
运动控制系列实验（一）

数字式桥式吊车控制系统

实验说明书

北京航空航天大学
自动化科学与电气工程学院
2010 年 2 月

数字式桥式吊车控制系统

实验说明书

数字式桥式吊车控制系统是在数字式小功率随动系统的基础上，把桥式吊车作为被控对象形成的。该综合实验要求学生独立完成复杂的非线性对象建模、系统方案设计、元部件选择、数字控制器的设计及数字仿真，实时控制程序的编写、调试、系统的软硬件联调。

本实验说明书是为帮助学生完成设计及实验任务而编写的参考资料，主要包括系统结构及原理介绍、系统设计与分析指导、控制盒使用说明、软件使用说明等内容。具体的设计任务及要求由教师布置的任务书给定。

第一节 系统组成及工作原理

一、系统组成

数字式桥式吊车系统的结构原理如图 1.1 所示。计算机作为数字控制器实现对系统的实时控制，同时也为操作者提供人一机界面，完成对系统的监督管理功能，如实时画图、采集数据等。A / D D / A 接口板插在计算机内，完成模数、数模转换。小功率随动系统用于电压和功率放大。电机、测速机是系统的执行元件和速度反馈元件，电位计 1 和 2 分别是车位置反馈元件和摆角度反馈元件。

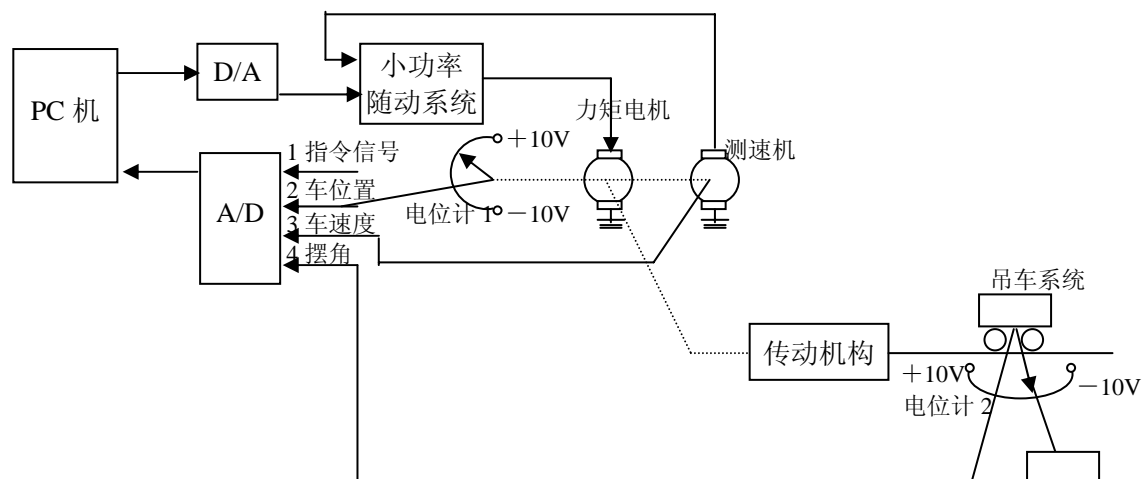


图 1.1 数字式桥式吊车控制系统结构原理

吊车系统的整套机械部件安装在一块底板上。底板上固定着导轨、皮带轮、电机、测速机、车位置反馈电位计，底板开槽，使吊摆垂下去。吊车轨道有效长度约为 0.8 米，吊车

组件包围在轨道外，四个车轮在导轨上方运动。吊车板下面连着小车板支架和角位置电位计支架，两支架之间安装吊摆，在角位置电位计支架上装有测量吊摆角度的单圈电位计。

计算机、A / D D / A 板、小功率随动系统、电机、测速机、桥式吊车装置通过机械或电气手段连接成一个整体。其中电气连接通过控制盒实现。

二、系统工作原理

本系统是一个数字式的闭环控制系统，其工作原理如下。

吊车（下装吊摆）在电机的拖动下沿固定的直线导轨进行运动，相应地，产生了吊车的直线位移和吊摆的转角。线位移由与皮带轮同轴安装的多圈电位计测得，角位移由安装在吊摆轴上的单圈电位计测得，吊车的运动速度由与电机同轴相联的测速机测得，这三个物理量经过 A / D 转换送入计算机，经过机内的实时控制程序运算产生控制指令，该指令经 D / A 变换送入小功率随动系统，经过功率放大再输出给电机，产生相应的控制作用，从而实现对吊车线位移和吊摆角位移的控制。系统的方框图如图 1.2。图中的并联校正、串联校正和功率放大均由小功率随动系统实现。

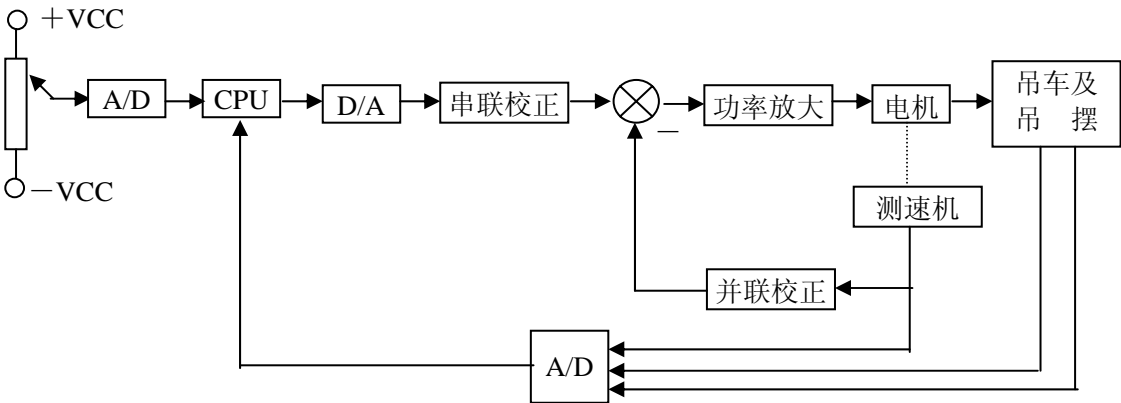


图 1.2 数字式桥式吊车控制系统框图

三、系统的技术指标

本系统的目的有两个，一是控制吊摆的摆动，二是控制吊车的位移，而重点是对吊摆的控制，下面就从这两方面讨论对系统的技术指标要求。

1. 吊摆的稳定时间和摆动次数

当吊车以一定的速度和加速度沿导轨从初始位置运行到另一位置时，会对吊摆产生一个冲量，若不对吊摆进行控制，仅靠其自身的阻尼作用，则它回到平衡位置的时间很长，摆动次数也会很多。为了有效控制吊摆的稳定时间和摆动次数，在系统中将摆角信号引入闭环控制回路，从而使上述两项指标达到要求。

2. 吊车的运动速度和加速度

在本系统中，要求吊车以较短的时间完成从初始位置到给定位置的运动过程，故对吊车的最大运动速度和最大加速度也提出了要求。

运动控制实验（一） 任务书

题目：

数控式桥式吊车控制系统

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

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

三. 主要参考书

1. 数字式桥式吊车控制系统试验说明书 王卫红
2. 计算机控制系统系列实验指导书 袁少强
3. 计算机控制系统设计与实现 郭锁凤

第二节 主要元部件性能测试

本系统的主要元部件有：低速直流力矩电机、测速机、小功率随动系统、A/D D/A 接口板、单圈电位计（测摆角）、多圈电位计（测车位移）。因系统已构建完毕，故在做实验时，不需要同学自己选择元部件，而只需对其性能进行测试，为建立系统的数学模型提供必要的数据库。

本节主要介绍对电机、测速机、电位计、A/D D/A 板进行测试的原理和方法。小功率随动系统的使用方法可参见“小功率随动系统学习机使用手册”。

一、直流力矩电机特性测试

这一部分主要包括对电机的电枢电阻、电感、反电势系数、转动惯量、机械特性、调速特性、死区电压等的测试。

1. 电枢电阻的测量

方法一：可直接采用欧姆表测量，应当注意的是，由于电刷与电枢在不同位置的接触电阻不同，故测量时应在电刷处于不同位置时多测几次，取其平均值。

方法二：在电机堵转的情况下，外加直流电压，并测其电流，从测得的电压和电流求电阻值。由于堵转时电机不产生反电势，所以电流较大，外加电压应取得较小，注意，电机电流不能超过额定值。测试电路如图 2.1。

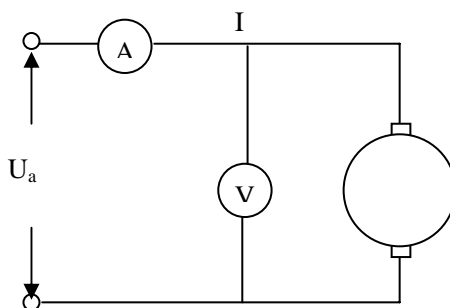


图 2.1 电枢电阻测试图

2. 电感的测量

方法一：可采用图 2.2 所示的电路测量电感，即在电机堵转的条件下，在电枢两端加入一定频率的交流信号，并测量交流电流，则电枢的感抗为：

$$X = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_a^2}$$

R_a 为电枢电阻，所以电感为 $L_a = \frac{X}{2\pi f}$ ，其中 f 是交流信号的频率，通常应取较高的频率。

电感亦应多测几次，取其平均值。

注意不宜加入太大的交流电压，否则电机将因去磁而损坏。

方法二：直接用具有测电感功能的万用表来测量。测量时也要注意多测几次，取平均值。

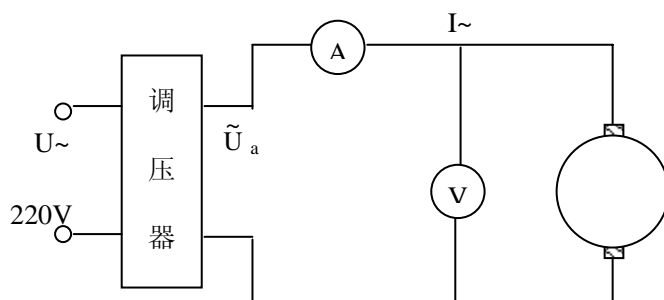


图 2.2 电枢电感测试图

3. 反电势系数 K_e 的测量

根据电机的电压平衡方程可得

$$K_e = \frac{U_a - I_a R_a}{\Omega}$$

通过测量电枢电压 U_a 、电枢电流 I_a 及转速 Ω ，利用上式即可求得 K_e 。为使测量准确，可测量不同的 U_a 时的 I_a 及 Ω 值，求出 K_e 的平均值。

电机的转速可以用机械转速表或数字式转速表获得，也可利用已知特性的测速机测得。

求出 K_e 后，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 ：

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

4. 转动惯量的测试

由于电机转子不易取出，在这种条件下，转子及同轴负载的转动惯量可以通过测量电机的制动过程求得，如图 2.3 所示。

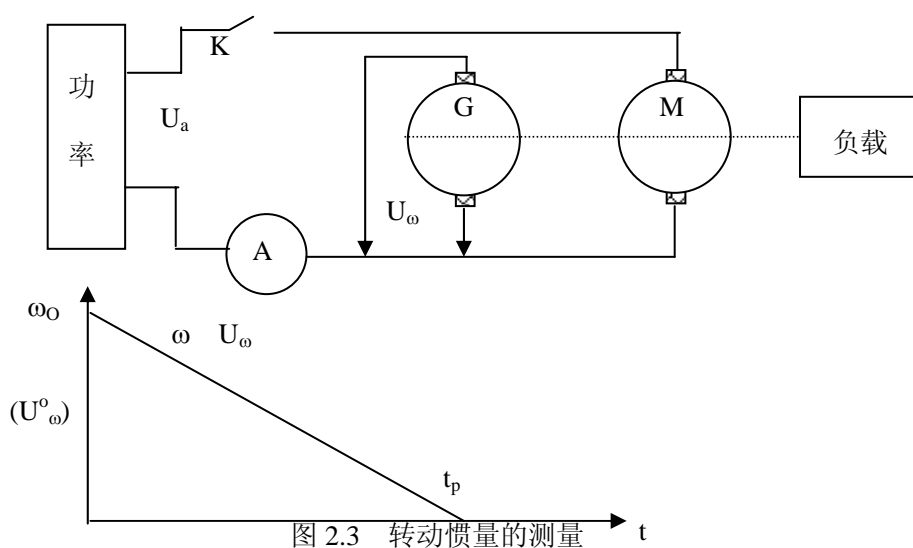


图 2.3 转动惯量的测量

第一步首先测出电机的阻力矩 M_{f0} 。

在电枢两端加上一定的控制电压 U_a ，电机带动负载做等速运动，平衡后有 $d\omega/dt = 0$ ，电机的电磁力矩 M_t 与阻力矩平衡，即 $M_t = M_{f0}$ ，测量此时的电枢电流 I_a ，即可得

$$M_t = M_{f0} = K_t \cdot I_a \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

同时需要测出电机等速运行的角速度 ω_0 。

第二步测量制动时间。

突然打开电枢回路的开关 K ，于是 $I_a=0, M_t=0$ ，故

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_{f0} = 0$$

式中的 M_{f0} 和转动惯量 J 均为常数，利用计算机或笔录仪测出速度变化曲线，求出角速度由 ω_0 到 0 的变化时间 t_p ，则

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega_0}{t_p}$$

于是 $J = M_{f0} \cdot t_p / \omega_0 = K_t \cdot I_a \cdot t_p / \omega_0 \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$

5. 机械特性的测试

电机的机械特性是指在一定的控制电压下，转速与负载力矩的关系曲线。测试机械特性的最基本方法是在一定的控制电压下改变电机轴上的负载力矩，并同时测量电机的转速。改变控制电压，重复上述实验，即可得到一组平行的机械特性曲线。如图 2.4 所示。

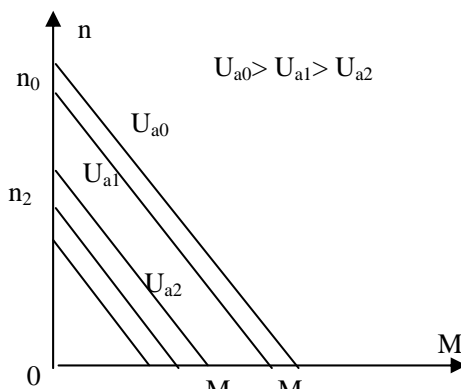


图 2.4 电机的机械特性

6. 调速特性的测试

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。测试时，在电机轴上加一定的负载力矩，改变控制电压（如从起动电压到最大电压），并测量电机相应的转速。改变负载，则可得一组调速特性曲线，如图 2.5 所示。

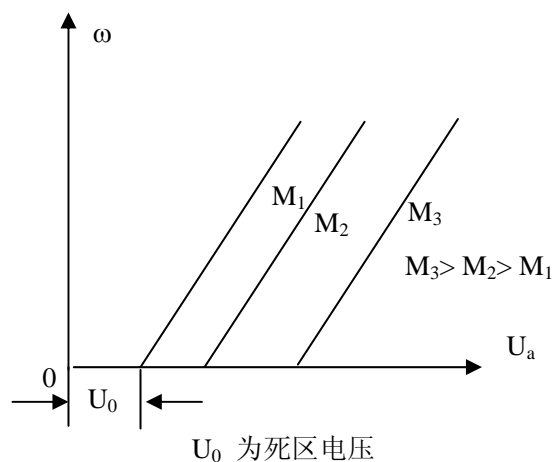


图 2.5 电机的调速特性

一般来说，直流电机的机械特性和调速特性均可近似看成一组平行直线，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。

7. 机电时间常数及电磁时间常数的测试

方法有三种。

（1）已知电枢电阻 R_a 、电感 L_a 、反电势系数 K_e 和力矩系数 K_t 、转动惯量 J 时，用下式可得：

机电时间常数： $T_m = R_a J / K_m K_e$

电磁时间常数： $T_E = L_a / R_a$

在已知机械特性曲线时，机电时间常数还可按下式计算：

$$T_m = J \cdot n_0 \cdot M_0$$

式中 n_0 为空载转速， M_0 为堵转力矩。

（2）阶跃过渡过程测试法

测试时可按图 2.6 线路连接，将开关 K 突然合上后，一个阶跃电压 U_a 加到电枢两端，由计算机记下电机转速的阶跃过渡过程。由于电磁时间常数较小，故可将 U_a 与转速 ω 的动态响应看成非周期环节，从图中即可求得 T_m 。

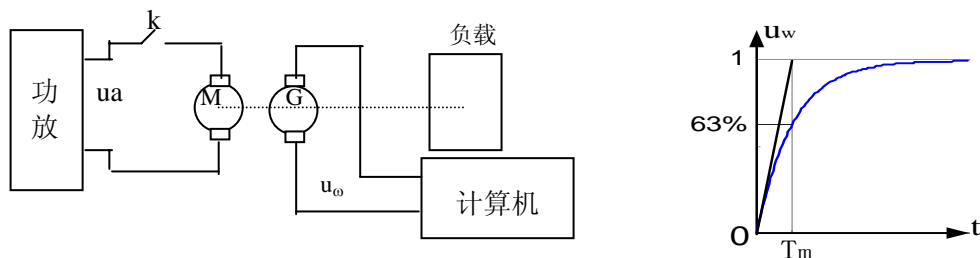


图 2.6 阶跃过渡过程测试

(3) 频率特性测试法

按图 2.6 连接，在输入端加入正弦信号，测量测速机的输出，则可以求得电机的频率特性，由此也可求得电机的机电时间常数。

8. 死区电压的测试

对整个吊车系统而言，测试死区电压时应带负载，即测量吊车刚启动时的输入电压。

二、测速机特性测试

测速机作为系统的速度反馈元件，对系统设计影响最大的是其输入输出特性。测速机的输入输出特性应在实际负载条件下测试。对本系统而言，由于精度要求不太高，所以可用电压表测输出电压，用转速表测转速，求出测速机的梯度。

注意，对顺时针、逆时针两个旋转方向均应测试，取其平均值为测试结果。

三、电位计特性测试

在本系统中，只测电位计的输出电压与相应的位置（或转角）之间的关系。

1. 单圈电位计安装在吊摆轴上，测量摆角。因电位计两端点所加电压为 +10V、-10V，故其梯度的理论值为：

$$\frac{20}{2 \times 3.14} = 3.18 \text{ V / rad}$$

在测试时，给电位计加上电压，将电位计旋转一定的角度，测量输出端的电压值，即可测出电位计的梯度。

2. 多圈电位计

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。系统中所选用的电位计共有 10 圈，直径为 40mm。电位计两端的电压分别为 +10V、-10V，其梯度的理论值为：

$$\frac{20}{40 \times 10^{-3} \times 3.14 \times 10} = 15.92 (\text{V / m})$$

在测试时，将电位计、皮带轮、吊车等连接好。首先调整小车的位置使电位计输出端电压为 0，并记此时的车位移为 0，然后移动小车，每隔一定距离记录输出电压和对应的车位移，根据所得数据即可求出电位计的梯度数值。

测量间隔一般取 0.1m。

四、A/D D/A 板性能测试

本系统选用的 A/D D/A 板为 HD1219 型 A/D D/A、数字 I/O、定时 / 计数板，该板是为 PC 机设计的数据采集与过程控制部件，其模入、模出、定时 / 计数部分的主要技术指标如下：

模入部分

通道数：单端输入 32 路

模入电压：0~10V（出品状态）；±5V，±10V

输入阻抗: $\geq 10\text{M}\Omega$

分辨率: 12 位

输出码制: 原码 (单极性信号输入时)

偏移码 (双极性信号输入时)

转换误差: $\leq 0.1\%$

转换速率: 100KHz

A/D 启动方式: 程序启动, 定时启动, 外同步触发启动

A/D 工作方式: 程序延时, 中断

模出部分

通道数: 2 路

模出电压: $0\sim 10\text{V}$ (出品状态), $\pm 5\text{V}$, $\pm 10\text{V}$

输出阻抗: $< 1\text{M}\Omega$

分辨率: 8 位 (12 位)

建立时间: $7\mu\text{s}$

定时器 / 计数器部分

通道数: 3 路

计数器字长: 16 位

最高计数频率: $\leq 2\text{MHz}$

输入 / 输出电平: TTL 电平

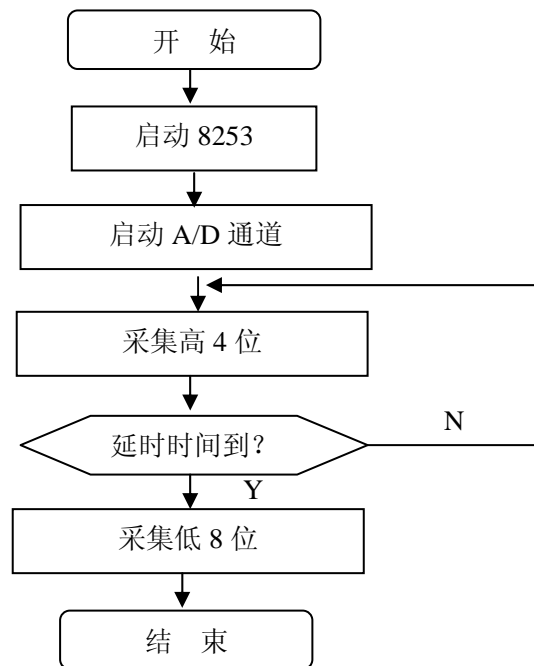
负载能力: 1 个 TTL 门

时钟频率: 2MHz

本系统使用了 4 路 A / D 通道和 1 路 D / A 通道。4 路 A / D 分别实现对小车位置、速度、摆角度和指令信号的采样, D / A 用于控制量的输出。

1. A / D 通道测试

A / D 通道测试程序的框图如下:



A / D 共占用 4 个地址, 设本板基地址为 310H, 则 4 个连续的地址为 310H、311H、312H、313H, 编程举例如下:

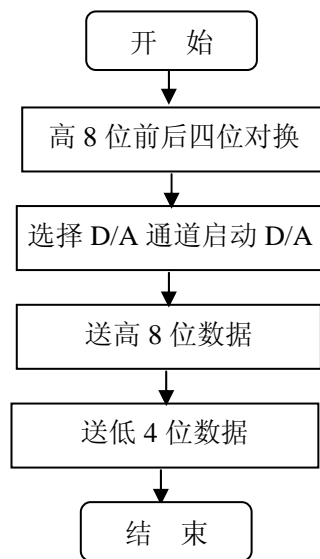
```

MOV DX, 031BH;
MOV AL, 18H ; 工作于 8253 方式 4
OUT DX, AL ; 使 8253 的 OUT0 输出为高
MOV AL, 00 ; 选择输入通道 IN0
MOV DX, 0310H
OUT DX, AL ; 送通道; 延时
INC DX
OUT DX, AL ; 启动 A/D, 延时
INC DX
IN AL, DX ; 读高 4 位
MOV AH, AL
INC DX
IN AL, DX ; 读低 8 位

```

2. D / A 通道测试

测试程序的流程图如下:



12 位 D/A 共占用 4 个地址，设本板基地址为 310H，则 4 个连续的 I/O 地址为 314H、315H、316H、317H，编程举例如下：

MOV AL, 08H; 800H 对应 5.000V，对于 12 位 D/A，高八位字节的高 4 位和低 4 位互换

MOV DX, 0314H

OUT DX, AL

MOV AL, 00 ; 800H 对应 5.000V，送低 4 位

INC DX

OUT DX, AL ; 第 1 路 D/A 输出 5.000V

IN AL, DX ; 起动

MOV AL, 0C ; C00H 对应 7.500V，对于 12 位 D/A，高八位字节的高 4 位和低 4 位互换

INC DX

OUT DX, AL

MOV AL, 00 ; C00H 对应 7.500V，送低 4 位

INC DX

OUT DX, AL ; 第 2 路 D/A 输出 7.500V

IN AL, DX ; 起动

在使用前，应分别对板上所有的 A/D、D/A 通道进行测试。

有关 A/D、D/A 板使用中的其他问题可参见“HD219 A/D、D/A、数字 I/O、定时 / 计数板使用说明书”。

第三节 系统建模

建模是系统分析与设计的基础。

一、吊车数学模型的建立

可用动力学的方法建立吊车的数学模型，吊车（含吊摆）的受力分析如图 3.1 所示。

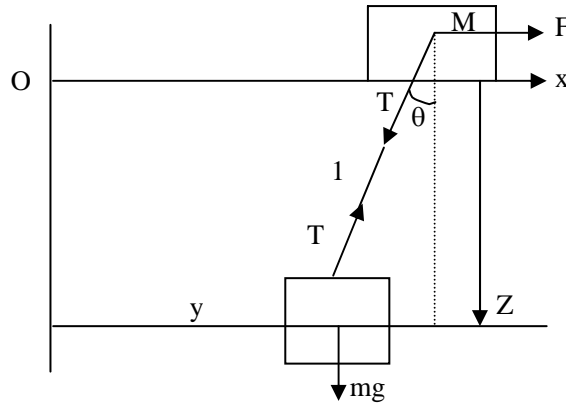


图 3.1 吊车受力分析

图中，F：吊车控制力

M：吊车质量

m：摆锤质量

x：吊车距原点的横坐标

y：摆锤距原点的横坐标

z：摆锤距原点的纵坐标

T：摆杆拉力

l：摆长

θ ：摆角

建模时不考虑吊车与导轨间的摩擦力、摆的阻力和摆杆的形变。

根据受力分析和所建立的坐标系可得

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= F - T \sin \theta \\ m\ddot{y} &= T \sin \theta \\ m\ddot{z} &= mg - T \cos \theta \end{aligned} \quad (3.1)$$

对上式整理可得

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + m\ddot{y} &= F \\ \ddot{y} \cos \theta + \ddot{z} \sin \theta &= g \sin \theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

从图 3.1 知

$$y = x - l \sin \theta$$

$$z = l \cos \theta$$

于是有：

$$\begin{aligned}\ddot{y} &= \ddot{x} + l \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 - l \cos \theta \cdot \ddot{\theta} \\ \ddot{z} &= -l \sin \theta \cdot \ddot{\theta} - l \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2\end{aligned}\quad (3.3)$$

将(3.3)式代入(3.2)式，得

$$\begin{aligned}(M+m)\ddot{x} - ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) &= F \\ \cos \theta \ddot{x} - l \ddot{\theta} &= g \sin \theta\end{aligned}\quad (3.4)$$

对式(3.4)进行整理可得 \ddot{x} ， $\ddot{\theta}$ 的表达式：

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{F - m \sin \theta (l \dot{\theta}^2 + g \cos \theta)}{M + m \sin^2 \theta} \\ \ddot{\theta} &= \frac{F \cos \theta - Mg \sin \theta - m \sin \theta (l \dot{\theta}^2 \sin \theta + g)}{l(M + m \sin^2 \theta)}\end{aligned}\quad (3.5)$$

作线性化处理，令 $\sin \theta = \theta$ ， $\cos \theta = 1$ ， $\sin^2 \theta = 0$ ， $\dot{\theta}^2 \sin \theta = 0$ ，于是（3.5）式简化为：

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{F}{M} - \frac{m}{M} g \theta \\ \ddot{\theta} &= \frac{F}{Ml} - \frac{(M+m)g}{Ml} \theta\end{aligned}\quad (3.6)$$

将(3.6)式的微分方程转化为状态空间形式，令

$$\begin{aligned}x_1 &= x \\ x_2 &= \dot{x} \\ x_3 &= \theta \\ x_4 &= \dot{\theta}\end{aligned}$$

于是可写出状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m}{M}g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{M+m}{Ml}g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{Ml} \end{bmatrix} F \quad (3.7)$$

令输出向量 $y = [x \ \dot{x} \ \theta]^T$ ，则

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

二、吊车—电机数学模型的建立

将吊车的状态方程与电机模型结合起来，如图 3.2 所示，由图可写出下式

$$[(U_a - K_e \omega) \frac{K_t}{R_a} - F \cdot r] \cdot \frac{r}{Js^2} = x \quad (3.9)$$

式中的 r 为皮带轮的半径。

由式(3.9)可得

$$-R_a F \cdot r^2 + r K_t U_a - K_e K_t \dot{x} = R_a J \ddot{x}$$

将式(3.6)代入上式，整理后得到下式

$$F = [0 \quad -\frac{MK_e K_t}{MR_a r^2 + R_a J} \dot{x} \quad \frac{Jmg}{Mr^2 + J} \quad 0]X + \frac{Mr K_t}{MR_a r^2 + R_a J} U_a \quad (3.10)$$

式中的 $X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T$ ，为状态向量。

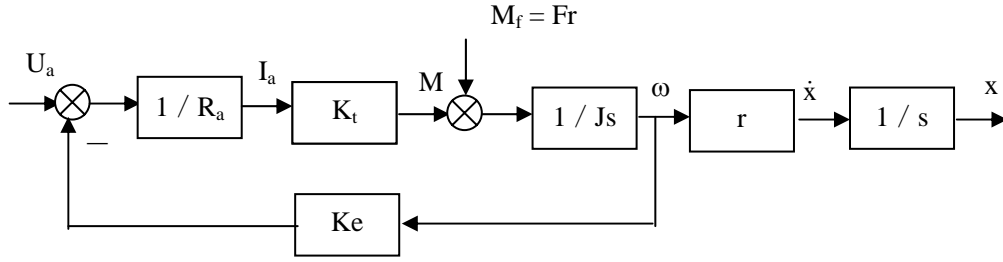


图 3.2 吊车—电机框图

将式(3.10)代入吊车的状态方程 (3.7)，可得吊车与电机总的数学模型如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_e K_t}{MR_a r^2 + R_a J} & -\frac{mgr^2}{mr^2 + J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_e K_t}{l(MR_a r^2 + R_a J)} & -\frac{(M+m)gr^2 + gJ}{l(Mr^2 + J)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r K_t}{R_a (Mr^2 + J)} \\ 0 \\ \frac{r K_t}{R_a (Mr^2 + J)} \end{bmatrix} U_a \quad (3.11)$$

第四节 系统设计

吊车控制系统的原理方框图已在图 1.2 中给出。系统中引入了测速机的输出做速度反馈，构成双回路控制系统，内回路为模拟式的，外回路为数字式的。对该系统的设计包括静态设计和动态设计两部分。

一、静态设计

系统静态设计的主要工作是：依据系统所受外界干扰及各种元部件的精度，为满足系统的静态精度要求选择系统的开环放大倍数。

系统静态放大倍数可依据以下几种原则选取：（1）静差要求；（2）速度误差要求；（3）系统的灵敏度要求，并从中选取最大的数值作为系统的放大倍数。由于系统所受外界及内部干扰直接影响系统的静态精度，因此在确定放大倍数之前应仔细分析作用于系统上的干扰。

上述确定的放大倍数是总的放大倍数，在具体实现时还应把它分配到不同环节上。实践表明，不同的分配方案对系统的性能会有不同的影响。分配放大倍数时应考虑到对系统误差和输出干扰的影响，还应考虑到对系统各部件进入饱和状态的影响，也应考虑对系统死区的影响。

在吊车控制系统中，要求 D / A 输出为 100mV 时电机启动，D / A 输出 5V 时对应电机最大速度，在静态设计时应予以考虑。

为了使 D / A 输出 100mV 时电机启动，由吊车系统原理框图知，放大倍数应满足

$$K = U_{\text{死区}} / 100\text{mV}$$

因为从 D/A 到电机中间既有运放又有功放，故可将 K 分成三级，两级为运放，一级为功放，如图 4.1，其中 $K_1 \cdot K_2 \cdot K_g = K$ 。

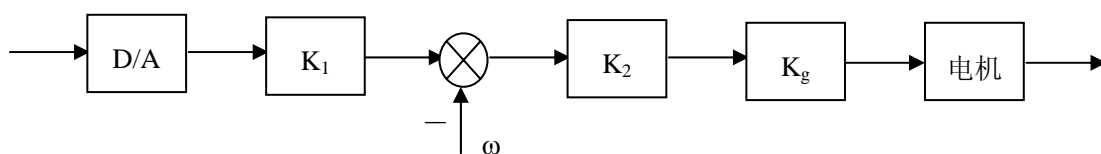


图 4.1 静态放大倍数的分配

考虑到系统中引入了速度反馈，故为了满足 D / A 输出 5V 对应电机最大速度的要求，应有下式成立：

$$(5K_1 - K_3 \cdot \frac{\dot{x}_{\max}}{r}) K_2 K_g K_m = \frac{\dot{x}_{\max}}{r} \quad (4.1)$$

式中的 \dot{x}_{\max}/r 即为电机最大速度， K_m 为电机传函的放大倍数，如图 4.2。 K_3 为测速反馈系数。

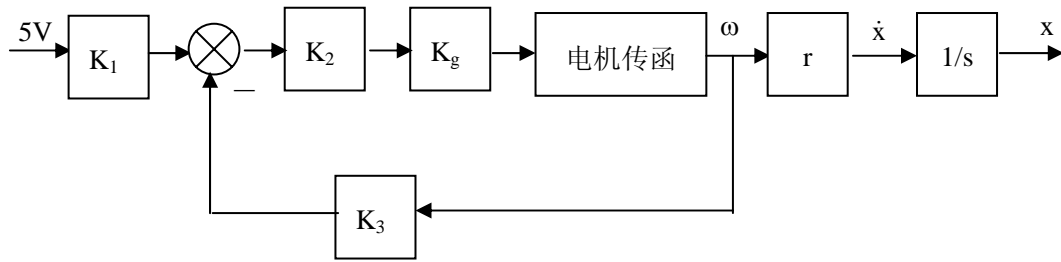


图 4.2 引入速度反馈的系统结构

二、动态设计

本系统的动态设计主要指数字控制器的设计。

吊车系统作为一种实验装置提供给实验者，在设计控制规律时，可以使用的设计理论是很多的，从经典控制理论到现代控制理论中的各种方法都可用来设计本系统的控制器。在设计过程中，还可借助目前广泛使用的先进仿真软件，通过试凑求得满足要求的控制算法。

为了在软件中输入参数方便，在对系统进行设计时，要求把控制律变换成如下形式

$$U = K(1) * p + K(2) * v + K(3) * \alpha \quad (4.2)$$

式中， p 为吊车的位移， v 为吊车的速度， α 为吊摆的摆角， $K(1)$ 、 $K(2)$ 、 $K(3)$ 为对应的增益系数，具体数值由所设计的控制律决定。

第五节 实验步骤

数字式桥式吊车控制系统的实验过程可分为准备阶段、理论设计、联机调试、实验总结四步。

一、准备阶段

在实验的准备阶段需完成的工作主要有：

1. 主要元部件性能测试：包括力矩电机、测速机、电位计、功率放大器、A / D D / A 接口板的性能、参数的测试。
2. 系统建模：建立被控对象即吊车—电机系统的数学模型。

二、理论设计

1. 控制规律设计：根据数学模型和给出的性能指标，用经典控制理论或现代控制理论设计控制规律。
2. 系统仿真：对设计出的控制规律进行数字仿真，根据仿真结果判断是否达到性能指标要求并对控制规律进行适当修改。

三、联机调试

1. 检查电缆的连接是否正确：检查电源、控制计算机、小功率随动系统、控制盒、反馈元件的连线。
2. 接通电源：打开 24V 电源的开关。
3. 运行程序：运行自编的控制软件。
4. 调整吊车位置，使吊车在靠近电机一侧时，线位移电位计的输出电压为零。
5. 接通功放的开关，使功放与电机连通。
6. 在键盘上按任意键，控制程序即开始运行，进行实时画图，并采集吊车线位移、吊车速度、吊摆角位移的数据，存入数据文件。
7. 若干秒之后（具体时间由操作者设定），程序退出，控制过程结束。

四、实验总结

根据实验所得的数据文件，进行数据处理。

1. 检查系统性能是否达到指标要求。
2. 与仿真结果进行对比。
3. 分析实验中出现的的问题的原因。

如果实际系统的性能不满足指标要求，则需要修改或重新设计控制器，重复二~四步骤。

第五节 运动控制实验报告（吊摆）内容

1. 系统设计任务及技术指标
2. 系统的组成和工作原理
 - 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 控制系统仿真
- 6. 计算机控制系统的设计与实现**
 - 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
 - 6.6 动画的实现
- 7. 系统的组成及调试**
 - 7.1 吊摆实现电路
 - 7.2 反馈极性判别
 - 7.3 系统调试
 - 7.4 系统性能分析与结论
- 8. 收获和体会**