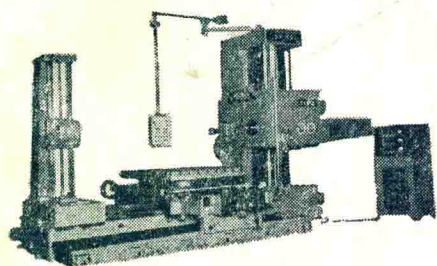
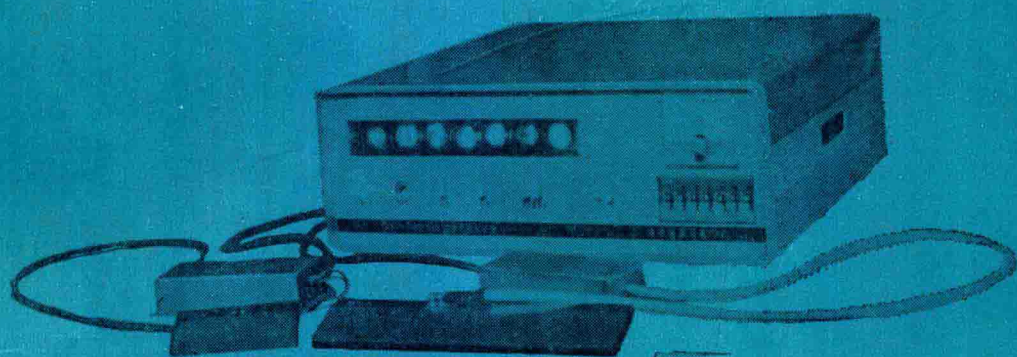


直线感应同步器数显表

广州机床研究所
中山大学数力系

上海电表厂
清华大学自动化系



广州机床研究所

录

前言	(1)
第一章 概论	(2)
第一节 长度和角度测量	(2)
第二节 感应同步器	(2)
第三节 数显表	(5)
第四节 感应同步器数显表在工业使用中的优点	(6)
第二章 感应同步器工作原理	(8)
第一节 输出电势与位移的关系	(8)
第二节 输出电势的误差平均效应和细分	(15)
第三节 测量输出信号的方法	(17)
(一) 鉴幅型系统	(18)
(二) 鉴相型系统	(19)
(三) 脉冲调宽型系统	(21)
第三章 数显表的基本原理与单元电路	(24)
第一节 感应同步器数显表的基本组成	(24)
(一) 鉴幅型数显表	(24)
(二) 鉴相型数显表	(27)
第二节 数字电路的基本知识	(30)
(一) 数字电路的一些基本知识	(31)
(二) 基本逻辑“门”电路	(36)
(三) 逻辑代数基础	(37)
(四) 数字集成电路简介	(39)
第三节 应用于数显表中的数字电路单元	(50)
(一) 触发器	(50)
(二) 用与非门组成的一些数字电路单元	(57)
(三) 计数器	(61)
(四) 十进制计数器的显示和译码	(77)
第四节 在数显表中应用晶体管的基本电路	(83)
(一) 数显表中的放大器	(83)
(二) 振荡器	(94)
(三) 滤波电路	(101)

第五节 应用运算放大器组成的基本电路	(109)
(一) 运算放大器简介	(109)
(二) 应用运算放大器组成的比例放大器	(111)
(三) 应用运算放大器组成加法器和减法器	(113)
(四) 应用运算放大器组成有源滤波器	(114)
(五) 应用运算放大器组成的整形器	(119)
第四章 鉴幅型数显表	(120)
第一节 系统的工作原理	(120)
第二节 数显表的基本环节	(123)
(一) 数模转换器	(123)
(二) 脉冲形成电路	(131)
(三) 门槛电路及粗精门槛转换	(134)
(四) 极距划分和移动方向判别电路	(141)
(五) 正、负符号显示和周期零指示	(145)
(六) 显示计数器及其加减控制	(147)
(七) 最低位微米级数值指示	(149)
(八) 预整定电路	(153)
(九) 匹配变压器	(156)
第三节 使用与维修	(157)
(一) 数显表的正确使用	(157)
(二) “周期零”点的寻找与恢复零位的操作	(158)
(三) 数显表维护与故障检修	(159)
第四节 鉴幅型数显表派生产品	(163)
(一) 测量直径用数显表	(163)
(二) 两坐标切换数显表	(164)
(三) 悬挂式数显表	(165)
(四) 两轴相加数显表	(165)
(五) 圆感应同步器数显表(角度数显表)	(168)
第五章 鉴相型数显表	(170)
第一节 系统的工作原理	(170)
(一) 位移—相位变换	(171)
(二) 模—数转换	(171)
(三) 计数及显示	(172)
第二节 鉴相型数显表的基本环节	(173)
(一) 位移—相位变换环节	(173)
(二) 模—数转换环节	(182)
(三) 计数及显示环节	(188)

第三节	鉴相型数显表的使用与维修	(190)
(一)	鉴相型数显表的维修方法	(191)
(二)	鉴相型数显表常见的故障及其现象	(191)
第六章	感应同步器的安装和接长	(192)
第一节	标准式感应同步器的安装	(192)
(一)	安装要求	(192)
(二)	定尺尺座、滑尺尺座和防护罩	(194)
(三)	定尺、滑尺在机床上的安装	(196)
第二节	标准式感应同步器定尺的接长	(198)
(一)	接长要求	(198)
(二)	接长设备和接长前的准备工作	(200)
(三)	定尺接长方法	(201)
第三节	带式感应同步器的安装	(206)

前 言

感应同步器是一种比较新颖的检测器件，它具有测量精度高、可靠性高、抗干扰能力强、寿命长、使用维护方便等独特优点，是其它检测器件所不能比拟的。目前在军事、宇航、航空、航海、机床等领域的自动化测量和自动控制系统中应用甚广，所以它日益得到人们的广泛重视。

机械工业中，使用感应同步器与数显表，能高精度、稳定地用数码显示出机械位移的长度和转角的准确尺寸。尤其应用在大型及重型机械上，对保证产品质量、提高工效、减轻工人的劳动强度等方面，具有一定意义，已取得显著效果。

本书是由广州机床研究所、上海电表厂、中山大学数力系、清华大学自动化系共同编写的《感应同步器与数显表》中摘编而成。内容包括直线感应同步器与数显表的工作原理，基本组成，直线感应同步器的安装和接长，数显表的维护和修理等，供各地开办感应同步器数显表训练班以及各有关从事这方面工作的工农兵读者参阅。

由于我们的水平不高，经验不足，肯定会有许多缺点和错误，我们恳切希望读者提出批评指正。

—— 编 者 ——

第一章 概 论

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的迅速发展,为尽快实现我国工业、农业、科学技术和国防现代化这个宏伟目标,目前在国民经济很多部门,日益广泛地采用自动化技术,例如在机械工业中,迫切要求发展高精度、高效率 and 大型的机床品种,自动化是一个重要的手段。在自动化的生产过程中需要了解工作过程的进展情况,以便采取相应的控制措施,这就必须进行自动测量。感应同步器及其数显表就是用来解决长度和角度自动测量的。

第一节 长度和角度测量

众所周知,要想知道一个物体直线移动了多少距离,首先要具有一个测量基准(有刻度的尺子),其次,用它去量度起点与终点的距离时,需要用眼睛观察,才能读得距离的数据;同样,要确定一个物体转过多少角度时,亦需有一个有分度的圆盘,量度角度时,也要用眼睛观察才能读取物体转动后相对起点的角度变化量。上述是长度和角度的手动测量方法。如果用自动测量来取代人的手动测量,不但需要有一个分度尺或分度盘,而且需要有一个自动读数的装置才能把目标在尺或盘上的位置准确地自动指示出来。本书介绍的感应同步器就是这样的一种尺子或度盘,而数字显示装置就是这种代替人眼睛读数和估算的自动显示装置。

第二节 感 应 同 步 器

感应同步器是一种利用两个平面形绕组的互感随位置而变化的原理所制造成的,用以测量直线或转角位移的器件。感应同步器分成两大类:用来测量直线位移的称直线感应同步器;用来测量转角位移的称圆感应同步器。

无论是直线感应同步器或圆感应同步器,它们都是由两部分组成。直线感应同步器由定尺和滑尺组成,如图 1—1 所示;圆感应同步器由转子和定子组成,如图 1—2 所示。

这两类感应同步器是采用同样的工艺方法制造的,一般情况下,首先用绝缘粘合剂把铜薄粘牢在金属或玻璃基板上,然后,按设计要求腐蚀成不同曲折形状的平面绕组,这种制造方法和无线电工业印刷电路的工艺相同,所以这种绕组又叫做印刷电路绕组。

如果我们细心地观察一下图 1—1 和图 1—2,就可以发现定尺和滑尺,转子和定子

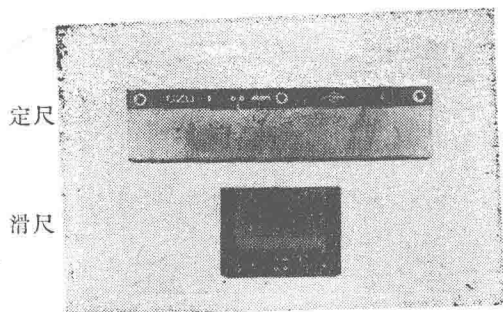
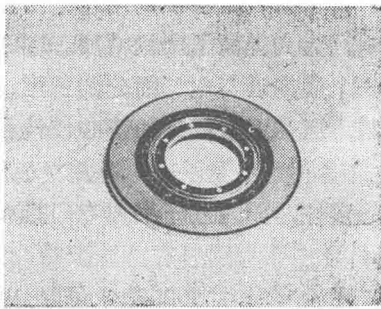
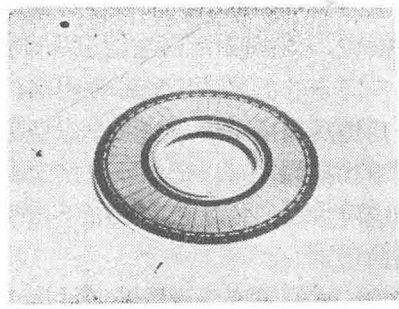


图 1—1 直线感应同步器

上的绕组分布并不相同，定尺和转子是连续绕组，而滑尺和定子则是分段绕组（又称为正、余弦绕组）。感应同步器这两部分相当于我们日常生活中熟知的变压器的初级和次级线圈，它们都是利用交变电磁场和互感原理工作，使用时，这两部分是缺一不可的。



转子



定子

图 1—2 圆感应同步器

在实际应用中，把其中的一部分与机械设备的固定部件相联的称定片；而另一部分与机械设备的运动部件相联的称动片，一般情况是以定尺或定子作为定片，而以滑尺或转子作为动片。安装时，定片上的平面绕组面对动片上的平面绕组，两者之间相隔一定空气隙。如果在其中一部分的绕组上通以交流励磁电压，由于电磁耦合，在另一部分的绕组上产生感应电势（见图 1—3），该电势是随定片与动片的相对位置呈正、余弦函数变化，再通过对此

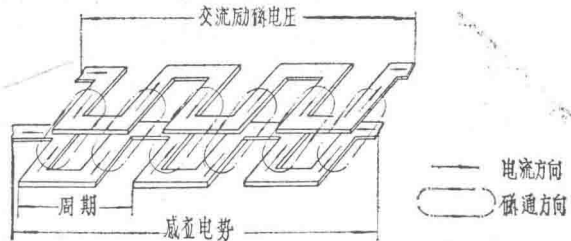


图 1—3 感应同步器工作原理示意图

信号的检测处理能精密地测出直线或转角位移量，这就是感应同步器的简单工作原理。感应同步器构成测量系统时，按幅值及相位两种特征工作。

幅值工作原理是利用感应同步器的输出电势的幅值随着定片与动片之间的相对位移而呈正弦或余弦函数规律变化的原理进行工作的。

相位工作原理是利用感应同步器在一定励磁条件下输出电势与励磁电压之间的相位差，随定片与动片之间的相对位移成线性关系的原理进行工作的。

感应同步器于五十年代初期研究成功，到目前为止已有 20 多年的生产历史，最初局限于国防的一些尖端项目的测量。近十年来，随着电子工业和自动化控制技术的迅速发展，并且由于它具有许多位置测量元件所不能比拟的独特优点，因此，目前它不仅用于尖端技术领域，而且广泛地应用于各个工业部门。如直线感应同步器用在各种机械设备，特别是机床的位移数字显示，自动定位和数控系统；圆感应同步器除用于导弹制导、陀螺平台、射击控制、雷达天线的定位与射电望远镜的跟踪以外，还用于经纬仪、机床的精密转台及其它回转伺服系统。

为什么感应同步器自问世以来会得到人们的广泛重视呢？因为它比其它直线和转角位移的电气测量，如光栅、磁栅、旋转变压器、编码尺或编码盘、光电脉冲发生器等方

法，有如下独特优点：

1. 精度较高

感应同步器的精度首先决定于定片和动片上的平面绕组的加工精度，目前用一套专门的工艺方法可以把平面绕组作得很准确。另外，由于滑尺上感应的电压信号是多周期的平均效应，从而减少了绕组局部尺寸误差的影响，大大提高了测量精度。

感应同步器的灵敏度或称分辨率，取决于对一个周期进行电气细分的程度，灵敏度进一步的提高受电子细分线路中信号噪声比所限制，但是通过线路的精心设计和采取严密的抗干扰措施，可以把电噪声减到很低。

感应同步器的重复精度取决于元件和系统的稳定性，而通过一系列专门措施已可达到很高的稳定性。

目前，直线感应同步器精度可达 ± 0.001 毫米，灵敏度为 0.00005 毫米（即 0.05 微米），重复精度为 0.0002 毫米（即 0.2 微米）。直径为 302 毫米（即 12 吋）的圆感应同步器精度可达 0.5 角秒，灵敏度为 0.05 角秒，重复精度为 0.1 角秒。

2. 受环境温度，湿度变化的影响小

直线感应同步器的基板与安装部件材料（钢或铸铁）的热膨胀系数接近，当环境温度变化时，两者按相同的规律变化，而不影响测量精度。圆感应同步器的基板受热后各方向的膨胀量对应于圆心，所以亦不影响测量精度。

因为感应同步器是非接触式的空间电磁耦合器件，可以选择耐温性能良好的非导磁性涂料作为保护层，加强感应同步器的抗温能力。

3. 使用寿命长，维护简便

因为感应同步器的定片和动片互不接触，没有任何磨擦、磨损，所以使用寿命很长，可以说是半永久性的。它不怕油污、灰尘和冲击振动的影响，不需要经常清扫。在机械设备上使用时，仅需装设防止铁屑进入感应同步器表面的防护罩。此外，由于感应同步器是电磁耦合而感应出信号电压的，不需要任何光源，或光电转换元件，所以不存在元件老化和故障的来源。

4. 可按需要拼接成各种测量长度，并能保持（或稍大于）单元长度的精度

直线感应同步器有组合量具的优点，可以根据测量长度的需要，任意拼接成 250 毫米（标准式定尺的长度）的倍数；另一方面，它没有机械式组合量具的缺点，因为它可通过电气接长的方法，合理选择感应同步器的误差特性，使拼接后总长度的精度保持（或稍大于）单块定尺（单元长度）的精度。目前行程为几米到几十米的中型或大型机床中，工作台位移的直线测量，大多数都是采用直线感应同步器来实现的。

5. 抗干扰能力强

在感应同步器每一绕组的周期内（例如：标准式直线感应同步器的定尺周期为 2 毫米），它是一个绝对式长度测量装置，在任何时间内都可以给出仅与位置量相对应的单电压信号，而不受瞬时作用的偶然干扰信号的影响。

此外，感应同步器平面绕组的阻抗很低，受外界干扰电场的影响较小。

6. 工艺性好，成本较低，便于复制和成批生产

感应同步器的平面绕组的制造工艺与印刷电路板的工艺方法相同，该方法已较成熟，

原材料亦易于取得,而且复制精度高、成本低,便于批量生产。

第三节 数 显 表

感应同步器的数码显示表(下称数显表)是将感应同步器检测的按正、余弦函数变化的电信号(模拟量)转换成数字量,并显示出来的一种数字仪表。

数显表有两种型式:按感应同步器振幅原理工作的数显表称鉴幅型数显表;按感应同步器相位原理工作的数显表称鉴相型数显表。近几年出现的脉冲调宽型数显表也是按鉴幅特征工作的。这几种数显表各有特点,鉴相型数显表工艺和调试较容易掌握,成本亦较低,但因相位在检测回路中容易产生偏移失真,所以要进一步提高测量精度方面受到较大的限制;鉴幅型数显表的工艺和调试较复杂,成本较高,但精度潜力较大;脉冲调宽数显表工艺比鉴幅型数显表简单,仍可达较高的精度,因此受到较多的注意。但当前国内使用较普遍的仍为鉴幅型数显表。

目前广泛使用的数显表一般用标准式直线感应同步器作为检测器件,它具有六位十进制数码显示,测量精度为0.01毫米,重复精度为 ± 0.002 毫米,灵敏度为 ± 0.001 毫米(用电表指示),最大测量范围为 ± 9999.99 毫米,允许最大位移速度为50米/分,有“+”“-”符号显示和“复零”操作,并可在任意位置上使显示为零。数显表面板上还设有拨码开关,能预置数字,通常有“周期零”指示,可标示周期原点,有些数显表还安排了信息输出端,作为打印记录或数据处理用。

此外,根据具体机械设备的使用要求,设计制造了下列几种有特殊功能的数显表:

1.高精度数显表:它有七位十进制数码显示,测量精度为0.001毫米。它与高精度感应同步器配合,用于高精度机床或量仪的位移测量,例如,座标镗床,三座标测量机等。

2.角度数显表:它与圆感应同步器配合,用来显示转角的大小,数字显示按60进制,可显示度、分、秒。

3.三速式数显表:它与三速式感应同步器配合使用,用于全量程的绝对座标测量,这样,可达到断电以后,重新开机仍可重显原来的座标值。

4.两轴相加数显表:用于大小拖板同时动作,而又须将两拖板的数字累加起来的场合。

5.两座标切换数显表:当两个运动座标均需要显示,但又不需要同时显示时,可采用这种数显表。它只有一套数显系统,可同时连接两个座标的感应同步器,待测座标的切换可手动或借助电子开关实现。这样就节省了一套数显装置。

6.直径数显表:它是在普通数显表线路的基础上再加上乘2环节,使显示成直径值,从而免除了操作者的中间运算。

7.悬挂式数显表:它可以安装在大型机床的吊线盒上,便于工人的操作和观察。为了缩小数显表的体积,最好采用高集成度的电子元件,也可把现有的数码管和电子线路分离安装。

今后,还会根据生产使用的需要制造出更多类型的数显表满足国民经济发展的需要。但应该指出,数显表在生产使用中最主要的是稳定性问题,其次是精度问题,稳定

性与线路的设计、制造工艺、元件的质量都有密切关系。目前，不同型号数显表中所使用的元件是不一样的，有使用分立元件或中小规模集成电路，它们各有特点，但一般说来，使用集成度较高的器件，对缩小体积，简化工艺，提高可靠性、稳定性和降低成本都有好处，是今后发展的趋势。

第四节 感应同步器数显表在工业使用中的优点

在机械制造业中，加工零件的长度和角度尺寸的自动测量数码显示装置，随自动化控制技术的发展已日益引起人们的重视。目前数码显示装置按检测器件分类有：光栅数显表、磁栅数显表和感应同步器数显表等。由于感应同步器具有一系列公认的独特优点，所以它是目前发展最快、产量最多的一种位移数显表。

为使读者有一个简明的印象，这里扼要介绍感应同步器和数显表是如何进行自动测量的，现以直线感应同步器为例说明。

据上述可知，直线感应同步器是由定尺和滑尺两部分构成，定尺相当于人们熟知计算尺的基尺；滑尺相当于计算尺的游标尺，工作时基尺与游标尺是相对移动的；同样感应同步器的定尺与滑尺在工作时也是作相对移动的。这里为便于分析，现以定尺绕组加上交流电励磁（因为感应同步器之间是电磁耦合关系，所以定尺或滑尺励磁是一样的，但常用滑尺励磁的较多），通过电磁耦合现象，在滑尺的两平面绕组上感应出电势，该电势的大小与定滑尺之间的相对位置（即位移量 x ）有关。我们在图 1—4 中的滑尺上分布的正余弦平面绕组可以看到，他们彼此错开 $\frac{3}{4}$ （或 $\frac{1}{4}$ ）空间周期，即两平面绕组空间相差 90° ，所以滑尺上分别感应出按正余弦三角函数变化的二相耦合波电势（ e_c 和 e_s ），如果作一条直线与二相耦合波相交，这两交点即对应两个电压值，而这两个值对于这条垂直线的位置来说是单值的。相反，如果将这一对电压值施加到滑尺（滑尺励磁）平面绕组上，则定尺的输出在这个唯一点上为最大值，在离开它 90° 的点上将为零值。由于单值性的存在，为感应同步器的直接细分创造了必要的条件。

从图 1—4 中 e_c 和 e_s 的波形可以看出，由正的最大峰值到负的最大峰值（或由负的最大峰值到正的最大峰值）之间，通常被称为一极距（ τ ），一周期（ T ）等于极距的两倍。因为定尺上并没有具体的标出任何尺寸或刻度，只知道相邻两条刻线之间的距离为一极距 $\tau = 1$ 毫米（即 $T = 2$ 毫米）。要精确地确定一周期的任意位置，是由数显表完成这一任务，它不但要把模拟信号电压变成数字信号用数码显示出来，而且还要把每个最大（峰）值都要累计起来，峰与峰之间还要根据定滑尺两平面绕组的状态细分成很多小单位，以便精确地读出 0.01 或 0.001 毫米的最小位

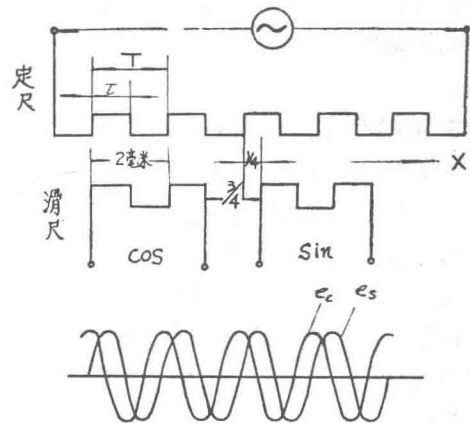


图 1—4

数,这一切均由数显表把位移或转角的手动测量转换成电气的自动测量。系统的联接如图1—5所示。

图1—5画出直线感应同步器与鉴幅型数显表系统的联接示意图,图中前置放大器和匹配变压器都是为了提高感应同步器的输出电压和阻抗匹配而设的。

用感应同步器和数显表作自动测量直线与转角位移的优点是:

1. 提高工效、减轻劳动强度

在机械加工部门中采用了感应同步器和数显表,不但可以直观连续地显示刀具或工件加工过程中的位移量,不停车地随时进行测量,大大减少了测量工作的辅助时间,提高工效。特别是重型和中、大型机床更为显著,因为这种机床加工的工件大,工人往往要使用笨重的机械量具,这样,不但给工人带来沉重的体力劳动,而且增加了测量过程中的不安全性。例如:在大型卧式车床上加工大型汽轮机主轴时,如果手动测量,则要经常使用10~20公斤重的大型千分尺,采用了感应同步器和数显表自动测量后,不但大大地减轻了工人的体力劳动强度,而且使效率提高约10%~30%,一年可以多加工1~2根汽轮机转子的主轴。

2. 改进测量质量

自动测量摆脱了操作者的主观因素带来的各种误差,提高了测量结果的可靠性。

3. 易于测量手动难测部位

某些加工件测量部位的自由空间极少,几乎无法进行手工测量,例如计算机磁盘存取臂的位置测量就是这种情况,只能使用自动测量去完成。

4. 易于与控制系统联合使用

因为感应同步器测量的直线或转角位移的输出量是电信号,这样就很方便与相应的电气控制系统连接组成位置的伺服控制系统(包括自动定位系统及闭环伺服系统),便于整个系统实现自动化和半自动化。

5. 可充分利用电气显示的优点

在电气测量和显示中,能以任意测量位置为原始位置,将显示置“零”,从而直接读出位移或转角增量,这在机械量具中是不易实现的。

上述优点,正说明了为什么感应同步器自问世以来能得到人们普遍重视的原因,在自动控制领域发挥它的优越性,并在实践中取得良好效果,因此在国内得到广泛的应用。

当前,在抓纲治国的大好形势推动下,从事感应同步器和数显表研制、生产和使用的广大工人及科技人员,正满怀信心,为提高器件的精度、质量和稳定可靠性而努力工作。

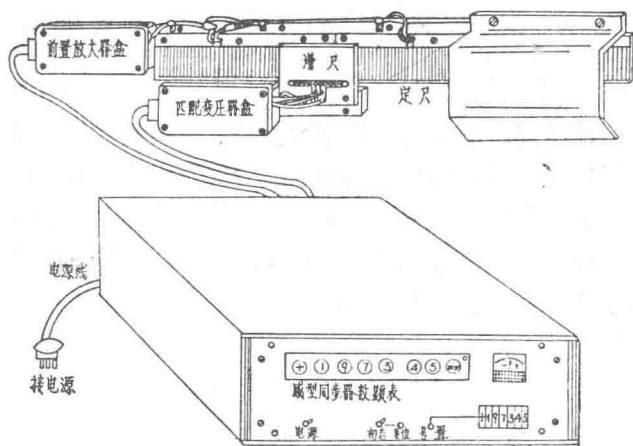


图1—5 感应同步器和数显表系统联接示意图

第二章 感应同步器工作原理

由前所述,感应同步器是一种测量位移(直线位移或角位移)的器件,它能够把位移量变成电信号,然后采取一定的方式对电信号进行检测,从而达到测量位移的目的。

为了弄清感应同步器的工作原理,必须明了两个问题:①感应同步器如何把位移量转换成电信号?②为了达到测量位移的目的,对电信号应如何检测?这便是本章所要讨论的中心内容。下面主要以直线感应同步器为例进行分析。

第一节 输出电势与位移的关系

直线感应同步器外形如图 1—1 所示。在实际使用中,定、滑尺分别安装在机械设备的固定和运动部分。所以,机械运动时,滑尺相对定尺移动。

定尺与滑尺绕组分布见图 2—1 所示,滑尺上的分段绕组(有时称为绕组单元)联接成两相绕组,分别称 S 绕组(亦称正弦绕组)及 C 绕组(亦称余弦绕组)。当在 S 绕组上通以交流励磁电压(例如正弦电压),则定尺连续绕组有感应电势输出,输出电势既与励磁电压有关,也与滑尺相对于定尺的位移有关。若只给 S 绕组通以频率为 f 的励磁电压

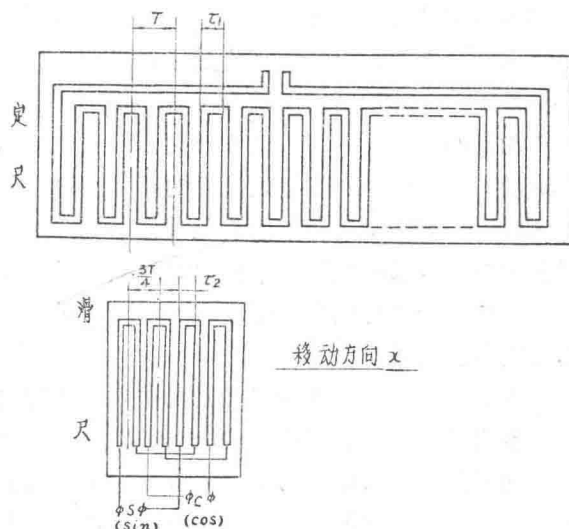


图 2—1 定尺和滑尺绕组分布示意图

$$u_s = U_s \sin \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

且以图 2—1 所示的位置(即 S 绕组的绕组单元的中心线与定尺绕组某一单匝的中心线重合)为起点,则滑尺移动了 x 的位移时,定尺绕组上有感应电势

$$e_s = k\omega U_s \cos \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \quad (2-1)$$

式中, k 是比例常数,与绕组间的最大互感系数有关。 T 是定尺绕组平行导片的片宽与片间绝缘间隔之和的两倍,称感应同步器的周期。

式(2—1)表明,定尺绕组输出电势的幅值与励磁电压的幅值成正比,与位移 x 成余弦函数的关系;而相位与励磁电压相差 $\pi/2$ 相位差。

若只给 C 绕组通以频率为 f 的励磁电压

$$u_c = U_c \sin \omega t \quad \omega = 2\pi f$$

则定尺绕组上有感应电势

$$e_c = k\omega U_c \sin \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \quad (2-2)$$

就是说，定尺绕组输出电势的幅值与励磁电压的幅值成正比，与位移 x 成正弦函数的关系；而相位也与励磁电压相差 $\pi/2$ 相位差。

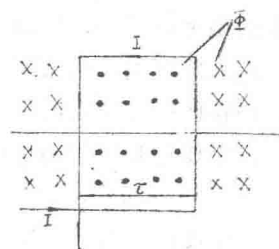
可见，感应同步器可以看作一个耦合系数随位移变化的变压器，其输出电势与位移 x 有正、余弦的关系。为什么感应同步器具有这样的特性呢？为了回答这个问题，可以用互感原理加以说明。

首先，我们来看一看，当一个矩形线圈通了电流以后，它将产生一个什么样的磁场。

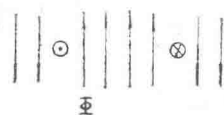
图 2-2 (a)、(b) 是一个矩形线圈通了电流 I 以后，线圈中磁场的分布图， $\odot$ 表示流出纸面方向， $\otimes$ 表示流入纸面方向。 Φ 表示磁通，磁通 Φ 与电流 I 之间在方向上成右螺旋关系，而 Φ 的大小则和 I 成正比。这样，当电流 I 的大小和方向变化时，磁通 Φ 的大小和方向也随之发生变化。图 2-2 (c) 中的 B_m 表示磁通密度，又叫做磁感应强度。为了说明方便，图中把磁通密度画成均匀分布，实际的情况并非如此，磁通密度并不是均匀分布的。

图 2-2 中，用 τ 表示矩形线圈的宽度，画出磁通密度的分布曲线时，把曲线座标的原点定在线圈宽度的中点上。由于假设磁通密度是均匀分布的，所以 B_m 曲线是一方波，而且从 $-\tau/2$ 到 $+\tau/2$ 之间， B_m 取正值，而在这个范围以外取负值，也就是在这两点之间磁通方向改变。

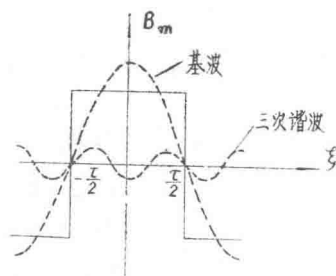
在电工学中，对非正弦周期波的处理，常常采用谐波分析的方法，即把它分解成一系列的正弦波。如图 2-2 (c) 中所示的周期为 2τ 的方波，可分解成周期为 2τ ， $\frac{2}{3}\tau$ ， $\frac{2}{5}\tau$ ，……等一系列的正弦波，这些正弦波分别称为基波，三次谐波，五次谐波……等等，图中用虚线画出了方波的基波和三次谐波。在下面的讨论中，我们只考虑基波的影响，即把基波的正弦曲线作为 B_m 分布曲线。这么一来，如果电流 I 不是恒定电流，而是正弦电流 $i = I \sin \omega t$ ，那末线圈中磁通密度 B_m 正弦分布曲线将随时间 t 而发生变化，其变化规律如图 2-3 所示，图中 ω 是正弦电流的角频率。这种随时间 t 而变化的磁场称为脉动磁场。



(a) 矩形线圈中磁通的分布



(b) 磁通的方向



(c) 磁通密度的波形

图 2-2 通电流的矩形线圈中的磁场分布

这时,如果有另一个矩形线圈靠近上述通电线圈的话,该线圈将有感应电势,其感应电势将随两个线圈的相对位置的不同而不同。图3—4画出了两线圈的几个特殊相对位置,并标出相应的感应电势。图中,B线圈通以电流

$$i = I \sin \omega t \quad (2-3)$$

而接上电压表的A线圈作为感应线圈,在图示方向与B线圈靠近。

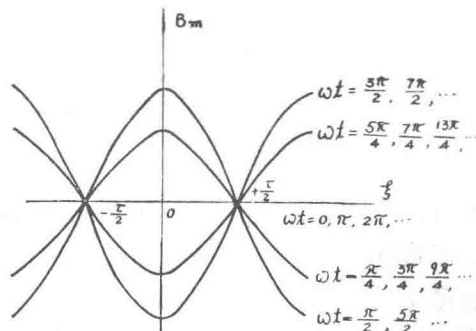


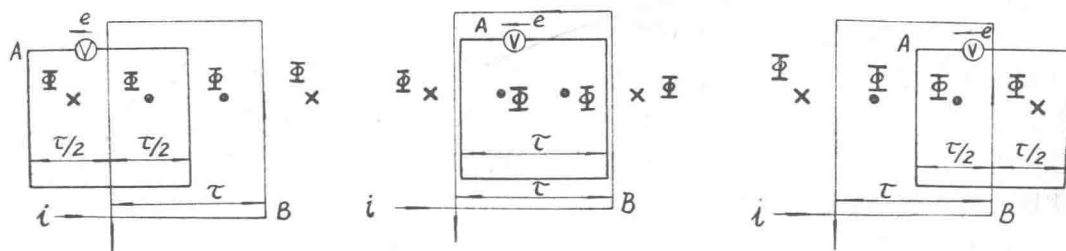
图2—3 脉动磁场的磁通密度 B_m 的变化规律

在图2—4(a)和(c)中,由于在线圈A中穿入与穿出的磁通各占一半,在任何时刻,通过线圈的磁通量均为零,因此感应出来的电势等于零,所以电压表的读数为零。而在图2—4(b)中,由于只有穿出的磁通,因此感应电势最大,所以电压表读数最大。可见,当线圈A由(a)位置移向(b)位置,再移向(c)位置时,电压表的读数将由零变到最大值,再下降到零。

由于通过B线圈的电流满足(2—3)式,所以线圈中产生的磁通 Φ 为

$$\Phi = k_\phi I \sin \omega t$$

k_ϕ 是一个比例常数。从图2—3可以看到,磁通密度是按正弦分布的,因此,如果以B线圈的中心线与A线圈的中心线重合的位置作起点,移动A线圈,右移的位移量 x 取正号,左移的位移量 x 取负号,当位移了 x 的距离以后,A线圈所穿过的磁通就应该是



(a) A线圈的一半进入B线圈 (b) A线圈的全部进入B线圈 (c) A线圈的一半退出B线圈

图2—4 两矩形线圈相对运动时的感应电势

$$\Phi_A = k_\phi I \sin \omega t \cos \theta \quad (2-4)$$

式中: $\theta = \frac{2\pi x}{2\tau} = \frac{\pi x}{\tau}$

所以,当 $x=0$, 即 $\theta=0$ 时, $\cos \theta=1$, 表示A线圈与B线圈重合, 这时A线圈穿过最大磁通; 而当 $x=\pm \tau/2$, 即 $\theta=\pm \pi/2$ 时, $\cos \theta=0$, 表示线圈A和B的中心线间相距 $\tau/2$ 时, $\Phi_A=0$, 即穿过A线圈的磁通为0。至于其他相对位置, 线圈中磁通的变化规律满足(2—4)式的道理可以用数学方法推导如下:

$$\Phi_A = \int_{x-\tau/2}^{x+\tau/2} B_m(\zeta) d\zeta$$

依图2—3, 磁通密度 $B_m(\zeta)$ 是按正弦规律变化, 而且幅值与电流 $i = I \sin \omega t$ 成正比,

记比例系数为 k_ϕ' ，则有

$$B_m(\xi) = k_\phi' I \sin \omega t \cos \frac{\pi \xi}{\tau}$$

从而，

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \int_{x-\tau/2}^{x+\tau/2} B_m(\xi) d\xi \\ &= \int_{x-\tau/2}^{x+\tau/2} k_\phi' I \sin \omega t \cos \frac{\pi \xi}{\tau} d\xi \\ &= k_\phi' I \frac{\tau}{\pi} \sin \omega t \left[\sin \frac{\pi}{\tau} \left(x + \frac{\tau}{2} \right) - \sin \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2} \right) \right] \\ &= \frac{2\tau}{\pi} k_\phi' I \sin \omega t \cos \frac{\pi x}{\tau} \end{aligned}$$

记 $k_\phi = \frac{2\tau}{\pi} k_\phi'$ ， $\theta = \frac{\pi x}{\tau}$ 即得

$$\Phi_A = k_\phi I \sin \omega t \cos \theta$$

这便是公式 (2-4)

A 线圈在 B 线圈产生的磁通的感应下会产生感应电势，A 线圈两个引出头必须假定一个电势的正方向，然后才能描述在这个方向上电势 e 和 B 线圈中的电流 i 在相位上的关系，如果按图 2-4 中所示的方向表示电势 e 的正方向，则 A 线圈中的电势 e 和 B 线圈中的电流 i 在相位上有 $+\pi/2$ 的相位差，即 A 线圈中感应产生的电势 e 为

$$\begin{aligned} e &= k_\phi \omega I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \cos \theta \\ &= k_\phi \omega I \cos \omega t \cos \frac{2\pi x}{T} \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中，记 $T = 2\tau$ 。如果感应电势的正方向规定相反，则相位差为 $(-\pi/2)$ ，从而 (2-5) 式前面必须增加一个“-”号。在感应同步器中，称线圈的宽度 τ 为极距， $T = 2\tau$ 为周期，有时也称 T 为节距，后者习惯用于分析几何尺寸。

由于 A 与 B 线圈都是单一的，所以式 (2-5) 中 x 的变化不得越出 $-\tau/2$ 与 $+\tau/2$ 之间范围。

现在，看一看具有几个矩形线圈构成的定尺，在通以电流的一个矩形线圈构成的滑尺作用下所产生的感应电势。图 2-5 画出了它们的示意图。

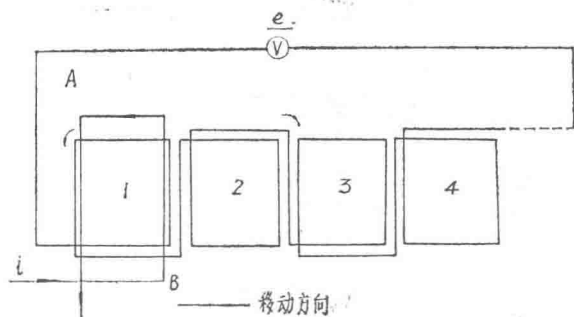


图 2-5 定尺连续矩形线圈的感应电势与滑尺位移关系

从图 2—5 可以看到, 定尺 A 中, 序号为单数的线圈与序号为双数的线圈的绕法是相反的。因此, 当滑尺 B 按图示方向移动时, 电压表的读数将由最大值逐渐减小至零, 进而又逐渐变大, 上升为最大值, 然后又逐渐变小至零, 再由零上升为最大值, 这样周期地变化着。不过, 滑尺上的线圈 B 和定尺上的线圈 1 或线圈 2 重合时, 虽然电压表的读数均为最大值, 但由于两个线圈的绕法相反, 因此感应电势的相位相差 180° 。如果用示波器 (外触发) 观察电压表两端的电压, 则当滑尺移动时, 可以看到电压的振幅由正而负, 再由负而正的波形变化。其变化规律仍然符合公式 (2—5), 即式 (2—5) 中 x 的变化范围扩大了, 只要滑尺不超出定尺绕组的范围, 感应电势的幅值呈周期性的变化, 其变化周期 $T = 2\tau$ 。

为了进一步说明感应同步器的工作原理, 这里画出图 2—6。图中线圈 S 和 C 表示滑尺上的两相绕组, 它们相互间的几何位置是固定不变的, 线圈中心线间的距离为 $3/4$ 周期, 即 $\frac{3}{4}T = \frac{3}{2}\tau$ 。S 为正弦绕组 (用 $\sin$ 表示), C 为余弦绕组 (用 $\cos$ 表示)。

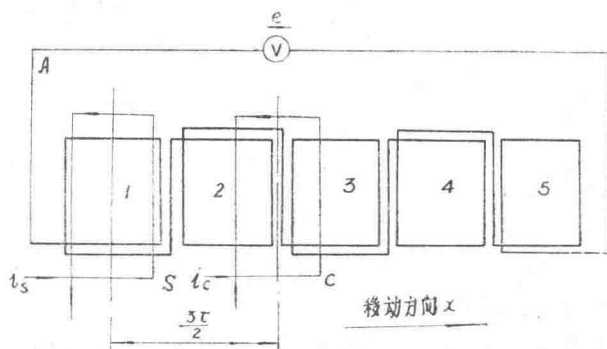


图 2—6 感应同步器基本原理图

如果在 S 绕组中通以电流 $i_s = I_s \sin \omega t$, C 绕组不通电流, 即 $i_c = 0$, 则由 (2—5) 式可知定尺绕组有感应电势

$$e_s = k_\phi \omega I_s \cos \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \quad (2-6)$$

同理, 若 $i_s = 0$, $i_c = I_c \cos \omega t$, 则由 (2—5) 式可知定尺绕组有感应电势

$$\begin{aligned} e_c &= k_\phi \omega I_c \cos \frac{2\pi}{T} \left(x + \frac{3T}{4} \right) \cos \omega t \\ &= k_\phi \omega I_c \cos \left(\frac{2\pi x}{T} + \frac{3\pi}{2} \right) \cos \omega t \\ &= k_\phi \omega I_c \sin \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \end{aligned} \quad (2-7)$$

实际上使用的感应同步器是用印刷电路制版工艺在金属基板上制作励磁和感应线圈的, 显然, 在这种单面板上要制出图 2—6 所示的线圈是不可能的, 图中的线圈有交叉点, 印刷电路制版工艺无法实现。所以线圈布置必须改变。图 2—1 画出了实际上使用的感应同步器定尺和滑尺的一种原理性布置, 其相互感应原理和图 2—6 所示的线圈之间的感应原理是相一致的。这可以用图 2—7 来说明。图中只画出 S 绕组与定尺

绕组间的几个特殊的相对位置，上方画出立体图，左方画出平面图，中间画出截面图。如对图 2—5 的分析一样，若滑尺的 S 绕组通以励磁电流 $i_s = I_s \sin \omega t$ ，则当它处于图 2—7 的 (a) 位置时，定尺上的感应电势 e_s 的幅值（记为 E_s ）有最大值，右移滑尺 $T/4$ 的距离至 (b) 位置时， $E_s = 0$ ，再移 $T/4$ 的距离至 (c) 位置时， E_s 又取得最大值，但 E_s 在 (c) 位置的相位与 (a) 位置相差 180° ，再右移至 (d) 位置时， E_s 又再次取零值，继续右移 $T/4$ 回复到初始的状态。从图 2—7 中能定性看出，如果以 (a) 位置作为零位，感应电势幅值 E_s 的大小是位置 x 的余弦函数，则有

$$E_s = k' \omega I_s \cos \frac{2\pi x}{T}$$

这便是图 2—7 (e) 的曲线方程式， k' 是比例常数。

由于感应电势和励磁电流在时间关系上有 $+\pi/2$ 的相位差，于是可记：

$$e_s = E_s \cos \omega t$$

$$\text{即 } e_s = k' \omega I_s \cos \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \quad (2-8)$$

这和式 (2—6) 一样，只不过常数因子 k' 与 k_ϕ 不同。这里 k' 实际上是定、滑尺平面绕组间互感系数的最大值。

若给 C 绕组通励磁电流 $i_c = I_c \sin \omega t$ ，则定尺感应电势表达式与式 (2—7) 类同。

$$e_c = k' \omega I_c \sin \frac{2\pi x}{T} \cos \omega t \quad (2-9)$$

通常，励磁电流 i_s 或 i_c 是由在 S 绕组 (sin 绕组) 或 C 绕组 (cos 绕组) 上加励磁电压 u_s 或 u_c 来获得的。若设绕组的电阻为 R ，由于绕组的自感系数很小，而励磁电压的频率较低，故可视绕组的阻抗为纯电阻，从而有

$$i_s = \frac{u_s}{R}, \quad i_c = \frac{u_c}{R}$$

若 $u_s = U_s \sin \omega t$ ， $u_c = U_c \sin \omega t$

则由 (2—8)，(2—9) 式知它们分别在定尺上感应出电势 e_s 和 e_c ：

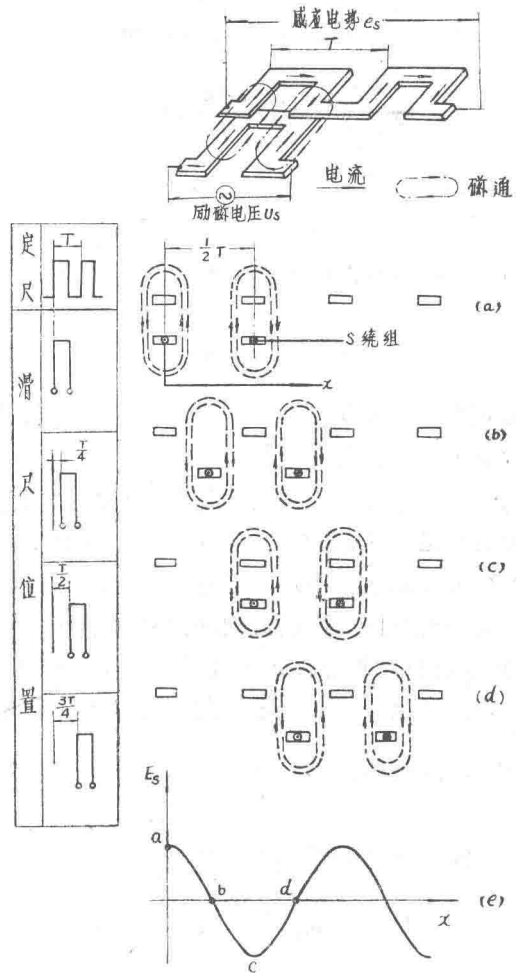


图 2—7 感应电势幅值 E_s 与位移 x 的关系