

冯信康 杨兴瑶 编译

电力传动控制系统

原理 与 应用

水利电力出版社

电力传动控制系统 原理与应用

冯信康 杨兴瑶 编译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 17.875印张 472千字

1985年6月第一版 1985年6月北京第一次印刷

印数00001—9720册 定价4.35元

书号 15143·5693

内 容 提 要

本书较系统地介绍了有关电力传动装置的结构和设计原理等方面的内容，对直流和交流电力传动、模拟式和离散式传动线路进行了较详细的分析并给出许多有用的公式和表格，内容比较丰富，叙述也比较精练，对从事电力传动工作的有关人员有较大的参考价值。

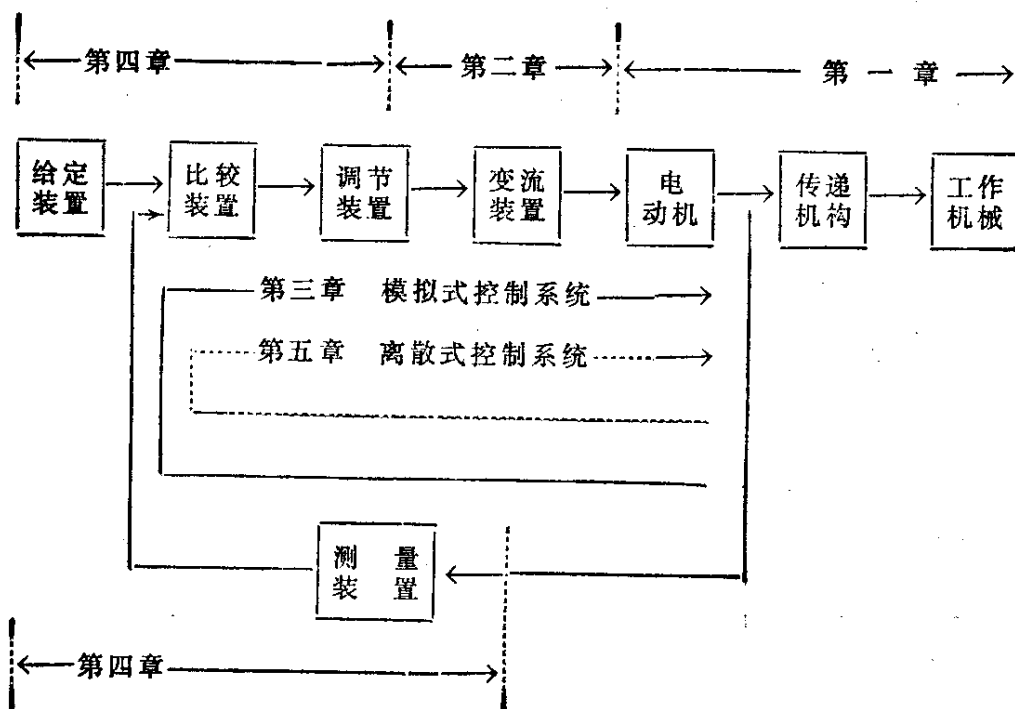
全书共分五章，主要内容是电力传动系统的任务、要求、分类及其典型的机电装置；电力电子学——静止变流技术在电力传动中的应用；电力传动调节系统的典型结构；电力传动系统中调节装置及调节系统的设计原理；电力传动的数字控制和程序控制。

本书可供从事电力传动技术的工程技术人员、科研和设计人员以及大专院校自动控制、生产自动化等专业师生参考。

编译者前言

随着电子技术和自动控制技术的发展,电力传动也发生了巨大的变革,这主要表现在广泛应用以晶体管、晶闸管变流装置为基础的电力电子学和以数字与计算技术为基础的信息电子学,广泛应用以控制理论为基础的系统设计方法和以节能、高效、优质、高产为目标的自动化生产过程。有关这些方面的内容国内虽出版了一些书籍但仍感不足,本书的目的是要对上述各领域内容作一较系统地介绍。本书是以德文书《Die Technik der elektrischen Antriebe (Grundlage), VEM-Handbuch》第五版为基础并参考其它资料进行整理编译而成的。

全书共分五章,各章内容及其相互之间的联系可如下图所示:



本书初稿曾请张铁忠同志和曾怀荣同志审看，承蒙提出许多宝贵意见，改写时还曾得到钟福金、侯夔龙、邓子琼等同志的热情指导和帮助，我们谨在此表示衷心地感谢！

由于编译者水平及能力有限，书中难免有不少缺点和错误，欢迎读者提出批评指正。

作 者

一九八三年七月

目 录

编译者前言

第一章 电力传动系统的任务及典型的机电装置	1
1.1 电力传动系统的目的、任务、要求和分类	1
1.1.1 电力传动系统的目的和任务	1
1.1.2 对电力传动系统提出的技术要求	2
1.1.3 电力传动系统的分类	3
1.2 典型的工作机械及其线路	6
1.2.1 典型的工作机械	6
1.2.2 机械线路的归算	13
1.2.3 机械运动方程式	27
1.3 传递机构——联轴节和变速传动装置	32
1.3.1 联轴节	32
1.3.2 变速传动装置	33
1.4 电磁离合器和制动器	33
1.4.1 概述	33
1.4.2 摩擦盘离合器和制动器	35
1.4.3 薄片离合器和制动器	36
1.4.4 电磁转差离合器	37
1.5 普通驱动电动机线路及特性	40
1.5.1 概述	40
1.5.2 直流电动机线路及运行特性	42
1.5.3 三相异步电动机线路及运行特性	52
1.5.4 同步电动机线路及运行特性	72
1.6 特殊驱动电动机的工作原理及其传动	78
1.6.1 直线电动机与直线传动	78
1.6.2 低惯量直流伺服电动机	82
1.6.3 无换向器(无刷)电动机	85
1.6.4 力矩电动机	90
1.6.5 步进电动机与步进传动	90
第二章 电力电子学在电力传动中的应用	104

2.1	电力半导体器件的分类及其发展	105
2.2	电力电子学中主要半导体器件的作用原理及特性	111
2.2.1	主要半导体器件的作用原理和特性	111
2.2.2	二极管、晶体管和晶闸管的开关过程	118
2.2.3	电力电子学的分类	121
2.3	基本可控整流电路	124
2.3.1	带续流二极管的单脉波整流电路	124
2.3.2	双脉波电路	132
2.3.3	三脉波电路	135
2.3.4	多脉波电路	136
2.3.5	晶闸管整流器的外特性	139
2.3.6	电网换相(有源)逆变器	143
2.3.7	整流器输出电压的谐波分量	144
2.3.8	整流器的无功功率	145
2.4	晶闸管交流开关和交流调压器	148
2.4.1	晶闸管交流开关	148
2.4.2	晶闸管交流调压器	150
2.5	直接变频器	154
2.6	电网换相变流器的控制装置	157
2.7	晶闸管直流调压器(斩波器)	161
2.7.1	强迫换相(关断)的原理	162
2.7.2	晶闸管直流调压器(斩波器)的基本电路	163
2.7.3	直流调压器电路元件参数的选择	165
2.7.4	直流调压器的控制方式	168
2.7.5	逆导晶闸管直流调压器电路	170
2.7.6	脉冲控制电阻	171
2.8	晶体管直流调压器(斩波器)和脉冲宽度调制器	172
2.8.1	晶闸管、门极可关断晶闸管与晶体管的比较	172
2.8.2	晶体管安全工作区域与动作轨迹	173
2.8.3	晶体管的基极驱动电路	179
2.8.4	晶体管直流调压器和晶体管脉冲宽度调制器	180
2.9	无源(自换相)逆变器	183
2.9.1	单相逆变器	184
2.9.2	三相逆变器	186

2.9.3 晶体管逆变器	194
2.9.4 逆变器输出电压的调节方式	195
2.10 强迫换相变流器的控制装置	199
第三章 电力传动调节系统的典型结构	201
3.1 自动调节理论基础	202
3.1.1 信号的传递——方块图	202
3.1.2 调节系统的构成原理	203
3.1.3 调节元件和系统的静态描述	205
3.1.4 调节元件和系统的动态描述	209
3.1.5 线性调节系统传递函数和频率特性的求法	214
3.1.6 调节系统中的信号形式	225
3.2 直流电动机的动态特性及直流发电机-直流电动机系统	225
3.2.1 他励直流电动机的电枢电压控制	225
3.2.2 他励直流电动机的磁场控制	229
3.2.3 串励直流电动机	231
3.2.4 直流发电机-直流电动机系统	233
3.2.5 调节系统对直流电动机的特殊要求	235
3.3 直流电动机由晶闸管整流器供电时的静态和动态特性	236
3.3.1 晶闸管整流器-直流电动机系统的静态特性	236
3.3.2 晶闸管整流器供电时的谐波问题	238
3.3.3 平波电抗器的设计	245
3.3.4 晶闸管整流器-直流电动机系统的传递函数	248
3.4 晶闸管整流器-直流电动机系统的可逆传动	253
3.4.1 可逆电路的原理	253
3.4.2 可逆电路中的环流	257
3.4.3 其它可逆电路	260
3.5 直流电动机的脉冲控制	264
3.6 直流电力传动自动调节系统	274
3.6.1 直流电动机电枢控制的双环自动调速系统	274
3.6.2 带自动弱磁的直流电动机调速系统	277
3.6.3 直流电动机可逆调速系统	279
3.7 异步电动机的方块图及调节方式	284
3.7.1 异步电动机的一般方程式	284
3.7.2 异步电动机的方块图	286

3.7.3 异步电动机的调节方式	292
3.8 具有转子控制环节的异步电动机传动	293
3.8.1 利用转子附加电阻来控制异步电动机的转速	295
3.8.2 利用直接变频器控制异步电动机的转子电压	296
3.8.3 利用二极管整流器来控制转子电压——次同步串级调速	299
3.8.4 利用脉冲控制电阻来控制转子电压	307
3.9 异步电动机的同步传动系统	309
3.9.1 三相电平衡轴——带辅助机的同步传动系统	310
3.9.2 三相电工作轴——带公共变阻器的同步传动系统	313
3.9.3 单相电平衡轴	315
3.9.4 电轴的方块图	317
3.10 异步电动机的定子电压控制	320
3.10.1 晶闸管交流调压器控制异步电动机定子电压的电路及特性	320
3.10.2 异步电动机由交流调压器控制时的制动与反转	327
3.10.3 异步电动机由交流调压器供电时的方块图	329
3.11 异步电动机的频率控制	332
3.11.1 异步电动机频率控制时的特性及其运行	334
3.11.2 异步电动机频率控制时的方块图	338
3.11.3 利用直接变频器控制异步电动机的转速	339
3.11.4 利用自换相逆变器控制异步电动机的转速	345
3.11.5 利用晶体管逆变器的变频调速系统	349
3.12 异步电动机-电磁转差离合器调速系统	353
3.13 同步电动机的调速系统	355
3.13.1 恒定励磁同步电动机承受冲击负载时的方块图	355
3.13.2 具有励磁电流调节的同步电动机方块图	358
3.13.3 同步电动机的频率控制	358

第四章 电力传动系统中调节装置及调节系统的设

计原理	364
4.1 对调节装置提出的技术要求	364
4.2 模拟信号处理的功能元件	366
4.2.1 测量装置	366
4.2.2 给定装置	376
4.2.3 校正网络和调节放大器	379
4.3 数字信号处理的功能元件	387

4.3.1	数字信号形成的原理	387
4.3.2	数字测量装置	391
4.3.3	信号转换电路	405
4.3.4	运算器	407
4.4	电力传动自动调节系统的设计原理	408
4.4.1	自动调节系统的静态和动态指标	408
4.4.2	自动调节系统在频率域内的品质指标	416
4.4.3	自动调节系统的串联校正	422
4.4.4	多环串联校正	426
第五章	电力传动的程序控制和数字控制	438
5.1	概述	438
5.1.1	基本概念	438
5.1.2	离散控制的分类	440
5.2	离散控制技术中的元件、组件和设备	444
5.2.1	输入环节	444
5.2.2	极限值测量装置和发送器	449
5.2.3	信号处理元件及其基本电路	450
5.2.4	逻辑组合电路	457
5.2.5	输出装置	468
5.2.6	报警装置、显示装置与存储装置	471
5.3	数字控制系统	472
5.3.1	采用数字信号处理的控制系统结构方式	472
5.3.2	具有锁相环的数字调速系统	476
5.3.3	具有微型计算机的数字控制系统	487
5.4	电力传动自动化系统的规划、设计和程序编制	507
5.4.1	系统的规划和设计步骤	507
5.4.2	电力传动系统中的线路图及其符号	509
5.4.3	控制装置工作方式的表示方法	513
5.5	电力传动中的程序控制系统	522
5.5.1	基本线路	523
5.5.2	工业机器控制系统	531
5.5.3	工业设备控制系统	547
主要参考书		557
本书采用的主要符号一览表		558

第一章 电力传动系统的任务 及典型的机电装置

一般把利用电动机带动工作机械的运动称作电力传动。但这里指的传动与一般机械传动中所指的传动含意不同，因为电力传动系统不是电器和机械的简单组合，而是由电动机、机械传动机构和电动机的控制设备或系统所组成的一种综合装置。电动机实现电能与机械能的变换，传动机构用来传递机械能，控制设备或系统则保证电动机按某种工艺要求来完成生产任务。电动机及其控制系统的特性将决定工作机械的生产率、精度及可靠性等一系列技术指标，而机械负载的惯性、传递精度等反过来又对电动机及其控制系统产生重要的影响。因此，在研究电力传动系统时我们必须注意电动机与机械负载的内在联系及配合，亦即必须把它们作为一个整体来考虑。

本章将简要介绍电力传动系统的基本任务、要求与分类，典型的机电装置（工作机械、传递机构和电动机）以及系统的力学计算基础。

1.1 电力传动系统的目的、任务、要求和分类

1.1.1 电力传动系统的目的和任务

随着生产的发展，要求工作机械不断提高劳动生产率、提高产品质量、改善劳动条件、节约能耗、降低生产成本。这就对电力传动提出越来越高的要求。例如，精密机床要求加工精度达到百分之几 mm 甚至几 μm ；大型镗床的送进机构要求在很宽的范围内调速；大批量加工零件时，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，在轧钢工业中，巨型的年产数百万吨钢锭的现代化初轧机，其轧辊电动机容量达数千 kW，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；轧制薄铁皮的高速冷轧机最高轧速达 37m/s 以上，而成品厚度误差不大于 1 %；在造纸工业中，日产新闻纸 400t 以上的高速造纸机，抄纸速度达到 1000m/min，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，单靠电动机本身就不够了，还需要一整套的控制设备，这样就产生了电力传动系统。

不同的工作机械实现的生产目的不同，因而所采用的电力传动方式也不尽相同，但一般来说，电力传动系统不外乎完成下述的几项基本任务：

- (1) 利用高效率的变换装置提供所需要的电能；
- (2) 将电能变换为工作机械所需要的机械能；
- (3) 采用各种调节元件来控制电能与机械能的变换；
- (4) 准确地复现由人工或指令装置给出的指令信息，以满足生产过程、科学试验以及日用电器等的技术要求；
- (5) 为确保操作人员及技术设备的安全和防止不允许出现的过负荷，系统应能进行自动保护与闭锁；
- (6) 为进行观察、报警、抑制干扰、产生调节指令以及记录、储存或者在指令装置上进行信号传递等，应在电力传动系统内设立测量及监控装置。

在现代电力传动系统中要完成上述各项任务就要借助于机电能量变换、电力电子学以及测量、控制、调节和计算等技术。特别是广泛采用近一、二十年发展起来的电力电子学、自动控制理论和计算机科学等，这是现代电力传动的最主要的标志。

1.1.2 对电力传动系统提出的技术要求

现代电力传动系统可以完成各种形式完全不同的运动，如长期的连续运动、断续的、脉动的、速度不变的以及在非常宽的范围内速度剧烈改变的或连续改变的(按给定规律或随意变动的)运动

等等。电力传动系统应该能自动地控制起动、制动和反转，以及维持速度、转矩和功率在一定的水平上，并具有很高的准确度和快速性。

为了完成上述功能，要求设计者首先必须明确设计的目的和任务，精心选择和确定达到这一目的的最合理的方案，然后进行细致的结构和参数计算。除此而外，为了保证系统的正常工作，还必须着重考虑下面几项要求：

（1）要考虑具体的工作条件、周围环境（温度、湿度、化学物质）以及机械负载等因素，以使系统有足够的稳定性与可靠性；

（2）供给系统的电压、频率等参数应在预定的范围内波动，此外，还要考虑到可能出现的静电与电磁干扰，以使它们不损害电力传动系统的正常工作；

（3）电力传动系统在特殊场合下（比如易燃与易爆场合下）运行必须确保安全，此外，也应避免造成对其它装置有害的无线电干扰、振动以及噪音等；

（4）必须注意控制和调节的经济性，节约能源，降低成本；

（5）减轻劳动强度，改善工作条件。

此外，电力传动系统还要符合国家标准的有关规定，以及所用的系列元件、装置和仪器的使用条件等技术规范。

1.1.3 电力传动系统的分类

电力传动系统按其结构和功能可以分成三种类型。第一种是基本的，也是经典的系统，可称为开环电力传动系统，主要用在要求不高的一些专用设备上。第二种是自动化电力传动系统，即一般称作的电力传动控制系统，它具备有自动控制和调节的作用，广泛应用在各种工作机械上。第三种是综合自动化电力传动系统，它往往是由多个自动控制系统和中央控制装置组成的复杂的控制系统，应用在生产过程控制以及全盘自动化等场合。

下面简要介绍上述三种系统的主要组成和作用。

1. 开环电力传动系统

开环电力传动系统（图1.1）是以电动机为核心元件的开环系统。电动机的输入端经过功率开关和控制元件由电网供电，而输出端则通过传递机构以一定的传递比与工作机械相连接。保护装置用以在出现不允许的过负荷时切断电动机的电源。

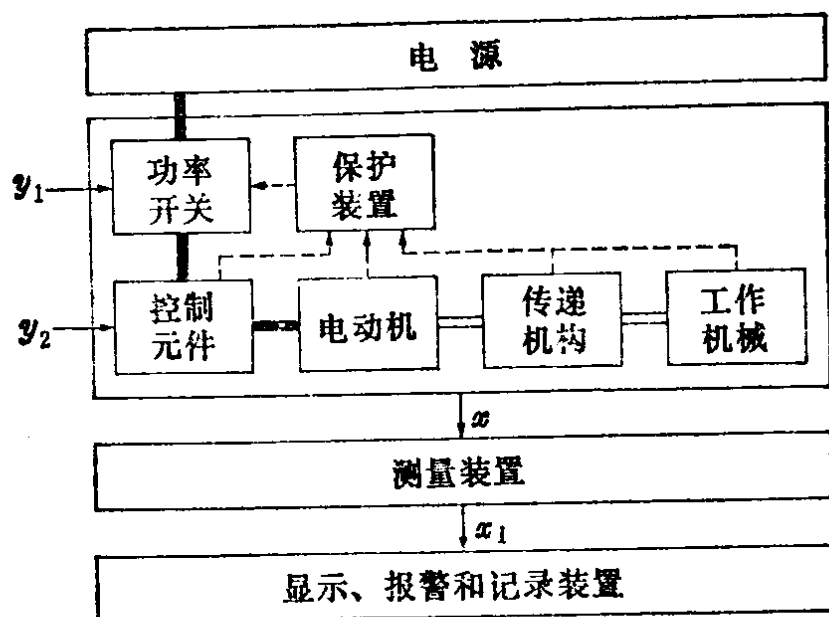


图 1.1 开环电力传动系统的组成

——电能流；——机械能流；---信号流； x —测量值； y —控制量

这一类的系统主要用在对起动、调速和制动过程没有特殊要求以及不要求精确地保持电量或机械量为某一确定值的场合。例如，泵、磨碎机、传送带、搅拌机、电动工具、简易起重机（如电葫芦）以及各种日用电器（如电扇）等。系统中的开关和控制装置通常是由人工手动来操作的，即图中的 y_1 和 y_2 是由人工来给定的。

根据实际需要，在这种系统中有时还备有测量与显示、报警和记录装置。

2. 自动化电力传动系统

自动化电力传动系统（图1.2）除了包含有图1.1系统中的所有部分外，还增加了一个重要的信息处理单元——控制或调节装置。它用来实现预先给定的控制或调节算法，以便按着一定的规

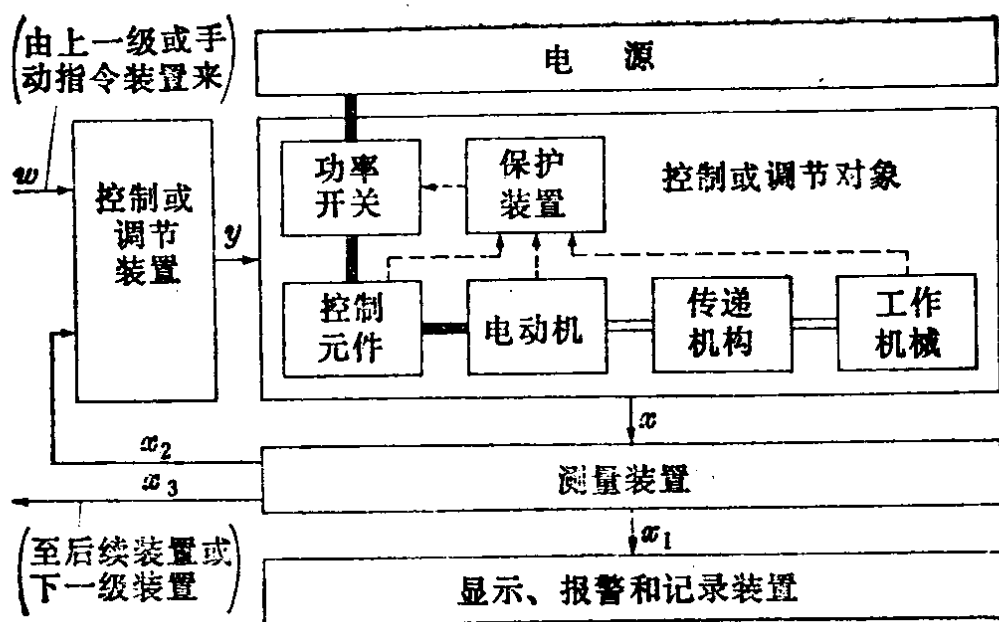


图 1.2 自动化电力传动系统的组成

—— 电能流； == 机械能流； --- 信号流； x — 测量值； y — 控制量；
 w — 输入量

律建立起调节指令 y 。其输入量 w 是由手动或上一级装置给出的；另一个输入量 x_2 为反馈量，也就是系统被调节量的实际值。控制或调节装置的输出指令 y 控制该系统中相应元件工作，从而实现自动控制或调节的作用。

这一类系统主要应用在对起动、调速和制动过程有一定要求以及需要保持某一电量或机械量在容许数值范围内（如电流或转矩限制，转速或转差率保持常数等）的场合。典型的例子如各种精密机床、起重与运输机械以及试验台的传动装置等。

在这类系统中测量装置是必不可少的组件，它一方面向显示、报警和记录装置提供信息，同时也向控制或调节装置提供反馈信息。而且，如果它还向下一级或上一级装置提供测量信息的话，那么这类系统就是下述拥有内部数据处理的综合自动化电力传动系统的一个组成部分。

3. 综合自动化电力传动系统

综合自动化电力传动系统是由一组自动化系统和信息处理单元所组成的，通常是按照一定的等级来排列的，即上一级的输出

量作为下一级的输入量（图1.3）。这里，最下一级被控制或被调节的系统就是图 1.2 所示的相互独立的单一自动化系统。它们从上一级功能组自动装置获取给定值或运算指令并实现由功能组自动装置集中提出的生产过程的工艺要求。功能组自动装置由中央控制装置来控制，而中央控制装置一般是由程序计算机进行管理的。至于中央控制装置本身则是由操作人员操作的输入设备或者由其它具有一定工作规程的上一级信息处理装置来提供指令的。

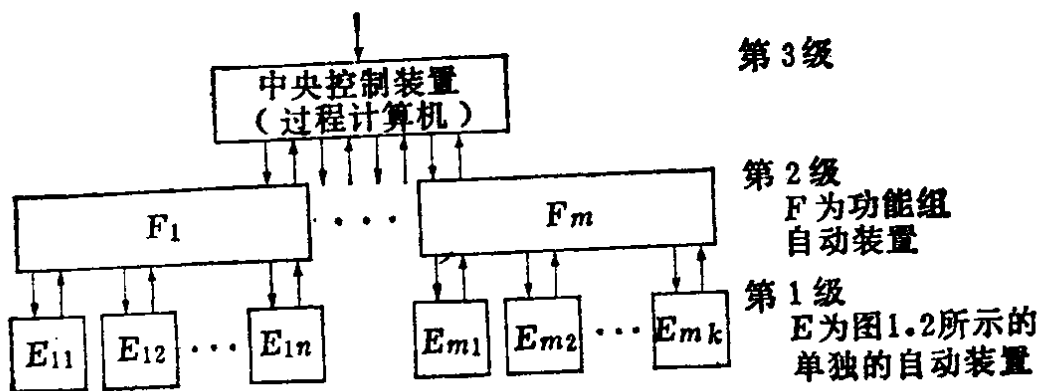


图 1.3 综合自动化电力传动系统

这一类系统在进行处理时仅在两相邻级之间的相应部分上有信号联系。这样，一旦出现事故时能使受干扰的元件仅局限在整个系统的小范围内，而不对同一层其它级产生影响。这种信号处理方式也便于起动工作，因为从最低一级起，系统的各个功能环节同其它可能投入运行的功能单元无关。此外，这种安排也有利于进行维护、修理与更换。

综合自动化电力传动系统常用于计算机控制生产的冶金工业（如轧钢）以及其它应用计算机控制的工业自动线及过程控制中。

1.2 典型的工作机械及其线路

1.2.1 典型的工作机械

工作机械又称生产机械，是完成机械加工、运输等任务的机械装置，其所需要的能量是由电动机通过转轴提供的，如图1.4所示。工作机械的输入轴以角速度 ω_A 旋转，轴上转矩为 m_{wA} ，

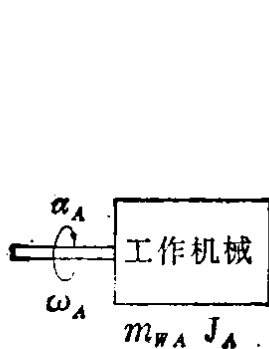


图 1.4 工作机械
 α_A —转角； ω_A —输入轴角速度； m_{WA} —阻转矩； J_A —转动惯量

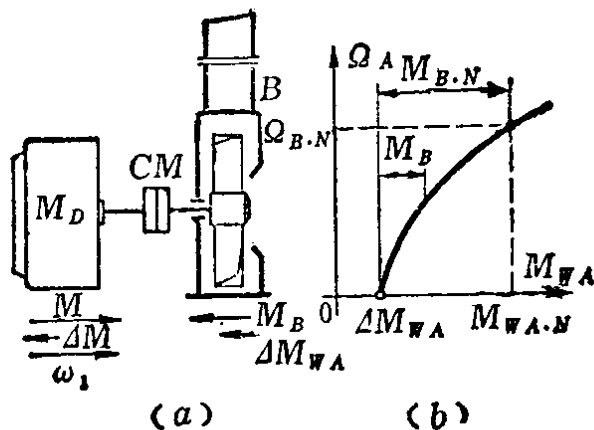


图 1.5 通风机结构 (a)
 及其特性 $M_{WA} = f(\Omega_A)$ (b)

转动惯量为 J_A 。 ω_A 、 m_{WA} 和 J_A 这三个量根据实际工作机械的结构情况的不同而有不同的关系，这些量本身也可以根据某种特殊的技术要求而随时间或其它量值变化。

在各个工业领域内实际存在的工作机械是极其众多的，我们不可能对它们作一一介绍。所以，下面我们仅介绍几种常见而又典型的工作机械，以作为我们研究机械问题的基础。

图1.5(a)所示为最简单而常见的离心式通风机的结构示意图，电动机 M_D 的转子通过联轴节 CM 直接与通风机 B 的轮叶轴相连，所有运动部分以同一转速旋转。在稳态运行时通风机产生的阻转矩 M_{WA} 同角速度 Ω_A 的关系[见图1.5(b)]为

$$M_{WA} = \Delta M_{WA} + M_{B \cdot N} (\Omega_A / \Omega_{B \cdot N}) \quad (1.1)$$

式中 $M_{B \cdot N}$ ——对应于额定转速 $\Omega_{B \cdot N}$ 时的通风机额定转矩；

ΔM_{WA} ——在通风机轮叶轴承上因摩擦引起的机械损失转矩。

将转矩与角速度用矢量表示，则如图1.5(a)下方各个箭头所示。

电动机转子产生的电磁转矩 M 及机械损失转矩 ΔM (主要是由电机轴摩擦引起的) 与电动机角速度 Ω_A 之间的关系也可用类似于式 (1.1) 的公式来表示。在这里，由于电动机与通风机具有