

晶 闸 管 直 流 传 动

〔加拿大〕 P. C. 森 著

赵士廉 译

叶 王 校



机 械 工 业 出 版 社

Thyristor D C Drives

by P. C. Sen

Copyright © 1981 by John Wiley
& Sons, Inc.

* * *

晶闸管直流传动

[加拿大] P. C. 森 著

赵士廉 译

叶 王 校

*

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 850×1168 1/32 ·印张 9³/₄ ·字数250千字
1984年4月重庆第一版·1984年4月重庆第一次印刷
印数 00,001—3,650 ·定价1.50元

*

统一书号: 15033·5454

目 录

符号

第一章 直流传动的发展	1
1.1 直流传动的历史	1
1.1.1 列奥纳德系统	2
1.1.2 电子控制	6
1.1.3 固态控制	6
1.2 现代技术发展概况	10
参考文献	12
第二章 单相传动	14
2.1 工作特性参数	16
2.1.1 电动机的工作特性参数	16
2.1.2 输入电源的工作特性参数	17
2.2 他激直流电动机的单相传动	19
2.2.1 连续电枢电流	20
2.2.2 断续电枢电流	29
2.2.3 综合分析	32
2.2.4 工作特性的计算	36
2.2.5 计算机分析	38
2.3 串激直流电动机的单相传动	54
2.3.1 波形	56
2.3.2 定义方程式	56
2.3.3 工作特性曲线	65
2.4 功率因数的改善	70
2.4.1 相位角控制	70
2.4.2 全控变流器的半控运行	74
2.4.3 非对称开通	78
2.4.4 强迫换相	78
2.4.5 串联变流器的顺序控制	84
2.4.6 方案的评比	95
参考文献	96

第三章 三相传动	97
3.1 半控变流器与全控变流器传动	97
3.1.1 半控变流器运行	97
3.1.2 全控变流器运行	100
3.2 串联变流器	106
3.2.1 功率因数	106
3.2.2 全控型串联变流器	108
3.2.3 半控型串联变流器	113
3.2.4 电压不移相的串联变流器	120
3.2.5 功率因数特性曲线	124
3.3 双重变流器	127
3.3.1 理想的双重变流器	127
3.3.2 实际的双重变流器	131
3.3.3 无环流双重变流器	133
3.3.4 断续负载电流	136
3.3.5 闭环系统	137
3.3.6 有环流双重变流器	139
3.3.7 两用双重变流器	144
3.4 可逆传动	147
3.4.1 电枢电流反向	147
3.4.2 激磁电流反向	154
3.4.3 传动的选择	158
参考文献	160
第四章 直流斩波器传动	162
4.1 斩波器的工作原理	164
4.1.1 升压斩波器	167
4.1.2 斩波器的电路结构	168
4.2 斩波器详述	170
4.2.1 斩波器的电压换相	170
4.2.2 斩波器的电流换相	176
4.2.3 斩波器的负载换相	178
4.3 斩波器供电的直流电动机	181
4.3.1 分析	182

4.3.2 工作特性曲线	185
4.4 输入滤波器	193
4.5 多相斩波器	200
参考文献	201
第五章 制动	202
5.1 能耗制动	202
5.1.1 相位控制传动	204
5.1.2 斩波器传动	204
5.2 再生制动	207
5.2.1 相位控制传动	208
5.2.2 斩波器传动	210
5.3 交通运输系统	213
参考文献	218
第六章 闭环控制	219
6.1 他激直流电动机传动	220
6.1.1 电动机的传递函数	220
6.1.2 闭环速度控制	223
6.1.3 电流控制	225
6.1.4 负载转矩的扰动	231
6.1.5 设计步骤	237
6.2 串激直流电动机模型	241
6.2.1 线性化模型	241
6.2.2 数值分析与线性化模型的比较	245
6.3 锁相环(PLL)控制	249
6.3.1 锁相环(PLL)	251
6.3.2 分析与系统模拟	253
6.3.3 PLL 传动	259
6.4 微型计算机控制	260
6.4.1 微处理器与微型计算机基础	262
6.4.2 可逆传动的微型计算机控制	265
6.4.3 现代技术发展动态	267
参考文献	268
附录A 晶闸管、晶体管与二极管	270

A.1 晶闸管(或SCR)	270
A.1.1 静态外特性	270
A.1.2 开通特性	272
A.1.3 关断特性	274
A.1.4 保护	275
A.2 晶体管	282
A.2.1 功率晶体管	282
A.2.2 功率达林顿器件	284
A.3 二极管	284
参考文献	287
附录B 触发电路与逻辑电路	288
B.1 相位控制	288
B.1.1 相角 α 的线性控制	288
B.1.2 相角 α 的余弦控制	290
B.1.3 脉冲放大器	293
B.2 斩波器控制	293
B.3 开环与闭环控制	295
B.4 过电流保护	297
参考文献	298

第一章 直流传动的发展

长期以来直流 (dc) 电动机都用于各种可调速传动中。由于它具有多方面的控制特性^[1~3] 故在工业中得到了广泛运用。直流电动机能提供牵引传动所需的高起动转矩。也易于实现在额定速度上下宽范围的速度调节。而且与交流 (ac) 电动机相比较, 它所采用的控制方法更为简便、经济。尽管由于具有换向器, 在某些情况下, 例如超高速传动和危险环境中限制了它的应用, 但直流电动机仍在各种工业传动中发挥重要作用。

直流传动的速度控制技术已取得很大进展, 现在直流电动机传动技术比二十五年以前又大大推进了一步。下一节将对直流传动的发展史作简短的回顾。

1.1 直流传动的历史

上一个世纪中所能得到的电力供应是固定电压的直流电, 而且电能的使用一般只限于某些大城市。位于市区的工厂通常用直

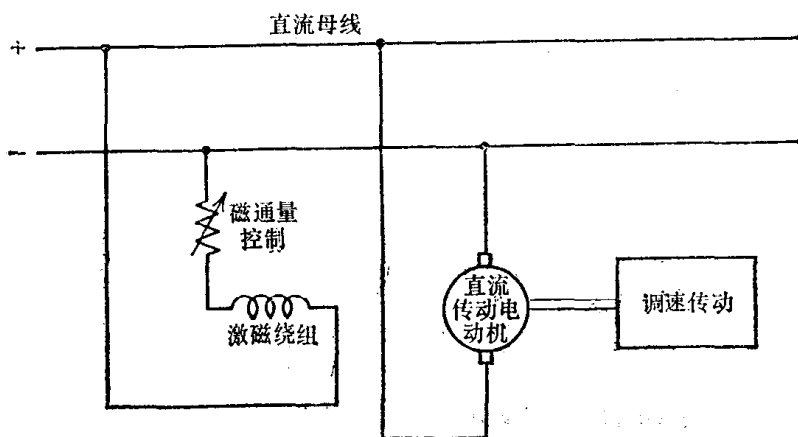


图1.1 古典调速直流传动的基本原理图

流电动机传动生产机械。直流电动机由固定电压的电源母线供电，要调节传动速度只能改变电动机的磁通量。于是就出现换向器发生火花、电刷和换向器的寿命缩短这样一些严重问题。事实上，换向过程在那时尚未被人们所完全认识。因此大多数的传动只能是固定速度的传动。那时的一些调速传动都是用图 1.1 所示的改变磁通量的方式实现的，使用的电动机是结实牢靠的，但机电时间常数一般较差。

后来扩大调速范围的需求迅速增长。人们对换向过程亦有了较多的认识。为了改善换向，研制了间极和极面绕组并投入使用，获得明显的成功。

1.1.1 列奥纳德系统

十九世纪九十年代开发并使用的华特-列奥纳德 (Ward-Leonard) 系统^{[1][2]}，在直流传动的发展史上是一个里程碑。这种系统采用电动机-发电机 (M-G) 机组向直流传动电动机供电。M-G 机组中的电动机以恒定的转速运行。利用磁场激励的变化来改变发电机的电压，从而使传动电动机的转速能在宽范围内

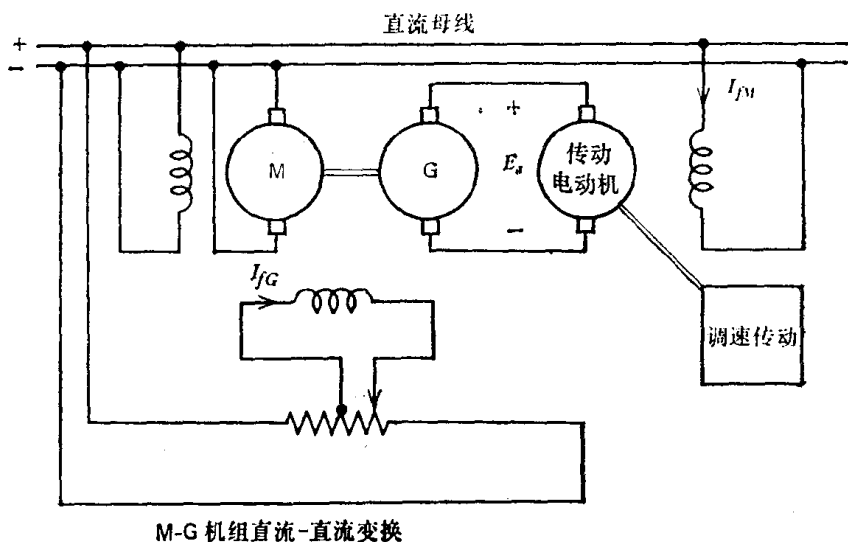


图1.2 列奥纳德系统的基本原理图

连续调节。在这种控制电枢电压以调节转速的方式中，传动电动机的磁通量保持不变，因此避免了电动机的换向不良问题。图1.2为列奥纳德调速系统的基本原理图。这种系统不仅能实现恒转矩传动也能实现恒功率传动，如图1.3所示。在恒转矩状态，传动电动机的磁通量保持恒定而控制电枢电压。在恒功率状态，电枢电压保持其额定值不变而激磁电流受到控制。列奥纳德系统首先在扩展调速范围，改善电机的换向和提高调速精度等方面成功地改善了运行特性。

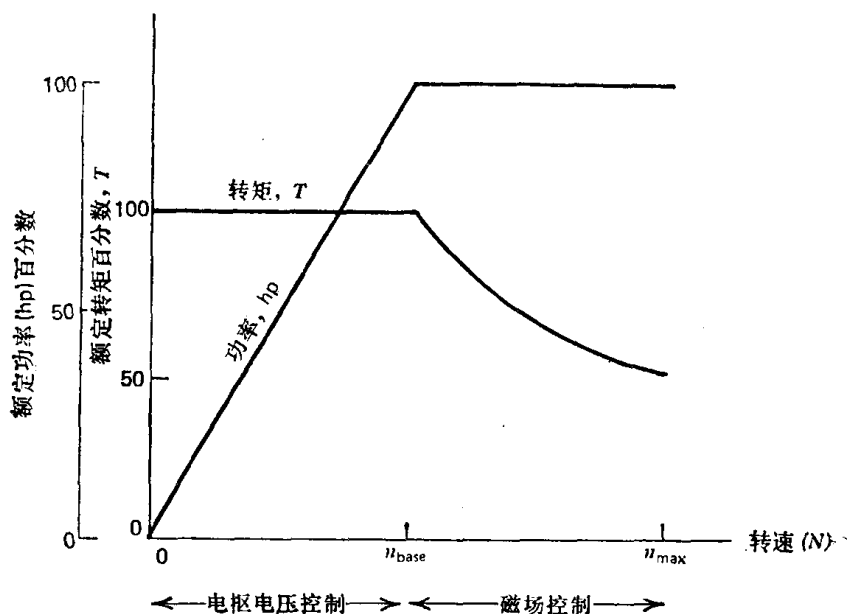


图1.3 列奥纳德系统的恒转矩和恒功率运行

当时交流发电、输电和配电系统相继出现，研制出了交流电动机，因为它既简单又坚固，引起了人们的重视。在有些扩建的工厂里，安装了交流配电系统以补充直流电力的不足，交流电动机被用在定速的传动系统中。新建厂就只安装交流配电系统。甚至一些老厂，后来也用交流配电取代了原有的直流配电。凡是要求调速传动的机器，都采用由一台交流电动机和一台直流发电机构成的列奥纳德M-G机组，如图1.4所示。

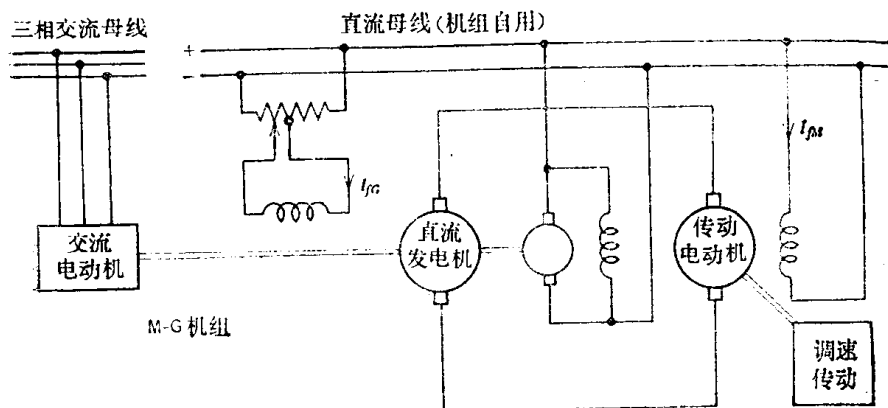


图1.4 由交流电动机和直流发电机构成的列奥纳德系统

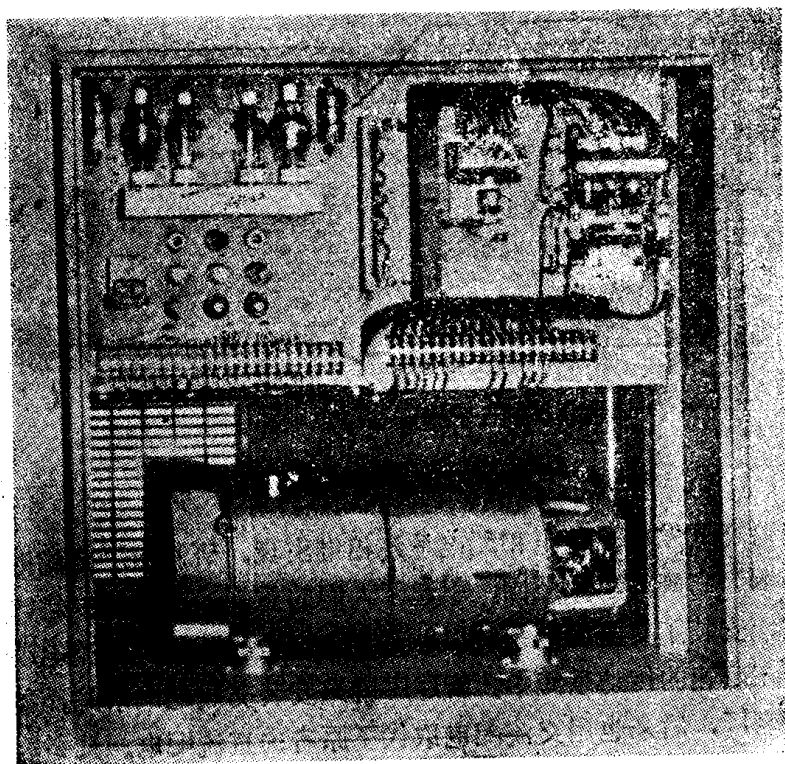


图1.5 采用真空管调节器的组装式列奥纳德M-G机组

起初是把列奥纳德系统制成分立部件，再在工厂现场安装和联结。到了四十年代初期，组装式列奥纳德系统开始出现。那就是把 M-G 机组、调节器和控制装置都放在共用的机壳内安装好和接好线，以供应组装成套的传动系统。图1.5和1.6就是这种组装式M-G机组系统。

列奥纳德系统具有以下优点：

1. 在正、反两个方向都能以全速运转。
2. 当减速时，通过 M-G 机组能自动地把电力再生到交流。

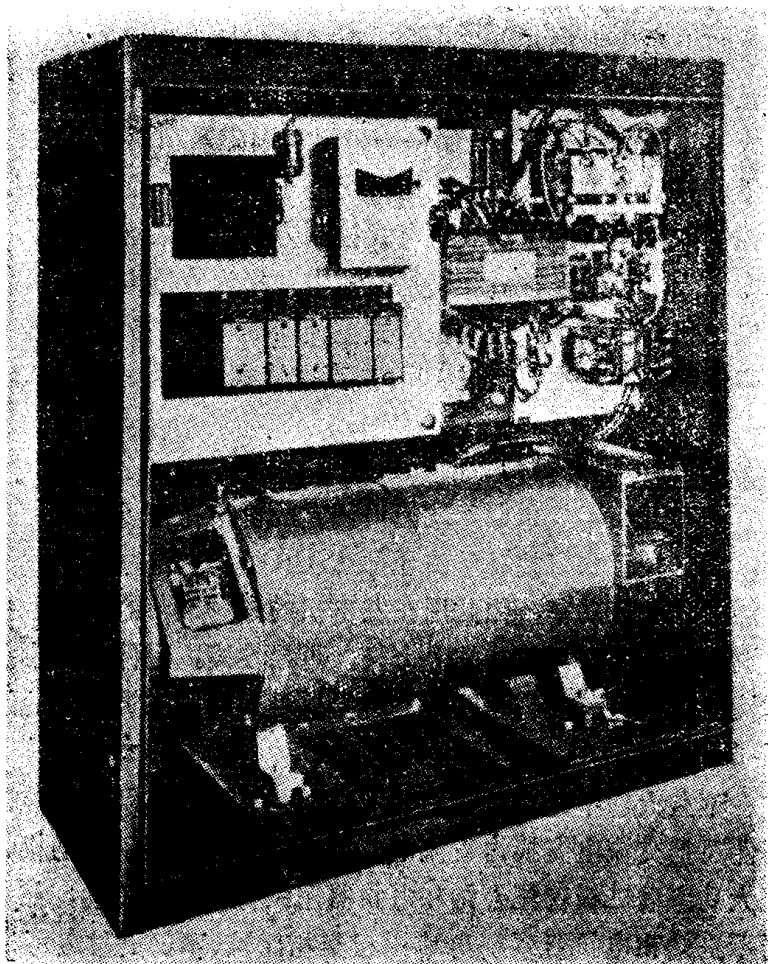


图1.6 采用固态调节器的组装式列奥纳德系统

电网里去。

3. 短时过载能力大。

4. 电动机的电枢电流是平直的。

但它还有以下一些缺点：

1. 投资费用高。

2. 总效率低，低于80%。

3. 需要占据较大的空间。

4. 必须进行周期检修和润滑。

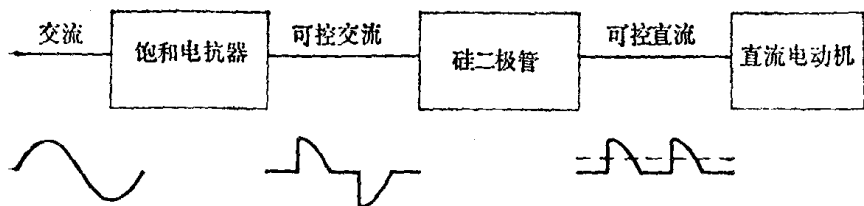
1.1.2 电子控制

四十年代末至五十年代初，电子控制技术使直流传动系统得到显著改进。在开始发展阶段，采用工业型的充气式整流管和可控式整流管（闸流管）作为M-G机组的励磁器和调节器，如图1.5所示。这就改善了系统的响应，提高了精确度，而且可用自动闭环控制取代早期的手动或机电式控制方式。后来这些管子的载流能力增大，可用于整流线路把交流电变换为直流电，控制直流传动电动机的转速。采用真空管式整流器的单相整流电路常用在小功率传动。额定功率超过10hp，真空管式整流器系统就不可靠了。

1.1.3 固态控制

到了五十年代末期，就能用便宜的价格在市场上买到固态器件、硅二极管和可控硅整流元件（SCR）^[4,5]。这些元、器件起初只能用于小功率，因此用在发电机的磁场调节器中代替真空管式调节器。固态调节器的寿命长，可靠性高，组件体积小而且工作性能有了显著改善。图1.6就是这种采用固态调节器的组装式M-G机组系统。

不久大功率硅二极管和SCR（又称晶闸管）问世。这些元、器件可把交流电变换为直流电，用来直接控制传动电动机。起初把大功率硅二极管配合饱和电抗器用到直流调速传动，如图1.7所示。饱和电抗器系统与M-G机组相比较，不仅更稳定可靠而且工作特性更好。但其体积颇大，价格较高。



(a)

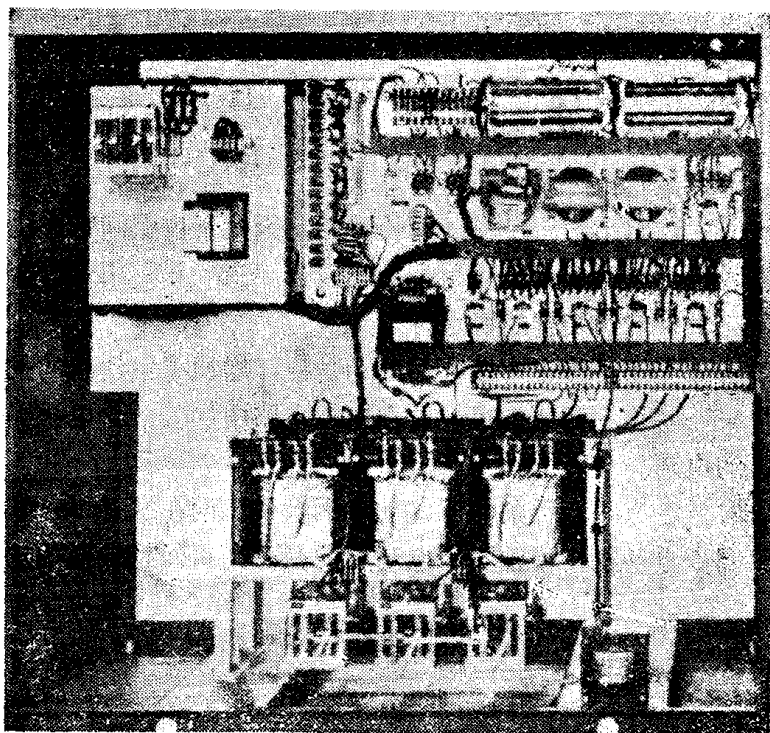


图1.7 饱和电抗器调速直流传动系统

(a) 方框图与波形图 (b) 系统的照片

六十年代初, 大功率晶闸管投入实用, 导致工业控制设备和传动系统性能的局部变革。在整个六十年代的十年中, 设计大容量可变电电压直流电源系统的工程师们, 都把注意力从采用 M-G 机组发出电力转移到采用晶闸管来变换电力上面来了。图 1.8a 就是这种晶闸管直流传动的方框图。事实上所有新型的直流调速传动

都采用了晶闸管 (SCR) 变流器。这样, 运用于直流调速传动达五十年之久的 M-G 机组就大部分被晶闸管变流器所取代。图 1.8b 表示一个晶闸管控制的直流传动装置和同样规模的 M-G 机组。晶闸管电力组件的详图示于图 1.8c。

晶闸管传动具有以下优点^[6]:

1. 晶闸管电力组件不存在发电机磁场和电枢的电气时滞问题。因此时间响应较快, 这时只有直流电动机的换向能力和传动的惯量限制时间响应。

2. 操作简单, 工作可靠。

3. 只需最低限度的维护。

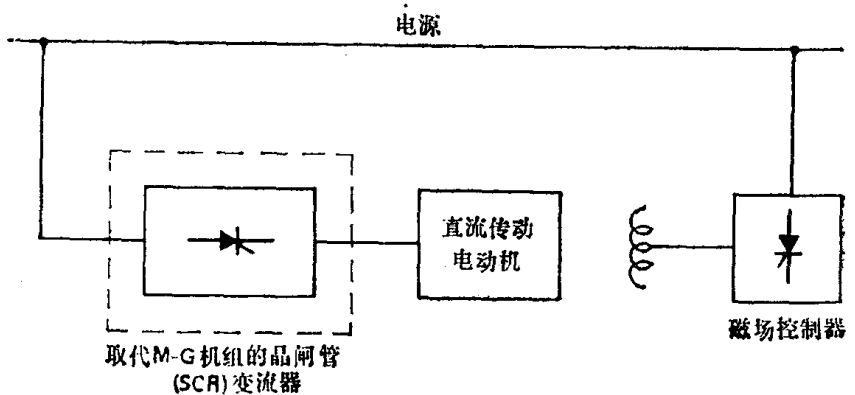
4. 运行效率高, 在 95% 以上。

5. 体积小, 重量轻, 组装灵活, 因此所占空间减小, 初投资费较低, 同时安装和运行费用也较少。

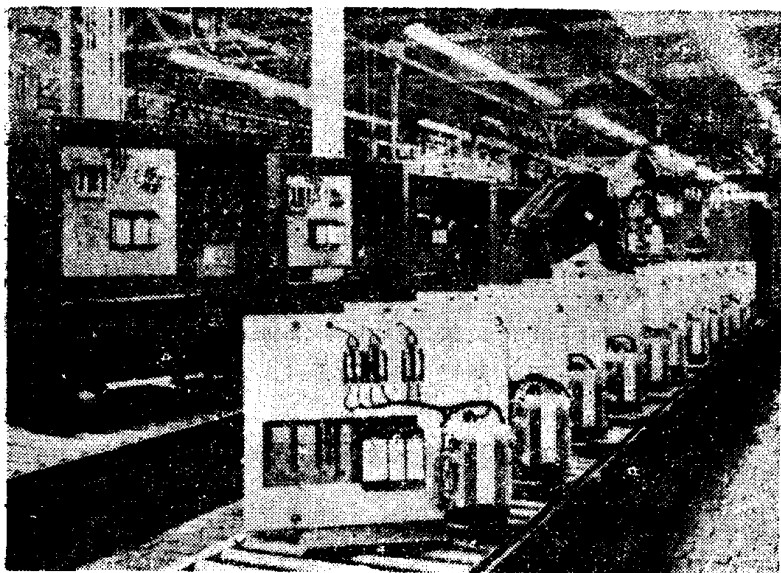
晶闸管传动装置的缺点有^[6~8]:

1. 变流器输出有较高的脉动含量, 增加了电动机的发热, 并带来一些换向问题。可能要在电枢电路中的加装一个电抗器以滤平脉动电流。

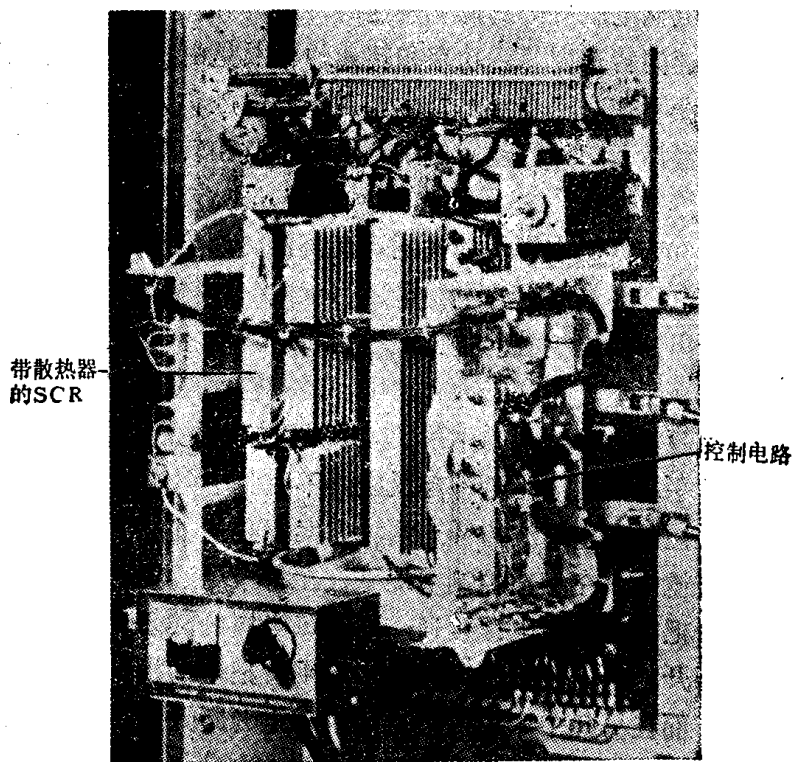
2. 在有些运行条件下, 功率因数低。而在 M-G 机组中, 若采用同步电动机, 调整同步电动机的激磁则可保持较高的功率因



(a)



(b)



(c)

图1.8 晶闸管直流传动装置

(a) 方框图 (b) 第一代晶闸管直流传动装置(前)和早期的M-G机组传动装置(后) (c) 晶闸管电力组件的详图

数。

3. 与M-G 机组相比较, 其过负载能力较差。

4. 由于晶闸管的开关作用, 交流电源电压可能会出现畸变, 并可能造成对通讯的干扰。

5. M-G 机组能自动再生。但在晶闸管变流器中, 为了得到再生需要复杂的控制电路。要用双重变流器(两个桥背对背联结), 或者要用带有某种类型的反接开关的单变流器才能实现再生。但这两种方法都是复杂而又昂贵的。

1.2 现代技术发展概况

目前, 用晶闸管变流器控制的他激直流电动机, 是工业中应用最广泛的电动机传动系统。这种系统能实现宽范围的速度控制。控制电枢电压可得到低于基速的转速调节。削弱激磁, 可得到高于基速的转速调节。功率和转速的极限是由直流电动机本身决定的, 而不取决于半导体器件。对于高电压和大电流, 可以把几个晶闸管串联和并联起来使用。电枢电流和转矩受电动机温升的限制。

图1.8a方框图中所示的晶闸管变流器。为传动电动机提供可变的电枢电压。从固定的电源电压(ac或dc)得到可变的直流输出电压所用的相位控制、整周波控制和斩波器控制这三种基本方法如图1.9所示。在这三种方法中, 晶闸管在电源与电动机端子之间总是起接通和断开的的作用。其开关的频率是很高的。因此, 电动机只对平均输出电压电平起反应而不对各个电压脉冲起反应。

相位控制和整周波控制这两种方案都是通过整流而把交流电变换为直流电。在相位控制情况下, 在每半周的某一定时间间隔内晶闸管把电动机与电源接通; 而在每半周的其余时间内电动机与电源断开。整周波控制方案中, 晶闸管把电动机与电源接通几个半周, 而在另几个半周内把电动机与电源断开。在斩波器控制方案中晶闸管迅速地导通和关断, 为传动电动机提供斩波电压。斩波电压的平均值由晶闸管的导通时间(t_{ON})与关断时间(t_{OFF})

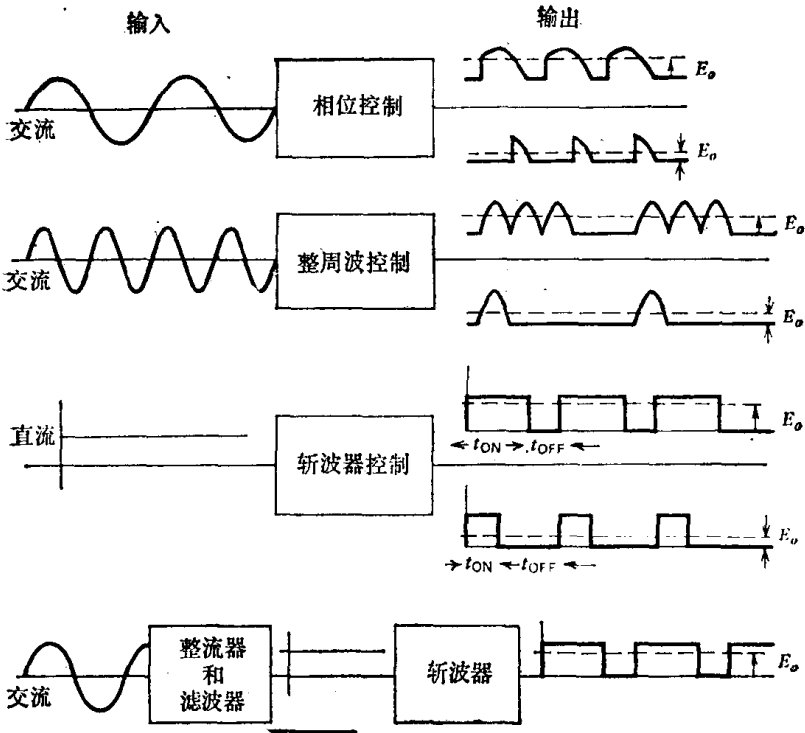


图1.9 从固定的电源电压得到可变的直流输出电压的控制方法

的比加以控制。如果电源是交流的，也可以把整流器与斩波器联合起来使用。

在相位控制和整周波控制中，电源的交流电压把晶闸管关断，而不需要换相电路。因此这两种方案既简单又经济。相位控制运用很广泛，它能在宽范围内平滑地控制输出电压。但在输出电压较低的情况下，功率因数要降低。倘若电源频率很高，整周波控制是比较满意的；不然的话当电源频率较低时电动机就会在其平均速度上下波动。对于电动机的速度控制，这种系统尚未获得令人满意的效果。电源若是直流的就采用斩波器电路。但它需要辅助电路来关断晶闸管。为了减少电动机电流的脉动，斩波器需以较高的开关频率工作。高速开关作用要求用特殊晶闸管。因此斩波器控制比较复杂，尽管这样它仍然得到广泛的应用。整流