

# 感应电动机的 双馈调速和 串级调速



机械工业出版社

本书论述了感应电动机的双馈调速和串级调速的基本原理、静、动态特性以及实用系统、实用电路的设计方法。此外，还对谐波、转子短路电流（环流）系统仿真、功率因数补偿器、起动、制动、旋转电势补偿、位置检测器等特殊问题作了详细的讨论。在理论方面采用了矢量控制和坐标变换原理，将交流调速的分析方法推进一步。书中介绍的实际应用系统电路的设计方法，在工程实际中很有参考价值。

本书供从事电气专业的工程技术人员及高等院校有关专业师生参考。

## 感应电动机的双馈调速 和串级调速

秦晓平 编著  
王克成

\*

责任编辑：贾欣 版式设计：张世琴  
封面设计：刘代 责任校对：熊天荣  
责任印制：王国光

\*

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出字第117号）

机械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  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $9 \frac{5}{8}$  · 字数 209 千字  
1990 年 11 月北京第一版 · 1990 年 11 月北京第一次印刷  
印数 0,001—2,520 · 定价：7.20 元

\*

ISBN 7-111-02081-2/TM · 283

## 前 言

近年来，随着生产工艺的发展，特别是风机、泵类负载节能的需要，对交流电动机的转速和转矩的调节提出了更多的要求。目前，国内外都十分重视开发交流电动机的调速技术。针对不同的交流电动机和不同类型的机械负载，就要采用不同的交流调速方法。

感应电动机双馈调速又称为双馈电动机 (Double Fed Motor) 调速，它和串级调速 (Cascade Control) 同属感应电动机转子转差功率调节方式。这两种调速方式的共同特征，就是在绕线式感应电动机的转子绕组上外接一个可控电源。在串级调速方式中，这个外接电源是电压幅值可调的直流电源；在双馈调速方式中，这个外接电源是频率、幅值、相位和相序都可调的三相交流电源。由于这个电源的差异，串级调速的调节功能要比双馈调速少一些，所以把串级调速看作部分可控的双馈调速。

双馈调速和串级调速的主要优点是功率变换器的容量比较小，传动系统的效率高，最适合用于风机、泵类负载的调速节能，也可以在冶金机械、化工机械中应用。

目前，国内有关串级调速的专著不多，双馈调速方面的资料更少，使这种技术的普及受到影响。基于这种原因，作者以自己的研究工作为基础，结合国内外有关文献，编写了这本书。

本书的特点是把感应电动机双馈调速和串级调速的原理统一起来，并把串级调速作为双馈调速的一种特殊情况加以

分析。在分析过程中运用了电机的统一理论和坐标变换原理，对双馈调速和串级调速的感应电动机的静态特性和动态特性进行了分析。考虑到工程实际的需要，书中还介绍了一些实用化的方案和电路，并阐述了微型计算机在双馈调速和串级调速方面的应用。

本书初稿经李则民教授审阅，在此谨表衷心的感谢。

由于作者水平有限，经验不足，书中难免有许多缺点和错误，恳请读者批评指正。

---

## 主要符号说明

$E_{20}$	转子开路感应相电势
$E_{2T}$	串级调速的逆变变压器的二次侧相电压
$E_D$	直流电动机的电枢电势
$E_{di}$	串级调速的逆变器的逆变电势
$E_{fj}$	转子侧附加电势
$E_P$	转子开路感应线电势
$i_1$	定子电流的瞬时值
$i_2$	转子电流的瞬时值
$I_d$	串级调速转子侧整流电流
$J$	转动惯量
$k_1$	整流器接线系数
$k_2$	逆变器接线系数
$k_{if}$	电流反馈系数
$k_r = L_m/L_r$	系数
$k_s = L_m/L_s$	系数
$k_{SCR}$	晶闸管变流器的放大倍数
$k_T$	转矩系数
$k_{T1}$	电动机定、转子间的电压折算系数
$k_{Tf}$	转矩反馈系数
$k_{if}$	转速反馈系数
$L_1$	定子每相绕组的漏电感
$L_2$	转子每相绕组的漏电感
$L_d$	串级调速中平波电抗器的电感
$L_r$	转子每相绕组的电感
$L_s$	定子每相绕组的电感

## V

$L_m$	感应电动机的激磁电感
$P$	功率
$p$	微分算子 $p = d/dt$
$P_e$	电动机的电磁功率
$P_M$	电动机的机械功率
$P_S$	感应电动机的转差功率
$P_{TR}$	电源变压器的功率
$P_1$	感应电动机定子侧的输入功率
$p_n$	电动机的极对数
$R_{eq}$	转子整流回路的等效电阻
$r_1$	定子每相绕组的电阻
$r_1'$	折算到转子侧的定子每相绕组的电阻
$r_2$	转子每相绕组的电阻
$r_d$	串级调速中平波电抗器的电阻
$r_T$	串级调速逆变变压器二次侧每相绕组的电阻
$s$	转差率
$s_0$	空载转差率
$s_{gd}$	转差率的给定值
$s_H$	电动机的额定转差率
$s_L$	感应电动机在自然机械特性时的临界转差率
$T$	电磁转矩
$T_C$	电动机轴上的负载转矩
$T_D$	直流电动机的转矩
$T_H$	电动机的额定转矩
$T_L$	电动机在自然机械特性时的临界转矩
$U_1$	电动机定子电压的有效值
$U_{1m}$	电动机定子电压的幅值
$U_2$	电动机转子电压的有效值
$U_{2m}$	电动机转子电压的幅值

$u_1$	电动机定子电压的瞬时值
$u_2$	电动机转子电压的瞬时值
$X_k$	折算到定子侧的每相漏电抗
$X_m$	感应电动机的激磁电抗
$X_p$	折算到转子侧的每相漏电抗
$X_r$	转子每相绕组的感抗
$X_s$	定子每相绕组的感抗
$X_T$	串级调速逆变变压器二次侧每相漏电抗
$X_\mu$	电动机的激磁电抗
$\omega$	转子的转速
$\omega_0$	电源的角频率
$\omega_g$	$g$ 轴坐标轴系的转速
$\Phi$	电动机气隙磁通
$\Phi_*$	直流电动机气隙磁通的相对值
$\psi_1$	定子磁链
$\psi_2$	转子磁链
$\sigma$	漏磁系数 $\sigma = 1 - X_m^2 / X_s X_r$
$\sigma_1$	系数 $\sigma_1 = (L_s L_r - L_m^2) / L_m$
$\lambda$	电动机的过载倍数
$\gamma$	串级调速的整流器的换相重叠角
$\nu$	电流波形的畸变系数
$\Delta P_1$	电动机定子绕组的功率损失
$\Delta P_2$	电动机转子绕组的功率损失
$\Delta P_B$	转子侧功率变换器的功率损失

# 目 录

## 主要符号说明

绪论 .....	1
<b>第一章 感应电动机双馈调速和串级调速的基本原理 .....</b>	<b>6</b>
§ 1-1 感应电动机双馈调速的基本概念和工作方式 .....	6
§ 1-2 感应电动机串级调速的基本原理 .....	13
§ 1-3 感应电动机串级调速的方式和分类 .....	21
§ 1-4 感应电动机双馈调速和串级调速的工作状况和能量 关系 .....	34
<b>第二章 用坐标变换的方法研究感应电动机的电磁         过程 .....</b>	<b>40</b>
§ 2-1 感应电动机的基本方程 .....	40
§ 2-2 坐标轴系的选择 .....	43
§ 2-3 感应电动机在自定向坐标轴系上的电磁过程 .....	46
§ 2-4 串级调速的感应电动机在运动坐标轴系上的方程 .....	54
<b>第三章 双馈调速和串级调速的感应电动机的稳态特         性 .....</b>	<b>58</b>
§ 3-1 双馈调速的感应电动机的机械特性 .....	58
§ 3-2 串级调速的感应电动机的机械特性 .....	69
§ 3-3 转子非正弦电流对感应电动机转矩和无功功率的影 响 .....	86
§ 3-4 串级调速感应电动机转子回路的短路电流 .....	97
§ 3-5 串级调速感应电动机的动力制动 .....	103
§ 3-6 串级调速系统的能量指标 .....	108
§ 3-7 双馈调速系统的能量指标 .....	126
<b>第四章 串级调速系统的过渡过程和闭环控制 .....</b>	<b>133</b>



## VI

§ 4-1	电气传动系统过渡过程的研究方法 .....	133
§ 4-2	求解串级调速感应电动机的微分方程 .....	136
§ 4-3	用模拟计算机对晶闸管串级调速系统进行仿真的方法 .....	146
§ 4-4	感应电动机串级调速过渡过程的特性 .....	149
§ 4-5	串级调速闭环调节系统的原理 .....	157
<b>第五章</b>	<b>感应电动机双馈调速的闭环控制原理和系统</b> ...	<b>165</b>
§ 5-1	感应电动机双馈调速的闭环控制原理 .....	165
§ 5-2	在 $x, y$ 同步坐标轴系上建立的感应电动机双馈调速系统 .....	174
§ 5-3	旋转电势对动态特性的影响及其补偿方法 .....	186
§ 5-4	高性能双馈调速控制系统 .....	197
§ 5-5	作为电网波动补偿装置的双馈调速系统 .....	212
§ 5-6	感应电动机双馈调速系统的仿真 .....	222
<b>第六章</b>	<b>感应电动机串级调速系统和双馈调速系统的设计</b> .....	<b>228</b>
§ 6-1	感应电动机串级调速系统主回路的设计 .....	228
§ 6-2	感应电动机双馈调速系统主回路的设计 .....	238
§ 6-3	感应电动机双馈调速控制系统的设计 .....	256
§ 6-4	转子位置检测器的设计 .....	266
§ 6-5	微型计算机在双馈调速系统和串级调速系统中的应用 .....	274
<b>第七章</b>	<b>感应电动机串级调速系统和双馈调速系统的应用</b> .....	<b>283</b>
§ 7-1	感应电动机串级调速系统和双馈调速系统性能的比较 .....	283
§ 7-2	感应电动机双馈调速系统和串级调速系统的应用 .....	288
	<b>参考文献</b> .....	<b>296</b>

## 绪 论

现代交流电动机调速技术同我国社会主义生产建设有着密切的关系。在工业生产中大量使用着不调速的交流电动机，如果将其中的一部分改为调速运行，不但可以节省电能，而且还可以提高生产能力和保证产品质量。

随着生产的发展，许多原来不调速的生产机械现在有了调速的要求。如风机、水泵、辊道、传送带、某些小型轧钢机、球磨机、矿山用钻孔机等。还有一些生产机械，原来采用的是低效率的交流调速方式，现在要求改用高效率的交流调速方式。例如定子绕组串入电阻或饱和电抗器调速的笼型感应电动机，现在要求改为变频调速；转子绕组串入电阻或频敏变阻器调速的绕线式感应电动机、转差离合器等，现在则要求改为双馈调速和串级调速等高效率的交流调速方式。从70年代开始，电力电子技术和微型计算机控制技术的发展，以及大规模集成电路的应用，为交流电力拖动的发展创造了有利的条件。特别是矢量控制技术等交流调速理论的应用，使交流调速逐步具备了调速范围宽、精度高、动态响应快等良好的技术性能。在调速性能方面已经可以与直流调速相媲美。目前在许多发达国家中很多直流调速已被交流调速所取代，从而克服了直流电动机换向困难、维护不便等缺点。

现代交流调速技术按电动机种类主要可以分为四种类型：

1. 调节感应电动机定子侧供电频率的变频调速；
2. 调节感应电动机定子侧供电电压的调压调速；

3. 调节同步电动机电源频率的变频调速；

4. 绕线式感应电动机转子侧串入附加电势的双馈调速和串级调速。

此外还有无换器电机调速、感应电动机的变极调速，绕线式电动机的转子绕组串入电阻斩波调速等其它调速方式。

本书着重对绕线式感应电动机的双馈调速和串级调速方式进行分析和研究。

所谓双馈调速，就是将电能分别馈入感应电动机的定子绕组和转子绕组。通常将定子绕组接入工频电源，将转子绕组接到频率、幅值、相位和相序都可以调节的独立的交流电源。如果改变转子绕组电源的频率、幅值、相位和相序，就可以调节感应电动机的转矩、转速和电动机定子侧的无功功率。这种双馈调速的感应电动机不但可以在亚同步转速区运转，而且可以在超同步转速区运转。

正弦波交-交变频器最适合作为转子绕组的变频电源。这是因为交-交变频器采用晶闸管自然换流方式，其结构简单，可靠性高；而且交-交变频器能够直接进行能量变换，效率高于交-直-交变频器。交-交变频器的最高频率是电网输入频率的 $1/3 \sim 1/2$ 。虽然这种输出频率范围限制了调速范围，但是对于双馈调速绕线式感应电动机来说，超过同步转速过高，将使转子绕组的机械强度受到损害，所以在双馈调速方式中采用正弦波交-交变频器作为转子绕组的变频电源，使其扬长避短，因而是最为适宜的。

双馈调速的感应电动机集中了同步电动机和感应电动机的特点，有些文献<sup>[17]</sup>称之为异步化同步电动机(Асинхронизирующая синхронная машина)。因为双馈调速的感应电动机的转速可以超过同步转速，所以也叫做超同步串

级调速。

双馈调速的基本思想是，在绕线式感应电动机的转子回路串入附加电势，调节附加电势的大小、相位和相序，就可以调节感应电动机的转矩、转速和定子侧的无功功率。附加电势的频率应当和转子电流的频率相同。这个频率和转差率成正比。转差能量变换是通过转子侧的交-交变频器进行的。由于检测、控制转差频率的电流存在着一些困难，有人提出对转子绕组中的电流进行整流，并以直流形式在转子回路中串入附加电势，这在技术上比较简单易行。这就是感应电动机串级调速的基本出发点。

早在本世纪初，串级调速的原理就被提出来了。最初都是采用电动机机组产生附加电势来调节转速的。其中最著名的就是克雷默(Kramer)式和谢尔毕乌斯(Scherbius)式。前者是采用电机式变换器，后者是采用整流子式交流电动机。

克雷默式串级调速应用得不够广泛，国外曾经有1000kW的水泵采用这种方式调速，调速范围是额定转速的(75~100)%，电机式功率变换器的容量接近300kW。谢尔毕乌斯式串级调速需要用整流子式交流电动机，在国外，应用情况比克雷默式稍好一些。国外曾在高炉鼓风机中采用过这种调速方式，装置中电动机功率为3400kW，电动机的同步转速为1500 r/min，调速范围是(1296~1668)r/min。60年代时国外有这种传动方式<sup>[18]</sup>。这种方式的优点是功率因数高，可以达到 $\cos \varphi = 1$ 。克雷默式和谢尔毕乌斯式这两种串级调速结构复杂，价格昂贵，换相不可靠，维护工作量大，不适于广泛应用，逐步被阀式串级调速所取代。

所谓阀式串级调速是指绕线式感应电动机转子回路中采用静止的阀式整流器(如水银整流器、半导体整流器，目前

多采用晶体二极管整流器)的谢尔毕乌斯串级调速。本书所研究的串级调速就是这种方式。为简明起见,本书把感应电动机的阀式串级调速方式简称为串级调速。

因为串级调速的感应电动机转子侧的整流器是不可控整流器,所以调节功能要比双馈调速少一些。其中最主要的是不能调节定子侧的无功功率,且因逆变器的功率因数低,使整个系统的功率因数很低。此外,在工作速度范围之内没有制动转矩。尽管如此,由于串级调速系统结构简单,价格低廉,可靠性高,调速范围宽,所以在工业上仍然得到广泛的应用。

现代交流调速装置的控制系統都可以建立闭环的自动控制系统。随着自动控制理论的发展,确定电气传动控制系统的形式和参数已经有了普遍适用的方法。直流电动机的转速、电流双闭环从属调节系统,已成为最基本的控制方式。随着矢量控制原理的出现,可以把交流电动机的控制模型和直流电动机的控制模型统一起来,在分析和综合交流电动机控制系统时,可以借鉴直流电动机的控制原理和方法。

矢量控制原理是联邦德国西门子公司的Felix、Blaschke等人首先提出来的〔31〕。它的理论基础是磁场定向原理,即认为感应电动机转子合成磁链矢量在空间的位置是确定的,和其它电磁量的空间矢量也有明确的数学关系。在空间运动坐标系上能够将各个电磁量的空间矢量的关系予以简化。这样一来,在分析双馈调速和串级调速的感应电动机时,数学模型可以简化,确定闭环自动控制系统的参数也十分方便。

感应电动机的双馈调速和串级调速有很多优点。首先,因为通过半导体功率变换器的转差能量只是被控能量的一部

分，所以变换器的容量可小于电动机容量，在可调速的电气传动方式中，双馈调速和串级调速的效率是最高的。其次，它们都有优良的调速性能，适用于多种生产机械的电气传动。更为有利的是，这两种调速方式中的半导体功率变换器和大部分控制单元跟直流电动机调速系统的产品可以通用，在生产制造上有一定的物质基础。因此，双馈调速和串级调速的发展前景是非常广阔的。

双馈调速和串级调速最适合于调速范围不太宽的生产机械。如果充分发挥双馈调速具有超同步转速的特长，还可以提高生产率。近年来，国内已有一些轧钢机、矿井提升机、风机、水泵等生产机械采用了串级调速。双馈调速也走出实验室，在拉钢机、水泵等生产机械上得到实际应用。虽然有这些成功的实例，但和国外的发达国家相比，差距仍然很大，因此，有必要在理论和实践方面进行更深入的工作。

微型计算机的普及应用，使交流电动机调速的控制技术提高到一个新水平。大规模集成电路，可编程序的专用接口，都使控制系统更加完善。

交流调速对电动机的制造技术提出了新的要求，其中对于谐波、转速、定子和转子的容量分配、转子相数、定子绕组和转子绕组的电阻等参数，都要作新的考虑。

# 第一章 感应电动机双馈调速和 串级调速的基本原理

## § 1-1 感应电动机双馈调速的基本 概念和工作方式

感应电动机双馈调速是将绕线式感应电动机的定子绕组接到工频电源，转子绕组接到一个频率、幅值、相位和相序都可以调节的三相电源。通常转子侧的电源采用交-交变频器供电。双馈调速系统的结构如图1-1所示。

感应电动机在稳态运行时，定子旋转磁场和转子旋转磁场在空间是保持相对静止的。当定子旋转磁场在空间以 $\omega_0 = 2\pi f_1$ 的速度旋转时，则转子旋转磁场相对于转子的旋转速度应当是：

$$\omega_s = \omega_0 - \omega = \omega_0 - \omega_0(1 - s) = \omega_0 s \quad (1-1)$$

式中  $\omega_0$ ——定子侧电源的角频率；

$\omega$ ——转子旋转的角速度；

$s$ ——感应电动机的转差率。

上式说明转子磁场相对于转子的转速同转差率成正比。如果感应电动机的转子旋转速度低于同步转速，那么转子旋转磁场和转子的旋转方向相同；如果转子的转速高于同步转速，那么，二者的旋转方向相反。

因为转子的旋转磁场相对于转子的旋转角速度 $\omega_s = 2\pi f_2$ ，所以馈入转子绕组中的电流频率就应当是转差频率，它与转差率之间的关系是：

$$f_2 = f_1 s \quad (1-2)$$

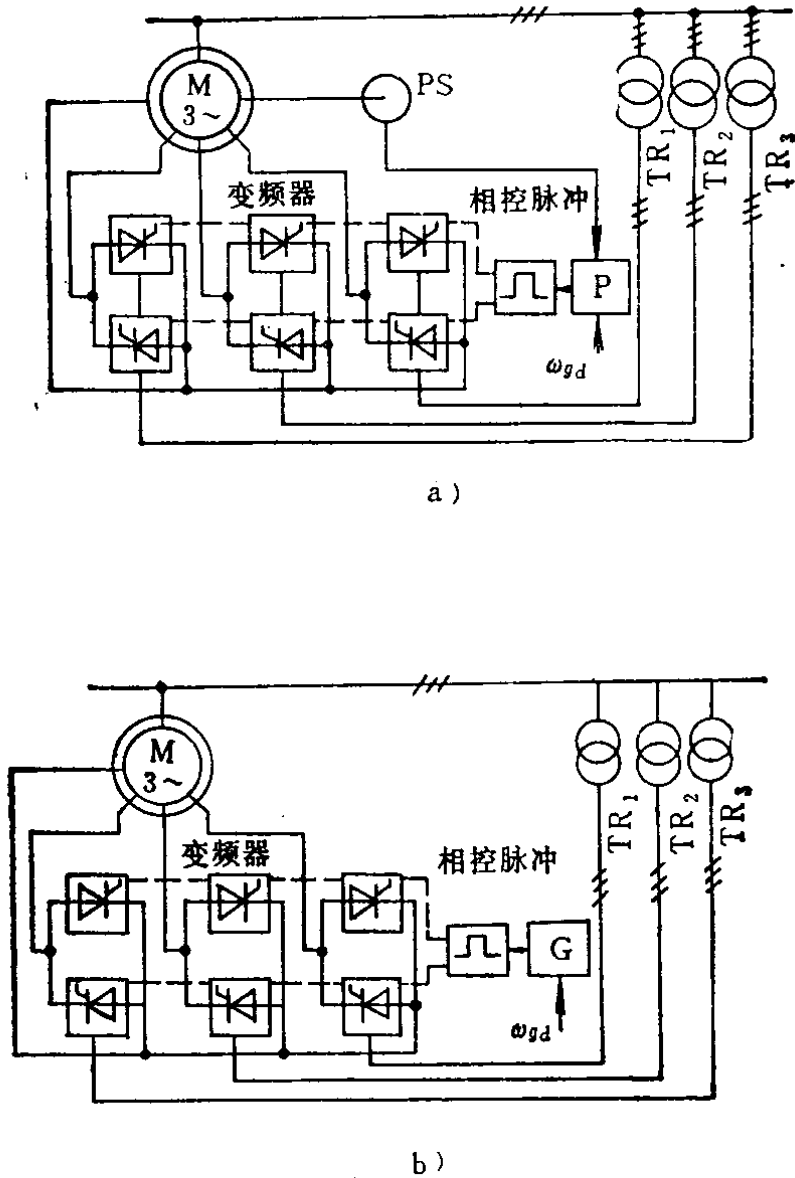


图1-1 感应电动机双馈调速系统的结构图

a) 自控式双馈调速系统的结构图    b) 他控式双馈调速系统的结构图  
 P—控制系统    PS—位置检测器    TR<sub>1</sub>、TR<sub>2</sub>、TR<sub>3</sub>—变压器    G—三相正弦波信号发生器    ω<sub>gd</sub>—转速给定信号

式中  $f_2$ ——转子电流的频率；  
 $f_1$ ——定子电流的频率。

一般的同步电动机是由直流电流激磁的，即转子电流的频率是  $f_2 = 0$ 。根据式 (1-1)、式 (1-2) 可以知道，电动机的工作转速只能是同步转速  $\omega_0$  (或  $s = 0$ )。



双馈调速的感应电动机的转子绕组是接到变频电源上的。根据变频电源频率控制方法不同，双馈调速可以分为他控式和自控式两种控制方式。

他控工作方式又称为同步工作方式。在这种工作方式中，由专门的频率给定装置独立地控制变频器的输出频率。通常转子侧的交-交变频器是由一个独立的频率可调的低频三相正弦信号发生器产生给定信号。每个控制信号的给定值都对应一个确定的频率 $f_2$ ，也就对应着感应电动机的一个确定的转速。这个转速与感应电动机的负载无关，只和 $f_2$ 的值有关，改变频率 $f_2$ 就可以调节感应电动机的转速。他控式双馈调速的感应电动机具有同步电动机的特点，但与同步电动机所不同的是转速可以调节。他控式双馈调速的感应电动机在突加负载、快速调节转速或者其它参数突变的情况下，保持稳定和防止振荡，是一个比较复杂的问题。解决这个问题的主要方法就是快速调节转子绕组中电流的相位和幅值。国外已经有人对他控式双馈调速的感应电动机的稳定性进行了深入的研究〔21〕。他控式双馈调速适用于负载平稳，对调速的快速性要求不高的场合。如风机、泵类负载的调速运行。

自控工作方式又称为异步工作方式。在这种工作方式中，感应电动机转子侧变频电源的频率是通过系统内的调节环节，根据电动机的运行状态自动控制的。这个频率要自动跟踪感应电动机的转差频率。为了检测转差频率，需要在系统中安装位置检测器（也称差频信号检测器）检测转子位置，实现相位控制。自控式双馈调速的感应电动机具有感应电动机的特点，即使转速达到同步转速 $\omega_0$ ，也仍然具有感应电动机的特点，即转速随轴上的负载而变化。与感应电动机不同之处就是定子侧的无功功率是可以调节的。这时，双馈调