

现代控制元件



结构·原理·应用

武纪燕 刘振东 杨润生 李洪儒 编著

电子工业出版社

现代控制元件

结构·原理·应用

武纪燕 刘振东 杨润生 李洪儒编著

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书主要阐述自控系统中常用的各种现代控制元件,如交、直流伺服电动机、小功率同步电动机、步进电动机、旋转变压器、自整角机、轴角编码装置、传感元件、交磁电机放大机、可控硅放大元件、磁放大器、直流测速发电机、交流异步测速发电机等控制元件的结构、工作原理和特性,介绍控制元件在控制系统中的应用。

本书可作为工科院校、职工大学、电视大学以及函授大学的教材,也可作为有关工程技术人员和业余无线电爱好者的参考书。

2/31/5011

现 代 控 制 元 件

结构·原理·应用

武纪燕 刘振东 杨润生 李洪儒编著

责任编辑:章丽华

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

一二〇一工厂印刷 北京云峰印刷厂装订

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22.5 字数: 570 千字

1995年4月第1版 1995年4月第1次印刷

印数: 5000册 定价: 25.00元

ISBN 7-5053-2928-6/TN·826

前 言

本教材是考虑到近年来科学技术的新发展及根据上级提出的更新教材内容,加强高新技术比重以适应我军现代化建设的需要,同时参照高等学校教学指导委员会制定的,国家教委批准的高等工业学校自控专业教学的基本要求,结合我们多年来教学实践经验而编写的。

本书共分五篇十四章,依次阐述直流伺服电动机、交流伺服电动机、小功率同步电动机、步进电动机、旋转变压器、自整角机、轴角编码装置、传感元件、交磁电机放大机、可控硅放大元件、磁放大器、直流测速发电机、交流异步测速发电机、变换元件等现代控制元件的结构特点、工作原理、运行特性、工程应用,使用方法。考虑到控制元件与系统的联系及其影响已成为使用中的一个重要问题,同时根据后续课程的需要,对有关控制元件的动态特性及传递函数作了相应的分析与推导。

传感元件目前已成为一个前沿学科,但随着兵器现代化程度的提高,多种传感元件已在兵器中广泛应用,故本教材作为一章专门介绍它。轴角编码装置亦在兵器中应用,故也列为一章介绍。

本书涉及的元件多达40—50种,每章重点介绍一、二种有代表性的常用元件。

本书教学时数可在50—80学时内灵活选定。

本教材第一章及第十二章由刘振东编写,第二章、第六章、第十一章及第十三章由杨润生编写,第八章由李洪儒编写,第三章、第四章、第五章、第七章、第九章、第十章、第十四章、绪论、附录由武纪燕编写。全书由王士铃审阅。臧增源同志对本书的出版给予很大帮助,在此表示感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1994年3月

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 执行元件

第一章 直流伺服电动机	(5)
1-1 直流伺服电动机的结构与工作原理	(5)
1-2 电磁转矩与电枢反电势	(9)
1-3 直流伺服电动机的静态特性	(12)
1-4 直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态	(16)
1-5 直流伺服电动机的动态特性	(18)
1-6 直流伺服电动机的使用	(21)
1-7 直流力矩电动机	(22)
1-8 低惯量直流伺服电动机	(24)
1-9 无刷直流伺服电动机	(25)
思考题与习题	(27)
第二章 交流伺服电动机	(28)
2-1 交流两相伺服电动机的结构和工作原理	(28)
2-2 圆形旋转磁场作用下的定性分析	(32)
2-3 移相方法	(51)
2-4 椭圆形磁场及其分析方法	(54)
2-5 控制方法	(64)
2-6 运行特性和性能指标	(66)
2-7 交流伺服电动机的应用	(72)
2-8 产品的选择与使用	(76)
思考题与习题	(78)
第三章 小功率同步电动机	(80)
3-1 概述	(80)
3-2 永磁式同步电动机	(80)
3-3 反应式同步电动机	(82)
3-4 磁滞式同步电动机	(84)
3-5 反应式电磁减速同步电动机	(87)
3-6 永磁式电磁减速同步电动机	(88)
3-7 小功率同步电动机的应用及使用	(89)
复习思考题	(92)
第四章 步进电动机	(93)

4-1	概述	(93)
4-2	反应式步进电动机的结构特点与工作原理	(93)
4-3	反应式步进电动机的运行特性	(98)
4-4	步进电动机的驱动电源	(106)
4-5	步进电动机的微计算机开环控制简介	(108)
4-6	永磁式步进电动机	(112)
4-7	直线和平面步进电动机	(113)
4-8	步进电动机的应用举例	(114)
	思考题与习题	(117)

第二篇 测量元件

第五章	旋转变压器	(118)
5-1	概述	(118)
5-2	正余弦旋转变压器	(118)
5-3	线性旋转变压器	(125)
5-4	旋转变压器的技术性能指标	(126)
5-5	旋转变压器的应用举例	(128)
5-6	多极旋转变压器	(134)
	思考题与习题	(136)
第六章	自整角机	(137)
6-1	自整角机的构造	(137)
6-2	力矩式自整角机的工作原理	(139)
6-3	力矩式自整角机的运行特性和性能指标	(143)
6-4	控制式自整角机	(144)
6-5	控制式自整角机的运行特性和性能指标	(153)
6-6	双通道自整角机系统	(155)
6-7	产品的选择和使用	(156)
6-8	新型自整角机介绍	(160)
6-9	感应同步器	(162)
6-10	电感移相器	(168)
	思考题与习题	(171)
第七章	轴角编码装置	(172)
7-1	直接编码装置	(172)
7-2	旋转变压器及自整角机轴角编码装置	(177)
7-3	自整角机及旋转变压器的新型轴角编码装置	(182)
7-4	压电晶体测速陀螺	(186)
7-5	轴角编码装置应用举例	(187)
	思考题与习题	(188)
第八章	传感元件	(189)

8-1	传感器的基本概念	(189)
8-2	应变传感器	(190)
8-3	电容传感器	(198)
8-4	压电传感器	(206)
8-5	霍尔传感器	(212)
8-6	光电传感器	(219)
8-7	红外检测	(225)
8-8	激光检测	(232)
8-9	光纤传感器	(237)
	思考题与习题	(243)

第三篇 放大元件

第九章	交磁电机放大机	(244)
9-1	概述	(244)
9-2	交磁电机放大机的结构和工作原理	(244)
9-3	交磁电机放大机的运行特性	(247)
9-4	交磁电机放大机的应用举例	(249)
9-5	交磁电机放大机的使用	(250)
	思考题与习题	(252)
第十章	可控硅功率放大元件	(253)
10-1	概述	(253)
10-2	具有反电势负载的可控整流电路	(254)
10-3	可控硅——直流伺服机的特性分析	(258)
10-4	直流伺服机单相可控硅可逆控制	(262)
10-5	可控整流电路的有源逆变工作状态	(265)
10-6	两相交流伺服机的可控硅控制	(271)
10-7	可控硅控制应用举例	(276)
	思考题与习题	(278)
第十一章	磁放大器	(279)
11-1	磁放大器的结构和工作原理	(279)
11-2	双铁芯简单磁放大器的工作原理	(282)
11-3	双拍差动磁放大器	(284)
11-4	磁放大器的特性参数	(286)
	思考题与习题	(287)

第四篇 测速发电机

第十二章	直流测速发电机	(289)
12-1	直流发电机的工作原理	(289)
12-2	直流测速发电机的输出特性	(290)

12-3	直流测速发电机的误差及其修正方法	(293)
12-4	直流测速发电机的性能指标和应用	(296)
12-5	直流测速发电机的发展趋势	(299)
	思考题与习题	(301)
第十三章	交流异步测速发电机	(302)
13-1	异步测速发电机	(302)
13-2	异步测速发电机的选择和使用	(310)
	思考题与习题	(311)

第五篇 变换元件

第十四章	相位灵敏检波器和极性调制器	(313)
14-1	概述	(313)
14-2	相位灵敏检波器	(313)
14-3	极性调制器	(318)
	思考题与习题	(320)
附录 I	变压器	(321)
附录 II	继电器与接触器	(332)
附录 III	控制电机型号命名方法及产品名称代号	(340)
	参考书目	(352)

绪 论

随着科学技术的发展,自动控制系统在国民经济及国防事业中的作用日益重要。如在国防现代化方面就有:导弹遥测遥控、雷达装置自动扫描、火炮自动瞄准、飞机和军舰自动导航以及卫星等自动控制系统。据资料统计,一个自动火炮系统仅控制电机就要用 60 多台,一枚导弹亦要用 60 多台控制电机,一台机电式指挥仪要用几十台控制电机,一架现代化的大型飞机装有 400 多种不同型号的控制元件。

一、现代控制元件在自动控制系统中的作用和地位

下面以雷达扫描的过程为例来具体说明现代控制元件在自动控制系统中所起的作用和地位。

炮瞄雷达的天线控制系统一般有两种工作状态,一种是当雷达还没有捕捉到飞机时,要由雷达手操作,使天线旋转去搜索飞机,这时雷达处于搜索状态或称为手控状态。第二种状态是当雷达捕捉到目标后,雷达天线控制系统控制天线自动跟踪飞机运动,这时雷达处于自动跟踪状态。我们以手控状态为例介绍控制元件在自动控制系统中的作用。

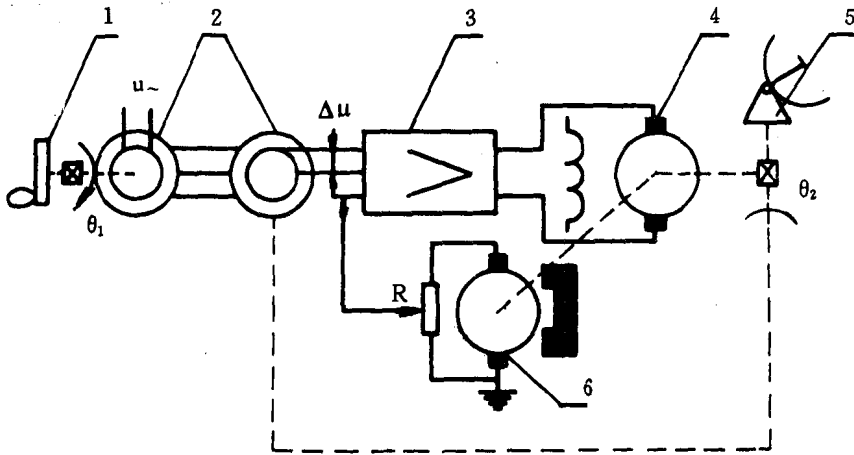


图 0-1 炮瞄雷达天控系统手控状态原理图

1. 手轮; 2. 自整角机; 3. 放大器; 4. 直流伺服电动机; 5. 天线; 6. 测速发电机。

在搜索空中飞机时,我们希望雷达天线按照要求在空间旋转,使雷达发出的强大的电磁波随着天线的旋转在空中搜索。由于雷达天线又大又重,人是摇不动的,因此常用图 0-1 所示的天线控制装置来实现控制。这时雷达手只需要摇动手轮 1,使自整角发送机的转子旋转,通过该系统的作用,就可使雷达天线跟着自整角发送机的转角自动地旋转,发送机转多少度,天线也转多少度。其具体控制过程如下:

我们从自整角机看起,与手轮机械联结的为自整角发送机,与天线轴机械联结在一起的为自整角接收机,自整角发送机和自整角接收机一般不单独使用而是成对地使用。当发送机转角 θ_1 和自整角接收机转角 θ_2 相等,即误差角 $\Delta\theta(\Delta\theta=\theta_1-\theta_2)$ 等于零时,自整角接收机的输出电压 Δu 等于零。当转角 θ_1 和 θ_2 不相等时,自整角接收机就输出一个和 $\Delta\theta$ 成正比的交流电压 Δu 。这样,自整角机可以敏感出天线的转角是否跟上自整角发送机的转角。因此自整角机被称为测量元件。

假如雷达手向某一方向摇动手轮1,产生一个误差角 $\Delta\theta$,这时自整角接收机就有交流电压 Δu 输出,这个电压经过交流放大器放大后,由相位灵敏检波器转换成直流误差电压,送到直流放大器放大,放大后的直流电压控制直流伺服电动机转动,从而带动天线转动,而天线又通过齿轮系统带着自整角接收机的转子转动。当 θ_1 等于 θ_2 时, $\Delta\theta$ 等于零, Δu 等于零,电机停止转动。当雷达手连续转动手轮时,天线也连续转动。当反方向转动手轮时, Δu 的相位与正转时相差 180° ,电动机也就反方向转动。这样,雷达天线就能跟随手轮转动,达到了控制天线的目的。

为了减小在跟踪过程中可能出现的振荡,在电动机轴上联接一个测速发电机6,测速发电机发出的电压与电动机的转速成正比,将此电压反馈到放大器中去,从而使系统的特性得到改善。

从上面的分析我们可以看出整个工作过程包括二步,第一步是通过一对自整角机检测出手轮轴(输入轴)与天线轴(输出轴)之间的偏差,并把误差角变为误差电压信号;第二步是把误差电压信号放大后去控制电动机,带动天线向误差角减小的方向旋转,也就是纠正偏差。因此,整个工作过程可概括为“检测偏差,纠正偏差”。这种控制系统称为按偏差的自动控制系统,是最常见的一种自控系统。除此之外,还有按扰动的自动控制系统和复合控制系统等。

二、现代控制元件的分类

根据控制元件在自动控制系统中的职能可以把它分成五类:

1. **测量元件(敏感元件)**:把被测量(例如转角或转角差)转换为另一种易于显示、传输或记录的物理量(例如电量)。如传感器、自整角机、旋转变压器等作敏感元件。图0-1的系统中是用自整角机作敏感元件。

2. **变换元件**:它的作用是根据执行元件的需要,将误差信号由交流变为直流或直流变为交流。常用相敏检波器和极性调制器等作变换元件。图0-1中是用相敏检波器作变换元件。

3. **放大元件**:它是用来将微弱的误差信号加以放大,其中包括电压放大和功率放大。常用晶体管放大器、可控硅放大器、磁放大器、电机放大机等作放大元件。图0-1的系统中用可控硅放大器或电机放大机作功率放大元件。

4. **执行元件**:它是用来把放大后的电信号转变为机械位移,以带动被控制对象运动。常用直流伺服电动机、交流伺服电动机等作执行元件。图0-1的系统中是用直流伺服电动机作执行元件。

5. **校正元件**:它用来改善系统的品质。常用测速发电机、测速电桥以及校正网络等作校正元件。在图0-1的系统中用直流测速发电机作校正元件。

以上几类元件习惯上被称为构成自控系统的功能元件,各式各样的按偏差的自控系统,虽然完成的任务各不相同,但都是由以上功能元件构成。例如图0-1的天线控制系统,可以用图0-2的方框图来表示。

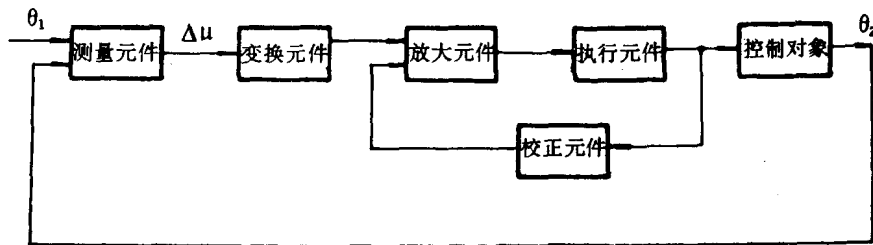


图 0-2 自控系统方框图

三、自动控制系统对元件的主要要求

控制元件作为自动控制系统中的一类重要元件,其性能好坏将直接影响到整个控制系统的工作性能。现代自动控制系统对控制元件除了要求其体积小、重量轻还要求它有高可靠性、高精度和快速性。

1. **高可靠性:**控制元件的工作可靠性对保证自动控制系统的正常工作极为重要。在宇宙航行系统、军事装备等系统中,对所用控制元件的可靠性总是提出第一位的要求。据概率计算,如果单个元件的可靠性是 99.5%,则 40 个元件所组成的系统的可靠性仅为 81.8%,100 个元件组成的系统,其可靠性仅为 60.5%。譬如一套自动控制系统有时要用到数十台甚至数百台的控制电机,它们在系统中又往往处于关键地位,因此,强调可靠性是不容置疑的。

2. **高精度:**所谓精度就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,元件的精度在相当程度上决定了整个系统的精度。因此提高精度是对元件提出的另一个主要的要求。

3. **快速性:**在自动控制系统中由于信号是经常变化的,有时变化甚至是极其迅速的,所以就要求元件特别是功率元件(如执行电动机)应能作出快速的响应。实践表明:执行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个基本要求。

四、控制元件的发展概况

这里我们仅谈谈本书主要介绍的控制电机的发展概况。所谓控制电机一般是指用于自动控制、自动调节、远距离测量、随动系统以及计算装置中的微特电机。其机壳外径在 12.5 毫米至 130 毫米之间,输出功率从数百毫瓦到数百瓦,但在大功率自动控制系统中,有些控制电机的输出功率也可达数十千瓦,机壳外径也可达数百毫米。虽然,从基本的电磁感应原理来说,控制电机和普通旋转电机并无本质上的差别,但普通旋转电机着重于对起动和运行状态力能指标的要求,而控制电机则着重于特性的高精度和快速响应。

近年来,随着控制系统的不断完善和更新,控制电机也有许多新的发展动向。

1. **提高可靠性和适应性:**近些年来研制出各类无刷控制电机,可克服有刷电机可靠性差、

有无线电干扰等致命缺点。在导弹、火箭等方面使用的电机，则要求它具有特高的耐冲击、振动等性能。

2. **提高精度**：如采用多极旋转变压主和多极感应同步器可大大提高精度。

3. **小型化、数字化**：由于大规模集成电路的广泛应用，为自动控制系统小型化创造了条件，相应地要求控制电机也能满足整机小型化的要求。特别在航天设备上的控制电机应具有最小的体积和重量。为此，采用高导磁材料来发展组合电机（如伺服测速机组等），以进一步实现小型化。在自动控制系统中，已广泛采用数字机，其输出装置常常要求把数字信息转变为机械位移。步进电机则较好地解决了这方面的问题。

最后应该说明，随着现代科学技术的发展，相继出现了一些新型元件，这些元件的出现打破了电机的传统概念，例如霍尔电机、集成电路电机等。

第一篇 执行元件

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,执行元件主要由各种伺服电动机所组成。目前大量使用的是直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机等。

执行元件的功能是把输入的电压信号转换为电机轴上的机械转矩,带动负载位移和旋转。

自动控制系统对执行元件的基本要求是:

- (1)控制简单,并具有较宽的调速范围;
- (2)动作迅速,时间常数小;
- (3)具有稳定的机械特性;
- (4)工作可靠,无自转现象(当输入信号降为零时,伺服电动机应能立即停止转动)。

第一章 直流伺服电动机

1-1 直流伺服电动机的结构与工作原理

直流伺服电动机的原理模型如图 1-1 所示。从图上可见,直流伺服电动机是由定子和转子两大部分组成。定子主要部分是磁极,即 N-S 极,可以由永久磁铁构成,也可以由软磁材料矽钢片叠成磁极,其上安装了励(激)磁绕组,以便通入励磁电流形成磁场,前者称为永磁式伺服电动机,后者称为电磁式伺服电动机。而电磁式又因励磁电流的引入方式之不同,又分为他励式、并励式、串励式和复励式四种,其符号见图 1-2。永磁式的磁场是由永久磁铁产生,其符号见图 1-2(e)。

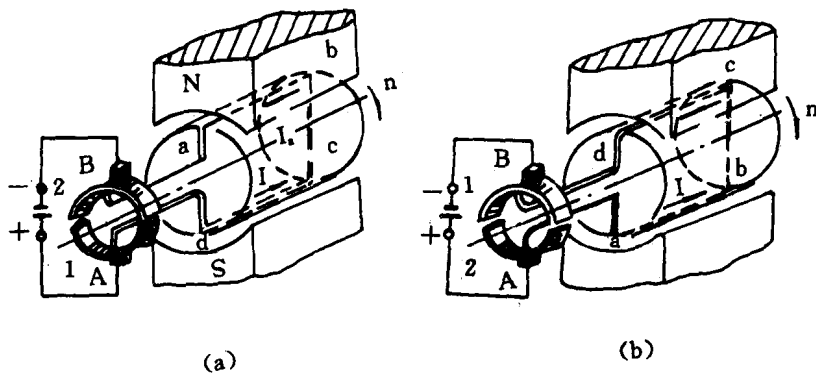


图 1-1 直流伺服电动机的工作原理

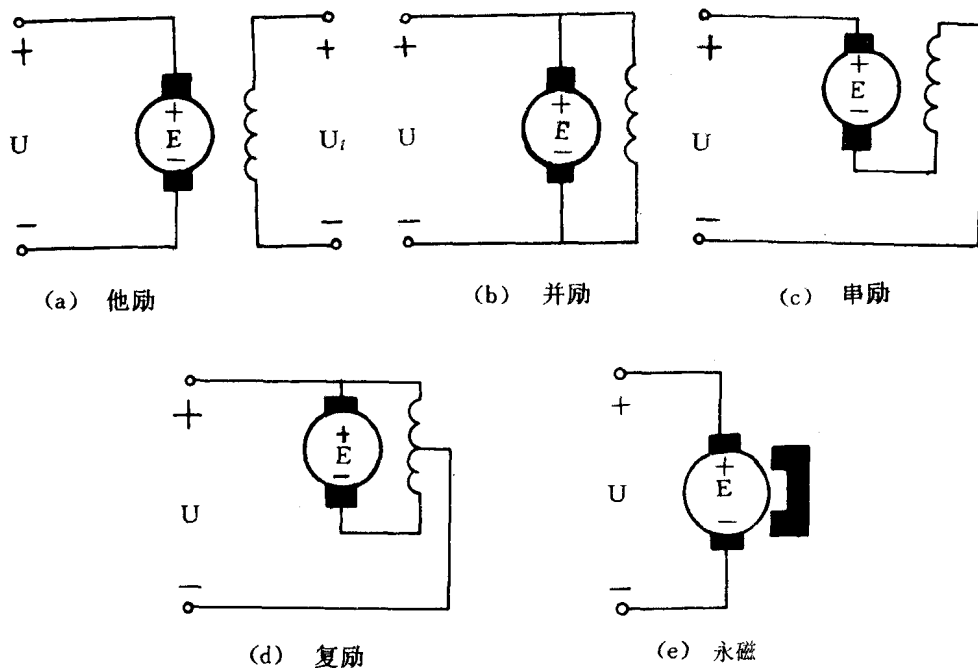


图 1-2 直流伺服电动机的励磁方式

一、直流电机的基本结构

这里以他励电磁式电机为例。图 1-3 是其结构简图。整个电机可分为两个部分：静止部分（称为定子）、旋转部分（称为转子）。定子由定子铁心、激磁绕组、机壳、端盖和电刷装置等组成。转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、轴、轴承等组成。

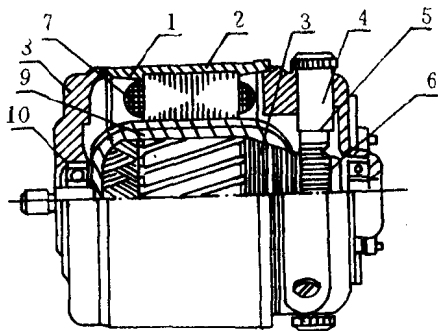


图 1-3 直流电机的基本结构

- 1—机壳 2—定子铁心 3—电枢 4—电刷座 5—电刷
6—换向器 7—激磁绕组 8—端盖 9—空气隙 10—轴承

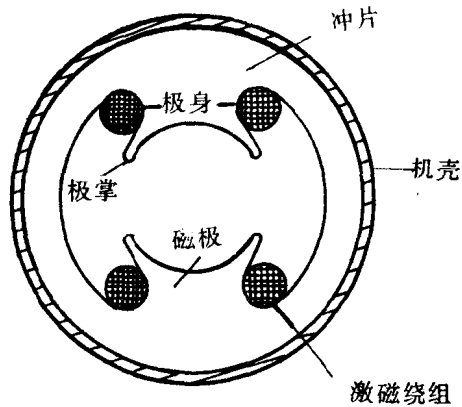


图 1-4 定子结构简图

电机的主要零部件的结构和作用：

1. 定子铁心和激磁绕组

小容量的直流电机定子铁心通常是用厚为 0.35—0.5mm 的电工钢片的冲片(见图 1-4)叠压而成。铁心固定在机壳内。机壳是用铝合金铸成的。为了使磁通在定子和转子之间的间隙(称为空气隙)中分布更为合理,磁极的极掌做成如图 1-4 所示的形状。套在磁极上的激磁绕组是用漆包线绕制而成的,其外面再包上绝缘材料,套在磁极上。当激磁绕组通上直流电时,产生磁通,形成 N、S 极。

2. 电枢铁心和电枢绕组

电枢铁心也是用厚为 0.35—0.5mm 的电工钢片的冲片(冲片的形状如图 1-5 所示)叠制而成。铁心上的槽是安放绕组的,见图 1-6。

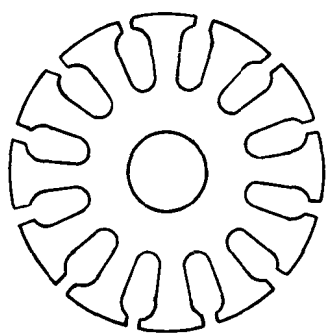


图 1-5 电枢铁心冲片

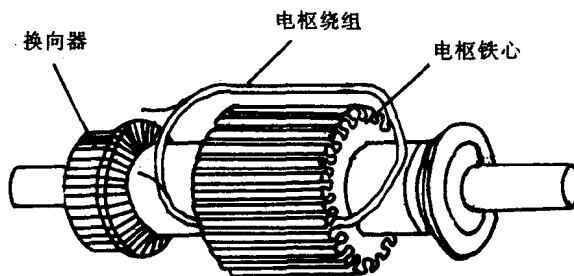


图 1-6 电枢铁芯和绕组

3. 换向器和电刷

换向器是由许多换向片(铜片),中间用云母绝缘,叠成一个外表面光滑的圆柱体。换向片圆柱体铸封在塑料套筒上(图 1-7),其断面示意图如 1-8 所示。

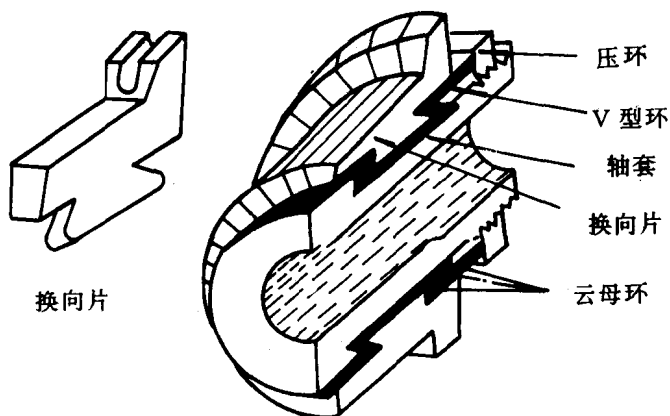


图 1-7 换向器结构

电刷放在电刷座内,座内有弹簧将电刷压在换向器上,使其和换向器始终保持良好的滑动

接触(见图 1-3)。

电刷和换向器的作用是将电枢中产生的交流电势变成直流电势由电刷输出。

二、直流伺服电动机的工作原理

见图 1-1,当将直流电压加到 A、B 两电刷之间,电流从 A 刷流入,从 B 刷流出,载流导体

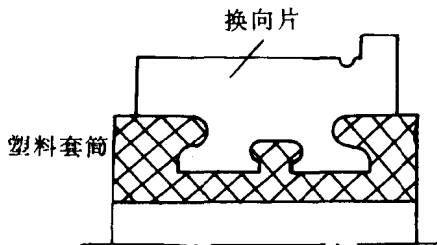


图 1-8 塑料换向器剖面图

ab 在磁场中受的作用力 F 按左手定则指向顺时针方向。同理,载流导体 cd 受到的作用力也是顺时针方向的。因此,产生的电磁转矩是顺时针方向的,转子绕顺时针方向旋转起来。当电枢恰好转过 90° ,电枢线圈将处于磁极的中性面内(这时,线圈不切割磁力线),因此无电磁转矩。但由于惯性的作用,电枢将继续转动,当电刷与换向片再次接触时,导体 ab 和 cd 交换了位置(以中性面上下分)。因此,导体 ab 和 cd 中的电流方向改变了。这就保证了电枢受到的电磁转矩方向不变,因而电枢可以连续转动。从上面的

分析可以看出,要电磁转矩的方向不变,则导体从一个磁极下(如 N 极)转到另一个磁极下(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”。换向片的名称也是由此而得的。

实际电动机的结构比较复杂,为了得到足够大的转矩,在电枢上安装了许多绕组。图 1-9 是一台由八个绕组构成的电动机的原理图。

由图 1-9 可以看出,八个绕组由八个彼此绝缘的换向片连接而形成两条支路。

电枢反应

定子磁极在定子磁极和转子电枢之间的空气隙中形成的磁场(通)称为主磁场(通)。当电枢绕组中通入电流,也在空气隙中形成一个磁场,称为电枢磁场。因此,实际上在空气隙中起作用的磁场应是主磁场和电枢磁场合成的结果,即为合成磁场(见图 1-10)。可见,由于电枢磁场的存在,使主磁场的大小和方向都发生了变化。这一现象称为“电枢反应”。图 1-10(a)是主磁场在空气隙中的分布情况;(b)是电枢磁场在空气隙中的分布情况;(c)是磁场的矢量图。

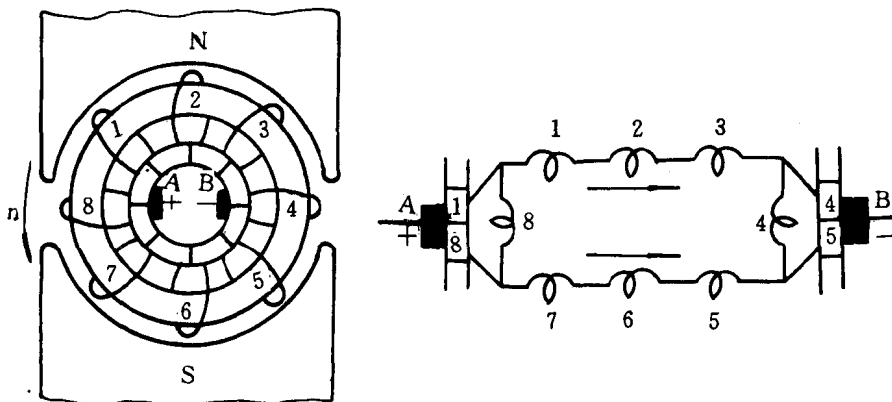


图 1-9 由八个绕组构成的电枢

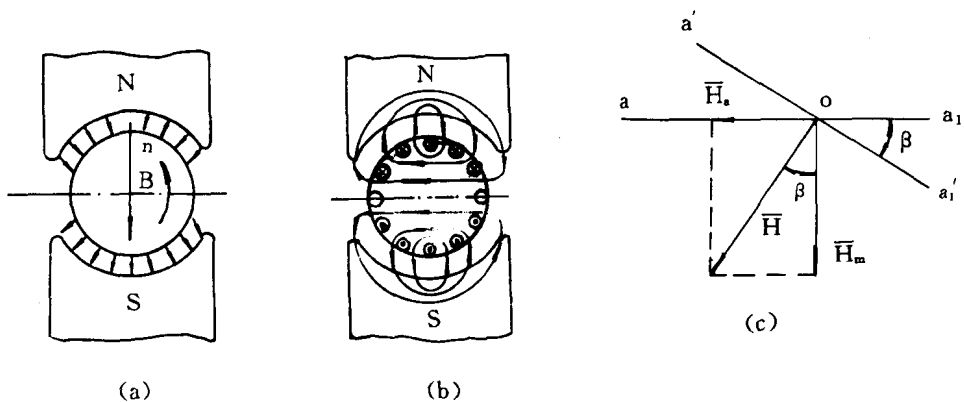


图 1-10 合成磁场

(a)主磁场在气隙中的分布 (b)电枢磁场在气隙中的分布 (c)合成磁场

$a-a_1$ —几何中性面 $a'-a'_1$ —物理中性面 H_a —电枢磁场 \bar{H} —合成磁场 \bar{H}_m —主磁场

由图 1-10 可见,合成磁场的轴线逆着电枢转动方向相对于主磁场转过 β 角。因此,使合成磁场的中性面也相应地移过一个 β 角。因此电刷不在中性面上,被电刷短路的绕组 4、8 必将切割磁力线而产生感应电动势(见图 1-9),且有感应电流。随着电枢的转动,绕组 4、8 将脱离电刷,由短路状态变为开路状态。于是在电刷与换向片间便产生火花。这种发生在绕组换向过程中的火花,不仅损坏换向装置、电刷,同时产生无线电波干扰。

产生换向火花还和下列因素有关:电刷与换向片接触不良、换向器表面不光滑、换向片表面的氧化铜薄膜破坏、空气中有潮气和盐雾等。因此,保持工作环境的清洁,并对换向装置定期维护保养是十分必要的。定期用清洁的气油或高纯度酒精清洗换向装置是非常必要的。此外,由于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,因此不能随意研磨该工作面。否则会使火花增加,带来不良后果。

1-2 电磁转矩与电枢反电势

一、电磁转矩

由于电枢外圆柱面上的一个载流导线在磁场中受到的作用力

$$F = I l B \quad (1-1)$$

它使电枢受到的电磁转矩

$$M = I l B \frac{D}{2} \quad (1-2)$$

式中, l —是导线的长度;

$\frac{D}{2}$ —是导线所在圆柱面的半径;

B —是磁感应强度。

由于,磁感应强度是不均匀的,这里应用其平均值 B_{av} ,且考虑到电枢表面共有 N 个绕组,那么,电枢受到的电磁转矩