

# 感应电动机

## 变频调速技术及其 节能应用

© 蒋志坚 编著

GANYING DIANDONGJI  
BIANPIN TIAOSU JISHU JIQI JIENENG YINGYONG



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 感应电动机变频调速技术 及其节能应用

蒋志坚 编著



机械工业出版社

交流电动机调速与节能技术是 20 世纪发展并趋于成熟的应用科学技术, 尤以感应电动机变频调速及其节能技术应用广泛。本书第 1~4 章介绍比较成熟的感应电动机变频调速基础理论。内容主要包括: 感应电动机的基本结构和工作原理, 感应电动机变频调速基础, 感应电动机调速节能原理, 感应电动机稳态分析, 感应电动机动态分析, 感应电动机变频调速器的主要类型与基本构成, 电压型逆变器 PWM 控制与空间磁链圆形轨迹控制等。本书第 5~10 章介绍作者及相关科研团队多年来在感应电动机变频调速与节能领域的研究成果。内容主要包括: 感应电动机定子磁链的观测及观测过程中的定子电阻补偿, 变频器功率开关死区补偿方法研究, 低成本四开关三相逆变桥研究, 直流母线电压的稳定与电容的均衡分压, 低成本变频器的功率因数校正与谐波抑制, 低成本变频调速闭环控制构成等专题研究。

本书为感应电动机变频调速及其节能技术的理论探讨与工程应用提供了比较详细的研究实例, 可作为高等院校相关专业的参考教材, 供不同类型院校师生参考, 或作为相关专业的硕士和博士研究生的科研参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

感应电动机变频调速技术及其节能应用/蒋志坚编著. —北京: 机械工业出版社, 2014. 11  
ISBN 978-7-111-48119-5

I. ①感… II. ①蒋… III. ①电动机—变频调速 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226169 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 于苏华 责任编辑: 于苏华  
版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英  
封面设计: 张 静 责任印制: 刘 岚  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷  
2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm×260mm·11 印张·264 千字  
标准书号: ISBN 978-7-111-48119-5  
定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心 : (010)88361066

教材网 : <http://www.cmpedu.com>

销售一部 : (010)68326294

机工官网 : <http://www.cmpbook.com>

销售二部 : (010)88379649

机工官博 : <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线 : (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

交流电动机调速与节能技术是 20 世纪发展并趋于成熟的应用科学技术，尤以感应电动机变频调速及其节能技术应用广泛。本书是一本科研专著。第 1~4 章介绍比较成熟的感应电动机变频调速基础理论。内容包括：感应电动机的基本结构和工作原理、变频调速基础、调速节能原理，感应电动机的稳态分析、动态分析，以及感应电动机变频调速器的主要类型与基本构成、电压型逆变器 PWM 控制与空间磁链圆形轨迹控制等。第 5~10 章主要介绍作者及相关科研团队多年来在感应电动机变频调速与节能领域的研究成果。内容包括：感应电动机定子磁链的观测及观测过程中的定子电阻补偿，变频器功率开关死区补偿方法研究，低成本四开关三相逆变桥研究，直流母线电压的稳定与电容的均衡分压，低成本变频器的功率因数校正与谐波抑制，低成本变频调速闭环控制构成等。

本书对以下在变频调速技术应用过程中产生的专题研究进行了深入的探讨：

关于感应电动机定子磁链的观测问题，书中在详细分析  $u-i$  模型中普遍应用的纯积分器、低通滤波器以及带饱和反馈环节的积分器等方案的基础上，提出了一种基于坐标变换的阈值可自适应调整的双积分器检测方法，该方法在积分器输入信号存在直流偏移的情况下失真很小，仿真和实验波形都证明了该方法的可行性与合理性。关于感应电动机定子磁链观测过程中的定子电阻补偿问题，书中提出了一种基于模糊控制器的定子电阻补偿方法，并与传统的 PID 调节器方法比较，证明了模糊控制器具有更好的补偿效果，其定子电阻估计结果的振荡更小、更接近于真值，定子电阻补偿后定子磁链幅值的检测误差明显减小。

采用 PWM 技术的变频调速器广泛地应用在交流电动机调速系统中，但无论采用何种 PWM 控制算法，都发现其应用效果往往不如预期理想，其重要原因之一是 PWM 控制主电路中的功率开关本身不是理想开关。为保证同一桥臂上、下两功率开关器件之间切换开关状态时不发生直通而造成电源短路的严重故障，必须在功率开关器件的驱动信号中设置一段死区时间，形成所谓死区效应。书中研究了死区效应对逆变器输出的基波电压、谐波电压、输出转矩的影响，仿真分析了功率因数角、载波频率、死区时间、电压调制比等参数与死区效应之间的关系，找到了克服死区效应的补偿方法。该方法利用高速数字处理器 ADMCF328 提供的双脉冲更新方式以及该器件先进的脉冲控制技术，配合对相电流过零点的精确判断，使死区补偿更加准确，取得了较好的控制效果。

近年来，低成本、低谐波、低功率、高功率因数的单相-三相感应电动机变频调速技术得到广泛的开发应用，书中针对实际需求进行了相应的研究工作。由于小功率变频调速器低成本化的主要途径之一在于使用较少的功率开关器件，因此研究重点是变频器主电路拓扑结构的简化及其优化控制。

在逆变桥部分，综合分析对比表明，降低成本理想的选择是四开关三相逆变桥。书

中利用磁链轨迹控制法对其进行了详尽的分析，总结了八个可能的电压控制矢量，证明了其中四个矢量  $U_{0^\circ}$ 、 $U_{180^\circ}$ 、 $U_{90^\circ}$  和  $U_{270^\circ}$  可作为四开关三相逆变桥进行感应电动机磁链轨迹控制的基本电压控制矢量，而一般情况下，另外四个矢量只在逆变桥的低频工作区有可能加以利用。由于四开关三相逆变桥没有零电压控制矢量，因此控制电机磁链轨迹时，时间调整会遇到困难。为了解决这一问题，书中提出了磁链轨迹回扫延时的概念，并给出了简化的在线控制算法。

研究表明，四个基本电压控制矢量的幅值不相等，当矢量  $U_{0^\circ}$  和  $U_{180^\circ}$  的幅值为  $E$  时，矢量  $U_{90^\circ}$  和  $U_{270^\circ}$  的幅值却为  $\sqrt{3}E$ ，因此，控制时必须遵循控制时间与控制矢量幅值比例等效变换的原则。分析表明，由于  $U_{0^\circ}$ 、 $U_{180^\circ}$  这组矢量与  $U_{90^\circ}$ 、 $U_{270^\circ}$  这组矢量控制轴线相互垂直，控制这两组矢量可产生类似于两相电动机的相互垂直的磁场，因此，四开关三相逆变桥也类似于具有垂直磁场控制的两相电动机驱动器。

书中针对低成本逆变器直流母线电压分配不均衡问题参考了相关文献，研究了不均衡放电校正法，发现其存在的不足之处，相应提出了新的不均衡充电解决方案。事实证明，不均衡充电法优于不均衡放电法，而把两种方法结合使用则效果更佳，再配合闭环控制，即可实现母线电压的稳定与快速均衡分配。

在整流-功率因数校正 (PFC) 部分，书中探讨了低成本变频器的功率因数校正和谐波治理问题，考虑到使用廉价可靠的标准六开关 IPM 模块和充分利用四开关三相逆变桥节省的功率开关，重点研究了 A 型和 B 型两种低成本变频器主电路方案。A 型主电路采用半桥倍压整流，性能价格比高，但其应用在国内，由于单相电压的有效值为 220V，是欧美电压的 2 倍，因此直流母线电压过高。为此，书中提出了 B 型主电路方案，使直流母线电压降为 A 型电路的一半。书中还详尽分析了 A 型、B 型电路实现 PFC 功能的基本工作原理，分析了造成直流母线电压不平衡与不稳定的原因，进行了稳态分析和参数计算。

在研究低成本变频调速器的闭环控制技术方面，书中将所构成的闭环控制系统以直流母线为界分为前后两部分，前端部分是三闭环直流母线电压稳定与均衡分配控制系统，后端部分是基于简化改进的感应电动机矢量变换闭环控制系统。由于开环控制的磁链轨迹控制法与闭环控制的矢量变换控制法都以气隙磁链作为控制的纽带，因此闭环控制采用矢量变换控制法是合理的。但由于原有的感应电动机矢量变换控制法采用检测电信号  $\leftrightarrow$  控制电信号的技术路线，控制过程以气隙磁链为中介，涉及繁杂的信号变换运算，因此书中提出了改进的简化控制方案：检测电信号  $\leftrightarrow$  控制磁信号。因为该方案是直接控制气隙磁链，所以可大为简化矢量变换的控制流程。

以上内容多为作者及相关科研团队多年来在感应电动机变频调速与节能领域的研究成果，其不仅包含理论研究，而且大都搭建了硬件与软件试验平台，并由相应的试验结果及其仿真分析验证了理论的合理性与正确性。相信这些成果对广大学生和科技工作者会有所助益。

蒋志坚



# 目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 感应电动机的基本结构和工作原理	1
1.2 感应电动机变频调速基础	5
1.3 感应电动机调速节能原理	10
1.4 感应电动机调速方法比较	14
1.5 感应电动机变频调速节能应用现状	15
第 2 章 感应电动机稳态分析	20
2.1 感应电动机运行的电磁过程	20
2.2 感应电动机的稳态分析等效电路	21
2.3 感应电动机的功率和转矩	26
2.4 感应电动机等效电路参数的测量	27
2.5 感应电动机的机械特性	30
2.6 感应电动机的运转状态与控制	34
第 3 章 感应电动机动态分析	38
3.1 三相交流感应电动机电压方程	38
3.2 坐标变换	39
3.3 三相交流坐标系到两相交流坐标系的变换	40
3.4 两相交流变量电压方程	41
3.5 两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换	42
3.6 两相交流静止坐标系电压方程	43
3.7 两轴直流旋转坐标系电压方程	44
3.8 T 形等效电路与转矩方程	45
3.9 感应电动机的状态方程	46
3.10 感应电动机动态方程	51
3.11 两相坐标系中感应电动机的动态数学模型	54
第 4 章 感应电动机变频调速器	57
4.1 变频调速器的主要类型	57
4.2 三相电压型逆变器的基本构成	60
4.3 电压型逆变器 PWM 控制	61
4.4 电压型逆变器空间磁链圆形轨迹控制	69
4.5 跟踪希望波形的 PWM 技术	74
4.6 优化 PWM 技术	77
4.7 桥臂器件开关死区对 PWM 变频 变频器工作的影响	78
第 5 章 感应电动机定子磁链的观测	81
5.1 问题	81
5.2 定子磁链的主要观测方法	82
5.3 改进积分器在磁链观测中的应用	83
5.4 定子电阻的补偿问题	88
5.5 定子电阻的补偿方法	91
5.6 定子电阻补偿 PID 控制器的构造	94
5.7 定子电阻补偿模糊控制器的构造	95
第 6 章 变频器功率开关死区补偿方法研究	98
6.1 问题	98
6.2 功率开关死区时间的设定	98
6.3 死区时间对逆变器输出电压基波的影响	100
6.4 死区时间对逆变器输出电压谐波的影响	103
6.5 死区时间对逆变器输出转矩的影响	104
6.6 采用数字脉宽调制方式实现死区时间补偿	104
6.7 死区补偿过程中电流过零点的检测	108
第 7 章 低成本四开关三相逆变桥研究	111
7.1 问题	111
7.2 四开关三相逆变桥的工作原理分析	111
7.3 感应电动机的磁链轨迹控制	115

7.4	四开关三相逆变桥基本电压控制 矢量 .....	116	9.3	A型低成本变频器的PFC功能 研究 .....	141
7.5	四开关三相逆变桥磁链轨迹改进 控制 .....	119	9.4	A型变频器的整流-PFC环节的稳态 分析和参数计算 .....	143
7.6	磁链轨迹改进控制软件编程算法 .....	121	9.5	B型低成本变频器PFC功能的研究 及其改进 .....	146
7.7	四开关三相逆变桥开环运行实验 .....	124	9.6	B型变频器主电路整流-PFC环节的 分析与计算 .....	147
<b>第8章 直流母线电压的稳定与电容的 均衡分压 .....</b>			<b>第10章 低成本变频调速闭环控制 构成 .....</b>		
8.1	引言 .....	126	10.1	引言 .....	151
8.2	直流母线电容分压不均衡的原因 .....	126	10.2	感应电动机矢量变换控制 .....	151
8.3	不均衡放电法 .....	129	10.3	低成本变频器应用矢量变换控制 .....	153
8.4	不均衡充电法 .....	131	10.4	基于磁链轨迹控制的矢量变换 流程 .....	156
8.5	不均衡放电法与不均衡充电法的 结合 .....	132	10.5	闭环控制系统的构成与软件 设计 .....	158
8.6	直流母线电压的闭环控制 .....	132	10.6	闭环控制系统的硬件设计 .....	160
8.7	仿真与试验 .....	134	10.7	闭环控制系统实验 .....	163
<b>第9章 低成本变频器的功率因数 校正与谐波抑制 .....</b>			<b>参考文献 .....</b>		
9.1	引言 .....	138	166		
9.2	具有PFC环节的低成本变频器拓扑 结构研究 .....	140			

# 第 1 章 概 述

## 1.1 感应电动机的基本结构和工作原理

### 1. 感应电动机的基本结构

类似于所有电动机，感应电动机主要由静止的定子和转动的转子两大部分组成，但其不同于其他种类电机的特点是：定子与转子之间的气隙很小。图 1-1 所示为感应电动机的基本结构。

(1) 定子 感应电动机的定子主要由定子铁心、定子绕组和机座三部分组成。为使感应电动机产生较大的电磁转矩，必须建立较强的旋转磁场，因此定子铁心由铁磁材料做成。定子铁心是感应电动机主磁通磁路的一部分，由于旋转磁场对定子铁心以同步转速旋转，在定子铁心中将引起

涡流损耗和磁滞损耗。为减少损耗，定子铁心一般由导磁性能较好的 0.5mm 厚且冲有一定槽型的硅钢片叠压而成，并在硅钢片两面涂以绝缘漆作为片间绝缘。定子铁心开槽用于嵌放绕组，槽型通常有半闭口槽、半开口槽及开口槽。

定子绕组是感应电动机的电路部分，它由许多线圈按一定规律连接而成。根据定子绕组在槽内布置的情况，有单层绕组及双层绕组两种基本形式。容量较大的感应电动机采用双层绕组。双层绕组在每槽内的导线分上下两层放置，上下层线圈边之间需要用层间绝缘隔开。小容量感应电动机常采用单层绕组。槽内定子绕组的导线用槽楔紧固。槽楔常用的材料是竹、胶木板或环氧玻璃布板等非磁性材料。

机座的作用主要是固定和支撑定子铁心。中小型感应电动机一般采用铸铁机座，并根据不同的冷却方式采用不同的机座形式。小型封闭式电动机，其损耗产生的热量通过机座散出，为了加强散热能力，在机座的外表面有很多均匀分布的散热筋，以增大散热面积。对于中大型感应电动机，一般采用钢板焊接的机座，冷却方式采用风冷或水冷等。

(2) 转子 感应电动机的转子主要由转子铁心、转子绕组和转轴组成。

转子铁心是主磁通磁路的一部分，一般由 0.5mm 厚冲槽的硅钢片叠成，固定在转轴或转子支架上。整个转子铁心的外表面为圆柱形。转子绕组分为笼型和绕线型两种结构，两种结构形式各有特点。

笼型绕组：由于感应电动机转子导体内的电流是由电磁感应作用而产生的，不需要外电源为转子绕组供电，因此转子绕组可自行闭合，绕组的相数也不必限定为三相。所以，

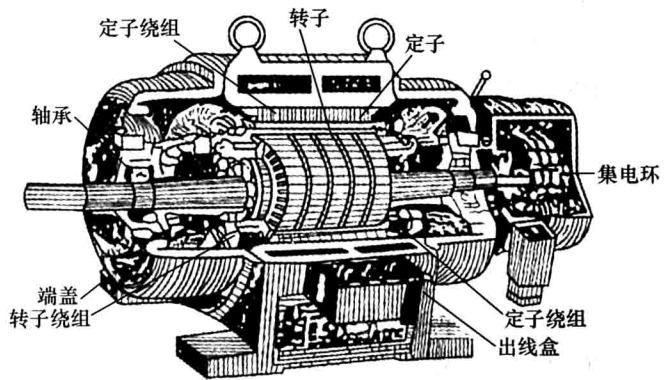


图 1-1 感应电动机的基本结构



笼型绕组的各相均由单根导条组成。感应电动机正常运行时，旋转磁场与转子导条的相对转速不大，所以导条中的感应电动势不大，如导条与铁心之间不加绝缘，由导条与铁心之间的接触电阻来限制导条间的漏电流也是可以的，一般无需用绝缘材料把导条与铁心隔开，这样的绕组工艺极为简单。笼型绕组可以由插入每个转子槽中的导条和两端的环形端环组成，如图 1-2 所示。如果去掉铁心，整个绕组的外形就像一个关松鼠的笼子，所以称为笼型转子。为了节约用铜并简化工艺，小容量笼型感应电动机大都采用一次性铸铝笼型转子，如图 1-3 所示。这种转子的导条和端环一次铸出，结构十分可靠牢固。对大容量电动机，则采用铜条插入转子槽内，在两端焊上端环，构成笼型绕组。笼型转子上既无集电环一般也无绝缘，结构简单、制造方便、运行可靠，即便在十分恶劣的工况下也能稳定运行。

绕线型绕组：与定子绕组一样，也是对称三相绕组结构，通常转子对称三相绕组接成星形，并接到转轴上的三个集电环上，通过专用电刷使转子绕组与外电路接通，如图 1-4 所示。绕线型绕组的特点是，通过集电环和电刷可以在转子回路中接入附加电阻或其他控制装置，人为改变电动机的性能。

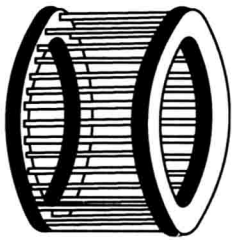


图 1-2 钢条笼型转子

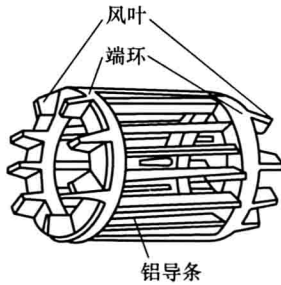


图 1-3 铸铝笼型转子

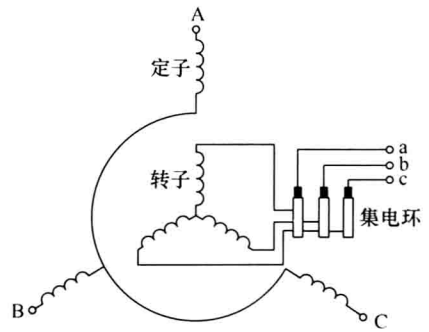


图 1-4 绕线转子感应电动机

(3) 感应电动机定、转子之间的气隙 感应电动机定子与转子之间的气隙很小是其显著特点，中小型电动机一般为 0.2 ~ 2mm。气隙的大小明显影响感应电动机的性能，气隙越大，磁阻越大。磁阻大产生同样大小的旋转磁场就需要较大的无功励磁电流，而无功电流的增大会使电机的功率因数变坏。但磁阻大的好处是可以减少气隙磁场中的谐波含量，从而可减少附加损耗，改善运行性能。电机设计总的要求是减小气隙，但气隙过小，会使装配困难和运转不安全，同时增加谐波。如何决定气隙大小，应根据技术要求全面考虑。

## 2. 感应电动机的工作原理

感应电动机的工作原理是通过旋转磁场与由该旋转磁场借助于电磁感应作用在转子绕组内所感生的电流相互作用，从而产生电磁转矩实现拖动机械负载运动。感应电动机实现机电能量转换的核心技术是如何采用电磁方法产生一种高速旋转的磁场。

(1) 旋转磁场的产生 旋转磁场是指极性和大小不变且以一定转速旋转的磁场。根据理论分析在对称多相绕组中流过对称多相电流时即会产生一种旋转磁场。假如三相绕组每相仅由一个线圈组成的，如图 1-5 所示，A-X、B-Y、C-Z 三个线圈空间彼此互隔 120°分布在定子铁心内圆的圆周上，构成了对称三相绕组。这个对称三相绕组在空间的位移是 B 相从 A

相后移  $120^\circ$ , C 相从 B 相后移  $120^\circ$ 。当对称三相绕组接上对称的三相电源时, 则在该绕组中通过对称三相电流, 如图 1-6 所示。

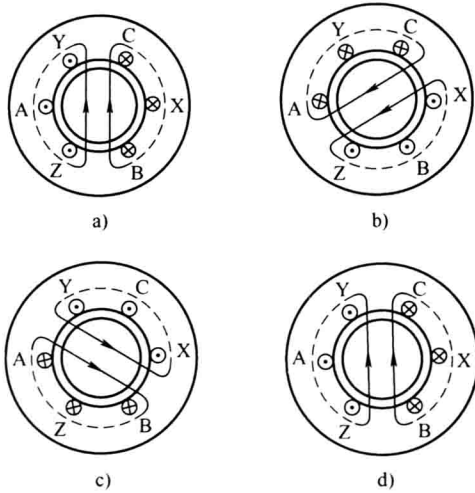


图 1-5 三相旋转磁场

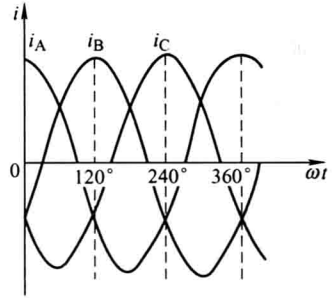


图 1-6 三相电流变化曲线

假如各相电流的瞬时表达式为

$$i_A = I_m \cos \omega t \quad (1-1)$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (1-2)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (1-3)$$

则可以通过几个特定的瞬间考察对称三相电流产生的旋转磁场效应。为此, 选择  $\omega t = 0 (t = 0)$ ,  $\omega t = 120^\circ (t = T/3)$ ,  $\omega t = 240^\circ (t = 2T/3)$ ,  $\omega t = 360^\circ (t = T)$  四个特定瞬间。图 1-5 中规定: 为正值时, 电流从每相线圈的首端 (A、B、C) 流出, 由线圈末端 (X、Y、Z) 流入; 为负值时, 电流从每相线圈末端流出, 由首端流入。用符号  $\odot$  表示电流从纸面流出,  $\otimes$  表示电流从纸面流入。在  $\omega t = 0 (t = 0)$  瞬间, 无论从电流瞬时表达式或电流变化曲线均可得出,  $\omega t = 0$  时,  $i_A = I_m$ ,  $i_B = i_C = -I_m/2$ 。将各相电流方向表示在各相线圈剖面图上, A 相电流为正值, 从 A 流出, 由 X 流入, 而 B、C 两相电流均为负值, 由 B、C 流入, 从 Y、Z 流出, 如图 1-5a 所示。从图看出, Y、A、Z 三个线圈边中的电流都从纸面流出, 且 Y、Z 边中的电流数值相等。根据右手螺旋定则, 可知该三个线圈中电流产生的合成磁场分布必以 A 边为中心, 左右反面对称, 磁回路通过转子时, 其方向为从下向上。同理, 可决定 B、X、C 三个线圈边中, 电流产生合成磁场的分布。从磁回路的图像看, 和一对磁极产生的磁场一样。用同样的方法可以画出  $\omega t = 120^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $360^\circ$  这三个特定瞬间的电流方向与磁场分布情况, 分别如图 1-5b、c、d 所示。依次观察图 1-5a ~ d 便会看出, 对称三相电流通入对称三相绕组以后所建立的合成磁场并不是静止不动的, 也不是方向交变的, 而是相似于一对磁极旋转产生的磁场, 且磁场大小不变。从瞬间  $\omega t = 0$  到  $\omega t = 120^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $360^\circ$ , 旋转的方向依据电流相序 A 相转向 B 相, 再转向 C 相, 即按 A → B → C 顺序旋转 (图中为逆时针方向)。可见, 当对称三相电流通入对称三相绕组时, 必然会产生一个大小不变、转速一定的旋转磁场, 且转向取决于电流的相序。

下面分析旋转磁场的转速。由图 1-5 和图 1-6 所示的电流变化情况与旋转磁场旋转情况可知，当三相电流随时间变化一个周期  $T$ ，旋转磁场在空间相应地转过  $360^\circ$ ，即电流变化一次时，旋转磁场转过一转。因为电流每秒钟变化  $f_1$  次（即频率数），则旋转磁场每秒钟转过  $f_1$  转。由此可知，在旋转磁场为一对极情况下，其转速  $n_s$  与交流电流频率的关系  $f_1$  为

$$n_s = f_1 \quad (1-4)$$

当电机磁场的极数变为四个，即具有两对磁极，则当电流变化一个周期时，旋转磁场仅转过  $1/2$  转。如果制造电机时，将绕组按一定规则排列得到 3 对、4 对以及  $p$  对磁极的旋转磁场，则旋转磁场的转速  $n_s$  与磁场极对数  $p$  的关系，可证明为反比关系。由于交流电源每秒钟变化  $f_1$  次，所以极对数为  $p$  的旋转磁场的转速为

$$n_s = \frac{f_1}{p}$$

式中， $n_s$  的单位为  $r/s$ 。

$$\text{或} \quad n_s = \frac{60f_1}{p} \quad (1-5)$$

式中， $n_s$  的单位为  $r/min$ 。

(2) 工作原理 典型的三相感应电动机定子铁心上嵌有对称三相绕组，在转子铁心上嵌有均匀分布的导条，导条两端分别用铜环连接成一个整体闭合电路。当对称三相绕组接到对称三相电源以后，即在定子、转子之间的气隙内建立了以同步转速  $n_s$  旋转的旋转磁场。转子上的导条被这种旋转磁场切割，根据电磁感应定律，转子导条内将会产生感应电动势。因为转子导条构成闭合回路，在感应电动势作用下转子导条中将有电流流动。导条在旋转磁场中，并载有感应电流，根据左手定则，导条将受到持续电磁力，电磁力的方向由左手定则决定。假如转子绕组连接合理，转子上所有导条受到的电磁力将形成同一个旋转方向的合成电磁转矩，在此作用下转子跟着旋转磁场方向旋转，其转速为  $n$ 。将转子与机械负载连接，则转子上受到的电磁转矩将克服负载转矩而做功，从而实现了机电能量的转换。

正常工况下，感应电动机的转速不可能达到旋转磁场的同步转速  $n_s$ ，而总是略小于  $n_s$ ，这是因为感应电动机转子导条上之所以受到电磁转矩的作用，其核心技术在于导条与旋转磁场之间存在一种相对运动而切割磁力线，进而在电磁感应作用下在导条中感生了电流，从而产生了电磁力。如果转子转速达到同步转速  $n_s$ ，则旋转磁场与转子导条之间的相对运动将消失，因而不可能在导条内感应产生电动势，也就不可能产生电磁转矩。因此，感应电动机的转子转速  $n$  总是略小于旋转磁场的同步转速  $n_s$ ，即电机转子实体与虚无的旋转磁场总是“异步”地转动，故感应电动机又称异步电动机。转速  $n_s$  与  $n$  之差称为“转差”，转差  $n_s - n$  的存在是感应电动机正常运行的必要条件。转差  $n_s - n$  与同步转速  $n_s$  之比的百分值称为转差率，用  $s$  表示，即

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

转差率是感应电动机的一个基本参数。正常工况下，感应电动机的转差率很小，空载转差率在 0.5% 以下，满载转差率在 5% 以下，显示感应电动机的机械特性很硬，运行的速度稳定性很好。

正常工况下, 感应电动机的转速不可能达到旋转磁场的同步转速  $n_s$ , 总是略小于  $n_s$ 。但假如借助外力拖动异步电机, 使它的转子实体转速超过同步转速, 即  $n > n_s$ ,  $s < 0$ , 这时旋转磁场切割转子导条的方向相反, 导条中的感应电动势与电流方向都反向。根据左手定则所决定的电磁力及电磁转矩方向也都与旋转磁场和转子的旋转方向相反, 电动机产生的电磁转矩变成制动性质的转矩, 感应电动机变成发电机, 处在发电状态并向电网输送电功率。

如果作用在感应电动机转子的外转矩使转子逆着旋转磁场的方向旋转, 即  $n < 0$ ,  $s > 1$ , 那么, 此时转子导条中的感应电动势与电流方向仍和电动机时一样, 电磁转矩方向仍与旋转磁场方向一致, 但与外转矩方向相反, 即电磁转矩是制动性质。在这种情况下, 感应电动机一方面吸取机械功率, 另一方面因转子导条中电流方向并未改变, 定子绕组中电流方向仍和电动状态相同, 电网对其仍然输送电功率。因此, 感应电动机同时从转子轴上输入机械功率、从定子绕组输入电功率, 两部分功率一起变为电机内部的损耗。感应电动机的这种运行状态称为“电磁制动”状态。总结以上分析, 感应电动机在实际运行中虽然以电动状态为主, 但在外界因素作用下也存在工作于发电状态和电磁制动状态的可能。

## 1.2 感应电动机变频调速基础

交流电机的同步转速表达式为

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1-7)$$

根据感应电动机转差率的定义

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (1-8)$$

推导出感应电动机转子的转速  $n$  为

$$n = n_s(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (1-9)$$

以上各式表明, 感应电动机调速理论上有变极对数、变频及变转差率调速三种。首先, 改变磁极对数的方法缺点明显, 一是需要特殊设计电机的定子绕组结构, 致使其可靠性下降、成本上升, 二是转速只能有限等级调节。其次, 同步电动机的调速可以用改变供电频率, 从而改变同步转速的方法来实现。相似于同步电动机, 感应电动机也可以采用改变供电频率的方法调速, 当然, 必须设计一个介于电网和电动机之间的变频电源装置, 即所谓的变频调速器。在各种无极平滑调速方法中, 笼型感应电动机的变频调速、绕线转子感应电动机串级调速、无换向器电动机调速很受人们的重视, 并且已在工业生产中获得了大量实际应用。最后, 变转差率的方法可以分别通过调定子电压、转子电阻、转差电压以及定子或转子供电频率差等方法加以实现。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, 所以效率很低。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, 因此变频调速具有高效率、宽范围和高精度的调速性能, 是感应电动机理想的调速方法。为了使感应电动机供电频率可变, 自然需要一套变频电源, 但以往采用一整

套旋转变频机组或离子变频器来改变电源频率，设备初投资大、效率低、可靠性差，因此在技术发展史上，变频调速方法很长时间没能得到推广应用。随着半导体变流技术的发展，电力电子与电力传动技术已经十分成熟，使得变频调速方法重新得到人们的重视，变频调速器不仅在理论而且在工程领域获得飞速进步，已经在生产的很多领域中获得了应用。目前，变频调速是交流电动机调速的重要发展方向。

根据控制方式的不同，感应电动机可以有三种不同的变频调速原则：

- 1) 恒磁通变频调速。
- 2) 恒流变频调速。
- 3) 恒功率变频调速。

下面根据不同的控制方式，分别讨论各个变频调速原则的控制条件及其机械特性。

### 1. 恒磁通变频调速

感应电动机的电动势方程为

$$E_1 = 4.44f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \quad (1-10)$$

如果忽略定子压降，则上式可写成

$$U_1 \approx E_1 = K_E f_1 \Phi_m \quad (1-11)$$

式中， $K_E$  为电动势常数， $K_E = 4.44 N_1 k_{w1}$ 。

若感应电动机定子供电电源电压一定时，则磁通  $\Phi_m$  随频率  $f_1$  的变化而变化。一般在电机设计中，为了充分利用铁心材料，都把磁通的数值选在接近磁饱和的数值上。因此，如果频率  $f_1$  从额定值（通常为 50Hz）向下降低，则磁通会增加，造成磁路过饱和、励磁电流大大增加，这将使电动机带负载能力降低，功率因数变坏，铁耗增加，电动机过热，这是不允许的。反之，如果频率向上升高，则磁通减小，在一定的负载下有过电流的危险，这也是不允许的。为此，通常要求磁通保持恒定，即

$$\Phi_m = \text{const} \quad (1-12)$$

为了保持  $\Phi_m$  恒定，根据式 (1-5) 可知，必须使定子电压随频率成正比变化，即

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} \quad (1-13)$$

式中， $U'_1$ 、 $f'_1$  分别为变化后的定子电压和频率。或者保持定子电压和频率的比值不变，即

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 就是恒磁通变频原则需要的控制条件。

感应电动机的机械特性有三种表达式，即物理表达式、参数表达式和实用表达式，分别如式 (1-9)、式 (1-10) 及式 (1-11) 所示。物理表达式反映了不同转速时  $T_e$  与  $\Phi_m$  及转子电流有功分量  $I_2 \cos \varphi_2$  间的关系，它经常用于从物理概念上分析机械特性的变化规律。参数表达式反映了感应电动机的转矩与其内部参数及电源参数间的关系，它经常用于讨论各种参数对机械特性的影响及参数计算。例如，当转矩一定时，转子电阻与转差率的比值  $r_2/s$  不变，这点在计算感应电动机起动电阻和制动电阻时是很重要的。又例如，感应电动机的转矩和定子电压的二次方成正比，受电网电压波动的影响较为严重，这点在分析感应电动机起动特性时很重要。下列实用表达式最适用于根据电动机的铭牌数据进行电动机机械特性的工程计算：

$$T_e = C_M \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-15)$$

$$T_e = \frac{pm_1 U_1^2 r_2' / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + x_k^2]} \quad (1-16)$$

$$T_e = \frac{2T_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1-17)$$

改变定子电源频率可以改变同步转速和电动机转速，画出感应电动机在不同频率下， $U_1/f_1$  比值为常数时的一族机械特性曲线，如图 1-7 所示。其最大转矩为

$$T_{\max} = \frac{pmU_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \quad (1-18)$$

当频率较高时， $x_k \gg r_1$ ，故  $r_1$  可忽略，则

$$T_{\max} = \frac{pmU_1^2}{4\pi f_1 \times 2\pi f_1 L_k} \quad (1-19)$$

在压频比  $U_1/f_1 = \text{常数}$  时， $T_{\max}$  保持不变。当有功电流恒定， $\Phi_m$  为常数时，电动机的输出转矩也恒定，因而这种按比例的控制方式属于恒转矩调速性质。

当频率较低时， $r_1 \gg x_k$ ，忽略  $x_k$ ，则

$$T_{\max} = \frac{pmU_1^2}{4\pi f_1 \times 2r_1} = \frac{pmk_{uf}^2 f_1}{8\pi r_1} \quad (1-20)$$

这时仍保持压频比  $U_1/f_1 = k_{uf}$  不变时，最大转矩将随频率  $f_1$  的降低而减小，原因在于电动机定子电阻  $r_1$  引起的电压降在低频低压时相对影响较大。

从式 (1-5) 可知，为保持  $\Phi_m$  恒定，应该满足

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const} \quad (1-21)$$

但由于电动机的感应电动势  $E_1$  难以测得和控制，故在实际应用中为了在低频时仍能近似保持恒磁通变频调速，一般在控制电路中加入一个函数发生器控制环节，以补偿低频时定子电阻所引起的压降影响。图 1-8 所示为补偿后得到的  $E_1/f_1$  近似等于常数时恒最大转矩变频调速的一族机械特性曲线。分析表明，感应电动机恒磁通变频调速必须在变频的同时进行调压，而在低频时则必须加以补偿，才能获得恒磁通最大转矩的调速特性。

## 2. 恒流变频调速

变频器给感应电动机供电时，可采用恒流变频调速方式。这种变频电源属于恒流源，通过电流调节器进行闭环调节在变频调速过程中始终保持定子电流恒定，即

$$I_1 = \text{const} \quad (1-22)$$

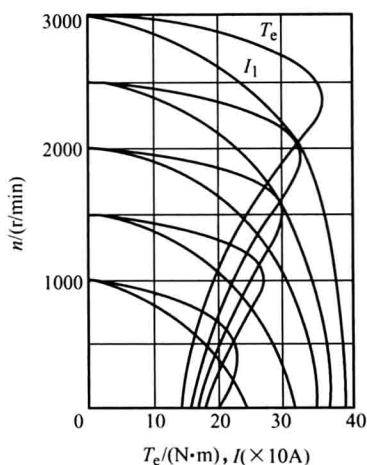


图 1-7  $U_1/f_1 = \text{常数}$  时的调速机械特性

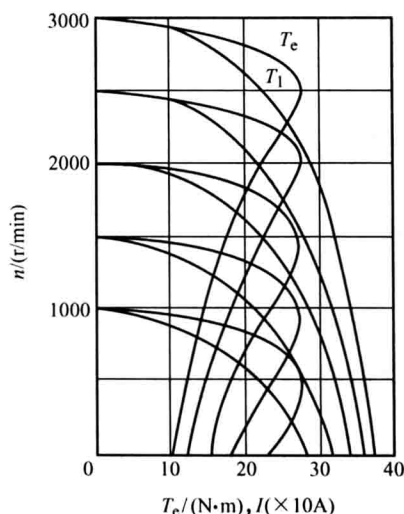


图 1-8 补偿后的恒  $T_{\max}$  变频调速的机械特性



在电流设定值给定后,通过电流调节器的闭环控制,可以保持感应电动机的定子电流不变。恒流变频调速机械特性的分析方法与感应电动机能耗制动时机械特性的分析方法基本相同。由于它们的定子电流都属于恒值,当定子恒定的直流等效成三相交流以后,就和恒定的定子交流电流情况一样了,故二者的分析方法和结论基本相同。

根据分析结果得出的转矩参数式为

$$T_e = \frac{pmI_1^2 x_m^2 r_2' / s}{2\pi f_1 [(r_2' / s)^2 + (x_2' + x_m)^2]} \quad (1-23)$$

临界转差率  $s_m$  及最大转矩  $T_{\max}$  分别为

$$s_m = \frac{r_2'}{x_2' + x_m} \quad (1-24)$$

$$T_{\max} = \frac{pmI_1^2 x_m^2}{4\pi f_1 (x_2' + x_m)} \quad (1-25)$$

由此可见,恒流变频调速方式与恒磁通变频调速方式的机械特性形状基本相同,都具有恒转矩调速性质。在变频时,最大转矩大小不受影响,可以认为最大转矩  $T_{\max}$  与频率  $f_1$  无关。由于在式(1-15)中分母包含有励磁电抗  $x_m$ ,  $x_m$  比短路电抗  $x_k$  大一个数量级,因此恒流变频调速时的最大转矩较恒磁通变频时小,过载能力也低,所以恒流变频调速方式仅适用于小容量、负载变化不大的地方。

### 3. 恒功率变频调速

电动机在额定转速以上运转时,定子频率将大于额定频率(一般为50Hz)如按恒磁通变频调速则应要求电动机的定子电压随着升高。但是,由于电动机绕组本身不允许耐受过高的电压,因此电动机电压必须限制在允许值范围内,这样就不能再保持恒磁通或恒转矩变频调速了。在这种情况下,可以采取恒功率变频调速。恒功率变频调速与他励直流电动机电枢电压一定时减弱磁通的调速方法类似。因为感应电动机的转矩表达式和功率表达式为

$$T_e = C_M \Phi_m I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-26)$$

所以,频率的增加,相当于磁通减小,转矩减小,而速度增加,故属恒功率调速性质。

恒功率变频调速原则所要求的电压频率协调控制条件可作如下推导,根据最大转矩表达式

$$T_{\max} = \frac{pmU_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \quad (1-27)$$

若忽略  $r_1$ , 则

$$T_{\max} \propto \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (1-28)$$

$$T_N \propto \frac{U_1^2}{\lambda f_1^2} \quad (1-29)$$

$$T'_N \propto \frac{U_1'^2}{\lambda' f_1'^2} \quad (1-30)$$

其中,  $T_{\max} = \lambda T_N$ ,  $\lambda$  为电动机的过载能力,  $T_N$  为额定转矩;  $T'_N$ 、 $U_1'$ 、 $\lambda'$  分别为变速后的相应值。取式(1-30)与式(1-29)之比,得

$$\frac{T'_N}{T_N} = \left(\frac{U'_1}{U_1}\right)^2 \left(\frac{f_1}{f'_1}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right) \quad (1-31)$$

设变频前后的过载能力相等，即  $\lambda = \lambda'$ ，则式 (1-31) 变为

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f_1}{f'_1} \sqrt{\frac{T'_N}{T_N}} \quad (1-32)$$

当恒转矩调速，即变频前后额定转速  $T_N = T'_N$  时，则得

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} \quad (1-33)$$

这和恒磁通（恒转矩）变频调速原则要求的协调控制条件是一致的。

当恒功率调速， $T_N f_1 = T'_N f'_1$  时，则

$$\frac{T'_N}{T_N} = \frac{f_1}{f'_1} \quad (1-34)$$

将式 (1-34) 代入式 (1-32)，则得

$$\frac{U'_1}{U_1} = \sqrt{\frac{f'_1}{f_1}} \quad (1-35)$$

或

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U'_1}{\sqrt{f'_1}} \quad (1-36)$$

式 (1-35) 或式 (1-36) 是恒功率变频调速原则要求的电压频率协调控制条件。在频率升高时，要求电压升高相对小一些。实际上在额定转速以上调速时，由于电动机定子电压受额定电压的限制，因此在升高频率时，定子电压保持额定值不变。随着转速的上升，磁通将减小，转矩也减小，可得到近似恒功率调速。

图 1-9 所示为感应电动机在全调速范围的一族机械特性曲线。在额定转速以下采用恒转矩变频调速，而在额定转速以上采用恒功率变频调速，因此调速范围可得到明显扩大。由图 1-9 可知，恒功率变频调速适用于负载随转速的增高而变轻的工况。当感应电动机在某特定频率下运转时，如果将频率迅速降低，使转差率变负，则可以使电动机处于再生发电运转状态，此时电动机运行在第二象限（见图 1-10），而电能通过变频装置回馈给电网。在减速过程中若始终保持频率比且电动机转速下降得较快，那么可以一直维持再生发电制动，制动回馈的能量  $W_i$  大致可由下式确定：

$$W_i \approx \frac{\eta T_e \Delta n}{9550} \quad (1-37)$$

式中， $\eta$  为电动机效率； $\Delta n$  为降低的转速 (r/min)； $T_e$  为电动机转矩，为负值 (N·m)。

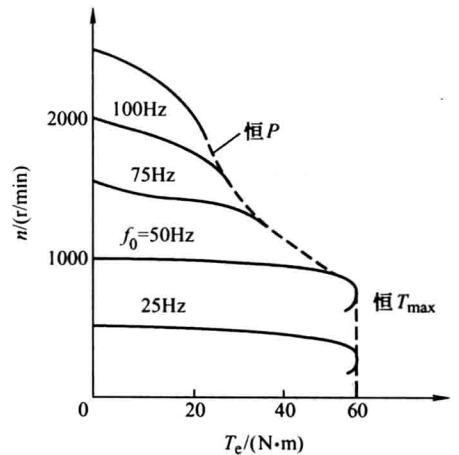


图 1-9 感应电动机变频调速机械特性

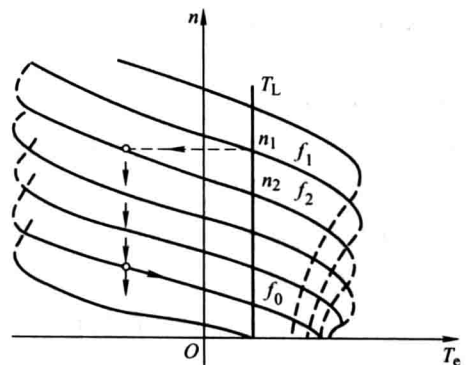


图 1-10 感应电动机降低频率时的发电运行状态

若使电动机急剧加速，则应当连续地提高频率。如图 1-11 所示，当频率由  $f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3$  时，电动机将沿着图示虚线由点 1→2→3 加速，转速由  $n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3$ ，达到新的稳定运行点。为了缩短加速时间，应当使电动机在加速过程中始终保持有最大转矩，即应当使电动机沿着最大转矩的包络线进行加速。加速时间  $t(s)$  可由下式确定：

$$t \approx \frac{GD^2 \Delta n}{375 T_e} \quad (1-38)$$

式中， $GD^2$  为电动机及负载（折算到电机轴）的总飞轮惯量 ( $N \cdot m^2$ )； $\Delta n$  为转速的变化 ( $r/min$ )； $T_e$  为加速转矩 ( $N \cdot m$ )。

在有的场合下，频率增加的速度要与电动机实际转速相适应。如图 1-11 中，当频率由  $f_1$  突变至  $f_3$  时，在改变后的瞬间电动机转矩（点 4）将小于负载转矩（点 1），电动机最终会停下来。起动时，同样也应当从低频开始起动，因为在低频下起动电流小而起动转矩大，有利于缩短起动时间。

感应电动机变频调速也很容易实现反转。为了使电动机在反转过程中产生再生发电制动把动能回馈给电网，也应当均匀降低频率和电压，待其停止后，再反向起动。如果不降低电压和频率，一下子将定子绕组相序反接，则电动机进入反接制动状态，此时动能将消耗在转子回路中，造成损耗和过热。

综上所述可见，感应电动机变频调速可以实现四象限运行。如果按照一定的规律控制，感应电动机的起动、制动、反转和调速过程时间都可以缩至很短，因此在变频调速时，感应电动机可以具有良好的拖动动态特性。

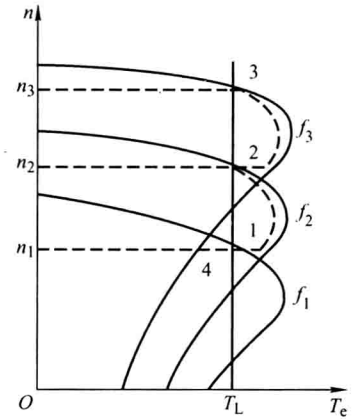


图 1-11 感应电动机变频调速的加速过程

### 1.3 感应电动机调速节能原理

许多生产机械为了满足生产工艺要求，在生产过程中需要电动机调速运行。例如矿井通风系统、居民供水系统、中央空调等风机和泵类系统等，都要求电动机调速运行。这类生产机械用电量很大，据统计，我国水泵用电量占全国总用电量的 21%，风机用电量占全国总用电量的 12%。由于设计时条件限制，有一些风机和水泵没有采用电动机调速系统，当用户对风或水的需求量发生变化时，这些恒速电动机无法满足要求，处于产能过剩状态，导致了大量的电能浪费。因此，研究风机和泵类系统的调速节能非常重要。

风机和水泵构成的动力系统可以统称为流体传送系统，是电动机节能的重要研究领域之一。由于在流体传送系统中，风机和水泵的流体力学方程基本相同，因此下面主要介绍水泵的基本性能和参数。

水泵是一种输送液体的机械设备，水泵主要分为叶轮泵和容积泵。叶轮泵是依靠旋转的叶轮对液体的动力作用，把能量连续地传递给液体，使液体的动能和压力能增加，随后在压出室中把部分动能转化成压力能。叶轮泵有离心式、轴流式、混流式等。容积泵是依靠工作腔容积的周期性变化，把能量周期性地传递给液体，使液体的压力增加，把液体强行排出。