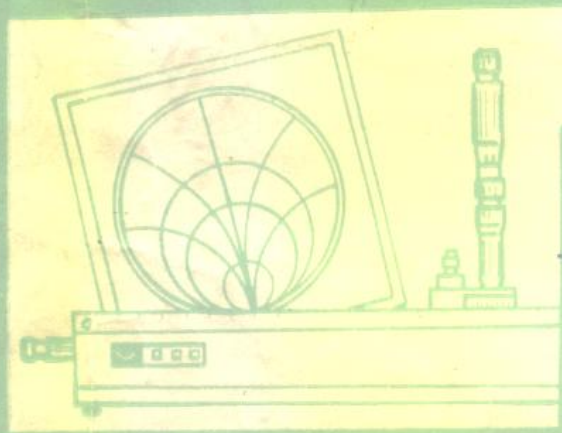
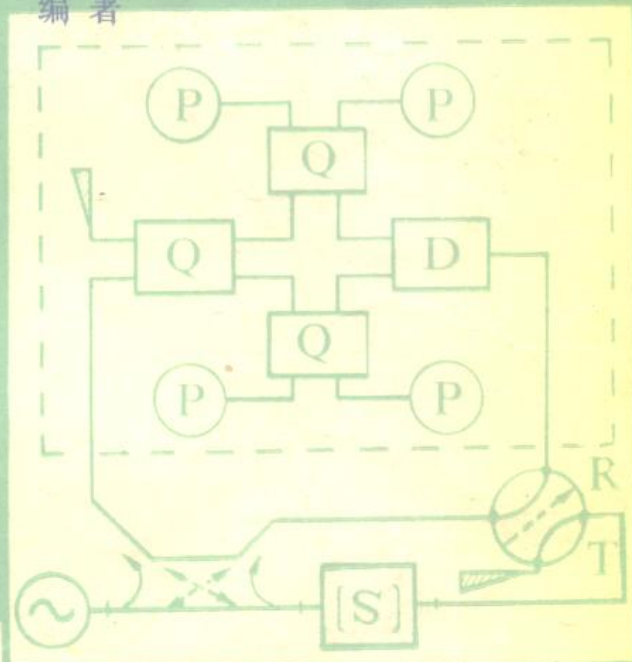


微波测量

北京工业学院

汤世贤 编著



国防工业出版社

微波测量

北京工业学院 汤世贤 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是高等院校工科电子类微波技术专业的教材。全书分二篇，共八章。第一篇为微波信号特性的测量，包括：微波信号源，信号频率与波长的测量，信号电平与功率的测量，信号波形与频谱的测量等四章。第二篇为微波网络特性的测量，内容有：反射参量（包括反射系数驻波比及阻抗等）的测量，传输参量（包括衰减、相移）的测量，网络参数的全面测定及用时域法测量网络特性等四章。本书除作为有关专业的本科和研究生教材外，也可供工厂和研究部门的科学技术人员参考。

微波测量

北京工业学院 汤世贤 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张26¹/₄ 609千字

1981年8月第一版 1981年8月第一次印刷 印数：0,001—5,600册

统一书号：15034·2240 定价：2.70元

前 言

本书系作为高等院校微波测量课程教材而编写的。书中对微波测量基本内容作出比较全面的论述和合理的编排。主要特点是将微波测量中经常待测的诸参量分别纳入微波信号特性的测量及微波网络特性的测量两大部类之中。而微波信号特性的测量除其本身任务外，又作为微波网络特性测量的基础，故放在第一篇首先讲授。第一章先对测量系统中不可缺少的测量用信号源及有关信号特性的参量进行比较全面的扼要介绍。第二章讲述信号频率与波长的测量：除列举各种频率标准及测频方法外，重点讲述微波计数式频率计的工作原理；对于简单而常用的谐振波长计的理论与实际也作出比较系统的论述。第三章讲述信号电平与功率的测量：既主要讲述微波功率的测量亦兼顾到电压和电流的测量，以及各种信号电平指示器。第四章讲述信号波形及频谱的测量：首先从时域与频域关系的角度，阐明波形与频谱的内在联系及在微波范围内波形与频谱两项测量相互补充的重要性，然后概述电子示波器及频谱仪的工作原理及近期发展。第二篇中，第五章讲述反射参量的测量：包括用各种点频及扫频方法测量网络的反射参数 s_{11} 及复数反射系数和有关的驻波比及复数阻抗等参量。第六章传输参量的测量：主要讲述对网络传输参数 s_{21} 模值的测量（即衰减的测量）及其幅角的测量（即相移的测量），同样包括点频及扫频时测量该两项参量的各种方法，并注意指出二者在测量方法上的某些相似性，以及发展为幅相兼测的可能性。第七章讲述能够对二口网络的全部 s 参数进行全面测定的一些方法，其中包括从最老的三点法和移动短路法直到最新的各种网络分析仪，后者并涉及到测量自动化的问题。最后一章讲述在时域中对微波网络的反射特性和传输特性进行测量的方法，以及时域测量与频域测量的相互变换问题，从而使微波网络测量由一贯采用的频率领域扩展到时间领域。

按照大纲规定，本课程讲授时间为 80 学时。根据下述几方面的考虑，本书内容略多于上述学时的讲授份量。第一，为了表明微波测量学科本身的系统性，至少必须包括本书所包含的那些基本章目，才能构成一个比较完整的体系。第二，由于电子测量技术近来突飞猛进的发展，微波测量方面的新内容层出不穷；考虑到我国四化建设发展形势的需要，对一些重要的新技术应本着迎头赶上的方针尽量吸收到教材中来；而对于原有的内容除一些陈旧落后的方法应予剔除外，其余在目前仍具有重要地位。因此对于新旧内容必须统筹兼顾予以安排，而在讲授中可以按照各校具体的教学情况，衡量轻重缓急，适当选择讲授。第三，本课程需要讲授的内容及讲解粗细程度，与本课程在教学计划中安排的先后位置、即有无其他先修课程为基础很有关系，一般希望安排在电子线路、微波技术、微波网络与元件等课程之后讲授，学生具有必要的基础知识，教学中便能收事半功倍之效。若有《电子测量》作为先修课程，则有关普通计数频率计和通用示波器等基本内容便可适当从简。第四，微波测量是一门实践性学科，有些内容可在课堂提示后，由学生结合实验课自行阅读；

有些较专深的内容（目录中注有※号者）可以少讲或不讲，供有余力的学生研读或作为研究生教材使用。第五，本书除作教材外，还可供有关科学技术人员作为参考。

本书原稿曾经西北电讯工程学院董树义、吕继尧等同志详加审阅，提出了不少宝贵意见，并由编者作了必要的修改。在定稿过程中，北京工业学院电子工程系高本庆同志在文字加工方面，给予了很大帮助。苏舫同志精心设计封面。在此统致谢意。由于本人学识水平有限，加以编写时间紧迫，书中错误不当之处必定还有不少，希读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	2-4.4 频率转换式	56
第一篇 微波信号特性的测量		§ 2-5 微波谐振式波长计	59
第一章 微波测量用信号源	6	2-5.1 带耦合元件的谐振腔等效电路	59
§ 1-1 微波测量用信号源的种类与用途	6	(1) 单口式谐振腔	60
§ 1-2 微波信号发生器及标准信号发生器	7	(2) 二口式谐振腔	63
1-2.1 电子管微波振荡器	8	2-5.2 谐振式波长计的不同接入方式及谐振指示	66
(1) 微波三极管振荡器	8	(1) 反应式波长计	66
(2) 速调管振荡器	9	※(2) 反射式波长计	70
1-2.2 固态微波振荡器及调幅器	12	(3) 传输式波长计	71
(1) 微波晶体管振荡器	12	2-5.3 波长计用的谐振腔类型和特性	72
(2) 体效应管振荡器	13	(1) 同轴 TEM 型 $\lambda/2$ 谐振腔	73
(3) PIN 管调制器	16	(2) 同轴 TEM 型 $\lambda/4$ 谐振腔	74
1-2.3 微波信号发生器的工作特性	19	(3) 电容加载式同轴谐振腔	75
(1) 频率特性	19	(4) 电容加载式 E_{010} 圆柱腔	75
(2) 输出特性	20	(5) H_{111} 及 H_{011} 型圆柱腔	77
(3) 调制特性	21	第三章 信号电平与功率的测量	83
1-2.4 信号发生器的稳频与稳幅	22	§ 3-1 概述	83
(1) 锁相稳频	22	§ 3-2 信号电平的对数单位——分贝	83
(2) 自动稳幅	25	§ 3-3 信号电平指示器的分类	85
§ 1-3 微波扫频信号发生器	26	3-3.1 按测量范围或灵敏度高低分类	85
1-3.1 返波管扫频发生器	26	3-3.2 通过式与终端式电平指示器	87
(1) 返波管振荡器原理简述	26	3-3.3 峰值与平均值电平指示器	89
(2) 一般扫频发生器的组成	27	§ 3-4 晶体二极管检波器及超小功率计	90
1-3.2 固态扫频发生器	28	3-4.1 微波检波二极管的种类及性能	90
(1) 用变容管调谐的扫频振荡器	28	3-4.2 检波晶体座及实现宽带匹配的途径	92
(2) 用 YIG 调谐的扫频振荡器	29	3-4.3 宽带匹配晶体检波器的性能指标和用途举例	95
§ 1-4 频率合成式信号发生器	31	3-4.4 晶体检波式超小功率计	97
1-4.1 直接式频率合成器	32	§ 3-5 热偶式安培计和中、小功率计	98
1-4.2 锁相式频率合成器	34	3-5.1 热偶式安培计及毫安计	98
(1) 用数字式锁相环构成频率合成器	34	3-5.2 热偶式中功率计	99
(2) 两种微波频率合成器方案举例	35	3-5.3 薄膜热偶式小功率计	100
第二章 信号频率及波长的测量	39	(1) 铋-锑薄膜式热偶	100
§ 2-1 频率标准	39	※(2) 薄膜-半导体热偶	101
2-1.1 石英晶体振荡器	39	§ 3-6 测热电阻式检波器、小功率计及伏-安校准器	104
2-1.2 铷原子频率标准	41	3-6.1 测热电阻元件的种类	104
2-1.3 铯原子频率标准	43	3-6.2 测热电阻座	106
2-1.4 氢原子频率标准	44	(1) 同轴线测热电阻座	107
§ 2-2 频率测量方法	45	(2) 波导测热电阻座	103
§ 2-3 微波外差式频率计	47	3-6.3 恒流电阻式检波器及峰值功率计的指示电路	111
§ 2-4 微波计数式频率计	48	3-6.4 测热电阻功率计电桥指示电路	113
2-4.1 直接计数式	48	(1) 不平衡式电桥	113
2-4.2 预分频式	52		
2-4.3 外差变频式	54		

(2) 平衡式电桥	115
(3) 自动平衡电桥	117
(4) 温度补偿双电桥	118
(5) 双电桥的改进型	120
3-6.5 测热电阻通过式功率计及伏-安校准器 电路	122
§ 3-7 量热式功率计	124
3-7.1 干负载式静止量热计	124
3-7.2 可校准测热电阻座的微量热计	127
3-7.3 水负载流动式量热计	129
§ 3-8 微波功率计的误差分析与校正	132
3-8.1 失配误差的性质与处理	132
3-8.2 效率误差、替代误差及其修正	135
3-8.3 仪表误差及测量总误差的估计	136
§ 3-9 微波功率计的校准与比对	137
3-9.1 交替接入比较法	138
3-9.2 单定向耦合器法	139
3-9.3 调配反射计法	141
3-9.4 功率方程法(广义反射计法)	145
第四章 信号波形与频谱的测量	148
§ 4-1 信号波形与频谱的关系	148
§ 4-2 常见信号波形及其频谱	149
§ 4-3 测量信号波形的主要仪器——电子 示波器	156
4-3.1 通用电子示波器	156
(1) 示波管显示部分	157
(2) 垂直放大部分	159
(3) 水平扫描部分	168
4-3.2 超高频实时示波器	176
(1) 普通示波管的高频限制	176
(2) 显微示波器	179
(3) 行波示波器	180
(4) 新近发展及趋向	183
4-3.3 采样示波器	184
(1) 垂直采样部分	184
(2) 采样时基部分	189
§ 4-4 测量信号频谱的主要仪器——频谱 分析仪	193
4-4.1 频谱分析仪的分类	194
(1) 实时式和非实时式(扫描式)	194
(2) 扫频射频调谐式与扫频超外差式	195
(3) 扫中频与扫前端的超外差式	196
(4) 基波混频式与谐波混频式	199
4-4.2 微波频谱分析仪的主要性能参数及其 对观测频谱的影响	201
(1) 与幅度有关的诸参数	201
(2) 与频率有关的诸参数	203
(3) 有关频率分辨率的一些问题	204
(4) 分析脉冲调幅波时两种不同的 频谱显示	208

第二篇 微波网络特性的测量

第五章 反射参数的测量	214
§ 5-1 本章任务概述——驻波比、反射 系数、输入阻抗、网络参数 S_{ii} 等的关系	214
§ 5-2 开槽测量线法	220
5-2.1 开槽测量线的构造要点	220
(1) 开槽线段	220
(2) 探针及滑行座	221
(3) 检波与指示装置	221
5-2.2 开槽测量线的基本测量方法	222
(1) 测量驻波比 S	223
(2) 测量复数 Γ 和 Z	223
5-2.3 开槽测量线的误差分析与检定	224
(1) 过渡段的不连续性	225
(2) 中介传输线的衰减	227
(3) 探针的加载作用	229
(4) 机械不平稳性	234
(5) 测量线的准确度等级及其检定	236
5-2.4 可避免某些误差的变通测量方法	235
(1) 不依赖于检波律的一些测 S 法	238
(2) 可消除 S_r 影响的一些测 S 法	239
(3) 测量大驻波比时减免探针误差的 测法	243
5-2.5 扫频测量线技术	245
§ 5-3 反射计法	247
5-3.1 微波反射计的组成方式及工作原理	247
(1) 双定向耦合器式	247
(2) 单定向耦合器式	250
(3) 可以兼测 $\arg \Gamma$ 的反射计	251
(4) 反射计的主要误差来源	254
5-3.2 调配式反射计	255
5-3.3 扫频反射计	257
(1) 扫频反射计的组成及读数方式	257
(2) 扫频反射计的信号流图分析	262
(3) 扫频反射计的发展	268
§ 5-4 电桥法	271
5-4.1 波导魔 T 电桥	271
(1) 平衡电桥法	272
(2) 不平衡电桥法	273
5-4.2 微波电阻电桥	274
§ 5-5 旋转式驻波指示器	275
§ 5-6 自动阻抗显示仪	277
第六章 传输参数的测量	281
§ 6-1 传输参数测量的任务——衰减及 相移的测量	281
§ 6-2 各种传输损失与衰减的定义及 某些测量误差	281
6-2.1 插入损失与衰减	281

6-2.2	替代损失与增量衰减	283
6-2.3	变换器损失与传输效率	284
6-2.4	衰减测量中的失配误差	285
6-2.5	漏场和串扰误差	286
§ 6-3	功率比法测衰减 (点频与扫频)	287
6-3.1	单只功率计或平方律检波器法	287
6-3.2	取样检波求比值法	289
6-3.3	稳幅信号源及校准栅线法	290
6-3.4	用功分器的两路比较法	291
§ 6-4	替代法测衰减	292
6-4.1	高频替代法	293
6-4.2	中频替代法	295
	(1) 串联替代式电路	295
	(2) 并联替代式电路	296
	(3) 线性混频的非线性误差	298
	(4) 两路变频式中频替代法	300
6-4.3	音频替代法	301
§ 6-5	直接转移到低频测衰减	302
6-5.1	低中频外差法	303
6-5.2	调制副载波法	304
6-5.3	单边带调制法	307
§ 6-6	其他间接法测衰减	309
§ 6-7	各种相移的定义及测相移时的失配误差	310
§ 6-8	用开槽线测相移	312
6-8.1	反射波法	312
6-8.2	传输波法	313
§ 6-9	高频替代法测相移	314
6-9.1	两路平衡电桥法	315
6-9.2	调制副载波法	317
§ 6-10	转移到低频测相移	318
6-10.1	超外差变频式微波相位测量及校准装置	318
6-10.2	调制副载波及微波鉴相器式扫频相位计	321
§ 6-11	相位测量装置的误差及自校准	323
6-11.1	微波相位计某些误差的性质和估计	323
6-11.2	相位计及其测量值的自校准法	325
§ 6-12	能够全面测量传输系数模值和幅角的方法评述	326
§ 6-13	矢量电压表及其应用	327
第七章	网络参数的全面测定	332
§ 7-1	概述	332
§ 7-2	测量网络参数的三点法和多点法	333
7-2.1	三点法	333
7-2.2	多点法	336
7-2.3	等效变压器法	337
§ 7-3	频率转移式微波网络分析仪的不同方案	340

7-3.1	单边带调制式	340
7-3.2	调制副载波式	341
7-3.3	外差变频式	343
7-3.4	采样变频式	346
§ 7-4	s 参数选测装置及其误差模型	347
7-4.1	反射测试单元	347
7-4.2	传输测试单元	350
7-4.3	反射/传输测试单元	351
7-4.4	全部 s 参数选测装置	353
§ 7-5	自动网络分析仪 (ANA)	355
7-5.1	自动微波网络分析仪的组成	355
7-5.2	系统误差的预先定值及自动修正	356
7-5.3	其他剩余误差及考核	361
§ 7-6	构成微波网络分析仪的新途径——六端口技术	362
7-6.1	概念的引出	362
7-6.2	六端口矢量电压表的一般理论及典型构造	363
7-6.3	六端口反射计的几何解释及设计准则	366
§ 7-7	六端口自动网络分析仪 (SPAN)	370
7-7.1	单六端口式方案	370
7-7.2	双六端口式方案	371
第八章	用时域法测量网络特性	374
§ 8-1	概述	374
§ 8-2	时域反射测量	375
8-2.1	宽带时域反射计	375
	(1) 电路接法和工作方式	376
	(2) 电阻性终端负载或不连续性	378
	(3) 电抗性终端负载或不连续性	381
	(4) 幅度分辨力	381
	(5) 时间或距离分辨力	384
	(6) 设备构成举例	385
8-2.2	窄带时域反射计	387
	(1) 不同的信号源及工作方式	387
	(2) 各式系统举例	388
§ 8-3	时域传输测量	391
8-3.1	用时域法测量传输的不同途径	391
8-3.2	时域测传输的电路接法	394
	(1) 典型接法及延迟线段的作用	394
	(2) 能兼测反射的变态接法	395
	(3) 步进衰减器替代读数法	395
§ 8-4	时域自动网络分析仪 (TDANA)	396
8-4.1	TDANA 的组成及工作原理	396
	(1) 测量传输参数 $s_{21}(j\omega)$	396
	(2) 测量反射参数 $s_{11}(j\omega)$	398
8-4.2	快速傅氏变换 (FFT)	399
8-4.3	TDANA 系统及应用举例	401
	(1) NBS 系统	401
	(2) Sperry 系统	404
	(3) 数据处理示波器	409
8-4.4	TDANA 与 ANA 的比较	410

绪 论

自从第二次世界大战期间微波技术伴随着雷达技术诞生并初步发展起来之后,迄今三十余年中,微波技术又在国防、通信、科学、工业、医疗以及国民经济各部门获得了更加广泛的应用和发展,形成了无线电电子学中一个具有独特性的分支。微波测量作为微波技术的一个重要组成部分,也得到日新月异的发展。不管在测量方法、测量仪器和测量精确度方面都取得了重大的进展,甚至发生了革命性的变革。在整个电磁测量学中,微波测量也是一个最活跃的领域^[18]。微波测量技术这个学科已经形成了一个完整的体系。但是,任何一个学科的发展,常常不是一开始就完全显示出它本身的固有体系,或者是完全按照其自身内容的系统性来规定发展顺序,而是按照客观形势的需要,以及本门及有关学科和工业基础所能提供的条件,逐渐地由简到繁、由粗到精、由局部到全面地发展起来的。通常要发展到一定程度,才能逐步看清该学科的体系。对于某一学科适时地研究并整理出一个合乎科学的系统性,一方面可以加深对该学科现有内容及其各部分之间的有机联系的理解,另一方面,对于预示学科的进一步发展方向,以及如何填平补齐等问题也具有指导性意义。

微波测量技术从早期开始就致力于微波测量用信号源的解决及对功率、波长与频率、频谱与波形、驻波比和阻抗、衰减和Q值等重要参量的测量方法的寻求和测量仪器的研制^[1]。后来由于波长、功率、驻波比和阻抗等参量的测量较早地找到了简单适用的测量方法和仪器,而领先地得到发展;其它某些参量的测量(例如波形、频率、相位及网络全部参数等)或由于遇到困难而暂时处于停滞状态,或由于客观需要不甚迫切而长期处于被忽视的地位。例如,对于微波元器件的反射特性、特别是传输特性的测量曾长期停留于“仅测幅度”的状态(即仅测驻波比和衰减)。对于与幅度紧密联系的相位参数的测量则直到六十年代相控阵雷达及加速器等新技术提出迫切需要时才开始受到重视。正是由于这种历史上发展的先后和程度上的差别性,使得后来陆续出版的有关微波测量的书籍^{[2]~[15]},常常是过多地注意了微波测量中诸待测参量之间的相对独立性,而不重视它们之间的有机联系和逻辑系统性,因而在内容编排上似乎主要按照写作或讲解的方便而采取各不相同的次序。例如对于与衰减关系密切的相移的测量,或者是任其空缺,或者是将二者置于毫不相关的地位;网络参量与信号参量穿插出现等等。直到1971年出版的由B. M. Oliver和J. M. Cate联合主编的《Electronic Measurements and Instrumentation》一书^[16]中,将有关微波测量的内容分别纳入“微波信号源”,“微波信号分析”和“微波网络分析”三章之中。其中所包含的参量种类和内容虽然很不完备,但这种将(除信号源外)各种待测参量划分为信号参数和网络参数两大类的作法,颇具有启发性。笔者在草拟本书编写提纲时,进一步考察了微波测量中所有基本参量的性质和关系,而将信号的频率与波长、电平和功率、波形与频谱等项的测量统称为微波信号特性的测量,并将与其关系密切的测量用信号源放在一起作为第一篇;第二篇网络特性的测量中,则按照最常用的网络散射参数的概念把有关网络特性的参量分为反射参量(包括复数 s_{11} 、 Γ 和 Z 及与 $|\Gamma|$ 有关的回波损失及驻波比等)的测量和传

输参量（包括 s_{ij} 及由 $|s_{ij}|$ 决定的衰减和由 $\arg s_{ij}$ 决定的相移等）的测量这两章（即第五、六章）来讨论。对于所涉及的各种测量方法注意从其是否能兼测复系数的模值和幅角，以及能否兼用于点频和扫频测量的角度来评价。又鉴于目前对于微波网络及系统的测量常常希望对其特性参数进行全面测定，故将能够测定全部散射参数的测量方法，包括各种近代的微波网络分析仪在内，单独辟为一章（第七章）讲述。此外，由于近些年来超高速脉冲发生器和采样示波器的出现，使得时域测量方法能够进入微波测量范围，故在最后一章又从时域测量角度介绍对微波网络反射特性和传输特性进行测量的方法，以及通过快速傅氏变换能得出频域散射参数的时域自动网络分析仪。采取这样的分章方法可以较好地体现微波测量学科的发展现状和系统性，并能展示出更加广阔的发展前景。

下面略论一般微波测量系统的构成及微波测量的任务，并借以进一步说明上述内容编排的合理性。

每进行一项测量，尽管其繁简程度有很大差别，一般都要组成如图0-1所示的测量系统。其中至少要有一个测量信号源（或称测试发送器），一个测量装置（或称测量电路），还必须有一个或多个测量信号特性的仪表（可以统称为测试接收器，包括各种频率计，电平指示器，示波器和频谱仪等）^[14]。由此看来，本书第一篇主要是介绍各种测试信号发送器和接收器，以解决信号特性的测量，并为第二篇网络特性的测量提供基础。

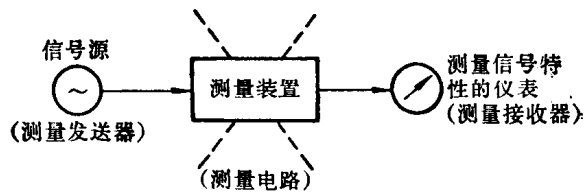


图0-1 一般测量系统的组成

最简单的测量任务为测量各种振荡器、发射机等有源电路的输出信号特性。为此，只将适当的终端式信号特性测量仪表，通过一段传输线或至少是一对传输线接头（这便是最简单的测量电路），接至被测信号源的输出端，便可进行此项测量。实际上即使对于此项任务，有时为了解决仪表的阻抗匹配问题或量程大小问题也还需要采用某种较复杂的测量电路。

更多的测量任务是测量各种无源网络和非自激的有源网络（如放大器，接收机等）的技术特性，主要是反射特性和传输特性。为此，需在被测网络输入端接上一种频率、波形及电平合适的信号源作为测试发送器，在网络输出端接上匹配的终端式接收仪表，以直接测量其传输特性（若为多口网络，在所有不用端口上都接以匹配负载）。在这种简单情况下，测量电路便是被测网络自身。此外，为了测量网络的反射参数，或按照某些较复杂的方法测量传输参数（例如两路比较法等），便需在测量电路中加入开槽测量线或功分器和可变标准器等来构成相应的测量装置；甚至要采用反射/传输测试装置或六端口网络等更加复杂的测量电路，以便能同时进行网络的反射参数 s_{ij} 和传输参数 s_{ij} 的模值和幅角的测量，从而实现网络参数的全面测定。

总之，一个测量系统要根据给定的测量任务和所采用的测量方法，用一些分立的仪器和辅助元件来组成；也可以根据某种成熟的测量方法构成一种现成的齐套测量设备，只要接入待测件便成为一个完整的测量系统；甚至可以制造出某些多用途、多功能的综合测量仪器或设备来执行多种测量方法。在测量方法与测量仪器二者之间，测量方法是根本的、起主导作用的，而且是相对稳定些的；而测量仪器的具体构造，不仅要随测量方法的更换而改变，而且即使是依据同一测量方法，也可能由于执行该测量方法的方式和细节不同，频率范围和测量范围的不同，精度和价格的不同，以及采用的电路设计及制造工艺的不同而表现出千变万化的差异。故本书内容以介绍测量方法为主。根据测量方法和原理，提出在不同要求下测量系统组成的具体方案，规划出大致的测量步骤，进行必要的误差分析等等。必要时也提出某些典型仪器的型号和指标，作为印证的实例，但不对其具体线路及构造细节作详细的介绍。至于进行实际测量时的具体操作步骤，拟放在本课程的实验指导书中给出；或留待读者从现有的参考书和手册中^{[5][11][12][18][17]}查找，或自行通过思考来拟定并在实践中修订。

由图 0-1 还可看出，一个测量系统，虽然一般规模较小，但比起一些较大的系统如通信系统和雷达系统等，大体上是相似的。因此，不少在其他系统中比较成功的经验，能够直接或间接地引用到测量系统中来。例如，雷达系统中有关显示器的不少经验便曾在电子示波器的发展中大量得到利用；象 A/R 型显示器中两套扫描的体制，便曾直接应用到较高级的示波器中。通信系统中所常用的各种频率转移技术，在网络测量中也常被采用。另一方面，由于测量仪器一般属于规模小但技术要求高的系统，研制的投资较少而周期较短，故最适宜于试验采用新技术而能迅速看到效果。近代无线电电子学中一些重要的新技术，如采样技术、锁相技术、频率合成技术、宽带扫频或程控跳频技术等，常常都最先在测量仪器中得到应用，取得经验后，才转用于其他较庞大的系统中。可以推断，近代宽带频谱分析仪和网络分析仪中所成功采用的宽带变频、锁相扫频及双路幅相接收等新技术，在今后通信及雷达接收系统中必将得到反映或引用。

测量仪器及系统在部分地或全面地实现自动化方面，也走在其他系统的前面^[18]。由计算机全面操纵的微波自动网络分析仪的试制成功，在实现宽带程控跳频发送、全相参多路幅相接收及带有自动误差修正和数据处理的全自动收发系统等方面已树立了成功的典范。目前微波测量的自动化除继续发展像自动网络分析仪和自动测量信号特性的多功能自动频谱分析仪这样的一些大型自动测量系统外，还在发展更多的由小型计算机（或可编程台式计算器）通过正在由 IEC 进行标准化的通用仪器接口母线（GPIB）控制的、由若干台分立仪器临时组成的小型自动化测量系统；同时还在大量发展在某些通用测量仪器中加装若干微处理器，以便在仪器的控制操作及数据整理和显示等方面实现部分自动化和智能化的“灵巧”仪器。虽然今后在这些方面自动化的继续发展，最终对测量技术造成重大的历史性变革；但目前阶段，在一般性微波测量教材中尚无需作出专题的论述。本书将在第七、第八两章介绍频域及时域自动网络分析仪时，适当讲述和介绍计算机在自动测试系统中所起的作用和使测量过程自动化的某些途径；并在第二、四章讲述计数频率计、示波器和频谱仪等仪器时，指出在某些方面可以实现自动化和智能化的机理。至于标准接口母线的采用，主要只影响今后的仪器制造及使用方法上的某些变化，对测量方法和原理并不造成根本性

的改变, 对于一般学员可等到国际上标准化和国内正式推广时逐步熟悉^[13]。

本书所讨论的测量方法和仪器以在教学、生产、科研工作中所常用的为主, 对计量与校准工作中所用的精密测量方法, 只择其有普遍意义者扼要加以介绍, 可作为提高或选学的内容。

本书所涉及的频率范围虽以自 500 或 1000 MHz 直至 40 GHz 的常用微波频段为重点, 但有一些微波测量方法同样适用于较低或较高频率。特别是近代一些宽带的微波测量仪器, 其低频限度往往能从 10MHz 或 100 MHz 开始 (还不说象采样示波器那样可以一直工作到直流), 所以微波测量在低频端与一般电子测量之间的频率界限已开始模糊起来。另一方面, 对毫米波及亚毫米波段的测量问题, 除有些能将微波测量方法推广应用之外, 对于需要采用光学或准光学及其他特殊方法的测量问题, 本书则不涉及^[15]。

关于微波频段的划分, 国内外都有多种不同的分法。下面将比较符合目前国内习惯的若干种划分频段的方法列于表 0-1, 以供参考。

表0-1 微波频段的划分

按电磁波谱分		信号源常用频段		按标准波导频段分					
频段	波段	频率范围 GHz	波段 代号	频率范围 GHz	IEC波 导代号	波段代号	频率范围 GHz	IEC 代号	波段代号
0.3GHz ↑ 超高频(UHF) ↓ 3.0GHz	10dm ↑ 分米波 ↓ 1dm	0.5~1.0	P	0.75~1.12	R9	P			
		1.0~2.0	L	1.12~1.7	R14	L(25cm)	0.96~1.45	R12	
		2.0~4.0	S	1.7~2.6	R22	LS	1.45~2.2	R18	
3.0GHz ↑ 特高频(SHF) ↓ 30GHz	10cm ↑ 厘米波 ↓ 1cm	2.0~4.0	S	2.6~3.95	R32	S(10cm)	2.2~3.3	R26	
		4.0~8.0	C	3.95~5.85	R48	C(6cm)	3.3~4.9	R40	A(7.5cm)
		5.85~8.2		5.85~8.2	R70	J(4.5cm)	4.9~7.05	R58	
		8.2~12.4	X	8.2~12.4	R100	X(3cm)	7.05~10	R84	H(3.5cm)
		12.4~18	Ku	12.4~18	R140	Ku(2cm)	10~15	R120	
		18~26.5	K	18~26.5	R220	K(1.25cm)	15~22	R180	
		26.5~40	Ka	26.5~40	R320	Ka(8mm)	22~33	R260	
30GHz ↑ 极高频(EHF) ↓ 300GHz	10mm ↑ 毫米波 ↓ 1mm			40~60	R500	(6mm)	33~50	R400	
				60~90	R740	E(4mm)	50~75	R620	
				90~140	R1200	F(3mm)	75~110	R900	
				140~220	R1800		110~170	R1400	B(2mm)
				170~260	R2200		170~260	R2200	
				220~325	R2600	(1mm)			

本书所用的物理量单位一律采用国际单位制, 并主要采用国际代号。在表 0-2 中列出部分常用的物理量的单位名称及其中文和国际代号。鉴于微波测量中所涉及的电学量的数值范围非常宽广, 经常要采用扩大或缩小单位的词冠, 对这些词冠的中文译名过去不太统一, 学员对之也不够熟悉, 特转载于表 0-3, 以便查阅。

本书除在各章末尾列出有关的专门参考资料外, 下面还将历来国内外出版过的微波测

量方面比较有名的一般性参考书籍编号列出, 以便于读者在必要时查阅和参考 (在绪论中涉及这些书的地方方便注以该编号)。

表0-2 国际制单位

量	名称	代号	
		中文	国际
基本单位	长度	米	m
	质量	千克(公斤)	kg
	时间	秒	s
	电流	安培	A
	热力学温度	开尔文	K
	物质的量	摩尔	mol
	光强度	坎德拉	cd
导出单位	频率	赫兹	Hz
	能、功、热量	焦耳	J
	功率	瓦特	W
	电量、电荷	库仑	C
	电压、电位	伏特	V
	电容	法拉	F
	电阻	欧姆	Ω
	电导	西门子	S
	磁通	韦伯	Wb
	磁感应	特斯拉	T
	电感	亨利	H

表0-3 国际制词冠

因数	词冠	代号	
		中文	国际
10^{18}	艾可萨(exa)	艾	E
10^{15}	拍它(peta)	拍	P
10^{12}	太拉(tera)	太	T
10^9	吉加(giga)	吉	G
10^6	兆(mega)	兆	M
10^3	千(kilo)	千	k
10^2	百(hecto)	百	h
10^1	十(deca)	十	da
10^{-1}	分(dec)	分	d
10^{-2}	厘(centi)	厘	c
10^{-3}	毫(milli)	毫	m
10^{-6}	微(micro)	微	μ
10^{-9}	纳诺(nano)	纳	n
10^{-12}	皮可(pico)	皮	P
10^{-15}	飞母托(femto)	飞	f
10^{-18}	阿托(atto)	阿	a

参考资料

- [1] C. G. Montgomery (ed.), *Techniques of Microwave Measurements*, 1947.
- [2] H. M. Barlow and A. L. Cullen, *Microwave Measurements*, 1950.
中译本: 巴娄、柯伦著《微波测量》, 科学出版社, 1961年。
- [3] F. E. Terman and J. M. Pettit, *Electronic Measurements*, 2nd. ed., 1952.
- [4] D. D. King, *Measurements at Centimeter Wavelength*, 1952.
- [5] M. Wind and H. Rapaport, *Handbook of Microwave Measurement*, 2nd. ed., Vol. I and II, 1955.
中译本: 悍特、腊帕波特《微波测量方法》, 上海科技出版社, 1963年。
- [6] M. Wind (ed.), *Handbook of Electronic Measurements*, 1957.
俄译本: Измерения в Электронике, Том 1 и 2, 1965.
- [7] E. L. Ginzton, *Microwave Measurements*, 1957.
- [8] P. A. Валитов и В. Н. Срегенский, *Радиоизмерения на С. В. Ч.*, 1963.
- [9] F. J. Tischer, *Mikrowellen Meßtechnik*, 1958.
俄译本: Ф. Тшцер, *Техника Измерений на С. В. Ч.*, 1958.
- [10] 大河内正阳、牧本利夫共著, *マイクロ波測定*, 1959.
- [11] I. L. Kosow (ed.), *Microwave Theory and Measurements*, 1962.
- [12] M. Sucher and J. Fox (ed.), *Handbook of Microwave Measurements*, 3rd. ed., Vols I ~ III, 1963.
- [13] 周清一编著: 《微波测量技术》, 国防工业出版社, 1964年。
- [14] H. Groll, *Mikrowellen Meßtechnik*, 1969.
- [15] 小口文一、太田正光共著: *マイクロ波・ミリ波測定*, 1970.
- [16] B. M. Oliver and J. M. Cage (ed.), *Electronic Measurements and Instrumentation*, 1971.
中译本: 奥利弗、卡其编《电子测量和仪器》, 科学出版社, 1978年。
- [17] T. S. Laverghetta, *Microwave Measurements and Techniques*, 1976.
- [18] *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 4, Apr. 1978. (Special Issue on Electromagnetic Measurement Science).

第一篇 微波信号特性的测量

第一章 微波测量用信号源

§ 1-1 微波测量用信号源的种类与用途

测试无源微波元件，必须要有微波信号源，供给测试信号。一般要求信号频率能在一定范围内连续可调；最大信号功率至少能达到 mW 级，并能连续控制；输出波形一般为连续正弦振荡，并至少能用一种低频方波进行开关式调幅。这种最简单的信号源通常泛称为微波信号发生器，有时也特称为简易信号发生器或测试振荡器。其中用以测量天线特性者，功率最好能达到 $1W$ 以上，有时特称功率信号发生器。当然，功率发生器也可用普通信号发生器外加适当的功率放大器构成（例如行波管放大器）。

为了测量微波接收机的灵敏度、选择性、调制特性等项指标，要求输出信号的频率和功率准确已知，并能精细调节；特别是须能将有用信号的大小连续衰减到 μW 甚至 pW 级电平；而且，根据用途不同，应具有不同的调制方式（例如，用于通信及遥测等要求用正弦波调幅或调频，用于雷达及脉冲多路通信者，要求用狭窄视频脉冲进行调幅），而且调制变化范围宽、调制程度可读。符合这些要求的信号发生器通常便称为标准信号发生器。有些标准信号发生器除供给准确已知的微弱信号外，还具有单独的 mW 级功率输出插口，或其输出信号最大可调到 $1mW$ ，所以也能充当普通信号发生器使用，只是不大经济罢了。

微波信号发生器及标准信号发生器的振荡源早期主要采用微波电子器件（例如，微波三极管及反射速调管），近来逐渐改用微波半导体器件，其附属电路也都完全半导体化，从而使微波信号源又可分为电子管式和固态式。固态信号源比电子管式的体积小、重量轻、耗电量少，而且结实、可靠、寿命长和价格低，因而有较大的发展前途。

老式的信号发生器的频率主要靠机械调谐，即靠改变振荡部分的谐振回路尺寸来调节。有些虽然能接受小范围的“电子调谐”，但只能作为频率微调使用。近来在一些固态信号源中则采用某种可以电控或磁控的调谐元件（例如，变容管和 YIG 调谐器等）作为振荡回路或其一部分，因而能用电调谐代替机械调谐。这不但可以简化机械结构、减小体积和重量，更重要的是可以接受模拟式或数字式电信号对其频率进行程控或远控，使其频率能按照预定的程序连续地或跳跃地变化。

一般信号发生器都是按“点频”方式工作的，即按其度盘放置的位置，输出相应的单一频率信号。当需要测量某个元器件在一定频率范围内的特性曲线时，便须将发生器度盘依次放置到所需范围内的若干个频率点上，分别测出各点上的待测参数，然后才能将各点联成曲线。这样，测量将极费时间。为了提高工作效率，希望信号发生器的频率能从所需频率范围的一端连续地“扫变”到另一端，并使测量仪器也随之连续测出各个频率上的测量结果，在示波器或记录仪上立即显示出所需的频率特性曲线。这种测法称为扫频测量法。能

产生这种扫频信号的发生器称为扫频信号发生器或简称扫频源（或扫频仪）。直到五十年代返波管出现后微波范围内的扫频源才趋于实用化。近年来又实现了全固态的扫频源。扫频信号发生器与工作于调频状态的普通信号发生器不同之点在于：前者的扫频宽度很宽，一般可达一个倍频程，扫频速率是线性的，扫描重复频率很低；具体说是用频率由 $1/100\text{Hz}$ ~ 100Hz 的次音频锯齿波进行宽带调频。而一般调频信号发生器则是用音频正弦波调制，频率偏移度只有几十或几百 kHz 或至多不超过载频的 0.2%。上面提到的电调谐、可编程的信号发生器，如能安排使其频率在预定范围内线性地连续变化，当然也能作扫频发生器使用。反之，任何扫频发生器亦可不加扫描电压而使之停留在任一点频上工作，从而能代替普通信号发生器使用。目前不少扫频发生器在点频工作时已能具备普通信号发生器的功能，有些甚至能达到标准信号发生器的水平。所以，今后的发展趋势是：扫频发生器与普通信号发生器二者将在一种可编程、多功能的电调谐信号发生器的基础上统一起来；或者说，具有多种可选择的扫频、点频及跳频方式的、高性能的扫频发生器将要代替普通的信号发生器，甚至标准信号发生器。

近年来，另一个发展成果是频率合成式信号发生器。它把以固定的标准频率源为基础，用频率综合方法产生出任意所需频率的正弦信号的“频率合成器”作为信号发生器的振荡源部分。目前的频率合成器已经能使输出频率按十进制以极小的步级进行变化，有不少已经能达到微波频率范围；例如，从 $0.5\sim 18\text{GHz}$ 范围内，以最小为 1kHz 甚至 1Hz 的步级变化。故其输出频率具有极高的分辨力，同时具有与其内含的或外加的标准频率源同等的准确度和稳定度。将频率合成器的输出信号经过稳幅、衰减和校准并加上调频或调幅措施，便可充当标准信号发生器使用。频率合成器的频率一般用十进位开关或按钮选择，也可接受电信号的程控和进行数字式扫频。频率合成式信号发生器把频率合成器和信号发生器的特点结合到一起，可谓两全其美。目前主要供需要特别高的频率准确度和分辨力的信号源时采用（例如用以测量和校准宇航通信设备）。但是随着其构造的不断简化和价格的降低，将来会逐渐代替普通的标准信号发生器。

在微波测量中，有时也需采用产生基带脉冲（亦称直流或视频脉冲）的脉冲信号发生器。其用途之一是作为微波信号发生器的外加调幅信号源。虽然某些微波标准信号发生器带有内含的调制脉冲发生器供内部脉冲调幅之用，但其性能有限。当要求调制脉冲的速率、宽度或重复频率范围超过内含脉冲发生器的指标时，便需采用外加的脉冲信号发生器。这种脉冲信号发生器与一般脉冲技术中所用者相同，本书中将不予叙述。在微波领域中所需用的另一种脉冲信号发生器是产生接近理想冲击波形或阶跃波形的超高速脉冲信号，供测试微波同轴元件或其它 TEM 波元件的暂态响应之用。这将在第二篇第八章中讲到“时域测量”时顺便略加论及。

§ 1-2 微波信号发生器及标准信号发生器

微波信号发生器及标准信号发生器的基本组成部分示于图1-2.1。图中用粗线相连的方块是各种信号发生器都必须具备的部分；细线所连部分是组成标准信号发生器需要增添的部分。各种信号发生器的核心是其振荡产生部分。因此，下面先分别叙述电子管式及固态式微波振荡源的常用器件、典型线路及其工作原理和性能。然后讨论微波信号发生器的各项性

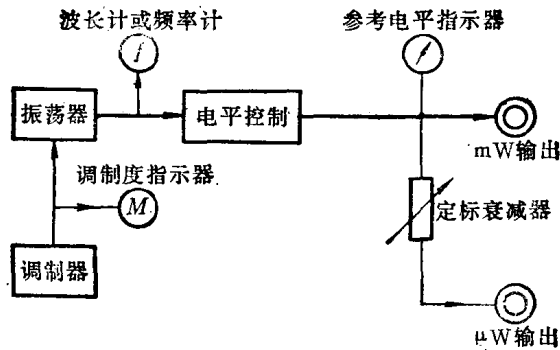


图1-2.1 微波信号发生器方块图

能指标和稳频、稳幅问题,以便对微波信号发生器的全部构造和运用特性有较全面的理解。

1-2.1 电子管微波振荡器⁽¹⁾⁽²⁾

测量用信号源中产生微波振荡的电子管,常用的主要有微波三极管和反射速调管。

(1) 微波三极管振荡器

三极管的振荡频率不能提得太高,这主要受两个因素的限制:①极间电容及引线电感限制了振荡频率的最高极限;②电子渡越时间效应(即电子在电极间渡过的时间较之振荡周期不可忽略时所产生的效果)造成越来越大的损耗使振荡不能维持。为减少以上两项影响,使之能进入微波范围,主要是靠采用以灯塔管为代表的盘封式三极管结构:即将板、栅、阴三个电极都做成平行的平面状,使它们之间的距离能尽量靠近(约0.1mm左右)以减小渡越时间;将各电极的引线改为金属盘状,以尽量减小引线电感;盘缘露出于玻璃管外,以便直接与外加的同轴式调谐回路形成周密的接触。这样构成的振荡器约可以从最低的数百MHz一直应用到最高达4000MHz的范围,再向上发展便有困难。

图1-2.2(a)概略示出灯塔管的构造和外形。其振荡电路通常采用等效于图(b)所示的栅极接地的调板-调阴式电路。板-栅和阴-栅两个调谐回路实际上都采用同轴线谐振腔。为减少两腔所占长度及易于拔插管子,通常采用将两个腔体摺合到一边的双层同轴式结构,如图(c)所示。由于栅极接地的屏蔽作用,两个回路之间没有多大的耦合。为了提供自激振荡所需的反馈,在两腔体之间要采用如图(c)中所示的耦合环或其他耦合装置。两个同轴腔体都采取一端用活塞短路,而另一端是开路的 $\lambda/4$ 或 $3\lambda/4$ 振荡模式(应计及极间电容的缩短作用)。在窄频带内,将两个活塞一起移动以调频率是可能的;当频带很宽时,单靠耦合环的作用不能维持稳定的反馈,为此常常需要将两个回路分开调谐,以便于获得合适的反馈。一般是将板极回路的活塞与主度盘联系,担任频率调节;将阴极活塞用另一旋钮驱动,以充当反馈调节。这样,每台仪器的工作频率范围至少可达一个倍频程。振荡功率的大小可借调整栅、阴间的负偏压来控制,并以阴极电流作粗略指示。采用灯塔管时最大输出功率约可达1W,若改用金属-陶瓷管,最大功率可达5W。这种管子的电极安排次序与灯塔管相反,即它的板、阴两极位置对调,使板极露出腔外以利散热,并可在

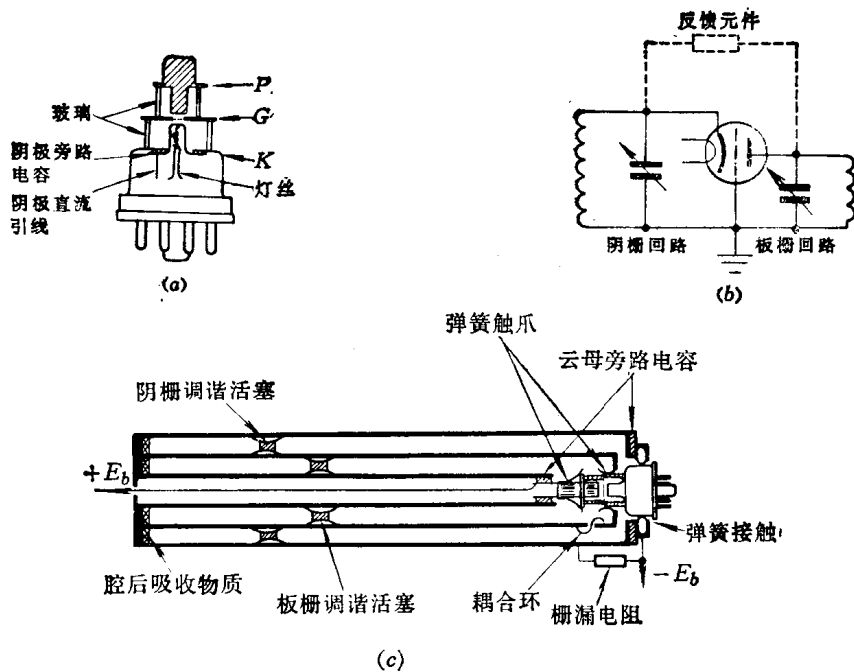


图1-2.2 灯塔管振荡器
 (a) 管子概略构造(P、G、K分别指板、栅、阴极及其接触盘)；(b) 常用的振荡电路；
 (c) 用双层同轴谐振腔构成的该电路的一种结构形式。

其上加装散热片及吹风冷却。图 1-2.3 示出一种金属陶瓷管振荡器的构造略图。与图 1-2.2 (c) 不同的是：外套筒是板-栅回路，内套筒是阴-栅回路，二者分别用短路活塞调谐，腔长 L_1 和 L_2 均约等于 $\lambda/4$ ；两个谐振腔间的耦合是借焊于阴极圆筒上的探针，通过栅极圆筒上的孔插入板-栅腔中来实现的；输出信号则经由插入板极圆筒的容性探针引出。瓦级输出和微瓦输出可分别由两个互相远离的耦合器取出，以免互相影响；用探针深度来控制输出的大小。

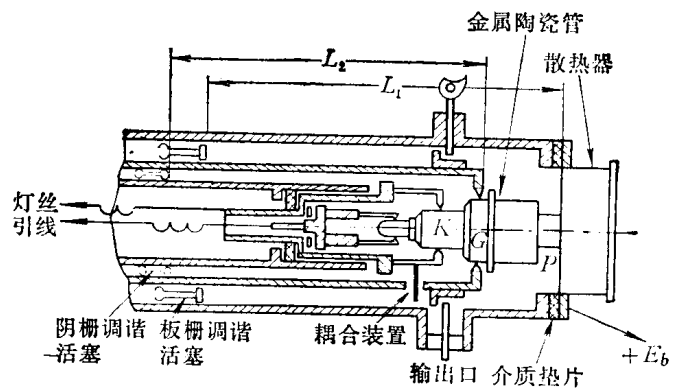


图1-2.3 带有同轴谐振腔的金属陶瓷管振荡器构造略图

三极管微波振荡器的优点是：供电比较简单，只需要一个数百伏的高压电源；频率稳定度一般较好；能够获得瓦级功率，可作为功率发生器；容易接受幅度调制，既能用正弦波调幅，也能接受方波或脉冲的开关式调幅。缺点是结构复杂、笨重，调谐使用不甚方便。今后将逐渐为微波晶体管振荡器所代替。

(2) 速调管振荡器

a) 基本工作原理 为了从根本上免除电子渡越时间的限制，曾研制出多种利用电子在渡越时间内与交变电磁场相互作用并交换能量，以产生并维持微波振荡的电子管。其中