

# 微波三、四极管 设计参考资料



国防工业出版社

# 微波三、四极管设计参考资料

电子管设计手册编辑委员会 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

“微波三、四极管设计参考资料”是进行微波三、四极管工程设计的实用参考书。

本“资料”介绍电子渡越时间效应、参量计算、结构设计、特殊工艺及测试，放大器、振荡器谐振回路的计算、高功率同轴腔体、双回路放大器、宽带放大器及分布放大器的计算。

本“资料”所采用的计算公式、图表、曲线、数据、程序等，是在总结实践经验和分析现有设计资料的基础上经过整理、验算后给出的，并列举了设计实例，以进一步说明设计的选择考虑和步骤。

本“资料”主要供从事微波三、四极管及其回路设计、试制和生产的工程技术人员参阅，也可供电真空器件专业的教师和学生及使用微波三、四极管整机单位的人员参考。

## 微波三、四极管设计参考资料

电子管设计手册编辑委员会 编

\*

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

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 177/8 455千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：0,001—6,000册

统一书号：15034·1844 定价：2.20元

(限国内发行)

# 序 言

“微波三、四极管设计参考资料”是从微波三、四极管及其回路工程设计的实际需要出发，在总结管子及回路在科研、生产、使用等方面基本经验的基础上编成的。微波三、四极管与谐振回路的设计是密切相关的，管子设计不能象在低频时那样独立于回路设计之外，而回路的设计密切地依赖于管子的结构，两者的沟通是现代微波三、四极管发展的一个重要特点。本“资料”将管子设计和回路设计编在一起，正是试图适应这种发展的趋势。

在“资料”中汇编了管子的参量计算，较为详细地介绍了结构设计，给出了电子渡越时间效应大信号计算的一些结果，汇编了回路的一些基本运用形式，介绍了用于微波发生器的谐振回路的工程设计与计算，重点讨论了同轴型腔体的工程设计。

正文共分为十四章：

第一章简要地介绍了微波三、四极管的特点、种类、回路、应用与发展前景。第二章叙述了管子参量计算与确定主要电极尺寸的方法，近似地修正了超高频效应对有关工作参量的影响。第三章讨论了电子渡越时间效应，并给出了采用电子计算机进行大信号计算得到的一些结果。第四章叙述了总体结构设计、各电极的结构设计及材料选择，并讨论了阴极、栅极的热计算。第五章选择了一些典型的管子进行实例计算。第六章对微波三、四极管制造中的一些关键工艺进行了介绍。第七章讨论了微波三、四极管一般测试、特殊测试的方法及测试误差分析。第八章汇编了计算电子管工作状态的基本关系式。第九章介绍几种形式的谐振回路，以及中小功率微波放大器用的谐振回路的计算方法。第十章

介绍一般振荡器腔体工程设计方法。第十一章介绍一种适用于超高频雷达、电视、加速器用的功率发生器的高功率同轴腔体。第十二章选编了几种广泛用于电视发射机宽带功率放大的双调谐放大器，并讨论了放大器的工程设计方法。第十三章讨论如何运用现代滤波阻抗匹配网络的理论来设计宽带放大器，这种方法适用于设计具有契比雪夫响应，带宽10%以上的功率放大器。第十四章介绍分布放大器的基本概念和工程设计上的特点。附录中列出了电子渡越时间效应大信号计算程序，以及汇编了管子和回路设计中一些常用的数据、图表、曲线等。

本“资料”对现有的设计资料进行了收集、分析，对计算中采用的公式、图表、曲线进行了验算；计算公式一般只给出结果，省去部分分析过程和推导，各章均列有设计举例，以便尽快了解和掌握设计方法。

考虑到，微波三、四极管在国内开展工作虽然较久，但对管子及回路设计实践经验和理论积累还不够系统，有一些内容还不成熟，故本书定为“设计参考资料”。

# 目 录

第一章 概述 .....	1
§ 1.1 微波三、四极管的特点 .....	1
§ 1.2 微波三、四极管的工作原理 .....	3
§ 1.3 微波三、四极管的种类 .....	4
§ 1.4 微波三、四极管的谐振回路 .....	4
§ 1.5 微波三、四极管的应用与发展前景 .....	5
第二章 参量计算和主要电极尺寸的确定 .....	8
§ 2.1 引言 .....	8
§ 2.2 电子渡越角的分析 .....	8
§ 2.3 超高频效应的修正 .....	13
§ 2.4 工作频段的确定 .....	16
§ 2.5 增益带宽乘积的计算 .....	17
§ 2.6 放大系数的计算和栅极结构的考虑 .....	18
§ 2.7 极间距离的确定 .....	22
§ 2.8 阴极回衰功率的计算 .....	24
§ 2.9 静态跨导的计算 .....	29
§ 2.10 极间电容的计算 .....	33
§ 2.11 四极管参量和电极尺寸的计算 .....	36
2.11.1 由运用状态求电子管静态参量 .....	37
2.11.2 由电参量求电极尺寸 .....	39
2.11.3 超高频效应的验算 .....	42
§ 2.12 尺度比例设计法 .....	43
§ 2.13 设计程序 .....	46
第三章 电子渡越时间效应 .....	48
§ 3.1 引言 .....	48
§ 3.2 计算方法简述 .....	48
3.2.1 阴栅区间接应电流的计算 .....	51

3.2.2	阳栅空间感应电流的计算 .....	55
3.2.3	阴极发射电流平均值及感应电流的分解 .....	56
3.2.4	输出功率、激励功率、增益、效率及阳极损耗的计算 .....	57
§ 3.3	计算实例及典型数据 .....	58
§ 3.4	阴栅区间渡越效应的讨论 .....	62
§ 3.5	阳栅空间电子渡越时间的影响 .....	68
第四章	结构设计及材料选择 .....	73
§ 4.1	总体结构考虑 .....	73
4.1.1	微波三、四极管频率与电子管几何尺寸的关系 .....	73
4.1.2	平板型微波三、四极管的典型结构 .....	89
4.1.3	圆柱型微波四极管的典型结构 .....	96
§ 4.2	阴极 .....	97
4.2.1	对阴极热丝的结构要求 .....	98
4.2.2	旁热式氧化物阴极的典型结构 .....	103
4.2.3	旁热式氧化物阴极的热计算与热丝结构设计 .....	107
§ 4.3	栅极 .....	125
4.3.1	栅极的结构类型 .....	125
4.3.2	栅极材料的选择与降低栅极温度的措施 .....	131
4.3.3	栅极的热计算 .....	133
4.3.4	栅极谐振频率的检验 .....	146
§ 4.4	阳极 .....	148
4.4.1	阳极的结构设计与材料选择 .....	148
4.4.2	阳极的冷却计算 .....	155
§ 4.5	管壳及电极引线 .....	162
§ 4.6	消气剂 .....	165
第五章	实例计算 .....	169
§ 5.1	FC-11F 的设计计算 .....	169
§ 5.2	FC-4 的计算 .....	183
§ 5.3	6C6D 的计算 .....	186
§ 5.4	FM-7F 的计算 .....	188
§ 5.5	FU-252F 的计算 .....	190
§ 5.6	6C24D 的计算 .....	195
第六章	特殊工艺 .....	200
§ 6.1	精密细丝框架栅的制造 .....	200

§ 6.2	近阴栅距管子的装配和测量 .....	209
§ 6.3	钛陶瓷管的熔封工艺 .....	216
§ 6.4	钛陶瓷管的老炼工艺 .....	221
§ 6.5	整管阴栅距离的调整 .....	223
第七章	微波三、四极管的测试 .....	226
§ 7.1	一般测试 .....	226
7.1.1	一般要求和注意事项 .....	226
7.1.2	通用测试 .....	227
7.1.3	振荡器的测试 .....	229
7.1.4	放大器的测试 .....	229
§ 7.2	特殊测试 .....	232
§ 7.3	测量误差的讨论 .....	235
第八章	放大器工作状态的计算 .....	244
§ 8.1	微波三、四极管放大器电路的特点 .....	244
§ 8.2	放大器工作状态的计算 .....	248
8.2.1	概述 .....	248
8.2.2	工作状态和阳流流通角的选择 .....	250
8.2.3	要求在负载中得到给定功率的放大器的计算 .....	252
8.2.4	在给定回路等效电阻时放大器的计算 .....	259
§ 8.3	负载变化对各项工作参数的影响 .....	262
§ 8.4	放大器输出电路的分析 .....	263
第九章	微波三、四极管的谐振回路 .....	266
§ 9.1	同轴型谐振回路的计算基础 .....	267
9.1.1	微波三、四极管的等效电路 .....	267
9.1.2	同轴型谐振回路的基本特性 .....	270
§ 9.2	同轴型谐振回路的结构型式 .....	280
9.2.1	双端同轴回路 .....	280
9.2.2	环形谐振腔 .....	282
§ 9.3	同轴回路的调谐方法 .....	285
9.3.1	同轴回路的电容调谐 .....	285
9.3.2	不接触活塞的阻抗调谐 .....	289
9.3.3	改变同轴回路长度的调谐 .....	294
§ 9.4	耦合电路的计算 .....	297
9.4.1	电感耦合电路 .....	298



9.4.2	电容耦合电路	302
9.4.3	直接耦合电路	304
§ 9.5	设计举例	305
§ 9.6	矩形波导和脊波导谐振回路	309
9.6.1	矩形波导的传输特性	310
9.6.2	脊波导的传输特性	312
9.6.3	矩形波导和脊波导谐振回路	320
§ 9.7	带状线的特性及应用	329
9.7.1	带状线的特性	329
9.7.2	带状线振荡器	332
第十章	振荡器的设计与计算	337
§ 10.1	振荡器工作状态的计算	337
§ 10.2	同轴腔双回路共栅振荡器的回路设计	339
10.2.1	回路与电子管的连接方式	339
10.2.2	同轴腔径向尺寸的确定	340
10.2.3	同轴腔几何长度的确定	340
10.2.4	附加反馈的选择	342
§ 10.3	反馈系数的频率校正	346
§ 10.4	振荡器设计举例	350
§ 10.5	重入型振荡器	357
第十一章	高功率同轴腔体的设计与计算	368
§ 11.1	腔体径向尺寸的选择	368
11.1.1	窄带腔体径向尺寸的选择	368
11.1.2	宽带腔体径向尺寸的选择	371
§ 11.2	放大器腔体的设计与计算	373
11.2.1	高功率输出电路的设计与计算	373
11.2.2	调谐元件的结构实现	380
11.2.3	用镜像法设计输出电路	382
11.2.4	输入电路设计	386
11.2.5	帘栅腔体的设计	387
11.2.6	腔体辅助元件的设计	389
11.2.7	输出电路设计示例	393
§ 11.3	高功率振荡器腔体的工程设计	409
第十二章	双调谐放大器的设计与计算	422
§ 12.1	甚高频电视发射机用的双调谐放大器	423

12.1.1	概述 .....	423
12.1.2	1kW 电视发射机末级放大器的输出电路 .....	428
12.1.3	10kW 电视发射机末级的输出电路 .....	430
12.1.4	双调谐电路的调整 .....	431
§ 12.2	超高频双调谐放大器的设计 .....	432
12.2.1	输出腔的设计 .....	433
12.2.2	输入腔的设计 .....	442
12.2.3	中和电路 .....	444
12.2.4	腔体简介 .....	445
第十三章	用网络综合法设计宽带放大器 .....	447
§ 13.1	电抗性负载阻抗匹配网络的基本原理 .....	447
§ 13.2	契比雪夫低通原型阻抗匹配网络 .....	450
13.2.1	规定通带内 $(L_A)_{\max}$ 为最小的契比雪夫阻抗匹配网络低通原型 .....	452
13.2.2	规定通带波纹的契比雪夫低通原型网络 .....	459
§ 13.3	电抗耦合四分之一波长微波带通阻抗匹配网络的设计 .....	462
§ 13.4	宽带功率放大器输出网络的设计 .....	468
§ 13.5	宽带输入电路的设计 .....	472
§ 13.6	设计示例 .....	474
§ 13.7	用电子计算机分析设计宽带输出电路 .....	482
§ 13.8	宽带放大器的级联 .....	490
§ 13.9	放大器的冷测 .....	494
§ 13.10	同轴管简介 .....	496
第十四章	分布放大器 .....	504
§ 14.1	概述 .....	504
§ 14.2	分布放大器的设计计算 .....	507
14.2.1	电子管数目 $N$ 和传输线特性阻抗 $Z_0$ 的选择 .....	507
14.2.2	阳极、栅极传输线-低通网络的选择 .....	510
§ 14.3	改善分布放大器性能的工程措施 .....	512
§ 14.4	分布放大器对电子管的要求 .....	515
§ 14.5	分布放大器实际举例 .....	516

## 附 录

附录一	常用的物理常数 .....	519
附录二	国产典型的微波三、四极管参数表 .....	520

附录三 电子渡越时间效应的计算程序及简要说明 .....	524
附录四 均匀传输线 .....	540
1. TEM 传输线的常用公式一览表 .....	540
2. 同轴线的特性阻抗, 电容和电感数值表 .....	540
3. 同轴线的特性阻抗 .....	545
4. 同轴线的电感和电容 .....	546
5. 矩形同轴线的特性阻抗 .....	547
6. 矩形与圆形截面对称板线的等效关系 .....	548
7. 对称带状线的特性阻抗 .....	549
附录五 同轴线中的不均匀性 .....	550
1. 同轴线中径向金属棒的低频电抗 .....	550
2. 同轴线中柱的电纳 .....	550
3. 同轴线中不连续阶梯电容 .....	551
4. 等阻抗、不同直径同轴线的联接 .....	553
附录六 回路设计常用图表 .....	554
1. 两节四分之一波长阻抗变换器设计图表 .....	554
2. 余弦脉冲分解系数 .....	555
3. 击穿电压关系图 .....	556
4. 金属材料的高频电性能 .....	557
5. 分贝与电压和功率的关系 .....	558

# 第一章 概 述

## § 1.1 微波三、四极管的特点

微波三、四极管是静电控制电子管的一个分支，也是微波电子管的一个种类。

随着无线电技术的发展，无线电设备的工作频率从长波、中波、短波、超短波而扩展到微波波段。与此相适应，对静电控制电子管的结构作了很大改进，使它能适用于微波波段，发展出一系列微波三、四极管。同时，人们不断地从理论上和实践上探索新途径，研制出许多种新型的微波电子管，如速调管、磁控管、行波管等。

微波三、四极管虽然是从“低频”三、四极管的基础上发展起来的，但是无论是管子的结构，还是应用电路中的元件及其结构，都和低频电子管有所不同。

首先，在分米波的低频段，电子管的极间电容和电极引线电感对电子管的工作发生影响：（1）使输入电导随频率迅速增加，从而加重了栅极的负载效应；（2）使等效负载阻抗随频率的提高而减小，结果使效率降低，阳极耗散功率增加。因此，为了提高微波三、四极管的工作频率，必须缩小电极尺寸以减小极间电容，采用短而粗的电极引出线，甚至采用盘状引出环，以减小引线电感。

其次，在分米波的高频段和厘米波段，电子在电极间的渡越时间和振荡周期可以比拟时，出现了电子渡越时间效应。这种效应对电子管工作的影响是：（1）增加了电子管的输入电导，加重了栅极的负载效应；（2）降低了输出功率，增加了阳极耗散功率，

效率下降；(3)部分电子回轰阴极，对阴极产生加热效应。因此设计微波三、四极管时，需要考虑缩小极间距离或提高工作电压来克服电子渡越时间效应的影响。

另外，微波三、四极管在超高频下工作时，还产生高频辐射损耗、高频介质损耗等现象，集中参数谐振回路的品质因数也会下降，结果使输出功率受到严重影响。因此，微波三、四极管通常不用集中参数的电路元件，而采用分布参数的电路元件，如同轴谐振腔等。在设计管子时，必需考虑管子结构与谐振腔体配合的问题。

通常所谓微波波段，指的是从300MHz直到3000MHz。微波三、四极管目前的最高工作频率为20000MHz左右，在此频率下，输出功率只有毫瓦级，而大部分微波三、四极管应用在300~6000MHz范围之内。

微波三、四极管根据用途可分为小信号收信放大管和大信号振荡管两类。功率等级也有很大差别，小的只有几十毫瓦，大的可达兆瓦级。根据用途和功率大小，其外形尺寸也有很大不同，小的只有铅笔那样粗细，大的有煤球炉那么大。

微波三、四极管与其他类型微波管相比，具有一定的优点：

- (1) 结构简单，体积小，重量轻，制造成本较低；
- (2) 工作电压低，电源简单而经济；
- (3) 不需聚焦的附加装置；
- (4) 频率稳定度高，相位稳定性好，负载失配容限大。

因此，微波三、四极管有广泛的用途。但是，与其他微波管相比，也有其固有的缺点：

- (1) 工作频率不太高；
- (2) 频带较窄；
- (3) 增益较低。

因此，整机选用何种管型，须根据设计任务指标来选定。

## § 1.2 微波三、四极管的工作原理

从电流流通的情况来讲，微波三、四极管的工作原理和低频三、四极管的工作原理相同，它们都是通过控制栅极电位对阴极附近的空电荷（或阴极表面电场）的静电作用来控制电子流的，所以微波三、四极管也称为静电控制超高频管。电子流从阴极向阳极运动的过程中，与交直流电场发生能量交换，使信号放大或自激振荡。但是，如在前面已经指出过的，在微波波段内工作时，管子的极间电容、引线电感、电子渡越时间的作用，对输入电路和输出电路均有相当大的影响。当工作频率提高时，作为放大器，增益下降，输出功率减小，输入阻抗降低，激励功率增加。而作为振荡器，它的输出功率随频率增加而极快地降低，电极上耗散功率超过额定值（尤其是栅极功率耗散）。这些不良影响，最终将导致管子不能正常工作。

减小极间电容影响的方法有：

- (1) 减少电极工作面积；
- (2) 减少分布电容，采用双端引出线或辐射形引出线结构；
- (3) 采用分布参数的调谐回路，使极间电容成为分布电容的一部分，起终端电容的作用。

减少引线电感的方法有：

- (1) 缩短并加粗电极引线、两线并联或采用盘状引出环结构；
- (2) 采用栅地电路，因为它可以把较大的阴极引线电感并入谐振电路，而栅极引线电感可以做得较小。

克服电子渡越时间影响的方法有：

- (1) 缩短极间距离；
- (2) 提高阳极工作电压；
- (3) 提高阴极电流密度。

此外，电子管在超高频工作时，还受高频集肤效应、高频辐

射损耗、高频介质损耗的影响。为了减少这些损耗，通常用镀银导线，以减小集肤效应所引起电阻的增加。采用高频陶瓷，或将介质置于高频电场较弱之处，来减少介质损耗。采用封闭式的谐振回路，如同轴线、谐振腔、波导管等使高频电磁场全部封闭在腔体内，从而高频损耗大大减少。

### § 1.3 微波三、四极管的种类

微波三、四极管的发展，先后经过盘封管、灯塔管、金属陶瓷管、笔形管、钛陶瓷管、谐振腔管、同轴管等。其工作频率已提高到 20000MHz 左右，分米波段输出功率也提高到兆瓦级。

根据国内外目前的发展情况，微波三、四极管按电极结构，可分为同轴型结构和平板型结构两大类：

#### 1. 同轴型

- (1) 笔形管；
- (2) 金属陶瓷发射管；
- (3) 同轴管。

#### 2. 平板型

- (1) 灯塔管；
- (2) 盘封管；
- (3) 钛陶瓷管；
- (4) 内腔管；
- (5) 金属陶瓷平板发射管。

另外，近年来还研制了从电路方面提高微波三、四极管性能的方法，如分布放大器、级联放大器等。

### § 1.4 微波三、四极管的谐振回路

微波三、四极管的谐振回路随着使用频率的不同，有着各种不同的形式。在微波低端，采用传输线段和半集总参数元件构成谐振回路。随着频率的提高，回路广泛地采用各种分布参数传输

线段，其中，最普遍地应用同轴线型谐振回路。在一些中小功率设备中，有时也采用波导、脊形波导和带状线或平板线作为谐振回路，使结构更紧凑，便于加工和使用。

微波三、四极管广泛地用于微波能的产生和放大，随着各种应用的发展，回路的形式也由简单向复杂发展。最初的放大器采用单调谐回路，随着通信、电视工程的发展，对信号带宽提出更高的要求以及近代雷达电子对抗的需要而产生了双耦合谐振回路和多重谐振回路。用于短波超视距雷达的分布放大器，为了获得极宽的频带，最有效地利用微波三、四极管的分布电容，其回路则是一个利用集总参数元件构成的传输线。

谐振回路的设计、随着使用频率和功率的提高密切地依赖于管子的结构，当管子尺寸和工作波长的四分之一可以相比拟时，管子本身的内部结构成了谐振系统的重要组成部分。与低频不同，回路和管子的密切联系是设计微波三、四极管谐振回路的重要特点。其设计方法也因任务不同而异；例如，分析一个分布参数谐振系统，常用等效参数法，以便可能运用成熟的集总参数电路理论。设计一个简单的腔体，利用阻抗圆图求解是方便的，但是这种方法积累误差和读数粗糙限制了它在设计复杂系统中的应用。相位-幅度分析法适用于 TEM 模式工作的各种分布参数谐振系统，其物理概念明确，参数直观，计算精度也能满足工程要求。把现代微波滤波阻抗匹配网络的理论和电子计算机结合起来设计宽带放大器则是微波三、四极管发展中的一种新方法，它已用于超高频段设计出了高功率宽带同轴管，而在微波领域内设计出各种高性能的级联放大器。

### § 1.5 微波三、四极管的应用与发展前景

随着电子技术的发展，微波三、四极管的应用范围也越来越广。它可以为工业、农业、科学技术、国防建设服务。

具体应用如下：



- (1) 用于工、农业微波加热设备的微波功率源；
- (2) 用于小功率振荡源（如信号发生器）；
- (3) 在各种雷达中作脉冲自激振荡器或功率放大器；接收机中作低噪声放大器；
- (4) 在单边带通信、卫星通信、遥测、微波中继通信等设备中，作功率振荡器及放大器；
- (5) 用于航天电子设备中，如飞机、火箭、导弹、卫星的导航、无线电信标，测距等；
- (6) 用于引爆装置中；
- (7) 用于电视发射机及电视中继站中；
- (8) 用于粒子加速器、射电天文望远镜、微波医疗仪器中。

微波三、四极管虽已有广泛的用途，但仍在不断向提高性能和提高质量的方向发展。其发展趋势为：

- (1) 提高工作频率和功率，提高效率，增大增益带宽乘积，延长寿命，提高可靠性；
- (2) 对单边带通信及电视用管子，提高线性度；
- (3) 研制具有高稳定性的工作频率达 600MHz、功率为兆瓦级的高增益的脉冲功率放大四极管；
- (4) 研制特殊用途的同轴管放大器、超高频宽带分布放大器及级联放大器。

近年来，半导体器件发展很快，比较微波三、四极管与半导体器件，可以看出：

微波三、四极管的工作频率高、承受功率大、效率高、增益高、频带宽、相位稳定性好、耐高温、抗辐射、参数性能稳定、可靠性也较高；但是体积较大、笨重、成本高，不利于整机小型化。

半导体器件的体积小、重量轻、耐冲击、耐振动、成本低、工作电压低，有利于整机小型化；但由于受材料、尺寸和散热性能的限制，频率、功率不易提高，稳定性差，特别是瞬时过载能