

自动控制元件及其线路

姚 纪 文 主 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍常用的传统型交、直流伺服电机和自整角机与旋转变压器,对新型电机和元件(如步进电机、无刷电机、直线电机、低惯量电机、平面电机、感应同步器和微动同步器等)也作了必要的介绍。此外,对伺服功率放大器和位移与轴角的数字编码线路的基本内容作了适当的介绍。

本书和现有同类书相比其特点是:它除了分析元件和电机的静态特性外,还对它们的动态特性作了必要的分析和研究。

本书可供高等院校自动控制、导航与船电自动化专业作教材,也可供从事自动化工作的工程技术人员参考。

自动控制元件及其线路

姚纪文 主编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张27¹/₄ 637千字

1980年6月第一版 1982年6月第二次印刷 印数:10,001—15,800册

统一书号:15034·2062 定价:2.80元

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 伺服电动机

概述	5
第一章 直流伺服电动机	6
1-1 电流、磁场、力三者的关系	6
1-2 直流伺服电动机的结构与工作原理	8
1-3 电磁转矩与电枢反电势	11
1-4 电压平衡方程式与转矩平衡方程式	13
1-5 直流伺服电动机的静态特性	14
1-6 直流伺服电动机的工作状态	21
1-7 直流伺服电动机的动态特性	22
1-8 参数与特性的测试	29
1-9 直流力矩电动机	32
1-10 直流伺服电动机的额定值	35
1-11 直流伺服电动机的特点	36
第二章 交流伺服电动机	37
2-1 交流两相伺服电动机的结构和 工作原理	37
2-2 交流两相伺服电动机的等效电路	43
2-3 交流两相伺服电动机的控制	48
2-4 交流两相伺服电动机的静态特性	52
2-5 交流两相伺服电动机的动态特性	61
第三章 步进电动机	69
3-1 构造与工作原理	69
3-2 步进电动机的基本特性	71
3-3 步进电机的精度	78
3-4 步进电机的开环控制	78
3-5 功率放大器	84
3-6 步进电机的阻尼方法	89
3-7 步进电机的选择	91
第四章 无刷直流电动机	93
4-1 工作原理与结构类型	93
4-2 无刷直流电动机的静态特性和 参数计算	100
4-3 无刷直流电动机的传递函数	110
4-4 无刷直流电动机的控制及其应 用线路	113

第二篇 伺服电动机的控制

概述	126
第五章 伺服电动机的开关控制	132
5-1 开关放大器	132
5-2 晶体管伏-安特性的四个区域	133
5-3 晶体管的开关过程	135
5-4 开关功耗的计算	141
5-5 直流伺服电动机的开关控制电路	143
5-6 开关放大器的静态分析	149
5-7 可逆系统的设计计算	158
5-8 两相伺服电机的开关控制	166
5-9 脉冲宽度调制器	171
第六章 伺服电动机的可控硅控制	175
6-1 具有反电势负载的可控整流电路	175
6-2 可控硅-直流伺服机的特性分析	179
6-3 直流伺服机单相半控桥非可逆 控制	184
6-4 直流伺服机单相可控硅可逆控制	186
6-5 两相交流伺服机的可控硅控制	196
第七章 交流伺服功率放大器	203
7-1 直流电源推挽功率放大器	203
7-2 脉动电源供电的推挽功率放大器	209
第八章 反馈在伺服电机控制中的 应用	216
8-1 概述	216
8-2 伺服电机的开环控制	216
8-3 伺服电机的反馈控制	218
8-4 反馈的形式	223

第三篇 测量元件

第九章 电感及电容测量元件与线路	233
9-1 电感测量元件的工作原理	233
9-2 电感测量元件的结构形式、特 性和参数	234

9-3	电感测量元件的设计	247
9-4	电容测量元件的工作原理	253
9-5	电容测量元件的结构形式和特性	255
9-6	电容测量元件的应用	262
第十章	旋转变压器及自整角机	263
10-1	概述	263
10-2	正余弦旋转变压器	263
10-3	线性旋转变压器	270
10-4	旋转变压器的技术性能指标	272
10-5	测角线路的原理及应用	274
10-6	双通道测角系统	276
10-7	多极旋转变压器	284
10-8	自整角机	286
第十一章	感应同步器	297
11-1	概述	297
11-2	旋转式感应同步器的构造及 工作原理	297
11-3	感应同步器的应用	301
11-4	感应同步器的误差和精度	305
11-5	感应同步器的电源	307
第十二章	测速发电机	316
12-1	概述	316
12-2	交流测速发电机的结构和工作原理	317
12-3	直流测速发电机	322
12-4	无刷直流测速发电机	325
12-5	测速线路和测速电桥	327
12-6	测速发电机的传递函数	329
第十三章	位移和轴角编码装置	330
13-1	直接编码装置	330
13-2	光栅位移检测器	337

13-3	感应同步器位移与轴角编码装置	339
13-4	旋转变压器轴角编码装置	355
13-5	多线旋转变压器轴角-数字 编码装置	363

第四篇 新型电机

第十四章	新型电机	375
14-1	直线电动机	375
14-2	低惯量电机	384
14-3	直线步进电机及平面电机	390
14-4	压电电动机	396
14-5	空心转子步进电动机	398
14-6	慢速电机	400
14-7	组合电机	402

附录 I	变压器	405
1.	变压器的工作原理	406
2.	变压器的空载工作状态	406
3.	变压器的负载工作状态	410
4.	变压器的向量图和等值电路	411
5.	变压器的损耗、温升	414
6.	变压器的额定值	419

附录 II	开关放大器中几个系数的 计算	421
1.	方程组 (5-39) 的解	421
2.	方程组 (5-82) 的解	422
3.	集电极电流有效值系数 k_C 的计算	422
4.	集电极电流最大值系数 k_A 的计算	422
5.	电枢电流有效值 $I_{a.r.m.s}$ 的计算	423

附录 III	有关控制电机技术性能表	425
参考书目		429

绪 论

随着科学技术的不断发展,自动控制系统在国民经济及国防事业中所起的作用越来越显得重要。例如,没有一整套的自动控制系统,一个现代化的热力发电厂的锅炉、汽轮机和发电机就无法正常地运转。又如,一颗洲际导弹从发射、飞行直到击中目标,也都要有很复杂的自动控制系统予以保证。自动控制系统中一个很重要的分支就是“伺服系统”。这种系统的任务是按预定的要求来控制物体的位置。任何复杂的自动控制系统,一般都离不开“伺服系统”。例如,火炮和雷达的定位系统,飞机的自动舵机,机床的自动控制,自动记录仪表,电梯的自动升降,天文望远镜的自动控制等等。这些系统都是由许多具有独立职能的“元件”有机地组成的。元件的能源可以是电、气、液,也可以是混合式的,即电气作用式或电液作用式。本书要介绍的是广泛应用的电气自动元件的主要组成部分——控制电机以及相应的电子线路。

1. 自动控制系统的基本构成原理

我们首先观察一个实例——火炮的跟踪系统,以了解自动控制系统是如何构成的。火炮跟踪系统的原理图如图 I-1 所示。

火炮跟踪系统的任务是使火炮的转角 θ_2 与由手轮经减速器减速后所给出的指令 θ_1 相等。当 $\theta_2 \neq \theta_1$ 时,一对自整角机所构成的测角装置就输出一个与角差 $\theta_1 - \theta_2$ (记为 $\Delta\theta$) 近似成比例的电压 Δu 。此电压 Δu 经放大器 3 放大后驱动直流伺服电动机 4,从而带动炮身 5,使它向着减小角差 $\Delta\theta$ 的方向运动,这样 θ_2 就能跟踪 θ_1 。当最终 $\theta_2 = \theta_1$ 时,角差 $\Delta\theta = 0$ 。同时测角装置的输出电压 $\Delta u = 0$,电动机停止运转,跟踪任务也相应地结束。为了减少在跟踪过程中可能出现的振荡现象,在电动机的轴上联接一个测量电动机转速的发电机——测速发电机 6。测速发电机所发出的与转速成正比例的电压加在一个电位器 R 上,从电位器上取出一部分电压反过来馈送到放大器的输入端。这样就构成了一个典型的“伺服系统”。

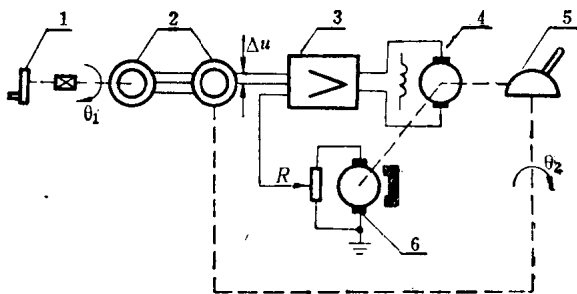


图 I-1 火炮跟踪系统原理图

- 1—手轮(包括减速器); 2—一对测量转角的自整角机;
3—放大器; 4—直流伺服电动机; 5—控制对象—火炮;
6—测速发电机。

如果我们用一个个方框来代表图 I-1 的每一个元件,而方框上的箭头分别代表该元件的输入与输出作用。就可以得到一个描述图 I-1 中各元件相互关系的示图——方框图,见图 I-2。

2. 自动控制元件的职能及分类

在图 I-2 中除了控制对象 5——火炮以外,其它元件都是为实现自动跟踪而由控制系

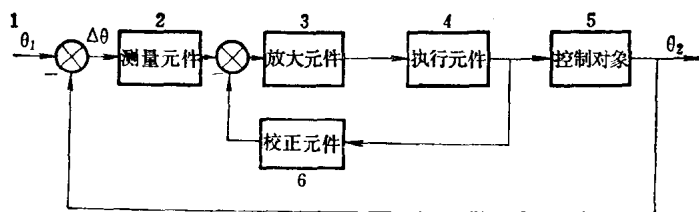


图 1-2 伺服系统的方框图

统设计者所设计或选用的。按照它们各自的职能可以分类如下：

(1) 测量元件：它们的职能是将被测量（例如转角 θ_1 , θ_2 或 $\Delta\theta$ ）转换为另一种易于显示、传输或记录的物理量（例如电量）。图 1-2 中一对自整角机构成的测角元件把角差 $\Delta\theta$ 转变为电压 Δu 。

(2) 放大元件：测量元件的输出功率都不大，它不足以驱动电动机，所以放大元件的职能是对输入的信号（例如 Δu ）进行电压与功率放大，以达到驱动伺服电动机。

(3) 执行元件：把经放大器放大后的电信号转变为机械位移以带动控制对象，这就是执行元件（本例中的直流伺服电动机）的职能。

(4) 校正元件：为了改善系统的品质，通常在系统中尚需附加一些元件，以保证系统工作的稳定性。这些元件（例如本例中的测速发电机）称为校正元件。

在伺服系统中经常用到的元件大体上有以下几种：

测量元件：自整角机、旋转变压器、感应同步器、电感、电容测量元件等。

放大元件：晶体管放大器、可控硅放大器、电机扩大机等。

校正元件：直流或交流测速发电机。

执行元件：直流或交流伺服电动机、步进电动机、直线电机、无刷电动机、力矩电机等。

这些元件的职能尽管不同，但一般可分为信号元件和功率元件两大类。凡是主要用来转换信号的（如测量元件、校正元件、电压放大器等）都是信号元件。凡是把信号转换为输出功率的（这种转换的含义是指能量的形式或大小的变化）则叫做功率元件。例如功率放大器，其输入为微弱的小功率信号，而输出则为能驱动电动机的大功率信号。这里能量的形式并没有改变。再如伺服电动机，输入为具有相当功率的电信号，而输出则为机械能。这里主要是能量形式的转换，即由电能转变为机械能。

3. 自动控制系统对元件的主要要求

由于自动控制元件是构成系统的基础，无疑其性能将在很大程度上决定着整个系统的工作。所以现代控制系统对元件提出了高可靠性、高精度、快速性的要求。

(1) 可靠性：整个系统工作的高可靠性无疑取决于各元件的可靠性。在一些重要部门，如宇航、航空、炼钢、电力等，一旦发生故障，常常导致重大的损失。所以特别要求元件能长期可靠地工作。由可靠性理论的计算表明：如果单个元件的可靠性为 99.5%，则使用 40 个元件的整机可靠性仅为 82%；如果使用 100 个元件，则其可靠性降低到 60%。这在重要的场合显然是不能允许的。

(2) 高精度：所谓精度是指实际特性与理想特性的差异。差异越小，则元件的精度越

高。与可靠性问题相似,元件的精度相当程度上,甚至根本上决定了整个系统的精度。例如多极旋转变压器可以用来测量角差,这时系统精度就要受到其精度的限制。目前的精度为 $3\sim 7$ 角秒,那么系统的精度是肯定不能超过这一数值的。再如步进电动机,目前已广泛地应用在无反馈的开环增量控制系统(或者开环数控系统),如果步进电机每走一步的误差(即步距精度)为步距的 $\pm 25\%$,而每一步走 1.5° ,那么整个系统的精度亦必然受到这一步距误差 $\left(\frac{1.5^\circ}{4}\right)$ 的限制。因此,提高精度是对元件提出的另一个主要的要求。现在高精度的测量元件已达到数个角秒,甚至小于一个角秒。

(3) 快速性:在自动控制系统中由于控制指令(例如图 I-1 中控制指令 θ_1)是经常变化的,有时变化甚至是极为迅速的,所以就要求元件特别是功率元件(如伺服电动机)应能作出快速的响应。实践表明:伺服电动机快速性能的好坏,严重地影响着整个系统的快速性。因此快速性是对元件提出的又一基本要求。

目前,为适应自动控制技术发展的需要,高性能的自动控制元件正在不断地出现,高品质及新系列的产品不断地增加,其主要发展动向是:提高精度,提高可靠性,小型化,适应数值控制的要求以及满足特殊性能或特殊用途。

4. 自动元件(控制电机)的发展概况

随着整机系统不断的提高与更新,其元件也有很多新的进展,现分述如下:

(1) 提高可靠性:由于可靠性是元件非常重要的性能指标,所以近年来采取了许多措施来提高可靠性。例如一般有刷直流电机由于有电刷存在,因此接触不可靠是其故障的主要原因。而采用新原理的无刷电机由于克服了接触的缺点,因而其寿命能达 20000 小时以上,大约是普通直流电机的 $4\sim 5$ 倍。而且无刷还消除了对其他电子设备的干扰,也避免了火花所引起的爆炸、火灾事故。

特别是在火箭、宇航、人造卫星等领域所采用的元件更要求能满足以下要求,以提高可靠性。

1) 工作温度范围宽:要求能在 $-55\sim +125^\circ\text{C}$ 的范围内工作。

2) 对高压、低压要求:有的元件能在高压达几十个大气压的条件下工作,有的却可以在真空度为 $10^{-8}\sim 10^{-9}$ 毫米汞柱的条件下安全工作。

3) 耐腐蚀:很多产品都有“防潮、防盐雾、防霉菌”的要求,即所谓“三防”的要求。

4) 耐冲击振动:对火箭、导弹之类的武器装备,要求其元件具有很高的耐冲击、耐振动的能力。例如要求承受 $10g$ 乃至 $15g$ 以上的加速度。

5) 耐核辐射:某些在原子反应堆里使用的元件,要求具有防辐射的能力。

以上这些要求,由于采用了新原理、新材料或新工艺,已取得了不少的成果。例如有的电机可以工作在 700°C 以上的高温。有的自整角机寿命可长达 15000 小时。一种新型的直流伺服电动机,温度范围可达 $-55\sim +125^\circ\text{C}$ 。

(2) 提高精度:由于对整机精度要求的提高,元件的精度必须首先不断地提高。例如适用于陀螺测试伺服转台的多极感应同步器精度可达几个角秒,甚至小于 1 角秒。测速电机的精度可达 0.01% 。

提高精度，可以采用以下措施来达到：1)更新结构；2)发展组合电机提高精度；3)借助电子科学和物理学的新成就，研制新原理电机，例如用压电效应制成的直线步进电动机可获得0.01微米的精度。

(3)小型化：在移动装置(如火箭、卫星等)上的元件要求尽可能具有小的体积与重量，因此在这些场合下小型化是个普遍的要求。主要是通过改进结构，采用高磁能材料，发展组合电机，消除减速机构以及采用新原理来实现小型化的。例如一种直流微型电机长度与直径只有12毫米，重量只有8克，输出功率为0.32瓦效率可达60%。

小型化不仅解决了体积与重量的问题，而且减少了功率消耗，对某些场合来说，其意义是很大的。例如在宇航系统中是以燃料电池或太阳能电池为电气系统的能源，因此减少元件的耗电量具有极为重要的意义。

(4)适应数字化发展：在自动控制系统中，目前已广泛采用数字机。其输出装置则常常要求把数字信息转变为机械位移。而步进电动机恰恰解决了这一问题，因此步进电动机在世界各国都得到了很大的发展。

再如在测量元件中，目前已将自整角机或旋转变压器制成5相或10相来适应十进制，用8相或16相适应2进制。此外，也采用光电、接触或其他形式的编码器来测量位移。

总之，适应数字化要求是控制电机发展的一个重要动向。

(5)新型元件的发展：近来许多新型元件的出现打破了电机传统的概念。例如霍尔电机、无刷直流电机、静电电机、固态元件、集成电路电机和介电质电机等都相继出现。这些新型元件不再局限于一般电机的原理与理论，而是与其他学科密切结合，从而使电机的发展进入一个新的阶段。本书第十四章将介绍一些新型元件。

(6)控制元件与线路互相协调：如所周知，一个伺服电动机性能是否能够充分发挥是与放大器设计是否正确密切相关的；而一个高精度的测量元件(如感应同步器)也必须配以相应的电子线路，才能发挥其效能。例如国外许多伺服电动机都有定型的系列功率放大器供应，这对使用者是极为方便的。鉴于此，本书用了相当的篇幅介绍与电机密切相关的电子线路，以期对这一发展趋势有所助益。

5. 学习本课程的要求

学生应该在学完电工基础与电子技术基础之后来学习本课程。在数学方面，应讲完拉氏变换有关章节。本课程课内参考学时约为110学时，元件部分(第一、三、四篇)占70学小时左右，控制线路占40小时。如果只讲授元件部分可选用第一、三、四篇。

自动控制元件是实践性很强的课程，因此在学习时应辅以必要的实验课。其目的在于熟悉如何使用元件以及如何测量其静态与动态特性，为今后做自动控制系统方面的实验及应用元件打下必要的实验能力方面的基础。

第一篇 伺服电动机

概 述

如在绪论中所指出：执行元件，是自动控制系统的一个重要组成部分。在电的自动控制系统中，执行元件主要是由各种伺服电动机所组成。目前，大量应用的执行元件是以下几种：

- (1) 直流伺服电动机（包括直流力矩电动机）；
- (2) 交流伺服电动机；
- (3) 步进电动机；
- (4) 无刷直流电动机。

它们的主要特点及用途如下：

(1) 交流或直流伺服电动机：此类电机的堵转转矩与电机的输入电流成正比，而转速则随转矩的增加而下降。除直流（或交流）力矩电动机外，其余通常均通过齿轮带动负载。

(2) 步进电动机：电机转轴的角位移与输入脉冲的个数成正比，而转速与脉冲的频率成正比。控制脉冲是由专门的电源设备承担的。这种电动机多用于开环数字控制系统中。

(3) 无刷直流电动机：它是用电子换向装置代替机械换向装置而出现的一种直流电动机。它克服了直流伺服电动机的缺点，可靠性高、噪音低且无火花干扰。常作为直流稳速电动机或直流伺服电动机。

本篇将讨论以上几种电动机的原理、特性以及测试方法。鉴于步进电动机的控制线路与电机实际上是不可分割的，为了便于学生学习，将其控制线路部分列入本篇。

第一章 直流伺服电动机

1-1 电流、磁场、力三者的关系

为了学习直流伺服电动机，首先应注意以下两个问题：

- (1) 载流导体在磁场中受到的电磁力；
- (2) 在磁场中运动的导体切割磁力线，产生感应电动势。

可以说，直流电动机的工作原理是根据载流导体在磁场中受力产生运动得到的。直流发电机的工作原理是根据在磁场中运动着的导体切割磁力线产生感应电动势而得到的。

1-1-1 载流导体在磁场中受到的电磁力

实践表明：如图 1-1 所示，如果磁场中有一导体，当该导体流过电流 I 时，则该导体就受力 F 的作用，该力称为电磁力。

如果导体的长度为 l （米），且该导体在空间位置上与磁场方向正交（即 90° 夹角），则电磁力为：

$$F = IlB \quad (1-1)$$

电磁力的方向（见图 1-1）。在普遍的情况下，电磁力向量为：

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (1-2)$$

即向量 $\vec{F}$ 为向量 $I\vec{l}$ 与向量 $\vec{B}$ 的向量积。电磁力的大小为：

$$F = IlB \sin \theta \quad (1-3)$$

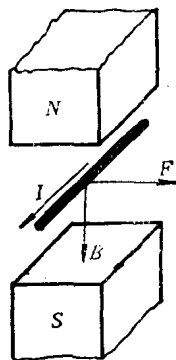


图1-1 载流导体在磁场中受力
 I —导体中电流，安培； B —磁感应强度，
韦伯/米²； F —电磁力，牛顿●。

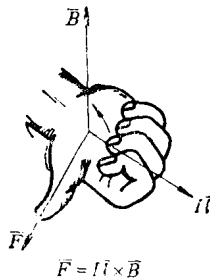


图1-2 电磁力的方向

其中 θ 为两向量 $I\vec{l}$ 与 $\vec{B}$ 之间的夹角。显然，当 $\theta = 90^\circ$ 时， $F = IlB$ ，这正是式 (1-1)。电磁力的方向由右手定则来确定：如图 1-2，电磁力 $\vec{F}$ 的方向垂直于向量 $\vec{l}$ 与 $\vec{B}$ 所决定的平面，当右手的四指从 $\vec{l}$ 方向开始以不超过 π 的角度转向 $\vec{B}$ 时，大拇指的指向就是电磁力

● 1 公斤力 = 9.80665 牛顿。

$\vec{F}$ 的方向。

1-1-2 导体中的感应电动势

如图 1-3 所示, 当导体在磁场中运动并切割磁力线时, 则导体中将感应出电动势。

如果导体的长度为 l , 且导体的运动方向与 B 的方向正交, 则感应电动势的大小为:

$$e = VBl \quad (1-4)$$

在普遍情况下感应电动势为:

$$\vec{e} = \vec{V} \times \vec{B}l \quad (1-5)$$

即电动势向量 $\vec{e}$ 正比于速度向量 $\vec{V}$ 与向量 $\vec{B}$ 的向量积。而 $\vec{e}$ 的大小为:

$$e = VBl \sin \theta \quad (1-6)$$

其中 θ 是向量 $\vec{V}$ 与 $\vec{B}$ 的夹角。当 $\theta = 90^\circ$ 时, 则

$$e = VBl$$

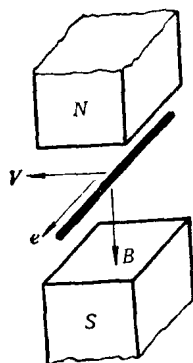


图1-3 运动导体产生感应电动势

V —导体的运动速度; B —磁感应强度; e —感应电动势。

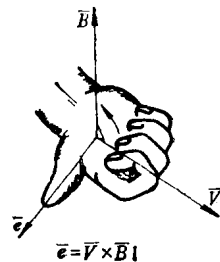


图1-4 感应电动势的方向

感应电势 $\vec{e}$ 的方向同样可由右手定则来确定: 如图 1-4, 向量 $\vec{e}$ 垂直于由向量 $\vec{V}$ 与 $\vec{B}$ 所决定的平面。当右手的四指由向量 $\vec{V}$ 的方向开始, 以不超过 π 的角度转向 $\vec{B}$ 时, 大姆的指向即为感应电动势的方向。

对于导体的长度 l , 尚需做进一步的说明。 l 实际上不是导体的自然长度 l_0 , 而是能切割磁力线的有效长度。如图 1-5(a), 导体放置的方向与速度 $\vec{V}$ 垂直, 切割磁力线的有效长度即一段导体的自然长度 l_0 。但如果导体不与速度 $\vec{V}$ 垂直, 如图 1-5(b), 则切割磁力线的导体有效长度为:

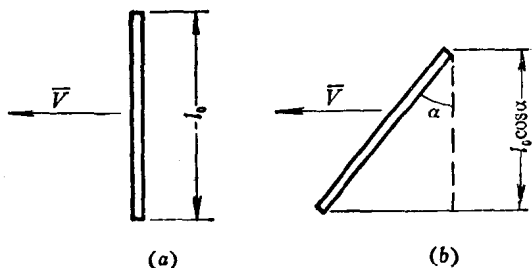


图1-5 导体的有效长度

$$l = l_0 \cos \alpha \quad (1-7)$$

极端的情况是 $\alpha = 90^\circ$, 这时导体已不再切割磁力线, 所以有效长度 $l = 0$ 。这时尽管导体在运动, 却不能产生感应电动势。

1-2 直流伺服电动机的结构与工作原理

1-2-1 结构与工作原理

首先通过一个简单的模型来说明直流伺服电动机的结构与工作原理。模型如图 1-6 所示。由图可知：直流伺服电动机包括三个组成部分。

1. 固定的磁极

磁极 $N-S$ 是电动机的定子，可以由永久磁铁构成，也可以由绕在磁极（软磁材料）上的励磁线圈构成。前一种是“永磁式”，后一种是“他激式”。例如，目前我国生产的 SZ 系列及 S 系列的直流伺服电动机均是它激式的，而 SYL 系列的直流力矩电机是永磁式的。

2. 电 枢

电枢是电动机的转子部分。它是一个表面上绕有线圈的圆柱形铁心。线圈 $abcd$ 的一根导体 ab 与开口环形铜片的一半（换向片）焊接在一起。而另一根导体则与另一个换向片焊接在一起。电枢（包括铁心，线圈，换向片）可以绕铁心的轴线转动。

3. 电 刷

电刷 A 与 B 是电动机定子的一部分。它以适当的压力紧紧地压在换向片上。当电枢转动时，每一个电刷都交替地与两个换向片接触。电刷通常是用石墨做成的，某些高质量的电机为了减小电刷与换向片的接触电阻，采用含有银粉的石墨电刷。

以上三个部分组成了一个完整的电机。现在讨论直流伺服电动机的工作原理。

如果在电刷 A 、 B 两端加以直流电压 U_a 。则有电枢电流 I_a 流经导体 ab 与 cd 。由于 A 接正电位， B 接负电位，因此 N 下的导体电流方向为 $a-b$ ，在图 1-7 中电流指向图面。而 S 极下的导体电流方向为 $c-d$ ，在图 1-7 中电流方向为流出图面。由于导体 ab 与 cd 均流过电流，所以在磁场中它们都受到电磁力 F 的作用。由于两电流方向是相反的，因而电磁力的方向也相反，这样就产生了一个如图 1-6 所示的逆时针方向的“电磁转矩” $M_{e,m}$ ，从

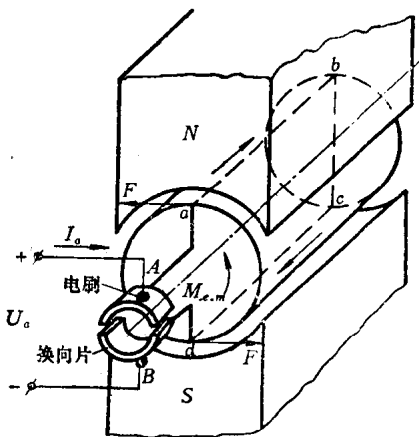
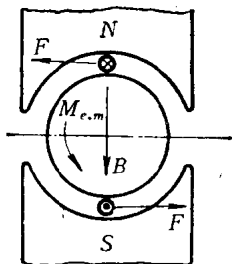


图1-6 直流伺服电动机模型



⊗ 电流指向图面 ⊙ 电流流出图面

图1-7 直流伺服电动机的工作原理

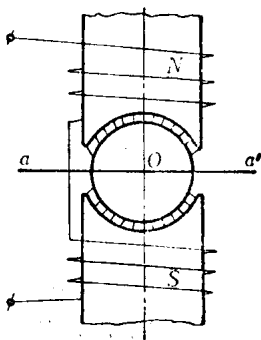


图1-8 磁极中性面

而驱动转子转动起来。当电枢恰巧转过 90° 时, 电枢线圈将处于磁极的中性面内[●]。由于气隙中的磁感应强度 B 等于零, 所以电磁转矩也等于零。但由于惯性的作用, 电枢将继续转动, 一旦换向片重与电刷接触, 导体 ab 与 cd 中的电流方向将改变。这就保证了电磁转矩的方向不变, 从而维持电动机不停地转动。从上面的分析可以看出, 要使电磁转矩方向不变, 则导体从一个磁极下 (例如 N) 转到另一磁极下 (如 S 极) 时, 导体中的电流方向必须相应地改变, 换向片与电刷就是实现这一任务的机械式的“换流装置”。换向片的名称也正是由此而得到。

实际电动机的结构比较复杂。为要得到足够大的转矩, 在电枢上安装了若干个绕组。图 1-9 是一台由八个绕组构成的电动机的原理图[●]。

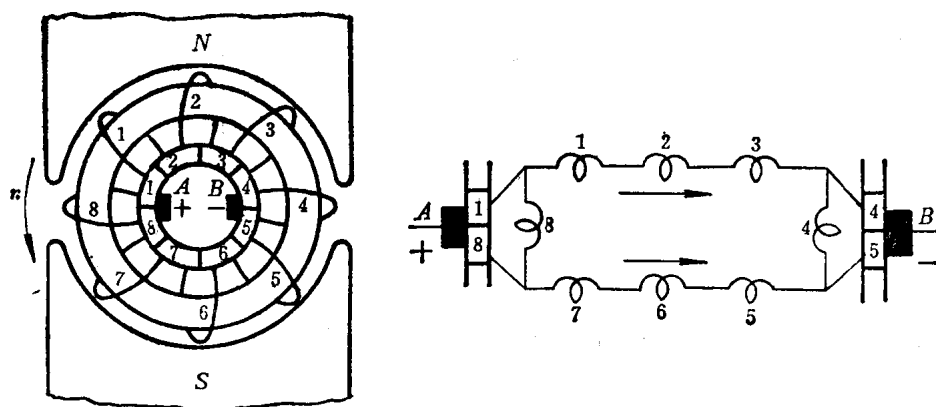


图1-9 由八个绕组构成的电枢

由图 1-9 可以看出, 由于换向片的联接而形成了两条支路。一条支路由绕组 1、2、3 串联构成, 另一条支路由绕组 5、6、7 串联构成。而绕组 4、8 分别被换向片 4、5 和电刷 B 以及换向片 1、8 和电刷 A 所短路。如果一个绕组匝数为 N_0 , 那么这时一个磁极下总的导体数应为:

$$\frac{N}{2} = 3N_0 \quad (1-8)$$

即一个磁极下导体的总数, 为该磁极下诸串联绕组导体数的总和。

1-2-2 电枢反应

如在 1-2-1 中所讨论, 当绕在磁极上的激磁线圈流过激磁电流时 (或磁极采用永磁材料), 在电机定子与转子的空气隙中就有磁通, 这叫做气隙主磁通。但是不应忘记, 一旦电枢中有电流通过, 这个电流也会建立一个磁场即电枢磁场。所以实际上磁场是由磁极产生

- 中性面是 N 极与 S 极当中, 通过电枢轴线的平面。如图 1-8 中通过轴线的 $a-a'$ 平面。在中性面上磁极所造成的空气隙中的磁感应强度 B 等于零。这个中性面亦称“几何中性面”。
- 这种绕组称为“环形绕组”。由于每个绕组都有一半绕在筒形铁心的内侧, 而内侧是没有磁通的, 因而不能产生电磁转矩。显然这种结构是不经济的。目前都采用“鼓形绕组”。但用来说明电动机的工作原理和物理过程, 环形绕组直观易懂。为了不过多地涉及结构问题, 所以我们仍用“环形绕组”来说明问题。

的主磁场与电枢磁场共同组成的。而合成后的实际磁场与主磁场是不相同的。亦即由于电枢磁场的存在，使磁场的方向与大小发生了变化。这一现象叫“电枢反应”。图 1-10 是主磁场在气隙中的分布情况。图 1-11 是电枢磁场在气隙中的分布情况。

由图 1-11 可以看出，电枢磁场的轴线恰恰与磁极主磁场的轴线相垂直。如果外加电压的极性相反，则电枢磁场的方向调转 180° 。此外，由于一个磁极下导体中电流的方向总是不变的，所以电枢磁场的方向并不因电枢的转动而有所变化。图 1-12 说明主磁场与电枢磁场合成的结果。

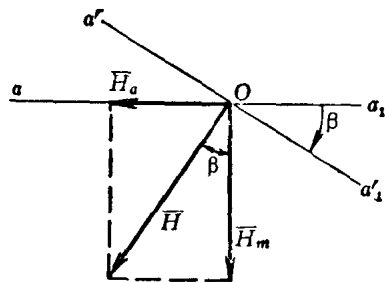
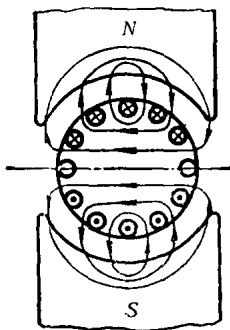
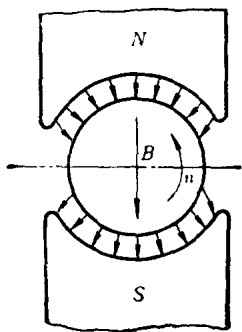


图1-12 合成磁场

$a-a_1$ —几何中性面； $\vec{H}_a$ —电枢磁场；

$a'-a'_1$ —物理中性面； $\vec{H}$ —合成磁场；

$\vec{H}_m$ —主磁场。

图1-10 主磁场在气隙中的分布

图1-11 电枢磁场在气隙中的分布

由图 1-12 可知，合成磁场的轴线将逆着电机旋转的方向相对于主磁场移过一个角度 β 。磁场的中性面也相应地移过一个 β 角，这时的中性面称做“物理中性面”。磁场的这种变化使得电刷离开了合成磁场的中性面。而本来当只有主磁场时，电刷处于电机的几何中性面内也就是处于物理中性面内。这样在图 1-9 中被电刷所短路的电枢绕组 4、8 并不会产生感应电动势。但对于合成磁场，正如图 1-12 所表明的，几何中性面与物理中性面不再重合了，于是绕组 4、8 必定会由于切割磁力线而产生感应电动势。又由于绕组 4、8 分别被电刷 A、B 所短路，所以产生了电流。随着电机的转动，绕组 4、8 将脱离电刷，从而由短路变为开路。于是电刷与换向片之间便产生火花。严重的火花会损坏电刷和换向片，使电机不能工作。上述现象是在绕组 4、8 的电流方向即将转换的过程中发生的，所以这一过程称为“换向过程”。在换向过程中出现的火花不仅可能损坏换向装置，而且是一个产生电磁波^ε的来源，它将干扰附近的电子设备。所以近年来出现了无刷直流电动机，以适应高要求的场合（如计算机的外围设备、宇宙飞行器中的设备等）。

换向时会产生火花，除了上述电磁方面的原因外，还有机械和化学的原因。例如电刷与换向片接触不良、换向器表面不光滑、换向片表面的氧化亚铜薄膜破坏、空气中有潮气或盐雾等。因此，保持工作环境的清洁，并对换向装置经常维护是十分重要的。定期用清洁的汽油或高纯度酒精清洗换向装置是十分必要的。此外，电刷与换向器接触的工作面是用专用的工具磨制与抛光的，因此不允许随意研磨该工作面。否则会使火花增加，带来不良的后果。

1-3 电磁转矩与电枢反电势

1-3-1 电磁转矩

由于已知载流导体在磁场中受力为:

$$F = IlB \quad (1-9)$$

因此作用于电枢上的电磁转矩为:

$$M = IlB \frac{D}{2} \quad (1-10)$$

其中 D 是电枢的直径。由于气隙中沿圆周分布的磁感应强度 B 是不均匀的, 所以每根导体所受到电磁力的平均值为:

$$F_{AV} = IlB_{AV} \quad (1-11)$$

其中 B_{AV} 是平均磁感应强度。因此平均电磁转矩为:

$$M_{AV} = IlB_{AV} \frac{D}{2} \quad (1-12)$$

如果导体的总数为 N , 则总的平均电磁转矩 (以下简称“电磁转矩”) 为:

$$M_{e.m} = IlB_{AV} \frac{D}{2} N \quad (1-13)$$

平均磁感应强度 (磁通密度) 为:

$$B_{AV} = \frac{2\Phi}{\pi Dl} \quad (1-14)$$

式中 Φ 为磁极所产生的磁通量。如果电枢绕组并联支路数为 a (如在图 1-9 中, $a = 2$),

则导体中电流 $I = \frac{I_a}{a}$, 于是总的电磁转矩为:

$$M_{e.m} = \frac{I_a}{a} l \frac{2\Phi}{\pi Dl} \frac{D}{2} N = \frac{N\Phi}{\pi a} I_a$$

由于 N 、 a 均是常数, 所以记

$$C_m = \frac{N}{\pi a}$$

于是

$$M_{e.m} = C_m \Phi I_a \quad (1-15)$$

式 (1-15) 中的单位为: $[M_{e.m}]$ ——牛顿·米; $[\Phi]$ ——韦伯; $[I_a]$ ——安。将式 (1-15) 右侧除以 9.8, 则转矩单位是公斤·米。

由式 (1-15) 可知: 当气隙磁通 Φ 为常值时, 电磁转矩与电枢电流成正比。同理, 当电枢电流一定时, 电磁转矩与磁通 Φ 成正比。

1-3-2 电枢的反电势

我们已经知道: 电枢通以电流会产生电磁转矩, 从而使电机转动起来。一旦电枢表面的导体运动起来, 它们就会切割磁力线, 因而在导体中又会产生感应电动势。如图 1-13, 在磁极 N 、 S 下面的导体中将分别感应出不同方向的电势。

与图 1-6 相对照可以看出: 电枢回路中产生的电势其方向与电枢外加电压方向相反, 因此这种感应电动势称为“电枢反电势”。

设一根导体中的反电势平均值为:

$$e = B_{AV} l V \quad (1-16)$$

则总的感应电动势为:

$$E_a = B_{AV} l V N \quad (1-17)$$

如果电机的转速为 n (每分钟 n 转), 则有:

$$V = \frac{\pi D n}{60} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 和式 (1-14) 代入式 (1-17), 可得:

$$E_a = \frac{N \Phi n}{30} \quad (1-19)$$

记

$$C_e = \frac{N}{30} \quad (1-20)$$

则

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-21)$$

式中 E_a 的单位是伏。 C_e 是由电机结构所决定的常数, 称为电机的电动势常数。

式 (1-21) 中, 当电机结构确定以后, C_e 就是常数。因此当磁通 Φ 一定时, 电枢反电势 E_a 与电机的转速成正比。如果忽略电枢回路的电阻, 则电枢外加电压 U_a 应与电枢反电势相平衡, 即 $U_a = E_a$ 。所以当 U_a 一定时, 电机的转速 n 与磁通 Φ 成反比。

由于电枢反电势与转速成正比, 利用这一原理可以把直流伺服电动机当做测速发电机使用。而专用的直流测速发电机在结构上与普通的直流伺服电动机相同。这表明了直流电动机与直流发电机具有可逆性质。了解这一点, 将有助于理解过渡过程中电机的工作状态。如果在直流伺服电动机电枢两端加上电压, 必将产生电磁转矩, 电动机将电能转变为机械能。反之, 若该电机是由其它动力拖动, 则电枢产生的感应电动势将向接在电枢两端的负载供电, 这时电机的作用是将机械能转变为电能。

直流电机的符号如图 1-14, 其中 (a) 为它激式, 而 (b) 为永磁式。由于电动机与发电机在原理上是互逆的, 所以其代表符号可以不加区别。

● 式 (1-21) 中系数 C_e 是根据图 1-6 的模型电机得出的。对于实际的电机:

$$C_e = \frac{pN}{60a_1}$$

式中 p —— 磁极对数;

a_1 —— 支路对数。

例如对于图 1-9 所示的, 具有环形绕组的电机, 磁极对数 $p = 1$, 支路对数 $a_1 = 1$, 于是

$$C_e = \frac{N}{60}$$

上式与式 (1-20) 相比相差 $1/2$ 。由图 1-9 不难看出, 这是由于两磁极下导体产生的感应电动势是并联的, 而在模型电机中两磁极下的感应电动势是串联的缘故。

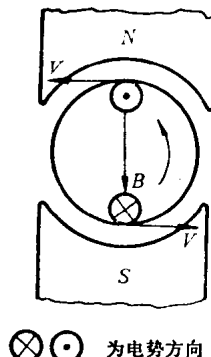


图1-13 电枢反电势

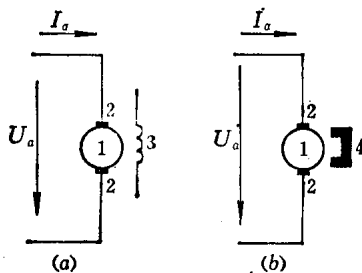


图1-14 直流电机的符号

1—电枢; 2—电刷; 3—激磁线圈; 4—永磁磁钢。
 I_a —电枢电流; U_a —电枢电压。

1-4 电压平衡方程式与转矩平衡方程式

1-4-1 电压平衡方程式

根据克希荷夫定律, 电枢外加电压 U_a 应与电枢回路的电阻压降 (电枢回路电阻 R_a 由电枢绕组电阻及换向装置的接触电阻组成) 和电枢反电势相平衡, 见图 1-15。

由图 1-15 得:

$$U_a = I_a R_a + E_a \quad (1-22)$$

由式 (1-22) 得电枢电流为:

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} \quad (1-23)$$

将式 (1-21) 代入式 (1-23) 可得:

$$I_a = \frac{U_a - C_e \Phi n}{R_a} \quad (1-24)$$

由式 (1-24) 可知: 当伺服电动机加上外电压 U_a , 电枢电流将是转速 n 的函数, 转速越高则电枢电流越小。而当 $n = 0$ 时 (即在电机启动的瞬间或堵转时), 电枢电流值为最大。此电流最大值称为堵转电流 (或启动电流) $I_{a, s}$ 。显然,

$$I_{a, s} = \frac{U_a}{R_a} \quad (1-25)$$

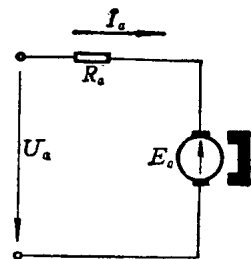


图1-15 电压平衡关系

启动电流要比电机正常工作时的电流大很多倍。例如 S-261 型直流伺服电动机正常允许的电枢电流为 0.42 安, 而当电压为额定值[●]时, 启动时的电流可达 1.5 安。如果普通的直流伺服电动机长期处于堵转状态, 或者反复地起停, 由于长期流过大的电枢电流, 可能会把电机烧坏。这在使用时应加以注意。功率大的 (几个千瓦以上) 直流电动机其启动电流可能达正常允许电流的十几倍以上。为了限制启动电流, 启动时在电枢回路应先串接一个电阻, 使启动电流限制在允许电流的 1.5~2 倍左右。待电机转速升高以后, 再将串接的电阻切除。在自动控制系统中所使用的几百瓦以下的小型直流伺服电动机, 其电枢电阻值比较大, 而且转速上升也比较快, 所以在电枢回路中可不用串接电阻。在本章第 1-7 节将讨论电枢回路中串接电阻所产生的影响。

1-4-2 转矩平衡方程式

当电枢有电流时, 就产生了电磁转矩。但是电机实际送出的转矩要略小于电磁转矩。因为电磁转矩 $M_{e, m}$ 首先要克服由电机的轴承及换向器所形成的摩擦转矩 M_f 。这个摩擦转矩称为电机本身的阻转矩。当电机转起来以后, 由于传动机构的阻力或带动其它负载而形成了负载转矩 M_L 。根据力学原理可知:

$$M_{e, m} = M_f + M_L + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-26)$$

其中 J 是电机转子及负载的转动惯量。当电机不带动其它惯性负载时, 电机轴上将只有电机转子的惯量 J_M 。这时

● 见本章第1-10节。