

· 工程应用 ·

16 95-100

# 机、电封闭兼用式机械传动 试验台控制系统的研制

The Electric Control System of Mechanical Transmission  
Test-bed With Mechanical Closed Cycle And Electric Closed Cycle

唐卓尧  
Tang Zhuoyao

石晓辉  
Shi Xiaohui

张光辉  
Zhang Guanghui

王明渝  
Wang Mingyu

TH132

(重庆大学自动化系, 重庆, 630044; 第一作者 33 岁, 讲师, 在读博士生)

**A** **摘要** 给出了机、电封闭兼用式传动试验台电气控制的原理及系统构成。该系统由变速驱动控制器、电动机、发电机、逆变器及微机组成。能同时应用于电封闭式传动试验台。该试验台通过微机对系统进行实时监测和转速、扭矩控制,并能模拟试件实际工况进行试验。文中给出了弱磁串调、逆变器控制原理,计算和实验数据及曲线,并分析了逆变效率及解决方案。

**关键词** 机械寿命试验; 变速装置; 逆变器

中国图书资料分类法分类号 TP227.1

机械传动, 传动试验台

电封闭式

**ABSTRACT** This paper presented the principle and combinations of the mechanical transmission test-bed with mechanical closed cycle and electric closed cycle. This system is composed of variable velocity driver, motor, generator, inverter and computer. It can be used both in mechanical closed cycle test-bed and electric closed cycle test-bed. The test-bed can keep a realting monitoring over the system and control the rotational speed and torque by computer. It can also simulate the real work condition of the test and to do the test. In this paper, the diminishable magnetization velocity modulation, invertible control, the test data and curve, and the inverting efficiency as well as control scheme and presented.

**KEYWORDS** mechanical endurance tests; speed-varied devices; inverter

## 0 引 言

电封闭式传动试验台具有布置灵活、对试验尺寸规格适应性强等特点,但它受电机功率和增速箱传动比限制,因而相对研制费用较高。机械封闭式试验台则有节能、设备投资少,能以较少功率的电机进行较大功率的试验等特点。但对某些试件不如电封闭试验台方便且要

求试件必须成对配置。本文叙述了一套即可布置成电封闭试验台,又能布置成机械封闭试验台的机、电兼用式机械传动试验台,它同时具有电封闭试验台和机械封闭试验台的优点,且两种类型的试验台共用一套电控、机械及计算机控制系统,因而能以最少的费用得到最佳的使用性能。但对试验台电控系统提出了较高的要求。为此,本文研制的电控系统具有以下特点:

- 1) 电动机与发电机的电控系统相互独立,即能配合使用,又可各自单独使用;
- 2) 电封闭与机械封闭试验台共用一套驱动控制系统;
- 3) 发电机输出的电能通过逆变器回馈电网,能量利用率高;
- 4) 不需电动机与发电机转速相等或接近,即不需要机械系统总传动比为1;
- 5) 系统反应时间短、控制精度高,能利用计算机控制系统使试验台模拟试件的实际工况进行试验。

## 1 试验台组成及控制原理

如图1所示,试验台是由电动机、驱动控制器,发电机、逆变器、转速扭矩传感器、被试品(齿轮)及主机、打印机等组成。从主控制台输出控制指令(如转速 $n_s$ 及扭矩 $T_s$ ),由驱动控制器控制电动机转速 $n_m$ ,逆变器及发电机控制电动机的输出力矩 $T_m$ 。

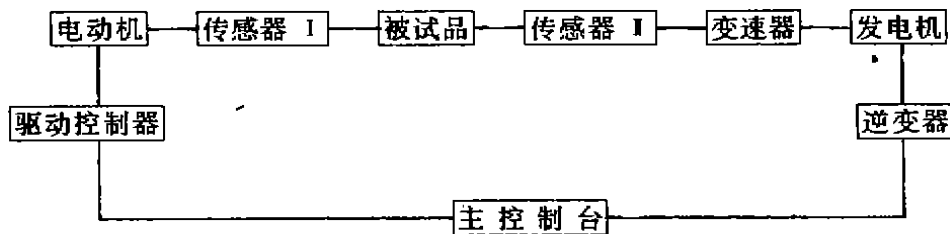


图1 试验台系统组成框图

设电动机出力 $T_m = K_m I_m$ ,发电机反力矩 $T_g = K_g I_g$ ,并设电动机到发电机采用刚性联接,忽略机械摩擦及非线性因素的影响,加在发电机轴上的驱动力矩 $T = K' T_g = T_g$ ,则下式成立

$$I_g = \frac{K' K_m}{K_g} I_m = K I_m \quad (1)$$

其中  $K = K' K_m / K_g$

由(1)式看出,只要控制发电机输出电流 $I_g$ ,即可控制电动机电枢电流 $I_m$ ,即控制电动机出力。而发电机输出电流 $I_g$ 就是逆变电流 $I_N$

$$I_N = \frac{U_g - U_i}{R_x} \quad (2)$$

$U_g$ :发电机输出电压; $U_i$ 逆变电压; $R_x$ :回路电阻 $I_N$ 又直接决定了逆变器输出到电网的电流,

即：
$$I_o = 0.816W_K I_{IF} = 0.816W_K K I_{Dn} \tag{3}$$

式中  $I_o$ —— 逆变回馈电网相电流；  
 $W_K$ —— 逆变变压器变比

所以试验台测试系统的损耗为

$$P_{损} = 3U_o(I_{IN} - I_o) \tag{4}$$

系统的转速由驱动控制器进行控制(图 1).

## 2 在弱磁区的串级控制驱动器

直流电动机的基速(本系统  $n_{基} = 1500 \text{ rpm}$ ) 以下的调速控制是一门非常成熟的控制技术,即调节电枢电压的电流——转速串级(或双环)控制.由于本系统要求调速范围宽,转速从  $300 \sim 3000 \text{ rpm}$  连续可调,且当  $n = 1500 \sim 3000 \text{ rpm}$  时进行恒功率控制,为了实现两个控制区域的平滑过渡,该驱动器在电流——转速串级控制的基础上,附加了一个以励磁电压作为动作变量的控制环(图 2),该环的目的是当转速超过基速时( $n_{基} = 1500 \text{ rpm}$ ),限制电枢的感应电压.

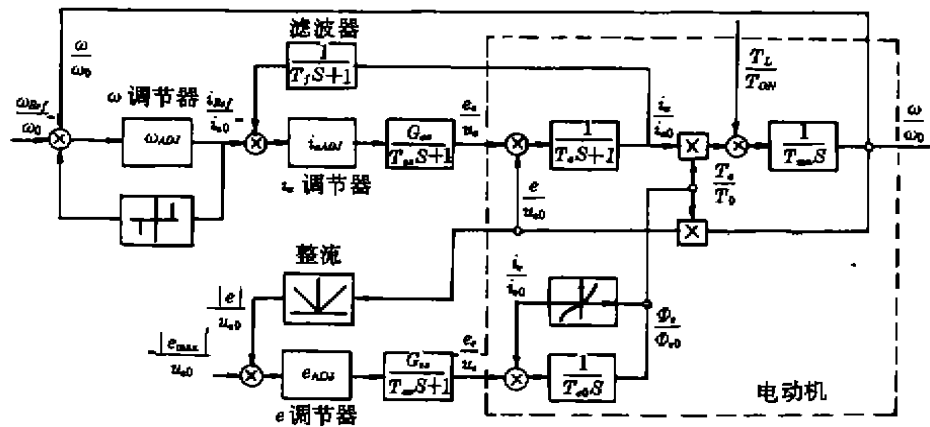


图 2 直流电动机电枢控制及弱磁控制图

图 2 采用传递函数的方式描述了直流电动机电枢控制及弱磁控制的原理.电机磁路采用非线性模型描述.

对弱磁控制,可利用测量得到的电压和电流值,按照下面的电压方程来重构感应电压的反馈信号

$$e = U_a - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt} \tag{5}$$

为此该驱动器中采用一个模拟计算电路(图 2 中未画),这个信号在可逆传动中经整流后得到,将它与一个恒定的参考输入量  $|e_{max}| \approx 0.9 u_a$  比较,然后由感应电压调节器(e)调节励磁

电压力图消除这个偏差。然而,只要电动机还运行在基速以下,反馈信号就不可能达到参考输入电压值, $e$ 调节器输出饱和,使励磁电源产生最大的励磁电压,这正是电枢控制区所需达到的目的。当转速增加时,感应电压 $|e|$ 可能接近参考输入值 $|e_{max}|$ ,一旦到达平衡点后, $e$ 调节器就开始变化,使励磁电压下降,以限制感应电压,于是自动地按照要求来减弱磁场(图2)。

图2是一个复杂而高度非线性的控制系统,设计该系统时对图2进行必要的简化,即:由于弱磁区 $e$ 的响应速度很快,而使 $e$ 在该运行区近似为一恒定的外加电压;由于 $e$ 调节器工作在弱磁区(线性区),故忽略磁路非线性影响。 $e$ 调节器采用PI调节器,取调节器的超前时间常数与电动机的励磁时间常数相等,则由余下的调节器积分项去对消纯滞后的时间。

由图2及附录A给出的电机参数,我们给出一组空载反向过渡过程仿真结果(图3),其中转速在 $\pm 1.5\omega_0$  ( $\omega_0 = 157.08 \text{ rad/s}$ )之间变化。从图3b的曲线上可看到 $e$ 控制的效果是非常显著的。

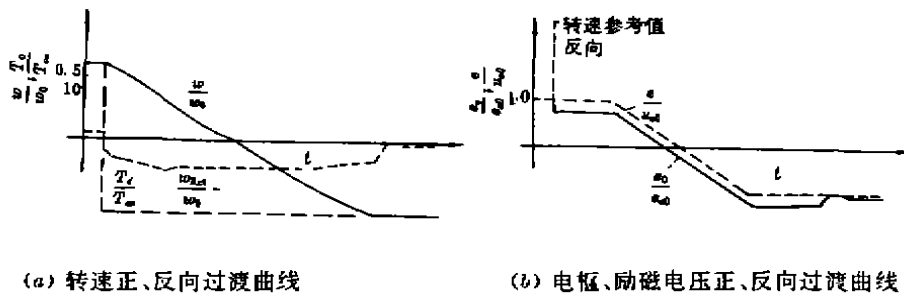


图3 驱动控制器反向过渡过程的仿真曲线

由于该驱动系统用于试验台速度控制,对快速性能要求不高,用户更关心的是调速的稳定性。图4给出该弱磁调速装置稳态时 $\Delta n/n$ 与转速的变化曲线。

从图4看出,当转速 $n \geq 300 \text{ rpm}$ 时,转速稳态误差 $e\% \leq 1\%$ ,满足用户使用要求。

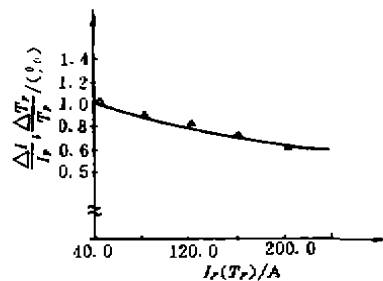


图4 转速误差曲线

### 3 逆变控制器

逆变就是把直流电转化成交流电。

该试验台的逆变控制器就是把直流发电机输出的直流电反送到交流电网,实现电封闭控制。图5示出逆变器、发电机传递函数框图。

已知,欲实现电能回馈,必须有直流电存在,该系统由发电机提供。逆变和整流是一个可逆过程。在由晶闸管组成的静止功率变换器中,实现逆变控制是十分方便的。在可控硅桥式电路中,当控制 $0 < \alpha < \pi/2$ 时,处于整流状态,当 $\pi/2 < \alpha < \pi$ 时,电路处于逆变工作状态,此时 $U_d = -2.34U_0 \cos \beta (\alpha + \beta = \pi)$ 。

由图5及附录A给出的发电机参数,对逆变控制器的特性也进行了仿真研究,图7给出

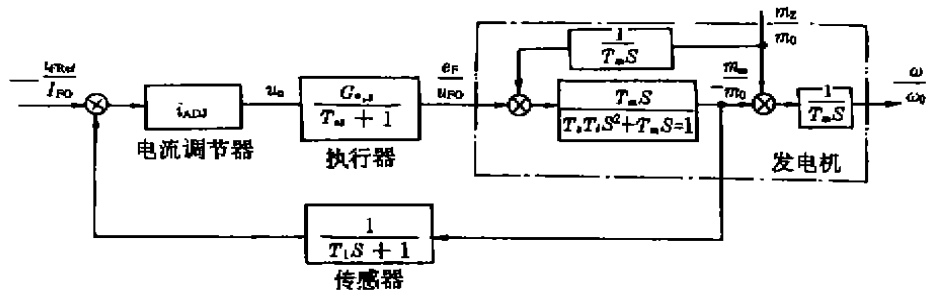


图 5 逆变控制原理框图

逆变控制中发电机输出电流(负载电流或力矩)稳态误差变化曲线。试验台采用逆变电封闭系统,原因之一是控制加减载方便,原因之二是节省电能。在分析变流装置效率时,应同时考虑功率效率和变流因数。然而对变流装置,其功率因素  $\cos\varphi$  是逆变装置效率的直接反应。对逆变系统,当逆变角为  $\beta$  时:

逆变电压:

$$U_{\alpha\beta} = -U_{\alpha 0} \cos\beta - \Delta U_{\alpha} \quad (6)$$

式中  $\Delta U_{\alpha} = \frac{3X_B}{\pi} I_{\alpha}$  变压器涌抗压降,  $U_{\alpha 0} =$

1.35 $U_{21}$ , 变压器付边线电压有效值。

逆变有功功率和无功功率分别为

$$P = (-U_{\alpha 0} \cos\beta - \Delta U_{\alpha}) I_{\alpha} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = K_1 U_{\alpha 0} I_{\alpha} \sqrt{1 - 1/k_1^2 (\cos\beta + \Delta U_{\alpha}/U_{\alpha 0})^2} \quad (8)$$

若忽略换相重叠角( $\gamma = 0$ ), 则  $K_1 = \pi/3$ . 将  $Q/S$  与  $P/S$  或  $U_{\alpha}/U_{\alpha 0}$  的关系示于图 7. 对本系统, 取  $\beta_0 = 30^\circ$  (最小值), 则  $OB = -U_{\alpha 0} \cos\beta_0/U_{\alpha 0}$ .

$$OB_1 = \frac{U_{\alpha}}{U_{d_1}} = \frac{-U_{\alpha 0} \cos\beta_0}{U_{d_1}} - \frac{\Delta U_{\alpha}}{U_{\alpha 0}} \quad (9)$$

有功功率为(功率因数)

$$OB_1 = \frac{P}{S} = \frac{-U_{\alpha 0} \cos\beta_0}{S} - \frac{\Delta U_{\alpha} I_{\alpha}}{S} \quad (10)$$

根据附录给出的电机有关参数( $\beta_0 = 30^\circ$ ) 时)

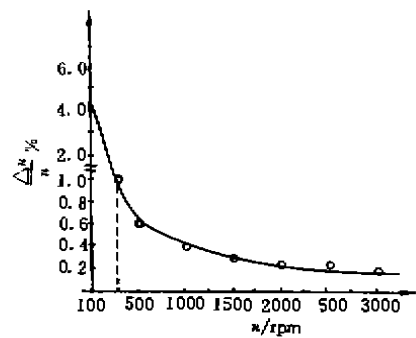


图 6 逆变器稳态运行负载电流(力矩)误差曲线

$$\frac{P}{S} = \cos\phi \approx -0.816 \tag{11}$$

从图7中看出,随着逆变角 $\beta$ 的增大( $\beta_0 < \beta_1$ ),有功功率( $|P|$ )减少,无功功率( $Q$ )增大,功率因数降低,系统损耗增大。为了提高逆变器的功率因数,必须减少逆变角 $\beta$ (考虑逆变保护,取 $\beta_0 = \beta_{min} = \pi/6$ ),然而 $\beta$ 值是由逆变电压(即发电机输出电压 $U_r$ )决定的,逆变电压 $U_i (= U_r)$ 与发电机转速有关( $U_r = Ce\phi R_r$ ),为了在试验台整个调速范围(300~3000 rpm)内,始终保证 $U_r - U_i$ 接近等于 $U_{rmax} - U_{imax}$  ( $U_{imax} = U_{d0} \cos \alpha / 6$ )则逆变器保持在最大的效率下运行。图1中的变速器就较好地解决了当电动机转速较低时发电机仍可获得很高转速(很高 $U_r$ )的问题。

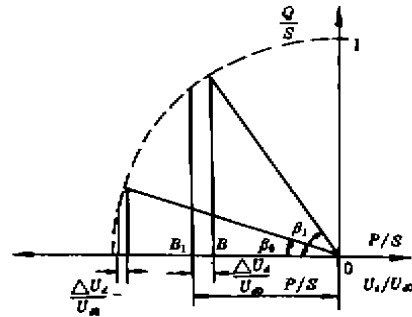


图7 逆变器功率因数

### 4 用PC机实现系统监测及控制

试验台有一台386微机对试验系统进行监测和控制。系统运行速度及加减载控制指令可直接由键盘输入,并通过微机A/D接口电路输出控制驱动转速及加减载力矩大小。各种运行参数如转速,力矩及温度等,通过传感器I、II送入微机进行存贮、处理并可打印运行结果。

### 5 结论

本文给出的大功率电封闭机械试验台在工厂已进行了工业试验。实验表明,该试验台不仅可进行任意的转速调节,而且可方便地对系统进行加减载控制,通过微机控制,可以模拟试件实际工况进行试验。是一种集机、电于一体的先进试验设备。

#### 附录

电动机  $P = 55 \text{ kw}, 1140\text{V}, 1500 \text{ rpm}$   
 $R_{\Sigma} = 0.1644 \Omega, I_r = 140 \text{ A}$   
 $L_r = 3.2 \text{ mH}$

发电机  $P = 55 \text{ kw}, U_r = 220 \text{ V}$   
 $n_r = 1500 \text{ rpm}, I_r = 284 \text{ A}$   
 $R_{\Sigma} = 0.02622, L_{\Sigma} = 6.5 \text{ mH}$

#### 参考文献

- 1 朱孝录. 齿轮的试验技术与设备. 北京:机械工业出版社,1988,12,2~25
- 2 W. Leonhard. control of electrical drives. Springer-Verlag. 1985,30~80
- 3 陈伯时. 自动控制系统,北京:机械工业出版社,1982,65~87