無綫电測量

B. Ю. 罗金斯基講

高等教育出版社

無 綫 电 測 量

B. Ю. 罗金斯基講
成都电訊工程学院 201 教研組譯

高等教育出版社

本書系根据苏联專家罗金斯基（B, Ю. Рогинский）在成都电訊工程学院为研究生和进修教师講課时所用的講义"無綫电測量"（Радиотехнические измерения）譯出的。

本書討論与現代無綫电仪器及設备中所用各波段的無綫电測量有关的諸問題。除了闡明測量的物理过程、必需的数学运算以及綫路圖的分析以外，本書还簡單地叙述了最常用的無綫电測量仪器。

本書可作無綫电工程高等学校的教材，同时也可供無綫电工程方面的工程技术人員作参考。

本書由成都电訊工程学院201教研組錢含光、陆梁韵、黃順吉担任翻譯工作，由徐秉錚校訂章一，二，三章，張世箕校訂第四，八，十一，十二，十三章，彭康强校訂第六，七，九章，彭日知校訂第五，十，十四章，最后由徐秉錚总校一遍。本講稿校訂工作得到研究生和进修教师的协助。

無　綫　电　測　量

B. Ю. 罗金斯基講

成都电訊工程学院201教研組譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

（北京市書刊出版業營業許可証出字第054号）

京华印書局印刷　　新华書店發行

統一書号15010·687 開本787×1092 1/16 印張23 2/8 插頁7 字數503,000 印數0001—2,200

1958年10月第1版　1958年10月北京第1次印刷　定價(10)¥3.00

序

本課程是在1956—1957学年在成都电訊工程学院为中华人民共和国的研究生和其他高等学校的进修敎师講授的。这一課程的主要任务如下:

1. 給听講者以現代的無綫电技术中測量技术方面的必需知識,同时考虑到大多数的听講者对这一技术領域还不够熟悉;

2. 編写本講稿的另一任务是为了使那些准备講授無綫电測量課程的听講者能利用它作为主要敎材;

3. 培养听講者,使他們能鑽研“無綫电測量仪表的計算和設計”这一課程,以及能独立設計和指导学生的畢業設計。

按照这些任务,在課程中所包括的若干問題已超出普通課程的范圍,尤其是在講稿中介紹了一部分具体型号的仪表,而这些仪表主要是在苏联制造的。这样引述敎材是恰当的,因为实际仪表的叙述是为了說明所提出的理論性問題。很遺憾,由于講稿的容量和講課时数的限制,不可能充分地这样作,因而在講稿的許多章节中,沒有相应的叙述材料。

除了本敎材外,在最近期間將出版相应的叙述無綫电測量仪表的專門書籍以及完整的無綫电測量实驗指导書。

目前关于無綫电測量問題方面还沒有足够的書籍,特别是中文的書籍。已有的某些苏联書的翻譯本的缺点在于对中国青年学生的特点估計不足。

編写本講稿时,考虑到了已有的材料和已出版的書籍。因此本講稿的作者并不强求材料叙述的独創性,而且毫無疑問地認为可以繼續改善叙述法,以及可以繼續改善对無綫电測量課程的敎学法。

本講稿的譯者錢含光工程师、成都电訊工程学院無綫电基础敎研組主任徐秉錚副敎授、張世箕講师和哈尔濱工業大学进修敎师彭康强积極地参加了把本講稿譯成中文的工作,对全部講稿进行系統的研究,并参加原稿印成中文的准备工作。作者深深地感謝这些同志为了更好地敎育中国人民的青年而不吝惜自己的精力。

对本書的任何意見請寄成都电訊工程学院。

B.Ю.罗金斯基

目　录

緒　論

現代無綫电技术各部門(無綫电定位、無綫电广播、电視等等)的一般情况的特征是在各种無綫电測量的發展和应用方面，已有很高的水平。許多無綫电技术部門与精确可靠的測量方法及測量設备的研究有着不可分割的联系。虽然無綫电測量是一般無綫电技术中的独立部門，但是無綫电測量技术的發展与無綫电技术的总的發展是分不开的。随着無綫电技术的發展，無綫电測量的方法亦愈益完善，制造出許多新的測量仪器和設备。例如：無綫电發明者 A.C.波波夫(Попов)研究船用無綫电台时，他不得不研究用来測量小电容量的差接电桥电路。借助于这个仪器，波波夫确定了船上金屬索具对天綫电容量的影响，这样就使他有可能选擇最好的船用天綫，这种天綫保証無綫电通訊达到最远的距离。無綫电技术和無綫电測量同时發展的类似事例可以从許多無綫电技术部門中看出来。例如：苏联最巨大的無綫电台的建設者——苏联科学通訊院士 A.A.明茨(Минц)教授在建設电台时，同时研究出了調制計，可利用它来监察調制度。还可以举出 Л.И.孟捷尔士达姆(Мандельштам)、Д.Н.巴巴列克西(Папалекси)、M.B.舒列依金(Шулейкин)、M.A.邦奇-伯鲁耶維奇(Бонч-Бруевич)及其他許多最重要的国内(苏联)及世界的科技工作者的例子。

以下所講的無綫电測量課程幷不完整地包括所有可能有的無綫电測量，而仅仅是基本的無綫电測量。特种無綫电測量通常在相应的專門課程中講授。

第一章　無綫电測量概論

§1. 測量的任务、性質和方法

A. 無綫电測量的任务

無綫电測量的任务包括下列几点:

(1) 确定和檢查無綫电設备的綫路和个别元件的参数,其中包括电阻(R)、电容(C)、电感(L)、互感(M)、品質因数(Q)、放大系数及衰减及其他許多类似的量的測量。

(2) 确定表征無綫电設备的工作狀态的数値,其中包括电流、电压、功率、頻率、調制系数及其他許多类似的量的測量。

(3) 确定無綫电設备的質量指标,如效率、非綫性畸变系数和其他許多类似的指标。

(4) 确定干扰的特性,測取發射和接收的方向特性曲綫,測量場强等等。

Б. 測量的性質

測量的性質决定于測量的目的,測量所需的仪表、以及測量是在何种情况下进行的。可以將差不多所有的無綫电測量分成三类:运轉的、生产的和研究的。

运轉的測量的特征,通常是在測量的精确度方面要求較低,可是要求在測量的方法上須簡單而可靠,以保証無綫电設备不断地工作。

生产上的測量与利用該無綫电設备的生产特点有关,对这种測量的較高的要求为測量过程簡單,不需要熟練人員来操作。

研究的測量可能是各种各样的。在測量的精确度方面有很高的要求。

所有無綫电測量,或是以直流电,或是以交流电来进行,量程極广,頻率范圍很寬。这也就是測量仪表和測量方法式样繁多的原因。例如:电阻可以用直流电測量,同样也可以用頻率达几百兆赫的交流电測量。被測电阻的大小通常也可以在很大范圍內变动,例如,从百分之几欧到几十兆欧。

B. 測量的方法

所有無綫电測量的方法可以分为下列几种:

(1) **直讀法**: 其特征是应用直接指示的仪表(例如:安培計、伏特計、瓦特計等等)。

(2) **間接法**: 其特征是用測量輔助値的方法来求出未知値,輔助値与未知値之間有着已知的关系。例如:測量場强之目的是为了确定發生器發射的功率。

(3) **比較法**: 其实質在于將待測値所产生的效果和已知値所产生的效果相比較。一般在用比較法測量时,利用各种輔助电路(如补償綫路、电桥电路等)。

上述每一种测量方法又可以按测量仪表及测量电路的作用原理进一步分成若干相应的方法。从这个观点来說，諧振的、热量計的、光电的、示波器的及补偿的方法是在無綫电测量中应用的最重要的方法。

§2. 測量的誤差

在無綫电設备的裝配和調整中，要求高度的测量的精确度。同样，研究上的测量亦要求很高的精确度。这也就是为什么有时为了要得到必要的测量精确度(特别是在高频时)，必須采用在一般情况下所不用的特殊的测量方法。

测量的精确度由誤差来决定，允許的誤差愈小，则测量精确度愈高。

通常测量的誤差可以分为絕对的与相对的兩种。

测量的絕对誤差值为:

$$\Delta X = A - X,$$

这里 A——被测量的物理量的眞实值;

X——該物理量的测量值。

取相反符号的絕对誤差一般称为修正值。

测量的相对誤差可有三种形式:

A. 测量的眞正相对誤差

$$\gamma_{\partial} = \frac{\Delta X}{X} \text{ 或 } \gamma_{\partial} = \frac{\Delta X}{X} 100\%;$$

Б. 测量的标称誤差

$$\gamma_{н} = \frac{\Delta X}{A} \text{ 或 } \gamma_{н} = \frac{\Delta X}{A} 100\%;$$

B. 测量的折合誤差

$$\gamma_{np} = \frac{\Delta X}{A_{np}} \text{ 或 } \gamma_{np} = \frac{\Delta X}{A_{np}} 100\%,$$

其中 A_{np}——借助于該仪表所测得的被测值的上限。

在上述各关系式中，所采用的被测数量的眞正值 X 是未知的，因而测量誤差的精确值亦难于确定。为了估計测量的精确度起見，可以只定出誤差值 ΔX 的范圍。这一任务一般根据测量时所使用的仪表的說明書中的数据来解决，或者由多次测量同一值的方法来解决。

A. 按仪表說明書上的数据确定测量誤差

众所周知，电的测量仪表按其精确度可分为 5 級，并且級别是由表 1-1 所示的折合相对誤差的極限值来决定的。

除上述的基本测量誤差以外，还規定电气仪表依賴于频率及周圍介質溫度变化的誤差定額。此外，也应計及被测电流或电压的频率的影响，以及外界磁場及电場的影响。

在無綫电测量电路內使用电气测量仪表时，不但必須正确地选擇仪表的精确度的級别，

并且要正确地选擇其量程。否則会發現誤差超过仪表級别所規定的最大誤差値好几倍，玆举例說明上述的情况：

表 1-1.

仪器的級别	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5
基本的相对誤差（折合誤差）(%)	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5

假定要测量电压 $U=10$ 伏。若选用一只测量上限为 $U_{np}=75$ 伏、0.5 級的伏特計［参閱Г. Л. 希古林(Шкурин)著："电气測量仪表手册"Справочник по Электрический Измерительным Приборам, 53 頁, M106 型伏特計］則測量的絕对誤差为：

$$\Delta X=\pm\frac{0.5\times 75}{100}=\pm 0.375 \text{ 伏}$$

于是測量的眞正相对誤差等于：

$$\frac{\Delta X}{X}100\%=\pm\frac{0.375}{10}\times 100\%=\pm 3.75\%.$$

若选用測量上限 $U_{np}=15$ 伏的同样的仪表，則其測量的絕对誤差和眞正的相对誤差將分别等于：

$$\Delta X=\pm\frac{0.5\times 15}{100}=\pm 0.075 \text{ 伏};$$

$$\frac{\Delta X}{X}100\%=\pm 0.75\%,$$

亦即比第一种情况要小得多。

無綫电仪表的精确度通常由其最大的相对誤差来决定，这个誤差値与被测値的最大值無关。例如，若指出測量的精确度为 $\pm K\%$，則被測値为 $X(1\pm K\%)$。無綫电仪表的第二个特点是：当測量很小的数量时，不但指出相对誤差，而且同时还有絕对誤差。后者可用下列例子来說明。

实驗室用的 УМ-2 型通用电桥可以測量 5 到 10 毫亨的电感，其精确度为 $\pm 2\%$，而測量小于 5 毫亨的电感时，其精确度为 $\pm 3\%$、± 5 微亨。若需測量 2 毫亨及 200 微亨的电感，則在第一种情况下，电感

$$L=2 \text{ 毫亨 } \pm 0.03\times 2\pm 5 \text{ 微亨}=2\pm 0.065 \text{ 毫亨},$$

这时測量誤差为

$$\Delta L=\pm 0.065 \text{ 毫亨}。$$

在第二种情况下，电感及測量誤差將分别为：

$$L=200 \text{ 微亨 } \pm 0.03\times 200\pm 5=200\pm 11 \text{ 微亨};$$

$$\Delta L=\pm 11 \text{ 微亨}。$$

显然，在測量很小的数量时，絕对誤差値具有重要的意义，它可以变成比相对誤差値大。在測量大的数量时，相对誤差値具有重要的意义，而絕对誤差可以忽略不計。

Б. 誤差的正态分布律

測量誤差出現的概率取决于許多原因。在概率理論內有誤差的概率分布律，該規律使

我們可以建立誤差值和出現誤差的概率間的关系。圖 1-1 所示为誤差的概率分布律的曲綫 $Y(\Delta X)$。从誤差概率分布律 $Y(\Delta X)$ 中可見，其値介于 ΔX_1 及 ΔX_2 范圍內的誤差，其出現的概律等于圖 1-1 中所示的画有斜綫的面积。上述情形可解析地表示如下列方程式:

$$P(\Delta X_1 \leqslant \Delta X \leqslant \Delta X_2) = \int_{\Delta X_1}^{\Delta X_2} Y d(\Delta X).$$

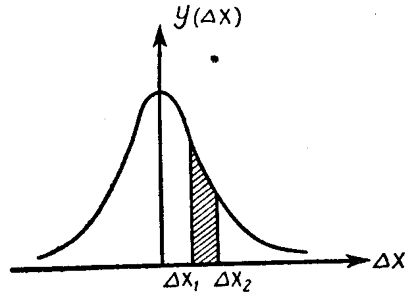

圖 1-1. 誤差分布律的曲綫(高斯曲綫)。

曲綫 $Y(\Delta X)$ 和橫軸所包的全部面积等于从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 范圍內誤差出現的概率。因这一概率等于 1, 故曲綫 $Y(\Delta X)$ 所限的总面积也就等于 1. 亦卽,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y d(\Delta X) = 1.$$

用同一只仪表进行多次測量时發生的誤差是由大量的各种各样因素影响的結果，这些因素往往很难估計到。但是大多数測量的誤差值服从于下列三条規律:

(1) 小的誤差比大的誤差遇到的次数多;

(2) 正誤差的数目与負誤差的数目差不多相等;

(3) 多次測量的誤差的算术平均值随測量次数的增加而減小。

在大多数情况中，誤差分布律就是随机量的正态分布律(高斯律)。該規律的解析表示式有如下列形式:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta X)^2}{2\sigma^2}},$$

而随机量的正态分布律的圖解如圖 1-1 所示。曲綫愈尖銳，則誤差愈小，測量的精确度也愈高。由正态分布律的解析表示式可見，曲綫的形狀和測量的精确度由参数 σ 来决定，σ 就是所謂均方根誤差，其值由下式决定

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} (X_i - A)^2}{n}},$$

式中，X_i——多次單独測量的数值，

n——測量的次数，

A——被測量的眞实值。后者可根据一系列的測量而定出(見下文)。

B. 測量誤差的定义

除上述几种关于誤差的定义外，还有下列定义:

（1）**均方根誤差 σ**，上面已經給出定义；

（2）**平均誤差 a**，定义为多次單独測量結果与其平均值間的偏差的絕对值的算术平均值。平均誤差为均方根誤差的 $\sqrt{\frac{2}{\pi}}$ 倍，即

$$a=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\,\sigma=0.779\,\sigma;$$

（3）**或然誤差 ρ**，它滿足下列条件：大于或小于或然誤差值的誤差，出現的机会相等。或然誤差等于均方根誤差的 0.67 倍，即

$$\rho=0.67\,\sigma;$$

（4）**最大誤差 $\Delta X_{макс}$**，它滿足下列条件：等于或大于最大誤差的誤差，其出現的概率等于 0.003。最大誤差为均方根誤差的 3 倍，即

$$\Delta X_{макс}=3\sigma.$$①

Г. 誤差的来源

通常誤差的来源可以分为經常的、随机的和錯誤。

經常的誤差是指在每次測量中誤差值是不变的，或者是按照完全确定的規律变化的。在恒溫情况下进行測量时，仪表刻度的誤差，以及由于外界电場和磁場的恒定影响及其他相类似的測量条件所引起的誤差都是經常的誤差的例子。消除經常誤差是一个極复杂的任务。消除經常誤差的方法之一是用各种不同仪表以各种方法来測量同一物理量。

随机的誤差，它的值和符号不恒定，且它的变化規律是未知的，不固定的。由于随机誤差的結果，在同样的条件下，用同一个仪表来測量同一个物理量，会得出不同的結果。通常，測量結果只是最后几位数不同。假如測量仪表的分辨能力不能察別多次單独測量結果的差別，則可以認为測量的最大随机誤差等于仪表的分辨能力。

利用反复測量和在概率理論的基础上最后整理所得結果，可以减小測量的随机誤差。

錯誤，过分大的測量誤差、显然不对的測量結果都称为錯誤（例如讀錯了仪表的刻度）。若測量結果与算术平均值相差大于 3σ，則可認为是錯誤。显然，以注意的态度对待測量，就可以消除錯誤。在整理測量結果时錯誤不应予以考虑，应当把它去掉。

Д. 誤差的累积定律

可以把所有的無綫电測量分为直接測量和間接測量兩类。在直接測量的情况下，用相应的仪表量出該物理量，亦即可以把直讀法（例如：用伏特計測量电压）列入此类。在間接測量的情况下，先量出一些輔助物理量，然后被測量作为量得的輔助量的函数計算出来。用来測量頻率的諧振迴路是間接測量的一个例子。在这种情况下，頻率作为电容 C 和电感 L 的函数而計算出来，L 和 C 是当迴路調到諧振时量出的。

---

① 这些表示式的来源可参看 П. И. 希洛夫著"最小二乘法"第 419 至 423 頁——譯者。

在直接測量的情况下，可能有两种誤差的来源：經常的($\Delta_{cc}X_{макс}$)和随机的($\Delta_{сл}X_{макс}$)。經常誤差和随机誤差是互不相关的兩随机量，都服从于随机量的正态分布律。在概率理論中証明了随机量应当按均方根相加。由此可見，在直接測量的情况下，总的最大誤差等于：

$$\Delta X_{макс}=\sqrt{(\Delta_{cc}X_{макс})^2+(\Delta_{сл}X_{макс})^2}.$$

在間接測量的情况下，当未知量是某些被測量的函数时，誤差累积起来了。例如令未知量以解析法表示如下列形式：

$$X=\varphi(a_1,\ a_2,\ a_3,\ \cdots a_n)$$

且在測量 a_i 值时，容許的誤差为 Δa_i，而所有其余的值的測量皆精确。这时

$$X+\Delta X_i=\varphi[a_1,\ a_2,\ \cdots(a_i+\Delta a_i)+\cdots a_n].$$

上面兩式相减，得到部分誤差值为

$$\Delta X_i=\varphi[a_1,\ a_2\cdots(a_i+\Delta a_i)\cdots a_n]-\varphi(a_1,\ a_2\cdots a_n).$$

將上面得到的表示式展开成 Δa_i 的戴劳級数，得到

$$\Delta X_i=\frac{\partial\varphi}{\partial a_i}\Delta a_i+\frac{1}{2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial a_i^2}(\Delta a_i)^2+\cdots。$$

考虑到誤差 Δa_i 是一很小的数值，我們只取級数的第一项。此时

$$\Delta X_i=\frac{\partial\varphi}{\partial a_i}\Delta a_i.$$

例 如果用諧振波長計測量波長，在測量过程中波長計的电感量不变，則可以計算如下：

$$\varphi(X)=2\pi c_0\sqrt{LC}=\lambda,$$

其中 c_0——光速。波長 λ 的測量絕对誤差將为：

$$\Delta\lambda=\Delta\varphi(X)=\varphi'(X)\Delta X,$$

或

$$\Delta\lambda=\frac{\partial\lambda}{\partial C}\ \Delta C=\pi c_0\Delta C\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

波長的相对測量誤差为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{\Delta\varphi(X)}{\varphi(X)}=\frac{\Delta C}{2C},$$

其中 ΔC——波長計的电容量讀数的絕对誤差，C——測量时波長計的电容器的电容量。

在确定 X 值时，由于在測量 $a_1,a_2\cdots$各量中的誤差Δa_1、$\Delta a_2\cdots$而引起的部分誤差 ΔX_1、ΔX_2、$\cdots\Delta X_i\cdots\Delta X_n$ 是一些互不相关的随机量。因此，要确定未知量X的誤差，就应將各部分誤差均方根相加，亦即

$$\Delta X=\sqrt{\sum_1^n\Delta X_i^2}.$$

以 ΔX_i 的值代入，得到

$$\Delta X=\sqrt{\sum_1^n\left(\frac{\partial\varphi}{\partial a_i}\Delta a_i\right)^2}.$$

最后的表示式称为誤差的累积定律。

在下列一些特殊情况下,誤差的累积定律可以簡化。

(1) 被測量X是a_1和a_2两个量的直綫性函数,如:

$$X=K_1a_1\pm K_2a_2.$$

在这个情况下,其偏导数等于:

$$\frac{\partial X}{\partial a_1}=K_1 \text{ 及 } \frac{\partial X}{\partial a_2}=K_2.$$

測量的絕对誤差將为:

$$\Delta X=\sqrt{(K_1\Delta a_1)^2+(K_2\Delta a_2)^2}.$$

(2) 被測量X是下列形式的函数

$$X=Ka_1a_2.$$

在这个情况下,其偏导数和測量的相对誤差將分别等于:

$$\frac{\partial X}{\partial a_1}=Ka_2; \qquad \frac{\partial X}{\partial a_2}=Ka_1;$$

$$\frac{\Delta X}{X}=\frac{1}{Ka_1a_2}\sqrt{(Ka_2\Delta a_1)^2+(Ka_1\Delta a_2)^2},$$

或

$$\frac{\Delta X}{X}=\sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{a_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta a_2}{a_2}\right)^2}.$$

(3) 被測量X与a_1/a_2值成正比$\left(X=K\frac{a_1}{a_2}\right)$,在这种情况下,其偏导数和測量的相对誤差分别等于:

$$\frac{\partial X}{\partial a_1}=\frac{K}{a_2}; \qquad \frac{\partial X}{\partial a_2}=-\frac{Ka_1}{a_2^2};$$

$$\frac{\Delta X}{X}=\frac{1}{K\frac{a_1}{a_2}}\sqrt{\left(\frac{K}{a_2}\Delta a_1\right)^2+\left(\frac{Ka_1}{a_2^2}\Delta a_2^2\right)^2}$$

或

$$\frac{\Delta X}{X}=\sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{a_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta a_2}{a_2}\right)^2}.$$

E. 减小随机誤差的方法

减小随机誤差的主要的和有效的方法之一是对同一个量进行多次的測量。此时,应取各讀数的算术平均值作为被測量的最可能的数值。这时可以認为經常誤差不存在($\Delta_{cc}X=0$).

假使在多次測量的情况下,得到的值为X_1、$X_2\cdots X_n$,这些值是按照随机量的正态分布律分布在被測量X的周圍,則算术平均值X_0將接近于被測量X。于是被測量的算术平均值等于:

$$X_0=\frac{\sum_1^n X_i}{n},$$

这里 n——测量次数。

多次單独測量的均方根誤差等于：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum\limits_{1}^{n}(X_i-X_0)^2}{(n-1)}}.$$

如果进行了几組的測量，則在每一組測量中可以找到被測量的算术平均值。所得到的每一个被測量的算术平均值的均方根誤差等于：

$$\sigma_0=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

σ——每次測量的均方根誤差。

这样一来，每次測量的最大可能誤差为：

$$\Delta_{сл}X_{макс}=3\gamma=3\frac{\Delta X}{X},$$

我們可以得到被測量的平均值的最大可能誤差为：

$$\Delta_{сл}X_{0макс}=3\sigma_0=3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\frac{\Delta_{сл}X_{макс}}{\sqrt{n}},$$

也就是当作了 n 次測量时，随机誤差减小到 $\frac{1}{\sqrt{n}}$。

經过适当的变換后，我們可以找到在多次測量时的最大随机誤差如下：

$$\Delta_{сл}X_{0макс}=3\sqrt{\frac{\sum\limits_{1}^{n}(X_i-X_0)^2}{n(n-1)}}.$$

如果測量的次数比 1 大得多，因而可以認为 $n-1\approx n$，則在多次測量的情况下，最大随机誤差的表示式將如下式所示：

$$\Delta_{сл}X_{0макс}=\frac{3}{n}\sqrt{\sum\limits_{1}^{n}(X_i-X_0)^2}.$$

Ж. 測量有限次数时誤差的确定

如果量 X 經过了 n 次的測量，得到的結果为

$$X_1、X_2\cdots X_n,$$

則其平均値为：

$$X_0=\frac{\sum\limits_{1}^{n}X_i}{n}.$$

此时用計算尺来計算平均値会招致很大的誤差。用下列方法，可以使計算精确度提高，

并且使計算簡化:

(1) 选擇任何一个和假定的算术平均値 X_0 相接近的方便的数字 X_{cp}。

(2) 計算每一个測得的値 x_i 与所选擇的数字 X_{cp} 之間的差(X_i-X_{cp})并計算这些差值之和

$$\left[\sum_1^n (X_i-X_{cp})\right].$$

(3) 以下列形式来計算多次測量的算术平均値

$$X_0=X_{cp}+\frac{\sum\limits_1^n (X_i-X_{cp})}{n}.$$

(4) 檢查結果的正确性,为此:

A) 計算每一个測量結果和求得的算术平均値之間的差

$$X_i-X_0;$$

Б) 每一个測量結果和其算术平均值之間的差值之和应为零。

$$\sum_1^n (X_i-X_0)=0.$$

現举一例說明所介紹的計算方法。假設作了 12 次測量，其結果列于表 1-2 的第二欄中。

选擇近似的平均値 $X_{cp}=224.0$，并且計算每一次測量的結果与所选擇的平均値 X_{cp} 之差。結果列于表中第三欄。

表 1-2.

編　号	X_i	X_i-X_{cp}	X_i-X_0	$(X_i-X_0)^2$
1	2	3	4	5
1	223.4	−0.6	−0.36	0.13
2	222.8	−1.2	−0.96	0.92
3	224.0	0	+0.24	0.06
4	223.1	−0.9	−0.66	0.43
5	224.2	+0.2	+0.44	0.19
6	224.1	+0.1	+0.34	0.15
7	223.9	−0.1	+0.14	0.02
8	224.1	+0.1	+0.34	0.12
9	223.8	−0.2	+0.04	0.00
10	223.9	−0.1	+0.14	0.12
11	224.1	+0.1	+0.34	0.12
12	223.7	−0.3	−0.06	0.00
总　和		−2.9	+1.98 −2.04	2.26

計算被測量的算术平均値如下:

$$X_0=X_{cp}+\frac{\sum\limits_1^n (X_i-X_{cp})}{n}=224.0-\frac{2.9}{12}=223.76.$$

計算每次測量的結果与算术平均值之差。結果列于表中第四欄。此时，如果算术平均值求得正确的話,則其差值之和应等于零。在目前的情况下，其和不等于零，这就說明算术平均值不够准确,也就是应該取一精确到小数点后第三位的值。

把得到的差值(X_i-X_0)平方，并將其結果列于表中第五欄。然后求每次測量結果与算术平均值之差的平方值的总和(該值記入表中第五欄),并計算算术平均值的最大随机誤差,

它等于:

$$\Delta_{сл}X_{макс}=\frac{3}{n}\sqrt{\sum_{1}^{n}(X_i-X_0)^2}=\frac{3}{12}\sqrt{2.26}=0.376.$$

最后把結果写成

$$X=X_0\pm\Delta_{сл}X_{макс}=223.76\pm0.376.$$

§3. 測量交变电流的特点

A. 被測电路的电容和电感的影响

測量电流时，通常將其能量变为另一种形式的能量(如机械能、热能、光能或化学能)，这能量由指示器記录下来，作为被測电流强度的量度。显而易見，为了能正确地确定被測电流的强度，能量的全部变换和指示器的正确作用是很重要的。

当測量頻率足够低的电流时，可以忽略連接电路和仪表的阻抗的电抗分量，把測量的等效綫路圖画成如圖 1-2 *a* 所示。在这一綫路圖中，所有的电路元件都是串联的，因而同一电流在这些元件中通过，其値为:

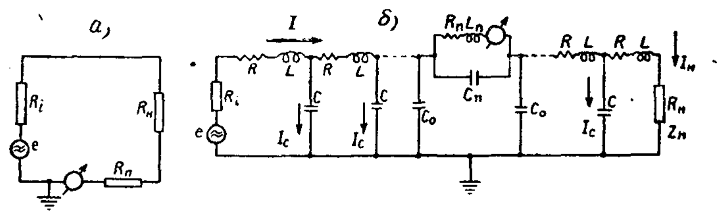

圖 1-2. 測量电路的等效綫路圖:
a)在低頻时; б)在高頻时。

$$I=\frac{e}{R_i+R_п+R_н},$$

其中 e——电流源的电动势，R_i——电流源的內阻，$R_п$——測量仪表电路中的电阻，$R_н$——負載电阻(計及接綫电阻)。在这种情况下，不管測量仪表接在电路的那一部分中都是一样的，通过負載的电流和通过仪表的电流是相等的。以整个設备的結構来考虑，把仪表的一个接綫柱接地是比較恰当的，但在測量特性方面幷無影响。

在測量頻率相当高的电流时，連接电路和仪表的阻抗的电抗分量不能忽略。測量电流的等效綫路圖大概可如圖 1-2 *б* 所示。这时測量电路的分布的和集中的电容和电感开始产生影响，通过負載的电流不再等于通过仪表的电流。这时，仪表接得离負載愈近，則負載中和仪表中的电流的差别也愈小。

在圖 1-2 *б* 所示的綫路圖中，測量电流的条件有許多限制。显而易見，被測电流的頻率愈高，則連接电路的分布参数(C、L 和 R)的影响將愈大。事实上，当頻率相当高时(大約 100 兆赫)应用这样的綫路圖来測量电流就成为不可能了。

我們对圖 1-2 *б* 的綫路圖中所用的測量仪表提出許多要求。从这个綫路圖中可以看出，測量仪表本身是一諧振系統，其固有頻率为:

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_n\left(C_n+\frac{1}{2}C_0\right)}}$$

如果被測电流的頻率与仪表的固有頻率很相近，則由于發生諧振現象，以致負載电流和經过仪表的电流相差过大，而使測量成为不可能。如果希望扩大被测电流的頻率范圍，就必須要求測量仪表系統的固有振蕩頻率尽可能地高。当电感 L_n 和电容 C_n 的値最小时，就可以滿足这一要求。但是，幷不是所有的測量仪表都能按照所需要的小的电感和电容値制造出来。这就限制了应用許多測量仪表系統的可能性。

电流測量器的电容和电感的最小値的要求还与对电流源的反作用有关系，这反作用在接入測量仪表时产生。接入时測量仪表应使电流源受到最小的負載，亦即測量仪表本身的損耗最小，这一点是很重要的。

Б. 被測电流波形的影响

任何形狀的交变电流均由其有效値来測量，此有效値由下列关系式来决定：

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T Ri^2d(\omega t)=RI^2_{эф}$$

我們可以用諧波級数的表示式来代替被測电流的瞬时値，这时功率由下式决定：

$$P=R\frac{1}{T}\int_0^T[I_0+I_{m1}\sin(\omega t+\varphi_1)+\cdots+I_{mn}\sin(n\omega t+\varphi_n)]^2d(\omega t),$$

这里 $\omega=\frac{2\pi}{T}$，T——被測电流的周期，I_0——电流的直流分量，$I_{m1}, I_{m2}\cdots I_{mn}$——电流的交变分量的振幅。

如果考虑到每一个諧波分量都按正弦律变化着，則每一个諧波电流分量的有效値可以用这些諧波的振幅表示如下：

$$I_{эф}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2d(\omega t)}=0.707\,I_m,$$

或

$$I^2_{эф}=0.5I^2_m,$$

經过簡單的变換后，得到：

$$P=R[I^2_0+I^2_{эф1}+I^2_{эф2}+\cdots+I^2_{эфn}],$$

或

$$P=R\left[I^2_0+\frac{1}{2}I^2_{m1}+\frac{1}{2}I^2_{m2}+\cdots+\frac{1}{2}I^2_{mn}\right]=RI^2_{эф}.$$

由此可得：

$$I^2_{эф}=I^2_0+\frac{1}{2}I^2_{m1}+\frac{1}{2}I^2_{m2}+\cdots+\frac{1}{2}I^2_{mn}.$$

因为电流的諧波分量的数目与交变电流的波形有关，所以有效値和各諧波的振幅之間的关系將是各种各样的。由此可得出結論，卽測量电流的仪表的讀数会随着交变电流的波