

無線電量測技術基礎

上 冊

成都電訊工程學院選編

北京科學教育編輯室

1962.5.

內 容 提 要

本书是按照最近的教育計劃中“无綫电量測技术基础”課程的教学大綱编写的。

本书內容共分三部分：第一部分討論了測量結果中以及測量仪器中存在的誤差問題，从理論上探討如何計算誤差以及减小誤差；第二部分討論現代无綫电技术中所有波段的无綫电測量的基本問題，除了闡明各种电参量的測量方法和測量原理外，并在一定程度上介紹了先进成就，并尽可能地結合我国实际情况介紹一些常用的、典型的、国产无綫电測量仪器；第三部分主要是討論将各种非电量轉变为电量的各种变换器的变换原理，用以了解无綫电測量技术在其他科学技术部門各方面的广泛应用。

“无綫电量測技术基础”課程的学时为 96~112 学时，包括实验課在內。

目 录

緒 論

§ 1 无綫电测量的主要任务	7
§ 2 无綫电测量的特点	7
§ 3 无綫电测量的方法	8
§ 4 无綫电测量技术和仪器的成长和发展概况	9

第一篇 測量結果的計算基础

第一章 誤差的基本概念

§ 1-1 誤差的基本定义	13
§ 1-2 直接測量誤差产生的原因及其分类	14

第二章 直接測量的誤差

§ 2-1 算术平均值和剩余誤差	18
§ 2-2 誤差理論的基本方程——誤差的正态分布定律	19
§ 2-3 对測量精确度进行估計时所用的尺度	22
§ 2-4 最小二乘法的基本概念和算术平均值的意义	28
§ 2-5 算术平均值的精确度——或然誤差、均方根誤差及极限誤差	29
§ 2-6 測量誤差的綜合討論及举例	31

第三章 間接測量的誤差——函数誤差

§ 3-1 間接測量誤差的基本問題	34
§ 3-2 測量值作为独立变量的任意函数——誤差积累定律	35
§ 3-3 根据函数的給定誤差确定自变量的誤差	38
§ 3-4 測量的最有利的条件的决定	40
§ 3-5 最小二乘法的运算	42
§ 3-6 偶然測量誤差及系統測量誤差的合并影响	48

第四章 非等精度的誤差

§ 4-1 測量結果的权	49
§ 4-2 广义算术平均值	50
§ 4-3 广义算术平均值的均方根誤差	53
§ 4-4 測量值函数的权	56

第二篇 无线电测量的主要任务

第五章 测量用的讯号源

§ 5-1 对讯号源的基本要求	58
§ 5-2 音频讯号发生器	58
§ 5-3 射频标准讯号发生器	62
§ 5-4 超高频讯号发生器	64
§ 5-5 脉冲讯号发生器	65

第六章 音频和高频电流的测量

§ 6-1 高频电流测量的特点。对高频安培计提出的基本要求	67
§ 6-2 磁电式直流仪表	67
§ 6-3 热线式电表	69
§ 6-4 热电式安培计	70
§ 6-5 电流量程的扩大	73
§ 6-6 高频安培计的校准	75

第七章 音频和高频的电压测量

§ 7-1 对伏特计的一般要求	79
§ 7-2 静电式伏特计	79
§ 7-3 热电式伏特计	80
§ 7-4 整流式伏特计	81
§ 7-5 电子管伏特计	84
§ 7-6 脉冲电压的测量	99
§ 7-7 电子管伏特计在超高频电路中的测量	100
§ 7-8 扩大量程的方法	102
§ 7-9 电子管伏特计和整流式伏特计的校准	102
§ 7-10 新技术的介绍——数字显示式伏特计	103

第八章 电子示波器

§ 8-1 引言	108
§ 8-2 电子束管	108
§ 8-3 电子束的扫描	113
§ 8-4 锯齿电压发生器	117
§ 8-5 示波器中的放大器及输入电路	121
§ 8-6 脉冲波形的研究及驱动扫描	122
§ 8-7 高速示波器及采样显示技术	126
§ 8-8 同时观察几个波形图——电子开关	135

§ 8-9 示波器的应用举例	136
第九章 相位的测量	
§ 9-1 概述	141
§ 9-2 测量两电压間的相位移的示波器法	145
§ 9-3 利用和差法測量相位移	149
§ 9-4 利用补偿法測量相位移	150
§ 9-5 脉冲变换法——电子相位計	152
§ 9-6 用頻率变换法測量相位移	154
§ 9-7 移相器	160
第十章 功率的測量	
§ 10-1 概述	161
§ 10-2 阻抗匹配对功率測量的誤差定量分析	163
§ 10-3 各种終端負載阻抗	164
§ 10-4 功率的直接測量法	166
§ 10-5 測量功率的光度計法	167
§ 10-6 測量功率的热量計法	168
§ 10-7 測量功率的測热电阻及热敏电阻法	172
§ 10-8 通过功率的測量	179

無線電量測技術基礎

上 冊

成都電訊工程學院選編

北京科學教育編輯室

1962.5.

內 容 提 要

本书是按照最近的教育計劃中“无綫电量測技术基础”課程的教学大綱编写的。

本书內容共分三部分：第一部分討論了測量結果中以及測量仪器中存在的誤差問題，从理論上探討如何計算誤差以及减小誤差；第二部分討論現代无綫电技术中所有波段的无綫电測量的基本問題，除了闡明各种电参量的測量方法和測量原理外，并在一定程度上介紹了先进成就，并尽可能地結合我国实际情况介紹一些常用的、典型的、国产无綫电測量仪器；第三部分主要是討論将各种非电量轉变为电量的各种变换器的变换原理，用以了解无綫电測量技术在其他科学技术部門各方面的广泛应用。

“无綫电量測技术基础”課程的学时为 96~112 学时，包括实验課在內。

目 录

緒 論

§ 1 无綫电测量的主要任务	7
§ 2 无綫电测量的特点	7
§ 3 无綫电测量的方法	8
§ 4 无綫电测量技术和仪器的成长和发展概况	9

第一篇 測量結果的計算基础

第一章 誤差的基本概念

§ 1-1 誤差的基本定义	13
§ 1-2 直接測量誤差产生的原因及其分类	14

第二章 直接測量的誤差

§ 2-1 算术平均值和剩余誤差	18
§ 2-2 誤差理論的基本方程——誤差的正态分布定律	19
§ 2-3 对測量精确度进行估計时所用的尺度	22
§ 2-4 最小二乘法的基本概念和算术平均值的意义	28
§ 2-5 算术平均值的精确度——或然誤差、均方根誤差及极限誤差	29
§ 2-6 測量誤差的綜合討論及举例	31

第三章 間接測量的誤差——函数誤差

§ 3-1 間接測量誤差的基本問題	34
§ 3-2 測量值作为独立变量的任意函数——誤差积累定律	35
§ 3-3 根据函数的給定誤差确定自变量的誤差	38
§ 3-4 測量的最有利的条件的决定	40
§ 3-5 最小二乘法的运算	42
§ 3-6 偶然測量誤差及系統測量誤差的合并影响	48

第四章 非等精度的誤差

§ 4-1 測量結果的权	49
§ 4-2 广义算术平均值	50
§ 4-3 广义算术平均值的均方根誤差	53
§ 4-4 測量值函数的权	56

第二篇 无线电测量的主要任务

第五章 测量用的讯号源

§ 5-1 对讯号源的基本要求	58
§ 5-2 音频讯号发生器	58
§ 5-3 射频标准讯号发生器	62
§ 5-4 超高频讯号发生器	64
§ 5-5 脉冲讯号发生器	65

第六章 音频和高频电流的测量

§ 6-1 高频电流测量的特点。对高频安培计提出的基本要求	67
§ 6-2 磁电式直流仪表	67
§ 6-3 热线式电表	69
§ 6-4 热电式安培计	70
§ 6-5 电流量程的扩大	73
§ 6-6 高频安培计的校准	75

第七章 音频和高频的电压测量

§ 7-1 对伏特计的一般要求	79
§ 7-2 静电式伏特计	79
§ 7-3 热电式伏特计	80
§ 7-4 整流式伏特计	81
§ 7-5 电子管伏特计	84
§ 7-6 脉冲电压的测量	99
§ 7-7 电子管伏特计在超高频电路中的测量	100
§ 7-8 扩大量程的方法	102
§ 7-9 电子管伏特计和整流式伏特计的校准	102
§ 7-10 新技术的介绍——数字显示式伏特计	103

第八章 电子示波器

§ 8-1 引言	108
§ 8-2 电子束管	108
§ 8-3 电子束的扫描	113
§ 8-4 锯齿电压发生器	117
§ 8-5 示波器中的放大器及输入电路	121
§ 8-6 脉冲波形的研究及驱动扫描	122
§ 8-7 高速示波器及采样显示技术	126
§ 8-8 同时观察几个波形图——电子开关	135

§ 8-9 示波器的应用举例	136
第九章 相位的測量	
§ 9-1 概述	141
§ 9-2 測量两电压間的相位移的示波器法	145
§ 9-3 利用和差法測量相位移	149
§ 9-4 利用补偿法測量相位移	150
§ 9-5 脉冲变换法——电子相位計	152
§ 9-6 用頻率变换法測量相位移	154
§ 9-7 移相器	160
第十章 功率的測量	
§ 10-1 概述	161
§ 10-2 阻抗匹配对功率測量的誤差定量分析	163
§ 10-3 各种終端負載阻抗	164
§ 10-4 功率的直接測量法	166
§ 10-5 測量功率的光度計法	167
§ 10-6 測量功率的热量計法	168
§ 10-7 測量功率的測热电阻及热敏电阻法	172
§ 10-8 通过功率的測量	179

緒 論

§ 1 无綫电测量的主要任务

无綫电测量是指无綫电技术所用全部頻率範圍內（从音頻到超高頻）的一切电气特性的測量。这里面包括：

1. 电路元件的电参数（如电阻值，电感量，电容量，綫的品质因数，綫圈的固有电容等等）；
2. 表征着无綫电設備工作状态的物理量（例如电压，电流，电功率等的数值，以及調幅深度，調頻指数等）；
3. 表征着无綫电設備的质量指标的一些物理量（例如效率，放大系数，通頻帶，灵敏度，頻率稳定度等等）；
4. 无綫电設備工作时可能受到的干扰，发射机的电場强度等等。

可以說，没有无綫电測量，就不可能有无綫电技术。任何无綫电設備的制造、調整、运行、維修都离不开无綫电測量。而且在国民經济的各部門中也越来越多的应用各种电子仪器。所以每一个从事无綫电測量的工作人員必須很好地掌握現代的无綫电測量技术，熟悉現有的无綫电測量儀器的原理及应用，并且懂得常用电子儀器的各种变換元件及变換方法。

从上述的任务看来，无綫电測量的对象範圍很广，因此現代的无綫电測量技术是非常广泛而多种多样的，所使用的无綫电測量儀器和电子仪器也是种类繁多的。

§ 2 无綫电测量的特点

如上所述，无綫电測量的主要任务是測量无綫电技术所用全部頻率範圍內的一切电气特性。由此可見，无綫电測量的第一个特点是頻率範圍极其广闊。最低从十分之几赫（ 10^{-1} ）以至最高达到几万兆赫（ 10^{+10} ）或更高，換句話說，頻率二端极限的比值达到 10^{11} 以上。

无綫电測量的第二个特点：就是量程极闊。例如：在功率測量中，測量的对象从最微弱的几个微瓦（ 10^{-6} ）到几十兆瓦（ 10^6 ），換言之，量程共达 10^{12} 之广。

这就不难理解，在电工量計中所使用的仪器和測量方法，只能有限地，局部地移用于无綫电測量中。无綫电測量要根据自身的特点，在測量方法上，技术上和仪器上都要作很多的特殊的考虑与处理。特别是关于高頻的影响問題。尤应細心慎重处理，以避免不应有的重大錯誤。

我們知道，由于集肤作用，元件在高頻时的电阻值不同于直流或极低頻率（例如工业用頻率或音頻）情况下的电阻值，它是頻率的一个函数。至于电抗性元件，則在高頻时往往不能單純地把它們看成为电路中一个性质不变的电抗参量。例如，在頻率不高时，在一个电感綫圈中，电感的成份占优势。但当頻率很高时，不但綫圈的电阻值会增加，而且圈与圈間的分布电容的影响也将变得很显著。这样，在很高的頻率时，就应当把电感綫圈看成为一个振荡回路，它具有自己的固有頻率 f_0 ，当工作頻率高于 f_0 时，电感綫圈就失去其电感的作用，

而变为一个电容性阻抗了。同样，当工作频率很高时，电路中的分布电容的影响是不能忽略的。而一段短路綫所具有的微小电感量，其影响也可能是不可忽视的。因此在高频情况下进行测量时，必须考虑到很多在低频时完全可以忽略的一些因素，经常要和许多不能确切地掌握住的杂散电感电容作斗争，竭力消除或削弱它们对测量结果的影响，这样一来，测量方法和测量仪器就往往随频率的高低而转变，在低频显得可靠的方法和出色的仪器，用之于高频测量时，很可能会导致彻底的失败。

在高频情况下进行测量工作时，由于工作者接近测量电路而引起的微量附加电容量，往往会引起不少的测量误差，甚至会造成仪器的损坏。因此在进行测量的过程中应经常注意仪器的位置，仔细地工作进行，以免自己本人变成为测量电路中的一个附加参量。

此外，无线电测量比其他测量（如大地测量，天文、气象测量，水利建筑测量，动力、机械测量等等）要方便得多，速度快，反应灵敏，而且能达到相当高的准确度和精密度。因此目前在国民经济的各部门中越来越广泛的采用各种电子仪器来进行非电量的测量。

§ 3 无线电测量的方法

测量的方法基本上就是二种：直接测量法与间接测量法。

所谓直接测量法就是将被测的量直接与同一类的量比较的测量方法。它可以分为直接读数法和比较法二种。

当被测的量直接由测量仪器的读数决定，仪器的刻度就是被测的量的值时，这种方法称做直接读数法。例如用电子管伏特计测量电压，用安培计测量电流等。

当被测的量直接与这量的度量比较而决定时，这种方法称做比较法。例如测量频率时，将被测频率与标准频率比较。当耳机听到零拍时或者在示波器上看到一个椭圆时，被测频率值等于标准频率。

比较法包括下面二种：

1. 零值法，
2. 替代法。

零值法，就是被测的量值（或与被测的量具有函数关系的量）对于仪器的作用被同一类的已知量的作用抵消到零的方法。例如，测量频率时，用已知频率来补偿它，测量电阻时，利用电桥，测量相位角时用已知移相器来补偿被测的相位角等等。

替代法，就是用已知量来替代被测的量而不引起测量仪器读数的变更的方法。例如用替代法测量衰减量，测量阻抗等等。

当未知量不直接测量，而根据别的量的测量结果和被测的量与未知量之间的关系值计算时，这种方法称做间接测量法。例如，测量导体的电阻时，可用安培计测量导体内的电流，而用伏特计测量导体二端的电压。已知电流 I ，电压 U 与电阻 R_x 之间的关系，可从下式求出电阻：

$$R_x = \frac{U}{I}$$

又例如：用热量计法测量功率，只要测量出流入和流出负载的水的温度差 ΔT ，以及水的流速 V ，就可以从已知的关系式求出功率

$$P = 4.18 \cdot V \cdot \Delta T \quad \text{瓦}$$

在实际测量中，应用得最普遍的是直接读数法，因为这种方法最简单，需要的测量时间也最短，不过测量的准确度不高（ $0.2 \div 10\%$ ）。

要得到较准确的结果（达 0.001% ），可利用零值法，这方法需要较长的测量时间，并且需要较复杂而贵重的仪器设备。

§ 4 无线电测量技术和仪器的成长和发展概况

既然无线电设备的一切制造、调整、运行、维修都离不开无线电测量，因此无线电测量的原理、方法、技术，以及所使用的仪器都是和无线电技术同时开始，一齐发展的。

大家都知道，无线电的创始者 A.C. 波波夫在 1895 年制成了一个测量远方雷电用的仪器——“雷电指示器”。这个仪器就是世界上第一部无线电接收机。在改进他的无线电接收机的同时，波波夫曾经利用过一些辅助的无线电测量仪器，进行了一系列的测量工作。其后，为了要在军舰上架设无线电天线，波波夫发明了一种测量小电容量的差动电桥，利用这个仪器，波波夫确定了船上金属索具对天线电容量的影响，这样就使得有可能选择最好的舰用天线，以保证通讯距离最远。

在 20 世纪初，就已经开始对无线电测量进行专门的研究。参加工作的有世界各国的许多著名的学者、院士、教授和工程师，还有更多的不知名的平凡劳动者。随着无线电技术本身的发展，发明了很多新的测量方法，创造出许多新的测量仪器。例如，在伟大的十月社会主义革命不久以后，在苏联建立了当时全世界最大的一个无线电台——“国际共产主义电台”。为了监察发射机的工作情况以保证电台的工作质量，当时就提出了好几种测量调幅深度系数的方法，创造了不同的仪器。

就这样，无线电技术提出要求，促进了无线电测量的发展，而新的无线电测量技术和仪器的发明，帮助解决了无线电技术所提出来的问题，使无线电技术向前跨进了一步。无线电技术的不断发展，又大大帮助了无线电测量技术和仪器的不断改善。我们知道 J.J. Thomson 为了测量电子的电荷与质量比，创造了第一个电子束管。但是只有当无线电技术发展到一个阶段，提供了工作可靠的放大器和扫描电路时，适用于实用的电子示波器才诞生，人类长期梦想着的电流电压波形的目视观察才能变为事实。随着无线电技术的不断发展，使电子示波器得到不断的改进。电子示波器的用途也日益扩展。在现代无线电测量中，电子示波器占有特殊重要的地位，有了完善的电子示波器，就给无线电定位和电视这二门无线电技术新部门的发展提供了必要的基础。无线电测量和无线电技术的发展就是这样相辅相成，彼此不可分割地紧密联系着的。

随着无线电测量技术的发展，无线电测量的方法日益完善，仪器也越来越新。不只是在无线电技术部门中要用到它，而且在国民经济的各个部门中应用得越来越广泛。因为一切被用来鉴定各种物理现象，化学现象和生产过程的物理量，都可以转换成电的参量，应用无线电的测量方法加以测定。

科学的发展与测量技术的发展有密切的关系，测量的准确度，灵敏度以及被测值数量的范围在颇大的程度上决定了科学的发展水平。测量技术达到的水平越高，则科学的成就显得愈为深广。而在另一方面，科学的发展又为测量技术的发展创立新的前提，新的途径和新的可能性。

在生产的发展与测量技术的发展之间也看到了完全相似的相互联系。现代的生产，特别

是在社会主义计划经济情况下的现代生产的特点，是极严格地遵守技术规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，现代生产的要求才能得到保证。在苏联的冶金、化学、制炼石油、纺织、食品、金属加工等工业的工厂里以及在其他各工业部门的工厂里，充满了各种各样的电测量仪器，用以检测和操纵生产过程。在我国，在生产过程中亦日益广泛地采用电子仪器。在另一方面，生产上的成就又保证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开创了更为广大的可能性。

无线电测量不只是广泛采用于生产过程中，而且在原子物理，天文，地质，医药，机械工业，建筑业等各部门亦得到广泛采用。例如：在建筑工业上用应力测量仪来测量横梁所受到的应力。勘察工业中采用光电测距仪，可以大大节省人力，提高工作效率。在地质探矿方面有地震仪可用来测量地下矿藏的深度和宽度。在机械工业上更是广泛地采用超声波来检查零件或钢板上有无伤痕裂缝的金属探伤器。在医学上亦已广泛采用电子仪器来检查和治疗各种疾病。如：心脏图示仪，用超短波来治疗关节炎，以及电睡眠机等等不胜枚举。在物理化学方面用极谱仪对各种金属进行定性和定量的分析。在天文方面用电子天文望远镜来接收天体所发射的无线电波，根据所接收到的无线电波来研究星球的各种物理化学现象。而大家在原子能展览会中，看到的许多测量 α 、 β 、 γ 的辐射仪，以及利用 α 、 β 、 γ 射线可以测量各种物理量如厚度、质量、粘度等等的电子仪器，所有这些电子仪器的产生和发展是现代科学技术和无线电测量技术发展的成果。使用电子仪器来进行各种物理量的测量，不仅是解决了某些用其它方法无法测定的物理量（如金属板上有无裂缝等），而且还由于电子仪器能连续测量及自动记录所测的数量；实施远距离测量以及与控制生产过程的执行机构通过继电器相联系；测量的高度准确、灵敏、迅速、方便；无论所测物理量的数值甚大或甚小时，测量范围都很广阔等优点。可见它对于多快好省的建設社会主义祖国，迅速改变我国“一穷二白”的落后面貌，迅速的提高我国的科学技术水平是起着多么重大的作用。

那末今后无线电测量的技术和理论将向那些方向发展呢？大体上说，它将按下面六个方向发展：

1. 对于通用仪器如频率计、功率计、电子管伏特计等等的产品质量要不断提高，也就是说要提高仪器的指标。向高精度度，宽量程，耗电小，尺寸小，使用方便，成本低廉方向发展；
2. 向更短波长的方向发展，如生产毫米波亚毫米波的各种测试仪；
3. 不断生产新品种；
4. 提高测量时间和频率标准的准确度和稳定度；
5. 向遙测方向发展，如导弹，人造卫星，宇宙火箭等等都是要用到无线电测量。利用测量仪器把宇宙外的情况测量后送回地球；
6. 向非电量的电测法方面发展。

誰都知道，旧中国是一个经济非常落后的国家。科学技术贫瘠不堪，作为现代科学技术重要标志之一的无线电电子学当然在我国无法得到反映。从电子管到各类无线电零件几乎全部由外国进口，所谓无线电工厂也只不过是进行一些安装修配工作而已，这也就充分显示出旧中国半殖民地性质的经济特点。

中华人民共和国成立后，情况就完全不同了，由于党的正确领导和无限关怀，无线电事

业也同其他各种科学技术事业一样在国民經济大发展的形势下获得了迅速的发展。

1956年制定的“12年科学发展规划”給无綫电事业提出了更加明确具体的任务，全体科学工作者都为实现这一偉大目标而发奋工作着。特别是在贯彻党中央提出的“鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义”总路綫中，取得了輝煌的成就。

实践証明：在党的领导下实行专家、技术工人相結合，大搞群众运动，学习和独创相結合，普及和提高相結合，这就是促进我国科学技术迅速发展的重要前提，在这些方針的指导下，无綫电測量技术取得了巨大的成就：不仅建立了許多專門的現代化工厂而且新的技术队伍正在成长和壮大。

在社会主义建設事业突飞猛进的今天，我們全体科学工作者，未来的建設者应该在党的领导下，高举总路綫的紅旗，发奋图强，自力更生，努力工作和学习，为把我国无綫电技术水平迅速提高，推进国民經济的高速度发展而奋斗。

