

# 測 量 電 綫 無

電 成

北 京 科 學 教 育 出 版 社

1961年7月

# 目 录

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 第一章 結論.....                               | 5  |
| § 1-1 无綫电量测的基本任务 .....                    | 5  |
| § 1-2 无綫电量测和无綫电量测仪器的发展及其应用 .....          | 5  |
| § 1-3 无綫电量测的特点及对无綫电量测仪器的基本要求 .....        | 6  |
| (一) 无綫电量测的特点 .....                        | 6  |
| (二) 无綫电量测仪器的基本要求 .....                    | 7  |
| § 1-4 无綫电量测的基本原理的同一性和不同频段中对象的不同性 .....    | 7  |
| 第二章 測量准确度的估計 .....                        | 9  |
| § 2-1 測量的类别 .....                         | 9  |
| § 2-2 測量結果的校正 .....                       | 9  |
| § 2-3 測量誤差的分类 .....                       | 10 |
| § 2-4 偶然誤差的特性 .....                       | 11 |
| § 2-5 偶然誤差的正态分布定律 .....                   | 12 |
| § 2-6 对測量精确度进行估計时所用的尺度 .....              | 14 |
| § 2-7 誤差的累积定律 .....                       | 15 |
| § 2-8 算术平均值的均方根誤差 .....                   | 16 |
| § 2-9 均方根誤差的計算 .....                      | 17 |
| § 2-10 測量結果的計算整理 .....                    | 18 |
| § 2-11 測量結果的图表整理 .....                    | 19 |
| § 2-12 在无綫电量测中測量精确度的一般概念 .....            | 20 |
| 第三章 測量用的訊号源 .....                         | 22 |
| § 3-1 对訊号源的基本要求 .....                     | 22 |
| § 3-2 RC 式音頻訊号发生器 .....                   | 22 |
| § 3-3 差頻訊号发生器 .....                       | 26 |
| § 3-4 LC 式高頻訊号发生器 .....                   | 28 |
| § 3-5 超高頻訊号发生器 .....                      | 31 |
| § 3-6 矩形电压发生器, 脉冲訊号发生器 .....              | 31 |
| 第四章 电流和电压的測量 .....                        | 37 |
| § 4-1 高頻測量的特点. 对高頻測量仪器提出的基本要求及其使用特点 ..... | 37 |
| § 4-2 磁电式仪表概述 .....                       | 39 |
| § 4-3 热綫式安培計 .....                        | 41 |
| § 4-4 热电式安培計 .....                        | 42 |
| 一、热电式仪表的工作原理 .....                        | 42 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 二、热电式仪表误差的主要来源 .....               | 46  |
| 三、高频安培计的分度和校准 .....                | 48  |
| § 4-5 静电式伏特计 .....                 | 49  |
| § 4-6 电子管伏特计 .....                 | 50  |
| 一、电子管伏特计的工作原理及其基本特性 .....          | 50  |
| 二、电子管伏特计的输入电路与输入阻抗 .....           | 51  |
| 三、单级伏特计的基本电路 .....                 | 54  |
| 四、起始电流补偿电路 .....                   | 58  |
| 五、非周期性脉动电压和脉冲电压的测量 .....           | 58  |
| 六、微小电压的测量 .....                    | 62  |
| 七、大电压的测量 .....                     | 64  |
| § 4-7 具有半导体整流器的伏特计 .....           | 66  |
| § 4-8 晶体检波式伏特计 .....               | 69  |
| § 4-9 电子管伏特计和氧化铜伏特计的校准 .....       | 69  |
| <b>第五章 电子示波器</b> .....             | 71  |
| § 5-1 引言 .....                     | 71  |
| § 5-2 低压电子射线管 .....                | 71  |
| 一、电子射线管的形式 .....                   | 71  |
| 二、电子射线管的装置 .....                   | 72  |
| § 5-3 示波器的放大器和电源设备 .....           | 76  |
| § 5-4 偏转板上加有电压时的作用 .....           | 77  |
| 一、当电压作用于一对偏转板上时, 射线的行为 .....       | 77  |
| 二、当电压同时作用于两对偏转板上时, 射线的行为 .....     | 78  |
| 三、电子射线管中波形图失真的主要来源 .....           | 80  |
| § 5-5 交流电压波形的观察 .....              | 83  |
| 一、锯齿形电压的基本参量 .....                 | 83  |
| 二、获得锯齿形电压的一些方法 .....               | 84  |
| 三、锯齿形扫描发生器 .....                   | 87  |
| 四、非周期性过程和脉冲过程的现象, 等待扫描 .....       | 92  |
| 五、射线的增辉。时标装置 .....                 | 95  |
| 六、其它各种扫描 .....                     | 95  |
| § 5-6 示波器的典型方框图与国产仪器介绍 .....       | 96  |
| 一、典型方框图 .....                      | 96  |
| 二、国产仪器介绍 .....                     | 97  |
| § 5-7 同时观察几个波形图 .....              | 101 |
| <b>第六章 振荡的频率分析。非直线性时变的测量</b> ..... | 103 |
| § 6-1 引言 .....                     | 103 |
| § 6-2 周期振荡的谐波分析 .....              | 104 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 一、图解分析法 .....             | 104 |
| 二、分离法 .....               | 105 |
| 三、外差法 .....               | 107 |
| § 6-3 非直线性系数的测量 .....     | 109 |
| 一、引言 .....                | 109 |
| 二、用单音法测量非直线畸变 .....       | 109 |
| 1. 谐振电桥 .....             | 110 |
| 2. T型电桥 .....             | 111 |
| 3. 补偿法 .....              | 112 |
| 三、用双音法测量非直线性系数 .....      | 114 |
| 1. 双电桥法 .....             | 114 |
| 2. 相互调制法 .....            | 115 |
| 第七章 相位的测量 .....           | 116 |
| § 7-1 概述 .....            | 116 |
| § 7-2 利用示波器测量相位 .....     | 116 |
| 一、根据波形图来决定被测电压间的相位移 ..... | 116 |
| 二、椭圆法 .....               | 117 |
| 三、直读的电子射线相位计 .....        | 119 |
| § 7-3 利用和差法测量相位 .....     | 120 |
| § 7-4 利用补偿法测量相位移 .....    | 124 |
| § 7-5 直读式双路相位计 .....      | 125 |
| § 7-6 利用频率变换法测量相位移 .....  | 126 |
| § 7-7 移相器 .....           | 128 |
| 第八章 频率的测量 .....           | 133 |
| § 8-1 频率的分类 .....         | 133 |
| § 8-2 频率标准 .....          | 134 |
| § 8-3 音频的测量 .....         | 134 |
| 一、引言 .....                | 134 |
| 二、比较法 .....               | 135 |
| 三、测量音频的电桥法 .....          | 137 |
| 四、利用电容器充电和放电的方法测量频率 ..... | 140 |
| § 8-4 射频的测量 .....         | 143 |
| 一、测量射频方法的一般特点 .....       | 143 |
| 二、测量射频的谐振法 .....          | 143 |
| 1. 谐振式波长计 .....           | 143 |
| 2. 压电晶体谐振器 .....          | 151 |
| 三、利用比较法测量射频 .....         | 153 |
| 1. 用差拍法比较射频 .....         | 153 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 2. 外差式波长計 .....               | 157 |
| 四、計数法——十进計数式頻率計 .....         | 162 |
| § 8-5 一次和二次頻率标准 .....         | 163 |
| 第九章 功率的測量 .....               | 167 |
| § 9-1 概述 .....                | 167 |
| § 9-2 吸收式瓦特計 .....            | 168 |
| 一、引言 .....                    | 168 |
| 二、伏特計法 .....                  | 169 |
| 三、功率的热測量 .....                | 170 |
| 1. 量热計法 .....                 | 170 |
| 2. 光測量 .....                  | 173 |
| 3. 测热电阻法和热变电阻法 .....          | 174 |
| § 9-3 通过功率的測量 .....           | 180 |
| 第十章 电路参数的測量 .....             | 183 |
| § 10-1 概述 .....               | 183 |
| § 10-2 具有集中参数的电路参数的測量方法 ..... | 183 |
| 一、伏特計——安培計法 .....             | 183 |
| 二、电桥法 .....                   | 186 |
| 三、諧振法 .....                   | 198 |
| § 10-3 具有分布参数的电路参数的測量 .....   | 209 |
| 一、傳輸綫参数的測量法 .....             | 209 |
| 二、短路同軸綫及开路同軸綫的輸入阻抗的測量 .....   | 213 |
| 三、利用測量綫測量傳輸綫的参数 .....         | 216 |
| 四、超高频电路的电桥測量法 .....           | 221 |
| 参考書介紹 .....                   | 223 |
| 某些仪器电路圖 .....                 | 224 |

# 目 录

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 第一章 結論.....                               | 5  |
| § 1-1 无綫电量测的基本任务 .....                    | 5  |
| § 1-2 无綫电量测和无綫电量测仪器的发展及其应用 .....          | 5  |
| § 1-3 无綫电量测的特点及对无綫电量测仪器的基本要求 .....        | 6  |
| (一) 无綫电量测的特点 .....                        | 6  |
| (二) 无綫电量测仪器的基本要求 .....                    | 7  |
| § 1-4 无綫电量测的基本原理的同一性和不同频段中对象的不同性 .....    | 7  |
| 第二章 測量准确度的估計 .....                        | 9  |
| § 2-1 測量的类别 .....                         | 9  |
| § 2-2 測量結果的校正 .....                       | 9  |
| § 2-3 測量誤差的分类 .....                       | 10 |
| § 2-4 偶然誤差的特性 .....                       | 11 |
| § 2-5 偶然誤差的正态分布定律 .....                   | 12 |
| § 2-6 对測量精确度进行估計时所用的尺度 .....              | 14 |
| § 2-7 誤差的累积定律 .....                       | 15 |
| § 2-8 算术平均值的均方根誤差 .....                   | 16 |
| § 2-9 均方根誤差的計算 .....                      | 17 |
| § 2-10 測量結果的計算整理 .....                    | 18 |
| § 2-11 測量結果的图表整理 .....                    | 19 |
| § 2-12 在无綫电量测中測量精确度的一般概念 .....            | 20 |
| 第三章 測量用的訊号源 .....                         | 22 |
| § 3-1 对訊号源的基本要求 .....                     | 22 |
| § 3-2 RC 式音頻訊号发生器 .....                   | 22 |
| § 3-3 差頻訊号发生器 .....                       | 26 |
| § 3-4 LC 式高頻訊号发生器 .....                   | 28 |
| § 3-5 超高頻訊号发生器 .....                      | 31 |
| § 3-6 矩形电压发生器, 脉冲訊号发生器 .....              | 31 |
| 第四章 电流和电压的測量 .....                        | 37 |
| § 4-1 高頻測量的特点. 对高頻測量仪器提出的基本要求及其使用特点 ..... | 37 |
| § 4-2 磁电式仪表概述 .....                       | 39 |
| § 4-3 热綫式安培計 .....                        | 41 |
| § 4-4 热电式安培計 .....                        | 42 |
| 一、热电式仪表的工作原理 .....                        | 42 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 二、热电式仪表误差的主要来源 .....               | 46         |
| 三、高频安培计的分度和校准 .....                | 48         |
| § 4-5 静电式伏特计 .....                 | 49         |
| § 4-6 电子管伏特计 .....                 | 50         |
| 一、电子管伏特计的工作原理及其基本特性 .....          | 50         |
| 二、电子管伏特计的输入电路与输入阻抗 .....           | 51         |
| 三、单级伏特计的基本电路 .....                 | 54         |
| 四、起始电流补偿电路 .....                   | 58         |
| 五、非周期性脉动电压和脉冲电压的测量 .....           | 58         |
| 六、微小电压的测量 .....                    | 62         |
| 七、大电压的测量 .....                     | 64         |
| § 4-7 具有半导体整流器的伏特计 .....           | 66         |
| § 4-8 晶体检波式伏特计 .....               | 69         |
| § 4-9 电子管伏特计和氧化铜伏特计的校准 .....       | 69         |
| <b>第五章 电子示波器</b> .....             | <b>71</b>  |
| § 5-1 引言 .....                     | 71         |
| § 5-2 低压电子射线管 .....                | 71         |
| 一、电子射线管的形式 .....                   | 71         |
| 二、电子射线管的装置 .....                   | 72         |
| § 5-3 示波器的放大器和电源设备 .....           | 76         |
| § 5-4 偏转板上加有电压时的作用 .....           | 77         |
| 一、当电压作用于一对偏转板上时, 射线的行为 .....       | 77         |
| 二、当电压同时作用于两对偏转板上时, 射线的行为 .....     | 78         |
| 三、电子射线管中波形图失真的主要来源 .....           | 80         |
| § 5-5 交流电压波形的观察 .....              | 83         |
| 一、锯齿形电压的基本参量 .....                 | 83         |
| 二、获得锯齿形电压的一些方法 .....               | 84         |
| 三、锯齿形扫描发生器 .....                   | 87         |
| 四、非周期性过程和脉冲过程的现象, 等待扫描 .....       | 92         |
| 五、射线的增辉。时标装置 .....                 | 95         |
| 六、其它各种扫描 .....                     | 95         |
| § 5-6 示波器的典型方框图与国产仪器介绍 .....       | 96         |
| 一、典型方框图 .....                      | 96         |
| 二、国产仪器介绍 .....                     | 97         |
| § 5-7 同时观察几个波形图 .....              | 101        |
| <b>第六章 振荡的频率分析。非直线性畸变的测量</b> ..... | <b>103</b> |
| § 6-1 引言 .....                     | 103        |
| § 6-2 周期振荡的谐波分析 .....              | 104        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 一、图解分析法 .....             | 104 |
| 二、分离法 .....               | 105 |
| 三、外差法 .....               | 107 |
| § 6-3 非直线性系数的测量 .....     | 109 |
| 一、引言 .....                | 109 |
| 二、用单音法测量非直线畸变 .....       | 109 |
| 1. 谐振电桥 .....             | 110 |
| 2. T型电桥 .....             | 111 |
| 3. 补偿法 .....              | 112 |
| 三、用双音法测量非直线性系数 .....      | 114 |
| 1. 双电桥法 .....             | 114 |
| 2. 相互调制法 .....            | 115 |
| 第七章 相位的测量 .....           | 116 |
| § 7-1 概述 .....            | 116 |
| § 7-2 利用示波器测量相位 .....     | 116 |
| 一、根据波形图来决定被测电压间的相位移 ..... | 116 |
| 二、椭圆法 .....               | 117 |
| 三、直读的电子射线相位计 .....        | 119 |
| § 7-3 利用和差法测量相位 .....     | 120 |
| § 7-4 利用补偿法测量相位移 .....    | 124 |
| § 7-5 直读式双路相位计 .....      | 125 |
| § 7-6 利用频率变换法测量相位移 .....  | 126 |
| § 7-7 移相器 .....           | 128 |
| 第八章 频率的测量 .....           | 133 |
| § 8-1 频率的分类 .....         | 133 |
| § 8-2 频率标准 .....          | 134 |
| § 8-3 音频的测量 .....         | 134 |
| 一、引言 .....                | 134 |
| 二、比较法 .....               | 135 |
| 三、测量音频的电桥法 .....          | 137 |
| 四、利用电容器充电和放电的方法测量频率 ..... | 140 |
| § 8-4 射频的测量 .....         | 143 |
| 一、测量射频方法的一般特点 .....       | 143 |
| 二、测量射频的谐振法 .....          | 143 |
| 1. 谐振式波长计 .....           | 143 |
| 2. 压电晶体谐振器 .....          | 151 |
| 三、利用比较法测量射频 .....         | 153 |
| 1. 用差拍法比较射频 .....         | 153 |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 2. 外差式波长計 .....               | 157 |
| 四、計數法——十進計數式頻率計 .....         | 162 |
| § 8-5 一次和二次頻率标准 .....         | 163 |
| 第九章 功率的測量 .....               | 167 |
| § 9-1 概述 .....                | 167 |
| § 9-2 吸收式瓦特計 .....            | 168 |
| 一、引言 .....                    | 168 |
| 二、伏特計法 .....                  | 169 |
| 三、功率的热測量 .....                | 170 |
| 1. 量热計法 .....                 | 170 |
| 2. 光測量 .....                  | 173 |
| 3. 测热电阻法和热变电阻法 .....          | 174 |
| § 9-3 通过功率的測量 .....           | 180 |
| 第十章 电路参数的測量 .....             | 183 |
| § 10-1 概述 .....               | 183 |
| § 10-2 具有集中参数的电路参数的測量方法 ..... | 183 |
| 一、伏特計——安培計法 .....             | 183 |
| 二、电桥法 .....                   | 186 |
| 三、諧振法 .....                   | 198 |
| § 10-3 具有分布参数的电路参数的測量 .....   | 209 |
| 一、傳輸綫参数的測量法 .....             | 209 |
| 二、短路同軸綫及开路同軸綫的輸入阻抗的測量 .....   | 213 |
| 三、利用測量綫測量傳輸綫的参数 .....         | 216 |
| 四、超高频电路的电桥測量法 .....           | 221 |
| 参考書介紹 .....                   | 223 |
| 某些仪器电路圖 .....                 | 224 |

# 第一章 緒 論

## § 1-1 无綫电量測的基本任务

无綫电量測是指无綫电电子技术中所用全部頻率範圍內（从音频一直到超高频）的一切电气特性的測量。因此无綫电量測課程的基本任务是使学生能掌握无綫电电子技术測量實踐中所遇到的主要物理量的基本測量原理和測量方法。它的基本任务一般包括下列各种測量：

1. 电路元件电参数的測量如电阻值，电感量，綫圈的品质因素等等。
2. 表征无綫电設備工作状态的物理量的測量；例如电流、电压、功率等等的測量。
3. 表征无綫电設備的质量指标的一些物理量的測量例如效率，放大系数，通頻带等等的測量。
4. 电磁場强度，干扰电平以及諸如此类的一些物理量的測量。

任何无綫电电子設備的制造，調整，运轉以及維修都离不开无綫电測量。因此，必須很好地掌握現代的无綫电測量技术，熟悉現有各种无綫电測量仪器的原理及其应用。

## § 1-2 无綫电量測和无綫电量測仪器的发展及其应用

既然无綫电量測的任务包括一切电气特性的測量，因此一切无綫电电子技术都离不开无綫电測量，沒有它就不能确定一些物理量，不能說明工作情况的特征。許多无綫电电子技术部門的发展与提高是与精确可靠的測量方法及測量設備的研究有着紧密的联系。因此測量技术的发展与无綫电电子技术的一般发展是分不开的。随着无綫电电子技术的发展，促使无綫电測量的发展，帮助了无綫电量測方法和仪器的不断改善。反过来无綫电量測方法和无綫电測量仪器的不断改善，又帮助和解决了无綫电电子技术所提出来的問題，促进无綫电电子技术向前跨进一步。就这样，这二門科学是同时开始，相互促进，共同提高，彼此不可分割地紧密地联系着的。

随着无綫电电子技术及其測量仪器的日益完善，由于无綫电电子技术的优越性——高的灵敏度、精确度，既便于远距离控制，又能实现自动控制。无綫电量測技术就被应用到其它的科学部門中去。到現在已經很难指出那一个科学技术部門中沒有应用到无綫电电子技术及其測量仪器的。无綫电量測仪器在其它科学部門中的应用，真是不胜枚举，例如物理学中的放射性測量，化学中的氫离子濃度測量，物理化学中的微波頻譜的測量，医学中的脑波和心动的測量，机械工程中的超声波金屬探伤及部件加工，遙控与自动化中的遙測与非电量的电測法，天文学中的宇宙綫的測量，以及時間——頻率标准的确定，食品工业中的包装溫度計，燃料工业中石油产品的連續測定仪，地质学中的探矿的电測法，紡織工业中織物漂白度的鉴定仪，动力工业中鍋炉內水垢厚度測量仪等等，此外人造宇宙火箭中軌道的控制及其所探索到的天体物理量值的遙測等等更是显明輝煌的成就。

### § 1-3 无线电量测的特点及对无线电量测仪器的基本要求

#### (一) 无线电量测的特点:

如上所述,无线电量测的任务主要指无线电电子技术所用全部频率范围内的一切电气特性的测量。由此可见无线电量测的第一个特点就是频率范围极其广阔,最低从几分之一赫以至最高达几万兆赫( $10^{10}$ )或更高。

无线电量测的第二个特点:就是量程很广例如测量与观察极短的瞬时过程,极微弱的讯号电压。又例如在功率测量中,测量的对象从极微弱的几个微瓦( $10^{-6}$ )以至达到几个兆瓦( $10^6$ )量程达 $10^{12}$ 之广。

由此不难理解,在电工量计中所使用的仪器和测量方法,只能有限的,局部的使用于无线电量测中。无线电量测要根据自身的特点,在测量方法上,技术上和仪器上都要作很多的特殊的考虑与处理。特别是高频时要考虑寄生耦合问题,分布参数影响,以减免不应有的重大错误。

我们知道,由于集肤作用,元件在高频时的电阻值不同于直流或极低频率(例如工业用频率或音频)情况下的电阻值,而是频率的一个函数。至于电抗性元件,则在高频时,也不能单纯地把他们看成为电路中一个性质不变的参量。例如,在频率很高时,不但线圈的电阻值会增加,而且圈与圈间的潜布电容的影响也将变得很显著,这样在很高的频率时,就应当把电感线圈看成为一个振荡回路,它具有自己的固有频率 $f_0$ ,当工作频率高于 $f_0$ 时,电感线圈就失去其电感的作用,而变成一个电容性阻抗了。同样当工作频率很高时,电路中的潜布电容的影响是不能忽略的,而一段短路线圈本身所具有的分布电感量,其影响也可能是不可忽视的,因此在高频进行测量时,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的掌握值的杂散电感电容作斗争,极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,在低频时显得可靠的方法和出色的仪器,用之于高频的测量时就很可能导致彻底的失败。

在无线电量测中,大多数的场合是测量那些在电工测量中也测量的量。但无线电测量中却有着许多重要的特点,这是由于无线电器械的特点,如其中电流的频率较高、电阻较大和电流较小等原因所引起的。例如在直流电流与直流电压测量中,两种测量都用磁电式仪表,但是在无线电量测中,测量电流用的仪表通常都具有很高的灵敏度,而测量电压用仪表普遍都具有很高的输入阻抗。在测量电子管的板极或栅极电压时,就必须使用输入阻抗很高的伏特计。通常在电工测量中所使用的伏特计具有较小的输入阻抗,如果把它并联在阻抗为几千和几万欧姆的无线电线路里,就会使线路中的电压分配显著地改变,而在测量时发生错误。在某些场合,当接入伏特计时电压分配的变动竟如此严重地影响到电路的情况,以致电路停止工作。此外,接入测量高频电路中电流、电压直流分量的磁电式伏特计和安培计要给电路引入大的对地寄生电容,而产生高频寄生电路。因此,安培计、伏特计和其它的测量仪器必须尽可能地接在无线电路中最近“地”电位的地方。

交流电流和交流电压的无线电测量具有更多的特点,它的高的频率使得广泛应用在电工测量上的很多型式的仪表不能应用。例如在电力上得到了最广泛应用的电磁式仪表就完全不能用在高频电路的测量上。即使在较低频率(100—500周),用这种仪表时它的感抗和铁心内涡流损耗也显著地增加,因而仪表的读数不仅决定于被测量电流和电压的数值,且与频率

有关。这样的仪表只能使用在进行校准过的那个频率上；可是在无线电测量中，通常需要利用能在一个宽带上应用的仪表。由于同样的原因，无线电测量中也不用动铁式的仪表。在高频电路里通常也不应用的电动式仪表，最近由于对它的测量系统拟出了新颖的结构，只在一些特殊场合中得到应用。

能进行音频和高频测量的电子式仪表，热电式仪表及检波式仪表在无线电测量中得到了最广泛的应用。

## (二) 对无线电测量仪器的基本要求

在无线电测量中所有的测量可以归纳为两大类：

1. 电能的量的测量（电压、电流、电功率、频率等等）
2. 电路元件参数的测量（电阻、电感、电容、阻抗、线圈品质因素等等）。但是归根到底，一切的测量最终只能是电磁能量的测量，因为只有在测量仪器的活动机构上作功，才能使仪器的读数起变化。换句话说，在测量过程中，测量仪器必然要消耗一部分被测电路系统中的能量。也就是说，测量仪器成为被测电路系统中的一个额外负载。这就改变了被测电路原来的工作状态，应该注意，在无线电技术中所碰到的电磁能量往往是很微弱的。这就要求测量仪器本身在工作时所消耗被测电路的能量，应该是愈小愈好。

上面曾经指出过，无线电测量的二大特点是频率范围与量程都非常广阔，无线电仪器当然要适应这二大特点。

因此对无线电测量仪器的基本要求是：

1. 在工作频率范围内保持一定的准确度；
2. 有一定灵敏度和稳定度；
3. 对被测电路影响小，即耗能小，这样就要仪器本身的输入阻抗大。
4. 使用方便，构造简单。

根据上述要求，很明显的在电工量计中所应用的那些仪器，虽然它们适用在工业频率，但是不是都可以应用到无线电测量技术上去。

此外在不同频率范围、测量的对象也不全相同，例如在超高频段内，很少测量电压电流而往往是测量功率。

因此在不同频率范围所运用的仪器及测量方法也有所不同。

## § 1-4. 无线电测量的基本原理的同一性和不同频段中对象的不同性

无线电测量方法像其它所有测量一样，可以分为下列几种：

1. 直接读数法：直接由指示仪器读数决定；例如安培计、伏特计、瓦特计等等；
2. 比较法：其实质是将被测量与一已知量进行比较，一般在用比较法测量时需要用各种辅助电路，（如补偿电路、电桥电路等）

根据比较时所被应用方法不同共可分为零值法、较差法、代替法。所谓零值法是将被测量与已知量作用抵消到零，例如调节电桥平衡，指示器读数为零，根据平衡条件由已知数值决定未知数值。

所谓较差法，是利用仪器测量未知量与已知量之间的差由差值和已知值来决定未知量。

所谓代替法，是用已知量来代替被测量维持读数不变的方法。

一般比較法准确度較高，但測量手續比較麻煩，而直接讀數法簡單、方便，但准确度不高。

### 3. 間接法

其特征是用測量輔助量的方法，然後根據輔助量與未知量關係求出未知值。

例： $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  測出  $LC$  後根據公式求出  $\omega_0$ 。

無線電量測方法也可按測量儀器及測量線路的作用原理來劃分，從這個觀點來講，廣示波器法、補償法、電橋法、差頻法、諧振法、計數法、熱效應法、光學測量法等等。

由於近代脈沖技術發展，利用脈沖技術方法愈來愈廣泛被採用，隨著無線電技術正向著愈益短波的方向發展，在超高频頻段中採用熱效應法、光學測量法，利用光學中的干涉和繞射現象，馬留斯定律和電磁波有質作用等進行測量。

應當指出的，無線電量測的原理並不隨頻率而改變，而當頻率範圍擴展時，主要是測量設備元件的結構形式有所改變而已。

雖然無線電量測的基本原理有同一性，但是不同頻段測量性質亦有所不同，如果在低頻（音頻）時測量電壓、電流、電感、電容和電阻等，那麼在高频時，測量頻率、品質因素、電場強度等便具有更大的意義。在電工測量中起主要作用的功率測量，在低頻和高頻里就進行得較少，而在超高频里卻又用得更多。在超高频中是測量行波系數、反射系數及一些其他在較低頻率中完全不測量的量，而電流和電壓是幾乎不測量。

甚至同一的量，在不同頻段里常也要求用不同的測量儀表和測量方法來進行。例如低頻電壓通常用檢波式伏特計測量，但是在高频就廣泛地採用了電子管伏特計。在電力上，功率直接電動式或感應式儀表去測量，而在超高频中則用光电式、熱量計式、電阻輻射熱測定器式和基於其它在較低頻率中不用或很少使用的測量原理的儀表去測量。

## 第二章 測量准确度的估計

### § 2-1 測量的类别

任何測量可以如下分类：

1. 直接測量与間接測量；
2. 必須的測量与多余的測量；
3. 等精度測量与非等精度測量。

直接測量——当測量的結果直接显示出被測量的量值时，这种測量称为直接測量，例如伏特計来測量电压就是这种情况。

間接測量——当我们并不直接去測量待測的量，而是去測量其它的一些量，得到結果以后，經過計算而求出待測的量。例如我們本欲測量一个电阻上的电压降，但是我们却并不直接用伏特計来測量它，而是設法測量流过这个电阻上的电流  $I$ ，以及电阻器的电阻  $R$ ，然后通过計算来求得待測的电压  $u=IR$ 。

必須的測量——为求得被測量的量值所必不可少的量称为必須的測量，例如，要測量一个电压的值，用一个伏特計，最低限度要进行的一次測量，这一次測量就是必須的。又如在上述間接測量电阻上的电压降时，就必须进行两次測量，一次測量电流的有效值，另一次測量电阻值。

多余的測量——超过了必須的測量时，其余的都是多余的測量，例如測量一个电压，我們用伏特計去測量  $n$  次，那么其中的一次是必須的，其余  $(n-1)$  次都是多余的。

等精确度的測量——对同一个量进行多次測量，而且在多次測量中都使用相同的方法，相同的仪器，并且每次量測都在相同的条件下进行，而且每次都以同样的細心与注意来进行工作的，总而言之，在每次測量中，能够影响到測量精确度的一切条件都維持不变时，那么这一系列的測量就是等精确度的。

### § 2-2 測量結果的校正

一般說来，任何次測量总不免有誤差的，即使我們使用最准确的仪器，极其精密的来进行測量，所得的結果也不能保証是被測量的真值，而只能說是它的近似值。重复多次等精确度的測量，所得的結果不是完全一样的，这一个事实就証明了上面的說法，測量誤差是由各种各样的原因产生的，要完全掌握并消除一切被測誤差来源一般說来是不可能的，此外經驗指出了，不同的誤差在測量过程中出現的方式也是不尽相同的。

測量的质量是以測量的精确度来作为指标的，而通常則是根据測量誤差的大小来判別量測的精确程度，量測結果的誤差愈小，測量則就愈精确，反之，測量就是愈不精确。如果能够掌握那些不可避免的測量誤差的产生的原因及其規律，就有可能与之斗争而达到一定的測量精确度。

直接測量的誤差取决于測量方法及应用的測量仪器，測量时的环境以及进行測量的人。

間接测量的誤差取决于其中直接测量的精确度以及所应用的計算公式的准确程度。

仅仅进行了必須的测量，对于测量的結果的誤差是无法判断的，只有在有了多余的测量之后，測量結果才能被认为是可靠的。依靠多余的测量可以提高测量的精确度，判断测量的精确度，发现并消除可能产生的計算錯誤及量測差錯。

假定被测量的真值是  $x$ ，而实际測得的值为  $a$ ，两者差額

$$\Delta = a - x$$

即称为量測的真誤差，而真誤差的負值

$$a_0 = x - a$$

即称为对实测值  $a$  的校正数。

校正数与誤差的符号也是相反的，因此为了改正有誤差的測量結果，應該取它与校正数的代数和，即

$$x = a + a_0$$

## § 2-3 測量誤差的分类

根据誤差的表示方法可分为絕對誤差和相对誤差

絕對誤差

$$\Delta = a - x$$

相对誤差

$$r = \frac{\Delta}{x} \approx \frac{\Delta}{a} \%$$

$a$ ——測量值       $x$ ——被測真值

根据产生誤差的来源，可以将測量誤差划分为仪器誤差，人身誤差和外界誤差。

根据誤差产生的規律特征，可以将誤差划分为系統性誤差、偶然性誤差和差錯。

仪器誤差——由于仪器本身的精确度有限而产生的誤差，称为仪器誤差。每一个測量仪器都有一个預定的精确度，仪器的精确度愈高，則該仪器就愈复杂，而且其价值也愈昂貴。絕對准确的仪器是没有的，与仪器誤差进行斗争的方法在于深刻的研究仪器，細心地对待它并维护它，适当地对它进行必要的調整，并在測量結果中引入相应的校正。

仪器本身的精确度通常指示在仪器上而或載于仪器的說明书中。至于标示的方式，即随仪器的类别与量程而异。

一般仪表的精确度通常是以最大相对額定誤差来表示的，并据此分为 7 級：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 及 4.0 級，例如一个滿标刻度为 150 伏的 1.5 級伏特計在測量时，所能产生的絕對誤差将不会超过  $150 \times 1.5\% = 2.25$  伏。

而且所可能产生的絕對誤差是与被测电压的大小无关的，如果用这样的伏特計来測量电压，測量結果为 100 伏，这就意味着被测电压的真值将为  $100 \pm 2.25$  伏，或者換句話說，被测电压的真值将在 97.75 伏至 102.25 伏之間，如果測得值为 10 伏，則被测电压的真值将为  $10 \pm 2.25$  伏，或者說，将在 7.75 伏至 12.25 伏之間。

有些仪器是以最大相对誤差来标志其精确度的，例如 YM-2 型通用电桥在測量 5 至 10 毫亨时的精确度为  $\pm 2\%$ ，这就是說，当測得值为 10 毫亨时，絕對誤差不超过  $10 \times (\pm 2\%) = \pm 0.2$  毫亨或者說被测电感的真值将在 9.8 至 10.2 毫亨之間。如果測得值为 5 毫亨，則絕對誤差将不会超过  $5 \times (\pm 2\%) = 0.1$  毫亨，換言之，被测电感的真值将在 4.9 至 5.1 毫亨之間。

除了基本誤差之外，无綫电測量儀器隨頻率範圍和量程的不同，有時還有附加的誤差，附加誤差有時仍然用最大相對誤差來表示，有時則用最大絕對誤差來表示，例如 EMG-1131 型音頻電子管伏特計在測量 1000 赫的電壓時，精確度為  $\pm 3\%$ （基本誤差）；當被測電壓的頻率為 25 赫至 100 千赫時，附加誤差為  $\pm 2\%$  而當被測電壓的頻率為 100—500 千赫時，附加誤差為  $\pm 10\%$ 。此外，由於供電電源的電壓變化 10% 時，附加誤差為  $\pm 2\%$ ，因此當供電電源電壓有變化（變化在 10% 以上）時，測量頻率為 10 千赫的電壓時，可能產生最大相對誤差將為  $(\pm 3\%) + (\pm 2\%) + (\pm 2\%) = \pm 7\%$ ；又如 YM-2 型通常用電橋在測量小於 5 毫亨的電感時，除了  $\pm 3\%$  的基本誤差外，還有  $\pm 5$  微亨的附加絕對誤差。這就意味着，假如測得值是 1000 微亨的話，那麼可能產生的最大絕對誤差將等於：

$$\pm [(1000 \times 3\%) + 5] = \pm 35 \text{ 微亨}$$

**人身誤差**——人身誤差是由於人類感覺器官的不完善而產生的測量誤差。例如，由於人耳不能聽聞頻率在 16 赫以下的振動因而在用差拍法測量頻率的時候，就會產生 16 赫的絕對誤差。又如在應用諧振法進行測量時，由於視覺的缺陷和手指調整的不靈活性便不能調到使迴路處於真正的諧振點——不是過頭了便是還不到，這就產生一定的測量誤差，熟悉的實驗技巧，實驗的小心在意以及對於所測量結果，採取批判性的處理等等都可以幫助減小人身誤差。

**外界誤差**——在測量過程中，由於外界環境（溫度、濕度、氣壓，外界電磁場干擾等）的變化而引起的測量誤差稱為外界誤差。

**系統誤差**——在測量過程中所產生的一些誤差，它們是恒定的或者是遵循着一規律變化的話，那麼這些誤差就稱為系統誤差。

系統性誤差可能是由於下述一些原因而引起的，儀器指示不夠正確，測量方法錯誤，外界作用的恒定的或單方向的影响等等，系統性誤差應從測量結果中清除掉。

假如在相同的條件下，反復多次進行同樣的測量，那麼系統性誤差的值基本是不變的，在大多數情況下，假如系統性誤差在一長時期內保持恒定的話，那麼，就可以預先消除它。

消除系統性誤差的辦法，或者通過對測量結果進行校正，或者通過選擇適當的測量方法和測量條件，或者是改善所用測量儀器的結構。如果系統性誤差隨時間而有顯著變化，那麼就得要經常調整校準儀器，在許多情況下，產生系統性誤差的原因是難以消除的，在這些情況中，通常是採取對多次測量結果進行比較的方法，並根據經驗批判地以實驗的方法來找出誤差的來源對測量的影响，同時假如改變了測量方法可使單方向因素的影响大大地減小，因而一組系統誤差即轉變為一組偶然誤差。

無法消除的系統性誤差對測量結果的影响稱為系統性誤差剩餘影响。

**偶然誤差**——隨機的偶然性誤差的出現是沒有明確的規律性的，是具有偶然性質的，同時也是不可避免的，偶然誤差都是隨機量，它們雖然沒有明確的規律性，但是卻有統計學上的規律。這些規律將在下面闡述。

**差錯**——測量差錯是由測量時，犯了過失或錯誤而產生的，例如在電表上讀數時，讀錯了讀到另一條刻度等等。

顯然，含有測量差錯的測量結果應該剔除掉。

## § 2-4 偶然性誤差的特性

實踐的經驗和概率論的研究都證明了在一系列等精確度測量中，偶然性誤差具有下列四



个特性:

1. 绝对值相等的正误差与负误差, 此出现的可能性相等;
2. 绝对值小的误差在测量中出现的次数比较多, 而绝对值大的误差出现的次数比较少;
3. 在某一定的测量(系统中)环境中, 偶然误差的绝对值不会超过某一定的限度;
4. 随着对同一量所进行的等精度测量次数的增加“偶然误差的代数”和有趋向于“0”的趋势。

第四点特性可以直接由第一点特性引伸出来。

上述的四个特性, 只有当测量的次数很多时, 才能表现出来, 而且测量的次数愈多, 就表现得愈接近。

在上述四个特性中, 其中第一个特性说明误差方向的规律性, 第二个特性说明误差大小的规律性; 第三个特性说明测量的条件, 应当根据这个特性来确定每一次量测过程中所允许的误差范围; 第四个特点表示偶然性误差, 在大量测量过程中的抵偿性能。

从偶然误差的第四个特性看来, 要减少偶然误差, 对测量结果的影响, 唯一的办法就是对同一个量反复进行多次测量, 然后取测量结果的算术平均值, 作为最后的结果, 显然  $A$  是被测量的量的真值  $x$  的一个最近似值, 因为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \Delta_i)}{n} = x + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} \quad (2-1)$$

而根据偶然误差的第四个特性, 当  $n$  无限增加时,  $\sum \Delta_i \rightarrow 0$ 。以下的讨论, 只是指不可避免的偶然性质的误差而言。

## § 2-5 偶然误差的正态分布定律

令  $x$  为某被测量的真值, 而  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n$  分别为这个量的  $n$  次等精度测量的结果。测量的真误差为:

$$\Delta_1 = a_1 - x$$

$$\Delta_2 = a_2 - x$$

.....

$$\Delta_i = a_i - x$$

.....

$$\Delta_n = a_n - x$$

假定以递增的顺序将这些误差分为若干组, ——例如误差值:

由 0 到 +1 的误差一共有  $m_1$  个

由 +1 到 +2 的误差一共有  $m_2$  个

由 +2 到 +3 的误差一共有  $m_3$  个

由 +3 到 +4 的误差一共有  $m_4$  个

由 +4 到 +5 的误差一共有  $m_5$  个

根据偶然误差的第一个特性, 可以讨论误差值

由 0 到 -1 的误差一共有  $m_1$  个