

# 电力机车稳态牵引工况仿真

胡 建 华

(电气工程系)

## 摘 要

本文在分析电力机车拖动系统基础上,对相控经济四段桥构成的拖动系统,研制了它的数学模型和仿真流程图,并编程在计算机上进行了模拟运行,其结果与试验数据基本吻合。

电力机车相控整流拖动系统,是由牵引变压器、平波电抗器、牵引电机和大功率晶闸管相控整流桥组成的复杂拖动系统。运行时系统中段位、级数、相控角、负载等参数变化都会影响到整个系统的运行情况。对整个系统运行分析,计算工作量大,而且困难。本文用计算机仿真技术,将整个系统从具体的工程问题中建立起它的物理模型。对拖动系统中各部分、元器件进行了分析讨论,抽象成数学公式,建立起整个系统的仿真流程图,编程在计算机上进行仿真分析,模拟系统运行情况,使问题简化。

## 一 稳态等效主电路

SS4型电力机车主电路工作情况简述如下:

电路主要器件为:机车主变压器、四段经济桥、平波电抗器、牵引电机。主变压器原边绕组经受电弓接在25KV电网上,付边分左右两个独立供电系统。左右对称,相互独立。因此对一侧进行讨论可代表整个电路情况。

主变压器付边有 $a_1 x_1$ 、 $a_2 x_2$ 两个绕组。在绕组 $a_1 x_1$ 中间有抽头 $b_1$ ,这样 $a_1 b_1$ 、 $b_1 x_1$ 、 $a_2 x_2$ 分别输出335V,335V,670V空载电压。经过晶闸管整流电路,可组合提供335V,670V,1005V,1340V,四个等级输出电压。由整流桥向牵引电机提供不同等级的直流电压,其工作情况见表一。

本文于1989年3月15日收到

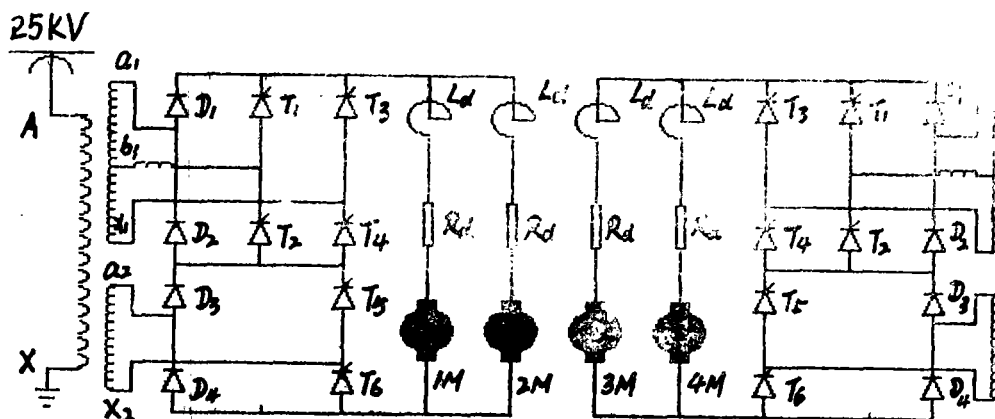


图 一

表 一

| 绕组 \ 段数 | 一        | 二                   | 三                  | 四                     |
|---------|----------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| a1 b1   |          |                     |                    |                       |
| b1 x1   |          |                     |                    |                       |
| a2 x2   |          |                     |                    |                       |
| Ud      |          |                     |                    |                       |
| 晶 闸 管   | T1 T2 相控 | T3 T4 相控<br>T1T2满开放 | T1 T2相控<br>T5T6满开放 | T3 T4 相控<br>T1T2T5T6满 |

根据经济四段桥工作情况，先把变压器四个不同的组合电压输出，等效看成变压器付边抽头单绕组线圈，得出机车牵引工况下主回路等效电路如下：

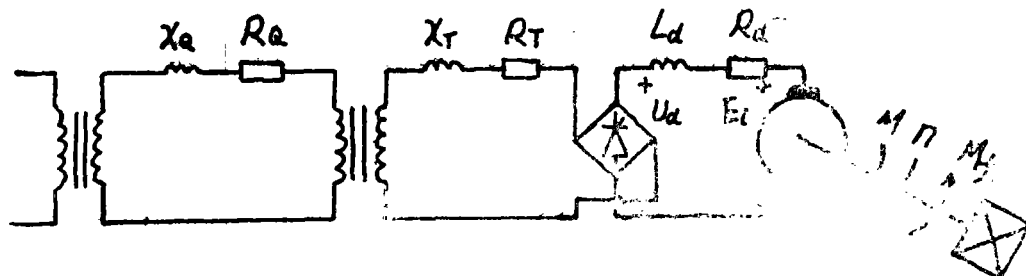


图 二

$RQ + jXQ$  为牵引变压器及接触网阻抗值，它与机车通过接触网到牵引变电所距离有关。  
 $Mfz$  为牵引电机的负载转矩。

$L_d$ 为直流侧总的电感量,包括平波电抗器、电机电枢绕组、补偿绕组等,是一个转向各支路并联电感。

$R_d$ 为直流侧回路电阻,包括平波电抗器、电枢绕组、补偿绕组串联电阻值。

$E_i$ 为牵引电机两端电压值,当牵引电机为恒压调节时其电压值受级位参量控制,可调电压工作在1—32个级位上,这里把牵引电机两端视为受级位控制的恒压源。

$U_d$ 为整流输出电压,它与相控角、变压器付边电压值等有关。

## 二 数学模型

整个系统经桥式整流构成直流和交流两部分,整流桥工作段位、相控角等变化直接影响两侧电流、功率大小以及电流和电压的波形。先分别对直流侧与交流侧进行讨论,最后建立统一数学模型进行综合分析讨论。

### (一) 直流侧

根据前面分析得出机车牵引工况下的系统物理模型,直流侧对应的数学模型表达式为:

$$U_d = E_i + R_d I_d + L_d \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$M = M_{iz} + J_n \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

$$M = C_m \Phi I_d \quad (3)$$

$$E_i = C_e \Phi N \quad (4)$$

$C_m$ 、 $C_e$ 为牵引电机转矩常数、电势常数, $n$ 为电机转速。电感量 $L_d$ 和磁通 $\Phi$ 与运行时电流有关,由于受磁路的饱和影响, $L_d \Phi$ 是非线性参量,如何建立这些参量与电流的准确关系,对仿真结果影响很大。这里采用了数据拟合的方法来确定 $L_d \Phi$ 与电流的函数关系。编制一段加权数据拟合程序来进行对非线性元器件处理。根据对测试数据定性分析,选择了多项式为逼近函数。采用以上数据拟合方法得逼近函数为:

$$\Phi = A_0 + A_1 I_d + A_2 I_d^2 + A_3 I_d^3 \quad (5)$$

$$X_d = B_0 + B_1 I_d + B_2 I_d^2 \quad (6)$$

$A_i$   $B_i$ 为拟合时待定系数。有了这些函数关系,可确定整个系统数学模型的解析表达式。为解状态方程组提供了方便。

相控整流输出直流电压为:

$$U_d = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega t - Q_n) \quad (7)$$

$U_0$ 为平均输出电压, $U_n$ 为脉动分量。

$$U_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t$$

$$= \frac{\sqrt{2} U'_2}{\pi} \{1 + \cos(r_1 + r_2)\} + \frac{\sqrt{2} U'_2}{\pi} \{1 + \cos(\alpha + r_4)\}$$

(8)

$$U_a = \sqrt{U_{an}^2 + U_{bn}^2}$$

(9)

$$U_{an} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \cos \omega t d\omega t$$

(10)

$$U_{bn} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \sin \omega t d\omega t$$

(11)

$U'_2$  为满开放部分电压有效值,  $U''_2$  为相控部分电压有效值,  $r_1, r_2, r_4$  为换流重叠角, 它与变压器短路漏电抗有关。可根据换流时短路状态回路方程求解得到。

获得整流输出电压后, 可求解直流侧电流:

$$\text{直流分量: } I_0 = \frac{U_0 - E_{cl}}{R_d}$$

(12)

$$\text{脉动分量: } I_a = \frac{U_a}{[R_{2d} + (n\omega L_d)^2]^{1/2}}$$

(13)

直流侧电流均方根值以及波动系数:

$$I_d = \sqrt{I_0^2 + I_a^2} \quad ; \quad K_i = I_a / I_0$$

(14) (15)

直流侧总的电流:

$$I_d = I_0 + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_a \cos(n\omega t - Q_n - P_n)$$

(16)

$$Q_n = \text{tg}^{-1} \frac{U_{bn}}{U_{an}} \quad ; \quad P_n = \text{tg}^{-1} \frac{n\omega L_d}{R_d}$$

(17) (18)

## (二) 交流侧

交流侧主要是经济四段桥和主变压器。相控整流桥的通断状态, 在略去晶闸管通态电阻和保护电路的影响情况下, 模拟成为一个开关电路作用。开关的动作由控制角  $\alpha$  来决定。变压器  $\dot{a}_1 b_1, b_1 x_1, a_2 x_2$  三个绕组投入工作情况, 是由整流桥的晶闸管导通、断开来确定。这里用一个选择加法器来模拟控制三个绕组投入运行情况:

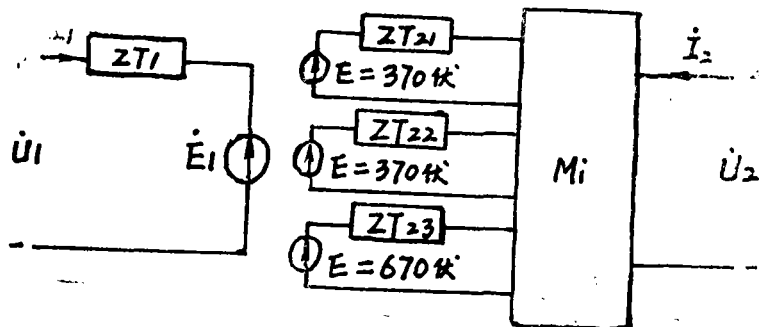


图 三

变压器绕组投入运行情况不同,不但输出电压不一样,而且整流换相过程短路阻抗也不一样,在不计变压器绕组电阻时,换流过程短路回路方程如下:

$$(L_{cl} + L_f) \frac{di_2}{dt} = m_i \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (19)$$

$m_i$ 为主变压器付边某段换相短路状态匝数与付边总的串联匝数比,  $L_f$ 为中抽部分附加电感,  $L_{cl}$ 为变压器,在*i*段换相电感,根据短路回路方程可求出换相时的重叠角和电流表达式,解方程(19)求出换相时电流 $i_2$ :

$$i_2 = \frac{\sqrt{2} m_i U_2}{L_{cl} + L_f} \int \sin \omega t dt \quad (20)$$

设换流角开始时为 $\omega t = \omega t_0$ ,  $i_2 = 0$ ,换相结束时 $\omega t = \omega t_0 + r$ ,  $i_2 = I_d$ ,换相重叠角为:

$$r_i = \cos^{-1} \left( \cos \omega t_0 - \frac{X_{cl} + X_f}{\sqrt{2} m_i U_2} I_d \right) - \omega t_0 \quad (21)$$

忽略励磁电流对电路影响,主要考虑磁势平衡电流作用,对换流过程电路分析可知,电流 $I_1$ 的波形如图四。 $I_1$ 波形为半波镜像,经济四段桥工作时,半波镜像不变。

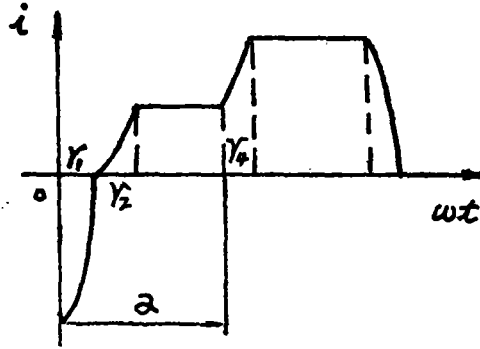


图 四

对 $I_1$ 富氏分解可得交流侧电流各次谐波情况:

$$I_1 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t - Q_n) \quad (22)$$

态中:  $I_n = \sqrt{I_{an}^2 + I_{bn}^2} \quad (23)$

$$I_{an} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(i_1) \sin n\omega t d\omega t \quad (24)$$

$$I_{bn} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(i_1) \cos n\omega t d\omega t \quad (25)$$

主变压器付边输出电压有效值为:

$$U_2 = \sqrt{U_{02}^2 - \sum_{n=1}^{\infty} [I_n (ZQ_n + ZT_n)]^2} \quad (26)$$

基波电流的有效值和相位移系数:

网侧电流有效值:

电流畸变系数以及功率因数:

等效干扰电流: 
$$J_p = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (S_n I_n)^2} \quad (32)$$

$S_n$ 为噪音计权评价系数, 根据CCTT公布数值表如下:

表 二

| 谐波次数           | 1    | 3   | 5    | 7   | 9    | 11   | 13   | 15   |
|----------------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| S <sub>n</sub> | 0.02 | 0.1 | 0.16 | 0.3 | 0.52 | 0.74 | 0.86 | 0.96 |

归纳总结上面数学方程式，得出仿真流程图如下图五：

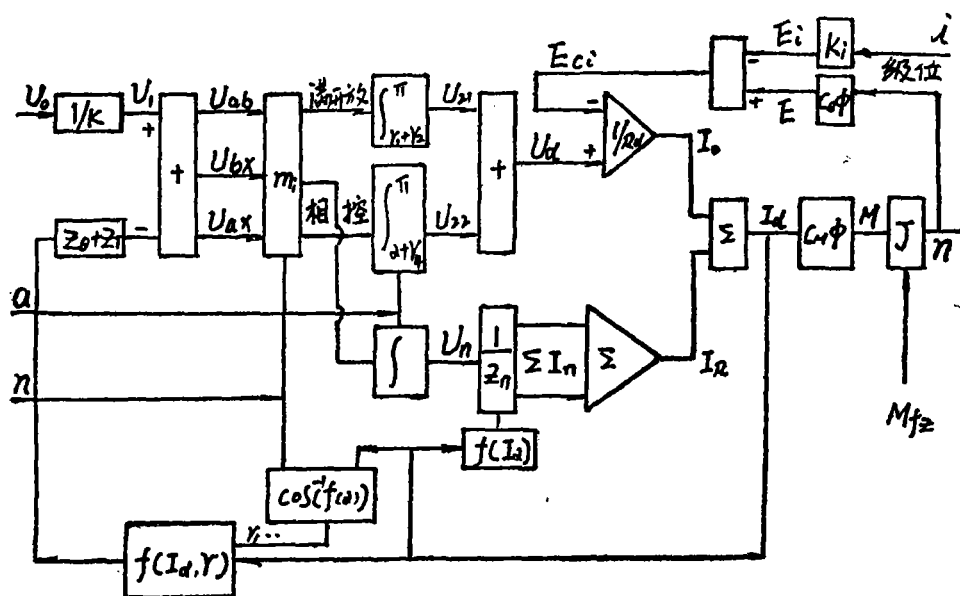


图 五

### 三 计算分析与程序框图

有了机车牵引工况运行状态数学模型以及流程图,可进行仿真编程计算。整个数学模型为一多状态变量方程组。从流程图可知系统运行状态受输入电压、相控角和级位控制,同时受负载参数的影响。在稳态主要由级位和相控角控制运行状态。恒电流起动时,转速是时间的函数。电流参量的变化联系到各个环节工作情况。在考虑变压器漏阻抗和接触网线路阻抗因数下,负载电流增加会引起变压器付边输出电压的减少和换流重叠角的加大。而电流大小又影响变压器和牵引电机中的磁场变化,对应磁场参数也不相同。换流重叠角的出现又减小了整流输出电压。网侧电流的谐波分量也随之变化。仿真主要模拟各控制量输入对整个系统运行的影响,以及变压器原边电流谐波、功率因数等参量的动态。根据机车实验数据,用上述仿真模型进行编程计算,程序框图如图六

程序运行首先给出SS4机车主电路原理图以及桥式整流工作电路图和模型流程图,用汉字提示模拟选择一负载输入,选择控制在某一级位下,然后自动输出该级位时的经济四段桥中晶闸管元件导通状态逻辑电路图和电路模型,并给出参考的控制角初值。程序执行用叠代的方法寻求系统牵引工况状态平衡点。在计算结果与模拟负载偏差较大时,用分割的方法进行叠代找平衡点。当平衡点求出,各参量数据用数组方式记录下来,并输出各状态数据和波形。程序也可模拟负载从小到大循环执行,可在各段、各级位控制条件运行情况下,反复进行叠代计算,离散求出系统牵引工况运行状态各参量值,然后对数据进行拟合分析。显示输出整流电压波形和网侧电流波形。可随时观察参数变化对电路的影响。最后在显示器或绘图仪上输出各次谐波电流、功率因数、噪音电流随负载变化关系曲线。

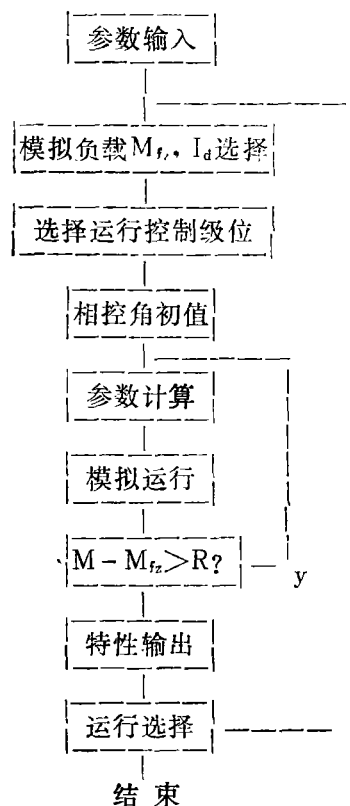


图 六

### 四 总 结

相控电力机车牵引装置是个复杂的拖动系统,涉及到多门学科,这里通过运用电力电子技术、电机学、近代数学理论对整个系统主电路进行了分析讨论。建立了牵引工况下仿真模型和流程图。编程在长城机0520-DH上运行证明可以模拟机车运行情况。在负载电流3360A

时,选择控制在31级位上,得网侧电流波形和整流输出电压波形为图七。求出网侧电流  $I$  有效值为183A,基波电流163A,噪音电流  $J_p$  为0.89。从小到大对一个级位运行状态仿真得功率因数、噪音电流、相位移以及各次谐波电流与网侧电流函数关系曲线为图八。从仿真得出波形和计算拟合的数据曲线可知,在同一级位上整流电压的波形和网侧电流的波形基本不变。某一调压级位对应于一定桥段的晶闸管导通角。由于直流侧电阻值较小,负载电流变化稳定电压只作些微调,这样负载电流的改变只改变电流的幅值,而电流波形基本不变,因此同一级位上功率因数改变较小,功率因数的大小主要取决于级位。总的平均功率因数为0.85左右。以上得出的仿真数据和波形与实际运行情况基本相符,证明模型建立与程序设计正确。

系统中的对饱和电抗、电机磁通等非线性参量的处理。采用了分段加权的数据拟合方法,求出了函数关系表达式。为非线性参量仿真数据处理提供了一种方法。

另外以上建模分析,忽略了辅助电路影响以及变压器空载电流,绕组电阻等因数影响,模拟结果与实际机车运行情况有一定误差。

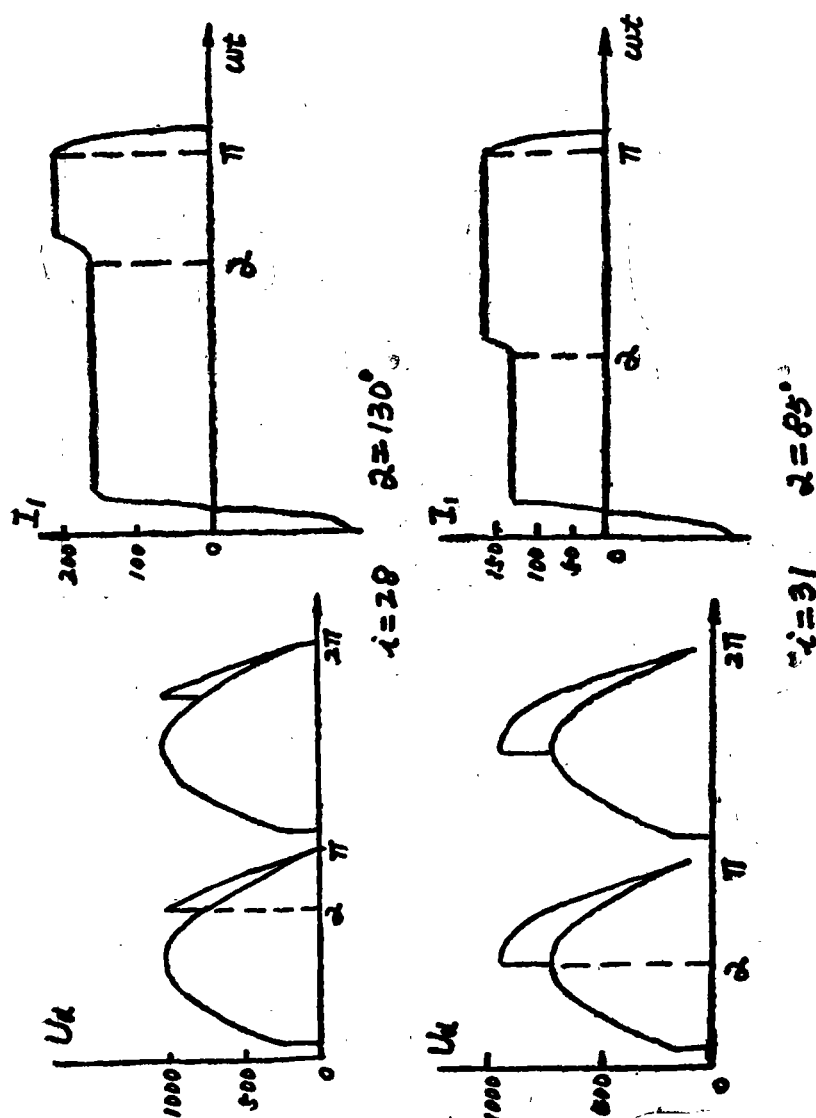


图 七

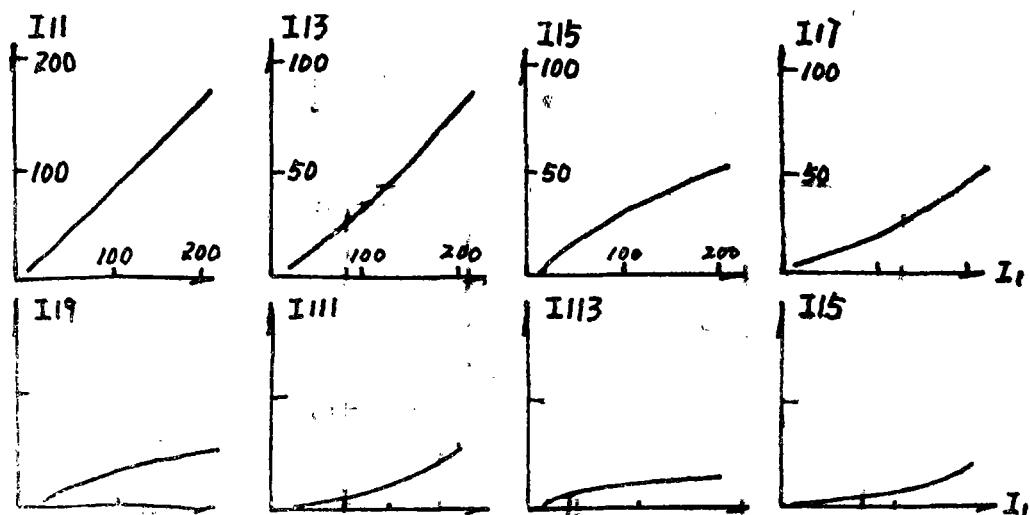
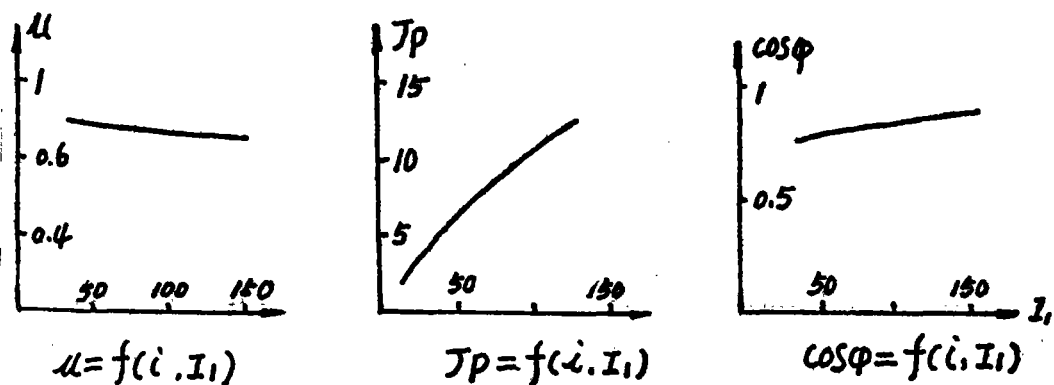


图 八

### 参 考 文 献

- [1] 熊光楞,《计算机仿真应用》,清华大学出版 1984.7
- [2] 程正兴,《数据拟合》,西安交大出版 1986.10第一版
- [3] 西南交大等,《电传动机车控制》,铁道出版社 1984.11
- [4] 张有松等S<sub>84</sub>型八轴干线货运电力机车——电气线路,机车电传动 1986.5
- [5] T.A.西巴依洛夫著,姚守猷译,《电机数学模拟》,机械工业出版社 1985