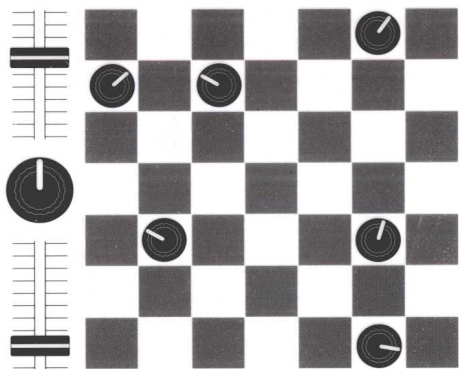
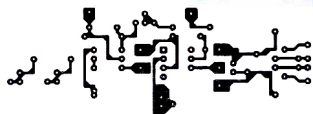


变频器应用
技术丛书



电气传动 与变频技术

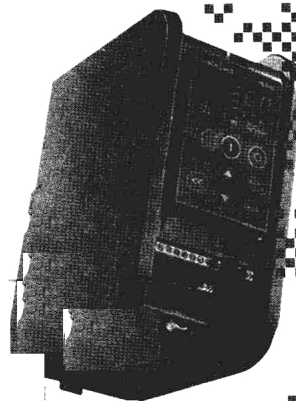
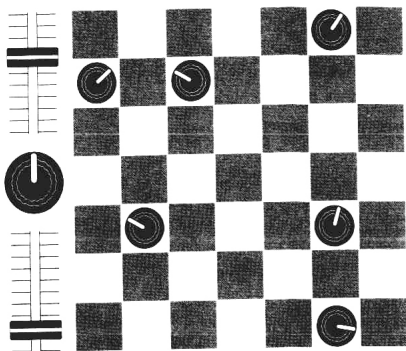


孙鹤旭 董砚 郑易 编著



化学工业出版社

变频器应用
技术丛书



电气传动 与变频技术



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是《变频器应用技术丛书》中的一本,针对工程技术人员在变频器应用过程中涉及的理论和技术问题,系统地论述了电机理论、电力电子技术、检测技术以及变频器应用的控制策略等方面的内容,以加深技术人员对变频器技术难点的理解和掌握,并在书中增加了交流步进控制这一新的传动理论。本书主要内容包括电气传动有关的基础知识、变频器中的电力电子技术、电气传动中的检测技术、直流电机的调速控制技术、交流电机的 U/f 控制、交流电机的转差频率控制、高动态性能的矢量控制和直接转矩控制、交流步进传动控制。

本书内容丰富,注重实用,可供工矿企业、科研院所等从事变频器应用的电气人员阅读及作为培训教材使用,也可作为相关职业技术学院的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动与变频技术/孙鹤旭,董砚,郑易编著. —北京:
化学工业出版社, 2010.10
(变频器应用技术丛书)
ISBN 978-7-122-09327-1

I. 电… II. ①孙…②董…③郑… III. ①电力传动
②变频调速 IV. ①TM921②TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 159122 号

责任编辑: 宋 辉
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
850mm×1168mm 1/32 印张 12 $\frac{1}{4}$ 字数 343 千字
2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前言



电力电子与电力传动技术的突出特点是可实现系统的高效、节能、省材，已成为我国国民经济的重要基础技术，对现代科学、工业和国防都具有重要支撑作用。在诸多高技术应用领域，各种传统产业，乃至照明、家电等与人民生活密切相关的应用领域，电力电子产品已无所不在。这就决定了在今后相当长的一段时期内，我国国民经济的发展和巨大的用户对电力电子与电力传动应用技术具有巨大的、持久的需求。当前，我国电力电子与电力传动技术的发展与应用进入了一个重要时期，我国电力电子和电力传动产业正面临着良好的机遇和严峻的挑战。

国家中长期科学和技术发展规划纲要提出我国全面建设小康社会，构建资源节约型、环境友好型和谐社会，其中明确了“自主创新，重点跨越，支撑发展，引领未来”的指导方针。我国与其他国家一样，电力电子与电力传动技术已日益广泛地渗透到能源、环境、航空航天、先进制造业、交通运输业、国防等许多重要领域。要达到我国政府提出的“十一·五”时期“单位国内生产总值能源消耗降低 20% 左右”的目标，绝非易事。由于大型电机采用调速控制方式后的节能效果十分明显并已经得到大部分工矿企业的认同，因此，电力电子与电力传动技术应用于节能和工艺改进的市场前景十分广阔。

变频调速技术是当今节电、改善工艺流程以提高产品质量和改善环境、推动技术进步的一种主要手段。随着电力电子技术、微电子技术、信息技术和现代控制理论在调速系统中的应用，变频调速已逐渐取代过去的滑差调速、变极调速、定子调速、串级调速及直流电机调速等调速方式，在工业生产中获得广泛的应用，被国内外

公认为最有发展前途的调速方式。随着节能产品之一的变频调速产品在电气、机械、化工等各行业得到广泛应用，变频器产业被称为绿色朝阳产业，一经问世便引起了国内外电气传动界的普遍关注，显现出广阔的市场前景。

从 20 世纪 80 年代变频器引入中国，经过不断地推广和使用，变频器已经得到广大企业用户的认可，目前在市场上有近百个品牌，上千个系列。但是，由于大多变频器采用的原理不同，可设置功能和参数众多，不同公司的产品各有特点，且变频器说明书中对于产品各种功能的解释过于简单、专业化，描述有时不够准确，加之一些进口变频器的说明书在翻译上存在诸如名词术语不规范的问题，常常给用户们带来许多不便，使变频器在生产中并没有更好地发挥作用。随着变频器的应用日益广泛，了解变频器的基本原理，正确合理使用变频器，使采用变频器的传动系统达到最佳的性能指标，以及进行正确的维护使变频器安全稳定地运行，这些都对生产第一线的技术人员提出了更高的要求。

正是在这一背景下我们编写了《变频器应用技术丛书》，包括《电气传动与变频技术》、《变频器的使用与维护》、《变频器应用实践》三个分册。这套丛书力求通俗易懂和结合实际，在介绍电气传动与变频技术原理的基础上，选择了在国内变频器市场中所占份额较大的几种具有代表性的品牌产品，介绍了变频器的选型、安装、功能设置、日常维护和电磁兼容性等方面的内容，并介绍了变频器在不同行业的应用，目的是使工程技术人员更好地了解、使用和维护变频器，使变频器在生产过程中发挥出最优的作用。

本套《变频器应用技术丛书》受到国家 863 计划重点项目“基于变频控制技术的智能电动执行器”的资助（课题编号为：2006AA040306）。

本书是《电气传动与变频技术》，针对工程技术人员在变频器应用过程中涉及的理论和技术问题，系统地论述了电机理论、电力电子技术、检测技术，以及变频器应用的控制策略等内容，以加深技术人员对变频器技术难点的理解和掌握，并在书中增加了交流步进控制这一新的传动理论。本书主要内容包括与电气传动有关的基

基础知识、变频器中的电力电子技术、电气传动中的检测技术、直流电机的调速控制技术、交流电机的 U/f 控制、交流电机的转差频率控制、高动态性能的矢量控制和直接转矩控制、交流步进传动控制。本书内容丰富，注重实用，可供工矿企业、科研院所等从事变频器应用的电气人员阅读及作为培训教材，也可作为相关职业技术学院的教材和参考书。

本书由孙鹤旭、董砚、郑易编著，参加编写的人员还有高洁、雷兆明、梁涛、何林、李洁。

限于编者的水平和经验，加之时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者指正。

孙鹤旭

目 录



第 1 章 电力传动的基础

1

1.1 直流电机	2
1.1.1 直流电机的结构和基本运行原理	2
1.1.2 直流电机的铭牌数据	5
1.1.3 直流电机的电枢绕组	5
1.1.4 直流电机的励磁方式及磁场	8
1.1.5 电枢电动势与电磁转矩	12
1.2 交流电机	13
1.2.1 交流电机的结构	14
1.2.2 交流电机工作原理	16
1.2.3 三相异步电机的铭牌数据	18
1.2.4 交流电机绕组及旋转磁场的建立	19
1.2.5 交流电机的感应电动势	29
1.2.6 异步电动机运行的电磁过程	33
1.3 电力传动系统	42
1.3.1 电力传动系统运动方程式	42
1.3.2 常见的负载转矩特性	44
1.3.3 电力拖动系统稳定运行的条件	46
1.3.4 电力拖动系统的运行状态分析	48
1.4 电气传动中的检测技术	52
1.4.1 速度、位置检测技术	52
1.4.2 电流检测技术	63
1.4.3 电压检测技术	68

2.1 常用电力电子器件	74
2.1.1 电力二极管	74
2.1.2 晶闸管	81
2.1.3 电力场效应晶体管	88
2.1.4 绝缘栅双极型晶体管	92
2.1.5 智能功率模块	97
2.2 直流斩波电路	98
2.2.1 直流降压斩波	98
2.2.2 直流升压斩波	101
2.2.3 可逆斩波电路	105
2.3 逆变电路	107
2.3.1 电压型逆变电路	109
2.3.2 电流型逆变电路	112
2.3.3 电压型逆变电路和电流型逆变电路的 对比	120
2.4 变频器的 PWM 控制技术	122
2.4.1 PWM 控制的基本原理	122
2.4.2 三相变频器的 SPWM 控制技术	123
2.4.3 三相变频器电流跟踪控制技术	126
2.4.4 三相变频器磁链跟踪控制技术	131

3.1 调速原理及性能指标	144
3.1.1 直流机调速的基本原理	144
3.1.2 调速性能指标	145
3.1.3 开环调速系统的性能及存在问题	150
3.2 调速系统的各环节的数学模型	151
3.2.1 可控直流电源的数学模型	151
3.2.2 直流电机的数学模型	154

3.2.3	调节器的数学模型	155
3.3	转速电流双闭环直流调速系统	156
3.3.1	双闭环调速系统的组成	156
3.3.2	电流环的设计	158
3.3.3	转速环的设计	167
3.3.4	双闭环调速系统静态分析	176
3.3.5	双闭环直流调速系统动态性能分析	179
3.3.6	弱磁控制的直流调速系统	184
3.4	直流 PWM 可逆调速系统	188
3.4.1	直流 PWM 可逆调速系统组成	189
3.4.2	H 桥逆变电路工作原理	190
3.4.3	直流脉宽调速系统的机械特性	193
3.5	全数字直流调速系统举例说明	194
3.5.1	无环流可逆调速系统工作原理	194
3.5.2	西门子 6RA70 系统组成	198
3.5.3	系统运行与优化	202

第 4 章 交流电机的开环 U/f 控制和闭环转差频率控制 (207)

4.1	变压变频调速原理	208
4.1.1	变压变频的基本控制方式	208
4.1.2	恒压频比 U_1/f_1 控制方式	209
4.1.3	恒气隙磁链 E_1/f_1 控制方式	212
4.1.4	恒 E_r/f_1 控制	214
4.1.5	恒功率控制方式	216
4.2	开环 U/f 控制系统	217
4.2.1	U/f 控制系统结构	217
4.2.2	变压变频装置	219
4.2.3	加减速过程	223
4.2.4	U_1/f_1 曲线及电压补偿	229
4.3	闭环转差频率控制技术	234
4.3.1	转差频率控制的基本概念	234

4.3.2	转差频率控制的规律及其实现	235
4.3.3	转差频率控制的变压变频调速系统 结构	237
4.3.4	转差频率控制的变压变频调速系统工况 分析	239
4.4	开环 U/f 控制和闭环转差频率控制性能 分析	243
4.4.1	U/f 控制技术性能分析	243
4.4.2	闭环转差频率控制性能分析	243

第5章 高动态性能的矢量控制

247

5.1	异步电动机的动态数学模型和坐标变换	248
5.1.1	动态数学模型	248
5.1.2	坐标变换	256
5.1.3	两相坐标系下的状态方程	266
5.2	矢量控制技术	274
5.2.1	矢量控制技术的概念及发展	274
5.2.2	矢量控制的基本思想	276
5.2.3	按转子磁链定向的矢量控制方程及其解耦 作用	277
5.3	矢量控制变频调速系统	281
5.3.1	直接矢量控制系统	281
5.3.2	间接矢量控制系统	291
5.4	无速度传感器矢量控制系统	292
5.4.1	有速度传感器矢量控制系统存在的 问题	294
5.4.2	无速度传感器矢量控制的速度观测	294
5.4.3	典型无速度传感器矢量控制	295
5.5	矢量控制控制技术性能分析	296
5.5.1	技术优势	297
5.5.2	不足之处	297

5.5.3 改进方案	298
------------------	-----

第6章 高动态性能的直接转矩控制

299

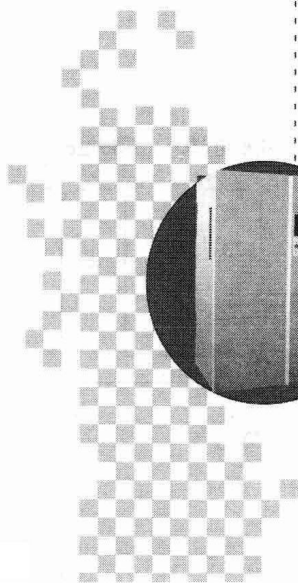
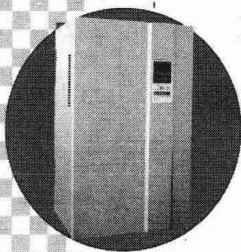
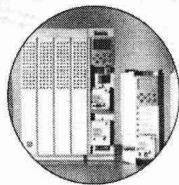
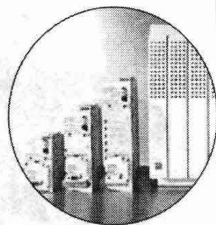
6.1 直接转矩控制技术	300
6.1.1 直接转矩控制技术的诞生与发展概况	300
6.1.2 定子磁链定向时的异步电机模型	301
6.2 直接转矩控制系统的原理及结构	309
6.2.1 直接转矩控制原理分析	309
6.2.2 定子磁链定向时磁链、转矩与离散电压的 矢量关系	312
6.2.3 直接转矩控制系统结构	317
6.2.4 控制单元	320
6.3 直接转矩控制技术性能分析	330
6.3.1 技术优势	330
6.3.2 不足之处	331
6.3.3 改进方案	332
6.3.4 矢量控制与直接转矩控制特性的比较	334

第7章 交流步进传动控制系统

337

7.1 交流步进传动技术	338
7.1.1 增量运动控制中的电动机	338
7.1.2 增量运动的交流控制	343
7.1.3 直接转矩控制到步进传动的过渡	345
7.2 永磁同步电机定子电流定向的增量运动 控制	346
7.2.1 定子电流定向控制的理论基础	346
7.2.2 永磁同步电机的位置开环控制	351
7.2.3 永磁同步电机的位置闭环控制	356
7.2.4 永磁同步电机增量运动控制的位置及速度 响应	359
7.3 开关磁阻电机的步进传动控制系统	362

第1章 电力传动的基础





1.1 直流电机

直流电动机是指通以直流电流而转动的电动机，是电机的主要类型之一。由于直流电机能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度，所以在轧机、精密机床和以蓄电池为电源的小型起重运输机械等设备中应用较多；在机器人等领域，小容量直流电机的应用亦很广泛。相比于交流电机，直流电机结构较复杂，成本较高，维护不便，尤其因为换向问题，使得它的发展和应用受到限制。近年来出现了交流调速系统在许多部门取代直流调速系统的情况。尽管如此，因为直流调速技术比较成熟，迄今为止其应用仍然很多。

1.1.1 直流电机的结构和基本运行原理

(1) 直流电机的主要结构

直流电机主要由定子（静止部分）和转子（转动部分）以及对转子起支撑作用的端盖组成，如图 1-1 所示。定子主要包括机座和固定在机座内圆表面的主磁极两部分。主磁极的作用是用来产生磁场，机座既是主磁路的一部分，也作为电机的机械支撑。去掉机座和端盖，可清楚地看到主磁极和转子等实现能量转换的主要部件，如图 1-2 所示。

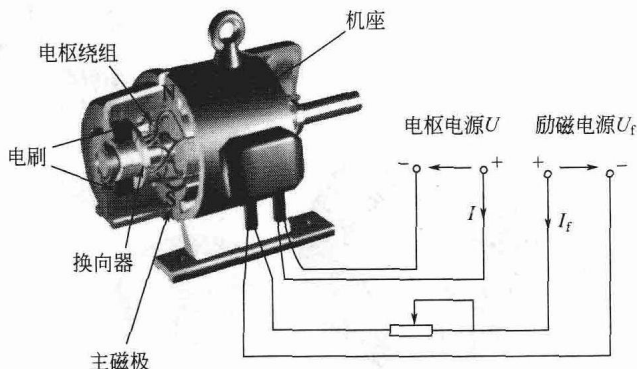


图 1-1 直流电机结构简图

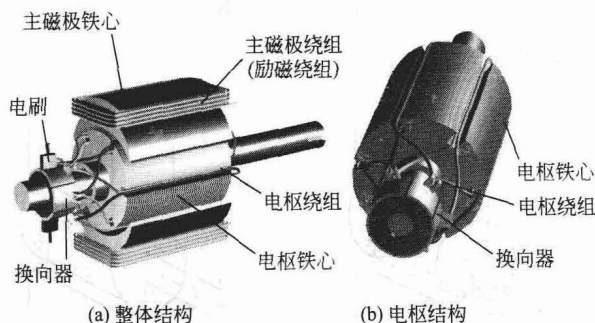


图 1-2 直流电机的内部机构

在图 1-2 中，电机有两个主磁极，主磁极上嵌有励磁绕组。绝大部分直流电机都是由励磁绕组通以直流电流来建立主磁场。只有小功率直流电机的主磁极才用永久磁铁，这种电机被称为永磁直流电机。在两个主磁极内表面之间，有一个由硅钢片叠成的圆柱体，称为电枢铁心。电枢铁心与主磁极之间的间隙称为气隙。电枢铁心表面的槽内嵌入的每个线圈的首末端分别连接到两片相邻且相互绝缘的圆弧形铜片（即换向片）上，与一个线圈末端相连的换向片同时与下一个线圈的首端连接，于是，各线圈通过换向片连接起来构成电枢绕组。各换向片固定于转轴上且与转轴绝缘。这种由换向片构成的整体称为换向器。与换向器滑动接触的电刷将电枢绕组和外电路接通，实现直流电机与外部电路之间的能量传递。直流电机工作时，电枢绕组切割气隙磁场而产生感应电动势，因而实现能量转换。

(2) 直流电机的工作原理

为说明直流电机的工作原理，首先分析一下必须加换向器和电刷的理由。这里为简化电机模型，以电枢绕组由一个线圈组成为例，如图 1-3 所示。构成线圈的两个导体分别为 ab 和 cd ，如果将直流电压直接加到线圈上， ab 导体内为电流流入， cd 中电流流出，此时 ab 位于 N 极， cd 导体位于 S 极。根据电磁力定律，通电导体在磁场中将受到电磁力的作用 $f = BIl$ ，方向如图 1-3(a) 所示，则线圈上产生的电磁转矩为



$$T_{ab-cd} = 2BilR \quad (1-1)$$

式中, R 为电枢的半径。

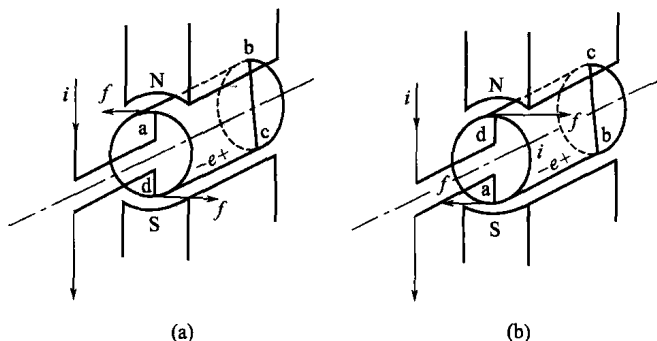


图 1-3 无换向器和电刷的电机简化模型

线圈在电磁转矩作用下, 沿逆时针方向旋转。一旦 ab 绕组转到 S 极, cd 绕组在 N 极, 根据左手定则, 可判断出电磁力的方向与原来相反, 如图 1-3(b) 所示。因此, 若线圈中的电流方向始终不变, 即 ab 中电流始终为流入, cd 导体电流始终为流出, 则产生的电磁转矩 T_{XA} 将是交变的, 时而顺时针方向, 时而逆时针方向, 无法使电枢持续旋转。

为实现电机的连续旋转, 必须加设换向器和电刷, 以保证同一磁极下电磁转矩方向不变, 其工作原理如下:

图 1-4 为有换向器和电刷的电机简化模型, 线圈的两端分别与两个相互绝缘的导电半圆环连接, 此时, 外加电源并非直接加于线圈而是通过电刷 A 、 B 引入, 这里假设电流从正电刷 A 流入, 而由负电刷 B 流出。因为电刷静止不动, 电流 i 总是从正极性电刷 A 流入, 经过 N 极下的导体、 S 极下的导体, 由负极性电刷 B 流出。故当导体交替地处于 N 极和 S 极下时, 导体中的电流将随其所处磁极极性的改变而同时改变其方向, 从而使电磁转矩的方向始终保持不变, 并使电动机持续旋转。此时换向器起到将外电路的直流改变为线圈内的交流的“逆变”作用。这就是直流电动机的工作原理。

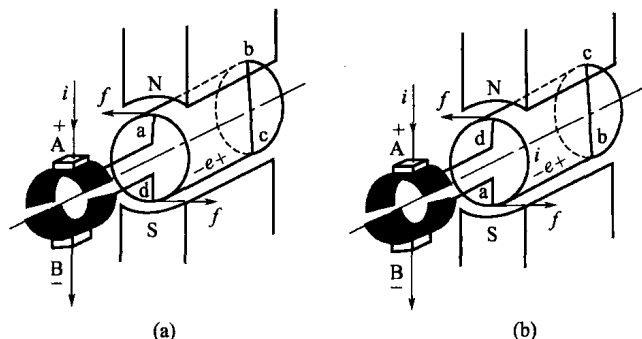


图 1-4 有换向器和电刷的电机简化模型

1.1.2 直流电机的铭牌数据

根据国家标准，直流电机的额定数据有：

- 额定电压 U_N (V)——在正负电刷间测得的电枢电压；
- 额定电流 I_N (A)——流过电枢回路的总电流；
- 额定转速 n_N (r/min)——输出额定功率时电机轴的转速；
- 额定容量 P_N (kW)——对电动机，额定功率是电机转轴上的

的机械功率： $P_N = U_N I_N \eta_N$ ；

- 励磁方式和额定励磁电流 I_f (A)——指电机在额定状态时的励磁电流值；

- 电机的效率 η_N ——如果输入功率为 P_1 ，则电机效率的定义为 $\eta_N = P_N / P_1$ 。

直流电机运行时，如果各个物理量都是额定值，这种运行状态称为额定运行状态。电机铭牌上标出的上述物理量的值均为额定值。

1.1.3 直流电机的电枢绕组

1.1.1 节中以一个线圈为例说明了直流电机的工作原理，而在实际电机中，电枢表面均匀分布的槽内嵌放着许多线圈。这些线圈按一定规律连接起来，构成直流电机的电枢绕组。



(1) 线匝、线圈与绕组

构成绕组的基本单元是线圈，亦称元件。元件可以是单匝的，也可以是多匝的。它们之间的关系见图 1-5。元件镶嵌在转子槽内的部分切割气隙磁通而感应出电动势，是它的有效部分，称为元件边。嵌放在槽内上层的元件边为上层边，下层的为下层边。元件按一定规律连接起来，即构成绕组。

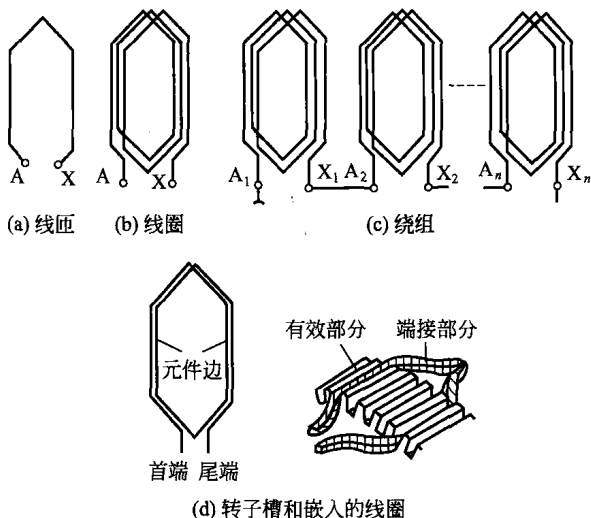


图 1-5 线匝、线圈和绕组

(2) 电枢绕组连接的基本方式

以 6 槽电枢绕组为例，介绍直流电枢绕组的连接方式。由图 1-6(a) 可以看出，上层边位于 1 号槽的元件，其首端接到 1 号换向片上，称为 1 号元件。1 号元件的尾端接到 2 号换向片上，而 2 号换向片又与 2 号元件的首端相连接。以此类推，最后，6 号元件的首端与 5 号元件的尾端相连，而尾端与 1 号元件的首端连接。于是，全部 6 个元件通过换向片依次串联最后构成一个闭合回路，如图 1-6(b) 所示，其简化的示意图则为图 1-6(d)。图 1-6(c) 与 (e) 是在换向器的两个对称位置各设置一个电刷后的绕组连接示意图，而图 1-6(f) 则是更简化的示意图。可以看出，装上一对电刷后，绕组就具有了两条并联支路。