

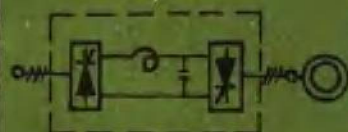


电力电子技术丛书

交流电动机晶闸管 调速系统

佟纯厚 主编

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

内 容 提 要

本书是《电力电子技术丛书》的一个分册。书中全面系统地介绍了各类交流电动机的晶闸管调速技术,包括调压调速、各种变频调速、转子斩波调速、低同步及超同步串级调速、无换向器电动机调速,并对磁场定向式和转差频率矢量变换控制及微型计算机在交流调速中的应用等最新技术作了阐述。对上述各种调速技术,阐明了基本概念和原理、主电路和控制系统构成、参数计算和设计等问题。

本书深入浅出,理论与实践相结合,面向生产实际,并侧重介绍带有方向性发展的新技术内容。

本书可供从事电力电子技术、工业电气自动化及电力拖动自动控制方面的科技干部、工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

交流电动机晶闸管调速系统

佟纯厚 主编

*

责任编辑:孙流芳 牛新国 责任校对:丁丽丽

版式设计:乔玲 责任印制 卢子祥

*

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)

国防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850×1168 $1/32$ ·印张 $13\frac{1}{2}$ ·插页1·字数358千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000·定价:6.90元

*

ISBN 7-111-00412-4/TM·70

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员 顾廉楚

副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐

陈守良 严蕊琪

委员（按姓氏笔划序）

卞敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪 张立

张永生 张铁忠 周胜宗 秦祖荫 徐传骧

前 言

本书是根据《电力电子技术丛书》编委会的计划安排及所通过的编写提纲进行编写的。

由于很多生产机械要求调速，在过去，直流调速拖动一直占居首位，近年来国内外随着微电子学和电力电子学的发展，交流调速拖动的发展极为迅猛，交流调速拖动已进入与直流调速拖动相媲美、相竞争的时代，并有取而代之的趋势。因此，在我国各经济建设部门中，迅速推广、应用近代交流调速拖动这门新技术，已是客观发展的必然趋势。

本书是以工厂企业、设计院、研究所从事电力电子技术、工业电气自动化和电力拖动自动控制方面的广大科技工作者为主要对象编写的，也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。本书在编写过程中注意了加强物理概念，深入浅出，理论与实践相结合，面向生产实际，并侧重介绍带有方向性发展的新技术内容。

全书共分五章，按不同类型交流电动机的晶闸管调速系统进行分章，以变频为基础，以矢量变换控制和微型计算机控制为最新技术加以阐述。在绪论中综述了交流电动机晶闸管调速技术的发展动向，第一章笼型感应电动机的晶闸管调速系统，除阐述了笼型电动机的工作原理、特性及调速方法外，着重分析晶闸管调压调速的原理，变频调速包括电压型、电流型、脉宽调制(PWM)型、交-交变频器的基本原理，及其主电路、换流、参数计算和控制系统的组成，并列举了实例。第二章绕线转子感应电动机的晶闸管调速系统，阐明了转子斩波器调速、低同步串级调速及超同步串级调速，着重分析了它们的机械特性、效率、功率因数、静态和动态特性、参数计算和控制系统设计问题。第三章同步电动

机晶闸管调速系统, 主要分析无换向器电动机的工作原理, 换流、调速方法以及四象限运行状态。第四章交流电动机晶闸管功率变换装置矢量变换控制系统, 着重分析磁场定向式及转差频率矢量变换控制的物理概念、原理、坐标变换、磁通检测、运算功能及其控制系统结构。第五章采用微型计算机控制的晶闸管-交流电动机调速系统, 简要介绍微型计算机原理及其在交流电动机晶闸管调速系统(电流型、PWM型及矢量变换控制)中的应用。在全书末尾列有参考文献。

本书绪论、第一章的第一、三、六、七、八节及第四章由佟纯厚同志编写; 第一章的第四、五节及第二章由贺斌英同志编写; 第一章的第二节及第三章由韩安荣同志编写; 第五章的第一至四节及第五节一、二由彭洪才同志编写; 第五章的第五节三和第六节由潘清波同志编写, 全书由佟纯厚同志担任主编。

本书由王溥仁同志审阅, 并提出很多宝贵意见, 在此表示衷心感谢。

在编写本书的过程中, 中国电工技术学会电力电子学会及《电力电子技术丛书》的编委们给予大力支持和提出许多宝贵意见, 并且得到了东北工学院近代交流调速研究室的同志们的帮助, 在此一并表示谢意。

由于时间仓促, 水平所限, 书中一定存在不少缺点和错误, 诚恳地希望广大读者批评指正。

编 者
一九八六年二月

目 录

绪论	1
一、交流电动机调速方法及晶闸管交流调速方式分类	1
二、交流电动机晶闸管调速的特点	3
三、交流电动机晶闸管调速的发展动向	5
四、交流电动机晶闸管调速存在的主要问题及改进措施	11
第一章 笼型感应电动机的晶闸管调速系统	13
第一节 笼型感应电动机概述	13
第二节 晶闸管调压调速	17
一、感应电动机调压调速的原理	18
二、晶闸管三相调压电路	19
三、调压调速控制系统的组成	37
四、调压调速系统运行中的问题	39
五、应用举例	45
第三节 晶闸管变频调速的一般基础	47
一、变频调速原则及其机械特性	47
二、晶闸管变频器的工作原理	55
三、变频器的换流方式	60
第四节 交-直-交电压型晶闸管变频调速系统	63
一、串联电感式电压型变频器	65
二、带辅助晶闸管换流的电压型变频器	76
三、电压型变频调速控制系统	80
四、可关断晶闸管 (GTO) 变频调速系统的特点	86
五、应用举例	90
第五节 交-直-交电流型晶闸管变频调速系统	93
一、串联二极管式交-直-交电流型变频器的工作原理	93
二、感应电动机由方波电流源供电时的等效电路	100
三、换流过程分析	108

四、电流型变频器元件选择	120
五、实际应用的电流型变频器主电路	127
六、交-直-交电流型变频调速系统	130
七、电流型变频器的多重化	140
八、电流型变频器的特点及应用	146
第六节 脉宽调制 (PWM) 型晶闸管变频调速系统	147
一、PWM型变频器的控制方式	148
二、脉冲宽度调制方法	150
三、晶闸管 PWM 型逆变器的主电路	156
四、脉宽调制 (PWM) 变频调速控制系统	161
第七节 交-交变频器晶闸管调速系统	162
一、工作原理	162
二、三相周波变流器的主电路	169
三、触发脉冲的控制原则	174
四、交-交变频调速控制系统	181
五、交-交变频器的特点	183
第八节 各类变频器的主要特点比较	184
第二章 绕线转子感应电动机晶闸管调速系统	187
第一节 概述	187
第二节 绕线转子感应电动机转子斩波器调速系统	190
一、工作原理	190
二、转子斩波器的主电路	195
三、触发电路	196
四、实例	197
五、闭环调速系统	198
六、应用	204
第三节 绕线转子感应电动机低同步晶闸管串级调速	205
一、晶闸管串级调速系统能量传输	205
二、串级调速的转矩特性	210
三、串级调速的机械特性	220
四、串级调速的功率因数	228
五、串级调速的总效率	231

六、串级调速的闭环控制系统	234
七、串级调速系统的起动和停止	239
八、串级调速系统的保护	242
九、低同步串级调速的特点及应用	244
十、串级调速系统的几种特殊接线方式	246
第四节 超同步串级调速系统	247
一、超同步串级调速的原理	248
二、超同步串级调速系统的构成	253
三、超同步串级调速的特点	266
第三章 同步电动机的晶闸管调速系统	269
第一节 概述	269
第二节 无换向器电动机的工作原理	271
一、工作原理	271
二、位置检测器	276
第三节 无换向器电动机的换流	279
一、反电势自然换流	279
二、断续换流	281
第四节 无换向器电动机的运行特性	282
一、转速特性	283
二、转矩特性	285
三、机械特性	286
第五节 无换向器电动机的运转状态及调速系统	287
一、转矩波形与 γ_0 的关系	287
二、无换向器电动机的四象限运行	293
三、直流式无换向器电动机控制系统的组成	304
第六节 交-交电流型无换向器电动机	305
一、主电路及原理框图	306
二、 α 、 γ_0 综合控制的工作原理	308
三、交流式电流型无换向器电动机的特点	309
第七节 无换向器电动机的过载能力	311
一、限制过载能力的因素	311
二、提高过载能力的措施	312

第八节 应用实例	314
一、工艺要求及设备参数	314
二、原理框图及起动过程	315
第四章 交流电动机晶闸管电力变换	
装置矢量变换控制系统	318
第一节 矢量变换控制工作原理	318
一、基本想法	318
二、工作原理	319
第二节 矢量变换的运算功能	324
一、三相/二相($3\phi/2\phi$)坐标变换器	324
二、矢量回转器(VD)	326
三、矢量分析器(VA)	327
四、直角坐标/极坐标(K/P)变换器	328
第三节 交流电动机磁通的检测和运算	329
一、磁敏检测法	329
二、探测线圈法	329
三、电压模型法	330
四、电流模型法	330
第四节 感应电动机的磁场定向式矢量变换控制系统	331
第五节 感应电动机的转差频率矢量变换控制	333
一、基本原理	333
二、转差频率矢量变换控制系统	335
三、实例	336
第五章 采用微型计算机控制的晶闸	
管-交流电动机调速系统	341
第一节 微型计算机控制的电气传动系统概述	341
一、微型计算机控制的电气传动系统的现状和发展趋势	341
二、微型计算机控制电气传动系统的几种类型	346
第二节 微型计算机的硬件基础	349
一、微型计算机框图	349
二、Z-80中央处理器(CPU)	351
三、Z-80CTC	355

四、Z-80 PIO.....	361
五、TP-801A单板计算机简介.....	366
六、数/模(D/A)和模/数(A/D)转换.....	369
第三节 几种控制功能的程序设计	373
一、应用微型计算机实现的环形分配器	373
二、微型计算机控制正弦电流(电压)变频器	376
三、应用微型计算机实现 PID 调节器的算法与程序	381
四、应用微型计算机实现的数字触发器	385
第四节 最简单的微型计算机控制的	
电流型交流变频调速系统	389
第五节 微型计算机在矢量变换控制系统中的应用	392
一、微型计算机、模拟混合式的矢量变换控制系统	392
二、由16位微型计算机完成全部运算	
和调节功能的矢量变换控制系统	397
三、多 CPU 矢量变换控制系统	398
第六节 微型计算机在 PWM 型逆变器中的应用	404
一、PWM 型逆变器用微机控制的基本特点	404
二、微处理器与模拟电路混合控制	406
三、微型计算机控制的晶闸管 PWM 型变频器.....	407
四、微型计算机控制 PWM 型感应电动机变频调速系统.....	409
参考文献	416

绪 论

一、交流电动机调速方法及晶闸管交流调速方式分类

我们知道，交流电动机的同步转速 n_1 表达式为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

根据感应电动机转差率 s 的定义，

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

可知感应电动机的转速 n 为

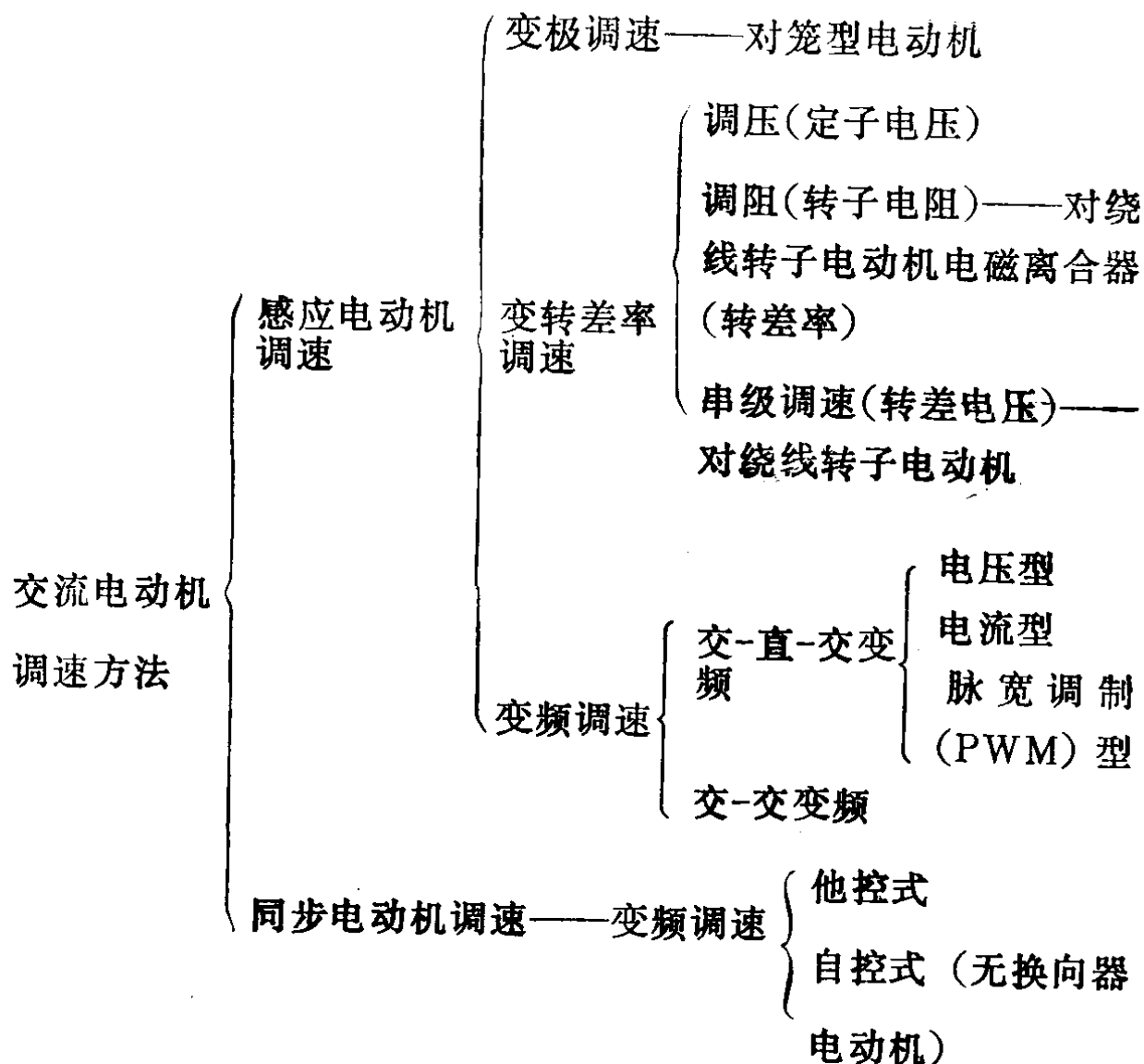
$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

因而感应电动机的调速方法可以有变转差率 s 、变极对数 p 及变频率 f_1 三种。其中，变转差率的方法又可以通过调定子电压、转子电阻、转差电压以及定、转子供电频率差等方法来实现。同步电动机的调速可以通过改变供电频率而改变同步转速的方法来实现。这样，交流电动机就有很多不同的调速方法，如下页表所示。

在上述各种调速方法中，绕线转子感应电动机的串级调速、笼型感应电动机的变频调速及无换向器电动机调速很受人们的重视，并且已在工业中获得了应用。

靠改变转差率对感应电动机进行调速时，由于低速时转差率大，转差损耗也大，所以效率低。在串级调速中，通过“能量回馈”的办法将这部分功率加以利用，可以提高效率。

变频调速方法与变转差率调速方法有本质的不同。变频调速时，从高速到低速都可以保持有限的转差率，因而变频调速具有高效率、宽范围和高精度的调速性能。可以认为，变频调速是交



流电动机的一种比较合理和理想的调速方法。

交-直-交电压型(包括 PWM 型)变频器一般适用于中小容量的不可逆系统,交-直-交电流型变频器一般适用于四个象限运行的可逆系统,交-交变频器一般适用于低速大容量系统。

采用晶闸管的交流调速方式可分类如下:

(1) 不改变同步转速的调速方法

- 1) 晶闸管转子斩波调速;
- 2) 晶闸管定子调压调速;
- 3) 晶闸管电磁转差离合器调速。

(2) 改变同步转速的调速方法

- 1) 改变定子极对数调速;
- 2) 晶闸管串级调速及双馈调速;

3) 晶闸管变频调速;

4) 无换向器电动机调速。

由于对转差功率处理的方法不同, 各种调速所产生的损耗也不同, 不断改进转差功率的处理方法, 是提高调速效率的有效途径。

二、交流电动机晶闸管调速的特点

众所周知, 电力拖动系统可分为直流和交流两大类。以往, 直流拖动系统由于调速性能(调速范围、稳定性或静差度、平滑性等)优于交流拖动系统, 因此, 一直占居首位。诸如发电机-电动机组控制方式, 带有交磁电机扩大机的发电机-电动机组以及晶闸管电动机调速系统, 在额定转速以下用改变电枢电压方法调速, 在额定转速以上用改变励磁的方法调速。采用反馈和前馈的直流调速系统可以得到高的精度。所以长期以来, 人们已形成了直流调速比交流调速好的深刻印象。但是, 由于直流电动机本身结构上存在换向器和电刷, 因此有如下主要缺点:

(1) 维护困难;

(2) 设置环境受到限制, 易燃易爆以及环境恶劣的地方不适用;

(3) 在结构发展上, 制造大容量、高转速及高电压的直流电动机比较困难;

(4) 造价高。

随着电力电子技术的发展, 各种电力半导体器件(诸如晶闸管等)的出现, 促使交流调速有了飞跃发展, 它已进入与直流调速相媲美、相竞争的时代, 并有取而代之的趋势, 因此, 对于交流和直流拖动的调速性能要重新给予评价。

交流调速系统是通过晶闸管电力变流器改变输出电压、电流和频率等参数来给交流电动机供电的, 如图 1 所示。

晶闸管电力变流器有下列四种形式:

(1) AC/DC, 由恒压恒频的交流电变换为直流电的功率变

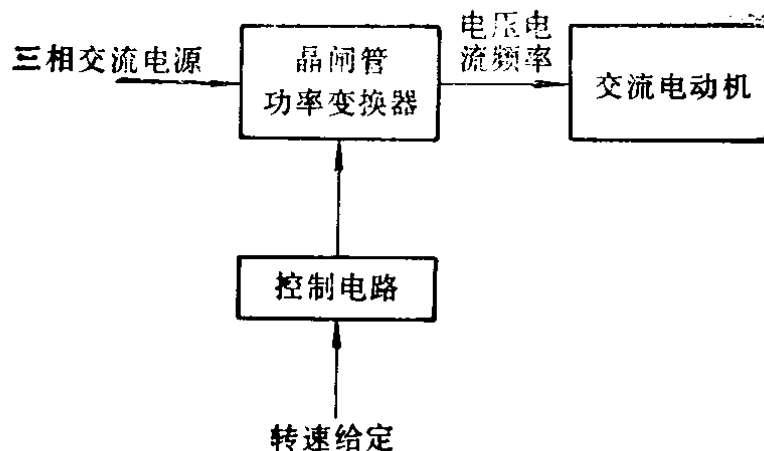


图 1 交流调速系统

换器，称之为整流器；

(2) DC/DC，由恒压直流电变换为调压直流电的功率变换器，称之为斩波器，相当于直流脉冲调压方式；

(3) DC/AC，由恒压直流电或调压直流电变换为调频和恒压或调压的交流电，称之为逆变器；

(4) AC/AC，由恒压恒频交流电变换为调压调频的交流电，称之为周波变流器。

由前三种或(1)、(3)两种组成的晶闸管电力变流器，称为交-直-交变频器或称为间接交流变频器。由后者组成的晶闸管电力变流器，称为交-交变频器或称为直接交流变频器。变频器的输出一般为可变电压和可变频率形式，因此变频器可缩写为VVVF变频器。由这种电力变流器组成的交流调速系统有如下特点：

(1) 可以扩大电动机的容量，提高电动机的转速和电压；

(2) 交流电动机，特别是笼型感应电动机，设置环境适应性强；

(3) 维护方便；

(4) 感应电动机结构简单，坚固耐用，经济可靠，惯性小，动态响应好；

(5) 由于高性能、高精度新型交流调速系统的不断发展，交流电动机的调速特性可以与直流电动机的一样好。

正因如此，交流调速系统完全克服了直流调速系统一直想解决而未能解决的缺点，并发挥了交流电动机固有的优点，其原有调速性能不好的缺点已得到解决，甚至在某些方面（譬如改善系统功率因数方面），交流调速还优于直流调速。所以近些年来，交流调速在国内外引起人们极大的重视，并得到飞跃的发展。

三、交流电动机晶闸管调速的发展动向

交流调速方式很多，带有方向性发展的近代交流调速主要有如下几种。

1. 串级调速 它是将绕线转子感应电动机的转差功率加以利用的一种比较经济的高效调速方法。把转差功率通过电动机变为机械能做功，称为机械串级调速方式，它的方向是采用无换向器电动机代替直流电动机，如图2a、b所示。把转差功率回馈到电网的，称为电气串级调速方式。通过机组完成回馈的，称为机组串级调速，如图2c所示；通过晶闸管电力变流器完成回馈的，称为晶闸管串级调速，如图2d所示。由于前者效率低，占地面积大、旋转系统维护不方便等，现已较少应用。晶闸管串级调速是当前最常用的，它有低同步及超同步两种串级调速方式，如图2d、e、f所示。低同步串级调速在技术上已经成熟，我国已有大容量的系列产品，应用的地方也不少。超同步串级调速具有其它电动机调速所没有的可贵特点，在低同步运行时，不仅可以运行在电动状态，还可以运行在再生发电制动状态；在超同步运行时，不仅可以运行在再生发电制动状态，还可以运行在电动状态。这样，扩大了调速范围，可方便地实现四象限运行。目前，我国正处在工业试验阶段。同步转速信号的准确检测及控制精度的提高，以及静态、动态特性的理论分析，还有待于进一步研究。但所有串级调速系统的应用受到绕线转子感应电动机的限制，因为它仍有滑环和电刷。有人提出了无刷串级调速方式，如图2g所示，这时轴上转速为

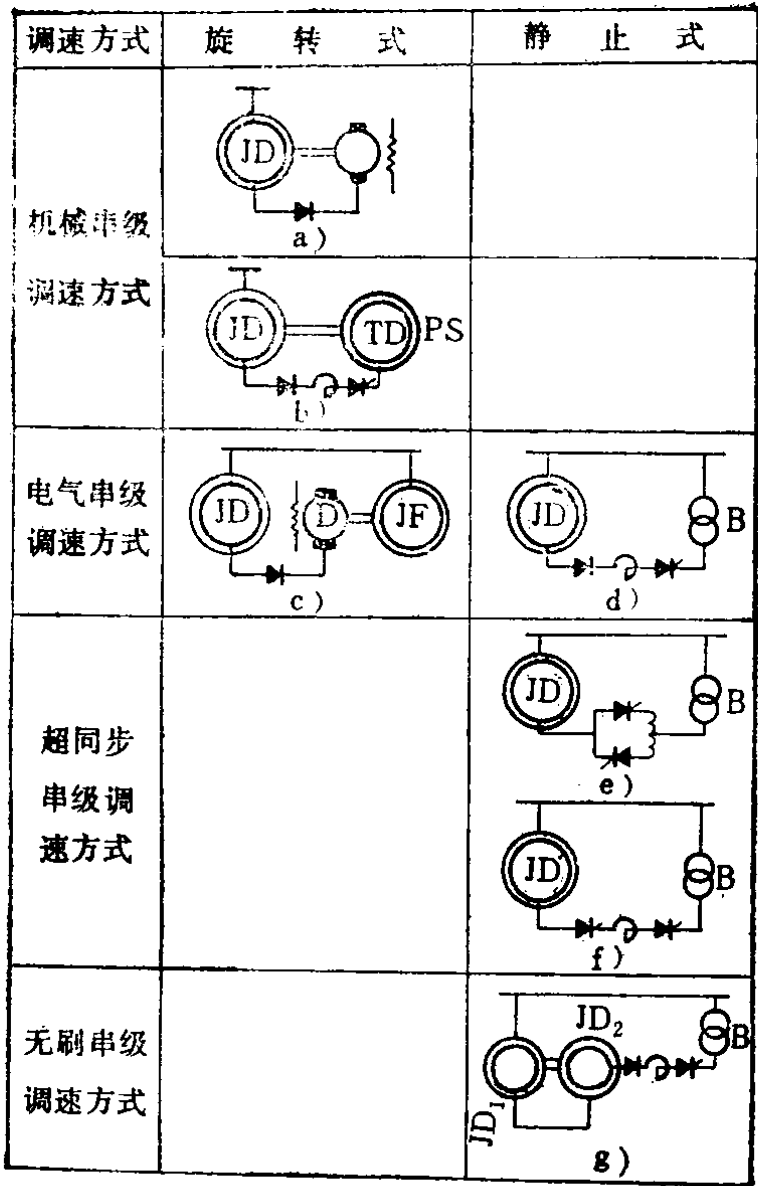


图 2 各种串级调速系统

$$n = \frac{60f}{p_1 + p_2} (1 - s_1 s_2)$$

式中， p_1 、 p_2 、 s_1 、 s_2 分别表示两台电动机的极对数和转差率。

2. 变频调速 它是最有发展前途的一种交流调速方式，是交流调速的主干内容。变频调速方法花样繁多，从60年代初提出的麦克默雷（McMurray）电压型变频器开始，发展到电流型、脉宽调制（PWM）型及周波变流器。前者为交-直-交（间接式）变频器，后者为交-交（直接式）变频器。它们正向着高性能、高精度、大容量、微型化及理想化方向发展，并不断出现新的控制结构