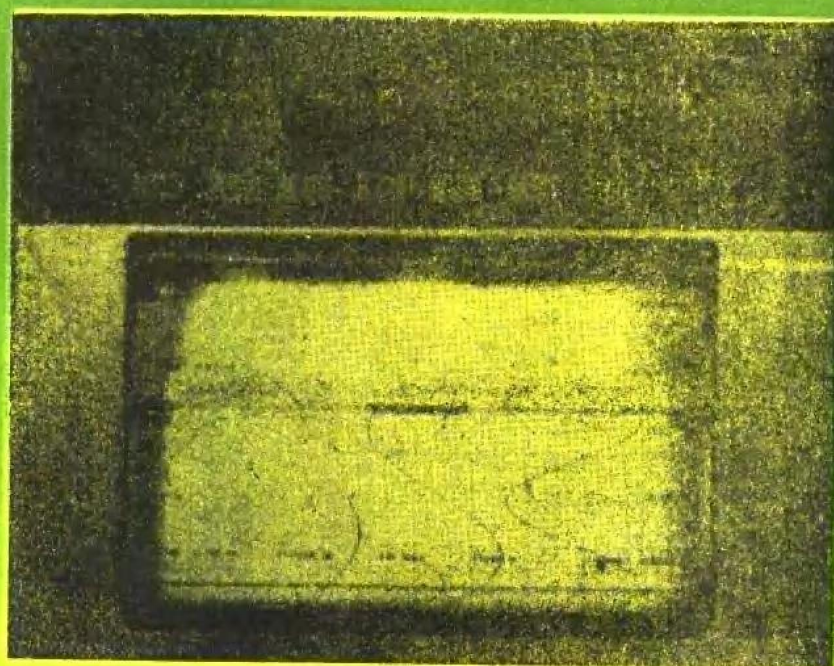


• ZIDONG XIANSHI YIBIAO • ZIDONG

自动显示仪表

蒋宗文 樊鑫瑞 徐恕宏 编



华中工学院出版社

5

5

YIBIAO • ZIDONG XIANSHI YIBIAO

自动显示仪表

蒋宗文 樊鑫瑞 徐恕宏 编

华中工学院出版社

内 容 提 要

本书包括模拟显示与数字显示两部分，共八章。前三章讨论模拟显示技术及仪表，第四至第七章讨论数字显示技术及仪表，最后讨论了显示仪表的抗干扰技术及微计算机在显示仪表中的应用。

本书在讨论各类显示仪表及其主要部件的基本构成与工作原理的基础上，进一步从理论上对显示仪表的各项性能指标、设计思想等方面进行了深入的分析和讨论，为正确设计和使用仪表提供了较充足的理论与实际知识。

本书是为大专院校仪表类专业开设“自动显示仪表”课程而编写的教材，亦可作为相近专业的教学参考书，还可供从事检测技术及自动化仪表工作的工程技术人员参考。

自动显示仪表

蒋宗文 樊鑫瑞 徐恕宏 编

责任编辑 常江南

*

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：15.75 字数：365,000

1985年11月第1版 1985年11月第1次印刷

印数：1-2,000

统一书号：15255-057 定价：3.40元

编 者 的 话

本书是为高等院校仪表类专业开设“自动显示仪表”课程而编写的一本教材，是编者在原有的《自动显示仪表》讲义的基础上，通过总结近年来的教学实践，并参考了国内外的有关教材和资料编写而成的。本书在内容的安排上，注意贯彻了由浅入深、由特殊到一般、从感性上升到理性的原则。书中系统地介绍了工业过程中各种自动显示仪表的基本原理和特性，深入阐述了自动显示技术的概念及发展过程，并从系统的角度出发，综合考虑了信号特征、系统功能和环境影响等各方面的因素。和以往教材相比较，本书有一个明显的特点，即压缩了模拟显示的内容，适当增加了数字显示部分的分量。在取材方面，既照顾到我国的现实，又充分考虑了显示技术的最新进展。编者的意图是，通过本书较深入地研究各类测量显示仪表的共同特性、共同要求及基本工作原理，而不仅仅是向读者推荐或评价某类仪表。

本教材的编写，参照了机械工业部教材编审委员会统一制定的本课程的教学大纲。同时，在编写过程中得到了国内仪表界同行们的大力支持，许多单位和个人为本书提供了极有价值的图纸或资料；教研室的同事们也给予了热情支持，谨向他们表示衷心的感谢！

在本书编写中，还参考了许多兄弟院校的教材和讲义，以及国内外一些生产厂家的技术资料。由于篇幅有限，在参考文献中未能全部列出，在此一并致谢！

参加本书编写工作的有蒋宗文（绪言、第一、四、五、六章）、樊鑫瑞（第二、三章）、徐恕宏（第七、八章）。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者 1983.12于武汉

绪 言

测量,是人们对客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这一过程中,首先借助于检测装置将被测量转变为显示装置可以接受的信息量,接着由显示装置将这些信息量以人们最易于识别的方式,如指针的位移,以及数码、字符、图象的变化等方式显示出来。早期的测量仪表不分检测与显示,都做成一体。随着生产和科学技术的发展,显示技术正逐渐发展成为一门新的学科,在生产和科学实验领域内发挥越来越大的作用。

所谓显示技术,就是将检测的结果进行转换与处理,使未知的被测信息量转换为可知的数值、可见的变化趋势以及图形、图象等,为人们(或机器)提供最精确和最方便的视觉(或听觉)感受的技术。显然,这是属于信息科学的范畴。

具有显示功能的仪表,称之为显示仪表。

由于科学和工业生产技术的发展,作为参数测量、控制和显示用的过程仪表*也随之不断发展。在工业生产过程自动化方面,五十年代出现了单机自动化,六十年代实现了机组自动化,七十年代开始了全厂自动化。就仪表本身而言,五十年代以基地式代表为主,实现单参数测量与显示;六十年代以单元组合式仪表为主,按功能来设计各种仪表;七十年代则出现了集散型综合控制装置,使过程控制与生产管理结合起来了。

如果将五十年代的基地式仪表比作“点”,那么,六十年代的单元组合式仪表就是“线”,而七十年代出现的集散型综合控制系统就是“面”了。也就是说,在过去的三十年左右,过程仪表已经历了由点到线,由线到面的发展过程。这过程不仅反映了工业过程仪表技术的进步和应用范围的扩大,同时也体现了仪表设计思想的变化。显示技术及其显示仪表正是在这个发展过程中逐步发展起来的。

在当今世界各国的工业生产过程自动化系统中,最普遍和最大量使用的显示仪表是模拟显示与数字显示两种类型。

模拟显示出现最早。因为各种物理参量之间在其运动规律上,有着极大的相似性,因此,就允许人们将一些不能直接或不能精确地直接感受的物理量(如温度、压力、流量、磁场等),用人们易于精确观察的物理量(如线位移、角位移或其它形式)来表示。这种方法,工程上称为物理模拟法。因此,凡是用物理模拟方法对被测信息实现显示的仪表,称之为模拟显示仪表。象在实验室常见的指示型电流表、电压表以及下面将要讨论的动圈仪表,就是用指针的角位移来模拟被测信息的大小及其变化趋势的模拟显示仪表。下面将要讨论的电子自动平衡式仪表,则是通过可逆电机的转角变换为相应标度尺上的线位移来模拟被测信息的大小及其变化趋势的另一类模拟显示仪表。

模拟显示仪表历史悠久,其原理、结构、元器件及制造工艺等均已相当成熟,在过程检测及实验研究领域内使用都能满足一定的精度要求,功能又比较齐全,附加一些装置,可以实现指示、调节、记录、报警以及其它多项功能。与不同检测装置相配合,能进行温度、压力、流量、物位等多种参数的测量和显示,而且价格低廉。特别是通过指针的移动能连续、

*过程仪表是工业过程检测与控制仪表的简称,又称工业自动化仪表。这个名称在世界各国很不统一,英、美及西欧等国称为“工业仪表”,德国称为“测量调节仪表”,苏联至今仍称“热工仪表”,日本称“工业计器”。

直观地反映被测信息的变化趋势，因而这类仪表具有极强的生命力，获得了广泛的应用。

数字显示仪表是由于模拟显示仪表的局限性（参见第四章第一节）以及现代科学技术的发展而相应出现的另一类显示仪表。它采用数字量的方式进行显示，与模拟显示仪表相比较有如下优点：由于数字显示仪表没有模拟显示仪表中所必须的机械运动机构，因而仪表的测量和显示速度、灵敏度（分辨力）、精度等均大大提高；而且数字显示清晰、醒目，便于远距离观测，又无视读误差，功能多；在进行数字显示的同时，还能输出代码，可供打印或与计算机联机运用；也可通过数-模转换装置输出模拟量，供执行机构进行生产调整，所以在自动化系统中，数字仪表起着人-机联系的桥梁作用。

数字显示仪表的出现和发展与电子技术、计算机技术以及数字技术等方面的发展紧密相连。随着这些现代科学技术的发展，数字仪表也不断地更新换代。从五十年代初期世界上出现第一台数字电压表至今，数字仪表经历了电子管式、晶体管式、集成电路式和智能化这样四个发展阶段。仪表的各项性能指标不断提高，应用范围越来越广。目前仍以极高的速度朝着高精度、多功能、小型轻量化、智能化等方面不断发展。特别是在数字仪表内装设微处理器或微型计算机后，可用“合成语言”的方法使仪表开口说话，报出所测的数字，这在一些不便于直接测取读数的场合，确能发挥其独特的功能，这样的仪表称之为“语言仪表”或“智能仪表”。

数字式仪表由于其发展迅速及性能的优越，已经在相当广泛的范围内取代了模拟式仪表，特别是在高速度与高精度的检测与显示方面。数字式仪表是否有可能全面取代模拟式仪表，这是人们一直关心的问题之一，科技人员也曾作过多方面的估测。从世界各国的发展情况看来，尽管数字式仪表已经基本解决了价格高和可靠性差的问题，但它仍不能完全取代模拟式仪表。其主要原因是模拟式仪表可以作连续的倾向性显示，这是数字显示方式至今无法办到的。另外，它所具有的对许多干扰不灵敏和稳定性能较好等优点也是受到重视的原因。

表0-1 模拟式与数字式仪表的特点

	模 拟 式 仪 表	数 字 式 仪 表
优 点	1.价格低 2.可靠性高 3.对许多干扰不灵敏 4.稳定性能较好 5.易于显示信号之倾向 6.易于判断信号与满度值之差	1.精度高 2.速度快 3.无视读误差 4.过载能力强 5.易与计算机接口 6.有极性显示
一般问题	1.速度较慢 2.易受冲击或振动的影响 3.环境因素影响大 4.过载能力差 5.质量控制不易	1.价格偏高 2.显示跳动或失效 3.干扰因素多 4.需内附或外附电源 5.元件或焊接失效问题
展 望	1.降低价格 2.进一步提高精度与速度 3.采用模拟与数字混合型仪表	1.降低价格 2.进一步提高可靠性 3.采用 μ P制成智能化仪表

数字式仪表的优点是精确、高速、分辨力高，有助于减少人-机间出现的含糊不清的疑点，并能实现人-机对话。但目前只能适用于单台显示仪表与选点显示中，对于高密集度安装的仪表表盘来说，大量的数字罗列，还不如模拟式仪表那样清晰和便于操作人员掌握全面情况。因此通常是做成模拟与数字并存的形式而不希望出现全数字式的仪表表盘。

作为检测与显示工业参数的手段，究竟是采用模拟式好，还是数字式好，这要根据具体情况而定，因它们的优缺点在一定程度上是互相补充的，应尽可能地发挥各自的长处，以取得更高的效益。表0-1对它们的性能作了简单比较。

本书对模拟与数字显示技术及仪表进行了专门的讨论，并对国内外有关的新技术及其应用等问题作了简要的介绍。

目 录

绪 言

第一章 动圈显示仪表 (1)

§ 1-1 动圈仪表的工作原理 (1)

§ 1-2 动圈测量机构设计计算的基本知识 (5)

§ 1-3 动圈仪表的品质系数与平衡系数 (12)

§ 1-4 动圈仪表的测量线路 (14)

§ 1-5 带前置放大器的动圈仪表简介 (18)

第二章 电子自动平衡式显示仪表 (22)

§ 2-1 自动平衡式显示仪表的工作原理 (22)

§ 2-2 自动平衡式显示仪表的测量桥路 (26)

§ 2-3 自动平衡式显示仪表的放大器 (44)

§ 2-4 自动平衡式显示仪表用微电机 (64)

§ 2-5 自动平衡式显示仪表的传动机构 (70)

第三章 模拟显示仪表的性能分析与设计基础 (74)

§ 3-1 模拟显示仪表的静态特性 (74)

§ 3-2 模拟显示仪表的静态精度分析 (79)

§ 3-3 模拟显示仪表的动态特性 (86)

第四章 数字显示技术的几个基本问题 (101)

§ 4-1 概述 (101)

§ 4-2 采样过程与采样定理 (109)

§ 4-3 量化过程与量化误差 (115)

§ 4-4 电信号的标准化与标度变换 (118)

§ 4-5 非线性输入特性的线性化 (121)

第五章 数字—模拟 (D/A) 转换 (130)

§ 5-1 概述 (130)

§ 5-2 并行 D/A 转换 (131)

§ 5-3 串行 D/A 转换 (140)

§ 5-4 集成电路 D/A 转换器介绍 (146)

第六章 模拟—数字 (A/D) 转换 (151)

§ 6-1 概述 (151)

§ 6-2 直接比较型 A/D 转换 (152)

§ 6-3 间接比较型 A/D 转换 (159)

§ 6-4 复合型 A/D 转换 (179)

§ 6-5 快速 A/D 转换 (182)

§ 6-6 集成电路 A/D 转换器 (186)

第七章 数字仪表的主要部件 (194)

§ 7-1	模拟开关	(194)
§ 7-2	测量放大	(202)
§ 7-3	电压比较器	(211)
§ 7-4	积分电路	(216)
§ 7-5	模拟采样保持电路	(219)
§ 7-6	数据显示器	(223)
第八章	显示仪表抗干扰与微计算机的应用	(226)
§ 8-1	概述	(226)
§ 8-2	屏蔽与接地	(226)
§ 8-3	系统结构的抗干扰性能	(233)
§ 8-4	微计算机在显示仪表中的应用	(236)

第一章 动圈显示仪表

动圈仪表是以指针的角位移模拟被测参数变化的一种典型的显示仪表。本章主要讲述其工作原理和测量机构设计计算的基本知识；介绍测量线路中的温度补偿、断偶保护方法；对于如何采用统一测量机构而又能妥善处理仪表灵敏度、精度和稳定性之间的关系的问题也进行了讨论。

§ 1-1 动圈仪表的工作原理

一、仪表特点与分类

在工业过程测量和控制系统中，动圈显示仪表是一种发展较早的模拟显示仪表，在国民经济的各部门，特别是轻工等部门应用极为广泛。其主要特点是：

它采用了灵敏度较高的磁电系测量机构，易将微弱的被测信号转换为指针的较大的角位移，指示清晰、连续，从指针的偏转即可得知被测参数的变化趋势；

仪表既能单独用作指示，又能同时指示调节，可与热电偶、热电阻等测温传感器配合，用来测量、显示和调节温度参数，还可与其它变送器配合，测量、显示和调节其它工业参数；

具有一定的抗干扰能力，噪声对其影响不大；

体积小，重量轻，结构简单，使用维修较方便，价格低廉；

仪表阻尼时间较长，不宜用于快速变化参数的测量和调节。

动圈仪表的发展较快，种类较多，按不同的分类方法其主要种类有：

按动圈仪表在工业测量与控制系统中的功能，可以分为指示型（XCZ）和指示调节型（XCT）；

按采用的支承方式分为张丝弹片支承型和轴承轴尖支承型；

按磁路系统的结构型式，又可分为外磁式、内磁式及内外磁式；

按作用力矩的种类可以分为弱力矩型和强力矩型，或者称之为不带前置放大器型和带前置放大器型；

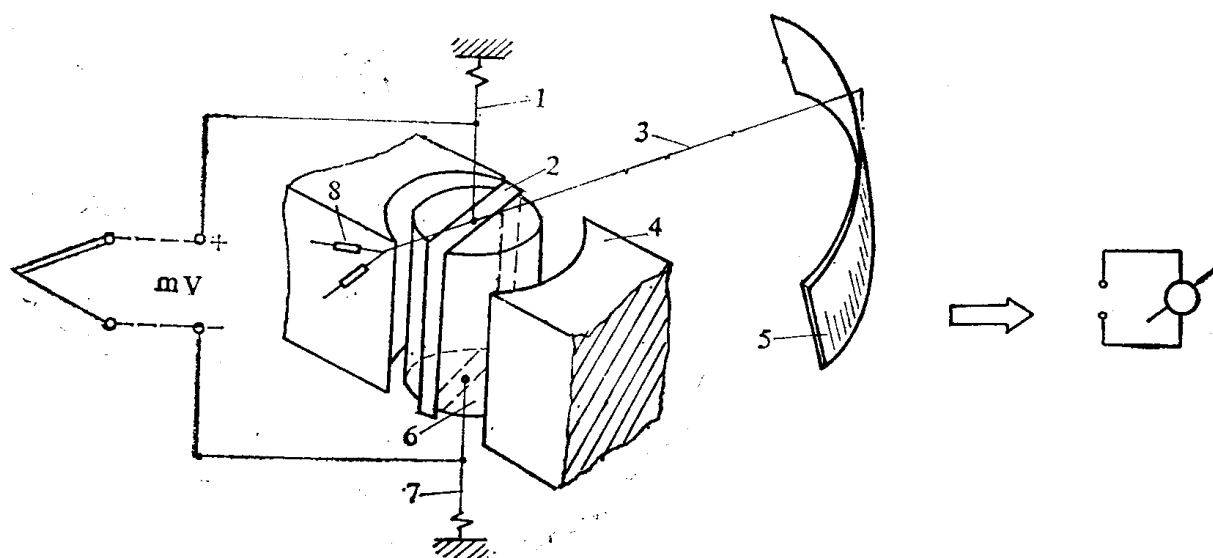
按输入信号的类别可分为毫伏输入型和电阻输入型等等。

我国统一设计的动圈仪表有两种基型，即配热电偶的毫伏输入型和配热电阻的电阻输入型。两种基型均采用统一的测量机构，取消了过去仿苏产品中配热电阻的“流比计”之类的产品，形成了具有我国特色的XC系列动圈仪表。现在，XCZ型和XCT型动圈仪表的国家标准业已制定，并即将颁布执行。有关动圈仪表系列型谱列于本章附录。

二、仪表组成与工作原理

动圈仪表是利用固定的永久磁铁对通电动圈所产生的作用力（矩）和支承机构的反作用力

(矩)的相互作用而工作的一种磁电系仪表。



1-上张丝；2-动圈；3-指针；4-永久磁铁；

5-刻度面板；6-软铁芯；7-下张丝；8-平衡锤

图1-1为XCZ型动圈仪表的工作原理简图。该仪表由永久磁铁、软铁芯、可动线圈、上张丝和下张丝以及连接线路等组成。

永久磁铁（又称“磁钢”）为仪表提供磁场能源。软铁芯在其中起磁通路作用，其所以做成圆柱形，是为了配合磁极，使之在环形空气隙中形成均匀的辐射状的磁场。气隙中悬有一个可动线圈（即通常说的“动圈”），这是一个由直径0.08毫米(44号)漆包铜线绕制成的无骨架矩形线框。它与上、下张丝和弹片支承相连接，而张丝则和信号线相连，起导流的作用。

当被测信号电流通过张丝流经动圈时，动圈受到电磁力矩的作用而偏转，其方向由左手定则决定。动圈在受力偏转的同时，扭转了张丝，张丝则产生反作用力矩以反抗动圈的转动。反作用力矩的大小取决于张丝的扭转程度。当两力矩平衡时，动圈就在某一平衡位置稳定下来，此时动圈偏转角度的大小就被测信号电流的大小成比例。图1-1所示的情况，就是动圈的偏转与被测温度成正比。

若被测温度再变化，即信号电流的大小发生变化，则动圈转动角度的大小随之变化。于是，如在动圈的转轴中心固定一根指针，指针的下面设置用温度分度的刻度面板，则可显示出此时温度的数值及其变化情况。动圈偏转角度的大小就直接成比例地模拟出被测温度的数值。

显然，如将其它种类的变送器替换热电偶，并通过一定形式的转换，则可用来测量和显示其它工业参数。

可见，动圈仪表将被测量转换为可动部分的偏转，经过了两个转换步骤，即先将热电势或其它被测参数（被测量 x ）转换为可动部分可以接受的大小适当的电流（过渡量 y ），然后再将电流转换为可动部分的偏转角。这两次转换均保持一定的函数关系。

在指示仪表中，凡能将测量 x 转换为可动部分可以接受的过渡量 y ，并保持一定变换比例的仪表组成部分，叫做测量线路；凡能将过渡量 y 或者直接将被测量 x 按一定的变换关系，转换为仪表偏转角 α 的仪表组成部分，称之为测量机构。动圈仪表系由测量线路和测量机构两大部分所组成，原理方框图示于图1-2。

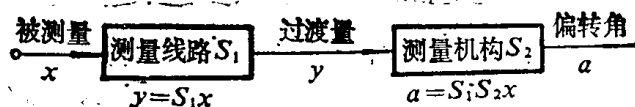


图1-2 动圈仪表原理方框图

三、测量机构的作用与力矩的分析

测量机构所起的作用如下所述。

首先，在被测量或过渡量的作用下，产生使仪表可动部分偏转的力矩（称为电磁力矩或偏转力矩），力矩的大小应与被测量或过渡量的变化成一定的函数关系。

其次，当可动部分偏转时，能产生随偏转角度大小变化而变化的反作用力矩，以使偏转角度能反映被测量的大小。

再者，为使可动部分在运动过程中能尽快稳定在某一平衡位置，以便读取示值，应能产生一阻尼力矩，以吸收可动部分的动能。阻尼力矩应随可动部分的运动而产生，随可动部分的停止而消失，其大小只与可动部分的运动速度有关，而和偏转角度无关，其方向总与可动部分运动的方向相反，这就是说，阻尼力矩仅仅对可动部分的运动起阻尼作用，并不影响偏转角度的大小。因此可动部分的稳定偏转只由偏转力矩和反作用力矩的平衡关系所确定，而与阻尼力矩无关。

下面进一步分析偏转力矩与反作用力矩，而阻尼力矩将在讨论动态特性时（第三章）研究。

1. 偏转力矩

从图1-1及图1-3可见，当动圈中通以电流时，动圈中的电流就与气隙磁场相互作用，在动圈两有效边上产生一对大小相等、方向相反的电磁力 F ，并相对于动圈中心轴线 OO' 形成力矩，迫使动圈转动。

电工基础理论指出，若磁场均匀，且载流导体与磁场相互垂直，则载流导体在磁场中受力大小与磁感应强度 B 、导体有效长度 L 及流经导体的电流 I 成正比，这时作用在动圈一个有效边上的力

$$F = BLIn \quad (\text{N}), \quad (1-1)$$

式中， B 为气隙的磁感应强度(T)； L 为动圈的一个有效边长度(m)； I 为流经动圈的电流(A)； n 为动圈匝数。

那么，偏转力矩

$$M = 2F \cdot \frac{b}{2} = BLInb \quad (\text{N} \cdot \text{m}), \quad (1-2)$$

式中， b 为动圈的平均宽度(m)。令 $L \cdot b = S$ 为动圈的有效面积(m^2)，则式(1-2)为：

$$M = BSnI \quad (\text{N} \cdot \text{m}). \quad (1-3)$$

对于结构给定的测量机构而言， B 、 S 、 n 均为常数，于是公式(1-3)可进一步写成：

$$M = C_1 I \quad (\text{N} \cdot \text{m}), \quad (1-4)$$

式中， C_1 为与动圈尺寸及磁系统有关的系数。

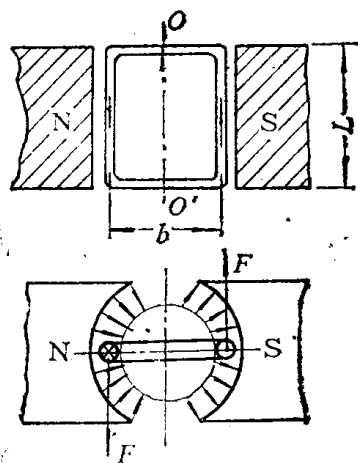


图1-3 动圈测量机构偏转力矩的产生

式(1-4)说明, 动圈的偏转力矩与流经动圈的电流成正比, 而转矩的方向则决定于流进动圈电流的方向

这里必须指出, 以上公式是在假定了磁场沿有效边长度均匀分布, 且动圈有效边与磁场相互垂直的情况下得出的。这一假定是使仪表获得均匀刻度的必要条件, 否则还要考虑夹角的影响, 这将带来刻度的非线性。国产XC系列动圈仪表的测量机构为保证上述要求的实现, 采用了合理的磁极型式, 并与极靴、圆柱形软铁芯相配合(参见图1-8), 使之在环形气隙中形成径向辐射状的、大小均匀的磁场。这样当动圈转动到不同角度时, 其有效边始终能与磁感应强度相垂直, 因而产生的力矩只随电流*I*的大小而变化, 保证了刻度的均匀性。

2. 反作用力矩

当仪表可动部分在偏转力矩作用下发生偏转时, 为了对应每一被测量只产生一定的偏转, 以便显示被测参数的大小, 必须有一个其值随偏转角度变化而变化的反作用力矩。

仪表中的反作用力矩通常利用弹性元件变形后的弹力产生。如利用张丝的扭力; 利用游丝的弹力; 利用游丝的弹力再加上张丝的扭力以及利用悬丝的扭力等。

XC系列动圈仪表采用了矩形截面的张丝做支承, 其反作用力矩 M_α 可按式计算:

$$M_\alpha = \left(\frac{1}{3} \frac{bh^3E\alpha}{L} + \frac{1}{12} \frac{b^2F\alpha}{L} + \frac{1}{360} \frac{b^5hE\alpha}{L^3} \right) \times 10^{-3} \quad (\text{N} \cdot \text{m}), \quad (1-5)$$

式中的第三项数值很小, 可以略去, 于是有

$$M_\alpha \approx \left(\frac{1}{3} \frac{bh^3E}{L} + \frac{1}{12} \frac{b^2F}{L} \right) \alpha \times 10^{-3} \quad (\text{N} \cdot \text{m}), \quad (1-6)$$

式中, *b*为张丝宽度(m); *h*为张丝厚度(m); *E*为张丝材料的剪切弹性模数(N/m²); *F*为张丝的工作张力(N); α 为动圈偏转角度(rad); *L*为张丝的等效长度(m)。

式(1-6)指出, 反作用力矩 M_α 既和张丝的材料性能、尺寸有关, 又和张力的大小有关。当结构给定时, *b*、*h*、*L*、*E*、*F*均为常数, 用 C_2 表示, 则(1-6)又可写成:

$$M_\alpha = C_2 \alpha \quad (\text{N} \cdot \text{m}). \quad (1-7)$$

这就说明, 反作用力矩和张丝的偏转角度(即动圈偏转角度)成正比。

四、刻度方程

前面已经指出, 动圈测量机构的可动部分的稳定偏转是由偏转力矩和反作用力矩的平衡关系确定的。两力矩不断比较和不断平衡, 当作用于可动部分的力矩之和为零时, 测量机构进入稳态, 此时,

$$\Sigma M = M - M_\alpha = 0,$$

即

$$C_1 I - C_2 \alpha = 0,$$

得

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} I = S_2 I. \quad (1-8)$$

式(1-8)清楚地表明了被测信号电流*I*和动圈偏转角 α 之间的函数关系, 所以式(1-8)就称为动圈测量机构的刻度方程。又因为式(1-8)表明了动圈测量机构在稳态条件下的输出量 α 和输入量*I*之间的函数关系, 所以此函数关系也叫动圈测量机构的静态特性。

式(1-8)中的 $S_2 = \alpha/I$, 为单位输入电流引起的输出转角的变化量, 显然 S_2 越大, 测量机构越灵敏, 故 S_2 称为动圈测量机构的灵敏度。在设计仪表时, 一般希望获得较高的灵

敏度，并力求整个刻度范围内的灵敏度为常数，以便获得均匀的刻度标尺。这里的动圈测量机构的 $S_2 = C_1/C_2$ ，为一常数，因而刻度特性是线性的。

已知动圈仪表由测量线路和测量机构所组成，若以 S_1 表示测量线路的灵敏度， S 表示动圈仪表的总灵敏度，则动圈仪表的刻度方程可以根据图1-2写出，即

$$\alpha = S_1 S_2 x = Sx \quad (1-9)$$

以配热电偶的毫伏输入型动圈仪表为例（见图1-4），即当被测量 x 用 $E(t)$ 表示时，得

$$\alpha = SE(t) = \frac{1}{R_{sr}} \frac{C_1}{C_2} E(t), \quad (1-10)$$

式中， R_{sr} 为测量线路的输入电阻。显然 $S_1 = 1/R_{sr}$ 。

式（1-10）即为配用热电偶的毫伏输入型动圈仪表的刻度方程式。

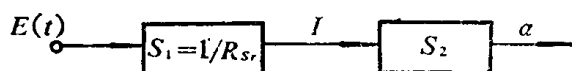


图1-4 配热电偶毫伏输入型动圈仪表原理框图

§ 1-2 动圈测量机构设计计算的基本知识

动圈测量机构直接担负着将被测电量转换为输出转角的任务，是整个仪表的“表头”。因此如何正确而又合理地设计测量机构是动圈仪表设计的首要问题。应该使得表头的设计满足灵敏度高、精度高、刻度线性好、稳定性能好等要求。

动圈测量机构由固定部分和可动部分组成。这里作为仪表固定部分的是由磁钢、软铁芯组成的磁路系统；可动部分则是由张丝及其支承的动圈和指针等部件构成，通常称之为张丝弹片支承系统，或简称张丝支承系统。

下面对磁路系统及张丝支承系统的设计和计算方法作简要介绍。

一、磁路系统

1. 磁路系统的结构型式、技术要求

动圈仪表是一种磁电系仪表，按其磁路形式的不同可分为三类：磁钢位于可动线圈外部的称为外磁式磁系统；磁钢位于可动线圈内部的称为内磁式磁系统；磁钢一部分位于可动线圈内部，而另一部分位于可动线圈外部的则称为内外磁式磁系统。表1-1分别给出了三种磁系统结构型式简图，并比较了它们的优缺点。

不管采用哪一种磁系统型式，均应满足以下基本技术要求：

- (1) 气隙中要有足够的磁通密度，而且磁通密度应保持稳定，不随时间变化；
- (2) 气隙中的磁通要均匀分布；
- (3) 外界因素的变化对气隙磁通的影响要尽量小，在振动、冲击作用下，磁铁的磁性不变化；
- (4) 磁系统结构要尽量小，而磁能应尽可能大。

国产XC系列动圈仪表的磁系统如图1-8所示，它为立式圆柱形外磁钢结构。

表1-1 三种磁系统及其优缺点比较

图1-5 外磁式 优点: 1. 结构简单, 生产方便; 2. 气隙磁感应强度与稳定性能满足要求; 3. 能安装热磁补偿片	图1-6 内磁式 优点: 1. 体积小, 可节约材料, 一般内磁式与外磁式体积或重量的比值约在1:4~1:8之间; 2. 漏磁小, 磁能利用率高	图1-7 内外磁式 优点: 1. 磁能利用率较外磁式高; 2. 外磁影响小; 3. 气隙中磁感应强度较高, 一般内外磁式要比内磁式提高B值约30%~40%, 适用于精密和高灵敏度的仪表
缺点 1. 磁能利用率较低; 2. 体积较大; 3. 外磁影响较大	缺点 1. 气隙磁感应强度不能太高; 2. 气隙磁通分布的均匀性稍差	缺点 1. 结构较复杂, 加工较困难; 2. 整个磁系统较复杂, 成本较高

这种磁系统由两块接近半圆环形的磁钢与极靴、软铁芯、接铁组成串接的形式。磁路经极靴、空气隙和软铁芯而闭合。两块极靴铁用压铸铝或铜连结在一起。接铁、极靴、铁芯和磁分路调节片均采用软铁制成。对它们的要求是磁阻小。磁分路调节片的作用是调整空气隙中的磁感应强度。当磁分路调节片顺时针方向转动时, 经过磁分路片的磁通量增加, 气隙中的磁感应强度 B 值降低, 使动圈受到的电磁力矩减小, 仪表示值亦减小。磁分路片除了在仪表出厂校验时用来微调示值外, 在使用过程中也可用来调整示值。

立式圆柱形外磁钢结构与图1-5所示的外磁钢结构相比有很多优点: 底部的接铁有屏蔽作用; 接铁、极靴、磁钢和软铁芯均可分别加工, 故加工方便; 两圆环形的磁钢夹在极靴与接铁之间, 磁能利用率较高; 漏磁小; 刻度线性好; 气隙磁感应强度较高; 表头灵敏度高。

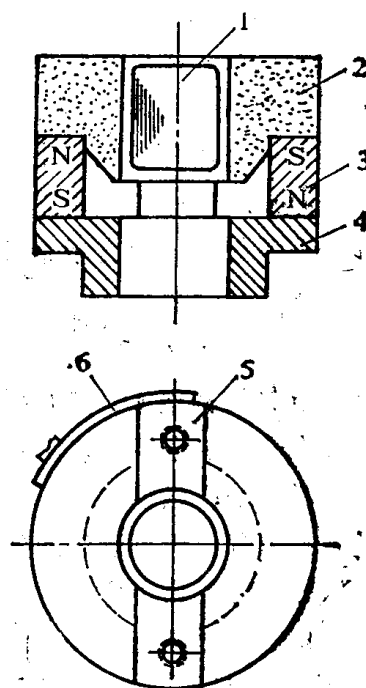


图1-8 立式圆柱形外磁钢结构
1—软铁芯; 2—极靴; 3—磁钢; 4—接铁;
5—压铸铝或铜; 6—磁分路调节片

2. 磁路系统设计计算的基本知识

(1) 磁性材料与去磁曲线

有些物质(如铁、钢、钴、镍及其合金)在外磁场影响下, 呈现出很强的磁性, 或者说

被强烈磁化，这类物质就称为铁磁物质或磁性材料。

磁性材料的一个重要属性是磁滞现象，这种现象可以用磁滞回线，即 $B-H$ 曲线来形象地表征，曲线的形状和材料的成分、加工方法、电源频率、切割方向等因素有关，很难用一个解析式表达，往往通过实验测得。

在图1-9(b)所示的磁滞回线上， B_r 称为剩余磁感应强度，它是磁性材料的一个重要特性参数。由于存在剩磁，磁铁本身就成了磁场的能源，在没有外磁作用下，保持了磁通 ϕ_r ，且

$$\phi_r = B_r \cdot S, \quad (1-11)$$

式中， S 为磁铁的截面积。这种在磁铁中建立剩磁的过程，就叫做：“充磁”。显然 B_r 愈大愈好，因为它决定气隙的磁场强弱，直接影响仪表的灵敏度。

由于剩磁的存在，要使 $B_r = 0$ ，必须反向磁化，这过程就称为：“去磁”（或“退磁”）。使磁铁物质完全失去磁性所要加的反向磁场强度 $-H_c$ 就称作矫顽磁力。不同的磁性材料有不同的矫顽磁力及剩磁，矫顽磁力大的材料称为“硬”磁材料，如钨钢、锰钢、钴钢等，这类硬磁材料一经磁化之后，其剩磁及矫顽磁力相当强，剩磁不易失去，人们叫它永久磁铁或磁钢。矫顽磁力小的材料，称为“软”磁材料，如软铁、硅钢等。

矫顽磁力是磁铁材料的另一重要特性参数，它表明磁铁性能的稳定程度。矫顽磁力大，磁铁的剩余磁感应强度 B_r 越稳定，这种磁铁即使在外界各种因素影响下，放置很长的时间，其磁性也几乎不减弱。

图1-9(b)所示的 $B-H$ 曲线是在磁路完全闭合的情况下（见图1-9(a)）测得的。象这种闭合磁路，就无法利用其磁能。为了有效地利用磁能，必须使永久磁铁具有一定的气隙，如图

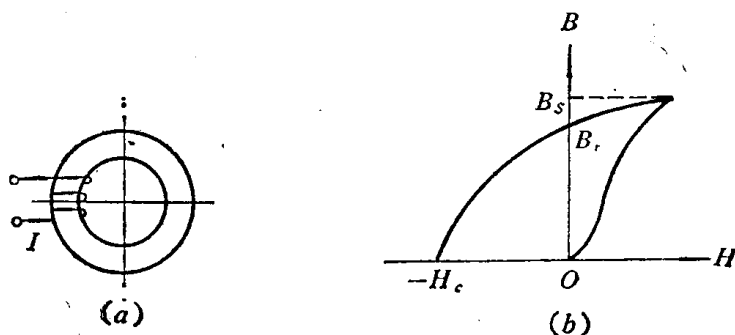


图1-9 闭合磁路与去磁曲线

1-10(a)所示的情况。在这种情况下，由于空气隙的存在，且气隙对磁钢有退磁作用，工作点由原来的 B_r 下降到 B_m ，磁场强度由零变到 $-H_m$ （见图1-10(b)）。连接 OP ， OP 与纵轴的交角定为 α ，于是有

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_m}{B_m} = N, \quad (1-12)$$

这里的 N 或 $\operatorname{tg} \alpha$ 一般称为去（退）磁系数， α 称为去（退）磁角。

此外，还经常用最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 来表征永磁材料的性能。所谓最大磁能积是指去磁曲线上的磁感应强度与相应的磁场强度的乘积的最大值，如图1-11所示。不同材料的 $(BH)_{\max}$ 不一样。与最大磁能积相对应的去磁曲线上的工作点 P （图1-11上三种退磁曲线上的 P_1 、 P_2 、 P_3 ）称为最佳工作点，在设计磁路时，应力求将工作点选在最佳工作点上。

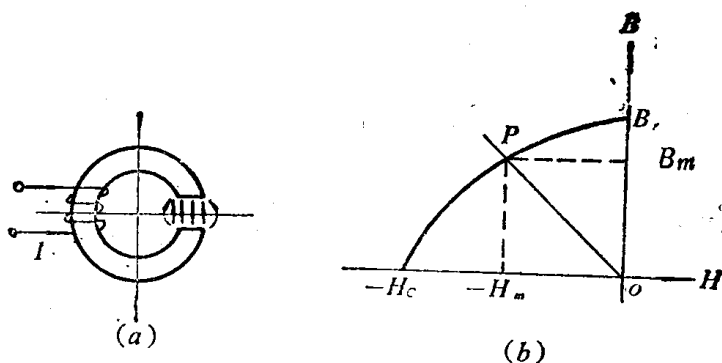


图1-10 间隙磁路与去磁曲线

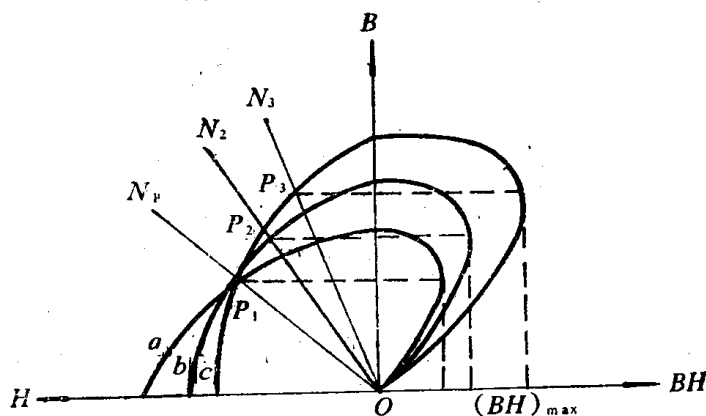


图1-11 最大磁能积与工作点的选择关系

(2) 永久磁路计算方法

磁路有直流磁路、交流磁路与永久磁路之分。三种磁路随应用场合的不同，计算时需要解决的问题不同，因而计算方法亦不同。三种形式的磁路在仪表中均有应用，永久磁路由于能长期保持磁性可作为磁场能源，因而在磁电系仪表中是不可缺少的部分。

关于永久磁路的计算目前尚无精确的专门方法，通常是化为直流磁路来进行计算，多采用以下两种方法：一种是已知气隙磁通密度和磁铁材料的性能，计算磁铁的几何尺寸；另一种是已知磁性材料的性能，然后假定几何尺寸计算气隙中的磁通密度。一般设计新磁路系统时，往往用第一种方法，求出磁铁的几何尺寸；而核算已有的结构时，常采用第二种方法。

但不管采用哪种方法，永久磁路系统的计算结果都是近似的。虽然计算方法以及引用的公式与电路的计算相仿，但磁路比电路复杂，又是非线性的，再加上磁系统漏磁现象的存在，所以在计算中需引用系数进行修正。而这些系数或取自实验结果，或凭借于经验来决定，因而计算结果显然是不够精确的，但可以给设计提供方向，然后再通过实践来进行检验。

下面介绍永久磁路计算的基本公式。

由于永久磁路的计算是转化为直流磁路来进行的，故可直接引用直流磁路的基本定律。

根据磁路的基尔霍夫第一定律，即磁通连续性原理，有 $\sum \phi = 0$ ，而 $\phi = B \cdot S$ ，故有：

$$B_g \cdot S_g = B_m \cdot S_m, \quad (1-13)$$

即通过气隙的磁通等于通过永久磁铁的磁通。当然这是理想的情况，实际上由于磁铁的磁阻与空气的磁阻相差很大，加之气隙存在漏磁，故需对(1-13)式引进漏磁系数 F 进行修正，于是可得：