

中等专业学校
试用教材

电力拖动 连续控制

(第2版)

赵明 张永丰 编

机械工业出版社



200289179

中等专业学校教材

电力拖动连续控制

(第2版)

赵明 张永丰 编

机械工业出版社

(京) 新登字054号

电力拖动连续控制
(第2版)

赵明 张永丰 编

*

责任编辑: 王存新

郝育生

责任印制: 卢子祥

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张20·字数493千字

1980年1月北京第1版

1986年6月北京第2版·1993年5月重庆第14次印刷

印数 153,201—158,200 定价: 5.15元

*

ISBN 7-111-00248-2/TM·44(课)

前 言

本书是根据机械工业部教育局 1982 年 3 月制定的中等专业学校教材编审计划，对原出版的《电力拖动自动控制》下册进行改编而成。

按照编审计划的要求，对原书进行了全面的改写：删去了一些章节，增加了较多的新内容，特别是根据中等专业学校的教学特点，增加了安装和调试方面的知识。

本书主要包括：电机放大机自动调速系统的基本环节，A 系列龙门刨床电气设备的原理及安装调试，磁放大器，晶闸管-电动机可逆和不可逆直流调速系统的基本原理，晶闸管直流调速系统的实例及调试方法等。

本书作为中等专业学校电气化专业的教材和有关专业的教学参考书，也可供从事工业电气化工作的工程技术人员和工人参考。

本书由湘潭机电专科学校张永丰和山东机械工业学校赵明共同编写。

本书由合肥工业大学李仁副教授主审，参加审稿的有合肥工业大学杨瑞山、安徽工学院陈传安、上海电机制造学校海定广、北京机械工业管理专科学校张广荪、上海机械专科学校孔凡才、郑州机械专科学校王丙勋、福建机电学校张编礼、哈尔滨机电专科学校李礼贤、黑龙江机械工业学校马冠军、河北机电学校许蓼、于宝田、山东机械工业学校张永兰、青岛轻工业学校马德云等。在审稿过程中，他们对本书提了不少宝贵的意见。我们对此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，错误或不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

1984 年 10 月

目 录

第一章 电机放大机自动调速系统的 基本环节	1	系统	114
§ 1-1 自动调速系统的基本概念	1	§ 5-3 具有转速负反馈的无静差自动调速 系统	119
§ 1-2 电机放大机	6	§ 5-4 具有电压负反馈及电流正反馈的 自动调速系统	124
§ 1-3 JF-F-D 开环系统	11	§ 5-5 转速负反馈带电流截止负反馈的 自动调速系统	127
§ 1-4 JF-F-D 转速负反馈自动调速 系统	13	§ 5-6 速度、电流双闭环自动调速系统	130
§ 1-5 自动调速系统的静态结构图	16	§ 5-7 双闭环调速系统的典型线路	137
§ 1-6 电压负反馈和电流正反馈自动调速 系统	23	第六章 晶闸管-电动机可逆直流调速 系统	146
§ 1-7 电势负反馈自动调速系统	28	§ 6-1 晶闸管-电动机可逆电路的 几种形式	146
§ 1-8 稳定环节	29	§ 6-2 晶闸管可逆电路中的环流和 配合控制	148
§ 1-9 具有电流截止负反馈环节的自动 调速系统	32	§ 6-3 配合控制的有环流可逆自动 调速系统	153
附表 1-1 ZKK3~ZKK500 技术数据表	35	§ 6-4 逻辑无环流可逆自动调速系统	157
附表 1-2 常用控制绕组数据表	36	§ 6-5 可控环流的可逆自动调速系统	167
第二章 A 系列龙门刨床电气设备	41	* § 6-6 自动调速系统中的检测元件	170
§ 2-1 概述	41	第七章 自动调速系统的动态分析	177
§ 2-2 主拖动系统静态分析	42	§ 7-1 动特性的基本分析方法	177
§ 2-3 电机组功率	47	§ 7-2 微分方程式的算子法及传递函数	181
§ 2-4 交流控制电路	49	§ 7-3 典型环节的传递函数	185
§ 2-5 主拖动系统控制电路	59	§ 7-4 几种常用电路的传递函数	193
* 第三章 A 系列龙门刨床电气设备安装 及常见故障	74	§ 7-5 速度自动调节系统的动态分析	198
§ 3-1 电气设备的安装	74	第八章 自动调速系统的动态校正	211
§ 3-2 交直流电器动作检查与辅助 拖动试车	76	§ 8-1 动态校正的基本原理	211
§ 3-3 反馈环节检查与调整	79	§ 8-2 动态校正的基本方法	216
§ 3-4 主拖动系统试车	83	§ 8-3 速度、电流双闭环直流调速系统 的动态校正	221
§ 3-5 直流电机故障	86	* § 8-4 根据扰动作用下的动态性能选择 调节器参数	228
§ 3-6 工作台速度不正常	91	* § 8-5 减小超调量的方法	233
§ 3-7 换向时常见故障	95	* § 8-6 实现动态校正的其他方法	237
§ 3-8 停车常见故障	97	* § 8-7 自动调速系统的参数测定方法	242
§ 3-9 其它故障	98	第九章 晶闸管直流调速系统实例	246
第四章 磁放大器	101	§ 9-1 S7515 螺纹磨床头架电动机晶闸管 调速系统	246
§ 4-1 可控饱和电抗器	101	§ 9-2 KG S ₁ 系列晶闸管整流设备	257
§ 4-2 实用磁放大器的接线与结构	102	§ 9-3 B2016 型四米龙门刨床晶闸管 直流调速系统	277
§ 4-3 磁放大器的控制特性	104	* § 9-4 自动调速系统的调试	296
§ 4-4 反馈磁放大器	106	* § 9-5 自动调速系统的故障分析	311
§ 4-5 自饱和磁放大器	108	参考资料	316
§ 4-6 磁放大器控制特性的位移	109		
§ 4-7 双拍式磁放大器	110		
§ 4-8 直流电流互感器	110		
第五章 晶闸管-电动机不可逆直流 调速系统	112		
§ 5-1 晶闸管-电动机系统的机械特性	112		
§ 5-2 具有转速负反馈的有差自动调速 系统	114		

注 凡有 * 的章节为实习参考资料或任选内容。

随着科学技术的进步与工业的发展，必将对自动化提出更高的要求。如机械加工工业中，车床、铣床、镗床和刨床都广泛应用了自动控制。由于自动化技术的广泛应用，结果提高了产品质量，降低了成本，增加了产量，改善了劳动条件，减轻了劳动强度。因此实现自动化，对加速实现工业、农业、国防和科学技术现代化有重要的意义。

电力拖动自动控制是实现自动化的重要手段之一，而电力拖动自动控制系统中应用的最普遍的是自动调速系统。按照拖动电动机的类型来分，自动调速系统有直流调速系统和交流调速系统两大类。直流电动机虽然不如交流异步电动机那样结构简单、价格便宜、制造方便、维护容易，但是它具有良好的起动、制动性能，宜于在广范围内平滑调速，所以直流调速系统至今仍是自动调速系统的主要形式。本书将只着重讨论电机放大机及晶闸管直流调速系统。

第一章 电机放大机自动调速系统的基本环节

§ 1-1 自动调速系统的基本概念

一、开环控制与闭环控制系统

图 1-1 为电动机开环控制原理图

图 1-2 为电动机的开环控制方块图， n 是要求控制的输出量，亦称为被控量。作用于被控对象的量 U 称为控制量。作用于系统输入端的 U_0 称为输入量。因此对于一个确定的输入量来说，总存在一个与之对应的输出量。所有妨碍输入量对输出量按要求进行正常控制的因素称为扰动量，如电源电压 U_0 的波动、发电机原动机转速的变化、电动机励磁电压变化、发电机和电动机绕组电阻的变化、发电机剩磁及磁滞等，特别是电动机负载转矩 M_z 变化都将在输入量 U_0 和输出量 n 决定的预期值之间引起偏差。为了分清主次，把各种扰动分为主扰动和次扰动，主扰动就是经常变化，对输出量影响较大的扰动，通常是被控对象的负载，以后就把主扰动称为扰动，而忽略次扰动。

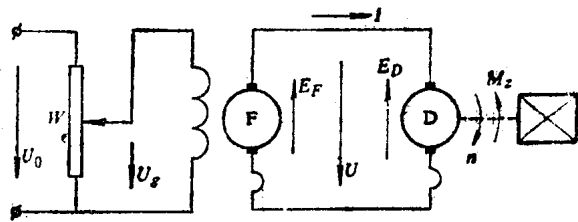


图 1-1 电动机开环控制原理图

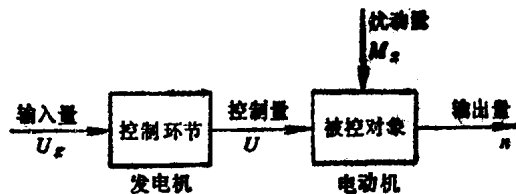


图 1-2 电动机开环控制方块图

上述控制系统被控量只能受控于输入量，而对输入量不能反施任何影响的系统称为开环控制系统。

开环控制系统往往是不能满足生产要求的，如刨床加工零件时，由于在加工过程中负载转矩不同，而产生不同的转速降。为了保证刨床的加工精度，要求在加工时电动机速度不变或几乎不变，为此在电动机轴上装设永磁式测速发电机SF，其原理图如图1-3所示。电动机如因负载转矩增大而转速降低，则 E_{sf} 降低， $\Delta U \approx U_g - E_{sf}$ ，由于 U_g 近似不变， ΔU 提高，发电机电势亦相应增加，自动调节电动机的转速，从而减小由于扰动在输出端造成的使被控量偏离预期值的偏差。

图1-4为电动机闭环控制方块图。

将被控量 n 通过测速发电机产生反馈信号 E_{sf} 送回到输入端和输入信号 U_g 相减（或相加）的过程称为反馈。图上所示使输出信号减弱者称为负反馈，而使输出信号增强者称为正反馈。测速发电机称为反馈元件或测量元件。

反馈信号只与被控量成比例时，称为硬反馈。若反馈信号与被控量的变化速度有关时，则称为软反馈。硬反馈不仅在过渡过程中，而且在稳态下也起作用；而软反馈只是在过渡过程中起作用，在稳态时，反馈作用就消失了。

图1-4中信号 U_g 、 E_{sf} 共同作用的圆圈表示比较环节，其中正负符号表示信号之间的极性，比较环节输出信号 ΔU 为偏差信号。图中箭头指示的方向表示信号流通方向，同时也说明了构成控制系统的各元件作用的单向性。

由于整个控制系统形成了一个闭合的环路，因此将这种输出与输入间存在负反馈的系统称为闭环控制系统或反馈控制系统。

综上所述，开环控制系统的特点是：

- (1) 不必对被控量进行测量和反馈，因而结构简单。
- (2) 这种系统需要采用高精度元件来保证控制精度。
- (3) 对干扰造成的误差，系统不具备修正能力。
- (4) 系统不存在稳定性问题。

而闭环控制系统的特点是：

(1) 系统需要反馈元件，而反馈元件的精度直接影响控制系统的精度，所以尽可能采用精度高的反馈元件。

(2) 由于采用了负反馈，因而对控制装置及被控对象参数变化而引起的干扰都不甚敏感，因此可采用不太精密的元件。

(3) 当出现干扰时，可以减弱其影响。

(4) 系统可能工作不稳定，因此存在稳定性校核问题。

二、闭环控制系统的组成

一般闭环控制系统的组成如图1-5。

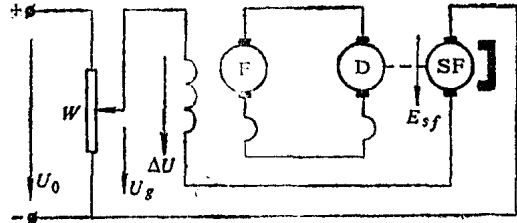


图1-3 电动机闭环控制原理图

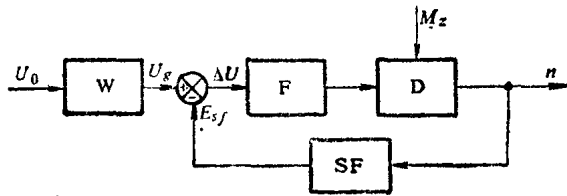


图1-4 电动机闭环控制方块图

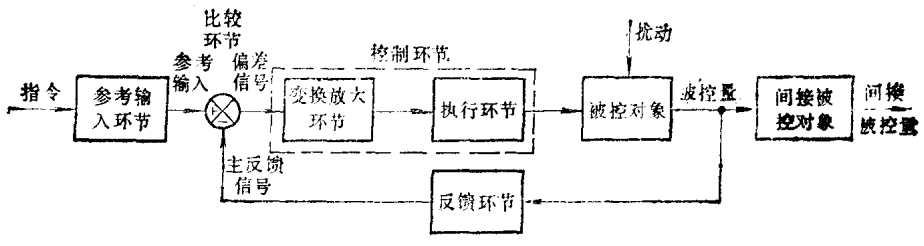


图1-5 一般控制系统的方块图

指令——来自闭环控制系统外部的输入量，与闭环控制系统本身无关。

参考输入环节——它产生正比于指令的信号。

参考输入——正比于指令的信号。一般亦称为输入量。

放大环节——由于偏差信号一般都比较微弱，需要进行变换放大，使它具有足够的幅值和功率。

执行环节——根据变换放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，使被控量与希望值趋于一致。

变换放大及执行环节有时统称为控制环节。

间接被控对象——它是在反馈回路外部联系被控量与间接被控量的部分。

间接被控量——它在反馈系统之外，而不被闭环控制系统直接测量。

尚有为改善系统控制性能而设的校正环节，即一般称为稳定环节，图上未曾画出。

三、自动控制系统的分类

自动控制系统可以从一些不同的角度来进行分类。

(一) 按系统结构特点分类

1. 开环控制系统、闭环控制系统及复合控制系统。

复合控制系统是既有主反馈，又有前馈的控制系统。所谓前馈控制是一种按照扰动进行控制的开环控制。因此复合控制系统是开环、闭合结合的系统。

2. 单回路控制系统与多回路控制系统。

图1-5为单回路控制系统，而图1-6为双回路控制系统。其中反馈装置5称为局部反馈。

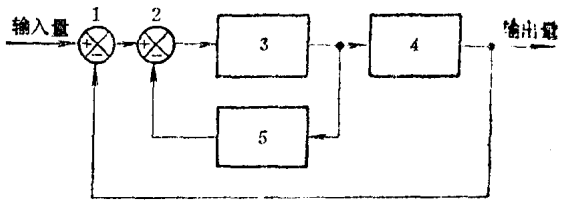


图1-6 双回路自动控制系统方块图

(二) 按输入量的特点分类：

1. 定值控制系统

在生产过程中，被控量要求维持某一值，就要采用定值控制系统。系统的输入在正常运行下基本上是不变的。当然有时根据需要，输入量也可以从某一值改变到另一值。系统的基本任务是存在着扰动的情况下，使输出的被控量保持在给定的希望值上。

如图1-7的电压自动调节系统即为定值控制系统。图中TF为同步发电机，FL为发电机励磁绕组，L为励磁机，LL为励磁机励磁绕组。如果由于扰动，发电机电压降低。电磁铁1吸力减小，弹簧2将炭柱片3压紧，炭柱片阻值减小，使励磁机、发电机电流增高，维持发电机电压大致不变。

2. 随动系统

系统的输入是任一随时间变化的函数，其指令往往是机械位移，而且在较大范围内变化，系统的任务是保证输出的被控量以一定的精度跟随输入的变化而变化，所以也称为跟踪系统。飞机的自动操纵，机床的仿形控制，自动平衡式测量仪器等均属此例。

图 1-8 为随动系统示意图。图中电位器 1 的可动片装有旋转手柄，电位器 2 的可动片则与他励电动机 4 的电枢及负载 5 装在同一轴上一起旋转，两个电位器固定的两端并接直流电源上，两个电位器的可动片则分别接在他励发电机 3 的励磁绕组的两端，他励发电机的电枢由三相同步电动机 6 带动作恒速运转，发电机的电压则接在他励电动机的电枢上。

当两个电位器的可动片位于相应的位置时，他励发电机励磁绕组电压 $U = U_1 - U_2 = 0$ ，如电位器 1 用手转动一个角度，则 $U = U_1 - U_2 > 0$ ，他励发电机电枢感应电势，供给他励电动机使电动机带动负载和电位器 2 一起旋转，当电位器 2 可动片转到新的对应位置上后 $U = 0$ ，他励电动机停止转动。

电位器 1 和电位器 2 两个旋转轴之间没有机械联系，然而电位器 2 的转轴，随时都有转到与电位器 1 转轴相应位置的趋势，在这一系统中，电位器 1 的可动片的转动为输入，电位器 2 的可动片的转角是被控量。由两个电位器和直流电源接成的电路是比较机构，两个电位器的可动片之间的电压 U 是偏差电压，他励发电机起着放大器的作用，而他励电动机起着执行机构的作用。

由上看出，输入量既不是常数，也不需要事先确定，电位器 1 的转轴是主动，而电位器 2 的转轴是跟随 1 而转动的，所以称为随动系统。

3. 程序控制系统

在这种系统中，被控量按一定的事先确定了的规律变化，象在加热炉的温度控制中，炉温是根据预先制定的程序进行控制的，所以叫做程序控制。例如，预先制定的程序可以是，炉温在一定的时间间隔内，先上升到某一给定温度，在另一段时间间隔内再下降到另一给定温度，然后在另一段时间间隔内再下降到另一给定温度，在这类程序控制中，给定量是按照预先制定的规律变化的，而系统内调节设备则保证炉温紧紧地跟着给定量的变化。

(三) 按被控量的特点分类

1. 连续控制系统

前面提到的各种控制系统，需定量地控制被控量，被控量如可以连续地被调整，都可归

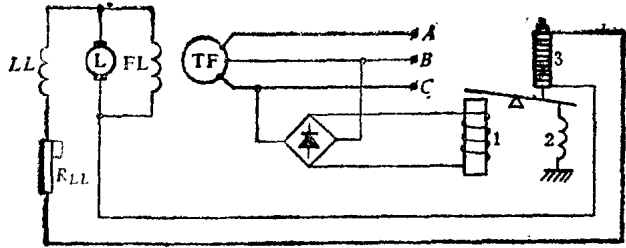


图 1-7 电压自动调节系统

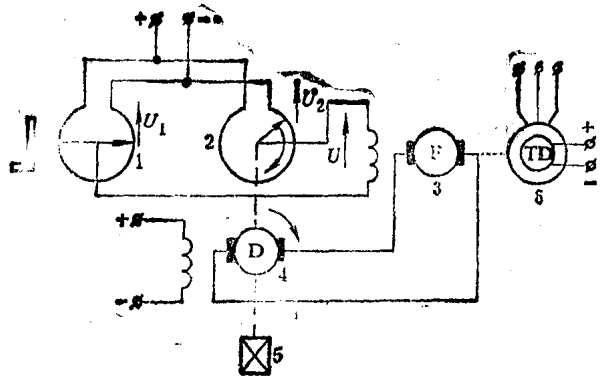


图 1-8 随动系统示意图

入连续控制系统。

连续系统的变量也可以采样测取成为时间的离散量，构成了采样控制系统。也可进一步量化成数字量，形成数字控制系统。

2. 断续控制系统

自动控制系统若其被控量是断续的称为断续控制系统。断续控制系统的被控量是开关量，例如电量的有或无、大或小，机械部件的进或退、动或停。

如果控制系统是完全按若干事件的逻辑关系而决定其各被控量的有或无，这系统就是组合逻辑控制系统；如果控制系统还进一步同时考虑若干事件发生的顺序来决定被控量有或无，则为顺序控制系统。

(四) 其他分类方式

1. 从稳态时被控量与输入量有无差别可分为稳态有差和稳态无差自动调节系统。

图1-3为稳态有差调节系统，如果是信号 $\Delta U = 0$ ，则发电机励磁电流、电压、电动机转速都将为0，系统不可能停留在这种状态，也就是说，误差总是要存在的，否则也就没有调节作用产生了。

有差调节系统的特征是：稳定状态下，被控量的值与扰动大小有关，在这种调节器中，固然可以减小扰动所引起的误差，然而却不能使被控量准确地达到给定值，负载越大，被控量的稳定值与输入量相差也越大。

图1-8为稳态无差调节系统，当被控量与输入量相等时，执行机构才停止工作。

2. 按放大元件特征来分，可分为电机放大机、磁放大器或晶闸管自动控制系统等。

3. 按控制系统中包含线性或非线性元件或环节来分，可分为线性控制系统与非线性控制系统。

4. 按采用不同反馈方式来分，可分为转速负反馈、电势负反馈、电压负反馈及电流正反馈控制系统等。

5. 按被控量名称来分，可分为自动控制（调节）电压系统、自动控制速度（调速）系统等。

四、自动调速系统的质量指标

自动调速系统的质量指标，是系统设计和实际运行中要求满足的指标；它是衡量系统性能好坏的准则。质量指标包括静态指标、动态指标、经济指标等。

静态指标代表系统稳态运行中的性能。其中静差率、调速范围、平滑系数等指标已在电机与拖动基础课程中作了介绍。尚有稳态误差指标，在稳态条件下输出量的期望值与稳定值之间存在的误差，称为系统稳态误差。稳态误差表征了系统的准确程度。影响系统稳态误差的因素很多，如系统的结构、系统的参数以及输入量的形式等。

动态指标代表系统动态过程的性能。一般指稳定性、最大超调量、调整时间及振荡次数等。

1. 稳定性

如果输入端加入单位阶跃函数时，其过渡过程将衰减，被控量最后达到某一稳定值，见图1-9曲线1、2，则称这类控制系统是稳定的。如果系统的过渡过程随时间的推移而单调发散或振荡发散，见图曲线3、4，则称这类控制系统为不稳定系统。不稳定系统不仅不能起自动控制作用，而且使系统无法正常工作，甚至损坏设备，因而在实际中是不能应用的。

2. 最大超调量 $\sigma_p\%$

如图1-10为一单位阶跃响应曲线。最大超调量简称超调量用 σ_p 表示

$$\sigma_p = X_{sc}(t_p) - X_{sc}(\infty)$$

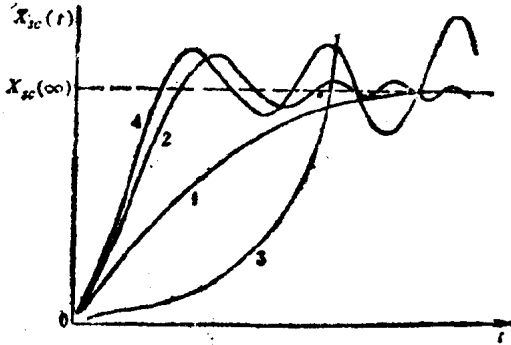


图1-9 控制系统过渡过程稳定性分析

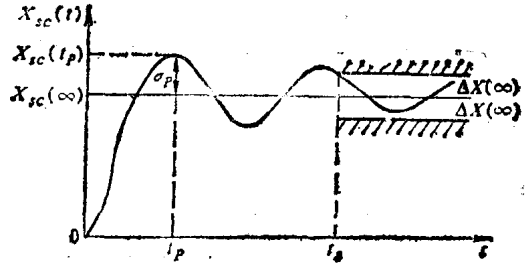


图1-10 自动控制系统动态指标

超调量百分数为:

$$\sigma_p\% = \frac{X_{sc}(t_p) - X_{sc}(\infty)}{X_{sc}(\infty)} \times 100\% \quad (1-1)$$

超调量太大, 达不到工艺上的要求, 但又不能限制太小, 否则使过渡过程过于缓慢。一般 $\sigma_p\%$ 可允许在 $10 \sim 35\%$ 。

3. 调整时间 t_s

$X_{sc}(t)$ 响应过程进行到使下式成立所需的时间定义为调整时间, 亦称为过渡过程时间:

$$|X_{sc}(t) - X_{sc}(\infty)| = \Delta X_{sc}(\infty) \quad (1-2)$$

$\Delta X_{sc}(\infty)$ 一般取 $0.02 \sim 0.05 X_{sc}(\infty)$

上式表明, 控制系统的单位阶跃响应曲线, 一旦达到 $X_{sc}(t) = X_{sc}(\infty) \pm \Delta X_{sc}(\infty)$, 便不再超出 $X_{sc}(\infty) \pm \Delta X_{sc}(\infty)$ 所限制的范围, 所需的最短时间便是该系统的调整时间。

4. 振荡次数 N

在 $0 \leq t \leq t_s$ 时间间隔内, 响应曲线 $X_{sc}(t)$ 穿越其稳态值 $X_{sc}(\infty)$ 次数的一半, 定义为振荡次数, 若所得结果不恰为整数时, 需要取与实际相近的整数, 如图1-10取 $N \approx 2$ 。

不同的生产机械对振荡次数的要求不同, 如龙门刨床、轧钢机等允许有一次振荡, 而造纸机不允许过渡过程有振荡。

§ 1-2 电机放大机

电机放大机是自动调速系统中的主要元件, 本节主要叙述电机放大机的结构、工作原理、特性、调整方法以及使用注意事项等。

一、电机放大机的工作原理

(一) 放大作用

电机放大机实际上是一种特殊的直流发电机。其电枢绕组和一般直流发电机一样, 但在换向器上放有两对电刷, 一对和一般直流电机一样, 放在磁极中性线上, 即与磁极轴线正交, 称为交轴 (或横轴) 电刷, 如图1-11的 1、2; 另一对放在磁极轴线上, 称为直轴 (或

纵轴)电刷,如图中的3、4。

当在电机放大机的励磁控制绕组中通入电流 I_k ,产生磁通 ϕ_k ,电枢由原动机带动旋转,这时就在交轴电刷1、2两端产生电势 E_q ,如果把交轴电刷短接起来,在电枢绕组中就会产生一个较大的电流 I_q , I_q 产生交轴电枢反应磁通 ϕ_q ,这个电枢反应磁通在这里正是要加以利用的,我们把它作为一个新的励磁磁通。由于电枢绕组切割 ϕ_q 的结果,在直轴电刷3、4两端产生电势 E_d ,这个电势就是电机放大机的输出电势。

输出功率与输入功率之比值称为功率放大倍数。一般10kW以下直流发电机的功率放大倍数为10~30,若要用作自动控制系统中的控制元件,是不能满足要求的。电机放大机相当于两级直流发电机,加上其转速高、气隙小、材料好等优点,因此,它的放大倍数很大,其功率放大倍数可达200~50000。如ZKK12J,输出功率1.2kW,输入功率仅需1W,功率放大倍数为1200。

由于这种电机放大机是利用交轴磁场进行放大工作的,所以又称为交磁电机放大机或交磁放大机。

(二) 直轴电枢反应的补偿

当放大机接上负载(如供给发电机励磁)以后,直轴电枢回路就通过电流 I_d ,它产生直轴电枢反应磁通 ϕ_d ,其方向与 ϕ_k 相反,将极大地削弱 ϕ_k ,根本不能带负载工作。因此,这个直轴电枢反应必须设法补偿。解决的方法是在定子上加补偿绕组,它与电枢绕组串联,使其磁通 ϕ_{bc} 去抵消 ϕ_d ,为了使直轴电枢反应磁通较完善得到补偿,补偿绕组分布在定子大槽和小槽中,由于 ϕ_{bc} 、 ϕ_d 都随放大机输出电流而变化,因此,可以在不同的输出电流下都得到较好的补偿。

(三) 其它绕组的作用

1. 在交轴炭刷之间还串联有交轴助磁绕组J。交轴助磁绕组产生的磁通,其方向和 ϕ_q 相同,因而对于一定的直轴额定输出,交轴电流可以减小,改善了交轴换向。如ZKK12J在额定输出时,不加交轴助磁绕组时交轴电流占额定电流的40%左右,而加交轴助磁绕组时只占20%左右。

2. 为了改善直轴换向,在中槽内安有换向绕组,装置在中槽之间的一个定子齿就形成电机放大机直轴方向的换向极。

电机放大机的原理图见图1-12所示,图中标号:JF——电机放大机,S——电枢绕组,BC——补偿绕组,H——换向极绕组,J——交轴助磁绕组,K I、K II——控制绕组,下标1、2表示绕组始末端,图中控制绕组只画了两个,实际上多的有四个,与补偿绕组并联的电阻 $R_{\sigma r}$ 是为了调节补偿程度用的。

3. 在大槽定子磁轭部分还绕有交流去磁绕组(QC)在原理图上未曾画出,由于去磁绕组上加交流磁势 F_{oc} ,使放大机工作点造成局部的磁滞回线,因而使固有磁滞回线变窄,从

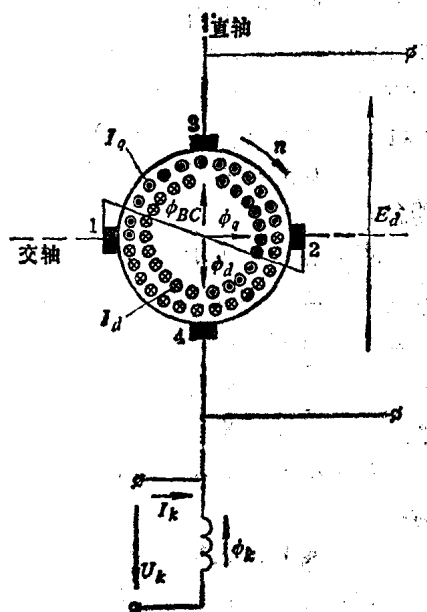


图1-11 电机放大机的工作原理

而减小电机的剩磁电压和特性曲线的非单值性。

ZKK3J~ZKK12J共轴式电机放大机的去磁电源是由拖动电动机内的抽头电压(4~5V)供给,内部已连接好,所以拖动电动机通电时,去磁绕组就通电。而ZKK25~ZKK500单独式电机放大机的去磁电源应另行配置。

二、电机放大机定子上各绕组的分布

电机放大机定子上各绕组的分布情况见图 1-13 所示。定子铁芯由硅钢片冲迭而成,在大槽里装有控制绕组、交流去磁绕组和一部分补偿绕组;在小槽里装有补偿绕组;在中槽里装有换向绕组和交轴助磁绕组。

三、电机放大机的特性

电机放大机按其工作性质来说,属于发电机类型,因此,需要讨论的特性主要是空载特性和外特性。

(一) 空载特性与电压放大倍数

当电机放大机不接负载,由拖动电机使它转到额定转速时,其电势 E_d 与控制绕组的磁势 F_k 的对应变化关系,称为空载特性。图 1-14 所示为ZKK12J的实测空载特性曲线。

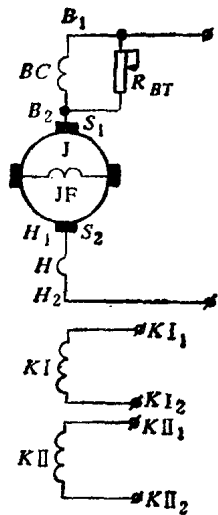


图1-12 电机放大机接线原理图

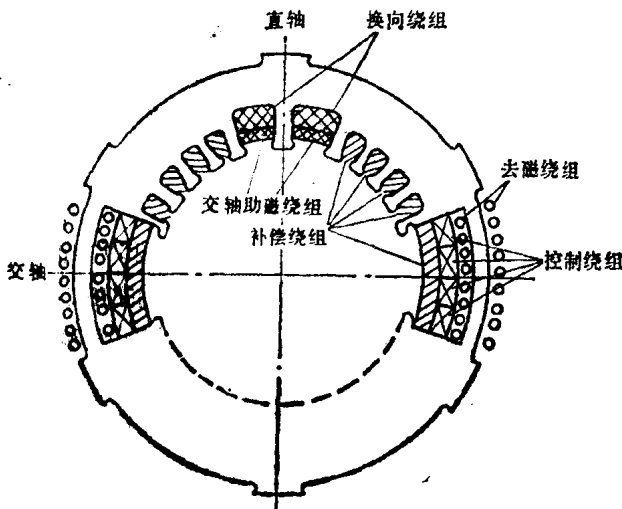


图1-13 电机放大机定子上各绕组分布

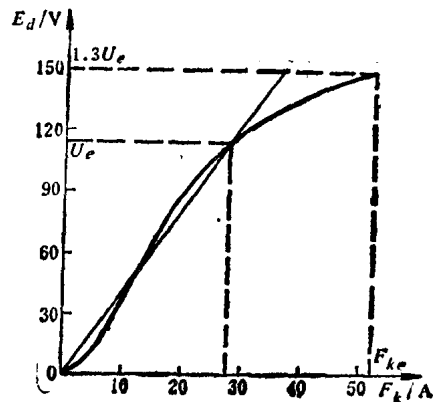


图1-14 电机放大机的空载特性

电机放大机无去磁绕组时剩磁电势较大,但要求不超过额定值的15%。当有去磁绕组时,要求剩磁电势不超过额定值的5%。

在空载特性曲线的开始一段, F_k 增加, E_d 变化较慢,这是因为 F_q 、 I_q 也较小,此时电刷接触电阻大,降低了放大机的放大系数;中间一段, E_d 增加较快,最后由于磁路饱和,

E_d 又变化较慢了。放大机磁路及导线载流能力都留有较大的余量，其目的是使控制系统中能够实现对过渡过程进行强励，从而加快过渡过程。

每台放大机各控制绕组的匝数，额定电流值各有不同，但它们的额定安匝数相同，因此，同一条空载特性适用于各个控制绕组。

空载特性曲线上，规定 E_d 为 $1.3U_d$ 时，控制绕组安匝数为额定值 F_{K_e} ，在工程计算中，可将空载特性线性化，即近似认为各点的放大倍数均等于 U_d 时的放大倍数，即

$$K'_{IF} = \frac{U_d}{I_K W_K} \quad (1-3)$$

式中 K'_{IF} 为电机放大机空载特性曲线的斜率，或称为电机放大机安匝放大倍数。 K'_{IF} 值与放大机的运行区域有关。

电压放大倍数就是输出电压与输入电压的比值 K_{IF}

$$K_{IF} = \frac{E_d}{I_K R_K} = \frac{E_d}{I_K R_K} \frac{W_K}{W_K} = \frac{E_d}{I_K W_K} \frac{W_K}{R_K} = K'_{IF} \frac{W_K}{R_K} \quad (1-4)$$

式中 R_K 控制绕组电阻。

从式中明显看出放大机电压放大倍数与控制绕组匝阻比 $\frac{W_K}{R_K}$ 成正比，每台放大机都有几个控制绕组，那一个绕组匝阻比大，那个绕组电压放大倍数就大。

(二) 外特性

当电机放大机的转速和控制绕组电流保持恒定值时，放大机接负载，其端电压 U_d 与输出电流 I_d 之间的对应变化关系，称为电机放大机的外特性。

图 1-15 为测定放大机外特性的试验线路，当负载电流 I_d 变化时，端电压 U_d 的变化除了与放大机内部（包括电枢绕组、换向极绕组和补偿绕组）电压降有关以外，还与补偿绕组对电枢反应的补偿程度有关，而后者对于放大机的外特性有着重大影响，这是电机放大机的又一特点。根据补偿绕组对电枢反应的补偿程度，放大机的外特性可分为三种情况。

1. 全补偿：即补偿绕组安匝等于直轴电枢反应安匝。这时当 I_d 变化时影响 U_d 的因素只有放大机内部压降，所以 U_d 随 I_d 的增大而略有下降。见图 1-16 所示。

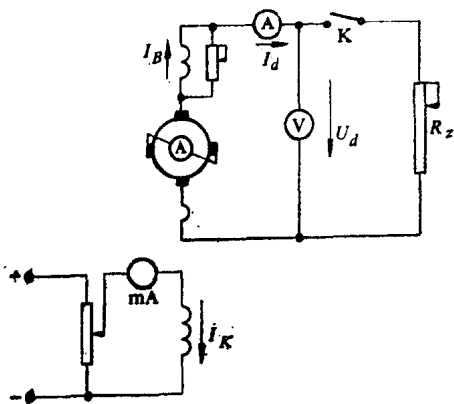


图 1-15 电机放大机外特性试验线路

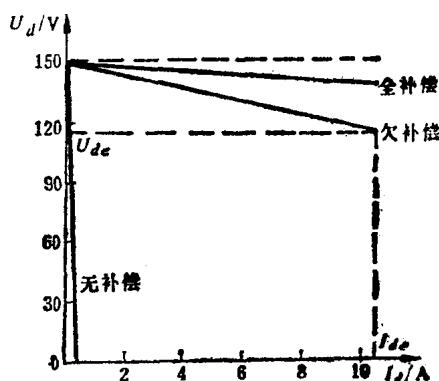


图 1-16 ZKK12 J 电机放大机外特性曲线

2. 欠补偿：补偿绕组安匝小于直轴电枢反应安匝。在这种情况下放大机的外特性更加倾斜。图 1-16 所示欠补偿，其电压变化率为 30%。无补偿时，带上很小负载， U_d 即降到零，所以不能正常工作。

3. 过补偿: 补偿绕组安匝大于直轴电枢反应安匝, 在这种情况下, 放大机的外特性在全补偿外特性之上, 当补偿过强时, 外特性会呈现上翘, 可能引起放大机的自励, 因而失去控制作用。因此, 使用中一般应避免过补偿。

(三) 调整补偿程度的方法

补偿程度是依靠与补偿绕组并联的调节电阻 R_{br} 来调整的, 一般补偿绕组设计得使在额定电流时由它所建立的磁势安匝要比直轴电枢反应安匝大 3~10% (容量大的对应于较小的数值, 容量小的对应于较大的数值)。由于电机发热时, 补偿绕组和分路电阻值 (R_{br}) 变化得不一樣, 因此调整的补偿程度不是固定不变的。为了减小发热时对补偿的影响, 分路电阻是由两部分导线组成: 一部分用铜导线绕制成线圈, 为不可调节部分, 第二部分是由电阻温度系数小的镍铬合金丝绕成的可变电阻。

第一步先调整到全补偿状态。按图 1-15 接线, K 断开, 调节励磁电流使放大机发出空载电压; 记录此时交轴电流值。合上 K, 使负载电流等于额定电流, 调节 R_{br} 使交轴电流维持原值, 这样就得到了全补偿状态。

然后再将 R_{br} 略微减小, 使得在额定电流下的端电压与空载电压之差为额定电压的 30% 左右。这样就得到了所需要的欠补偿程度, 如 ZKK12J 空载电压 150 V, 额定负载时电压 115 V, 电压降占额定电压 $35/115 = 30\%$, 按此整定后的所有外特性曲线都是下降的。

电机放大机的补偿程度出厂时已调整好, 因此, 如没有发现什么特殊问题, 不需要另行调整。

(四) 电机放大机的特点归纳如下

1. 放大倍数高, 功率放大倍数可高达 200~50000;

2. 时间常数小, 控制绕组的时间常数一般为 0.03~0.06 s, 但由于控制绕组还与控制电路电阻相串联, 因此其时间常数是很大的。交轴回路的时间常数一般为 0.05~0.1 s, 直轴绕组时间常数更小些, 且与输出回路负载性质有关。因此电机放大机的时间常数主要取决于交轴回路时间常数。可见, 电机放大机励磁过渡过程快, 控制灵敏。图 1-17 为 ZKK-12J 实际空载阶跃响应曲线, 它不仅显示了电机放大机时间常数小的特点, 还显示了控制绕组在不同阶跃输入电压时, 其过渡过程曲线是不同的。当 E_{JF} 约为 60 V 以下时, 可近似作为一阶电路, 而 60 V 以上时, 近似作为二阶电路。

3. 励磁余量大, 可以在过渡过程中提供强励。

4. 有多个控制绕组, 可以实现各种反馈, 进行自动调整, 而且运行亦很可靠。

其缺点是剩磁电压大, 使控制系统复杂化; 磁滞回环较宽, 使工作特性不稳定; 同时材料要求高, 制造工艺较复杂, 成本较高。电机放大机的价格约为同容量的直流电机价格的三倍左右。另外, 它们仍是有换向器的旋转电机, 维修比较麻烦。

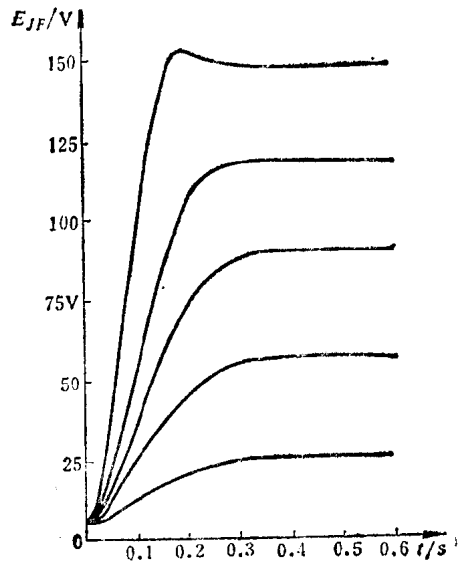


图 17 ZKK12J 电机放大机
空载阶跃响应曲线

四、电机放大机的型号、规格

我国生产的电机放大机为ZKK系列（见本章附表1-1，1-2电机放大机的主要技术数据），功率等级目前为0.2~50kW，如ZKK12J。字母含义：ZKK——直流、控制用、放大机；数字12——转速为2900r/min左右时放大机额定输出功率（kW）的10倍近似值；J——带交流驱动电动机。

电机放大机控制绕组编号的意义如12-4-12。第一组数12表示属于ZKK12J型号的控制绕组，第二组数4指有4个控制绕组，第三组数12则是指第12组绕组参数。

控制绕组的额定电流，是指用这一个控制绕组工作时，使放大机在额定负载时发出额定电压所需要的控制电流，一般实际额定控制电流比铭牌上规定的要小，控制绕组的长期允许电流，是从绕组发热不超过允许温升而决定的长期允许通过的电流。

五、电机放大机的使用注意事项

（一）电刷在换向器上的位置无特殊要求时，出厂时放在几何中性线上，如果为了加强稳定，避免过励及减小剩磁，则可由中性线顺旋转方向移动一点，这样就减小了放大倍数。允许电刷沿旋转方向移动（在端盖上量）2~3mm。

（二）由于电刷位置的偏移，所以放大机必须按机上标示的方向旋转，从交流电动机端看，一般为顺时针旋转方向。

（三）放大机的励磁系统：无论在什么情况下，都应避免自励而使电机放大机产生过电压。

（四）电机放大机在热状态下，应该承受下列过载：

1. 额定电压时，在3s内，允许200%额定电流的过载；
2. 在不超过50%额定电压时，允许350%额定电流的过载，历时3s，但强制频率每小时不超过6次，时间间隔均匀；
3. 电机放大机应能在空载输出电压为150%额定电压，历时3s，但强制频率每小时不超过6次，时间间隔均匀。

§ 1-3 JF-F-D开环系统

电机放大机在自动调速系统中，一般有两种供电方式：当电动机容量较小时，电机放大机作为直流发电机直接向电动机供电，如图1-18；当电动机容量较大时，电机放大机作为励磁机向发电机励磁绕组供电，发电机再向电动机供电，如图1-19。

在JF-F-D开环系统中，调节给定电压 U_g ，可以改变 E_{JF} 、 I_{FL} 、 E_F 、 n ，对电动机实行调速。

控制绕组中电流

$$I_K = \frac{U_g}{(\Sigma R)_K} \quad (1-5)$$

式中 $(\Sigma R)_K$ 为控制回路总电阻。

根据等效发电机原理，电位器 R_0 的输出开路电压为

$$U_g = \frac{r_g}{R_0} U_o = \alpha_g U_o \quad (1-6)$$

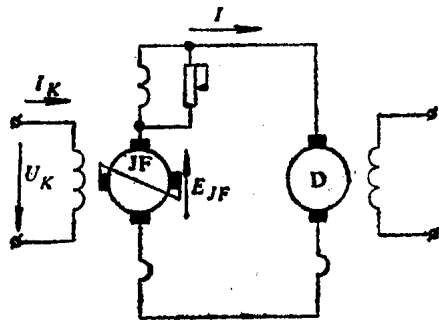


图1-18 JF-D系统原理图

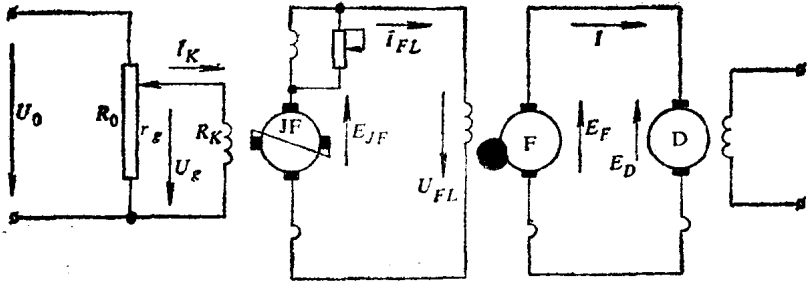


图1-19 JF-F-D开环系统原理图

式中 R_0 ——给定电位器（即调速电位器）的电阻；

α_g ——给定电位器的分压比。

给定电位器的等效内阻为

$$r'_g = \frac{(R_0 - r_g) r_g}{R_0} = \alpha_g (R_0 - r_g) = \alpha_g R_0 (1 - \alpha_g) \quad (1-7)$$

因此 $(\Sigma R)_K = \alpha_g R_0 (1 - \alpha_g) + R_K$

假设系统所有元件都工作在线性范围内，即每个元件输入量与输出量之间维持线性关系。并结合式 (1-5)，可得

$$E_{JF} = K'_{JF} I_K W_K = K'_{JF} \frac{W_K}{(\Sigma R)_K} U_g = K_{JF} U_g \quad (1-8)$$

式中 K'_{JF} ——电机放大机空载特性斜率；

K_{JF} ——电机放大机电压放大倍数，与 $(\Sigma R)_K$ 有关。

设电机放大机是处在全补偿状态，则

$$U_{FL} = U_{JF} = E_{JF} \frac{R_{FL}}{r_{JF} + R_{FL}} \quad (1-9)$$

式中 r_{JF} ——电机放大机等效内阻。

而发电机电势

$$E_F = K_{F0} U_{FL} \quad (1-10)$$

式中 K_{F0} ——发电机电压放大倍数。

$$\text{故} \quad \frac{E_F}{U_g} = \frac{U_{JF}}{U_g} \cdot \frac{E_F}{U_{JF}} = \left(\frac{E_{JF}}{U_g} \cdot \frac{R_{FL}}{r_{JF} + R_{FL}} \right) \cdot K_{F0} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 说明电机放大机考虑负载效应后电压放大倍数减小为 $\left(\frac{E_{JF}}{U_g} \cdot \frac{R_{FL}}{r_{JF} + R_{FL}} \right)$ 。

$$\text{或} \quad \frac{E_F}{U_g} = \frac{E_{JF}}{U_g} \cdot \frac{E_F}{E_{JF}} = K_{JF} \cdot \left(\frac{E_F}{U_{FL}} \cdot \frac{R_{FL}}{r_{JF} + R_{FL}} \right) = K_{JF} K_F \quad (1-12)$$

式 (1-12) 说明发电机考虑电源内阻后电压放大倍数减小为 K_F ， $K_F < K_{F0}$ 。

主回路中电势平衡方程式为

$$E_F = IR + E_D = I (R_F + R_D) + C_c \Phi n$$

则

$$\begin{aligned} n &= \frac{E_F}{C_c \Phi} - \frac{R_F + R_D}{C_c \Phi} I = U_g K_{JF} K_F K_D - (R_F + R_D) K_D I \\ &= n_0 - \Delta n_K \end{aligned} \quad (1-13)$$