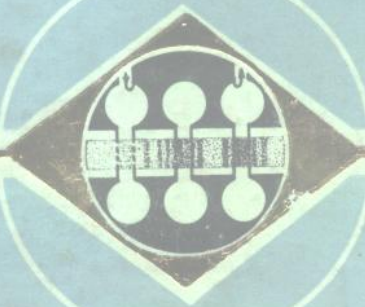


大功率速调管设计手册



国防工业出版社

大功率速调管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书较系统地叙述了大功率速调管的设计方法。全书共分九章，第一章至第三章介绍大功率速调管的基本原理、性能及总体设计方法；第四章至第六章介绍大功率速调管的高频部件（谐振腔、宽频输出回路和输出窗）的设计和测试方法；第七章至第九章介绍速调管的特殊问题、测试和使用，以及结构工艺等。

本书可供从事大功率速调管研制和生产的人员阅读，也可供使用大功率速调管的人员和高等院校有关专业的师生参考。

大功率速调管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

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 × 1168¹/32 印张9⁷/8 插页2 248千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数：00,001—12,000册

统一书号：15034·1791 定价：1.75元

(限国内发行)

前 言

在毛主席“独立自主、自力更生”的伟大方针指引下，我国电子管的科研和生产从无到有，并取得了很大的成就。为了加速电子管技术的发展，提高管子的技术性能，增加品种门类，缩短研制周期，赶超世界先进水平，满足从事电子管生产、科研和使用的广大技术人员、工人和干部的迫切需要，在第四机械工业部领导下，我们组织编写了这套电子管设计手册。

这套手册的每个分册一般均包括基本工作原理、设计方法、测试方法和应用等几个方面的内容。在选材方面，以总结我国电子管设计的实践经验为主，同时，根据“洋为中用”的方针，也选取了国外一些有用的资料。

这套设计手册的编写工作，在毛主席革命路线指引下，坚持了群众路线，实行了技术人员、领导干部、工人、生产、科研、使用和厂、所、校等几个三结合，贯彻了理论联系实际的原则，进行了比较广泛的调查研究和群众性的经验总结。每个分册定稿前，都经过有关人员多次的讨论、补充和修改，对手册中提供的设计方法和计算公式进行了验算和实验验证。因此，这套设计手册本身就是广大群众集体智慧的结晶。

在编写设计手册的过程中，许多单位的领导和同志们给予了支持和帮助，并提供了很多宝贵的经验和资料，对此，我们深表感谢。由于具体工作做得不好，编写人员水平有限，手册中难免还存在某些缺点，甚至错误，我们衷心希望广大读者批评指正。

电子管设计手册编辑委员会

序 言

大功率速调管在微波电子管中占有重要地位。由于它具有极大的输出功率、高增益、长寿命、高稳定性等特点,所以在雷达、通信、直线加速器、微波加热等方面获得了广泛的应用。

本手册主要介绍大功率速调管的电气设计、结构设计和性能测试(包括部件和整管性能)所用的方法。电气设计包括直流电子注参量的选择、高频参量的初步选定、小信号增益频宽的分析 and 计算、大信号效率频宽的分析 and 计算、谐振腔的设计与计算、宽频带输出回路的设计,以及大功率输出窗的设计。结构设计主要包括大功率速调管的机械调谐结构、电子枪的结构、管子的对中方法、收集极和管体的冷却,以及典型速调管的结构。部件的“冷测”包括谐振腔、输出窗和输出回路性能的测试。整管性能测试包括高压老炼、输出功率、频带特性、相位特性和脉间噪声的测量。

本手册从工程设计需要的角度出发,提供了有关的设计公式、图表和用计算机进行有关设计计算的程序,并说明了它们的来源、使用条件和范围,但没有给出详尽的或系统的理论推导。如须要更详细地了解某方面的问题,读者可以参阅所给出的有关参考资料。

目 录

序言	1
第一章 概 论	1
§ 1.1 基本工作原理	1
§ 1.2 速调管的发展、特点及应用	2
§ 1.3 性能指标的描述	4
1.3.1 主特性	4
1.3.2 副特性	6
1.3.3 工作状态与工作参数	8
第二章 大功率速调管的总体设计	10
§ 2.1 速调管总体设计考虑	10
2.1.1 输出功率	10
2.1.2 增益和带宽	11
2.1.3 效率	15
2.1.4 非线性问题	20
2.1.5 聚焦方式和调制方式	24
§ 2.2 速调管参量的选取与计算	26
2.2.1 直流电子注参量的选择	27
2.2.2 电子注成形与聚焦参量的确定	31
2.2.3 电子注群聚参量的计算与选择	36
2.2.4 电子注与高频场互作用参量的计算	40
2.2.5 谐振腔参量的确定	44
2.2.6 相对论修正系数	47
§ 2.3 多腔速调管小信号增益频宽的计算	49
2.3.1 主要计算公式	49
2.3.2 小信号计算机程序说明	52
2.3.3 主要计算结果及讨论	54
§ 2.4 速调管效率频宽的分析和计算	56
2.4.1 引言	56
2.4.2 一维电子圆盘模型	57
2.4.3 运动方程	58

2.4.4	差分方程	60
2.4.5	空间电荷力的计算	61
2.4.6	电子注中高频电流分量的计算	64
2.4.7	电子注与群聚腔相互作用的计算	65
2.4.8	速调管效率的估算	67
2.4.9	计算机程序及其说明	67
2.4.10	计算的主要结果及分析	71
第三章	静电聚焦速调管的设计	76
§ 3.1	静电聚焦速调管的特点	76
§ 3.2	静电聚焦速调管的设计	78
3.2.1	设计考虑	78
3.2.2	电子注功率与导流系数的限制	82
3.2.3	小信号增益计算	83
§ 3.3	静电聚焦速调管中的振荡问题	86
§ 3.4	静电聚焦速调管使用中的一些问题	87
3.4.1	关于耐压问题	87
3.4.2	高频散焦问题	89
第四章	谐振腔的设计与计算	91
§ 4.1	双重入圆柱形谐振腔的设计	91
§ 4.2	双重入角柱形谐振腔的设计	113
§ 4.3	耦合元件的设计	115
§ 4.4	谐振腔的机械调谐	117
4.4.1	调谐方式	117
4.4.2	调谐机构对谐振腔其它特性的影响	122
§ 4.5	谐振腔的测量	123
第五章	大功率速调管宽频输出回路的设计	133
§ 5.1	引言	133
§ 5.2	滤波器型输出电路与波导滤波器的等效	135
§ 5.3	波导滤波器的设计	138
§ 5.4	输出腔与滤波器第一节的等效	145
§ 5.5	滤波器型宽频输出回路设计举例	146
§ 5.6	滤波器型输出回路的测试	150
§ 5.7	分布作用输出电路的设计	157
5.7.1	周期的选择	159
5.7.2	谐振腔及耦合缝的设计	159

5.7.3	分布作用腔的模式	160
5.7.4	分布作用腔的振荡问题	161
第六章 输出窗的设计		164
§ 6.1	盒型窗的设计	164
6.1.1	窗片尺寸的选择	164
6.1.2	圆波导长度的计算	167
§ 6.2	波导阶梯窗的设计	171
6.2.1	单向阶梯窗的设计	172
6.2.2	双面阶梯窗的设计	177
§ 6.3	高功率门钮窗的设计	181
§ 6.4	窗的材料	185
§ 6.5	高功率窗的特殊问题——二次电子 倍增效应及其抑制	186
§ 6.6	窗的高功率试验	189
第七章 大功率速调管的特殊问题		195
§ 7.1	高压绝缘	195
7.1.1	电极间真空耐压	195
7.1.2	外部绝缘	197
§ 7.2	工作时的保护	199
§ 7.3	工作时的防护	203
第八章 测试与使用		208
§ 8.1	热测前的准备工作	208
8.1.1	测定低电压下的阴极发射	208
8.1.2	冷高压老炼	209
8.1.3	聚焦系统的结构与安装	210
8.1.4	管子的安装	212
§ 8.2	直流特性的测试	212
§ 8.3	输出功率、效率和增益的测量	213
§ 8.4	频带特性的测量	217
§ 8.5	相位灵敏度、相位线性及 调幅-调相转换的测量	220
§ 8.6	脉间噪声测量	222
§ 8.7	交叉调制(变频效应)的测量	223
§ 8.8	速调管的使用	224

第九章 结构与工艺	226
§ 9.1 谐振腔结构的考虑	227
§ 9.2 输入、输出结构的考虑	228
§ 9.3 狄泵	229
§ 9.4 电子枪的结构设计	230
9.4.1 阴极加热功率的估算	230
9.4.2 灯丝的结构设计	232
9.4.3 电子枪绝缘段问题	237
9.4.4 聚束极的热发射问题	237
9.4.5 电子枪的对中	238
§ 9.5 谐振腔机械调谐的结构设计	240
9.5.1 调谐元件与腔壁的接触	240
9.5.2 调谐机构	244
9.5.3 快速信道调谐机构	245
§ 9.6 收集极及管体的冷却	246
9.6.1 速调管常用的冷却方式	247
9.6.2 收集极内电子发散和耗散功率 密度的分布	249
9.6.3 收集极的结构考虑	252
9.6.4 计算举例	255
9.6.5 管体的冷却	258
§ 9.7 速调管的加工和工艺	260
9.7.1 速调管零件的公差配合	260
9.7.2 速调管的焊接结构	262
9.7.3 速调管零件的机械加工	265
9.7.4 速调管的焊接、装配和烘排	266
§ 9.8 几种典型速调管结构	267
附录 I	271
附录 II	296
附录 III	302

第一章 概 论

§ 1.1 基本工作原理

速调管[●]的简单示意图如图 1.1 所示。其工作原理简述如下：从阴极发射的电子经电子枪的作用形成均匀的电子注，它穿过一系列谐振腔达到收集极。如果有高频信号馈送到输入腔，并且与

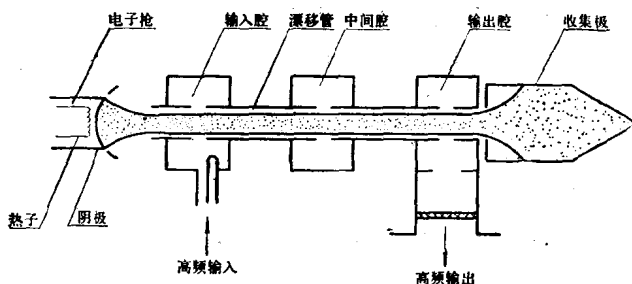


图1.1 速调管示意图

腔谐振，则将在输入腔中激起高频振荡。电子注穿过腔的间隙时，受到高频场的作用，在正半周穿过间隙的电子受到加速，而负半周穿过的电子受到减速，即速度受到调制，电子速度变得有快有慢。在继续前进的过程（通常称为漂移）中，快电子将逐渐赶上慢电子，使电子注中的电子分布疏密不匀。这种现象称为群聚。已群聚的电子注穿过第二腔时，将在腔内感应起高频电流。如果第二腔也调谐到工作频率，感应电流将激起比第一腔更强的高频振荡，反过来，又使电子注受到比第一次更强的速度调制。如此反复，当电子注进入第三腔、第四腔以至输出腔时，便激起一次比一次更强的高频振荡。振荡的能量通过输出腔的耦合孔到达输

● 本书所述的速调管均为大功率速调管。

出波导，再通过输出窗送到负载或天线上，从而完成了高频信号放大的任务。电子注在此过程中经历了速度调制、群聚、激励谐振腔、再调制、再群聚、再激励的反复过程，电子注的一部分能量转换成高频能量，而剩余的能量在电子轰击收集极时转化为热能。

速调管的基本功能是，通过电子注与高频场的相互作用将直流能量转换成高频能量。为了使转换效率最高，需要进行定量的分析，摸清它的规律。设计时，要选择最佳的电子注参量、腔的间隙、腔与腔之间的漂移长度、漂移管尺寸、每个腔的频率和品质因数，等等。

速调管通常由下列各部分组成：一个能发射足够电流的阴极；保证阴极达到所需要的工作温度的热子；使电子会聚成注并能承受高压的电子枪；维持电子注不发散的聚焦系统；使电子注全部能量转换成热能的收集极和相应的冷却系统；能够传输全部高频功率且无反射的输出窗；与电子注相互作用并将电子注能量转换成高频能量的谐振腔和输出系统；改变谐振腔频率的调谐系统，等等。

§ 1.2 速调管的发展、特点及应用

速调管的发展大体上可以分为几个阶段。三十年代末，发明了双腔速调管放大器，其增益为20分贝左右，效率仅为20~30%。四十年代后期，开始研制大功率速调管，用于直线加速器的三十兆瓦S波段速调管可以说是一个典型。随着雷达性能的不断改进，要求有频率稳定度高的大功率宽频带发射机。为了适应这一要求，五十年代在宽频带速调管的研制方面取得了显著的进展，基本上达到了成熟的地步。

到六十年代，为了适应多种用途和各种不同性能的需要，速调管的各项性能指标都有不同程度的提高。突出的是，为了减轻重量，发展了静电聚焦速调管，其单位重量的功率比磁聚焦速调

管的大数倍，达到每公斤平均功率几百瓦。近年又出现了 120 千瓦脉冲功率的 X 波段周期磁聚焦速调管，其重量仅为 3.6 公斤。为了展宽频带，发展了多种新型的输出结构，特别是兆瓦级的行波速调管，已有定型产品，其频宽达 12~15%，超过同等功率量级的普通速调管和行波管，效率约 30~38%。为了提高效率，利用谐波调制的研究也获得了进展，用于工业加热的 50 千瓦实验管，采用二次谐波腔，效率高达 75%。利用二次谐波空间电荷群聚技术做出了 10 千瓦 C 波段连续波速调管，其效率达 56~59%，并有一定的带宽（16 兆赫）。此外，还发展了多级降压收集极及速度跳变等方法，进一步提高了效率，为适应卫星电视转播的需要而研制的高效率速调管，采用了多达十级的新型反射收集极。为了散热的需要，还应用了导热管的新技术，有关辐射收集极的新技术也开始研制。为了提高连续波功率，研制了具有扩展作用腔（或称多间隙腔）的 1 兆瓦 X 波段速调管。还研制了多注速调管以提高总功率；研制行波多注速调管以提高功率和带宽，其电子注的数目多达 10 个以上。为了调谐方便，已成功地采用了“频道调谐”及“自动调谐”的新技术，后者在几秒钟内即可更换一个频率。除此之外，快速电子计算机也日益广泛地应用于速调管的设计。

从总的发展情况看，速调管的功率潜力，无论脉冲功率还是平均功率，都超过了其它类型的微波管。增益也是所有微波管中最高的，曾达到高于 80 分贝的稳定增益。效率低于 M 型器件而高于行波管。工作稳定性和寿命也是比较好的。主要的不足之处是频宽较窄。功率越小，频宽越窄。在目前的电子对抗中，频宽具有特别重要的意义，因而它的应用受到了一定的限制。

由于速调管的特点，它主要用来作为微波发射机的末级功放。在各种类型的雷达中，它仍然是很主要的微波器件之一。从 P 波段到 X 波段都有应用。大型雷达所使用的管子的脉冲功率为几百千瓦到十几兆瓦，其平均功率达几十千瓦至数百千瓦。在各

种通信机中，速调管的使用也很普遍。卫星通信地面站使用C波段及X波段的连续波速调管，功率一般为1~15千瓦。散射通信用的多在L，S及C波段，功率为1~20千瓦。电视广播发射机也常使用速调管，频段多数在几百兆赫，采用外腔式，功率最高达50千瓦。在高能直线加速器的微波源中，速调管由于能达到特大功率，在微波波段几乎处于独占的地位。民用的小型加速器，如用于医疗或金属探伤的 γ 射线源，也有采用速调管的。此外，近年逐渐推广的工业和民用微波加热和干燥设备，功率在几千瓦的，多用磁控管，而功率在几十千瓦的，常用速调管。

§ 1.3 性能指标的描述

性能指标主要是使用部门根据整机的要求提出来的。下面列举最常遇到的指标和某些有关的指标，以便于使用与研制双方协商指标时参考。对于不同的使用目的，应有不同的侧重点。

1.3.1 主 特 性

一、输出功率

对脉冲工作应包括峰值功率及平均功率，同时应规定最大的脉冲宽度和工作比（或重复频率）。

对连续波工作只有平均功率。但通常是指在饱和运用条件下，输入为单频的连续波所得出的输出功率，若输入为已经编码的信号（例如是调相编码），则实际测得的平均功率往往要低些。

二、效率

通常指直流能量转换为高频能量的效率，即输出高频功率 P_{out} 与馈给电子注直流电源功率 P_0 之比。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_0} = \frac{P_{out}}{V_0 I_0}$$

V_0 ， I_0 为电子注的电压和电流。对于脉冲工作，以上量都是指脉冲参量。

有时还提出总效率的要求, 则输入功率还应包括热子功率 P_t 、聚焦电源功率 P_p , 有时还要包括冷却系统功率 P_c 。

$$\eta_t = \frac{P_{out}}{P_0 + P_j + P_f + P_c}$$

三、工作频率范围和频宽

所谓频宽 (或称带宽), 就是在一定的条件下, 能满足一定的技术指标的频率范围。在不同场合, 使用部门允许的条件和指标各不相同, 频宽的含义也就各异。这些条件通常包括: 是否允许机械调谐, 是否允许调整聚焦电流和直流高压, 是否允许改变激励功率。衡量带宽的技术指标通常是: 功率不低于某一额定值, 带内输出功率不低于最大值以下 1 分贝或 3 分贝。表 1.1 列出几种最常用的频宽定义。

表 1.1 几种常用频宽的定义

定 义	条 件			指 标
	调 谐	聚 焦 电 流	激 励 功 率	
瞬时带宽 (或通频带)	不调	不变	不变	功率波动 (小于 1 分贝或 3 分贝)
饱和带宽	不调	调到最佳	最佳	同上
工作频段 (或可调带宽)	可调	调到最佳	最佳	功率不低于额定值

四、增益

增益是高频输出功率与激励功率之比。

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad \text{〔分贝〕}$$

速调管工作于饱和状态或线性状态 (小信号状态) 增益是不等的, 通常饱和增益要比小信号增益小 5~10 分贝, 甚至更多。

另外, 同一只管子调谐于宽带工作状态与窄带工作状态, 增益也是不等的, 可相差 20 分贝以上。

五、寿命

衡量寿命的指标有以下几种:

1. 管子实际工作的总小时数（即加有高压和有高频输出）；
2. 仅加有灯丝电压的总小时数；
3. 贮存寿命，管子出厂后允许存放而不失效的时间。

1.3.2 副 特 性

本节列举的参量主要是管子的稳定性、非线性及杂散输出。稳定性、非线性及杂散输出往往是不可分割的，没有严格的界限，最终都表现为输出的失真、寄生调制或干扰。电源不稳定造成的输出波动，表现为输出的寄生调制或交流噪声。相位的非线性可造成输出相位不稳定，引起相位失真、误码或串音。振幅非线性也能引起类似效果。因此对不同的使用场合将侧重于不同的指标。

一、功率稳定性（功率随诸参量的变化）

（1）输出功率变化——当电子注直流高压变化1%时，输出功率变化的百分率，以%/ %表示。

（2）幅度变化——频率变化1兆赫时功率的最大变化的分贝数，以分贝/兆赫表示。这一参量主要表示带内幅-频特性允许的最大斜率。

（3）幅度波动——聚焦磁场电流变化1%，功率变化的百分率，以%/ %表示。

二、相位稳定性

速调管的相位特性是指输出信号与输入信号之间的相移与其它参量的关系。通常，多腔速调管作为信道的电长度为几个至十几个波长，绝对相移 $1000^{\circ} \sim 3000^{\circ}$ 左右。各种因素都会影响相移。

（1）相位灵敏度——电子注电压变化1%引起的相移变化，以度/ %表示。

（2）调幅-调相转换（或称相位-幅度畸变）——激励信号幅度变化引起的相移变化，一般以度/分贝表示。这也是一种相位非线性。

（3）相位波动——聚焦磁场电流变化引起的相位变化，以

度/%表示。

三、相位非线性及群延迟

速调管是发射机放大链的一个环节，群延迟是

$$\tau_g = \frac{d\phi}{d\omega}$$

式中 ϕ ——速调管输入、输出相位差；

ω ——信号角频率。

若系统的相移-频率特性为直线，则群延迟为一常量，信号无畸变。相位非线性一般是指 $\phi - f$ 特性偏离直线的程度，在一定频带内，以最大偏离的度数表示。群延迟畸变是指频带内群延迟的变化范围（频带中心与边频群延迟之差的一半），以毫微秒表示。

四、交叉调制和线性度

当速调管工作于多载波体制（如卫星通信）或调幅体制（如电视），则要求工作点选在线性区域而不是饱和状态。描述线性度的方式，可以直接测量输入-输出特性，或表示为增益-激励特性。为了用数量表示，在单频工作时，可用“幅度压缩”作为非线性度的量度，多频工作时，可用“交叉调制分量”作为量度。二者虽有联系，但并没有严格的函数关系。

（1）幅度压缩——工作点近于饱和时，激励功率变化的分贝数引起输出功率变化的分贝数（后者较小），以分贝/分贝表示。

（2）交叉调制分量——两个或两个以上不同频率的激励信号同时馈入速调管，在输出端产生的新的频率分量与载波分量之比，可以用分贝来表示。偶次交调分量远离频带不造成干扰，只有奇次（主要是三次）交调落入频带内。一般测定的标准是：将双载波（这里指的双载波是二纯音、无调制、规定一定的频率间隔，例如 1.5~10 兆赫）激励速调管，使两个载波的输出幅度相等，用频谱仪或接收机测三次（或五次）交调分量与载波功率之比。输出越接近饱和，交叉调制越强。同时双频激励的饱和输出功率低于单频激励的饱和输出功率。

五、噪声

大功率速调管通常作为发射机的末级功放，一般情况下，它的噪声对系统的影响不严重，同时它是窄带器件，带外噪声被抑制。但若管子工作不正常，例如有正离子振荡引起寄生调制，噪声可能达到可观的电平。此外，灯丝的交流电源、高压电源的波纹，以及机械振动都可能引起寄生调制，并表现为输出噪声，这些是整机设计时应考虑的。在某些应用场合，要求极高的频谱纯度，脉冲雷达要求极低的脉间噪声电平。在这种情况下，管子固有的噪声仍然是必须考虑的指标。背景噪声是在管子加高压而未加激励信号时用接收机测出的输出噪声功率，可分为调幅噪声和调频（或调相）噪声，以一分贝/赫或一分贝/千赫表示，即在1赫（或1千赫）带宽内的噪声功率与载波功率之比的分贝数。

$$\text{噪声-功率比} = \frac{\text{噪声功率/带宽}}{\text{载波功率}}$$

若采用噪声系数，其定义如下：

$$\text{噪声系数} = \frac{\text{噪声功率/增益}}{\text{热噪声功率}} = \frac{\text{噪声功率/增益/带宽}}{\text{热噪声功率密度}}$$

式中 热噪声功率—— $kT\Delta f$

其中 k ——波尔兹曼常数，为 1.38×10^{-23} 焦耳/K；
 $T = 290\text{K}$ （室温），有时取 300K 。

六、谐波

谐波是非线性器件所不可避免的。速调管电子注中谐波电流分量极多；不过，由于谐振腔的滤波作用，输出谐波功率一般并不严重；但也可能对附近的其它机器造成干扰。谐波主要是二次和三次分量，一般约为载波的 $-20 \sim -40$ 分贝。

1.3.3 工作状态与工作参数

工作参数主要是指为使速调管达到要求的性能所提出的工作条件；当然使用者也可对这些条件提出限制的要求。下列项目是