

高等学校试用教材

电 磁 测 量

下 册

哈尔滨电工学院袁禄明 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

电 磁 测 量

下 册

哈尔滨电工学院 袁禄明 主编



机械工业出版社

电 磁 测 量

下 册

哈尔滨电工学院 袁禄明 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北下关印刷厂印

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $17 \frac{3}{4}$ ·字数 440 千字

1980年11月北京第一版·1982年 8 月北京第二次印刷

印数 4,601—9,600·定价 1.85 元

*

统一书号: 15033·4872

目 录

第七章 示波和记录测量法..... 1	§ 11-2 电阻式变换器148
§ 7-1 光线示波器的特点及分类 1	§ 11-3 电容式变换器171
§ 7-2 光线示波器的工作原理 及振动物 2	§ 11-4 电感式变换器178
§ 7-3 电子射线示波器的工作原理13	§ 11-5 热电偶变换器192
§ 7-4 用电子示波器测量电压 和电流20	§ 11-6 感应式变换器198
§ 7-5 用电子示波器测量频率 和相位23	§ 11-7 压电式变换器203
§ 7-6 磁带记录仪28	附录 I 关于惯性式仪表的基本工作 原理218
第八章 数字表测量法..... 35	第十二章 测量误差的估计223
§ 8-1 概述35	§ 12-1 测量误差的分类223
§ 8-2 电子计数器36	§ 12-2 系统误差及其消除方法224
§ 8-3 数字电压表46	§ 12-3 随机误差的统计特性和 算术平均值原理229
§ 8-4 数字电压表的特性及使用61	§ 12-4 随机误差的估计231
第九章 电测装置的屏蔽与防护.....69	§ 12-5 随机误差计算举例235
§ 9-1 概述69	§ 12-6 真误差的综合241
§ 9-2 直流电测装置的屏蔽与防护71	§ 12-7 随机误差的综合244
§ 9-3 交流电测装置防护的 一般原则76	§ 12-8 系统误差的综合249
§ 9-4 交流元件的静电屏蔽78	§ 12-9 微小误差准则252
§ 9-5 交流电桥的屏蔽与防护86	§ 12-10 误差的分配253
§ 9-6 电子仪器的屏蔽与防护90	§ 12-11 最佳测量方案的确定255
第十章 磁测量..... 99	§ 12-12 实验设计简介256
§ 10-1 概述99	附录 II259
§ 10-2 基本概念99	§ II-1 概率与统计的基本概念259
§ 10-3 空间磁场的产生和测量106	§ II-2 正态分布 大样本的误差 估计264
§ 10-4 直流磁性的测量122	§ II-3 t 分布 小样本的误差估计269
§ 10-5 交流磁性的测量132	§ II-4 均匀分布 系统不确定度的 综合271
第十一章 非电量的电测法146	§ II-5 最小二乘法概述275
§ 11-1 前言146	§ II-6 非等精度测量简介280

第七章 示波和记录测量法

在实际测量中,我们经常会遇到需要观察和记录动态被测量的情况。这一动态被测量的变化,可能是周期性的,或非周期性的;可能是快速的,或迟缓的。各种不同类型的示波器和记录仪,就是为了适应这样一些测量任务的需要而出现的。所谓示波和记录测量法,就是用这类仪器直接显示、记录和测量各种交变的或非周期变化的电信号的一种方法。用各种不同的变换器与示波器或记录仪相配用,还可以测量各种不同的动态非电量,例如温度、压力、振动、声、光、热和磁等,并能够把这些被测量的变化情况记录下来,以供观察和研究。

用示波器和记录仪,可以研究各种电的和非电设备以及某一系统的动态特性,还可以研究在各种复杂的联动装置中所产生的过渡过程,等等。因此,这类仪器的应用,随着现代化生产与科学研究的发展,必将越来越广泛。

用于示波和记录测量法中的仪器种类很多,我们在本章中只简要介绍其中常用的光线示波器、电子射线示波器和磁带记录仪三种。

§ 7-1 光线示波器的特点及分类

光线示波器是利用电磁作用原理,并以感光的方式实现测量和记录的一种仪器。它可以借光线来显示和记录被测量的波形。光线示波器是由振动子,光学系统,传动系统,磁系统以及电气系统等几个主要部分组成。

光线示波器之所以能得到广泛的应用,主要是因为它和一般具有机械传动的记录仪器相比较,具有以下几个特点:

1) 可以记录频率较高的输入信号

由于振动子的可动部分转动惯量很小,其自然振荡频率可以作到高达 15 千赫,这时的示波器可以记录 10 千赫以下的变化信号。

2) 灵敏度高

因为光线示波器的光学系统本身具有放大作用,所以可使测量机构的灵敏度大大提高。当输入信号频率为 10 赫时,其灵敏度可达 10^7 毫米/安/米以上。这样,在一般测量情况下,不需要另加放大器,直接与变换器相连,就可以清晰地记录被测信号的波形,从而简化了测量系统。

3) 同时记录被测量的数量多

光线示波器的振动子,一般可以做得很小(最小直径做成 3 毫米并不困难),因此,在一台示波器中可以使用十几个,甚至一百多个振动子。适当增加记录纸的宽度,就可以在一张记录纸上同时记录十几个甚至一百多个不同信号的变化过程,以便于对被试参数进行分析。这是其它记录仪器难以做到的。

4) 体积小、重量轻

由于光线示波器测量机构中的振动子尺寸小,因而它的体积和重量可以大大减小,便于

携带和进行野外、航空等方面的测量。

光线示波器按振动子磁系统的结构，可以分为单磁式和共磁式两种。

1) 单磁式光线示波器

单磁式光线示波器的振动子和磁系统组成一个单独的组件，即每一个振动子都具有一套磁系统，因此体积较大。SC1 型八线示波器就采用了这种单磁式结构的振动子。

2) 共磁式光线示波器

这种示波器的特点是几个振动子插在一组共用的磁系统中，即振动子中只有可动线圈部分，而磁系统为许多振动子所公用。因此，这种示波器的结构紧凑，体积较小。目前生产的示波器，大多数都属于这种类型。例如 SC16 型十六线示波器，SC60 型六十线示波器等都是这种共磁式示波器。

光线示波器按记录方式可分为如下三种：

1) 白炽光显定影记录

用这种方式记录的示波器，采用普通的白炽灯做光源，信号波形记录在胶卷或照像感光纸上，然后在暗室中进行显、定影处理。这种记录方式所用的光源功耗小，记录纸来源方便。SC1 型八线示波器就是采用35毫米宽的胶卷记录的。

2) 白炽光直接记录

这种示波器的记录纸，是一种特殊的感光纸。它在高效能的白炽灯照射下，形成潜影，然后在荧光灯或室内光下经过 15~30 秒的二次曝光后，即可显示出记录的波形。SC14 型十线（或十五线）示波器，就是采用这种记录方式的示波器。

3) 紫外线直接记录

这种示波器采用含有丰富紫外线的超高压水银灯作光源，用涂有特殊银盐乳剂的紫外线感光纸作记录纸。它的作用原理与白炽光直接记录相似，其二次曝光时间大约为40秒左右。这种类型示波器的型号很多，如 SC16 型，SC20 型和 SC60 型等示波器，都是利用这种记录方式。

§ 7-2 光线示波器的工作原理及振动子

一、光线示波器的工作原理

光线示波器的工作原理，可以用图 7-1 来说明。在图 7-1, *a* 中，由光源 1 发出的光线经过聚焦镜 2、光栏 3 和三棱镜 4，投射到振动子 5 的小镜上。从小镜反射回来的光线，有一部分经过透镜 6 聚焦到记录用的感光纸带的表面上。这个记录用的感光纸带，被卷在可以转动的鼓轮 7 上。从小镜反射出来的另一部分光线，经过透镜 8 投射到可以转动的多棱镜 9 的表面，并从这个表面反射到屏幕 10 上，以供观察被测量的波形。

如果有被研究的电流通过振动子，则振动子的可动部分，将在电流和磁场的作用下产生与被测电流值相应的摆动。当鼓轮 7 和多棱镜 9 不动时，摆动的光点通过光学系统放大后，将在屏幕 10 上显示出一条光带；而感光记录纸经过二次曝光后，也将显出一条与鼓轮 7 的轴线平行的直线来。如果鼓轮 7 和多棱镜 9 都以某一恒定速度旋转，我们就可以在屏幕上看到被研究电流的波形曲线，而在记录纸上，将记录下这条曲线，形成波形图，如图 7-1, *b* 所示。

上述依靠转动鼓轮 7 和多棱镜 9 来得到被研究曲线的过程,叫做展开过程。曲线纵座标的比例尺,决定于振动子的灵敏度;横座标的比例尺,是依靠时标装置来确定的。示波器的类型不同,采用的时标装置也不相同。下面介绍三种常见的时标装置。

1) 频闪灯

在示波器中安放的频闪灯,可以发出具有一定频率闪光的时标信号光线。这个光线经过一定的光学系统,最后被聚焦投射在记录纸上,并形成时标信号的潜影,经过二次曝光后,这个潜影被显示出来。

2) 刻口鼓轮

刻口鼓轮的时标装置,可以用图 7-2 中所示的简图来说明。由光源 1 产生的一部分光线,经过透镜 2 聚光后,投射在刻口鼓轮中的反射镜 3 上。刻口鼓轮 4 是由一台转速稳定的同步电机带动的圆筒,在该圆筒上按一定间隔刻有一条条缝隙。记时光线通过反射镜 3 的反射,穿过旋转着的鼓轮缝隙,投射在反射镜 5 上。经过镜 5、6,记时光线被投射于记录纸 7 上,并形成时间线的潜影。经过二次曝光后,该潜影将被显示出来。

3) 外时标

所谓外时标,就是采用外接的晶体管振荡器(有的示波器内部附有晶体管时标振荡器)和示波器中的一个振动子相连接,让这个振动子的可动部分随振荡器的频率而变化;这个振动子反射的光线,经过光学系统投射在记录纸上,从而形成时标信号的潜影,如图 7-1, b 中的下部曲线所示。

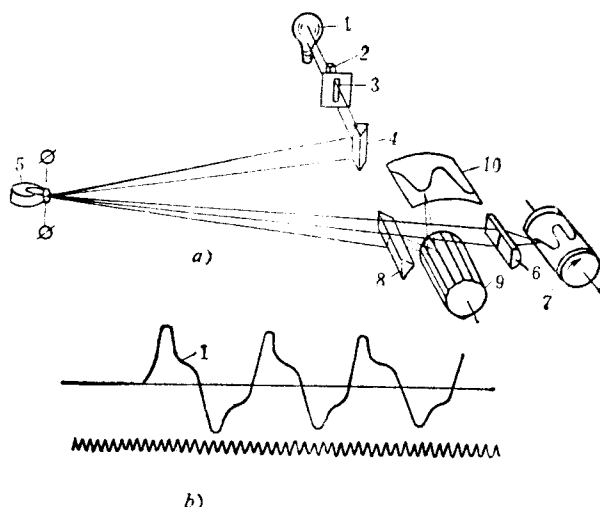


图7-1 光线示波器的工作原理

a) 光学系统 b) 波形图

1—光源 2—聚焦镜 3—光栏 4—三棱镜 5—振动子 6—聚焦透镜 7—鼓轮 8—聚焦透镜 9—多棱镜 10—屏幕

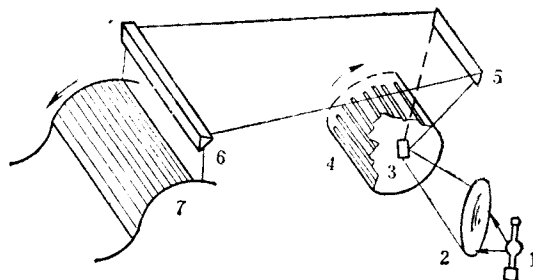


图7-2 刻口鼓轮时标装置简图

1—光源 2—聚光镜 3—反射镜 4—刻口鼓轮
5、6—反射镜 7—记录纸

二、振动子的结构和工作原理

在光线示波器中,振动子是一个将电信号转换为光信号的器件,因此,振动子的正确选择和合理使用,是应用示波器进行测量和记录时首先要考虑的问题。

单磁式结构的振动子,实际上相当于一个小型的磁电系检流计;而共磁式结构的振动子,由于没有单独的磁系统,所以相当于一个小型检流计的可动部分。

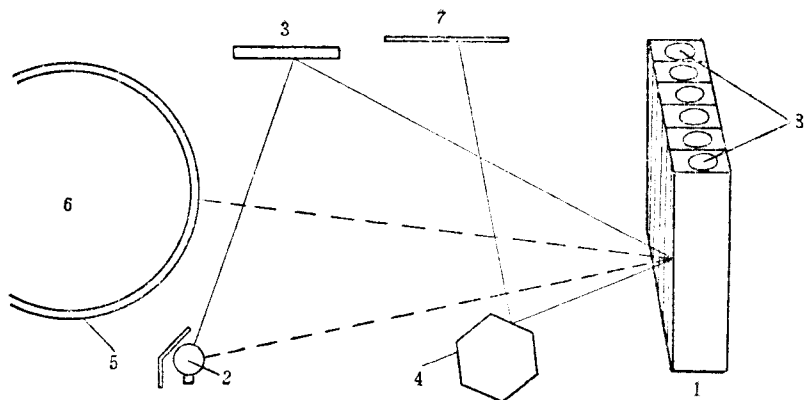


图7-3 共磁式光线示波器的工作原理

1—磁系统 2—光源 3—反射镜 4—多棱镜 5—记录纸 6—鼓轮
7—屏幕 8—振动子插孔

如在第二章中所指出的，限制磁电系测量机构应用到交流电路的是它的可动部分有较大的转动惯量，因此，它跟随不上动框中电流的变化而停止不动。换言之，与电流变化相比，其可动部分的自然振荡频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$ 太小了。但是，如果从结构上减小可动部分的转动惯量，就可以将磁电系测量机构用来测量交流，并可以制成自然振荡频率不仅可以和被测交流的频率相比拟，甚至还能比它高许多的磁电系机构。

光线示波器中的振动子，就属于这种磁电系结构。由于可动部分惯性很小，它能跟随上转动力矩的瞬时变化，并按其变化来偏转。

根据振动子可动部分的结构型式不同，振动子可以分为回线式、动圈式和动磁式三种。

1. 回线式振动子

回线式振动子的原理结构，如图7-4所示。图中，在回线2上粘贴着一个反射小镜1，它们在端子4和绝缘柱5之间被弹簧6拉紧，这就是振动子的可动部分。该可动部分置于磁极7的N、S极之间，其回线的宽度由三棱架3所决定。被测电流由端子4引入回线，并与磁场相互作用产生转动力矩，使可动部分开始转动。这个转动受到可动部分弹性反作用力矩的限制，其偏转的大小与通入的电流成比例。

回线式振动子可动部分的转动惯量很小，而反作用力矩系数较大，所以其自然振荡频率较高。但是，这种结构的载流体只有一圈，所以灵敏度很低。此外，由于每一个振动子都有一个独立的磁系统，所以体积较大。我国早期生产的SC1型八线示波器中使用的FC1型振动子，就是这种回线式的振动子。

2. 动圈式振动子

图7-5所示，为动圈式振动子的结构。动圈式振动子又称为笔

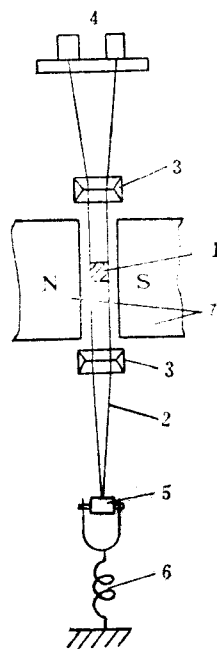


图7-4 回线式振动子结构示意图

1—小镜 2—回线 3—三棱固定架 4—端子 5—绝缘柱 6—弹簧 7—磁铁

式振动子。它克服了回线式振动子的缺点，可以做到灵敏度高和体积小。目前，这种振动子的直径可以做到3毫米，其自然振荡频率可以达到10千赫。这种振动子没有单独的磁系统，而是将几个或几十个振动子放在同一个磁系统中，因而可以大大缩小示波器的体积。目前，这种结构的振动子的使用最为广泛，我国生产的FC6、FC7和FC11系列的振动子，均属于这种结构。

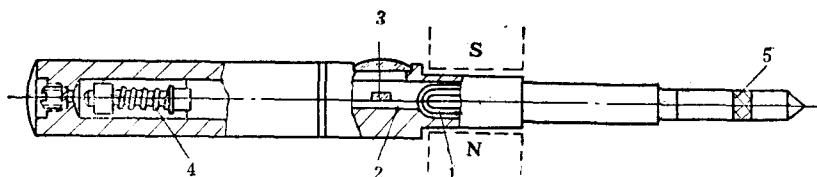


图7-5 动圈式振动子结构示意图

1—动圈 2—张丝 3—小镜 4—张紧装置 5—绝缘

动圈式振动子在工作时，其下半部插入磁系统内，可动线圈位于磁系统的极掌之间。在这个极掌的空气隙内，具有很高的磁感应强度（可达12000高斯）。当电流引入线圈时，由于电磁作用，线圈将带动整个可动部分绕张丝轴转动，从而使示波器能反映被测量的变化情况。

3. 动磁式振动子

动磁式振动子的载流线圈是固定的，而可动部分有一个小磁铁，因此，称它为动磁式振动子。振动子的载流线圈固定在一个铁芯上，组成电磁铁5，其原理结构如图7-6所示。

当被测电流流经电磁铁5的线圈1时，在空气隙中产生磁场。在这个磁场中放置一个尺寸很小的永久磁铁2，它和反射镜3分别粘贴在张丝4的两侧。永久磁铁、小镜和张丝组成了振动子的可动部分。由于空气隙中磁场强度的大小取决于流经线圈的被测电流的大小，而可动部分的偏转情况又取决于磁场强度，所以可动部分的偏转可以反映被测量。

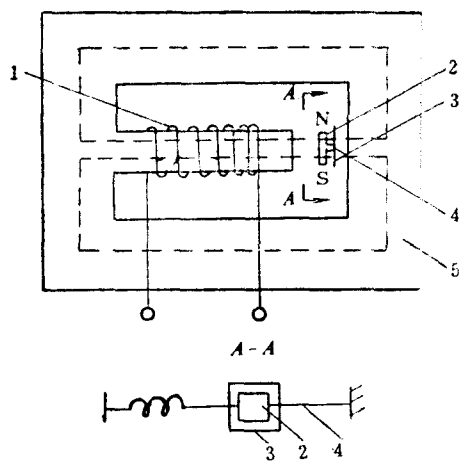


图7-6 动磁式振动子结构示意图

1—线圈 2—磁铁 3—小镜 4—张丝
5—电磁铁

动磁式振动子由于可动部分不通入电流，可以做的张丝短、可动部分轻，因此，它抗外界的震动性能较好。并且因为载流线圈是固定的，可以采用较粗的导线绕制，这样既提高了振动子的过载能力，同时又可以根据阻抗的需要来绕制线圈，因此，它的阻抗范围很宽，一般可以做到10欧至10千欧。就动磁式振动子本身的体积而言，它比动圈式振动子稍大，但比回线式小的多；而动磁式振动子又不需要较大的磁系统，所以使用动磁式振动子的光线示波器的重量，仍可做的很轻，适合野外和航空部门以及震动较大的场合中使用。

动磁式振动子是用被测电流来建立磁场的，与前面两种类型的振动子相比较，其功率消耗较大、灵敏度低、自然振荡频率低、抗外磁场的干扰性能较差，这些是它的不足之处。

我国生产的FC9系列振动子，就是属于这种类型。

三、振动子的动态特性

以动圈式振动子为例, 它的作用原理和磁电系检流计毫无区别, 只是因为它的转动惯量很小, 自然振荡频率很高, 使其不仅能测量直流, 而且对交流信号也能很好的响应。磁电系检流计用于直流的理论已在第二章中进行了讨论, 这里只研究它的动态特性。

根据磁电系仪表的作用原理, 当有电流 i 通过振动子的线圈时, 将产生转动力矩, 使可动部分偏转。其偏转角为

$$\alpha = \frac{\psi_0 i}{W} \quad (7-1)$$

实际上, 在光线示波器中考虑的不是电流与偏转角的关系, 而是反射光线在记录纸上偏移的距离 n 与电流的关系。如果振动子小镜表面的中心到记录纸的垂直距离为 d (光臂), 则仿照式 (2-28) 有

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n}{d} \quad (7-2)$$

当偏转角 α 很小时, 可以认为

$$\operatorname{tg} 2\alpha \approx 2\alpha$$

因而上式可改写为

$$2\alpha \approx \frac{n}{d}$$

或

$$n \approx 2d\alpha \quad (7-3)$$

考虑到有的振动子的小镜浸在阻尼液中, 光线通过液体时会受到折射, 使 n 值增大, 这时有

$$n \approx K 2d\alpha \quad (7-4)$$

式中 K 为阻尼液的折射率, 其值约为 1.5; 而对于空气阻尼, $K = 1$ 。

由单位电流所引起的光点在记录纸上的偏移量, 称作振动子的电流灵敏度。它以 S_i 表示时, 可由式 (7-1) 和 (7-4) 求出

$$S_i = \frac{n}{i} = K 2d \frac{\psi_0}{W} \quad (7-5)$$

由式 (7-5) 可知, 振动子的电流灵敏度除与常数 $\frac{\psi_0}{W}$ 有关外, 还与光臂长度 d 有关。

光臂长度是标志一台光线示波器灵敏度高低的一个很重要的参数。示波器的类型不同, 其光臂长度也不一致。例如, SC60 型示波器的光臂长度为 400 毫米, 而 SC10 型为 250 毫米。虽然这两种示波器均使用 FC7 系列的振动子, 但是同一个振动子放在两台不同的光线示波器中使用, 其灵敏度却不相同。由于这个原因, 为了便于比较, 通常都将 S_i 值换算成 $d = 1$ 米时的数值, 其单位为 毫米/毫安/米。

如果振动子的线圈通入交变电流, 则在电流和磁场的相互作用下产生转动力矩。因为电流是交变的, 所以转动力矩每半个周期将改变一次符号, 而在可动部分转动惯量不大的情况下, 该可动部分将随电流的变化而摆动。假定电流按正弦变化, 即

$$i = I_m \sin \omega t$$

则作用于可动部分的转动力矩为

$$M_t = \psi_0 I_m \sin \omega t \quad (7-6)$$

与普通磁电系测量机构所讨论过的相类似, 振动物可动部分运动的微分方程式可按 § 2-8 中曾经引出的式 (2-35) 列出, 只是现在应根据式 (7-6) 将式 (2-35) 中的 I 以 $i = I_m \sin \omega t$ 代入即可。由此可得

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d \alpha}{dt} + W \alpha = \psi_0 I_m \sin \omega t \quad (7-7)$$

众所周知, 这个微分方程式的全解是两个分量的和, 即为在 § 2-8 中已得到的无右部项的微分方程式 (2-38) 的解与满足方程式 (7-7) 的特解的和。因此, 方程式 (7-7) 的全解可以写成

$$\alpha = \gamma + \theta$$

式中 θ ——方程式 (7-7) 的特解。

我们将要求出的这个特解的形式为

$$\theta = \theta_m \sin(\omega t - \psi)$$

如果用复数法表示, 可以使求解简化, 令:

$$\dot{\theta} = \theta_m e^{j(\omega t - \psi)}$$

又因为

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = j\omega \theta_m e^{j(\omega t - \psi)} = j\omega \dot{\theta}$$

$$\frac{d^2 \dot{\theta}}{dt^2} = -\omega^2 \theta_m e^{j(\omega t - \psi)} = -\omega^2 \dot{\theta}$$

$$\dot{I} = I_m e^{j\omega t}$$

将这些关系代入式 (7-7), 则得:

$$-J\omega^2 \dot{\theta} + Pj\omega \dot{\theta} + W\dot{\theta} = \psi_0 \dot{I}$$

对 $\dot{\theta}$ 解此方程式, 可得

$$\dot{\theta} = \frac{\psi_0 \dot{I}}{(W - J\omega^2) + j\omega P}$$

由此求出:

$$\theta_m = \frac{\psi_0 I_m}{\sqrt{(W - J\omega^2)^2 + \omega^2 P^2}} \quad (7-8)$$

及

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{\omega P}{W - J\omega^2} \quad (7-9)$$

因此, 所求的特解为:

$$\theta = \frac{\psi_0 I_m}{\sqrt{(W - J\omega^2)^2 + \omega^2 P^2}} \sin\left(\omega t - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega P}{W - J\omega^2}\right) \quad (7-10)$$

将这个特解与无自由项[式 (2-42)]方程式 (7-7) 的解相加, 并考虑到

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$$

及

$$\beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}}$$

可以求出方程式 (7-7) 的全解为:

$$\alpha = \frac{\psi_0 I_m \sin \varphi}{W} \cdot \frac{e^{-\omega_0 \beta t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \left(\omega_0 t \sqrt{1-\beta^2} + \text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta}} \right) + \frac{\psi_0 I_m}{\sqrt{(W-J\omega^2)^2 + \omega^2 P^2}} \sin \left(\omega t - \text{tg}^{-1} \frac{\omega P}{W-J\omega^2} \right) \quad (7-11)$$

式中的 $\sin \varphi$ 反映了振动物接入交流电路的那一瞬间的情况。如果振动物是在电流经过零值时接入, 则 $\varphi = 0$, 方程式的第一项将变为零; 如果在电流达到最大值时接入, 则 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 。

由式 (7-11) 可以看出, 可动部分的偏转角 α 是由两部分组成的。第一部分是我们所熟悉的可动部分自由振荡方程式, 这个振荡将随着时间而衰减, 最后变为零。解的第二部分是频率为 ω 的非衰减强迫振荡的方程式, 这些振荡是由振动物线圈中的正弦电流来维持的。如果可动部分的转动惯量很大, 则振荡的幅值将非常小, 因此方程式 (7-11) 就只有第一部分起作用。与此相反, 如果可动部分的转动惯量很小, 使得固有频率 (即自然振荡频率) ω_0 可以与强迫频率 ω 相比拟, 或甚至比它大很多时, 则自由振荡衰减后式 (7-11) 的第一部分就将消失, 剩下的就只有第二项。

理论和实践都可以证明, 当固有频率 ω_0 足够大时, 方程式 (7-11) 的第一部分很快就衰减掉了, 因而可动部分只按解的第二部分运动。光线示波器的振动物, 就是利用上述理论的这一特点制成的。

我们把式 (7-11) 中的第二项略加变换, 并且引入

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$$

即强迫 (被测信号) 频率 ω 对固有频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$ 之比, 则有

$$\alpha = \frac{\psi_0 I_m}{W} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} \sin \left(\eta \omega_0 t - \text{tg}^{-1} \frac{2\beta\eta}{1-\eta^2} \right) \quad (7-12)$$

公式 (7-12) 指出了可动部分强迫振荡的幅值为

$$\alpha_m = \frac{\psi_0 I_m}{W} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} \quad (7-13)$$

我们要求光线示波器必须能够正确地反映被测量, 也就是说, 它应当无畸变地记录出被测量的变化曲线。为此, 就要求振动物的可动部分必须按与正弦变化的电流 i 相应的正弦规律而运动。即可动部分的偏转, 必须服从于下面的方程式:

$$\alpha = \alpha_m \sin \omega t = \alpha_m \sin \eta \omega_0 t \quad (7-14)$$

比较式 (7-12) 和 (7-14) 不难发现有两点不同。首先是振荡的振幅 $\frac{\psi_0 I_m}{W}$ 乘上了一个因子:

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} \quad (7-15)$$

其值不等于 1, 并且与频率比和阻尼因数有关, 它被称作畸变系数。其次是可动部分振荡的相位, 比公式 (7-14) 中的相位滞后了一个角度:

$$\varphi_A = \operatorname{tg}^{-1} \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2} \quad (7-16)$$

称作滞后角。

由于这些畸变，导致了用光线示波器记录被测信号的变化曲线时，产生振幅和相位的误差。这些误差与阻尼因数 β 及频率比 η 有关。

对于一个结构确定了的振动物，它的阻尼因数 β 和固有频率 ω_0 是一定的，因此，记录不同频率 ω 的被测量时将有不同的 η 值，即振幅误差和相位误差也将不同。

在电流幅值一定的情况下，振动物可动部分的振幅随频率变化的特性，称作振动物的幅频特性。由于畸变系数不等于1所产生的误差，叫作振幅误差。它可以表示为

$$\gamma_A = (A - 1) \times 100\% = \left[\frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} - 1 \right] \times 100\% \quad (7-17)$$

在图7-7中示出了在不同的阻尼因数情况下，振幅误差 γ_A 对频率比 η 的关系曲线。从图中可以看出，振动物的阻尼因数 β 对振幅误差的影响很大。当 $\beta = 0$ 时，随着频率比 η 值的增加，曲线急剧变化；这时如果 $\eta = \frac{\omega}{\omega_0} = 1$ ，即发生共振时，则误差为无限大。

当输入直流信号（即 $\eta = 0$ ）时，从式（7-17）可以看出振幅误差 $\gamma_A = 0$ ，这和图7-7中示出的完全符合。这时不论阻尼因数 β 为何值，都不产生误差。当 η 增加时，振幅误差值就将取决于阻尼因数。由图中曲线可以看出： $\beta < 0.7$ 时，曲线趋于上升； $\beta \geq 0.7$ 时，曲线趋于下降；而当 β 值接近0.7时，振幅误差在较宽的频率范围内是足够小的。因此，为了使振动物能够正确地工作，应力求频率比 η 尽可能小、阻尼因数 β 大致为0.65~0.7。

根据图7-7，可以正确选择振动物工作频率的范围。例如，在允许振幅误差为 $\pm 5\%$ 的条件下，阻尼因数 β 为0.7时，其工作频率可以使用到固有频率的60%。如果允许幅值误差可以再大一些，则显然工作频率的范围可以再扩大一些；相反，为得到较小的振幅误差，就必须降低频率比。因此，要根据测量时的具体要求，灵活、合理地选用振动物。

振动物可动部分偏转的滞后程度随被测信号频率不同而变化的特性称作相频特性。由于振动物可动部分具有一定的转动惯量，因此，在记录交变或变化信号时，输出与输入之间产生相位或时间的滞后是不可避免的。由式（7-16）可知，振动物的相频特性与频率比 η 和阻尼因数 β 有关。在图7-8中示出了在不同 β 值时滞后角 φ_A 与频率比 η 的关系曲线，该曲线是通过实验的方法作出的。

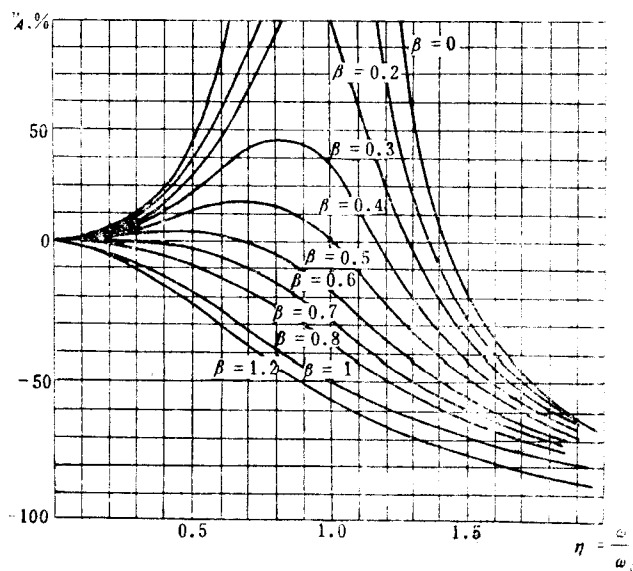


图7-7 振幅误差和频率比的关系曲线

由特性曲线可以看出相位差 φ_A (滞后角) 随频率比 η 和阻尼因数 β 的变化关系。当 $\beta = 0.7$ 时, 频率比 η 使用到 60%, 将会引起 50° 左右的相位误差。这种滞后现象是无法消除的。在单线测量 (被测参数只有一个) 时, 这种滞后影响可以不必考虑, 因为它只落后于被测信号一段时间, 但仍能正确地反映被测信号的变化规律。然而, 在多线测量时, 如果各线所使用的振动子的固有频率 ω_0 和阻尼因数 β 不一致时, 即使各线所测信号的频率 ω 相同, 也会产生不同的滞后现象, 这将给研究各线被测信号之间相互关系造成困难。因此, 在多线测量中, 应该注意选择合适的振动子。

当被测信号不是正弦量时, 则该非正弦量可以看成是由基波和高次谐波组成的。如果这时我们希望能准确地记录被测信号的真实曲线, 那就必须正确地记录所有的谐波, 或者能够记录所需要的谐波。

很明显, 为了满足这一要求, 振动

子可动部分的固有频率应当比被测信号的最高次谐波的频率, 还要高很多。

应当指出, 如果高次谐波的振幅与基波相比很小时, 则即使在记录它时有较大的误差, 也没有实际意义。

四、振动子的选择

通常, 一种类型的光线示波器只能使用相应系列的振动子, 所以在光线示波器的类型确定后, 其振动子的系列也就决定了。但是, 在同一种系列的振动子中, 又有不同的型号, 因此, 振动子型号的选择, 还是一个值得重视的问题。对于振动子的选择, 主要是以不失真地反映被测信号的变化过程为原则, 所以应在幅频特性、灵敏度和相频特性等三个方面进行考虑。

如果被测信号是一个正弦波, 而且还能估算出其频率时, 可以从振动子技术参数表中选择适当型号的振动子, 使被测信号的频率在振动子的工作频率范围之内。

但是, 实际上被测信号一般多数不是单纯的正弦波, 而是含有谐波分量的信号。对于这种被测信号, 振动子工作频率的选择, 应以其振幅为基波振幅的 2% 以上的高次谐波的频率为依据。对于周期性的矩形波, 其高次谐波的振幅是随谐波次数成反比地减小, 到第 51 次谐波时, 其振幅为基波的 2%。所以在选择振动子时, 必须考虑到 51 倍基波频率。而对于三角波和梯形波信号, 由于它们的高次谐波的振幅与谐波次数的平方成反比地减小, 其第七次谐波的振幅只有基波的 2%, 所以在选择振动子工作频率时, 只需考虑 7 倍于基波的频率。如果被测信号的变化过程没有很陡的前沿, 一般以 10 倍于基波频率作为选择振动子工作频率的依据。例如, 某一被测信号的基波频率为 100 赫, 则所选用的振动子其工作频率应大于 1 千赫。

由于振动子的灵敏度与其固有频率的平方成反比, 所以振动子灵敏度的选择和频率的选

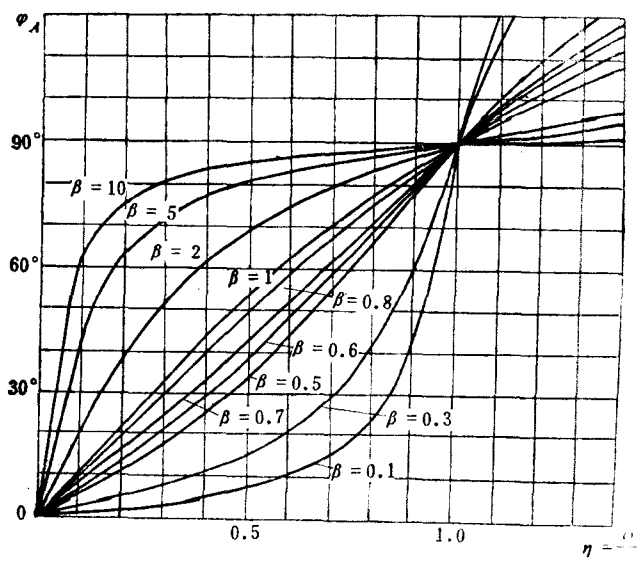


图7-8 滞后角与频率比的关系曲线

择是互相矛盾的。如选取固有频率较高，则灵敏度就太低；反之，如选择灵敏度较高，则其自然振荡频率又会过低。因此，在选择时应根据需要，尽量照顾到矛盾的双方。在一般情况下，应以选择自然振荡频率为主。因为被测信号的微小电流，可以通过调节前置放大器的增益得到放大，使之适应振动子的灵敏度的要求。

如前所述，在用一台示波器记录多路信号时，要考虑振动子的相频特性。相频特性主要受阻尼因数 β 和频率比 η 两个因素的影响。

就阻尼因数而言， β 值总是尽量应用在 0.6~0.7 的范围内，因此，由它引起的基于相频特性造成的误差可以忽略不计。

但是，由于频率比不同所引起的相位误差却是值得考虑的。例如，所测信号的频率为 20 赫，采用 SC18 型光线示波器记录；振动子为 FC6 系列，使用型号为 FC6-120 和 FC6-1200 两种振动子， β 值为 0.7；可以算出其频率比分别为 0.167 和 0.0167；从图 7-8 中查曲线，可得两者相位滞后分别为 14° 和 4° ，即两者相差约 10° 或小于 2 毫秒。

从上面的例子中可以看出，由滞后角造成的相位误差是有限的，更主要的是不使记录波形失真，因此，对于一般的多路信号的测量，其影响可不予考虑。但是对于测量相位（或时间）的相对关系为主要内容时，就必须重视相位误差。在这种测量中，最好使各路被测信号的频率和所采用的振动子的固有频率的比，尽量一致；如果各路被测信号的频率相同，则应选择固有频率相同的振动子。这样就可以避免记录多路信号时由滞后角引起的相位（或时间）上的差异。

五、几种国产振动子的技术参数

我国目前生产的振动子主要有五种系列，每种系列具有数种参数不同的型号。

1. FC1 系列振动子

与 SC1 型八线示波器配用的 FC1 系列振动子，属于回线式振动子的类型。它的固有频率虽然较高，但是其外形尺寸较大（ $\phi 46 \times 113$ 毫米），灵敏度较低。因为现在我国已不再生产 SC1 型八线示波器，所以这种系列的振动子只作为配件少量生产。

FC1 系列振动子的主要技术参数，参看表 7-1。

表 7-1 FC1 系列振动子主要技术参数

型 号	固 有 频 率 (赫兹)	灵 敏 度 (毫米/毫安)	内 阻 (欧姆)	最大允许电流 (毫安)	工作频率范围 (赫兹)	备 注
I	5000	0.25	1.0	100	0~2000	
II	10000	0.05	1.0	150	0~5000	
IV	3000	1.2	2.0	25	0~800	
V	2000	3.0	2.0	10	0~500	
VI	400	60	70	1	0~130	
VII	1200	15	4	2	0~250	
X	200	250	70	0.25	0~60	

2. FC6 系列振动子

动圈式的 FC6 系列振动子的灵敏度较高、频率范围较宽、结构坚固，其外形尺寸为 $\phi 6 \times 120$ 毫米，它可以与 SC16、SC18 和 SC19 等型号的光线示波器相配用。

FC6 系列振动子的主要技术参数，参看表 7-2。

表7-2 FC6系列振动子技术参数

型 号	固有频率 (赫兹)	工作频率 范 围 (赫兹)	直流电流灵敏度 ($\pm 2\%$) (毫安/毫安/米)	内 阻 (欧姆)	外 阻 ($\beta = 0.6 \sim 0.7$) (欧姆)	最大允许 电流幅值 (毫安)	保证线性度 最大偏转值 ($d = 1$ 米) (毫米)	平 衡 ($d = 1$ 米) (毫米/10°/米)
FC6-10	10	0~5	≥ 65000	120 ± 24	≥ 2000	0.004		
FC6-30	30	0~10	10000	120 ± 24	900 ± 300	0.05		
FC6-120	120	0~65	2800	55 ± 10	275 ± 125	0.2	$\pm 333 (\pm 3\%)$	≤ 50
FC6-120A	120	0~40	2800	28 ± 5		0.2	$\pm 333 (\pm 3\%)$	≤ 17
FC6-400	400	0~200	250	50 ± 10	27.5 ± 12.5	2	$\pm 333 (\pm 3\%)$	± 3.5
FC6-1200	1200	0~400	40	20 ± 4		5	$\pm 166 (\pm 3\%)$	± 5
FC6-2500	2500	0~800	8.1	16 ± 4		30	$\pm 166 (\pm 3\%)$	± 1.5
FC6-5000	5000	0~1700	1.4	12 ± 4		80	$\pm 100 (\pm 5\%)$	
FC6-10000	10000	0~4000	≥ 0.4	14 ± 4		100	$\pm 33 (\pm 5\%)$	

- 注：1.磁系统孔直径6毫米间隙，磁感应强度为 3800 ± 100 高斯；
 2.磁系统工作温度为 $45 \pm 2^\circ\text{C}$ ；
 3.在工作频率范围内，其灵敏度与直流灵敏度相差不大于 $\pm 5\%$ ；
 4.当电流极性改变时，灵敏度的变化不应超过 $\pm 3\%$ 。

3. FC7 系列振动子

FC7 系列振动子也属于动圈式结构，其外形尺寸比 FC6 型的还要小一些，为 $\phi 3.2 \times 90$ 毫米，适用于线数较多或小型的光线示波器，如与 SC60、SC10 型光线示波器相配用。

FC7 系列振动子的主要技术参数，参看表 7-3。

表7-3 FC7系列振动子技术参数

型 号	固 有 频 率 (赫兹)	工作频 率范围 (赫兹)	直流电流灵敏度 ($\pm 25\%$) (毫安/毫安/米)	内 阻 (欧姆)	外 阻 ($\beta = 0.6 \sim 0.7$) (欧姆)	最大允许 电流幅值 (毫安)	保证线性度的 最大偏转值 ($d = 400$ 毫米) (毫米)	平 衡 ($d = 400$ 毫米) (毫米/10°/米)
FC7-120	120	0~60	4000	150 ± 20	400 ± 100	0.06	$\pm 100 (\pm 2.5\%)$	
FC7-400	400	0~200	250	85 ± 15	25 ± 15	1.0	$\pm 100 (\pm 2.5\%)$	1.0
FC7-1200	1200	0~300	35	22 ± 4		5.0	$\pm 60 (\pm 3\%)$	0.5
FC7-2500	2500	0~700	5	16 ± 4		40	$\pm 60 (\pm 3\%)$	
FC7-5000	5000	0~1700	1	9 ± 3		100	$\pm 40 (\pm 5\%)$	
FC7-10000	10000	0~4000	0.22	9 ± 3		120	$\pm 10 (\pm 10\%)$	

- 注：1.磁系统孔直径2.2毫米间隙，磁感应强度为 12000 高斯 $\pm 3\%$ ；
 2.磁系统工作温度为 $45 \pm 2^\circ\text{C}$ ；
 3.在工作频率范围内，其灵敏度与直流灵敏度相差不大于 $\pm 5\%$ ；
 4.当电流极性改变时，灵敏度的变化不应超过 $\pm 3\%$ 。

4. FC11 系列振动子

结构属于动圈式的 FC11 系列振动子专门用在 SC14、SC20 和 SC30 等型号的光线示波器中。它的外形尺寸为 $\phi 6 \times 68$ 毫米，其主要技术参数，列于表 7-4 中。

5. FC9 系列振动子

FC9 系列振动子是动磁式结构，其外形尺寸为 $\phi 16 \times 24$ 毫米，可以与 SC9、SC17 等小型光线示波器相配用。它不需要体积较大的磁系统，抗震性能好，但这个系列的振动子工作频带较窄，最高只能用到 400 赫。它在外磁场较强的环境中使用时，需要采取磁屏蔽措施。

FC9 系列振动子的主要技术参数，参看表 7-5。

表7-4 FC11系列振动子技术参数

型 号	固 有 频 率 (赫兹)	工作频 率范围 (赫兹)	直流电流灵敏度 ($\pm 25\%$) (毫安/毫安/米)	内 阻 (欧姆)	外 阻 ($\beta = 0.6 \sim 0.7$) (欧姆)	最大允许 电流幅值 (毫安)	保证线性度的 最大偏转值 ($d = 400$ 毫米) (毫米)	平 衡 ($d = 10$ 毫米) (毫安/度) 40%毫米)
FC11-120	120	0~80						
FC11-400	400	0~200	250	60 ± 10	35 ± 15	1.0	$80 (\pm 2.5\%)$	0.5
FC11-1200	1200	0~450	52	22 ± 6		5.0	$60 (\pm 3\%)$	
FC11-2500	2500	0~850	8.5	16 ± 4		40	$60 (\pm 3\%)$	
FC11-5000	5000	0~2000	2.0	14 ± 4		80	$40 (\pm 5\%)$	
FC11-10000	10000	0~4000						

- 注：1. 磁系统磁感应强度为 $7000 \pm 3\%$ 高斯；
 2. 磁系统工作温度为 $45 \pm 1^\circ\text{C}$ ；
 3. 在工作频率范围内，其灵敏度与直流灵敏度相差不大于5%；
 4. 当电流极性改变时，灵敏度的变化不应超过 $\pm 3\%$ 。

表7-5 FC9系列振动子技术参数

型 号	固 有 频 率 (赫兹)	工作频率 范 围 (赫兹)	直流电流灵敏度 (毫安/毫安/250毫米)	内 阻 (欧姆)	外 阻 (欧姆)	最大允许电流幅值 (毫安)	保证线性度的 最大偏转值 ($d = 250$ 毫米) (毫米)
FC9-100 I D	100	0~40	170	10 ± 2		2.0	$\pm 100 (\pm 5\%)$
FC9-200 II D	200	0~80	60	10 ± 2		5.5	$\pm 100 (\pm 5\%)$
FC9-200 II G	200	0~80	600	1500 ± 200		0.5	$\pm 100 (\pm 3\%)$
FC9-500 V D	500	0~200	12	10 ± 2		25.0	$\pm 100 (\pm 3\%)$
FC9-500 V G	500	0~200	120	1500 ± 200		2.5	$\pm 100 (\pm 3\%)$
FC9-1000 X G	1000	0~400	22	1500 ± 200		15	$\pm 100 (\pm 3\%)$

§ 7-3 电子射线示波器的工作原理

电子射线示波器是一种快速的 X-Y 描绘器。根据需要,它可以描绘出输入信号对另一个信号,或者输入信号对时间的关系曲线。在示波管的荧光屏上,有一个电子射线形成的光点随输入电压而移动,它起类似记录笔的作用。在一般情况下, Y 轴(垂直轴)输入端接入被测电压信号,使光点依电压的瞬时值作上下移动; X 轴(水平轴)输入端接入由内部产生的随时间作线性变化的锯齿波电压,使光点均匀地从左到右移动,称为扫描。于是在荧光屏上,光线将描绘出输入电压随时间变化的曲线。如果被测信号以足够快的速度重复出现,并且和锯齿波电压间保持固定的时间关系,则显示的曲线可以保持稳定。

电子射线示波器就是这样一种可以将随时间变化的电压描绘成可见图象的测量仪器。示波器除了可以直接测量电压外,还可以利用变换器把其它许多种物理量,变换成电压进行测量。电子射线示波器,目前已成为一种应用极为广泛的通用仪器。它和光线示波器比较,其突出特点是应用的频率范围极宽(可达几百兆赫),输入阻抗高和几乎不消耗被测信号的功率。如果把两个信号分别加入 X 轴和 Y 轴,就会在荧光屏上显示出表征这两个电参量之间关系的 X、Y 轴座标图形。基于这个原理,就制成了一些被普遍应用的专用示波器,如磁性材料的 B-H 测试仪,以及电子管和晶体管特性曲线图示仪,等等。