法是最基本、应用最广泛的一种。

（6）模型阶次估计

一般情况下，选择不同的模型阶数，然后比较建模结果，尽量选择最简单又最能反映系统动力学特性的模型。

（7）模型检验

描述系统的模型是否辨识的合适，必须进行适当的检验。如果经过检验证实模型符合要求，则整个辨识过程结束；否则，就应该修改模型的结构。甚至重新进行试验设计，直至获得满意的模型为止。

模型检验的主要方法有：

(i) 利用在不同时间区间内采集的输入输出数据，分别进行被控对象模型辨识，如果各个模型的特性基本相同，则说明辨识结果是可靠的：

(ii) 增加辨识中使用的数据长度，如果损失函数不再显著下降，则模型则是可靠的；

(iii) 检验模型与对象输出残差序列的白色性，如果残差序列可以看作零均值的白噪声序列，则认为辨识模型是可靠的。

(8) 模型评价

(i) 利用先验知识判断：根据对系统已有的知识来判断模型是否实用。

(ii) 利用数据检验：当利用一组数据辨识得到一个模型之后，通常希望用另一组未参与辨识的数据检验模型的适用性。如果检验结果失败，可能存在的问题是：辨识所用的一组数据包含的信息不足或所选模型类不合适。另外，也可以用一组数据对不同的模型进行比较，以选用更合适的模型。

(iii) 利用实际响应曲线检验：比较实际系统和模型的阶跃响应曲线或脉冲响应曲线^[18-20]。

3.2.2 系统辨识工具

本文采用 Matlab 的系统辨识工具箱对被控对象进行系统辨识，该工具箱提供了进行系统辨识的有力工具，其中主要包括：各种模型类的建立和转换函数、非参数模型的辨识、参数模型的辨识、递推参数估计、模型验证工具、图形用户界面等。用户可以在图形用户界面中完成系统辨识，也可以在 Matlab 的命令窗口中键入相应的命令以完成系统辨识，其图形用户界面如图 3-3 所示。

利用该工具箱进行系统辨识首先要将输入、输出数据导入该工具箱，然后进行初步的数据处理，再利用选好的模型的结构在不同阶次下进行参数辨识，将得到的模型进行验证，经过多次的筛选得到一组符合验证标准的模型在其中选择阶次较低的作为系统的传递函数模型，由此得到了所辨识系统的离散形式的传递函数模型。针对本文所选的线性模型类在该工具箱中是利用最小二乘的方法进行参数估计的。

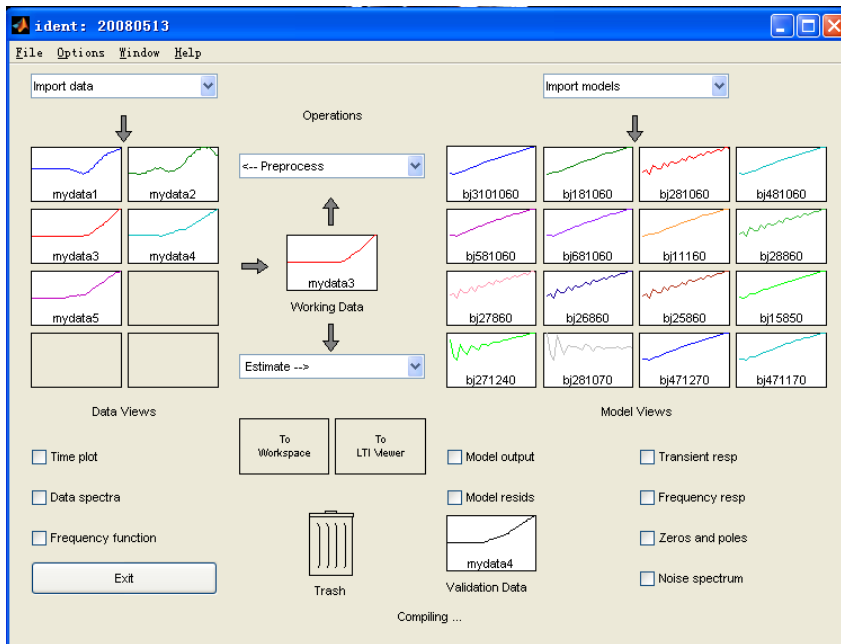


图 3-3 MATLAB 系统辨识工具箱 GUI 界面

3.2.3 模型结构选择

在假定模型结构的前提下，可以利用参数估计的方法确定模型参数。在 Matlab 的系统辨识工具箱中给出了许多有参数的模型结构和无参数的模型结构，对于“黑箱”，有线性传递函数模型和状态空间模型，对于“灰箱”，可以由用户自己设定模型的结构和参数，并在 M 文件中写出传递函数的参数和状态空间矩阵。

在本文中是将系统看成一个“黑箱”模型而进行系统辨识的，假设系统的输入 $u(t)$ ，输出 $y(t)$ 用线性差分方程表示

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m)$$

系统的传递函数模型可写为：

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t)$$

在 Matlab 的系统辨识工具箱中线性模型有 ARX 模型、ARMAX 模型、OE 模型和 B-J 模型，由于 B-J 模型的输入和干扰的传递函数不含有相同的分子或分母，也就是输入和干扰不相关，所以本文采用 B-J 模型，它的结构如图 3-4 所示。

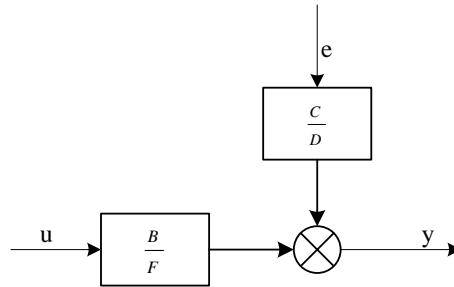


图 3-4 B-J 模型结构

它的输出表达式为：

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

3.3 系统辨识实验设计

辨识建立在对实际系统实验的基础上，其目的是通过实验观测数据建立数学模型，最终用于系统控制、计算、决策或分析与综合，因此必须事前根据辨识目的和先验信息设计一系列实验，实验目的在于充实先验信息和得到所需输入—输出数据。

3.3.1 输入信号的选择

系统辨识中的输入信号的选择直接影响到辨识结果的准确性，如果选择不当则输入则难以表现系统的特性，也就无法得到系统的准确的数学模型，对于输入信号的选择有以下要求：

（1）在辨识过程中必须使输入信号频谱丰富且在各个频率点上都持续激励。或者说，在实验期间，要求输入信号的频谱必须覆盖系统的频谱并能够充分激励系统的所有模态。

（2）输入信号的功率或幅度不宜过大，否则会使系统工作在非线性区；也不能太小，否则数据所含的信息量将下降，尤其在噪声较大的情况下，会直接影响辨识的精度。

（3）保证输入信号对系统的正负向扰动机会均等，定义扰动因子为：

$$C_r^2 = \frac{\max_t u^2(t)}{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u^2(t)}$$

当扰动因子的值为 1 时，输入信号性能最好。

(4) 输入信号应便于实现，且费用低。

在实际应用中混合正弦信号、扫频信号、伪随机信号都可以基本满足以上要求，下面将它们进行比较以选出最合适的信号作为输入信号。

3.3.1.1 混合正弦信号

混合正弦信号的输入中含有许多不同频率的正弦信号，通过该输入信号可以激发系统在这些频率点处的模态，从而得到系统的模型。

时域输入函数为：

$$u(t) = \sum_{k=1}^d a_k \cos(\omega_k t + \phi_k)$$

谱密度函数为：

$$\phi_u(\omega) = 2\pi \sum_{k=1}^d \frac{a_k}{4} [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)]$$

混合正弦信号的优缺点：

通过设定 d, a_k, ω_k 的值可以将信号的能量配置到任何精确期望频率的位置，如果所有的正弦都在 0 相位，则信号的能量就是 $(\sum a_k)^2$ ，但是它的扰动因子为 $\sqrt{2d}$ ，未达到输入信号扰动因子的理想值，而且必须选择足够多的合适的 ω_k ，以期能够激发系统更多的模态，使通过辨识得到的模型更加准确，然而对于这些关键频率点的确定是很困难的，所以在实际中一般不用混合正弦信号进行系统辨识。

3.3.1.2 扫频信号

让正弦信号的频率随时间按一定规律在一定范围内反复扫动，这种信号成为扫频信号。

它的时域输入函数为：

$$u(t) = A \cos(\omega_1 t + (\omega_2 - \omega_1)t^2 / 2M)$$

其中连续变化的频率 ω_t 是由下式获得的：

$$\omega_t = \omega_1 + \frac{t}{M}(\omega_2 - \omega_1)$$

扫频信号随着时间 t 的变化，它从 ω_1 增加到 ω_2 ，在这一激励频率变化范围之内信号能够得到很好的控制。但是它与正弦信号有着同样的扰动因子 $\sqrt{2}$ ，无法达到理想值 1，而且必须准确选择 ω_1, ω_2 的值，使这一频率范围恰好是系统的主要工作频段，从而能够通过该信号激发系统的在该频率段的

全部模态，这一频率范围的确定需要准确知道系统的频率响应范围，这一点通常也很难做到。

3.3.1.3 伪随机信号

伪随机信号有连续模拟量伪随机信号和数字式二位伪随机信号两种，连续模拟量伪随机信号可由专用伪随机信号发生器产生，也可由计算机产生一个有限长度的随机数序列，经数模转换器变换成模拟量，循环输出而产生。数字式二位伪随机信号通常由伪随机信号发生器产生不同长度的二进制序列，当以一定周期重复输出时就产生基本的伪随机二位信号。数字式二位伪随机信号容易正确实现，且周期、信号能量容易控制，自相关函数准确，互相关函数计算简单，因此，在系统辨识时，常采用数字式二位伪随机信号（M 序列）。

M 序列具有周期性，它的自相关函数如下式所示

$$R_M(\tau) = \begin{cases} a^2 \left[1 - \frac{|\tau|(N+1)}{\Delta t N} \right] & \text{当 } |\tau| < \Delta t \\ -\frac{a^2}{N} & \text{当 } |\tau| \geq \Delta t \end{cases}$$

它的自相关函数的波形如图 3-5 所示，由该图可以看出 M 序列的自相关函数是一个漂移量为 $-a^2/N$ 的周期性三角波。当 Δt 很小，N 很大时，可近似认为 M 序列是一个理想的周期脉冲函数。

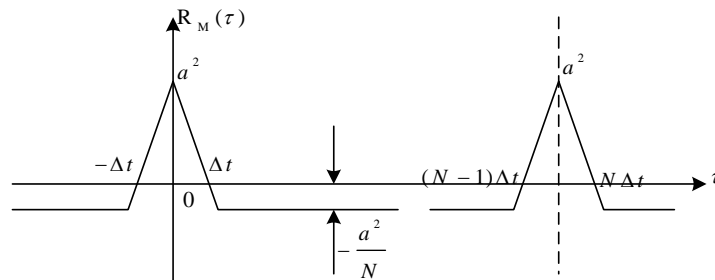


图 3-5 伪随机序列自相关函数的波形

M 序列的谱密度函数为

$$S_M(\omega) = \frac{a^2 (N+1) \Delta t}{N} \sum_{\gamma=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(\frac{\gamma\pi}{N})}{\frac{\gamma\pi}{N}} \right]^2$$

在低频时，即 $\gamma \ll N$ ，M 序列的谱密度函数可近似为

$$S \approx \frac{a^2(N+1)\Delta t}{N}$$

伪随机序列自相关函数频谱的波形如图 3-6 所示，从该图中可以看出，当 $\omega=(2\pi)/(3\Delta t)$ 时，其幅值衰减 3dB，因此其有效频带在 $(2\pi)/(N\Delta t)$ 到 $(2\pi)/(3\Delta t)$ 之间。显然，当 Δt 比较小时，M 序列就接近于白噪声信号。

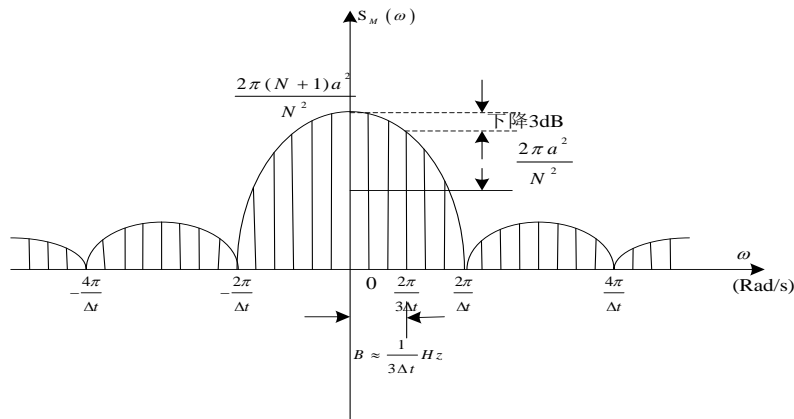


图 3-6 伪随机信号自相关函数频谱曲线

M 序列的特点：

- (1) 一个 n 阶 M 序列周期为 $N=2^n-1$ ；
- (2) 在 M 序列的一个周期内，逻辑 1 的状态出现次数为 $(N+1)/2$ ，逻辑 0 的状态出现的次数为 $(N-1)/2$ ，即逻辑 1 状态比逻辑 0 状态多 1 个。对于实际信号而言逻辑 1 代表正电平 +a，逻辑 0 代表负电平 -a，信号状态切换次数为 $(N+1)/2$ 次；
- (3) 一个 M 序列与其移位序列按对应位进行模 2 加法，其所得序列仍为 M 序列；
- (4) 一个 M 序列与其移位序列的各对应位中，状态相同位数为 $(N-1)/2$ 个，状态不同位数为 $(N+1)/2$ 个。因此进行代数相加时，电平取 0 的位数为 $(N-1)/2$ ，取土 2a 的位数为 $(N+1)/2$ 个。

3.3.1.4 确定输入信号

从以上对于三种常见输入信号的分析可以看出伪随机信号具有良好的随机性，并且具有预先的可确定性和可重复性，频谱丰富，能够保证持续的激励，可以保证输入信号在每个激励频率点上都具有足够的能量，具有类似白噪声的相关函数，峰值因子为 1，能够很好的满座满足系统对于输入信号的

要求。而混合正弦信号和扫频信号都要求给定一定频率范围或某些特定频率点，得到该给定频率范围或频率点处的激励频率，频谱没有伪随机信号丰富，而且伪随机序列的谱密度函数在各个频率点上的幅值是相等的，能够更好的激发出系统的模态。伪随机信号由于具有很强的能量，在激励过程中，可能会对系统造成一定的伤害。但对于直线电机则危害很低，因为直线电机驱动的机电控制系统的工作条件就是高速、高精度运动下的点位控制，所以伪随机序列并不会对直线电机造成损害。综合以上对于三种常用输入信号的分析，在本实验中选用伪随机信号作为系统的输入信号。

3.3.1.5 伪随机信号阶数的确定

在确定选择伪随机信号作为输入信号后还要选择伪随机信号的阶数，阶数越高的伪随机信号越能够更多的激发系统的各个频率的特性，从而准确的得到系统的模型，但是这也要考虑所用运动控制卡采集数据的能力，综合各方面的考虑，选择七阶的伪随机信号作为系统辨识的输入信号。

3.3.2 采样周期的选择

现在对现场数据的采集一般都采用计算机，故输入输出信号都需要经过采样处理，采样时间的选择将直接影响辨识所得模型的精度。

3.3.2.1 采样周期 T_s 的选择原则

(1) 满足香农采样定理，使采样后的信号频谱各分量之间不产生混叠。由香农采样定理可知，具有有限带宽（上限频率为 ω_m ）的连续信号采样后不但有主分量，而且有无穷多高次谐波辅分量，可由 ω_m 于采样角频率之间的关系，分以下两种予以讨论。

(i) $\omega_s > 2\omega_m$ ，此时， $f(t)$ 采样后的信号频谱 $F^*(j\omega)$ 各分量之间不产生混叠，如果希望从采样信号中不失真地恢复原信号，则只要使之通过如下形式的低通滤波器可实现：

$$G(j\omega) = \begin{cases} T & |\omega| < \frac{\omega_s}{2} \\ 0 & |\omega| \geq \frac{\omega_s}{2} \end{cases}$$

式中 $G(j\omega)$ ——滤波器的频率特性。

(ii) $\omega_s \leq 2\omega_m$ ，此时， $f(t)$ 采样后的信号频谱 $F^*(j\omega)$ 各分量之间产生混叠， $F^*(j\omega)$ 在 ω 处之值，使主分量与辅分量在 ω 处的所有值之和。由上可

知，若 ω_m 是连续信号上限频率， ω_s 为采样角频率，则当 $\omega_s > 2\omega_m$ 时，经采样得到的信号便能无失真地再现原信号。从而采样定理给出了采样频率的下限，通常称 $\omega_N = \omega_s/2$ 为奈奎斯特频率，这样也就是给出了采样时间的上限。

(2) 为了提高辨识效率和减少计算工作量， T_s 选取不得过小，否则将会把噪声带入被辨识模型，并且会因数据过多而增加存储量、计算工作量和辨识费用。

3.3.2.2 确定采样周期

本文在进行系统辨识实验之前，先通过实验对系统的带宽进行估计，实验方法是给被控对象由低到高输入各个频率的正弦信号，观察直线电机的运动情况。在实验中发现当输入正弦信号的频率大于 200Hz 后，直线电机停止运动，也就是系统能够响应的最高频率为 200Hz，继续增加输入信号的频率，可以观察到虽然直线电机停止运动，但还存在机械振动，也就是说系统也对高频信号产生了响应，这种响应是以机械振动的形式表现出来的。为了使辨识模型也能包含这一部分高频成分，可取 $f_m = 1000\text{Hz}$ 按照上面所述香农采样定理按照香农采样定理：可取 $T_s \leq 1/(3f_m - 4f_m)$ ，式中 f_m 是被辨识系统的最高工作频率（截止频率），即可选取采样周期 $T_s = 2.5\text{kHz}$ 。

3.3.3 其他条件选择

(1) 实验数据长度的选择

理论上讲，数据长度 N 愈长，则辨识精度愈高。但实际上实验数据长度受到诸因素的限制，如漂移、计算工作量、存储空间等。因此， N 的选择应视具体辨识情况而定，但是应遵循一个重要的原则，这就是实验时间至少应为被辨识系统主要时间常数的 10 倍以上。

(2) 开环辨识或闭环辨识

一般情况下都是采用开环系统辨识，因为这种辨识方法简单且方便，但对系统运行过程可能造成一定的影响，若选择闭环辨识则辨识方法会比较复杂，必须满足闭环系统可辨识的条件，才能获得有效的辨识结果。

综合以上各点，对于本课题系统的辨识可采用简单的开环辨识的方法进行。

(3) 离线辨识或在线辨识

采用离线辨识还是在线辨识，主要取决于辨识工作的最终目的、被辨识过程的类型以及可利用的计算机设备。对于一般的系统分析、系统仿真、预

测和控制算法的设计等辨识目的，如果被辨识过程又是非时变的或者基本上是非时变的，一般采用离线辨识。对于时变过程控制，特别是自适应控制，就必须采用具有实时处理能力的在线辨识方法。本课题的系统是线性时不变系统所以采用离线辨识的方法即可^[21]。

3.4 直线电机系统辨识

对于该直线电机驱动的机电运动控制系统的辨识，由于驱动器的电流环集成在驱动器内部，并不开放给用户使用，所以在进行系统辨识时实际的辨识对象并不仅仅是直线电机，还包括了驱动器的电流环。驱动器采用的模式为模拟力矩模式，通过运动控制卡将输入的伪随机信号转换为模拟电压信号传送给驱动器，辨识对象的整体结构如图 3-7 所示，其中 F_d 为干扰力， K_t 为电机系数， K_a 为电流放大系数。。因为驱动器电流环的带宽远大于被控系统的带宽，所以驱动器的电流环的传递函数相当于一个比例增益，并且它在理想情况下为 1，辨识所得的传递函数模型就可以近似为直线电机的模型。

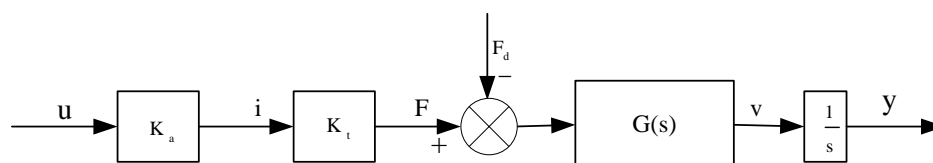


图 3-7 系统辨识整体结构

3.4.1 数据采集

以上被控对象的数据采集是通过运动控制卡将输入的伪随机信号通过 D/A 转换器转化为模拟电压作为驱动器模拟力矩模式下的输入信号，并将由光栅尺测得的位置反馈信号传送回驱动器，通过驱动器 C4 口的编码器等价输出将该位移传输回运动控制卡进行数据的存储，数据采集过程如图 3-8 所示^[15]。

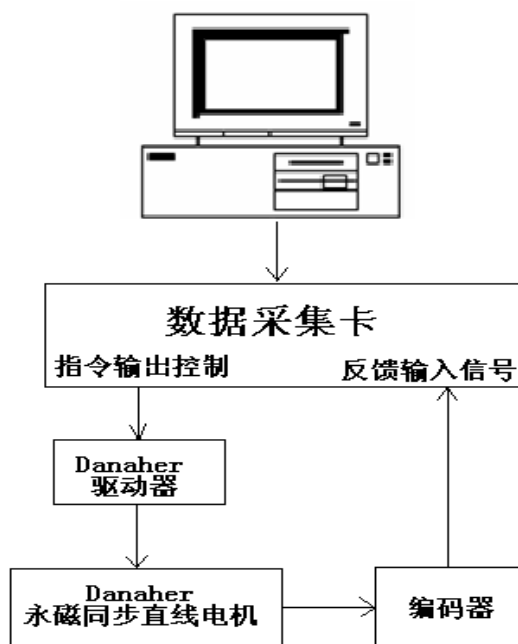


图 3-8 系统辨识数据采集过程

利用系统辨识工具箱对于所采集的数据进行系统辨识，采用 B-J 模型作为所辨识系统的模型结构。直线电机的理想动力学模型为二阶，但是在实际中无法达到理想的情况，在直线电机运动过程中可能会引入高频段的干扰，使所辨识模型阶数升高，考虑到这部分不确定因素的影响，通过实验选取四阶 B-J 模型作为系统的模型结构，其辨识结构的整体模型如图 3-9 所示。

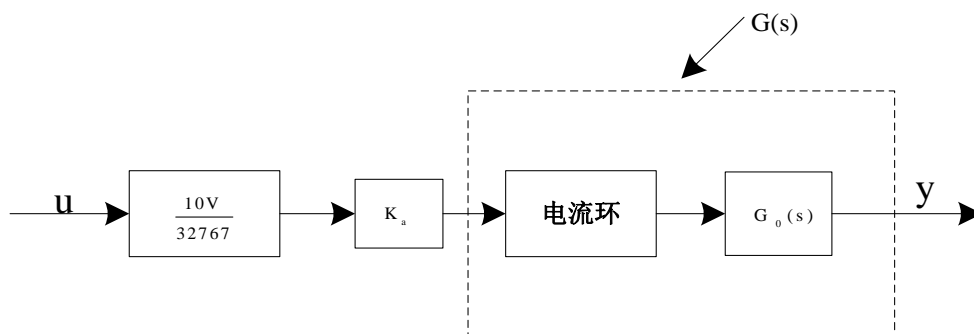


图 3-9 辨识结构的整体模型

3.4.2 辨识结果分析

将所采集的数据在 Matlab 系统辨识工具箱中应用所选模型结构和阶数进行辨识，得到一个理想的模型，使系统的模拟电压输入信号通过该模型后的位置输出信号和系统实际测得的位置输出信号具有较高的匹配度，且使系统残差模型具有白色性。

辨识得到的被控对象的离散形式的传递函数为

$$G(z) = \frac{9.016 \times 10^{-6} - 8.239 \times 10^{-6} z^{-1}}{1 - 1.285 z^{-1} + 0.2344 z^{-2} - 0.6108 z^{-3} + 0.6614 z^{-4}}$$

通过 Matlab 的命令将其化为连续形式的结果为

$$G(s) = \frac{9.016 \times 10^{-6} s^4 + 0.0288 s^3 + 199.3 s^2 + 2.766 \times 10^5 s + 5.295 \times 10^7}{s(s^3 + 1033 s^2 + 2.589 \times 10^7 s + 8.179 \times 10^7)}$$

由于速度环和位置环之间存在一个积分环节，应当从所辨识得到的系统的传递函数中提取，并在提取后保证分子多项式的阶数不大于分母多项式的阶数，通过 Matlab 的命令将其化简后的结果为

$$G(s) = \frac{0.01466 s^3 + 196.5 s^2 + 2.765 \times 10^5 s + 5.293 \times 10^7}{s(s^3 + 1033 s^2 + 2.589 \times 10^7 s + 8.179 \times 10^7)}$$

化简前后系统的开环波特图如图 3-11 所示，可以看出在 1KHz 频率范围以内可以完全吻合，而这一频率范围已经远大于我们关心的频率范围，所以这一化简是切实可行的。

校验数据的伪随机输入信号通过模型的输出结果如图 3-10 a)、c)、e) 中虚线所示，校验数据实际测得的位置信号的输出如图 3-10 a)、c)、e) 中实线所示，残差与白噪声的相似性如图 3-10 中的 b)、d)、f) 所示。

由图 3-10 可以看出该模型具有一定的可靠性，对于多种情况下的数据都能达到很好的匹配度，且其残差与输入、输出的相关函数也基本在置信区间以内，使得残差可以近似的看做是白噪声，这样可以认为辨识的模型是准确的。

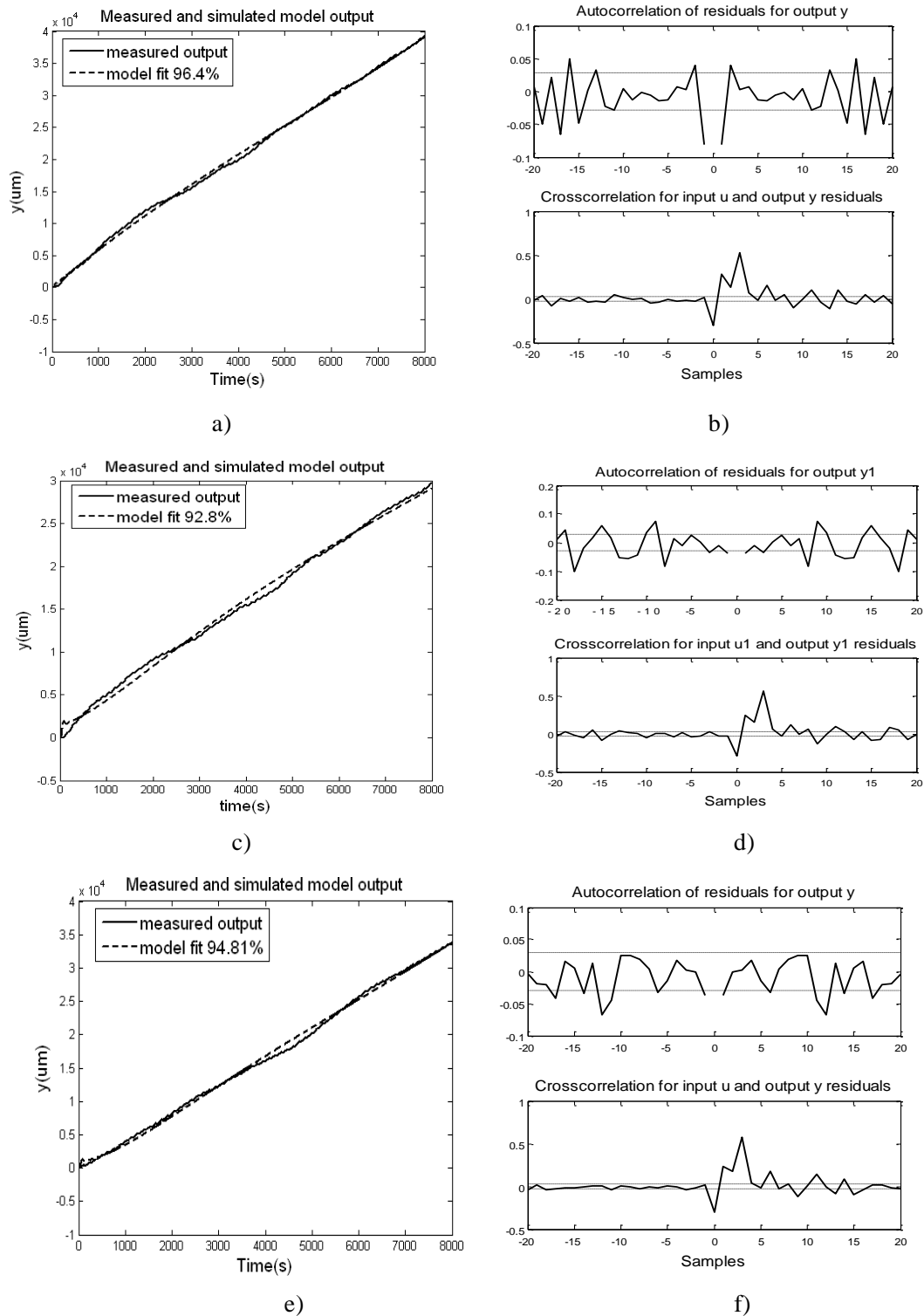


图 3-10 校验结果

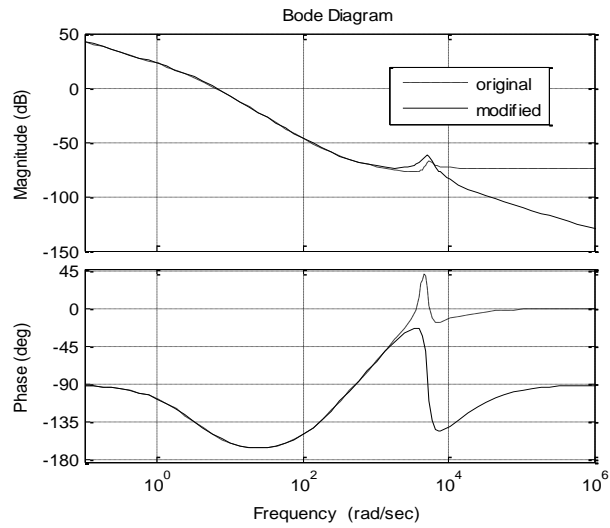


图 3-11 传递函数简化前和简化后的 bode 图比较

3.4.3 模型准确性验证

利用驱动器的速度控制模式下的自调整功能整定出一个能够使系统稳定速度环的 PI 控制器，将该控制器作为仿真和实际测量时的控制器。利用该控制器在 MATLAB 中进行仿真，仅采用速度环，图 3-12 和图 3-13 为利用该 PI 控制器对被控对象进行控制得到的仿真速度输出曲线实际速度输出曲线的对比。

速度命令为 200mm/s 时实际测得速度与仿真速度曲线如图 3-12 所示。

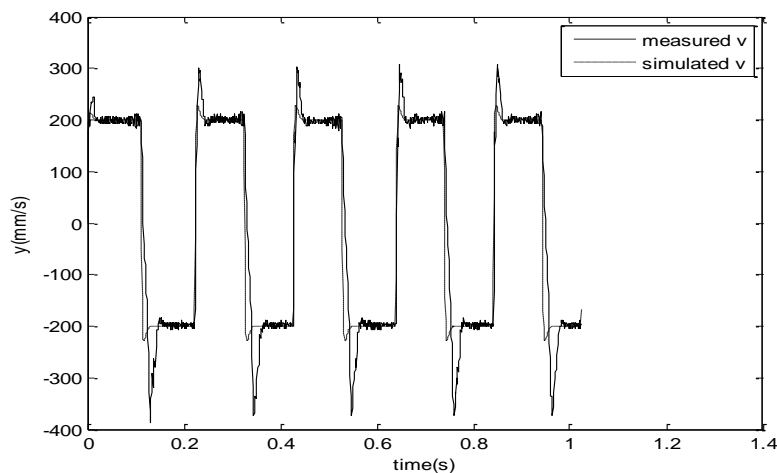


图 3-12 速度命令为 200mm/s 实际测得速度与仿真速度曲线

速度命令为 100mm/s 时实际测得速度曲线与仿真速度曲线如图 3-13 所示。

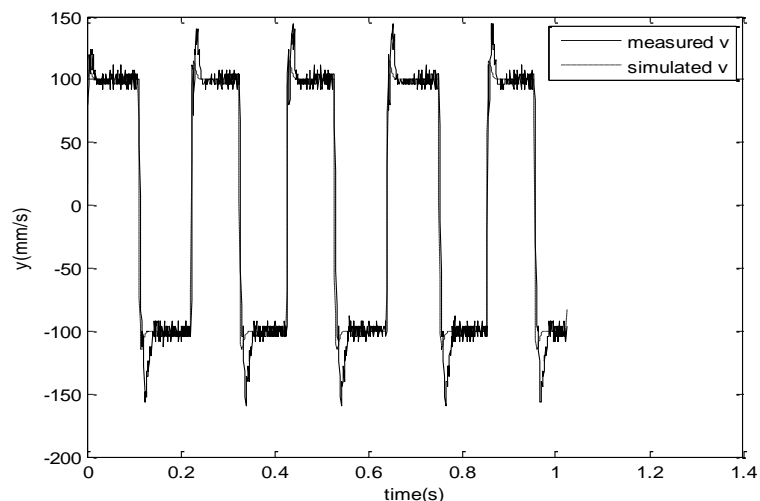


图 3-13 速度命令为 100mm/s 时实际测得速度与仿真所得速度曲线

由于平台摆放不平，负向存在重力的分量，所以负向的负载比较大，导致负向的匹配情况不好，另外正向实际的超调比仿真输出的超调要大是因为在辨识的过程中没有将摩擦力的因素考虑进去，只将其作为残差的一部分，而在实际系统中摩擦力对于系统的控制存在着一定的影响，所以导致实际的超调比仿真的超调要大。

3.5 本章小结

本文以驱动器电流环和直线电机为被控对象，通过系统辨识的方法建立了该直线电机驱动的机电运动控制系统的数学模型。给出了系统辨识的方法，包括辨识步骤、辨识工具、辨识模型的选择，并进行了系统辨识实验的设计，包括输入信号的确定、采样周期的选择和一些其它条件的选择。并根据以上研究进行了直线电机的系统辨识，利用运动控制卡采集输出数据，在 Matlab 的系统辨识工具箱中利用所选择的模型的结构和阶数进行参数辨识，得到被控对象的传递函数模型，并用简单的方法进行了模型的验证。

第4章 控制器设计方法研究

4.1 引言

对于本文所研究的运动控制系统应采用全闭环的控制方式，即采用电流环、速度环和位置环三环共同控制的控制模式^[22-23]，其整体结构如图 4-1 所示。电流环集成在驱动器内部，不开放给用户进行调节，所以在本文控制系统中只通过对速度环和位置环控制器的设计到达使系统满足高速、高精度要求的目的，下面将对一些常用控制器进行分析以选择本文速度环和位置环所要使用的控制器。

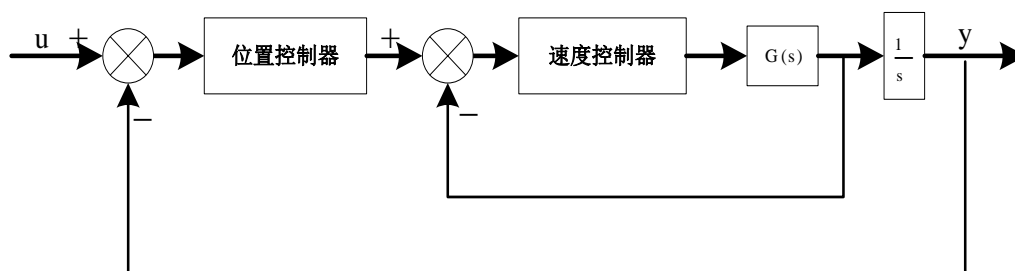


图 4-1 运动控制系统整体结构图

4.2 控制器设计

对于运动控制系统的设计一般采用全闭环的方式，即电流环、速度环和位置环三环控制的方式，对于本文中的系统电流环是集成在驱动器内部，因此只对速度环和位置环进行控制器的设计。在位置环中采用在工业领域应用极广的 PID 控制器，而对于速度环的控制器则通过对 PI 控制器、PDF 控制器和 PDFF 控制器的性能比较得出，下面将分别介绍这几种控制器的原理。

4.2.1 PID 控制器

PID(比例、积分和微分)控制^[24-26]以经典控制理论为基础，它是连续系

统中技术成熟、应用最广泛的一种控制方法。其最大的优点在于不需了解被控对象的数学模型，只要根据经验调整调节器参数，便可获得满意的结果，其不足之处是对被控参数的变化比较敏感。由于用软件编程方法实现 PID 控制，参数变化十分灵活，因而获得了广泛的应用。PID 控制器根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成的控制偏差： $e(t)=r(t)-c(t)$ ，将偏差的比例 P、积分 I 和微分 D 通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，其原理框图如图 4-2 所示。

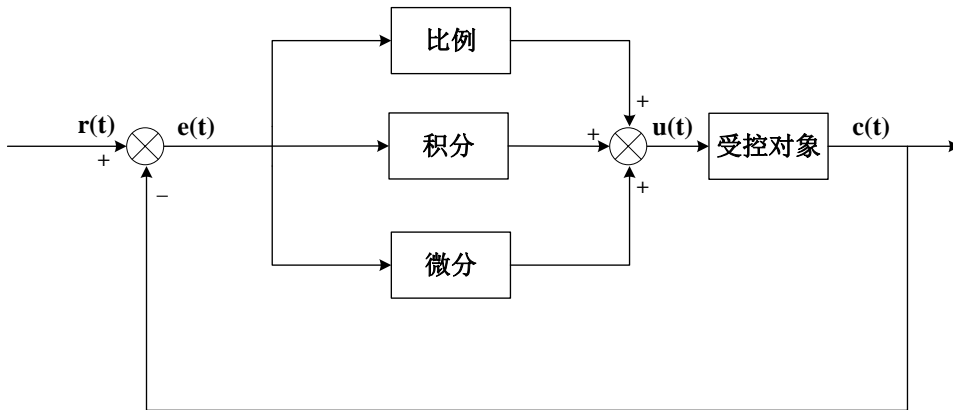


图 4-2 PID 控制原理框图

其控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

写成传递函数形式：

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

式中 K_p ——比例系数；

T_i ——积分时间常数；

T_d ——微分时间常数。

PID 控制器各校正环节的作用：

(1) 比例环节

比例环节能及时成比例地反映控制系统的偏差信号，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。比例系数 K_p 增大，可以加快系统响应速度，减小系数稳态误差，提高控制精度。但是过大会产生较大超调，甚至导致不稳定；若取得过小，能使系统减少超调量，稳定裕度增大，但会降低系统的调节精度，使过渡过程时间延长。

（2）积分环节

积分调节能对误差进行记忆并积分，有利于消除静差，因此积分有利提高系统的稳态性能。但它存在滞后现象，使系统的响应速度变慢，超调量变大，并可能产生振荡。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越大，积分作用越小，反之则越强。加大积分系数 T_i ；有利于减小系统静差，但过强的积分作用会使超调加剧，甚至引起振荡；减小积分系数 T_i 虽然有利于系统稳定，避免振荡，减小超调量，但又对系统静差消除不利。

（3）微分环节

比例调节和积分调节都是根据当时的输入偏差的方向和大小进行调节。而微分控制作用能够敏感出信号偏差的变化趋势，具有一定的预见性。但是微分控制作用只对动态过程起作用，而对稳态作用没有影响，并且对系统噪声非常敏感。在实际系统控制中，微分控制通常总是与比例控制和比例—积分控制结合起来，构成比例—微分或比例—积分—微分控制器。

在运动控制系统的位置环上的常采用 PID 控制器，因为它可以通过简单的三个参数的设定使系统达到很好的性能。

4.2.2 PI 控制器

具有比例—积分控制规律的控制器的称为 PI 控制器，输出信号 $u(t)$ 同时成比例地反映偏差输入信号 $e(t)$ 及其积分。

它的控制规律为：

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right)$$

式中 K_p ——比例常数；

K_i ——积分常数。

PI 控制器综合了比例、积分两种控制方式的优点，利用比例控制快速性消除干扰的影响，同时利用积分控制消除稳态误差。PI 控制相当于在系统中增加了一个位于原点的开环极点，同时也增加了一个位于 s 平面左半部的开环零点。

位于原点的极点可以提高系统的型别，以消除或减小系统的稳态误差，改善系统的稳态性能；而增加的位于 s 平面左半部的零点则用来提高系统的阻尼比，减缓 PI 控制器极点对系统稳定性产生的不利影响。只要积分时间常数足够大，PI 控制器对系统稳定性的不利影响就会大大降低。在工程实

践中，PI 控制器主要用来改善系统的稳态性能。

PI 控制器是比较常用的速度环控制器，它作为速度环时的结构框图如图 4-3 所示，此时它输出的电流命令为

$$I_{CMD} = \left(K_{VI} \int (V_{PCMD} - V_{FB}) dt + V_{PCMD} - V_{FB} \right) K_V \quad (4-1)$$

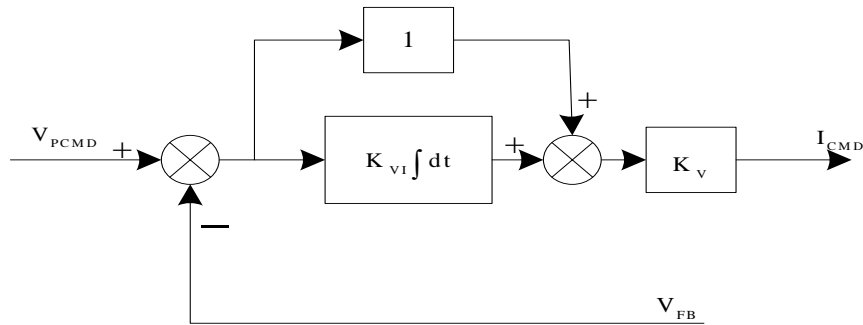


图 4-3 PI 控制器框图

4.2.3 PDF 控制器

PDF（Pseudo-Derivative-Feedback）控制策略是由美国的Phelan教授于本世纪70年代初提出的,它具有响应速度快、无超调、鲁棒性强、抗干扰性能好等优点。

该控制策略的基本思想是：按误差控制的闭环系统，其控制器的作用就是对输入的误差信号进行运算进而产生输出指令去调节功率驱动元件的输出功率，最终使得被控对象朝着误差减小的方向运动。理想的控制器应该满足以下三个条件：

- (1) 对任何误差(恒值或时变值) 均有反应;
- (2) 可以完全消除一切形式干扰产生的误差;
- (3) 如果被控对象未按指令动作，该控制器应能产生使功率驱动元件提供随时间而递增的输出功率的控制信号^[28]。

PDF 控制器和 PI 控制器很相似，它们都有对速度误差的积分环节并且都有比例环节 K_V ，主要的不同是 PDF 控制器使整个的误差信号都通过积分环节，这使得 PDF 控制器比 PI 控制器响应速度慢，但是却可以在 PDF 控制器中提高积分增益，从而使系统能够更好的抑制低频段的干扰。PDF 控制器的结构框图如图 4-4 所示，此时它输出的电流命令为

$$I_{CMD} = (K_{VI} \int (V_{PCMD} - V_{FB}) dt - V_{FB}) K_V \quad (4-2)$$

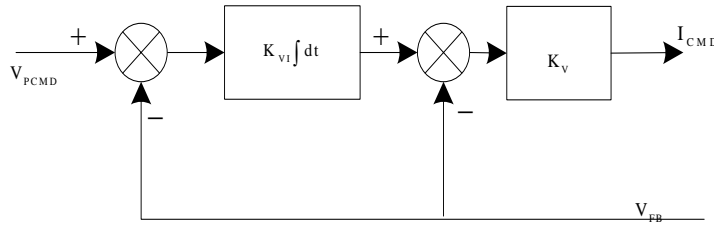


图 4-4 PDF 控制器的框图

4.2.4 PDFF 控制器

PDF(Pseudo-Derivative-Feedback)控制器加入前馈环节形成了 PDFF 控制器，该前馈环节是由比例增益 K_{VFR} 决定的，这一前馈使得在输入命令在经过积分之前进入系统，从而系统的响应更加迅速。同时 PDFF 控制器是对 PI 控制器的一种拓展，通过对 PI 控制器的算法的修改使超调减小，并允许低频段具有很大的刚度。PDFF 控制器的结构框图如图 4-5 所示，它的输出电流命令为

$$I_{CMD} = (K_{VI} \int (V_{PCMD} - V_{FB}) dt + K_{VFR} V_{PCMD} - V_{FB}) K_V \quad (4-3)$$

通过式 (4-1)、(4-2) 和 (4-3) 的对比可以看出，PDF 控制器和 PI 控制器都是 PDFF 控制器的特例，也就是 K_{VFR} 取极限时的情况。当 $K_{VFR}=1$ 时，式 (4-3) 化为式 (4-1)，PDFF 控制器变为 PI 控制器，当 $K_{VFR}=0$ 时，式 (4-3) 化为式 (4-2)，PDFF 控制器变为 PDF 控制器，而在 $0 < K_{VFR} < 1$ ，PDFF 控制器可以兼具 PI 控制器和 PDF 控制器的优点，即 PDFF 控制器是 PDF 控制器和 PI 控制器的综合体现。

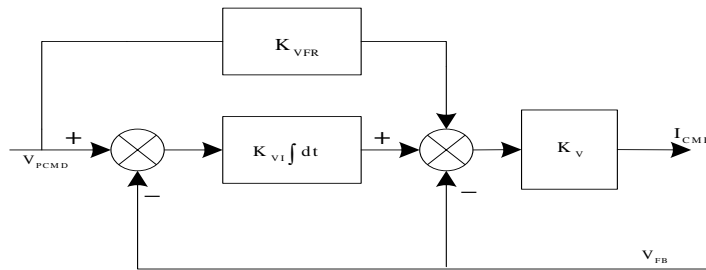


图 4-5 PDFF 控制器的框图

从以上研究中可以看出 PI 控制器虽然响应速度较快，但如果将积分增益调得很高以使低频段抗干扰能力增强的时候，则会使系统产生超调。相反 PDF 控制器则可以使系统在低频段的抗干扰能力很强，但响应速度较 PI 控制器就慢很多，而采用 PDFF 控制器可以通过调节 K_{VFR} 使系统既在低频段具有很好的抗干扰性，又不会产生很大的超调，同时还可以保证系统的响应速度，所以在本文速度环上采用 PDFF 控制器^[27]。

4.3 CRS 算法整定控制器参数

(1) CRS 算法

在实际生产中对于控制器的参数调整大多是通过手动进行，即根据经验和系统实际的工作状况进行的调整。但是，这样只能得到一组满足系统性能指标要求的参数，而这组参数并不是全局最优解，而且手动调整的方法也比较麻烦需要进行多次的尝试。为此人们想到了一些方法对控制器的参数进行整定，由 Ziegler 和 Nichols^[29] 最早提出了基于开环系统的阶跃响应 PID 控制器的参数整定方法。此后各种参数整定方法层出不穷，如极点配置方法、临界比例法^[30]但是这些方法大多是基于过程控制的而且是以稳定性为准则，很难使系统满足高速、高精度的性能指标。这时一些数学中的优化算法开始被应用于控制领域，本文所提到的 CRS 算法就是其中一种比较简单易于实现的优化算法，通过该算法整定的控制器在仿真和实际中都取得了比较好的效果。

CRS 算法^[31]也就是控制随机搜索算法，它是由 Goucher 和 Casares 在 1978 年最早提出的算法，它被证实具有很好的鲁棒性，并且在获得全局最优解方面非常有效，它最大的优点是简单和易于实现，对于本文这样的简单的参数整定可以起到很好的效果，利用该随机算法整定控制器参数的程序见附录二。

CRS 算法分为两部分，在算法的第一部分应用撕裂算法减少了需要同时解决的等式约束，建立起一个有着特殊排列规律的矩阵，产生一系列可以计算未知数的规范，在必要的时候，可以同时解出多做等式方程。该算法在奇异点处、非线性区域或者变量的雅可比矩阵接近奇异时都将会出现一些问题，但迄今这些问题在实际系统中都是很少遇见的。

在 CRS 算法的第二部分，CRS 算法由一个用户自定义的初始点开始搜寻最优解，也可以自动产生一个切实可行的初始点。利用高斯可能性分布准

则对每个新点进行迭代，把标准偏差向量（等价于其它搜索方法中的步长）作为一个决策性向量的函数来计算，该决策性向量的上下限由一个参数 k_1 决定（ k_1 的默认值为 1/3），通过解等式来验证新点的可行性，并带入不等式验证，其中等式可利用修改过的牛顿拉夫申公式解出。当尝试很多次都没有结果时，标准决策性向量将会被减小，并与另一个参数 k_2 相乘（ k_2 的默认值为 1/2）。尝试的次数为 $\eta_e n$ ，其中 n 为决策性变量的个数， η_e 为第三个参数（ η_e 的默认值为 25）。当一个能够使目标函数更优的可行点被找到时，一次新的迭代就开始了，标准偏差函数的元素也就被更新了。收敛准则是基于目标函数和决策性变量对前面所定义准则的承受能力而定的。

当完成了一次成功的尝试之后，标准偏差向量就被调整为

$$\sigma_i = k_1 \Delta x_i \quad i=1, \dots, n$$

$$\text{其中 } \Delta x_i = \min \left\{ \left| x_i^U - x_i \right|, \left| x_i - x_i^L \right| \right\}$$

x_i^L, x_i^U 分别是 x_i 的上限和下限，当失败了一定次数后（低于 $25n$ ），标准偏差就会被减小为：

$$(\sigma_i)_{new} = K_2 (\sigma_i)_{old}, \quad i=1, \dots, n$$

算法运行结束的条件为：

$$\frac{\left| (x_i)_{new} - (x_i)_{old} \right|}{x_i^U - x_i^L} \leq \varepsilon$$

此时得到的 x_i 即为所求的参数，在式中经常取 $\varepsilon = 0.001$ ，本文经过对一系列常用准则的对比实验最终选取超调量和调整时间作为参数整定的目标函数。

4.4 本章小结

本章主要介绍了一些应用于实际运动控制系统中的常用控制器的原理，包括 PID 控制器、PI 控制器、PDF 控制器和 PDFF 控制器，通过对比选定 PDFF 控制器作为速度环的控制器，选定 PID 控制器作为位置环的控制器，并且简单介绍了 CRS 控制器随机搜索算法，将其作为控制器参数的整定方法，并选择超调量和调整时间作为参数整定的目标函数。

第5章 系统实现

本章以第 3 章中得到的模型为被控对象，采用第 4 章中所选择的控制器，即在速度环采用 PDFF 控制器，在位置环采用 PID 控制器，并利用该章提到的 CRS 优化算法对控制器的参数进行整定，将设计好的控制器在 MATLAB 的 Simulink 工具箱里进行仿真以检验该控制器的性能，并将仿真通过的控制器应用于实际系统中进行调试，直线电机实物图如图 5-1，直线电机驱动的运动控制系统实物图如图 5-2 所示。

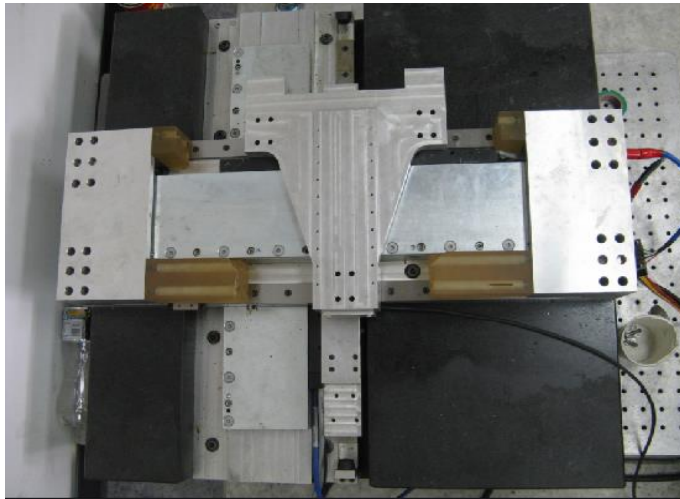


图 5-1 直线电机的实物图



图 5-2 运动控制系统的实物图

5.1 速度环仿真及实验结果分析

将第 3 章中得到的系统传递函数进行分解，得到速度环被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.01466s^3 + 196.5s^2 + 2.765 \times 10^5 s + 5.293 \times 10^7}{s^3 + 1033s^2 + 2.589 \times 10^7 s + 8.179 \times 10^7}$$

速度环开环系统的阶跃响应曲线如图 5-3 所示，从图中可以看出系统在开环时存在稳态误差，所以应当在控制器中加入积分环节，减小系统的稳态误差。开环系统的波特图如图 5-4 所示，系统的增益很小，波特图曲线是从负值开始的，这样无法满足系统对于快速性的要求，所以应该增大系统的增益来增大系统的带宽，同时也可看出运动控制系统的速度环采用 PI 控制器或 PDFF 控制器均可以满足系统的要求，由上一章分析可得采用 PDFF 控制器可以得到更好的效果。

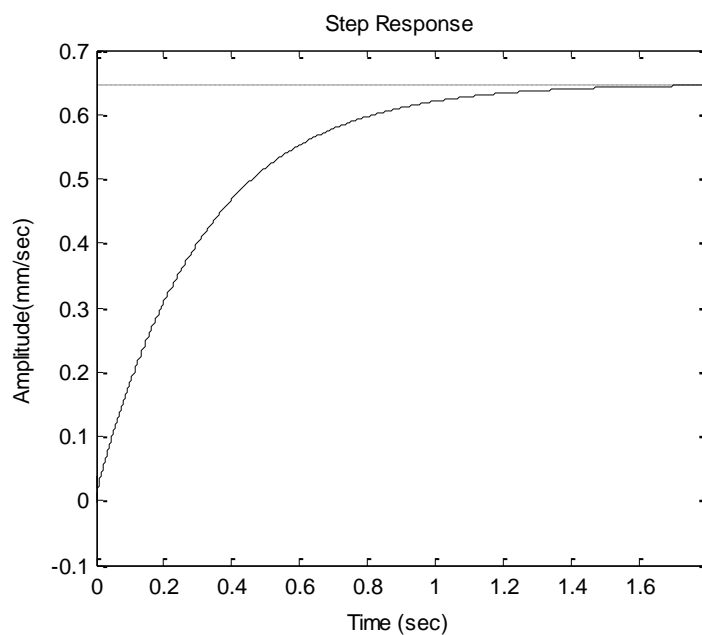


图 5-3 系统的阶跃响应

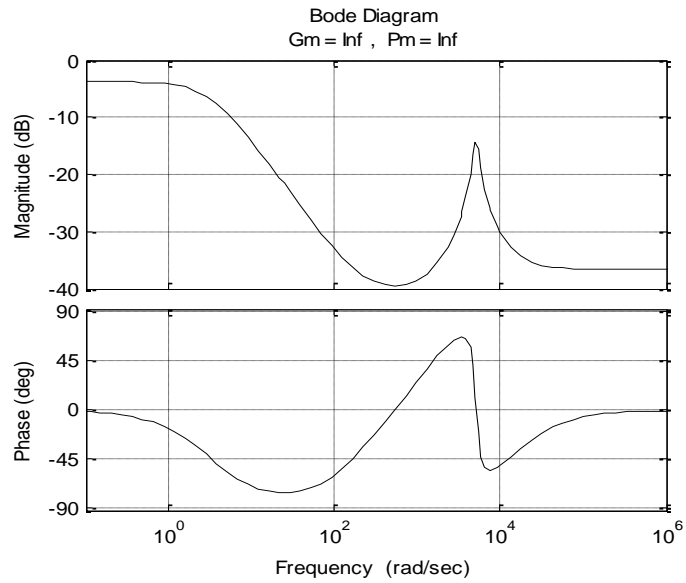


图 5-4 速度环被控对象的开环波特图

应用 CRS 算法以调整时间和超调量为目标函数整定速度环 PDFF 控制器的参数结果为

$$K_V=3570, K_{VI}=9247, K_{VFR}=0.8$$

速度环 PDFF 控制器在 Matlab 的 Simulink 工具箱中仿真框图如图 5-5 所示。

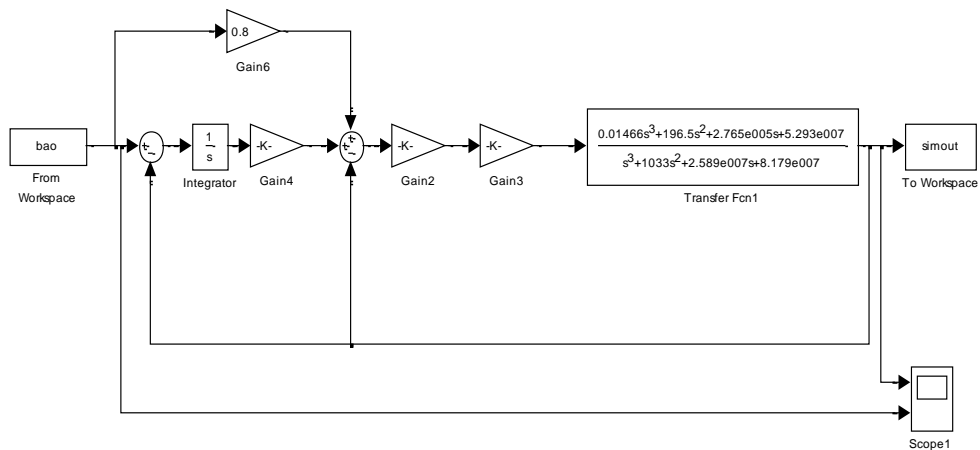


图 5-5 速度环采用 PDFF 控制器的 Simulink 仿真框图

它的阶跃响应如图 5-6 所示，从图中可以读出它的超调量为 2.19%，调整时间为 7.45ms。

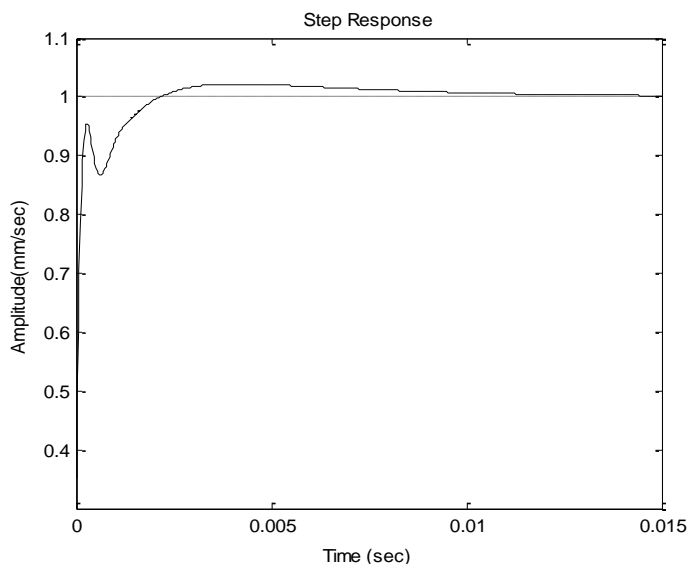


图 5-6 加入 PDFF 控制器后系统的阶跃响应

利用该 PDFF 控制器的参数，从驱动器中采集实际的输入和实际的输出，并将实际的输入作为仿真的输入信号，得到实际输入和仿真输出曲线如图 5-7 所示，得到实际输入和实际输出的曲线如图 5-8 所示。从图示曲线可以看出该控制器可以很好的使系统达到所需的性能指标，响应速度很快，超调也很小，且对于同一输入实际输出和仿真输出曲线接近，也进一步证明了模型的准确性。

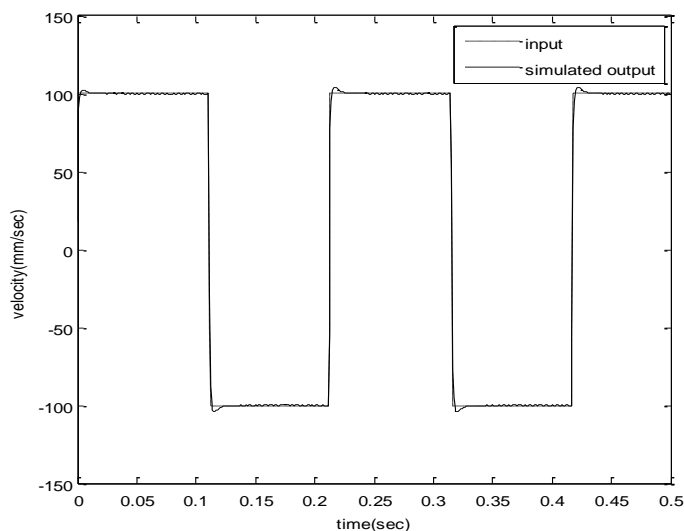


图 5-7 系统的实际输入和仿真输出曲线

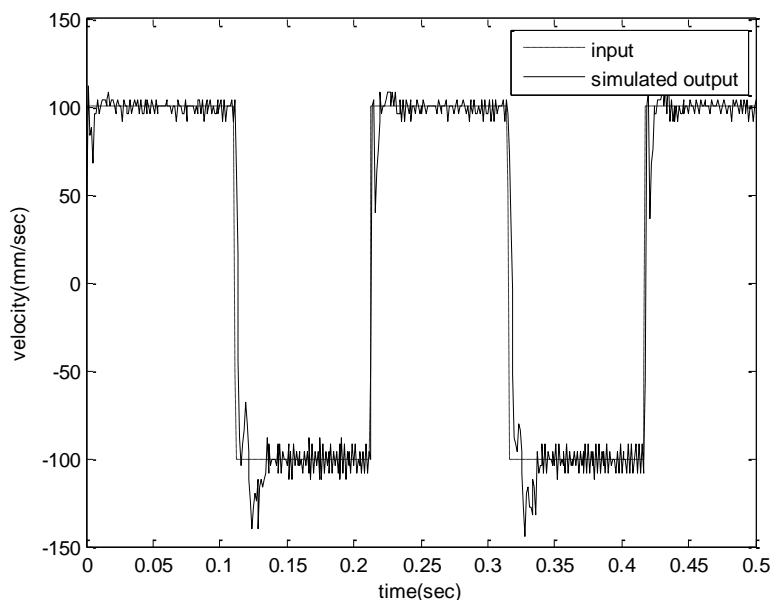


图 5-8 系统的实际的输入和输出曲线

5.2 位置环仿真及实验结果分析

以加入了速度环 PDFF 控制器的模型作为位置环的被控对象，并采用 PID 控制器作为位置环的控制器。利用 CRS 算法以调整时间和超调量为目标函数对 PID 控制器的参数进行整定，得到的参数为

$$K_p=9049, K_i=6269, K_d=190$$

利用该参数在 Matlab 的 Simulink 工具箱中进行仿真的框图如图 5-9 所示，采集运动控制器卡的输入作为仿真的输入，得到的输入输出曲线如图 5-10 所示，误差曲线如图 5-11 所示，可以看出虽然在前 0.2s 系统的误差很大，但从输入中看出这一段是系统的曲线规划阶段，而不是定位阶段，而从 0.2s 以后系统才进入定位段，可以看出此时系统的误差很小。利用 Simulink 工具箱中的示波器观察到仿真输出的超调为 $5\mu\text{m}$ ，调整时间为 4ms，符合设计要求。

在样机上进行实验得到系统的实际输入输出曲线如图 5-12 所示，误差曲线如图 5-13 所示，可以看出在实际系统中难以达到仿真时的效果，这可能是由于实际系统的机械部分存在一定的问题，导轨存在摩擦并且该 XY 平台在摆放时也没有达到绝对的平稳，在反方向运动时存在重力的分量。

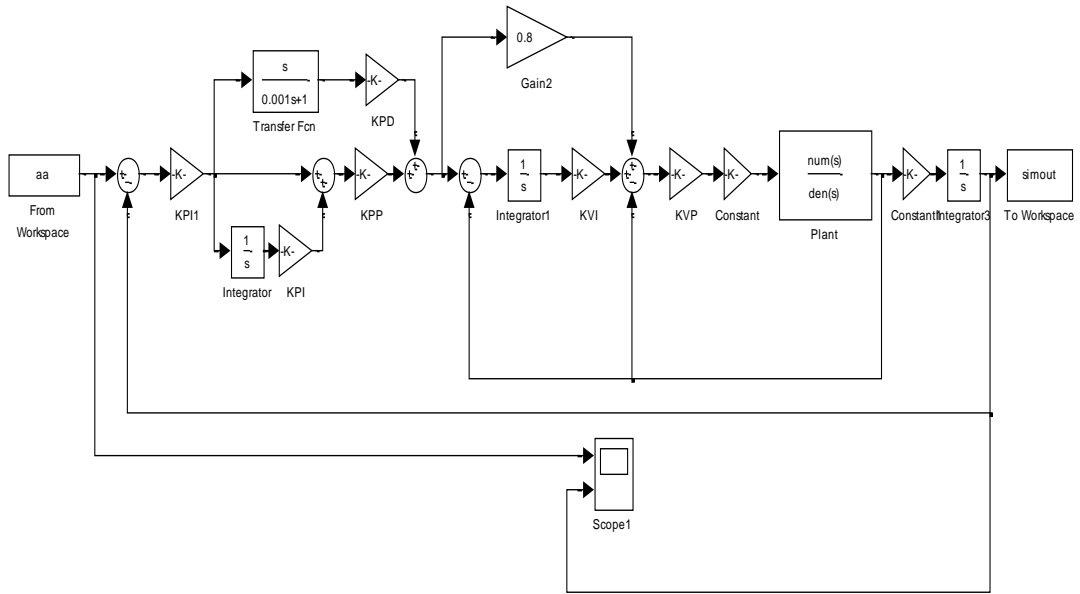


图 5-9 加入速度环和位置环控制器的 Simulink 仿真框图

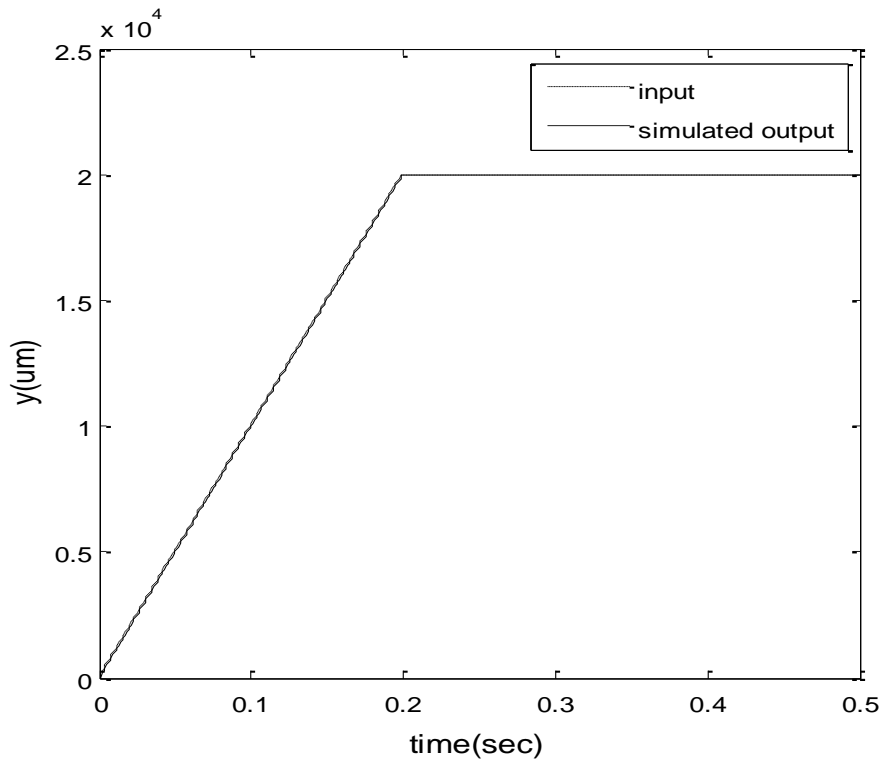


图 5-10 加入 PID 控制器后仿真输入输出曲线

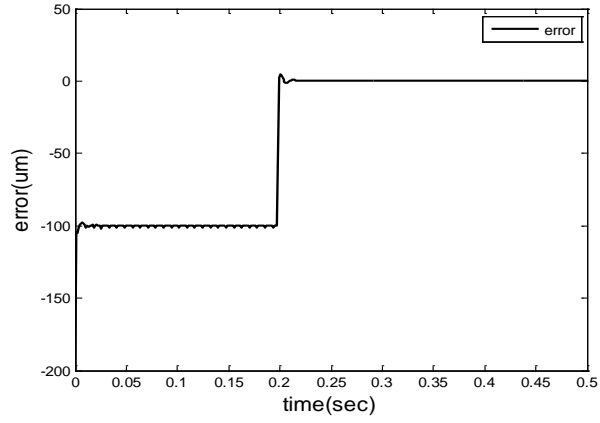


图 5-11 系统仿真的误差曲线

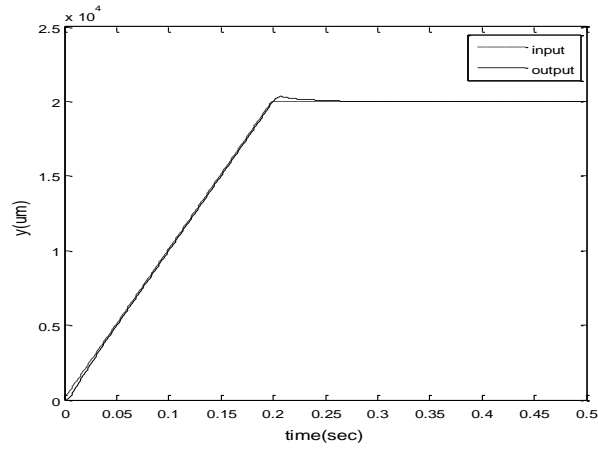


图 5-12 加入 PID 控制器后系统的实际输入输出曲线

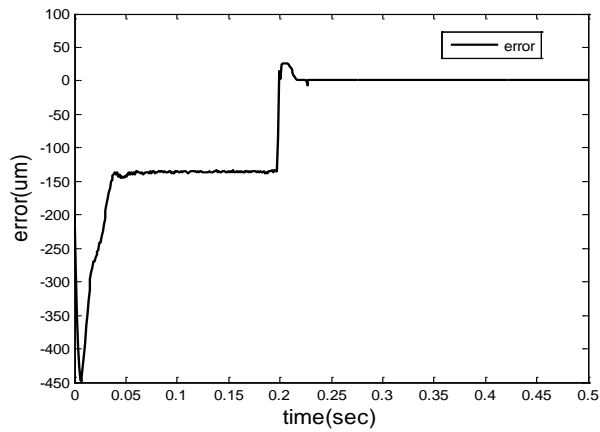


图 5-13 实际系统误差曲线

5.3 本章小结

本章是将上一章所设计的控制器进行仿真并将其应用于实际系统中的到的仿真曲线和实际曲线。在速度环上应用 PDFF 控制器，可以看出应用 CRS 算法整定的 PDFF 控制器无论在仿真和实际应用中均取得了良好的动态性能，超调很小，调整时间也较短。在位置环上应用 PID 控制器，CRS 算法整定的 PID 控制器在仿真时得到了很好的曲线，超调只有 2.19%，并且对于 20000um 的行程，最大误差只有 5um，调整时间也只有 4ms 但在实际中就难以达到这种效果，主要是因为机械系统在设计时存在很多问题，并且所选择的模型的阶次比较低，无法体现出系统的全部特性。

结论

本文以 XY 平台的一个轴为被控对象，进行了直线电机驱动的机电运动控制系统的设计。通过系统辨识的方法建立了系统的传递函数模型，并设计了全闭环控制器，本文的主要工作总结如下：

（1）首先对运动控制系统进行了方案设计，根据系统的性能指标选取了系统的执行元件、驱动器、控制器和测量元件，搭建了直线电机驱动的运动控制平台。

（2）基于以上运动控制平台，进行了系统辨识。利用固高公司的 GT_400 运动控制卡采集了数据，并利用 Matlab 的系统辨识工具箱中的线性模型进行参数辨识，最终得到了系统的传递函数模型，为下一步对该控制系统的分析、控制奠定了基础。

（3）在得到系统的传递函数模型后，利用该模型设计控制器，采用速度环、位置环全闭环控制的方式。通过对 PI 控制器、PDF 控制器、PDFF 控制器的对比分析，选用 PDFF 控制器进行作为速度环的控制器，采用 PID 控制器作为位置环的控制器，并采用 CRS 算法以超调量和调整时间为目标函数对该控制器进行了参数整定，得到一组最优的控制器参数。

（4）将整定好参数的控制器在 Matlab 的 Simulink 工具箱中进行仿真，通过最终结果可以证明该控制器具有良好的性能，但是由于实际系统的机械部分一定的问题，使得应用该控制器在实际系统得到的工作曲线比理想仿真曲线性能要差。

最终在实际中通过以上控制器的控制可以使直线电机驱动的运动控制系统基本满足性能指标的要求，工作情况稳定，性能良好。

通过本文的研究，已经基本完成 XY 平台单轴的控制，但要使 XY 平台交付使用还要对两个轴进行耦合控制，并且对于单轴的控制算法也要进行进一步的研究，以使其能够用于两个轴的联合控制。

致谢

本文是在导师马杰、楼云江和禹新路硕士的悉心指导下完成的，并由马杰和贺风华老师在论文的格式和内容方面给予了细心的修改，在此对他们给予我的帮助表示衷心的感谢。楼云江老师从本论文的选题、开题到研究无不倾注了大量的心血，禹新路硕士在整个毕业设计研究过程中给予了我具体、细致的指导，对于我论文的完成给予了很大的帮助，马杰和贺风华老师对于我的论文的撰写、格式和排版都给予了我细心的指导，她们不厌其烦的对于我的论文中存在的问题进行一遍遍的修改，值此论文完成之际我要对他们表示衷心的感谢。

最后，我要对一直全力支持我的父亲、母亲以及所有关心我的朋友表示最诚挚的谢意。

参考文献

- 1 蔡长春, 徐志锋, 潘晶, 庄建平, 刘新才. 直线电机的发展和应用. 微电机, 2003, 36(2): 47-49
- 2 潘超, 左健民, 汪木兰. 电动机在数控机床中应用的特殊性问题研究. 机床与液压, 2007, 35 (10): 57-58
- 3 D. Renton, M.A. Elbestawi. Motion control for linear motor feed drives in advanced machine tools. machine tools & manufacture. 2001, 41: 479-501
- 4 叶云岳. 国内外直线电机技术的发展与应用综述. 电器工业. 2003, 1: 12-15
- 5 丁汉. 高加速度运动控制系统的建模与控制. 航空制造技术. 2005, 8: 26-30
- 6 Shigeru Futami, Akihiro Furutani, Shoichiro Yoshida, Nanometer positioning and its micro-dynamics, Nanotechnology, 1990, 1: 31~37
- 7 M. Jouaneh, Ping Ge, Modeling and control of a micro-positioning tower, Mechatronics, 1997, 5(7): 465~478
- 8 钟 扬, 叶云岳, 赵光宙. 直线感应电机的新型 PID 控制研究综述. 微特电机. 2001, 12(50): 2-4
- 9 Z.Z.Liu, F.L.Luo, M.H.Rashid. Robust high speed and high precision linear motor direct-drive XY-table motion system. IEEE Proc.-Control Theory Appl. 2004, 2(151): 166-173
- 10 李庆雷, 王先逵, 吴 丹, 刘成颖, 石忠东. 永磁同步直线电机推力波动分析及改善措施. 清华大学学报. 2000, 40(5): 33-36
- 11 杜伟涛. 面向芯片封装的高速精密定位平台控制系统设计. 天津大学硕士毕业论文. 2006, 1: 1-6
- 12 孔慧勇. 基于运动控制卡的全闭环系统研究. 四川大学硕士学位论文. 2003, 5: 9-23
- 13 Seok-Myeong Jang, Dae-Joon You, a_ and Won-Bum Jang. Design and dynamic analysis of permanent magnet linear synchronous machine for servo application. American Institute of Physics. 2006, 99: 305-764
- 14 罗建强. 开放式 IC 平台控制系统设计. 上海交通大学硕士学位论文. 2007: 47-51
- 15 Rohrig, Christof. Motion Control of Linear Permanent Magnet Motors with Force Ripple Compensation. Department of Electrical Engineering and

- Information Technology.2001, 5:1-5
- 16 王贵明.直线电机进给系统特点及改进方案.制造技术与机床.1999, 6:45-47
- 17 徐南荣, 宋文忠.系统辨识.东南大学出版社,1991:1-20
- 18 drives. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2007, 47:1381-1392
- 19 Kaan Erkorkmaz,Yusuf Altintas.High speed CNC system design. Part II: Modeling and identification of feed drives. International Journal of Machine Tools & Manufacture.2001, 41:1487-1509
- 20 王蕾, 吉书鹏.基于 Matlab 的转台控制系统的模型辨识.先进制造与管理.2007, 8:32-34
- 21 Lennart Ljung.System Identification Theory for the User.第三版.清华大学出版社, 2002:1-563
- 22 Dr.Brian,M.Perreault. Control Strategies for Linear Synchronous Motors. IEEE.2007, 1:969-971
- 23 M.J.Jang,K.C.Lin,C.L.Chen. Modeling and Positioning Control of a Ball Screw Driven Stage. International Conference on Networking,Sensing & Control.2004,3:21-23
- 24 陶永华.新型 PID 及应用.工业仪表与自动化装置.1997,4: 60-62
- 25 M H Moradi. New techniques for PID Controller Design.IEEE.2003,3:903-906
- 26 徐世彬, 王再英.基于辨识的自校正 PID 实时控制系统研究.西部探矿工程.2006.3:284-286
- 27 [美]George Ellis.控制系统设计指南.刘君华, 汤晓君译.第三版.电子工业出版社,2006:72-128
- 28 李智铭, 徐庚保.二阶被控对象 PDF 控制器设计的新途径.航天控制.1998,2:63-64
- 29 P.Cominos and N.Munro, PID controllers: recent tuning methods and design to specification.2002, 1:46-53
- 30 班立权, 鲁五一.PID 参数自整定算法及仿真.计算技术与自动化.2005, 3:12-14
- 31 JULIO R.BANGA and WARREN D.SEIDER. Global Optimization of Chemical Processes using Stochastic Algorithms.Dept.Chem.Eng.2000, 2: 33-45

附录 1

CRS 算法整定控制器参数程序：

（1）主程序

```
%-- Default values for parameters k1, k2 and maxfsd
k1=1./3;
k2=1./2;
maxfsd=25.*nvar;
error_e=0.01;
iter=0;
fsd=0;
neval=0;
x=x0;
[funval1 funval2]=conobj_baobao0(x0);
if(~feasible)
    fprintf('>>> Initial point is infeasible')
    return;
end
% Main loop
while 1
    iter=iter+1;
    int_min=min(ux-x,x-lx);
    sigma=k1.*int_min;
    better=0;
    while (~better)
        xnew=x+sigma.*rand(1,nvar);
        if (all(xnew<ux) & all(xnew>lx))
            [funval_new1 funval_new2]=conobj_baobao0(xnew);
            if ((funval_new1 < funval1) & (feasible))&&((funval_new2 <
funval2) & (feasible))
                better = 1;
            else
```


(2) CRS 算法目标函数的求解

```
function [fobj1 fobj2]=conobj_baobao0(x)
global neval;
global feasible;
global sigmaa;
global ts;
feasible=1;
Kp=x(1);Ki=x(2);Kvfr=x(3)
Gs=tf([Kp*Kvfr Kp*Ki],[1 0]);
G0=6.5*10e-4*32767/700000*tf([0.3132 4198 5.907e006 1.131e009],[1 1033
2.589e007 8.179e007]);
G1=tf([Kp,Kp*Ki],[1 0]);
G2=G0*G1;
G3=1+G2*G1;
[num1]=tfdata(G2);
[num2]=tfdata(G3);
G=tf(num1,num2);
[y,t]=step(G);
[sigmaa,tp,ts,error]=perf(2,y,t);
fobj1=sigmaa;
fobj2=ts;
neval=neval+1;
return
```

```
function [x,funval1,funval2]=cicrs(x0,lx,ux)
%-- CRS: Controlled Random Search (*basis algorithm*)
%-- x0: initial point vector
%-- lx, ux: lower and upper bound vectors for x
global feasible;
global neval;
nvar = size(x0,2);
```


（3）系统超调量和调整时间的求解

```
function [sigmaa,tp,ts,error]=perf(key,y,t)
%Count sigma and tp
[mp,tf]=max(y);
cs=length(t);
yss=y(cs);
sigmaa=100*(mp-yss)/yss;
tp=t(tf);
error=yss-1;
%Count ts
i=cs+1;
n=0;
while n==0,
    i=i-1;
    if key==1,
        if i==1,
            n=1;
        elseif y(i)>1.05*yss,
            n=1;
        end;
    elseif key==2,
        if i==1,
            n=1;
        elseif y(i)>1.02*yss,
            n=1;
        end;
    end;
end;

t1=t(i);
cs=length(t);
j=cs+1;
n=0;
```

```
while n==0,
    j=j-1;
    if key==1,
        if j==1,
            n=1;
        elseif y(j)<0.95*yss,
            n=1;
        end;
    elseif key==2,
        if j==1,
            n=1;
        elseif y(j)<0.98*yss,
            n=1;
        end;
    end;
end;
t2=t(j);
if t2<tp
    if t1>t2
        ts=t1;
    end
elseif t2>tp
    if t2<t1,
        ts=t2;
    else
        ts=t1;
    end
end
end
```