

非电量的电测法

上册

苏联 A. M. 屠利庆著

水利电力出版社

第二版序言

这本著作是由1951年出版的同名的著作改写而成的，在改写的过程中，作者考虑了来自各方面的意见和建議，同时尽量將祖国最近二年来在仪器制造方面，特别是运用自动电桥和补偿器方面的成就补充了进去。

作者感謝評閱者 P. P. 哈尔琴柯，他提出了許多宝贵的建議和意見，此外，Я. М. 費延別尔格、Е. А. 阿噶馮諾夫、Л. А. 奧斯脫洛夫斯基、И. И. 伊万諾娃、П. Д. 普来斯涅可夫、М. М. 費傑索夫和И. Н. 賽李凡尔斯多夫对于本書各章节提出了有益的意見，在此一併致謝。

П. В. 諾維茨基花了巨大的劳动校閱了這本書，Е. В. 麦尔狄諾娃和Л. М. 雅勃罗尼克整理了原稿，亦表示謝意。

書中缺点在所难免，作者竭誠欢迎讀者提出意見，通信处为：列宁格勒市涅夫斯基大街28号国立动力出版社。

第一版序言

非电量的电測法問題在國內外的許多著作中討論得很多，但這些著作有些只談到非电量的电測法的一部分問題，有些則是按生产部門的特征系統地写成，这样，它所敘述的測量非电量的器具，有用电的儀器，亦有用非电的儀器，這一類的著作有：B. П. 普烈奧勃拉任斯基的“热工測量及儀器”、С. И. 歇普金“化学生产中的控制測量和調節儀器”、H. H. 托彼尔凡尔赫的“冶金厂中的測量和調節儀器”。大家知道，這些著作是敘述性的，适合于需要測量器具运用知識的人們。

近年来，由于广泛应用生产上的自动檢查和自动控制，非常迫切的需要出一本非电量的电測法的書，其中應該充分地敘述儀器的物理化学原理及其理論和計算。

这样的書对运用儀器的工程师有用，对制造和設計測量非电量儀器的工程师亦有用。

此外，这样的書对高等技术学校中相应專業的大学生也是十分需要的。

为了編写一本能满足上述要求的書，Ф. Е. 焦姆尼柯夫和 P. P. 哈尔琴柯的“非电量的电測法”作了首次的嘗試，但是這本書不能完全适合电工測量方面課程的教学大綱。

本書是作为學習“非电量的电測法”課程的大学生的参考教材。

本書的第一部分是作为課堂講課的基本教材，第二部分和第三部分是作为課程設計和實驗的材料。

在材料敘述上作者采用了有理方程式。

作者希望本書对于在非电量的电測部門工作的工厂及科学研究机关的工程技术人员有所帮助。

作者

目 录

緒言	1
----------	---

第一部分 將非电量轉变为电量的变换器

第一篇 参量变换器

第一章 变阻器式变换器	5
§ 1-1. 理論基础	5
§ 1-2. 变阻器式变换器的構造	7
第二章 接触变换器	8
§ 2-1. 接触变换器的作用原理和主要型式	8
§ 2-2. 对测量电路的要求	11
第三章 接触电阻变换器	13
§ 3-1. 炭堆变换器	13
§ 3-2. 炭絲变换器	15
第四章 电阻絲变换器	16
§ 4-1. 理論基础。采用的材料	16
§ 4-2. 电阻絲变换器的粘固	18
§ 4-3. 测量电路的灵敏度和对它的要求	19
第五章 热电阻	21
§ 5-1. 概 說	21
§ 5-2. 热电阻在测量气流速度的仪器中的应用	22
§ 5-3. 热电阻在根据导热原理的气体分析器里的应用	32
§ 5-4. 热电阻在真空测量仪器里的应用	38
§ 5-5. 热电阻在溫度测量仪器里的应用	39
§ 5-6. 热电阻在动态中的工作(热电阻的热慣性)	45
第六章 电解質电阻变换器	48
§ 6-1. 理論基础	48
§ 6-2. 电解質变换器溫度誤差的补偿	52
第七章 極化变换器	58
§ 7-1. 基本原理	58

§ 7-2. 应用極譜法的要点	63
第八章 压磁变换器	65
§ 8-1. 理論基础	65
§ 8-2. 变换器的磁路計算	68
§ 8-3. 压磁变换器的灵敏度	73
§ 8-4. 压磁变换器的誤差	75
第九章 电感变换器	77
§ 9-1. 理論基础。电感变换器的型式	77
§ 9-2. 变换器的磁路計算	81
§ 9-3. 綫圈的磁势和匝数, 以及电源频率的选择	85
§ 9-4. 电感变换器的誤差和它的工作状态的选择	89
第十章 电容变换器	92
§ 10-1. 理論基础	92
§ 10-2. 电容变换器应用的特点。特性的直綫性、溫度的 影响和对于测量电路的要求	94
§ 10-3. 具有电容变换器的仪器的测量电路	98
第十一章 光电变换器	102
§ 11-1. 应用在测量技术上的光电元件的主要特性	102
§ 11-2. 光电变换器的型式	108
§ 11-3. 光电元件接入测量綫路的方式	109
§ 11-4. 差接光电变换器	111
第十二章 游离变换器	113
§ 12-1. 理論基础	113
§ 12-2. 应用游离变换器的实例	117
§ 12-3. 对于变换器和测量电路的要求	121
第二篇 發電变换器	
第十三章 感应变换器	123
§ 13-1. 理論基础。变换器的类型	123
§ 13-2. 溫度誤差	126
第十四章 热电变换器	127
§ 14-1. 理論基础	127
§ 14-2. 热电偶所用的材料	130
§ 14-3. 热电偶自由端的溫度变化所引起的誤差	131
§ 14-4. 导綫、热电偶和测量器溫度变化所引起的誤差	135

第十五章 压电变换器	136
§ 15-1. 理論基础	136
§ 15-2. 对于测量电路的要求	141
第十六章 氢离子浓度测定仪器的电位变换器 (pH 計的变换器)	144
§ 16-1. 理論基础。氢的指标和边界电位	144
§ 16-2. 金属-金属离子系统的电极电位	147
§ 16-3. 氧化-还原系统的电极电位	150
§ 16-4. 玻璃电极的电位	154
§ 16-5. 对于测量电路的要求	157
第十七章 逆变换器	157
§ 17-1. 工作原理	157
§ 17-2. 逆变换器应用的实例	158

第二部分 基本测量电路

第三篇 测量电路的基础

第十八章 测量仪器各部分参数的配合	161
§ 18-1. 概說	161
§ 18-2. 不平衡和平衡测量电路的一般特性	162
§ 18-3. 测量电路各組成部分(环节)参数的配合。仪器的 方框略圖	165
§ 18-4. 四端網絡的品质指标和匹配度对于变换效率的影响	170
§ 18-5. 最高变换效率的条件	173
§ 18-6. 方框略圖方法的应用实例	175
第十九章 应用于非电量测量仪器的测量器的选择	178
§ 19-1. 直流和交流测量器(及平衡指示器)	178
§ 19-2. 电子管放大器与各种测量器的配合使用	181
§ 19-3. 具有高輸入阻抗的直流放大器	185
§ 19-4. 从功率的观点选择测量器	195
第二十章 頻率变换电路	196
§ 20-1. 概說	196
§ 20-2. 具有不可控二極管的电路	199
§ 20-3. 应用电磁式(振动式)变换器的电路	201
§ 20-4. 具有可控二極管的电路	204

§ 20-5. 控制电压的获得方法	209
第二十一章 积分电路和微分电路	211
§ 21-1. 具有 R 、 C 、 L 和 M 的积分电路和微分电路	211
§ 21-2. 积分放大器	214

第四篇 测量电路

第二十二章 不平衡的直流电桥电路	216
§ 22-1. 基本关系	216
§ 22-2. 当变换器的参数一定时电桥电路中各电阻間最佳的对比关系	217
§ 22-3. 当测量器的参数一定时电桥电路中各电阻間最佳的对比关系	222
§ 22-4. 电桥电路对仪器标度特性的影响	223
§ 22-5. 用流比计作测量器的直流电桥电路	228
§ 22-6. 当工作臂的电阻显著改变时直流电桥电路中测量器內电流的簡單計算方法	230
第二十三章 不平衡的交流电桥电路	233
§ 23-1. 基本关系	233
§ 23-2. 具有 $Z_1 = Z_2$ 及 $Z_3 = Z_4$ 对称情形的电桥电路 (圖 23-1)	235
§ 23-3. 具有 $Z_1 = Z_3$ 及 $Z_2 = Z_4$ 对称情形的电桥电路 (圖 23-1)	236
§ 23-4. 应用具有極大阻抗的测量器的电桥电路	238
第二十四章 自动平衡的測量电路	240
§ 24-1. 自动补偿器的作用原理和灵敏度	240
§ 24-2. 应用于测量热电高溫計热电势的自动补偿器电路的特点	242
§ 24-3. 自动电桥的作用原理和它的标度的特性	244
§ 24-4. 自动补偿器和电桥 (СП和СМ型) 的电动机机械随动裝置	247
§ 24-5. ЭПВ、ЭПД、ЭПП、ЭМВ、ЭМД 和 ЭМП 型的自动补偿器和电桥的电子管随动裝置	251

緒 言

非电量的电测法是测量技术中一个極其广大的部門，实际上包括对一切数量的测量，这些数量被用来鑑定各种物理現象、化学現象和生产过程。

科学的發展与测量技术的發展有密切的联系。测量是用实验的方法对任何現象、任何規律性在質和量兩方面达到認識的过程，它所具有的可能性（关于准确度、灵敏度以及被测数量的范围）在颇大的程度上决定了科学的發展水平。测量技术达到的水平愈高，則科学的成就显得愈为深广。而在另一方面，科学的發展又为测量技术的發展創立新的前提、新的途徑和新的可能性。

在生产的发展与测量技术的发展之間也看到了完全相似的相互联系。現代的生产，特别是在社会主义計劃經濟情况下的現代生产的特点，是極严格地遵守技术規程和普遍地采用生产过程的自动控制。只有借助于测量技术，测量出表征各种技术操作过程中每一部分和每一环节的特性的那些参量，現代生产的要求才能得到保証。所以在今日苏維埃的冶金、化学、制煉石油、紡織、食品、金屬加工制造等工業的工厂里，以及其他各工業部門的工厂里，充滿了各种各样的测量仪器，用以檢測和操縱生产过程。在另一方面，生产上的成就又保証了新材料的获得和仪器零件制造的更加精密；这就为测量技术的发展開創了更为广大的可能性。

表征各种生产过程的特性的各种参量的测量可以归結为有限的几种物理量的測定：温度、机械量（力、压力、位移、速度、加速度等等）、液态或气态介質中各成份的濃度、時間、各种电量（电流、电压、頻率、电功率等）。

普遍采用电式测量仪器来測定包括非电量（温度、机械量及其他）在內的实际上的一切物理量，是現代测量技术发展上的特点。这种情况是由于电式测量仪器具有为大家所熟知的一系列优点：連續测量和記錄所测数量的可能性，实施远距测量以及与控制生产过程的执行机

構相联系(通过繼电器)的可能性,测量的高度准确性和灵敏性,無論所测数量的数值甚大或甚小时,测量范围都很广闊。

当使用电式仪器来检测非电量时,出现了测量技术中这一部門所独有的一些問題。在这些問題里面,首先应该提到的是將非电量变换为电量的問題。在测量裝置里面完成这种变换作用的元件,我們称它为变换器。

这类变换器是利用固体、液体或气体的某种电参量与所测数量間的倚賴关系,例如电阻与温度間的关系。

以电的方法来测量非电量的仪器的基本結構圖可以繪成如圖 1 所

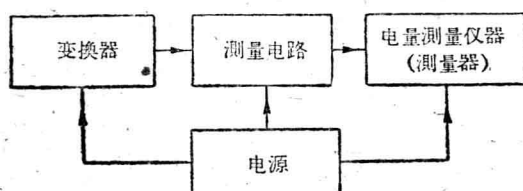


圖 1 测量非电量的电式仪器的結構圖

示的形式。变换器經過测量电路与电量测量仪器联系起来,测量仪器的标度以所测非电量的單位来刻划。为了使得电量测量仪器(安培計、伏特計、檢流計等)的概念能够与整个测量仪器的概念更为方便地区别开来,我們以后將称电量测量仪器为测量器。

在一般的情况下,电源供电給仪器的所有三个基本部分。在个别場合下,电源只要对测量电路供电就够了,而在有很多場合里面,变换器本身就是测量电路和测量器的电源(例如热电高温計里面的热电偶);在后一种情况下,就不必要有單独的(輔助的)供电电源了。

如果所测非电量在变换器里面被轉变成电阻、电感、电容之类的电参量,这些电参量的測定必須要有輔助的电源,我們称这一类变换器为参量变换器。如果所测非电量在变换器里面被轉变为电势,則我們称这类变换器为發電变换器。

应该指出,在有些情况下,也使用所謂逆变换器来將电量轉变为非电量,以便与所测非电量作比較;使变换器輸出端的非电量与所测非电量相均衡的电量(輸入)的数值,随所测的非电量而轉移。

在最簡單的情况下,测量电路就是連接变换器与测量器(例如在热电高温計里用毫伏計作为测量器)的导綫。如果变换器的电参量用

电桥或补偿方法测量，則測量电路就相应地复杂化了。

測量电路常由于某些环节而复杂化，这些环节起着下述这些作用，如稳定电源的电压，將电路輸出端(測量器前面)的交变电流加以整流、放大电桥或补偿电路輸出端的电流或电压等。

照例，变换器的电参量不仅随所测非电量而变化，并与測量对象的其他物理和化学屬性有关，而且也与周圍介質的物理屬性有关。例如金屬导綫的电阻不仅倚賴于温度，并与导綫在拉力作用下的机械变形有关。如果要利用导綫的电阻与拉力的关系来測量拉力，則必須設法补偿因环境温度的变化而引起的导綫电阻的变化。变换器的电参量与測量对象及周圍介質的各种屬性(不被測量的)間的倚賴关系的影响的补偿問題，不仅对变换器提出了許多要求，而且对測量裝置的其他部分，如測量电路、測量器等也提出了許多要求。

測量非电量的各种电式仪器在我們的社会主义工業及科学中的發展和在实际中的广泛应用，应当归功于苏維埃科学家和工程師們的創造性的劳动。在本書的正文里面指出了各种測量方法和仪器的創制人。

联共(布)第十九次党代表大会、苏联最高苏維埃第五次常会和联共中央九月全体會議的決議，在苏联重工業面前，特別是在輕工業和食品工業面前，在农業面前提出了最高度的增强生产的任务。但是，沒有生产工艺过程的自动控制，不用最新式的監察測量器件，主要是各种測量非电量的电式仪器来將工厂装备起来，生产的剧烈增長是不可能的。

农業經濟的高漲同样也要求采用各种測量非电量的电式仪器，例如用以測量温度、湿度、地面風力，以及用以檢查大量机器的工作。

这样，測量非电量的电式仪器的作用將不断地增加；因此，在理論上和實踐上来进一步地研究非电量的电測法和使它系統化，是一个極其迫切的任务。

在非电量的电測技术中，应用了極其多样性的仪器和器具，因此，仪器的分类極为困难，从而使得本書在資料的排列和敘述上也感到很大的困难。

要將測量非电量的电式仪器的变换器、測量电路和測量器等方面

的所有問題都包羅在本書的篇幅里面是不可能的,并且也未必适当。測量器(也就是电量測量儀器)的理論、設計和構造問題在其他書籍里有所研究。同樣地,关于电測量方法和測量电路的一般問題也在其他書籍里加以研究,所以,我們認為研究非电量的电測量所特有的各种型式的變換器和測量电路,是本書的基本任务。

無論變換器的用途如何,依据它們的作用原理来分类是最适当的。本書的第一部分叙述各种變換器的理論和基本特性。

本書的第二部分討論測量非电量的电式儀器所最常用的測量电路,而且特別注意自动补偿器和电桥。

我們認為本書的另外一个重要任务是研究最典型的測量非电量的电式儀器和它們的使用特性。从这方面看来,將測量同一种非电量的各种方法和儀器進行比較是很有益的。所以本書的第三部分的內容是研究蘇維埃工業中使用得最普遍的、測量非电量的各种典型的电式儀器,以及各种在实际上有广泛使用的远大前途的新的儀器,这部分資料是按照所測非电量的特性而編排的。

第一部分 將非电量轉变为电量的变换器

第一篇 参量变换器

第一章 变阻器式变换器

§ 1-1. 理論基础

变阻器式变换器正如它的名称所表示的, 是一种变阻器, 它的滑件因所测非电量 F 的作用而移动位置(綫位移或角位移)。这样就建立起关系式:

$$R = f(F),$$

式中 R ——变换器的电阻。

变阻器式变换器可以被連接在任何一种测量电阻的电路里。

圖 1-1 示出包含变阻器式变换器的仪器的最典型的电路。圖 1-1, a 电路中的电流 I_1 等于:

$$I_1 = \frac{U}{R_r + R_1}.$$

关系式 $I_1 = f_1(R_1)$ 具有双曲綫的特性, 因而关系式 $I_1 = f(l)$ 也具有

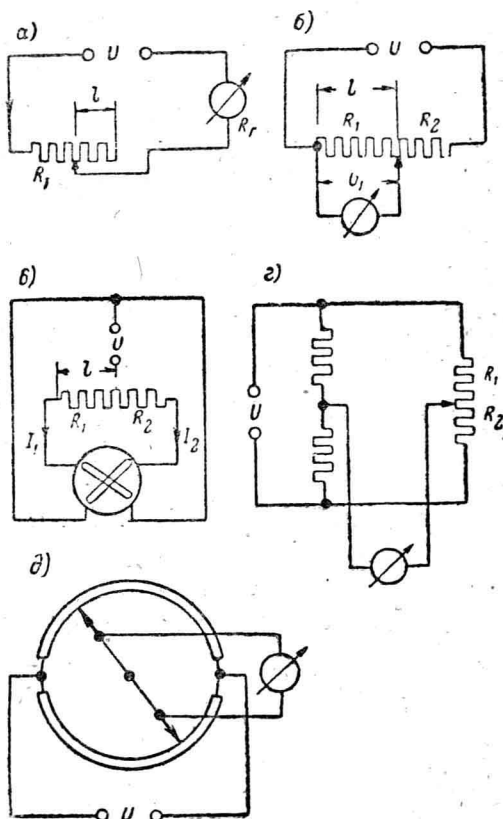


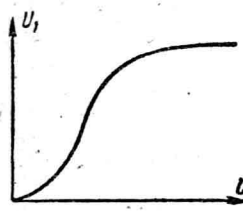
圖 1-1 应用变阻器式变换器的仪器的原理結綫圖

双曲线的特性，标度的零点与仪器的自然零点不一致。

选择 R_f 与 R_1 的比值时，应从仪器对电流的灵敏性、仪器标度使用部分的直线性和保证测量器线圈有必要的阻尼等方面来考虑。

照例，变阻器两端有一部分是不工作的。

圖 1-1, 6 电路内的电压 U_1 等于：



$$U_1 = U \frac{\frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}}{R_2 + \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}} = U \frac{R_1 R_f}{(R_1 + R_f) R_2 + R_1 R_f}$$

$$= U \frac{R_1}{\frac{R_1 R_2}{R_f} + R},$$

圖 1-2. 曲線 $U_1 = f(l)$

式中 $R = R_1 + R_2$.

从上式可得出以下的結論：

1) 如 $R \ll R_f$ (因之, $R_2 \ll R_f$),

則

$$U_1 = U \frac{R_1}{R},$$

而且特性 $U_1 = f(l)$ 实际上將是直線。

2) 如 R 接近 R_f 或大于 R_f , 則特性曲線 $U_1 = f(l)$ 將具有如圖 1-2 所示的形狀。

从以上导出的式子可以看到，电流 I_1 和电压 U_1 都取决于电源电压 U 的恒定性，所以，如圖 1-1, 6 所示的应用流比計作为测量器的电路是最常用的电路，因为流比計的偏轉值是电流比率的函数，因而也是滑件的位移 l 的函数

$$\alpha = f_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f_2\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = f(l),$$

这数值实际上与电源电压无关。

改变流比計测量機構的極靴或鉄芯的形狀，就可以很方便地改变标度的特性，也就是改变关系式 $\alpha = f(l)$ 的形式。在某些情况下，变阻器式变换器組成电桥的兩臂(圖 1-1, 2)，或者在使用双变换器的情

況下，則組成電橋的四臂(圖 1-1, θ)。

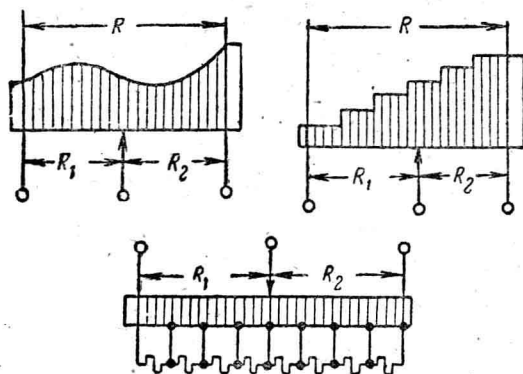


圖 1-3 特殊型式的變阻器式變換器

在有許多情況下，特別是當滑件的位移 l 與所測機械量成為非線性關係時，必須使函數 $I_1 = f(l)$ ， $U_1 = f(l)$ 或 $\frac{I_1}{I_2} = f(l)$ 也是非線性的，這是為了使函數 $\alpha = f(F)$ 成為線性。

在這種情況下，我們將變阻器式變換器的繞組製成特殊的型式，或者使繞組的電阻成為不均勻的(圖 1-3)。

這種非線性的變換器的計算是極其複雜的。這類電阻的某些計算方法在別的文獻中介紹了。

§ 1-2. 變阻器式變換器的構造

變阻器式變換器是用電阻絲繞在骨架上面，或製成滑接電阻的型式。

製造電阻絲所最常用的材料是錳銅或康銅；也採用高阻合金(鐵鉻鋁)。在特殊重要的場合下，例如對接觸表面的耐磨度有特別高的要求，或接觸壓力很小時，則採用鉑鈷合金(90% Pt + 10% Ir)，或採用鉑和鈮、鈷、鈦、鐵的合金。

變阻器的電阻絲應塗上釉或氧化物層，使相鄰各匝間互相絕緣。滑件(電刷)或者用由鉑鈷合金或鉑鈹合金製造的 2 或 3 根導線組成，或者用銀或磷青銅製成層片狀的電刷形式。導線式電刷的接觸壓

力約为 0.3—0.5 克，層片式电刷的接触压力約为 5—10 克。

电阻絲繞組的接触表面是被磨光的；滑件与表面接触的宽度应等于电阻絲直徑的 2 或 3 倍。

当变阻器式变换器在有震动的情况下工作时，应采用由不同長度（从固定点到接触点）的导綫組成的电刷，或者采用由帶有兩三个切口的金屬片組成的电刷。这样就能够保証电刷的各部分具有不同的自然振动頻率。

变阻器式变换器的骨架常用膠布板或塑料制造；有时也采用鋁制骨架，其上塗以絕緣漆。骨架的形狀是非常多样化的，有：扁平或圓柱形的片塊、扁平或圓柱形的环、扁平的弧形片等。

变阻器式变换器的感抗和容抗是很小的；頻率在几万赫芝以下时可以不考虑变阻器式变换器的电抗。

圖 1-4 所示为特殊型式的变阻器式变换器的構造的一个例子。

电阻絲 2 以均匀的間隔繞在用絕緣材料制成的骨架 1 上面。在骨架頂上的这部分电阻絲的絕緣被清除掉，电刷 3 即沿着电阻絲的裸露部分的金屬滑动。

輔助电刷 4 在受电环 5 上滑动。兩個电刷与导軸 6 之間加有絕緣。

在 § 26-1 中敘述的油量計的变换器是变阻器式变换器的另一个例子。

第二章 接触变换器

§ 2-1. 接触变换器的作用原理和主要型式

在接触变换器里面，被測量的机械位移以閉合或断开触头的方法来控制电路。

在最簡單的情况下，接触变换器是單限的，它具有一对触头（圖 2-1, a），触头由于所測位移，例如工件 1 尺寸的变化而閉合。

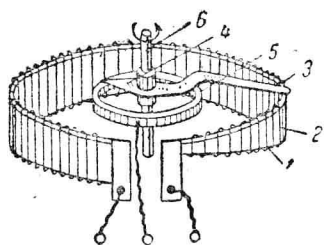


圖 1-4 特殊型式的变阻器式变换器的構造

在檢測工件的尺寸時，常採用具有兩對觸頭的双限接觸變換器(圖 2-1, б)。

也有帶有几對觸頭的多限變換器的構造(圖 2-1, в); 觸頭可以放置在銜鐵的兩側或一側。

接觸變換器工作時可以閉合(或斷開)全部電路，也可以只閉合一個電阻電路的一部分(圖 2-1, з)。在後面這種情況下，接觸變換器實際上就是一個分級改變電阻的變阻器式變換器。

為了增加接觸變換器的靈敏度，我們採用槓桿傳動，使觸頭(即銜鐵)的位移可以比變換器拉桿的位移增大一些。

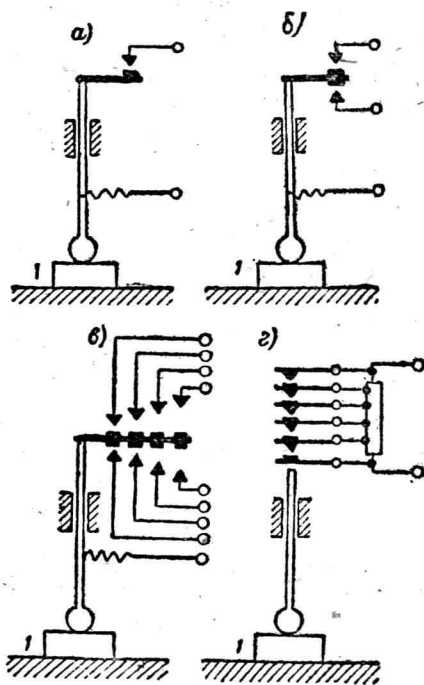


圖 2-1 接觸變換器的主要型式

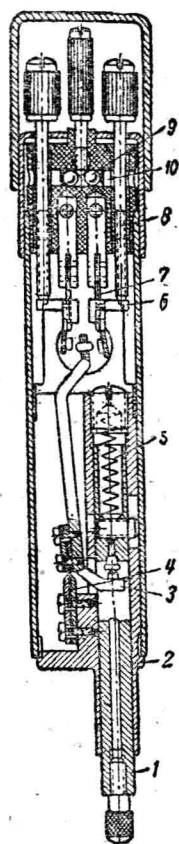


圖 2-2 槓桿接觸變換器

圖 2-2 所示的是測微計的槓桿接觸變換器的構造。拉桿 1 在外殼

2 中滑动，拉桿中部有一凹口，橫桿 3 的短臂可伸进这个凹口 里面，橫桿則用扁平彈簧 4 固定在外壳上面。橫桿 3 和拉桿相接触的一点距离拉桿的軸心很近，因此，拉桿在导管里可能产生的歪斜不会使橫桿 3 产生位移。拉桿 1 上升时，橫桿 3 向左侧移动，使左面的一对触头闭合。彈簧 5 使拉桿回复到下面的位置，这时，右面的一对触头闭合。

可調节的触头裝置在直角橫桿 6 上，直角橫桿用扁平彈簧 7 固定。为了减小調整螺釘 8 的空隙的影响，調整螺釘用小球 9 及中間桿 10 压紧在帶有中心螺釘的承座上。

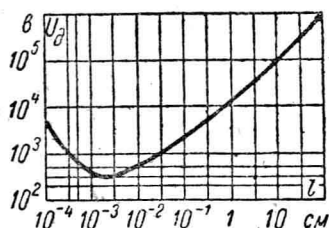


圖 2-3 在一个大气压力下的空气中，击穿电压 U_δ 与扁平触头的隙距 l 的关系

变换器的灵敏度的極限值主要地决定于触头間的最小隙距 δ 。最小隙距受击穿事故的限制而与加在触头上的电压有关。

加在触头上的电压应低于某一电压数值，在这个电压的作用下，触头間开始自持放电(击穿)。这个电压的数值与触头間的距离、触头的材料和形状、以及接触压力等有关。作为一个例子，圖

2-3 引示击穿电压 U_δ 与扁平触头的隙距 l 的关系曲线，而这触头是处于一个大气压力的空气中的。当触头不干淨和有氧化層形成时，击穿电压即降低。

触头是变换器的最重要的零件。触头的材料、構造和制造加工以及它的工作情况决定着变换器在工作时的准确性、可靠性和稳定性。

由于触头間产生电弧(或火花)的結果，触头会遭到损坏(蝕損)。但是，沒有电弧或火花时，触头也会發生蝕損；当触头間的距离極小时(小于电子的自由行程)，其間建立起电位梯度極大的静电場(当电压为 10 伏而触头間的距离为 1 微米时，電場的电位梯度等于 100 000 伏/厘米)。电子从電場的陰極逸出，打击陽極而將它击散，因此陽極的正离子轉移到陰極上面；在陰極上形成凸起部分，而在陽極上形成凹陷部分。

在緩慢地断开触头时，可以观察到有由陽極材料組成的金屬桥的