

电气工程师速成系列教程

# 变频器 及节能控制实用技术速成



深入内涵 全盘分析 一步到位

福来 孙鹤旭 等编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电气工程师速成系列教程

# 变频器及节能控制 实用技术速成

姚福来 孙鹤旭 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书对电气自动化、仪器仪表、过程控制、机械自动化等相关专业在实际工作中最常用的变频器、软启动器、伺服控制器、步进电动机、同步控制器、PID 进行了深入浅出的讲解，并且对社会用电量很大的水泵风机变频调速进行了量化的节能分析，对该领域存在的问题及部分模糊概念和错误的节能知识进行了剖析，给出了该领域至今为止最前沿的量化节能测算、量化节能设计和量化节能控制技术。本书公开了如何在已经用了变频器的泵站继续实现深度节能的控制方法。本书力图使读者在短期内掌握实际工作中最常用的一些实用知识，为自动化专业大中专毕业生、本科毕业生、研究生及爱好者快速进入实战提供帮助。

本书可作为自动化专业的短期速成培训教材或自学教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

变频器及节能控制实用技术速成 / 姚福来等编著. —北京: 电子工业出版社, 2011.8

电气工程师速成系列教程

ISBN 978-7-121-14330-4

I. ①变… II. ①姚… III. ①变频器—教材 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 163600 号

策划编辑: 康 霞

责任编辑: 康 霞 特约编辑: 钟永刚

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 19.25 字数: 406 千字

印 次: 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：(010) 88258888。

# 前 言

在当前的自动化类相关参考书中，大多数为针对单一种类设备或几个主要种类设备的讲解性图书，如专讲 PLC、变频器、组态软件类的，或是对这几类设备的混合讲解，尚缺乏对整个自动化工程进行完整、系统地讲解的图书，而学校也没有针对自动化工程进行系统的培训，所以造成当前毕业生虽然学了很多理论知识，也做了不少课堂试验，但是一接触到实际工作，可能连如何配线或使用什么工具配线都不知道，更不知如何进行器件选型，基于此，我们组织编写了本套丛书——电气工程师速成系列教程。本套丛书的目的是要搭建这样一座桥梁：只要读者学习完本套书，基本上可以对绝大部分自动化类工程有一个完整、清晰的整体系统概念，并能独立完成从最基本的系统设计、原件选型、生产组装、软件编程到最后的调试。

变频器是目前应用最广泛的调速装置，对于很多新手来说可能觉得它的参数太多而难于掌握？其实它的基本使用方法非常简单，完全可以在一两个小时内掌握它，软启动器就更是如此，伺服控制器也不复杂，作者通过对自己多年来的大量工程实践，提炼出了最需要掌握的基本知识和实践方法进行案例讲解，带您快速进入自动化工程的实战前线。

本分册对读者在实际工作中最常用的变频器、软启动器、伺服控制器、步进电动机、PID、同步控制器进行了深入浅出的讲解，虽然简单，但却是最基本的，这些内容可以让一个新手进入几乎所有的工业自动化领域，看完本书的过程，就是完全掌握工业自动化工程的过程。

本分册作为作者博士工作的一个组成部分，对社会用电量很大的水泵风机变频调速进行了量化的节能分析，并对该领域存在的问题及部分模糊概念和错误的节能知识进行了剖析，给出了该领域至今为止最前沿的量化节能测算、量化节能设计和量化节能控制技术，并公开了如何在已经上了变频器的泵站继续实现深度节能的控制方法；另外，本分册还首次提出了通用设备的优化控制、优化调速和优化切换理论，并给出了证明，它可以指导自动化专业的科技人员对各种系统进行优化控制；书中给出该理论在多动力机车、输送机械和电网的优化调速或调节的一些应用。

本分册由姚福来研究员、孙鹤旭教授等编著，其中第 1 章的 1.1、1.2 节和第 4 章的 4.1、4.3 节由孙鹤旭教授编写，第 5 章的部分内容由张艳芳、田立勤高级工程师和王红霞工程师编写，第 7 章的主要内容由姚泊生工程师和张艳彬工程师编写，第 9 章的内容由耿艳利博士编

写，第 11 章的内容由高洁博士编写，第 12 章的内容由董砚博士编写，第 8 章的部分内容由姚保军工程师和贺洪江教授编写，姚雅明工程师编写第 5 章 5.4 节和第 19 章的部分内容，其余章节由姚福来研究员编写。

对于本书您有任何建议和意见可发邮件至 [kangxia0411@163.com](mailto:kangxia0411@163.com)，欢迎批评指正。

编著者  
2011 年 8 月

# 目 录

第 1 章 交流电动机的调速方法 .....	(1)
1.1 交流电动机的转速 .....	(1)
1.2 交流电动机的效率 .....	(2)
1.3 交流电动机的调速方法 .....	(3)
1.3.1 改变极对数 $p$ 的调速方法 .....	(3)
1.3.2 改变转差率 $s$ 的 12 种调速方法 .....	(9)
1.3.3 改变频率 $f$ 的调速方法 .....	(20)
1.4 交流电动机的外部调速方法 .....	(27)
1.4.1 电磁转差离合器 .....	(27)
1.4.2 液力耦合调速器 .....	(28)
1.4.3 液黏调速离合器 .....	(29)
1.4.4 机械调速器 .....	(30)
第 2 章 高压交流电动机的降压改造 .....	(32)
2.1 三相交流电动机的 1Y-1 $\Delta$ 转换降压方法 .....	(32)
2.2 三相交流电动机的 1Y- $n$ Y 降压方法 .....	(33)
2.3 三相交流电动机的 1 $\Delta$ - $n\Delta$ 降压方法 .....	(34)
2.4 三相交流电动机的 $n$ Y- $m\Delta$ 降压方法 .....	(35)
2.5 三相交流电动机的 $m\Delta$ - $n$ Y 改压方法 .....	(35)
第 3 章 电动机无功功率的节能补偿 .....	(37)
3.1 无功电流和无功功率 .....	(37)
3.2 无功电流和无功功率的补偿 .....	(38)
3.3 电动机的无功补偿 .....	(39)
第 4 章 变频器的基本知识 .....	(43)
4.1 通用变频器的主电路结构 .....	(43)
4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 方式和实现方法 .....	(44)
4.3 变频器的谐波和应对措施 .....	(47)
4.4 输入/输出电抗器的估算 .....	(49)
4.5 变频器输入/输出电压、电流和功率的测量 .....	(49)
4.6 变频器的基本使用方法 .....	(52)

4.6.1	变频器的选型 .....	(52)
4.6.2	变频器的主要动力和控制接线 .....	(52)
4.6.3	变频器的基本参数设定 .....	(53)
4.6.4	变频器的外形 .....	(54)
4.7	变频器的散热问题和无功补偿问题 .....	(54)
4.8	变频器的 $V/f$ 控制 .....	(55)
4.9	变频器的矢量控制 .....	(57)
4.10	变频器的直接转矩控制 .....	(60)
4.11	制动电阻的计算和估算 .....	(62)
4.12	变频器中的 PID 及电源反接问题 .....	(63)
<b>第 5 章</b>	<b>富士变频器入门 .....</b>	<b>(65)</b>
5.1	变频器外形 .....	(65)
5.2	变频器型号及总体框图 .....	(66)
5.3	变频器接线 .....	(68)
5.4	参数设定 .....	(71)
5.5	数据快速查询和运行状态监视 .....	(74)
5.6	变频器的使用高度及散热问题等事项 .....	(75)
<b>第 6 章</b>	<b>西门子变频器入门 .....</b>	<b>(78)</b>
6.1	变频器外形 .....	(78)
6.2	变频器的总体方框图 .....	(79)
6.3	变频器接线 .....	(79)
6.4	参数设定 .....	(85)
6.5	变频器的降容使用问题 .....	(90)
6.6	MM440 变频器支持 BiCo 功能 .....	(91)
<b>第 7 章</b>	<b>ABB 变频器入门 .....</b>	<b>(92)</b>
7.1	变频器外形 .....	(92)
7.2	变频器型号 .....	(93)
7.3	变频器接线及浮地问题 .....	(93)
7.4	参数设定 .....	(99)
<b>第 8 章</b>	<b>电动机软启动器入门 .....</b>	<b>(104)</b>
8.1	软启动器的基本原理、参数、接线和外形 .....	(104)
8.2	CMC 型软启动器的快速入门 .....	(105)
8.2.1	外观 .....	(106)

8.2.2	接线图 .....	(106)
8.2.3	参数设定 .....	(109)
8.2.4	指示灯说明 .....	(111)
<b>第 9 章</b>	<b>步进电动机及驱动器入门</b> .....	(112)
9.1	步进电动机基本知识 .....	(112)
9.2	步进电动机的特点 .....	(113)
9.3	直线步进电动机及驱动控制系统 .....	(114)
9.4	驱动器和步进电动机的外形 .....	(115)
<b>第 10 章</b>	<b>伺服电动机及伺服驱动器入门</b> .....	(116)
10.1	交流伺服电动机驱动器的原理 .....	(116)
10.2	交流伺服电动机驱动器的接线及外形 .....	(116)
10.3	A4 系列伺服驱动器的快速入门 .....	(118)
<b>第 11 章</b>	<b>开关磁阻电动机的调速控制</b> .....	(129)
11.1	开关磁阻电动机的发展历史 .....	(129)
11.2	开关磁阻电动机的原理 .....	(130)
11.3	开关磁阻电动机的调速控制 .....	(131)
11.3.1	电流斩波控制 .....	(132)
11.3.2	角度位置控制 .....	(133)
11.3.3	电压 PWM 控制 .....	(134)
11.4	开关磁阻电动机的特点 .....	(134)
11.5	开关磁阻电动机的应用 .....	(135)
<b>第 12 章</b>	<b>交流步进控制</b> .....	(136)
12.1	步进控制理论 .....	(136)
12.2	同步机的矩角特性 .....	(136)
12.3	交流步进控制与定位矢量的关系 .....	(138)
12.4	交流步进定位控制系统 .....	(139)
<b>第 13 章</b>	<b>水泵风机调速后的稳定判据</b> .....	(141)
13.1	定速水泵风机的稳定性问题和稳定区域确定 .....	(141)
13.2	调速水泵风机的稳定判据 .....	(147)
13.2.1	调速水泵风机的稳定判据 .....	(147)
13.2.2	用目标电耗软件的转速曲线进行稳定性设计 .....	(149)
13.3	水泵风机的过载问题 .....	(150)
13.4	水泵风机的频繁切换问题 .....	(152)



13.4.1	恒压供水的原理 .....	(152)
13.4.2	频繁启停问题 .....	(153)
13.4.3	需要注意的其他稳定问题 .....	(154)
<b>第 14 章</b>	<b>水泵风机的节能优化调速定律和切换定律 .....</b>	<b>(155)</b>
14.1	水泵的特性 .....	(156)
14.2	水泵站消耗的总功率 .....	(158)
14.3	定速泵站的最优负荷分配控制 .....	(159)
14.4	定速泵站的最优切换控制 .....	(162)
14.5	定速泵站的一个优化案例 .....	(163)
14.6	变速水泵的特性 .....	(165)
14.7	调速泵站的总功耗 .....	(167)
14.8	调速泵站的负荷优化控制 .....	(168)
14.9	调速泵站运行数量的优化切换 .....	(171)
14.10	调速泵站的一个实际案例 .....	(174)
14.11	节电比例可实现的必要条件 .....	(177)
14.12	以电耗最低为目标的“目标电耗”节能技术 .....	(178)
14.13	关曲线和开曲线 .....	(181)
14.14	调速设备的数量原则和选取原则 .....	(184)
14.15	“水泵风机目标电耗节能理论”的应用 .....	(184)
14.16	对已经使用了变频器运行的泵站进行节电潜力测算 .....	(186)
<b>第 15 章</b>	<b>相同设备组成系统的量子优化控制法则 .....</b>	<b>(188)</b>
15.1	问题的提出 .....	(188)
15.2	量子优化法则 .....	(189)
15.3	效率函数 .....	(189)
15.4	能耗函数的类型 .....	(190)
15.4.1	能耗函数为势能的系统 .....	(190)
15.4.2	能耗函数为电能的系统 .....	(191)
15.4.3	能耗函数为热能的系统 .....	(192)
15.4.4	能耗函数为克服摩擦力的系统 .....	(193)
15.4.5	能耗函数为克服摩擦力和重力的系统 .....	(193)
15.4.6	能量函数为动能的系统 .....	(194)
15.4.7	能量函数为磁能的系统 .....	(194)
15.5	一类函数的极值点和极值 .....	(195)

15.5.1	$k$ 值固定找出极值和极值点 .....	(195)
15.5.2	$k$ 值变化找出最大或最小极值点 .....	(197)
15.6	加权效率函数 .....	(198)
15.7	加权效率优化的负荷分配法则 .....	(199)
15.8	加权效率优化运行数量法则 .....	(200)
15.9	加权效率优化切换法则 .....	(202)
15.10	有约束的加权效率优化负荷分配法则 .....	(204)
15.11	有约束的加权效率优化运行数量法则 .....	(204)
15.12	有约束条件的加权效率优化切换法则 .....	(205)
15.13	加权效率优化系统的几个重要特点 .....	(205)
15.14	更一般意义上的通用设备的效率优化 .....	(206)
15.15	更一般意义上的最优切换控制 .....	(210)
15.16	一种工程上方便使用的近似最优运行台数判别法则和近似最优切换法则 .....	(214)
<b>第 16 章</b>	<b>不同设备组成系统的量子优化控制法则 .....</b>	<b>(216)</b>
16.1	问题的提出 .....	(216)
16.2	两种不同设备构成系统的总效率 .....	(216)
16.3	两种不同设备构成系统的效率优化 .....	(218)
16.4	局部最优和整体最优的关系 .....	(220)
16.5	三种不同设备组成系统的总效率 .....	(220)
16.6	三种不同设备组成系统的效率优化 .....	(223)
16.7	三种以上不同设备构成系统的总效率 .....	(225)
16.8	三种以上不同设备组成系统的理论优化方法 .....	(225)
16.9	两种不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法 .....	(225)
16.10	两种不同设备的优化分析 .....	(228)
16.11	两种不同设备构成的系统设备切换优化法则 .....	(230)
16.12	效率优化的几个重要特点 .....	(231)
16.13	三种不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法 .....	(232)
16.14	三种不同设备组成系统的优化分析 .....	(238)
16.15	三种以上不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法 .....	(239)
<b>第 17 章</b>	<b>多动力机车和多动力输送机的优化调速控制 .....</b>	<b>(241)</b>
17.1	动车组消耗的总功率 .....	(241)
17.2	动车组的最优负荷分配控制 .....	(242)
17.3	动车组的运行数量的优化切换 .....	(245)

第 18 章	PID 控制器入门 .....	(248)
18.1	PID 控制器的基本原理 .....	(248)
18.2	PID 主要参数的作用 .....	(248)
18.3	PID 控制器的主要接线及外形 .....	(249)
18.4	IAO 型 PID 控制器快速入门 .....	(250)
18.4.1	IAO 系列 PID 控制器的型号说明 .....	(251)
18.4.2	接线端子 .....	(252)
18.4.3	用 IAO 系列 PID 控制器实现恒压控制 .....	(252)
18.4.4	参数设定 .....	(253)
18.4.5	参数调整 .....	(254)
18.4.6	注意事项 .....	(255)
第 19 章	Danfoss 和 Trio 同步控制器入门 .....	(256)
19.1	Danfoss 同步定位控制卡 SyncPos motion controller 外形及接口 .....	(256)
19.2	SyncPos motion controller 卡的连接方式 .....	(257)
19.3	VLT5000 变频器的接线 .....	(259)
19.4	SyncPos motion controller 卡的使用及编程方法 .....	(259)
19.5	SyncPos motion controller 卡的现场调试应用 .....	(263)
19.6	使用 SyncPos motion controller 卡需要注意的问题 .....	(264)
19.7	Trio 公司的 MC206 同步控制器的外形及接口说明 .....	(266)
19.8	MC206 同步控制器的应用案例及编程方法 .....	(271)
第 20 章	创新思维的简化 .....	(278)
20.1	年轻是创新的资本 .....	(278)
20.2	最容易掌握的 7 种创新方法 .....	(282)
20.3	把不方便的事作为研究目标——最容易出成绩的方法 .....	(282)
20.4	组词式海量发明方法——最容易出产量的方法 .....	(288)
参考文献	.....	(294)

# 第 1 章 交流电动机的调速方法

## 1.1 交流电动机的转速

根据三相交流异步电动机的基本原理（具体参见相关教材），我们分析知道，由于余弦函数  $\cos(\cdot)$  的周期性特点， $\omega t$  从  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间的特性分析及变化规律也就代表了  $\omega t > 360^\circ$  以后各时间段的周期变化情况，即

$$\omega t = 2\pi f t = \frac{2\pi}{T} t \quad (1-1)$$

式中， $f$  为三相交流电源的频率（Hz）； $T$  为三相交流电源的周期（s）。

对于三相 2 极交流电动机， $T$  秒电动机的磁场旋转了一圈，每秒则旋转  $1/T$  圈，也就是每秒旋转  $f$  圈，每分钟旋转  $60f$  圈，这就是三相 2 极（ $p=1$ ）交流电动机定子旋转磁场的转速，同理，对于三相 4 极交流电动机， $t$  从  $0 \sim T$  秒，三相交流电动机的定子磁场旋转了  $1/2$  圈，每秒旋转  $f/2$  圈，每分钟旋转  $60f/2$  圈，这就是三相 4 极（ $p=2$ ）交流电动机定子磁场的转速，对于三相 6 极（ $p=3$ ）交流电动机，定子磁场每分钟旋转  $60f/3$  圈，以此类推，得三相交流电动机定子磁场的旋转速度  $n_0$ （也称同步转速）表达式为

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1-2)$$

式中， $f$  为三相交流电动机供电电源的频率； $p$  为三相交流电动机的极对数，有 1, 2, 3, 4, 5, 6 等。

三相交流电动机转子输出转速  $n$  的表达式为

$$n = (1-s)n_0 = (1-s) \cdot \frac{60f}{p} \quad (1-3)$$

式中， $n$  为三相交流电动机转子转速（r/min）； $s$  为转差率，代表的是三相交流电动机转子输出的旋转速度同定子上的磁场旋转速度之间的差异，同步三相交流电动机的转差率  $s=0$ ，即转子输出的旋转速度同定子上的磁场旋转速度相等，异步三相交流电动机的转差率  $s>0$ 。

转差率  $s$  的表达式为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1-4)$$

## 1.2 交流电动机的效率

三相交流电动机的效率 $\eta$ 表达式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_{\text{Cu}_1} + p_{\text{Fe}_1} + p_{\text{Cu}_2} + p_{\text{Fe}_2} + p_f + p_{\text{ad}}} \% \quad (1-5)$$

式中,  $P_1$  为三相交流电动机的总输入功率;  $P_2$  为电动机的机械输出功率;  $p_{\text{Cu}_1}$  为定子中电流流过铜线电阻引起的铜损;  $p_{\text{Fe}_1}$  为定子铁芯上交变磁场导致涡流存在等引起的铁损;  $p_{\text{Cu}_2}$  为转子的铜损;  $p_{\text{Fe}_2}$  为转子上的铁损;  $p_f$  为转子轴承摩擦等引起的机械损耗;  $p_{\text{ad}}$  为转子中横向电流等引起的附加损失。

由于转子随旋转磁场转动, 同步运行时, 转子中交变磁场的频率为零, 异步额定运行时, 为  $1 \sim 3\text{Hz}$ , 所以, 转子上的铁损  $p_{\text{Fe}_2}$  一般很小, 电路分析时常忽略不计。

三相交流电动机定子传递给转子的电磁功率为  $P_M$ ,  $P_M$  等于总输入功率  $P_1$  减去定子铁损  $p_{\text{Fe}_1}$  和定子铜损  $p_{\text{Cu}_1}$ , 电动机的电磁转矩  $T_M$  由转子电流和定子旋转磁场相互作用产生, 定子旋转磁场转速  $n_0$  的表达式为

$$P_M = P_1 - p_{\text{Cu}_1} - p_{\text{Fe}_1} = 9550 T_M n_0 \quad (1-6)$$

电磁转矩  $T_M$  传递到电动机转子上, 电动机转子的速度为  $n$ , 电动机转子上的总机械功率为  $P_m$ ,  $P_m$  等于电磁功率  $P_M$  减去转子上的铜损  $p_{\text{Cu}_2}$  和铁损  $p_{\text{Fe}_2}$ ,  $p_{\text{Fe}_2}$  忽略不计, 见式 (1-7a)。

$$P_m = P_M - p_{\text{Cu}_2} = 9550 T_M n \quad (1-7a)$$

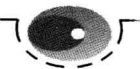
转子与定子之间的功率传输效率 $\eta_m$ 的表达式为

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_M} = \frac{n}{n_0} \quad (1-7b)$$

转子上的铜损  $p_{\text{Cu}_2}$  等于转子电流  $i_2$  在转子内阻  $r_2$  上的热损耗, 同时它也等于转差率  $s$  和电磁功率  $P_M$  的乘积, 即

$$p_{\text{Cu}_2} = 3i_2^2 r_2 = P_M - P_m = P_M \left( \frac{P_M - P_m}{P_M} \right) = P_M \left( \frac{n_0 - n}{n_0} \right) = s P_M \quad (1-8)$$

电动机机械输出功率  $P_2$  等于转子上的总机械功率  $P_m$  减去转子上的机械损耗  $p_f$  和附加损



耗  $p_{ad}$ ，即

$$P_2 = P_m - p_f - p_{ad} \quad (1-9)$$

三相交流电动机的效率  $\eta$  也可以看做定子效率  $\eta_1$  和转子效率  $\eta_2$  的乘积，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_M}{P_1} \cdot \frac{P_2}{P_M} = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (1-10)$$

电动机的铁损基本不变，也称不变损耗，电动机的铜损随着电流的增大（也就是负载率增大）而增大，也称可变损耗，三相交流电动机定子和转子的不变损耗等于可变损耗时效率  $\eta$  达到最大  $\eta_M$ ，为了在使用同等金属材料下，尽可能拖动大的负载，在三相交流电动机制造时，一般把额定工作状态设计在大于最高效率时的负载率之上，最高效率时的负载率一般为 70%~90%。

三相交流电动机各部分功耗和总输入功率  $P_1$  和机械输出功率  $P_2$  之间的关系如图 1-1 所示。

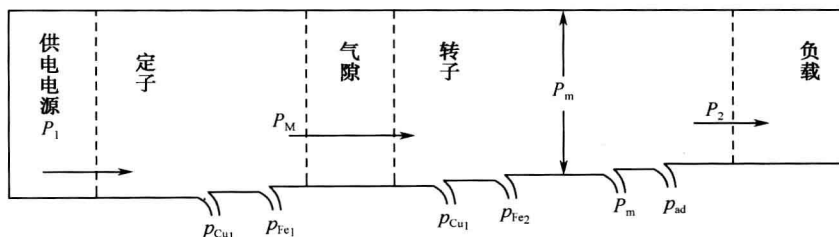


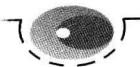
图 1-1 电动机的能量分配

## 1.3 交流电动机的调速方法

从式 (1-3) 可以看出，三相交流电动机的调速途径有 3 种：①改变三相供电电源的频率  $f$ ；②改变三相交流电动机的极对数  $p$ ；③改变转差率  $s$ 。

### 1.3.1 改变极对数 $p$ 的调速方法

这是三相交流电动机调速方法中最简单的，在镗床、磨床等机床及离心机等机械的主轴上广泛应用，这种调速方法要求三相交流电动机本身的结构必须是可以变极的，这种调速方法通过交流接触器或手动开关变换电动机内部定子线圈的接线方式来改变三相交流电动机的极数，没有其他中间环节，因此，也就没有中间环节的效率损失，该调速方法自身的能效最



高,当然这不是指变极电动机自身的效率高低。

例如,三相交流电动机从4极接线方式转换到2极接线方式时,就可以将三相交流电动机的输出转速增加1倍左右,而从2极接线方式转换到4极接线方式时,则转速降低50%左右。不过因为极对数 $p$ 只有1,2,3,4,5,6等若干挡,所以,这种调速方式是有级的,不能实现三相交流电动机转速的连续调节。

### 1. 倍极比变极方法

倍极比变极方法是最简单最常见的变极方法,它是将每相绕组中串联或并联的线圈通过顺串、反串或反并使其中1/2绕组变为反向连接,也就是改变半相绕组的电流方向,其单相绕组形成的磁极数量也将发生变化,就可以实现三相交流电动机极对数的倍增或倍减,从而使转速增加1倍或降低50%,这种方式可以实现2/4、4/8、6/12等成倍数极数的相互变换。

以四极三相交流电动机为例,假设其U相绕组的线圈组采用顺串连接方式,基于U相电流的流向,根据右手螺旋定则,有两个N极和两个S极,4个磁极分布如图1-2所示。

如果把两个线圈组采用反串的方式,原来的4个磁极就变成了两个磁极,如图1-3所示。

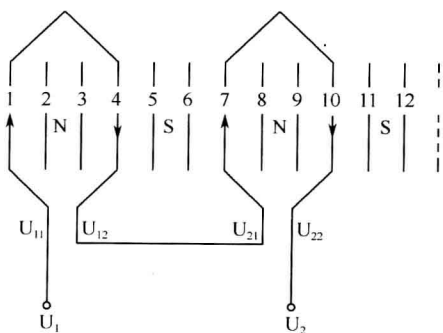


图 1-2 线圈顺串磁极分布

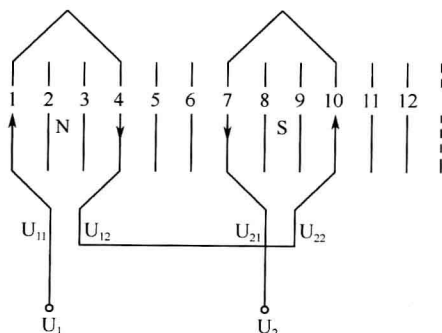


图 1-3 线圈反串磁极分布

如果把两个线圈组采用反并的方式,原来的4个磁极也变成了两个磁极,如图1-4所示。如果原来的U相绕组采用1Y(极对数为4)顺串接法,改为反串1Y(极对数为2)接法后,其电路接线示意如图1-5所示。

如果原来的U相绕组采用1Y(极对数为4)顺串接法,改为反并2Y(极对数为2)接法后,其电路接线示意如图1-6所示。

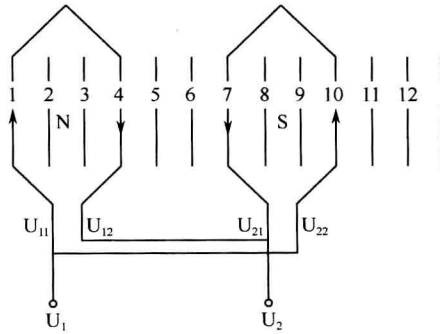
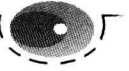


图 1-4 线圈反并磁极分布

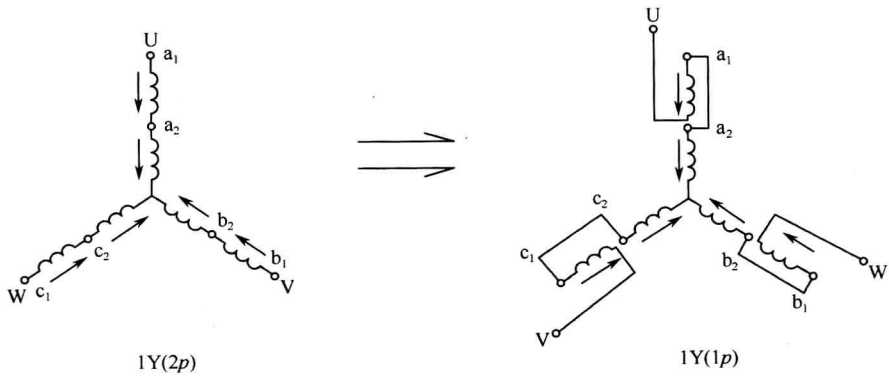


图 1-5 线圈 1Y 顺串改反串 1Y 接法

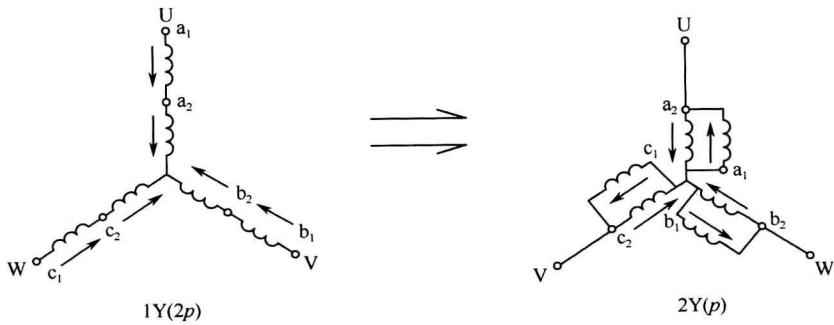
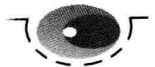


图 1-6 线圈 1Y 顺串改反并 2Y 接法





如果原来的 U 相绕组采用  $1\Delta$ （极对数为 4）顺串接法，改为反并  $2Y$ （极对数为 2）接法后，其电路接线示意如图 1-7 所示。

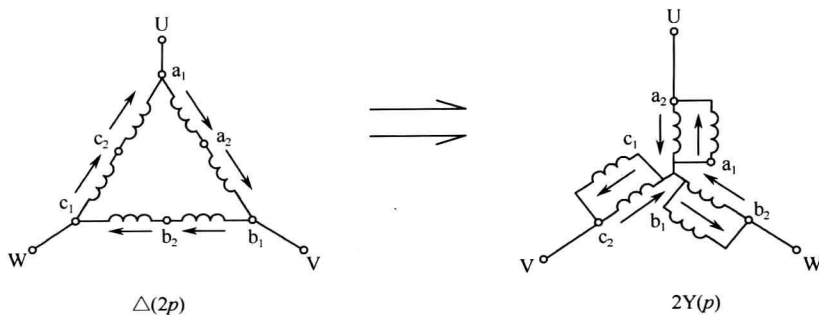


图 1-7 线圈  $1\Delta$  顺串改反并  $2Y$  接法

由于变极后磁场的旋转方向发生了变化，为了满足不改变电动机转子旋转方向的变速要求，需要把变极前后 V、W 两相绕组的电源接线进行对调，其实，也可以在电动机内部的接线引出到端子时在电动机内部进行对调。

其他极数的三相交流电动机倍极变速方法与此类似，不再进行讨论。

## 2. 非倍极比变极方法

除了倍极比变极方法外，还可以通过改变绕组接法使电动机的极数呈现非整数倍的变极方式，以双层绕组的  $4/6$  变极方式为例。假设变极前三相交流电动机为 4 极接法，4 个磁极的分布规律如图 1-8 所示。

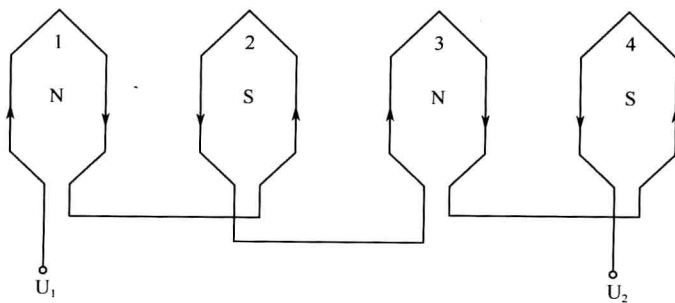


图 1-8 4 极接法示意图

改变图 1-8 中线圈组的接法，将线圈组 3 和线圈组 4 反接，使电流方向发生变化，同时电动机的极数也发生了变化，根据右手定则，确定出磁场分布如图 1-9 所示。