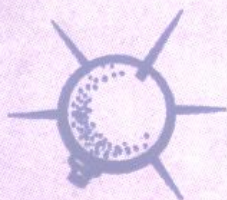


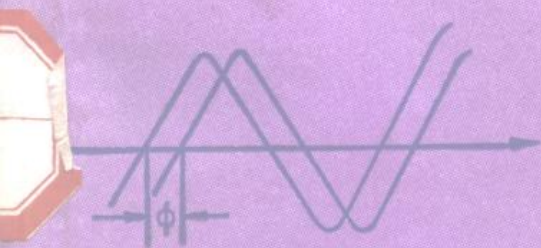
无线电计量测试丛书

16



高频、微波相移的 计量测试

谢上次 徐燕清 编著



中国计量出版社

无线电计量测试丛书 16

高频、微波相移的 计 量 测 试

谢上次 徐燕清 编著

中国计量出版社

新登(京)字024号

DU44/09
内 容 提 要

本书是无线电计量测试丛书的第16分册。全书系统地阐述了高频及微波相移计量的有关问题。主要内容有：相移计量测试的基本概念、有关名词术语的解释和数学表达式；低频、高频及微波频段各种精密移相器的原理、设计方法和误差分析，介绍各频段相移测量方法及误差来源。还特别介绍了网络参数测量的一些新技术，及群延迟时间测量技术。

本书可供具有中等以上文化程度从事或涉及高频和微波计量测试，以及其他微波工程的科技工作者、工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

无线电计量测试丛书 16

高频、微波相移的计量测试

谢上次 侯燕情 编著

责任编辑 刘宝丰

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 787×1092/32 印张 12.5 字数 284 千字

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-5026-0497-9/TB·385

定价 8.50 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编： 汤世贤

副主编： 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委： (以姓氏笔划为序)

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编辑： 夏虎林 汤世贤

无线电计量测试丛书

1. 无线电计量测试概论
2. 高频、微波信号源及其稳定
3. 低频电压的计量测试
4. 高频电压的计量测试
5. 高频、微波功率的计量测试
6. 高频、微波场强与干扰的计量测试
7. 高频、微波噪声的计量测试
8. 失真与调制参数的计量测试
9. 脉冲参数与时域测量技术
10. 高频集总参数阻抗的计量测试
11. 微波阻抗与反射的计量测试
12. 数据域测试
13. 网络参数的计量测试
14. 高频、微波介质的计量测试
15. 高频、微波半导体器件的计量测试
16. 高频、微波相移的计量测试
17. 高频、微波衰减的计量测试

前 言

无线电计量测试丛书是根据中国计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想和统一安排，在中国计量测试学会的高度重视和实际支持下，由本编委会邀请作者、组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

编 者 的 话

相移是无线电计量的重要参量之一。相移量的计量测试在许多电子工程中有着广泛的应用。然而,系统地论述相移计量测试的专著却很少。本书是积编著者多年从事相移及网络参量计量测试研究的实际工作经验,同有关技术理论的积累总结编写而成。书中较为系统地论述了相移计量的基本概念,分析介绍了各种计量测试方法,以及计量标准的原理和误差分析。

全书共分八章。第一章论述了相移计量的基本概念、名词术语的定义,并推导了各种端变量描述二端口器件相移的表示式。第二章讨论了低频移相器同低频相移的计量测试方法。第三章分析讨论了各种类型高频及微波移相器。重点介绍了作为计量标准的移相器的原理、设计要点、误差分析。第四章介绍高频及微波相移计量测试方法,系统介绍了几种精密测量方法的原理及可能达到的准确度。第五章讨论相移测量的一些其他方法,这些方法扩展了相移测量装置的应用。第六章专门讨论了相移测量的误差来源。第七章介绍了各种自动网络分析仪,以便说明网络参量(包括相移量)测量的新技术和发展方向。第八章作为相移测量的一种扩展应用,介绍了群延迟时间测量。

本书第一、二、四、七、八章由谢上次编写,第三、第五章由谢上次、徐燕清共同编写,第六章由徐燕清编写,最后由谢上次统稿成书。由于作者水平有限,疏漏和错误之处在所难免,敬请读者和有关专家批评指正。

编 者

1990.12.

目 录

编者的话

第一章 相移计量概论 (1)

第一节 引言 (1)

第二节 基本概念 (2)

第三节 相移和相位差方程 (6)

第四节 测量方法 (20)

第五节 国内外相移计量概况 (23)

参考文献 (29)

第二章 低频移相器和低频相移测量 (30)

第一节 概述 (30)

第二节 正切移相器 (31)

第三节 电感移相器 (43)

第四节 音频相角校准标准 (50)

第五节 示波器法测量相移 (Lissajous图技术) (61)

第六节 三电压表法测量相移 (76)

参考文献 (82)

第三章 高频和微波移相器 (84)

第一节 伸缩线型移相器 (84)

第二节 移动介质片型移相器 (94)

第三节 旋转介质片型移相器 (103)

第四节 反射型移相器 (112)

第五节 电控移相器 (127)

参考文献 (134)

第四章 高频及微波相移测量方法 (136)

第一节 概述 (136)

第二节	高频比较法测量相移	(138)
第三节	频率变换法测量相移	(159)
第四节	时间间隔数字法测量相移	(176)
	参考文献	(188)
第五章	测量相移的其他方法	(190)
第一节	概述	(190)
第二节	扫频及动态相移测量	(191)
第三节	高频脉冲调制相移测量	(193)
第四节	自校准法	(209)
第五节	标准频率法	(219)
	参考文献	(223)
第六章	相移测量的误差分析和一些减小误差的 测量方法	(225)
第一节	阻抗误差	(225)
第二节	信号源频率不稳引入的误差	(228)
第三节	交叉耦合误差	(232)
第四节	寄生调频误差	(240)
第五节	失配误差	(244)
第六节	信号源谐波失真引入的误差	(252)
第七节	幅相误差	(255)
第八节	零点漂移	(259)
第九节	随机误差	(261)
第十节	微波双通道相移测量中失配误差的对消	(261)
第十一节	测量变耗器件差值相移的系统误差对消法	(268)
	参考文献	(276)
第七章	相移测量的新技术	(278)
第一节	概述	(278)
第二节	网络分析仪	(280)
第三节	自动网络分析仪	(287)
第四节	多端口网络分析仪	(321)

参考文献	(334)
第八章 延迟时间的测量技术	(337)
第一节 概述	(337)
第二节 网络的特性	(339)
第三节 名词术语定义	(342)
第四节 测量技术	(345)
第五节 群延迟标准	(368)
第六节 延迟时间测量的误差来源	(370)
参考文献	(373)
附录	(374)

第一章 相移计量概论

第一节 引言

本书主要研究如电压、电流、入射波和出射波等电信号的相角变化，这些信号都是随时间作谐和变化的量，我们关心和研究的是这些信号在传输过程中，相位随时间和位置变化的情况，以及两个不同时间或位置上信号的相位差或相移，如研究并测量一个二端口器件的输出电压相对输入电压的相移，或者当测试电路中插入一个器件时（包括可变器件），由于器件的插入或度盘位置变化所引起的相移。

为了深入探讨相移计量的原理、方法及其他有关问题，首先对有关的名词术语给以明确的定义，同时本章还通过对二端口网络的分析，推导并建立了接近实际情况，表征一个被测网络特性的相位差方程，通过对这些方程式的讨论，可以得到定量的概念及提高测量精确度的途径，对测量误差的分析和测量不确定度的估计提供了重要的依据。

相移的计量测试，通常包括三部分内容：研制高精确度的标准移相器，研制稳定可靠的测量系统，对测量技术的不确定度进行评价，而测量原理与方法的研究是贯穿其中并通过测量系统来实现的。

第二节 基 本 概 念

一、相位和相角

相位是对一个周期信号 $f(t)$ 在某一特定时间 t 而言的,可以表示为 t/T 。其中 T 为信号的周期; t 为相对于任意原点的时间。通常原点选择为信号由负到正的过零点。

在实践中最常遇到的是谐和变量。一个在均匀媒质中传播的谐和变量“ a ”可以表示为

$$a = \operatorname{Re}[Ae^{i(\omega t + \phi - \beta z)}] = A \cos(\omega t + \phi - \beta z) \quad (1-1)$$

其中 $\theta = (\omega t + \phi - \beta z)$ 称为该信号的相角,它相应于复平面上一个旋转矢量的幅角。通常认为随着时间的增加矢量是沿反时针方向旋转的,本书将遵照这种习惯。量度相角的单位是度或弧度,这些单位都是无量纲的量值。

从式(1-1)可见,一个谐和变量“ a ”的相角是 ω 的函数, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$,其中 f 是谐和变量的频率; t 是时间; ϕ 是初相位; β 是相位常数; z 是沿传输线或空间某点的位置。由式(1-1)看出,随着时间增加相角也增加,而随着距离的增加它将越来越滞后。所以,相角是一个谐和变量随时间和空间相对于选定的参考时间和位置上该信号的变化量度。相角可以通过相位乘以 360° 或 2π 弧度得到。谐和变量是一个周期性函数,其中 $\omega = \text{常数}$ 。相角变化以 360° 为一周期,但是在一些不致引起含混的情况下,也可将相角称之为相位。

二、相 位 差

两个谐和变量 a_1 和 a_2 之间的相位差如下式所示：这两个变量不需要由同一个源输出，也不要求具有相关性。

$$\theta_2 - \theta_1 = (\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \phi_1) + (z_2 - z_1)\beta \quad (1-2)$$

由式可见，两个信号之间的相位差是以差拍频率 $f = |f_2 - f_1|$ 为系数随时间而变化的量，随着时间的增长，相位差会变得越来越大，最后趋于无穷大，而失去了意义。因此，按照上述概念测量相位差时，势必引起模糊和不确定，为此引入了相移这一术语。

三、相 移

相移是表示相位的变化量，表示在一定条件下两个信号之间的相位差，它可能取正值也可能取负值，常用“超前”表示相移是正值，而“滞后”表示相移是负值，所谓同相则是两信号的相位差为零的情况，反相则是指相差为 180° 。

所要满足的条件是：(1)两信号的频率必须相等。(2)测量系统必须匹配（即无反射）。

例如，一段长度为 l ，相位常数为 β 的均匀传输线，当信号从一端（ $z_1=0$ ）输入，从线的另一端（ $z_2=l$ ）输出时，就产生了相位滞后（相移），其值为 $\beta l = \beta(z_2 - z_1)$ ，此时若没有反射波存在，则输出信号的相位同输入信号的相位差就等于 βz ，称为此段传输线的相移。

又如，对一个无反射（ $S_{11}=S_{22}=0$ ）二端口网络，它的输出和输入信号之间的相位差，也就是网络产生的相移。但是，当有反射存在时，输出和输入信号之间的相位差就不仅取决于二端口器件的特性，还与系统的源端和负载端有

关，因此也就不能把相位差的量值作为网络本身的固有相移了。

相移并不总是相位“滞后”。如当伸缩线（一段长度可变的传输线）的长度缩短时，输出信号的相位将向正方向移动，也即是相位“超前”。

四、延 迟 时 间

延迟时间的定义可从式（1—1）推演出来，假设传输线的相位常数 β 和距离无关，则一谐和变量 a 沿此传输线的“相位延迟”可由下式给定

$$\begin{aligned}\theta_D &= \beta(z_2 - z_1) = \frac{\omega}{v}(z_2 - z_1) \\ &= \omega \Delta t = \theta \pm 2n\pi\end{aligned}\quad (1-3)$$

其中 v 是沿传输线信号波的传播速度， Δt 是从 z_1 到 z_2 的时间，即延迟时间。如果测量出延迟时间，则相移可以利用式（1—3）计算出来。利用这种方法可以测出大于 360° 的相移，而采用一般的相位计就只能测量小于 360° 的相移。

五、二端口器件的相移

在电路中要想移动某参考点上信号的相位，可以用两种方法。首先将一个二端口器件接到电路中，当二端口器件为一固定器件时，通常将它插入到参考点和发生器之间，这时参考点上的相位相对于插入前就会发生改变，最后观察到的这种相移称之为“插入相移”，这是第一种方法。

第二种方法是当二端口器件为可变器件时，将其接入发生器和负载之间的电路中，当二端口器件从初始状态改变到终结状态时，这时对负载端上的电压来说，其相位也将从初始值移动到终结值，这种相移常称之为“差值相移”或“增

量相移”。应该注意，这时在负载端上观察到信号相移的同时，可能由于器件的反射的变化使得输入端上信号的相位不能保持恒定。因此，通常在设计移相器时，都要考虑到这种因素，最好由它引起的输入信号的相位变化应很小或在理想情况下应使其为零。

正如前面所述，只有当系统没有反射时，才能认为二端口器件的输入和输出端上的信号之间的相位差的量值大小就是该二端口器件本身的相移。但是，无反射条件只是一种理想情况，一般的系统都不能满足此条件，所以有时术语“相位差”反而可能具有更为确切的数值。这并不意味着作为器件固有特性参数的“相移”这一术语没有意义，虽然理想的条件达不到，但在实际测试系统中应尽量逼近理想的条件，以保证相移量值的复现。与理想条件有差别所引起测量不一致，可归结到测量误差中去。

六、特 征 相 移

一个二端口器件的插入相移不只是器件本身的特性，还和器件插入系统的特性有关。这种情况和一个衰减器的插入损耗和系统特性有关完全类似，同样我们也规定器件应插入到一个无反射的系统中，以此来实现表征移相器件本身的性质特性，这时在负载端上观察到信号的相移则只是二端口器件本身固有的特征，故称之为“特征相移”，或简称为器件的相移。在相同的频率上，但是在不同的测试系统中，如在不同实验室的测试系统中，要想精确地复现一个二端口器件的特征相移，必须注意以下几点：首先是发生器的频率、内阻和开路电压，以及负载阻抗在器件插入的前后要保持不变。为此可以采用隔离器、去耦衰减器来增加电路的隔离从而减小其影响。其次，在插入点即器件和系统连接处对每个测

试系统来说都应采用一样型式和精度的接头，比如都是同样的同轴接头、波导接头，不能经过不同的转换接头。第三，在每个系统中应以相同的方式方法来得到无反射的条件，如果是通过调配来实现这一条件，应该用同等精度的反射测量仪器。总之最重要的一点是要确保在系统的插入点，端口的两边满足无反射条件的规定。只有满足这些条件后才能复现出正确的量值。

第三节 相移和相位差方程

在推导二端口器件各种不同定义的相位差和相移的方程时，我们用一简单的二端口网络来代表一个实际的移相器，事实上移相器通常也就是一个二端口网络。这样，二端口网络的数学模型就可以用来表示分析相移的数字方程。

以下分析主要应用网络的散射参数，因为这是在高频和微波网络理论中最常采用的一种参数，用它来分析讨论问题最为方便。但某些方程也可以用阻抗或导纳参数来表示，这样可以将各种参数表示的方程相互进行比较。

一、二端口网络的表示模型

可以有几种形式来表示一个二端口网络的相位差，这里采用图1-1所示的模型。

相位差的表达式之所以有各种不同的形式，是因为测量相位差的系统中采用的检测器类型不同的缘故。由于检测器类型不同它们响应的波的类型也就不一样，有的可能响应于广义电压波，有的响应于电流波。例如，在常用的测量线中的电场探针便是对电压波发生响应。

在图1-1中，二端口网络的波导引线的端面1—1和2—2

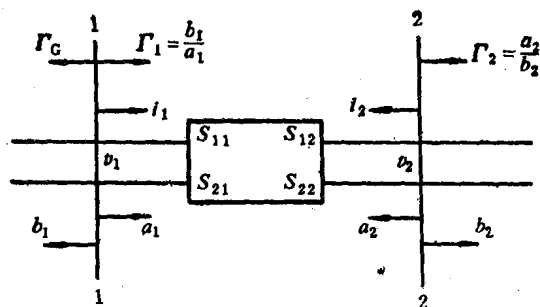


图 1-1 用两组端变量表示二端口网络示意图

上, a 和 b 表示是入射和出射电压波, v 和 i 是广义电压和电流波的复数振幅。

两组端变量之间的关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} v &= a + b \\ i &= a - b \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

在图1-1中 b_G 表示源出射波的幅度, a_1 、 b_1 和 b_G 之间的关系由下式给定:

$$a_1 = b_G + b_1 \Gamma_G \quad (1-5)$$

由此看出, 二端口网络的相移可以考虑为端变量 v_2 和 v_1 之间、 i_2 和 i_1 之间, 或 b_2 和 a_1 之间、 b_2 和 b_G 之间的相位差的大小, 这样一来“二端口相移”的表示式可能会引起含混和模糊不清, 因为不知道这些表示式是否给出的所有二端口网络的相移都相同, 通过下面的分析将指出, 用不同的端变量所得出的各方程表示的相位差一般说来是不同的, 但在什么条件下它们又可能变为相同呢? 这是我们所关心的, 也是值得分析研究的问题。另一个问题就是选择哪种端变量来表示最好, 或经常采用的是哪种端变量之间的相移, 这些都是需要深入探讨的问题。