

异步电动机的矢量变换 控制原理及应用

郭庆鼎 王成元 编著

辽宁民族出版社

324828

异步电动机的矢量变换 控制原理及应用

郭庆鼎 王成元 编著



辽宁民族出版社

1988·沈阳

324828



异步电动机的矢量变换控制原理及应用

郭庆鼎 王成元 编著

辽宁民族出版社出版、发行 沈阳工业大学印刷厂印刷
(沈阳市南京街6段1里2号)

字数：288,000

开本：787×1092 1/32

印张：13 3/8

印数：1—1,000

1988年8月第1版

1988年8月第1次印刷

责任编辑：金苍大

责任校对：包四成

封面设计：宇冰

ISBN 7-80527-111-9

T·2

定价：3.00元

内 容 简 介

本书较系统地介绍了异步电动机矢量变换控制的基础理论、控制原理和控制系统。

全书共分九章。前四章介绍了异步电动机的机电能量转换，矢量控制基本原理，坐标变换和矢量变换，磁场定向方法和电磁转矩控制，矢量控制基本方程式和控制系统状态方程。第五章至第八章介绍了矢量控制系统的磁通观测理论，电机参数变化和谐波转矩的影响，脉宽调制 PWM 逆变器的开关模式。最后一章介绍了矢量控制系统的实际应用。

本书可供研究所、工厂电气工程技术人員及高等院校教师参考。可作为工科大学电气类专业高年级或研究生的教学参考书。

序 言

随着电力电子学、微电子学和自动控制理论的发展，交流电动机的调速驱动，近年来有了迅猛的发展。由于交流调速驱动克服了直流传动的缺点，发挥了交流机固有的优点，并很好地解决了交流机原有调速性能欠佳的缺点，所以当今交流调速驱动已进入了与直流传动相媲美、相竞争、相抗衡的时代，进而有取代的趋势。

交流调速驱动或电力电子学是一门近代新兴的边缘学科。它是以电力半导体元器件为核心，横跨电力、电子和自动控制多学科领域。它的内容正在不断充实、丰富和发展中。国内在交流调速理论方面并不逊色，但在实用化方面差距较大，近些年来也发展较快，近期将会出现一个交流调速发展的新热潮。让我们广大电气传动工作者，做出更大的贡献，来迎接这个交流调速新热潮的到来吧！

矢量变换控制是一种新的控制思想、新的控制理论和控制技术，它从1971年一出现，就引起人们极大的重视。仅这十几年的光景，就已进入了实用化阶段。其所以引人注目，就是因为它可以把交流机能够像直流机一样进行控制，并可以取得像直流机一样的调速性能。过去曾在调速领域里一直被直流机占据统治地位的年代，一去不复返了；在人们的观念中，只有直流传动调速性能好的旧观念也已被打破。

矢量变换控制是在电机统一理论、机电能量转换和坐标变换理论的基础上发展起来的。由于它具有先进性、新颖性和实用性，很多人都想了解它和掌握它，因而非常需要这方

面的书籍。当前，在国内这方面资料、专业书籍较少的情况下，沈阳工业大学郭庆鼎教授和王成元副教授编著的《异步电动机的矢量变换控制原理及应用》一书是很及时的，真如“雪中送炭”。它将对促进我国近代交流调速的发展，起到重要作用，是具有参考价值和实用意义的。

该书重点突出地阐述了矢量变换控制的理论基础、原理和控制系统；分析了谐波转矩和谐波损耗；介绍了各种磁通检测方法和磁通观测器；讨论了电机参数变化的影响及补偿方法；还精辟地叙述了近年来发展很快的脉冲宽度调制（PWM）型逆变器的原理及矢量控制应用问题；最后理论联系实际地对数控机床的矢量变换控制系统，做了系统地论述。这是既理论性强又实用性强的一本好书，基本概念清楚，内容深入，推荐给有关广大科技人员和教师，值得一读，定会受益非浅也。

东北工学院 教授 佟纯厚

1987年12月8日 于沈阳

目 录

第一章 旋转电机中的机电能量转换	(1)
§ 1-1 磁能和磁共能.....	(1)
§ 1-2 磁场力和电磁转矩.....	(11)
§ 1-3 交流电机的机电能量转换.....	(24)
§ 1-4 三相异步机的电感和电磁转矩.....	(30)
§ 1-5 三相异步机的磁场和电磁转矩.....	(36)
§ 1-6 直流电机的电磁转矩.....	(50)
§ 1-7 三相异步机的运动方程和动态特性.....	(52)
第二章 三相异步机矢量控制的稳态分析	(64)
§ 2-1 异步电动机变频调速和矢量控制.....	(64)
§ 2-2 矢量控制的稳态方程式.....	(72)
第三章 异步电机的坐标变换和矢量变换	(82)
§ 3-1 原型电机的统一方程式.....	(83)
§ 3-2 两相异步机和原型电机间的变换.....	(91)
§ 3-3 变换矩阵及约束条件.....	(99)
§ 3-4 三相异步机和原型电机间的变换.....	(102)
§ 3-5 从静止轴系 dq 到同步旋转轴系 MT 的 变换.....	(116)
§ 3-6 矢量变换.....	(126)
第四章 矢量控制中的磁场定向和基本方程式	(152)

§ 4-1	磁场定向原则·····	(152)
§ 4-2	磁场定向坐标中基本方程式·····	(154)
§ 4-3	矢量方程·····	(169)
§ 4-4	转子磁场定向技术·····	(181)
§ 4-5	电机参数变化对磁场定向的影响·····	(193)
§ 4-6	矢量控制电压去耦方程式·····	(204)
§ 4-7	控制系统状态方程式·····	(208)

第五章 三相异步电动机矢量变换控制系统中的磁

通观测理论·····	(232)
§ 5-1 dq 轴系状态方程·····	(233)
§ 5-2 常用的磁通运算法及其存在的问题·····	(237)
§ 5-3 电动机的磁通观测器·····	(241)
§ 5-4 磁通观测器的极点配置方法·····	(245)
§ 5-5 按最小维观测器理论设计磁通观测器·····	(248)
§ 5-6 用磁共能法检测磁通·····	(253)

第六章 电机参数变化对系统性能的影响·····(258)

§ 6-1 三相异步机速度控制系统的仿真模型·····	(258)
§ 6-2 电机参数变化对系统性能影响的分析·····	(262)
§ 6-3 矢量变换速度控制系统·····	(267)

第七章 三相异步机调速系统中的谐波转矩和谐波

损耗·····	(275)
§ 7-1 三相异步机的电流时间谐波·····	(276)
§ 7-2 谐波转矩对异步机稳态运行性能的影响·····	(293)

§ 7-3	谐波损耗和电机效率的降低	(301)
第八章	PWM逆变器的开关模式	(308)
§ 8-1	普通 PWM 逆变器的工作原理	(308)
§ 8-2	SPWM控制模式的求解方法	(316)
§ 8-3	“ Δ ”调制法简介	(324)
§ 8-4	双极性SPWM逆变器中开关元件延迟导通所引起的振荡效应	(326)
§ 8-5	PWM 逆变器控制模式优化的一般方法	(329)
§ 8-6	磁通轨迹控制的 PWM 优化方法	(345)
§ 8-7	在线优化PWM控制模式	(355)
§ 8-8	矢量变换控制系统中的正弦电流控制型逆变器的开关模式	(362)
§ 8-9	具有抑制高频谐波及快速电流响应的电流控制型逆变器的 PWM 控制模式	(373)
第九章	数控机床的矢量控制驱动系统	(385)
§ 9-1	数控机床对驱动系统的要求	(385)
§ 9-2	三相异步机矢量变换控制驱动系统	(387)
§ 9-3	转子电阻变化的影响	(395)
§ 9-4	电动机参数变化的补偿原理和方法	(401)
§ 9-5	控制系统的制动原理和方法	(412)
参考文献		(415)

第一章 旋转电机中的机电 能量转换

本章阐述了旋转电机中机电能量转换的基本原理。机电能量转换过程是磁场和运动的载流导体相互作用的结果。当电机转子旋转时，使电机内部耦合磁场的储能发生变化，同时引起电源对磁场输入（输出）电能的变化，而磁场储能变化一定伴随着机械能的产生。亦即，电能只有以磁场为媒介才能转换为机械能，或反之。

本章先研究机电能量转换过程中的能量基本关系和耦合场的作用，然后推导了旋转电机中电磁转矩的基本公式。目的是为以后分析讨论打下基础。

本章和以后各章如不做说明，各物理量的单位均指以国际单位制表示。

§1-1 磁能和磁共能

一、磁场能量

图1—1表示一个带有励磁线圈的铁芯。假设：

1. 铁芯截面 S 中的磁通密度 B 值处处相等。磁通 Φ 被全部限制在铁芯内，亦即不存在漏磁场；

2. 励磁线圈的电阻实际上是分布在整個线圈内，现用一个集中参数为 R 的外部电阻同一个没有电阻的理想电感线

圈 L 串联来表示原有的励磁线圈；

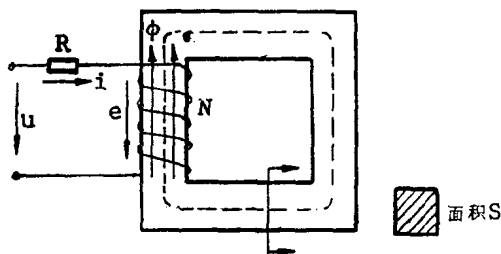


图 1—1 带有励磁线圈的铁芯

3. 铁芯截面积 s 处处相等，磁路平均长度为 l ；

4. 图中各物理量的方向表示的是正方向。

铁芯内的磁场是电流 i 通过 N 匝线圈后建立起来的。由安培环流定律可知

$$F = Ni = Hl \quad (1-1)$$

式中， F 为励磁线圈的磁势， H 为铁芯内磁场强度。当铁芯线圈匝数和铁芯尺寸确定后， H 值与电流 i 大小成正比。

在磁场强度 H 作用下，铁芯内各点处建立了磁场，磁场的强弱用磁感应强度（磁通密度） B 来描述，其大小不仅决定于 H 值，还与导磁材料的性质有关，即

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

式中， μ 为导磁材料的磁导率，它一方面取决于磁性材料的导磁性能，另一方面，对一般导磁材料来说，它还于磁强强度 H 的大小有关。上述导磁材料 H 和 B 间关系可用图 1—2 所示的磁化曲线来表示，图中 μ 值随 H （或 B ）值变化。当 H 值增加到一定程度时，即使再增大 H 值， B 值也变化不大，这种现象称之为饱和，此时 μ 值随之迅速下降。

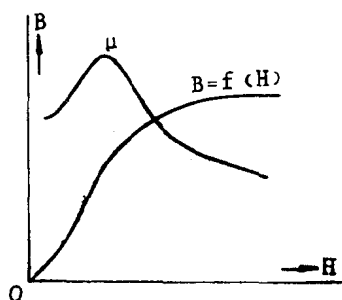


图 1—2 导磁材料的磁化曲线

根据 (1—1) 和 (1—2) 式, 可得

$$F = Hl = \frac{B}{\mu} l = SB \frac{l}{\mu S} \quad (1-3)$$

对于图 1—1 所示磁路, 截面积 S 处处相等。上式中, $SB = \phi$, 于是

$$F = \phi R_m = \frac{\phi}{\Lambda_m} \quad (1-4)$$

上式又称为磁路的欧姆定律, R_m 定义为铁芯磁路的磁阻, Λ_m 定义为磁导。对图 1—1 磁路而言

$$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l} \quad (1-5)$$

显然, 某段磁路的磁导 (磁阻), 决定于组成磁路所用材料的磁导率和磁路的几何尺寸。

将图 1—2 中的纵横坐标比例尺扩大 S 和 l 倍以后, 就将材料的磁化曲线变为具体磁路的磁势和磁通关系曲线, 称之为 $F-\phi$ 曲线, 如图 1—3 所示。 F 和 ϕ 的关系, 由于受制于材料的磁化特性, 所以一般为非线性。磁路几何尺寸确定后, 磁导

(磁阻)值决定于 μ 值,即决定于导磁材料性能和磁场的饱和程度。当 μ 值为常数(磁路为线性)时,磁导(磁阻)为某一定值。

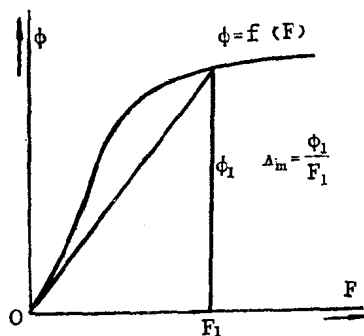


图 1—3 铁芯磁路 $F-\phi$ 曲线

当线圈电流由零增加到 i 时,若不考虑磁滞效应,铁芯的磁通密度由零上升到 B ,则铁芯内的磁场储能增为

$$W_m = V \int_0^B H dB \quad (1-6)$$

式中 V 为铁芯体积。上式还可写为

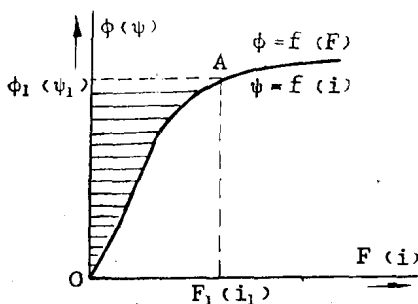


图 1—4 铁芯中的磁能和磁共能

$$W_m = \int_0^B Hl \cdot S dB = \int_0^\phi F d\phi \quad (1-7)$$

当线圈磁势为 F_1 时, 铁芯内磁场储能可用图1—4 中阴影面积 $O A \phi_1 O$ 表示。

链过线圈 N 的磁链定义为

$$\phi = N\phi \quad (1-8)$$

若磁链 ϕ 是由线圈本身通入电流 i 产生的, 则称之为线圈 N 的自感磁链。当通入线圈单位电流时, 链过 N 匝线圈的磁链为

$$L = \frac{\phi}{i} \quad (1-9)$$

式中 L 定义为线圈 N 的自感。于是电流 i 通过 N 匝线圈时, 链过 N 匝线圈的磁链为

$$\phi = Li \quad (1-10)$$

自感 L 反映了铁芯线圈产生自感磁链的能力。根据 (1—4)、(1—5) 式和 (1—8)、(1—9) 式, 可得

$$L = N^2 \frac{\mu S}{l} = N^2 \Lambda_m = \frac{N^2}{R_m} \quad (1-11)$$

可见线圈自感决定于磁路尺寸、导磁材料的性能和线圈匝数。当 μ 值随饱和程度变化时, L 值也随之发生变化; 当磁路为线性时, L 为常值。

公式(1—7)又可表示为

$$W_m = \int_0^\phi N i d\phi = \int_0^\psi i d\phi \quad (1-12)$$

图1—4的坐标若以 i 和 ϕ 表示时, W_m 可用阴影面积 $O A \phi_1 O$ 表示, 当磁路为线性时, $\phi = f(i)$ 为一直线, 其斜率就是电感值 L , 此时磁场储能为

$$\begin{aligned}
 W_m &= \frac{1}{2} i \phi = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} \frac{\phi^2}{\Lambda_m} \\
 &= \frac{1}{2} F \phi
 \end{aligned}
 \quad (1-13)$$

公式(1-7)、(1-12)和(1-13)表明,磁场某时刻的储能仅与该时的 F 和 ϕ 值或者 i 和 ϕ 值有关,亦即仅与系统的即时状态有关,而与磁场的建立过程无关,故磁场储能为状态函数。

若改变式(1-7)和(1-12)的积分变量,可得

$$W'_m = \int_0^i \phi di = \int_0^F \phi dF \quad (1-14)$$

此处 W'_m 定义为磁共能,其值可用图 1-4 中面积 OF_1AO 或 Oi_1AO 表示。磁能与磁共能之和为

$$W_m + W'_m = i \phi = F \phi \quad (1-15)$$

对于线性系统,代表磁能和磁共能的两块面积相等,两者均可用(1-13)式表示。

应注意,磁共能并没有明确的物理意义,它仅是一个计算量。引出这个量,是因为在一定条件下,用它计算电磁装置的机械力或者转矩是比较方便的。

二、感应电势和电能输入

根据能量守恒原理,磁场储能一定是由外电路输入电能转换而来的。若各物理量正方向如图 1-1 所示,在 dt 时间内,输入铁芯线圈净电能增量为

$$dW_e = (u - iR)idt = -eidt \quad (1-16)$$

由法拉第电磁感应定律可知

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-17)$$

将上式代入(1-16)式,得

$$dW_e = Fd\phi = id\phi \quad (1-18)$$

由图1-4和式(1-7)、(1-12)可知,上式右端 $Fd\phi$ 或 $id\phi$ 两项还表示为磁场储能的增量 dW_m ,即对于图1-1所示的电磁装置,电源输入的电能完全转换为磁场储能。这个能量的转换,是通过在线圈内产生感应电势 e 而实现的,感应电势 e 是电能和磁能转换的必要条件。

若输入线圈电流 i 增加,磁链 Ψ 立即跟着增加,变化的磁链在线圈内感生电势 e ,依靠这个感应电势,使电路从电源吸收电能,此电能转换为磁能。反之,磁场储能一发生变化,磁场就要对电路做出反应(产生感应电势),引起电能输入(输出)变化。

三、双边励磁电磁装置的磁能和磁共能

1. 磁链和电感

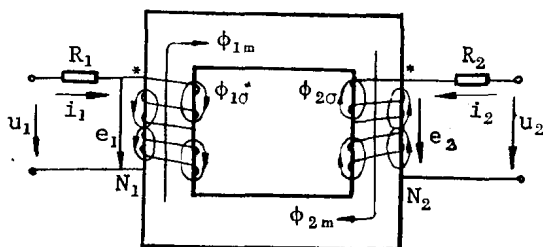


图1-5 双边励磁电磁装置

图1-5中,线圈 N_1 通入电流 i_1 后,不仅会在铁芯内产生励磁磁通 ϕ_{1m} ,而且会产生漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 。漏磁通过铁芯链

过部分线匝后主要经过空气路径而闭合。漏磁通的分布是较为复杂的,图中象征性地画出几条路径,目的是用来说明这种复杂性。因为空气磁阻很大,所以漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 相对励磁磁通 ϕ_{1m} 要小得多。 ϕ_{1m} 和 $\phi_{1\sigma}$ 两者之和就是线圈 N_1 产生的全部自感磁通,其中 ϕ_{1m} 通过铁芯路径还于线圈 N_2 交链,所以又称之为线圈 N_1 对线圈 N_2 的互感磁通,而 $\phi_{1\sigma}$ 只与线圈 N_1 本身线匝交链。线圈 N_2 也产生上述两部分磁通。

令

$$\phi_m = \phi_{1m} + \phi_{2m} \quad (1-19)$$

磁通 ϕ_m 是两线圈励磁磁通之和,也是限制在铁芯路径内的总磁通,又称之为主磁通,它同时链过两个线圈。若线圈 N_1 接入交流电源,线圈 N_2 接上负载,图1—5表示的就是一台单相变压器,原副边电能的传递正是依靠主磁通 ϕ_m 为媒介才得以实现。

线圈 N_1 的自感磁链 ϕ_{11} 可表示为

$$\phi_{11} = N_1(\phi_{1m} + \phi_{1\sigma}) = \phi_{1m} + \phi_{1\sigma}$$

利用电感参数,可将上式表示为

$$\phi_{11} = L_{1m}i_1 + L_{1\sigma}i_1 = L_{11}i_1 \quad (1-20)$$

式中, L_{1m} 、 $L_{1\sigma}$ 和 L_{11} 分别称之为线圈 N_1 的励磁电感、漏磁电感和自感。显然

$$L_{11} = L_{1m} + L_{1\sigma} \quad (1-21)$$

同理

$$L_{22} = L_{2m} + L_{2\sigma} \quad (1-22)$$

线圈 N_1 对线圈 N_2 的互感磁链可表示为

$$\phi_{21} = N_2\phi_{1m} = L_{21}i_1 \quad (1-23)$$