

东北大学

硕士学位论文

关于干熄焦吊车交流电机调速原理和晶闸管系统

姓名：章伟军

申请学位级别：硕士

专业：机械工程

指导教师：张镭

20020601

关于干熄焦吊车交流电机调速原理 和晶闸管系统的国产化研究

摘要

干熄焦装置是国家计委推荐的、以后在焦炉上重点发展的项目，预计在不久的将来，国家将会出台年产 100 万吨以上的焦化厂在新建焦炉时必须配套干熄焦工艺的相关政策。

当前国内除了已经投产的干熄焦装置以外，还有二十多家单位对投资干熄焦装置有意向性。但由于干熄焦装置的国产化，特别是关键设备（如吊车）国产化的水平较低，导致设备必须从外国引进，而引进的外国设备价格相当高，为国内相同规模设备价格的八到十倍。这就影响了干熄焦装置在国内的普及。

本文内容为首钢干熄焦装置国产化预研项目的一部分，论文结合首钢干熄焦吊车的实际情况并参考相关文献，重点在理论上对提升电动机部分的调速原理进行深层次分析和研究。

主要工作如下：

首先根据首钢焦化厂使用的吊车提升部分的基本机械条件，从理论上提出干熄焦吊车提升电动机以及制动器的国产化选型要求。同时，根据电动机的基本参数计算，得出提升电动机固有和负载机械特性的理论公式，并初步分析提升电动机的静态运行点。

其次，根据提升电动机的控制要求，建立晶闸管三相交流调压，二次电阻理论计算方法；并确定晶闸管触发电路的选型确定原则。

第三，对干熄焦吊车提升电动机的交流可逆闭环调速系统进行理论分析和研究，建立 MATLAB 的仿真模型，得出提升电动机起动过程的动态波形。

基于以上分析，建立吊车提升电动机的控制思想。为首钢焦化厂的维护工作和以后的国产化改造工作创造一定的条件；同时，也为吊车的国产化制作工作提供理论依据。

关键词：干熄焦吊车 交流电动机调速 晶闸管系统 国产化

CDQ Crane's AC Electromotor Governing Principle and Research on Domestically Made Silicon Controlled Rectifier's System

Abstract

CDQ (Coke Dry Quench) is the project that is recommended by the National Plan Committee and developed mainly for coke furnace. It is estimated that in the near future the State will work out the policy that new-build yearly over one million tons coking plant must take CDQ as the auxiliary plant.

At present domestically except for the put-in-production CDQ, there are still more than twenty companies who are interested in investing in CDQ. But the domestic making level of this unit is so low, especially the key equipment (like crane), that the equipment must be imported with an expensive price which is eight to ten times more than the same scale domestic equipment. This situation hinders domestic popularization of CDQ.

The content of this article is one part of the Shougang CDQ made-in-China pre-research project. Together with the actual situation of Shougang CDQ and reference books, this article puts emphasis on the theoretical analysis and research for motor governing principle.

The main work will be the following:

At first, according to the basic mechanical condition for Shougang coking plant crane lifting parts, theoretically type choosing requirement for CDQ crane lifting motor and brake unit is supposed. At the same time, according to motor basic parameters calculation, theoretical formula of lifting motor fixed and loaded mechanical character is obtained and preliminarily static running points of lifting motor is analyzed.

Secondly, according to the control requirement of lifting motor, the

calculation method is set up which is for Silicon Controlled Rectifier three phases AC voltage adjustment and second electricity resistance theory; Silicon Controlled Rectifier flip-flop circuit type-choosing confirm principle is defined.

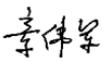
Thirdly, the CDQ crane AC electromotor invertible feedback governing system is theoretically analyzed and researched. MATLAB simulative model is set up to get dynamic wave for lifting motor starting duration.

Based on the above analysis, crane lifting motor control thought is built. This creates certain condition for the maintenance work of Shougang coking plant and the future made-in-China renovation. At the same time, it provides theoretical basic for crane made-in-China manufactory work.

key words: CDQ crane, AC Electromotor Governing, Silicon Controlled Rectifier's System, Domestically Made

声 明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下进行的。论文中取得的研究结果除加以标注和致谢以外的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得学位而使用过的资料。对其他同志给予的帮助在论文中已经作了明确的说明并表示谢意。

本人签名： 
日 期：2002 年 5 月

第一章 引言

1.1 研究背景

干熄焦 (Coke Dry Quenching, 简称 CDQ) 是一项节能和环保项目, 主要目的是将约 1000℃ 红热焦炭在干熄槽内使用惰性气体均匀冷却到 200℃ 以下, 以回收焦炭的余热和提高焦炭质量, 同时避免了原有的湿法熄焦所产生的污染。所回收的余热在锅炉中吸收, 产生蒸汽。从工艺上分为三个主要流程: ①将红焦装入干熄槽 (Chamber) 并在其冷却后排出的焦炭流程、②将焦炭冷却后的热量传递到锅炉 (Boiler) 的循环气体流程③产生蒸汽流程。

世界最早开发干熄焦技术的国家是瑞士, 从 1917 年就开始研究干熄焦工艺, 但干熄焦工艺的工业化应用是前苏联于 1936 年以后逐步发展起来的, 日本在 1973 年从前苏联引进干熄焦技术和专利后, 进行消化吸收, 已经开发出具有自己特点的干熄焦工艺。目前, 在干熄焦工艺上日本具有领先的地位, 主要在干熄焦装置的高度大型化、节能环保和自动控制方面有了较大的发展。我国宝钢于 1979 年开始从日本引进了干熄焦装置, 于 1985 年投产。首钢焦化厂在国家绿色援助项目的支持下, 日本赠送了一套具有日本上世纪九十年代末先进水平的干熄焦装置, 该项目已于 2001 年 1 月 19 日投入生产。到现在为止, 国内有 17 座干熄焦已经投入运行。同时, 还有武钢、首钢的二套干熄焦装置已经与日本签订了合同。

干熄焦装置是国家计委推荐的、以后在焦炉上重点发展的一个项目, 预计在不久的将来, 国家将会出台年产 100 万吨以上的焦化厂在新建焦炉时必须使用干熄焦工艺的政策。当前国内有二十多家单位对投资干熄焦装置有意向性。但由于干熄焦装置的国产化, 特别是关键设备的国产化程度较低, 导致设备从外国引进, 而引进的外国设备价格相当高, 为国内相同规模设备价格的八到十倍。这就影响了干熄焦装置在国内的

普及。

1.2 干熄焦吊车

干熄焦吊车 (Crane) 是一台室外用、带吊钩的特殊起重设备, 主要用于将 1000°C 的红焦装入干熄槽中, 是干熄焦装置中一台极为关键的设备, 它的运转正常与否对干熄焦的正常运行有极为重要的作用。干熄焦吊车的总体外观见图 1.1。

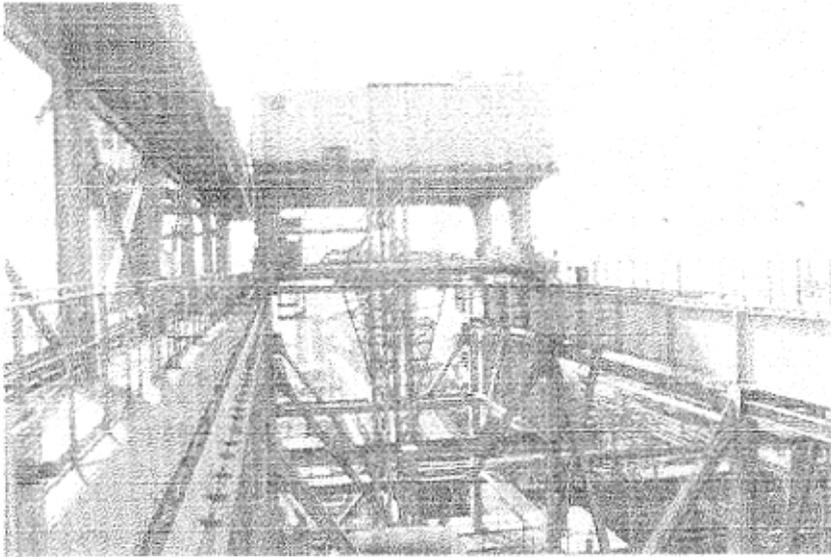


图 1.1 首钢焦化厂干熄焦吊车的外观

Fig.1.1 Overview of CDQ crane in shougang coking plant

在国内, 干熄焦吊车基本上以进口日本设备为主。如目前运行的干熄焦吊车如宝钢 6 台、首钢 1 台从日本引进。另外四台 (如济钢 2 台、上海浦东煤气厂的 2 台) 是国内制造的, 但使用效果不好。武钢、首钢二期干熄焦项目中干熄焦吊车也将从日本引进。这主要是由于国内对干熄焦装置的研究才开始, 同时设备制造厂家 (如干熄焦吊车的制造厂家) 对干熄焦工艺不熟悉, 对干熄焦吊车的设计、制造也无成熟经验可以借鉴。这就造成了干熄焦吊车从日本引进, 但这使干熄焦装置投资升高。干熄焦吊车的国产化是降低投资的极为有效的手段。

本论文着重研究和分析干熄焦吊车提升机构的电气控制。在研究过程中, 为了方便说明问题, 本文以首钢焦化厂的吊车的机械结构作为理论分析的基础。本文以后所指的吊车专指干熄焦吊车, 电动机和控制系统专指干熄焦电车提升部分的设备。

1.2.1 吊车简介

吊车的总体结构见附图 1。主要有以下几部分组成。

1、钢结构

吊车本体有车架、提升机构、走行机构、吊具、电气室、机器室和操作室所组成。其中车架是型钢和钢板的焊接结构, 分为上下二层。第一层设有走行机构、操作室, 下部设置焦罐导轨。第二层设有提升机构、电气室、机器室。

2、提升装置

被吊具保持住的焦罐是通过提升装置卷筒(Drum)上的钢丝绳(Wire Rope)卷取, 进行焦罐的提升、下降。

卷筒(Drum)通过两台减速机由四台提升电动机驱动, 各电动机轴安装有电磁制动机构。

在吊具和吊车本体之间使用两根钢丝绳, 钢丝绳的端部固定在卷筒和过张力检测装置上。

提升装置的原理简图见图 1.2。

3、走行装置(略)

4、吊具

吊具是由自动机械式开闭的吊钩和焦罐盖构成, 通过提升装置的钢丝绳的升降进行吊钩的自动开闭。

吊具上安装的导向滚轮(Guide Roller)在焦罐导向轨道(Bucket Guide Rail)内运动, 以保持焦罐在运动中的机械稳定性。

提升塔下设置有吊钩自动开闭的吊具缓冲器和焦罐盖缓冲器。

干熄焦吊车提升部分提升行程见附图 2, 提升速度见附图 3。

由附图 1 到附图 3 可以看出, 吊车提升部分有以下几个主要的动作:

- 1、 在提升塔处上升: 提升重量约 92 吨、上升高度约 32 米;

- 2、 在冷却塔处下降：下降重量约 92 吨、下降高度约 1 米；
- 3、 在冷却塔处上升：提升重量约 71 吨、上升高度约 1 米；
- 4、 在提升塔处下降：下降重量约 71 吨、下降高度约 32 米；

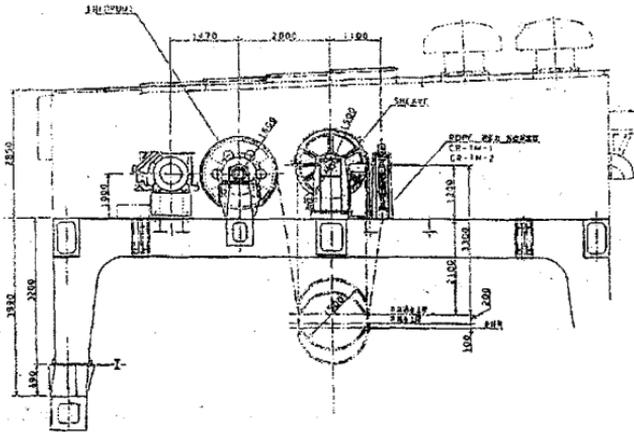


图 1.2 吊车提升装置简图

Fig.1.2 Sketch of crane's governing mechanism

1.2.2 吊车提升部分机械结构特点

提升部分机械结构见附图 4、附图 5 和附图 6。它主要由电动机、减速机、制动器、滚筒、上下滑轮组、钢丝绳、吊具和相关的检测装置所组成。为了研究控制系统的方便，将有关的参数明确如下。

额定提升重量为：71 吨(焦罐：42t；焦罐盖：7t；焦炭：22t)。本论文简称轻载。

最大提升重量为：92 吨(额定提升重量：71t；吊具：21t)。本论文简称重载。

试验提升重量：109.75 吨(校验吊车的提升能力)。本论文简称极重载。

焦罐提升速度：30m/min（高速）

10m/min（中速）

3m/min（低速）

焦罐提升加速度：小于 $0.166\text{m}^2/\text{s}$ 。

钢丝绳：二套。

焦罐提升高度：约 32m。

电磁制动器：四个。

提升减速机的速比： $i=23.766$

卷筒直径 D ：1.6m

附属品：提升行程和速度检测器

钢丝绳过张力检测器

钢丝绳涂油器

1.2.3 吊车提升部分对调速系统的要求

1、吊车提升部分的速度应能在一定的速度范围进行调节，以满足工艺要求。具体来说，应结合干熄焦总体工艺要求分别确定提升部分的最高和最低提升速度。

2、由于干熄焦吊车提升部分所提升的重量为恒定，即在每一次的提升和下降过程具有恒转矩负载的特点。

3、在运动过程中，对速度稳定的精度要求较高，但要尽可能的缩短起动、制动的过渡过程。但对电动机的同步问题要着重考虑。

4、考虑到生产工艺的要求，考虑到故障状态下，在 3 台电动机工作的情况下，也能保证生产的进行。

5、要考虑到吊车提升部分为位能性负载特殊性。

6、控制系统的选择应考虑到吊车的工作特点，即吊车在正常生产的过程中使用较为频繁，检修时间短的特点。每年只能安排一次 10 天的修理。

7、器件选型要考虑吊车使用时间为 25 年的特点。

1.3 本文的研究内容

引进的设备，外方仅仅是提供了设备基本维护、使用说明，不提供该设备深层次的理论，而且进行保密。本文将结合首钢干熄焦吊车的实际情况，并结合使用、维护说明书，结合干熄焦工艺的特点，重点在理论上对提升部分的调速原理进行深层次的分析和研究，在实践中不断分析总结，并消化日本技术，以解决实际维护中存在问题，同时为干熄焦吊车的国产化提供理论依据。

本论文第一章建立干熄焦吊车的基本机械条件，为以后控制系统的分析提供依据。第二章讨论干熄焦吊车的提升电动机以及负载的机械特性，从建立理论公式，为提升电动机的动态分析打下基础。第三章讨论晶闸管的三相交流调压，二次电阻的计算。同时从晶闸管的触发电路的选型做出说明。第四章对交流可逆闭环控制系统进行理论分析和研究。第五章分析提升电动机的动态特性，特别是建立 MATLAB 的仿真模型，分析起、制动过程的波形。同时与实际相结合，为首钢焦化厂的维护工作以及国产化工作提供理论依据。

第二章 电动机及其控制方式确定

2.1 提升电动机选型要求

2.1.1 提升电动机功率确定

根据 1.2 节干熄焦吊车的简介，结合吊车的工作特点和要求，提升电动机的功率可按下列式(2.1)和式(2.2)确定。[参考文献 10]

$$P = Gv \quad (2.1)$$

其中：P：提升功率（kW）

G：最大提升重量（kN）

v：最高提升速度（m/s）

考虑到损耗的影响，以 η 表示之。则有下式成立。[参考文献 10]

$$P_1 = \frac{P}{\eta} \quad (2.2)$$

其中：P₁：电动机侧总功率（kW）

η ：平均效率

以 1.2.2 节中的参数进行核算。

- 1、最大提升重量为 92 吨。即 $G=92*9.8=901.6$ kN
- 2、最大提升速度为 30m/min。即 $v=30/60=0.5$ m/s。
- 3、由式(2.1)可得： $P=92*9.8*0.5=450.8$ kW
- 4、若取 $\eta=0.85$ ，由式(2.2)可得： $P_1=450.8/0.85=601$ kW
- 5、取安全系数为 1.05，则得到修正后的功率为 631kW

按照电动机的选用原则，单台 631kW 电机一般选用高压电机，而根据干熄焦现场的具体情况，高压电机无法安装在移动的机车上，故不能选用一台电动机的方案。为了提高系统的转动惯量，初步选择 4 台电动机。而 $631/4=158$ kW，故电动机选用 4 台、每台电机功率为 160kW。

根据本文的研究条件，焦罐提升速度和电动机的转速之间有如下关系：[附图 1 到附图 6]

$$n = 60vk \frac{1}{\pi D} i \quad (2.3)$$

其中：n:电动机转速，r/min

v:焦罐提升速度，m/s

60:为单位制转换

k:系数，取为 4，表示钢丝绳的影响

D:卷筒直径，1.6m

i:减速机的速比，23.766

将焦罐最高提升速度 0.5m/s(30m/min)代入式(2.3)，计算出电动机的最

高转速为： $n = 30 \times 4 \frac{1}{\pi \times 1.6} \times 23.766 = 567 \text{r/min}$ 。故选用电动机的同步转速

为 600r/min。

提升电动机的布置见附图 4。

2.1.2 提升电动机转矩计算

2.1.2.1 受力分析

根据附图 1 到附图 6，滚筒、定动滑轮和固定点之间钢丝绳的机械联系可以简化成图 2.1。

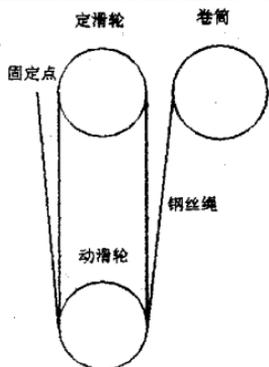


图 2.1 提升装置相互关系简图

Fig.2.1 Interrelation's sketch of governing mechanism

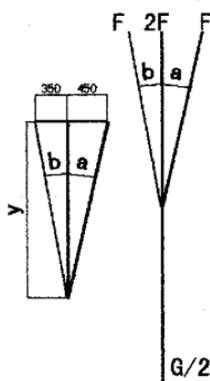


图 2.2 钢丝绳受力示意图

Fig.2.2 Force Sketch of wire rope

为了分析上的方便，将图 2.1 和附图 1-6 的相关尺寸进行简化，可得图 2.2 所示得钢丝绳所受的拉力关系图。

在图 2.2 中，有以下二式成立：

$$\cos a = \frac{y}{\sqrt{y^2 + 450^2}} \tag{2.4}$$

$$\cos b = \frac{y}{\sqrt{y^2 + 350^2}} \tag{2.5}$$

其中, y 代表动滑轮所移动的提升高度, 表示焦罐提升的高度。 $y=35445-x$

x 表示焦罐提升高度。 $(0 < x < 32145\text{mm})$

从图 2.2 可得如下关系:

$$(F\cos\alpha + F\cos\beta + 2F) - g(m/2) = a(m/2) \quad (2.6)$$

其中, F : 单根钢丝绳拉力, kN

a : 提升加速度, m/s^2

g : 重力加速度, 9.8m/s^2

m : 提升的质量, kg

$m/2$: 表示有二套钢丝绳

即:

$$F = \frac{m(g+a)}{2(\cos\alpha + \cos\beta + 2)} \quad (2.7)$$

实际上, 在式(2.4)有 $y \gg 450$, 则有 $\cos\alpha = 1$; $\cos\beta = 1$

故式(2.7)可以简化为式(2.8),

即:

$$F = \frac{m(g+a)}{8} \quad (2.8)$$

综上所述, 可以得到以下结论:

1、在不考虑提升加速度时, 即 $a=0\text{m/s}^2$ 时:

- 1) 正常生产时, 提升重量约 92 吨时钢丝绳受力为 112.7kN(11.5 吨);
- 2) 正常生产时, 提升重量约 71 吨时钢丝绳受力为 87kN(8.88 吨);
- 3) 吊车卷上实验时, 提升重量约 109.75 吨时钢丝绳受力为 134.4kN(13.7 吨);

2、根据工艺的要求, 提升加速度为 0.166m/s^2 时, 则钢丝绳所受的拉力为最大:

- 1) 正常生产时, 提升重量约 92 吨时钢丝绳受力为 114.6kN(11.5 吨);

2)正常生产时,提升重量约 71 吨时钢丝绳受力为 88.4kN(8.88 吨);

3)吊车卷上实验时,提升重量约 109.75 吨时钢丝绳受力为 136.7kN(13.7 吨);

根据以上的计算,为了保护钢丝绳,应选定合理的钢丝绳的测力装置,同时设定合理的保护范围。

2.1.2.2 折算到电机侧转矩

规定提升电动机的转矩、转速的正方向为提升重物的方向。若不考虑损耗的影响,则电动机侧的总转矩计算可以使用以下公式:[参考文献 10]

$$M_2\Omega = Gv \quad (2.9)$$

式中 M_2 为电动机转矩, Nm

Ω 为电动机转速 (rad/s)

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.10)$$

n 为电动机转速 (r/min);

G 为卷筒所受的拉力 (N);

v 为重物的提升和下降速度 (m/s);

将式(2.3)和式(2.10)代入式(2.9)可得以下公式:

$$M_2 = \frac{D}{8i} G \quad (2.11)$$

式中各符号的意义见式(2.3)。

若考虑损耗的影响,则电动机侧的总转矩计算可以使用以下公式:

1、 在提升时:

$$M_{21} = \frac{M_2}{\eta_e} \quad (2.12)$$

2、 在下降时:

$$M_{22} = M_2\eta_e \quad (2.13)$$

其中: η_e 为提升时传动效率;

η_e' 为下降时传动效率;

$$\eta_e' + \frac{1}{\eta_e} = 2 \tag{2.14}$$

按提升重量 92t 时的效率 $\eta_e = 75\%$ ($\eta_e' = 66.6\%$) 为依据, 计算电动机的转矩如下:

$$\text{电机侧总转矩 } M_2 = \frac{1.6}{8 \times 23.766} 92 \times 9.8 \times 1000 = 7587.3 \text{ Nm}$$

$$\text{电机侧总提升转矩 } M_{21} = \frac{7587.3}{0.75} = 10116.4 \text{ Nm}$$

$$\text{电机侧总提升转矩 } M_{22} = 7587.3 \times 0.667 = 5058.2 \text{ Nm}$$

则可以得到单台电动机的转矩为: 总转矩: 1896.8 Nm; 提升转矩: 2529.1 Nm; 下降转矩: 1264.5 Nm。

考虑到实际上提升、下降重物的效率是可变的, 而转矩损失是不变的, 故在额定负载下计算出的转矩损耗为:

$$\Delta M = \frac{2529.1 - 1264.5}{2} = 632 \text{ Nm} \tag{2.15}$$

其他负载的情况下可以近似认为转矩损失是相同的, 即:

$$M_{\text{提升}} = M_2 + \Delta M \tag{2.16}$$

$$M_{\text{下降}} = M_2 + \Delta M \tag{2.17}$$

根据以上的计算公式, 可以得到不同提升负载情况下的单台电动机的负载转矩如表 2.1。

表 2.1 提升重量与负载转矩的关系

Table 2.1 Relation of governing's weight and load's torque

		吊具	吊具+焦罐盖	轻载	重载	极重载
提升重量	t	21	29	71	92	109.75
有效负载转矩	Nm	433	598	1464	1897	2263
电机负载转矩	Nm	1065	1230	2096	2529	2895
		-199	-34	832	1265	1631

根据以上的结论, 可以得出单台常用电动机负载特性曲线, 如图 2.3。

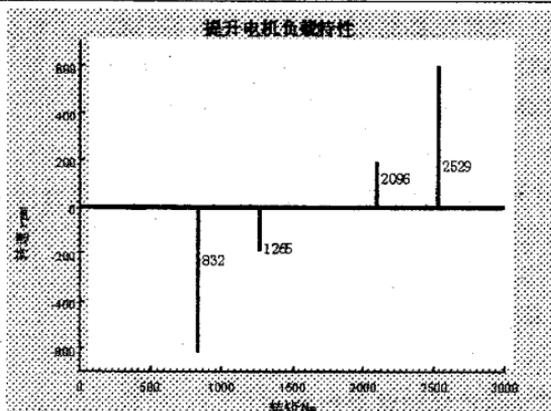


图2.3 提升电动机的负载特性

Fig.2.3 Load characteristic of Governing motor

根据表 2.1 可以得出以下结论：

- 1、提升时电动机负载转矩的方向与电动机的转速方向相同。
- 2、下降时电动机负载转矩的方向与电动机的转速方向相反。
- 3、电动机负载转矩大小与提升的重量有关，且在提升相同重量时提升转矩比下降转矩大。

4、干熄焦吊车提升部分是位能性负载。系统转矩损耗已经不足于系统的自保，即在系统静止时必须提供额外的制动转矩来保持系统的平衡状态，以防止提升的重物在半空中时掉下来。

为了达到以上目的，可以使用制动器来提供制动转矩，制动器的选用原则如下：

- 1) 每台电动机配用一台制动器；
- 2) 按额定提升重量（92t）时电动机的负载转矩进行确定制动器的额定制动转矩。有以下式：

$$M_1 > kM_2 \quad (2.18)$$

其中： M_1 为单台制动器额定制动转矩；

M_2 为单台电动机额定转矩；

k 为过载系数。

为了确保在某一个制动器失效时系统的可靠性,即在三个制动器工作时也能提供足够的制动转矩,过载系数 k 应取大于 2。

单台电动机下降转矩为 1265 Nm,按式(2.18)可得:

$$M_1 > 2 \times 1265 = 2530 \text{ Nm}$$

5、吊车在极轻载的时候,下降负载转矩为负,即此时若无制动器,吊具和焦罐盖也不会自己掉下来,可起到保护作用。

2.1.3 提升电动机转动惯量折算

2.1.3.1 位能性负载的转动惯量折算

位能性负载折算到电动机侧总转动惯量的计算公式为[参考文献 10]

$$GD^2 = 365 \frac{Gv^2}{n^2} \quad (2.19)$$

将式(2.3)代入,有

$$GD^2 = 365G \left(\frac{\pi D}{240i} \right)^2 \quad (2.20)$$

1、轻载时

$$GD^2 = 365 \times 71 \times 10^3 \times 9.8 \times \left(\frac{\pi \times 1.6}{240 \times 23.766} \right)^2 = 197 \text{ Nm}^2$$

折算到单台电动机的转动惯量: 49.3 Nm²

2、重载时

$$GD^2 = 365 \times 98 \times 10^3 \times 9.8 \times \left(\frac{\pi \times 1.6}{240 \times 23.766} \right)^2 = 255.2 \text{ Nm}^2$$

折算到单台电动机的转动惯量: 63.8Nm²

2.1.3.2 电动机总的转动惯量

查电动机资料,单台电动机本身的转动惯量: 745.56Nm²

减速机输入轴转动惯量: 48.85-63.3Nm²

从以上数据可以看出,电动机的转动惯量对系统大,而卷筒和位能性负载的转动惯量可以忽略。故只考虑电动机的转动惯量加上一定的系

数为整个电动机的转动惯量。见下式：[参考文献 10]

$$GD^2 = kGD^2_{\text{电机}} \quad (2.21)$$

其中：k 为转动惯量系数，本文中取为 1.2

则系统的转动惯量为： $GD^2 = 1.2 * 745.56 = 894.7 \text{ Nm}^2$

2.1.4 电动机运动公式

$$M - M_t = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.22)$$

将所计算得出的转动惯量代入式(2.22)可得到式(2.23)，此公式在以后的控制系统的选型中极为重要。

$$M - M_t = 2.386 \frac{dn}{dt} \quad (2.23)$$

其中：M：电动机的转矩(Nm)

M_t：负载转矩(Nm)

n：电动机的速度(r/min)

$\frac{GD^2}{375}$ ：电动机和负载总的转动惯量(Nm²)

为了保护钢丝绳和干熄焦的工艺要求，应该使焦罐提升加速度小于 0.166m/s²，即

$$a = \frac{dv}{dt} < 0.1660 \quad (2.24)$$

其中：v 为焦罐的提升速度，m/s

将式(2.3)代入，可得

$$\frac{dn}{dt} = \frac{240i}{\pi D} \frac{dv}{dt} = 3.14 \text{ r/s}^2 \quad (2.25)$$

则 $M - M_t = 188.4 * 2.386 = 449.5 \text{ Nm}$ 。

表示在电动机加减速的过程中，为了确保焦罐的提升加速度不会超过 0.166 m/s^2 。电动机的输出转矩和负载转矩不能相差 449.5 Nm 。

2.2 提升电动机机械特性和等值电路

为了结合实际分析系统的动静态特性，根据电动机的试验参数，使用理论计算的方法来确定电动机的机械特性以及等值电路。为下一步的理论分析提供依据。

吊车提升电动机的试验参数见附表 1。

2.2.1 电动机基本参数的计算

根据电动机的使用说明书和实验报告，可以得到以下的数据并使用以下二节的理论计算公式确定电动机的等值电路数据。

额定功率： $P_N=160 \text{ kW}$ ；额定转矩： $M_N=2593 \text{ Nm}$ ；极对数： $p=5$ ；

同步转速： $n_1=600 \text{ r/min}$ ；额定转速： $n_N=589 \text{ r/min}$ ；

额定转差率： $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{600 - 589}{600} = 0.0181$ ；

定子：Y 接；额定电压： $U_{1N} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$ ；额定电流： $I_{1N} = 320 \text{ A}$ ；

转子： Δ 接；额定电压： $U_{2N} = 409 \text{ V}$ ；额定电流： $I_{2N} = \frac{238}{\sqrt{3}} = 137.4 \text{ A}$ ；

一次电阻 $r_1 = \frac{0.026}{\sqrt{3}} = 0.01189 \Omega$

二次电阻 $r_2 = 0.0296 \times \sqrt{3} = 0.05127 \Omega$

2.2.1.1 短路（堵转）试验

$U_{1k} = \frac{56.5}{\sqrt{3}} \quad I_{1k} = 331 \text{ A} \quad P_{1k} = 7900 \text{ W}$

$z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = 0.09855 \Omega$

$$r_k = \frac{P_{1k}}{3 \times I_{1k}^2} = 0.02404 \Omega$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 0.09558 \Omega$$

$$x_1 \approx x_2' \approx x_k / 2 = 0.04779 \Omega$$

$$k_e \times k_i \approx \left(\frac{U_{1N}}{U_{2n}}\right)^2 = 0.3$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{k_e \times k_i} = 0.1593 \Omega$$

$$r_2' = (k_e \times k_i) \times r_2 = 0.01538 \Omega$$

2.2.1.2 空载试验

$$U_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

$$I_0 = 158A$$

$$P_0 = 6660W$$

$$z_0 = \frac{U_1}{I_0} = 1.3924 \Omega$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3 \times I_0^2} = 0.08893 \Omega$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = 1.3896 \Omega$$

$$r_m = r_0 - r_1 = 0.07703 \Omega$$

$$x_m = x_0 - x_1 = 1.3418 \Omega$$

2.2.2 电动机等值简化原理图

根据上一节的计算，可以得出电动机的等值简化原理图 2.4。

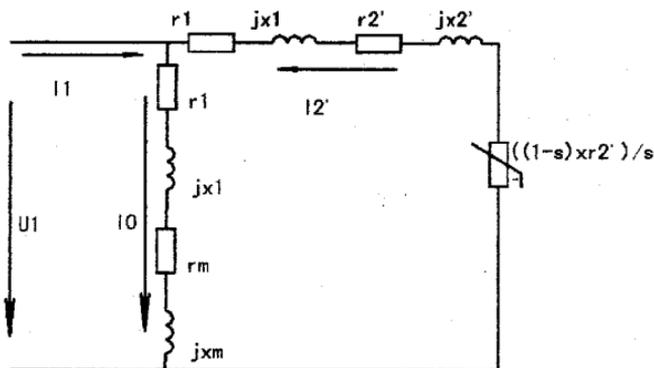


图 2.4 提升电动机的等值原理图

Fig 2.4 Principle draw of governing motor

2.2.3 提升电动机转矩公式

根据三相异步电动机简化等值电路图 2.4 可知:

$$M = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1(I_2')^2 \frac{r_2}{s}}{\frac{2\pi n_1}{60}} \quad (2.26)$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (2.27)$$

$$\text{其中 } \Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$$

$$M = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3pU_1^2 \frac{r_2}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (2.28)$$

在以上的计算公式中所使用的电压、电流、电阻值全部是单相电路值。

2.2.4 提升电动机的机械特性

根据式(2.28)使用 MATLAB 可以画出提升电动机的机械特性如图 2.5。其中打叉的点为电动机的实验数据。从图中可以看出, 所得到的式(2.8)计算电动机的输出转矩公式可以作为理论计算的依据。

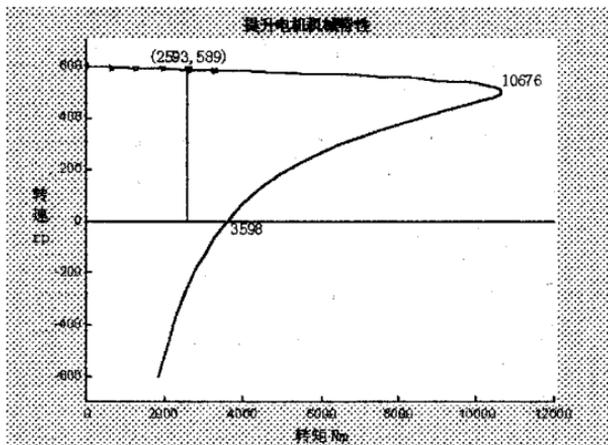


图 2.5 提升电动机的固有机械特性

Fig. 2.5 Mechanical characteristic of governing motor

$$M_N = 2593 \text{ Nm}$$

$$M_m = 10676 \text{ Nm}$$

$$M_{st} = 3598 \text{ Nm}$$

$$\lambda_m = \frac{M_m}{M_N} = 4.12$$

$$k_m = \frac{M_{st}}{M_N} = 1.39$$

2.3 提升电机静态分析

2.3.1 提升电动机稳态运行点

根据式 3.2，可以得到表 2.3。

表 2.2 焦罐提升速度和电机转速关系

Table 2.2 Relation of bucket governing speed and motor's rev

焦罐的提升速度 (m/min)	电动机转速 r/min
30	570
10	190
3	57

将表 2.3 和图 2.3、图 2.6 放在一起可以得到图 2.6。

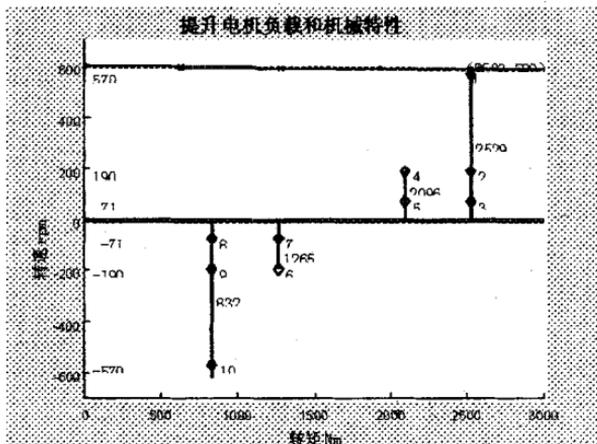


图 2.6 电动机静态运行点

Fig.2.6 Run's static state of motor

由图 2.6 可以得到以下的结论：

1、提升电动机的静态运行在图中的 1—10 点，一般的鼠笼型交流电动机无法满足图中的调速要求，只能使用直流电动机和绕线型特性，而 160kW 得直流电机对电刷的要求极高，无法满足要求。故选用绕线型交流电动机，并使用交流调速的方法。

2、从图中还可看出，绕线型交流电动机可使用调二次电阻来达到调速的目的、但在下降时还无法满足调速的要求，必须结合一次交流降压的方法来达到目的。

2.3.2 运行状态分析

以电动机提升重物时为基准建立各过程量的正方向。由以上的电动机机械特性图可以看出，卷上电动机运行在 I、IV 象限，即无论电动机的转向如何，电动机所受的转矩的方向都是不改变。所以，对卷上电动机的各种运行状态分析如下：

2.3.2.1 提升

1、高速：电动机处于正向电动运行，通过电动机驱动重物提升。此时，切除全部二次电阻，仅加二次常带电阻，电动机加上全电压。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的1点。

2、中速：电动机处于正向电动运行，通过电动机驱动重物提升。此时，全部二次电阻不切除，再通过降低电动机的一次正向电压来使电动机的转速带到规定的要求。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的2和4点。

3、低速：电动机处于正向电动运行，通过电动机驱动重物提升。此时，全部二次电阻不切除，再通过降低电动机的一次正向电压来使电动机的转速带到规定的要求。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的3和5点。

2.3.2.2 下降

1、高速：电动机处于反向回馈制动运行状态。电动机加上反向一次全电压，切除全部二次电阻，仅加二次常带电阻。下降重物拖动电动机运转，此时电动机作为异步发电机运行。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的10点。电动机的转速大于同步转速。

2、中速：电动机处于正向的倒拉反转运行状态。电动机全部二次电阻不切除，再通过降低电动机的一次正向电压来使电动机的转速带到规定的反向转速要求。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的7和9点。

3、低速：电动机正向的处于倒拉反转运行状态。电动机全部二次电阻不切除，再通过降低电动机的一次正向电压来使电动机的转速带到规定的转速反向要求。电动机稳态时运行在电动机机械特性图的6和8点。

2.3.3 提升电动机静态功率分析

1、正向电动运行

提升时的高速、重速和低速均为此种运行方式。此时，电网向电动机输入功率，电动机轴上输出机械功率驱动重物提升。通过消耗在二次

电阻上的电功率以及将低一次电压的方法达到调速的目的。

2、 拉反转运行

下降的低速和中速为此种运行方式。此时，电网向电动机输入电功率，重物下降而减少的位能也向电动机输入功率。这二部分的功率消耗在电动机的二次电阻中。

3、 反向回馈运行方式

下降中的高速为此种运行方式。此时，电动机当作异步发电机运行，重物下降而减少的位能向电动机输入有功功率，电网向电动机输入无功功率以建立旋转磁场。

第三章 晶闸管主回路确定

根据第二章的论述，在吊车提升回路中使用了四台 160kW 的电动机，提升电动机使用一次交流调压、二次调电阻的调速方式。根据这种调速方式，下面从理论上分析此种控制方式的主回路。

3.1 晶闸管交流可逆系统理论基础

3.1.1 基本概念

触发延迟角：从晶闸管开始承受正向阳极电压起到施加触发脉冲为止的电角度，用 α 表示，也称触发角或控制角。

导通角：晶闸管在一个周期中处于通态的电角度，用 θ 表示。

交流电力控制电路：只改变电压、电流或对电路的通断进行控制，而不改变频率的电路。此种电路的控制方式常采用相位控制电路。

将二个晶闸管反并联后串联在交流电路中，通过对晶闸管的控制就可控制交流电力。在每半个周波内通过对晶闸管开通的相位控制，可以方便地调节输出电压的有效值，来达到控制电动机一次电压，从而达到调速目的。

3.1.2 一次交流调压

晶闸管控制主回路有几种接法，而在本论文重点研究和分析三相三线的工作原理。单台电动机主电路的接法见图 3.1。

在图 3.1 中，其中的电源（a、b 和 c）线电压和相电压的表达式和波形如下所述：a'、b' 和 c' 分别代表提升电动机的定子线圈。

$$u_a = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t \quad u_b = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad u_c = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

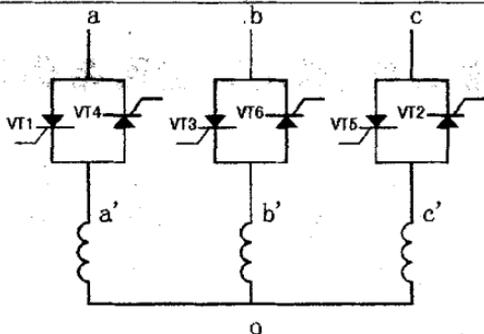


图 3.1 交流调压电路主回路

Fig. 3.1 main loop of three phases AC voltage adjustment

$$u_{ab} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad u_{ac} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$$

$$u_{bc} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t - \frac{3\pi}{6}) \quad u_{ba} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6})$$

$$u_{ca} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \quad u_{cb} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 \sin(\omega t - \frac{9\pi}{6})$$

其中： ω 为角频率。 $\omega = 2\pi f$

f 为频率， $f = 50\text{Hz}$

三相触发脉冲可采用双脉冲或宽脉冲。三相的触发脉冲应依次相差 120° ，同一相的两个反并联的晶闸管的触发脉冲相差 180° 。因此，触发脉冲顺序也是 VT1-VT6，一次相差 60° 。

考虑到三相电源电压在任何时候都有下式存在：

$$u_a + u_b + u_c = 0,$$

且所带的负载为三相平衡负载，故为了分析上的方便，假设图 3.1 中的 o 点的电位恒定为 0V。各相电流的方向如图 3.1 所示。

如果将图 3.1 中晶闸管换为二极管，相电流和相电压同相位，且二极管开始导通。因此把相电压过零点定为触发角 α 的起点。 α 的移相范围是 $0^\circ - 150^\circ$ 。

在任意时刻，可能是三相中各有一个晶闸管导通，这时负载相电压

就是电源电压相电压；也可能是两相中各有一个晶闸管导通，另一相晶闸管不导通，这时导通相的负载相电压就是电源相电压的一半。根据任一瞬间导通晶闸管的个数以及半个周波内电流是否连续可将 0° - 150° 的移相范围分为如下三段。

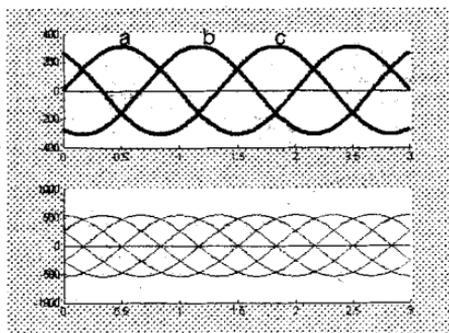


图 3.2 三相三线交流调压电源电压波形

Fig.3.2 voltage wave of three phases AC voltage adjustment

表 3.1 三相调压电路的晶闸管的导通顺序

Table 3.1 Silicon controlled mode of three phases AC voltage adjustment

时段	I	II	III	IV	V	VI
晶闸管 VT1、VT3、VT5	VT1	VT1	VT3	VT3	VT5	VT5
晶闸管 VT2、VT4、VT6	VT6	VT2	VT2	VT4	VT4	VT6

1) $\alpha = 0^{\circ}$ 时。 $\alpha = 0^{\circ}$ 是一个特殊状态，一直有三个晶闸管导通。见图 3.3。

2) $0^{\circ} \leq \alpha < 60^{\circ}$ 范围内，电路处于三个晶闸管导通和二晶闸管导通的交替状态，每个晶闸管导通角度为 $180^{\circ} - \alpha$ ，见图 3.4。

3) $60^{\circ} \leq \alpha < 90^{\circ}$ 范围内，电路处于二个晶闸管导通。每个晶闸管的导通角度为 120° ，见图 3.5。

4) $90^{\circ} \leq \alpha < 150^{\circ}$ 范围内，电路处于二个晶闸管导通与无晶闸管导通的交替状态，每个晶闸管的导通角度为 $300^{\circ} - 2\alpha$ ，而且这个导通角度被分割为不连续的两部分，在半周波内形成两个断续的波头，各占 150° 。

α ，见图 3.6 和图 3.7。

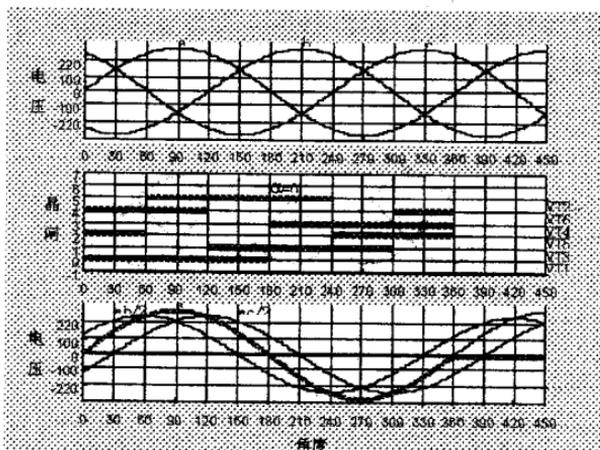


图 3.3 电压波形 ($\alpha = 0^\circ$)

Fig. 3.3 voltage wave ($\alpha = 0^\circ$)

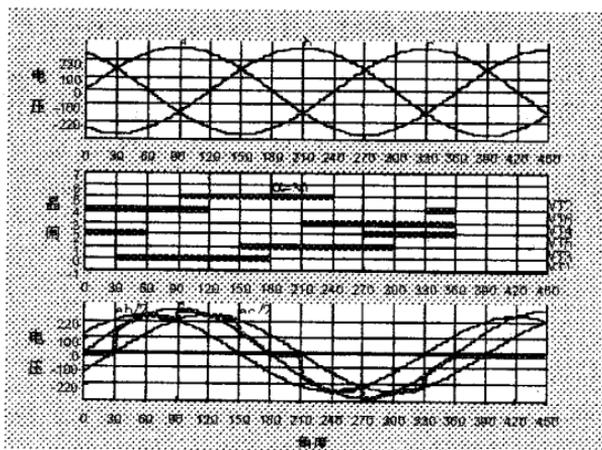


图 3.4 电压波形 ($\alpha = 30^\circ$)

Fig. 3.4 voltage wave ($\alpha = 30^\circ$)

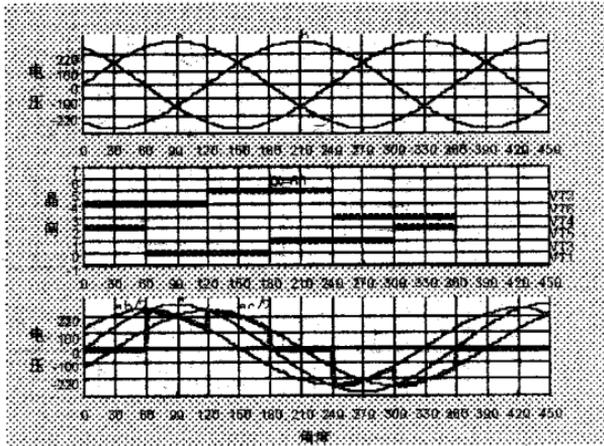


图 3.5 电压波形 ($\alpha = 60^\circ$)

Fig. 3.5 voltage wave ($\alpha = 60^\circ$)

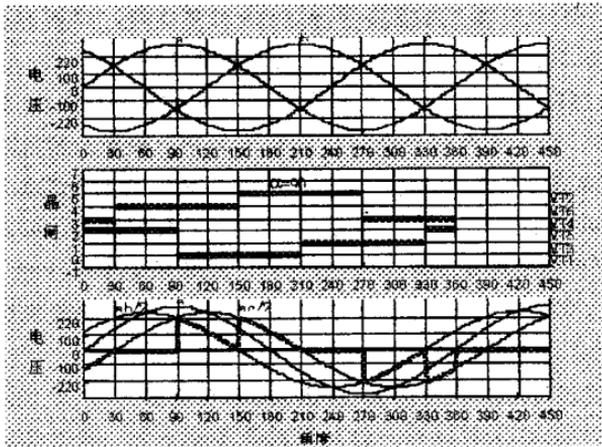


图 3.6 电压波形 ($\alpha = 90^\circ$)

Fig. 3.6 voltage wave ($\alpha = 90^\circ$)

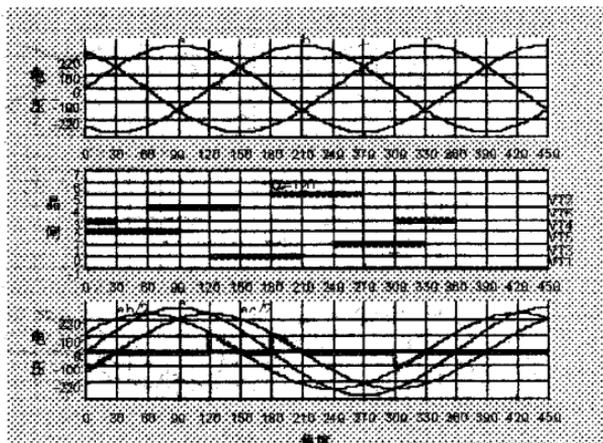
图 3.7 电压波形 ($\alpha=120^\circ$)Fig. 3.7 voltage wave ($\alpha=120^\circ$)

图 3.3-图 3.7 得绘制使用了 MATLAB 绘图功能，编制的程序名为：
sxy(a)。图 3.3-图 3.7 中，有如下几点需要说明：

1、每个图的第一个小图为电源电压，即为图 3.1 中 a、b 和 c 的电压波形；第二个小图为每个晶闸管的触发角 α （触发的起始时间）和导通角 θ （晶闸管的导通时间）；第三个小图为负载的电压波形，即图 3.1 中 a'、b' 和 c' 的电压波形，图中只画出了 a' 相的波形，以深颜色的线表示。其余各相的波形形状与 a' 的相同，只是相位相差 120° 。

2、为了简单，电压波形以电阻负载为例。对电动机来说是阻感负载，对波形有一定的影响。

3、在第三小图中还表示出了相电压的有效值 U_a 。此有效值可以代入式(2.27)中，作为电动机一次电压的有效值使用，来对电动机输出转矩、输入电流作理论分析使用。

4、第二小图的晶闸管的导通关系可以作为触发电路的选型依据，这在 3.4 中作详细的论述。同时可以作为联系调速系统和交流一次调压的联系纽带。

5、将图 3.3-3.7 的一次输入电压作为提升电动机的定子电压，代入式(2.27)可得电动机调压特性见图 3.8。在图 3.8 的曲线分别代表 α

为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 100° 、 120° 的特性曲线。

电机一次电压低的时候，电机的输出转矩将小于负载转矩，而且电机的谐波也多，故在一次调压时尽量使用额定电压。且从图中可以看出，仅仅调整一次电压根本无法满足调速范围的要求，必须结合调节二次电阻来达到调速目的。

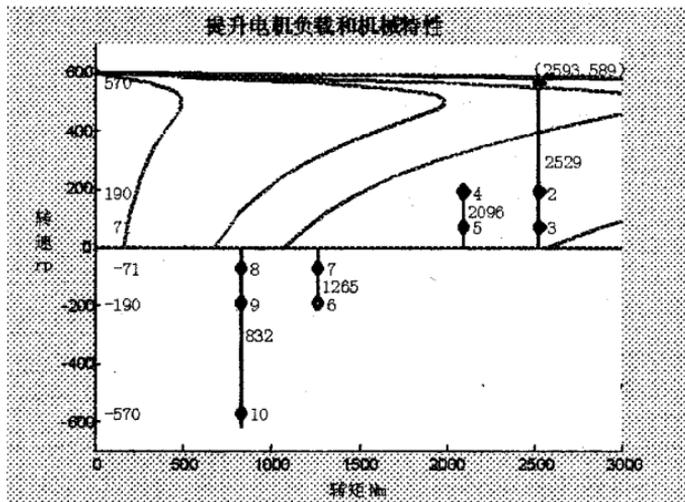


图 3.8 电动机交流调压特性

Fig.3.8 AC voltage adjustment of motor

3.1.3 二次电阻

绕线型异步电动机转子三相电路可以外接三相电阻器，来改善起动特性，也可得到一定的调速特性。为了计算上的方便，现将有关不变的数据代入式(2.28)，可得式(3.1)。

$$M = \frac{3 \times 5 \times 220^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi \times 50 [(0.01189 + \frac{R_2'}{s})^2 + 0.09558^2]} \quad (3.1)$$

3.1.3.1 常带电阻计算

图 3.8 中的“1”点不在电机的固有机械特性曲线上，为了确保在高速提升时晶闸管的导通角为 $\alpha=0^\circ$ ，必须软化电动机的固有机械特性，即常带一级电阻；同时，由于四台电机在吊车上是同步运行的，为了确保电动机的机械特性的一致性，使用常带的二次电阻来确保电动机的同步。此电阻的计算如下：

$$n=570\text{r/min}; s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 570}{600} = 0.05; M=2529\text{Nm};$$

将以上的数据代入式 (3.1)，即可得到： $R_2'=0.0441\Omega$

根据 2.2.1 节有 $R_2 = \frac{R_2'}{0.3}$ 成立，故 $R_2=0.147\Omega$ ，而计算出的 R_2 包含了电动机的二次电阻，按 3.2.1 的计算电动机得二次电阻 $r_2=0.05127\Omega$ 则计算出的常带电阻为： $R_2-r_2=0.09573\Omega$ 。

由于提升电动机的转子为 Δ 接，为了控制上的方便，电动机的外带二次电阻为 Y 接，故所带的电阻为： $\frac{R_2-r_2}{\sqrt{3}}=0.05527\Omega$ 。

3.1.3.2 全电阻计算

二次全电阻的计算必须考虑以下二点：

- 1、 为了保证电动机的特性的硬度，全电阻尽量小；
- 2、 为了保证一次电压尽可能的高，全电阻尽量大。

初步考虑，在图 3.8 中‘1’和‘2’点即重载高低速之间选择一点作为计算全电阻的基准点。

$$M=2529\text{Nm}; n=360\text{r/min};$$

$$\text{计算过程如下: } n=360\text{r/min}; s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 360}{600} = 0.4;$$

将以上的数据代入式 (3.1)，即可得到： $R_2'=0.3528\Omega$

根据 2.2.1 节有 $R_2 = \frac{R_2'}{0.3}$ 成立，故 $R_2=1.176\Omega$

而计算出的 R_2 包含了电动机的二次电阻，按 3.2.1 的计算电动机得二次电阻 $r_2=0.05127\Omega$ ，则计算出的电阻为： $R_2-r_2=1.1247\Omega$ 。

由于提升电动机的转子为 Δ 接，为了控制上的方便，电动机的外带二次电阻为 Y 接，故实际上所带的电阻为：
$$\frac{R2-r2}{\sqrt{3}}=0.6494。$$

3.1.3.3 分级起动电阻计算

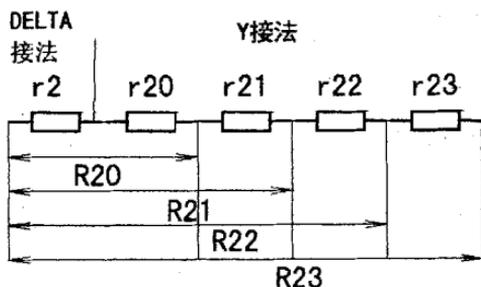


图 3.9 电动机二次电阻

Fig. 3.9 Second resistance of motor

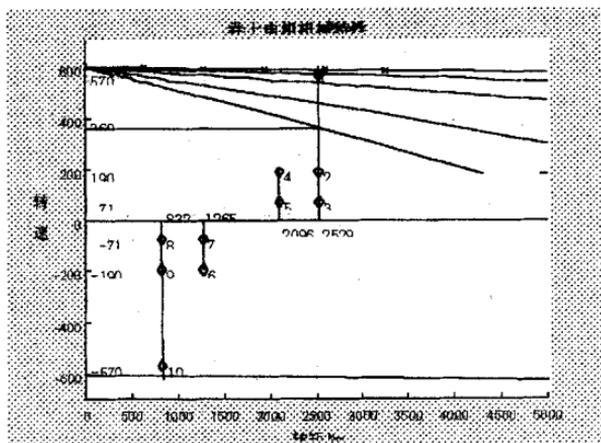


图 3.10 电动机二次调电阻特性

Fig. 3.10 Second resistance adjustment of motor

将 $r23$ 、 $r22$ 、 $r21$ 、 $r20$ 占总电阻的 65%、40%、17% 和 7% 的原则确定二级电阻的切除阻值。

将 $r_{20}=0.04668 \Omega$ 、 $r_{21}=0.10176 \Omega$ 、 $r_{22}=0.22496 \Omega$ 、 $r_{23}=0.263 \Omega$ (合计 0.6364Ω) 各级电阻代入式 (2.28)，并且假定一次电压为 220V，可得到图 3.10。

3.2 主回路确定

3.2.1 控制方式确定

根据上一节的论述，本节说明晶闸管控制系统的具体实现方法。选用的晶闸管的主回路接线如图 3.11 所示。

由图 3.11 配制可见，电动机的正反转是通过二套晶闸管来实现的。其中 F 组的六个晶闸管控制电动机的正转；R 组的六个晶闸管控制电动机的反转。F 组和 R 组的晶闸管控制方式见图 3.12。

在图 3.12 中，PA 代表脉冲放大器，对脉冲信号进行放大。PS 代表移相器。移相器的作用是控制晶闸管的导通角，即控制电动机的一次电压的大小，而不控制电动机的正、反转。关于移相器 PS 和脉冲放大器 PA 的作用、功能和实现方法在 3.3 节中有专文详细研究和论述。

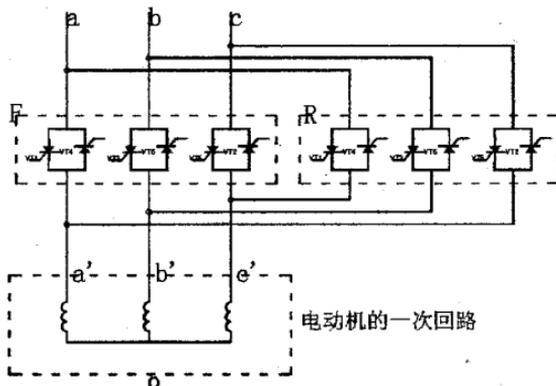


图 3.11 晶闸管主回路

Fig.3.11 Main loop of silicon

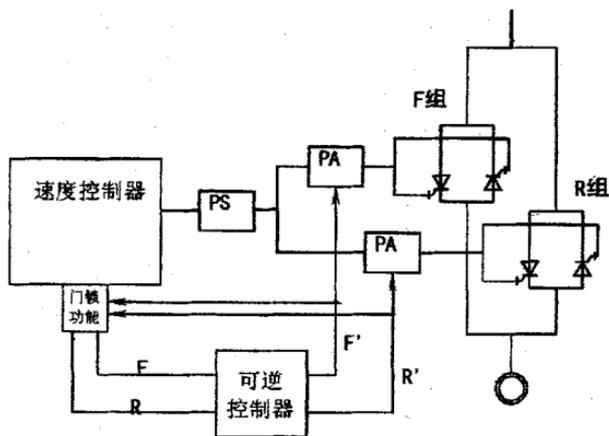


图 3.12 可逆控制原理简图

Fig. 3.12 Diagram of reverse controlled

正反转的控制则由可逆控制器发出正、反转信号来实现。关于可逆控制器的实现方法和所要求达到的功能在第五章中详细论述。

1、当正转指令 F' 有效、反转指令 R' 无效时，则正向侧的脉冲放大器工作，使触发脉冲控制 F 组六个晶闸管，从而使电动机正转；反向侧的脉冲放大器不工作，使触发脉冲无法，R 组的六个晶闸管。

2、反之则电动机反转。

3.2.2 四台电动机控制方式确定

在前面的分析中，本文中的干熄焦电车使用四台 160kW 的提升电动机，结合上一节的晶闸管的控制方法，四台电动机的控制方法可使用图 3.13 的原理。

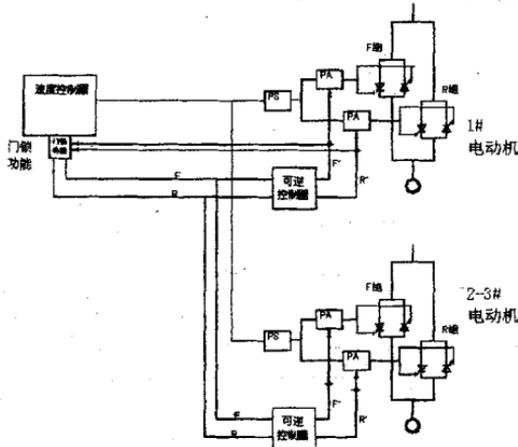


图 3.13 电动机的同步控制

Fig3.13 synchronic controlled of motor

3.3 触发电路的选型

3.3.1 移相器

为了保证晶闸管的可靠出发，触发脉冲必须具有如下特点：

- 1、 触发脉冲的宽度为：25 μ s。
- 2、 脉冲上升时间小于 200ns，典型值为：100ns。
- 3、 触发脉冲到门极的最小电阻为 4 Ω 。
- 4、 触发电流脉冲前沿幅值为：2A。
- 5、 10 μ s 以后的触发电流脉冲幅值为 0.1A。
- 6、 输出绝缘电平为：2000V。

产生的理想晶闸管触发脉冲电流系列波形见图 3.14。

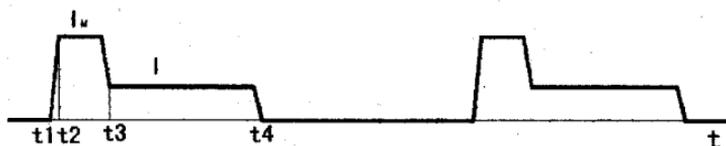


图 3.14 触发脉冲波形

Fig.3.14 pulse wave of touch off

移相器使用全控制方式进行工作，有以下功能。

3.3.1.1 门脉冲发生功能

移相器使用垂直控制方式。见图 3.15 和图 3.16。

从直流电源来的的 2 个同步信号 A 和 B (A 和 B 的相位相差 30°) 在 1TR 上进行切换，从而产生锯齿波 C。C 和移相器输入的偏差信号在比较器 COM1 中进行比较后，得到信号 D。信号 D 和 20kHz 信号进行与运算，然后通过隔离变压器进行隔离后得到信号 E。信号 E 即为晶闸管的门脉冲信号。

C 处锯齿波下降沿是：由于在图 3.15 中 R1 和 C1 组成的充电电路所产生的。故下降沿的形状由充电电路决定。

公式如下：

$$u_c = -12 \times e^{\frac{t}{T}}$$

其中： $T=RC$ 。在本方案中， $T \gg 20\text{ms}$ 。

脉冲(信号 E)的波形：

20kHz 的振荡电路所产生的单一触发脉冲的波形如下：

$$T = \frac{1}{20 \times 1000} = 50 \mu\text{s}$$

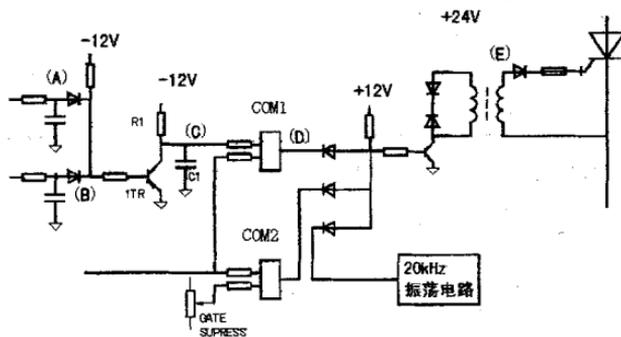


图 3.15 脉冲信号电路

Fig.3.15 pulse single circuit

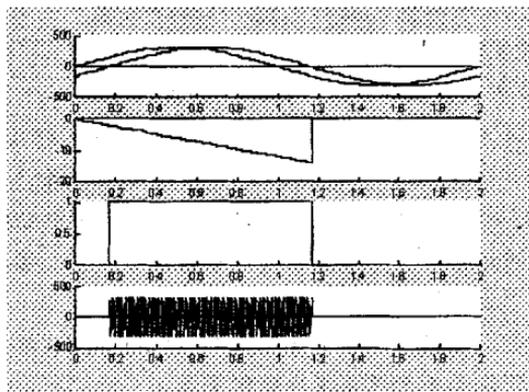


图 3.16 脉冲信号波形

Fig.3.16 pulse single wave

对触发电路的要求：

1、触发脉冲的宽度应保证晶闸管的可靠导通，在本方案种采用了脉冲列的触发，每一个触发脉冲的波形在设计的时候应该向图 3.14 的理想波形靠近， t_4-t_1 为 $25\mu s$ 。脉冲系列的频率为 $20kHz$ ，这样，可保证每两个触发脉冲的的间隔为：

$$\frac{360^{\circ}}{\frac{20 \times 1000}{50}} = \frac{360^{\circ}}{400} = 0.9^{\circ}$$

2、触发脉冲应有足够的强度，脉冲电流的的幅度应增大为器件最大触发电流的 3-5 倍。见图 3.14 中的 $I_M=(3\sim 5)I_{GT}$ 。脉冲前沿的陡读也需增加，一般需达 $1\sim 2A/\mu s$ 。

3、所提供的触发脉冲应不超过晶闸管门极的电压、电流和额定功率，且在门极伏安特性的可靠触发区域内。

4.□.□.□ 应有良好的干扰性能、温度稳定性及预祝电路的电气隔离。

图 3.15 中所产生的触发脉冲的导通角 α 与移相器输入电压(v)的关系见图 3.17。

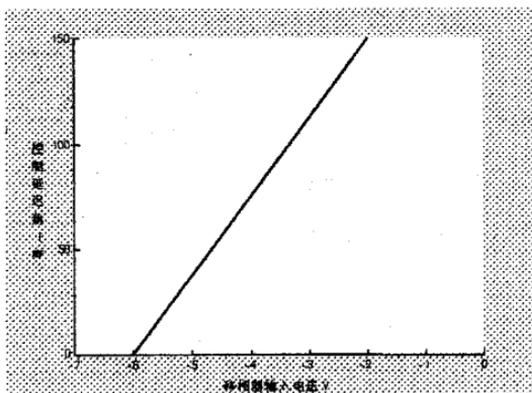


图 3.17 导通角与移相器输入电压的关系

Fig.3.17 Relation of degree and input voltage in phase device

3.3.1.2 门脉冲消去功能

移相器输入电压在某个电平以下（绝对值）时，COM2 动作，门脉冲不产生。COM2 的动作电平通过图 3.14 中的可变电阻 GATE SUPPRESS 进行设定。设定的标准值为在移相器的输入电压为-2.0V。

3.3.2 脉冲放大器

脉冲放大器根据晶闸管的特性和数量进行设计，具有脉冲放大、绝缘功能和门锁功能。在本论文中，考虑到提升电动机的晶闸管的选型，选用如下的脉冲放大电路，见图 3.18。图 3.18 是以一个晶闸管为例进行说明。图 3.18 具有如下功能。

4.□.□.□ 脉冲放大功能

4.□.□.□ 门锁功能

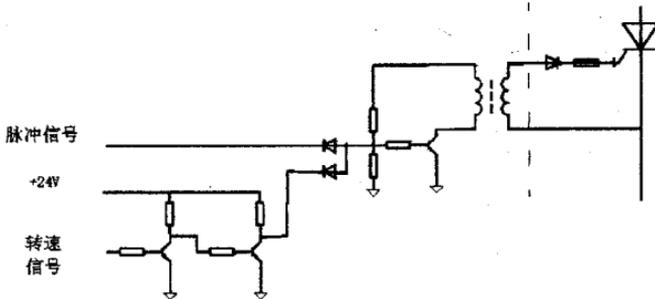


图 3.18 脉冲放大器原理图

Fig.3.18 Diagram of pulse amp.

第四章 可逆调速控制系统的确定

4.1 控制对象 MATLAB 模块组成

控制系统的选型必须结合实际情况来进行考虑，在前述几章对提升电动机、晶闸管及其触发电路和负载的具体情况进行了分析，本节将依据前述的研究结论，建立电动机、晶闸管的触发电路和负载的 MATLAB 模型，通过使用 MATLAB 仿真功能进行逐步的分析。以期建立交流可逆调速控制系统的模型。

4.1.1 电动机的 MATLAB 模块组成

4.1.1.1 电动机总体模块构成

根据 2.2 节的研究结果，可以建立“电动机”的 MATLAB 仿真模型如图 4.1。

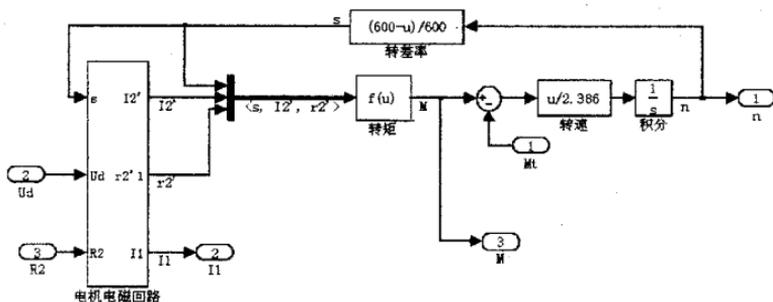


图 4.1 提升电动机的仿真模型

Fig. 4.1 emulation model of lifting motor

图中符号的意义如下:

1、输入

- (1) U_d :电动机一次输入电压
- (2) R_2 :电动机二次电阻
- (3) M_l :负载转矩

2、输出

- (1) I_1 :电动机一次电流
- (2) M :电动机输出转矩
- (3) n :电动机转速

3、子系统

电机电磁回路:详细说明见 4.1.1.2。

4、模块

(1) 转差率:将电动机的转速转换成转差率 s , 其中的公式表示下列公式的意义。

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{600 - n}{600}$$

(2) 转矩:计算电动机的输出转矩, 其中的公式代表式 (2.26) 意义。

(3) 转速:根据负载转矩和电动机输出转矩计算电动机转速变化率。其中的公式表示式 (2.23) 的意义。

(4) 积分:将电动机的转速变化率转化为实际的转速。

$$n = \int \frac{dn}{dt} dt$$

5、符号

- (1) s :电动机转差率
- (2) n :电动机转速
- (3) I_2' :二次电流折算到定子侧
- (4) r_2' :二次电阻折算到定子侧

4.1.1.2 电机电磁回路

根据 2.2 节的内容，可以建立电动机本身的等值电路的仿真见图 4.2。对于和上一节出现的符号不再做出特殊的说明，未出现的符号进行详细的说明。

- 1、输入： $s; R_2$
- 2、输出： $I_2'; I_1$
- 3、子系统

电机阻抗:计算电动机阻抗，根据 2.2.2 节中图 2.5。

4、模块

- (1) Fcn1:折算到定子侧的电动机二次电阻。
- (2) r_2' 、 x_2' :折算到定子侧的电动机本身二次阻抗
- (3) r_1 、 x_1 :电动机本身的一次阻抗
- (4) r_m 、 x_m :电动机本身励磁阻抗
- (5) 定子电流：计算出电动机实际的定子电流
- (6) 转子电流：计算出电动机实际折算到定子侧的转子电流

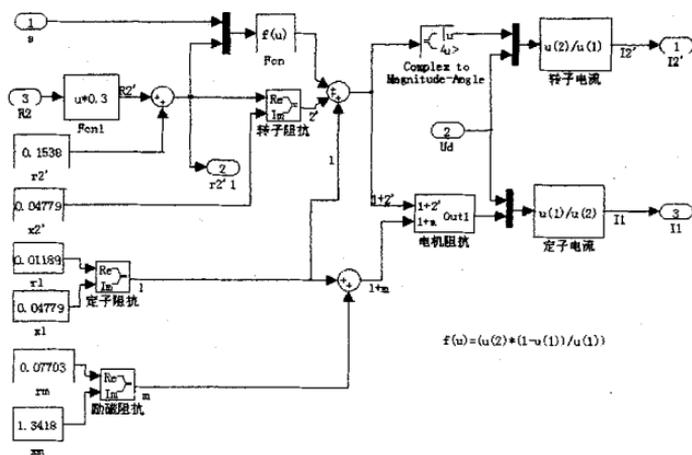


图 4.2 提升电动机等值电路图

Fig.4.2 circuit of lifting motor

4.1.1.3 电动机直接起动仿真

图 4.3 代表电动机全压直接起动仿真原理图。

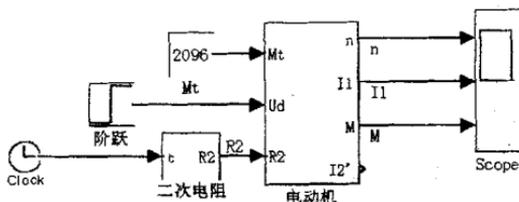


图 4.3 直接起动仿真原理

Fig.4.3 emulation of direct start up

模块“阶跃”代表三相交流电压(220V)直接加入电动机进行直接起动。

模块“二次电阻”代表电动机所加的二次电阻，它接受时间的输入可以模拟二次切电阻。

图 4.4 表示重载直接起动，二次电阻全部切除的仿真波形。

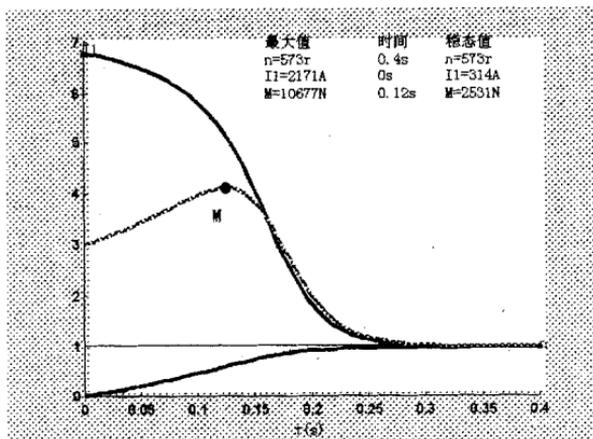


图 4.4 直接起动仿真波形

Fig. 4.4 emulation wave of direct start up

为了在同一个图形中清楚的表达动态过程和曲线与电动机额定值的关系，以后在进行仿真波形使用本节中的方法，即：

- 1、横坐标代表时间 t ，其单位是：秒；
- 2、纵坐标代表相对值，即与电动机的额定值的比值关系；
- 3、在曲线的最大值发生的进行标记曲线所代表的物理量，并做出点“.”标记，并在图形的上部列出最大值的具体数据和其所发生的时间；
- 4、在图形的上部同时列出稳态值的具体数据；

从图 4.4 可以看出，在负载为 2529Nm，启动电阻全部切除（即 $R2=0.04668\Omega$ ）的情况下，电动机的启动电流为：2171A（起动电流倍数为 $2171/320=678\%$ ）；起动时间约为 0.25 秒；稳态转速为：573r/min。通过改变负载的大小，可以得到起动电流基本不变。故直接使用此种起动方式是几乎无法使用的，起动电流太大。

图 4.6 表示重载直接起动，二次电阻依次切除的仿真波形。二次电阻切除的仿真原理见图 4.5。

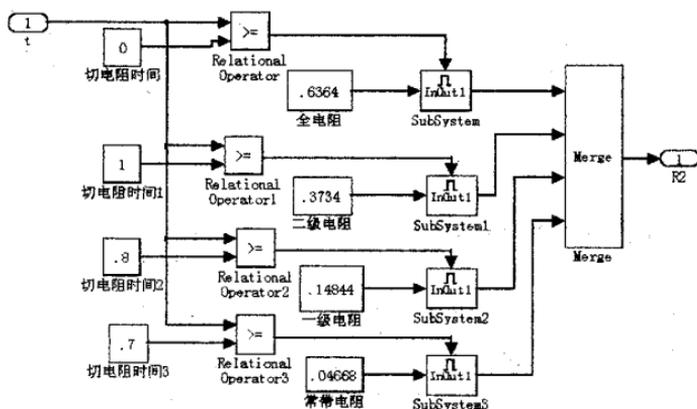


图 4.5 分级启动

Fig.4.5 start up

从图 4.6 可以看出，在负载为 2529Nm，依次将二次电阻切除的情况下；电动机的启动电流为：661A（启动电流倍数为 $661/320=207\%$ ）；启动时间约为 1.7 秒；稳态转速为：573r/min。通过改变负载的大小，可以得到启动电流基本不变。在此种启动方式下启动电流已经大大地降低，电动机是允许的，但它达到多级速度的设置和负载变动的情况下保证速度的稳定精度都是极为困难的。

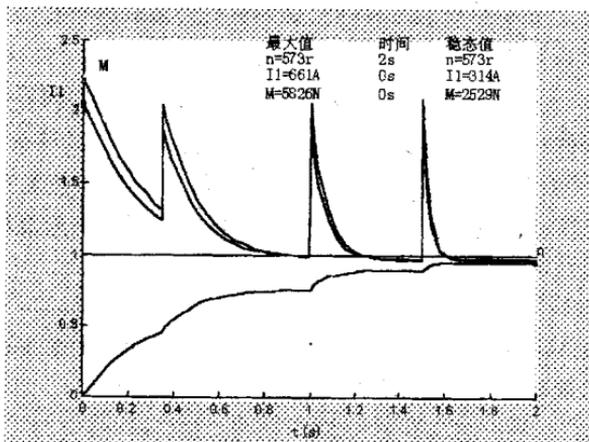


图 4.6 分级启动波形

Fig.4.6 wave of start up

4.1.2 晶闸管 MATLAB 模块组成

晶闸管的控制离不开触发电路，因此在系统分析时往往将它们看成一个整体，故本文中图 3.12 的 PS、PA 和晶闸管作为一个整体考虑。本环节的输入量为速度控制器的输出量 V_5 、输出量是理想空载电压 U_{d0} 。MATLAB 的仿真模块见图 4.7。

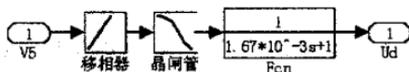


图 4.7 晶闸管仿真原理

Fig.4.7 emulation of silicon

图中的模块的意义如下：

模块“移相器”代表晶闸管的触发和放大回路，可以进行线性化处理，处理的结果见图。

模块“晶闸管”代表晶闸管主回路，表示当晶闸管的主回路输入了触发角 α （电角度，度）时，本模块输出的电动机回路的一次电压。为了说明本模块的输入输出的函数关系，使用以前的分析计算结果，编制 M 程序 $sxty1(\alpha)$ 来体现。 $sxty1(\alpha)$ 参考附录。

由于本环节是一个纯滞后环节，其滞后作用是有晶闸管的失控时间引起的。其滞后时间 T_s 的最大值为零，最大值为 $3.33ms$ 。实际分析计算时，通常取

$$T_s = \frac{3.33}{2} = 1.67ms$$

因为晶闸管触发和交流调压装置为纯滞后环节，所以其传递函数为：

$$W(s) = e^{-T_s s} \tag{4.1}$$

为了计算简单起见，也可将式(4.1)看成一个惯性环节，即

$$W(s) = \frac{1}{T_s s + 1} \tag{4.2}$$

模块“FCN”代表晶闸管的滞后作用，本模块使用 MATLAB 的传递函数模块，其使用的表达式即为式（4.2）。

4.1.3 检测环节 MATLAB 模块组成

4.1.3.1 转速检测回路的传递函数

电动机转速检测方法见 5.3.1。忽略本环节的动态响应并作线性化处理，其传递函数可简化为：

$$\alpha = \frac{V_2}{\omega} = \frac{6}{600} = 0.01 \text{ V}\cdot\text{min/r} \quad (4.3)$$

4.1.3.2 主电流检测回路的传递函数

电动机主电流的检测方法见 5.3.2。忽略本环节的动态响应并作线性化处理，其传递函数可简化为：

$$\beta = \frac{V_A}{I_d} = \frac{3}{320} = 0.009 \text{ V/A} \quad (4.4)$$

4.2 系统总的 MATLAB 模块组成

4.2.1 最佳过渡过程的概念

干熄焦吊车根据生产工艺的要求，经常启动、制动、反转和稳态运行，具有附图 3 所示的速度图。其中每个工作周期为 8 分钟。

启动和加速过程的矛盾在于：一方面，为了快速启动，需要有较大的启动转矩，也就是要求有较大的启动电流；另一方面，太大的启动电流又不为电动机和晶闸管交流调压装置所允许。

一个理想的解决办法是：在整个启动和加速过程中，把电流限制 I_d 在最大允许值 $I_{d\max}$ 上，使之既不超越，亦不小于，即实行“恒流调节”。不超越是为了不过流，不减小是为了保持较大的启动转矩。

同样，制动和减速过程也有上述特点，但电动机的电流应维持在最

大值 I_{dmax} 上, 但交流调压电路的输出应维持在反向状态上。当电动机的转速将为零时, 电动机的电流立即从 I_{dmax} 将为零, 使制动过程结束并将制动器进行制动。

调速系统若想获得硬的静态特性必须有速度负反馈, 为了限制电流的冲击和获得下坠特性, 有必要引入电流截至负反馈。

4.2.2 可逆控制系统的整体组成

系统的整体组成见图 4.10, 其中的子系统“速度控制器”、“晶闸管主回路”、“电动机”已经在以上几节中进行了详细的说明, 在本节仅仅说明图 4.10 中未提到的模块和子系统。

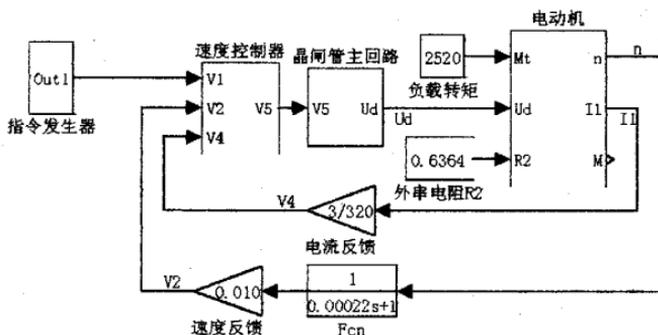


图 4.8 控制系统仿真

Fig. 4.8 emulation of control system

子系统“指令发生器”主要是为了产生速度指令信号。它产生 $1.88V/s$ 的斜坡指令信号。这样, 就可以保证焦罐的提升加速度不会超过 $0.166m/s^2$ 。

模块“电流反馈”将电动机的一次电流反馈到电流闭环, 同时与电

流指令信号的大小相对应，其中的放大倍数见式(4.4)。

模块“速度反馈”将电动机的转速反馈到转速闭环，同时与转速令信号的大小相对应，其中的放大倍数见式(4.3)。

4.2.3 速度控制器 MATLAB 模块组成

速度控制器的结构原理图如图 4.9。

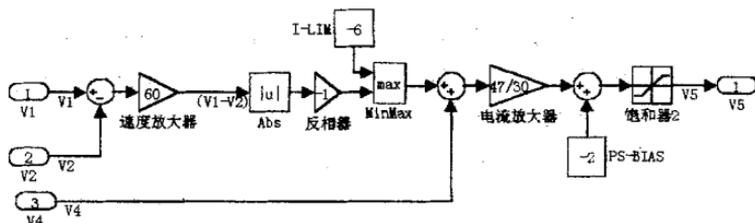


图 4.9 控制系统仿真原理

Fig.4.9 emulation of controlled system

图中各模块的意义如下：

模块“速度放大器”代表速度放大器，使用 MATLAB 仿真库的 gain 模块，其放大倍数初步定为 30 倍。其输入为速度指令和速度反馈之差。

模块“Abs”代表绝对值功能。

模块“MinMax”代表求取最大最小值功能，本文中使用了最大值功能，即反相器和 I-LIM 的输出值大者进行输出。其输出为电流闭环的电流指令。在本文中由于是负数相比，即代表反相器和 I-LIM 输出的绝对值小者输出到电流闭环的电流指令，这样就限制了电动机一次电流的最大值。

模块“I-LIM”代表设定的电动机最大输出电流的设定值。其与电动机的实际电流值的关系为：320A 代表-3V。本文中设定为-6V，即限制电动机的最大电流为 200%，即 640A。

模块“电流放大器”代表电流放大器，使用 MATLAB 仿真库的 gain 模块，其放大倍数初步定为 47/30 倍。其输入为电流指令和电流反馈之差。

模块“PS-BIAS”代表设定晶闸管的触发脉冲 α 的最大值，根据晶闸管子系统的特点，通过本模块来保证触发角在 150° 以下。

模块“饱和器 2”代表设定晶闸管的触发脉冲 α 的最小大值，根据晶闸管子系统的特点，通过本模块来保证触发角在 0° 以上。

4.3 动态分析

为了分析上的简单，下面详细分析重载提升（即负载转矩为 2529Nm）和轻载下降（即负载转矩为 833Nm）二种使用较多的状态。所得到的有关结论可以向其他的状态进行推广。

4.3.1 提升

一、重载起动到低速(71r/min、带全部二次电阻)

使用图 4.8 的模块进行仿真，其中“速度指令发生器”的输出限幅为 +0.8V；负载为 2520Nm；二次电阻为 0.6364Ω 。起动过程的波形见图 4.10。

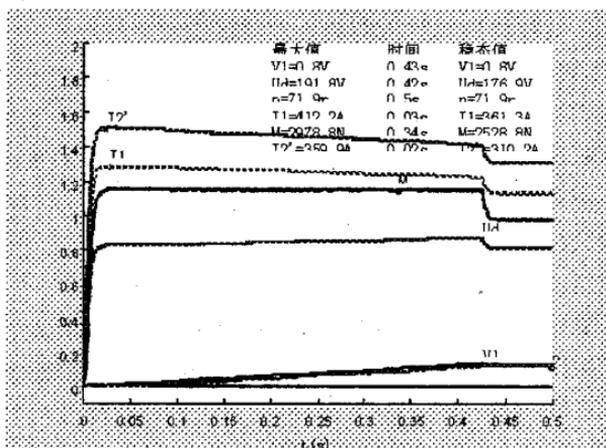


图 4.10 控制系统仿真波形 1

Fig.4.10 emulation wave 1 of control system

从图中可以得出以下结论:

1、根据电动机的转速曲线, 可得从 0r/min 加速到 72r/min 的时间为 0.43s 。但在刚开始加速的时候, 如果没有电磁制动器的作用, 焦罐将有一个短暂的下降过程。焦罐下降过程产生的原因: 由于晶闸管和控制系统的滞后效应所造成的, 短时间内电动机输出转矩比负载转矩小, 从而使焦罐有一个约 30ms 下降过程。

2、为了避免这一过程的发生, 可以将电磁制动器的打开时间受控制系统的控制, 即在电动机的一次电流达到一定的值, 即保证电动机的输出转矩和负载转矩相等时, 打开电磁制动器。同时, 也能保护钢丝绳不受或少受短时冲击负载的冲击。

3、低速稳态(电动机转速 72r/min)时有以下的运行参数:

电动机一次电压为: 177V ;

电动机一次电流为: 461A ;

电动机输出转矩为: 2529Nm ;

4、加速过程中, 电动机一次电流和输出转矩分别为: 412A 和 2979Nm 。

5、在加速过程中, 电动机的输出转矩为 2979Nm , 且基本上维持不变。这样, 就可以确保焦罐的提升加速度小于并维持在 0.166m/s^2 的水平进行匀加速提升。

6、从以上加速和稳态运行中可以看出, 电动机的一次电流比额定电流 320A 大, 分别是额定电流的 129% 和 113% 。这主要是由于电动机的一次电压比较低造成的。因为, 在电动机输出转矩不变的情况下, 电压和电流的乘积于输出转矩成正比。

二、重载起动到低速(190r/min 、带全部二次电阻)

使用图 4.8 的模块进行仿真, 其中“速度指令发生器”的输出限幅为 $+2\text{V}$; 负载为 2520Nm ; 二次电阻为 $0.6364\ \Omega$ 。起动过程的波形见图 4.11。

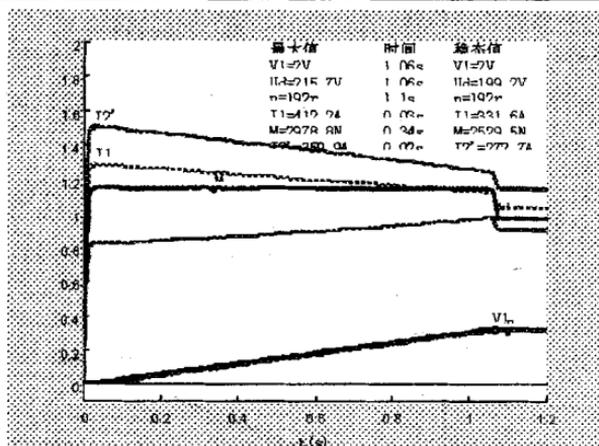


图 4.11 控制系统仿真波形 2

Fig.4.11 emulation wave 2 of control system

从图中可以得出以下结论：

- 1、根据电动机的转速曲线，可得从 0r/min 加速到 199r/min 的时间为 1.06s。
- 2、在中速稳态(电动机转速 199r/min)时有以下的运行参数：
 - 电动机一次电压为：199V；
 - 电动机一次电流为：332A；
 - 电动机输出转矩为：2529Nm；
- 3、加速过程中，电动机一次电流和输出转矩分别为：412A 和 2979Nm。
- 4、在加速过程中，电动机的输出转矩为 2979Nm,且基本上维持不变。这样，就可以确保焦罐的提升加速度小于并维持在 0.166m/s^2 的水平进行匀加速提升。
- 5、电动机的起动电流比额定电流 320A 大，分别是额定电流的 129% 和 104%。

三、重载起动到高速

使用图 4.8 的模块进行仿真，其中“速度指令发生器”的输出限幅为+6V；负载为 2520Nm；二次电阻逐步切除。起动过程的波形见图 4.12。

图 4.12 分别有图 4.13 到图 4.15 所得来。

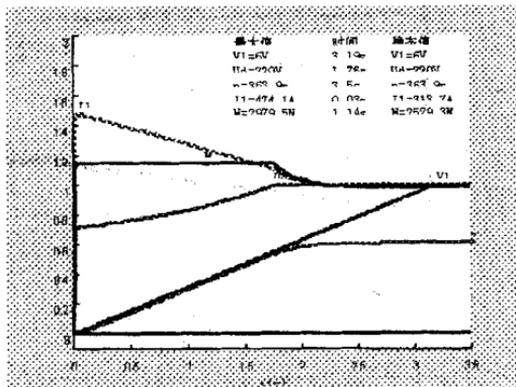


图 4.13 控制系统仿真波形 4

Fig.4.13 emulation wave 4 of control system

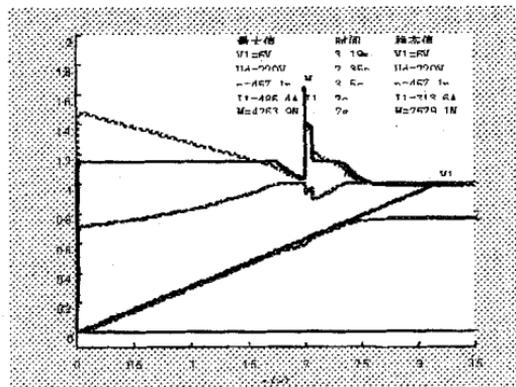


图 4.14 控制系统仿真波形 5

Fig. 4.14 emulation wave 5 of control system

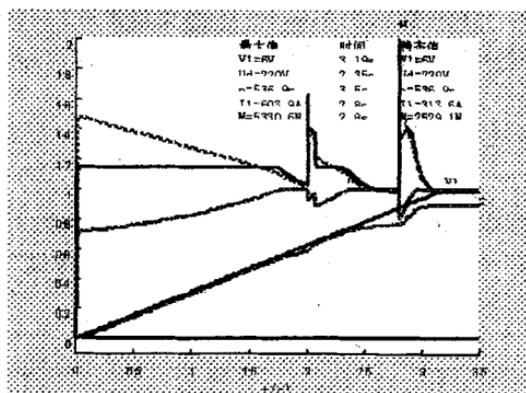


图 4.15 控制系统仿真波形 6

Fig. 4.15 emulation wave 6 of control system

从图中可以得出以下结论：

1、图 4.13 表示全部二次电阻不切除所得到的波形，从 0r/min 加速到 360r/min 的时间为 1.8s。虽然 1.8s 以后，速度指令继续增加，但电机的一次电压已经达到最大，电动机由于串接全部的二次电阻，则电机的转速维持 360r/min 不变。

2、图 4.14 表示在 2s 时将二次电阻切除第一级，其余的二次电阻不切除，可以加速到 457r/min，稳定时间为 2.4s。

3、图 4.15 表示在 2s 时将二次电阻切除第一级，2.8s 切除第二级，其余的二次电阻不切除，可以加速到 537r/min，稳定时间为 3s。

4、图 4.12 表示在 2s 时将二次电阻切除第一级，2.8s 切除第二级，3.5s 切除最后一级电阻，可以加速到 573r/min，稳定时间为 3.6s。

5、在图 4.12 到 4.15 中，所有得稳态时有以下的运行参数：

电动机一次电压为：220V；

电动机一次电流为：313A;

电动机输出转矩：2529Nm;

6、在加速的过程中，通过三次切除电阻，将电机的转速提高到570r/min,电机一次电流从起动时的150%逐步下降，但随二次电阻的切除，电机的状态有所波动，当很快即达到新的稳定状态。

4.3.2 下降

一、轻载起动到低速（-71r/min、带全部二次电阻）

“速度指令发生器”的输出限幅为-0.7V。其起动过程的波形见图4.16。从图中可以得出以下结论：

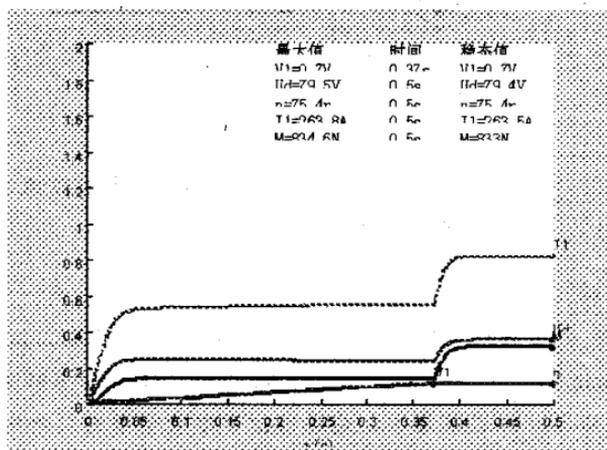


图 4.16 控制系统仿真波形 7

Fig.4.16 emulation wave 7 of control system

- 1、 0r/min 加速到-75r/min 的时间为 0.37s。
- 2、 低速稳态(电动机转速-75r/min)时有以下的运行参数：
电动机一次电压为：79V；
电动机一次电流为：264A；

电动机输出转矩：833Nm；

- 3、 在加速过程中，电动机一次电压、一次电流和输出转矩分别为：54v、178A 和 384Nm。
- 4、 在加速过程中，电动机输出转矩：384Nm，且基本上维持不变。这样，就可以确保焦罐下降加速度小于 0.166m/s^2 。

二、轻载起动到中速（190r/min、带全部二次电阻）

“速度指令发生器”的输出限幅为-1.9。其启动过程的波形见图 4.17。从图中可以得出以下结论：

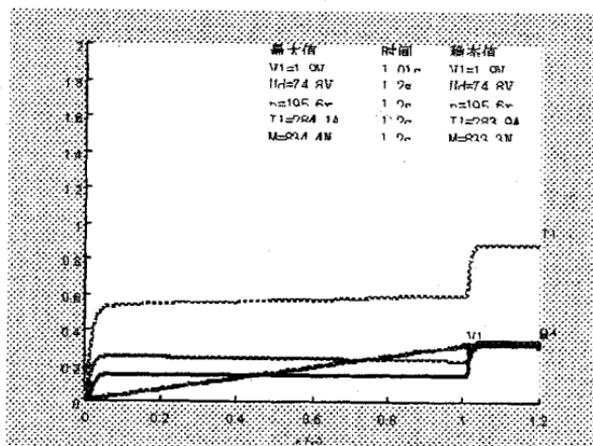


图 4.17 控制系统仿真波形 8

Fig.4.17 emulation wave 8 of control system

- 1、 从 0r/min 加速到 195r/min 的时间为 1s。
- 2、 在中速稳态(电动机转速 195r/min)时有以下的运行参数：
电动机一次电压为：75V；
电动机一次电流为：284A；
电动机输出转句：833Nm；
- 3、 速过程中，电动机一次电压、一次电流和输出转矩分别为：

52V、188A 和 384Nm。

- 4、在加速过程中，电动机的输出转矩为 384Nm，且基本上维持不变。这样，就可以确保焦罐下降加速度小于 0.166m/s^2 。

三、轻载起动到高速

“速度指令发生器”的输出限幅为 -6V。其起动过程的波形见图 4.18，从图中可以得出以下结论。

- 1、本起动方式与以前的其他起动方式不同，为了稳定运行，必须将电动机反转，即相当于电动机运行于第四象限（发电运行）。

- 2、为了确保电动机的运行点偏离正常运行点小，必须将二次电阻尽快切除；同使电动机的一次电压尽快达到额定值。

- 3、从 0r/min 加速到 608r/min 的时间为 0.55s；

- 4、电机的稳定运行点的数据如下：

一次电压：220v；

一次电流：175A；

转 速：608r/min；

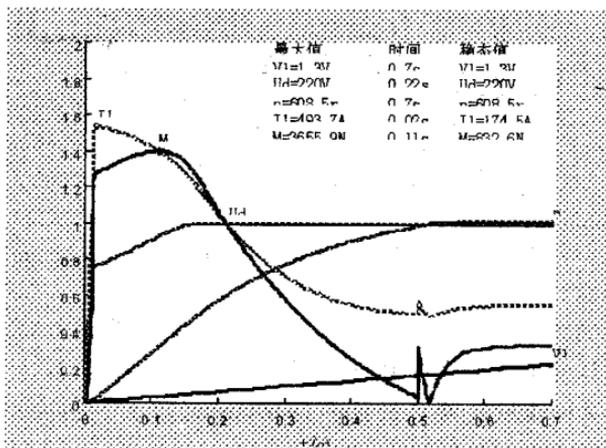


图 4.18 控制系统仿真波形 9

Fig. 4.18 emulation wave 9 of control system

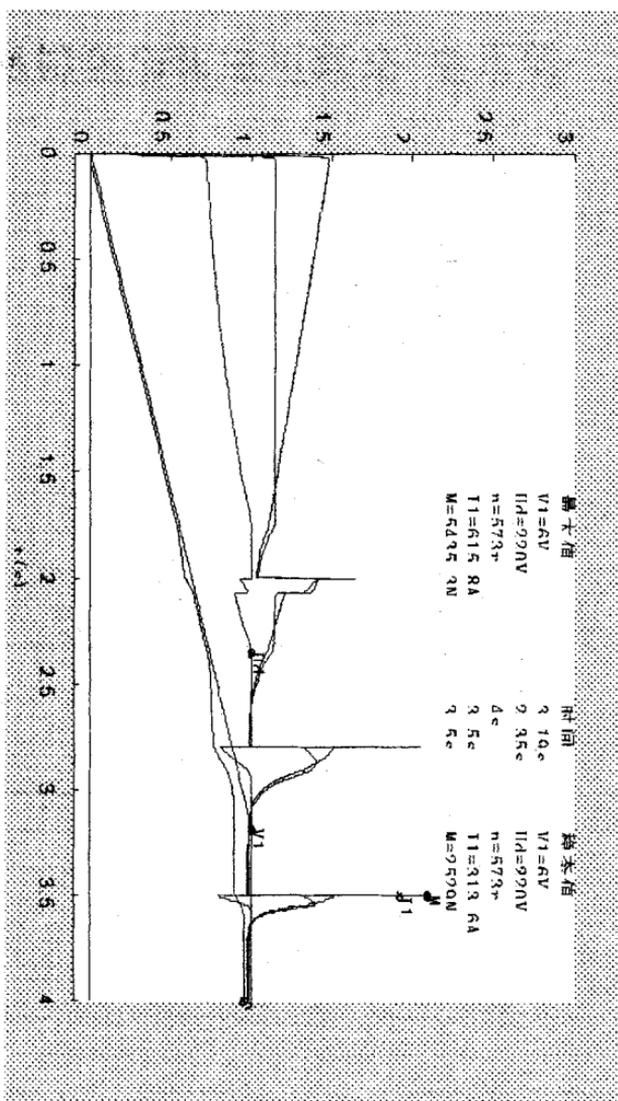


图 4.12 控制系统仿真波形 3

Fig.4.12 emulation wave 3 of control syste

第五章 交流可逆调速控制系统确定

5.1 系统构成

系统的构成见图 5.1。主要有以下几部分组成。

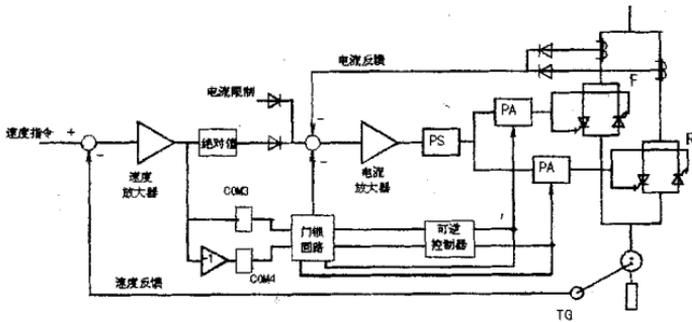


图 5.1 控制系统简图

Fig.5.1 Diagram of control system

1、主回路：

二组晶闸管采用反并联连接，按 4.1.2 所述的三相交流调压的方法为交流电动机供电。可逆控制方法相当于直流调速系统中的逻辑无环流可逆调速系统。对本部分的器件选型等已经在第四章作了较为详细的说明。

2、控制回路

一般可逆系统的控制回路都采用典型的转速、电流双闭环。图 5.1 中设置了转速调节器 ST、电流调节器 LT、脉冲发生器 PS 和二套脉冲放大器 PA。

为了切实保证在任何时刻都是只给两组晶闸管的一组发出触发脉冲，严格防止两组晶闸管的触发脉冲同时出现，以便从根本上切断系统短路通道，控制回路中设置了逻辑切换装置，即可逆控制器。靠可逆控制器根据系统的状态发出逻辑指令，或者封锁正组触发脉冲、开放反组触发脉冲，或者封锁反组触发脉冲、开放正组触发脉冲，二者必居其一。以保证主回路没有产生短路的可能性。

5.1.1 逻辑切换装置的组成和工作原理

逻辑切换装置的任务是鉴别系统的运行状态，严格控制两组晶闸管交流调压装置触发脉冲的开放和封锁，从而正确地对两组晶闸管进行切换。逻辑切换装置的输出是数值信号 F' 和 R' 。当 $F'=1$ 、 $R'=0$ 时开放正组脉冲，封锁反组脉冲；当 $F'=0$ 、 $R'=1$ 时开放反组脉冲，封锁正组脉冲。 F' 和 R' 的状态由逻辑切换指令控制。

5.1.1.1 电平检测器（比较器）

转速差是连续变化的模拟量。但是逻辑切换装置需要鉴别的确是逻辑量，即开通哪组交流调压装置由转速差的正、负所决定，和转速差的数值大小无关。因此，逻辑切换装置中应当有鉴别模拟量的正、负以及大小的电路。此种电路成为电平检测器，也称比较器。它是在比较器的基本电路，其他不同类型的比较器就是由它转换而来。

电平检测器实际上就是一个模数转换器，由它将模拟量转换为数字量。常用的电平检测器由具有正反馈的运算放大器构成。其结构图见图

5.2。

以下的分析中， K_0 为运算放大器的开环放大倍数。

有图 5.2 可知，正反馈系数为：

$$K_1 = \frac{R_0}{R_0 + R_1} \quad (5.1)$$

其闭环放大倍数为：

$$K_b = \frac{V_o}{V_i} = \frac{K_o}{1 - K_o K_1} \quad (5.2)$$

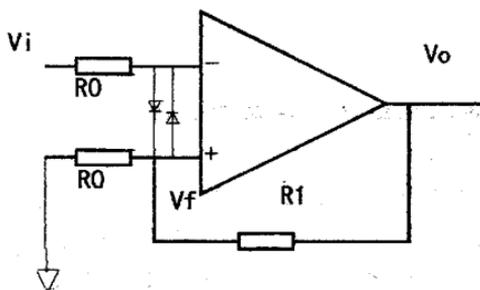


图 5.2 带正反馈的运算放大器

Fig.5.2 Amp. With fore feedback

为了有一定的抗干扰能力，在电平检测器中一般取 $K_o K_1 > 1$ 。当 $K_o K_1 > 1$ 时，带正反馈的运算放大器将具有图 5.3 的输入输出特性。它是一种具有回环特性的输入输出曲线。

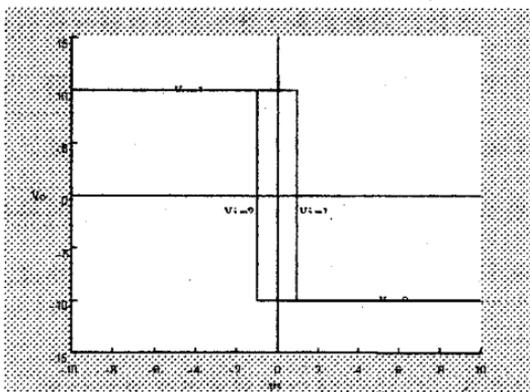


图 5.3 带正反馈运算放大器的一种输入输出特性

Fig.5.3 characteristic of input and output

下面归纳出电平检测器的回环宽度的计算公式。

假设图 5.2 已经达到某一种饱和状态，如果输出状态要反转必须有下列条件：

$$V_o = -V_f = -K_1 V_o \quad (5.3)$$

则图 5.3 中由 V_{0m1} 反转到 V_{0m2} 时有

$$V_{i1} = -K_1 V_{0m1} \quad (5.4)$$

由 V_{0m2} 反转到 V_{0m1} 时有

$$V_{i2} = -K_1 V_{0m2} \quad (5.5)$$

环宽

$$V_h = V_{i1} - V_{i2} \quad (5.6)$$

以上公式和图 5.3 中， V_{0m1} 和 V_{0m2} 分别代表输出的正负限幅， V_{im1} 和 V_{im2} 分别代表输出的正负限幅反转的最小输入电压。调整 K_1 可以改变环宽。 R_1 小时，正反馈强，回环的宽度大。电阻 R_1 的选择就是根据要求的回环宽度决定的。

5.1.1.2 逻辑切换指令（可逆控制器的工作原理）

由第三章的分析可知：当需要电动机正向转动时，应当释放正组触发脉冲、封锁反组触发脉冲，反过来，当需要电动机反向转动时应当释放正组触发脉冲、封锁反组触发脉冲。可见，可以将电动机的转速差（转速指令与转速反馈的差值）作为逻辑切换指令的发令信号。

从保证系统工作的绝对可靠性出发，在一组晶闸管出发脉冲被封锁后，另一组的脉冲还不能马上释放。因为在本组脉冲被封锁的前一瞬间本组的某个晶闸管可能已经被触发。这个被触发的晶闸管将继续导通，直至本组电流过零，晶闸管关断。此时，才允许出发另一组晶闸管。不然，可能使两组晶闸管同时处于导通的状态，形成短路。另外，即使是在封锁本组晶闸管脉冲时，本组晶闸管已经全部关断，晶闸管在关断以后还须有一个恢复阻断能力的时间。为此，在封锁本组晶闸管的触发脉冲以后，必须等待一个足够长的时间，才允许释放另一组的触发脉冲。

这个时间叫触发等待时间。对于本文交流可逆调压的情况，触发脉冲等待时间定为 35-40ms，以保证系统工作的绝对可靠性。

具体来说，可逆控制器具有以下功能。实现本功能的原理图见图 5.4。关于速度控制器的门锁功能见 5.1.1.6，关于脉冲放大器的原理图见图 4.17。

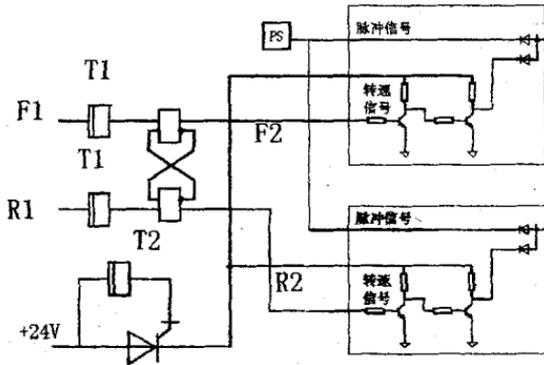


图 5.4 可逆控制的原理

Fig. 5.4 principle of reverse control

1、延时以及连锁功能

图 5.4 的初始状态为速度控制器来的正、反转信号 (F1、R1) 为 '0'，则可逆控制器的输出正反转确认信号 (F2、R2) 也为 '0'。此时，执行速度控制器的门锁功能，见 5.1.2.6。

当正转指令 F1 为 '1'、反转指令 R1 为 '0' 时，延时 (T1) 35-40ms 使正转指令 F2 为 '1'，强制使反转指令 R2 为 '0'。在这样的情况下，假设正转指令 F1、反转指令 R1 同为 '1' 的情况下，正转指令 F2、反转指令 R2 也不会同时为 '1'。

当正转指令 F1 为 '0'、反转指令 R1 为 '1' 时，延时 (T1) 35-40ms 使正转指令 F2 为 '1'，强制使反转指令 R2 为 '0'。在这样的情况下，假设正转指令 F1、反转指令 R1 同为 '1' 的情况下，正转指令 F2、反转指令 R2 就不会同时为 '1'。

综上所述，只有在经过 35-40ms 的时间才允许进行正转指令 F2、反转指令 R2 的切换。

2、电源投入时的连锁功能

在提升电动机的晶闸管控制系统中，如果速度控制器的控制电源 +12V 未投入，则直流安定化电源+24 也未投入。只有当直流安定化电源 +24 投入 (T2)250ms 以后，才能使触发脉冲控制晶闸管。

5.1.2 速度控制器的实现方法

5.1.2.1 速度放大功能

速度指令 V_1 (约 6V/100%速度) 与速度反馈信号 V_2 (6V/100%速度) 相比，产生速度偏差信号 ($V_1 - V_2$)。此偏差信号在 1AMP 进行放大。放大器的回路构成见图 5.5。(1AMP 的放大增益可使用可变电阻 N-GAIN 进行调节，放大倍数为：1-66.7)。1AMP 的输入输出特性见图 5.6。

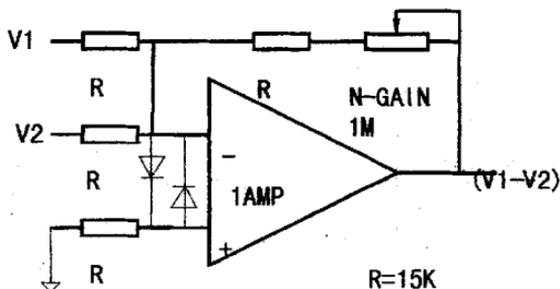


图 5.5 速度放大器

Fig.5.5 Velocity Amp.

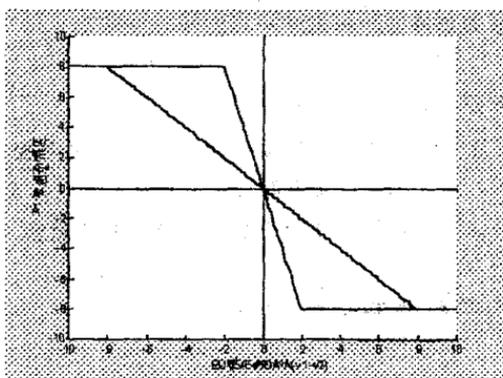


图 5.6 速度放大器的静特性

Fig.5.6 Static characteristic of velocity Amp.

5.1.2.2 绝对值功能和电流限制功能

1、绝对值功能：由 2AMP 和 3AMP 组成的回路构成。见图 5.7。

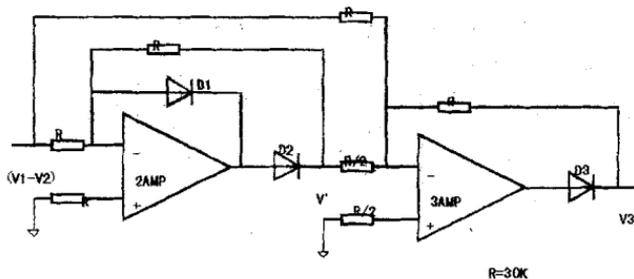


图 5.7 绝对值回路

Fig.5.7 Circuit of absolute value

不考虑 D3 的影响，当 $(V_1 - V_2)$ 为正的时，则通过 2AMP 的放大功能使 V' 为负，而这样将导致 D1 和 D2 的导通，强制使 $V' = 0V$ 。

对 3AMP 有以下公式成立：

$$\frac{V_3}{R} + \frac{V_1 - V_2}{R} = 0$$

$$\frac{V_3}{V_1 - V_2} = -1$$

即输出的 V_3 为负。

如果不考虑 D_3 的影响，当 $(V_1 - V_2)$ 为负的时候，则通过 2AMP 的放大功能使 V' 为正，而这样将导致 D_1 和 D_2 的截止。

此时，对 2AMP 有以下公式成立：

$$\frac{V'}{R} + \frac{V_1 - V_2}{R} = 0$$

对 3AMP 有以下公式成立：

$$\frac{V'}{R/2} + \frac{V_1 - V_2}{R} + \frac{V_3}{R} = 0$$

求解以上二式可得到以下的等式。

$$\frac{V_3}{V_1 - V_2} = 1$$

即输出的 V_3 为负。

通过以上的计算，可以看出：通过图 5.7，可以将 $(V_1 - V_2)$ 进行绝对值功能。确保图 5.7 输出的 V_3 总是为负。

2、电流限制功能：组成的回路见图 5.8。

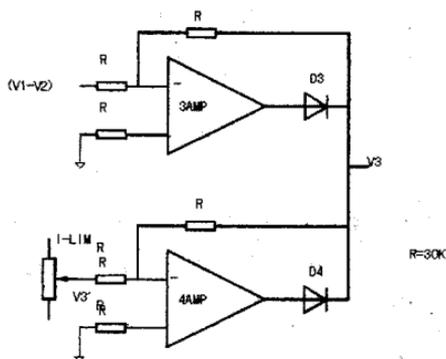


图 5.8 电流限制

Fig.5.8 current limit

对 3AMP 和 4AMP 而言，如不考虑 D3、D4 的影响，有以下二式成立。

$$V_3 = -|V_1 - V_2|$$

$$V_3 = -V_3'$$

如考虑 D3、D4 的影响，则比有一个运算放大器退出工作区。这样，可以确保 3AMP 和 4AMP 输出的电压值小的有效，可以达到电流限制的功能。

当 $|V_1 - V_2| \leq V_3'$ 时， V_3' 有效，以 V_3' 作为电流放大器的输入，这样就可以限制电流放大器的最大输入值，达到限制主回路最大电流的目的。

当 $|V_1 - V_2| > V_3'$ 时， $|V_1 - V_2|$ 有效，以 $|V_1 - V_2|$ 作为电流放大器的输入，这样就可以执行正常电流放大器的功能。

5.1.2.3 电流放大功能

电流反馈电压 V_4 和电流指令 V_3 的偏差 ($V_3 - V_4$) 在 5AMP 中进行放大 (电流放大倍数固定)，通过调整可变电阻 **L-FB** 使电流反馈电压 V_4 的最大值在 $+3V/100\%$ ，在 6AMP 中进行极性反转后输出。见图 5.9。

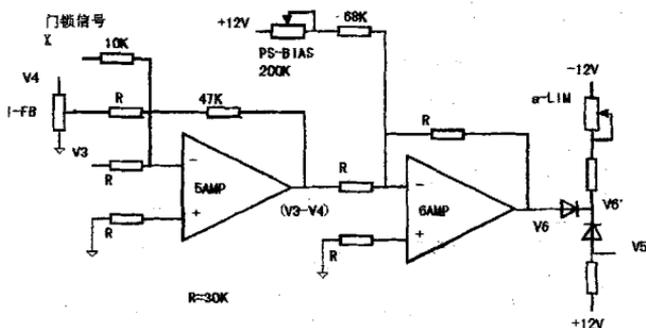


图 5.9 电流放大器

Fig.5.9 current Amp.

5.1.2.4 移相器偏差和 α -LIM 限制功能

见图 5.9。

当 $V_3 - V_4 = 0V$ 时，通过调整 6AMP 的可变电阻 PS-BIAS 设定移相器输入偏差，使 $V_5 = -2V$ 。

通过调整可变电阻 α -LIM 设定移相器的输入的嵌位电压，使 $V_5 = -6V$ 。

当 $V_6 > V_6'$ 时，使 $V_5 > V_6$ 。即将速度控制器中的电流放大器的输出电压送到移相器，用于产生触发脉冲信号。

当 $V_6 < V_6'$ 时，使 $V_5 = -6V$ 。即将速度控制器中的电流放大器的输出电压限制到 $-6V$ ，并使移相器无法产生触发脉冲信号。

5.1.2.5 速度偏差极性判别

比较器 COM3 和 COM4 的原理图见图 5.10，它是有 5.1.1 节中图 5.2 的电平监测器改进而来。

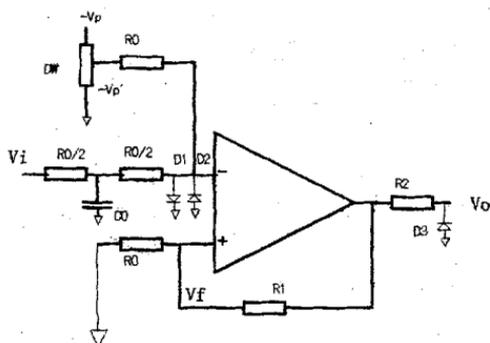


图 5.10 比较器 COM3、4 原理图

Fig.5.10 Diagram of compare decice(COM3.4)

由于输入 $V_i (= V_1 - V_2)$ 中有谐波分量比较式，为避免有它引起比较器的误动作，输入端增加了 T 型滤波电路。二极管 D1 和 D2 限制了非共模输入信号的幅值，以保护集成电路。该电路输出电压的最大值为 +12V。代表逻辑 ‘1’；其输出电压的最低值由二极管 D3 和电阻 R2 组成的负限幅电路限制为 -0.6V 左右，代表逻辑 ‘0’。其输入输出特性见图 5.10。

当放大后的速度偏差信号 $(V_1 - V_2)$ 小于 -0.6V 时，其输出 V_o 应为 ‘0’；当放大后的速度偏差信号 $(V_1 - V_2)$ 接近于零，即 $(V_1 - V_2)$ 大于 -0.2V 时，其输出应为 ‘0’。

为了获得图 5.11 的输入输出特性，在图 5.10 电路的输入端增加了一个负偏移电路 (V_p 和可变电阻 DW)。通过调节 DW 使 $V_p' = 0.4V$ 。有了偏移信号 V_p' 后，放大器的输入端有下式成立：

$$\Delta V = V_f + V_i + 0.4$$

正反馈放大器输出状态翻转时，应有 ΔV 约为 0V，即

$$V_i = -0.4 - V_f$$

如取

$$K_1 = \frac{R_0}{R_0 + R_1} = \frac{1}{60}$$

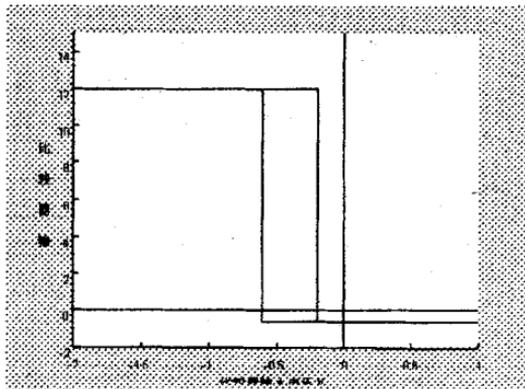


图 5.11 比较器 COM3、4 输入输出关系图

Fig5.11 I/O relation of compare device(COM3.4)

当放大器的输出为+12V 时，

则 $V_f = -\frac{1}{60} \times 12 = -0.2V$ ，由+12V 翻转为-12V 时应有

$$V_i = -0.4 - (-0.2) = -0.2V$$

当放大器的输出为-12V 时，则 $V_f = 0.2V$ ，由-12V 翻转为+12V 时应有

$$V_i = -0.4 - 0.2 = -0.6V$$

可见，有了偏移电压 V_p 以后，实现了输入输出特性的移动，调节电位器 DW 可调整移动的程度，

比较器 COM3 和 COM4 在系统中的接线方法见图 5.1。放大后的速度偏差信号($V_1 - V_2$)在比较器 COM3 和 COM4 中检测后，用于判断电动机的运转和制动等状态。COM3、COM4 的输出状态分别用符号 F1 和 R1 表示。

当 COM3 输出为 '1' 时 (即 F1 = '1')，同时 COM4 输出为 '0' (即 R1 = '0')，表示要求电动机正转；当 COM4 输出为 '1' 时 (即 R1 = '1')，同时 COM3 输出为 '0' (即 F1 = '0')，表示要求电动机反转。将 F1 和 R1 分别送到门锁回路和可逆控制器，用于控制交流调压主回路晶闸

管，使电动机转动。

5.1.2.6 门锁 (Gate lock) 功能

比较器 COM3、COM4 输出 (F1、R1) 和可逆控制器的主回路动作确认信号(F2、R2)按表 5.1 进行逻辑运算，得到门锁信号 X。将门锁信号加到电流放大器的输入端来断开移相器输入信号，将主回路负荷电流切断，见图 5.9。

表 5.1 的输入输出信号 (F1、R1、F2、R2 和 X) 均为逻辑量。逻辑 '1' 代表电压值在+9V 以上；逻辑 '0' 代表电压值在+1V 以下。

表 5.1 门功能

Table 5.1 Gate function

输入				输出	输入				输出
F	F	R	R	X	F	F	R	R	X
1	2	1	1		1	2	1	1	
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
1	1	1	0	1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	0	0	0	1

实现表 5.1 功能的原理见图 5.12。

由表 5.1 可以看出，只有在比较器 COM3、4 的输出 F1、R1 和可逆控制器的输出 F2、R2 的信号严格相同，即晶闸管的触发条件完全具备的情况下，速度控制器的双闭环控制才能投入运行，以确保晶闸管的稳定运行。

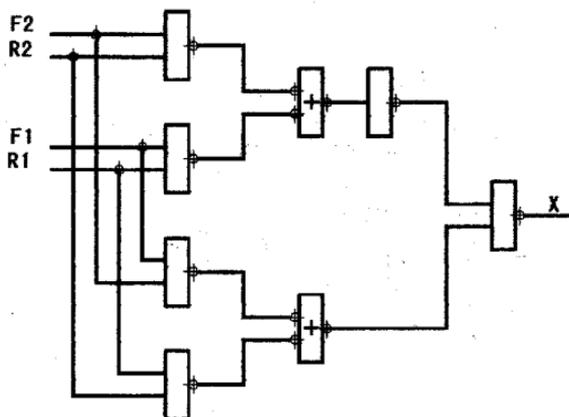


图 5.12 门锁功能

Fig.5.12 Diagram of gate Function

5.1.2.7 速度检测功能

速度反馈信号的绝对值输出 ($-6V/100\%$) 在比较器 COM1 和 COM2 中判断后检测出速度信号通过 B9 和 B13 输出。速度检测电平可以使用可变电阻 1VR 和 2VR 设定。

5.1.2.8 过电流检测功能

见图 5.19。电流反馈 V_4 值得分压 B2 达到 $+3V \times 1.17 = 3.51V$ (标准值) 以上时, 7AMP 执行比例积分的功能。当 7AMP 的输出达到移动的电压 ($-9.2 \sim -9.7V$) 时比较器动作, 输出过电流信号。(通过可变电阻 OC-DET 的调整到 $+3V$ 的 117%)。过电流的动作特性见表 5.2。器件的误差导致过电流动作特性有误差。

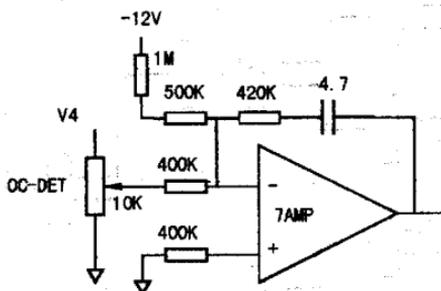


图 5.19 过电流检测

Fig.5.19 inspect of over current

表 5.2 过电流特性

Table 5.2 characteristic of over current

电流检测 %	电压 (V)		动作时间 (秒)		
	B2	B12	最小值	最大值	标准值
100	+3	1.36	∞	∞	∞
120	3.6	1.63	44	∞	210
150	4.5	2.05	11	32	18
200	6.0	2.72	4.1	8.5	5.9
300	9.0	4.09	1.1	2.3	1.6
400	12.0	5.45	0.10	0.65	0.32

5.2 反馈检测回路

5.2.1 测速回路

本文的速度检测回路是由与电动机外轴相连的测速发电机组成。测速的原理见图 5.20。

图 5.20 中, TG 代表测速发电机, 该发电机是永磁式直流发电机。其规格如下:

型 号: GEEM-W

测速范围：0-3000r/min

转子的转动惯量：0.009kg.m²

额定测速比：2000r/min/200V

线性性：1%

容许电流：150Ma

内部电阻：27Ω

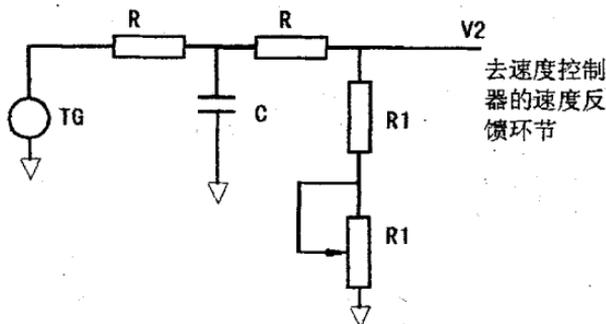


图 5.20 速度检测

Fig.5.20 Inspect of velocity

对图 5.20 的电阻、电容值确定如下：

1、电阻确定

测速发电机的最高输出电压为 200V。在本文的条件下，电动机转速范围：0-600r/min，按测速发电机的测速比，则发电机的实际输出电压范围为 0-60V。

为了确保测速发电机的输出电压的准确，按测速发电机的容许电流 150mA 的 10% 确定电阻。

按图 5.20 有下式成立

$$R = \frac{60}{\frac{150 \times 10\%}{2}} = 2k\Omega$$

同时根据速度控制器对反馈电压的要求，即 $V_2=0-6V$ 。

按图 5.20 有下式成立

$$R_1 + R_2 = \frac{2 \times R}{10} = 400 \Omega$$

为了确保调节范围，选择 R1 和 R2 的阻值为 300 Ω。

2、电容确定

图 5.20 的 T 型滤波回路，确定 C=2.2 μF。

5.2.2 电流检测回路

为了准确地检测主电流信号，又能使主回路和控制回路隔离，在本文中采用交流互感器的电流检测回路，检测电路见图 5.21。

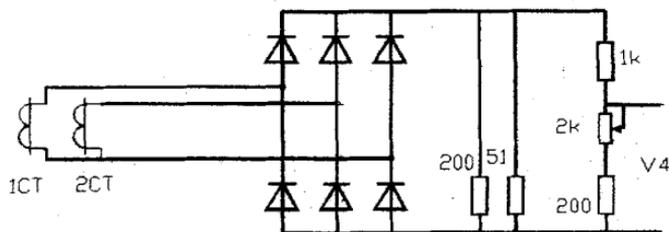


图 5.21 主电流检测

Fig.5.20 inspect of current

图 5.21 中的 1CT、2CT 的规格为：UTM-05、0.5kVA、1000A/0.2A。

本文提升电动机的额定电流：0-320A，则 1CT、2CT 输出电流为 0-0.064A。经过三相整流以及转换、分压，电流检测的输出电压 V₄ 为 0-3V。

第六章 结论

在对首钢焦化厂干熄焦吊车的机械结构进行理论分析的基础上,通过实践中的不断分析总结,并消化日本技术,对干熄焦吊车提升部分设备的调速原理及电气控制进行深层次的分析和研究,并得出以下结论:

1 根据吊车提升部分的机械结构以及负载特性,并结合干熄焦工艺特点,提出了电动机以及制动器的国产化选型要求,理论分析及仿真研究均证明,按此要求选型可完全替代现有的进口设备。

2 根据提升电动机的参数以及交流可逆调速系统的 MATLAB 仿真数学模型,建立了电动机的动态数学模型,并重点分析了提升电动机的静态运行点,为提升电动机维护和国产化改造提供理论依据。

3 通过分析现有的日本干熄焦吊车的晶闸管调速原理,建立了晶闸管的三相交流调压,二次串电阻调速的理论计算模型,研究表明,根据此模型设计控制系统的主回路能够满足干熄焦吊车对提升设备的运行要求。

4 初步提出交流可逆调速系统的一种具体实现电路的理论实现方法,为国产化控制系统的主回路的设计提供理论基础。

5 根据闭环可逆调速系统的特性,同时结合实际的使用经验,初步提出了闭环可逆调速系统的一种实现方法。研究表明,该控制系统完全可以做到国产化。

6 根据提升电动机的 MATLAB 仿真数学模型建立的模型,同时结合工艺特点得到了提升电动机的动态波形。具体波形见 4.3 节中的说明。

研究表明，根据此模型对提升电动机的选型能够满足干熄焦吊车对提升设备的运行要求。

从以上的分析和研究可以看出，可逆控制系统的理论实现方法是常规的，国内完全具备制造能力。吊车的国产化、特别是提升部分的国产化是可以实现的。只要引进部分关键

参 考 文 献

1. 周凯订、郑力新. 基于 MATLAB 双闭环直流调速系统仿及参数化设计. 计算机技术自动化. 2001, 第二期
2. 吴健雄. 国内外电气传动技术发展. 电气传动 TM-99 1993 VOL、23 NO 1-6 第一期
3. 王清灵、刘峻. 晶闸管变流装置的故障监视新方法. 电气传动 TM-99 1995 VOL、25 NO 4-6 中第四期
4. 马小亮. 国外交直流传动新动向. 电气传动 TM-99 1994 VOL、24 NO 1-6 第一期
5. 王兆安、黄俊. 《电力电子技术 (第四版)》. 机械工业出版社, 2000
6. 日本电气学会电力半导体变流方式调研专门委员会著. 王兆安、张良金译. 《电力半导体变流技术》. 机械工业出版社. 1993
7. 王兆安、杨君、刘进军. 《谐波抑制和无功功率补偿》. 北京, 中国铁道出版社, 1997 年
8. 张连科. 《电力拖动自动控制系统》. 冶金工业出版社, 1989
9. 刘竞成. 《交流调速系统》. 上海交大出版社. 1984
10. 冯婉芝. 《电机与电力拖动》. 中国轻工业出版社. 1991
11. 陈伯时. 《自动控制系统》. 机械工业出版社. 1981
12. John G, Kassakian. Principles of Power Electronics. Addis on

Wesley publishing company, 1991

13. Bimal K. Bose. Evaluation of Modern Power Semiconductor Devices and Future Trends of Converters. IEEE trans. On Industries Applications. 1992, 28(2)

14. IEEE Working Group on Power System Harmonics. Power System Harmonics: an overview. IEEE Trans Power Delivery, 1993, 8(2):672-680

15. Bimal K. Bose. Evaluation of Modern Power Semiconductor Devices and Future Trends of Converters. IEEE Trans. on Industries Applications, 1992, 28(2)

16. B C Kuo. Automatic Control Systems. Addison-Wesley Publishing Company, England. 1995

71. 张志涌等编著.《精通 MATLAB 5.3 版》.北京,北京航空航天大学出版社,2000年

81. M. Г. 捷波里特斯基 (苏) 著.李哲浩译.《干法熄焦》,冶金工业出版社,1981

19. 马竹梧、邱见平、李江著.《钢铁工业自动化-炼铁卷》,冶金工业出版社,2000

20. 胡宗武、顾迪民编著.《起重机设计计算》,北京科技大学出版社,1989.10

21. 富原弘明等 (日), 京滨钢铁厂炼焦设备新的控制系统, 1996 (4)
22. 李哲浩编, 《炼焦新技术》, 冶金工业出版社, 1988.4

附录

- 1、 sxtyl(a):三相调压的 MATLAB 程序
- 2、 附图-1
- 3、 附图-2
- 4、 附图-3
- 5、 附图-4
- 6、 附图-5
- 7、 附图-6

```

function Ia=sxty1(r)
% SXTY1 计算三相调压相电压有效值
% r      触发脉冲的起始电角度，以角度表示

% Ia=sxty1(r) 计算出 a 相的有效值给 Ia

% 编写于 2002 年 2 月 24 日：

if (nargin<1 & nargin>2)
    error('输入变量数目不对，请按 sxty(0)输入。');
end;

if (r<0 | r>150)
    error('输入的触发角度范围应在 0-150 之间');
end;

th=450;dt=1;t=0:dt:th;
x=0:30:th;y=[-400,-220,-100,0,100,220,400];%x 为 x 轴坐标刻度；y 为 y 轴
坐标刻度
a=sqrt(2)*220*sin(pi*t/180);
b=sqrt(2)*220*sin(pi*(t-120)/180);
c=sqrt(2)*220*sin(pi*(t-240)/180);
ab=(a-b)/2;ac=(a-c)/2;

if (r)>0 & r<60)
    vt1=(t>=r)&(t<=180);vt3=(t>=r+120)&(t<=300);
    vt5=((t>=0)&(t<=60))|((t>=r+240)&(t<=360));
    vt4=(t>=r+180)&(t<=360);vt6=((t>=r+300)&(t<=360))|((t>=0)&(t<=120));
    vt2=(t>=r+60)&(t<=240);
    %三个晶闸管导通
    zal=vt1&((vt5&vt6)|(vt6&vt2)|(vt3&vt2));

```

```

za2=vt4&((vt5&vt6)|(vt5&vt3)|(vt3&vt2));
%二个晶闸管导通
za3=(~za1&vt1&vt6).*ab+(~za1&vt1&vt2).*ac;
za4=(~za2&vt4&vt3).*ab+(~za2&vt4&vt5).*ac;

za=(za1|za2).*a+za3+za4;
elseif (r)>=60 & r<90)
    vt1=(t)>=r&(t<r+120);vt3=(t)>=r+120&(t<r+240);
    vt5=((t)=0)&(t<r)|((t)=r+240)&(t<360));
    vt4=((t)=0)&(t<r-60)|((t)=r+180)&(t<360));vt6=((t)=r-
60)&(t<r+60));
    vt2=(t)=r+60&(t<r+180);
    %二个晶闸管导通
    za3=(vt1&vt2).*ac+(vt1&vt6).*ab;
    za4=(vt4&vt3).*ab+(vt4&vt5).*ac;

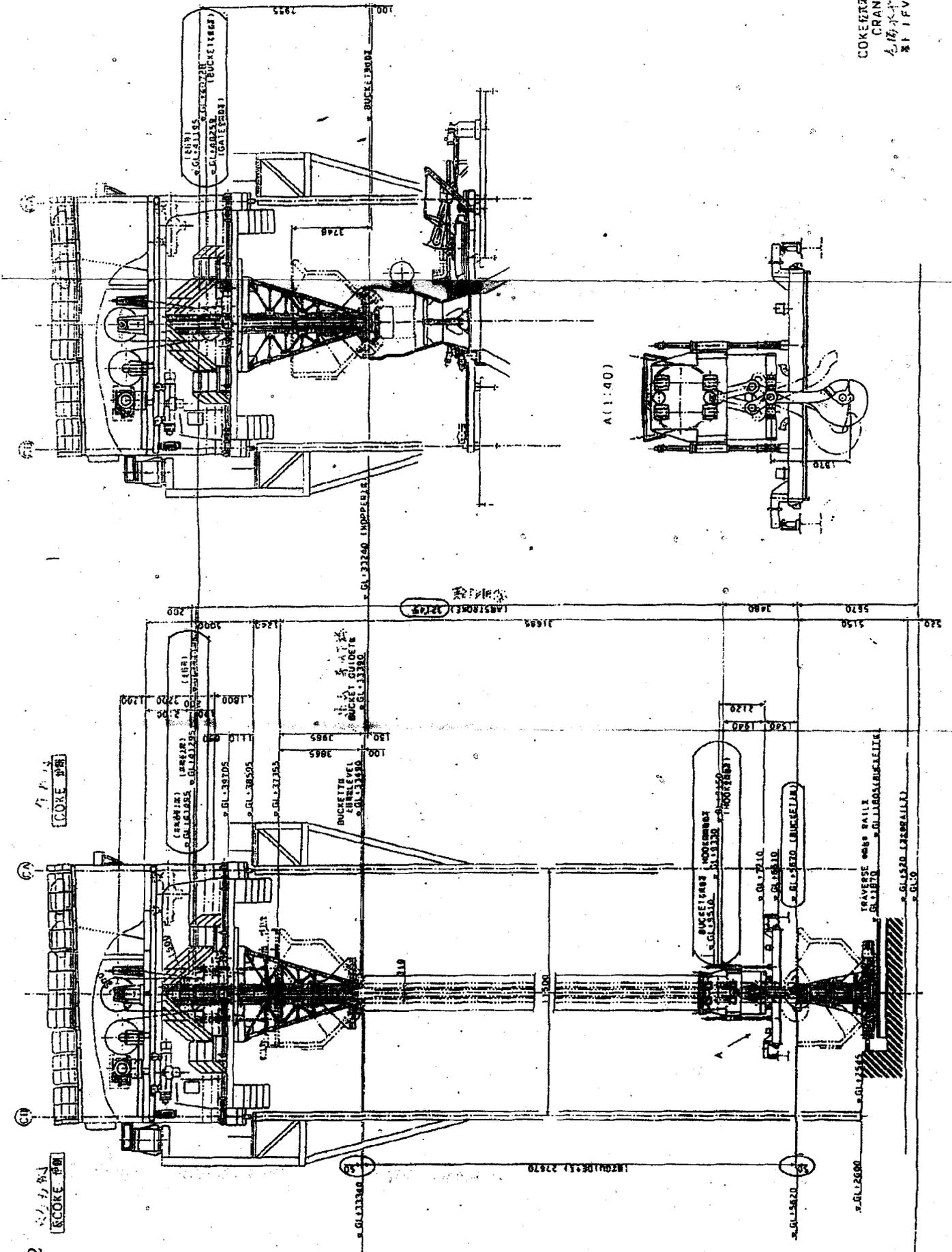
    za=za3+za4;
elseif (r)>=90 & r<150)
    vt1=(t)=r&(t<210);vt3=(t)=r+120&(t<330);
    if r<=120
        vt5=((t)=r+240)&(t<360)|((t)=0)&(t<90));
    else
        vt5=(t)=r-120&(t<90);
    end;
    vt4=((t)=r+180)&(t<360)|((t)=0)&(t<30));
    vt6=((t)=r-60)&(t<150);vt2=(t)=r+60&(t<270);
    %二个晶闸管导通
    za3=(vt1&vt2).*ac+(vt1&vt6).*ab;
    za4=(vt4&vt3).*ab+(vt4&vt5).*ac;

    za=za3+za4;

```

```
end;
%求 a 相的电压有效值 (0- $\pi$  之间)。
if nargout==1
    pp=spline(t*pi/180,za.^2);
    int_pp=fnint(pp);
    Ia=sqrt(ppval(int_pp,[0,pi])*[-1:1]/pi);
    Ia=round(Ia);
end;
```


附图-2
COKE 炉



COKE OVEN
CRANE
吊炉水车架
吊炉水车架

致 谢

在论文的撰写过程中，自始至终得到了东北大学指导指导教师张锺副教授的精心指导；同时还得到校外指导教师汤长庚、首钢设计院以及其他同志给予的帮助，谨此表示衷心的感谢！

另外对在本论文的打印过程中，所有提供帮助的同志一并表示感谢！