

高等专科学校试用教材

电力拖动与控制

李礼贤 编

机械

GAOZHU

高等专科学校试用教材

电力拖动与控制

李礼贤 编



机械工业出版社

本书是将电力拖动与自动控制结合起来编写的高等专科学校电机制造专业的教材。全书共分三篇，第一篇为电力拖动基础，第二篇为自动控制，第三篇为反馈控制理论。

电力拖动基础篇以直流他励电动机与交流感应电动机为研究对象，讲述电力拖动的基本理论、分析电动机四个象限的运行特性，介绍电动机三种工作制功率选择的方法；自动控制篇除介绍断续控制系统的继电器—接触器控制线路与顺控器控制线路，也介绍了连续控制系统的交磁放大机控制线路及晶闸管控制线路，并对各种常用控制电器的结构、工作原理作了介绍，每一种控制线路均有典型线路举例；反馈控制理论篇则介绍经典控制理论的基本知识与基础理论，并以频率特性介绍系统校正的基本方法。

本书内容丰富，体系新颖，结构紧凑，语言精练，每一章均有小结、习题或思考题，并附解答，便于读者自学。书后附部分常用电器技术参数、常用调节器的传递函数，可供读者在实际工作中参考。

本书亦适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供电气工程技术人员参考。

电力拖动与控制

李礼贤 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 22·字数 540千字

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数 00,001—11,700·定价 3.65元

*

统一书号：15033·6438

前 言

本书是高等专科学校电机制造专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生，学制为三年的教学大纲组织编写的。

本书也适用于职工大学、业余大学，中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

本书是把电力拖动与自动控制结合起来编写的。全书共分三篇，第一篇电力拖动基础，第二篇自动控制，第三篇反馈控制理论。电力拖动基础篇以直流他励电动机与交流感应电动机为研究对象，讲述电力拖动的基础理论，分析电动机四个象限的运行特性，介绍三种工作制下电动机功率的选择方法。自动控制篇除讲述断续控制系统的电器控制线路与顺序控制器线路外，也介绍连续控制系统的交磁放大机控制线路与晶闸管—电动机自动控制系统，对每一种控制线路均有典型举例。反馈控制理论篇介绍经典控制理论的基本知识和基础理论，并以频率特性讲述系统校正的基本方法。

本书由哈尔滨工业大学赵昌颖副教授主审，参加审稿的有姚福荣、陶甫廷、甘志平、李全利等同志。编者对他们在审阅过程中的辛勤劳动表示衷心的感谢。

书中第四、六、七章由李滨生、张后立同志协助绘图。在编写过程中还得到沈阳低压开关厂张成邦、唐守讷、上海机械专科学校莫正康及山东省机械工业学校赵明等同志的关心，并提供了宝贵资料，在此表示衷心的感谢。

本书讲授总学时约为95~105学时，重点内容为第一篇的第一、第二章；第二篇的第四、第五、第六章；第三篇的第八、第九章。

由于编者思想与业务水平有限，加之编写时间仓促，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

一九八五年

目 录

绪论 1

第一篇 电力拖动基础

第一章 电动机的机械特性 3
§ 1-1 生产机械的机械特性与电力拖动运行的稳定条件 3
§ 1-2 直流他励电动机的机械特性 6
§ 1-3 直流他励电动机的人为特性与调速 9
§ 1-4 直流他励电动机起动电阻的计算 13
§ 1-5 直流他励电动机的制动 17
§ 1-6 三相感应电动机的机械特性 25
§ 1-7 三相感应电动机的人为特性与调速 27
§ 1-8 绕线型电动机起动电阻的计算 35
§ 1-9 三相感应电动机的制动 37
小结 43
习题 44
第二章 电力拖动的过渡过程 47
§ 2-1 运动方程式 47
§ 2-2 负载静转矩的归算 48

§ 2-3 飞轮矩的归算 49
§ 2-4 直流他励电动机的过渡过程 52
§ 2-5 直流发电机—电动机组的过渡过程 62
小结 68
习题 68
第三章 电力拖动系统电动机的选择 70
§ 3-1 电动机选择的基本原则 70
§ 3-2 连续工作制电动机功率的选择 74
§ 3-3 短时工作制电动机功率的选择 81
§ 3-4 断续周期性工作制电动机功率的选择 83
§ 3-5 选择电动机功率的统计法 86
§ 3-6 电动机电流种类、型式、额定电压及额定转速的选择 87
小结 88
习题 89

第二篇 自动控制

第四章 电器控制线路 91
§ 4-1 非自动切换电器 91
§ 4-2 接触器 96
§ 4-3 控制线路中元件的符号与线路图 103
§ 4-4 电动机的基本控制环节 106
§ 4-5 电动机的基本控制方法 109
§ 4-6 电动机的保护 120
§ 4-7 X 62W 铣床电器控制线路 128
§ 4-8 起重机的控制线路 132
§ 4-9 电器控制线路的设计 138
小结 147
思考题与习题 148
第五章 顺序控制器 152
§ 5-1 基本逻辑型顺序控制器 152
§ 5-2 步进型顺序控制器 156

§ 5-3 可编程序顺序控制器 163
§ 5-4 顺序控制器应用举例 169
小结 176
思考题与习题 177
第六章 交磁放大机调速系统 178
§ 6-1 调速系统的静态主要技术指标 178
§ 6-2 开环与闭环调速系统 181
§ 6-3 具有转速负反馈的自动调速系统 184
§ 6-4 电压负反馈和电流正反馈在调速系统中的应用 191
§ 6-5 具有电流截止负反馈的自动调速系统 195
§ 6-6 龙门刨床的主拖动系统 198
小结 208
习题与复习题 209

第七章 晶闸管自动调速系统	211	§ 7-3 速度与电流双闭环调速系统	225
§ 7-1 晶闸管—电动机系统	211	§ 7-4 龙门铣床的主拖动系统	230
§ 7-2 具有转速负反馈的晶闸管直流调 速系统	215	小结	235
		思考题	235

第三篇 反馈控制理论基础

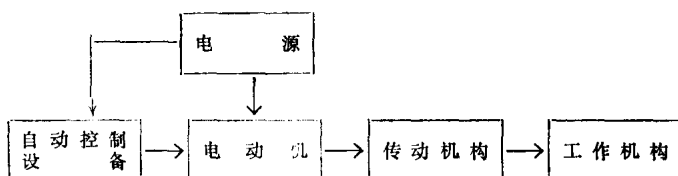
第八章 反馈控制系统的数学模型	237	习题	304
§ 8-1 反馈控制系统的分类、要求与典 型输入信号	237	第十章 反馈控制系统的校正与综合	308
§ 8-2 典型环节的传递函数	240	§ 10-1 校正的概念与工作原理	308
§ 8-3 非线性数学模型的线性化	249	§ 10-2 校正装置	312
§ 8-4 控制系统的方块图及其变换	251	§ 10-3 用伯德图计算校正装置	317
§ 8-5 反馈控制系统的数学模型	256	小结	321
小结	261	习题	321
习题	262	附录	322
第九章 反馈控制系统的分析	264	一、字符	322
§ 9-1 控制系统的单位阶跃响应	264	二、常用电器主要型号与规格	324
§ 9-2 控制系统的稳态误差	275	三、逻辑代数的基本性质	335
§ 9-3 控制系统的稳定性	279	四、拉普拉斯变换对照表	336
§ 9-4 劳斯稳定判据	281	五、拉普拉斯变换的特性	337
§ 9-5 频率特性	284	六、部分常用无源网络的传递函数	338
§ 9-6 对数频率特性 (伯德图)	292	七、部分常用电气元件的传递函数	339
§ 9-7 频率特性与品质的关系	301	八、部分常用调节器	341
小结	304	九、部分习题解答	343
		参考书目	345

绪 论

一、电力拖动的概念与优越性

在现代工业中，为了实现各种生产工艺过程的要求，需要使用各种各样的生产机械。驱使生产机械的工作机构运动的电气机械装置称为电力拖动。电力拖动是机械设备中的一个部分，它包含三个主要环节：

1. 电动机——电力拖动的原动机，是实现把电能转换为机械能的部件；
 2. 自动控制设备——控制电动机运转的控制电器或由各种控制电器组成的控制设备，即间接控制工作机构运动的部件；
 3. 电动机与工作机构之间的传动装置。如减速箱、皮带、联轴节等。
- 电力拖动的组成如下图所示。



除一部分生产机械采用气动或液压拖动外，大多数的生产机械都采用电力拖动，这是因为电力拖动有其一系列的优点：

1. 电能的远距离输送简便经济，分配简单，检测方便，价格低廉；
2. 电力拖动比其它形式的拖动效率高，原动机与被拖动机械的连接简便；
3. 电动机的型式与种类很多，具有各种各样的特性，可适应不同生产机械的需要，且电力拖动的起动、制动、反向与调速等控制简便迅速，调节性能良好；
4. 可实现远距离控制与自动调节，并进而实现生产过程的自动化。

因此，电力拖动自动控制已成为现代工业生产高度电气化、自动化的基础与核心，而实现工业企业的电气化和自动化对于提高产品质量、改善工人的劳动条件、增加工作可靠性及提高生产率均有着重大的意义。

二、电力拖动自动控制的发展概况

工业生产上应用电力拖动形式经历了三个阶段：成组（天轴）电力拖动、单电动机拖动和多电动机拖动。

成组电力拖动是由一台电动机拖动传动轴，再由传动轴经过皮带或绳索来分别拖动许多的生产机械。这种拖动在传动过程中能量损失很大，工作中极不安全，也不可能实现自动控制，因此已被淘汰。

现在通用的是单电动机拖动的形式，即以一台电动机拖动一个生产机械，如C620普通车床。这种拖动可充分利用电动机的调速性能，提高生产率，降低能量传送中的损失，并易于实现自动控制。

随着现代工业生产的迅速发展，单电动机拖动已不能满足较复杂的生产机械对各种运动形式实现自动控制的要求，因而出现了多电动机拖动的形式。多电动机电力拖动是用许多台电动机来分别拖动复杂机械的各个工作机构，以实现各部分工作过程的自动控制，把工人从沉重的辅助工序中解放出来，更大地提高生产率。现在大型的金属切削机床往往安装有十几台乃至几十台各种型式的电动机。国产的A系列龙门刨床则装有10台直流和交流电动机。

电力拖动的控制方法可以是非自动的或自动的。控制是自动的电力拖动称为自动化电力拖动。现代工业的电力拖动，一般都要求局部的或全部的自动化，因而所说的“电力拖动”实际上是指“自动化的电力拖动”。

自动化电力拖动的不断更新和发展是与电机、电器制造业以及各种自动化元件的发展密不可分的。

最初采用的控制系统是继电器—接触器型的，属于有触点断续控制系统，称为继电器—接触器控制系统。

三十年代初，出现了发电机—电动机组，使调速性能优异的直流电动机得到了广泛的应用。在此基础上，产生了交磁放大机、磁放大器等连续控制元件，组成了连续控制系统。

随着半导体器件与微电子技术的迅猛发展，近代又产生了顺序控制、数字控制以及专用电子计算机控制等的新型断续控制系统。目前，由于功率电子器件的不断更新与发展，晶闸管直流自动电力拖动系统已得到了广泛的应用，并正向大容量的方向发展。

交流电动机与直流电动机相比，具有结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点，单机功率及电压等级都可作得比直流电机高很多，还可实现高速拖动，因此交流电力拖动在近代引起人们的普遍注意。

随着微电子技术的发展和现代控制理论的应用，自动化电力拖动正向着计算机控制生产过程自动化的方向迈进。

三、本课程的性质和任务

《电力拖动与控制》是高等专科学校电机制造专业的一门专业课。

本课程研究的是生产机械的电力拖动与自动控制中最基本的性质和原理。其任务是使学生初步掌握电力拖动与自动控制的基本理论知识和实践技能，了解电机与控制电器在电力拖动系统中所处的重要地位，熟悉电力拖动一般的计算与实验方法，从而使学生能从电力拖动自动控制的观点改进电机的性能。

学生学完本课程以后，应达到如下要求：

1. 初步掌握电力拖动与自动控制的一般基础理论知识；
2. 了解常用电机与控制电器在电力拖动自动控制领域中的应用；
3. 具有阅读和分析电力拖动自动控制线路的初步能力。

第一篇 电力拖动基础

电力拖动系统是由电动机拖动，通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。由各类型电动机拖动的生产机械要有效而经济地进行工作，先决的条件是正确地选择电动机。

本篇就是介绍电力拖动基础的基本理论与计算方法。它包括了解生产机械静转矩的性质，分析电动机的机械特性与各种运转状态，从动力学角度讨论电力拖动系统运动方程式的概念及计算，研究电动机的过渡过程以及介绍不同工作制电动机功率的计算。

考虑到专业特点，对电动机的机械特性只研究直流他励电动机与交流感应电动机的机械特性，对电动机过渡过程中的能量损失也不作介绍。

第一章 电动机的机械特性

§ 1-1 生产机械的机械特性与电力拖动运行的稳定条件

一、生产机械的机械特性

作为电动机负载的生产机械的静转矩一般是阻碍运动的，但是在一定的条件下也能促进运动。

负载静转矩的大小和许多因素有关，但在研究动力学问题时，需要了解的是负载静转矩与转速的关系。生产机械的机械特性是指转速 n 与负载静转矩 T_L 的关系，即 $n = f(T_L)$ 。

生产机械的机械特性可归纳为下列三种类型：

1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性，就是指负载静转矩 T_L 与转速 n 无关的特性，即当转速变化时，负载静转矩 T_L 保持恒值。

恒转矩负载特性按动力学性质可分为反抗性与位能性两种。多数恒转矩负载特性是反抗性的。

反抗性恒转矩负载特性的特点是恒值转矩 T_L 总是反对运动的方向，如图 1-1 所示。摩擦类型的转矩就具有这样的性质。

位能性恒转矩负载是由拖动系统中某些具有位能的部件（如起重类型负载中的重物）造成，因而负载静转矩 T_L 具有固定的方向，不随转速方向改变而改变。如图 1-2 所

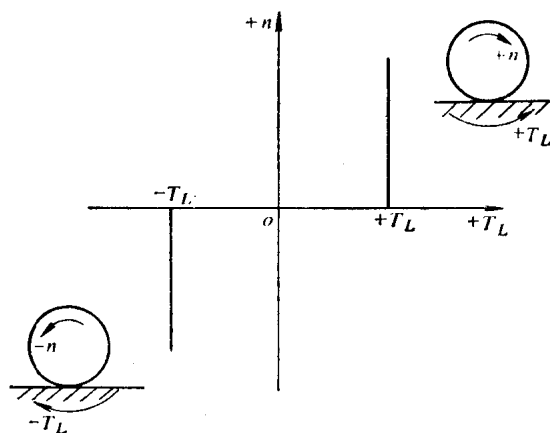


图1-1 反抗性恒转矩负载特性

示。

示, 不论重物提升 (n 为正) 或下降 (n 为负), 负载转矩始终不改变方向, 即 T_L 总为正, 特性画在第一与第四象限内。

由图 1-2 可见, 提升时, 负载静转矩 T_L 阻碍提升; 下降时, T_L 却帮助下降, 这是位能性负载的特点。

2. 恒功率负载特性

一些机床, 如车床, 在粗加工时, 切削量大, 其切削阻力也大, 此时开低速; 在精加工时, 切削量小, 切削阻力也小, 往往开高速。因此, 负载静转矩基本上与转速成反比, 即

$$T_L = \frac{K}{n}$$

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_L n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1$$

式中 $K_1 = \frac{K}{9.55} = \text{const.}$

可见, 切削功率基本不变, 负载静转矩 T_L 与转速 n 的特性曲线呈现恒功率的性质, 如图 1-3 所示。

3. 通风机负载特性

通风机的转矩与转速大小有关, 基本上与转速的平方成正比, 在数值上可以表示为

$$T_L = K n^2$$

式中 K ——比例常数。

通风机负载特性如图 1-4。属于通风机负载的生产机械有: 通风机、水泵、油泵等, 其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比。

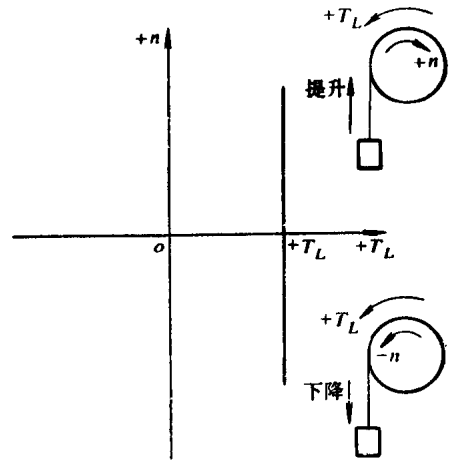


图 1-2 位能性恒转矩负载特性

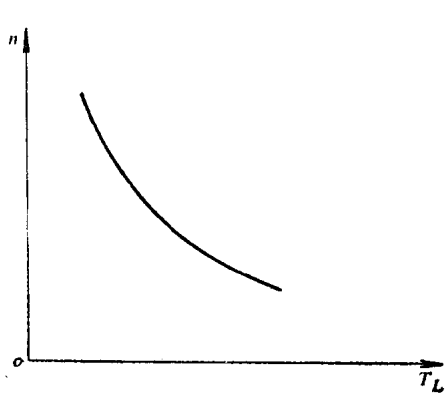


图 1-3 恒功率负载特性

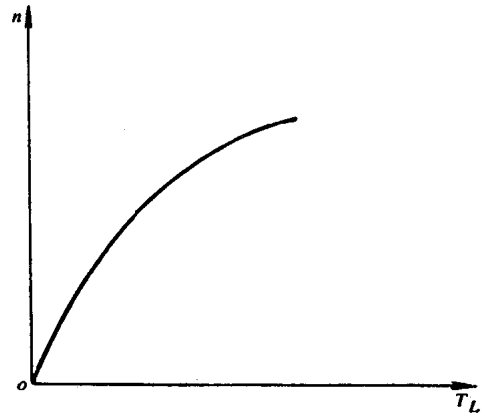


图 1-4 通风机负载特性

二、电动机的机械特性

电动机的机械特性是指其转速 n 与电磁转矩 T 的关系, 即 $n = f(T)$ 。它指出了电动机在稳定运转时的性能, 并且决定着电力拖动过渡过程的特征。

评价电动机的性能时, 机械特性具有重要的意义; 而在为生产机械选择电动机类型时,

机械特性又是主要的衡量标准之一。无论在稳定运转或是在过渡过程中，电动机均需满足生产机械在特性方面对它的要求。

大部分工业上通用的电动机均有这种性能：其转速随着转矩的增加而降低。按这种变化程度，电动机的机械特性可分为以下三类：

1. 绝对硬特性

绝对硬特性是转矩变化而转速不变，如同步电动机的机械特性，见图 1-5 中曲线 1；

2. 硬特性

硬特性是转矩增加而转速下降较小，如直流他励电动机和交流感应电动机的机械特性（指在临界转差率以前的部分），见图 1-5 中直线 2 和曲线 3；

3. 软特性

软特性是转速随转矩的增加而下降很大，如直流串励电动机的机械特性，见图 1-5 中曲线 4。

对于直流他励电动机，当励磁磁通不变时，有时把转速与电枢电流的关系 $n = \varphi(I)$ 也称为机械特性。

三、电力拖动运行的稳定条件

前面已分析了生产机械的机械特性与电动机的机械特性，现在来讨论这两种特性的配合问题。

在生产机械运行时，电动机的机械特性与生产机械的机械特性是同时存在的。为分析电力拖动的运行问题，可把两者画在同一坐标图上。设图 1-6 中直线 1 为直流他励电动机的机械特性 $n = f(T)$ ，而直线 2、3 为对应不同负载静转矩的生产机械的机械特性。

如电动机转矩 T 与负载静转矩 T_L 方向相反，大小相等而相互平衡时，电动机的转速为某一稳定值，拖动系统即处于稳态（或称静态）。如图 1-6 上两特性的交点 A ，转速都是 n_A ，而转矩 $T = T_L = T_{L1}$ ，因之交点 A 表明电力拖动系统的某一稳态运行点。

如负载增大，即负载静转矩由 T_{L1} 增为 T_{L2} ，此时由于惯性，电动机转速来不及变化，电动机转矩 T 还是由 A 点决定，即 $T = T_{L1} < T_{L2}$ ，平衡状态被破坏，拖动系统进入动态减速过程，或称减速过渡过程状态。

在减速过程中，转矩 T 与 T_L 各按其本身的特性变化，由图 1-6 可见，随着转速 n 的下降，负载静转矩保持为 T_{L2} 不变，而电动机转矩 T 则不断增加，这一过程一直进行到特性 3 与 2 交于 B 点，即 $T = T_B = T_{L2}$ ，减速过程才结束，系统又转变为稳态，以新的转速 n_B 稳定

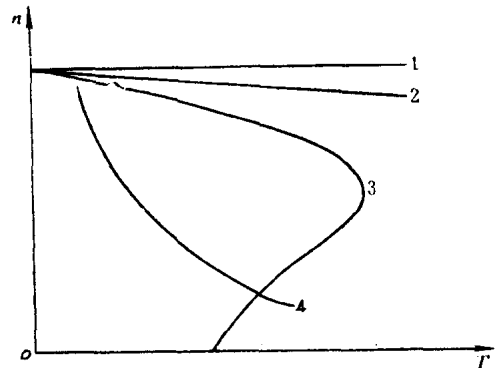


图1-5 电动机的机械特性

1—同步电动机 2—直流他励电动机
3—感应电动机 4—直流串励电动机

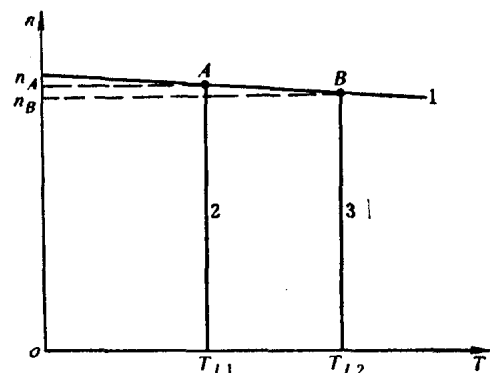


图1-6 他励电动机带恒转矩负载的特性

1— $n = f(T)$ 2— $n = f(T_{L1})$ 3— $n = f(T_{L2})$

运行。由此可见，稳态下电动机发出转矩的大小是由负载静转矩的数值所决定的。

由上可知，如电动机的机械特性与生产机械的机械特性具有交点，则电力拖动系统可能稳定运行。必须指出，两个特性有交点仅是稳定运行的必要条件，但还不够充分。充分的条件是：如果电力拖动系统原来在交点处稳定运行，由于出现某种干扰作用（如电网电压波动、负载转矩的微小变化等），使原来的转矩 T 与 T_L 变为不平衡，电动机转速便稍有变化，此时当干扰消除后，拖动系统必须有能使转速恢复到原来交点处的数值。电力拖动系统如能满足这样的特性配合，则该系统是稳定的，否则是不稳定的。下面举例说明：

图 1-7 示出他励电动机拖动一恒转矩负载。图 1-7 a 中，两特性的交点为 A 。若系统出现瞬时扰动（如端电压升高）使电枢电流 I 与转矩 T 均瞬时增大，则电动机转速 n 稍有增加 ($+\Delta n$)，随之转矩 T 便减小，当扰动消除后，因负载静转矩 T_L 大于电动机转矩 T 而迫使转速下降，消除 $+\Delta n$ 而恢复原值 n_0 ；同理如瞬时扰动引起转速稍有降低 ($-\Delta n$)，当扰动消除后，转速也会上升而恢复到原值 n_0 。因此， A 点是系统的稳定运行点。

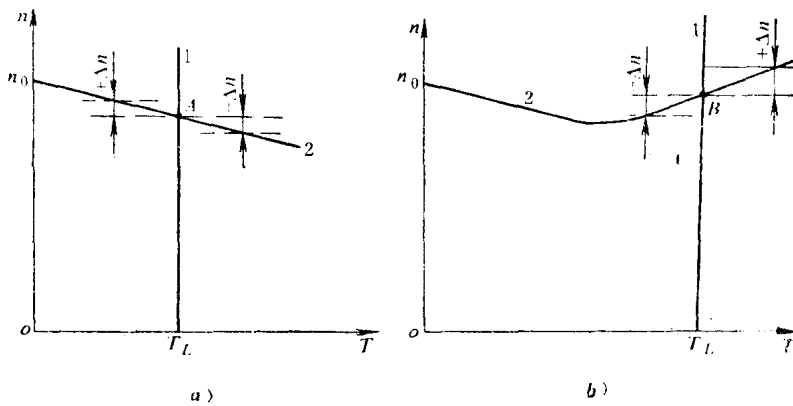


图1-7 两种特性的不同配合

1—恒转矩负载特性 2—他励电动机的机械特性

图 1-7 b 中，特性 2 是考虑电枢反应影响时电动机的机械特性，在负载大时呈上翘现象。 B 为两个特性的交点，它处于特性 2 的上翘部分。若这时转速有微小增加，将使 $T > T_L$ ，而使电动机继续加速；反之，转速稍有降低，将导致 $T < T_L$ ，电动机将进一步减速。总之，在 B 点，不论转速瞬时微小增加或减小，拖动系统都没有恢复到原转速 n_0 的能力，所以 B 点是不稳定运行点。

由上分析可见，对于恒转矩负载，要得到稳定运行，电动机需具有向下倾斜的机械特性。推广到一般情况，如果两特性在交点处的配合能满足下列要求，系统的运行是稳定的，否则是不稳定的：

“在交点所对应的转速以上应保证 $T < T_L$ ，而在此转速以下则要求 $T > T_L$ ”。显然，特性这样的配合保证系统有恢复原转速的能力。

§ 1-2 直流他励电动机的机械特性

一、机械特性方程式

直流他励电动机的电路原理如图 1-8 所示。当忽略电枢反应和电枢电阻的变化时，他励

电动机的机械特性可以用数学解析式来表示。

设电动机端电压 U 和励磁磁通 Φ 不变, 则有

$$U = E + IR = C_e \Phi n + IR \quad (1-1)$$

$$T = C_m \Phi I \quad (1-2)$$

式中 $R = R_a + R_f$ 称为电枢电路总电阻;

R_a ——电枢绕组的电阻;

R_f ——电枢电路中附加的电阻。

把由式 (1-2) 求得 I 值代入式 (1-1) 中, 即得

$$\frac{U}{C_e \Phi} = n + \frac{IR}{C_e \Phi} = n + \frac{TR}{C_e C_m \Phi^2} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 就是他励电动机的机械特性方程, 它也可写成

$$n = n_0 - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} \cdot T = n_0 - \Delta n \quad (1-4)$$

式中
$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \quad (1-5)$$

称 n_0 为电动机的理想空载转速。是指当电动机的反电势 E 等于端电压 U , 电枢中没有电流, 亦即当转矩 $T = 0$ 时电动机所具有的转速。而

$$\Delta n = \frac{IR}{C_e \Phi} = \frac{TR}{C_e C_m \Phi^2} \quad (1-6)$$

为电动机在某一枢路电阻 R 和转矩 T 时的转速降。它是由于负载电流流过电枢电路时, 产生电压降而造成的。当负载越大, 转速降 Δn 也越大。

系数 C_e 和 C_m 有一固定关系, 根据电机学有

$$C_m = \frac{60}{2\pi} C_e = 9.55 C_e \quad (1-7)$$

他励电动机的机械特性是自理想空载转速 n_0 起, 向下倾斜的一条直线, 如图 1-9 所示。若 $R_f = 0$, 即 $R = R_a$ 时所得机械特性是一条向下倾斜度很小的直线, 称此为他励电动机的固有特性 (或称自然特性)。

转速降 Δn 的大小与枢路电阻成正比。当电枢电路中有附加电阻时, 特性的斜度便较固有特性增大, 称此变化为“软化”。若附加电阻相当大, 电动机的运转稳定性就很差, 即负载有微小变动时就会引起较大的转速变动。

必须指出, 机械特性中的转矩 T 是电磁转矩, 它与电动机轴上的输出转矩 T_2 是不等的, 其间差一个空载转矩 T_0 。在电动状态下

$$T = T_2 + T_0 \quad (1-8)$$

T_0 的大小可根据电动机的额定数据求得, 一般仅为电动机额定转矩 T_N 的 2~5%, 在一

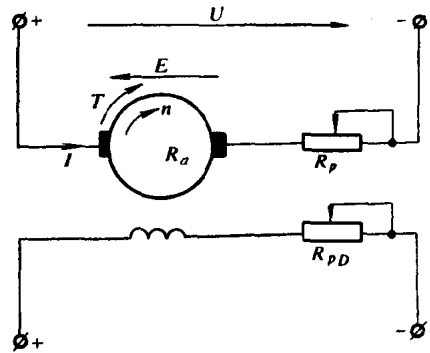


图1-8 直流他励电动机原理图

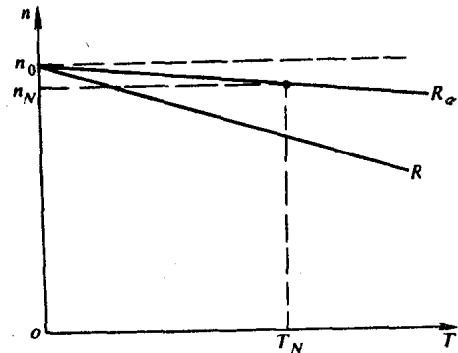


图1-9 他励电动机的机械特性

般工程计算中可略去 T_0 ，而认为电磁转矩 T 与轴上的输出转矩 T_2 相等。

二、机械特性的绘制

机械特性往往可根据电机铭牌数据、产品目录或实测数据来计算。一般对计算有用的数据是 P_N 、 U_N 、 I_N 和 n_N 。

他励电动机的固有特性是一条直线，只要求出线上两个点的数据，就可绘出这条直线。一般选择理想空载 ($T = 0$, $n = n_0$) 及额定运行 ($T = T_N$, $n = n_N$) 两点较为方便。

对于理想空载点

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}$$

式中 U_N 已知， $C_e \Phi_N$ 可由额定状态下的电枢电路电压方程式求得

$$C_e \Phi_N = \frac{E_N}{n_N} = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \quad (1-9)$$

式中 I_N 与 n_N 均为已知，只有 R_a 未知。

通常 R_a 的数值在铭牌与产品目录中是找不到的。如已有电机， R_a 可以实测；如设计时电机还没有，可用下式估算 R_a 。

$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) (1 - \eta_N) \frac{U_N}{I_N} \quad (1-10)$$

式中 $\eta_N = \frac{P_N}{U_N I_N}$ 额定负载时电动机的效率。

式 (1-10) 是个经验公式，其中认为在额定负载下，电枢的铜损耗占电动机总损耗的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 。

按式 (1-10) 估算出 R_a ，代入式 (1-9) 即可计算 $C_e \Phi_N$ ，因而可得理想空载点。

对于额定运行点， n_N 已知，而

$$T_N = C_m \Phi_N I_N = 9.55 C_e \Phi_N I_N \quad (1-11)$$

则 T_N 即可算出，因而额定点也可求得。

两个点均已求出，通过该两点的连线即为固有特性。

欲绘制枢路内附加任一电阻 R_p 时的特性，可根据 R_p 的数值，假定一个转矩 T (一般用 T_N)，代入式 (1-4) 求出 n 值，得出特性上的一点 (T_N , n)，将此点与理想空载点连接即得。

例1-1 一 Z_2 型他励电动机的铭牌数据 $P_N = 22\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 116\text{A}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ，试绘制其机械特性。

解 (1) 估算 R_a 。

$$R_a = \frac{2}{3} \left(\frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} \right)$$

$$R_a = \frac{2}{3} \times \frac{220 \times 116 - 22000}{116^2} = 0.175 \quad (\Omega)$$

(由于 Z_2 型直流电机的铜损占总损耗的比例较高，故上式中取 $\frac{2}{3}$)。

(2) 计算 $C_e \Phi_N$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 116 \times 0.175}{1500} = 0.133$$

(3) 理想空载点

$$T = 0, \quad n = n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.133} = 1650 \quad (\text{r/min})$$

(4) 额定点

$$T_N = 9.55 C_e \Phi_N I_N = 9.55 \times 0.133 \times 116 = 147.2 \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$n = n_N = 1500 \quad \text{r/min}$$

§ 1-3 直流他励电动机的人为特性与调速

前已述及，当他励电动机的端电压与磁通均为额定值 U_N 与 Φ_N ，电枢中无附加电阻时的机械特性称为固有特性。而用改变电动机参数的方法所获得的特性则称人为特性。他励电动机一般可得下列三种人为特性。

一、电枢串接电阻时的人为特性

当 $U = U_N$ ， $\Phi = \Phi_N$ 而电枢串接附加电阻 R_p 时人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_p}{C_e C_M \Phi_N^2} T \quad (1-12)$$

由于电动机的电压及磁通保持额定值不变，人为特性具有与固有特性相同的理想空载转速 n_0 ，而其倾斜度则随串接电阻 R_p 之增大而增加，即人为特性的硬度降低，如图 1-10 中直线 2 与 3 所示。

由图可知，在一定的负载静转矩（例如在额定转矩 T_N ）下，转速降 Δn 随附加电阻 R_p 之增加而增大。人为特性为不同斜率且均交于纵坐标一点（ $n = n_0$ ）的直线族所组成。

二、改变电压时的人为特性

当电枢不串接附加电阻（ $R_p = 0$ ），而磁通 $\Phi = \Phi_N$ ，仅改变电压时的人为特性方程为

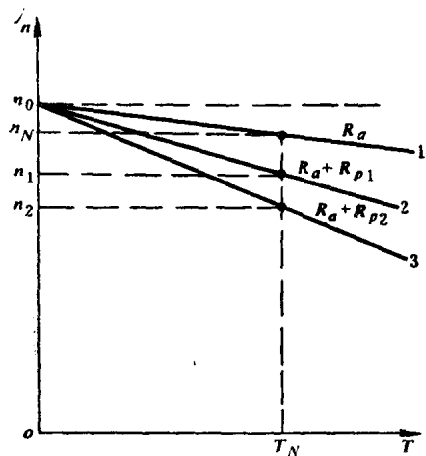


图1-10 他励电动机串电阻时的人为特性

$$R_{p2} > R_{p1}$$

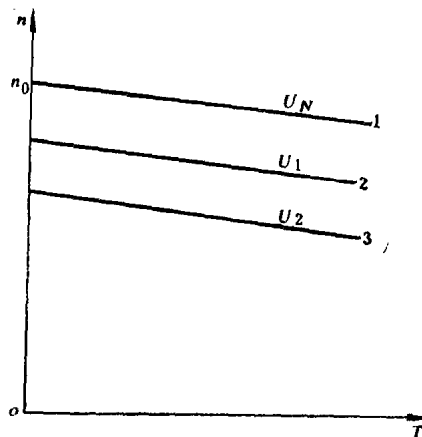


图1-11 他励电动机改变电压时的人为特性

$$U_N > U_1 > U_2$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi_N^2} T \quad (1-13)$$

比较式 (1-12) 与式 (1-13) 可见, 改变电压时, 理想空载转速 n_0 随电压的降低而降低, 特性的斜率则保持不变。他励电动机的电压一般向低于额定电压的方向改变, 因此人为特性为一组平行线, 它们都低于固有特性 1, 2 与固定特性相平行, 如图 1-11 所示。因电枢中没有附加电阻, 所以特性较串接电阻时要硬。

三、减弱电动机磁通时的人为特性

一般直流他励电动机在额定磁通下运行时, 磁路已接近饱和, 因而改变磁通实际上是减弱磁通。

在励磁回路内串接电阻 R_{pD} , 并改变其值, 即能减弱磁通, 使其在低于额定磁通 Φ_N 下得到调节。

此时 $U = U_N$, 电枢不串接电阻, 减弱磁通时的人为特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2} T \quad (1-14)$$

$n = f(I)$ 的特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I \quad (1-15)$$

由上述两式知, 当 Φ 减小时, 理想空载转速 n_0 增大 ($n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi}$), 短路 (堵转) 电流 $I_k = \frac{U_N}{R_a} = \text{常值}$, 而短路 (堵转) 转矩 T_k 随 Φ 之减小而减小 ($T_k = C_M \Phi I_k$)。

图 1-12 上绘出了不同 Φ 值时 $n = f(I)$ 特性曲线, 这些特性都是直线, 交横坐标于一点 ($I = I_k$), 磁通 Φ 愈小其特性愈软。

Φ 为不同值时的人为机械特性 $n = f(T)$ 绘于图 1-13。图中 T_{kN} 、 T_{k1} 、 T_{k2} 分别为 Φ_N 、 Φ_1 、 Φ_2 时的短路 (堵转) 转矩, 显然 $T_{kN} > T_{k1} > T_{k2}$, 且这些特性在第一象限内有交点。一般情况下, 电动机的额定转矩 T_N 比堵转转矩 T_k 小得多, 故减弱磁通时, 若电动机的负载不变, 将使电动机转速升高。只有当负载特别重或磁通特别小时, 如再减弱磁通, 则转速反而

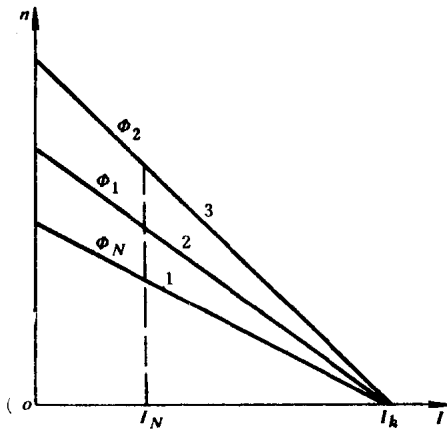


图1-12 减弱磁通时的 $n = f(I)$
 $\Phi_N > \Phi_1 > \Phi_2$

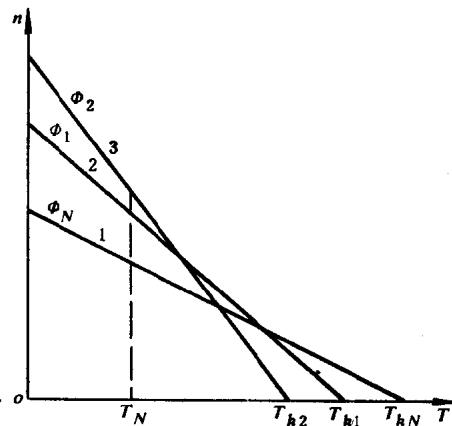


图1-13 减弱磁通时的 $n = f(T)$
 $\Phi_N > \Phi_1 > \Phi_2$

会发生下降的现象。

四、他励电动机的调速

调速是指用改变电动机或电源的参数强迫电动机的转速发生变化，也可通过改变电动机的接线使其转速发生变化。这里切不要把调速和由于负载的变动而引起电动机转速的波动混淆起来。换言之，调速是指在某一负载（一般指额定负载，即 $I = I_N$ ）下，改变电动机的转速。因此，分析与研究各种调速方法，实质上归结为分析与研究电动机运用这些调速方法而得到的人为机械特性。

由直流他励电动机的机械特性

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi}$$

可知，只要改变电枢回路电阻、电动机的端电压或励磁磁通，就可使转速发生变化。由此，他励电动机有下列三种调速方法：

（一）改变电枢回路电阻

在直流他励电动机的电枢回路串接附加电阻，并改变其大小，即可实现调速。调速时的机械特性如图 1-10 所示。显然串接的电阻 R_p 愈大，特性愈软，在某一负载下的转速也愈低，其运行的稳定性愈差。

此种调速方法适用于恒转矩负载。因方法简单、方便，适于作短时调速，在起重运输和牵引机械中得到广泛应用，其调速电阻也兼做起动电阻。

能量损耗大是此法的主要缺点，且转速越低，损耗越大。

现分析一下此法经济性：

电动机取自电网的功率 P_1 为

$$P_1 = UI = EI + I^2 R \quad (1-16)$$

损耗 ΔP 等于

$$\begin{aligned} \Delta P &= I^2 R = UI - EI = UI \left(1 - \frac{E}{U} \right) \\ &= P_1 \left(1 - \frac{C_e \Phi n}{C_e \Phi n_0} \right) = P_1 \left(\frac{n_0 - n}{n_0} \right) \end{aligned} \quad (1-17)$$

则效率 η 为

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{n}{n_0} \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 表明，如 $n = \frac{1}{2} n_0$ 时， $\eta = 0.5$ ，即由电网吸取的功率有一半消耗在电枢总电阻上，效率仅为 50%。可见，此法是很不经济的。

（二）减弱励磁磁通

减弱励磁磁通也可调速，其机械特性如图 1-12 与图 1-13 所示。显然，减弱磁通将使转速上升，且磁通愈小，特性也愈软，其运行的稳定性愈差。

此种调速因在励磁回路中调节，因而能量损失小，方法简单，调节平滑性好，适用于恒功率负载。

应该指出，如果他励电动机在运行过程中励磁回路突然断线，磁通只剩下很小的剩磁，则不仅将使电枢电流大大增加，且由于严重弱磁，使转速上升到危险的飞逸转速，甚至把整