

高等学校教学用書



# 电气测量仪表和测量

瓦·奥·阿卢丘諾夫著

人民教育出版社

高等学校教学用书



# 电气测量仪表和测量

瓦·奥·阿盧丘維夫著

哈爾濱工業大學  
电气計量設備及測量技術教研室譯

人民教育出版社

四一七

本書系根据苏联国立动力出版社 (Госэнергиздат) 出版的瓦·奥·阿卢丘諾夫 (В. О. Арутюнов) 著“电气測量仪表和測量” (Электрические измерительные приборы и измерения) 1958年版譯出。原書經苏联高等教育部审定为动力及电工高等学校以及动力系和电工系用的教学参考書。

本書共分七部分三十四章，内容包括与电气測量和电气測量仪表有关的基本知識。研究了直讀式測量仪表和比較仪表。叙述了电測量、磁測量以及非电量的电測量等問題。同时对远距离測量問題也加以适当的闡述。本書可作为高等学校动力系和电工系学生的教学参考書，同时对使用和設計电气測量仪表的工程师也有所帮助。

参加本書翻譯工作的有哈尔滨工业大学电机系电气計量設備及測量技术教研室的彭康強、尤德斐、刘嗣賢、王在元、郭傳錫、赵新民和赵国田等同志，最后由王在元及彭康強两同志整理校訂。

## 电气測量仪表和測量

瓦·奥·阿卢丘諾夫著

▲ 哈尔滨工业大学

电气計量設備及測量技术教研室譯

人民教育出版社出版 高等學校教材編輯部  
北京宣武門內大街27号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第2号)

京華印書局印裝 新华書店發行

統一書号 15010·875 开本 850×1168 1/32 印张 19 1/16

字数 484,000 印数 7,501—15,500 定价 (7) 2.10

1960年5月第1版 1960年8月北京第2次印刷

## 序

“电气测量”一課在高等电工学校內一般都是在三年級講授，并且多半是对一个系乃至一个学院的所有专业講授的。这門課一般为60~80学时。在一般专业的高年級中，对測量問題再无别的課程进行闡述了。例外的是下列这些专业，如电气測量技术、仪表制造以及自动与远距离操縱裝置专业。在这些专业，測量問題当然会得到繼續的发展。

由此，本課程是公共的基础課程。因而，这样的課程必須包含全部有关电气測量及測量器具的全部基本知識。

根据以上所述，在本課程的教学参考書中必須对合理使用仪表与器械的問題給以足够的篇幅。当叙述有关电气測量仪表的理論及裝置的部分时，絕大部分內容应放在运行特性及可能性以及它們的技术指标，并以較少的部分来叙述結構上的特点。对一些誤差的来源以及与之作斗争的方法必須特別注意。对用电气方法測量非电量的問題必須給以相当大的篇幅。

同时，由于在教学参考書中不可能对全部現有各式仪表及測量方法都进行研究，因此必須先从仪表裝置原理及測量方法的明确分类出发，以便有可能使这种研究只限于各类具有典型代表性的仪器，并打好方法上的基础，以使学生或工程师能在此基础上独立地弄懂各种仪表的裝置，并能在实际操作中以必要的謹慎性进行各种具体的測量工作。

作者在編著这本教学参考書时，注意滿足上述各种要求。这本参考書是基于目前通行的分类法，这种分类法是以加里宁命名的列宁格勒多科性工学院电气測量技术教研室在石拉姆科夫(Е. Г. Шрамков)教授的领导下拟訂的。作者是这个教研室中的一个成員，利用了这个

教研室講授這門課程的多年經驗以及此教研室與石拉姆科夫教授個人制定的教學法文件。

參加編著這本書的還有吐利欽(А. М. Туричин)副教授(寫第六部分——“非電量的測量”)，以及諾維茨基(П. В. Новицкий)副教授(寫第八章中一部分——“電子管儀表”)。作者向他們表示感謝。

作者對莫斯科動力學院電氣儀表製造教研室集體以及舒米洛夫斯基(Н. Н. Шумиловский)教授本人表示感謝，他們對本書進行了評閱，對柏萊奧勃拉然斯基(А. А. Преображенский)副教授也表示感謝，他對本書手稿進行了校訂。

作者對設計師列克(Ш. Т. Лек)及勃列赫斯坦因(Л. И. Блехштейн)表示特別感謝，他們倆為此書作了新穎的插圖。

作者歡迎一切批評、指教和意見，並希投寄：列寧格勒，Д-41，馬爾索夫廣場，1。國立動力出版社列寧格勒分社(Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Госэнергоиздат)。

# 目 录

序.....	11
緒論.....	1
第一部分 关于测量及测量仪器的基本概念	
第一章 基本概念及定义.....	3
§ 1-1 测量过程及其基本元件.....	3
§ 1-2 测量的分类.....	6
第二章 测量误差及测量结果的处理.....	9
§ 2-1 测量误差.....	9
§ 2-2 消除系统误差的方法.....	12
§ 2-3 测量结果的处理.....	13
第三章 单位制.....	19
§ 3-1 关于测量单位的选择.....	19
§ 3-2 电与磁的单位制.....	21
§ 3-3 MKSA 单位制.....	25
第四章 标准器与范型量具.....	27
§ 4-1 概述.....	27
§ 4-2 电流天平.....	29
§ 4-3 标准电池.....	32
§ 4-4 标准电阻.....	34
§ 4-5 电阻箱.....	36
§ 4-6 电感线圈与互感线圈.....	39
§ 4-7 范型电容和电容箱.....	41
第二部分 直讀式电气测量仪表	
第五章 电气机械式仪表的理论及构造的基本问题.....	44
§ 5-1 电气测量仪表的基本分类.....	44
§ 5-2 电气机械式仪表的一般原理.....	45
§ 5-3 电气机械式仪表的一般线路及轉动力矩的通式.....	51
§ 5-4 平衡方程式·刻度特性.....	54
§ 5-5 灵敏度.....	56

§ 5-6 定位力矩·稳定平衡的条件	57
§ 5-7 摩擦力矩·变差	58
§ 5-8 阻尼力矩·阻尼时间	61
§ 5-9 流比计	63
§ 5-10 测量仪表的误差	66
§ 5-11 仪表的外观	69
<b>第六章 直流磁电式仪表</b>	<b>75</b>
§ 6-1 构造的原理及理论	75
§ 6-2 测量机构的结构	80
§ 6-3 磁电式安培计·分流器	83
§ 6-4 磁电式伏特计·附加电阻	85
§ 6-5 磁电式安培计及伏特计的技术指标及性质	87
§ 6-6 磁电式欧姆计	91
§ 6-7 磁电式电流计	98
§ 6-8 冲击电流计	108
§ 6-9 韦伯计	114
§ 6-10 磁电式电量积算计(电量电度表)	118
<b>第七章 无变换器的交流磁电式仪表</b>	<b>123</b>
§ 7-1 概述	123
§ 7-2 谐振电流计的构造	124
§ 7-3 谐振电流计的理论	127
§ 7-4 谐振电流计的工作方式	132
<b>第八章 附变换器的交流磁电式仪表</b>	<b>133</b>
§ 8-1 概述	133
A 热电式仪表	134
§ 8-2 热电变换器	134
§ 8-3 理论、特性及技术指标	137
B 整流式仪表	143
§ 8-4 整流器	143
§ 8-5 整流式安培计及伏特计	146
§ 8-6 整流式频率计	151
§ 8-7 相敏整流电路及仪表	152
B 电子管式仪表	156
§ 8-8 电子管整流电路	156
§ 8-9 电子管式伏特计	161
§ 8-10 电子管式频率计	166
§ 8-11 电子管式瓦特计	168

<b>第九章 电动式仪表</b> .....	169
§ 9-1 构造原理及理論.....	169
§ 9-2 机构結構.....	174
§ 9-3 电动式安培計及伏特計.....	176
§ 9-4 电动式瓦特計.....	179
§ 9-5 电动式安培計, 伏特計及瓦特計的技术指标及性質.....	184
§ 9-6 电动式电度表.....	195
§ 9-7 电动式相位計.....	199
<b>第十章 鉄磁电动式仪表</b> .....	204
§ 10-1 构造原理及机构結構.....	204
§ 10-2 轉动力矩及平衡方程式.....	206
§ 10-3 鉄磁电动式安培計及伏特計.....	209
§ 10-4 鉄磁电动式瓦特計.....	211
§ 10-5 鉄磁电动式相位計.....	213
§ 10-6 鉄磁电动式頻率計.....	216
<b>第十一章 电磁式仪表</b> .....	222
§ 11-1 构造原理和理論.....	222
§ 11-2 机构的結構.....	225
§ 11-3 电磁式安培計和伏特計.....	227
§ 11-4 电磁式安培計和伏特計的技术指标和性能.....	230
§ 11-5 电磁式相位計.....	232
§ 11-6 电磁式法拉計.....	235
§ 11-7 諧振型电磁式頻率計.....	236
<b>第十二章 感应式仪表</b> .....	239
§ 12-1 构造的原理和理論.....	239
§ 12-2 感应式单磁通型安培計和伏特計.....	250
§ 12-3 感应式电度表.....	251
§ 12-4 感应式积算流比計.....	260
<b>第十三章 静电式仪表</b> .....	262
§ 13-1 构造的原理和理論.....	262
§ 13-2 静电式伏特計.....	265
§ 13-3 技术指标和性能.....	267
§ 13-4 静电計.....	270
<b>第十四章 观察和记录速变量的仪表</b> .....	273
§ 14-1 构造的原理和理論.....	273
§ 14-2 自录仪表.....	279
§ 14-3 电气机械式示波器.....	285



§ 14-4 电子示波器 .....	292
<b>第十五章 测量用互感器</b> .....	297
§ 15-1 构造的原理和理论 .....	297
§ 15-2 电流互感器 .....	304
§ 15-3 电压互感器 .....	309
§ 15-4 直流变换器 .....	310

### 第三部分 比较式电气测量仪器

<b>第十六章 直流补偿器</b> .....	315
§ 16-1 直流测量的补偿原理 .....	315
§ 16-2 工作电流的调整 .....	317
§ 16-3 补偿器读数精度的提高 .....	320
§ 16-4 量程的变更·分压器 .....	327
§ 16-5 直流补偿器的结构 .....	328
§ 16-6 改变工作电流的补偿器 .....	331
§ 16-7 电流补偿器 .....	334
<b>第十七章 交流补偿器</b> .....	335
§ 17-1 交流测量的补偿原理 .....	335
§ 17-2 直角坐标式补偿器 .....	338
§ 17-3 极坐标式补偿器 .....	344
§ 17-4 用标准电池调整补偿器的交流工作电流 .....	346
<b>第十八章 直流电桥</b> .....	348
§ 18-1 构造原理和理论 .....	348
§ 18-2 单电桥 .....	351
§ 18-3 双电桥 .....	355
<b>第十九章 交流电桥</b> .....	359
§ 19-1 理论 .....	359
§ 19-2 平衡指示器与电源 .....	361
§ 19-3 交流电桥测量电路的基本线路 .....	366
§ 19-4 交流电桥的构造 .....	372
§ 19-5 使用交流电桥时的预防措施 .....	374
<b>第二十章 自动电桥及自动补偿器</b> .....	376
§ 20-1 概述 .....	376
§ 20-2 电子管式自动电桥及自动补偿器 .....	380
§ 20-3 具有可变工作电流的自动补偿器 .....	384

### 第四部分 电量的测量

<b>第二十一章 电流和电压的测量</b> .....	386
-----------------------------	-----

§ 21-1 测量电流和电压时的方法误差 .....	386
§ 21-2 小电流和小电压的测量 .....	389
§ 21-3 大电流和大电压的测量 .....	391
§ 21-4 三相电路中电流和电压的测量 .....	396
§ 21-5 高次谐波电流和电压的测量 .....	399
<b>第二十二章 电阻的测量</b> .....	<b>402</b>
§ 22-1 用直讀式仪表测量电阻 .....	402
§ 22-2 用补偿器测量电阻 .....	407
§ 22-3 絕緣电阻的测量 .....	409
§ 22-4 接地电阻的测量 .....	412
§ 22-5 电綫和綫路中故障地点的測定 .....	415
<b>第二十三章 电容、自感和互感的测量</b> .....	<b>418</b>
§ 23-1 电容的测量 .....	418
§ 23-2 自感的测量 .....	421
§ 23-3 互感的测量 .....	425
<b>第二十四章 功率、能量和功率因数的测量</b> .....	<b>429</b>
§ 24-1 直流电路中功率和能量的测量 .....	429
§ 24-2 单相交流电路中功率和能量的测量 .....	434
§ 24-3 三相电路中有功率和能量的测量 .....	437
§ 24-4 三相电路中无功功率和能量的测量 .....	444
§ 24-5 功率因数的测量 .....	448
<b>第二十五章 頻率的測量</b> .....	<b>451</b>
§ 25-1 概述 .....	451
§ 25-2 应用閃頻效应比較頻率 .....	452
§ 25-3 应用差拍比較頻率 .....	456
§ 25-4 借电子束管比較頻率 .....	458
§ 25-5 借与頻率有关的电桥电路測量頻率 .....	462
<b>第五部分 磁量的测量和鉄磁材料特性的測定</b>	
<b>第二十六章 磁量的測量</b> .....	<b>467</b>
§ 26-1 概述 .....	467
§ 26-2 不随時間变化的磁通的測量 .....	468
§ 26-3 交变磁通的測量 .....	473
§ 26-4 磁場强度的測量 .....	477
§ 26-5 磁势的測量 .....	481
§ 26-6 磁化物体磁矩的測量 .....	484
<b>第二十七章 鉄磁材料特性的測定</b> .....	<b>486</b>

§ 27-1 直流下磁化曲线和磁滞回线的测定·磁导计 .....	486
§ 27-2 交流下铁磁材料性能的测定·铁磁计 .....	493
§ 27-3 磁滞和涡流损耗的测定 .....	497
§ 27-4 复数磁阻抗的测定 .....	503
<b>第六部分 非电量的电测量</b>	
<b>第二十八章 变换非电量为电量的测量变换器</b> .....	506
§ 28-1 一般概念及定义 .....	506
A 参量变换器 .....	508
§ 28-2 变阻器变换器 .....	508
§ 28-3 电阻丝变换器 .....	510
§ 28-4 热电阻 .....	512
§ 28-5 电解液电阻变换器 .....	517
§ 28-6 电感变换器 .....	519
§ 28-7 电容变换器 .....	520
§ 28-8 光电变换器 .....	522
§ 28-9 电离变换器 .....	524
B 发电变换器 .....	526
§ 28-10 感应变换器 .....	526
§ 28-11 热电变换器 .....	527
§ 28-12 压电变换器 .....	530
§ 28-13 电位变换器(pH 仪变换器) .....	531
<b>第二十九章 机械量的电气测量</b> .....	534
§ 29-1 概述 .....	534
§ 29-2 直线尺寸的测量 .....	535
§ 29-3 水位的测量 .....	538
§ 29-4 集中力及压力的测量 .....	541
§ 29-5 机械振荡(振动)参数的测量 .....	543
§ 29-6 转速的测量(转速计) .....	548
<b>第三十章 温度的电气测量</b> .....	550
§ 30-1 利用电阻温度计测量温度 .....	550
§ 30-2 利用热电高温计测量温度 .....	555
§ 30-3 电阻温度计及热电高温计的变换器热损耗所引起的误差 .....	556
§ 30-4 固体与表面温度的测量 .....	559
§ 30-5 利用发热体的辐射能量测量温度 .....	562
<b>第三十一章 液体及气体介质浓度的电气测量</b> .....	565
§ 31-1 利用电导率测量溶液的浓度 .....	565

§ 31-2 气体混合物成分浓度的测量 .....	567
§ 31-3 利用对辐射能的吸收测量浓度 .....	570
§ 31-4 利用氦的指标测量溶液浓度 .....	573

## 第七部分 远距离测量

<b>第三十二章 一般概念和分类</b> .....	<b>574</b>
§ 32-1 基本概念和定义 .....	574
§ 32-2 远距离测量系统的分类 .....	576
<b>第三十三章 近程远距离测量系统</b> .....	<b>578</b>
§ 33-1 整流系统 .....	578
§ 33-2 补偿电流系统 .....	580
<b>第三十四章 远程远距离测量系统</b> .....	<b>584</b>
§ 34-1 频率系统 .....	584
§ 34-2 时间系统 .....	590
§ 34-3 数系统 .....	593

## 緒 論

測量，即確定各種量的數值，在國民經濟中具有特別重大的作用。沒有一個科學和技術的領域，也沒有一個工業或農業部門，不以測量為決定性因素之一的。

研究自然現象及探索這些現象所遵循的規律，以及所有的科學研究總是與測量有關，因為這些研究歸根到底是確定各種量的關係，通過這些量的關係才能發現被研究現象及物體的質的方面。

測量技術的完善（表現在提高測量準確度及創造新的測量方法及儀表）會促使科學得到一定的新成就。

例如，由於提高了測重量的準確度（增加了一位數字）曾導致在 1802—1894 年發現了新的氣體——氫，在此以前，由於測量的準確度不夠，一直沒有被發現。由於顯微鏡被應用到實驗技術中，對研究微生物創造了嶄新的可能性，甚至促使創立了一門獨立的學科——微生物學。由於角度測量的完善（準確度被提高到十分之一秒或更小），使有可能確定星際的距離。常常會這樣，為了要研究各種現象，就促使必須創造新的更為完善的器械。

另一方面，科學上的新發明又促進測量技術的完善及創造出一些新型的儀表。

例如，電荷間相互作用現象的發現使俄國科學院院士 Г. В. 里赫曼 (Рихман) 在 1743 年有可能創製了帶刻度的靜電器——世界上第一個電氣測量儀表。

在研究原子結構方面的成就使人們有可能創立測量恒定磁場的新方法，它是利用核磁譜振現象為基礎的。電工技術的發展史中有很多這類的事實，並且電工技術發展史本身同時就是電氣測量技術的發

展史。

在今天，測量，特別是電氣測量是任何生產必不可少的部分。產品質量的改善及勞動生產率的提高在很大程度上決定於企業在測量方面業務組織的良好程度。原始材料及半成品的檢查，對它們特性的準確確定，對工藝制度的檢查（沒有這些，對組織任何一個現代化的生產都是難以想象的）——如果沒有各式各樣，有時是很複雜的測量器械，將是不可能的。在這裡，測量的電氣方法。尤其是探傷學具有特殊的意義。探傷學是發現材料、半成品及已製成零件內部各種缺陷（如裂縫、有害物或異物夾雜）的技術。很多生產過程（如冶金、化學及食品）的檢查通常也要用電氣測量儀表。

生產的自動控制、工藝過程及檢查工序的自動化同樣與測量是密不可分的——不對各種過程的各種指標進行測量，就不可能控制這些過程。而在此處，電氣測量通常是較為優越的。

電氣測量的應用使很多重要的課題得以順利解決。

例如，近代勘探石油及礦藏的方法完全是基於電的，特別是磁測量的方法。航空勘探是基於準確的以及，主要的是，連續地把地面的磁場強度的組成成分進行測量和紀錄。當鑽探石油時，對地層結構研究，是借助於測量各水平線上地層土壤的電阻系數。

象這類例子還可以舉出很多，而且首先是用電氣測量的方法。這是由於電氣測量方法具有一系列重要的優點，主要是：

1. 實際上可以連續測量任一電量或非電量。測量的連續性再加上在紀錄帶或圖紙上的紀錄就可保證對被檢查過程狀態的監視，並使之自動化；

2. 可以在離開被研究對象一定距離之外進行測量，這距離往往是很遠的，這就能在難以達到或甚至不能達到的地方進行測量（例如測量天空星球的溫度，在旋轉機器上進行測量，射擊過程的測量等等）。

此外，還有較高的準確度、靈敏度以及對此測量數據進行數學運算的可能性等等。

# 第一部分 关于测量及测量仪器的 基本概念

---

## 第一章 基本概念及定义

### § 1-1. 测量过程及其基本元件

对各种不同的研究对象的性质从量的方面来进行对它的评价，是通过测量代表其特性的物理量来实现的。

测量乃是一个认识过程，这个过程就是将被测的量与其某一个取为单位的数值进行比较。测量结果是被测的量的数字值  $A_x$ ，它等于被测的量  $X$  与测量单位  $X_e$  之比。换言之，该数字值指出了被测的量为测量单位的多少倍。

因此，测量过程可以写成这样：

$$A_x = \frac{X}{X_e},$$

由此

$$X = A_x X_e \quad (1-1)$$

可以这样来读它：“被测量( $X$ ) (电流、电压、长度、速度等等) 是多少个 ( $A_x$ ) 单位 ( $X_e$ )”。

方程式 (1-1) 称为测量的基本方程式，因此，方程式描述了被测量与它的用某一抽象数字表示的单位进行比较的过程。由此可见，并非一切物理量均是可以被测量的，因为不是一切量都容许将其值进行比较的。

仅有这样的量才是可以被测量的：从它的定义可以获得“较大”和

“較小”的概念，并且有可能比較其值者。显然，可以被测的量一定要是能够具有零值的。

大部分的物理量能滿足这些要求。这些量例如質量、长度、角度、电阻等。但是象硬度这样的量，为了有可能测量它，就需要特殊的定义了。事实上，如果按照在被試物上依次地观察有无由金剛石、剛玉、黄玉、石英、长石等等留下的伤痕来推断硬度，如象在矿物学中所采用的方法那样，則在这个硬度的定义中不含有为了测量所必需的基本因素。但是白利納耳氏的定义則滿足了被测性的要求。根据这个定义，硬度是按照在已知的条件之下在被試物上所得的凹穴的直徑来評定的。

零值对于一系列的测量場合來說都是假定的。例如，在测量物体的加热度时，我們被迫假定了“計数之初始”（零值），而實質上测量的并不是物体的溫度，而仅是假定的溫度的区段，溫度之差。在测量時間时也存在同样的情况：日历年間是从假定的始点，例如，“基督的生日”开始算起的，而对于一昼夜的实际時間测量我們采用半夜——“平均太阳日”的最低时刻——作为計数的初始。一段时间是与“較大”和“較小”的概念相关的，而某一时刻則与“較早”或“較晚”的概念相关。对于一段时间來說，可以有零值存在，以及有进行比較和用一定数字来表示的可能性，而对于某一时刻來說就不容許这样做。

前面引出的测量过程的定义預先决定了这个过程所必需的元素是测量单位。测量单位必須与被测量是同一种类的。至于单位的大小一般說來則可以是任意的。但是测量单位的大小，一經選擇好以后就必须是固定不变的，因为不然的話，对于同一个量在不同时刻进行测量将得到不同的結果。所有的人都必須使用只有一个公認的单位，否則测量結果对所有的人将不会有相同的理解。只有用公共单位进行的测量才具有实际意义。每个国家都在它的度量衡的范圍里以專門的法律規定着这样的单位。在国际范圍內单位的通用性則由国际間的协商来加以調整。



测量单位的确定还没有解决实现测量本身这一任务。为此，就必须复制所选测量单位的实物，以便有可能将被测量与之作比较。

按预先给定的精度实际复制出来的测量单位的技术工具之总和称为量具。以当前历史时期的最高精度(所谓的度量衡精度)复制单位的量具称为标准器。

研究单位及标准器以及研究同应用这些标准器有关的测量的科学称为度量衡学。

在每一个国家内都有基本物理量的标准器，并在特殊的国家机关内保存与不断地加以完善。在俄罗斯，这样的机关是度量衡检定总局(现在在列宁格勒的Д.И.门捷列夫全苏度量衡科学研究所)，它由Д.И.门捷列夫(Менделеев)创建于1893年。标准器必须保存在特定的条件之下，只有在特别重要的场合下才能使用标准器进行测量。在日常的度量衡实践中，为了校验范型量具及范型指示仪表，采用工作标准器。

范型量具与范型测量仪表以比度量衡精度较低的精度复制着测量单位，而按其精度等级被划分为一等，二等或其他等级的量具。这些范型量具及范型仪表放置在各校验实验室中加以管辖。在全国各基本城市中都有这种校验实验室，它们对在工厂、科研机关以及商业组织中使用的量具及仪表进行日常的校验并给予封印。正确地设置的校验事务消除了量具与仪表之间的不一致性，消除了权衡及度量时的错误以及保证了全国单位的统一。因此，度量及权衡的国家服务工作就成为社会主义计划经济体系的必需而且十分重要的要素了。这个组织的工作目的是要将全国的整个测量事务保持在所需的水平之上。

虽然已经确定了单位，并且已经将它们实物复制品加以管理了，但是我们还是不能实现测量过程，因为为此还必须具有实现将被测量与量具进行比较的设备。例如，为将被测质量与质量砝码进行比较就必须用称。因此，在可以用来进行测量的技术工具中，除了量具之外