

伺服系统

敖荣庆 袁坤 编

- 伺服系统基础知识
- 伺服系统位置检测元件
- 伺服系统驱动设备
- 典型伺服系统
- 伺服系统性能分析

航空工业出版社

伺 服 系 统

敖荣庆 袁坤 编
肖尧先 主审

航空工业出版社

内 容 提 要

本书根据机械设计、制造及自动化,机电一体化,航空航天,自动化控制等专业的需要而编写。主要内容有伺服系统基础,伺服系统驱动元件的结构、工作原理、特点及应用,伺服系统检测器件的结构、工作原理及其使用,各种典型伺服系统的组成原理,伺服系统的计算机控制,伺服系统的误差分析和伺服系统的设计等。

本书在编写过程中,力求理论联系实际,深入浅出,实用性强。适合作为大专院校本科、研究生的专业基础教材,也可供从事数控技术、机电一体化产品开发、控制系统设计和航空航天等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

伺服系统 / 敖荣庆, 袁坤编. —北京: 航空工业出版社, 2006. 9

ISBN 7-80183-731-2

I. 伺... II. ①敖...②袁... III. 伺服系统

IV. TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 039035 号

伺服系统 Sifu Xitong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64978486 010-64919539

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2006年9月第1版

2006年9月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 13.5

字数: 342千字

印数: 1—2800

定价: 28.00元

前 言

当今科学技术飞速发展，数控技术、机器人、智能化控制应用于各行各业，在这些应用领域，驱动和控制都是通过伺服系统来实现。伺服系统是一切自动化系统中不可缺少的关键环节，为满足广大读者的需要，编者将十多年的教学、科研工作中的经验积累进行总结，编写此书。

伺服系统很早就出现在以随动系统为控制系统的液压仿形加工中，这种液压随动系统是伺服系统的初级阶段。随着现代计算机技术的发展、电力电子技术的出现和微电子技术的飞速发展，现在的伺服系统都是数字化控制的现代伺服系统。伺服系统是联系控制指令发出装置与执行机构的中间环节，起着传递控制信息和反馈执行机构运行状态信息的桥梁作用。随着微电子技术、电力电子技术、计算机控制技术、信息技术、数字处理技术、传感器与检测技术的飞速发展，伺服系统的精度、响应速度已大大提高。

本书的特点：书中大部分内容取自编者的科研课题成果，并结合了编者的工程实际体会。编者在编写本书时，力求理论联系实际，贯彻少而精的原则，旨在培养应用型工程技术人才。全书以速度伺服和位置伺服控制为主线，从介绍伺服系统的基础理论知识着手，论述伺服系统的各个组成部分，并结合工程实际叙述了伺服系统的性能及其分析方法，同时对伺服系统的设计作了较为详细的介绍。

本书主要内容：伺服系统的基础知识，伺服系统的位置检测元件，伺服系统的驱动设备，步进式伺服系统，直流伺服系统，交流伺服系统，位置伺服系统，伺服系统的性能分析。

本书内容实用、图文并茂、系统全面，可作为高等院校本科、研究生教材，也可供从事数控技术，机电一体化产品开发，航空航天、导弹、卫星等领域的自动控制的工程技术人员参考。

本书由袁坤博士和教荣庆副教授合作编写，并由南昌航空工业学院教授肖尧先博士担任主审，肖教授对本书进行了仔细的审阅，并提出了很多修改意见，此外南昌航空工业学院机械系机电教研室的老师们也提出了很多有益的建议，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2005年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 发展简况	(1)
第二节 伺服系统的组成及其基本特征	(1)
第三节 伺服系统的分类	(2)
第二章 位置检测元件	(4)
第一节 概述	(4)
一、数控机床对位置检测元件的要求	(4)
二、位置检测元件的分类和特点	(4)
第二节 旋转变压器	(5)
一、旋转变压器的结构	(5)
二、旋转变压器的工作原理	(5)
三、旋转变压器的信号处理	(7)
第三节 感应同步器	(8)
一、感应同步器的结构	(8)
二、感应同步器的工作原理	(9)
三、感应同步器的信号处理	(9)
四、感应同步器数字位置测量系统	(10)
五、感应同步器的安装	(11)
六、感应同步器的分类和技术参数	(12)
第四节 脉冲编码器	(13)
一、增量式脉冲编码器	(13)
二、绝对式脉冲编码器	(15)
第五节 光栅	(17)
一、光栅的分类	(17)
二、光栅的结构	(18)
三、光栅的工作原理	(19)
四、光栅读数头	(20)
五、光栅检测装置的辨向	(22)
六、提高光栅分辨精度的措施	(22)

七、光栅的安装	(23)
第六节 磁尺	(25)
思考题与习题	(27)
第三章 驱动元件	(29)
第一节 步进电机	(29)
一、步进电机的分类	(29)
二、步进电机的结构	(29)
三、步进电机的工作原理	(32)
四、步进电机的主要特性	(33)
五、步进电机的主要技术参数及选用	(36)
第二节 直流伺服电机	(38)
一、小惯量直流伺服电机	(38)
二、宽调速直流伺服电机	(39)
第三节 交流伺服电机	(44)
一、交流伺服电机的基本结构	(44)
二、无刷直流电机	(45)
三、正弦波永磁同步电机	(49)
四、交流伺服电机的主要技术参数	(50)
思考题与习题	(50)
第四章 步进式伺服系统	(52)
第一节 环形分配器	(53)
一、硬件环形分配器	(53)
二、软件环形分配器	(57)
第二节 步进电机的驱动功率放大器	(61)
一、对功率放大器的要求和功率放大器的分类	(61)
二、提高驱动电源性能的措施	(62)
三、常见功率放大器	(64)
第三节 开环控制的伺服系统设计	(71)
一、系统方案设计	(72)
二、机械系统的设计计算	(73)
三、机械系统动态特性分析	(78)
四、系统误差分析	(80)
五、机械系统设计分析举例	(81)
六、控制系统设计	(85)
思考题与习题	(85)

第五章 直流伺服系统	(86)
第一节 直流伺服控制技术的发展	(86)
第二节 直流调速系统	(88)
一、直流电动机调速的方法与稳态调速指标	(88)
二、转速负反馈有静差调速系统	(90)
三、电流截止负反馈调速系统	(94)
四、转速负反馈无静差调速系统	(96)
五、单闭环调速系统实例	(98)
第三节 双闭环直流调速系统	(99)
一、双闭环调速系统的组成和静态特性	(99)
二、转速、电流双闭环系统的动态性能	(102)
三、双闭环系统的抗干扰性能	(107)
第四节 可逆直流调速系统	(107)
一、晶闸管—电动机系统的可逆线路和回馈制动	(108)
二、两组晶闸管装置可逆系统中的环流	(111)
三、可控环流的可逆调速系统	(114)
四、逻辑无环流可逆系统	(115)
第五节 晶体管脉宽调制 (PWM) 调速系统	(118)
一、脉宽调速系统 (PWMS) 的工作原理	(118)
二、脉宽调速系统的控制电路	(124)
思考题与习题	(127)
第六章 交流伺服系统	(129)
第一节 交流变频调速概述	(129)
一、晶闸管变频器的工作原理	(129)
二、异步电动机在调频时的机械特性	(131)
三、变频调速时的传递函数	(135)
第二节 交—直—交流变频调速系统	(136)
一、电压型变频器	(137)
二、电流型变频器	(143)
三、PWM 变频器	(145)
第三节 三相异步电动机变频调速控制系统	(150)
一、异步电动机变频调速控制系统的主要控制环节	(150)
二、转速开环系统	(156)
三、 U/f 的 PWM 控制系统	(158)
四、转差频率控制系统	(159)
第四节 三相异步电动机矢量变换控制系统	(160)
一、异步电动机坐标变换原理	(160)
二、矢量控制系统	(169)

思考题与习题	(170)
第七章 位置伺服系统	(172)
第一节 概述	(172)
一、伺服系统常用的控制方式	(172)
二、数控机床对伺服系统的要求	(175)
第二节 脉冲比较伺服系统	(175)
一、脉冲比较伺服系统组成原理	(175)
二、脉冲比较电路	(176)
第三节 相位比较伺服系统	(178)
一、相位比较伺服系统组成原理	(178)
二、脉冲调相器	(179)
三、鉴相器	(180)
第四节 幅值比较伺服系统	(182)
一、幅值比较伺服系统的组成原理	(182)
二、鉴幅器	(184)
三、极性处理电路和电压/频率变换器	(185)
四、正、余弦信号发生器	(186)
思考题和习题	(188)
第八章 伺服系统性能分析	(189)
第一节 闭环伺服系统的数学模型	(189)
一、控制系统的一般结构与传递函数	(189)
二、典型伺服进给系统的组成环节及其数学模型	(190)
三、典型伺服进给系统的传递函数	(193)
第二节 闭环伺服系统分析	(195)
一、系统的稳定性	(195)
二、稳态性能分析	(195)
三、动态过程分析	(197)
第三节 对位置伺服系统的要求	(200)
一、开环增益	(201)
二、位置精度	(201)
三、调速范围	(202)
四、速度误差系数	(203)
五、伺服系统的可靠性	(204)
思考题与习题	(205)
参考文献	(206)

第一章 绪 论

第一节 发展简况

伺服系统是自动控制系统中的一类，它是伴随控制论、微电子和电力电子等技术的应用而发展起来的，最早出现于 20 世纪初。1934 年，第一次提出了伺服机构（Servomechanism）这个词，随着自动控制理论的发展，到 20 世纪中期，伺服系统的理论与实践均趋于成熟，并得到广泛应用。近几十年来，新技术革命，特别是微电子技术和计算机技术的飞速进步，使伺服技术如虎添翼地突飞猛进，其应用几乎遍及社会的各个领域。

在军事上，雷达天线的自动瞄准跟踪控制，火炮、导弹发射架的瞄准运动控制，坦克炮塔的防摇稳定控制，防空导弹的制导控制等；冶金行业中，电弧炼钢炉、粉末冶金炉等的电极位置控制，水平连铸机的拉坯运动控制，轧钢机轧辊压下运动的位置控制等，这些人工操作无法实现的控制都是依靠伺服系统来实现。运输行业中电气机车的自动调速、高层建筑中电梯的升降控制、船舶的自动操舵、飞机的自动驾驶……都是由各种伺服系统完成，从而减轻了操作人员的劳动强度，也大大提高了工作效率。在计算机外围设备中，磁盘、光盘驱动系统，绘图仪的画笔控制系统等都少不了伺服系统。随着 CD 在家庭中的普及，伺服系统也进入千家万户的日常生活中。

在机械制造行业，伺服系统应用得最多最广泛，各种高性能机床运动部件的速度控制、运动轨迹控制，都是依靠各种伺服系统完成的。20 世纪 50 年代出现的数控机床是由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体等部分组成，其中伺服系统的性能是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。

第二节 伺服系统的组成及其基本特征

什么是伺服系统？伺服系统就是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律，通常称闭环系统。数控机床的伺服系统是指以机床移动部件的位置和速度作为控制量的自动控制系统，亦称随动系统。

伺服系统的种类很多，组成状况和工作状况也是多种多样。可简单地用图 1-1 来表示它的组成。

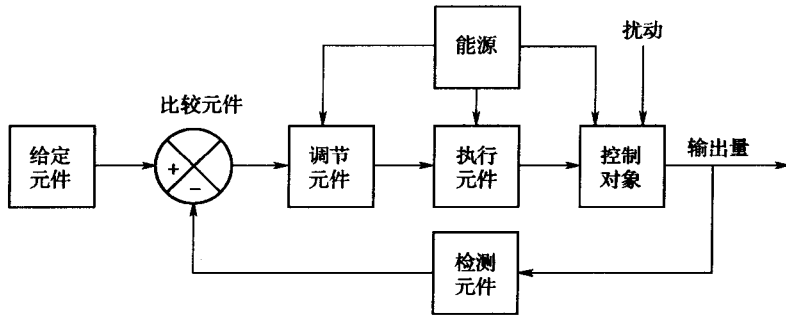


图 1-1 伺服系统方框图

由比较元件将给定元件产生的输入量与检测元件测到的输出量进行比较，获得偏差信号。调节元件将偏差信号进行放大、判断其变化趋势，确定调节过程的快慢。并由执行元件输出足够的功率，直接对控制对象进行控制引起输出量趋向于预定的值。能源和扰动分别是系统工作必不可少的基础条件和外界环境对系统产生的各种干扰。

伺服系统性能主要有三个方面，即系统的稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性

是指系统在给定输入或外界干扰作用下，能否在短暂的调节过程后到达新的或者恢复到原有的平衡状态。

(2) 快速性

是伺服系统动态品质的标志之一，即要求跟踪指令信号的响应要快。一方面要求调节过程要快；另一方面，为了满足超调要求（在调节过程中对偏差最大值的要求），要求过渡过程的前沿陡，即上升率要大。

(3) 准确性

准确性是指伺服系统的控制精度，一般用稳态误差来衡量。它是衡量伺服控制系统性能的又一重要指标。

从以上叙述不难看出，伺服系统必须有反馈回路，伺服系统的运动来源于偏差信号，伺服系统的运动始终处于过渡过程，最后它还具有力的放大作用。

第三节 伺服系统的分类

伺服系统种类很多，按照构成伺服系统的主要元件的种类、特征，可划分出各种各样的伺服系统。

按执行元件划分，有电动伺服系统、液压伺服系统、电液伺服系统、气压伺服系统和电气伺服系统等。其中电动伺服系统按所采用电动机的类型又可分为步进伺服系统、直流电机伺服系统和交流电机伺服系统。

按控制方式划分，有开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统等。实际上数控系统也分成开环、闭环和半闭环三种类型，就是与伺服系统这三种控制方式相关。

1. 开环系统

图 1-2 所示为开环系统组成原理图，它主要由数控装置、驱动电路、执行元件和机床部件组成。常用的执行元件是步进电机，如果是大功率，常用电液脉冲马达作为执行元件。开环系统存在稳定性问题。

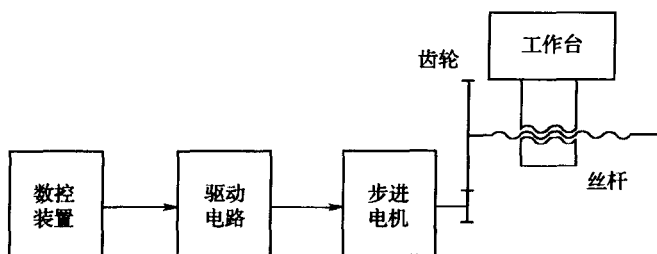


图 1-2 开环系统组成原理图

2. 半闭环系统

图 1-3 所示为半闭环系统组成原理图，同开环相比，它具有反馈通道，提高了系统精度。半闭环系统主要是用在输出量不易测量的场合。半闭环系统也存在稳定性问题。

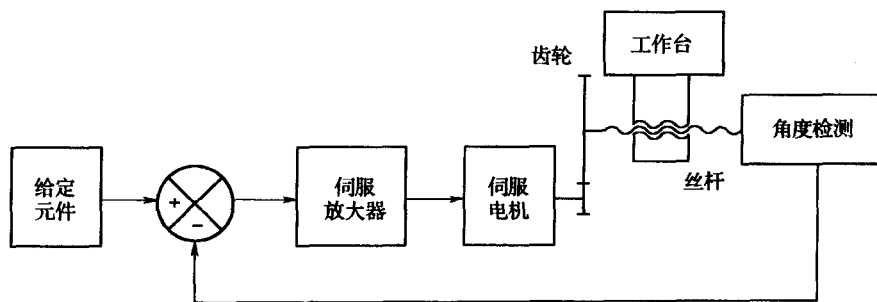


图 1-3 半闭环系统组成原理图

3. 闭环系统

图 1-4 所示为闭环系统组成原理图，同半闭环相比，其反馈点取自输出量，避免了半闭环系统自反馈信号取出点至输出量间各元件引出的误差，进一步提高了系统的性能。

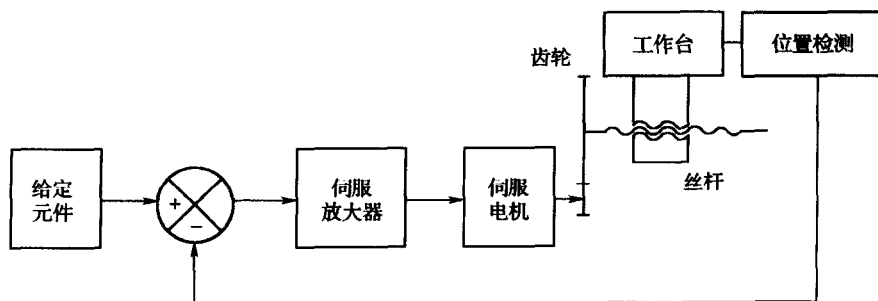


图 1-4 闭环系统组成原理图

第二章 位置检测元件

位置检测元件是数控机床伺服系统的重要组成部分，其精度对数控机床的定位精度和加工精度都有很大影响。因此，了解位置检测元件的工作原理，正确选用位置检测元件以及掌握数控机床中的连接方法，是设计、使用和维护数控机床所必需的。本章主要介绍数控机床中常用位置检测元件的结构、工作原理、使用方法和特点。

第一节 概 述

一、数控机床对位置检测元件的要求

随着科学技术的不断发展，对机械加工的速度和精度提出了越来越高的要求。而开环控制系统的数控机床已不能满足高速度、高精度的加工需要。因此，产生了闭环或半闭环控制系统的数控机床。在闭环或半闭环的控制系统中，产生反馈信号的位置检测元件起着十分重要的作用。对于配备有设计完善的位置伺服系统的数控机床，其定位精度和加工精度主要取决于位置检测元件的精度。

数控机床对位置检测元件的主要要求有：

1. 具有高可靠性和高抗干扰能力；
2. 可满足数控机床精度和速度的要求；
3. 能适应生产现场的工作环境，使用、维护方便；
4. 价格低，寿命长；
5. 便于与数控机床安装、连接。

二、位置检测元件的分类和特点

1. 位置检测元件的分类和特点

经常用于数控机床的位置检测元件有旋转变压器、感应同步器、编码盘、光栅和磁尺等。

位置检测元件按其功能可分为回转式和直线式两大类。回转式用于检测角位移，直线式用于检测直线位移。位置检测元件按其输出信号的类型又可分为模拟式和数字式。模拟式检测元件测得的位置信号是一个模拟量，这个模拟量需经 D/A 转换后方可送入数控装置；而数字式检测元件测得的位置信号是数字，它可以直接送入数控装置。位置检测元件还可按其测量的值分为增量式和绝对式。

2. 常用位置检测元件

数控机床常用的位置检测元件见表 2-1。

表 2-1 常用位置检测元件

名称	增量式	绝对式
回转式	脉冲编码器 旋转变压器 圆感应同步器 圆光栅 圆磁栅	多速旋转变压器 绝对脉冲编码器 三速感应同步器
直线式	直线感应同步器 计量光栅 磁尺 激光干涉仪	三速感应同步器 绝对值式磁尺

第二节 旋转变压器

旋转变压器常用于数控机床中角位移的检测。它具有结构简单、工作可靠、信号输出幅值大、抗干扰能力强等优点，但其测量精度低。一般用于精度要求不高的数控机床或大型数控机床的粗测及中测系统。

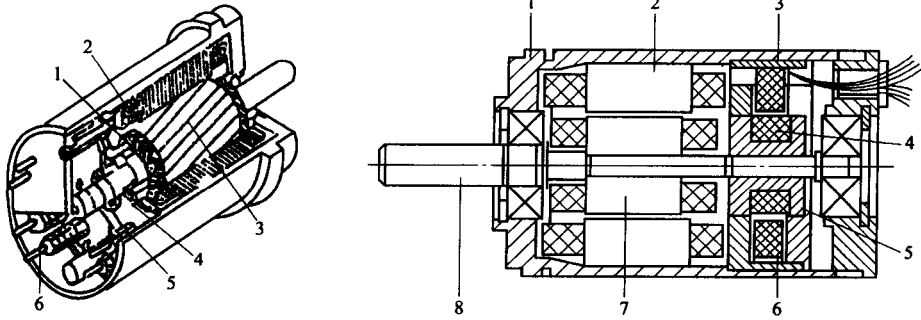
一、旋转变压器的结构

旋转变压器（又称同步分解器）是一种旋转式的小型交流电机，它由定子和转子两部分组成。定子和转子均由高导磁的铁镍软磁合金或硅钢薄板冲压成的槽状芯片叠成。在定子和转子的槽状铁芯内分别嵌有绕组，定子绕组为旋转变压器的原边，定子绕组通过固定在壳体上的接板直接引出；转子绕组为旋转变压器的副边，转子绕组分为有刷和无刷两种引出方式。

根据转子绕组的引出方式，可将旋转变压器分为有刷式和无刷式两种结构形式。如图 2-1(a)所示是有刷式旋转变压器。它的转子绕组是通过滑环和电刷直接引出的，由于电刷与滑环是机械滑动接触，所以，旋转变压器的可靠性差，寿命短。如图 2-1(b)所示是无刷式旋转变压器。它可分为旋转变压器本体和附加变压器两部分。附加变压器的一次侧、二次侧铁芯及绕组均做成环形，分别固定于壳体和转子轴上，径向留有一定的间隙。旋转变压器本体的绕组与附加变压器二次绕组连接在一起，因此，通过电磁耦合，附加变压器二次侧上的电信号（即旋转变压器转子绕组中的电信号）经附加变压器二次绕组间接地送了出去。这种结构避免了电刷与滑环的接触不良，提高了旋转变压器的可靠性和使用寿命，但也增加了体积、重量和成本。

二、旋转变压器的工作原理

由于旋转变压器在结构上保证了定子与转子之间空气间隙的磁通按正弦规律分布，当定子绕组加上 400Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz 或 5000Hz 交流励磁电压时，通过电磁耦合，转子绕组会产生感应电动势，其输出电压的大小取决于定子与转子两个绕组的轴线在空间的



(a) 有刷式旋转变压器
 1—转子绕组；2—定子绕组；3—转子；
 4—整流子；5—电刷；6—接线柱

(b) 无刷式旋转变压器
 1—壳体；2—旋转变压器本体定子；
 3—附加变压器定子；4—附加变压器一次绕组；
 5—附加变压器转子线轴；6—附加变压器二次绕组；
 7—旋转变压器本体转子；8—转子轴

图 2-1 旋转变压器的结构

相对位置。当两者垂直时，转子绕组中的感应电动势为零，如图 2-2(a) 表示。当两者平行时，转子绕组中的感应电动势最大，如图 2-2(c) 所示。当两者成一定角度时，转子绕组中的感应电动势为

$$E_2 = KU_s \sin\theta \tag{2-1}$$

$$K = \frac{W_1}{W_2} \tag{2-2}$$

$$U_s = U_m \sin\omega t \tag{2-3}$$

- 式中： K ——两个绕组的匝数比；
 E_2 ——转子绕组感应电势，V；
 W_1 ——定子绕组匝数；
 W_2 ——转子绕组匝数；
 U_m ——定子绕组外加电压幅值，V；
 U_s ——定子绕组的励磁电压，V；
 θ ——两绕组的轴向夹角，(°)。

如图 2-2(b) 所示。

若将转子与数控机床的进给丝杠同轴安装，定子安装在机床的相对固定部分，则 θ 角为丝杠转过的角度，即间接地反映了机床工作台的移动距离。从上式可知，旋转变压器转子绕组感应电动势的幅值（或相位）严格地按转子偏转角 θ 的正弦规律变化，其频率和励磁电压的频率相同。因此，可采用测量旋转变压器转子绕组感应电动势的幅值或相位的方法，来测量转子转角 θ 的变化。

实际使用中常采用正弦余弦旋转变压器，其定子和转子绕组中各有一对互相垂直的绕组，如图 2-3 所示。当两个定子绕组分别加上两个相位相差 90° 的励磁电压，即

$$U_a = U_m \sin\omega t$$

$$U_c = U_m \cos\omega t$$

应用叠加原理，转子绕组中一个绕组的感应电动势（另一个绕组短接）为

$$\begin{aligned}
 E_2 &= KU_s \sin\theta + KU_c \cos\theta \\
 &= KU_m \sin\omega t \sin\theta + KU_m \cos\omega t \cos\theta \\
 &= KU_m \sin(\omega t + \theta)
 \end{aligned}$$

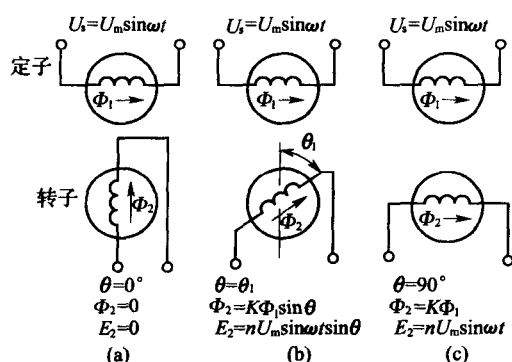


图 2-2 旋转变压器的工作原理

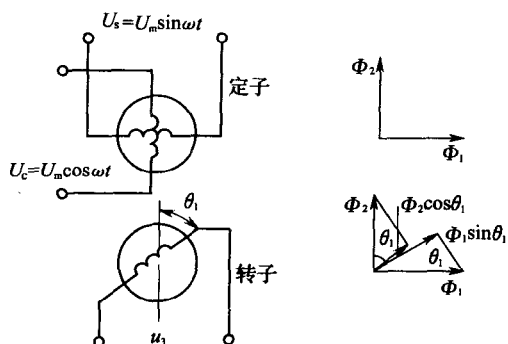


图 2-3 正弦、余弦旋转变压器

三、旋转变压器的信号处理

根据工作要求和精度的不同，旋转变压器的信号处理有鉴相型和鉴幅型两种方式。

1. 鉴相型工作方式

在鉴相型工作方式下，旋转变压器的两相正交定子绕组分别加上幅值相等、频率相同，而相位相差 90° 的正弦励磁电压，即

$$\left. \begin{aligned}
 U_s &= U_m \sin\omega t \\
 U_c &= U_m \cos\omega t
 \end{aligned} \right\}$$

式中： U_m ——励磁电压的幅值；

ω ——励磁角频率。

这两相励磁电压在转子绕组中产生的感应电动势为

$$\begin{aligned}
 E_2 &= KU_s \sin\theta + KU_c \cos\theta \\
 &= KU_m \sin\omega t \sin\theta + KU_m \cos\omega t \cos\theta \\
 &= KU_m \sin(\omega t + \theta)
 \end{aligned}$$

式中： θ ——转子相对于定子的角位移，($^\circ$)。

由上式可知，旋转变压器转子绕组感应电动势的相位严格地按转子转角 θ 的正弦（或余弦）规律变化，其频率和励磁电压频率相同。因此，可通过测量旋转变压器转子绕组中感应电动势的相位来测量出转子相对于定子的转角 θ ，即被测位移的大小。

2. 鉴幅型工作方式

在鉴幅型工作方式下，旋转变压器的两相正交定子绕组分别加上相位相等、频率相同，而幅值不同的励磁电压，即

$$\left. \begin{aligned}
 U_s &= U_{sm} \sin\omega t \\
 U_c &= U_{cm} \sin\omega t \\
 U_{sm} &= U_m \sin\varphi \\
 U_{cm} &= U_m \cos\varphi
 \end{aligned} \right\}$$

式中： U_{am} ， U_{cm} ——为励磁电压的幅值；
 φ ——旋转变压器的电相角。

这两相励磁电压在转子绕组中产生的感应电动势为

$$\begin{aligned}
 E_2 &= KU_m \sin\theta + KU_c \cos\theta \\
 &= KU_m \sin\varphi \sin\omega t \sin\theta + KU_m \cos\varphi \sin\omega t \cos\theta \\
 &= KU_m \sin\omega t \sin(\varphi - \theta)
 \end{aligned}$$

由上式可知，旋转变压器转子绕组感应电动势的幅值严格地按转子转角 θ 的变化而变化。若 $\theta = \varphi$ ，则 $E_2 = 0$ 。实际应用中，可根据转子绕组感应电动势的大小（即励磁幅值），不断修改定子绕组励磁信号的 φ ，使其跟踪 θ 的变化，以测量角位移 θ 。

第三节 感应同步器

感应同步器是一种电磁式位移检测元件。它有直线式和圆盘式两种，直线式由定尺和滑尺组成；圆盘式由转子和定式组成。前者用于直线位移的测量，后者用于角位移的测量。感应同步器对环境要求低，抗干扰能力强，维护简单，寿命长，价格低，同时具有一定的精度，所以应用广泛。

一、感应同步器的结构

直接式感应同步器相当于一个展开式的旋转变压器，它由定尺和滑尺两部分组成，其结构如图 2-4 所示。定尺上是连续绕组，滑尺上是分段绕组（又称正、余弦绕组）。定尺和滑尺均由印刷电路绕组组成。

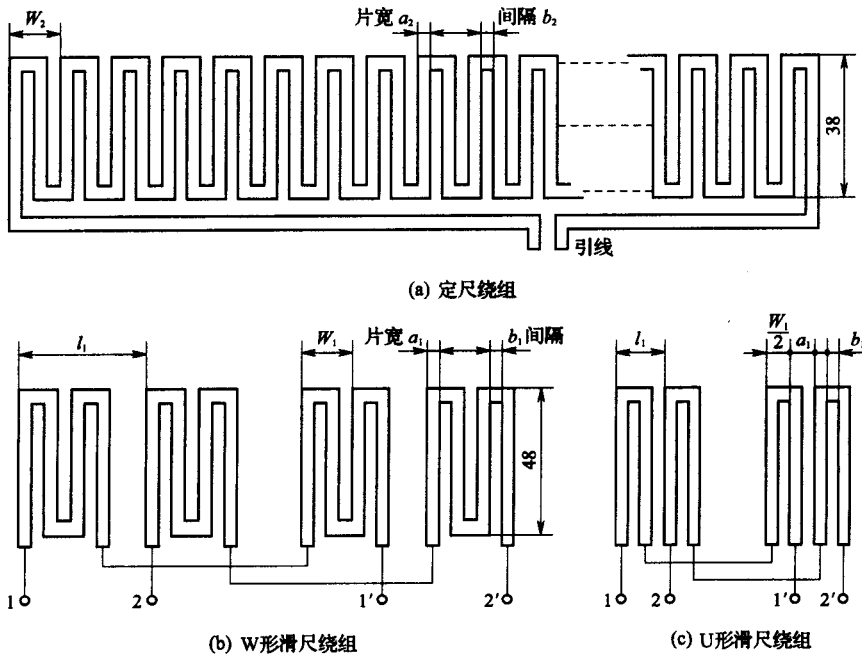


图 2-4 绕组结构图

$$\text{定尺的节距} \quad W_2 = 2(a_2 + b_2) \quad (2-4)$$

式中： a_2 ——定尺绕组等片宽；

b_2 ——定尺绕组等间距。

滑尺上的正弦、余弦绕组在空间错开 90° 电角度，即 $1/4$ 周期，两组节距相同，即

$$W_1 = 2(a_1 + b_1) \quad (2-5)$$

式中： a_1 ——滑尺绕组等片宽；

b_1 ——滑尺绕组等间距。

目前，标准型定尺的节距为 $W_2 = 2\text{mm}$ ，滑尺的半节距 $W_1/2$ 的选择要考虑消除影响测量输出线性度的高次谐波，可按 $W_1/2 = nW_2/K$ (K —谐波次数； n —正整数) 来计算。例如，若消除感应电动势中三次谐波，则 $K=3$ ， $n=1$ ，则 $W_1/2 = 0.667\text{mm}$ 。绕组片宽的选择也要考虑消除高次谐波，可按 $a_1 = nW_1/K$ 和 $a_2 = nW_2/K$ 来计算。

二、感应同步器的工作原理

工作时，当滑尺绕组加上一定频率的励磁电压后，根据电磁感应原理，在定尺绕组上将感应出相同频率的感应电动势。图 2-5 所示为感应电动势与绕组位置的关系。当滑尺上的正弦绕组 S 和定尺上的绕组重合时 (A 点)，耦合磁通最大，感应电动势也最大；滑尺继续移动，感应电动势逐渐减小，当移动到 $1/4$ 节距位置处 (B 点)，感应电动势为零；继续移动到半个节距点 (C 点) 时，感应电动势为负的最大值；在 $3/4$ 节距处 (D 点) 又变为零；移动到一个节距 (E 点) 处，感应电动势又为正的最大值。从上可知，感应电动势随着滑尺相对于定尺的移动而周期性地变化。加大励磁电压将获得较大的感应电动势，但过大的励磁电压将引起过大的励磁电流，致使温升过高而无法正常工作，一般励磁电压为 $1 \sim 2\text{V}$ 。

三、感应同步器的信号处理

根据工作要求和精度的不同，感应同步器的信号处理也有鉴相型和鉴幅型两种工作方式。

1. 鉴相型工作方式

鉴相型工作方式是根据定尺绕组感应电动势的相位变化来鉴别滑尺相对于定尺的位移量。当滑尺上两个互相错开 $1/4$ 节距的绕组分别加上幅值、频率相同，而相位相差 90° 的励磁电压 $U_c = U_m \sin \omega t$ 和 $U_s = U_m \cos \omega t$ 时，它们在定尺绕组上所产生的感应电动势分别为

$$e_c = KU_m \sin \omega t \cos \theta$$

$$e_s = KU_m \cos \omega t \sin \theta$$

这时定尺绕组总的感应电动势为

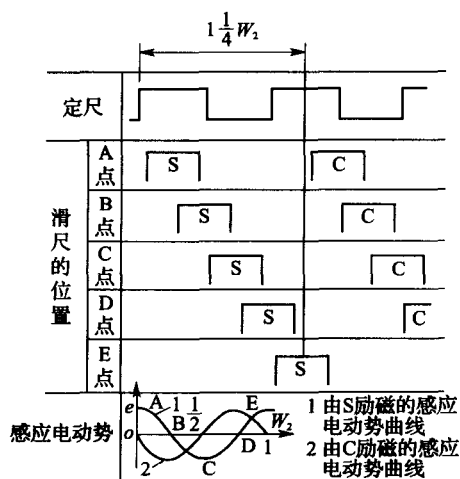


图 2-5 感应电动势与绕组相对位置的关系