

中等专业学校試用教科书

# 电工仪表設計

哈尔滨电工学院中专部电工仪表教研室編

只限学校内部使用



中国工业出版社

中等专业学校試用教科书



# 电工仪表設計

哈爾濱電工學院中專部電工儀表教研室編

中國工業出版社

本书是按中等专业学校「电工仪表设计」课程的教学大纲编写而成。

本书共分为十二章，前四章讨论了电工仪表的一般理论基础和公用元件的结构与计算，并且阐明了电工仪表的一般设计问题。第五章到第十二章讲授了各种型式仪表的结构和计算。其中包括：磁电式、附变换器磁电式、电动式、电磁式、感应式、静电式和流比表的诸型式仪表。而对张丝和悬丝以及流比表一章作了较为详细的介绍。

本书可供中等专业学校「电工仪表制造」专业的学生作教科书，也可作为仪表制造工厂和有关电磁计量的工程技术人员参考书。

## 电 工 仪 表 设 计

哈尔滨电工学院中专部电工仪表教研室编

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张 17  $\frac{1}{4}$  · 字数 400,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数 0001—2,537 · 定价 (9-4) 1.60 元

统一书号: 15165 · 378 (-机-54)

## 前 言

本书是根据 1959 年修訂的「电工仪表設計」課程的教学大綱編写的。本书教学时数为 100—120 小时,各校在使用时可根据具体情况加以增刪。

「电工仪表設計」是电工仪表制造专业的主要专业课程之一,它是在「电工仪表和測量」課程的基础上进行讲授的。

本书在論述电工仪表的一般理論問題时,把重点放在标度尺特性、准确度和灵敏度的关系以及阻尼時間的計算方面;在公用元件的結構和計算部分,較多地介紹了光指示系統、張絲結構和永久磁铁三方面的內容;在讲述各种仪表的結構、計算和設計时,相应地介紹了它們的新型結構和发展趋向。

本书是在哈尔滨电工学院中专部过去几年中使用的「电工仪表設計」讲义的基础上整理出来的。在整理过程中,根据各方面的意見,在流比表一章中增加了一些內容,这是因为流比表的应用日益广泛的緣故。

編写本书时参考了有关的苏联和其他国家的書籍和期刊,适当地反映了我国仪表厂的經驗,并且吸取了兄弟学校的經驗和对本課程提供的寶貴意見。在取材和編写方法方面,編者虽力图結合我国具体情况和照顾学生水平,但由于能力所限和時間短促,对几年前写成的讲义还来不及作更大的变动,因此一定会有某些缺点和錯誤,希讀者不吝指正。

編 者

1961 年 4 月

# 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 前言 .....                     | 3  |
| 緒論 .....                     | 6  |
| 第一章 电工仪表的一般理論 .....          | 9  |
| 1—1 测量机构和测量电路 .....          | 9  |
| 1—2 稳定偏轉 .....               | 9  |
| 1—3 定位力矩 .....               | 10 |
| 1—4 标度尺特性 .....              | 11 |
| 1—5 摩擦力矩 .....               | 13 |
| 1—6 品质系数 .....               | 15 |
| 1—7 仪表对颠簸和振动的稳定性 .....       | 16 |
| 1—8 活动部分的运动 .....            | 18 |
| 1—9 阻尼時間 .....               | 20 |
| 第二章 电工仪表的誤差 .....            | 24 |
| 2—1 基本誤差和附加誤差 .....          | 24 |
| 2—2 摩擦誤差 .....               | 24 |
| 2—3 傾側誤差 .....               | 25 |
| 2—4 不完全平衡誤差 .....            | 26 |
| 2—5 标度尺的刻度和放置不准<br>的誤差 ..... | 28 |
| 2—6 調整不准确的誤差 .....           | 28 |
| 2—7 游絲残余变形的誤差 .....          | 29 |
| 2—8 讀数誤差 .....               | 29 |
| 2—9 外界因素影响概論 .....           | 31 |
| 2—10 溫度的影响 .....             | 31 |
| 2—11 頻率和波形的影响 .....          | 33 |
| 2—12 外界磁場的影响 .....           | 33 |
| 2—13 外界电場的影响 .....           | 35 |
| 第三章 电工仪表公用元件的結<br>构和計算 ..... | 37 |
| 3—1 外壳 .....                 | 37 |
| 3—2 指示器和标度尺 .....            | 42 |
| 3—3 游絲 .....                 | 47 |
| 3—4 悬絲和張絲 .....              | 49 |
| 3—5 矩形張絲的計算 .....            | 54 |
| 3—6 平衡錘的計算 .....             | 55 |
| 3—7 阻尼器 .....                | 56 |
| 3—8 永久磁铁 .....               | 62 |
| 3—9 分流器 .....                | 70 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 3—10 附加电阻 .....                   | 74  |
| 3—11 轉換裝置 .....                   | 80  |
| 第四章 电工仪表設計的一般問題 .....             | 82  |
| 4—1 技术任务的編制 .....                 | 82  |
| 4—2 仪表基本尺寸的决定 .....               | 84  |
| 4—3 最大品质系数 .....                  | 85  |
| 4—4 在若干具体情况下获得最<br>大品质系数的条件 ..... | 83  |
| 4—5 計算测量电路的基本前提 .....             | 90  |
| 第五章 磁电式仪表 .....                   | 92  |
| 5—1 测量机构的結構 .....                 | 92  |
| 5—2 磁电式机构的計算 .....                | 96  |
| 5—3 伏特表和安培表的簡單电路 .....            | 99  |
| 5—4 溫度补偿方法 .....                  | 102 |
| 5—5 串联溫度补偿电路的計算 .....             | 106 |
| 5—6 串并联溫度补偿电路的<br>計算 .....        | 109 |
| 5—7 多量限仪表的测量电路 .....              | 113 |
| 5—8 磁电式欧姆表 .....                  | 116 |
| 5—9 磁电式檢流計 .....                  | 123 |
| 5—10 磁电式振动子 .....                 | 127 |
| 5—11 磁电式諧振檢流計 .....               | 129 |
| 第六章 附变换器的磁电式仪表 .....              | 132 |
| A. 热电式仪表 .....                    | 132 |
| 6—1 热变换器的裝置和結構 .....              | 132 |
| 6—2 热电式仪表的测量机构和<br>电路 .....       | 135 |
| 6—3 热电式仪表的誤差 .....                | 137 |
| B. 整流式仪表 .....                    | 138 |
| 6—4 整流器的特性和結構 .....               | 138 |
| 6—5 整流式仪表的电路 .....                | 140 |
| 6—6 整流式仪表的誤差 .....                | 144 |
| 6—7 振动式整流器及其应用 .....              | 145 |
| 第七章 电动式仪表 .....                   | 147 |
| 7—1 基本特性和运用范围 .....               | 147 |
| 7—2 测量机构的結構 .....                 | 147 |
| 7—3 轉动力矩 .....                    | 151 |
| 7—4 标度尺特性 .....                   | 152 |

|                                |     |                                  |     |
|--------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 7—5 电动式瓦特表的内部联接<br>电路和误差.....  | 154 | 11—2 联接线路和保护方法.....              | 217 |
| 7—6 三相瓦特表.....                 | 159 | 11—3 转动力矩和标度尺特性.....             | 218 |
| 7—7 瓦特表的计算.....                | 161 | <b>第十二章 流比表</b> .....            | 222 |
| 7—8 电动式伏特表的内部联接<br>电路和误差.....  | 162 | A. 普通特性和理论.....                  | 222 |
| 7—9 伏特表的计算.....                | 164 | 12—1 作用原理和应用范围.....              | 222 |
| 7—10 电动式安培表内部联接电<br>路和误差.....  | 166 | 12—2 理论.....                     | 224 |
| 7—11 安培表的计算.....               | 168 | 12—3 量限.....                     | 227 |
| <b>第八章 铁磁电动式仪表</b> .....       | 171 | 12—4 变乘数曲线的计算.....               | 229 |
| 8—1 测量机构的结构.....               | 171 | 12—5 误差.....                     | 230 |
| 8—2 转动力矩和标度尺特性.....            | 172 | B. 磁电式流比表 .....                  | 231 |
| 8—3 铁磁电动式仪表的内部联<br>接线路和误差..... | 174 | 12—6 结构.....                     | 231 |
| 8—4 铁磁电动式仪表的计算.....            | 177 | 12—7 计算.....                     | 233 |
| <b>第九章 电磁式仪表</b> .....         | 179 | 12—8 磁电式欧姆表.....                 | 234 |
| 9—1 测量机构的结构.....               | 179 | 12—9 磁电式赫茨表.....                 | 235 |
| 9—2 转动力矩和标度尺特性.....            | 183 | 12—10 磁电式相位表.....                | 237 |
| 9—3 内部联接线路.....                | 185 | C. 电动式流比表 .....                  | 239 |
| 9—4 电磁式仪表的误差.....              | 186 | 12—11 装置原理和基本型式.....             | 239 |
| 9—5 电磁式仪表的计算.....              | 187 | 12—12 结构.....                    | 239 |
| <b>第十章 感应式仪表</b> .....         | 191 | 12—13 电动式流比表的理论和计算.....          | 240 |
| A. 单磁通感应式仪表.....               | 191 | 12—14 具有变化空气隙的铁磁电<br>动式流比表.....  | 242 |
| 10—1 概论.....                   | 191 | 12—15 具有两个共轴动圈的铁<br>磁电动式流比表..... | 242 |
| 10—2 测量机构的原理和结构.....           | 191 | 12—16 铁磁电动式补偿流比表.....            | 243 |
| 10—3 转动力矩和标度尺特性.....           | 192 | 12—17 П. Б. 烏薩金式流比表 .....        | 244 |
| 10—4 单磁通式仪表的误差.....            | 195 | 12—18 电动式万用相位表.....              | 246 |
| B. 多磁通感应式仪表.....               | 196 | 12—19 电动式复用相位表—赫茨<br>表.....      | 247 |
| 10—5 感应式瓦时计主要零件的<br>结构.....    | 196 | 12—20 电动式赫茨表.....                | 248 |
| 10—6 感应式瓦时计的力矩.....            | 199 | 12—21 电动式法拉表.....                | 249 |
| 10—7 瓦时计的负载曲线和误差.....          | 203 | 12—22 铁磁电动式三相相位表.....            | 251 |
| C. 瓦时计测量机构的计算 .....            | 207 | 12—23 铁磁电动式赫茨表.....              | 252 |
| 10—8 驱动元件的计算.....              | 207 | 12—24 铁磁电动式法拉表.....              | 254 |
| 10—9 转动力矩和反作用力矩的<br>计算.....    | 212 | D. 电磁式流比表 .....                  | 256 |
| <b>第十一章 静电式仪表</b> .....        | 215 | 12—25 装置原理和结构.....               | 256 |
| 11—1 测量机构的基本特性和结构.....         | 215 | 12—26 理论.....                    | 257 |
|                                |     | 12—27 计算.....                    | 260 |
|                                |     | 附录 .....                         | 262 |
|                                |     | 参考文献 .....                       | 276 |

## 緒 論

人們在認識世界和改造世界的历史过程中，已积累了极为丰富的知識，揭露了无数事物的本质，这都是通过各种测量的方法而得到的。这一切成就告訴我們：离开了对它們在数量关系方面的研究，是不可能的。[任何质量都表现为一定的数量，沒有数量也就沒有质量<sup>①</sup>。]要知道数量，就需要测量。

测量，特别是电工测量，已广泛使用在国民經济当中，这是由于目前电能已成为現代工业，現代农业和現代交通运输业的主要动力来源的緣故。在电能的生产、輸送、分配、控制和应用的过程中，离不了各种电工仪表。

要进行科学研究，是离不开测量仪表的，其中电工仪表占有比較重要的地位。无数事实证明，在研究过程中所用的测量仪表愈是完善和精确，則对事物的現象和規律也就研究得愈是深刻、彻底和准确。

另一方面，科学上的新成就也反过来促进了测量仪表的发展。例如，由于研究原子結構方面的成就，使仪表制造者有可能利用核磁諧振的現象构成准确度高、装置简单和使用方便的测磁仪表。

利用电工仪表进行测量具有准确度高、反应灵敏、动作迅速和测量方便等一系列优点，因此利用电的方法来测量温度、压力、湿度、速度和加速度等非电量的测量技术和相应的测量仪表的研究工作，近来也发展得非常迅速，从而形成了一門新兴的测量技术分支。

电工仪表建立在电工技术的基础上，因此，电工技术发展史也就是电工测量技术和电工仪表的发展史。根据可靠的考古材料，磁針、人造磁铁、地磁偏角、磁屏蔽等，都是在我国最早发现和应用的。早在12世紀初年，我国已将磁針应用于航海方面。磁針，实质上就是一个最早的测量方向的仪表，它利用的原理和現代以磁和磁相互作用的仪表相类似。只是由于我国在历史上长期处于落后的封建制度下，生产力得不到发展，因而使我国科学事业长期处于停滞状态。

在电工仪表的发展上，罗蒙諾索夫(М. В. Ломоносов)及其同事黎赫曼(Г. В. Рихман)等最先提出現代直讀仪表的理論，他們在1751年首先提出了带标度尺的驗电器，即已利用了二个力矩相互作用的原理，其中一个力矩为被测量的函数，另一个为仪表活动部分位置的函数。

解放前，由于国民党的反动統治，我国的工业是极端落后的，全国几乎沒有一个完整的仪表工厂。解放后，在党的正确领导下，我国的国民經济获得了迅速的恢复和发展，对各种型式电工仪表的需要量日益增大，这就为电工仪表制造工业的发展創造了空前有利的条件。在总路綫的光輝照耀下，从1958年大跃进以来根据党的指示，采用了一整套两条腿走路的方針，并实行了因陋就簡、因地制宜的办法，仪表厂在全国各地如雨后春笋般地建

① 毛澤东选集第四卷1443頁。

立起来了。近三年来，经过了轰轰烈烈的群众性的技术革命和技术革新运动，我国电工仪表制造工业的面貌已大为改观，产品数量有了巨大的增长，产品质量有了显著的提高。尽管如此，由于我国过去的工业基础很差，而各部门对电工仪表提出的要求很多，因此，电工仪表在产品数量、品种、规格和质量方面，还是不能满足各方面的需要。

一般说来，凡是用来测量电量和磁量的仪表均可称为电工仪表，但本课程所研究的以电气机械类仪表为限。本课程是研究这类仪表的理论、结构、计算和设计等问题的一门功课。通过这门功课的学习，不但要掌握电工仪表共同性的理论问题，研究它们产生误差的一般规律，学会组成仪表所用的公用元件的计算方法，还要分别对磁电式、电磁式、电动式、铁磁电动式、感应式、静电式等仪表以及流比表、整流式仪表和热电式仪表的结构、标度尺特性、联接线路、误差计算和设计等特殊问题，进行详细的研究。

为了便于今后的学习，这里大致介绍一下电工仪表的发展趋向和目前达到的水平。

1. 磁电式仪表：这种仪表要用永久磁铁，常用的永久磁铁是含镍的。镍是一种贵金属，因此，节约用镍量具有很大的意义。为此，从结构方面，目前采用内磁机构或动磁机构来代替外磁机构。采用内磁机构，可使磁铁重量减轻十倍左右，因为它的磁能利用率可达80%左右。这种内磁式仪表尺寸小，防外磁影响的能力也较强。动磁式仪表不用载流线圈，因而结构牢靠。其次，在开关板仪表中，采用铁淦氧磁铁和铁铝炭磁铁代替含镍磁铁也有很大的意义。

因为磁系统的稳定性可达0.02%，因而就可以把磁电式仪表的准确度提高至0.05级。

磁电式机构很容易制成全偏转角为 $240^\circ$ 以至 $360^\circ$ 的广角度仪表，这样可以显著地减小仪表的外形尺寸。

2. 电磁式仪表：这种仪表结构简单，价格低廉，结构牢靠，因此，如何扩大其应用范围是考虑问题的出发点。现在，它正向着提高准确度和灵敏度以及扩大频率范围的方向发展。由于采用了高导磁低矫顽力的坡莫合金，在准确度方面已有不少国家达到0.2级，个别工厂已达0.1级。在频率范围方面，1.0级仪表可用于1000赫茨以下的电路，2.5级仪表可用于8500赫茨以下的电路。在灵敏度方面，有的国家已制成1毫安的仪表。

3. 电动式仪表：这种仪表的结构较复杂，成本较高，但由于它在交流测量方面可达最高的准确度，因此它在精密仪表的行列中占有重要位置。目前，它正向高准确度、高灵敏度和宽频率范围的方向发展。在频率范围方面，伏特表达1000~1500赫茨，瓦特表达5000赫茨，毫安表达10000~15000赫茨。在准确度方面，目前已达0.1级，正向0.05级发展。

在电动式仪表中，采用特殊的光学系统后，可把0.2级的仪表标度尺长缩短至150毫米，因而外形尺寸减小不少。

4. 铁磁电动式仪表：这种机构在准确度、灵敏度和频率范围方面的潜力尚未充分发挥，若采用恒导磁率低损耗的软磁粉末材料，可提高其灵敏度和准确度，扩大其频率应用范围，有的工厂采用了一种特殊的内励磁机构，已生产出1.0级的携带型瓦特表。

5. 静电式仪表：近年来朝着提高准确度等级和扩大量限的方向发展。目前，有的国家已把静电式仪表的准确度提高至0.5级和0.2级。用它构成伏特表可以不用附加电阻，因



此，扩大静电式机构的应用范围对节约电阻材料来说，有很大的意义。又因为静电式机构几乎不消耗功率，它在低功率高电阻电路的测量方面，具有宽广的前途。

6. 瓦时计：瓦时计的产量很大，应用面也广，延长使用寿命、提高过载能力和减少维护检修工作是它的发展方向。采用磁力悬挂式结构在消除磨损延长寿命方面，效果很好。

总之，为了多快好省地发展电工仪表制造工业，以适应整个国民经济的需要，应该把电工仪表设计得：1) 材料消耗少；2) 外形尺寸小；3) 重量轻；4) 功率消耗小；5) 通用性强；6) 寿命长；7) 价格低廉；8) 精致美观；9) 使用方便。

# 第一章 电工仪表的一般理論

**1-1. 测量机构和测量电路** 电工仪表的主要目的在于把我們不能凭感觉辨别的电气量变为我們容易識別的机械位移。为了正确地反映电气量的大小和种类，我們利用現有的电工学方面的定律，采用各种测量机构来接受电气量，通过机构内产生的电磁力把被测量轉換成为机械量，这机械量对直讀电工仪表来說，一般即为指針的偏轉。有的被測量（如不大的电流）能够直接作用于测量机构，但在很多場合下，被測量不能直接作用在测量机构上，这就需要通过测量电路来把被測量轉換成测量机构能够接受的量，这量称为中間量。为方便起见，被測量用  $X$  表示，中間量用  $Y$  表示。

在有些情况下，虽然被測量能够直接作用在测量机构上，但为了其他目的，如补偿誤差，也常常采用测量电路，如磁电式毫伏表采用串、并联綫路来补偿温度誤差。

通过测量电路，中間量  $Y$  和被測量  $X$  之間存在一定的函数关系，即：

$$Y = f_Y(X). \quad (1-1)$$

而中間量  $Y$  作用在测量机构上，使指針偏轉  $\alpha$  角，其間也有一定的函数关系：

$$\alpha = f_\alpha(Y). \quad (1-2)$$

由以上二式可見，被測量  $X$  和偏轉角  $\alpha$  之間的关系为：

$$\alpha = f_\alpha[f_Y(X)] = F(X). \quad (1-3)$$

在一定的工作条件下，一个被測量  $X$  只应该有一个相应的偏轉角  $\alpha$ ，也就是說 (1-3) 式應該是单值函数，为此，(1-1) 和 (1-2) 二式也必須是单值函数。

对仪表的要求，除了一个被測量仅引起一个偏轉外，还应具有一定的准确度。把仪表設計得使誤差不超过一定的容許值，这是設計者的重要任务。根据我国电工专业标准，电 (D) 31-59 規定，电工仪表的准确度等級为：0.1；0.2；0.5；1.0；1.5；2.5；4.0。表示仪表准确度等級的数字相当于測量范围内容許誤差的百分数。当然，在我国电力工业遍地开花的客观形势下，有些場合采用誤差大于 4.0 級的仪表也不是不可以的，但应该保证仪表工作的可靠性。

**1-2. 稳定偏轉** 测量机构受电气量  $Y$  的作用而产生轉动力矩，使活动部分向着示数增大的方向偏轉。

表 1-1 所示为电工仪表的几种轉动力矩公式。由表可見，有的力矩和中間量的一次方有关，有的和二次方有关，除此之外，大部分的力矩和偏轉角有关。因此，轉动力矩可以写成如下的普遍形式：

$$D = Y^n f_D(\alpha). \quad (1-4)$$

图 1-1 所示为各式电工仪表的轉动力矩曲綫。

假如在电工仪表中只有轉动力矩，則活动部分就会不管被測量多大而偏轉到尽头。为了使每一个被測量只引起一定的偏轉，必須要有一种力矩来平衡被測量所产生的轉动力

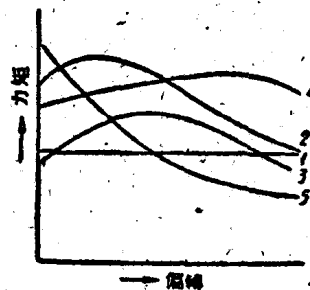


图 1-1 电工仪表的轉动力矩曲綫

1-磁电式，感应式和铁磁电动式仪表；2-电磁式；3-电动式伏特表；4-电动式瓦特表；5-静电式伏特表。

表 1-1

| 序号 | 机 构   | 中 間 量          | 轉 动 力 矩 $D$                                                                                         | 附 注                                                                                     |
|----|-------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 磁 电 式 | 电 流 $I$        | $\psi I = Yk_1$                                                                                     | $\psi$ ——与动圈相碰的总磁通                                                                      |
| 2  | 电 磁 式 | 电 流 $I$        | $\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{2} Y^2 f_2(\alpha)$                                  | $L$ ——线圈的电感                                                                             |
| 3  | 电 动 式 | 电流乘积 $I_1 I_2$ | $I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = Y f_3(\alpha)$                                                   | $M_{12}$ ——相互不串联的固定线圈和活动线圈间的互感                                                          |
| 4  | 电 动 式 | 电 流 $I$        | $I^2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = Y^2 f_4(\alpha)$                                                     | 固定线圈和活动线圈是相互串联的                                                                         |
| 5  | 感 应 式 | 电流乘积 $I_1 I_2$ | $I_1 I_{20} \frac{dM_{1,20}}{d\alpha} + I_2 I_{10} \frac{dM_{2,10}}{d\alpha} = k_2 I_1 I_2 = Y k_5$ | $I_{10}, I_{20}$ ——由电流 $I_1, I_2$ 所产生的磁通在圆盘中所感应的电流<br>$M_{1,20}, M_{2,10}$ ——相应电流回路间的互感 |
| 6  | 静 电 式 | 电 压 $U$        | $\frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha} = \frac{1}{2} Y^2 f_6(\alpha)$                                  | $C$ ——电极间的电容                                                                            |

矩，以控制活动部分的偏轉。为此，这个力矩的方向要和轉动力矩的方向相反，还要和偏轉角有关。这种力矩称反作用力矩，它通常由游絲、悬絲或張絲产生，有时也用重力或磁力来产生。

因此，反作用力矩可以写成：

$$M = f_M(\alpha). \quad (1-5)$$

对于游絲、悬絲和張絲来说，反作用力矩和扭轉角成正比：

$$M = W\alpha;$$

式中， $W$  为扭轉单位角度所产生的力矩，称反作用力矩系数；对游絲、悬絲和張絲来说，它等于：

$$\frac{dM}{d\alpha} = W. \quad (1-6)$$

由上式可见，它与偏轉角无关。

在轉动力矩作用之下，活动部分开始轉动，扭紧（或拉松）游絲，直至游絲产生的反作用力矩和轉动力矩相等为止。这时，活动部分得到一偏轉角  $\alpha_c$ ，这叫做稳定偏轉。因此，活动部分的平衡位置或稳定偏轉决定于作用在活动部分上的总力矩为零时的位置，即：

$$D - M = 0$$

或

$$Y^n f_D(\alpha_c) = f_M(\alpha_c). \quad (1-7)$$

由上式中解出  $\alpha_c$ ，就可以求得(1-2)式所表示的  $\alpha_c$  和  $Y$  的关系。

平衡位置也可用图解法来决定。如图 1-2 所示，把轉动力矩和反作用力矩都放在第一象限内，可是，它们的符号是相反的。二力矩曲线的交点  $A$  决定了稳定偏轉角  $\alpha_c$ ，因为在这一点，轉动力矩和反作用力矩大小相等，方向相反。

**1-3. 定位力矩** 活动部分在平衡位置  $\alpha_c$  的情况下，假如强使它离开一个角度  $\Delta\alpha$  (图 1-2)，则有一力矩差  $D - M$  作用在活动部分上，它力图使活动部分回到原来的位置。

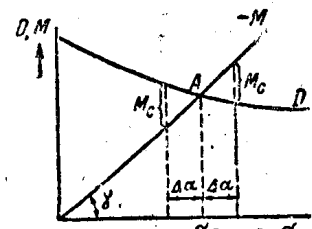


图 1-2 稳定偏轉的图解法

这个力矩差叫做定位力矩，用字母  $M_c$  表示。由图 1—2 可见，当活动部分离开平衡位置向左偏转时，转动力矩将大于反作用力矩，而定位力矩力求使活动部分回到右边。反之，当它离平衡位置向右偏转时，转动力矩将小于反作用力矩，而活动部分力求回到左边，即又回到稳定偏转方面。由此可见，定位力矩应该总是处于反对偏转角  $\alpha_c$  改变的方向，否则，活动部分的平衡位置  $\alpha_c$  是不稳定的。

在力矩差  $D-M$  作用之下，即在定位力矩  $M_c$  作用之下，活动部分稳定地停在平衡位置。为了克服像轴承内的那种摩擦，在单位角度内应该有一定的定位力矩。同一个  $\Delta\alpha$  角内所产生的定位力矩愈大，活动部分所稳定的平衡位置愈准确。

活动部分离开平衡位置单位角度所引起的定位力矩叫做定位力矩系数，用字母  $M'_c$  表示，可以写成：

$$M'_c = \frac{dM_c}{d\alpha} = \frac{dD}{d\alpha} - \frac{dM}{d\alpha} \quad (1-8)$$

假如已知转动力矩和反作用力矩的解析式，则只要对力矩差  $D-M$  取导函数便可得到定位力矩系数。在有的情况下，假如  $D = \text{常数}$ （如在磁电式仪表中），而反作用力矩由游丝产生，则得：

$$\frac{dD}{d\alpha} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{dM}{d\alpha} = W$$

以及

$$M'_c = -W,$$

即磁电式仪表的定位力矩系数在数值上等于反作用力矩系数，并且在仪表整个标度尺内是常数。

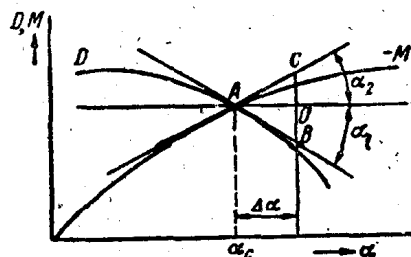


图 1—3 定位力矩系数的图解法

假如转动力矩和反作用力矩的曲线如图 1—3 所示，则可用图解法求得  $M'_c$  的大小。在力矩曲线的交点对力矩曲线引二切线  $AB$  和  $AC$ ，从  $A$  点引一直线  $AO$  与横轴平行，再在  $O$  点作一垂直线，与二切线交于  $B$  点和  $C$  点，则：

$$\frac{dD}{d\alpha} = -\operatorname{tg} \alpha_1 = -\frac{OB}{AO}, \quad \frac{dM}{d\alpha} = \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{OC}{AO},$$

而

$$\begin{aligned} M'_c &= \frac{dD}{d\alpha} - \frac{dM}{d\alpha} = -\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 = -\frac{OB}{AO} - \frac{OC}{AO} \\ &= -\frac{OB+OC}{AO} = -\frac{BC}{\Delta\alpha}, \end{aligned} \quad (1-9)$$

这就是说，定位力矩系数  $M'_c$  在数值上等于两切线之间的距离与  $\Delta\alpha$  之比，它总是负值。计算时， $BC$  应该用力矩单位来表示，如用达因厘米或克厘米，而角度则用弧度或度来表示。

**1—4. 标度尺特性** 假如  $\alpha = F(X)$  的函数是已知的，则用解析的方法很容易求得标度尺特性，如当被测量  $X$  为额定值  $X_n$  时，指针达全偏转角  $\alpha_n$ ，这时  $\alpha_n = F(X_n)$ ，与上式

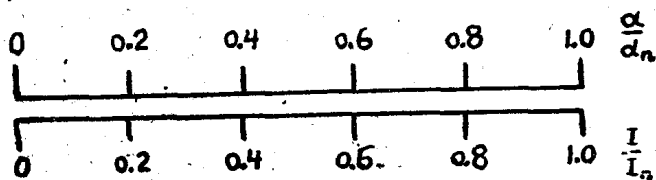


图 1—4 根据解析式求标度尺特性的方法

相比，可得到与任意被测量  $X$  相应的偏转角为：

$$\alpha = \frac{F(X)}{F(X_n)} \alpha_n. \quad (1-10)$$

如对磁电式仪表来说， $\alpha = kI$ ， $\alpha_n = kI_n$ ，

則  $\alpha = \frac{I}{I_n} \alpha_n$ , 其标度尺特性如图 1-4 所示。

在很多情况下, 常常不知道偏轉角  $\alpha$  和被測量  $X$  的具体解析式子, 但是, 利用試驗的方法, 轉动力矩曲綫  $D = Y^n f(\alpha)$  却总是可以求得的。例如, 我們可以求得各种电流下的电磁式仪表的轉动力矩曲綫, 如图 1-5 所示。假如电磁式毫安表的額定电流为 50 毫安, 全偏轉角为  $90^\circ$ , 指針从  $0^\circ$  开始偏轉, 則我們可以在  $90^\circ$  处作一垂直綫, 和  $y = y_n$  的轉动力矩曲綫相交, 得交点  $A$ , 連接  $OA$ , 即得反作用力矩曲綫, 从它

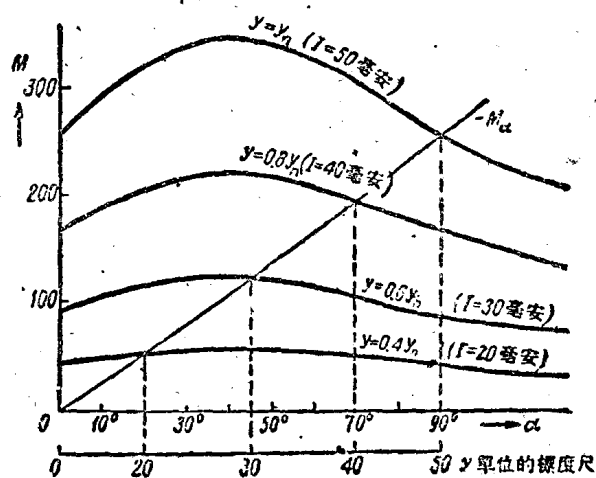


图 1-5 标度尺特性的图解法

和轉动力矩曲綫的相交处, 就可以得到标度尺特性了。假如所求的为伏特表的标度尺特性, 則由于伏特表的电压和电流是正比关系, 所以标度尺特性沒有变, 不过把毫安数改为相应的伏特数罢了, 如伏特表的量限为 150 伏, 則 40 毫安的标度与 120 伏的标度相应, 其他类推。

假如測量电路为非綫性, 即  $Y$  和  $X$  的关系不是直綫关系, 如图 1-6 所示。图中, 中間量  $Y$  的标度尺特性是根据轉动力矩曲綫求得的, 我們要在这标度尺上根据  $X$  和  $Y$  的关系曲綫求得  $X$  的标度尺特性。若  $X$  标度尺中間的数字标度为額定值的 20, 40, 60 和 80%, 則我們可以从  $X$  量額定值的 20, 40, 60, 80 和 100% 处分別引水平綫与曲綫相交, 再投到橫軸上, 就找到相应为 46, 67, 81, 92 和 100% 的  $Y$  量, 再在  $Y$  标度尺上找到这些量, 就得到  $X$  的标度尺特性了。

从上面的討論可以看出, 获得轉动力矩曲綫对于构成标度尺特性具有极为重要的意义。为方便起见, 我們有时只用試驗方法求出一条轉动力矩曲綫, 其他的曲綫可用計标的方法求得。例如: 已知  $Y = \eta Y_n$  的力矩曲綫如图 1-7 所示, 試求  $Y = \beta Y_n$  的力矩曲綫。

由图 1-7 可見, 当  $Y = \eta Y_n$  时, 在位置  $\alpha_K$  处的力矩是已知的, 为:

$$D_{\eta Y_n, \alpha_K} = (\eta Y_n)^n f(\alpha_K), \quad (1-11)$$

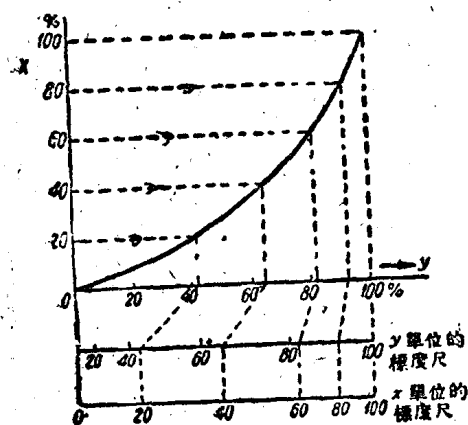


图 1-6 根据  $Y$  标度尺求  $X$  标度尺

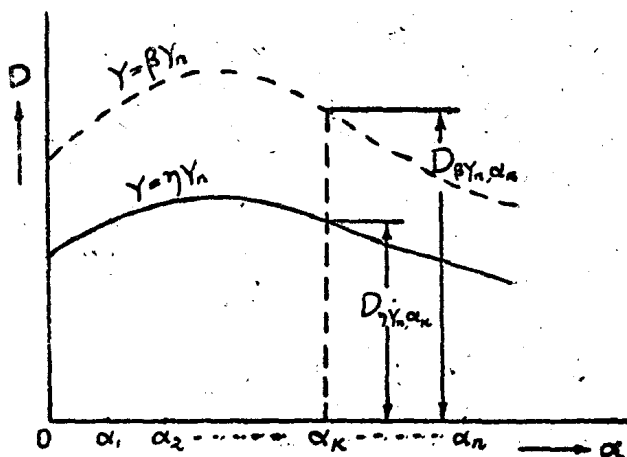


图 1-7 根据一条力矩曲綫求其他力矩曲綫

当  $Y = \beta Y_n$  时, 在位置  $\alpha_K$  处的力矩为未知值, 可以写成:

$$D_{\beta Y_n, \alpha_K} = (\beta Y_n)^n f(\alpha_K). \quad (1-12)$$

(1-12) 和 (1-11) 两式相除, 得:

$$\frac{D_{\beta Y_n, \alpha_K}}{D_{\eta Y_n, \alpha_K}} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^n,$$

即

$$D_{\beta Y_n, \alpha_K} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^n D_{\eta Y_n, \alpha_K}. \quad (1-13)$$

由上式可见, 我们可以根据一条已知的转动力矩曲线求得其他的转动力矩曲线。例如, 若已知  $Y = 0.6 Y_n$  的转动力矩曲线, 仪表的测量机构是电磁式, 求  $Y = 0.8 Y_n$  的转动力矩曲线。根据给定条件,  $\eta = 0.6$ ,  $n = 2$ , 而  $\beta = 0.8$ , 代入 (1-13) 式, 得:

$$D_{0.8 Y_n, \alpha_K} = \left(\frac{0.8}{0.6}\right)^2 D_{0.6 Y_n, \alpha_K},$$

由上式可见, 只要在  $\alpha$  各个不同位置的已知力矩上乘  $\left(\frac{0.8}{0.6}\right)^2$ , 即得所求曲线, 其他依此类推。

**1-5. 摩擦力矩** 前面我们是在假定没有摩擦的条件下来讨论稳定偏转的, 这对采用悬丝或张丝的仪表来说是合适的。可是, 在很多情况下, 电工仪表的活动部分是利用轴尖和轴承来支持的。活动部分运动时, 轴尖和轴承相接触的部分便产生摩擦力矩, 它总是处于反对活动部分运动的那个方向。

由于摩擦力矩的影响, 当被测量增大时, 活动部分要比没有摩擦时早一点到达平衡位置, 也即指针没有达到由转动力矩和反作用力矩相等时所决定的理想平衡位置, 而停留在离这个位置少许偏左的地方, 如图 1-8 所示的 B 点。当被测量减小时, 所发生的情况刚好相反, 指针停留在理想平衡位置的右边, 即图中的 C 点。

由此可见, 在有摩擦力矩  $M_f$  的情况下, 活动部分不是停在由  $D - M = 0$  所决定的  $\alpha_c$  点, 而停在由下式

$$D - M - M_f = 0 \quad (1-14)$$

所决定的  $\alpha_c - \alpha_f$  点 (即 B 点) 或  $\alpha_c + \alpha_f$  点 (即 C 点)。因为  $D - M$  即定位力矩  $M_c$ , 所以当考虑摩擦力矩时, 平衡条件为:

$$M_c = M_f. \quad (1-15)$$

由图可见, 摩擦力矩愈大, 活动部分不能到达理想平衡位置所差的  $\alpha_f$  角也愈大。  $\alpha_f$  就是由于摩擦而引起的绝对摩擦误差。

当  $\alpha_f$  很小时, 可以近似地写成:

$$M_c = M'_c \alpha_f \text{ 或 } M'_c \alpha_f = M_f,$$

故由于摩擦而引起的绝对误差为:

$$\alpha_f = \frac{M_f}{M'_c}. \quad (1-16)$$

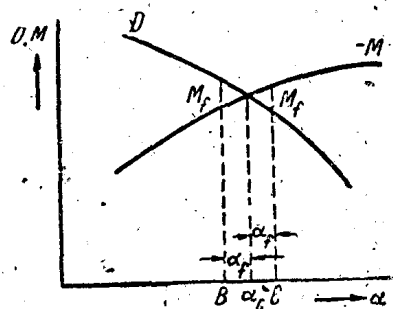


图 1-8 摩擦对平衡位置的影响

(1-16) 式告訴我們，儀表的定位力矩系数愈大以及摩擦力矩愈小，則摩擦誤差愈小。

摩擦力矩決定於軸尖和軸承的材料以及它們的尺寸和工作表面的狀況。摩擦力矩是一個很不一定的量，它決定於振動等一系列偶然因素，並和支承內的污垢及濕度等情況有關。我們通常對摩擦引起的最大可能誤差特別注意，常取在一定的結構中、在一定的條件下所觀察到的若干數值中最大的一個。因此，假如  $B$  點和  $C$  點（圖 1-8）是在摩擦力矩最大時的平衡位置，則它們之間的距離（即  $\alpha_f$  角的二倍）可由增大和減小至被測量時指針所處的邊界來確定。活動部分的實際平衡位置可以在  $B$  和  $C$  之間的任何地方。 $B$  和  $C$  之間的距離或二倍摩擦誤差常稱為變差。

由 (1-16) 式可見，在一定的摩擦力矩的情況下，定位力矩系数愈大，也即在一定的全偏轉角下儀表所具有的全偏轉力矩愈大，摩擦誤差愈小。可是，我們知道，在一定結構的情況下，儀表獲得全偏轉所需的力矩愈大，則全偏轉電流也愈大，也就是說儀表的靈敏度愈低。由此可以得出這樣的結論：對採用軸尖和軸承支持的儀表來說，在一定的結構下，準確度和靈敏度是互相矛盾的。

在垂直軸的情況下，摩擦力矩按下式計算：

$$M_f = 0.41 f \frac{G^{1.5}}{\sqrt{\sigma_{\max}}} \quad (1-17)$$

式中  $f$ ——摩擦系数，決定於軸尖和軸承工作表面的光潔度。對鋼質軸尖和瑪瑙軸承來說，可取 0.15—0.2（變化範圍為 0.1—0.3）。對鋼質軸尖和剛玉軸承來說，可取 0.13—0.14；

$G$ ——活動部分的重量（克）；

$\sigma_{\max}$ ——軸尖和軸承接觸處的最大應力（克/厘米<sup>2</sup>）。軸尖和軸承的最大容許應力為：

|                   |                                           |
|-------------------|-------------------------------------------|
| 已淬火的鋼             | $5 \times 10^7$ 克/厘米 <sup>2</sup>         |
| 鈷鎢合金（鈷 75%，鎢 25%） | $4 \times 10^7$ 克/厘米 <sup>2</sup>         |
| 瑪瑙                | $5 \times 10^7$ 克/厘米 <sup>2</sup>         |
| 計算電度表的支座時，容許應力取   | $1.3-1.4 \times 10^7$ 克/厘米 <sup>2</sup> 。 |

最大應力  $\sigma_{\max}$  可按下式計算：

$$\sigma_{\max} = \sqrt[3]{0.235 G \frac{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)^2}} \quad (1-18)$$

式中  $R_1, R_2$ ——相應為軸尖和軸承的曲率半徑（厘米）；

$E_1, E_2$ ——相應為軸尖和軸承的彈性系数（克/厘米<sup>2</sup>）。軸尖和軸承材料的彈性系数為：

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| V10A 鋼     | $2.08 \times 10^9$ 克/厘米 <sup>2</sup> |
| 鈷鎢合金       | $1.3 \times 10^9$ 克/厘米 <sup>2</sup>  |
| 瑪瑙         | $1 \times 10^9$ 克/厘米 <sup>2</sup>    |
| 剛玉，藍寶石和紅寶石 | $4.5 \times 10^9$ 克/厘米 <sup>2</sup>  |

按 (1-17) 式計算的摩擦力矩以克厘米計。

在水平軸的情況下，摩擦力矩可按下式計算：

$$M_f = \left[ R_1 \sin \alpha_1 \sin\left(\frac{\varphi}{K}\right) + f \cos\left(\frac{\varphi}{K}\right) \right] G \quad (1-19)$$

式中  $G$ ——活动部分的重量 (克);

$\varphi$ ——指针的偏转角;

$K = \frac{R_2}{R_1}$ , 一般取 3—6;

$$\sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta}{R_2 - R_1}\right)^2}$$

而  $\delta$  为轴隙之半;

$f$ ——滚动摩擦系数, 等于 0.0005—0.001 厘米;

按上式计算的摩擦力矩单位为克厘米。

在利用 (1-18) 式计算最大应力时, 要用  $N_1 = \frac{G_1}{\sin \alpha_1}$  代替 (1-18) 式中的  $G$ , 而  $G_1$  为活动部分的重量分配到一个轴承上的部分。

在正确地选择轴尖和轴承的情况下, 摩擦力矩大致是和活动部分重量的 1.5 次方成正比的。因此, 设计仪表时, 在满足规定的其他要求的条件下, 应该尽可能减小活动部分的重量。

在一般的情况下, 水平轴的摩擦力矩要比垂直轴的摩擦力矩大很多。因此, 精密仪表的转轴总是处于垂直位置的。不论是水平轴或垂直轴, 轴尖和轴承都应该采用  $E_1$  和  $E_2$  很大的材料, 并且仔细抛光它们的表面。

轴尖通常用 3 级精度的直径为 0.25; 0.5 或 0.75 毫米的优质炭素工具钢 Y8A, Y10A, Y11A, Y12A 制成, 由于其外表呈银亮光, 又叫银亮钢。在需要特别耐蚀、经磨和经得起颠簸及振动的情况下, 常常采用直径为 0.5 毫米的钴钨合金丝。轴尖顶部的球半径通常为 0.015—0.055 毫米。

轴承通常用直径为 1.5—2.5 毫米的宝石制成, 高度为 1—2.5 毫米, 凹部的球半径为 0.06—0.3 毫米。宝石材料为天然的或人造的玛瑙、红宝石、和刚玉, 在小型仪表中, 也有用特种玻璃、铜钨合金、镍钨合金和青铜的。

摩擦力矩在很大的程度上决定于轴尖和轴承的加工质量和表面状态, 假如在仪表的轴尖上给油, 可以减小摩擦力矩并减轻轴尖的磨损。

**1-6. 品质系数** 轴承内的摩擦力矩所引起的摩擦误差是活动部分带轴尖的电工仪表的非常重要的特性。摩擦误差是仪表的最基本的误差之一, 在一定程度上, 它反映仪表的质量, 更准确些说, 反映仪表的基本零件轴尖和轴承的质量。

仪表的质量通常用引用摩擦误差的倒数来表明; 这个倒数叫做品质系数。

根据 (1-16) 式, 品质系数等于:

$$A_T = \frac{\alpha_n}{\alpha_f} = \frac{M'_c \alpha_n}{M_f} \quad (1-20)$$

式中  $\alpha_n$ ——全偏转角。

$M_f$  是一个很不一定量, 它决定于支承的制造工艺和表面质量。考虑到在一般情况下,  $M_f$  和  $G^{1.5}$  成正比, 为了使计算简化, 通常采用实用品质系数:

$$A_n = \frac{10M_n}{G^{1.5}}$$



上式中  $M_n$  为全偏轉力矩，以克厘米表示， $G$  用克表示。引用系数 10 是为了要获得接近 1 的数字。

只有在轉动力矩不随偏轉角变化的情况下， $(M'_c \alpha_n)$  才和全偏轉力矩  $(W \alpha_n)$  相等。在很多情况下，各个标度处的定位力矩系数是不同的，也就是說，实际的品质系数随标度而异。因此，还是采用下式計算品质系数为好：

$$A_n = \frac{10M'_c \alpha_n}{G^{1.5}}$$

計算时，应取它的最小值。

在品质系数的公式中，並沒有把标志軸尖和軸承表面加工质量的摩擦系数考虑进去，因此，我們不能单凭品质系数来評判仪表的质量。我們可以这样設想一下，在两个技术水平不同的工厂中，生产同一种结构的仪表，在活动部分的重量相同和全偏轉力矩一样的情况下，按公式計算，它們的品质系数是完全相同的。可是，实际上，軸尖和軸承的加工质量較高的工厂所出产的仪表，其质量显然要好得多。由此可見，品质系数絕不能用来比較各个工艺水平不同的工厂所出仪表的质量。

試驗证明，在支承质量很好的情况下，可以制造出品质系数比較小的仪表来，而且其性能并不逊于支承质量不好的高品质系数仪表。反之，假如支承做得不好，就是高品质系数也是不行的。

但是，在軸尖和軸承有一定质量的情况下，在生产技术条件一定的某一工厂范围内，品质系数可以反映仪表结构的优劣。从这个观点出发，品质系数的提高无疑是进步的适当标志。

設計仪表时，要尽可能获得較高的品质系数，这一方面靠减小活动部分的重量和合理选择其組成元件，另一方面在不影响仪表其他性能（如功率消耗不超过容許值）的条件下靠增大定位力矩系数。

在仪表的制造工艺特别是支承的加工质量提高的情况下，可以适当减小品质系数，这对提高仪表的灵敏度和减小功率消耗是有好处的。

表 1—2 中列举了各种垂直軸仪表的品质系数的某些值。

表 1—2

| 仪 表 名 称                      | 实 用 品 质 系 数 |
|------------------------------|-------------|
| 标准尺寸 (150—200 毫米) 的开关板型磁电式仪表 | 1—1.5       |
| 在顛簸条件下工作的开关板型磁电式仪表           | 1.5—2.0     |
| 0.2—0.5 級携带型磁电式仪表            | 0.3—0.7     |
| 标准尺寸的开关板型电磁式仪表               | 0.8—1.2     |
| 携带型电动式仪表                     | 0.4—1.0     |
| 自动記录仪表                       | 5—15        |

因为水平軸的摩擦力矩比垂直軸的大很多，所以在設計水平軸仪表时，应力求提高品质系数的值。

**1—7. 仪表对顛簸和振动的稳定性** 仪表常常在震动的情况下工作。震动有顛簸和振动两种形式：顛簸是由于受到突然的冲击而引起的沒有規律的震动；振动是有規律的震动。