

# 基于双馈式异步电机的内燃机测功机的研制\*

黄文新<sup>1</sup> 史文诗<sup>2</sup>

(1. 盐城工学院 电气工程系 江苏 盐城 224003 2. 盐城市水利局 江苏 盐城 224003)

**摘 要** 测功机为内燃机试验的重要设备,用于测试其转矩及油耗。介绍了一种新型的交流电力测功机的构成方案,应用双馈式交流异步电机作为测功发电机,同时兼具电动起动及研磨功用。通过测量电机的电磁功率及角速度来间接测算电机转矩。系统运用了单片微型模糊控制技术,使该新型测功机能自动运行,可大大提高劳动效率,从而有可能取代非自动的测功机并将得到广泛的应用。

**关键词** 电力测功机;双馈式异步电机;模糊控制

中图分类号:TM359.6

文献标识码:A

文章编号:1671-532X(2002)01-0005-05

目前,在中小型内燃机的出厂试验中,交流电力测功机能够吸收被试内燃机的机械功率,并将其转化为电能返送回电网。因其为节能产品,可逐步取代非节能的水力测功机而得到广泛应用。普通平衡式交流电力测功机本质上为一台超同步运转的异步发电机<sup>[1]</sup>。其定子为轴承活动支撑,可在一定角度范围内偏转。在试验时,采用杠杆平衡砝码法,加减砝码,改变内燃机的负载转矩,同时再调节油门达到所要求的试验转速。工人再根据所挂砝码计算出转矩,功率。这种电力测功机虽有结构简单、价廉的优点,但有 2 个主要的缺点:①不能实行自动运行,试验的全过程均由工人手工操作,效率低,劳动强度大。②不能在内燃机从低速到高速整个运转范围内为其提供负载转矩,吸收机械功率返送电网,只有当内燃机拖动其转子超过同步速时,方可提供阻转矩吸收其发出的机械功率,即不能在低于电机同步速的转速下进行负荷试验。现有一些能进行大速度范围试验的电力测功机采用了交流同步发电机,再由整流、逆变功率变换电路将电能馈入电网。显然要求功率线路的容量很大。若需求交流发电机兼具电动功能,则功率线路要能双向传递电能,控制复杂,成本较高。一般用于内燃机的产品形式试验台上,在内燃机的出厂试验上采用,则不经济。

本文提出一种新型内燃机电力测功机构成方案,完全可克服普通电力测功机的 2 个缺点,可对内燃机进行全工况试验。

## 1 系统构成特点

该系统构成方案如图 1,主要由测功发电机、晶闸管变流器、整流器与整流变压器、起动电阻、油门伺服机构、8032 单片机控制检测电路及键盘显示电路等部分构成。

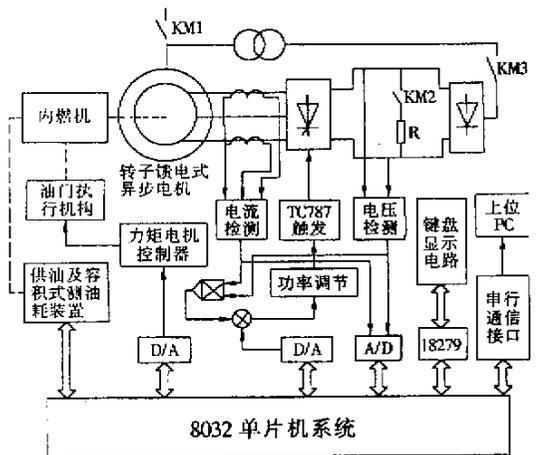


图 1 系统构成方案

Fig.1 The Configuration of the Proposed System

\* 收稿日期 2001-04-16

作者简介:黄文新(1966-)男,江苏东台市人,盐城工学院副教授,南京航空航天大学在职博士研究生。

因采用新的测转矩原理,测功机发电机摒弃了改动定子结构,采用绕线式异步电机作测功发电机。采用绕线式电机的目的是能向转子馈电。普通绕线式异步电机 YR 系列没有 2 极电机,本系统选择同步速为 1500 r/min 的 4 级电机,在内燃机与电机间应配减速器,减速器的速比应这样确定,能将所要试验的内燃机额定转速降至 1400 r/min 左右。若专用于中小型柴油机测功,因其额定转速在 2800 r/min 以下,则可向电机厂家定制转子绕组端部固定加强的 2 极电机,可不用减速器。转子绕组回路经电刷滑环接晶闸管变流装置,控制其触发角,可使其运行于可控整流状态,以起动电阻为其负载,电机作串电阻调速电动运行,可实现较佳的起动过程,并可实现电动反拖冷磨。完成电动运行后,切除起动电阻,接入整流电路,控制变流器触发角使其运行于逆变状态,将整流器输出的直流电逆变至转子回路,转入发电状态,吸收内燃机的机械功率。这种发电状态属于绕线式异步电机的转子馈电式亚同步发电制动状态<sup>[2]</sup>。向转子馈入的电能为转差功率  $sP_e$ ,内燃机输入机械功率为  $(1-s)P$ ,由转子传递到定子的则为电磁功率  $P_e$ ,扣除定子损耗后,将电能送入电网。

当试验内燃机运行于额定转速时,本系统测功发电机的转差率为 0.1~0.2,这使得逆变器在向转子电路馈入电能时能依靠较高的转子电势自然换流。这也是本系统设计为在测功时使绕线式异步电机运行于亚同步发电状态的原因,否则,在接近或越过电机同步速时,转子的感应电势接近于零,逆变器需要强迫换流电路,且很难从转子滑环端取得转子电势同步信号,需加装转子电势相位检测器,这将增加系统的复杂性。可见本系统的构成特点既比较简单,又能完全满足需要。内燃机出厂试验项目额定工况试验时,输出额定功率、额定转矩,电机转差率小于 0.2,所以变流器容量设计为电机容量的 20% 即可,这要比发电—整流—逆变型测功机的容量小得多(内燃机出厂试验不作低速大扭矩试验,如需要则变流器容量要根据需要加大)。因电能直接由异步发电机进入电网,从而该系统对电网的谐波污染要少得多。

## 2 转矩的检测原理

内燃机试验时,要测量并显示出转速、转矩。系统中采用间接法测量转矩,由测功发电机的运

行参数计算得到,可省去价格昂贵的转矩传感器。

在测功运行时,双馈异步电机处于亚同步发电制动状态。这时直接回路电压方程可以写成

$$U_{di} = 2.34sE_{2D}\cos\beta + I_d\left(\frac{3X_Ds}{\pi} + 2R_D\right) + 2\Delta U \quad (1)$$

式中, $U_{di}$ 为电网电压经整流变压器降压整流后再经平波电抗后输入给逆变器的直流电压。 $s$ 为转差率, $E_{2D}$ 为异步电机转子空载电势( $s=1$ 时), $\beta$ 为逆变角, $R_D$ 、 $X_D$ 为折算到转子侧的每相漏抗, $\Delta U$ 为晶闸管压降, $I_d$ 为输入逆变器直流电流。由此式可见,若试验时系统以某一转速运转,即  $s$  不变,则改变逆变角  $\beta$  可改变电流  $I_d$ ,相应地转子电流以  $I_{2r}$  也发生改变,从而改变了电磁转矩。也就是改变逆变角  $\beta$  可容易地实现对试验内燃机加减负载。绕线式异步电机亚同步发电状态的机械特性表达式见文献[2],是与  $\beta$ 、 $s$  有关的函数,该表达式复杂,系统不以机械特性表达来求取转矩。

亚同步发电运行时,转差功率可表示为输入给逆变器的直流功率与转子回路损耗之差,即

$$sP_e = sT_e\Omega_1 = U_{di}I_d - 3I_{2r}^2r_2 - 2\Delta UI_d \quad (2)$$

$I_{2r}$ 为转子相电流有效值。因为逆变电路工作于方式 1,则转子电流的有效值

$$I_{2r} = \sqrt{\frac{2}{3}}I_d \approx 0.816I_d \quad (3)$$

根据检测的  $I_{2r}$  与  $U_{di}$  及转差率  $s$ ,通过公式(2)、(3),单片机可计算出电磁转矩  $T_e$ 。电流与电压的检测采用常规方法。由于系统运行时电机转差率大于 0.1,不接近同步速,因测定转差率时可不计电网频率的微小波动,认为是 50 Hz 不变,通过测定转子回路感应电势的频率来计算转差率  $s$ 。转子电势频率的测定方法是利用转子三相感应电势的过零脉冲,每周期有 6 个脉冲输出,经二分频脉冲整形电路,送入单片机的 INT1 引脚,以定时器 T1 在门控方式下工作去测脉冲宽度,计算得出转子频率。并可由此算得电机转速与内燃机转速。这样可省去速度传感器。系统设计时,以系统要吸收的最大功率及其运行转速变化范围,并考虑防止逆变颠覆  $\beta_{\min} = 35^\circ$ ,来选择电机及整流变压器的容量、直流环节电压等级以及变换器的容量等电气参数。

## 3 控制方案

内燃机出厂试验一般进行低速轻载磨合,高

速半载及额定工况等几个试验阶段。时间为 2 h。普通交流电力测功机因其功能所限,不能进行低速轻载试验,不能自动转换试验过程,不能方便地模拟某些负载的负载特性,如泵类负载试验,

路面负载试验等。该新型测功机采用双馈式异步电机作测功发电机,运用单片机控制,功能大大增强。如可对某内燃机按表 1 所列项目进行全自动试验。

表 1 某型内燃机的试验阶段

Table 1 The Testing Stage of a sort of Engine

项目	冷磨	轻载	额定	路面试验			
阶段	1	2	3	4	5	6	7
$t/\text{min}$	30	40	30	6	7	3	4
$n/(\text{r}/\text{min})$	1500	1800	2000	油门固定位置不变(输入 0 表示)			
$p/\text{kW}$		2.2	8.8				
$M/(\text{N}\cdot\text{m})$				30	10	0	42

本系统采用一片单片机 8032 作为其控制核心,扩展一片可编程键盘、显示控制接口芯片 8279,可由键盘输入各个试验阶段要求的转速功率时间。16 位数码 LED 显示分成 5 组,4 位显示内燃机转速,3 位显示功率,3 位显示转矩,3 位显示稳定运行工况之油耗(系统采用容积法测定油耗<sup>[1]</sup>),3 位显示试验进行的时间,系统最大试验时间定为 199 min,这样可将时间最高位 8 位数码管的除显示“1”的另外 6 段引出,可用作 6 个信号灯的驱动信号,指示系统的运行状态。8279 的使用使系统有良好的人机界面,并使单片机不必顾及显示扫描,实时紧凑地运行系统监控程序。单片机的定时器 T0 工作于方式 2(自动重装初值),用于 0.5 ms 定时基准,为单片机内部计时信号,计量试验时间,并且控制主程序利用之控制运行周期。定时器 T2 用于波特率发生器。采用多位 A/D 转换芯片 ADC0809 测量电压与电流,单片机以中断方式(接 INT1)读入转换结果。

在内燃机的每个试验阶段中(除冷磨),要求测功机按试验要求提供恒定的负载转矩(此转矩数值由输入的试验要求得到),并由油门伺服机构控制油门大小,调整内燃机到所要求的试验转速,亦即系统需分别控制负载转矩与内燃机转速(油门)满足试验要求。转速为机械量,其变化相对比较缓慢,转矩调节快速,但易受电网电压波动等因素的干扰。在本系统中对转矩调节与转速的控制采用了不同的控制策略。转矩调节采用数字 PI 转矩调节外环与模拟 PI 逆变功主经调节内环相结合的双闭环调节系统。内燃机为热力机械,其油门调节与转速变化关系复杂,故本系统采用模糊控制技术进行油门控制,调节转速。

### 3.1 转矩调节

前面已指出,调节转矩是通过调节逆变角  $\beta$  的大小来改变转子电流,从而改变电机转矩。控制电路结构见图 1。单片机算出某阶段所要保持的转矩值作为给定值。检测直流环节电压、电流值,经 A/D 转换送入单片机,并由此刻检测到的转速,单片机可算出电机的电磁转矩,与给定值比较得转矩偏差,经数字增量式 PI 调节作用,再由 D/A 转换输出作为模拟功率 PI 调节器的给定值。功率调节器输出供给集成晶闸管触发芯片 TC787 的移相控制电压<sup>[3]</sup>。增设模拟功率调节器作为内环,可起两个作用:①消除突现的电网电压波动或其他干扰因素的影响。由式(2)可见,若能保持逆变功率不变,则可基本保持恒定转矩这一试验条件;②此环节中可具备输出限幅电路,以免单片机受干扰时由硬件确保逆变角不低于  $\beta_{\min}$ ,防止逆变颠覆。

### 3.2 转速调节

内燃机的某些试验阶段要求以一恒定的转速运行。由于测功机的试验对象可能是多种型号的内燃机,性能不尽相同,显然采用 PID 调节器来调节转速难以整定或调整其参数。在用普通测功机由人工进行内燃机试验时,不论何种内燃机,试验工人可凭经验根据转速的偏差的大小及转速的大致变化趋势,用手工调节油门的大小来比较快地达到试验要求的转速。譬如,工人的某个调节经验是:转速低于要求值且仍有降低的趋势,则将油门开得比较大一些。对此,采用基于人工调节经验总结的 FUZZY 控制器来实现对内燃机转速的调节完全可行。本系统的模糊控制器的结构框图如图 2,采用转速的偏差  $E$  与转速的变化率  $\Delta E$  作为模糊控制器的输入量。油门启闭由一台直流

力矩电机控制。模糊控制器的输出量  $U$  为对应直流力矩电机控制器的输入控制电压增量,油门以增量方式调节。

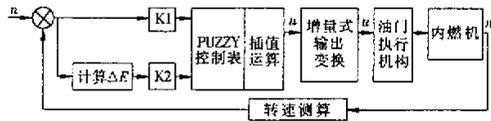


图 2 转速调节框图

Fig.2 The Frame of the Adjustment of the Speed

根据模糊控制器设计的一般方法,本系统对转速偏差  $E$  及其变化率  $\Delta E$  两个输入量以及输出量  $U$  对应的语言变量都分成正大 PL,正中 PM,正小 PS,零 O,负小 NS,负中 NM,负大 NL 等 7 个模糊集。将实际量  $E, \Delta E$  离散至  $(-6, 6)$  区间内,控制量  $U$  的区间为  $[-7, 7]$ 。模糊集隶属函数的形式基本为三角分布,其分布的尖锐程度(反应反映了控制的灵敏度)按零  $\rightarrow$  大的顺序降低,以提高控制的精确性。量化因子的选取基于以下考虑:经实际观测,不同系列不同功率的内燃机的额定转速经匹配的减速器减速后的转速相差不多;汽油机比柴油机的加速性能要好,但其额定转速也高,经相应的不同速比的减速器后的转速变化率也相差不多。因此将转速偏差的量化因子  $K1$  转速变化率的量化因子  $K2$  选择为常数。内燃机有这样的特性,有一定的转速下,内燃机的耗油量与其负荷近似为线形关系,因此工人在进行试验时,当内燃机重负荷时,油门调节幅度就大些;轻负荷时,油门调节幅度小一些。为提高调节性能,量化因子  $K3$  根据内燃机负载率(占额定功率的百分比)进行了修正。根据对人工内燃机测功机测功试验调节过程的实践经验总结,我们得出一控制规则,如表 2。

表 2 模糊控制规则表

Table 2 The Regulation of FUZZY Control

$E$	$\Delta E$						
	PL	PM	PS	O	NS	NM	NL
PL	X	X	NL	NM	NS	O	O
PM	NL	NL	NM	NM	NS	O	O
PS	NL	NL	NM	NS	O	PM	PL
O	NL	NL	NM	O	PM	PL	PL
NS	NL	NM	O	PS	PM	PL	PL
NM	O	O	PS	PM	PM	PL	PL
NL	O	O	PS	PM	PM	X	X

阵,再由  $E, \Delta E$  各档模糊子集的各元素隶属度表,就可按控制规则求出相应得控制决策,然后再按隶属度最大的原则,得到相应的控制量  $U$ ,经过大量的离线计算求出控制表,存于系统单片机存储器中。实际运行时,根据输入量  $E$  及  $\Delta E$  查控制表时采用了二元函数插值算法<sup>[4]</sup>,即当  $E_i < E \leq E_{i+1}, \Delta E_j < \Delta E \leq \Delta E_{j+1}$  时,对应的  $u$  值可用下列公式从控制表中求取

$$U = U_{ij} + \frac{U_{(i+1)j} - U_{ij}}{E_{i+1} - E_i} (E - E_i) + \frac{U_{kj+1} - U_{ij}}{\Delta E_{j+1} - \Delta E_j} (\Delta E - \Delta E_j) \quad (4)$$

$i, j$  指控制表  $i$  行、 $j$  列。采用二元函数插值法可以减少离线推算控制表时由于隶属函数的选取以及某些控制经验规则总结的不当而造成的控制表不佳的影响,还可从本质上消除调节死区,从而提高了控制品质,特别是稳态品质。

要在测功机上试验的内燃机将有多种型号,同一型号的也有因制造装配原因引起的性能差异。内燃机测功机转速控制过程是一个非线性、时变、有干扰、有纯迟后的过程,模糊控制正适合应用于这类数学模型未知或多变的过程。本系统采用单片机实现的模糊控制器当然不能对任何被测内燃机的转速控制都能做到无超调且响应快。但内燃机出厂试验对转速的要求是很不苛刻的,该模糊控制器完全满足系统要求。

### 3.2 系统控制流程

本系统控制软件主程序流程如图 3。

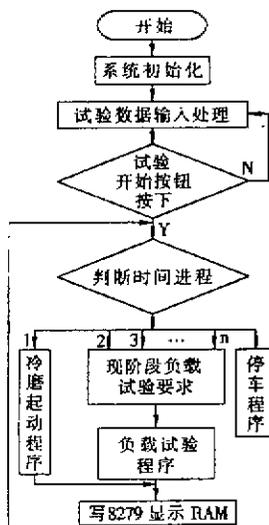


图 3 程序流程图

Fig.3 The Elowchart of the Control Program

根据总结出来的控制规则,即可求出模糊关系矩

首先是系统初始化程序,运转前为试验数据

输入及处理阶段,当查询到试验启动按钮按下后进入内燃机试验阶段。按照试验时间进度来完成各阶段的试验要求。第一阶段为冷磨起动阶段,接触器 KM1 闭合后,KM2 闭合,KM3 打开,KM1、KM2 必须互锁。系统通过控制变流器导通角来改变转子回路等效电阻进行调速,达到规定的冷磨转速。冷磨结束后的起动过程是开启供油电磁阀,控制驱动油门的力矩电机打开油门,使内燃机供油工作,当转速增加 150 r/min 后,认为起动结束,打开 KM2,闭合 KM3。负载试验程序主要功能是根据试验要求调节负载转矩与内燃机转速。另有四个中断服务程序,定时器 T0 中断服务程序的优先级最高,每 0.5 ms 间隔中断一次,主要完成计时,检查容积法测油耗装置的光电管(标志油面高度)的状态。记录容量瓶用完的时间,用于计算单位时间油耗。INT0 中断是由 ADC0809 在 A/D 转换结束时产生,该中断服务程序读取 A/D 转换数值,并改变通路选择开关,启动下一次转换。

参考文献:

- [1] 赵恒侠. 汽车发动机测试技术[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1985.
- [2] 魏泽国. 可控硅串级调速的原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [3] 谭建成. 电机控制专用集成电路[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 孙庚山. 工程模糊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [5] 涂时亮. 单片微机控制技术[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1994.

## Development Study of an New Double-feed Asynchronous Alternating Current Dynamometer

HUANG Wen-xin, SHI Wen-shi

(1. Department of Electrical Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China; 2. Yancheng Water conservancy Bureau, Jiangsu Yancheng 224003, China)

**Abstract:** This paper introduces a new project of AC dynamometer in which double electric feeding induction motor to be used as its dynamo electric machine. Before measuring, this new device can start the engine and can run in it without opening its oil supply. The method of measuring torque is indirect one by means of measuring the working parameters of the motor and then calculating its torque value. Because the advanced FUZZY control technique based on a single-chip microcomputer system has been used to make the new dynamometer run automatically, the production efficiency can be prompted. It is possible that this kind of device will be widely used instead of the unautomatic ones.

**Keywords:** AC power Dynamometer; Double Electric Feeding Induction Motor; Fuzzy control

INT1 引脚为转子电势二分频脉冲,当负跳变时,进入 INT1 中断服务程序。完成读取定时器 T1 的 INT1 为高电平(脉宽)定时的数值。再清零,做好对下一个高电平脉冲测宽的准备。本测功机以 20 mA 电流环的方式于上位机进行串行通讯。上位机(PC机)以“点名”方式与各从机(测功机的 8032)进行数据交换,由串行口中断服务程序完成。

### 4 结论

按本方案研制的转子馈电式交流电力测功机成本低,经济性好,经过试验调整,测试精度完全可满足内燃机出厂试验的需要。

工业生产自动化、节能化是企业不断追求的目标。该种新型转子馈电式交流异步电力测功机的研制正符合这一时代要求,有利于控制内燃机产品质量,提高生产效率,减轻工人劳动强度,有较好的经济效益。