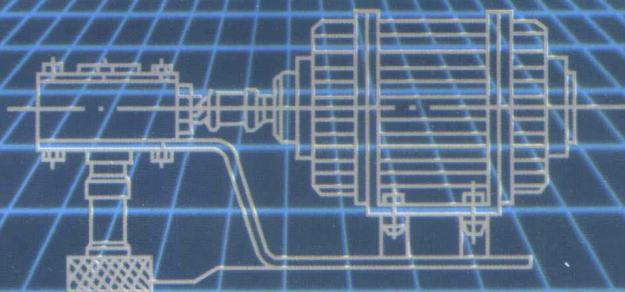


电动机变频器 与电力拖动

戴广平 编著



中国石化出版社

电动机变频器与电力拖动

戴广平 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了异步电动机变频调速器的分类、特点,着重介绍了异步电动机在变频调速时的机械特性,定性分析了交—直—交变频调速器的工作原理及逆变时的调制方案,给出了变频器的主要技术规格。作者根据自己多年来在变频器的推广、应用中的经验体会和具体实践介绍了变频器的安装、调试、检修等具体方法。书中给出了变频器在实际生产中的应用实例,并列举了许多经验数据、曲线及图表。

本书可供从事变频调速系统工作的工程技术人员和工人参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电动机变频器与电力拖动/戴广平编著. —北京:中国石化出版社,1999

ISBN 7-80043-763-9

I. 电… II. 戴… III. ①异步电动机—变频器②电力传动 IV. TM343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02975 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 4 印张 90 千字 印 1—2000

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

定价:8.00 元

前 言

电动机变频调速技术是近年来发展起来的新技术，在美、日、德、英等技术发达国家中应用已十分广泛。与传统的电动机直流传动相比，变频调速系统具有结构简单、安全可靠、方式灵活、节约能源、维护方便等优点。因此目前我国也被列为重点推广项目。

本书从异步电动机的机械特性及其调速方式入手，详细介绍了变频调速器的组成和特点，着重介绍了异步电动机在变频调速时的机械特性，定性分析了交—直—交变频调速器的工作原理及逆变时的调制方案，给出了变频器的主要技术规格及安装使用方法，介绍了变频器在实际生产中的应用实例。书中列举了许多经验数据、曲线及图表。作者根据自己多年来在变频器的推广、应用中的经验体会，试图做到深入浅出，能给应用变频调速器的同行作些参考。

在本书编写过程中，得到北京燕山石油化工公司副总工程师茹玉哲同志的大力支持及一些变频器用户的大力协作，没有他们的帮助，这本书是不可能面世的。特在此表示衷心感谢！由于作者经验水平所限，书中定有不少错误和欠妥之处，衷心希望读者批评指正。

作 者

1998 年 8 月

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 电力拖动系统.....	1
第二节 异步电动机的机械特性.....	3
一、三相异步电动机转速极限.....	4
二、三相异步电动机的机械特性.....	4
第三节 异步电动机的调速方式	12
一、变极对数调速	13
二、变速差率调速	14
三、变频调速	25
第二章 变频调速装置的组成和特点	27
第一节 变频调速装置分类和特点	27
一、变频调速装置分类	27
二、异步电动机在变频调速时的机械特性	31
第二节 变频器的工作原理	35
一、方波幅度调制 (PAM)	35
二、矩形等幅脉冲宽度调制 (PWM)	39
三、正弦脉冲宽度调制 (SPWM)	41
四、交流电动机的矢量控制	43
第三节 变频器的主要技术规格	48
一、铭牌数据	48
二、技术指标	49
三、运行和指示	52

第四节 电动机和变频器容量的选择	57
一、变频器的适用场合	57
二、变频器的选择	58
第五节 变频器的安装及配置	60
一、使用环境	60
二、逆变器安装盘的安装	60
三、配置与接线	66
第六节 异步电动机在变频调速运行时的特点	86
一、启动	86
二、升速	86
三、制动	87
第三章 变频器的应用	89
第一节 变频器的作用	89
一、节能	89
二、构成自动调节系统	90
第二节 变频器应用实例	90
一、变频调速恒压供水系统	90
二、水池水塔供水控制系统的技术改造	98
第四章 变频器的日常维护	107
第一节 定期检查和测试	107
一、电流测试	109
二、电压测试	110
三、功率测试	111
四、高阻表测试	111
第二节 故障显示与检查	112
参考文献	117

第一章 概 述

第一节 电力拖动系统

在诸如石油化工、轻工、纺织等工业部门，广泛使用着电力拖动系统。所谓电力拖动系统是一种电气传动系统，即以电动机为动力驱动控制对象（工作机构）作机械运动的整套装置。如果对象是生产机械，有一定的功率转换（电能变为机械能）要求，习惯上称之为电力拖动系统。该系统通常包括三个主要环节：电动机、控制设备和机械传动机构，后者是指连接电动机与工作机之间的装置，如联轴节、减速机构或换向机构等。

利用控制设备通过电动机使生产机械按照预定的规律运行的系统叫电力拖动自动控制系统。按照被控制的物理量及其变化规律的不同，电力拖动自动控制系统的形式也不同，其中自动调速系统应用最为广泛。此外，张力控制系统、位置控制系统和随动系统等应用也较广。

交流电动机与直流电动机相比，具有结构简单、成本低、维护方便等优点，但过去采用的传统变频装置价格昂贵且交流调速性能差，因此在调速领域里一直是直流传动占统治地位。直流调速的缺点有：

(1) 直流电动机结构复杂，成本高，故障多，维护困难，且不适于恶劣的工作环境（如易燃、易爆及粉尘多的场合），经常因火花大而影响生产。

(2) 换向器的换向能力限制了电机的容量和速度。直流电动机的极限容量和速度之积约为 $10^6 \text{kW} \cdot \text{r/min}$ ，因此大型

机械的电动机设计制造困难，一般单机容量只能做到 12~15MW。

(3) 为改善换向能力，要求电枢漏感小，转子短粗，导致电机和负载机械的飞轮力矩 GD^2 增大，影响系统动态性能。在动态性能要求高的场合，不得不采用双电枢或三电枢，带来造价高、占地面积大、易共振等一系列问题。

(4) 直流电动机除励磁外，全部输入功率都通过换向器流入电枢，电机效率低，由于转子散热条件差，冷却费用高。

交流电动机虽没有上述缺点，但调速困难。近年来，随着电子技术的发展，交流调速的性能已经达到直流传动的水平，装置成本降低到相当或略低于直流传动的程度，而且维修费用及能耗大大降低，可靠性高，因而出现了以交流传动取代直流传动的强烈趋势。采用交流调速的优点是：

(1) 减少维修工作量，减少停机时间，提高产量。一般维修量约是直流传动的 1/4。

(2) 可突破直流电动机的功率、速度极限，可为设备提供更大的动力，从而提高产量。

(3) 减小电动机的转动惯量。

(4) 节能、节水。

(5) 由于交流电动机结构简单，体积小，可形成机电一体化产品。

交流电动机分为同步电动机和异步电动机，均可使用变频调速器。国外各公司对哪种电动机更好的看法有所不同，德、法等国的公司主张用同步电动机，而日、英等国的公司坚持用异步电动机，这两种电动机各有特点：

同步电动机气隙大，制造容易，适合工作于冲击振动场合；异步电动机气隙小（若气隙大，则电动机功率因数及效

率会降低), 按机加工能达到的最小气隙设计, 大容量异步电动机(4000~5000kW)制造困难。

异步电动机控制系统简单。因为同步电动机存在牵入同步和失步问题, 不宜开环调速, 需采用闭环控制; 而异步电动机可以开环工作, 在调速性能要求不高的场合(例如: 风机、水泵等)可以采用简单的 U/f 比开环控制方案, 不用较复杂的闭环控制。另外同步电动机的矢量控制系统比异步电动机的矢量控制系统复杂得多。

总的来说, 同步电动机功率指标好, 但控制复杂, 一般在 3000kW 或 4000kW 以上使用较合算。在石化装置中, 大量使用异步电动机, 因此本书以异步电动机调速为主来讨论交流变频调速问题。

第二节 异步电动机的机械特性

由电机学可知, 在定子线圈中通入三相电流产生了旋转磁场。如果开始时转子是静止的, 那么, 旋转磁场与转子导条就有相对动力, 于是在各导条里产生感应电动势和感应电流。根据电磁力

$$F = BLI$$

的关系(式中 F 为电磁力, B 为磁感应强度, L 为导条有效长度, I 为导条中的电流), 转子各导条中的电流与旋转磁场相作用产生电磁转矩。把各导条的电磁转矩加起来, 就是驱动转子转动的总电磁转矩 M_{dc} 。如果 M_{dc} 大于轴上的总反抗转矩 M_f , 则整个转动部分将加速转动, 由于转子转速逐渐增高时, M_{dc} 逐渐减小, 所以, 总可以达到 $M_{dc} = M_f$, 转动就成为匀速了。

一、三相异步电动机转速极限

三相异步电动机的转速不能超过该电动机旋转磁场的转速。因为当转子转速接近同步转速时，转子导条中的感应电动势和感应电流很小，因而产生的电磁转矩也很小，这样将使电动机因带不动机械负载而减慢转速。如果转子的转速达到同步转速，则转子导条中就无电磁感应，因而 $M_{dc} = 0$ ，因此电动机不可能在这种转速下运转。所以同步转速是作为电动机运行的一个极限。例如 $p = 2$ 时，同步转速为 1500 r/min， $p = 3$ 时为 1000 r/min 等等。

带负载运行时，转速 n 低于同步转速 n_1 。 $(n_1 - n)$ 称为转差，也称滑差。 $(n_1 - n) / n_1$ 称为转差率，亦称滑差率。以 S 表示：

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

一般三相异步电动机的转差率为 1% ~ 5%，转差率较大的电动机可达 7% 以上。

二、三相异步电动机的机械特性

电动机带动生产机械运行的时候，由于负载经常有变化，所以电动机的转矩也经常变化。转矩变化时，电动机的转速如何变化，是使用电动机的人很关心的问题，因为这不仅关系到生产率，而且也影响产品质量。转速随电磁转矩的变化，称为电动机的机械特性，即 $n = f(M_{dc})$ 。为了简便，以后将 M_{dc} 简写为 M 。

1. 在正常运行范围内 $n = f(M)$ 的关系

空载时，电动机转速很接近于旋转磁场的转速。当负载增加后，电动机转速下降了，虽然转速下降的百分数不大，但转子与旋转磁场相对运动的转差率却增加了许多倍，转子

导条中的感应电动势和感应电流在正常运行范围内是差不多正比于转差率的。因此，转差率增加多少倍时，感应电流就增加多少倍，于是电磁转矩也就增加多少倍，结果与负载转矩达到新的平衡。

需要说明，电磁转矩变化时，转速变化是很小的（电动机从空载到满载，转速变化不超过 10%）。电动机这种机械特性称为硬特性，如图 1-1 所示。

2. 电动机从静止到同步转速范围内 $n = f(M)$ 的关系

上面我们只研究了工作范围内的机械特性。这当然是很重要的问题，因为电动机的正常运行就是工作在这个范围内的。但是，至少有两个问题引起我们注意。第一，如果负

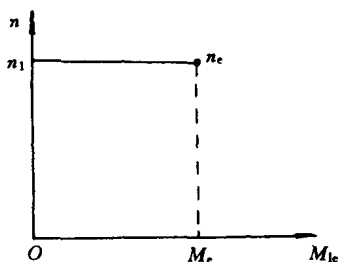


图 1-1 从空载到满载范围内的 $n = f(M)$ 曲线

载转矩继续增加，电动机在电磁转矩方面是否可以无限制地适应呢？它的过载能力究竟有无限限制？第二，电动机开始启动时，它的电磁转矩究竟有多大？这个问题对使用的人是很重要的，因为我们知道如果电磁转矩比负载转矩大得多就启动得快，可以提高生产率；如果电磁转矩小于负载转矩，就根本不能启动。为了解决上述两个问题，需要研究从 $n = 0$ 到 $n = n_c$ 转速范围内的 $n-M$ 关系。

下面详细说明三相异步电动机的机械特性。为了讨论方便，我们用转差率 S 来表示转速。于是研究 $n = f(M_{dc})$ 的关系就变为研究 $M_{dc}-S$ （简称为 $M-S$ ）的关系了。

1) 转子电路的影响

① 转子电路的频率及 e_2 与 i_2 的关系

转子与旋转磁场有相对运动，转子导条中的感应电动势、感应电流的频率与相对运动的速度是直接联系着的。

设旋转磁场的转速为 n_1 (r/min)，转子转速为 n (r/min)，定子线圈中的频率为 f_1 (Hz)，角频率为 ω_1 (rad/s)，转子导条中的频率为 f_2 (Hz)，角频率为 ω_2 (rad/s)，电动机的极对数为 p ，则旋转磁场与转子的相对转速为 $n_1 - n$ ，即对于转子的导条而言，旋转磁场以 $n_1 - n$ 的速度旋转。这样，转子导条中 e_2 及 i_2 每秒钟变化 $(n_1 - n/60) \cdot p$ 个周期。即

$$\begin{aligned} f_2 &= [(n_1 - n)/60] \cdot p \\ &= \{[(n_1 - n)/n_1](n_1/60)\} p \\ &= S(n_1/60)p = Sf_1 \end{aligned}$$

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi f_1 = S\omega_1$$

例如 $S = 0.02$ 时， $f_2 = 0.02 \times f_1 = 0.02 \times 50 = 1$ (Hz)，即 e_2 与 i_2 每秒钟变化一个周期。

转子导条中产生了感应电动势 e_2 后，由于导条是由端环短路起来的，所以 e_2 就与导条电阻及漏磁电抗的电压降相平衡。即：

$$e_2 = r_2 i_2 + L_2 (d i_2 / d t) \quad (1-2a)$$

式中 r_2 及 L_2 分别为转子导条的电阻及漏磁电感。

如果把 e_2 ， i_2 近似地认为是正弦变化的，则 (1-2a) 式可写成复数形式：

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= r_2 \dot{I}_2 + j\omega_2 L_2 \dot{I}_2 \\ &= r_2 \dot{I}_2 + jS\omega_1 L_2 \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1-2b)$$

如果在电动机中 $\omega e_1 L_2 / r_2$ 约为 3, 那么在 $S = 0.02$ 时, $S\omega_1 L_2$ 便 $\ll r_2$ 。其中 S 为转差率; ω_1 为定子线圈中磁场的角频率; L_2 为转子漏磁电感; r_2 为转子电阻。因此在讨论工作段的机械特性时, 认为 e_2 与 i_2 同相, 是合乎实际情况的。

② 转子总电磁转矩

$$M_{dc} = C\Phi I_2 \cos\phi_2 \quad (1-3)$$

式中 M_{dc} ——转子上的总电磁转矩;

C ——系数, 是个与电动机结构有关的常数;

Φ ——旋转磁场每个极的磁通量;

I_2 ——导条中电流的有效值;

$\cos\phi_2$ —— e_2 与 i_2 相位差的余弦, 即是转子电路的功率因数。

此电磁转矩公式可以推导证明, 我们只从物理概念上来加以解释。

电磁力是由旋转磁场与 I_2 相互作用产生的, 所以 M 与 Φ 及 I_2 成正比是显而易见的。问题是为什么还与 $\cos\phi_2$ 有关? 这是因为当转差率 S 较大时, i_2 与 e_2 是不同相的。图 1-2 示出当 i_2 滞后于 e_2 时各导条中电流的空间分布及其与磁场的相对位置, 这时在同一磁极下的电流并不都是同一方向的, 所以产生的电磁转矩有些是相互抵消的。并且磁极最强的地方电流并不最大, 这说明 M 是受 $\cos\phi_2$ 影响的。假如 $\phi_2 = 90^\circ$ (实际上当然不可能), 那么各导条的电磁转矩便都彼此抵消了。虽然 Φ 及 I_2 是有数值的, 但总电磁转矩却为 0。

③ I_2-S 及 $\cos\phi_2-S$ 曲线

从 (1-2 b) 式得知:

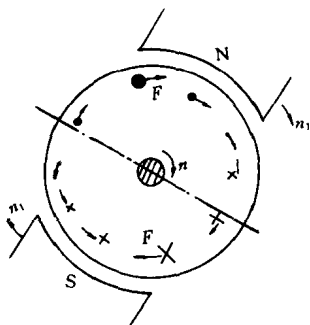
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2 + jS\omega_1 L_2}$$

但 E_2 正比于旋转磁场与转子的相对转速 $n_1 - n = S n_1$ 。如果转子静止 ($S=1$) 时, e_2 的有效值为 E_{20} , 则 S 为任意值时,

$$E_2 = S E_{20}$$

于是 i_2 的有效值可写为

$$\begin{aligned} I_2 &= S E_{20} / \{r^2 + (S\omega_1 L_2)^2\}^{1/2} \\ &= E_{20} / [(r^2/S)^2 + (\omega_1 L_2)^2]^{1/2} \quad (1-4) \end{aligned}$$



如果设 $\omega_1 L_2 / r_2 = 3$, 那么当 $S > 0.5$ 时, $(r^2/S)^2$ 一项便可略去, 于是

$$I_2 = E_{20} / \omega L_2 = \text{常数}$$

而当 $S < 0.1$ 时, $(\omega_1 L_2)^2$ 一项便可略去。于是

$$I_2 = (E_{20}/r_2) \cdot S_0$$

这样就可得出 I_2-S 的曲线,

图 1-2 当 n 与 n_1 相差甚大时 如图 1-3 所示。

转子导条中电流的空间分布及其旋转磁场的相互位置 $\cos\phi_2$ 与 S 的关系:

$$\cos\phi_2 = r_2 / [r_2 + (S\omega_1 L_2)^2]^{1/2}$$

仍以 $\omega_1 L_2 / r_2 = 3$, 则 $S < 0.1$ 时, $\cos\phi_2 \approx 1$ 。而当 S 增大, 则 $\cos\phi_2$ 便逐渐减小。 $\cos\phi_2-S$ 的曲线如图 1-4 所示。

④ $M-S$ 曲线

在 $M = C\Phi I_2 \cos\phi_2$ 中, C 为常数, Φ 亦近似为常数, 因此 M 与 S 的关系可由 I_2-S 与 $\cos\phi_2-S$ 的曲线相乘来得, 如图 1-5 所示。图 1-5 也可用 $n = f(M)$ 曲线表示。

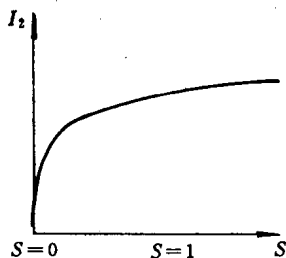


图 1-3 I_2-S 曲线

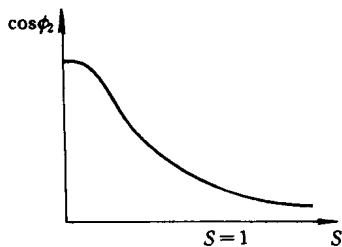


图 1-4 $\cos \phi_2-S$ 曲线

对 $M-S$ 的形状可作如下的解释：

当 $S=0$ 时，即转子与旋转磁场同步，这时转子导条中的 $e_2=0$ ，因而 $i_2=0$ ，所以 $M=0$ 。

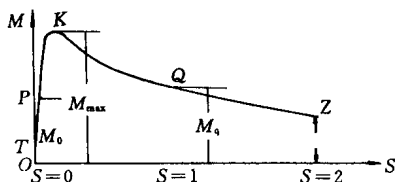


图 1-5 $M-S$ 曲线

当 S 逐渐增加，但其值很小时， I_2 几乎是随 S 成正比增加，而 $\cos \phi_2$ 则几乎保持恒定。因此 M 是随 S 直线增加的。在图 1-7 中 OK 一段就是这样。

当 S 值变得更大时， I_2 的增加变得缓慢了，而 $\cos \phi$ 却减小较快，于是出现了电磁转矩最大值——最大转矩 $M_{\max}$ ，然后减小下来。当 S 再增大时， I_2 增加甚慢，而 $\cos \phi$ 却几乎与 S 成反比，因此出现了 KQ 段 $M-S$ 的关系， M 下降甚多。

当 $S=1.0$ 时，这是转子转速等于 0 的情况，这时的 M 叫做电动机启动转矩 M_0 。启动转矩比最大转矩要小很多。

如果电动机正在某方向旋转时，突然使旋转磁场反转，

则出现 $S > 1$ 而接近于 2 的情况，那时的 $M-S$ 关系如图 1-5 中 QZ 段所示。在 QZ 段里，电磁转矩与转速的方向是相反的，这种情况称为制动。在制动情况下电动机将很快地停转，此时的电磁转矩称为制动转矩。

⑤ 转子电阻 r_2 对 $M-S$ 曲线形状的影响

在绕线式电动机启动和调速时，及在一些控制用的异步电动机中，有时故意加大转子电阻以造成某种形态的机械特性来达到增加启动转矩调节转速和消除无讯号时自转现象。那么，究竟 r_2 的改变对 $M-S$ 曲线有何影响呢？

从 I_2-S 及 $\cos\phi-S$ 曲线中可以看出如加大 r_2 则二曲线将变为如图 1-6 (a) 所示。于是 $M-S$ 曲线就变成图 1-6 (b) 的形状。

从图 1-6 (b) 中可以看出，加大 r_2 后可能加大电动机

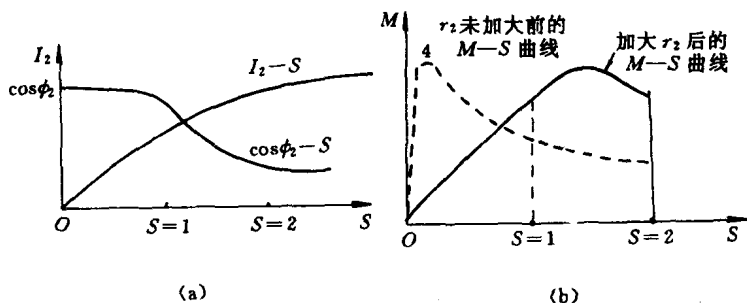


图 1-6 转子电阻 r_2 的影响

(a) 加大 r_2 后 i_2-S 及 $\cos\phi_2-S$ 曲线；

(b) 加大 r_2 前后 $M-S$ 曲线比较

的启动转矩，同时使 $M-S$ 曲线向右移了，或者说电动机的机械特性变软了，在同一负载转矩下，转速将变低，这样就达到了调节转速的目的。

2) $n = f(M)$ 的曲线及对额定转矩、最大转矩及启动转矩的影响

$n = f(M)$ 的曲线如图 1-7 所示。在 $n = f(M)$ 曲线上有三个特殊点对选择和使用电动机很有用处，即额定转矩 M_e 、最大转矩 $M_{\max}$ 及启动转矩 M_q 。

额定转矩是电动机满载时传给负载的转矩，使用电动机时不能长期地超过这个转矩，否则，电动机会过热。额定转矩以 M_e 表之，其单位为 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 或 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

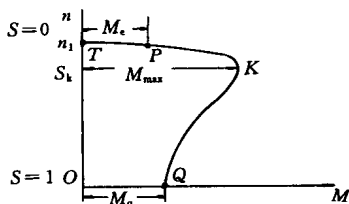


图 1-7 $n = f(M)$ 曲线

最大转矩 $M_{\max}$ 是电动机可能发出的最大的电磁转矩，它标志着电动机的瞬时过载能力，即电动机运行中如有一个时间不长即可消失的过载，只要不超过最大转矩，电动机是可以承受的，不致停转。但若超过此值，电动机便将不能维持转动而停转。这是在电动机拖动变化负载时必须要考虑的。

启动转矩 M_q 是 $n = 0$ 时电动机的电磁转矩。它必须大于启动电动机时轴上的反抗转矩，否则电动机就不能开始转动。

3) 电动机的外加电压对 $n = f(M)$ 曲线的影响

电动机是接在电网上工作的，电网电压的波动会影响电动机运行。究竟是怎样影响的呢？后果又怎样呢？

加在电动机定子线圈上的电压 U_1 减小时，则电动机中旋转磁场强度随之成比例的减弱。因而每磁极下的磁通量 ϕ 也成比例的减小。同时在同一转速下，转子导条中 e_2 与 i_2