

高等学校試用教科书

金屬切削机床的电力装备

哈尔滨工业大学生产机械电力装备教研室編



中国工业出版社

是在总结几年来教学的基础上并参照苏联哈里卓緬夫的“金属切削机床”一书编写成的。书中第一部分阐述了机床传动的基本原理；第二部分介绍了机床的控制电器与自动控制的基本原理；第三部分介绍了机床的电力装备及其自动化。最后还介绍了机床电力装备的

本书可作为高等工业学院的试用教科书，也可供有关技术人员参考。

金属切削机床的电力装备

哈尔滨工业大学生产机械电力装备教研室编

*

第一机械工业部教材编审委员会编辑（北京复兴门外三里河第一机械工业部）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $8 \frac{3}{8}$ · 插页 1 · 字数 199,000

1961年9月北京第一版·1962年1月北京第二次印刷

印数 8,038—13,247 · 定价（10—6）1.05元

*

统一书号：15165·845（一机-178）

前 言

本书是根据选編教材的精神按照教学大綱，参照了苏联И.В. 哈里卓緬諾夫著“金属切削机床的电力装备”（1958年第二版）的教材，結合我国生产实际，在总结几年来的教学經驗和教材的基础上，由王炎同志执笔，并經教研室集体审查討論編写而成。

本书内容共分为三大部份。第一部份为机床电力传动的基本理論，包括电动机与生产机械的机械特性的分析，电动机的调速，电力传动的过渡过程与电动机容量的选择。第二部份为机床的控制电器与自动控制的基本原理。第三部份叙述了典型机床的电力装备及其自动化。最后并編入了“机床电力装备的设计与安装”一章。

考虑到本門課程的教学时数有限，因此在具体机床电力装备及其自动化的部份中没有全面地将各类机床的电力装备及其自动化均予以闡述，只是叙述了使用广泛和电力装备比較典型的机床。

本书尽可能地反映了我国生产实际与大跃进以来的重大成就，力求反映国内外在机床电力装备及自动化方面的最新技术与机床自动控制的新綫路。

由于我們的水平有限，特别是对工厂生产实际的調查研究非常不足，因此还存在不少的缺点和錯誤。欢迎兄弟学校和讀者多多提出补充修正的意見。

另外，有关电器的代表符号、型号和标号，我国有关工业部門均制訂有标准，本书因編写仓促，未及更改，希讲课教师在讲授时加以补充。

本书曾經清华大学工业企业电气化教研組仔細审閱，提出不少宝贵的意見，特此致謝。

哈尔滨工业大学生产机械电力装备教研室

一九六一年五月

目 次

前 言	3
第一章 緒 論	5
§1-1 課程的目的与任务	5
§1-2 金属切削机床电力传动的发展简史	6
§1-3 我国机床电气化事业发展的概况	9
第二章 交流异步电动机的机械特性与调速	10
§2-1 电动机的机械特性与生产机械的机械特性	10
§2-2 交流异步电动机的机械特性	11
§2-3 交流异步电动机的启动	14
§2-4 交流异步电动机的制动	15
§2-5 交流异步电动机的调速	17
第三章 直流他激电动机的机械特性与调速	22
§3-1 直流他激电动机的机械特性	22
§3-2 直流他激电动机的启动	24
§3-3 直流他激电动机的制动	25
§3-4 直流他激电动机的调速	27
§3-5 直流发电机——电动机组 (Γ-Π) 的调速系统	30
§3-6 电机放大机控制的直流调速系统	31
§3-7 磁放大器控制的直流调速系统	38
§3-8 离子变流装置控制的直流调速系统	41
第四章 电力传动的过渡过程	44
§4-1 概述	44
§4-2 电力传动的运动方程式	44
§4-3 电力传动系统启动过渡过程时间的计算	45
§4-4 交流异步电动机在过渡过程中的能量损耗	47
§4-5 直流发电机——电动机组过渡过程的基本概念	48
第五章 电动机容量的选择	51
§5-1 概述	51
§5-2 电动机的发热与冷却	52
§5-3 恒定负载长期工作制电动机容量的选择	53
§5-4 变动负载长期工作制电动机容量的选择	54
§5-5 短期工作制电动机容量的选择	57
§5-6 重复短期工作制电动机容量的选择	58
§5-7 电动机容量选择的统计分析法	59
§5-8 电动机结构型式和型号的选择	60
§5-9 机床电力传动的力能经济问题	61

第六章 机床的控制电器与自动控制的基本原理	64
§6-1 概述	64
§6-2 手动控制电器	65
§6-3 自动控制电器	67
§6-4 电磁铁、电磁离合器、电磁工作合	73
§6-5 继电器——接触器自动控制的基本线路	77
§6-6 按行程原则的自动控制	82
§6-7 按时间原则的自动控制	85
§6-8 按速度原则的自动控制	91
§6-9 按电流原则的自动控制	93
第七章 普通车床的电力传动及其自动控制线路	95
§7-1 普通车床的电力传动	95
§7-2 普通中小型车床的电气自动控制线路	95
§7-3 普通重型车床的电力传动及其自动控制线路	97
§7-4 电轴	99
§7-5 立式车床的电力传动及其自动控制线路	100
第八章 龙门刨床的电力传动及其自动控制线路	103
§8-1 龙门刨床工作台的电力传动	103
§8-2 龙门刨床工作台的自动控制线路	105
§8-3 龙门刨床进刀的自动控制	108
第九章 仿型机床的电力装备	111
§9-1 概述	111
§9-2 触点式断续的电气仿型控制机床	112
§9-3 无触点式连续控制的电气仿型机床	113
第十章 机床的程序控制	117
§10-1 概述	117
§10-2 继电器接触器控制的程序控制机床	118
§10-3 数字程序控制机床	121
第十一章 机床自动线的电气自动控制	125
§11-1 机床自动线对电气自动控制的基本要求	125
§11-2 机床自动线的电气自动控制	126
第十二章 金属切削机床电力装备的设计与安装	130
§12-1 金属切削机床电力装备设计的步骤和内容	130
§12-2 电气自动控制线路的设计	130
§12-3 机床电力装备的布置与安装图的设计	132
§12-4 机床操作台与电气柜的设计	133
参考文献	137

第一章 緒 論

§1-1 課程的目的与任务

金属切削机床是制造机器的机器。一切工业部門中所用的机器，大部都是由金属切削机床加工完成的。所以机床工业的发展，直接影响到机器制造业的发展。一个国家的机床的拥有数量，以及它的技术水平基本上就标志着这个国家工业的生产水平。

我国的社会主义建設要求我国的工业逐步地轉移到現代化的技术基础上来。这就要求我国的机器制造业不断地提高劳动生产率，为国民經济各部門提供数量更多，质量更好的技术装备。

机床的电气化与其自动化对提高机器制造业的劳动生产率，改进产品的质量，減輕工人的体力劳动，降低产品的成本具有极为重要的作用。

机床是用刀具来进行切削加工的机器，因此为了实现切削的过程，刀具与工件間就須要作相对的运动。机床也就是由刀具系統和工件系統所組成的矛盾統一體。为了获得刀具与工件間相应的运动，机床就必須具有动力来源和将运动分配与传递到刀具与工件的传动机构。所以任何机床都包含了发动机、配力机和工作机三个基本的組成部份。馬克思曾說：一切发展了的机器，都由三个在本質上不同的部份——发动机，配力机，与工具机（即工作机）——构成。

机床的发动机和配力机的作用主要是使工作机运动，因此它們又往往統称为机床的传动。随着原动机形式的不同，机床的传动又分为液压的、蒸汽的、气动的、电气的。由于电能分配灵活、輸送經濟、控制方便，因此发展至現在，原动机广泛使用电动机。电力传动也就成为机床传动的主要型式。

供給机床工作机部份的运动應該根据生产工艺过程的要求，所以还需要将由原动机变换了的机械运动进行控制。

所謂电力传动就是指由电动机、传动机构和控制装置这三个基本环节所組成的綜合裝置。它完成能量的变换（将电能变换成机械能），运动的分配与传递，以及将变换了的机械运动进行控制的任务。

机床的电力传动部份为机床提供一定要求的动力。并且对工作机根据生产工艺过程加以控制。因此机床的电力传动直接影响着机床的結構、机床的生产效率和机床的加工质量。机床电力传动部份的任何变革，都将促使机床的工作机部份結構得以进一步簡化。

例如車床由不調速的电动机传动改由双速电动机，可調速的直流电动机传动时，齿輪就由 9 对減为 7 对、4 对（图 1-1a, 6, B）。并且減少了速

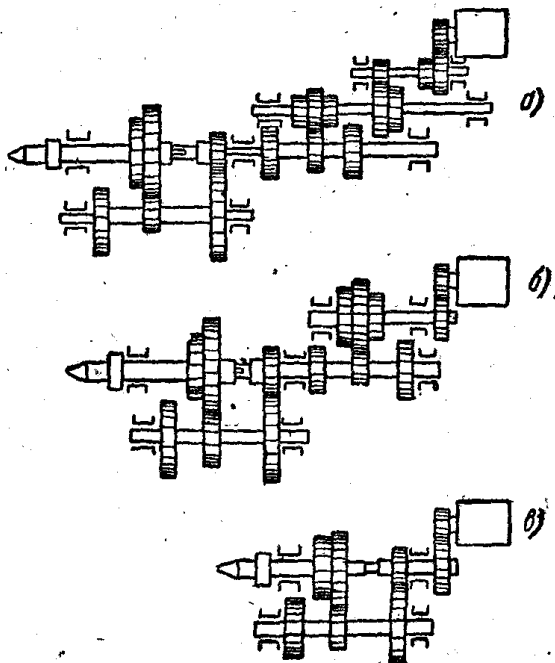


图 1-1 在不同的传动电动机下的車床齿輪箱

度损失，提高了机床的生产效率。

依靠着电力传动的自动控制，龙门刨床就能实现工作台的自动往返，自动进刀，节省了辅助工时，减轻了工人的操作。

由上述看出，电力传动是现代化机床中不可分割的一个组成部分。同时它的任何变革都推动着机床向前发展。因此机床的设计者与使用者应该学习和掌握有关的内容。

本门课程的任务是分析机床电力传动的发展规律，阐述机床的电力装备与其自动化中的基本理论，反映国内外在机床电力装备与其自动化方面的一些新技术。

机床电力传动的基本原理，电力传动系统中所使用的控制元件——电器的结构和原理，自动控制的基本原则，具体机床的电气化与自动化也就成了本课程研究的主要对象。

§1-2 金属切削机床电力传动的发展简史

电力传动已成为现代机床传动的主要型式。但是从其发展来看，在十八世纪以前，都是用人力、兽力作为原动力。

由于受到人类体力的限制，人们曾寻找新的动力，例如采用水力、风力，但是它们又受地点和季节的限制，不能普遍采用。

十八世纪末叶，资本主义的出现，生产力有了很大发展，因此工业生产也要求越来越多的机器，这样就对机床在生产效率上和加工质量上提出了更高的要求。而落后的原始动力，限制了机床生产效率的提高。因此就要求机床有不受体力、地点和季节等限制的原动力。在这种要求下出现了新的动力——蒸汽机。在十九世纪最初的二十年里，机床就开始采用蒸汽机作为动力来源。

蒸汽机产生出完全受人控制的动力。蒸汽机的使用，使机床的转速大大提高，机床的生产效率大为增加。

这时一个工厂就用一台大功率的蒸汽机来传动全厂所有的生产机械。

随着生产规模的扩大，工厂的动力不断增加，为了保证蒸汽机的煤和水的供应，工厂必须建立在水源地与煤矿附近，同时蒸汽机放在车间外，运动的传递很不方便。因此生产规模的扩大，原动力又成为机床发展中矛盾的主要方面。

1834年俄国 B. C. 雅可比发明了电动机。1838年他第一个在船艇上采用电力传动。1891年俄国科学家 M. O. 多利沃-多勃罗沃尔斯基又创造了简单、可靠的三相交流异步电动机。由于交流电能可以远距离传输，而且使用灵活，因此它的出现，立刻受到极大的重视。

三相交流异步电动机出现后，电动机就逐步代替蒸汽机。

最初电动机直接代替蒸汽机，通过天轴将能量分配至各台机床，这种传动方式称为成组传动，如图 1-2 所示。

成组传动必须通过中间机构才能实现能量的分配与传递，因此机构比较复杂，传动效率低，生产的灵活性小，而且不能适用现代化的运输工具。特别是随着机床工件转速的提高，切削力的加大，机床需要的动力显著增涨，这种落后

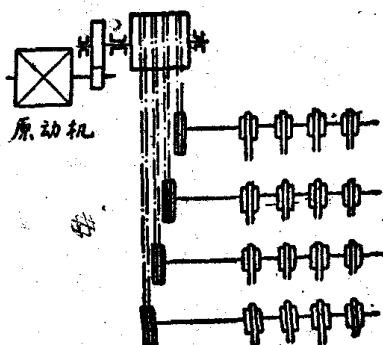


图 1-2 成组传动

的能量分配方式由于不适于传递太大的动力和较高的速度，就成为进一步提高机床生产效率的主要障碍。随着电机制造业的发展，电机产量日益增多，所以二十世纪二十年代，就开始采用由一台电动机来传动一台机床的单机传动以代替过去的成组传动。如图1-3所示。随后配力机也由齿轮变速箱逐步代替过去的皮带塔轮传动。

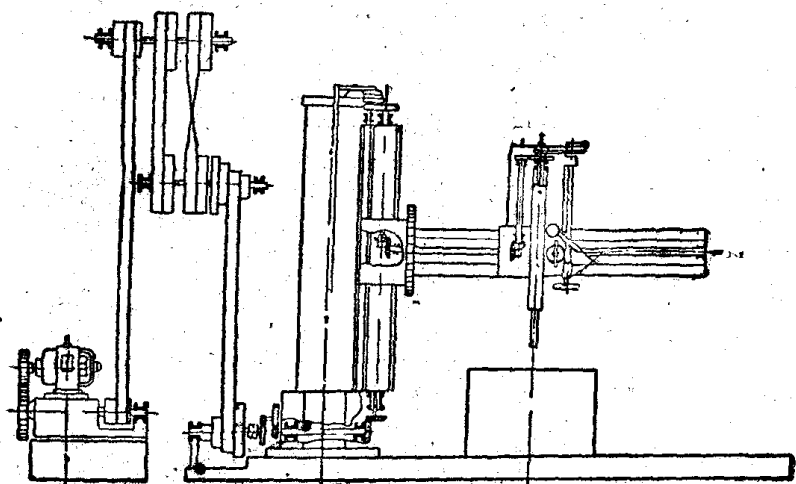


图 1-3 鑽床的單機傳動

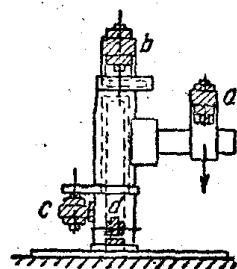


图 1-4 鑽床的多电机傳動

采用单独传动后，节省了大量的中间的传动机构，提高了传动效率，可以为机床提供更大的动力和更高的速度。由于使机床拥有了自己的原动机和配力机，机床也就发展成为具有比较完备形态的现代化金属切削机器——现代机床。

随着生产规模的逐渐扩大，需要制造各种大型的机器设备，所以机床相应地增大，运动相应增多，各种辅助运动也由原动机传动。这样机床仍由一台电动机传动时，其机械的传动机构就十分复杂，而且工作的灵活性小，各种运动的速度，工作时间都不尽相同，不能予以充分满足，限制了机床生产效率的提高。因此在二十世纪的三十年代，机床的电力传动又进一步分化，开始出现由每台电动机传动各个工作机构的多电机传动，如图 1-4 所示。

机床采用多电机传动后，大量地简化了机床的机械结构，可以使机床的各个工作机构选择最合理的运动速度，缩短机动工时。由于辅助运动采用电动机传动，辅助工时也为之缩短。多电机传动还便于实现机床的自动化，所以机床的生产效率获得大大提高。

机床的工作机部份为了获得不同速度的运动，采用了复杂的齿轮变速箱。出现多电机传动后，就有可能采用电气调速的方法，简化原动机与工作机之间的配力机（如图 1-1 所示），但电气设备投资增加，电气系统复杂。因而机电调速之间的这个斗争，引起了电力传动内部交直流传动之间的矛盾斗争的发展。

随着机床切削速度的提高，调速范围相应扩大。制造大型机床的齿轮变速机构，工艺复杂，成本昂贵，因此对简化机床的机械结构的要求十分迫切。所以在二十世纪三十年代开始出现了直流发电机——电动机组的调速系统，以及具有如电机放大机等放大元件控制的调速系统。采用可调速的传动后，机床结构大为简化（图 1-1）。

直流传动的调速性能虽好，但须要变流设备，系统复杂，维护不易，传动效率低，电气设备投资大。而交流异步电动机结构简单，工作可靠，价格便宜，但是调速困难。因此

制造经济的可调速的交流传动就具有重要的意义。

这样通过交直流传动的斗争，推动了机床电力传动的发展。机床的原动机也更进一步接近机床的工作机。

在車床上，主軸轉速和刀架移动速度之間要求保持有严格的比例关系，采用絲槓传动，結構复杂，絲槓制造困难，因此目前发展为电軸来传动。

某些机床工作部件的轉速很高，因此电动机直接在結構上与工作机合而为一。例如磨床砂輪的高速电主軸，最終地将中間的机械的传递机构清除殆尽。

机床的电力传动，最初采用手动控制，使用的是与此相适应的手动控制电器，例如刀开关、轉換开关等电器。

由于切削工具的改进，机床所需的动力迅速增大，手动控制电器由于不能消弧而难于控制大电流，而且在机床相对地增大与运动增多的情况下，提出实现远距集中操纵等要求时，采用手动控制电器就不能予以滿足。因此随着控制对象容量的增加，运动的增多，这种落后的控制手段就不能与之相适应，就出现了继电器——接触器的自动控制方式。

应用继电器与接触器可以实现机床电力传动的起动、停止、反轉等过程的自动控制。由于机床多电机传动的出現和应用，更促使机床应用这些电器实现各种自动循环与联鎖控制。

因此继电器——接触器的自动控制提高了机床的生产率，使机床向自动化方向发展。

随着机床向高精度、高生产率与更高层次的自动化方向发展，上述的继电器与接触器就不能完全相适应。例如仿型机床，由于继电器接触器断續动作，不能連續准确地反映信号，因此就影响加工质量。在二十世紀三十年代开始就相继出現各种連續动作的控制元件，如电机放大机、磁放大器、电子管与半导体放大器，組成連續动作的自动控制与自动調节系統。

应用这些系統，就制造成功高准确度的自动加工的仿型机床，自动保持轉速而調速范围很广的臥式鏜床。

普通的自动机床，如果更換工件，就須要經過一个比較复杂的調整过程，所以它只适合于加工批量較大的另件。在使单件小批生产实现自动化的加工要求下，在第二次世界大战以后，出現了能够按照人們預先給定的工艺順序、切削用量和运动軌迹自动地进行工作的程序控制机床，采用易于更換程序的紙帶、紙卡、磁帶記憶程序的装置，并应用計算装置来編制程序。

加工一个另件，往往要經過很多道工序，須要由几台机床联合完成，于是就产生机床自动綫。这样就由单个机床的自动控制过渡到整个生产过程的綜合自动化。

为了进一步提高劳动生产率，提高加工质量，改善工人的劳动条件，生产过程的綜合自动化已成为当前生产发展中的重要趋势。特別在社会主义国家里，这方面的发展更为迅速。在資本主义国家里，自动化則給工人带来了失业和灾难，成为資本家获得高额利潤的工具。

机床电力传动的控制，由手动控制发展成为自动控制与自动調节，进而到程序控制，由单个机床的自动控制发展为生产过程的綜合自动化。在这发展过程中机床电力传动的自动控制系统及其元件得到不断完善与不断提高。

§1-3 我国机床电气化事业发展的概况

解放前，由于国民党反动派的统治和帝国主义的压榨和掠夺，使我国没有自己的机床工业，只有一些机械修配厂。即使这些为数不多的修配厂，它所使用的机床还都是从国外买来的。而且大部份都采用天轴与皮带传动，电气设备十分简陋，仅是采用一些最简单的闸刀开关控制。旧中国的电气设备制造水平也异常落后，甚至制造容量较大的直流电机都有困难，也没有专门制造机床电器的工厂，只是在电机制造厂中附带制造一些简单的电器。产品不成系列，技术经济指标落后。

解放后，在党的正确领导下，迅速地改变了旧中国落后的面貌，在短短的十多年中就已经基本上建成了完整的机床工业体系，机床电气化的事业也获得迅速发展。

在我国国民经济恢复时期，党首先通过技术改造把一些修配性质的工厂逐步改造成为机床制造厂，并相应地将旧有制造电气开关的小型工厂改组成为专门制造控制电器的工厂。至1952年时，我国已能生产出采用继电器接触器等自动控制电器来控制的各种车床、立车、铣床、摇臂钻床等机床。在这些机床上可以实现半自动循环，包括自动反向、自动改变转速、自动放松与夹紧工件——的控制。

为了促进机床电气化事业的发展，于1955年开始建立专门为机床服务的机床电器制造厂。

1958年在总路线的光辉照耀下，全国职工破除迷信，解放思想，树立了敢想敢干的共产主义风格和贯彻了党的中央工业与地方工业并举、大、中、小型企业并举、土洋并举等一整套两条腿走路的方针，出现了一个史无前例的大跃进局面。我国的机床工业，以及机床电气化事业获得了前所未有的高速度发展。1959年机床的年产量即提前达到了第二个五年计划原定的指标。

机械工业的大跃进，不仅机床产量大为增加，而且试制了一些高、大、精、尖等机床品种，又开始生产自动化的仿型铣床、重型卧式镗床与龙门刨床等机床。并且开始试制与研究反映现代先进技术的数字程序控制机床等。

1960年在党的领导下，我国出现了一个声势浩大，规模壮阔的以机械化、半机械化、自动化、半自动化为中心的技术革新与技术革命的群众运动。使得机床的电气化和自动化得到进一步的发展。

开展研究工作是技术发展的必然要求。在党所提出的科学研究必须密切结合生产的要求，我国机床电气化的科学技术研究工作得到迅速发展。各地先后成立了专业性的研究所与试验室，开展了群众性的试验研究工作。

几年来随着我国机床工业的飞跃发展，机床电气化事业的发展也十分迅速，但是这仅仅是开始，还远不能满足国民经济发展的需要。因此必须继续努力为完成这个任务而奋斗。

第二章 交流异步电动机的机械特性与调速

§2-1 电动机的机械特性与生产机械的机械特性

电动机是带动负载旋转并供给动力的原动机，因此它不仅旋转，而且输出转矩。

当电动机转矩 M 与负载转矩 M_c 相等不变时，就得到转速 n 为一定的平衡工作状态。

但是生产机械的负载经常有变化。例如切削工件时，每处切削量不完全相等，所以电动机的转矩经常变化。这样我们就须要知道电动机转矩与转速的关系

$$n = f(M). \quad (2-1)$$

这就是机械特性。为了使电动机更好地满足生产机械所提出的要求，就须要首先研究电动机的机械特性与生产机械的机械特性，研究它们互相适应的情况。

例如机床主轴要求在吃刀时，即增加负载时希望转速仍维持原有数值，不希望停车。否则不仅降低机床生产效率，而且降低加工质量。

有的生产机械希望增加负载时转速降低。例如吊车在吊重物时须要降低转速。因此选用电动机，须根据生产要求，或者改变电动机的参数以满足上述要求。

在电工学课程中，我们已知道各种电动机的机械特性。如图 2-2 所示。

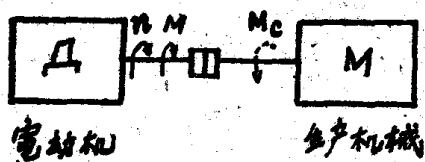


图 2-1 电动机与生产机械的关系

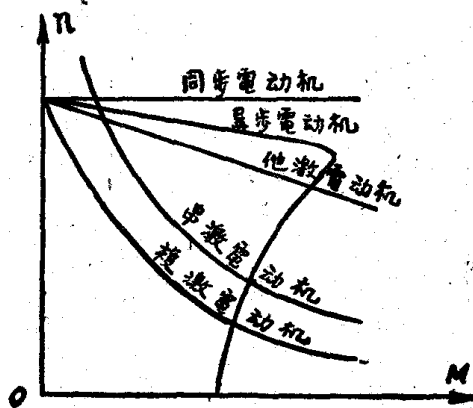


图 2-2 各种电动机的机械特性

各种电动机的机械特性均不同，我们用下列参数来表明各机械特性转速随转矩变化的程度：

1. 硬度

它用下式来表示：

$$\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n}. \quad (2-2)$$

2. 陡度

有时采用硬度 α 的倒数来表示：

$$\beta = \frac{\Delta n}{\Delta M}. \quad (2-3)$$

陡度 β 也就是机械特性的斜率。

根据机械特性硬度的大小, 电动机的机械特性可以分成三类:

1. 无落差特性。当转矩改变时而转速不变。例如同步电动机的机械特性, 它的硬度 $\alpha = \infty$ 。
2. 硬特性。当转矩增加时转速下降甚少。它的硬度 $\alpha = 40 \sim 10$ 。例如直流他激电动机和交流异步电动机的机械特性。
3. 软特性。转速随转矩作甚大的变化。它的 $\alpha < 10$ 。例如直流串激电动机的机械特性。

硬特性的机械特性尚可以用空载转速 n_0 与额定转速 n_H 之差 (即转速落差) Δn_H 与空载转速之比来表示, 它称为额定转差率 S_H :

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{\Delta n_H}{n_0} \quad (2-4)$$

上述为电动机的机械特性。生产机械的机械特性, 有的与速度无关, 有的也与速度有关。例如刀架在低速移动时, 负载转矩大, 移动速度增高时则由于动摩擦系数小于静摩擦系数, 所以转矩减小, 如图 2-3 中曲线 1 所示。通风机、油泵等生产机械的转矩则与转速平方有关, 具有抛物线形状的机械特性, 如图 2-3 中曲线 2 所示。

生产机械除由于摩擦阻力使负载转矩与转速成上述关系外, 有的为充分发挥其工作效率或受工艺的限制, 转矩与转速间亦成一定关系。例如机床的切削负载。在高速时切削用量小, 负载转矩就小, 而在低速时切削用量大, 负载转矩就增大。这样在整个转速范围内, 负载功率保持恒定 ($M_n \approx \text{常数}$)。这类负载就称为恒功率的负载。机床的刀架, 在工作速度的范围内, 摩擦转矩的变化很小, 这类负载则称为恒转矩负载。

电动机的机械特性和生产机械的机械特性共同相交的点即为工作点。这时电动机的转矩 M 和负载转矩 M_c 相互平衡。若负载转矩减小至 M'_c , 系统即失去平衡, 出现 $M - M'_c$ 的净转矩, 使电动机加速, 电动机的转矩就减小, 最后平衡于新的工作点 2。如图 2-4 所示。

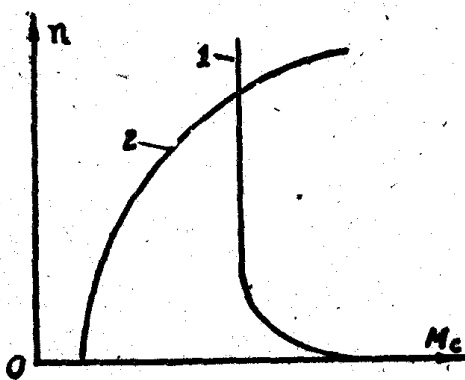


图 2-3 生产机械的机械特性

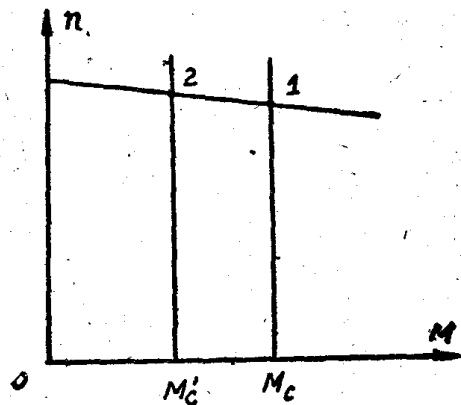


图 2-4 电动机与生产机械共同工作的机械特性

§2-2 交流异步电动机的机械特性

交流异步电动机在机床中应用极为广泛, 这与其优点密不可分:

1. 交流异步电动机结构简单, 价格便宜;
2. 工作可靠, 没有换向元件, 维护简单;

3. 不須要任何变流設備，效率高。

若与同容量同轉速的直流电动机相比，在重量上交流异步电动机約輕一半，在价格上仅为直流电机的三分之一。

因此在决定机床电力传动方案时，应尽可能扩大交流异步电动机的应用。

在异步电动机的定子上接入三相交流电流后即产生旋轉磁場。此磁場切割轉子的导体，在轉子綫圈中产生感应电势，从而流有电流。这电流与磁場作用的结果就产生旋轉力矩，使电动机轉子旋轉，其旋轉方向与旋轉磁場的方向相同。

交流异步电动机的轉矩：

$$M = C \phi_m I_2 \cos \varphi_2, \quad (2-5)$$

式中 I_2 ——轉子电流；

$\cos \varphi_2$ ——轉子电路的功率因数；

C ——比例系数。

电源电压保持恒定时，磁通 ϕ_m 也不变。电动机的轉矩仅与 I_2 、 $\cos \varphi_2$ 乘积有关。

轉子电流：

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot S}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}, \quad (2-6)$$

式中 E_2 ——轉子不轉动时的感应电势；

r_2, x_2 ——轉子电阻与轉子不轉动时的轉子漏磁感抗。

当轉子未轉动时，轉子内感应的电势最大， I_2 也最大。随着轉速的增加， s 减小， I_2 逐渐减小，如图 2-5 中的曲线所示。

轉子电路的功率因数：

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}. \quad (2-7)$$

$\cos \varphi_2$ 随着轉速的降低而减小，其特性如图 2-5 曲线所示。这样在高速时轉子电流小，轉子功率因数大；而在低速时轉子电流大，功率因数小；因此由 I_2 和 $\cos \varphi_2$ 乘积决定的轉矩 M 在此过程中必定具有一个最大值，电动机的机械特性将呈现出图 2-6 所示的曲线。

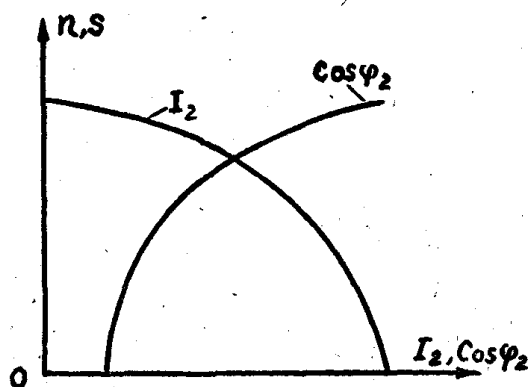


图 2-5 交流异步电动机轉子电流与功率因数的特性曲线

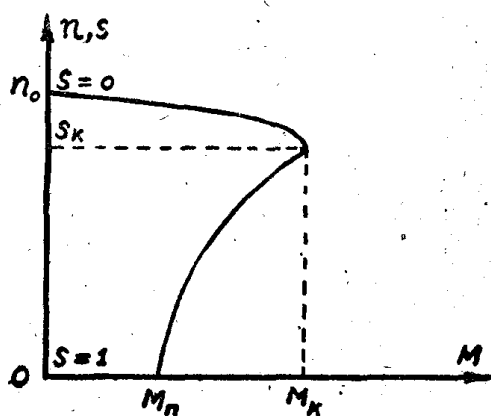


图 2-6 交流异步电动机的机械特性

在电工学中，我們已經知道在忽略定子阻抗的情况下，交流异步电动机的机械特性可用下式表示：

$$M = K \frac{U_1^2 S r_2}{r_2^2 + (S X_2)^2}, \quad (2-8)$$

式中 U_1 ——定子每相繞圈的电压；

$$K = \frac{C W_2}{4.44 f_1 W_1^2},$$

W_1, W_2 ——定子与轉子每相繞圈的匝数。

在实际应用时，不易根据上式作出机械特性。因此又有經過簡化而可根据产品目录决定异步电动机机械特性的工程計算公式：

$$M = \frac{2M_K}{\frac{S_K}{S} + \frac{S}{S_K}}, \quad (2-9)$$

式中 M_K ——电动机的最大临界轉矩；

S_K ——对应于临界轉矩时的临界轉差率。

M_K 可以自产品目录上找到， S_K 可按下述近似公式决定：

$$S_K = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}, \quad (2-10)$$

式中 x_1 ——定子繞圈的漏磁感抗；

r_2', x_2' ——归算于定子端的轉子繞圈的电阻与漏磁感抗。

它也可以由 (2-9) 式化成根据产品目录給出的数据能够进行計算的公式：

$$S_K = [\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}] S_N, \quad (2-11)$$

$$\text{式中 } \lambda = \frac{M_K}{M_N}.$$

从分析公式 (2-9) 中可以看出，当高速 S 很小时， $\frac{S}{S_K}$ 較 $\frac{S_K}{S}$ 为小，如忽略分母中的第二項，即得到一直綫方程式：

$$M = \frac{2M_K}{S_K} \cdot S. \quad (2-12)$$

当低速 S 很大时， $\frac{S_K}{S}$ 相时于 $\frac{S}{S_K}$ 可以忽略，即得

$$M = 2M_K \frac{S_K}{S}. \quad (2-13)$$

上式为一双曲綫方程式。因此由公式 (2-9) 作出的机械特性与图 2-6 的特性完全一致。

由交流异步电动机的机械特性看出：

1. 当 $n = n_0$ 时，由公式 (2-9) 知道 $M = 0$ ，即在理想空載情况下，轉子旋轉速度与定子旋轉磁场的速度相等。

2. 当轉矩增大时，电动机轉速下降，但下降不大。它的額定轉差率 $S_N = 0.02 \sim 0.12$ ，硬度 α 大于 10，属于硬特性，适合机床的要求。

3. 交流异步电动机的最大轉矩受临界轉矩决定，在产品目录上列有 $\frac{M_K}{M_N} = \lambda$ 的数值。

一般 $\lambda = 1.65 \sim 2.5$ 。它表明电动机的过载能力。由于异步电动机转矩和电压平方成正比，对电压变化很灵敏，因此电动机允许的过载最大转矩，尚须计及电网电压变化的影响，这样 $M_{max} = 0.85 M_K$ 。

4. 当 $n=0$ 时，即电动机启动的时候， $M=M_N$ 。由于启动时转差率 S 大，转子的功率因数 $\cos \varphi_2$ 小，所以启动转矩 M_N 不大。一般 $\frac{M_N}{M_H} = 0.8 \sim 2$ 。因此要求大启动转矩的生产机械，例如刀架，应该选用高转差率的电动机。这种电机转子电阻大，所以启动转矩较普通电机的为大。

5. 在绕线式异步电动机转子中串接入电阻后可以增大临界转差率 S_K (公式2-10)，从而得到大的启动转矩。因此在有些立式车床的主轴传动中采用绕线式异步电动机。转子串电阻后的特性称为人工机械特性，如图2-7所示。不串电阻的特性则称为自然特性。

6. 交流异步电动机只有在 $S=0$ 至 $S=S_K$ 区域内才能稳定工作。 S_K 以下为不稳定工作区域，因为负载转矩增加而电动机转速下降时，电动机转矩不能增加相反却是减小，结果不能与负载转矩平衡，转速继续降低，一直下降至停止。

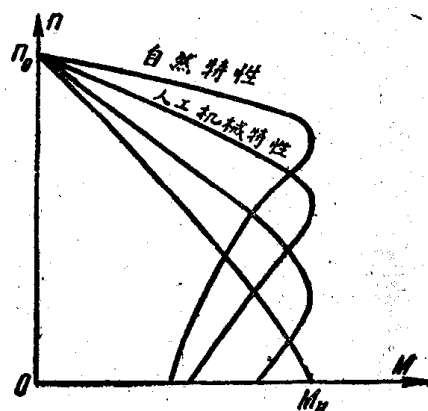


图 2-7 交流异步电动机转子串电阻的人工机械特性

§2-3 交流异步电动机的启动

交流异步电动机在启动时，由于转子感应电势 E_2 很大，因此产生很大的启动电流 I_m ，达到 4~8 倍的额定电流 I_N 。大的启动电流（特别是大容量电机）常常引起电网电压下降，电网电压和电动机转矩成平方关系，因此首先减小该电动机的启动转矩，使电动机甚至启动不了。其次尚影响电网上其它电机，使它们超过临界转矩停止下来，造成重大事故，所以必须限止异步电动机过大的启动电流。

动力部门规定，只有在电动机容量不超过 25% 变压器容量下才准直接启动。如果电动机经常起制动，或变压器与照明网路相连，那末只准启动 5% 变压器容量大小的电机。

在电工学中讲过许多异步电动机启动的方法，例如 Y-Δ 启动、变压器启动、串联电阻启动，但在机床中最常应用的是定子串电阻降压的启动方法。定子降压虽然使电动机启动转矩降低，但由于机床往往为空载启动，所以不要求大启动转矩。

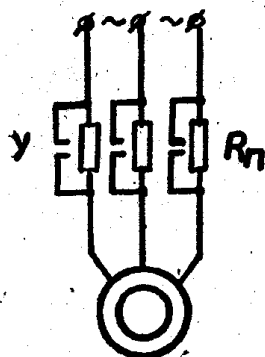


图 2-8 交流异步电动机定子串电阻的启动

在启动时，如图 2-8 所示在定子电路中串联接入电阻 R_N ，当启动结束后，触点 Y 闭合将电阻短接。

若欲减小 k 倍的启动电流，电动机的阻抗 z 应为：

$$z = k \cdot z_K, \quad (2-14)$$

式中 z_K ——转子不转时电动机的等值阻抗，

它为

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2}. \quad (2-15)$$

接入启动电阻后

$$z = \sqrt{(R_N + r_K)^2 + x_K^2}. \quad (2-16)$$

因此

$$R_{\pi} = \sqrt{(kz_K)^2 - x_K^2} - r_K. \quad (2-17)$$

根据上式，即可計算启动电阻。式中 z_K 可由下式决定

$$z_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} I_{\pi}}. \quad (2-18)$$

上式中 U_H 即为电动机的相电压， I_{π} 在产品目录中给出。知道 z_K 后，即可按下式决定 r_K 与 x_K ：

$$r_K = z_K \cos \varphi_{\pi}, \quad (2-19)$$

式中 $\cos \varphi_{\pi}$ ——电动机启动时的功率因数。 $\cos \varphi_{\pi} = 0.125 \sim 0.7$ ，对于大启动轉矩、小启动电流的电机取較大的数值。

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (2-20)$$

由于定子电压减小 k 倍，启动轉矩将减小 k^2 倍。因此要求启动轉矩大的生产机械須要进行校驗，或改用繞綫式异步电动机采用轉子串电阻启动的方法。

§2-4 交流异步电动机的制动

为了縮短輔助工时，提高机床的生产效率，往往要求机床迅速停車或改变其运动方向，亦即要电动机能迅速制动。

所谓电动机的制动就是电动机轉矩和轉速方向相反的工作状态。常用的交流异步电动机制动的方法有能耗制动、反接制动和发电反饋制动。

1. 能耗制动

如图 2-9 所示，当触点 $1K$ 断开电动机停止时立即将触点 $2K$ 閉合，在定子綫圈內通以直流电流，这样在电动机定子內原先有一个旋轉磁場，現在成了固定磁場。电动机尚未停止，仍在旋轉，所以在轉子綫圈內产生如图方向向內的感应电势与电流。該电流与磁場作用所产生的力的方向与电动机旋轉方向相反，因此成了能耗制动的工作状态。它利用轉子中儲藏的动能进行制动。在制动过程中，动能轉換成电能，而后又变成热能消耗于轉子綫圈內。

在能耗制动时，轉子中的頻率 f_2 与电动机工作状态时不同。在后者情况下，轉速越低，頻率越高，能耗制动时則相反。它为

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{pn_0}{60} \cdot \frac{n}{n_0} = f \frac{n}{n_0}, \quad (2-21)$$

式中 f ——电網頻率。

令 $s' = \frac{n}{n_0}$ 为能耗制动的轉差率，即得

$$f_2 = fs'. \quad (2-22)$$

s' 与电动机状态时的轉差率 s 間关系如下：

$$s' = 1 - s. \quad (2-23)$$

根据异步电动机能耗制动时的工作原理，制动轉矩为

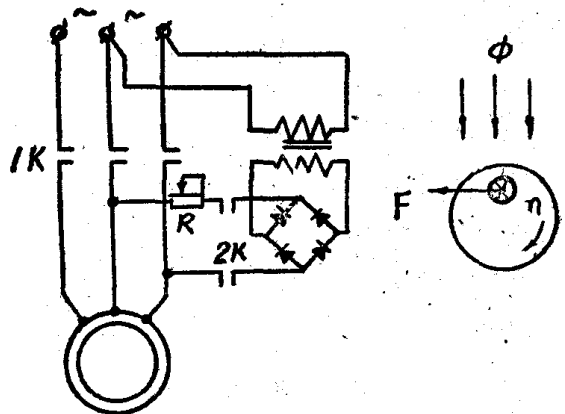


图 2-9 交流异步电动机的能耗制动

$$M = \frac{2M'_K}{\frac{S'}{S'_K} + \frac{S'_K}{S'}}, \quad (2-24)$$

式中 M'_K 和 S'_K 均为能耗制动时的临界转矩与临界转差率。

M'_K 与流经定子线圈的直流电流有关，它为：

$$M'_K = \frac{c^2}{9.81} \cdot \frac{m_1 I_n^2 \cdot x_\mu^2}{2 \cdot \omega_0 (x'_2 + x_\mu)}, \quad (2-25)$$

式中 I_n ——直流电流(安)；

x_μ ——异步电动机主磁场的激磁感抗；

x'_2 ——归算至定子端的转子漏磁感抗；

ω_0 ——旋转磁场的角速度；

c ——与定子线圈接线有关的常数。若为星形接线， $c = 0.82$ 。三角形接线时， $c = 0.44$ 。

S'_K 可以由下式决定：

$$S'_K = \frac{r'_2}{x'_2 + x_\mu}. \quad (2-26)$$

由于异步电动机的 x_μ 值相对于 r'_2 为大，因此 S'_K 值很小，这样能耗制动的最大转矩将产生在低速的部分。根据 (2-24) 式作出的机械特性如图 2-10 所示。当转速为零即

$S' = 0$ 时，制动转矩 $M = 0$ ，高速时由于转子频率 f_2 增大， $\cos \varphi_2$ 低，所以转矩亦小。

定子所通的直流电流越大，转子感应的电流也越大，制动也越强，因此改变直流电流可以改变制动强弱。

能耗制动的优点是：

1) 能量消耗少，利用自身储藏的动能进行制动。

2) 制动准确。

它的缺点是：

1) 需要直流电源，而且电流很大，一般在 $(0.5 \sim 1.0) I_n$ 。

2) 制动强度弱，在高速和极低速范围内，转矩很小。

交流异步电动机的能耗制动适用于要求制动平稳和准确的生产机械。在龙门刨床进刀系统中采用这种方法制动。

2. 反接制动

在停止电动机时，我们将电机反向联接，即将相序倒接，定子的旋转磁场方向立刻改变。电动机将由图 2-11 中的工作点 A 移至反向机械特性的 B 点工作，这时电动机转矩和转速方向相反，即呈反接制动的工作状态。

反接制动至转速等于零时，电动机仍有很大的制动转矩，这时若不切断电源，电动机立即反向工作。

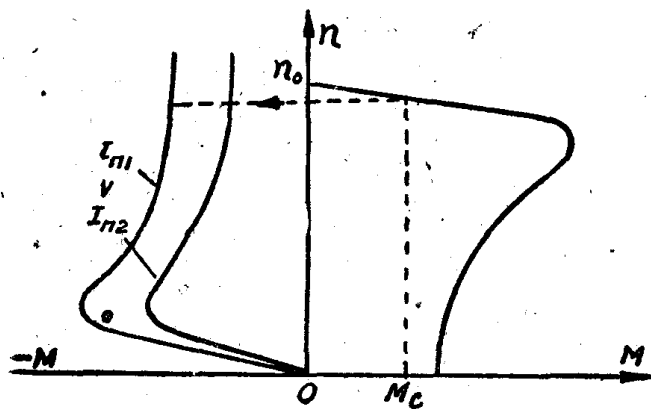


图 2-10 交流异步电动机能耗制动的机械特性

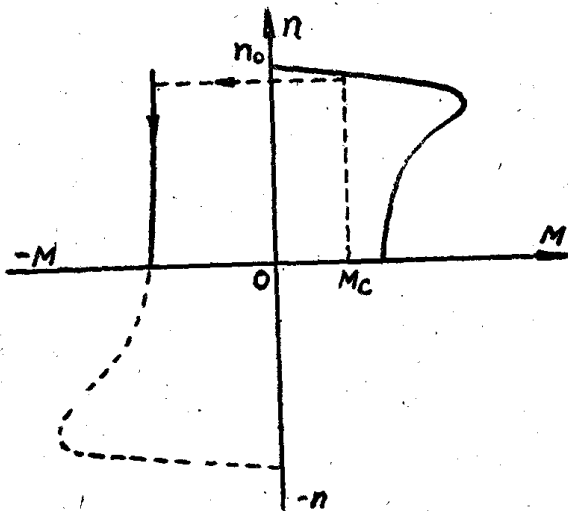


图 2-11 交流异步电动机反接制动的机械特性

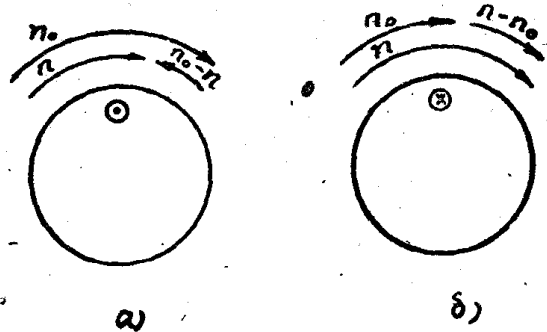


图 2-12 发电反馈制动的工作原理

电动机在反接制动时，流有很大电流。为了避免电动机发热，限止过大电流，容量较大的电机均须接入反接附加电阻。

反接制动的优点是制动简单，制动效果强。缺点是能量损耗大，不能经常制动，否则电机发热严重；制动准确度差，尚须采用自动控制电器，自动切断电源。

它适用于不经常起制动的生产机械，例如中型车床的主轴、刨床主轴、铣床主轴等。

3. 发电反馈制动

在电动机工作状态时，定子旋转磁场的转速高于转子的转速。相当于定子不转时转子绕组以 $n_0 - n$ 转速向旋转磁场的反方向运动，如图 2-12a 所示。若使电动机转速升高，超过同步转速 n_0 ，转子绕组则将以 $n - n_0$ 转速顺旋转磁场的方向运动，这样转子中所感应的电流亦改变方向。因此电动机转矩将由原与转速相同的方向改变成和转速相反的方向，如图 2-12b 所示，呈制动工作状态。由于定子电流的方向也相反，向电网输出能量，所以这种制动被称为发电反馈制动。

发电反馈制动的机械特性如图 2-13 所示。

发电反馈制动最为经济，制动效果大，但是必须在 $n > n_0$ 时才呈制动状态。多速电动机由高速降为低速时采用这种方法。

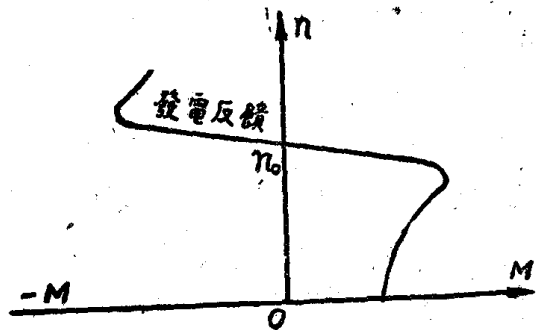


图 2-13 交流异步电动机发电反馈制动的机械特性

§2-5 交流异步电动机的调速

调速是机床工作部分对电力传动部分提出的极其重要的要求。例如车床的主轴在不同刀具材料、工件材料、加工工艺要求下就需要有不同的旋转速度，不仅如此，随着工件直径的不同，转速高低也随之改变。机床的调速性能往往直接影响机床的生产效率，加工的质量。

所谓调速就是根据生产要求强制地改变电动机的旋转速度。在绕线式异步电动机转子回路中串入不同电阻时，就能在同一负载下得到不同的转速。实质上，调速也就是改变机