

感应电动机的矢量控制及应用

华南工学院 符 曦 编

机械工业出版社

感应电动机的矢量控制及应用

华南工学院 符 曦 编

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证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

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 $4 \frac{1}{2}$ ·字数 88 千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,800·定价 1.10 元

统一书号: 15033·6362

目 录

第一章 矢量变换控制的基本原理	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 矢量变换控制的基本原理	2
§ 1-3 矢量控制传动系统的特点	7
第二章 坐标变换和矢量变换	9
§ 2-1 空间相量概述	9
§ 2-2 坐标变换和矢量变换	12
一、基本概念	12
二、坐标变换公式	14
§ 2-3 功率不变约束的坐标变换	19
一、功率不变约束	19
二、功率不变约束的坐标变换	21
第三章 矢量变换控制的感应电动机数学模型	26
§ 3-1 合成电流矢量	26
一、定子合成电流	26
二、转子合成电流	28
§ 3-2 感应电动机的基本方程	31
一、定子基本方程	31
二、转子基本方程	34
三、矢量变换的基本方程	37
四、转子归算到定子的基本方程	39
§ 3-3 感应电动机的数学模型	41
一、电压方程的建立	41
二、数学模型中各变量的关系	45

§ 3-4	感应电动机数学模型与直流电动机 数学模型比较	48
第四章	感应电动机矢量变换控制系统	50
§ 4-1	概述	50
§ 4-2	原理性的感应电动机矢量变换控制系统	51
一、	控制系统的组成及工作原理	51
二、	矢量变换的运算功能	53
三、	感应电动机磁通的检测和运算	62
四、	电压控制振荡器(VCO)	70
§ 4-3	电流型逆变器供电的异步电动机矢量变 换控制系统	72
一、	控制系统的组成及工作原理	72
二、	二重化电流型逆变器	74
三、	运行特性	76
§ 4-4	同步电动机矢量变换控制系统	77
一、	同步电动机转矩的产生	77
二、	同步电动机的矢量变换	78
三、	同步电动机矢量变换控制系统	80
§ 4-5	滑差频率式的感应电动机矢量变换控制系统	85
一、	基本原理	85
二、	滑差频率控制式的矢量变换控制	87
三、	滑差频率式的感应电动机矢量变换控制系统	88
第五章	感应电动机矢量变换控制系统的应用	92
§ 5-1	轧钢机主传动控制系统	92
一、	系统概况	92
二、	变频装置的构成	92
三、	系统的控制方式及控制过程	93
四、	运行特性	95
五、	传动系统的特点	96
§ 5-2	大型抄纸机拖动系统	97

一、系统概况	97
二、系统的控制方式及控制过程	98
三、长网机和压榨机的控制	100
四、传动系统的特点	101
§ 5-3 压延主机的同步电动机矢量变换控制系统	103
一、系统概况	103
二、系统的控制方式及控制过程	103
三、运行特性	106
四、传动系统的特点	106
附录	108
I 脉宽调制型逆变器	108
一、脉宽调制控制方式	108
二、脉宽调制型逆变器主回路	109
II 可关断晶闸管逆变器	114
一、可关断晶闸管的特性	114
二、可关断晶闸管的关断方式	116
三、可关断晶闸管逆变器主回路	117
四、可关断晶闸管交流调速控制系统	119
参考文献	121

第一章 矢量变换控制的基本原理

§ 1-1 概 述

在电力拖动系统中，经常使用有交流和直流两种电力拖动方式。从电力拖动的作用领域来看，由于感应电动机，特别是鼠笼型异步电动机结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜，所以，交流拖动一直占着主要的地位。然而，直流电力拖动却具有良好的调速特性。直流电动机调速系统的静态性能和动态性能比交流电动机调速系统理想。因此，探求一种与直流电动机调速性能尽可能完全相同的交流电动机控制方案，是从事电力拖动工作者多年向往的奋斗目标，是交流电力拖动系统控制的关键技术问题之一。

随着新型功率元件的出现和微型计算机日益广泛的应用，近年来，研制成功了各种具有良好运行性能和维护性能的交流电动机调速系统，用感应电动机替代直流电动机控制的传动系统相继出现和实用化，获得了划时代的进展。一种称为矢量变换控制的感应电动机调速装置，已在少数国家系列生产和推广应用，获得满意的效果。例如，日本东京芝浦电气株式会社于1979年研制成功了矢量控制电流型逆变器系统（TOSVERT-400），代替中、大容量的直流电动机调速系统，应用于大型造纸机上，系统在大速度范围（ $1/30 \sim 1/40$ ）内能稳定控制，调速精度为 $\pm 0.1\%$ 。1980年又研制成功了矢量控制正弦波交-交变频器系统（TOSCYCLO-800），应用于大型轧钢机主传动上，系统效率比直流拖动系统约高

2%，电动机容量为800~15000kW。对于45kW以下的中、小容量的交流电动机，采用了矢量控制G-TR（大功率晶体管）逆变器系统（TOSVERT-150），能满足于恒转矩、恒功率或速度平方转矩负载特性的生产机械电力拖动，最高频率为120Hz。

近些年来，我国在交流电动机调速系统的研制和应用方面，相应地有了很大的发展。除了一般的调压调速、电磁调速、串级调速和无换向器电动机调速系统外，对变频调速装置的实验研究和工业应用，特别是应用微型计算机实现的调速控制，得到了一定的成效和突破。例如，带转差控制的GTO（可关断晶闸管）PWM（脉冲宽度调制）变频调速系统，数字-模拟复合控制的变频调速系统，用微型计算机控制的电压型逆变器系统和应用微型计算机实现的PWM变频调速系统等等。但是，对于感应电动机的矢量变换控制系统，目前正进行着理论研究和实验试制工作，有待工业上的应用和推广。我们相信，在不久的将来，随着新型功率元件质量的提高和微型计算机的广泛应用，感应电动机的矢量控制及其应用，一定会迅速发展起来，得到新的突破。

§ 1-2 矢量变换控制的基本原理

矢量变换控制（*Transvector Control*）是1971年由西德Felix Blaschke等人首先提出来的，这是对感应电动机提出的一种新的控制思想和控制技术，是交流电动机的理想调速方法。矢量变换控制的基本思路，是以产生同样的旋转磁场为准则，建立三相交流绕组电流、两相交流绕组电流和在旋转坐标上的正交绕组直流电流之间的等效关系。从而可以按直流电动机的控制规律来控制交流电动机。即是说，矢量变换控

制的基本想法是要把交流电动机模拟成与直流电动机相似，能够像直流电动机一样来进行控制。

直流电动机具有优良控制性能的特点，在于其励磁电路和电枢电路相互独立，因而可以分别调节励磁电流和电枢电流，控制直流电动机的励磁磁通、转矩和转速。

直流电动机的工作原理简图如图1-1a所示。定子上装有两个相互垂直放置的励磁绕组1和补偿绕组2，转子上的电枢绕组3通过整流子起到了一个固定着的绕组的作用。如果励磁绕组1流过励磁电流 i_f ，则在电动机中建立起磁场，即产生气隙磁通 ϕ 。欲要在转子上产生转矩，则必须在电枢绕组3中通入电枢电流 i_a 。电枢电流和磁场的相互作用，产生一个如图中所标方向的力。为了补偿电枢绕组所产生的电枢反应，可在补偿绕组2通入反向相等补偿电流 i_c ，亦即使 $i_c = -i_a$ 。

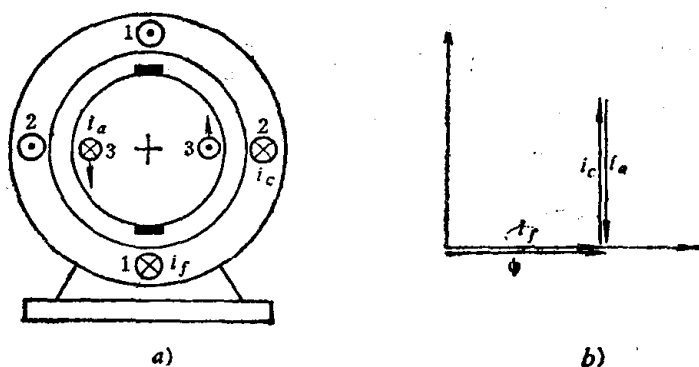


图1-1 直流电动机中的磁场和电流

在直流电动机中，由励磁电流 i_f 产生气隙磁通 ϕ ，且由电枢电流 i_a 和补偿电流 i_c 共同与磁通作用而产生转矩 M 。直流电动机电磁转矩的表达式为

$$M = C_M \phi I_a \quad (1-1)$$

式中, C_M 为直流电动机的结构常数。

磁通和电流的空间矢量图如图 1-1 b 所示。如果忽略磁路饱和, 且设补偿绕组全补偿了电枢反应影响, 电刷置于几何中性线时, 则气隙磁通 ϕ 正比于直流励磁电流 i_f , 且气隙磁通 ϕ 与电枢电流 i_a 互成直角坐标关系, 并为两个独立变量, 互不相关。这样, 可以方便地分别调节电枢电流 i_a 和励磁电流 i_f , 进行转矩、转速控制, 这就是直流电动机调速性能优越的控制特点。

在感应电动机中, 转子绕组是一个不供电的本身短路的绕组, 感应电动机的工作原理简图如图 1-2 a 所示。定子绕组 1 通以三相交流电流, 建立起一个以一定转向和转速旋转的旋转磁场。以相对运动关系而言, 我们可以把定子绕组看成是旋转的, 而定子绕组通以直流励磁电流 i_1 以形成固定磁场旋转, 其对转子的作用是相同的。根据电磁感应法则, 由励磁电流 i_1 产生磁通 ϕ 与电枢绕组 3 的电枢电流 i_3 的作用, 产生转矩而使转子旋转。这时, 励磁电流 i_1 、补偿电流 i_2 、电枢电流 i_3 的矢量关系如图 1-2 b 所示。

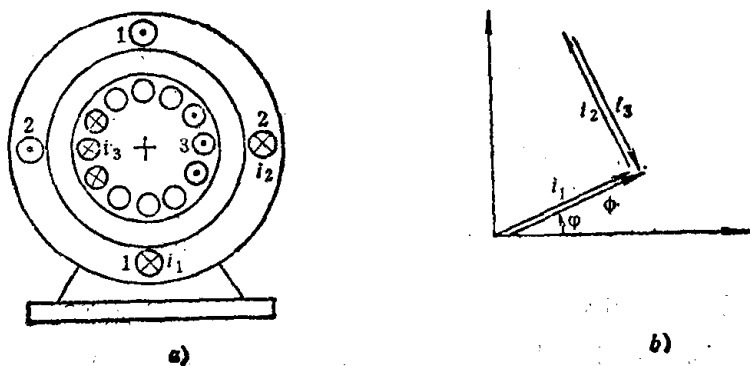


图 1-2 感应电动机中的磁场和电流

由图1-1 b 和图1-2 b 可见, 感应电动机的磁通和电流的空间矢量关系与直流电动机的磁通和电流的空间矢量关系是相同的, 所不同点是在于感应电动机的磁通 Φ 的矢量是旋转的, 且其旋转角度 φ 是个变量。

实际上, 感应电动机的定子绕组是固定的, 而不是由旋转绕组通以直流励磁电流 i_1 以形成固定磁场旋转。但是, 如果我们能通过矢量变换方法, 按照产生同样的旋转磁场原则, 则可以等效地进行分析。

感应电动机的电磁转矩与气隙磁通 Φ_m , 转子电流 I_2 和转子功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关, 其表达式为

$$M = C_m \Phi_m I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-2)$$

式中, C_m 为感应电动机的结构常数。注意, 感应电动机的气隙磁通 Φ_m 是由定子电流和转子电流共同磁化的结果所产生, 并以电流频率的同步速度在空间旋转。转子电流 I_2 在感应电动机中是不能直接控制的。转子功率因数角的表达式为

$$\varphi_2 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{s x_2}{r} \quad (1-3)$$

式中, s 为转差率, x_2 为转子电抗, r 为转子电阻。

由式 (1-2) 和式 (1-3) 可见, 感应电动机的电磁转矩 M 不仅与气隙磁通 Φ_m 和转子电流 I_2 有关, 还与转速有关, 且 Φ_m 和 I_2 不是两个独立变量。感应电动机转矩的这种复杂性是感应电动机难以控制的基本原因。也就是说, 要在动态中准确地控制感应电动机的转矩是比较困难的。

如果将式 (1-2) 中的 Φ_m 与 $\cos\varphi_2$ 的乘积当作一个新变量, 称为转子磁通 Φ_2 , 则感应电动机的电磁转矩表达式变为

$$M = C_m \Phi_2 I_2 \quad (1-4)$$

式 (1-2) 中的气隙磁通 Φ_m 与式 (1-4) 中的转子磁通 Φ_2

的相差量为转子漏磁通 $\phi_{\sigma 2}$ 。

由电机学知道，感应电动机的矢量图如图 1-3 所示（图中参数符号按本书所定符号标出）。

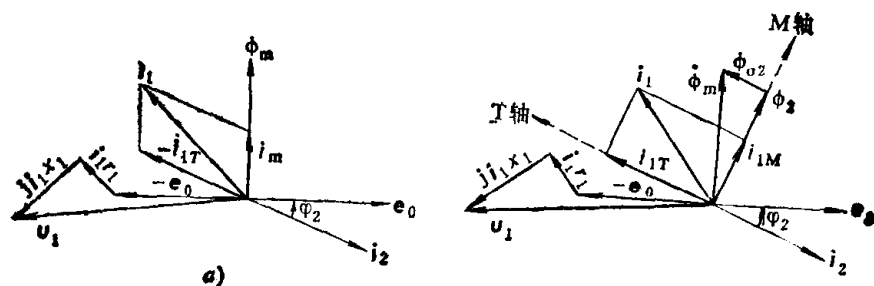


图1-3 感应电动机的矢量图

图1-3 a 为一般形式的矢量图。定子电流 i_1 是转子电流 i_2 与励磁电流 i_m 的矢量和，励磁电流 i_m 与气隙磁通 ϕ_m 同向。图 1-3 b 为引入新变量 ϕ_2 的矢量图。利用 $\phi_2 = \phi_m \cos \varphi_2$ 关系，并以转子磁通 ϕ_2 取作磁场定向新坐标 M 轴和与之垂直的 T 轴组成 M-T 新坐标轴系，则定子电流 i_1 可以重新分解为两个分量：一个为与转子磁通 ϕ_2 同相的磁场电流分量 i_{1M} ，另一个为与转子磁通 ϕ_2 相垂直的转矩电流分量 i_{1T} 。由图 1-3 b 可见， i_{1T} 与 i_2 方向相反。

可以证明，如果 M-T 直角坐标系赋以感应电动机的同步转速，则感应电动机定子电流在 M 轴上的分量 i_{1M} 就等效于直流电动机的励磁电流 i_f ，感应电动机定子电流在 T 轴上的分量 i_{1T} 就等效于直流电动机的电枢电流 i_a 。这样，我们就可以从外部对 i_{1M} 和 i_{1T} 进行控制，即可以将感应电动机模拟成与直流电动机相似而进行控制，这就是感应电动机矢量变换控制的基本原理。

感应电动机定子电流在 M 轴上的电流分量 i_{1M} 是产生磁

通 ϕ 的, 故称为磁场电流分量(简称磁化电流)。在T轴上与磁通相互垂直的电流分量 i_{1r} 是感生转矩 M 的, 故称为转矩电流分量(简称转矩电流)。若保持磁化电流 i_{1u} 为恒值时, 则感应电动机的电磁转矩与转矩电流 i_{1r} 成正比。

由上面分析可知, 要将感应电动机模拟成与直流电动机相似而进行控制, 其主要的问题是选取以转子磁通 ϕ_2 为磁场定向的M-T坐标轴系并对定子电流 i_1 在M轴和T轴的电流分量 i_{1u} 和 i_{1r} 进行控制。从数学上来说, 就是将用A, B, C静止坐标系表示的感应电动机矢量变换到按转子磁通方向为磁场定向并以同步速度旋转的M-T直角坐标系上, 即进行矢量的坐标变换。可以证明, 在M-T直角坐标系上, 感应电动机的数学模型和直流电动机的数学模型是极为相似的。因此, 可以像直流电动机一样去控制感应电动机, 以获得优越的调速性能。

有关坐标变换和矢量变换问题以及矢量变换控制的感应电动机的数学模型, 将在第二章和第三章详细讨论。

§ 1-3 矢量控制传动系统的特点

矢量变换控制的感应电动机调速装置, 已在少数国家进行系列化生产, 并成功地应用于大型轧钢机主传动和大型抄纸机分部传动上, 获得了满意的性能指标和运行效果。通过实践证明, 感应电动机的矢量变换控制系统的共同特点是:

1. 速度控制精度和瞬态过程的响应时间与直流电动机调速系统大致相同, 调速精度可高达 $\pm 0.1\%$ 。
2. 自动弱磁控制与直流电动机调速系统相同, 弱磁范围为4:1。
3. 过载能力强, 能承受冲击负载和突然加、减速运行,

并可以突然可逆，在四个象限运行。

4. 能适应于恒转矩，恒功率或速度平方转矩负载特性的生产机械，应用面宽。

5. 性能良好的交流传动系统效率比直流传动系统效率高 2%，节省电力，经济性好。

6. 适用于大、中、小容量的感应电动机电力拖动。

第二章 坐标变换和矢量变换

§ 2-1 空间相量概述

任何在空间按正弦形式分布的物理量都可以用空间相量表示。一般情况下，感应电动机的定子绕组均采用对称的三相绕组，当三相交流电流 i_A 、 i_B 、 i_C 流入三相绕组后，就形成旋转的绕组磁势。若略去空间谐波磁势，则各相绕组产生的基波磁势可分别用每相磁势空间相量 F_A 、 F_B 、 F_C 表示。其长度代表基波磁势的大小，分别和各相电流的瞬时值成正比，其方向代表基波磁势幅值所在的方向，分别处于各相绕组的轴线上。基波磁势空间相量如图 2-1 所示。

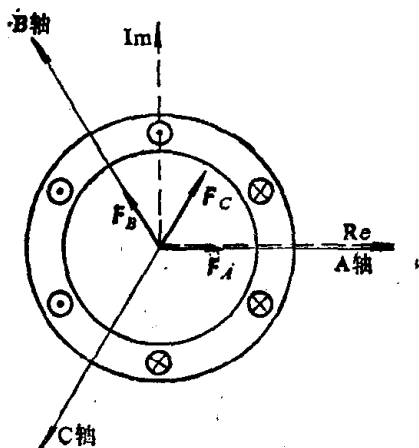


图2-1 基波磁势空间相量

图中，若取轴线A作为实轴 Re ，虚轴 Im 领先于实轴 90° ，则在此电动机剖面的空间复平面内，有下列的关系式成立：

$$\left. \begin{aligned} F_A &= F_A e^{j0} = F_A \\ F_B &= F_B e^{j120^\circ} = a F_A \\ F_C &= F_C e^{j240^\circ} = F_C e^{-j120^\circ} = a^2 F_A \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中， F_A 、 F_B 、 F_C 分别表示各相基波磁势的幅值。

$$\begin{aligned}
 a &= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ \\
 &= -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}
 \end{aligned} \quad (2-2)$$

根据相量合成法则, 将各相磁势空间相量 F_A 、 F_B 、 F_C 相加, 可得到三相合成磁势空间相量。取合成磁势的 $\frac{2}{3}$ 倍, 定义为磁势空间综合相量 (简称为磁势空间相量), 用 F 表示, 则有

$$F = \frac{2}{3}(F_A + F_B + F_C) \quad (2-3)$$

利用式 (2-1), 则磁势空间相量可表示为

$$F = \frac{2}{3}(F_A + aF_B + a^2F_C) \quad (2-4)$$

由于磁势的大小和电流成正比, 所以在三相系统中 若各相的相电流瞬时值分别用 i_A 、 i_B 、 i_C 表示, 则这三个瞬时值电流构成一个电流空间相量, 用 i 表示, 则有

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{2}{3}(i_A + i_B + i_C) \\
 &= \frac{2}{3}(i_A + ai_B + a^2i_C)
 \end{aligned} \quad (2-5)$$

电流空间相量在复平面上的表示如图 2-2 所示。一般说来, 电流空间相量的长度和位置都是随时间变化的。

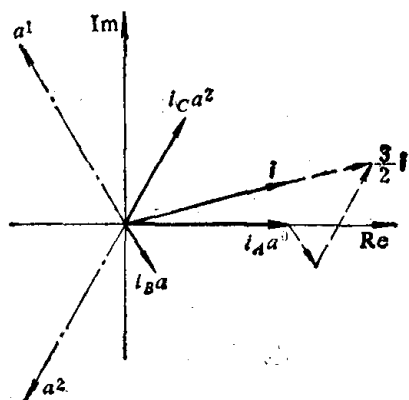


图2-2 电流空间相量

当三相电流没有零序分量时 (当电动机三相绕组是星形联接而中点不外接时, 此条件可以满足), 即 $i_A + i_B + i_C = 0$

时，可以证明，磁势空间相量 F 在 A 、 B 、 C 三相轴线上的投影正好等于 F_A 、 F_B 、 F_C ，且此时 F 和电流 i_A 、 i_B 、 i_C 之间出现了一一对应关系。即是说，任意一组的 i_A 、 i_B 、 i_C 将唯一地确定了一个磁势空间相量 F ，反之亦然。实际上，考虑到三相电流没有零序分量时的约束条件 $i_A + i_B + i_C = 0$ ，一组电流 i_A 、 i_B 、 i_C 只包含两个独立变量，而一个空间相量 F 也包含着实部的和虚部的两个独立变量，所以两者之间有可能一一对应。

如果电流空间相量 i 为已知时，由图2-2可见，各相电流的瞬时值为

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \operatorname{Re}\{i\} \\ i_B &= \operatorname{Re}\{i a^{-1}\} \\ i_C &= \operatorname{Re}\{i a^{-2}\} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

电流空间相量 i ，还可以用下式表示，即

$$i = i_a + j i_b \quad (2-7)$$

式中， i_a 为 i 在实轴 Re 上的投影， i_b 为 i 在虚轴 Im 上的投影。

由式 (2-5) 和式 (2-7) 可见

$$i = i_a + j i_b = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

同理，可定义电动机的磁链空间相量 Ψ 及电压空间相量 u ，即有

$$\Psi = \Psi_a + j \Psi_b = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$$u = u_a + j u_b = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

将三相电动机中各相的物理量综合起来，用空间相量加以表达，具有下列优点：

1. 电流空间相量代表三相合成磁势，磁链空间相量代表三相合成磁场，具有一定的物理意义，直观且形象化。
2. 由于某物理量的空间相量在某一相绕组轴线上的投影，可得到该物理量的瞬时值，所以，根据空间相量的变化情况，很容易求出各相有关物理量的时间波形图。
3. 可以证明，感应电动机的转矩正比于磁链空间相量和电流空间相量的矢积，所以在空间相量图上能直观地确定电动机转矩的大小和方向。
4. 由于引入空间相量概念时并不要求各相的物理量随时间作正弦变化，所以，半导体变流装置输向电动机绕组的非正弦电流或非正弦电压，也可以用空间相量加以分析。

§ 2-2 坐标变换和矢量变换

一、基本概念

根据感应电动机矢量变换控制的基本原理，要将感应电动机模拟成与直流电动机相似而进行控制，必须经过两步的坐标变换和矢量变换：第一步是将对称三相 A, B, C 静止坐标系表示的感应电动机矢量变换到固定在定子上的 $\alpha-\beta$ 平面直角坐标系上；第二步是将矢量从固定的 $\alpha-\beta$ 直角坐标系变换到按转子磁通方向为磁场定向并以同步速度旋转的 $M-T$ 直角坐标系上。因此，解决空间矢量如何进行坐标变换的问题，是感应电动机矢量变换控制的一个关键性的问题。

空间矢量的坐标变换如图2-3所示。

对应于图 2-3 a，对称三相 A, B, C 静止坐标系的 A