

电力拖动自动化

(可控硅直流调速系统)

上 册

清华大学工业自动化系

前 言

毛主席亲自动和领导的无产阶级文化大革命，以排山倒海之势、雷霆万钧之力把剥削阶级世代把持的教育阵地搅了个“天地翻复”。在这场大革命中，一个崭新的无产阶级教育制度正在逐步建立；教育战线的社会主义新生事物层出不穷。从来还没有这样的事情：创造世界历史的无产者，第一次用自己长满厚茧的粗壮的双手，把握了培养青年一代的航向。学校为工农敞开了大门。教育同三大革命运动实践血肉相连。一批批工农兵学员，满怀革命豪情到党和国家最需要的地方去，限制资产阶级法权，缩小三大差别，坚定地走与工农相结合的道路。总之，在工人阶级的领导下，在教育这块阵地上，无产阶级开始实现了对资产阶级的全面专政，学校正在被改造成为无产阶级专政的工具。

在阶级社会里，学校历来是阶级专政的工具。资产阶级办教育是为了替资产阶级培养各种统治人材和训练恭顺的接班人。从来就没有不为一定阶级服务的教育。资产阶级教育，是把学校改造成为无产阶级专政的工具，培养有社会主义觉悟的有文化的劳动者，还是维持资产阶级知识分子对学校的统治，培养资产阶级精神贵族，以巩固资产阶级专政、复辟资本主义的工具？在这个谁专谁的政的根本问题上，一直存在着两个阶级、两条路线的激烈斗争。

执行一定的教育方针，必然要采取与之相适应的教学内容和教学方法。而一定的教学内容和方法又都是为实现一定的培养目标服务的。旧教材从体系、内容到方法都是为培养资产阶级精神贵族服务的；新教材必须为巩固无产阶级专政服务，必须为培养有社会主义觉悟的有文化的劳动者服务。七·二七以来，经过这几年的教育革命实践，教材虽然有了不少改革，但还只是开始，马列主义、毛泽东思想还没有完全占领这个阵地，在这个领域里，资产阶级在某些方面还占优势。不解决这个任务，不仅不能培养出无产阶级革命事业的接班人，而且，“无产阶级成份的学生就有被资产阶级改造的现实危险”。

《电力拖动自动化》教材的改编首先就要为培养有社会主义觉悟的有文化的劳动者的目标服务，这是我们改革《电力拖动自动化》教材的体系、内容、方法总的指导思想。

遵照毛主席《五·七指示》，改变“三脱离”的状况，彻底打破资产阶级对无产阶级的专政，几年来广大师生到工厂、工地、农村、部队开门办学，全心全意依靠工人阶级办教育，努力做到师生与工农兵相结合，教育与生产劳动相结合，理论与实际相结合。在开门办学中，结合典型任务进行教学，打破了基础课——技术基础课——专业课的“老三段”旧体系，按照马克思主义的认识论组织教学。改编的《电力拖动自动化》教材，打破了过去的《电机及其应用》，《电力拖动自动化》，《调节原理》，《数学》，《物理》，《电工》等以课程为中心的体系，按开门办学的需要，组成新的课程。

以当前技术革新中常用的可控硅直流调速系统作为电力拖动自动化的典型系统，围绕这一系统编写《电力拖动自动化》的基本教材，着重介绍电力拖动自动化系统的基本规律、分析方法、实验调试方法和实际应用问题。同时，为了解决典型任务的多样性和设计任务的需要，还编写了一本《直流调速系统参考资料》，可以根据需要选用。

旧的教学方法，概括起来就是“三中心”——教师为中心，书本为中心，课堂为中心。旧教材就是适应这种教学方法、为培养资产阶级接班人服务的，必须彻底改革。开门办学冲破了这个“三中心”的旧方法，教材必须坚持理论与实践的统一，符合由浅入深，由特殊到一般的认识规律，便于学员进行自学。这样才有利于三结合的教学方式，有利于边干边学，有利于开展“官教兵，兵教官，兵教兵”的群众性的教学活动。

教材必须以辩证唯物主义作为指导思想，运用对立统一的观点去分析和阐明电力拖动自动化的一些基本概念和规律。这是用无产阶级的世界观来转变学员思想的重要方面。旧教材鼓吹“专家至上”、“英雄创造历史”的反动唯心史观，宣扬“理论至上”、“技术第一”，充斥着大量的唯心主义和形而上学，严重地毒害了许多知识分子和青年学生。因此，破唯心论形而上学，立唯物辩证法，用它来统帅教材，这决不只是一个方法问题，而是用什么样的世界观影响学员的重大问题，是清除滋生资产阶级知识分子土壤的一项重要任务。

我们在重新编写《电力拖动自动化》教材的时候，学习了毛主席关于教育革命的一系列重要指示，回顾了这几年教育革命的实践，批判右倾翻案风，批判形形色色的修正主义，批判旧学科体系的资产阶级思想，深入工农兵、深入生产实际进行了一些调查研究，努力朝着教材真正为无产阶级教育革命服务迈步。但是限于我们的政治思想水平，对毛主席教育革命思想领会得不深，实践经验又少。因此，教材中肯定会有不少错误和缺点，诚恳地希望广大工农兵、工农兵学员给予批评指正，以便进一步搞好教材改革。

工业自动化专业《电力拖动自动化》教材编写小组

1976年6月

目 录

前言

第一章 概论	1
§ 1—1 什么叫电力拖动自动化?	1
§ 1—2 什么样的生产机械采用直流自动化电力拖动系统?	3
§ 1—3 电力拖动自动调速系统的组成	5
第二章 直流电机和电力拖动	7
§ 2—1 直流电机	7
2—1—1 主磁极和磁场	9
2—1—2 电枢和感应电势, 发电作用	10
2—1—3 换向器	12
2—1—4 电动作用	12
2—1—5 发电作用和电动作用的对立统一	13
§ 2—2 直流电机的基本规律	14
2—2—1 实际电枢的主要特点	14
2—2—2 激磁方式和电路原理图	17
2—2—3 发电作用的特征——感应电势	18
2—2—4 电动作用的特征——电磁转矩	20
2—2—5 发电作用和电动作用的对立统一规律	22
§ 2—3 直流电机的选择和使用	28
2—3—1 直流电机中的能量转换和损耗	29
2—3—2 限制直流电机带负载能力的基本因素	32
2—3—3 电动机的工作方式和容量选择	35
2—3—4 直流电机的系列和铭牌数据	43
2—3—5 直流电机的引出端和接线	47
2—3—6 选择直流电机时需要考虑的其它问题	48
§ 2—4 直流电机的电力拖动	51
2—4—1 他激直流电机的机械特性	52
2—4—2 生产机械的机械特性	58
2—4—3 电动机和生产机械的对立统一规律	64
2—4—4 直流电动机的起动和制动方法	68
§ 2—5 直流电动机的调速方法	76
2—5—1 调速指标	77

2-5-2 改变电枢电压调速	79
2-5-3 弱磁调速	81
2-5-4 调速时电动机的容量问题	82
§ 2-6 直流电动机的试验和保护	85
2-6-1 一般检查	85
2-6-2 电刷中性线的调整	85
2-6-3 电枢电阻的测量	86
2-6-4 机械特性的测定	86
2-6-5 直流电动机的自动保护	89
第三章 可控硅整流电路及可控硅——电动机系统	90
§ 3-1 可控硅整流元件的作用和特性	90
3-1-1 可控硅元件	90
3-1-2 可控硅是怎样工作的?	92
3-1-3 怎样实现可控整流?	93
3-1-4 可控硅的伏安特性	94
3-1-5 可控硅的主要参数	95
3-1-6 可控硅的型号和规格	101
§ 3-2 三相可控整流电路工作原理及其分析方法	104
3-2-1 概述	104
3-2-2 带纯电阻负载的三相 0 式整流电路	104
3-2-3 带电感电阻负载的三相 0 式整流电路	109
3-2-4 共阳极整流电路及其应用	113
3-2-5 三相全控桥式整流电路	117
§ 3-3 可控硅——电动机系统	124
3-3-1 电流连续时可控硅——电动机系统的机械特性	124
3-3-2 电流断续时可控硅——电动机系统的机械特性	129
3-3-3 平波电抗器的作用及其选择	131
§ 3-4 可控硅的触发电路	134
3-4-1 可控硅元件对触发电路的要求	134
3-4-2 同步移相信号为锯齿波的触发电路	138
3-4-3 触发器的定相	148
§ 3-5 主变压器及可控硅元件容量计算与选择	151
3-5-1 主变压器电压、电流及容量的计算	151
3-5-2 可控硅电压、电流计算与选择	154
3-5-3 可控硅整流元件的串联与并联	156
§ 3-6 可控硅的保护	162
3-6-1 过电流保护	162

3-6-2 过电压保护	166
3-6-3 $\frac{di}{dt}$ 和 $\frac{dv}{dt}$ 的限制	177
§ 3-7 三相整流电路的实验与调整	185
第四章 反馈控制系统	189
§ 4-1 反馈控制的基本原理	189
§ 4-2 转速负反馈自动调速系统	193
4-2-1 有差调速系统	193
4-2-2 调速系统静特性分析	201
4-2-3 无静差调速系统	214
4-2-4 自动调速系统的稳定性	221
§ 4-3 电压负反馈及电压负反馈加电流正反馈自动调速系统	230
4-3-1 电压负反馈自动调速系统	230
4-3-2 电压负反馈加电流正反馈自动调速系统	237
§ 4-4 自动调速系统的限流保护——电流负反馈的应用	244
4-4-1 转速负反馈带电流截止负反馈的自动调速系统	244
4-4-2 转速、电流双闭环调速系统	250
§ 4-5 带有激磁控制的自动调速系统	258
§ 4-6 自动调速系统的实验方法	263
4-6-1 环节静态放大倍数的测定	263
4-6-2 可控硅——电动机开环系统实验	266
4-6-3 可控硅——电动机转速负反馈单环调速系统实验	267
上册习题解答	269

第一章 概 论

§ 1-1 什么叫电力拖动自动化?

在工、农业等国民经济以及人民生活的一切领域中,广泛使用着各种各样的生产机械。例如工业中的金属切削机床、起重运输机械、鑽探机、軋鋼机、造纸机、纺织机、鼓风机、气体压缩机;农业中的拖拉机、排灌机械;林业中的鋸木机;交通运输中的机车等等。要使各种生产机械能够正常运转,必须有原动力。目前已经利用的原动力,除了直接的人力、畜力以外,有风力、热力、水力、电力、液压力、气压力、原子核能动力等等。但是用于直接拖动生产机械的原动力则主要是电力,这是因为电能容易传送,便于控制。而且电动机的效率很高,也比较经济。其它类型的动力,大部分都是用来发电,转换成电能后,再用到生产中去。

电动机接上电源后,把电能转换成机械动力,带动各种生产机械来完成它们的生产任务,就叫做电力拖动。

随着生产的发展,要求生产机械不断提高劳动生产率、提高产品质量、改善劳动条件、减少消耗、降低生产成本,这就越来越对电力拖动提出更高的要求。例如,精密机床要求加工精度达到百分之几毫米甚至几微米;大型镗床的送进机构要求在很宽的范围内调速;大批量另件加工时,为了提高生产率,可由数台或数十台机床组成自动线,要求实现自动联锁和集中控制;形状复杂的工件要求在程序控制机床上自动加工出来。又如,在軋鋼工业中,巨型的年产数百万吨鋼錠的现代化初軋机,其軋軋电动机容量达数千千瓦,而且操作频繁,在不到一秒的时间内就得完成从正转到反转的过程;軋制薄铁皮的高速冷軋机最高軋速达到 37 米/秒,而成品的厚度误差不大于 1%;在造纸工业中,日产新聞紙 400 吨以上的高速造纸机,抄紙速度达到 1000 米/分,稳速误差小于 $\pm 0.01\%$;凡此种种,不胜枚举。要完成这样的任务,只靠电动机本身就不够了,还需要一整套的自动控制设备。这一切构成了自动化的电力拖动系统。图 1-1-1 表示了电力拖动系统组成的示意图。

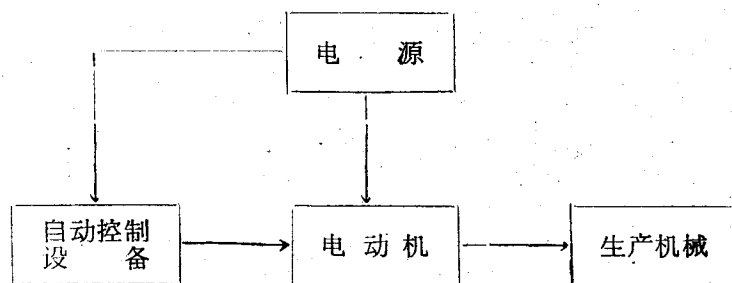


图 1-1-1 电力拖动系统示意图

电力拖动的自动控制，是采用各种自动控制元件，对生产机械进行自动控制，包括：自动控制起动、制动、逆转、同步、调速、自动维持转速、力矩或功率为恒定值、按给定程序或事先不知道的规律改变速度、改变转向和工作机构的位置、使工作循环自动化等等。随着控制工具的改进，自动化电力拖动得到广泛迅速的发展。特别是近代半导体器件、数控技术和电子计算机的应用，使得自动化电力拖动又发展到一个新的水平，向着生产过程自动化的方向迈进。应用电子计算机可以不断地整理大规模复杂生产过程中的大量数据，并且据以计算出最佳的运行参数，然后通过自动控制设备及时地调正各部分的生产机械，使之保持在最合理的运行状态，因而能够高速度高质量地进行生产，同时使生产费用尽量低廉。

但是，在有阶级存在的社会里，技术总是为阶级斗争服务的。在帝国主义和社会帝国主义那里，为了加速军事生产，准备和进行侵略战争，为了加强竞争能力，降低成本，最大限度地榨取利润，资产阶级才大搞自动化，其结果是造成大批工人失业。在业工人的劳动强度因要跟机器配合而大大增加，剥削更为加剧，从而阶级矛盾也就更加深化。只有在无产阶级专政的社会主义国家里，自动化技术才能为人民服务，为巩固无产阶级专政服务，成为解放生产力、改善劳动条件、增加社会财富的手段，成为逐步消灭三大差别的有力工具。

在无产阶级专政的条件下，如何处理政治与业务，革命与生产，政治与经济的关系，这是马克思主义同修正主义斗争的焦点之一。毛主席教导我们：“政治是统帅，是灵魂。”“政治工作是一切经济工作的生命线。”什么是政治呢？列宁指出：“政治就是各阶级之间的斗争。”因此，坚持政治的统帅作用，就是要以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，坚持无产阶级专政，坚持社会主义道路。伟大领袖毛主席为我党制定了“抓革命，促生产”的伟大方针。这个方针，科学地反映了革命和生产、上层建筑和经济基础、生产关系和生产力之间的辩证关系，指明了沿着社会主义方向高速度地发展国民经济唯一正确的途径。党内资产阶级和修正主义路线的头子，他们或则片面夸大先进科学技术的作用，鼓吹“阶级斗争熄灭论”和“唯生产力论”，否定以阶级斗争为纲，否定政治挂帅，否定无产阶级革命和无产阶级专政，或则形而上学猖獗，别有用心地把革命和生产，政治和经济、阶级斗争和生产斗争、无产阶级专政和社会主义建设，统统对立起来，反对抓生产，搞建设，其后果不但使生产发展受到破坏，也必然危害无产阶级革命和无产阶级专政的伟大事业。他们的目的就是要复辟资本主义。因此，我们在学习自动化技术的时候，必须批判修正主义者所散布的种种谬论，牢记党的基本路线，以阶级斗争为纲，用无产阶级政治统帅生产，统帅科学技术。按照毛主席的路线和政策，把社会主义革命继续推向前进，按照毛主席提出的宏伟规划，在本世纪内，全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化，把我国建设成为社会主义强国，争取对人类作出较大的贡献，为最终实现共产主义而奋斗。

§ 1-2 什么样的生产机械采用直流自动化电力拖动系统？

电力拖动系统按拖动生产机械的电动机种类来分，有直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两大类。前者是用直流电动机拖动，后者是用交流电动机拖动。

那么什么样的生产机械须要采用直流电力拖动系统呢？要回答这个问题，我们必须对直流电动机的性能特点有所了解，并对生产机械的工艺作一番分析以后才能做到。

直流电动机虽然不如交流电动机在结构上简单、制造方便、维护容易、价格便宜，但是它具有良好的起动性能和调速性能，宜于在广泛范围内平滑调速，有些生产机械是需要用它拖动的。

例如龙门刨床，工件卡紧在工作台上，电动机经齿轮减速箱和蜗杆齿条传动工作台沿导轨作往返运动。刀具安放在工作台上部和侧面的刀架上。在工作台前进(工作行程)时进行切削，在返回行程，刀具抬起不进行切削。工作台的传动见图 1—2—1。工作行程的速度是由切削速度决定的，它与工件的材料、大小、形状，刀具的几何形状及其质量有关。提高最高切削速度固然可以提高生产率，但能量损耗大，对刀具也是不经济的。因此，目前我国制造厂定最高切削速度为80—90米/分。刨削的最低速度为6~10米/分而对刀点车要求最低速度为2—3米/分。故龙门刨床要求约20—40倍调节速度的范围。而且要求根据不同的工件和刀具在此范围内能平滑无级的调速。龙门刨床除了调速

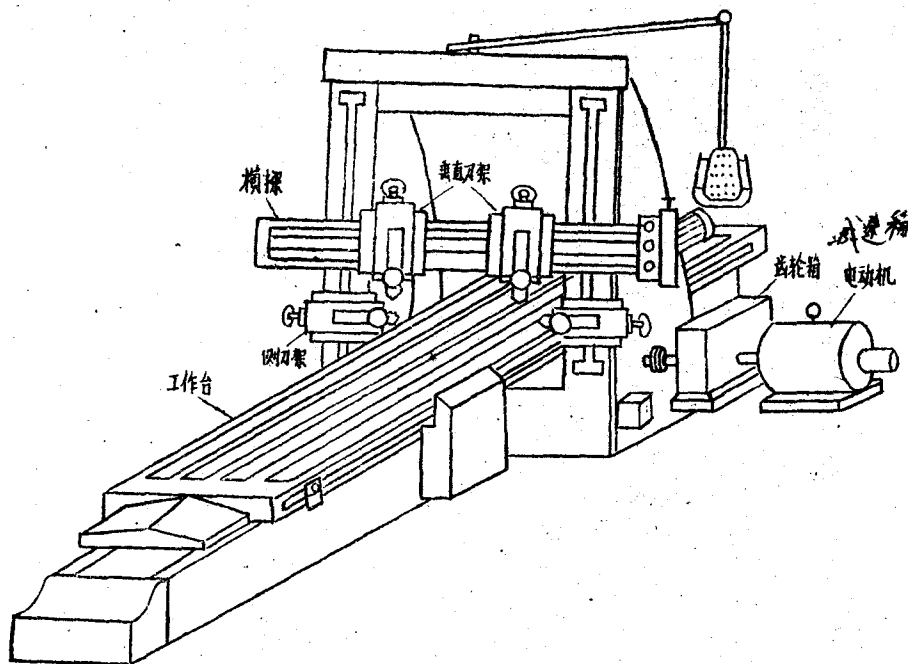


图 1—2—1 龙门刨床传动图

的要求外，还有稳速的要求。希望工作台的速度不受外来一些因素变化而发生波动，例如切削负载的变化，电网电压波动等都会影响速度的变化。速度变化过大就会影响被加工工件表面的质量。为了保证刨削加工的精度，要求工作台的速度当刀具切入工件（即加上切削负载）以后“掉转”不能太多，这种速度降落常称为静态速降（用加上额定负载稳定后的转速降落与空载转速的相对比值表示）。而且加工精度对突加额定负载后速度变化过程中的最大速度降落也有要求，这种速度降落习惯上称动态速降（用最大速降与空载转速的相对比值表示）。对于龙门刨床要求静态速降小于 5%，动态速降不大于 10%。

龙门刨床的工作台经常频繁地正、反转，往复周期性地运转，起、制动过程在工作周期中占有相当大的比重，因此缩短起、制动过程，对于这种生产机械提高生产率有着很大的意义。

根据上述的工艺要求，龙门刨床工作台拖动的电动机一般采用直流电动机，而且是电机制造厂专门设计制造的惯性较小、过载能力较大的特殊型式的直流电动机，以满足工作台快速频繁的起、制动和正反转以提高生产率、减小过渡过程中能量损耗的要求。工作台在较大的速度调节范围内还要保证一定的调速精度。为此，对它的电力拖动还应有一套自动控制系统。

再举一个多机架热连轧机的例子。目前连轧机各机架轧辊多采用由单独电动机拖动。钢材同时在几台机架的轧辊中进行轧制，如图 1—2—2 的示意图。根据轧制不同品种和规格钢材的工艺要求分配各机架的压下量（钢材经过轧辊压延以后厚度的变化量，如 1[#] 机架的相对压下量为 $\frac{H_0 - H_1}{H_0}$ ）。为保证钢材在各机架中正常的轧制，不致拉断或堆积，就要求各机架轧辊的线速度保证严格的比例关系（即所谓多单元同步协调）。对于不同的钢材规格品种各机架速度就要有不同的配比关系。这就要求各机架的速度能够作单独连续无级的调正。另外当某机架的轧辊磨损以后，为了保持各机架速度比例关系，

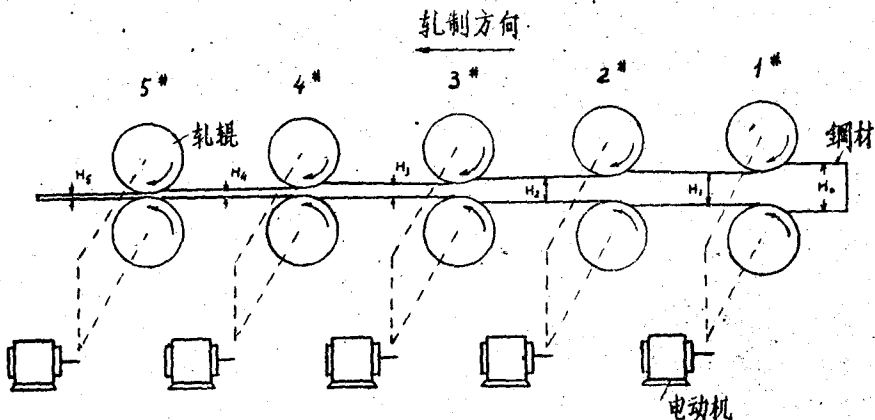


图 1—2—2 热连轧机轧制钢材示意图

还要求对该机架的速度作单独细微的调正。连轧机根据轧制工艺一般要求速度调节的范围约为 10 倍。由于各机架的速度要求严格的比例关系，就要求速比关系一经调定以后，不论在何种扰动（主要是咬钢后的负载扰动）作用下，要有高的稳速精度。对热连轧机要求静态速降小于 $0.2 \sim 0.5\%$ ，动态速降小于 $1 \sim 3\%$ ，动态恢复时间小于 $0.2 \sim 0.3$ 秒。否则，受扰动后破坏了各机架间的速比关系，也会造成机架间的钢材堆积或拉断的事故或影响产品质量。

对连轧机由于要求无级调速而且稳速精度较高，因此各机架轧辊的拖动采用单独直流电动机拖动，而且每台电动机都应有一套稳速的自动控制系统。

用直流电动机拖动的生产机械还是很多的，通过上述两个例子我们可以看到，在调速要求（调速范围、调速精度、调节平滑性）较高的、频繁快速起制动正反转的、多单元同步协调运转的生产机械上宜采用直流自动化电力拖动。通过上述两个例子也告诉我们确定电力拖动自动化方案应当从生产机械工艺要求出发，这一点是必须注意的。

§ 1-3 电力拖动自动调速系统的组成

在生产机械的直流电力拖动系统中，最常见的还是要求调节速度并维持速度为恒值的自动调速系统。

调节直流电动机转速的方法有两种：改变电枢电压或者改变激磁磁通。这两种方法都需要有个可调的直流电源。过去大部分是用交流电动机直流发电机组，自从可控硅整流元件问世以来，由于它能组成静止式变流装置，而且惯性小，能节省有色金属和钢铁，目前已广泛地应用到电力拖动系统中作为可控的整流电源。

操作者可以藉助一个电位计改变控制电压的大小，再通过可控硅整流元件的触发装置改变可控硅整流元件的导通角，因而也就改变了可控硅整流装置输出的直流整流电压的大小，用它来改变电动机的电枢电压或者改变激磁磁通，就可以调节电动机的转速。不同的控制电压，电动机就相应有不同的转速，控制电压给定了电动机的转速，因此称它为给定信号。转速调节的结果可以通过仪表等测量装置显示出来。如果由于某些原因（例如生产机械带上负载后），转速不符合要求的时候，还得由操作者再去调节给定信号，使转速回复到原来的数值，系统本身是无能为力的。因此这种系统就无法满足高调速精度的要求，而且使操作紧张疲劳，对工作情况变化频繁的生产机械，这种调节方法甚至根本无法实现。所以必须实现自动化。要代替人的这种监视与调节工作，我们可以利用测量与反馈装置把电动机或生产机械的转速转换成电压后送到自动设备中去，与给定信号电压（代表我们所希望的转速值）比较，如有差别，再利用这一偏差电压去调正可控硅整流装置输出的整流电压，从而调节电动机的转速，获得满意的结果。这样就形成闭环反馈控制系统，亦称自动调速系统。其基本组成简图如图 1-3-1 所示。

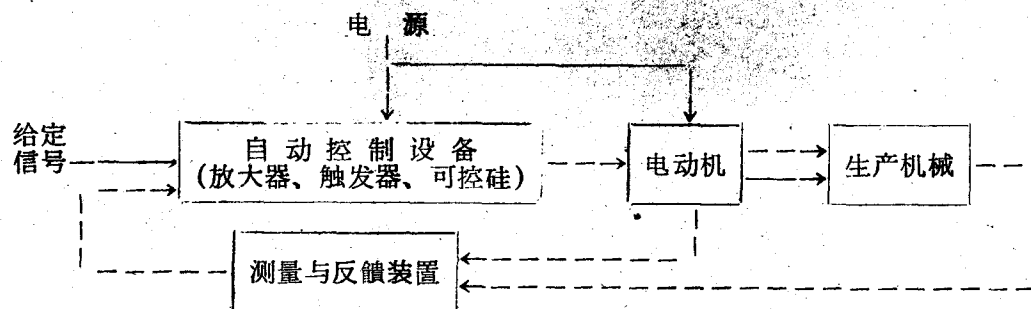


图 1—3—1 自动调速系统基本构成图

本教材主要介绍可控硅直流自动调速系统。

第二章 直流电机和电力拖动

内 容 提 要

本章着重说明直流电机及其电力拖动的基本原理和应用问题。§2-1 首先介绍直流电机的主要组成部分和工作原理。§2-2 进一步分析直流电机的基本规律，揭示出其内部的基本矛盾，即电动作用和发电作用的矛盾，从而认清直流电机的本质。§2-3 阐明直流电机中的能量转换关系和决定电机运行容量的基本因素，说明如何正确地选择和使用直流电机。§2-4 和 §2-5 介绍直流电机在电力拖动中应用的具体性能，其中包括：机械特性、起动、制动和调速，而贯穿于各种性能之中的是电力拖动系统的主要矛盾——电动转矩和负载转矩的矛盾。最后在 §2-6 中介绍直流电机的试验和保护方法。

学习本章的目的是能够在电力拖动自动化系统中正确地使用正常的直流电机。深入一步的问题，如电枢绕组的具体绕法、电枢反应及其补偿、换向的原理及其改善方法、应用可控整流电源对直流电机提出的问题的，直流电机的故障和维修等等，都列入本教材的《参考资料》中。

§ 2-1 直 流 电 机

电动机俗称“马达”，有的地方又叫“电滚子”。一接上电源，它就会转起来，带动机床、轧钢机、起重机、水泵等等生产机械，去执行各自的生产任务。所以，电动机是一种把电能转变成机械能的机器，是电力拖动自动化系统中的执行机构，是工农业生产电气化和自动化的重要设备。

按照电源种类的不同，电动机有两种：交流电动机和直流电动机。直流电动机调速性能好，正反转控制灵活，有这类要求的生产机械常常需要用直流电动机拖动，例如大、中型轧钢机、矿井卷扬机、龙门刨床、电机车等等。但是，和应用最广的交流异步电动机相比，直流电机由于有换向装置，所以存在着结构较复杂、价格较高、维护比较麻烦等缺点。

直流电动机是需要直流电源的，另外，电解、电镀等设备也需要直流电源。通常发电厂供给的都是交流电，直流电源从那儿来？这就需要专门的直流发电机。把直流电动机的作用倒过来，由别的原动机（一般用交流电动机）拖着它转动，就可以发出直流电来。直流电动机和直流发电机都是直流电机，是同一事物在不同条件下的两种表现，它们内部的规律是一样的。旧教材中虽然也提到直流电动机和发电机的“可逆性”，但是讲到它们的原理时，往往割裂开来，各讲各的，只强调它们不同的外部表现，这是形而上学的观点。

近年来，随着大功率硅整流装置和可控硅整流装置的应用和发展，逐渐取代了直流

发电机来供给直流电，使直流电源设备简便得多，因而也大大推动了直流电动机的应用。然而可控硅整流电源又对直流电动机的换向和发热等方面提出了新问题，从而又推动了直流电动机结构的改造。（见《参考资料》）

一台直流电机主要由两大部分组成。外部固定不动的部分叫做定子，当中旋转的部分叫做转子。定子的主要作用是产生磁场，并作为整个电机的支架，它的主要部件是主磁极，此外还有换向磁极、机座、端盖等。转子又称电枢，是电机的枢纽，或核心，包括电枢绕组、电枢铁心和转轴，有的电机轴上还自带风扇，作冷却用，在电枢绕组中感应电势，流过电流，在电枢电流和磁场的相互作用下产生转矩，通过转轴带动生产机械运转（作为发电机时，则由原动机带动转子旋转）。电枢绕组在旋转着，电流怎么流进来流出去呢？是通过换向器和电刷流通的。换向器装在转轴上没有风扇的一端（通常称作换向器端或后端），在电路上和电枢绕组相联接；电刷则装在固定在定子上的刷架里，靠电刷和换向器表面摩擦接触来导电。直流电机的主要部件见图 2—1—1，其剖面示意图见图 2—1—2。

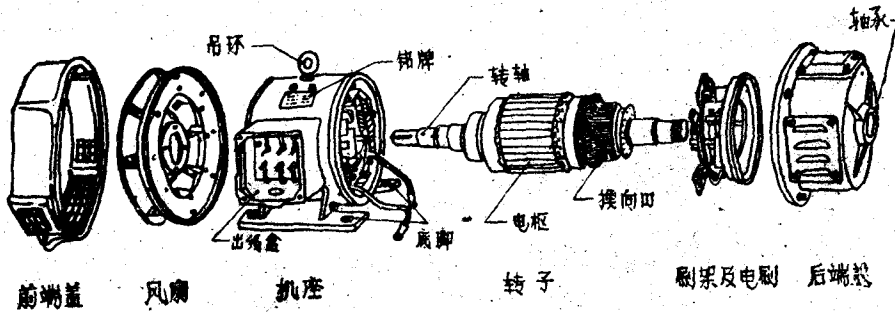


图 2—1—1 直流电机主要部件图

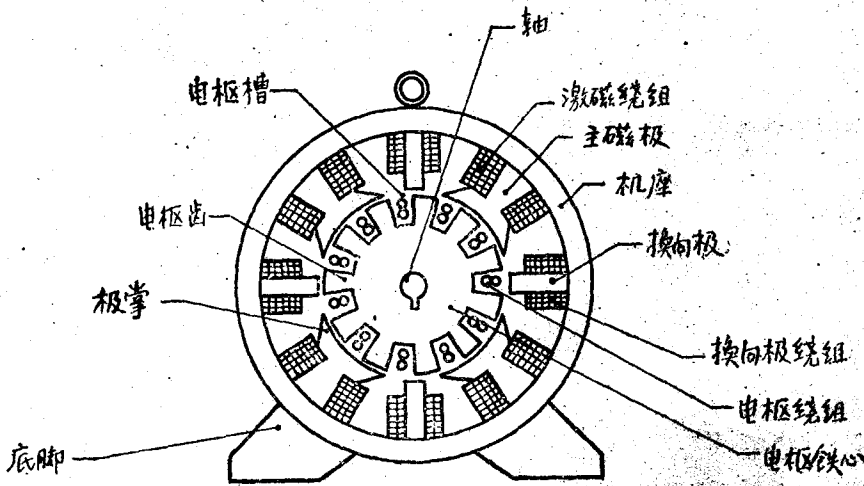


图 2—1—2 直流电机剖面示意图（以四极电机为例）

开始学习《电力拖动自动化》时，只要求能正确使用正常的电机就够了，因此本节只重点介绍直流电机的主要部分及其工作原理，对于其内部的详细结构先不深究；但是在实际运行中遇到故障或其它问题时，还是需要对电机内部有进一步的认识才能正确处理的，可参阅《参考资料》。

在直流电机运行中起作用的基本规律主要是：电流的磁效应（“动电生磁”）、电磁感应（“动磁生电”）和电磁力的规律。关于这些规律的详细说明可以看《电工》教材，下面我们分析直流电机的工作原理时，为了学习方便起见，也简单地重述一下。

2-1-1 主磁极和磁场

直流电机定子的主要部分是主磁极，主磁极的铁心用铸钢铸成，或用 1.0~1.5 毫米的钢板冲制成形，迭起来，再用铆钉铆紧。近转子的一面称为极掌（或极靴），极掌比较宽，以承托激磁绕组，掌面成弧形，以配合电枢表面，使磁通密度分布均匀。铁心外面套着线圈，叫做激磁绕组，通电后，产生磁场。整个磁极用螺栓固定在机座上，磁极的数目总是成对的，有二极、四极、六极……等等。各极的激磁绕组一般都串联起来，有两个出头，接在电机出线盒内的接线板上。

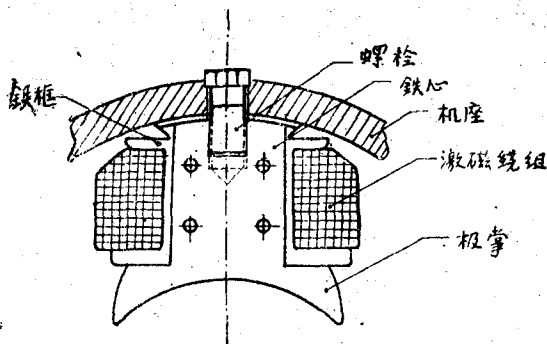


图 2-1-3 主磁极

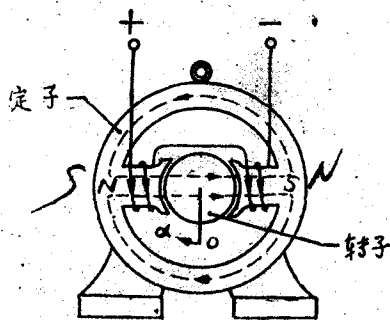


图 2-1-4 直流电机剖面示意图

现以一台两极电机为例，分析一下磁场的分布。图 2-1-4 是两极电机的剖面示意图。当激磁绕组通直流电时，如果线圈的接法和电流方向是图 2-1-4 中所画的那样，那么，按照“动电生磁”的右手螺旋定则（图 2-1-5），可以判明磁通方向正好是图 2-1-4 中虚线所表示的那样；按照规定，凡是磁通从极面出来的那个极叫做 N 极，从极面进去的叫 S 极。磁通穿过两个磁极和转子铁心，再从定子外壳绕回来，形成了闭合的磁路。由于磁极的形状，在极掌和转子之间气隙比较小，因而磁通比较强；两极间空档的气隙大，因而磁通较弱；沿转子表面磁通密度的分布是不均匀的。以图中的 O 线为起点，沿 α 方向将转子表面展成直线座标，则磁通密度 B 的分布波形就是图 2-1-6 所示的样子了（以 N 极下的磁密为 $+B$ ， S 极下的磁密为 $-B$ ）。

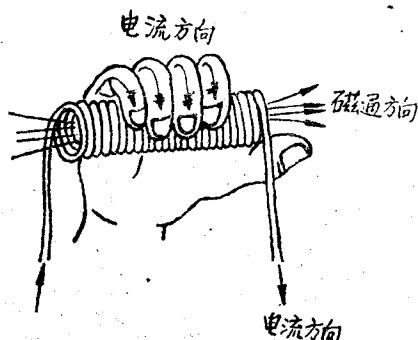


图 2-1-5 用右手螺旋定则判断线圈磁场方向

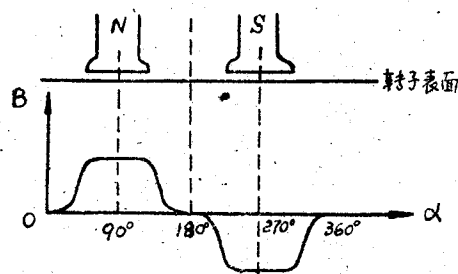
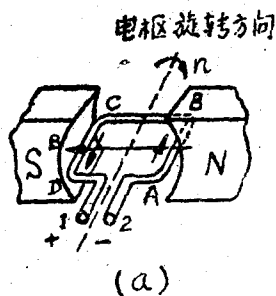


图 2-1-6 转子表面磁通密度的分布

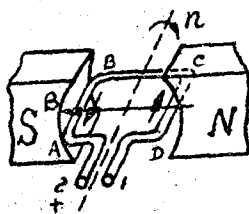
2-1-2. 电枢和感应电势，发电作用

电枢表面有许多槽，槽中嵌着电枢绕组。在激磁绕组通直流电产生了磁场的条件下，如果电枢以转速 n 旋转着（在发电机中是由外力使它旋转，在电动机中是它本身产生转矩旋转起来），电枢绕组的导线就会不断地切割磁力线，因而感应出电势来，这就是直流电机的发电作用。感应电势的极性是怎样的呢？让我们先拿一个简单的一匝电枢绕组的模型来分析一下。图 2-1-7(a) 是当线圈绕着它的中心轴旋转时，线圈平面和磁力线互相平行那一瞬间的情况，这时，两边导线 AB 和 CD 都垂直地切割磁力线，感应电势方向可以用发电作用的右手定则来判断，如图 2-1-8（详见《电工》教材）。办法是：平伸右手，使大拇指与其余四指垂直，掌心对着磁力线方向，大拇指指着导线运动的方向，那么，四指的指向就是导线中感应电势的方向（是电位升的方向）。用右手定则来判断图 2-1-7(a) 中线圈的感应电势，可以看出， AB 中的电势方向是由 A 到 B ， CD 中的电势是由 C 到 D ，在线圈中二者恰好相加，在 1、2 两端表现出图中所示的极性：1 是+、2 是-。这是线圈平面处在图 2-1-7(a) 中位置的情况。如果线圈转过 180° ， AB 和 CD 两边的位置互相颠倒了， DC 取代了原来 AB 的位置，感应电势是由 D 到 C ；而 AB 中的电势却由 B 到 A ，如图 2-1-7(b)，那么、1、2 两端的电势极性和 (a) 中的情况相反，变成 2 是+、1 是-了。当线圈转到图 2-1-7(c) 的中间位置时，情况又是怎样的呢？这时 AB 和 CD 的运动方向都和磁力线平行，不切割磁力线，因而感应电势等于另。

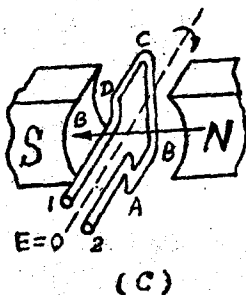
以上是电枢线圈转到三个特定位置时的感应电势。从一般情况来看，沿转子表面磁通密度的分布是图 2-1-6 那样的；图 2-1-7(a) 线圈两边导线处在磁极中心，相当于图 2-1-6 中 $\alpha=90^\circ$ 的位置，这时导线切割的磁力线密度最大，因而感应电势 e 也最高；图 2-1-7(c) 导线处在 $\alpha=180^\circ$ 的位置，磁通密度为 0，因而 e 也是 0；图 2-1-7(b) 导线处在 $\alpha=270^\circ$ 的位置，磁通密度为负向最大值，感应电势 e 也是反向最大值。由此可见，在任何位置上感应电势的大小和极性都和那里的磁通密度相当，



(a)



(b)



(c)

图 2-1-7 电枢绕组感应电势模型

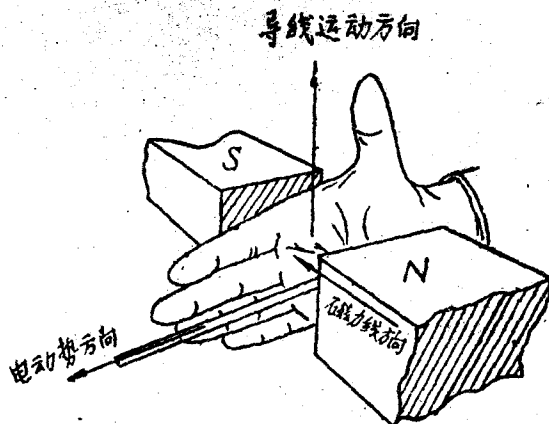


图 2-1-8 用右手定则判断发电作用的感应电势方向

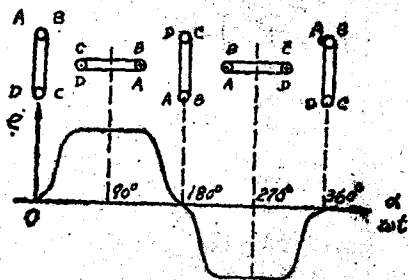


图 2-1-9 电枢转到不同位置时的感应电势

因此感应电势 e 的变化曲线与磁通密度在空间分布曲线的形状是一致的，如图 2-1-9 所示。如果电枢的转速恒定，设角速度为 ω 弧度/秒，则 $\alpha = \omega t$ ，那么感应电势 e 随时间变化的曲线形状也是这样。因此感应电势的极性是正负交变的，直流电机电枢绕组内的感应电势实际上是交流的。

图 2-1-7 中线圈的 1、2 两端是不断转动的。要把感应电势引出来，可以把它们分别接在两个铜环上，叫做滑环，再用电刷 1、2 分别接触两个滑环，从电刷上引出导线接到负载 FZ 上（如电灯、电阻），电流便能从旋转的线圈中通过滑环和电刷引出来了（图 2-1-10）。这样，负载两端所得到的电势就是图 2-1-9 那样的交变电势，因此，图 2-1-10 只是一台交流发电机的模型。

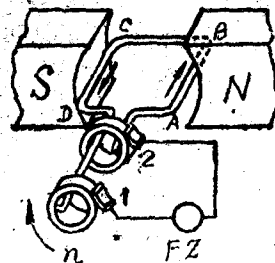


图 2-1-10 交流发电机模型