

# 多功能机械传动试验台电气 控制系统分析

ELECTRICAL CONTROL SYSTEM ANALYSIS  
FOR THE MECHANICAL TRANSMISSING TEST BED

胡 荫 林    许 德 沛    吕 厚 余

Hu Yinlin    Xu Depei    Lu Houyu

(电气工程系)

**摘 要** 本文对试验台方案的选择、双电机组的等效处理、试验台的控制和加载方式,进行了分析讨论。概要地介绍了控制系统框图的特点,给出了试验波形图。最后,指出了尚待深入研究的问题。

**关键词** 试验台; 双电机组; 加载方式

**ABSTRACT** This paper analyzes and proves the seeking for projects of the test bed, the equivalent processing for the bi-electric machine set and the control and loading modes of the test bed. It also introduces briefly the features of the block diagram of the control system and gives the test waveforms. Finally, it points out the problems to be further studied.

**KEY WORDS** Test bed; bi-electric machine set; loading mode

各类机械变速箱的性能和寿命试验,特别是采用新原理、新工艺和新结构制成的变速箱新产品的试验,急需适应面宽、功能强的机械传动试验台,所谓适应面宽,其主要含义:齿轮减速箱和蜗轮减速箱均可试验;减速箱输入轴和输出轴之间的中心距可在较大范围内变动;减速箱传动比可在大范围内变动;有足够宽的速度变化和功率复盖范围。重庆大学机械零件教研室和电工学教研室联合研制的多功能机械传动试验台是在增大试验台的宽适应性方面的一次突破。该试验台额定功率30千瓦,额定转速1500转/分,调速范围为6,功率复盖系数为10,受试减速箱(试件)传动比的适应范围为0.78~8.03~120.9(无级)。试验台已投入使用,运行情况良好,现将试验台的电气控制系统加以介绍。

本文于1987年10月30日收到。

### 一、试验台方案的选择

能够满足上述要求的，具有较高技术、经济指标的试验台方案，有以下三种，它们都是电气传动的能量回输方案。

图1为交流电能回输方案之一，采用绕线式异步电动机驱动试件减速箱，转差功率  $SP_M$  和通过试件的试验功率  $(1-S)P_M$  分别通过两个有源逆变器送回交流电网。

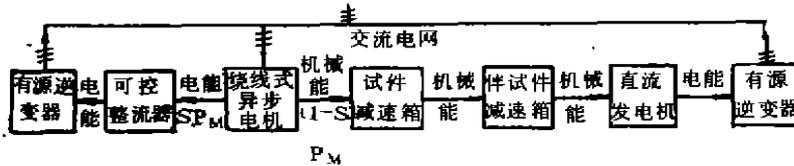


图1 交流电能回输方案之一

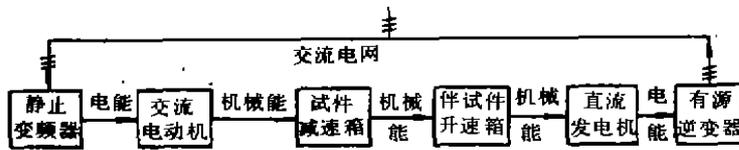


图2 交流电能回输方案之二

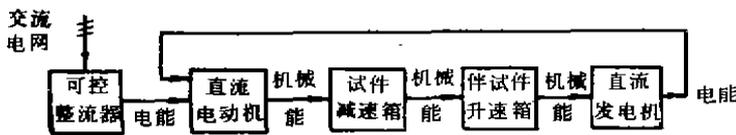


图3 直流电能回输方案

第二，直流电动机调速、调功性能优越，技术成熟、简易。故决定采用图3所示的直流电能回输方案。

### 二、双发电机组的等效处理

直流电能回输方案中电动机与发电机的联接关系如图4所示。

两个电机电枢并联，旋转轴也通过机械传动互相啮合，两电机的电气变量（ $U$ 、 $I$ 、 $E$ ）和机械变量（ $n$ 、 $M$ ）互相紧密相关。这样一个特殊的调节对象，以下简称“双电机组”。双电机组行为的分析是构成试验台电气控制系统的基础。

图2为交流电能回输方案之二，用鼠笼式异步电动机或同步电动机作为驱动电动机，而电动机的电源使用静止变频器以使试验台获得调速性能，此方案不设置转差功率回输环节。

图3为直流电能回输方案，其特点是采用直流电动机驱动试件，通过试件的试验功率被直流发电机转换为电功率后，不是通过有源逆变器送回交流电网，而是就近馈入直流电动机。可控整流器的作用是将交流电能变为直流电能，向直流电动机供电，以补充系统的损耗。

比较上述三种方案：第一，直流电能回输方案能量传输回路环节最少，可望取得最大的能量利用系数，节能效果最佳〔1〕。

$$K_{利} = \frac{\text{试验功率}}{\text{补充功率}} = \frac{\eta_{\text{回路}}}{1 - \eta_{\text{驱动}}}$$

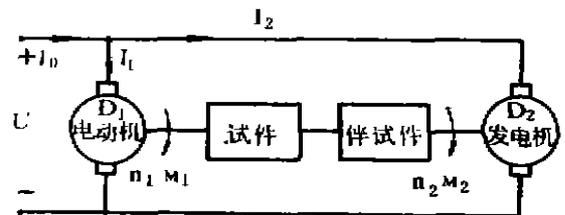


图4 双发电机组联接图

## 1. 双机组的传递函数

双机组的原始方程如下:

$$U = I_1(R_1 + L_1S) + (Ce\phi)_1 n_1 \quad (1)$$

$$U = I_2(R_2 + L_2S) + (Ce\phi)_2 \times \frac{1}{j} n_1 \quad (2)$$

$$(C_M\phi)_1 I_1 + \frac{1}{j} (C_M\phi)_2 I_2 = \frac{GD^2}{375} S n_1 + M_0 \quad (3)$$

式中,  $U$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $n_1$ 、 $M_0$  均为对应量的拉氏变换;

$R_1$ 、 $L_1$ 、 $(Ce\phi)_1$ 、 $(C_M\phi)_1$  分别为电动机  $D_1$  的电枢电阻、电枢电感、电势常数和力矩常数;

$R_2$ 、 $L_2$ 、 $(Ce\phi)_2$ 、 $(C_M\phi)_2$  分别为发电机  $D_2$  的电枢电阻、电枢电感、电势常数和力矩常数;

$GD^2$  和  $M_0$  是折算至电动机  $D_1$  轴上的双机组全部飞轮力矩和机械损耗力矩;

$j = \frac{n_1}{n_2}$  为电动机与发电机的转速比。

为突出主要关系, 下文均忽略系统的机械损耗力矩  $M_0$ 。令  $M_0 = 0$ , 联解(1)~(3), 得

$$\begin{aligned} & \frac{GD^2}{375} (R_1 + L_1S)(R_2 + L_2S) S n_1 + (C_M\phi)_1 \\ & \times (Ce\phi)_1 (R_2 + L_2S) n_1 + \frac{1}{j^2} (C_M\phi)_2 (Ce\phi)_2 \times (R_1 + L_1S) n_1 \\ & = (C_M\phi)_1 (R_2 + L_2S) U + \frac{1}{j} (C_M\phi)_2 \times (R_1 + L_1S) U \end{aligned}$$

上式为三阶方程, 人为地配置电枢电阻  $R_1$ 、 $R_2$ , 使

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2} = T \quad (4)$$

则可使上述方程降为二阶:

$$\begin{aligned} & \frac{GD^2}{375} R_1 R_2 (1 + TS) S n_1 + \left[ (C_M\phi)_1 (Ce\phi)_1 \times R_2 \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{j^2} (C_M\phi)_2 (Ce\phi)_2 R_1 \right] n_1 \\ & = \left[ (C_M\phi)_1 R_2 + \frac{1}{j} (C_M\phi)_2 R_1 \right] U \quad (5) \end{aligned}$$

$$(5) \text{式两边同时除以} \left[ (C_M\phi)_1 (Ce\phi)_1 R_2 + \frac{1}{j^2} (C_M\phi)_2 (Ce\phi)_2 R_1 \right]$$

得到:

$$(T'_M TS^2 + T'_M S + 1)n_1 = \frac{1}{(Ce\phi)'} U \quad (6)$$

式中:

$$T'_M = \frac{GD^2}{375} \frac{(C_M\phi)_1(Ce\phi)_1}{R_1} + \frac{1}{j^2} \frac{(C_M\phi)_2(Ce\phi)_2}{R_2} \quad (7)$$

称为双发电机组的等效机电时间常数, 其表达形式与单电机的机电时间常数 $T_M$ 相似。

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \frac{R}{(Ce\phi)(C_M\phi)}$$

式中:

$$(Ce\phi)' = \frac{\frac{(C_M\phi)_1(Ce\phi)_1}{R_1} + \frac{1}{j^2} \frac{(C_M\phi)_2(Ce\phi)_2}{R_2}}{\frac{(C_M\phi)_1}{R_1} + \frac{1}{j} \frac{(C_M\phi)_2}{R_2}} \quad (8)$$

称为双发电机组的等效电势常数, 与单电机的电势常数 $Ce\phi$ 相对应。

由(6)式可获得磁通恒定时的双发电机组转速 $n_1$ 对电压 $U$ 的传递函数。

$$\frac{n_1(S)'}{U(S)} = \frac{\frac{1}{(Ce\phi)'}}{TT'_M S^2 + T'_M S + 1} \quad (9)$$

(9)式与普通他激直流电动机的传递函数形式完全相同。由此导出结论:

- ① 双发电机组等效为一台他激直流电动机, 等效条件是(4)、(7)、(8)式。
- ② 可以引用典型的直流电动机速度、电流双闭环速度调节系统等现成技术。

### 三、双发电机组的稳态分析

在(6)式中, 令 $S \rightarrow 0$ , 得到双发电机组的稳态转速 $n_1(\infty)$

$$n_1(\infty) = \frac{U}{(Ce\phi)'} = U \cdot \frac{\frac{(C_M\phi)_1}{R_1} + \frac{1}{j} \frac{(C_M\phi)_2}{R_2}}{\frac{(Ce\phi)_1(C_M\phi)_1}{R_1} + \frac{1}{j^2} \frac{(Ce\phi)_2(C_M\phi)_2}{R_2}} \quad (10)$$

$$\text{或} = \frac{U}{(Ce\phi)_1} \cdot \frac{1 + \frac{R_1}{R_2} \frac{\frac{1}{j}(C_M\phi)_2}{(C_M\phi)_1}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \left[ \frac{\frac{1}{j}(C_M\phi)_2}{(C_M\phi)_1} \right]^2} \quad (11)$$

$$\text{或} = j \frac{U}{(C_e\phi)_2} \cdot \frac{1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{(C_M\phi)_1}{\frac{1}{j}(C_M\phi)_2}}{1 + \frac{R_2}{R_1} \left[ \frac{(C_M\phi)_1}{\frac{1}{j}(C_M\phi)_2} \right]^2} \quad (12)$$

导出(11)式及(12)式时，使用了关系式

$$\frac{(C_e\phi)_1}{(C_M\phi)_1} = \frac{(C_e\phi)_2}{(C_M\phi)_2} = 1.03$$

但不要求满足(4)式，即不要求配比。

下面对(10)~(12)式进行讨论：

$$A, \text{ 令 } x = \frac{\frac{1}{j}(C_M\phi)_2}{(C_M\phi)_1} = \frac{\frac{1}{j}(C_e\phi)_2}{(C_e\phi)_1}$$

$x$  可称为发电机  $D_2$  与电动机  $D_1$  的折合磁通比，或简称磁通比。

若  $x = 1$ ，即  $\frac{U}{(C_e\phi)_1} = j \frac{U}{(C_e\phi)_2}$ ，电动机  $D_1$  理想空载转速等于发电机  $D_2$  的理想空载

转速。（折合值，下同）

由(11)及(12)得出双电机组的稳态转速

$$n_1(\infty) = \frac{U}{(C_e\phi)_1} = j \frac{U}{(C_e\phi)_2}$$

即双电机组在  $M_0 = 0$  时的稳态转速等于电动机或发电机的理想空载转速。在这种情况下，自然又有  $I_1 = 0$ ， $I_2 = 0$ ， $I_0 = I_1 + I_2 = 0$  及  $M_1 = 0$  和  $M_2 = 0$ ，系统即无机械损耗（已假定  $M_0 = 0$ ）又无电气损耗。

$$B, \text{ 若 } x = \frac{\frac{1}{j}(C_e\phi)_2}{(C_e\phi)_1} < 1,$$

$$\text{或 } \frac{U}{(C_e\phi)_1} < j \frac{U}{(C_e\phi)_2}$$

电动机  $D_1$  的理想空载转速小于发电机  $D_2$  的理想空载转速。

由(11)和(12)式可知

$$\frac{U}{(C_e\phi)_1} < n_1(\infty) < j \frac{U}{(C_e\phi)_2}$$

即双电机组的稳态转速介于电动机理想空载转速与发电机理想空载转速之间。

$$C, \text{ 若 } x = \frac{\frac{1}{j}(C_e\phi)_2}{(C_e\phi)_1} > 1 \text{ 或 } \frac{U}{(C_e\phi)_1} > j \frac{U}{(C_e\phi)_2} \text{ 电动机 } D_1 \text{ 的理想空载转速大于发电}$$

机  $D_2$  的理想空载转速。

由(11)及(12)式可知

$$\frac{U}{(C_e\phi)_1} > n_1(\infty) > i - \frac{U}{(C_e\phi)_2}$$

即双发电机组的稳态转速低于电动机的理想空载转速，高于发电机的理想空载转速。电动机 $D_1$ 处于电动状态，其机械输出功率就是输入试件的试验功率，经试件和伴试件传递，此机械功率馈入运行于发电状态的发电机 $D_2$ 。这时电流 $I_1 > 0$ ，力矩 $M_1 > 0$ ，试件处于扭矩加载状态； $I_2 < 0$ ，发电机 $D_2$ 输出的直流功率回输送入直流电动机 $D_1$ ；总电流 $I_0 = I_1 - |I_2| > 0$ ，以便向双发电机组补充功率，以弥补增大了的电气损耗与机械损耗。

#### 四、扭矩加载方式的选择

由前述可知，在忽略机械损耗力矩的条件下，只要使折合磁通比 $x > 1$ ，就可以使试件进入扭矩加载状态。可以选择两种方式进行扭矩加载，方式一：发电机增磁，同时电动机减磁；方式二：发电机增磁，而电动机恒磁。本试验台采用方式二。先进行有关的数学分析：联解(1)式和(6)式，令 $S = 0$

$$I_1(\infty) = \frac{U - (C_e\phi)_1 n_1(\infty)}{R_1} = \frac{n_1(\infty) [(C_e\phi)' - (C_e\phi)_1]}{R_1}$$

代入(8)式中 $(C_e\phi)'$ 之值得：

$$M_1(\infty) = \frac{1}{R_2} (C_M\phi)_1 (C_e\phi)_1 \cdot n_1(\infty) \cdot \frac{x^2 - x}{1 + \frac{R_1}{R_2} x}$$

$$\text{令 } K(x) = \frac{x^2 - x}{1 + \frac{R_1}{R_2} x} \text{ 为加载系数} \quad (13)$$

加载系数 $K(x)$ 与折合磁通比的关系见表1。

表1

$K(x)$ \ $x$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\frac{R_1}{R_2} = 0.8$	0	0.0585	0.122	0.191	0.264	0.41
$\frac{R_1}{R_2} = 1.0$	0	0.0523	0.0109	0.170	0.233	0.300
$\frac{R_1}{R_2} = 1.2$	0	0.0474	0.0883	0.152	0.209	0.268

电动机 $D_1$ 的稳态电磁转矩

$$M_1(\infty) = \frac{1}{R_2} (C_M\phi)_1 (C_e\phi)_1 \cdot n_1(\infty) \cdot K(x) \quad (14)$$

由(14)式可知，如果采用方式二，在忽略机械损耗转矩情况下，电动机的电磁转矩 $M_1(\infty)$ （近似等于试件的输入扭矩）与转速和加载系数的乘积成正比。由于在扭矩加载过程

中，速度调节系统将维持转速恒定，故采用方式二，扭矩加载只与加载系数 $K(x)$ 成正比。  
(注)

由上述推证，如果采用方式一，加载时电动机要减磁，根据(14)式，电动机的转矩与容量不能充分发挥。其次，电动机要减磁，电动机的磁路不允许饱和，这就必须增加电动机铁心和整个电机的尺寸和体积，再次，双面调磁比之单面调磁，将使控制电路复杂、分析、设计更加困难。故本试验台采用电动机恒磁发电机加磁的扭矩加载方式，实践证明，这种选择是正确的。

### 五、试验台电气控制系统框图

1. 图5上半部分为速度调节系统，下半部分为扭矩调节系统，试验台的转速和扭矩可以分别独立给定。

2. 速度调节系统是典型的电流速度双闭环系统，但调节对象——双电机组——的参数 $T'_{\omega}$ 、 $(C_e\phi)'$ 、将随 $GDF$ 、 $i$ 、 $\phi_2$ 变化，参数 $T'_{\omega}$ 、 $(C_e\phi)'$ 随 $\phi_2$ 变化体现了扭矩调节系统对速度调节系统的影响。

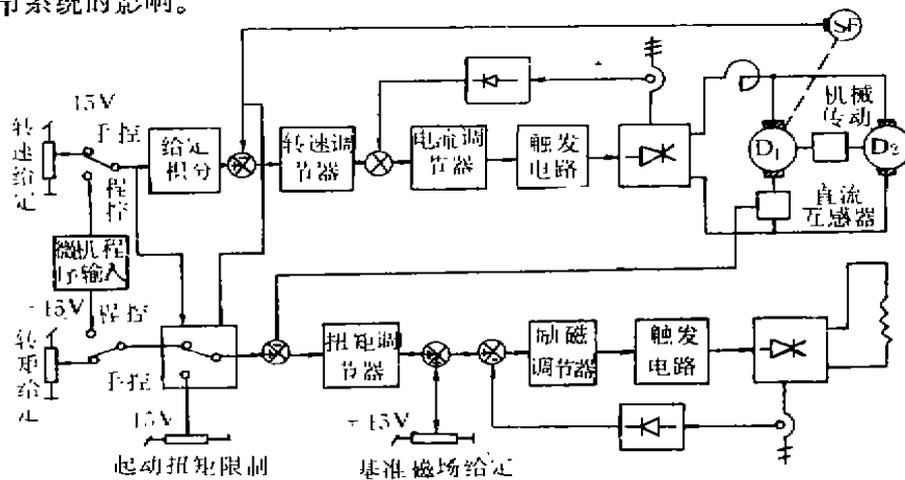


图5 试验台电气控制系统框图

3. 扭矩调节系统也是非线性系统，除开发电机 $D_2$ 磁场特性的非线性之外，稳态扭矩 $M_1(\infty)$ 对磁通 $\phi_2$ 的关系也是非线性的，(参看(14)式)，(14)式也体现了速度调节系统变量 $n_1$ 对扭矩调节系统的影响。

4. 扭矩调节系统中的模拟开关是由窗口比较器和晶体管模拟开关构成的。其作用是在试验台转速急剧变化时，取消外加扭矩给定，代之以一个固定小扭矩给定，以限制扭矩传感器弹性轴的过大惯性力矩。在起动过程中，这一环节保证电动机和发电机都运行于电动状态，使系统“同步起动”，故这一环节可称为起动扭矩限制器。

注：若不忽略机械损耗力矩 $M_0$ ，则

$$M_1(\infty) = \frac{1}{R_2} (C_M\phi)_1 (C_e\phi)_1 n_1(\infty) K(x) + \frac{M_0}{\frac{R_1}{R_2}x + 1}$$

## 六、试验结果

图6~图9给出了系统的示波图( SC-16光线示波器拍照的复制件, 扭矩和转速的数值是用JSG转矩转速功率仪读出的)。由图6可以决定系统稳态转速的稳定性误差:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1500 - 1500}{1500} = 0\% \quad (\text{负载扭矩从} 11\text{N}\cdot\text{m} \text{变为} 189\text{N}\cdot\text{m})$$

由图7可以决定系统稳态扭矩的稳定性误差:

$$\frac{\Delta M_1}{M_1} = \frac{197.08 - 196.69}{196.69} = 0.2\% \quad (\text{系统转速从} 1503\text{r}/\text{min} \text{变为} 234\text{r}/\text{min})$$

由图8和图9所示的起动过程可知, 无论稳态扭矩给定值的大小如何, 系统始终以固定的直线过程平滑加速, 电动机输出扭矩  $M_1$  保持一个不大的恒定值(约  $84\text{N}\cdot\text{m}$ ), 这是“同步起动”性能所要求的。

## 七、结论

上述分析已为试验台的实践所证实, 本试验台能量利用效益很高, 节能效率显著, 证明采用直流电能回输方案是正确的; 由于双电机组等效于一台他励电动机, 本试验台首次采用型号不同, 转速相异的两台直流机组成双电机组; 由于转速比  $i$  连续可调, 本试验台首次突破了试件和伴试件必须成对试验的框框, 而且和机械变速相结合, 使本试验台首次达到试件传动比可在  $0.78 \sim 120.9$  范围内变动的极宽适应性; 由于首次采用单面调磁的扭矩加载方式, 本试验台线路结构得以简化; 运行稳定, 不足之处在于, 由于调节对象的非线性、由于速度调节系统与扭矩调节系统的互相关联, 使系统行为的分析和系统设计的优化具有很大的难度, 尚需进一步深入研究。

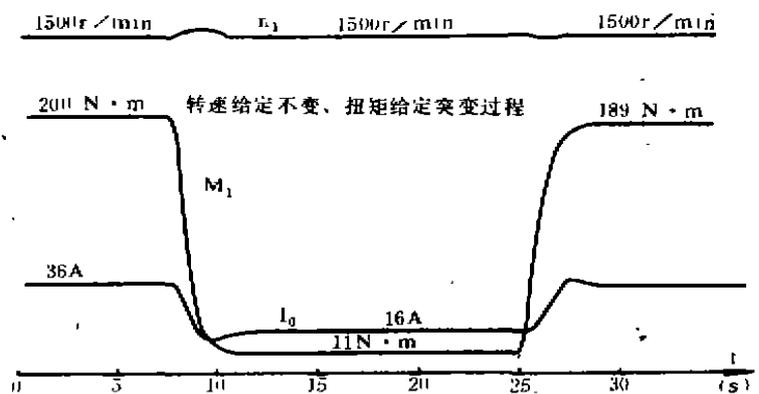


图6 扭矩给定突变过程

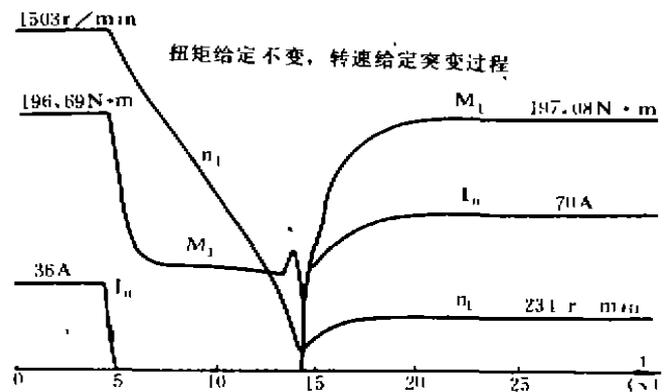


图7 转速给定突变过程

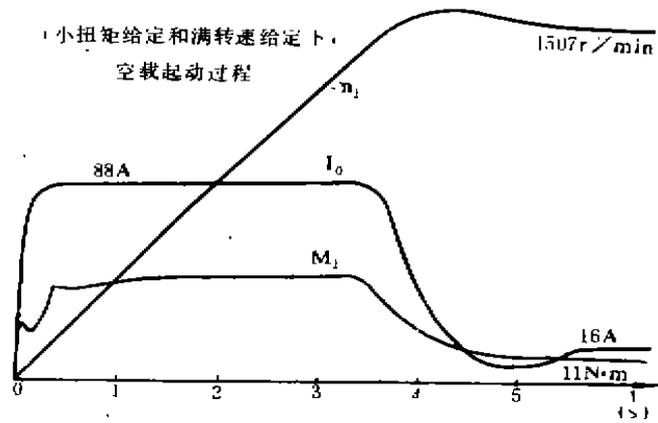


图8 空载起动过程

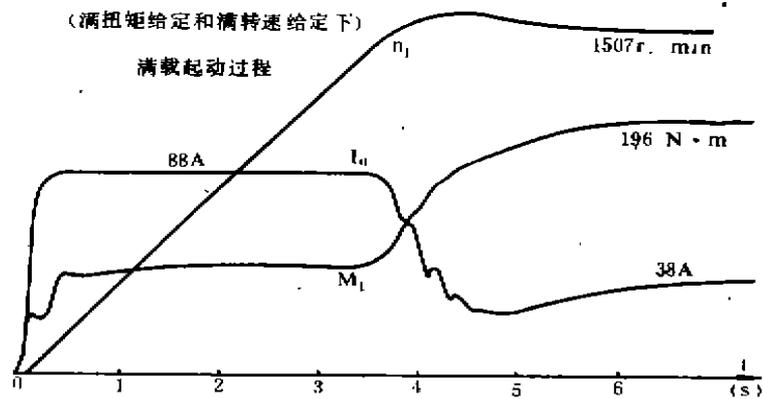


图9 满载起动过程

## 参考文献

- [1] 胡荫林, 王世隆. 多功能机械传动试验台能量回馈效益及宽适应性分析. 重庆大学学报, 1988, 11(3): 97~103
- [2] 杨兴瑶. 电动机调速的原理及系统. 水利电力出版社, 1979: 101~103