

模式识别与运动控制实验

Motion Control System Experiment

自动控制与测试教学实验中心

运动控制系统

- 运动控制系统是以机械设备为对象，以控制器为核心，以电动机及电力电子功率变换装置为执行机构，在自动控制理论的指导下组成的电气传动自动控制系统。

控制系统分类

- 按照被控变量的响应速度划分，可以分成过程控制和运动控制两大类
 - 过程控制——是工业生产过程的自动控制，其被控对象主要是温度、压力、流量、液位等过程控制量。
 - 运动控制——是以机械运动为主要生产方式，以电机为主要被控对象的快速、高精度的控制。
-

运动控制系统的分类

- 按被控物理量分：以转速为被控量的系统叫调速系统；以角位移或直线位移为被控量的系统叫位置随动系统或伺服系统。
 - 按驱动电机的类型区分：直流传动系统；交流传动系统。
 - 按控制其的类型分：模拟控制系统；数字控制系统。
-

运动控制系统的组成

- ❑ 被控对象—被操纵的机械设备（数控机床、机器人、倒立摆）。关键参数—被控量
 - ❑ 电机驱动系统—电机（马达）+驱动器
 - ❑ 运动控制器—可编程控制器（**PLC**）、运动控制器、多轴计算机辅助控制器。**PC**机控制系统、单片机控制系统。
 - ❑ 传感器—数字、模拟
-

教学方式

- 以吊摆、倒立摆为研究对象，以独立完成设计与实验任务为手段，采用课上、课下相结合，基础教育与创新教育相结合的方式，调动学生的积极性，让学生自己动手建模、设计、编程、调试提高工程技巧，教师对一些关键技术给予必要的指点。让学生真正掌握计算机控制的关键技术。

项目教学法

（Project Based Learning，简称PBL）

- ❑ 项目教学法是指师生通过共同实施一个或多个完整的“项目”而进行的教学活动。它萌芽于欧洲的教育思想，最早的雏形是18 世纪欧洲的工科教育和19 世纪美国的合作教育，经过发展到20世纪中后期逐渐趋于完善，并成为一种重要的理论思潮。
 - ❑ 有利于发挥学生主体作用。
 - ❑ 有利于培养学生独立学习能力。
 - ❑ 有利于进行分层教学。
 - ❑ 有利于培养学生分析、解决问题的能力。
-

学习方法

- 本课程采用**基于工程项目的教学方法**，学生要以实习工程师的身份，主动承担设计项目，积极主动学习的态度对待。
 - 要勤于动手、敢于动手。
 - 提倡独立设计、独立完成，反对抄袭。
 - 鼓励在控制方法、软件使用和功能开发方面的创新。
-

项目教学法的实步骤

- 教师**下达项目任务书**：包括：完成项目的时间、完成项目的人员、项目完成的具体要求。
- **系统设计辅导**—设备介绍，初步方案，已有案例
- 学生**制定项目方案**：根据项目要求，充分利用资源制定项目方案包括：项目计划，确定实施步骤和程序，人员分工，时间安排。
- **方案评估**：根据学生制定的项目方案由教师组织学生一起对方案的可行性进行评估。
- **软件设计辅导**—软件要求，编程要点。

项目教学法的实步骤

- **实施计划**：根据可行性方案，学生确定各自在小组内的分工及小组成员间合作形式，按照已确定的工作方案和程序工作。
 - **项目施工**：复杂项目或所需时间较长的项目要记好施工日志。
 - **成果展示**：项目施工结束后，学生对自己的成果进行展示，并进行讲解。
 - **评估总结**：主要根据每个学生在该项目中的参与程度、所起的作用、合作能力及成果等进行评价，可先由学生自己进行自我评估，之后再由教师对项目进行检查评分。师生共同讨论、评判在项目工作中出现的问题、学生解决问题的方法及学生的学习行为特征。通过对比师生的评价结果，找出造成评价结果差异的原因。
 - **提交报告**
-

时间安排

序号	日期	节数	教 学 内 容	备 注
1	10.15	4	运动控制系统概念及课程介绍，吊车系统介绍；系统元件的测试方法，吊车系统的静、动态设计与建模仿真方法(讲课2学时)。计算机控制吊车系统原理，计算机实时控制程序的编制方法(讲课2学时)	2#118
2	10.22	4	吊车系统建模,吊车系统的静、动态设计与仿真（最优控制方法）	2#118
3	10.29	4	A/D\D/A转换器的原理与编程(讲课) A/D/D/A编程与调试实验。	2#118
4	11.5	4	吊车实时控制程序的编制与闭环调试	2#118
5	11.12	4	闭环系统调试与实验结果检查。	2#118
6	11.19	4	倒立摆的原理与模拟式倒立摆实验	新主楼E607
7	11.26		提交报告	

运动控制实验一

吊摆控制系统实验

控制系统的组成：

- ❑ 被控对象—导轨上的小车和吊摆
 - ❑ 被控量—摆角 θ ，小车的位置 X
 - ❑ 驱动系统—电机（马达）+功率放大器
 - ❑ 运动控制器—微机控制系统（PC+A/D、D/A卡）
 - ❑ 测量传感器—单圈电位计（测量 θ ）
多圈电位计（测量 X ）
-

吊车系统结构



新型吊车系统结构



吊摆控制系统的工作原理

- 给定小车位置指令 R ，运动控制器产生控制信号 U ，经过功率放大器放大产生电压 U_a ，使电机转动，电机旋转带动小车移动，测量电位计产生位置电压 U_c ，当 $R - U_c = 0$ 时，电机停止转动，小车移动到指定位置。与此同时，小车的运动引起摆角 θ 的变化，当 $\theta \neq 0$ 时测量电位计产生信号 U_θ ，运动控制器产生控制信号 U ，经过功率放大器放大产生电压 U_a ，使电机转动，电机旋转带动小车向着减小 θ 的方向移动。
-

一. 技术指标:

1. 摆角稳定时间小于5秒，摆动次数小于3次
2. 吊车启动时最大摆角小于 $\pm 10^\circ$
3. 吊车最大速度为0.5米/秒
4. D/A输出 100mv电机起动，D/A输出5 v时对应电机最大速度

考核：实验结果与回答问题60%；实验报告40%；

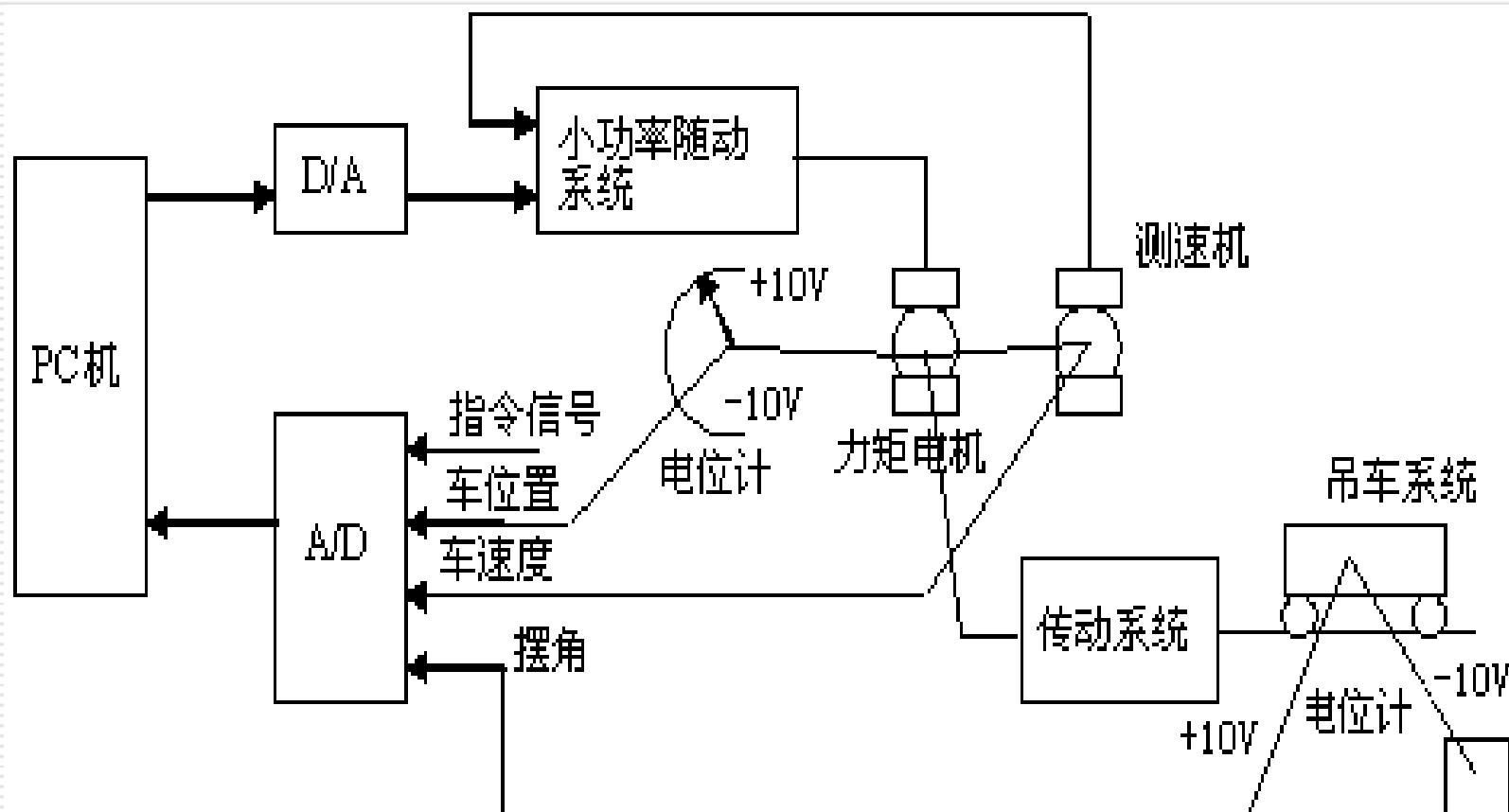
二. 设计任务

1. 系统方案设计和主要部选择
 2. 系统元部件测试
 3. 建立系统数学模型
 4. 系统设计（静态设计、动态设计）和仿真
 5. 数字控制系统电路设计
 6. 数字控制器软件设计
 7. 闭环系统实验和调试
-

主要参考书

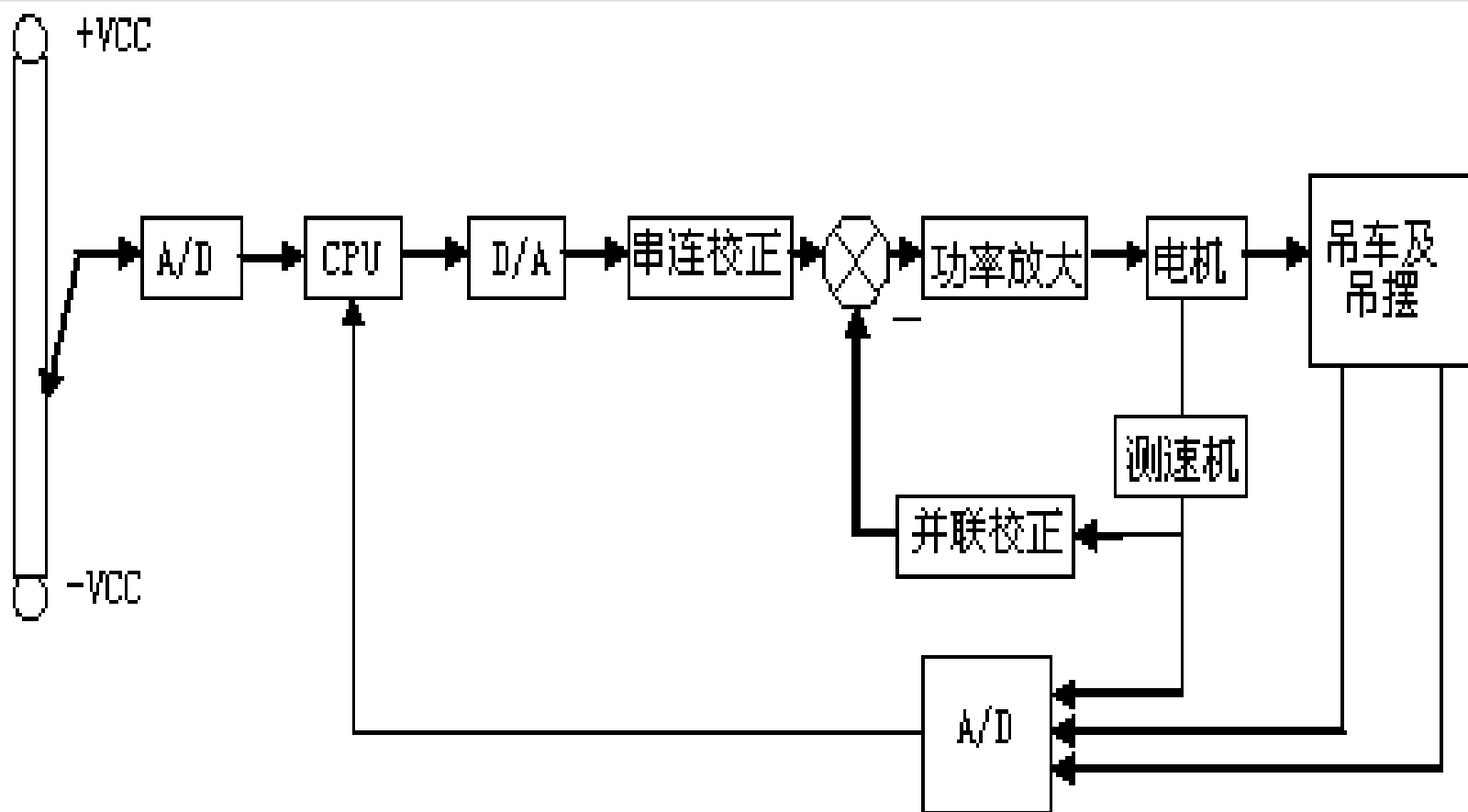
1. 数字式桥式吊车控制系统试验说明书
 2. 倒立摆控制系统实验说明书 袁少强
 3. 计算机控制系统系列实验指导书 袁少强
 4. 计算机控制系统设计与实现 郭锁凤
 5. Borland C函数库手册或TC函数库手册
-

系统组成及工作原理：



数字式桥式吊车系统控制系统机构原理

数字式桥式吊车控制系统框图



数字式桥式吊车控制系统框图

元部件选择：

- ❑ 低速直流力矩电机——其结构简单，可靠，使用方便，低速力矩电机可以提供较大的转矩，满足系统的控制要求
 - ❑ 测速机
 - ❑ 小功率随动系统
 - ❑ A/D、D/A接口板（HD1219）
 - ❑ 单圈电位计（测摆角）
 - ❑ 多圈电位计（测车位移）
-

主要元部件性能测试：

- 测速机特性测试--测速机作为系统的速度反馈元件，对系统影响最大的是其输入输出特性，应在实际负载条件下测试。由于本试验要求精度不高，可用电压表测出电压，用转速表测转速，求出梯度。注意两个旋转方向都要测试，取其平均值。

- 单圈电位计--安装在吊摆轴上，因电位计两端点加电压+12V、-12V，其梯度理论值为

$$24/(2 \times 3.14) = 3.82 \text{V/rad}$$

- 多圈电位计--安装在导轨一侧的皮带轮上，测量小车的线位移。电位计两端的电压为+12V、-12V. 其梯度理论值为：

$$24/(40 \times 3.14 \times 10^{-2}) = 19.1 \text{ (V/m)}$$

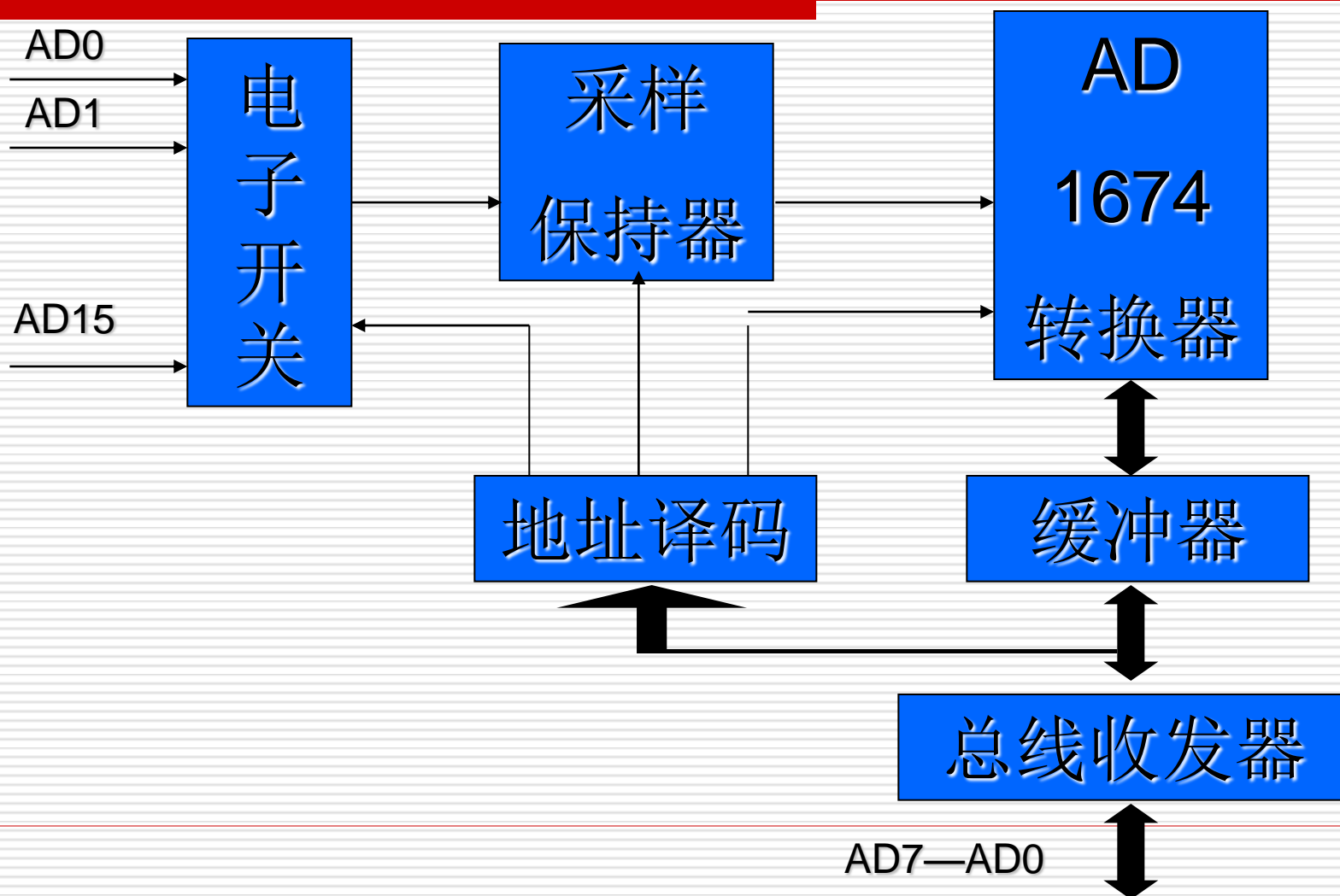
- 4、A/D D/A板测试--用C语言编写A/D D/A程序，测试A/D D/A板的性能。
-

元部件测试—功率放大器

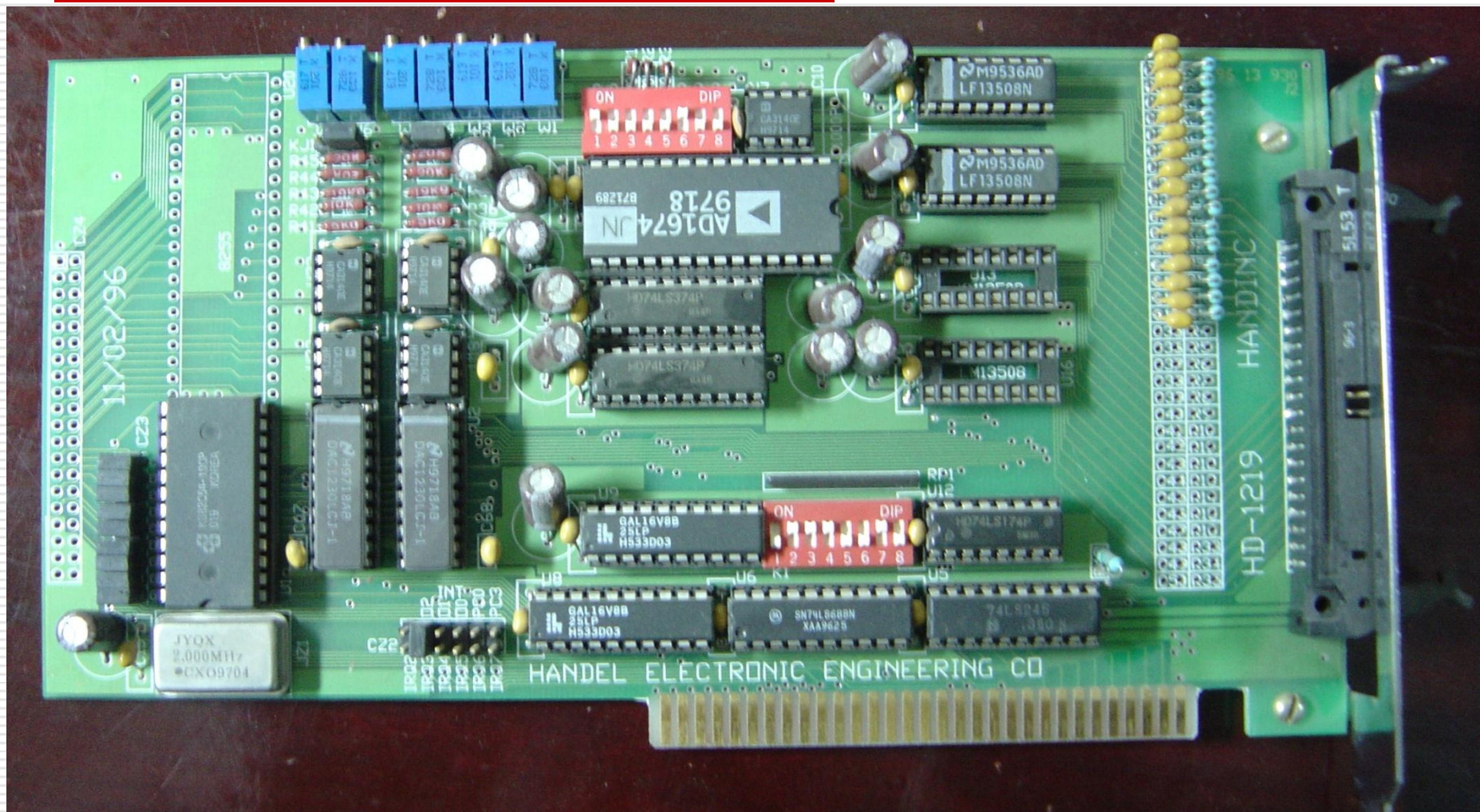
- 将功率放大器的输出端 U_o 与电机相连
- 在功率放大器输入端输入直流电压，每试验一次增加一伏，测量输入、输出电压，记录并画出曲线。
- 计算功率放大器的增益

$$K=U_o/U_i$$

HD1219接口板A/D转换硬件



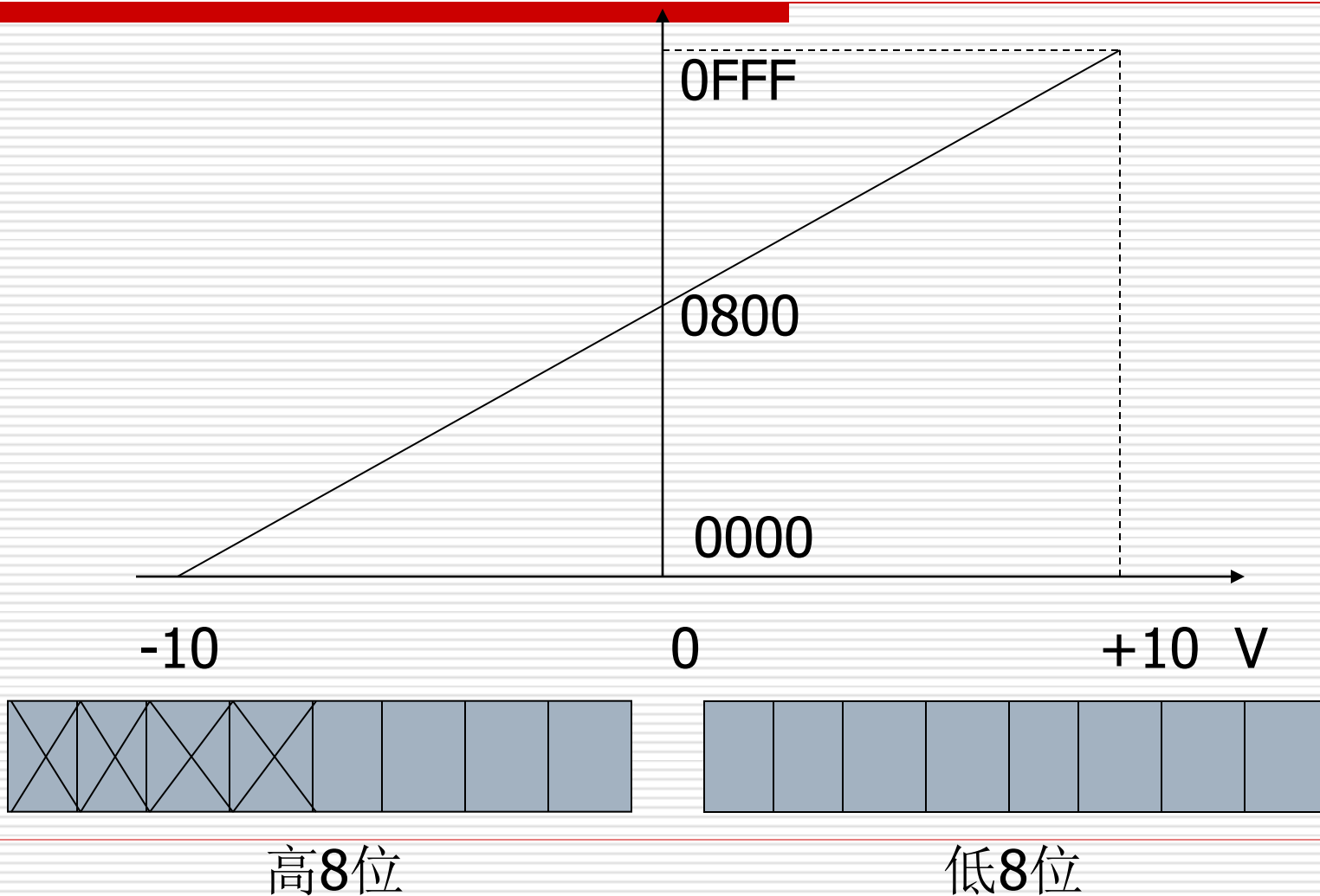
A/D D/A接口板



HD1219接口板I/O地址的功能 基地址Base=310H

地址	芯片	R/W	功能
Base	AD574	W	通道选择
Base+1	AD574	W	A/D起动
Base+2	AD574	R	高4位
Base+3	AD574	R	低8位
Base+4	DA1232 (1)	W	高8位
Base+5	DA1232 (1)	W/R	低4位, 起动D/A
Base+6	DA1232 (2)	W	高8位
Base+7	DA1232 (2)	W/R	低4位, 起动D/A
Base+8	8253(计数器)	W	计数器0
Base+9	8253(计数器)	W	计数器1
Base+10	8253(计数器)	W	计数器2
Base+11	8253(计数器)	W	控制字
Base+12	8255 (并口)	W/R	A口
Base+13	8255 (并口)	W/R	B口
Base+14	8255 (并口)	W/R	C口
Base+15	8255 (并口)	W	控制字

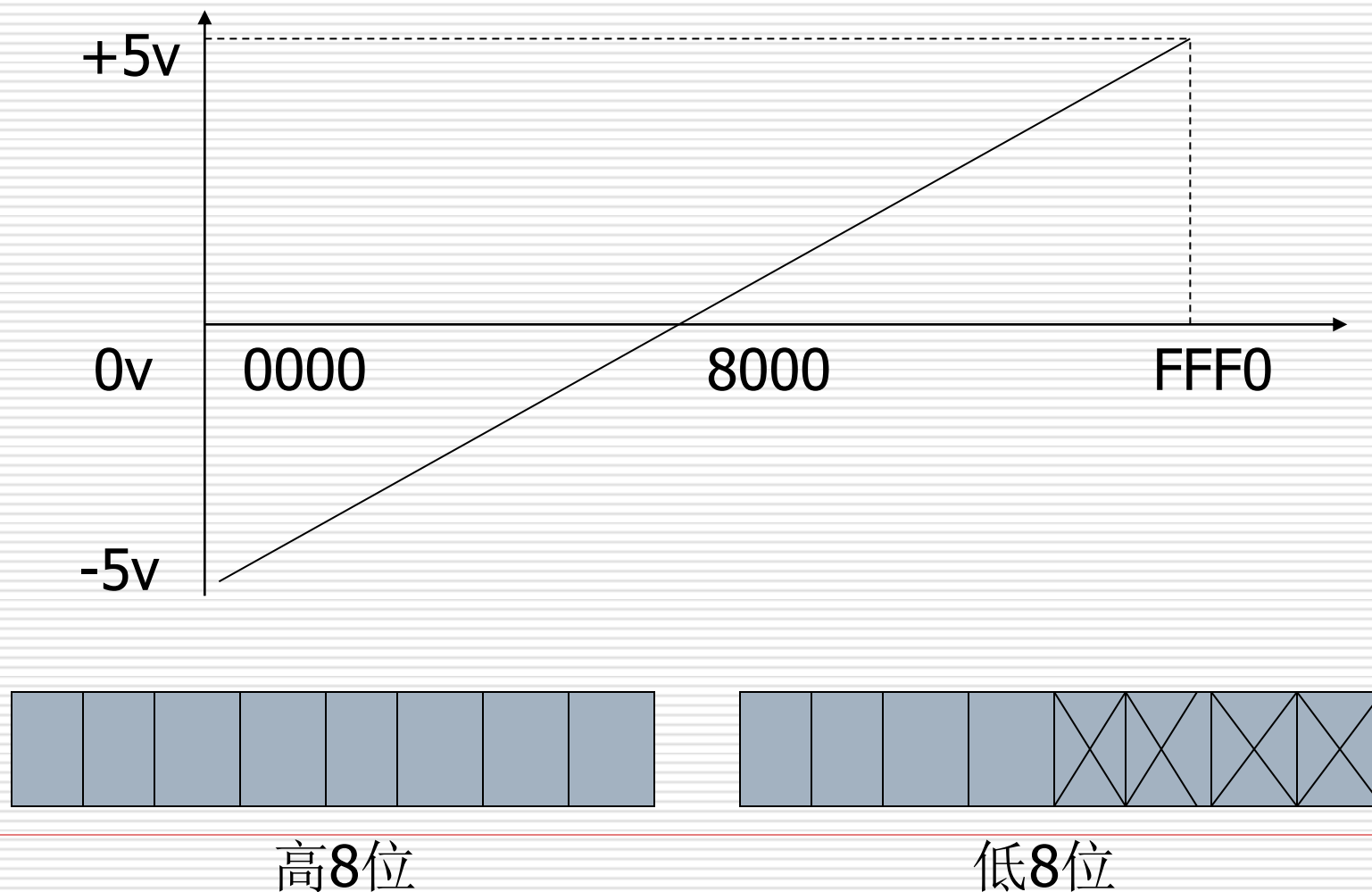
双极性A/D电压/数码对应关系



A/D驱动程序的编制

- 8253工作与方式4
 - 发送通道号 (0-15)
 - 延时25us
 - 启动A/D转换
 - 延时25us
 - 读高4位(屏蔽高4位)
 - 读低8位
 - 合成12位
 - 转换成浮点数(-1-+1)
 - `outportb(0x31b,0x18);`
 - `outportb(0x310,0xa);`
 - `for(i=0;i<5000;i++)`
 - `outportb(0x311,0x0);`
 - `for(i=0;i<5000;i++)`
 - `p=inportb(0x312)%16;`
 - `q=inportb(0x313);`
 - `r=p*256+q;`
 - `ad=r/0x800-1`
-

双极性D / A数码/电压对应关系



D / A驱动程序的编制

- 输入浮点数 (-1, +1)
 - 转换为16进制偏移码
 - 分为高8位和低8位
 - 高4位和低4位互换
 - 写入高8位
 - 高4位和低4位互换
 - 写入低8位
 - 启动D/A转换
 - `x=0.5;`
 - `x=(x+1)/2*0xfff0;`
 - `lo=x%256;hi=(x-lo)/256;`
 - `newhi=hi%16*16+(int)hi/16;`
 - `outportb(0x314,newhi);`
 - `newlo=lo%16*16+(int)lo/16;`
 - `outportb(0x315,newlo);`
 - `inportb(0x315);`
-

直流电动机性能测试

- 电枢电阻的测量--直接采用欧姆表测量，电刷与电枢在不同位置上的接触电阻不同，测量时应在电刷处于不同位置时多测几次，取其平均值。
- 电感的测量--直接用具有测电感功能的万用表来测量，多测几次，取其平均值。
- 反电势系数 K_e 的测量--根据电机的电压平衡方程可得：
$$K_e = (U_a - I_a R_a) / \Omega$$

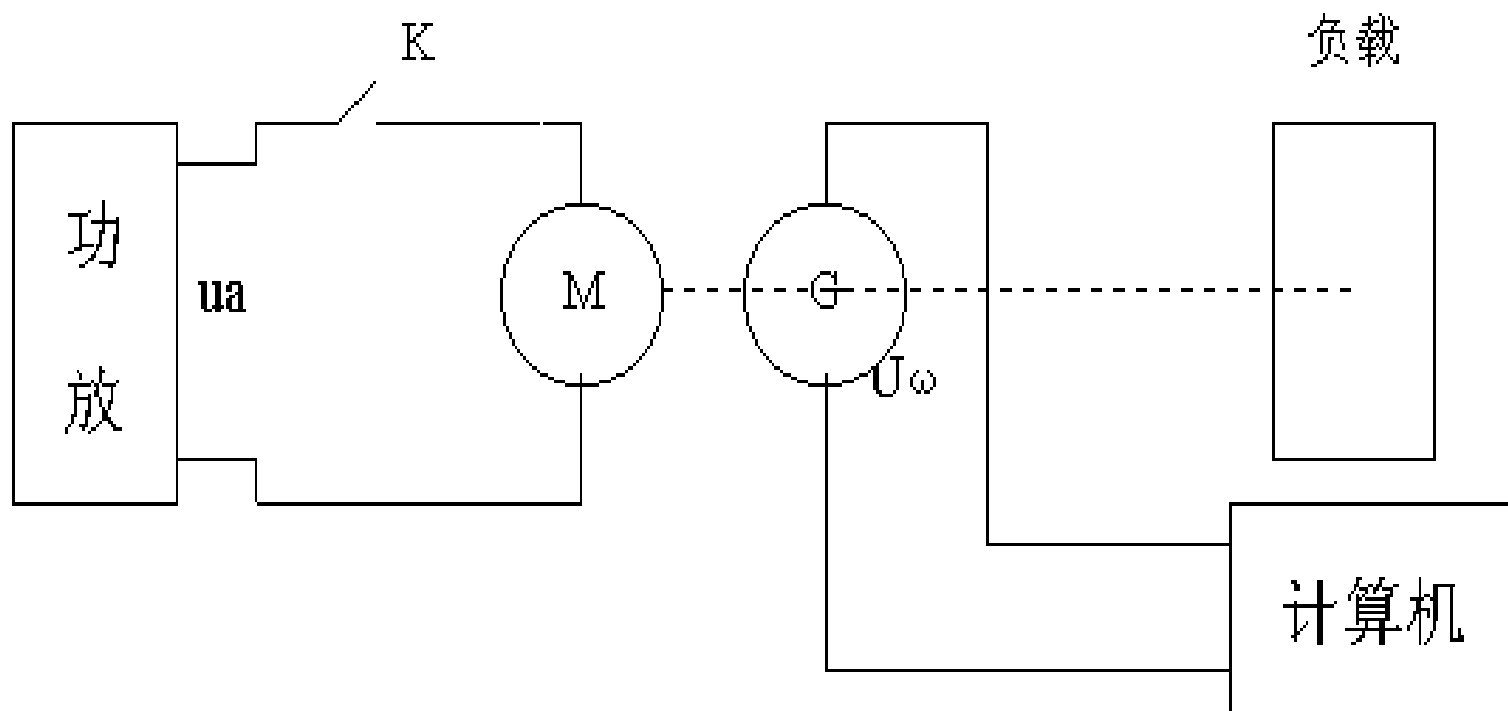
通过测量电枢电压 U_a ，电枢电流 I_a 及转速 Ω ，理论上式及可求得 K_e 。利用反电势系数与力矩系数的关系，即可求得力矩系数 K_t ：

$$K_t = 0.1032 K_e (\text{Kg} \cdot \text{m/A})$$

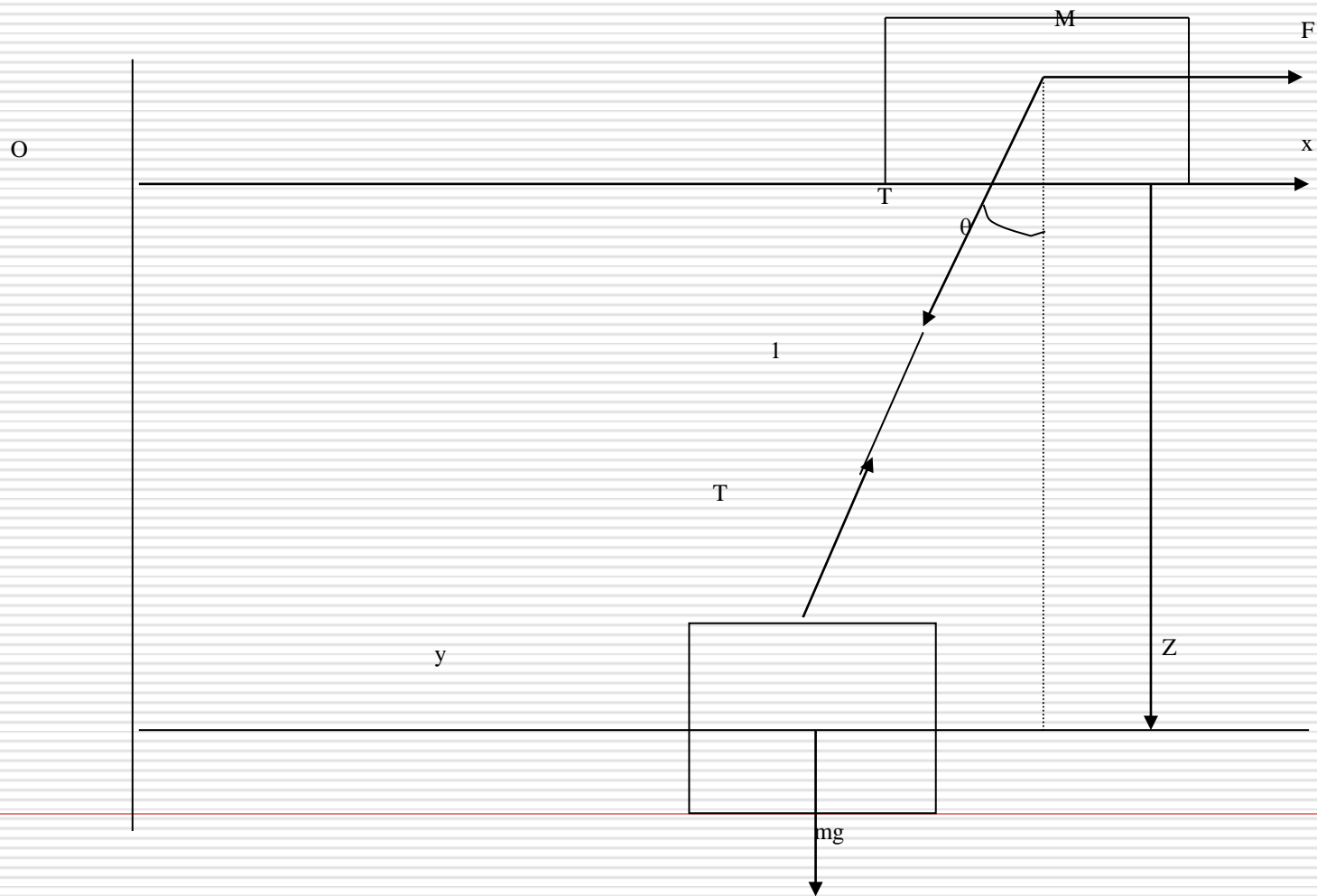
直流电动机性能测试

- 电机的调速特性--电机的调速特性是指在一定的负载下，转速与控制电压的关系曲线。一般来说，直流电机的机械性能和调速特性均可看成是一组平行的直线，因此，在条件不允许时，可近似用空载（只有摩擦力矩）特性曲线代替。
 - 电机时间常数及电磁时间常数的测试--运用阶跃过程测试法：按图连接好线路，将开关K突然合上后，一个阶跃电压加到电枢两端，有计算机记下电机转速的阶跃过渡过程曲线。由于电磁时间常数较小，故可将 U_a 与转速 w 的动态响应看成非周期环节，从图中可求得 T_m 。
-

直流电动机性能测试



吊车受力分析



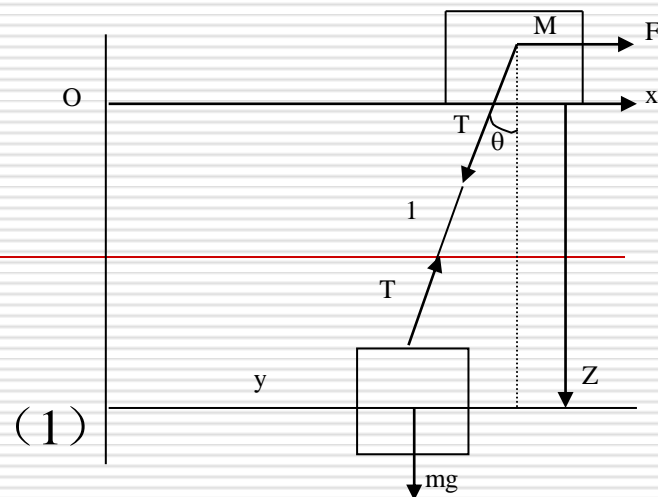
吊车数学模型的建立

受力分析可得：

$$M \ddot{x} = F - T \sin \theta$$

$$m \ddot{y} = T \sin \theta$$

$$m \ddot{z} = mg - T \cos \theta$$



(1)

由几何关系： $y = x - l \sin \theta$ 对t求两次导数： $\ddot{y} = \ddot{x} + l \sin \theta \dot{\theta}^2 - l \cos \theta \ddot{\theta}$
 $z = l \cos \theta$ 带入1解得： $\ddot{z} = -l \sin \theta \dot{\theta}^2 - l \cos \theta \ddot{\theta}$

$$\ddot{x} = \frac{F - m \sin \theta (l \dot{\theta}^2 + g \cos \theta)}{M + m \sin^2 \theta}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{F \cos \theta - Mg \sin \theta - m \sin \theta (l \dot{\theta}^2 \sin \theta + g)}{l(M + m \sin^2 \theta)}$$

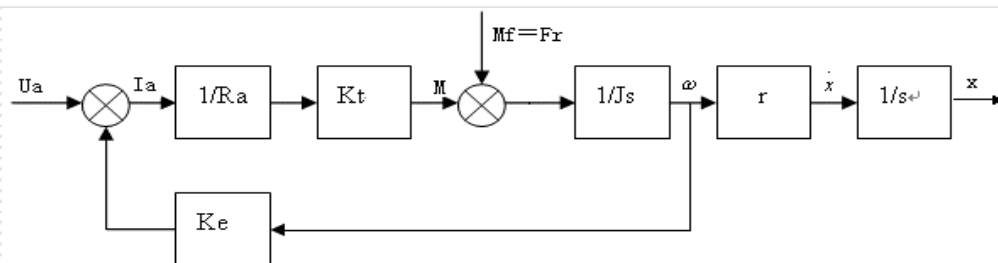
线性化处理设：

$$\sin \theta = \theta, \cos \theta = 1, \sin^2 \theta = 0, \dot{\theta}^2 \sin \theta = 0, \quad x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$$

得到状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m}{M}g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{M+m}{Ml}g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{1}{Ml} \end{bmatrix} F$$

吊车—电机数学模型的建立



吊车—电机框图

由图可以写出：
整理可得：

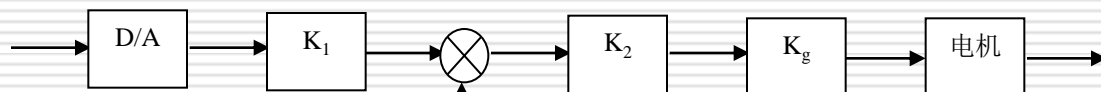
$$[(U_a - K_e \omega) \frac{K_t}{R_a} - F \cdot r] \cdot \frac{r}{J s^2} = x$$

$$F = [0 \quad -\frac{MK_e K_t}{MR_a r^2 + R_a J} \quad \frac{Jmg}{Mr^2 + J} \quad 0]X + \frac{MrK_t}{MR_a r^2 + R_a J} U_a$$

总状态方程为：

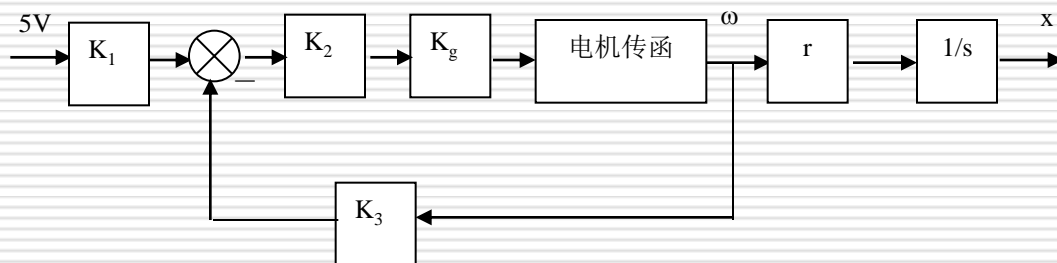
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_e K_t}{MR_a r^2 + R_a J} & -\frac{mg r^2}{Mr^2 + J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_e K_t}{l(MR_a r^2 + R_a J)} & -\frac{(M+m)gr^2 + gJ}{l(Mr^2 + J)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{rK_t}{R_a(Mr^2 + J)} \\ 0 \\ \frac{rK_t}{lR_a(Mr^2 + J)} \end{bmatrix} U_a$$

静态系统设计:



1. 系统的启动要求: D/A输出100mV时启动,

知: $K_1 K_2 K_g = U_{\text{死区}} / 100\text{mV} = 17$ (*)



2. 由吊车最大速度为0.5m/s可知电机的最大转速为: $\omega_{\text{max}} = 0.5/r$, 于是由条件D/A输出为5V时电机达到最大转速, 有

$$(5K_1 - K_3 \omega_{\text{max}}) K_2 K_g K_m = \omega_{\text{max}} \quad (**)$$

由上述约束 (*), (**) 具体选取K值。

动态系统设计

控制率采用最优控制的方法，选择指标

$$F = \frac{1}{2} \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt$$

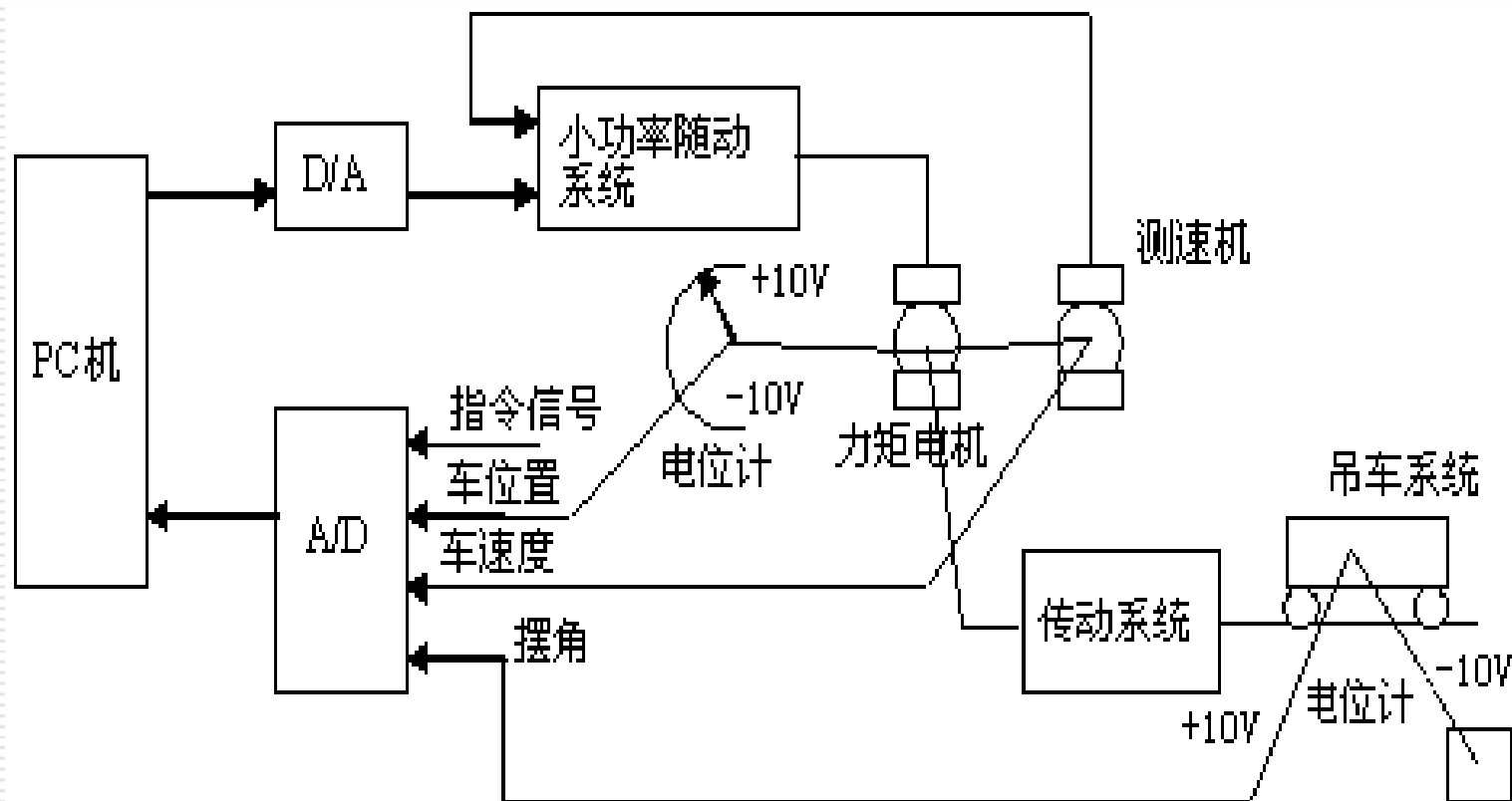
由最优控制理论选择合适的状态调节器，构成系统。U=-KX

LQED: [K, SE]=lqrd{A, B, Q, R, Ts}

Ts=20ms

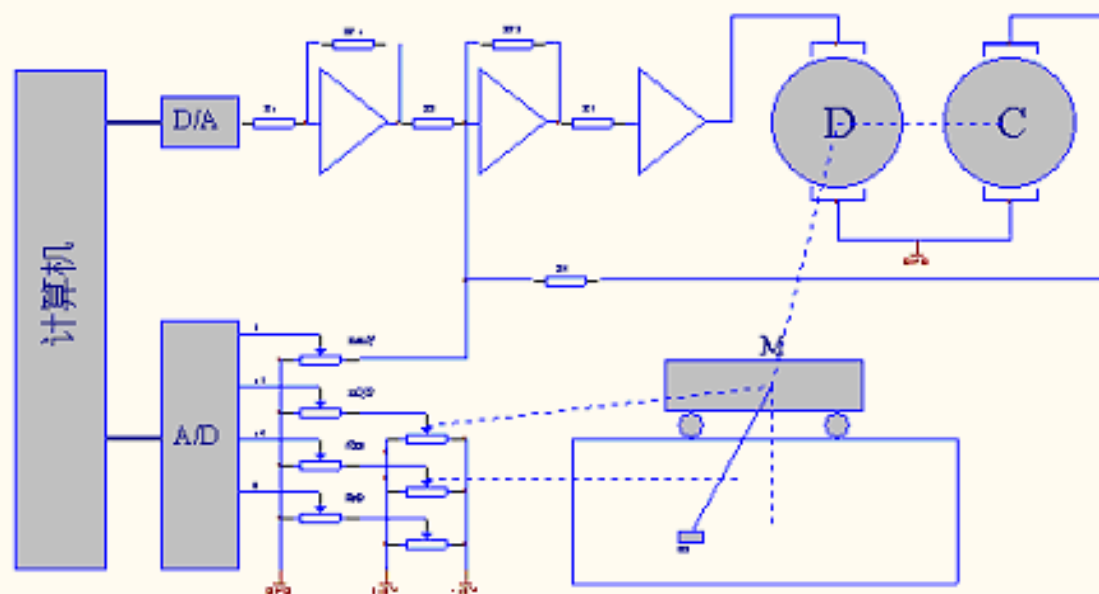
R, Q=[q1, q2, q3, q4]

系统硬件的电路设计及实现



数字式桥式吊车系统控制系统机构原理

吊车硬件电路图



吊车控制系统电路图

Task	Project	Source
Task	Project	Source
Task	Project	Source
Task	Project	Source

吊摆实时控制软件设计

- 基本要求:
 - 用硬件定时器实现，采样周期**20** 毫秒
 - 能够实时显示 X, X', θ, R 曲线
 - 基本数据可以记录
 - 可以修改控制参数
 - 实时动画显示（选做）
-

PC机中断系统介绍

☐ 内部中断

☐ 被零除中断

☐ 单步中断

☐ 溢出中断 (INT0,OF)

☐ 中断指令 (INT n)

☐ 外部中断

☐ 可屏蔽中断(INTR,IF)

☐ 非屏蔽中断(NMI)

PC机外部中断系统

- ❑ 非屏蔽中断(NMI)
 - ❑ 8087申请的中断
 - ❑ RAM奇偶校验错
 - ❑ 扩展槽I/O通道错
 - ❑ NMI受NMI屏蔽寄存器控制 地址A0H
 - ❑ 可屏蔽中断(INTR,IF)
 - ❑ 高电平加入INTR引脚
 - ❑ 可屏蔽中断寄存器IF=1
-

中断响应和中断向量

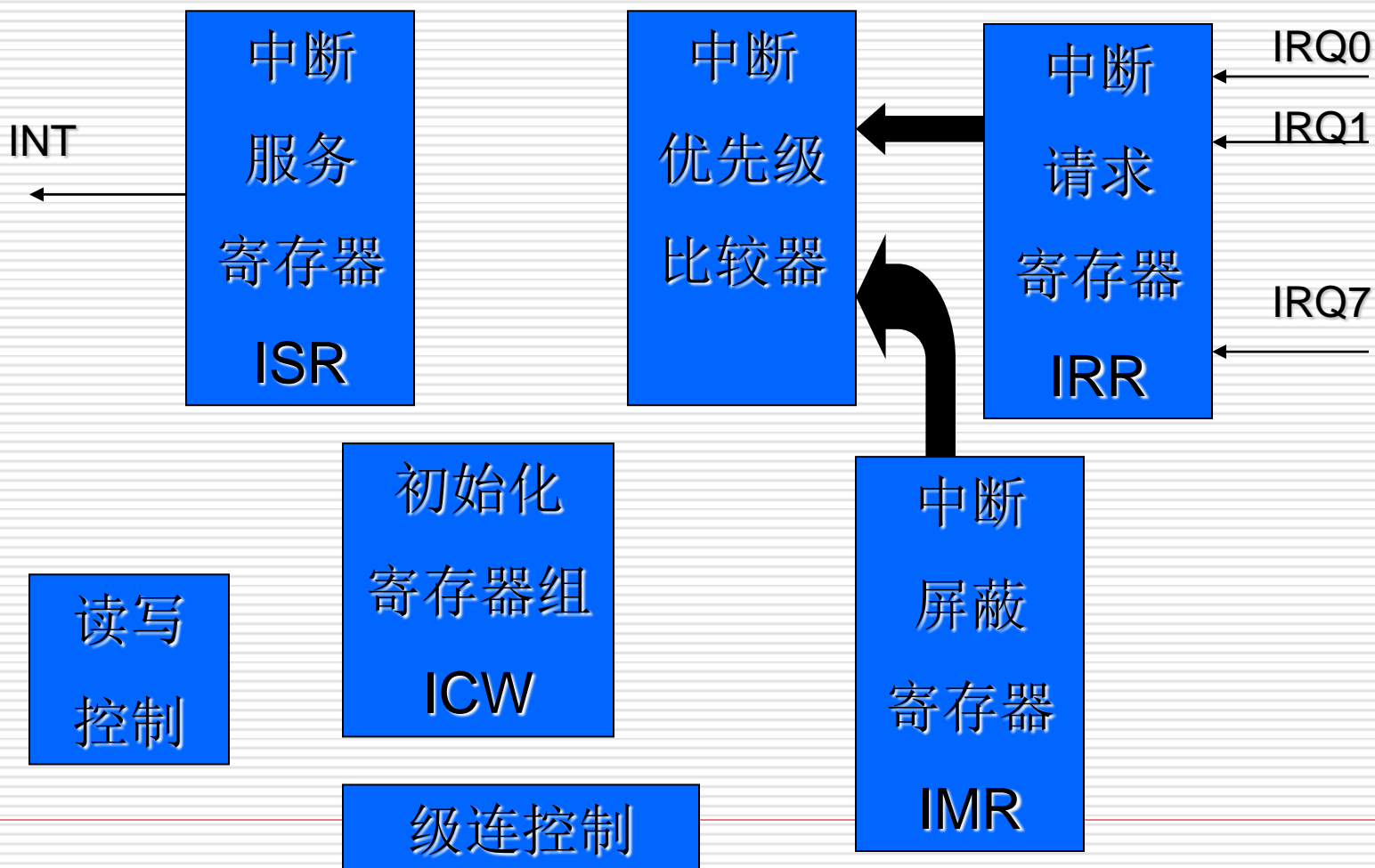
- 中断流程
 - 保护断点
 - 转入中断服务程序
 - 返回断点
 - 中断向量-----存放中断服务程序地址的地址。
 - 中断向量号-----存放中断服务程序地址的地址的编号。
-

中断向量表

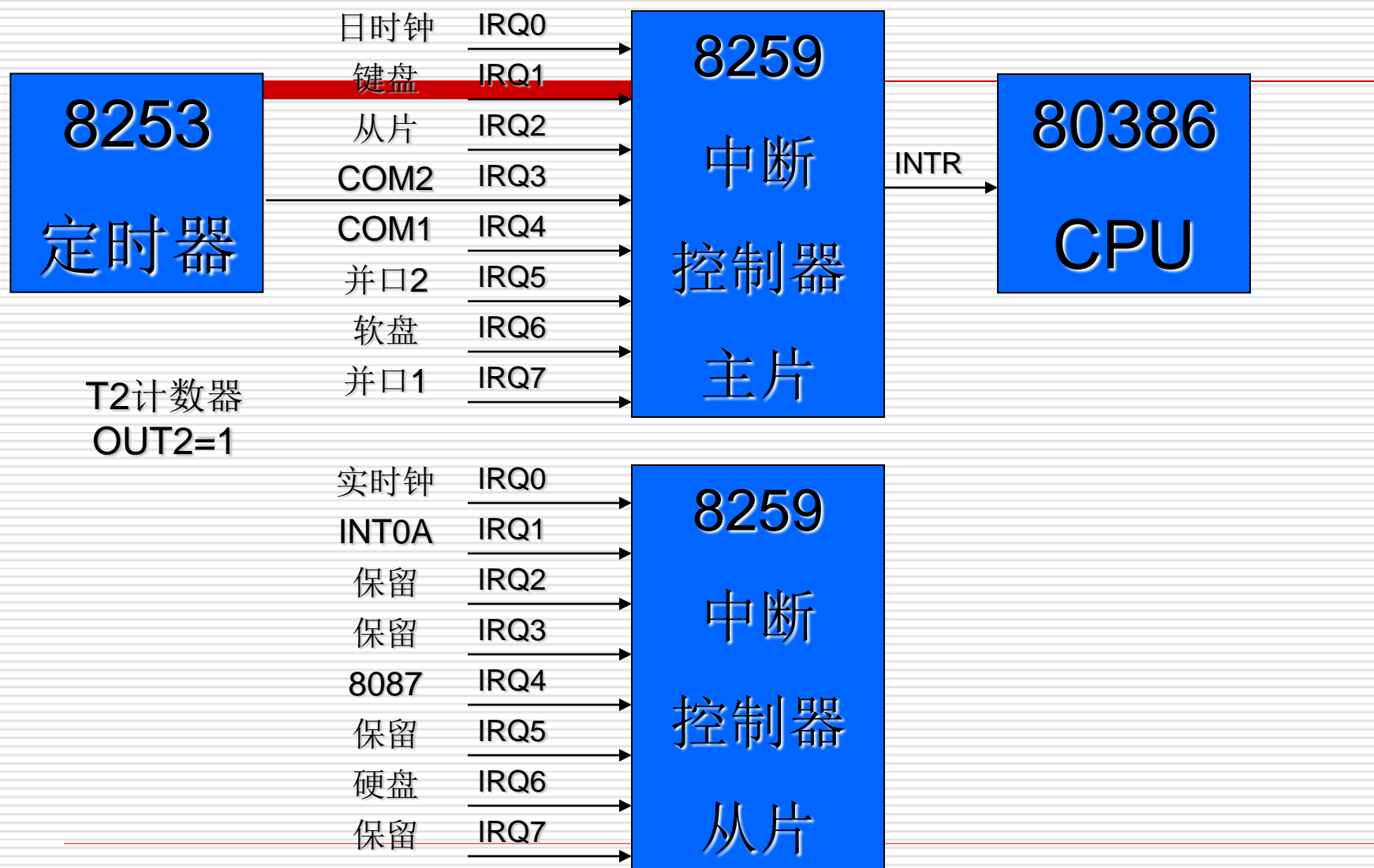
向量号	中断类型	名称	地址	向量号	中断类型	名称	地址
0	内部	除数为零	00-03	8	外部	日时钟	20-23
1	内部	单部跟踪	04-07	9	外部	键盘	24-27
2	内部	非屏蔽	08-0B	A	外部	从片	28-2B
3	内部	断点	0C-0F	B	外部	COM2	2C-2F
4	内部	溢出	10-13	C	外部	COM1	30-33
5	内部	屏幕打印	14-17	D	外部	并口2	34-37
6	内部	保留	18-1B	E	外部	软盘	38-3B
7	内部	保留	1C-1f	F	外部	并口1/打印	3C-3F

中断向量：存放中断服务程序地址的地址

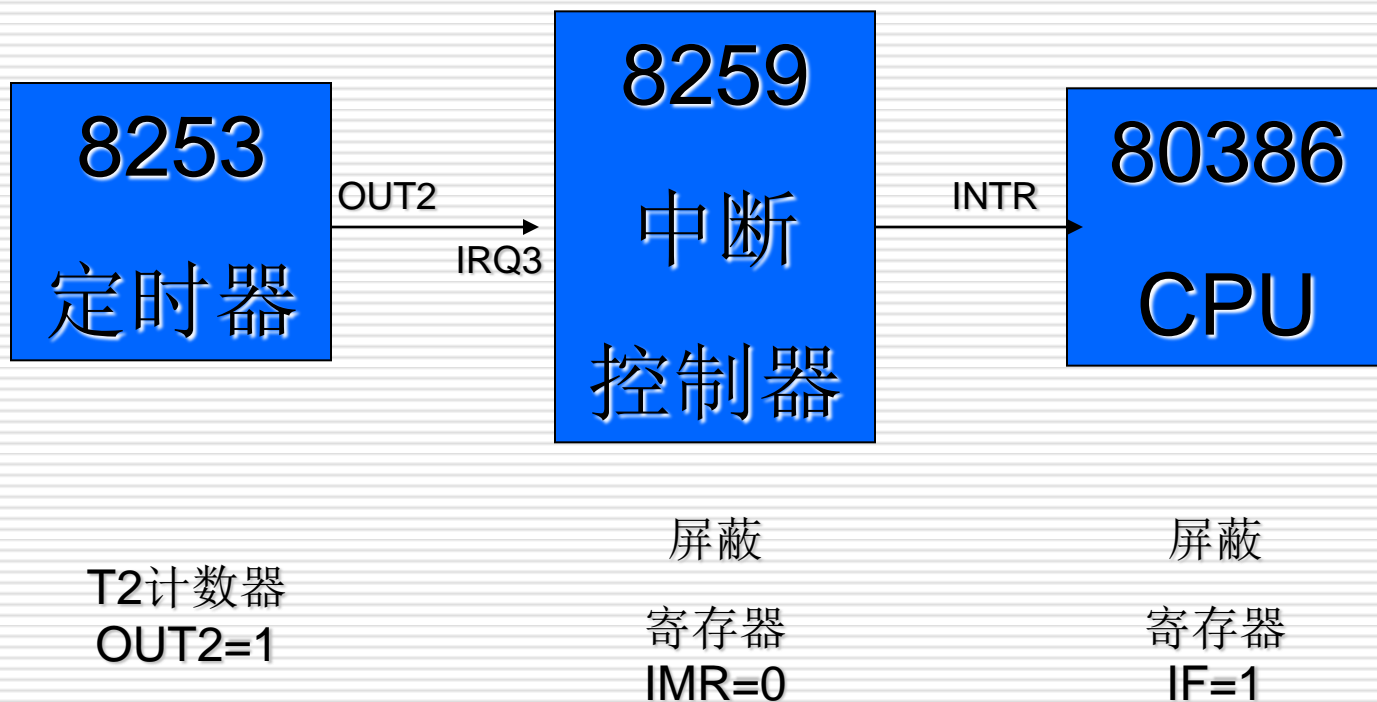
8259可编程中断控制器



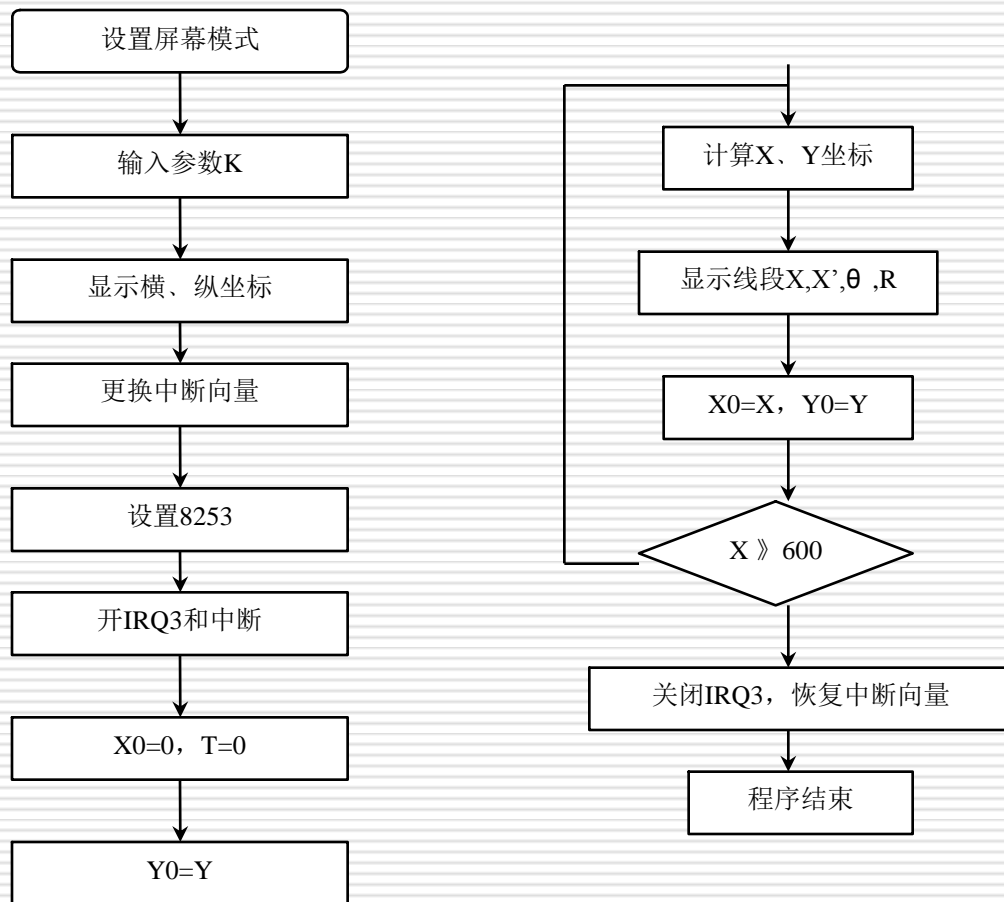
PC机硬件中断定时系统



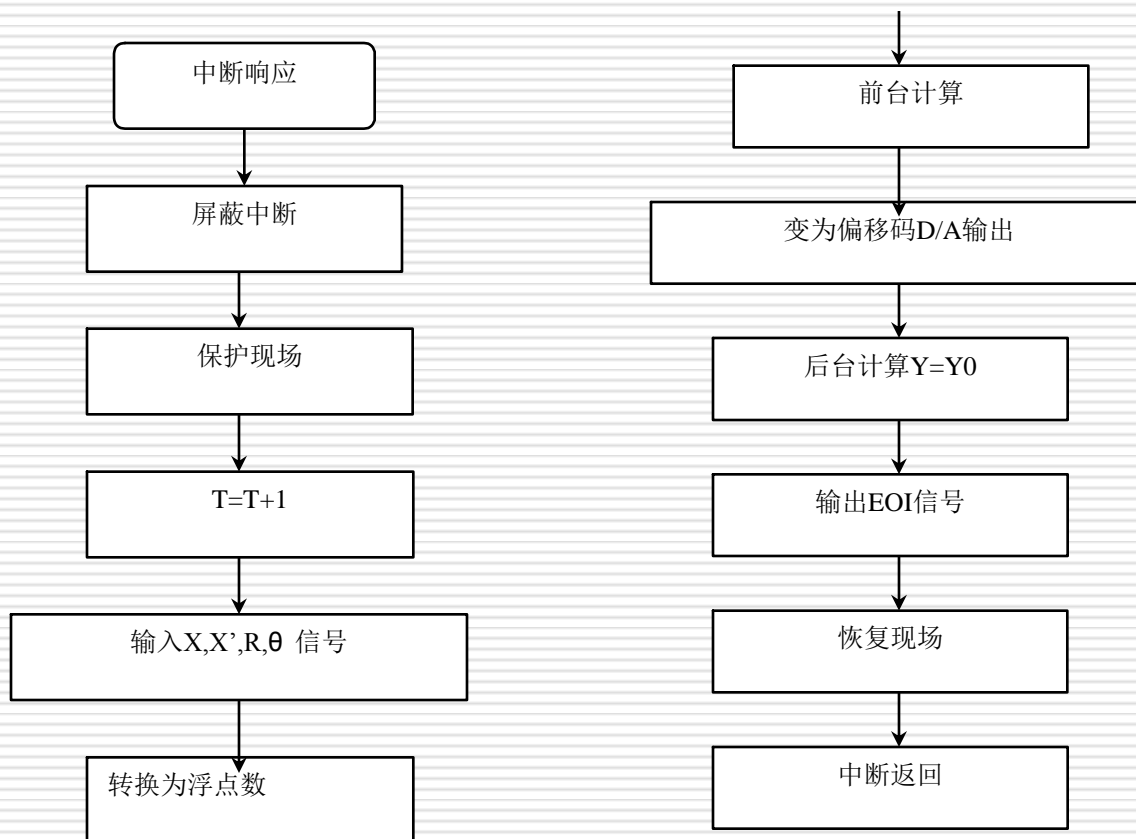
硬件中断定时系统方案



控制软件主程序结构图



中断程序软件结构图



实时控制程序控框架

- ❑ #include<graphics.h>...
 - ❑ define....
 - ❑ void interrupt (*oldint)();
 - ❑ void interrupt newint();
 - ❑ unsigned int adc(int);
 - ❑ void dac(unsigned int);
 - ❑ Void main(){
 - ❑ int gd=DETECT,gm,i;
 - ❑ initgraph(&gd,&gm,"");
 - ❑ cleardevice();
 - ❑ 绘制坐标等;
 - ❑ oldint=getvect(0xb);
 - ❑ setvect(0xb,newint);
 - ❑ disable();
 - ❑ outportb(0x31b,0xb6);
 - ❑ outportb(0x31a,lo);
 - ❑ outportb(0x31a,hi);
 - ❑ outportb(0x21,inportb(0x21)&0xf7);
 - ❑ enable();
 - ❑ 画图或等待
-

实时控制程序控框架

- ❑ getch();
 - ❑ closegraph();
 - ❑ outportb(0x21,inportb(0x21)|0x08));END

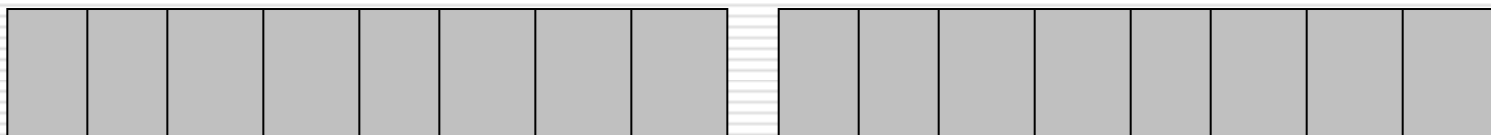
 - ❑ void interrupt newint();
 - ❑ {采样, 控制率;
 - ❑ Outportb(0x20,0x20);
 - ❑ unsigned int adc(int chan){...}
 - ❑ void dea(unsigned int outpot){...}
-

实时控制程序的编制

- 变量的表示与转换
 - 溢出保护问题
 - 比例因子配置
-

计算D(Z)采用的数制

□ 16位补码 (int)



最高位为0-正数 最高位为1-负数

□ 浮点数 (float 32位, double 64位)

□ Float (-1,+1) 乘8000变为int型

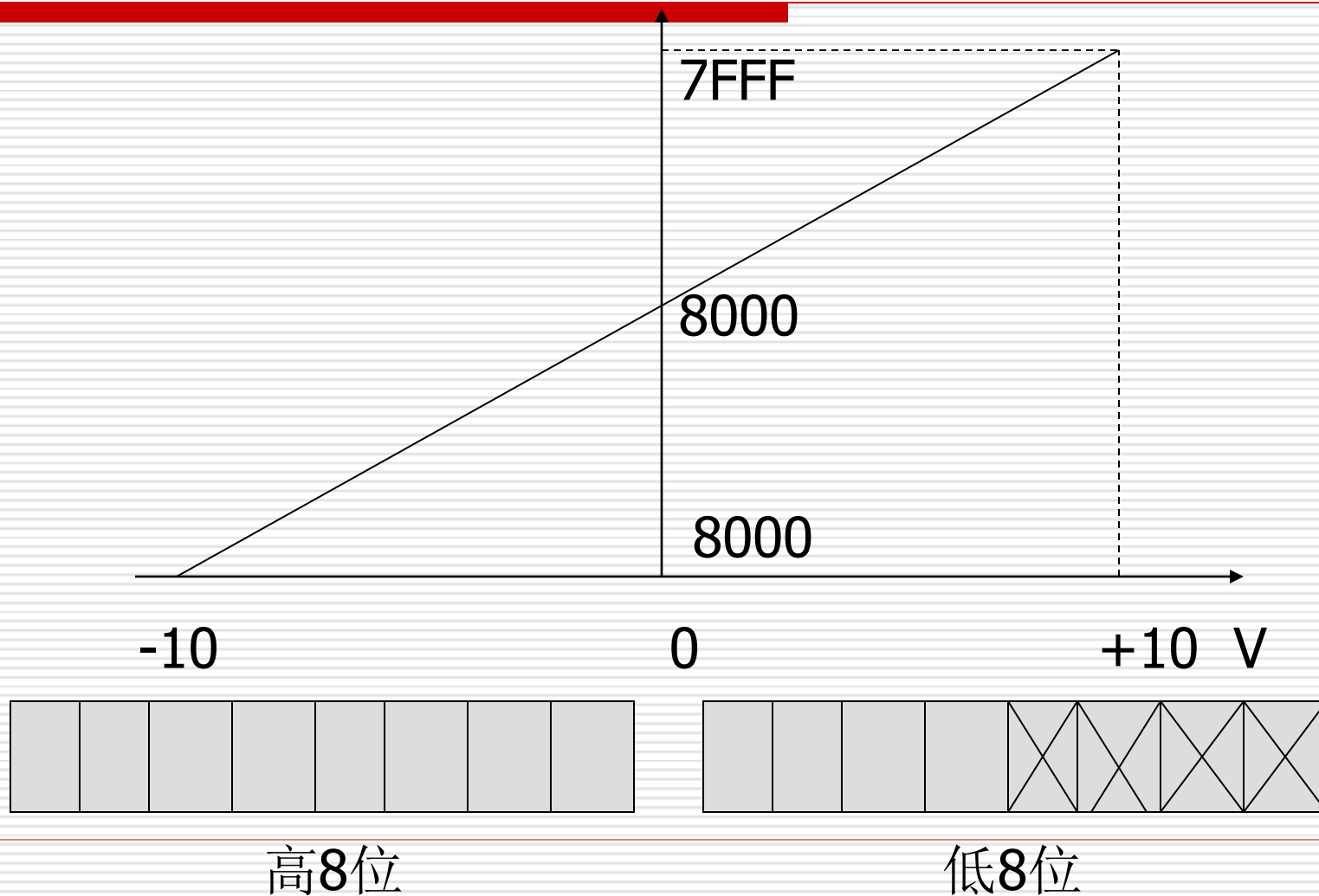
□ 阶符 (1位) 阶码 (7位)

□ 数符 (1位) 尾数 (23位) (6位十进制精度)

A/D采集的数

模拟 电压(V)	偏移码	补码	浮点数
+10	0FFF	7FFF	+1
+5	0C00	4000	+0.5
0	0800	0000	0
-5	0400	C000	-0.5
-10	0000	8000	-1

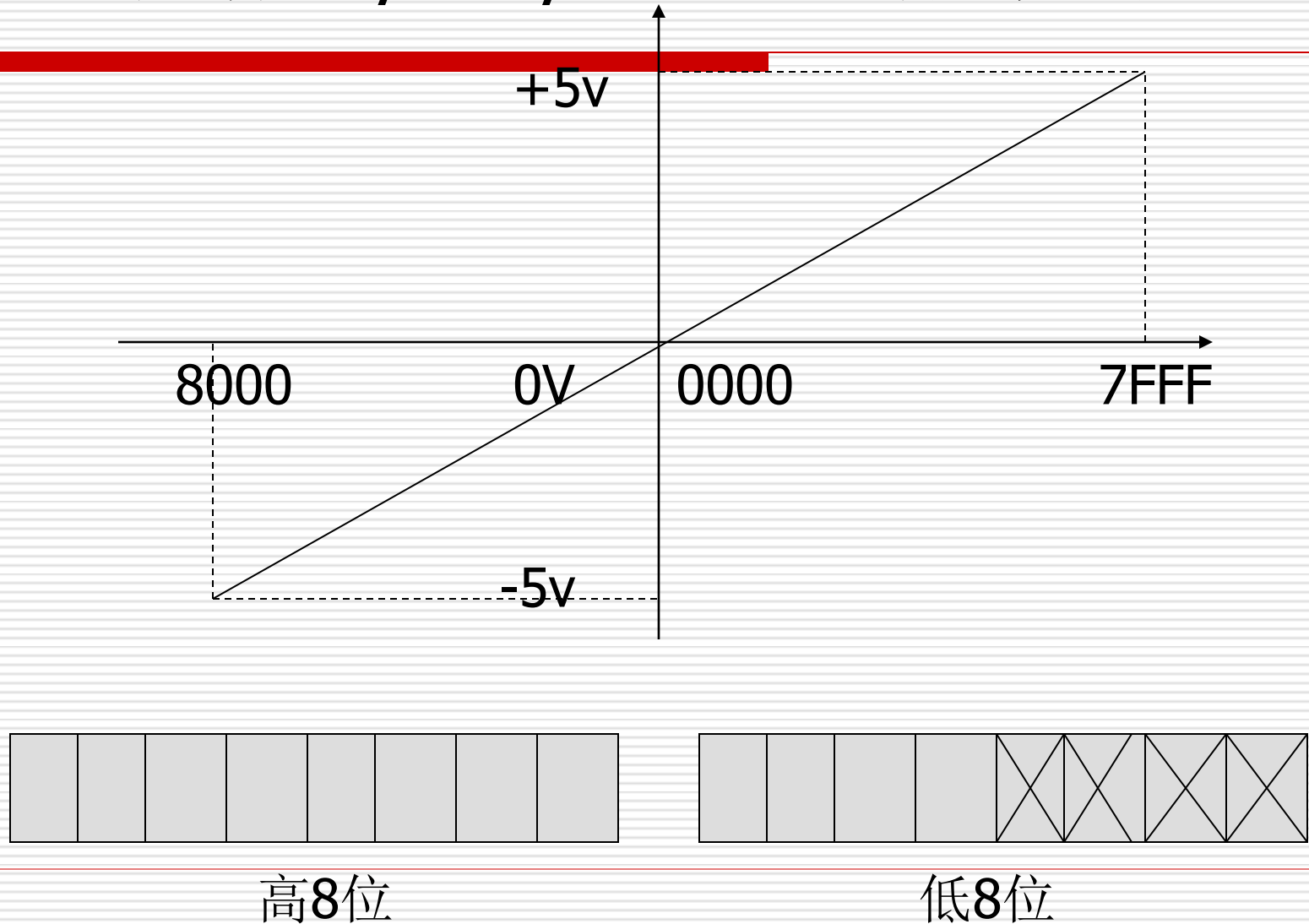
A/D电压/16位补码对应关系



D/A输出关系

浮点数	补码	偏移码	模拟 电压(V)
+1	7FFF	FFF0	+5
+0.5	4000	C000	+2.5
0	0000	8000	0
-0.5	C000	4000	-2.5
-1	8000	0000	-5

16位补码/ D / A电压对应关系



溢出保护

- ❑ 溢出的检测

- ❑ 加法溢出（加法、减法、积分）

- ❑ 乘法溢出（左移、乘法、数制变换）

int型 用OF溢出标志位判断 OF=1溢出

float型 (-1, +1)范围判断

- ❑ 溢出的处理 饱和法

建议：溢出保护程序在加法和乘法子程序中包含

比例因子配置

- 选择合适的结构形式
 - 数字补偿器（滤波器）的各支路不产生溢出
 - 量化误差足够小
 - 充分利用量化信号的线性动态范围
(既要保证不溢出，又要使精度高)
-

吊摆实验报告内容及要求:

- 1 系统设计任务及技术指标
 - 2 系统的组成和工作原
 - 2.1 系统的组成
 - 2.2 工作原理
 - 3 元部件性能测试及数据处理
 - 4 建立数学模型
 - 5 系统设计与仿真
 - 5.1 系统静态设计
 - 5.2 系统动态设计
 - 5.3 系统仿真
 - 5.4 分析与结论
-

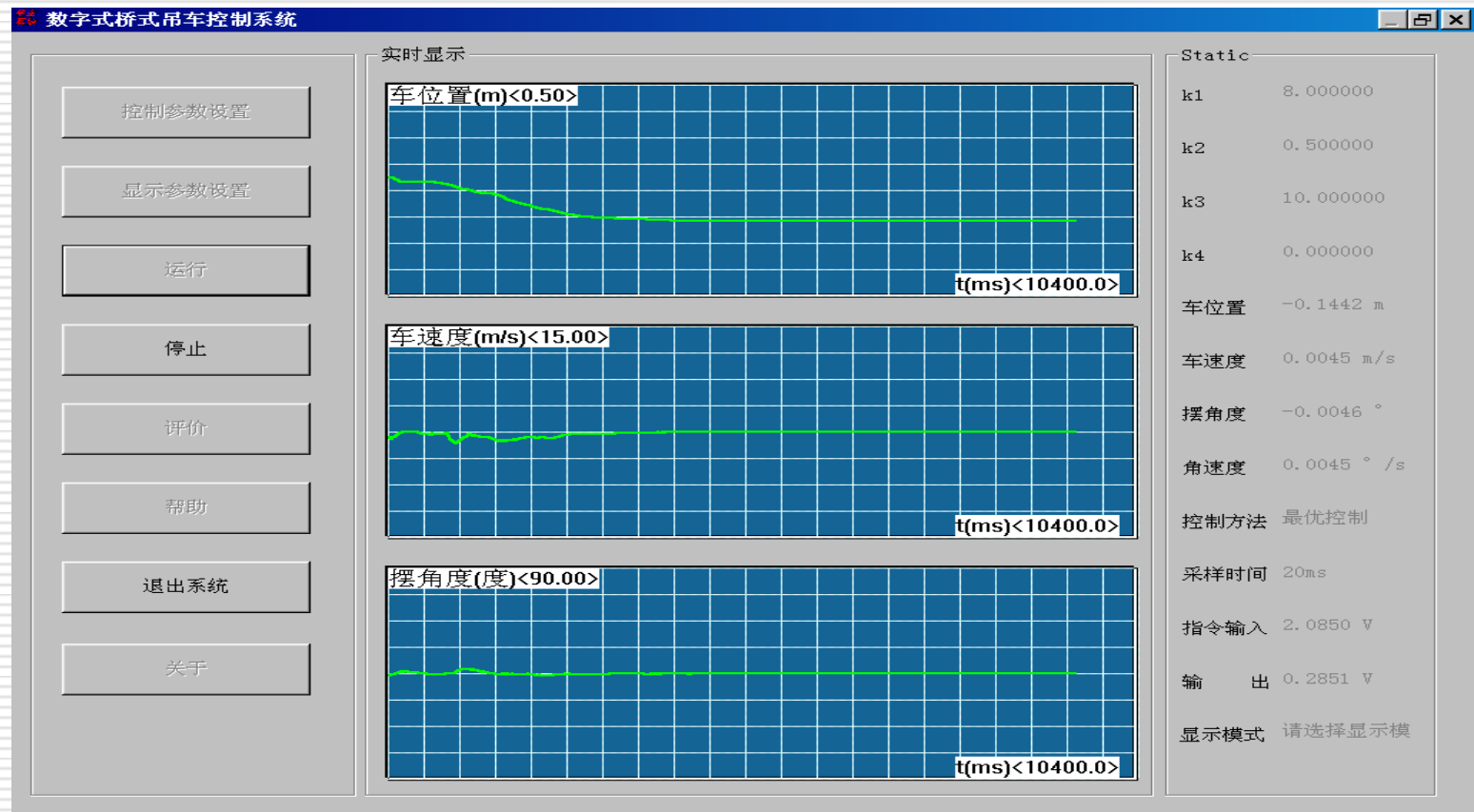
吊摆实验报告内容及要求:

- 6 计算机控制系统设计与实现
 - 6.1 计算机控制系统的设计方案（硬件、软件）
 - 6.2 实时控制软件框图
 - 6.3 数据采集与模拟量输出
 - 6.4 采样周期的实现
 - 6.5 界面设计与实现
 - 6.6 动画的设计与实现
 - 7 系统的组装与调试
 - 7.1 吊摆实现电路
 - 7.2 反馈极性判别
 - 7.3 系统调试
 - 7.4 系统性能分析与结
 - 8. 收获和体会
-

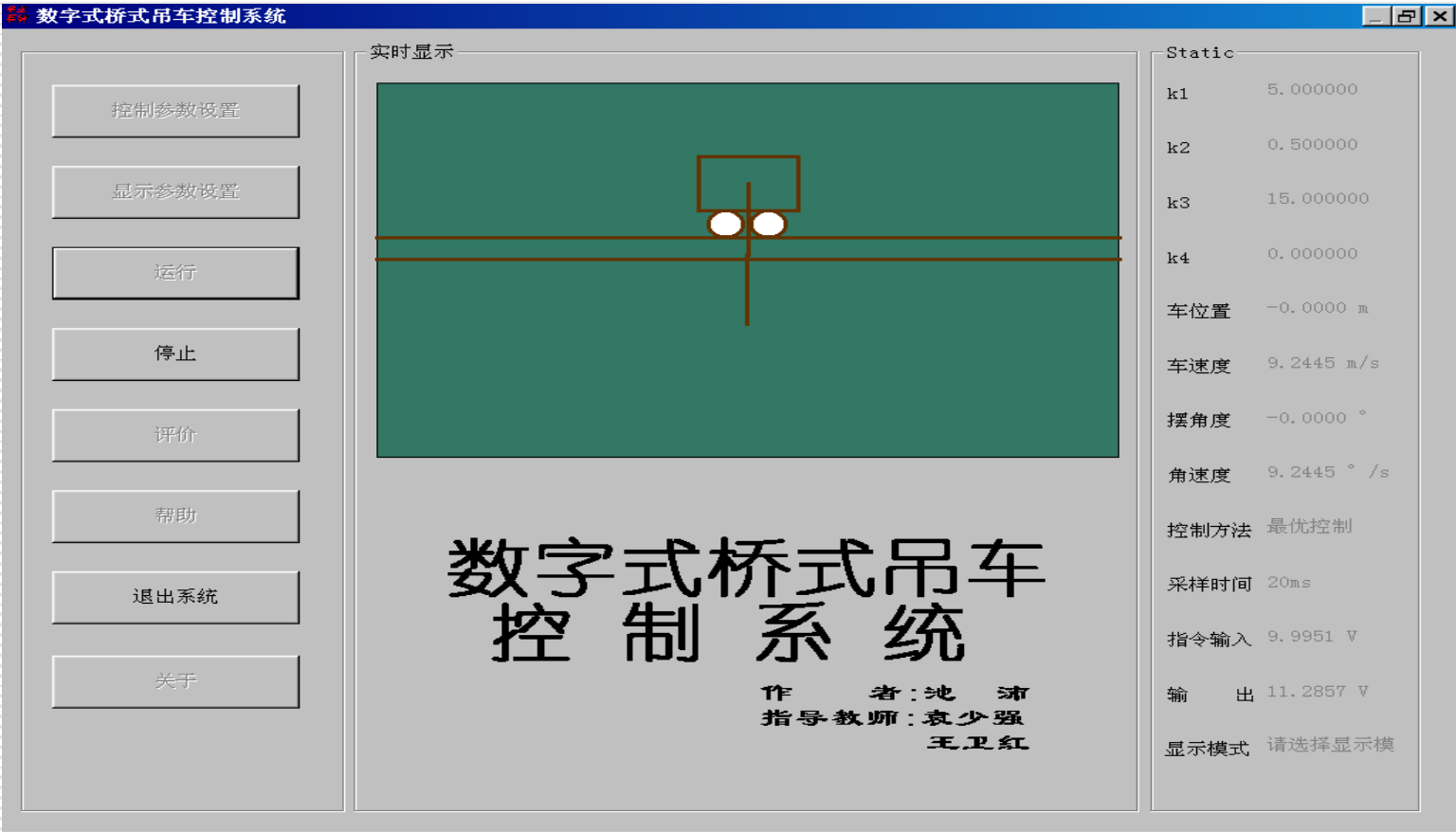
范例1（作者池沛）



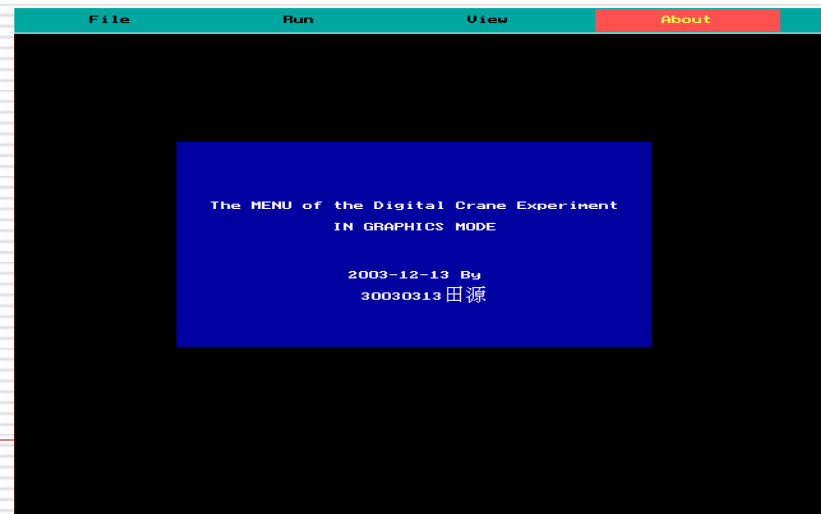
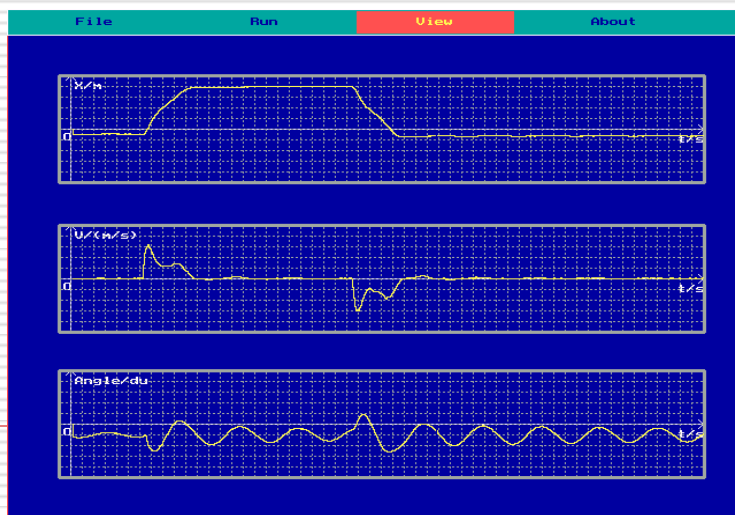
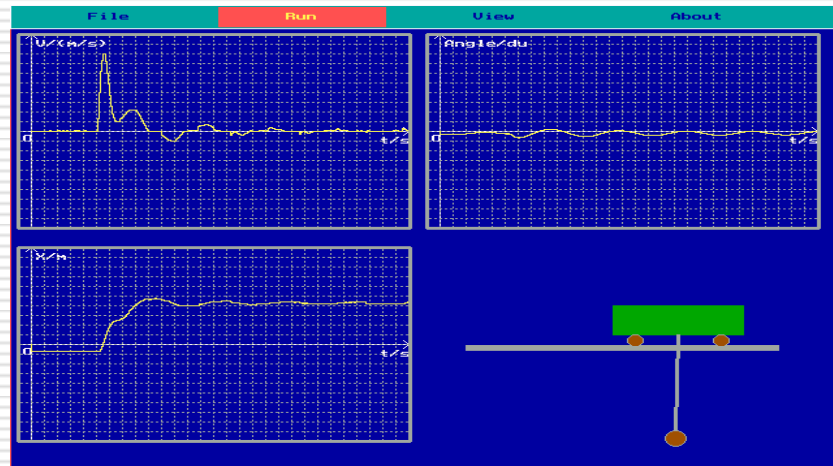
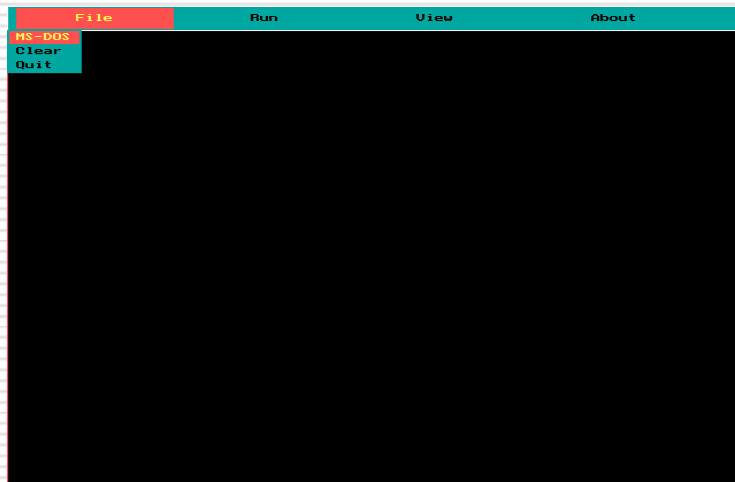
范例1（作者池沛）



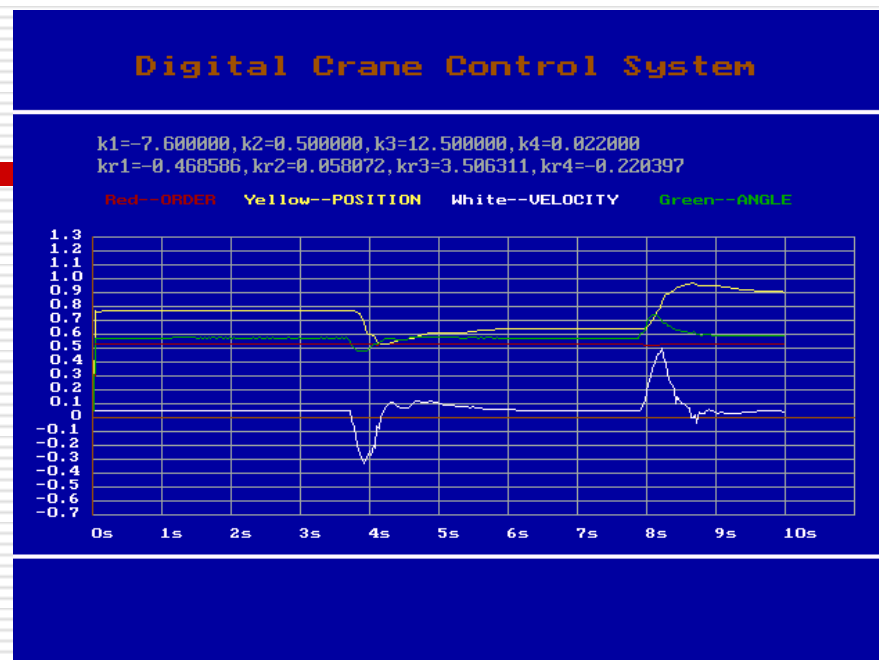
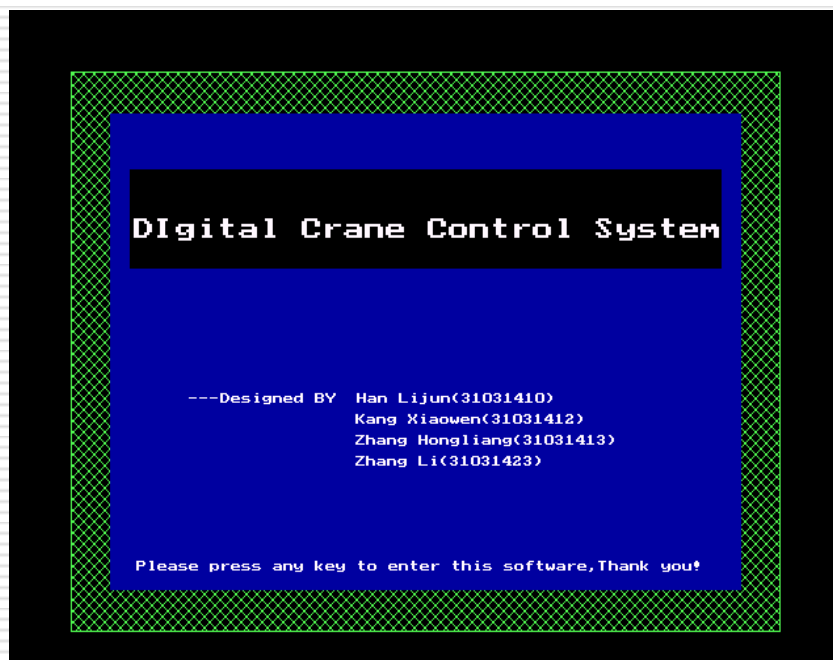
范例1（作者池沛）



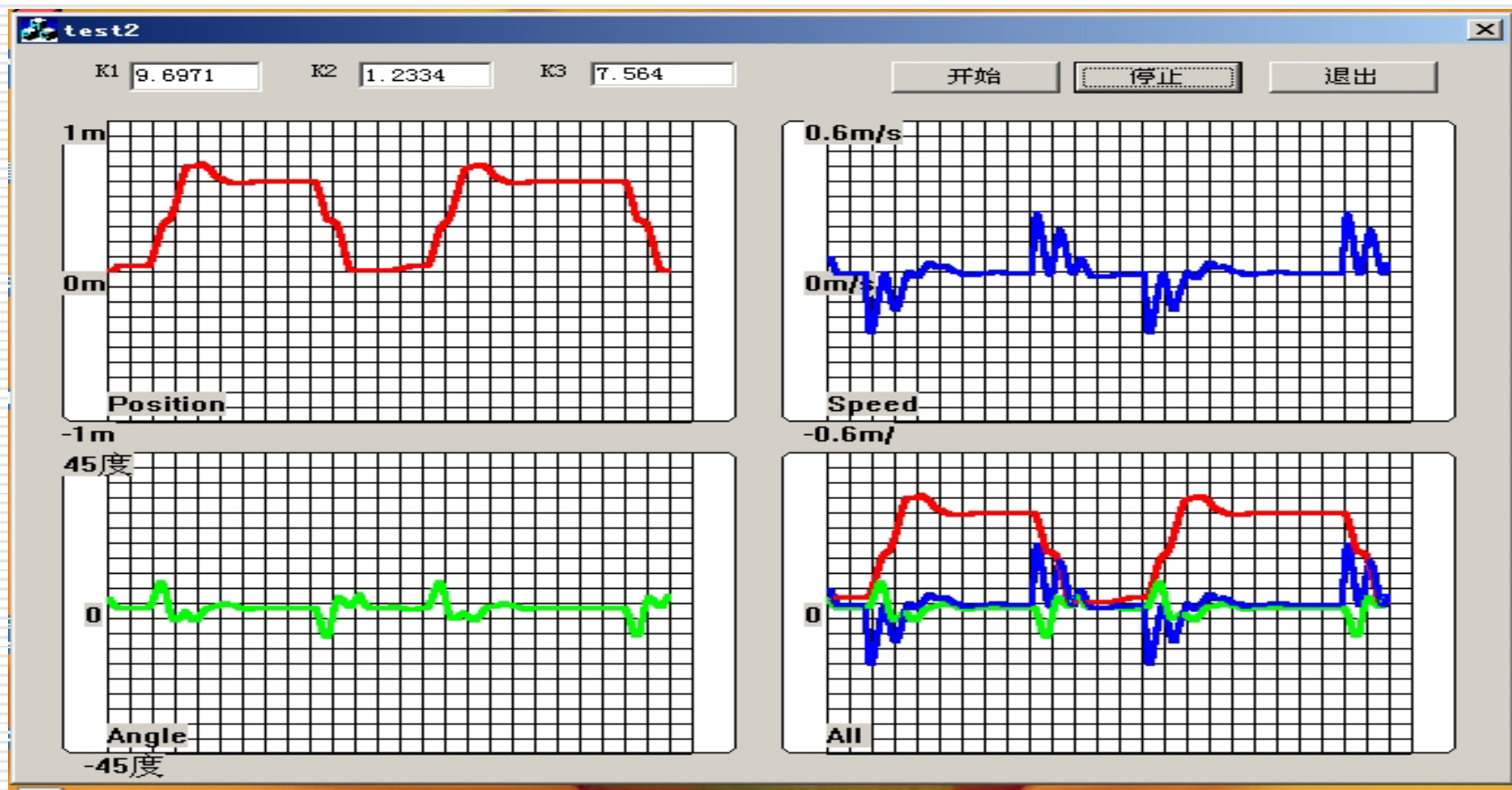
范例2（作者：田源）



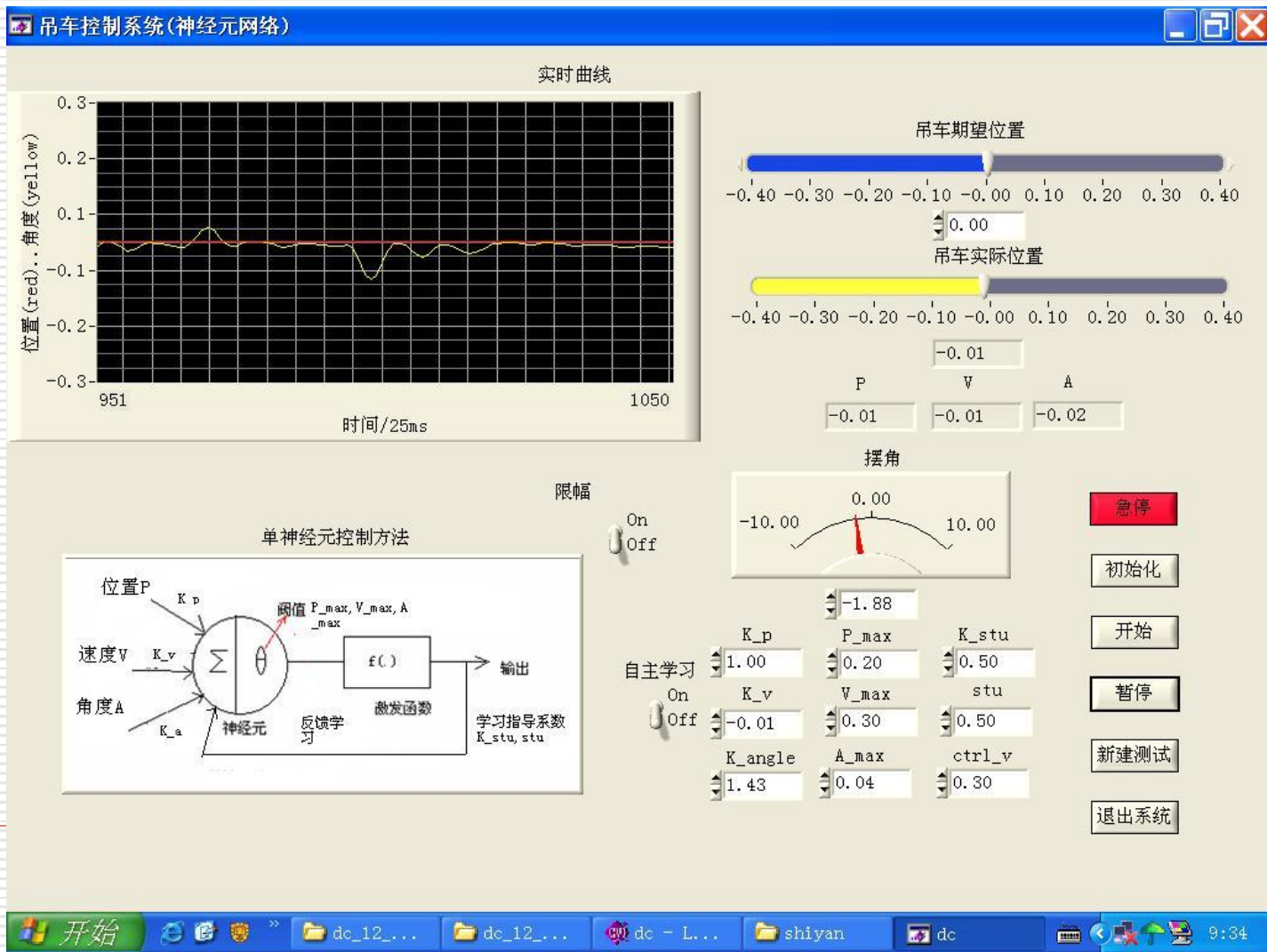
范例3（作者康晓文）



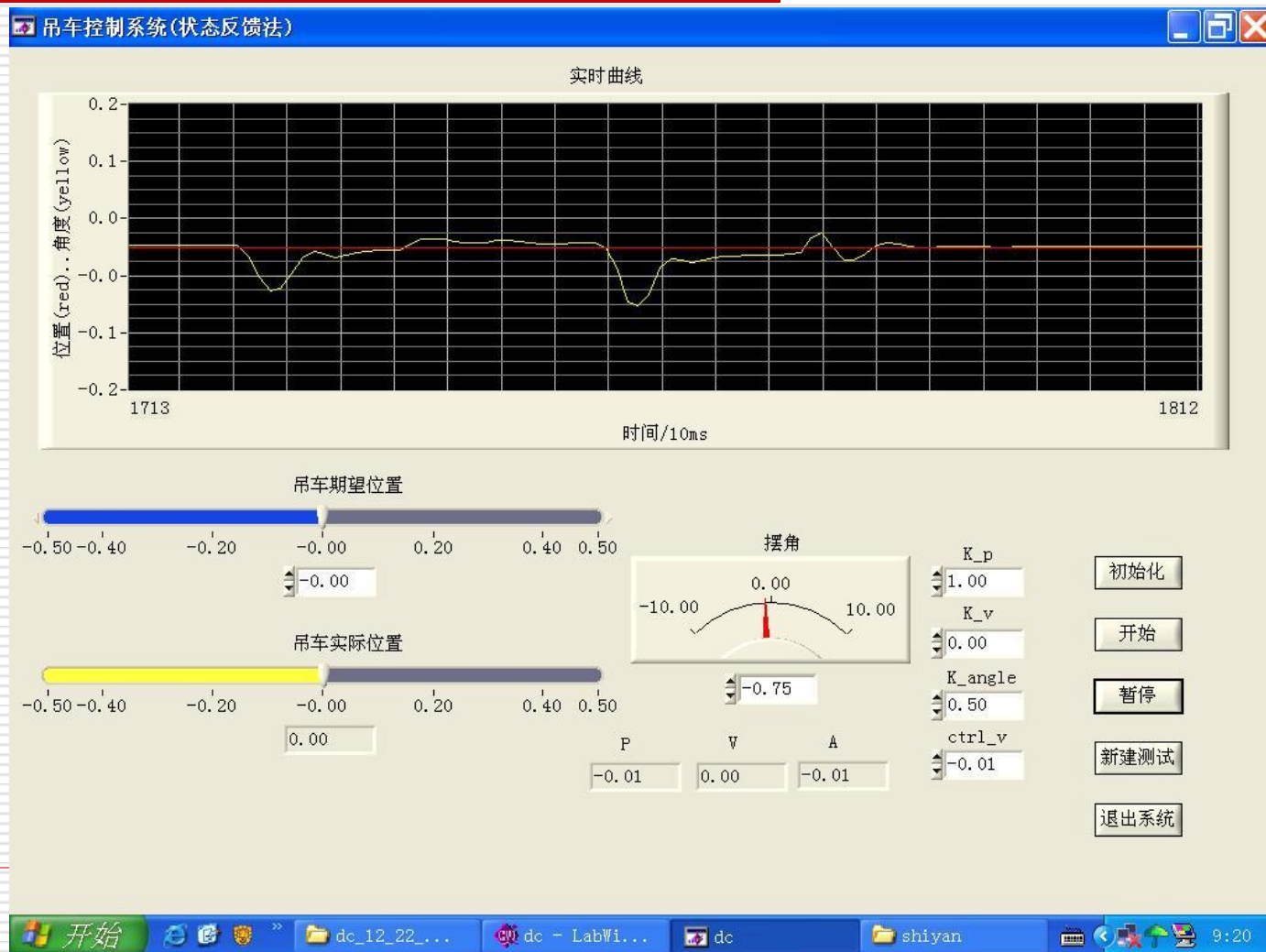
范例4（作者孙鹏飞）



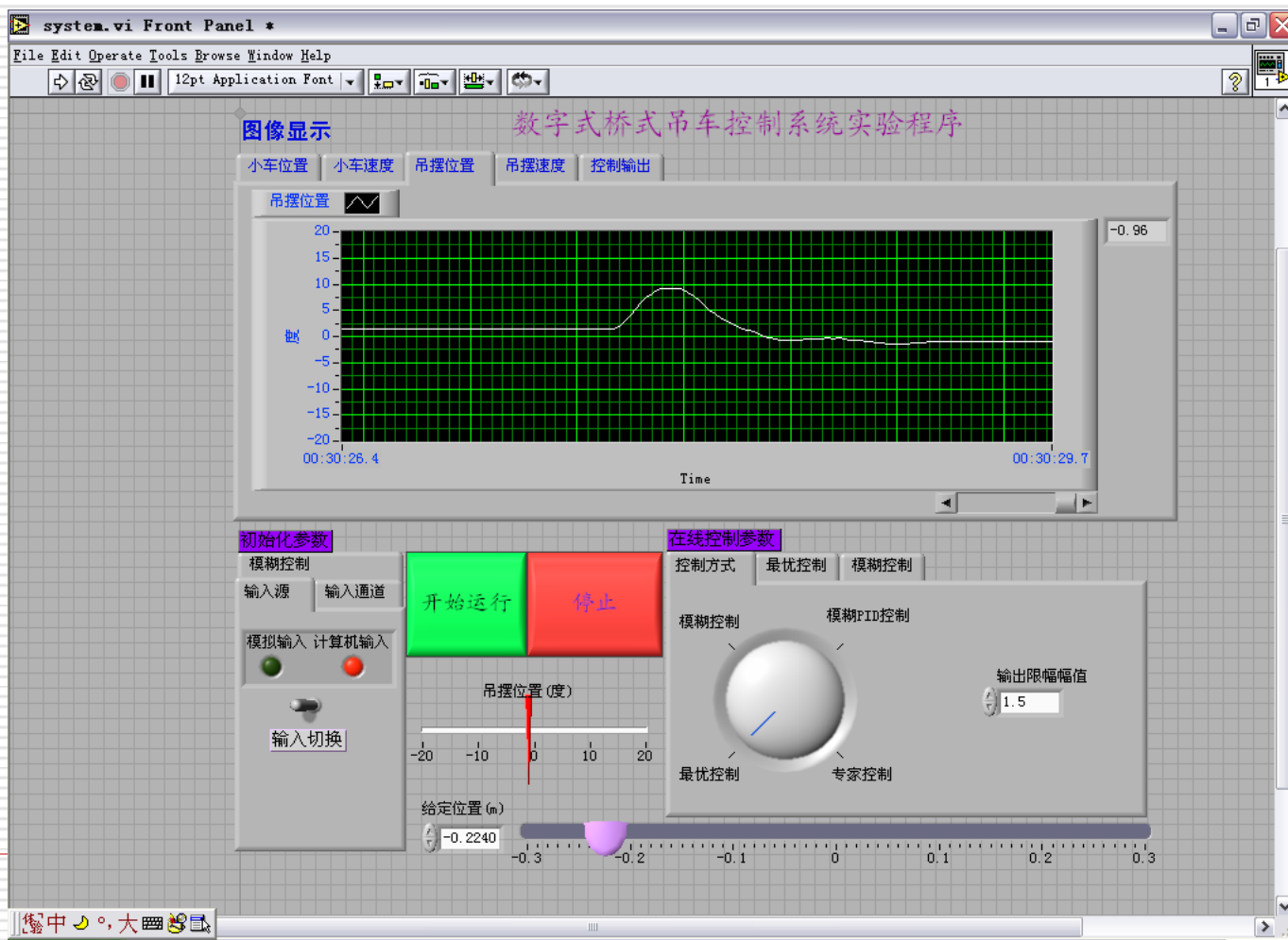
范例5（作者叶丞&余梓瑞）



范例6（作者叶丞&余梓瑞）



范例7（作者杨晓科）



范例8（作者杨晓科）

