

科技简报

(内部刊物·注意保存)

第 3 期

电子控制高压油泵试验台研制初步总结

唐山市革命委员会生产指挥部科技处

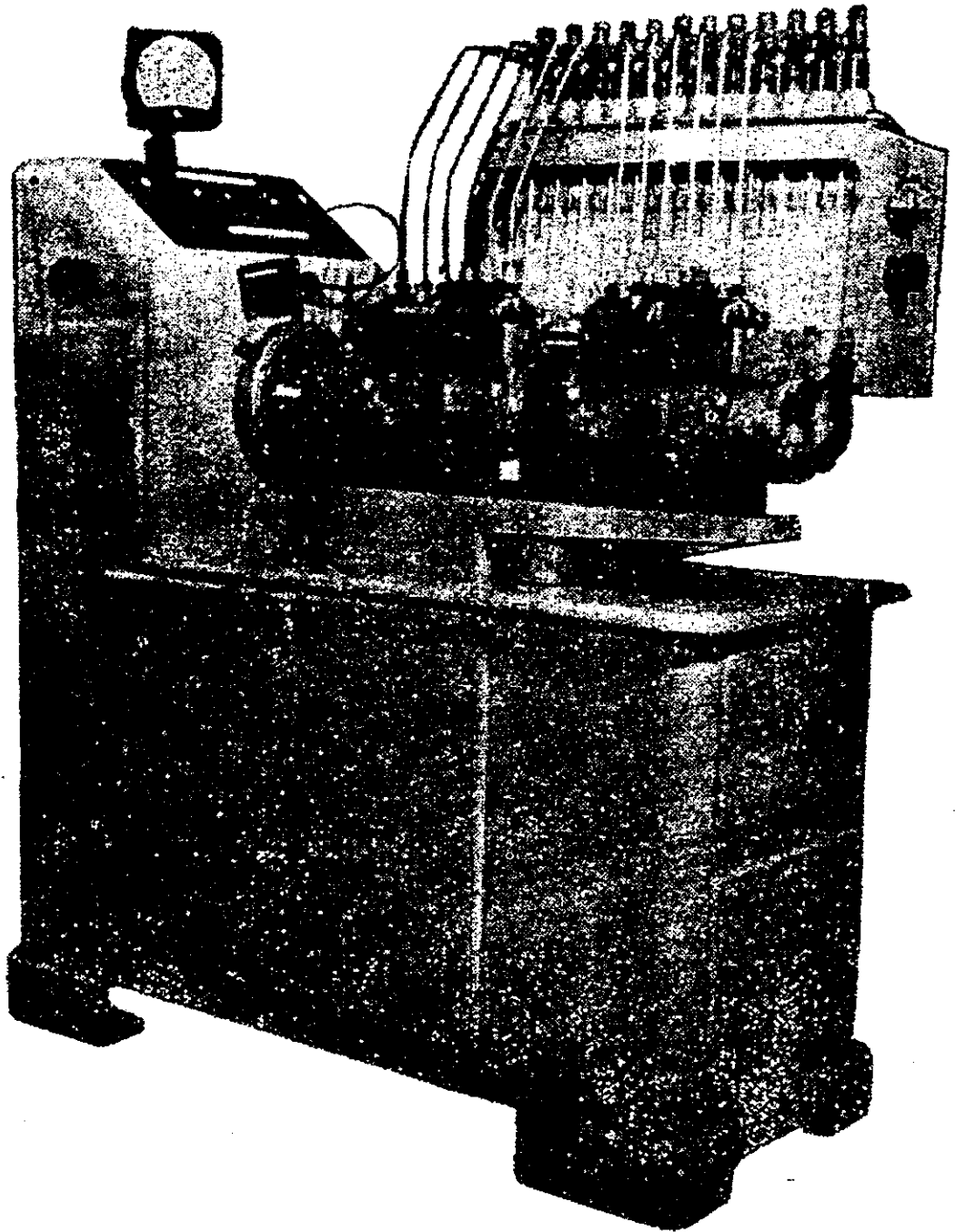
一九七四年十月

毛主席语录

我们的方针要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。



YSD-512 高压油泵试验台外形

目 录

一、前言	(1)
二、油泵调试对转速的控制与测量的要求	(5)
2.1 油泵负载的特点	(5)
2.2 实现无级调速的各种方案	(5)
2.3 转速表	(6)
三、转差离合器	(7)
3.1 各种可控硅调速方案的比较	(7)
3.2 双电枢转差离合器的构造	(7)
3.3 力矩的计算	(8)
四、调速系统	(12)
4.1 调速系统的构成	(12)
4.2 各环节的微分方程和传递函数	(15)
4.3 静差	(17)
4.4 动态特性	(19)
五、计数量油装置及闪光测相装置	(22)
5.1 各种试验台的计数量油装置	(22)
5.2 全部用电子电路的计数量油装置	(22)
5.3 闪光测相装置	(23)
六、试用情况	(24)
七、参考资料	(24)

电子控制高压油泵试验台研制初步总结

唐山市郊区农业机械修配厂

一、前 言

高压油泵试验台是调整、试验柴油机高压油泵的专用仪器，是修、制柴油机及以柴油机为动力的机械的单位的一种必须的关键设备。随着我国工农业、交通运输业的发展，拖拉机、载重汽车、起重吊车、汽船、移动式发电机组、钻机、内燃机车、海轮等日益增多，试验台的需要量也日益增多。

国内外生产的各种试验台，尽管构造上有许多差异，但都包括以下的基本组成部分：

(1) 一个精确的无级变速装置来驱动油泵；(2) 一个精确的转速表；(3) 计算喷油次数并控制闸板的装置和一组量管来计量各缸供油量；(4) 给高压油泵供应低压油的机内输油泵及压力表；(5) 一套测量供油或喷油角的装置，从最简单的毛细管法到电子闪光法；(6) 有的试验台还有各种附件来试验高压油泵的附件。其中无级调速装置可以说是试验台的核心。

我厂是一个柴油机修理单位。1970年，我厂广大革命职工，遵照毛主席“外国有的，我们也要有，外国没有的，我们也要有”；“卑贱者最聪明！高贵者最愚蠢”的伟大教导，研究、制造成功一台全部电子控制的高压油泵试验台。从1970年底开始，投入了小批生产，除我厂修理车间几年来一直使用外，省内外也有许多单位使用。

三年多的实践和理论上的研究，都已证明了这种电子控制的试验台的结构原理是正确的。

无级变速采用了可控硅——电磁转差离合器系统。实践证明，这一系统尽管从机械上和电气上都较简单，却可以达到很高的特性硬度，甚至超过了异步电机的自然硬度^{*}。从这方面说，是各种以异步电机为动力源的调速装置难以做到的。它的道理简单来说是这样的：负载变化时转差离合器本身虽然“丢转”，但是测速装置一“发觉”，马上“通知”可控硅去“补转”，所以结果丢的转非常少。理论和实践都证明了，被动轴惯性矩愈大，丢转愈少，硬度愈高。对许多机械设备而言，传动系统的被动轴惯性大是个缺陷；但试验台本身正是需要大的惯性矩，这个缺点在这里转化成了优点。转差离合器是一种恒转矩的调速装置，转速愈低

* 《电子控制高压油泵试验台》，唐山市郊区农机站。见中国农业机械化科学研究院《农机情报资料》1971年8月，第1期，23页。唐山地区科技局《科技简报》10期，1972年8月，3页。

** 《ZLK—5自动同步转差离合器控制装置》，上海电气成套厂。

输出功率愈小，在机床主拖动之类的场合是不大适用的；但是油泵本身是一个恒转矩负载，所以并不成问题。它的调速手柄是一只普通的电位器旋钮，比各种机械调速装置的手柄都要轻便。这种传动装置除轴承外没有磨损的部位，保养简单，也是其他无级调速装置难以做到的。

计数量油装置采用了以电子脉冲计数器为基础构成的自动控制机构，来代替许多试验台上使用的以蜗轮蜗杆、齿轮等为基础构成的机械计数装置。近年来，用电子电路来代替普通的机械计算装置，已成为一种趋势，不但台式计算机已经改用电子电路，连座钟手表也用数字电路来代替齿轮了。从我厂目前生产的情况看，电子计数器的成本并不高于相应的机械装置，其动作灵活而准确。整个电路采用了积木式装配，便于拆卸检修。

电子闪光测喷油相角的装置国内外好几种试验台都已采用，但都是利用喷油器喷出的油击合一个常开触点来激发闪光的，触点运动时间常常成为误差的来源。我们在1970年试验成功一种机构，利用喷出的油击开一个常闭触点来激发闪光，因此消除了这个误差来源。

虽然这种试验台的基本原理已被证明为正确的，但是，我厂自70年开始生产的YSD—308型试验台，在设计方面尚不完善，工艺上问题也不少，因此，有些使用单位发现故障较多，修理困难，一定程度上影响了使用效果。

此外，生产的发展，又向试验台制造提出了新的课题：

1. 近几年来，我国新系列泵已普遍采用。在各种拖拉机上，新泵已经在很大范围内取代了老式泵。新系列泵需要在100转/分左右的低速下进行起动油量试验，需要进行全程调速性能试验，卡具也和老式泵不同。作为农机试验设备，必须能满足这些要求，而现有的试验台有不少是不能满足这个要求的。YSD—308型试验台在低速时因为转速表刻度是从250转/分开始的而很难进行低速试验。卡具也不方便。

2. 冶金、交通等大量使用柴油汽车的单位，目前非常需要可供试各种汽车油泵的试验台。为此，我厂在73年8月制成了一台5.5千瓦中型试验台，经一年左右的使用，证明它可以满足冶金部门的需要。

3. 柴油机生产厂需要比一般修理单位用的更精密的试验台，我国目前生产的试验台还难以满足需要。

因此，1973年，唐山市革委会科技处下达我厂一项科研任务，研制一种可给冶金、交通部门使用的、各方面都改进了的新型电子控制高压油泵试验台。

在批林整风和批林批孔运动的推动下，在厂党支部和革委会的领导下，我厂革命职工坚持毛主席的“鞍钢宪法”的光辉旗帜，经过一年的努力，已于1973年8月和1974年3月制成了两种新型的电子控制高压油泵试验台。它们比YSD—308型试验台有了以下的改进：

1. 用脉冲式电子转速表代替机械式转速表。它有精度较高、寿命长的特点，且省去了传动部分——软轴或圆锥齿轮。

2. 改进了可控硅——转差离合器调速系统。适当调整了调速系统中的时间常数，在被动轴上加设惯性轮，转速稳定性大为提高。

3. 计数量油装置方面，用电磁感应线圈取代触点，用硅管数字电路取代锗管电路，用

* 见中国农业机械化科学研究院，《农机情报资料》第1期，1971年3月，23—25页。

灵敏继电器和交流电磁铁取代大功率管和直流电磁铁，使电路大为简化，工作可靠性提高，对温度的稳定性提高。

4. 电路安装方面，充分采用了积木式插件，布线都安排在同一块易于检修的平面上。电路工艺也作了较妥善的处理。

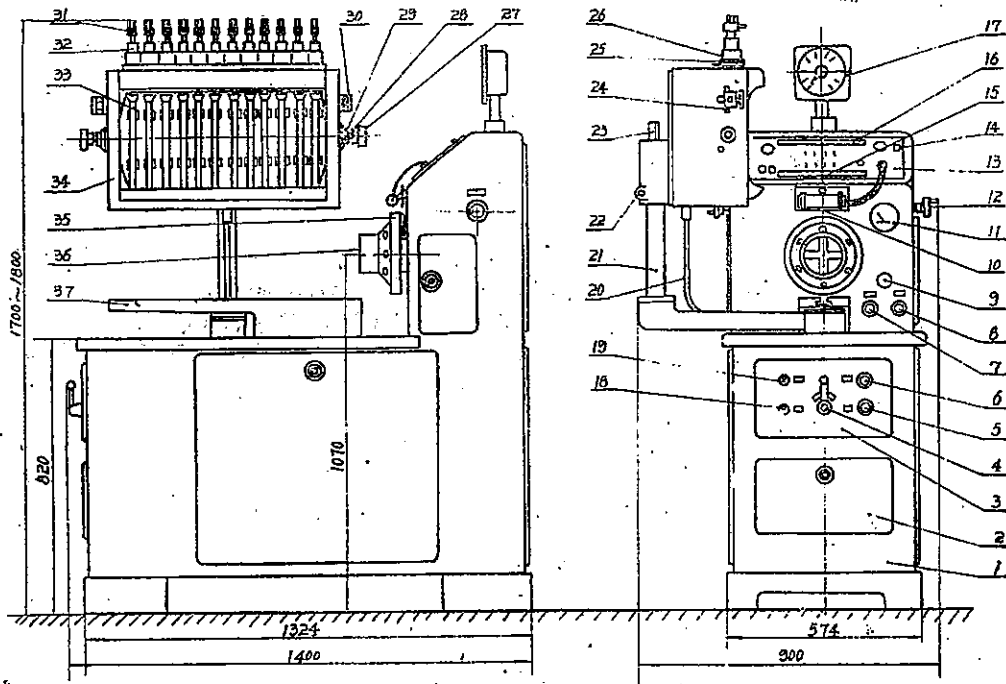
5. 测相装置的机械部分作了改进，增进了角度读数的精度。

6. 集油器改为密封式，有良好的消雾、消沫和排出作用。

7. 卡具和接头采用了圆弧垫块、钢片万向节，可自动定心。

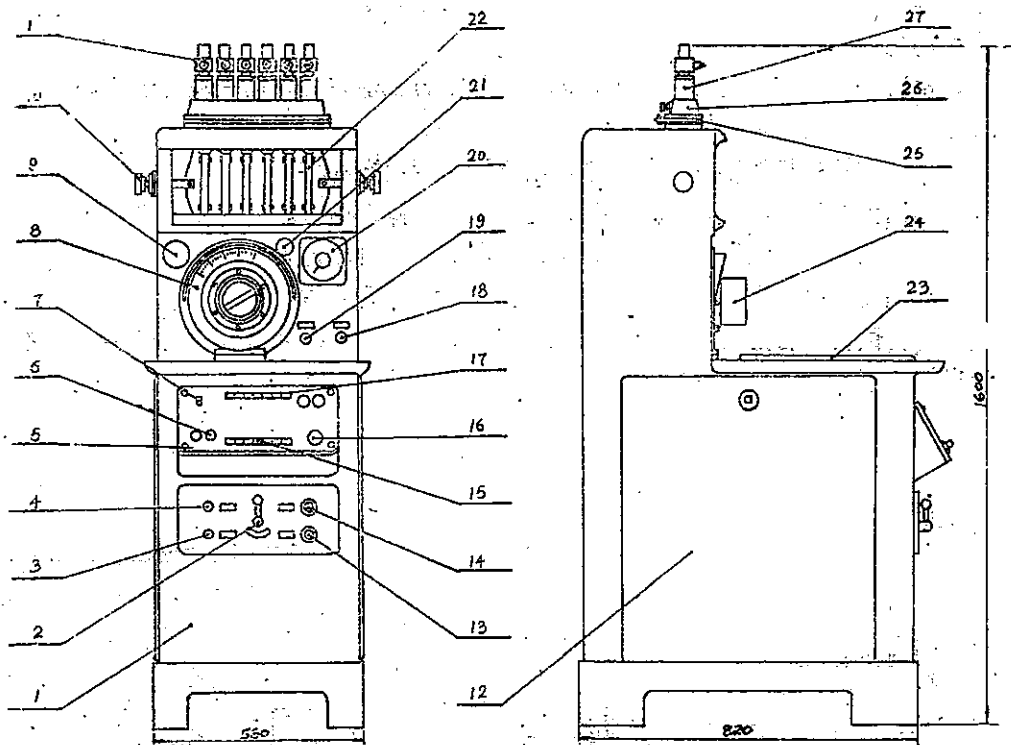
8. 从提高刚度出发，加固了机架的结构，减小了震动。

这两种新试验台暂定名为YSD—512和YSD—306型电子控制高压油泵试验台。它们的主要技术指标如下：



1. 机身 2. 工具箱 3. 电气箱 4. 电源开关兼倒顺开关 5. 停止按钮 6. 起动按钮 7. 回油接头 8. 供油接头 9. 调压阀手柄 10. 闪光管 11. 油压表 12. 调速手柄 13. 控制箱 14. 集油按钮 15. 闪光测相缸位转换开关 16. 计数盘油次数转换开关 17. 转速表 18. 照明开关 19. 输油泵电机开关 20. 回油管 21. 转管 22. 上油箱紧固螺钉 23. 上油箱升降螺钉 24. 电磁铁架 25. 测相触点接线板 26. 集油器定位螺钉 27. 量油管倾倒旋钮 28. 定位盘紧固螺钉 29. 定位盘 30. 电磁铁 31. 喷油器总成 32. 集油器 33. 量油管 34. 测量机构(上油箱) 35. 刻度盘 36. 挠性接头 37. 导轨

图1—1 512型试验台外形



- 1.机身 2.电源及倒顺开关 3.照明开关 4.备用开关(检修用) 5.控制箱 6.熔丝 7.集油按钮
 8.刻度盘 9.油压表 10.量油管倾倒旋钮 11.喷油嘴总成 12.侧门 13.停止按钮 14.起动按钮
 15.闪光测相缸位转换开关 16.调速旋钮 17.计数次数转换开关 18.供油管接头 19.回油管接头
 20.转速表 21.刻度盘微动旋钮 22.量油管 23.导轨 24.接头 25.闪光测相接板 26.集油器架
 27.集油器

图 1—2 306 型试验台外形

型 号	YSD—512	YSD—306
驱动电机	JO ₂ -42-4, 5.5KW	JO ₂ -32-4, 3KW
输出转速	0~1500, 0~3750转/分	0~1400 转/分
可试缸数	12	6
油箱容积	24升	12升
量杯容积	0~30, 0~150ml	0~15, 0~40ml
输油量	4升/分	2.5升/分
输油压力	0~2 公斤/厘米 ²	0.8~1.2公斤/厘米 ²
主轴高度	1070毫米	1070毫米
外廓尺寸: 长	1560	900
宽	880	560
高	1720	1600

现将这两种新型试验台的结构特点、工作原理、设计计算、试制过程中的问题及解决方法、使用情况等作一汇报。由于我们水平很有限,不当之处,请予指正。

灵敏继电器和交流电磁铁取代大功率管和直流电磁铁，使电路大为简化，工作可靠性提高，对温度的稳定性提高。

4. 电路安装方面，充分采用了积木式插件，布线都安排在同一块易于检修的平面上。电路工艺也作了较妥善的处理。

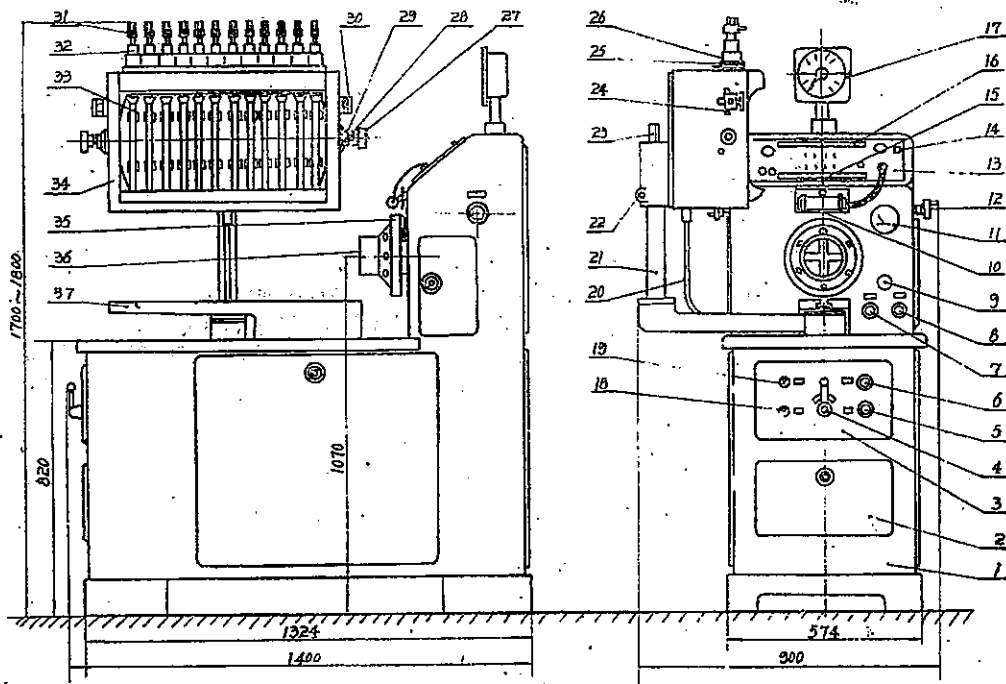
5. 测相装置的机械部分作了改进，增进了角度读数的精度。

6. 集油器改为密封式，有良好的消雾、消沫和排出作用。

7. 卡具和接头采用了圆弧垫块、钢片万向节，可自动定心。

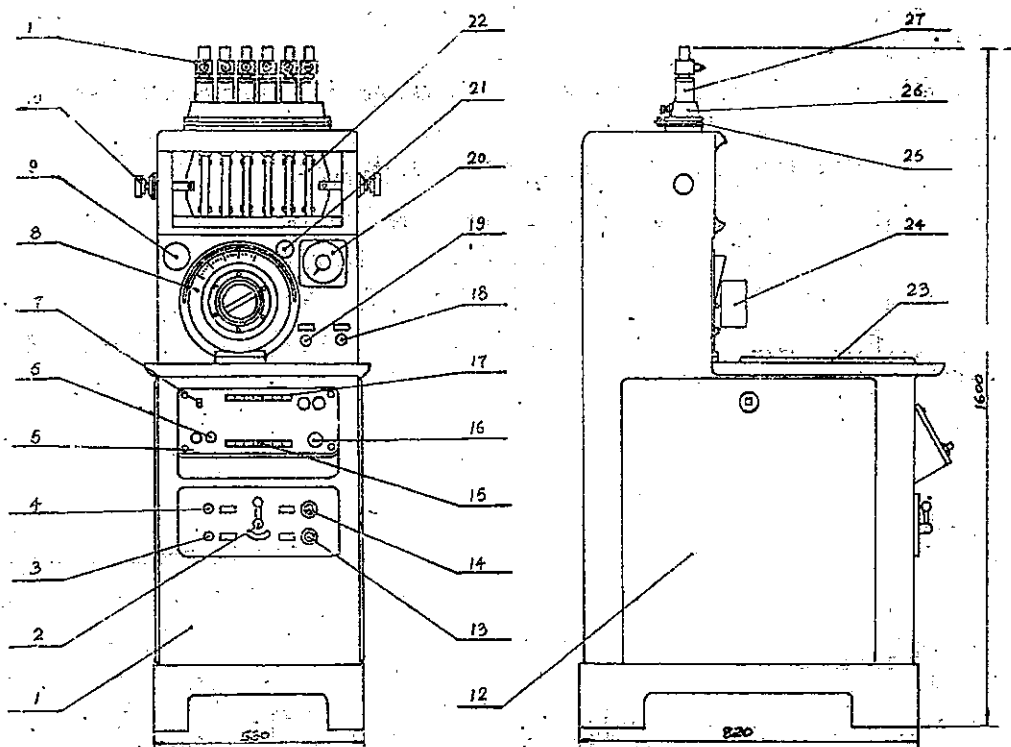
8. 从提高刚度出发，加固了机架的结构，减小了震动。

这两种新试验台暂定名为YSD—512和YSD—306型电子控制高压油泵试验台。它们的主要技术指标如下：



1. 机身 2. 工具箱 3. 电气箱 4. 电源开关兼倒顺开关 5. 停止按钮 6. 起动按钮 7. 回油接头 8. 供油接头 9. 调压阀手柄 10. 闪光管 11. 油压表 12. 调速手柄 13. 控制箱 14. 集油按钮 15. 闪光测相缸位转换开关 16. 计数量油次数转换开关 17. 转速表 18. 照明开关 19. 输油泵电机开关 20. 回油管 21. 转管 22. 上油箱紧固螺钉 23. 上油箱升降螺钉 24. 电磁铁架 25. 测相触点接线板 26. 集油器定位螺钉 27. 量油管倒旋钮 28. 定位盘紧固螺钉 29. 定位盘 30. 电磁铁 31. 喷油器总成 32. 集油器 33. 量油管 34. 测量机构(上油箱) 35. 刻度盘 36. 挠性接头 37. 导轨

图1—1 512型试验台外形



- 1.机身 2.电源及倒顺开关 3.照明开关 4.备用开关(检修用) 5.控制箱 6.熔丝 7.集油按钮
 8.刻度盘 9.油压表 10.量油管倾侧旋钮 11.喷油嘴总成 12.侧门 13.停止按钮 14.起动按钮
 15.闪光测相缸位转换开关 16.调速旋钮 17.计数次数转换开关 18.供油管接头 19.回油管接头
 20.转速表 21.刻度盘微动旋钮 22.量油管 23.导轨 24.接头 25.闪光测相接板 26.集油器架
 27.集油器

图 1—2 306 型试验台外形

型 号	YSD—512	YSD—306
驱动电机	JO ₂ -42-4, 5.5KW	JO ₂ -32-4, 3KW
输出转速	0~1500, 0~3750转/分	0~1400 转/分
可试缸数	12	6
油箱容积	24升	12升
量杯容积	0~30, 0~150ml	0~15, 0~40ml
输油量	4升/分	2.5升/分
输油压力	0~2 公斤/厘米 ²	0.8~1.2公斤/厘米 ²
主轴高度	1070毫米	1070毫米
外廓尺寸: 长	1560	900
宽	880	560
高	1720	1600

现将这两种新型试验台的结构特点、工作原理、设计计算、试制过程中的问题及解决方法、使用情况等作一汇报。由于我们水平很有限,不当之处,请予指正。

二、油泵调试对转速的控制与测量的要求

高压油泵试验台的基础，是驱动油泵的无级调速装置。它要求能在大范围内精确地控制转速，并且有一个精确的转速表。

2·1 油泵负载的特点

油泵的功率消耗，主要是给各个汽缸供油的功率。虽然各种柴油机的油泵差别很大，但是也可以找出近似的规律。根据许多柴油机的统计资料，耗油量是(180~225)毫升/马力·小时，供油压力是(100~200)公斤/厘米²。从此可以计算出柴油机每马力消耗在油泵供油的功率是：

$$N_y = PV/t$$
$$\approx \frac{(180 \sim 225) \times (100 \sim 200) \times 9.8 \times 10^{-2}}{3600} \frac{\text{瓦}}{\text{马力}}$$
$$\approx (0.5 \sim 1.2) \text{瓦/马力}。$$

加上各种磨擦损失在内，一个五百马力的柴油机油泵所消耗的功率，也超不过一千瓦。但是，各种试验台的电机功率，常常超过这个理论功率的几倍。这是因为，被试油泵这种负载有几个特殊性。第一，它要求转速可以在大范围内连续调整并且在任何转速都可以保持高度的稳定性来试验油泵在各种转速下的特性。第二，油泵负载在一转之内不是均匀的。例如，四个柱塞的油泵，功率消耗集中在供油的四个很窄的角度范围内，在其他角度上阻力矩很小。因此必须有足够的扭矩来维持一周内角速度均匀。第三，在运转过程中，常常需要使油泵从空载到满载（不供油和供油）进行转换。在负载变化时，转速不应下降太多以免影响测量精度。第四，由于油泵调速器的作用，在油泵转速一超过额定转速时，在很窄的转速范围内，供油量自动下降，负载由满载过渡到空载。所以，如果调速系统硬度不够高，在调速器开始起作用后，转速就会失去控制而自由上升，在调速器起作用的转速范围内转速稳定不住。所以，油泵试验台一般都留有很大的功率余量。

当转速下降时，每转一圈所作的功——它等于转一圈供油的体积乘以供油压力——，大体上不变，所以油泵在额定转速以下基本上是一个恒扭矩负载。

2·2 实现无级调速的各种方案

虽然，实现无级调速的机构种类繁多，但世界各国的试验台几乎都采用了下列两种方案之一：

1. 开合皮带轮三角带传动。它是通过调整三角皮带轮有效直径的办法来调速的。早期的试验台基本上都采用了这种方案。例如，英国的 Hatrige，苏修的 KO，美国的 Bacharach GP—500，日本的 Iyasaka—DPT—J 和 Banzai DTB—800，我国朝阳农机厂 CN 30—3，沈阳第三机床厂 ZR—2，洛阳农机学院附属工厂的 RS—Q820 等。我国不少农机修理单位自制的试验台也采用这一方案。它的优点是构造简单、传动效率高。目前这类试验台在世界上逐渐被代替的原因之一是它的工效低、劳动强度大，因为在变速时需要用人力输送相当数量的功。

特别是在生产油泵或柴油机的工厂中，这种试验台还不能适应。有的试验台因此还加上一套伺服电机和传动装置来代替手轮，它的构造当然就复杂化了。

2. 液压传动。它是由一只变量叶片泵、一只叶片油马达和附属的液压件构成的。是一种恒扭矩传动装置。比较晚的试验台越来越广泛地采用这种传动方式。西德 Bosch 厂的各种试验台和 Wirbär WP—4, WP—5, 奥地利的 Friedmann & Mayer, 英国的 Merlin 和最近的 Hatrige 试验台, 意大利的 ATMO—700 和 800 等, 我国泰安农机试验设备厂的 66 型、5.5 型、17 型, 保定新生农机厂的 BSY108 型等, 都采用了这种传动方式。它传动稳定性好、噪音小、变速手柄较轻便、变速迅速, 性能是比较好的。但对叶片泵和叶片油马达的材质、加工精度和传动油的质量都有很高的要求, 如果马虎一些, 由于泄漏加大、磨擦生热, 就会引起硬度下降、传动油过热、稳定性变坏和寿命短等问题。

以上两种变速方式都是用异步电机作动力源的, 因此它的硬度不会超过异步电机的自然硬度。

个别的试验台采用了其他的传动方式。日本的 Nissan 试验台采用行星轮无级变速。匈牙利的 Mirköz 试验台采用三相整流子异步电机调速。

提高驱动轴的惯性矩是克服喷油时突然增加的阻力矩、提高转速的稳定性和均匀性的有效措施。* 近几年生产的试验台, 如 Bosch 厂和 Hatrige 厂生产的试验台, 都有意识地加大了主轴的惯性矩。有的在产品说明书上还标有惯性矩的数值作为试验台技术指标之一, 例如 Bosch EFEP375 和 410 惯性矩是 $GD^2 = 1.2 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$, Bosch EFEP385 的惯性矩是 $GD^2 = 1.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$ 。

2.3 转速表

转速的测量是试验台的重要环节。调速器的特性, 对柴油机的正常运行和发挥功率有显著的影响。所以试验台的转速表一般要求精确到 ± 10 转/分。对于某些特殊的柴油机油泵, 例如发电机组的, 精度要求更严格。

目前世界各国的试验台使用的转速表, 有以下三类:

1. 机械式转速表或离心式转速表。它的原理是: 当转速表轴转动时, 轴上的飞锤由于离心力将一个弹簧拉开, 拉开的距离从表针上反映出来, 它与转速成一定的函数关系。它的缺点之一是低速时不灵敏, 因为离心力是与转速的平方成比例的。这种转速表在满度值的 $1/6$ 以下没有刻度。精度也较低。

2. 永磁式转速表。这种转速表的轴上有一块磁钢, 旋转时在一个导体片上引起涡流, 它又受到磁钢的磁力作用, 引起一个与转速成正比的力矩。它的刻度是线性的, 精度较好, 是近来国内外试验台采用最广的。

以上两种转速表的共同缺点是轴的磨损问题。所以它们需要经常加油, 寿命也有限。

3. 电动式转速表。它是由测速发电机和电表组成的。最近国外多种试验台采用了这种转速表。它的磨损部分仅仅是测速电机内的轴承, 所以寿命较长; 它也易于进行校准。

* Test Bench and Smoke Meter Advancements, John Moon, 《Diesel and Gas Turbine Progress》, July—August 1972. P.46.

三、转差离合器

3.1 各种可控硅调速方案的比较

如所周知，利用可控硅电路实现无级变速的方案是多种多样的。常见的有：可控硅直流电源——直流电机系统，可控硅变频装置——异步电机系统，可控硅——转差离合器系统，这三种调速方案在我国许多部门都有采用。现对它们的经济技术指标作一分析比较。

直流电机方案是传统的发电机——电动机机组的后代。设计、调整得当，可以获得很好的硬度和过渡特性。但直流电机是比较昂贵的；由于碳刷磨损，维修量较大。控制装置需要三个大电流可控硅，控制电路也较复杂。（单相供电，电路比较简单，但造成电网三相不平衡，不宜推广。）

变频方案将导致昂贵而庞大的电子设备。它需要九只大电流可控硅和相当复杂的电路。除了造价高和体积庞大以外，可靠性、维修问题不好解决，将给使用单位造成难题。它的硬度受异步电机自然硬度的限制。

转差离合器方案是目前国内各种机械上采用最广的。它的构造最简单，可靠性高，维护也最简便。它可以获得宽广的调速范围（20:1至30:1）。它的弱点是：1. 损失的功率较大。2. 被动部分惯性矩较大。这两个弱点使它在许多场合下不适用。但是对于试验台这种试验设备来说，它开动的持续时间短，功率损失不成为问题；被动部分还需另加惯性轮才能满足试验油泵的需要，惯性大恰是优点；而且，被动部分增大了惯性后，可以使调速的品质（硬度和过渡特性）提高。

因此，我们认为采用转差离合器方案是合理的。

3.2 双电枢转差离合器的构造

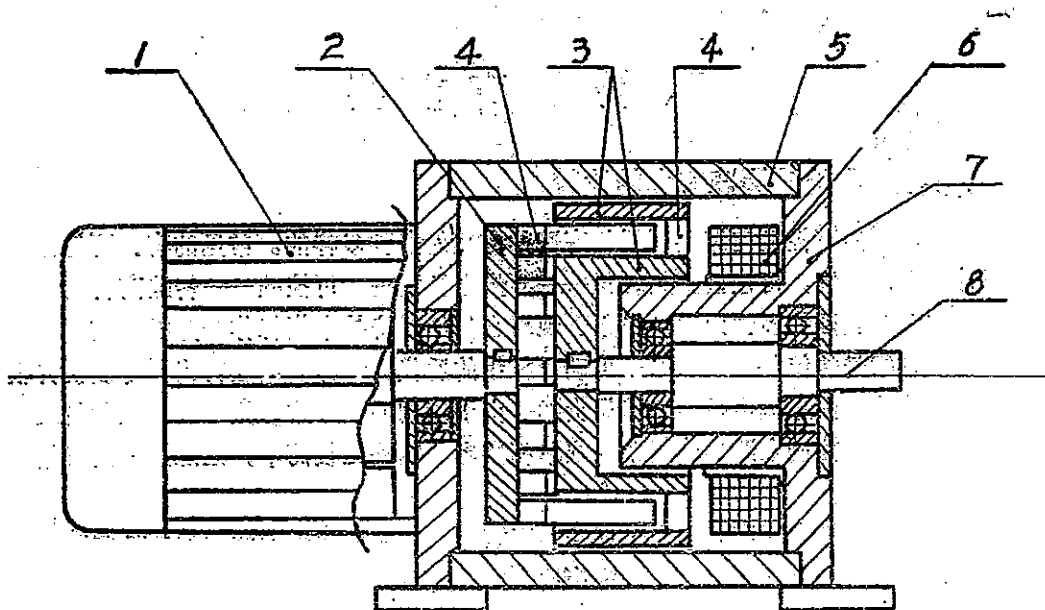
目前国内有两种转差离合器成批生产，一种是上海先锋电机厂的爪极式转差离合器⁽¹⁾，一种是南京变压器厂的双电枢齿极式转差离合器⁽²⁾。它们都是与相应的鼠笼异步电机装在一起的，合称JZT电机或电磁调速异步电机。在10千瓦以下，齿极式的较为简单和可靠。它的构造示意图见图（3.1）。

它的原理粗略地说来是这样的：励磁线圈中通过电流时，将产生磁场，磁力线由导磁套（7）内电枢（3）齿极（2）外电枢（3）经机壳（5）又回到导磁套。齿极随异步电机转动，齿的导磁系数比空气大几千倍，磁力线几乎都由齿通过，因此产生旋转磁场。如果电枢与齿极以相同速度转动，电枢相对于旋转磁场是静止的，就不受力。当电枢转速与齿极转速有差别时，它相对于旋转磁场有转差，在电枢中产生了感生电流。这个电流又受磁场的作用而产生的力矩。力矩的方向是使转差减小。

这个力矩，当转差一定时，是与激磁电流的平方成比例的。因为磁感应强度（即所谓磁

(1) 《电磁调速异步电机》，上海先锋电机厂。

(2) 《电磁调速异步电动机》，南京变压器厂。



1.电机。2.齿极，与电机输出轴联结，共有12个齿。3.内外电枢，与输出轴联结。4.隔磁块，由奥氏体不锈钢制成，与齿极或内外电枢焊成一体。5.外壳。6.励磁线圈。7.导磁套。8.输出轴。

图3.1 电磁调速异步电机（转差离合器及电机）构造示意图

力线密度)与激磁电流成正比,电枢中的感生电流与磁感应强度成正比,而电磁力是等于磁感应强度乘以感生电流。至于力矩与转速差的关系,就比较复杂,因为我们不能忽略集肤效应的作用。电磁学基本理论证明了,交变电磁场只能进入导体表面深度为 δ 的地方:

$$\delta = (\omega\mu\sigma)^{-1/2}$$

δ 是集肤深度。 μ 、 σ 是导体的导磁率和导电率。 ω 是角频率, $\omega = 2\pi \times$ 频率。现在作一估计。设齿极的齿数 $Z = 12$,电枢与齿极的转速差 $\Delta n = 100$ 转/分(这是实际应用中最小的转速差),则 $\omega \approx 125$ /秒。代入上式,并代入软钢的 μ 和 σ ,可得 $\delta \approx 0.8$ 毫米。转差更大时, δ 将更小。就是说,电枢的感生电流实际上只发生在靠近齿极的表面1毫米以内的薄层中。

为了正确地分析转差离合器的设计和工艺过程,我们需要对它的工作原理做进一步的了解。以下,我们从电磁学基本理论出发来研究转差离合器的输出力矩与各种因素的关系。

3.3 力矩的计算

在国际单位系(SI)中,导体的麦克斯韦方程组是:

$$\text{div} \mathbf{B} = 0, \text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{i}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \text{div} \mathbf{D} = \rho, \text{rot} \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}, \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}. \quad (3.3.1)$$

由此可导出导体中的电磁波方程:

$$\Delta \mathbf{B} = \mu \sigma \mathbf{B}, \quad (3.3.2)$$

其中 Δ 是拉普拉斯算子。 \mathbf{i} 也满足同一方程。解电磁场自然可以用圆柱坐标系。(图3.2)。因为齿的长度比宽度大很多,可以忽略端部的影响,根据问题的对称性,可以使方程简化,即只考虑 i_z ,令 $i_r = i_\theta = 0$ 。这样, B_z 也恒等于零。现在我们先计算外电枢受的力矩。

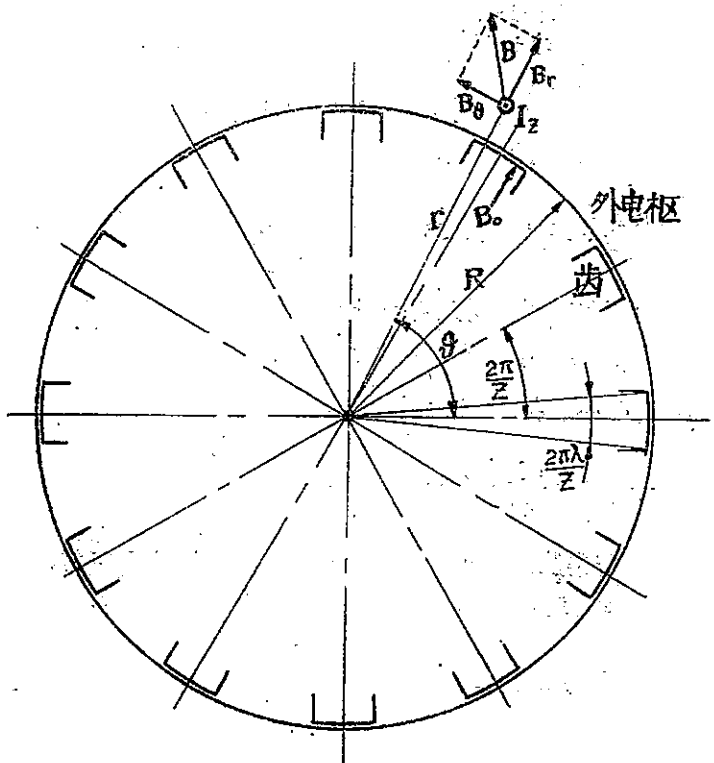


图3·2 转差离合器力矩计算图

边界条件可以设：在 $r=R$ ，有齿的地方 $B_r = B_0$ ，没有齿的地方 $B_r = 0$ ，由于齿是以转速差 ω 相对于电枢（即坐标系）转动的，所以边界条件也是时间的函数。这个边条件可以用福里埃级数展开为

$$B_r \Big|_{r=R} = B_0 \lambda + \frac{2B_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} \cos k Z (\theta - \omega t), \quad (3.3.3)$$

式中 Z 是齿数， λ 是齿宽系数。

上节已经说过，交变磁场实际上只发生在 $r \approx R$ 的附近，所以另一个边界条件可设为：

$$r = \infty \text{ 时 } B_r = 0. \quad (3.3.4)$$

注意到由于忽略齿端面的影响，各电磁量都与 Z 无关，电磁波方程 (3.3.2) 可化为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = \mu \sigma \frac{\partial B_r}{\partial t}. \quad (3.3.5)$$

现在我们把边界条件 (3.3.3) 化为复数形式，

$$B_r \Big|_{r=R} = B_0 \lambda + \frac{2B_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} e^{jkZ(\theta - \omega t)}, \quad (3.3.6)$$

并求下列形式的解：

$$B_r = B_0 \lambda f_0(r) + \frac{2B_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} e^{jkZ(\theta - \omega t)} f_k(r), \quad (3.3.7)$$

其中 $f_k(R) = 1$, $f_k(\infty) = 0$ 。很容易验证它满足所有的边界条件。把 (3.3.7) 代入 (3.3.5), 可以得出 $f_k(r)$ 的微分方程:

$$r^2 \frac{d^2 f_k}{dr^2} + r \frac{df_k}{dr} - (k^2 Z^2 - jkZ\omega\mu\sigma r^2) f_k = 0. \quad (3.3.8)$$

这是半虚宗量的贝塞尔方程。引入新变量

$$jkZ\omega\mu\sigma r^2 = \rho^2, \quad (3.3.9)$$

可以化为普通的贝塞尔方程

$$\rho^2 \frac{d^2 f_k}{d\rho^2} + \rho \frac{df_k}{d\rho} - (k^2 Z^2 - \rho^2) f_k = 0. \quad (3.3.10)$$

这个新变量 ρ 正是 r 与集肤深度 δ 的比, 乘以 \sqrt{i} 。 r 比 δ 大几百倍, 所以 ρ 是很大的量。第一类汉克尔函数可以满足 f_k 的边界条件。由于 ρ 很大, 可以把它用渐近式展开为:

$$H_{kZ}^{(1)}(\rho) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\rho}} e^{j(\rho - \frac{\pi}{2}kZ - \frac{\pi}{4})}. \quad (3.3.11)$$

引入

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{kZ\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}\delta_k}, \quad (3.3.12)$$

可以得出符合边条件的解 f_k :

$$f_k(r) = \sqrt{\frac{R}{r}} e^{-\alpha_k(r-R)} e^{j\alpha_k(r-R)}. \quad (3.3.13)$$

代入 (3.3.7), 取实部, 可得到最后的解:

$$B_r = B_0 \lambda + \frac{2B_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} e^{-\alpha_k(r-R)} \cos[kZ\theta + \alpha_k(r-R) - RZ\omega t]. \quad (3.3.14)$$

由于指数项衰减得很快, 已把 $\sqrt{R/r}$ 因子略去。利用法拉第感应定律和欧姆定律

$$\frac{1}{r} \frac{\partial I_z}{\partial \theta} = -\sigma \frac{\partial B_r}{\partial t}, \quad (3.3.15)$$

还可以得到 I_z 的表达式:

$$I_z = \frac{2B_0\sigma R\omega}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} e^{-\alpha_k(r-R)} \cos[kZ\theta + \alpha_k(r-R) - kZ\omega t]. \quad (3.3.16)$$

现在我们利用 (3.3.14) 和 (3.3.16) 来计算外电枢所受的电磁力矩。它等于

$$\begin{aligned}
M &= R I \int_R^{\infty} dr \cdot r \int_0^{2\pi} d\theta B_r I_z = \\
&= \frac{4}{\pi^2} \sigma \omega B_0^2 R^3 I \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi k \lambda}{k} \frac{\sin \pi m \lambda}{m} \int_R^{\infty} dr e^{-(\alpha_k + \alpha_m)(r-R)} \times \\
&\quad \times \int_0^{2\pi} d\theta \cos[\alpha_k(r-R) + kZ(\theta - \omega t)] \cos[\alpha_m(r-R) + mZ(\theta - \omega t)].
\end{aligned} \tag{3.3.17}$$

因为积分只牵涉到 $r \approx R$ 的一小薄层，所以可以用 R 代替 r 。 B_r 的常数项无贡献，已略去。由于三角函数的正交性，只有 $k = m$ 时对 θ 的积分才不为零，等于 π 。最后得出：

$$M = \frac{4R^3 I B_0^2}{\sqrt{2} \pi} \sqrt{\frac{\sigma \omega}{Z \mu}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k \lambda}{k^{5/2}}. \tag{3.3.18}$$

内电枢也可以用类似方法计算力矩，结果形式完全相同。设外电枢直径为 D_1 ，内电枢为 D_2 ，可得出总力矩为

$$M = \frac{I B_0^2}{2\sqrt{2} \pi} \sqrt{\frac{\sigma \omega}{Z \mu}} (D_1^3 + D_2^3) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k \lambda}{k^{5/2}}. \tag{3.3.19}$$

式中的级数不能用初等函数表达为有限的形式：

$$S(\lambda) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k \lambda}{k^{5/2}}. \tag{3.3.20}$$

但是，容易证明，它对 $\lambda = \frac{1}{2}$ 是一个偶函数，并且可以用泰勒级数求出一个二次近似公式：

$$S(\lambda) \approx S\left(\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} S''\left(\frac{1}{2}\right) \left(\lambda - \frac{1}{2}\right)^2. \tag{3.3.21}$$

其中
$$S\left(\frac{1}{2}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^{5/2}},$$

$$S''\left(\frac{1}{2}\right) = 2\pi^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}. \tag{3.3.22}$$

这两个系数可以通过数值计算得出。最后可得

$$S(\lambda) \approx 1.114 - 6\left(\lambda - \frac{1}{2}\right)^2. \tag{3.3.23}$$

这个函数 (3.3.20) 也可以通过数值计算的方法算出来。图 (3.3) 是这个函数的图形。由图中可看出，近似公式 (3.3.23) 在 $0.25 < \lambda < 0.75$ 之间误差很小。

现在对力矩公式作简要的讨论：

1. 力矩与磁感应强度 B_0 的平方成比例。所以在设计磁路时要保证各部分的磁路截面都不小于齿的总截面以保证齿的磁感应强度可以达到饱和。适当地选择齿宽系数 λ 可以使用最少

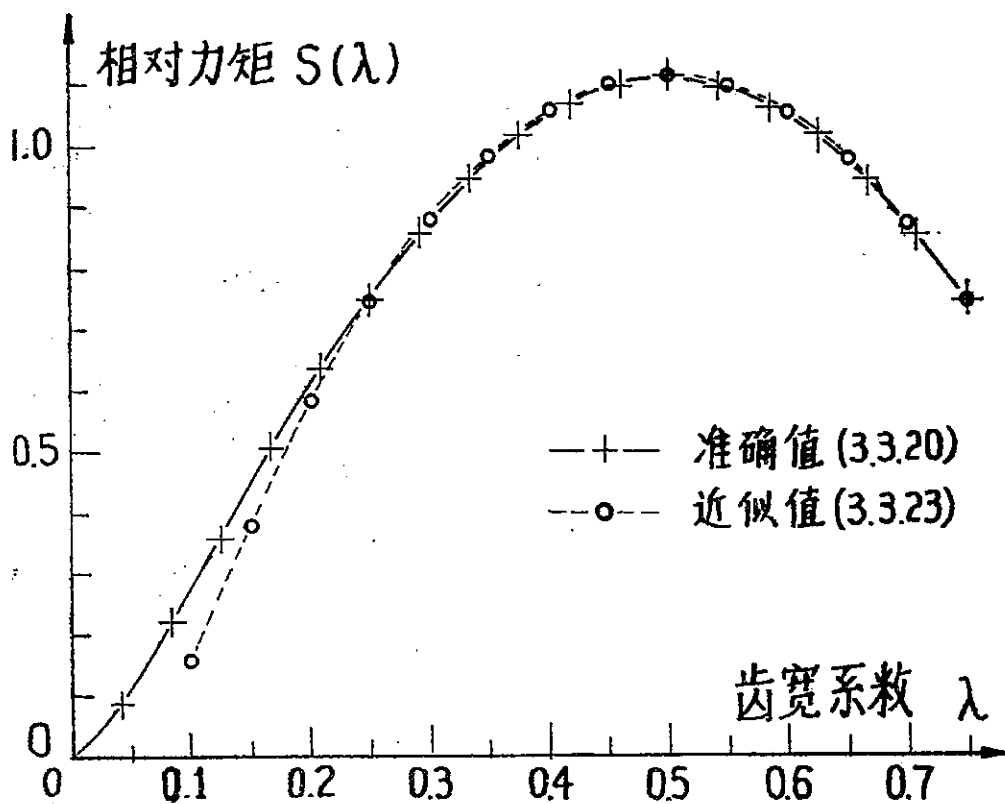


图3·3 力矩与齿宽系数的关系

的材料而得到最大的力矩，例如，当 λ 由0.5减至0.4时，力矩仅减小5.5%，磁路截面却减小了20%。

2. 力矩与直径的三次方成比例。所以，转差离合器输出大小，对直径的依赖关系很显著。

3. 力矩与齿数的平方根成反比例。因为齿数愈多，集肤效应愈显著，电枢的有效电阻就愈大，使感生电流相对降低。但是也不能把齿数减得太少，否则会使齿端部的影响显著起来，力矩反要下降。

4. 力矩与转速差的平方根成比例。比线性关系平缓。在分析稳定性和硬度时也是重要的根据之一。

由于篇幅有限，磁路和机械方面的计算的细节这里从略。

四、调速系统

4·1 调速系统的构成

试验台的调速系统，一方面要保证性能良好，另一方面要尽可能作得简单，以利于提高可靠性和简化维修工作。

图4·1是调速系统的电路方框图，图4·2是512型和306型试验台的传动示意图。转差离合器的被动轴通过三角带带动齿轮变速箱的输入轴。转速反馈信号由磁阻变换器——装在变速箱输入轴上的测速轮和固定在变速箱壳上的测速头——产生。因为速度的控制是以变速箱的转速为准的，所以三角带的丢转不会影响转速的准确性和稳定性。

变速箱的设计需要满足两个条件：

1. 电子转速表也由磁阻变换器提供信号，高速档和低速档尽可能在转速表上用同一刻度，所以变速比最好是简单整数比。
2. 两对齿轮的齿数应该都是互为质数以保持转速和磨损均匀。我们采取的变速比是1:2.5，测速轮是57齿，每转一圈产生57个信号；低速档齿轮付是 $Z_1 = 17$ ， $Z_2 = 40$ ，输出轴每转一圈，产生120个信号。从数值上说，信号频率等于转速的二倍。高速档 $Z_1 = 32$ ， $Z_2 = 27$ ，输出轴每转一圈产生48.09375个信号，与标称变速比1:2.5之差不到0.2%。这是经过凑试得出的比较合适的选择。

测速电路包括一个稳压电源和由倒相、斯密特触发器、单稳触发器组成的整形电路，把输入信号整形成为幅值和宽度都严格一致的矩形脉冲群。它的平均电压就与转速严格成比例。我们曾尝试过几种不同的电路，包括三极管泵电路、小功率可控硅和单晶体管构成的单稳触发器等，

但是从线性度、对温度和负载变化的稳定性来说，普通的射极耦合单稳触发器最好。通过适当选择元件参数，可以做到当温度从0℃到50℃变化时，转速表的误差不大于0.5%。测速电路的比较高的频率可以使滤波器的时间常数缩小到不致于影响动态特性的程度。

给励磁线圈供电的可控硅电路采用了最简单的阴极接零的半波电路。在励磁线圈的用铜量和功率损耗相同时，可以证明，它的静态性能与全波的相同。它会产生比全波电路大一倍的延时（全波最大延时0.01秒，半波0.02秒），但由于整个系统时间常数在1秒左右，所以不会带来什么不利影响。由于采用了半波电路，触发电路可以大为简化。我们采用了简单可靠的直接耦合式单晶体管触发电路。从电源直接降压产生的稳压方波，一方面作为触发电路的同步电源，另一方面又直接当作给定电压使用。这样简单的电路，通过使用证明，在效能上并不比复杂的电路逊色，但可靠性大为提高。粗略地看起来，这种电路非线性很严重，但是，仔细的理论分析证明，这些非线性效应最后互相抵消，使制动系数 ζ 在很大范围内保持大体不变；实践也完全证明了这一点，系统可以在很大的转速和负载范围内保持接近于最优控制的状态。

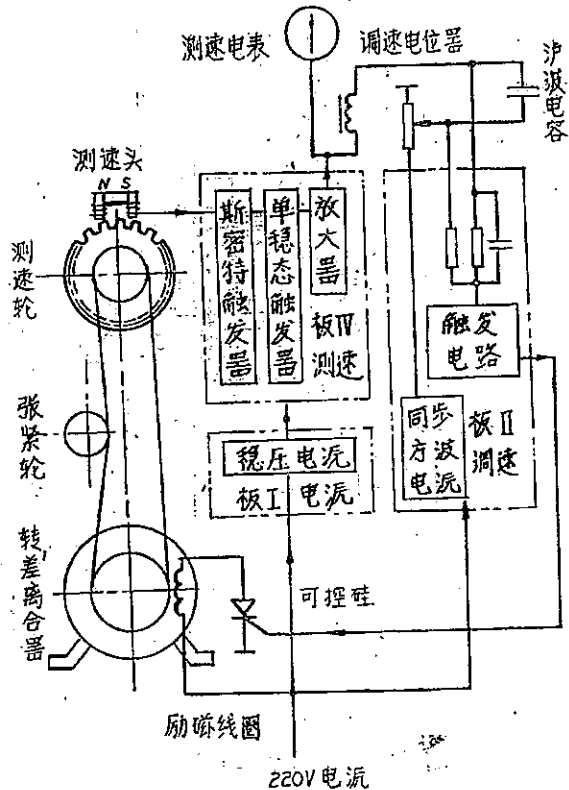
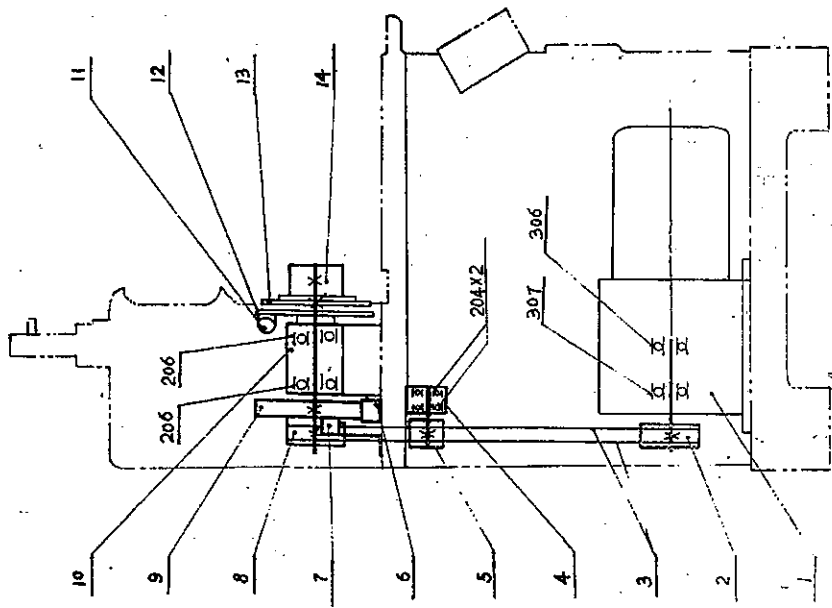
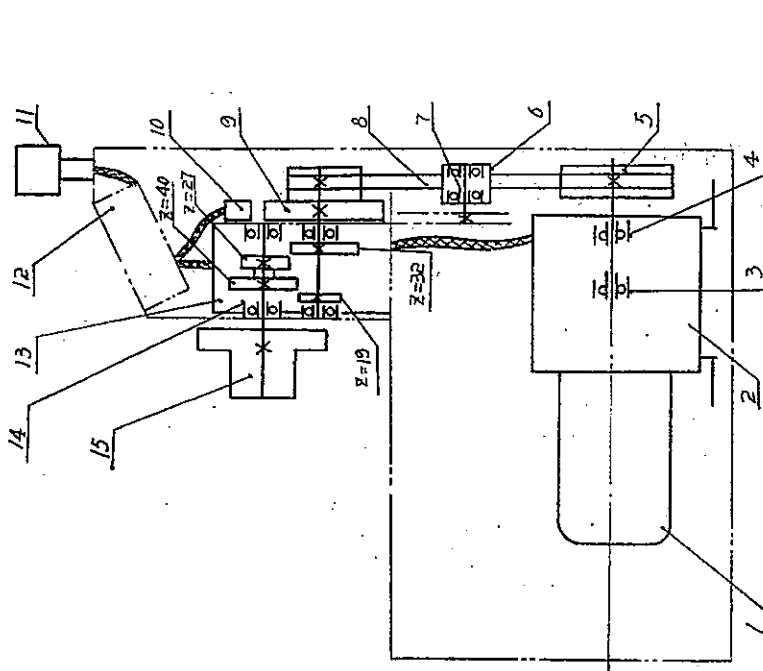


图4·1 调速系统电路方框图



1. 转差离合器 2. 皮带轮 3. 三角带B1803, 2根 4. 输油泵壳 5. 张紧轮
6. 测速头 7. 计数器 8. 皮带轮 9. 测速轮 10. 测速头 11. 闪光管
12. 闪光盘 13. 刻度盘 14. 弹性联轴器

图4-2-b YSD-306试验台传动示意图



1. 电机 2. 转差离合器 3. 轴承307 4. 轴承308 5. 皮带轮 6. 张紧轮 7. 轴
8. 测速头 9. 测速头 10. 测速头 11. 测
速表 12. 控制箱 13. 变速箱 14. 轴承207, 4个 15. 传动盘

图4-2-a YSD-512型试验台传动示意图

给定电压与转速反馈接成串联中和电路。这种电路与并联中和相比，优缺点如下：

优点：1. 灵敏度高。

2. 反馈回路耗电小。

缺点：测速电路不能接地，多一条线。

经过反复试验，最后采用了串联电路。

反馈回路中加入了一个简单的PD环节，来抑制振荡、提高硬度和加速过渡过程。因为测速回路原来就有低通滤波器，机械部份的大惯性也是一个低通滤波器，所以PD环节所带来的通频带增宽并不会导致高频干扰的增大。

4.2 各环节的微分方程和传递函数

1. 转差离合器的力学方程

在转差离合器磁路饱和以前，励磁电流 i 与齿极磁感应强度 B_0 的关系是：

$$B_0 = N\mu_0 i / \delta, \quad (4.2.1)$$

其中 N 是励磁线圈的匝数， δ 是气隙总长， μ_0 是空气的导磁系数 $4\pi \times 10^{-7}$ 。上节的公式 (3.3.19) 可化成 (注意 (3.3.19) 中的角速度 ω 是电机角速度 ω_0 和被动轴角速度 ω 之差)：

$$M = \left\{ \frac{N^2 \mu_0^2 l}{2\sqrt{2\pi\delta^2}} \sqrt{\frac{\sigma}{Z\mu}} (D_1^3 + D_2^3) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k \lambda}{k^{5/2}} \right\} i^2 \sqrt{\omega_0 - \omega}$$

$$= A i^2 \sqrt{\omega_0 - \omega}. \quad (4.2.2)$$

大括号中是一个只与转差离合器的结构尺寸有关的常数：

$$A = \frac{N^2 \mu_0^2 l}{2\sqrt{2\pi\delta^2}} \sqrt{\frac{\sigma}{Z\mu}} (D_1^3 + D_2^3) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k \lambda}{k^{5/2}}. \quad (4.2.3)$$

设转差离合器被动部分的总转动惯量是 J ，阻力矩是 M_t ，可得力学方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = A i^2 \sqrt{\omega_0 - \omega} - M_t. \quad (4.2.4)$$

这个方程是非线性的，现在把它线性化。在稳定时 $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，得到

$$A i_s^2 \sqrt{\omega_0 - \omega_s} = M_t, \quad (4.2.5)$$

其中 ω_s 和 i_s 分别是稳定时的角速度和励磁电流。把方程 (4.2.4) 的右方展开为泰勒级数，取头二项并利用 (4.2.5)，可得：

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{2M_t}{i_s} (i - i_s) - \frac{M_t}{2(\omega_0 - \omega_s)} (\omega - \omega_s). \quad (4.2.6)$$

我们得到机械传递函数

$$\Omega(s) = \frac{K_m}{1 + T_m s} I(s), \quad (4.2.7)$$

其中
$$K_m = \frac{4(\omega_0 - \omega_s)}{i_s}, \quad (4.2.8)$$

$$T_m = \frac{2J(\omega_0 - \omega_s)}{M_t} \quad (4.2.9)$$

$\Omega(s)$ 是 $(\omega - \omega_s)$ 的拉氏变换, $I(s)$ 是 $(i - i_s)$ 的拉氏变换。

2. 可控硅——励磁线圈的电气方程

可控硅的导通开始角为 φ , 电源电压的有效值为 E , 则在一周内电压的平均值为

$$\bar{U} = \frac{E}{\sqrt{2}\pi}(1 + \cos\varphi), \quad (4.2.10)$$

励磁线圈的电感量为 L , 电阻为 R , 则可得到励磁电流 i 的微分方程

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \frac{E}{\sqrt{2}\pi}(1 + \cos\varphi). \quad (4.2.11)$$

放大电路(图4.3)把差值输入电压 u 和导通角 φ 联系起来:

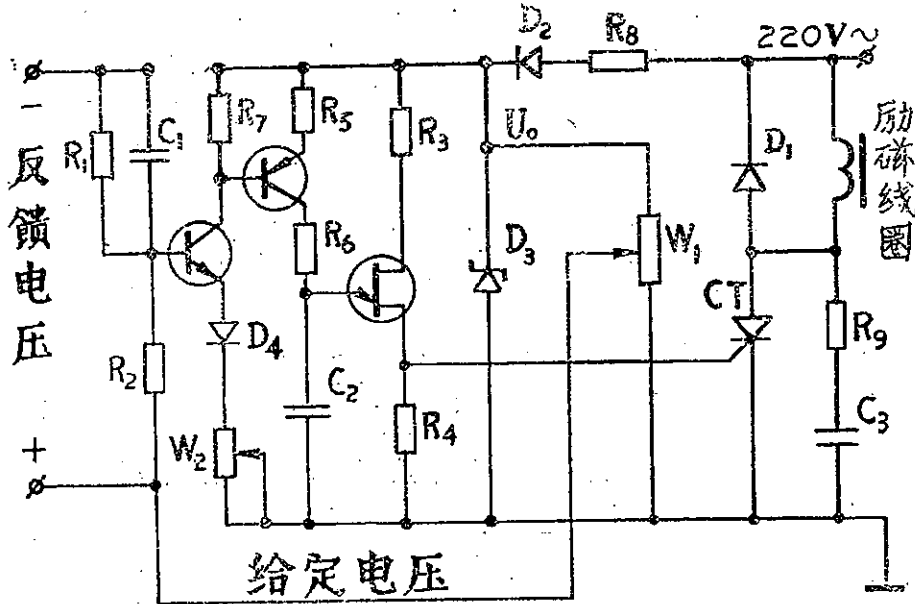


图4.3 调速电路

$$\varphi = \frac{1}{Gu}, \quad (4.2.12)$$

$$G = \frac{R_7}{100\pi C_2 W_2 R_5 \eta (u_0 - i_{b_1} i_{b_2} R_3)}. \quad (4.2.13)$$

其中 η 是单结晶体管的分压比, u_0 是方波电源电压, $i_{b_1} i_{b_2}$ 是单结晶体管两个基极之间的电流。把(4.2.11)和(4.2.12)联立可得

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \frac{E}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \cos \frac{1}{Gu}\right). \quad (4.2.14)$$

这也是一个非线性方程。在稳定时, $\frac{di}{dt} = 0$, 上式变为

$$Ri_s = \frac{E}{\sqrt{2}\pi} (1 + \cos\varphi_s) = \frac{E}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \cos\frac{1}{Gu_s}\right) \quad (4.2.15)$$

其中 φ_s 是稳定时的导通开始角， u_s 是稳定时的差值电压。把(4.2.14)在稳定点附近线性化可得

$$\left(\frac{L}{R} \frac{d}{dt} + 1\right)(i - i_s) = \frac{EG}{\sqrt{2}\pi R} \varphi_s^2 \sin\varphi_s (u - u_s) \quad (4.2.16)$$

传递函数是

$$I(s) = \frac{K_o}{1 + T_{os}s} U(s) \quad (4.2.17)$$

其中 $T_o = \frac{L}{R}$, $K_o = \frac{EG}{\sqrt{2}\pi R} \varphi_s^2 \sin\varphi_s$ (4.2.18)

可控硅的延时效应可以近似地看作一个惯性环节。把这个因素计入，传递函数是

$$I(s) = \frac{K_o}{(1 + T_{os})(1 + T_{SCR}s)} U(s) \quad (4.2.19)$$

T_{SCR} 在这里是0.02秒。

3. 测速反馈电压的传递函数

测速输出是与转速严格成正比的，但是泸波电路将引起一个延时，它是一个惯性环节：

$$U_c(s) = \frac{K_f}{1 + R_f C_f s} \Omega(s) = \frac{K_f}{1 + T_f s} \Omega(s) \quad (4.2.20)$$

4. 微分环节，它的传递函数可以从许多参考书中找到，这里不再推导。结果是

$$U_f(s) = r \frac{1 + T_{DS}}{1 + rT_{DS}} U_c(s) \quad (4.2.21)$$

其中 $r = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, $T_D = C_1 R_1$ (4.2.22)

5. 方框图和传递函数

根据上面的结果，可以画出闭环系统的方框图（图4.4），根据方框图可以写出闭环系统的传递函数：

$$\frac{\Omega}{U_r}(s) = \frac{K_o K_m (1 + rT_{DS})(1 + T_f s)}{(1 + T_{os})(1 + T_{ms})(1 + T_{SCR}s)(1 + rT_{DS})(1 + T_f s) + K(1 + T_{DS})} \quad (4.2.23)$$

其中K是总放大系数：

$$K = rK_o K_f K_m = 4(\omega_o - \omega_s) \varphi_s^2 \tan\frac{\varphi_s}{2} \cdot GK_f r \quad (4.2.24)$$

4.3 静差。

从方框图中（图4.4）我们还可以直接得出静差的表达式。差值电压 u 是等于给定电压 u_r 减去反馈电压 u_D ，都取静止值，得到

$$u = u_g - rK_f \omega \quad (4.3.1)$$

$$\text{即 } \omega = \frac{u_g - u}{rK_f} \quad (4.3.2)$$

差值电压 u 与导通角有一个关系：(式4.2.12)

$$u = \frac{1}{G\varphi} \quad (4.3.3)$$

所以 (4.3.2) 又可写成

$$\omega = \frac{u_g}{rK_f} - \frac{1}{G\varphi rK_f} \quad (4.3.4)$$

现在来研究一下导通开始角 φ 与负载力矩 u_t 有什么关系。从 (4.2.5) 和 (4.2.15) 两式

$$A i_s^2 \sqrt{\omega_o - \omega_s} = M_t \quad (4.2.5)$$

$$R i_s = \frac{E}{\sqrt{2}\pi} (1 + \cos \varphi_s) \quad (4.2.15)$$

可以得出

$$\cos \frac{1}{2} \varphi_s = \left(\frac{M_t}{M_{\max}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.3.5)$$

$$M_{\max} = \frac{2E^2}{\pi^2 R^2} A \sqrt{\omega_o - \omega_s} \quad (4.3.6)$$

这个 M_{\max} 是在一定转速下的最大阻力矩，这时导通开始角为零。我们在设计转差离合器时，总要使最大转矩比额定转矩大一倍左右。而空载时机器也会有一些摩擦损耗。所以，我们可以这样来定义静差：当把摩擦损耗计算在内的阻力矩由额定转矩的10%升到100%时的转速降落叫做最大静差。而额定转矩等于最大转矩的0.5。这样，根据 (4.3.5) 我们可以计算出，当 $M_t = 0.05 M_{\max}$ 时， $\varphi_s = 2.16$ 弧度；当 $M_t = 0.5 M_{\max}$ 时， $\varphi_s = 1.14$ 弧度。从 (4.3.4) 可以计算出最大静差：(图4.5)

$$\begin{aligned} \Delta \omega &= \frac{1}{GrK_f} \left(\frac{1}{1.14} - \frac{1}{2.16} \right) \\ &\approx \frac{0.42}{GrK_f} \quad (4.3.7) \end{aligned}$$

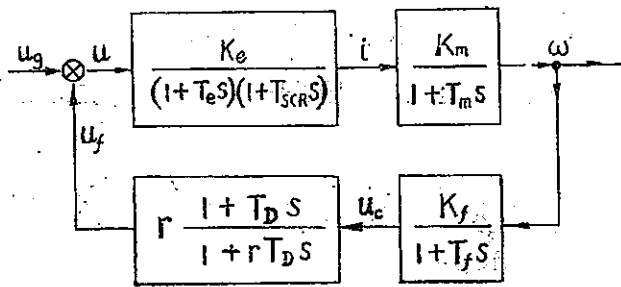


图4.4 系统方框图

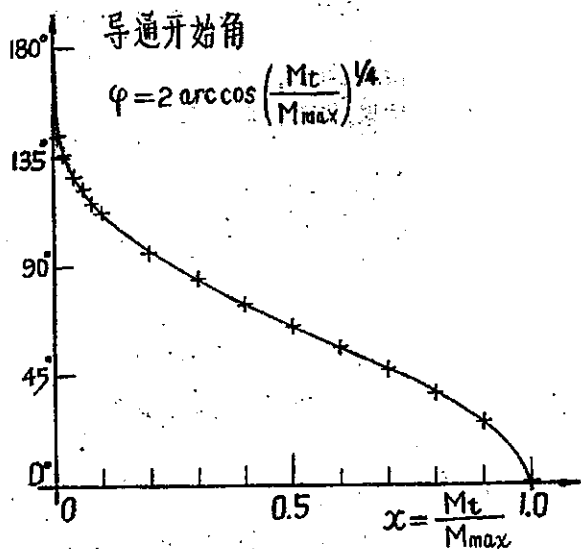


图4.5 φ 与 M_t 的关系

4.4 动态特性

现在根据传递函数(4.2.23)来研究系统的动态特性。我们要求系统有小的上升时间和整定时间,小的超调,在满足以上三个条件时达到最大的硬度即最小的静差。

直接求解(4.3.23)是很费事的,而传统的波德图解法只能给出一些定性的启示。以下我们用最优控制理论来求(4.3.23)的代数解。首先来估算各个常数的数值。

1. 电气常数 T_e 。根据(4.2.18), $T_e = L/R$ 。对5.5千瓦转差离合器用交流阻抗法直接测出 $L \approx 3$ 亨利, $R = 32$ 欧,计算得 $T_e \approx 0.1$ 秒。

2. 滤波时间常数 $T_f = R_f C_f$ 。在实际电路中 $R_f = 1\text{K}\Omega$, $C_f = 20\mu\text{f}$,算出 $T_f = 0.02$ 秒。

3. 微分时间常数 T_D ,实际电路中 $r = 0.5$,取 $T_D = T_e$,它就与 T_e 消去,剩下一个因子是 $(1 + rT_D s)$, $rT_D = 0.05$ 秒。

4. 机械时间常数 T_m 。它是随负载而变化的。512型试验台 $GD^2 = 1.5$ 公斤重·米²,折合转动惯量 $J = 0.375$ 公斤·米²。当 $n = 1000$ 转/分时, $\omega \approx 105$ /秒, $\omega_0 \approx 150$ /秒。阻力矩,按负载为500瓦计算, $M_t = 500 \div 105 = 4.78$ 牛顿·米。代入(4.2.9)可得

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{2J(\omega_0 - \omega_s)}{M_t} \\ &\approx \frac{2 \times 0.375 \times 45}{4.78} \\ &\approx 7.1 \text{秒} \end{aligned}$$

我们知道,要了解一个系统的动态特性,需要了解闭环传递函数的所有极点的位置。把上述数据代入(4.2.23),我们就可以得出极点的方程式:

$$(1 + T_m s)(1 + T_f s)(1 + T_{SCR} s)(1 + rT_e s) + K = 0,$$

即

$$(1 + 7.1s)(1 + 0.02s)(1 + 0.02s)(1 + 0.05s) + K = 0. \quad (4.4.1)$$

由于 T_m 比其他三个时间常数大很多,所以可以把后三个因子相乘,略去二次小量:

$$(1 + T_m s)[1 + (T_f + T_{SCR} + rT_e)s] + K = 0. \quad (4.4.2)$$

为简便起见,令

$$t_s = T_f + T_{SCR} + rT_e, \quad (4.4.3)$$

则(4.4.2)式可写成

$$(1 + T_m s)(1 + t_s s) + K = 0. \quad (4.4.4)$$

这是一个二次方程。可以化为规范形式:

$$T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1 = 0, \quad (4.4.5)$$

其中

$$T = \left(\frac{T_m t_s}{1 + K} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.4.6)$$

$$\zeta = \frac{T_m + t_s}{2\sqrt{(1 + K)T_m t_s}} \quad (4.4.7)$$

现在我们可以把问题归结为对制动系数 ζ 的研究。

根据线性最优控制的假设，即 $\int_0^{\infty} |\Delta\omega| dt = \min$ ，应有 $\zeta = 1$ ，这时没有超调，但安定时间

间长、硬度较低。根据平方最优控制的假设，即 $\int_0^{\infty} |\Delta\omega|^2 dt = \min$ ，应有 $\zeta = 0.5$ ，但超调为 43%，太大。比较适当的是取 $\zeta = 1/\sqrt{2}$ ，这时超调大约为 4%，安定时间和硬度指标都较佳*。现在我们来求 ζ 的更明确的表达式。因为 $T_m \gg t_d$ ， $K \gg 1$ ，我们可以把 (4.4.7) 进一步简化为：

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_m}{Kt_d}} \quad (4.4.8)$$

把 T_m 和 K 的表达式 (4.2.9) 和 (4.2.24) 代入 (4.4.8)，并利用 (4.3.5)，最后可化为

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{J}{GK_f M_{max} t_d}} \Phi\left(\frac{M_t}{M_{max}}\right) \quad (4.4.9)$$

其中

$$\Phi(x) = \frac{1}{2x^{\frac{1}{4}} \arccos x^{\frac{1}{4}} (\sin 2 \arccos x^{\frac{1}{4}})^{\frac{1}{2}}} \quad (4.4.10)$$

(4.4.9) 式前面的因子是与负载力矩无关的，后面的因子 $\Phi(x)$ 是与负载力矩有关的。函数 (4.4.10) 可以用数值计算的方法算出，已列于表 (4.1) 中，图形见图 (4.6)。我们看到，当 x 在 0.04 到 0.5 之间， $\Phi(x)$ 是很平缓的，说明只要在某一点把 K 调到最佳值，那么，在很大的负载范围内（十倍以上），系统都能保持在最佳状态附近。

表 4.1 $\Phi(x)$ 数值表

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0	∞	0.1	0.924	0.7	1.520
0.01	1.480	0.2	0.894	0.8	2.045
0.02	1.240	0.3	0.914	0.9	3.365
0.04	1.064	0.4	0.987	1.0	∞
0.06	0.988	0.5	1.077		
0.08	0.948	0.6	1.258		

此外， M_{max} 是与转速有关的 (4.3.6)。所以 ζ 也与转速有关：

$$\zeta \propto (\omega_0 - \omega_s)^{-1/4} \quad (4.4.11)$$

* 《晶体管控制系统的最佳理论》三桥浅生，井上达夫。冶金工业自动控制译丛，1966年3期，28页；4期，39页。

但是它的关系也很平缓。当转差离合器的被动部分的转速接近于电机转速时，即 $(\omega_0 - \omega_s)$ 很小时，制动系数 ζ 有些上升。

利用(4.4.9)和(4.3.7)还可以估算当系统处于最佳控制状态附近的静差。在(4.4.9)中设 $\zeta = 1/\sqrt{2}$ ， $\Phi = 1$ ，可得

$$\frac{1}{GK_f r} = \frac{2M_{max}t_s}{J}, \quad (4.4.12)$$

代入(4.3.7)可得

$$\Delta\omega \approx 0.84 \frac{M_{max}t_s}{J}. \quad (4.4.13)$$

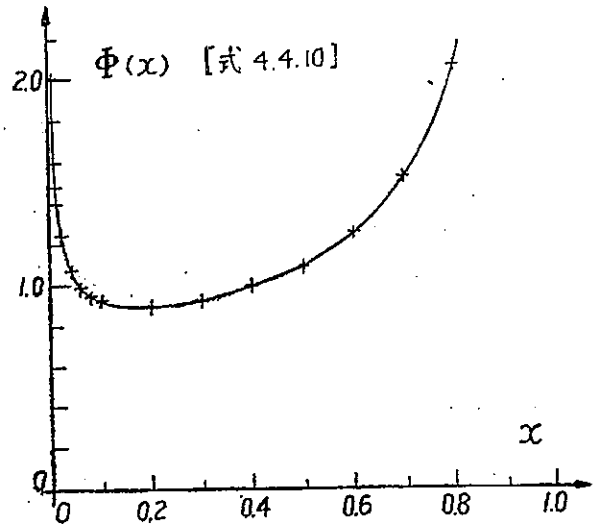


图4.6 $\Phi(x)$ 的图形

按目前我们的试验台的数据代入计算，得出的静差率约等于电机的转差率。实际试验也证明了这一点。YSD-306型试验台试验结果如下：用A4CB8.5×10 东方红75油泵作负载，供油时降速<3转/分；用4135油泵作负载，供油时降速<5转/分。这个数字可与泰安农机试验设备厂的液压变速产品比较：66型试验台，驱动电机2.8千瓦，用A4CB8.5×10 油泵为负载，降速值厂标为35转/分；5.5型试验台，驱动电机5.5千瓦，用6135 油泵作负载，供油时降速值厂标为20转/分。

利用(4.4.8)，(4.4.5)和(4.4.6)可以计算出安定时间。由(4.4.5)式，并设 $\zeta = 1/\sqrt{2}$ ，可以解得过渡过程的时间函数：

$$p(t) = 1 - e^{-t/\sqrt{2}T} \left(\cos \frac{t}{\sqrt{2}T} + \sin \frac{t}{\sqrt{2}T} \right). \quad (4.4.14)$$

时间常数为 $\sqrt{2}T$ 。又令(4.4.8)式的 $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ，代入(4.4.6)，可得

$$T = \sqrt{2}t_s. \quad (4.4.15)$$

即时间常数为 $2t_s$ 。即，达到稳定态的时间只与系统的几个小时间常数的和有关，而与系统的惯性、负载无关。因为静差率与惯性 J 成反比，所以，提高惯性是提高硬度的有效手段，而在一定条件下不影响调速的快速性，尽管试验台对调速的快速性并没有特殊要求。我们说“在一定条件下”，是因为关于动态特性所有的推导都是在线性化近似下做出的，当惯性增大、放大系数提高到一定限度之后，转差离合器的磁饱和和电流饱和就成为限制转速上升率的因素。

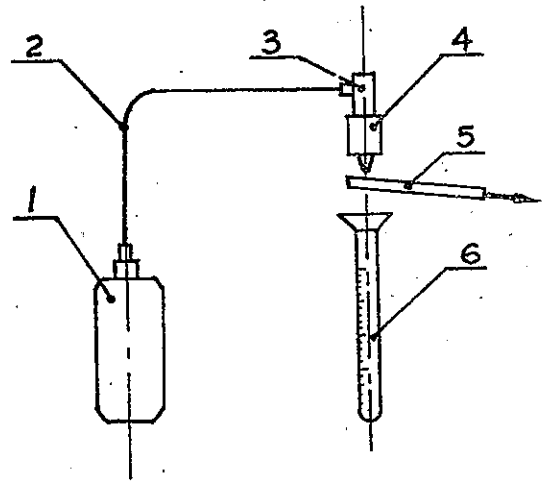
五、计数量油装置及闪光测相装置

5.1 各种试验台的计数量油装置

计数量油装置的作用如图 5.1。高压油泵 (1) 压出的油从喷油器 (3) 喷出, 在集油器 (4) 中喷雾、消沫后流往量油管 (6)。它们中间有一块闸板 (5), 是由计数器控制的。它的作用是使指定次数喷出的油流入量管, 来计量喷油量的大小。控制闸板的计数和执行机构, 各种试验台是不同的。

比较老的试验台采用机械计数装置。较早的 Bosch 试验台 (如 EFEP-25A)、我国生产的 ZR1 (长沙第一机床厂) ZR2 (沈阳第三机床厂) BSY108 (保定新生机械厂) 采用的是同类的机构。较早的 Hatrige 试验台 (如 PEM-8) 和我国生产的 RS-Q820 (洛阳农机学院工厂) 采用了同一类型的机构。日本的“日春”和“万岁”牌试验台的计数机构与以上两种都不同。

较新的 Bosch 试验台 (如 EFEP375, 385) 采用了机械——电气或机械——电子计数装置。它由一个蜗轮减速器、微动开关和步进选择器、继电器构成, 更晚的产品则用晶体管电路取代步进选择器及部分继电器。我国泰安产的 5.5 和 17 型试验台也采用了这种机构。



1. 高压油泵 2. 高压油管 3. 喷油器 4. 集油器
5. 闸板 6. 有刻度的量油管。

图 5.1 量油装置

5.2 全部用电子电路的计数量油装置

我厂于 1970 年研制成功完全采用晶体管电路的计数量油装置, 并于 71 年起生产。*

在新研制的 YSD-512 和 YSD-306 型试验台中, 我们对电子计数和自动控制装置又进行了彻底的改进, 电路比以前的更为简单, 并采用了硅管电路, 对提高可靠性是很有利的。电路安装方面也作了改进, 使装配和检修较为方便。

新型的计数量油装置的电路方框图见图 5.2。它由计数头、整形电路、25:1 分频器、二进位计数器、门电路和继电器等构成。传动盘每转一圈, 磁铁在计数头线圈中诱发一个脉冲信号, 经整形后成为一个矩形脉冲。由五个双稳构成的分频器每输入 25 个信号输出一个脉

* 《电子控制高压油泵试验台》, 唐山市郊区农业机械站。见《农机情报资料》, 中国农业机械化科学研究所, 1971 年 8 月, 23 页。

冲，它输入一个二进位计数器，它由6个双稳组成，分别每隔25,50,100,200,400和800次翻转一次。译码器是由一只12位按键开关控制的，它可以任意选择预定的计数次数，以50为基数，最大为1550次。按一下集油按钮，继电器即吸合，三组触点分别完成吸合档油板电磁铁、扫除和自保持的任务。此时传动盘来的信号不断进入计数器。到达预定次数之后，门电路输出的电压由7伏左右降到零，继电器释放，电路还原，档油板电磁铁释放。

电路中使用的双稳触发器是最简单的无偏压式硅管电路。(图5·3)。由于硅三极管的 V_{BEs} 约0.7伏， V_{CEs} 约0.3伏，所以没有反向偏压也同样可以满意地工作，而电路简单多了。当温度升高时， V_{BEs} 下降 V_{CEs} 上升，实验表明，当环境温度超过50℃时，双稳输出的方波幅度开始降低，说明已开始成为不饱和双稳电路。继续升至60℃，电路变为振荡器。在65℃以上，振荡也停止了。但一般使用的环境温度都不超过40℃，所以，只要在工艺过程中按一定标准选用 V_{BEs} 和 V_{CEs} 合适的晶体管，电路就能够正常工作。

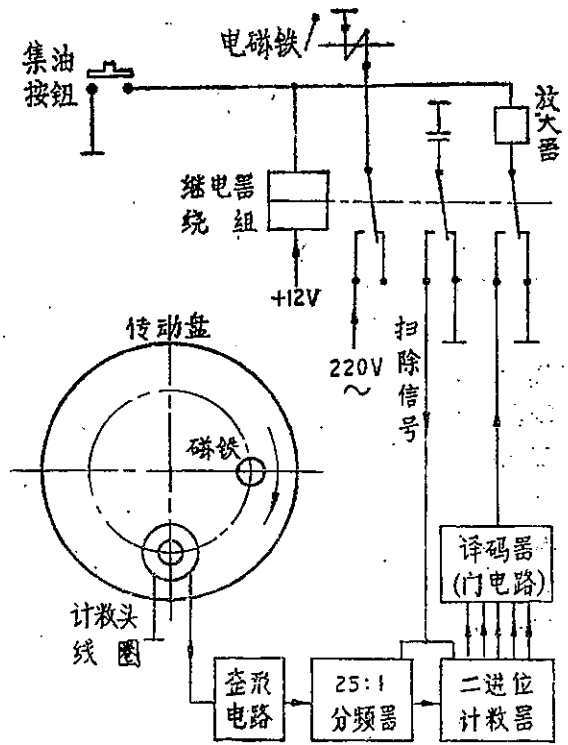


图5·2 计数量油机械电路方框图

5·3 闪光测相装置

许多种试验台上都装有测定高压油泵动态喷油角的闪光测相装置。英国 Hatrige PEM—8 等试验台装置的测相装置是利用喷油器喷出的油击合一个常开触点来激发闪光的。我国洛阳农机学院的RS—Q820试验台、保定新机械厂的BSY108型试验台也装有同类的测相装置。奥地利的Friedmann and Mayer 12BH7C试验台、Hansman EFH5012等试验台上装有一种手动控制的同步闪光仪，除了看喷油时间外，还可以观察高压油泵的机件在每一相位角上的状态。但使用不及 Hatrige 式的测相装置简便。

我们在YSD—512和306型试验台上仍使用我厂在70年研制成功的常闭触点式闪光测相装置。它与Hatrige式测相装置同样简便，但消除了触点运动时间引起的误差，增进了准确度。详情可参阅1971年3月农机院《农机情报资料》上的《电子控制高压油泵试验台》一文。

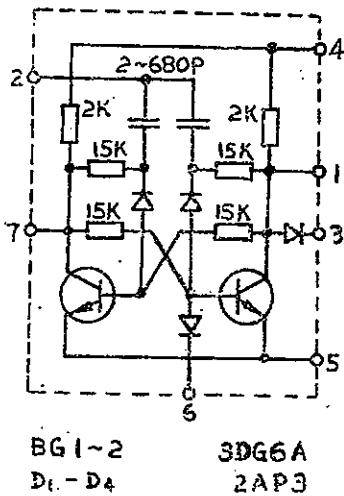


图5·3 双稳触发器

六、试用情况

第一台 512 型试验台已于 74 年 4 月 16 日起在首钢内燃机公司试用。截至 5 月末，已用它调试了五台大型汽车的油泵，计别拉斯油泵（即 T—62 坦克油泵）二台，太脱拉—138 油泵三台。其中一台别拉斯汽车和两台太脱拉汽车已经过行驶，油泵技术状态良好。据试验台使用者反映，这台试验台调速灵活，转速稳定，没有忽高忽低现象，供油与不供油看不出转速降落，最低在 30 转/分时还能稳定运转。计数器、闪光测相工作准确，节省工时。该厂有关工人、干部和技术人员认为此机电路设计较简单，安装布线较紧凑，有利于维护，外形较美观，转臂式量油箱对调试左、右窗的油泵都较方便。初步使用证明，此试验台适合柴油汽车修理单位使用。306 型试验台去年秋天起在本厂使用，情况良好。今年春天有一台 306 型试验台产品送往北京铁路局北京工程段第三工程队试用，经两个月使用，运转基本正常，证明可供中型柴油汽车队使用，试验过 6135、却贝尔和依发汽车的油泵，并与进口试验台进行了核对，结果正确。

采用上述的电子控制方案，是在“独立自主，自力更生”的基础上，解决我国对试验台的需要的一条途径。我们循着这一方向做了一些工作，有了一定的进展，但是，由于我们对马列主义、毛泽东思想学得不够，科学技术水平低，人手单薄，工作做得还很不够。距离上级领导的要求，距离各使用单位的要求，还有差距。我们恳切地希望有关的老大哥单位，给予我们指导、帮助和合作，继续进行研制，使它进一步完善起来。

团结起来，争取更大的胜利！

参 考 资 料

1. 《电子控制高压油泵试验台》，唐山市郊区农业机械站。中国农业机械化科学研究院《农机情报资料》1971年3月第1期，23页。
2. 《电子控制高压油泵试验台》，唐山市郊区农业机械站。唐山地区科技局《科技简报》1972年8月，10期，3页。
3. 上海内燃机研究所藏世界各国高压油泵试验台产品样本。
4. 《RS—Q820 燃油泵试验台使用说明书》洛阳农业机械化学院附属工厂。
5. 泰安农机试验设备厂《Y B5.5 型、66型射油泵试验台出厂试车规范》，1973年10月18日。
6. 《66型射油泵试验台使用说明书》泰安农机试验设备厂。
7. 《BSY108 型射油泵试验台使用说明书》保定新生农业机械厂。
8. 《ZR—2 燃油泵试验台使用说明书》。沈阳第三机床厂。
9. 《Hatrige PEM—8 燃油泵试验台使用说明书》。

10. 《Friedman and Mayer 12BH 7 A 射油泵试验台使用说明书》
11. Bosch EFEP 375, 385, 410 试验台技术说明书。
12. 《电磁滑差离合器及其应用》上海市电机综合研究所, 1970年12月。
13. 《电磁滑差离合器调速系统》, 上海机床电器厂 杨世胜。见天津电气传动设计研究所《电气传动文集》6, 1966, 44页。
14. 《电磁调速异步电机》上海先锋电机厂。
15. 《电磁调速异步电动机》南京变压器厂。
16. 《ZLK—3, ZLK—5型自动同步滑差离合器控制装置》, 上海电气成套厂。
17. 钱学森著:《工程控制论》。
18. 《晶体管控制系统的最佳理论》三桥浅生, 井上达夫。冶金工业自动控制译丛, 1966年3期, 28页; 4期, 39页。
19. 《试验台和烟量计的进展》。John Moon, 《柴油机及燃气轮机进展》(Diesel and Gas Turbine Progress) 1972年7—8月合刊, 46页。
20. 汉斯曼柴油电气行 EFH—5012 等试验台产品样本, 1974年奥地利工业展览会。
21. 《YSD—308型高压油泵试验台使用说明书》, 唐山市农业机械站, 1972。
22. 《YSD—306型高压油泵试验台使用说明书》, 唐山市农业机械站, 1974。
23. 《YSD—512型高压油泵试验台使用说明书》, 唐山市农业机械站, 1974。

一九七四年五月三十日