

自动装置中的 微电机

Ю. С. 切切特著



国防工业出版社

自动装置中的微电机

Ю. С. 切切特 著

电器科学研究院电机研究室译



国防工业出版社

1961

本书阐述了自动装置中用的一些主要类型的微电机——伺服电动机、测速发电机、迴轉變压器、同步联結微电机，研究它們在自动化綫路中使用时的理論問題与实际問題。

本书供电机及动力系之大学生以及在自动化、遙控、計算解答技术部門工作的工程師、技术員作参考用。

苏联 Ю. С. Чечет 著 ‘Электрические микромашины автоматических устройств’ (Госэнергоиздат 1957 第一版)

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

人民教育印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

787×1092 1/16 印張 13 1/2 310 千字

1959 年 5 月第一版

1961 年 10 月第二版第二次印刷

印数: 7,601—11,600 册 定价: (11) 1.55 元

統一书号 15034·523

給 中 国 讀 者

現代化的自动化遙控及計算-介答裝置中运用着一系列的电机元件,它們能够保證綫路可靠和准确的工作。

本书的任务是介紹这类元件的工作原理及使用特性。

如果我的这一点劳动在偉大的中华人民共和国——我們苏联人民对它有着深厚的兄弟般的感情和真誠的友誼——的建設工作中,能够对中国兄弟的研究工作者有一些帮助的話,这对我将是最大的愉快。

Ю·切切特教授

莫斯科 1958年 12 月 29 日

前 言

苏联共产党第二十次代表大会关于1956~1960年苏联发展国民经济第六个五年计划的指示中，整个第二部分都是阐述生产过程的机械化和自动化。此外，在其它的部分中(机床制造、重型机器制造、无线电及仪表制造工业等)均有关于自动化的指示，第一部分讲到：“……5年内，自动化的仪器和工具的产量大约增加2.5倍”。由此可见，党和政府是十分重视我国的自动控制，遥控和计算解答技术的发展。

由于微电机经常是自动控制线路中不可缺少的元件，它的理论及实际使用问题引起了人们的注意。

在同步联结系统中使用的电机，可称为自动控制用微电机发展史中的“元老”。早在十九世纪中叶，俄国学者(A. II. 达维多夫、K. II. 坎斯坦金诺夫、B. Ф. 别特鲁舍夫斯基)及国外学者(凯斯列尔、乌依斯顿)已研究成功军事用的同步联结装置(如大炮射击的自动化)。以后利用变频的各种电气变流器(如整流开关)的系统也开始发展(И. Т. 马鲁金、包尔别-别那尔等人)。现在使用的几乎全部是恒频的感应式微电机(即自整角机)的系统。在自整角机理论及计算方面，M. II. 科斯琴科、Д. B. 瓦西里也夫、Д. A. 郭尔斯基、Г. II. 史杜尔曼及 A. T. 约瑟非扬等人做了许多工作。A. T. 约瑟非扬和 Д. B. 斯维卡尔尼克发明无接触自整角机。在自整角机理论方面工作的国外学者中应该提到皮里、来特、林维尔、武德沃特以及西门子公司、西德通用电气公司、美国通用电气公司、西屋公司的工程师们。

其他类型微电机(伺服电动机、测速发电机、迴转变压器)的理论工作在不久之前才大力开展起来。这里，应当提到 A. A. 巴别尔诺夫、И. Я. 列贺曼、E. M. 罗布辛娜、Г. II. 史杜尔曼、B. M. 卡加以及 K. M. 那尔西则等人的研究工作。

在本国及国外的技术资料中，都缺少这方面系统性的综述文献。因此，学习这个专业的高等学校学生遇到了相当大的困难，这些是促使作者写此参考书的原因。此书内容是以作者莫斯科动力学院讲授“自动装置中微电机”一课之讲义为基础。由于在教学计划中这门功课教学时间的限制，本书仅能对自动控制线路中常用的主要类型微电机进行研究。

作者在写本书时，认为读者对电机原理已经了解得很清楚。

本书的资料多半是独创的，亦是作者在微电机方面多年研究工作之结果。本书为作者著教学参考书的第一次尝试，因此十分希望读者指出该书的缺点和错误。

作者对技术科学副博士 H. A. 亚弗林斯基在阅初稿时所提出的宝贵意见表示谢意。

作 者

序 言

在自动控制、遙控及計算解答技术中所使用的微电机,按其所执行之任务可分四大类:

- 1) 伺服电动机;
- 2) 测速发电机;
- 3) 迴轉變压器;
- 4) 同步联結系統用的电机。

在上述微电机中,除迴轉變压器只可能是交流的外,其他既可能是交流又可能是直流的形式。

下面将简单地叙述一下各类型微电机之用途,并利用最简单的线路图說明其应用。研究较复杂之线路图是其他专业书的任务。

伺服电动机之用途为将輸入的电气信号(控制电压)轉变为其軸上机械运动。在图 B-1

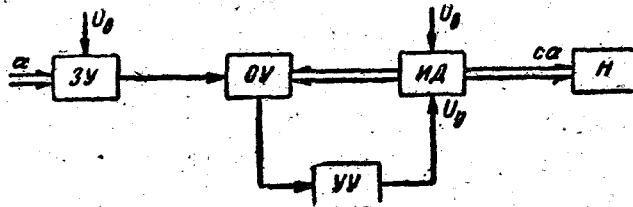


图 B-1 带有伺服电动机的自动控制线路图。

中示出具有伺服电动机之自动控制方框图。当由电网电压 U_0 激磁的发动机构 $3Y$ (Зоводящее устройство) 轉动 α 角时,修整机构 (Отрабатывающее устройство) OY 将发出电气信号。机构 OY 的电气信号經放大机构 YU 放大后,成为控制电压 U ,并加于伺服电动机 MA 上 (伺服电动机由电网之电压 U_0 激磁)。由于它是直接或经过减速器与負載轉軸相連,因此带动后者轉动。同时由于 MA 与 OY 之間有机械的反饋,控制电压 U 将逐渐减小,当 Y 轉动 α 角后, U 将等于零,伺服电动机停止旋轉。結果負載軸轉了 α 角或与其成比例之 $c\alpha$ 角。

测速发电机之用途为将机械旋轉变成电气信号即輸出电压。因此它可以用在各种不同的线路图中应用。在图 B-2 所示为利用测速发电机 T 測量任意机构 M 的瞬时轉速的装置。测速发电机 T 借机械方法与机械 M 联結在一起。假設該机构轉軸的轉速为 n 轉/分,当激磁电压 U_0 为恒定时,則测速发电机輸出端的电势与轉速成比例:

$$E = c'n.$$

測量該电势之电压表 B 的刻度可直接刻成“轉/分”。

由于测速发电机輸出端之电势

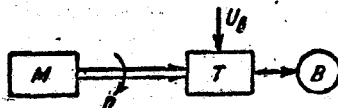


图 B-2 用测速发电机測量轉速之线路图。

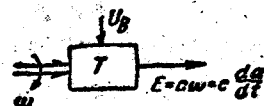


图 B-3 测速发电机輸出电势。

$$E = c\Omega = c \frac{d\alpha}{dt}$$

与角速度成比例，即与轉动角 α 之一次微分成比例(图 B-3)，因此它可作为电气微分的元件。实际上，电气微分之线路是很复杂的，除测速发电机之外，还包括伺服电动机、放大器、迴转变压器或电位计等。

最后，测速发电机还用于供产生加速和阻尼信号的场合。

迴转变压器^①之任务是在输出端得到与轉子轉角的某种函数成比例的电压，例如与該角的正弦、余弦成比例(正弦、余弦迴转变压器)，或者与轉角本身成比例(綫性迴转变压器)。迴转变压器之线路图示于图 B-4 中。

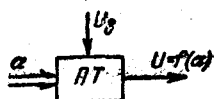


图 B-4 迴转变压器线路图。

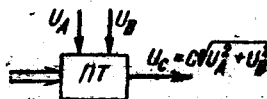


图 B-5 解三角题目用的迴转变压器线路图。

迴转变压器还可用于解某些三角题目。假设输入与直角三角形两直角边成比例之电压 U_A 与 U_B (图 B-5)，则输出电压 U_c 将与該三角形的斜边成比例。

同步联结系统用的电机用于使两个在机械上不相连接的軸同步或同相位的迴轉或旋轉。同步指示傳动和随动傳动是同步联结理論的两个方面。前者只要求傳动很小的力矩，例如只为带动仪表(指示器)的示針。在图 B-6 中，当发动机构 3Y(发送机 I)轉动 α 角度后，修整机构 OY(接收机 II)发生动作，接收机軸上的指示針 II 亦轉动与信号 α 角成比例的角度 $c\alpha$ 。

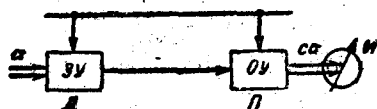


图 B-6 同步指示傳送线路图。

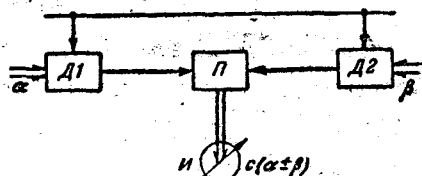


图 B-7 差动同步联结线路图。

在叙述伺服电动机时，在图 B-1 已示出随动傳动线路图。由于修整机构(接收机)不能直接克服負載 H 的反轉矩，所以需要将信号放大，而后经过中間环节(伺服电动机)带动負載。

差动同步联结线路图示于图 B-7 中。其中 A_1 和 A_2 为两个发送机，而 II 为接收机(差动式电机)，如发送机 A_1 和 A_2 分别各得到发送信号角 α 和 β 时，则接收机 II 随与 α 和 β 角之和或差成比例的角度而动作。

自动装置用微电机之理論是以普通电机理論为基础，但还有其一定的特点。許多在普通电机中可以忽略的地方，在这里却很重要。在微电机中，与繞組結構、定子轉子迭片装配、偏心率、槽及齿的存在、饱和、摩擦、滑动接触等因素有关的誤差問題极为重要。因此，对于工艺規程和文明生产应考虑得特別仔細。在設計師面前常常出現的問題是尽量縮小尺寸及重量，但由于自动装置用微电机其磁路的饱和程度必須低(原則上講，皆为利用程度較低的电机)，所以縮小尺寸及重量等問題經常是很費力才能解决的。

① 本书作者认为使用术语“迴转变压器”比使用通常遇到的“旋轉变压器”合理，因为这种电机不象电动机一样地連續旋轉，其轉子仅在一定角度內迴轉。

目 录

給中国讀者

前言

序言

第一篇 伺服电动机

第一章 交流伺服电动机的一般理論	1
1-1 結構、作用原理和接綫图	1
1-2 等值电路及其参数	3
1-3 电流方程式	11
1-4 电磁功率和轉矩	14
1-5 椭圆磁場中的鉄耗及其对定子电流影响的計算	14
1-6 定子轉子繞組銅耗和电容器中的損耗	17
1-7 能量图。总机械功率和有效功率、輸入功率、效率、功率因数。电容器上的电压	18
1-8 获得圆形磁場的条件	19
1-9 伺服电动机的定子繞組	21
1-10 等值电路的参数	23
第二章 “理想”异步伺服电动机的理論	24
2-1 电磁功率和轉矩	24
2-2 机械特性和調节特性	27
2-3 控制功率和激磁功率。有效功率	28
第三章 幅值控制与相位控制的实际电机的理論	31
3-1 幅值控制时的电磁功率和轉矩	31
3-2 幅值控制时的机械特性和調节特性	33
3-3 調节的綫性及其保證	36
3-4 控制功率和激磁功率。功率因数。有效功率。效率	38
3-5 相位控制的电动机	41
3-6 自轉不存在的准則	44
3-7 轉子电阻对电机特性和利用程度的影响	47
3-8 轉子发热对电动机特性的影响	50
第四章 激磁电路接有电容器的电动机的理論。各种控制方法的比較	51
4-1 电磁功率与轉矩	51
4-2 机械特性与調节特性	53
4-3 調节的綫性及其保證	55
4-4 控制功率与激磁功率。功率因数。有效功率。效率。电容器上的电压	55
4-5 各种供电方法的比較	59
4-6 鼠籠式轉子电动机和杯形磁性轉子电动机的主要特性	61
第五章 直流伺服电动机	62
5-1 結構、作用原理和接綫图	62

5-2 电枢控制的直流伺服电动机	64
5-3 磁极控制的直流伺服电动机	68
5-4 电枢控制和磁极控制的电动机的特性比较以及它们和理想异步电动机特性的比较	72
第六章 伺服电动机的电机机械时间常数	72
6-1 交流异步电动机的电机机械时间常数	72
6-2 直流伺服电动机的电机机械时间常数	75

第二篇 测速发电机

第七章 交流测速发电机	77
7-1 输出特性	77
7-2 同步测速发电机	78
7-3 空心转子式异步测速发电机及其作用原理	78
7-4 异步测速发电机输出特性方程式	80
7-5 负载的大小和性质对异步测速发电机输出特性的影响	82
7-6 异步测速发电机的误差及其减小的方法	85
第八章 直流测速发电机	90
8-1 直流测速发电机的型式	90
8-2 输出特性曲线	91
8-3 直流测速发电机的误差及减小方法	91

第三篇 迴转变压器

第九章 迴转变压器的构造, 用途及作用原理	94
9-1 迴转变压器的构造	94
9-2 正弦迴转变压器	95
9-3 副边补偿的正弦-余弦迴转变压器	97
9-4 原边补偿的正弦迴转变压器	98
9-5 綫性迴转变压器	99
9-6 比例式迴转变压器	101
第十章 四繞組迴转变压器的理論	102
10-1 电压与电流的基本方程式	102
10-2 横軸磁場未加补偿的正弦迴转变压器	106
10-3 定子有补偿繞組的正弦迴转变压器	109
10-4 轉子具有两个繞組的正弦-余弦迴转变压器	112
10-5 四繞組正弦-余弦迴转变压器。轉子反应所致误差	114
10-6 綫性迴转变压器	117
10-7 比例式迴转变压器	119
第十一章 迴转变压器的高精确度繞組	122
11-1 分布繞組的一般关系	122
11-2 定子与轉子的电势	127
11-3 各种型式繞組的分析	129
11-4 繞組类型的选择与計算	132
11-5 由于定子与轉子齿結構引起的误差	137

11-6 由导磁率的非恒值引起的误差	140
--------------------	-----

第四篇 同步联结装置用微电机

第十二章 同步电动机	142
12-1 同步联结装置中微电机的主要工作指标	142
12-2 同步电动机的分类及应用范围	143
12-3 定子集中绕组的反应式电动机	143
12-4 定子集中绕组反应式电动机的静态和动态整步力矩	146
12-5 定子分布绕组的反应式电动机	150
12-6 定子分布绕组反应式电动机的理论	153
12-7 减速反应式电动机	166
12-8 磁滞电动机	168
第十三章 感应式同步联结系统用微电机	172
13-1 感应式同步联结系统用微电机的分类、性能及应用范围	172
13-2 三相同步联结系统中的自整角机	175
13-3 在指示状态下单相自整角机的工作原理	176
13-4 变压器工作状态下单相自整角机的工作原理	189
13-5 差动式自整角机	193
13-6 具有单轴同步绕组的单相自整角机	194
13-7 磁整步机	195
附录 苏联工厂生产的自动装置用的一些微电机的技术数据	198
CII 系列他激直流伺服电动机	198
ACM 型鼠笼式异步伺服电动机	199
ACM 型电动机主要尺寸	199
定子系集中绕组的 CII 系列反应式同步电动机(脉冲电动机)	200
CII 电动机的动态特性	200
CT 系列反应式同步电动机(定子系分布绕组)	201
CT 型电动机的动态特性	201
自整角机	202

第一篇 伺服电动机

第一章 交流伺服电动机的一般理论

1-1 结构、作用原理和接线图

在定子上有两个空间位移 90° 电角度的绕组 Y 和 B 的短路转子式异步电机, 现在差不多都用作交流伺服电动机(图 1-1)。绕组 B 恒接以电压 U_c , 以后称它为激磁绕组(所有属于它的数值和参数都以脚码 c 表示)。绕组 Y 是控制绕组(脚码 y), 只在需要转子转动时才加上控制电压 U_y (即信号)。因此, 在给予信号之前, 转子应保持不动。为了在给予信号时产生转矩, 电压 U_y 和 U_c 应有相位差, 该相位差可以此电动机工作的线路中直接获得, 或者在一个绕组的电路中(通常是激磁绕组)接入移相的元件(绝大多数的情况是电容器), 如图 1-2 所示。应用第一种方法时, 激磁电压等于供电电网电压 U_c , 在第二种情况下, 激磁电压是电网电压 U_c 与电容器上的电压 U_K 的几何差, 由此获得 U_y 和 U_c 之间的相位差。在这两种情况下, 都用改变电压 U_y 数值($U_c = \text{常数}$ 时)的方法来控制电动机。如两电压(激磁电压和控制电压)恒加于相应的两绕组, 则按图 1-1 的线路也可获得第三种控制电动机的方法: 控制电压的数值保持不变, 但向量 $\dot{U}_c$ 和 $\dot{U}_y$ 间的夹角用迴转向量 $\dot{U}_y$ 的方法使其在 $0 \sim 90^\circ$ 的范围内改变。此处应指出, 向量 $\dot{U}_y$ 从零位置的迴转就是给予了信号, 向量 $\dot{U}_y$ 在零位置时, 转子应保持不动。

以后按图 1-1 的线路控制电动机时将称为幅值控制或相位控制, 这要根据还是改变 $\dot{U}_y$ 的数值, 还是改变 $\dot{U}_y$ 相对于 $\dot{U}_c$ 的相位而定。亦可用同时改变 $\dot{U}_y$ 的数值和相位的方法来控制电动机, 也就是应用幅值-相位控制。

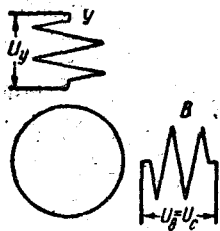


图 1-1 幅值控制或相位控制电动机的接线图。

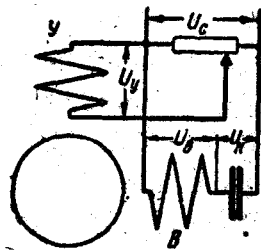


图 1-2 电容电动机的接线图。

图 1-2 的线路实质上还是较复杂的幅值-相位控制, 因为当 $\dot{U}_y$ 改变时, 电流改变引起电压 $\dot{U}_c$ 及 $\dot{U}_K$ 的数值及相位在 $\dot{U}_c = \dot{U}_y + \dot{U}_K$ 中重新分配。为了简化起见, 我们简称图 1-2 的线路是电容控制。

伺服电动机转子旋转的方向取决于两个电压(激磁电压和控制电压)在相位上谁领先。

从电机学一般理论得知, 如果普通的单相异步电动机已在旋转, 当切断起动绕组(相当于现在的控制绕组)时, 若电机产生的转矩足够克服加于其轴上的阻力转矩, 则电动机不会

停轉。这种自轉在伺服电动机的工作条件中是不允許的,因为在信号解除后,如果轉子仍不停轉,則即意味着失去了控制性。所以无自轉是对伺服电动机的基本要求。以后將闡述,可用增大轉子繞組电阻的方法来消除自轉。

对伺服电动机的第二个基本要求是它应具有适当的机械特性,就是在控制电压不变时,保証能穩定而广泛地調节轉矩与轉速間的关系。图 1-3 中, 曲线 1 系普通工业用电动机的机械特性。启动时, 电动机产生初始启动轉矩 oa ; 然后, 在速度增高时, 轉矩起先增大, 达最大值, 然后又减小。額定轉矩 M_n 相应于与同步速度相差很小的速度 od , 即額定滑率 s_n 只有百分之几。从异步电机理論得知, 在其他条件相同时, 轉子电阻愈小, 則机械特性从空載轉速(点 f) 开始上升得愈快。因此, 如果將該电阻增大到足够的程度, 即可得到如图 1-3 中

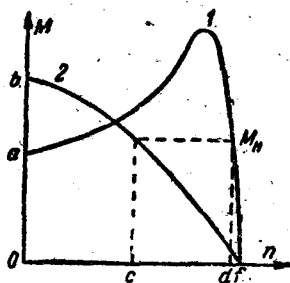


图 1-3 电动机的机械特性:

1—轉子电阻較小的; 2—轉子电阻較大的。

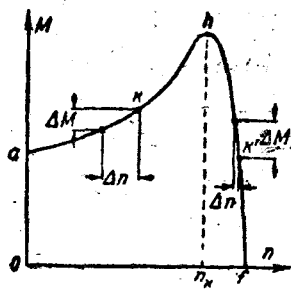


图 1-4 机械特性的穩定和不穩定部分。

曲线 2 所示的特性, 在这种情况下, 轉矩从启动点($n=0$) 开始不断下降, 亦即初始启动轉矩同时也是最大轉矩。因为特性曲线的斜率較小, 从图可看出, 在相当低的轉速 oc (即相当大的滑率) 时, 就可得到与上述情况数值相同的額定轉矩 M_n 。現在闡述图 1-3 中哪一种机械特性能滿足伺服电动机的要求。

图 1-4 中再次画出了轉子电阻較小的电动机的机械特性。假設电动机工作在相当于曲线上升部分的 k 点的情况下, 如果由于某种原因轉速稍許減低了 Δn , 則轉矩減小 ΔM , 因而引起轉速的进一步降低, 更使轉矩有更大的减小。依此类推, 因此在这种情况下, 工作是不穩定的。假使該电动机工作在相当于机械特性下降部分的 k' 点的情况下, 則在轉速降低 Δn 时, 轉矩增大, 使轉子回复到原先的速度, 因而滿足了穩定性的要求。这样的特性曲线只有从 f 到 h 不大的一段(通常只有全部速度范围 of 的 10~20%) 才具有穩定性。

图 1-3 中特性曲线 2 的情况則不然。全部曲线都是下降的, 因此保証了工作的穩定性以及从空載到靜止状态能穩定地調节速度。

很明显, 穩定性的規律是要求

$$\frac{\Delta M}{\Delta n} < 0$$

或者轉換为无穷小的增量

$$\frac{dM}{dn} < 0.$$

換言之, 轉矩的正增量应相当于速度的負增量, 反之亦然。

从上述可知, 不仅是自轉的不存在, 而且要保証广泛而穩定地調节轉速都与提高轉子的

电阻有关,該要求可由两个途径达到。第一,可应用普通的鋼片迭成的短路轉子,其上有鼠籠形的繞組,其銅条和短路环都用高电阻率的材料(例如黃銅或青銅)制成。这种电动机的結構与普通异步电动机没有什么不同。另一解决問題的方法是用非磁性材料(通常用鋁)將轉子制成薄壁空心圓柱体的形式(杯形)。这种杯形轉子电动机的原理結構示于图 1-5,定子 a 用硅鋼片迭装成,其上有二相繞組 c ,該定子称为外定子。在它的里面还有不带繞組的内定子 b ,它也由硅鋼片迭装成。軸 k 穿入内定子的孔中,它能在軸承 e 中旋轉,軸承 e 固定在端盖 f 上。杯形轉子 d 装在軸上,电动机工作时,轉子中产生渦流,它与旋轉磁場相互作用而产生轉矩。从图看出,内定子的用途仅在于减小經過气隙磁通的磁阻。由于轉子壁很薄(零点几毫米)因而慣性矩很小,这对电动机所工作的系統的快速动作是极重要的。这一特点与結構简单、運轉平稳无噪音、没有无线电干扰結合起来,使杯形轉子电动机現在在各种自动控制、遙远控制系統及計算-解答技术中获得了十分广泛的应用。

在杯形轉子电动机的功率不超过 1~1.5 瓦的情况下,控制繞組和激磁繞組常常放在内定子上,这时外定子仅用于减小磁阻。这种結構使定子腔孔直徑較小时繞組的制造十分容易,并且使轉矩稍有增大。但同时轉子直徑却不得不加大些,以增大内定子放置繞組的空間,因而使慣性矩显著地增加。为了消除后一缺点,有时将一个繞組放置在内定子上,另一繞組放置在外定子上。

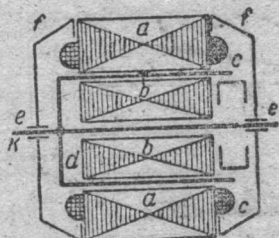


图 1-5 杯形轉子电动机的原理結構。

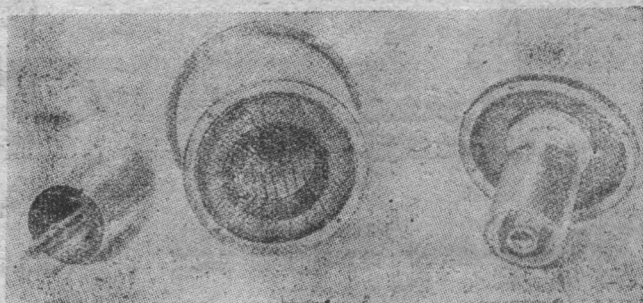


图 1-6 杯形轉子电动机的部件。

图 1-6 中示出杯形轉子电动机拆开后的部件(左——鋁質轉子,中——帶繞組的定子,右——裝有内定子的端盖)。

如轉子用鉄磁材料制造,則杯形轉子电动机的結構还要更简单。在这种情况下不需要内定子。不言而喻,这时慣性矩增加很大,影响快速动作。此外这种电动机比非磁性轉子的电机应用得少。毕竟这种电机还具有一些有价值的特性,有时应用它是恰当的,該問題以后將作較詳細的研討。

1-2 等值电路及其参数

伺服电动机在系統中工作的特点通常是:加在其上的电压和繞組中的电流不是对称的二相电压和电流系統,亦即归算到同一匝数,它們的数值不同,相位移角也不是 90° ,故兩繞組磁势产生的旋轉磁場在一般情况下不是圓形;而是橢圓形。

为了进一步的研究,我們將对称分量法应用到二相系統,根据这个方法,任何数值不同、其間位移任意角度的時間向量 $\vec{A}$ 和 $\vec{B}$ 的非对称二相系統,都可分解成两个对称的系統,每一个系統都由两个数值相同、其間位移 90° 角的两向量組成。其一是正序向量 $\vec{A}_1$ 和 $\vec{B}_1$ 的

系統，相序與原來的非對稱系統相同；另一個是逆序向量 $\dot{A}_2$ 和 $\dot{B}_2$ 的系統，相序與原來的非對稱系統相反。

圖 1-7 中表示出原來的系統及其對稱分量，從該圖可得下列關係：

$$\dot{B}_1 = j\dot{A}_1; \quad (1-1)$$

$$\dot{B}_2 = -j\dot{A}_2; \quad (1-2)$$

$$\dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2; \quad (1-3)$$

$$\dot{B} = \dot{B}_1 + \dot{B}_2 = j(\dot{A}_1 - \dot{A}_2), \quad (1-4)$$

或者
$$j\dot{B} = \dot{A}_2 - \dot{A}_1. \quad (1-5)$$

從(1-3)和(1-5)式得：

$$\dot{A}_1 = \frac{\dot{A} - j\dot{B}}{2}; \quad (1-6)$$

$$\dot{A}_2 = \frac{\dot{A} + j\dot{B}}{2}. \quad (1-7)$$

方程式(1-6)和(1-7)便有可能根據原來的向量 $\dot{A}$ 及 $\dot{B}$ 確定對稱分量 $\dot{A}_1$ 和 $\dot{A}_2$ 的數值及方向。分量 $\dot{B}_1$ 和 $\dot{B}_2$ 再按(1-1)和(1-2)式確定。圖 1-8 表示根據方程式(1-6)、(1-7)、(1-1)和(1-2)應用圖解確定 $\dot{A}_1$, $\dot{A}_2$, $\dot{B}_1$, $\dot{B}_2$ 。

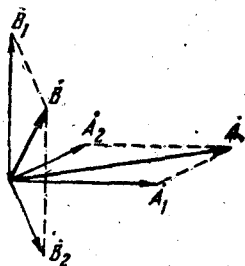


圖 1-7 非對稱的向量系統及其對稱分量。

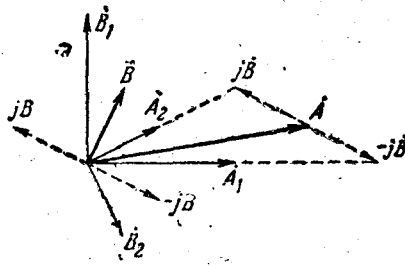


圖 1-8 根據原來的向量確定對稱分量。

假如將有繞組 Y 及 B (它們空間分布位移 90° 電角度，其中的電流 $\dot{I}_y$ 和 $\dot{I}_b$ 在時間上位移任意角度) 的電機作為二相系統來研究，則 $\dot{I}_y$ 和 $\dot{I}_b$ 所產生的磁勢與乘積 $\dot{I}_y w_y$ 和 $\dot{I}_b w_b$ 成正比。這裡 w_y 和 w_b 是繞組 Y 和 B 的有效匝數，亦即實際匝數乘以相當的繞組系數。這些磁勢 (在時間上的位移角度與電流相同) 共同作用的結果產生旋轉磁場。僅在磁勢相等並且相互位移 90° 時，該磁場才是圓形；在任何其它的位移角度或磁勢數值不等時，磁場都是橢圓形的。

必須指出，如用磁勢 $\dot{I}_y w_y$ 和 $\dot{I}_b w_b$ 代替向量 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$ ，則上述方程式(1-1)~(1-7)仍然正確。亦可利用正比於磁勢的電流值

$$\frac{\dot{I}_y w_y}{w_y} = \dot{I}_y \text{ 和 } \frac{\dot{I}_b w_b}{w_y} = \dot{I}_b k,$$

式中

$$k = \frac{w_b}{w_y}$$

是激磁繞組和控制繞組間的變換系數。

按(1-1)~(1-7)式給出：

$$\dot{I}_b k = j\dot{I}_y, \text{ 或者 } \dot{I}_b = j\frac{\dot{I}_y}{k}; \quad (1-8)$$

$$\dot{I}_{e1}k = -j\dot{I}_{y1}, \text{ 或者 } \dot{I}_{e1} = -j\frac{\dot{I}_{y1}}{k}; \quad (1-9)$$

$$\dot{I}_y = \dot{I}_{y1} + \dot{I}_{y2}; \quad (1-10)$$

$$\dot{I}_e = \dot{I}_{e1} + \dot{I}_{e2} = j\frac{\dot{I}_{y1} - \dot{I}_{y2}}{k}, \quad (1-11)$$

或者

$$jk\dot{I}_e = \dot{I}_{y1} - \dot{I}_{y2}, \quad (1-12)$$

从方程式(1-10)和(1-12)得:

$$\dot{I}_{y1} = \frac{\dot{I}_y - jk\dot{I}_e}{2}; \quad (1-13)$$

$$\dot{I}_{y2} = \frac{\dot{I}_y + jk\dot{I}_e}{2}. \quad (1-14)$$

如以 $\dot{I}_y, \dot{I}_{y1}, \dot{I}_{y2}, \dot{I}_{e1}k, \dot{I}_{e2}k$ 和 $\dot{I}_{e1}, \dot{I}_{e2}$ 代替 $\dot{A}, \dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{B}, \dot{B}_1$ 和 $\dot{B}_2$, 则图 1-7 和 1-8 所示向量图仍然正确。

分解磁势 $\dot{I}_y w_y$ 和 $\dot{I}_e w_e$ 或正比于它们的电流 $\dot{I}_y$ 和 $\dot{I}_e k$ 成为两对称系统, 即有可能将电机在一般情况下产生的椭圆磁场当作两个圆形磁场迭加的结果来研究。其中一个圆形磁场(正序)系由正序电流 $\dot{I}_{y1}$ 和 $\dot{I}_{e1}k$ 产生, 另一圆形磁场(逆序)系由逆序电流 $\dot{I}_{y2}$ 和 $\dot{I}_{e2}k$ 产生。由于正序和逆序系统中相序的不同, 磁场旋转的方向相反。在个别情况下, 一个绕组中没有电流, 例如 $\dot{I}_y = 0$, 从(1-8)~(1-10)式得:

$$\dot{I}_{y1} = -\dot{I}_{y2}; \quad (1-15)$$

$$k\dot{I}_{e1} = k\dot{I}_{e2} = \frac{k\dot{I}_e}{2}. \quad (1-16)$$

这种情况下电流的向量图示于图 1-9, 因为所有电流(或磁势)的绝对值是相同的:

$$I_{y1} = I_{y2} = kI_{e1} = kI_{e2},$$

则它们产生两个大小相等、旋转方向相反的圆形磁场, 迭加的结果产生相对于定子不动的脉振磁场。

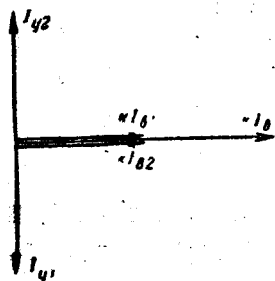


图 1-9 $I_y = 0$ 时的电流向量图。

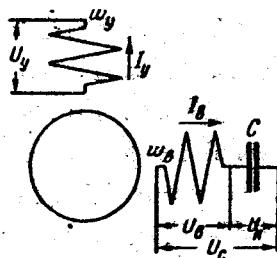


图 1-10 电动机的接线图。

以后我们将以伺服电动机最一般的接线图如图 1-10 所示为出发点, 其中电压 $\dot{U}_y$ 和 $\dot{U}_e$ 的数值和相位都不同。假定 $\dot{U}_y$ 和 $\dot{U}_e$ 不同相以及电容器的容抗等于零, 即认为 $\dot{U}_e = \dot{U}_y$, 则得到幅值控制或相位控制的情况; 假定 $\dot{U}_y$ 和 $\dot{U}_e$ 数值不同, 但同相, 则得到电容电动机的线路。

Y 相电压

$$\dot{U}_y = \dot{U}_{y1} + \dot{U}_{y2} = \dot{I}_{y1}Z_{y1} + \dot{I}_{y2}Z_{y2}; \quad (1-17)$$

B 相电压

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} = \dot{I}_{e1} Z_{e1} + \dot{I}_{e2} Z_{e2} \quad (1-18)$$

式中 Z_{y1} 和 Z_{y2} 系对于繞組 Y 的軸綫的正序和逆序总阻抗, Z_{e1} 和 Z_{e2} 系对于繞組 B 的軸綫的正序和逆序总阻抗。

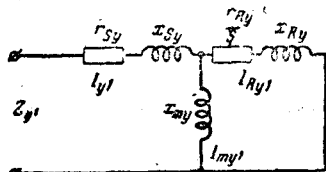


图 1-11 Z_{y1} 的等值电路。

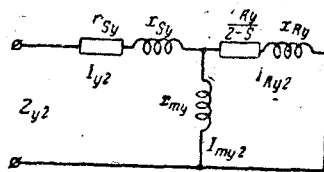


图 1-12 Z_{y2} 的等值电路。

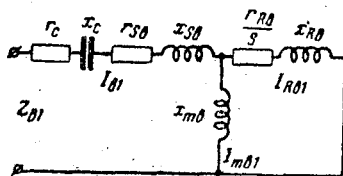


图 1-13 Z_{B1} 的等值电路。

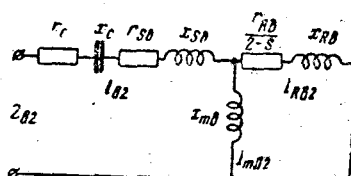


图 1-14 Z_{B2} 的等值电路。

图 1-11~1-14 画出了阻抗 Z_{y1} 、 Z_{y2} 、 Z_{e1} 、 Z_{e2} 的等值电路适用于图 1-10 的电动机接线, 在这些等值电路中:

x_c ——电容器 C 的电抗;

r_c ——电容器 C 的电阻(损耗电阻);

x_{Sy} 和 x_{Se} ——定子繞組 Y 和 B 的电抗;

r_{Sy} 和 r_{Se} ——定子繞組 Y 和 B 的电阻;

x_{Ry} 和 r_{Ry} ——归算到定子繞組 Y 相的轉子繞組电抗和电阻;

x_{Re} 和 r_{Re} ——归算到定子繞組 B 相的轉子繞組电抗和电阻;

x_{my} ——相当于气隙磁通的对于 Y 相軸綫的电抗;

x_{me} ——相当于气隙磁通的对于 B 相軸綫的电抗;

s ——相对于正序磁場的轉子滑率;

$2-s$ ——相对于逆序磁場的轉子滑率。

在接线图 1-11~1-14 中, 激磁支路的阻抗 x_{my} (或 x_{me}) 认为是純电抗, 即不考虑铁耗。下面阐述考虑該损耗的方法。此外, 以后的分析不考虑饱和的影响(即认为等值电路的所有参数都是常数)和磁場高次諧波的影响。

B 相軸綫的阻抗可用 Y 相的阻抗和变换系数 k 来表示。因为繞組形状相同时, 漏感和漏抗与实际匝数的平方成正比:

$$\frac{x_{Se}}{x_{Sy}} = \left(\frac{w_e k_{wy}}{w_y k_{we}} \right)^2,$$

在这种情况下, 可以认为繞組系数 k_{wy} 和 k_{we} 彼此相等, 因而得

$$x_{Se} = x_{Sy} \left(\frac{w_e}{w_y} \right)^2 = k^2 x_{Sy}. \quad (1-19)$$

因为电抗 x_m 及 x_R 与有效匝数成正比, 则

$$x_{R0} = k^2 x_{Ry} \quad (1-20)$$

及

$$x_{m0} = k^2 x_{my} \quad (1-21)$$

至于电阻 r_{s0} , 则当每槽内铜的总截面积保持不变, 即绕组导线截面积与匝数成反比变化时; 可用电阻 r_{sy} 和变换系数的平方来表示它。实际上, 当绕组每匝长为 l_w , 导线截面积为 Q_y 和 Q_0 以及绕组系数相等时

$$r_{s0} = \rho \frac{l_w w_0}{Q_0 k_{w0}} = \rho \frac{l_w k w_y}{\frac{Q_y}{k} k_{wy}} = k^2 \rho \frac{l_w w_y}{Q_y k_{wy}} = k^2 r_{sy} \quad (1-22)$$

必须指出, 方程式(1-19)和(1-22)只在这样的情况下才是正确的: 如前所述, 两绕组有相同的形状, 即分布在同样数目的槽内, 有相同的端部连接以及槽的填充系数相等。假使放置每相绕组的槽数 N_y 和 N_0 不同

$$N_y = a N_0,$$

则所有槽的截面积相同和绕组填充系数相同时

$$\frac{w_y}{k_{wy} N_y} Q_y = \frac{w_0}{k_{w0} N_0} Q_0,$$

因此

$$Q_0 = Q_y \frac{w_y}{w_0} \cdot \frac{k_{w0}}{k_{wy}} \cdot \frac{N_0}{N_y} = \frac{Q_y}{ka} \cdot \frac{k_{w0}}{k_{wy}}$$

及

$$r_{s0} = \rho \frac{l_w w_0}{Q_0 k_{w0}} = \rho \frac{l_w k w_y}{\frac{Q_y}{ka} \cdot \frac{k_{w0}}{k_{wy}}} = \rho \frac{l_w k w_y}{Q_y \cdot \frac{k_{w0}}{ka}} = k^2 a \left(\frac{k_{wy}}{k_{w0}} \right)^2 r_{sy} \quad (1-22a)$$

因为绕组铜的截面积是标准化的, 因此在实际情况中

$$Q_0 = \frac{Q_y}{k} \text{ 或 } \frac{Q_y}{ka} \cdot \frac{k_{w0}}{k_{wy}} \text{ (假使 } N_y \neq N_0 \text{)}$$

仅是近似的。如果绕组 B 导线的截面积不是绕组 Y 导线的截面积的 $\frac{1}{k}$ 倍 (或是 $\frac{1}{ka \frac{k_{wy}}{k_{w0}}}$ 倍),

而是它的 $\frac{1}{t}$ 倍 (或是 $\frac{1}{ta \frac{k_{wy}}{k_{w0}}}$ 倍), 则(1-22)式成为

$$r_{s0} = \rho \frac{l_w k w_y}{\frac{Q_y}{t} k_{wy}} = k t r_{sy} \quad (1-22b)$$

而(1-22a)式变为

$$r_{s0} = \rho \frac{l_w k w_y}{\frac{Q_y}{ta} \cdot \frac{k_{w0}}{k_{wy}}} = k t a \left(\frac{k_{wy}}{k_{w0}} \right)^2 r_{sy} \quad (1-22B)$$

最后一个方程式是最一般的, 因为当 $a=1$, $t=k$ 及 $k_{wy}=k_{w0}$, 即得(1-22)式; 当 $a \neq 1$ 及 $t=$