

O 型返波管设计手册



国防工业出版社

73.645
709

○型返波管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编



国防工业出版社

8510637

内 容 简 介

本书较全面系统地叙述了O型返波管的设计方法。全书共分七章。第一章和第二章介绍返波管的特性参量和基本工作原理；第三章和第四章分别介绍返波管所用高频系统和电子枪的设计计算方法；第五章介绍返波管相互作用区的设计计算及举例；第六章介绍返波管主要部件的结构和制造工艺；第七章介绍返波管高频系统及整管的测试。

本书可供从事O型返波管研制和生产的人员阅读，也可供使用O型返波管的人员和高等院校有关专业的师生参考。

0023 19

O型返波管设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

责任编辑 刘树兰

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

850×1168¹/₃₂ 印张10³/₈ 271千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷 印数：0,001—2,370册

统一书号：15034·2767 定价：2.75元

7830108

序 言

O型返波管是一种小功率宽频带电子调谐器件，在微波技术中获得了广泛的应用。

本手册系统地叙述了O型返波管的工程设计方法。为了使读者了解设计方法的物理本质，前两章简要论述了返波管发展的历史和返波管的基本工作原理。第三章对返波管常用的交叉指型慢波结构和螺旋线型慢波结构进行了系统的深入的理论分析，给出了许多计算公式、曲线和数据。第四章叙述了电子枪的设计计算方法。第五章介绍了返波管相互作用区的设计计算方法，给出了几种返波管相互作用区的设计程序，并且列举了一些设计计算实例。第六章是结构和工艺设计，主要包括慢波结构的加工与夹持方法、电子枪的结构和工艺、电子枪与慢波结构的对中、终端吸收器的制造工艺、收集极结构，以及返波管的一些特殊工艺结构。第七章详细叙述了高频系统的一些电参量的冷测方法，也介绍了返波管的热测及使用注意事项。

参加本手册编写的有刘盛纲、徐承和、周文、李煊、李美达、李宏福、张富鑫、张开炽、柴天洁等。参加编写工作和提供资料的有夏同书、王基奎、苏光鉴、陈君乐、郑卓全、候文秀、赵颖威等。在编写本手册的过程中，曾得到有关单位的大力支持和帮助，还有许多同志提了不少宝贵意见，谨在此表示衷心感谢。

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 返波管的特性参量	4
§ 1.3 返波管发展简介	10
§ 1.4 返波管设计中应注意的一些问题	13
第二章 返波管的基本工作原理	15
§ 2.1 引言	15
§ 2.2 返波管的小信号理论	16
2.2.1 求线路方程	17
2.2.2 求电子方程	19
2.2.3 求特征方程	20
2.2.4 返波管的增益	22
2.2.5 返波管的自激	23
2.2.6 返波管中场分布的特点	36
2.2.7 电子调谐斜率	37
2.2.8 频率推移	37
2.2.9 返波管振荡建立时间	38
§ 2.3 返波管的效率和输出功率	41
§ 2.4 若干实际因素对返波管工作影响的讨论	43
第三章 返波管的高频系统	47
§ 3.1 返波管对高频系统的要求	47
§ 3.2 返波管常用的慢波结构	48
§ 3.3 周期性结构的基本特性	51
3.3.1 空间谐波和色散特性	51
3.3.2 周期性结构的几个重要定律	53
3.3.3 慢波场在横截面上的变化	54
3.3.4 空间谐波的耦合阻抗	55

§ 3.4 螺旋线慢波结构	55
3.4.1 概述	55
3.4.2 螺旋线慢波结构的色散特性	56
3.4.3 单螺旋线负一次返波色散特性的计算	62
3.4.4 反相激励双螺旋线色散特性的计算	66
3.4.5 介质对螺旋线色散特性的影响	67
3.4.6 螺旋线负一次返波耦合阻抗的计算	69
3.4.7 螺旋线的特性阻抗	80
§ 3.5 交叉指型慢波结构	82
3.5.1 交叉指型慢波结构的理论分析	83
3.5.2 交叉指型慢波结构的色散特性	86
3.5.3 交叉指型慢波结构的特性导纳	88
3.5.4 交叉指型慢波结构的耦合阻抗	104
3.5.5 交叉指型慢波结构的特性阻抗和输入阻抗	107
§ 3.6 周期零散对相速的影响	108
§ 3.7 返波管的终端吸收器	109
§ 3.8 返波管的能量输出装置	112
3.8.1 单螺旋线返波管的能量输出装置	113
3.8.2 双螺旋线返波管的能量输出装置	117
3.8.3 交叉指型慢波结构的能量输出装置	120
第四章 电子枪的设计计算	125
§ 4.1 概述	125
§ 4.2 电子注的成形和聚焦	127
4.2.1 轴对称电子注的聚焦原理	127
4.2.2 带状电子注的聚焦原理	133
4.2.3 电子枪区电子的运动	134
§ 4.3 返波管电子枪的工程设计	139
§ 4.4 多阳极旋转补偿枪	142
4.4.1 多阳极旋转补偿枪的原理	142
4.4.2 多阳极旋转补偿枪的设计步骤	152
第五章 返波管互作用区的设计计算	156

§ 5.1	概述	156
§ 5.2	单螺旋线返波管相互作用区的设计程序	158
§ 5.3	双螺旋线型返波管设计程序	174
§ 5.4	交叉指型返波管相互作用区的设计程序	176
§ 5.5	返波管相互作用区设计举例	184
5.5.1	单螺旋线型返波管相互作用区设计举例	184
5.5.2	双螺旋线型返波管相互作用区设计举例	189
5.5.3	单排交叉指型返波管相互作用区设计举例	194
5.5.4	双排交叉指型返波管相互作用区设计举例	204
§ 5.6	特殊要求的返波管设计说明	212
5.6.1	低压运用返波管	212
5.6.2	高调谐斜率返波管	214
第六章	结构和工艺设计	216
§ 6.1	慢波结构的加工和夹持方法	216
6.1.1	交叉指型慢波结构的加工与夹持方法	217
6.1.2	螺旋线型慢波结构的加工与夹持	218
§ 6.2	电子枪的结构和工艺	220
6.2.1	电子枪结构	220
6.2.2	电子枪与慢波结构的对中	222
§ 6.3	终端吸收器的制造工艺	223
6.3.1	喷涂碳基铁粉	223
6.3.2	碳膜衰减器	225
6.3.3	镍铬合金的真空蒸发法	226
6.3.4	金属喷涂法	226
§ 6.4	进一步提高管内真空度的措施	226
§ 6.5	返波管的特殊工艺结构	228
6.5.1	收集极结构设计	228
6.5.2	引线滤波器	229
6.5.3	离子收集极的应用	229
第七章	返波管高频系统及整管的测试	232
§ 7.1	慢波结构色散特性的测试	232

VIII

7.1.1	谐振法	233
7.1.2	活动短路法	239
7.1.3	有功探针法和无功探针法	242
§ 7.2	慢波结构耦合阻抗的测试	243
7.2.1	小扰动体法	243
7.2.2	大扰动体法	244
7.2.3	吸收法	245
7.2.4	纵向场分布的测量	248
7.2.5	谐波耦合阻抗的测量	250
§ 7.3	终端吸收器衰减量的测试	253
7.3.1	替代法	253
7.3.2	活动短路法	253
7.3.3	窄波导法	255
7.3.4	扫频法	256
§ 7.4	返波管中反射的测量	257
7.4.1	移相法和变频法	257
7.4.2	扫频测试外观驻波比	258
§ 7.5	返波管的热测	259
7.5.1	输出功率的测量	259
7.5.2	返波管振荡工作频率的测量	261
7.5.3	返波管频谱特性的测量	262
7.5.4	返波管起振特性的测量	264
7.5.5	测试中一些现象的分析	265
§ 7.6	返波管的使用	268
附录		270
附录 I	国外返波管参数一览表	270
附录 II	平衡-不平衡转换接头	293
附录 III	单、双螺旋线的耦合阻抗及特性阻抗	306
附录 IV	返波管互作用区长度计算的一种方法	320

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

返波管是微波电真空器件的一种，它利用慢波结构上的返波与电子注相互作用而产生微波振荡。这种管子的主要特点是可在很宽频带（通常约为一个倍频程）内实现电子调谐。在研究行波管的过程中，发现慢波结构上存在返波与电子注相互作用时可实现自激振荡，从而发明了返波管这一新型器件。它从五十年代初问世以来，至今已有三十年的历史。返波管分为O型和M型两大类，按功率来分，前者是小功率，后者是大功率宽电子调谐器件。本手册仅讨论小功率O型返波管。为书写简便，以下把O型返波管简称为返波管。

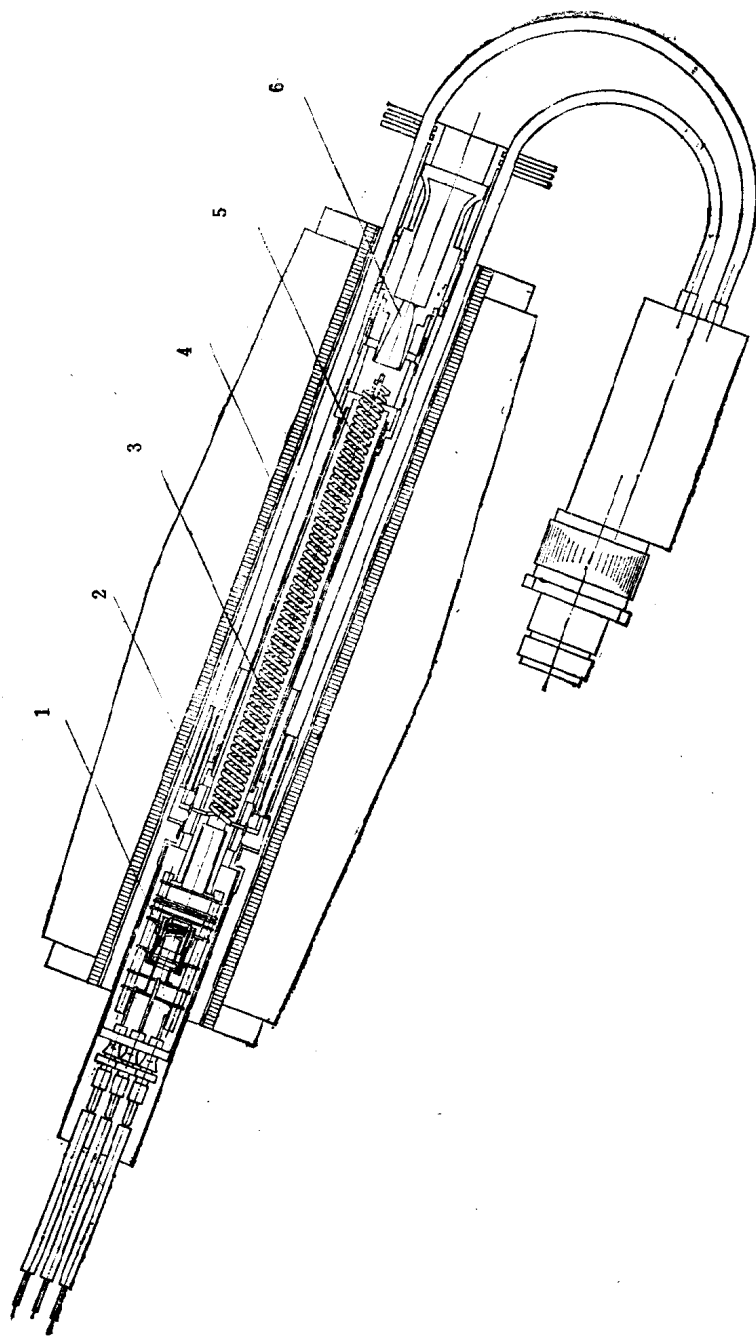
返波管的典型结构如图 1.1 所示，它由以下几个主要部件构成。

（1）电子枪 它的作用是提供一个成形良好的、能与返波场发生有效作用的电子注。由于返波管是通过电压调谐频率的，电子注的加速电压变动范围很大，所以在电压变动大时要求工作电流的变动尽可能小，以降低全频带的功率落差。

（2）磁聚焦系统 它使电子注保持一定形状，不致扩散。返波场在慢波结构附近较强，要使电子注与返波场有效地相互作用，就要求电子注贴近慢波结构行进而不被截获，或者截获尽可能小，这样，就要求聚焦系统能保证电子注的脉动小。通常采用均匀永磁场聚焦，其聚焦性能良好，缺点是磁体较重。有时也采用周期永磁聚焦和周期静电聚焦，但频带较窄，管子输出特性较差，在实际产品中用得不多。

（3）慢波结构 它是一种周期结构的高频系统，能在足够宽的频带内传输反向慢电磁波（返波）。在返波管中广泛应用的是

8510637



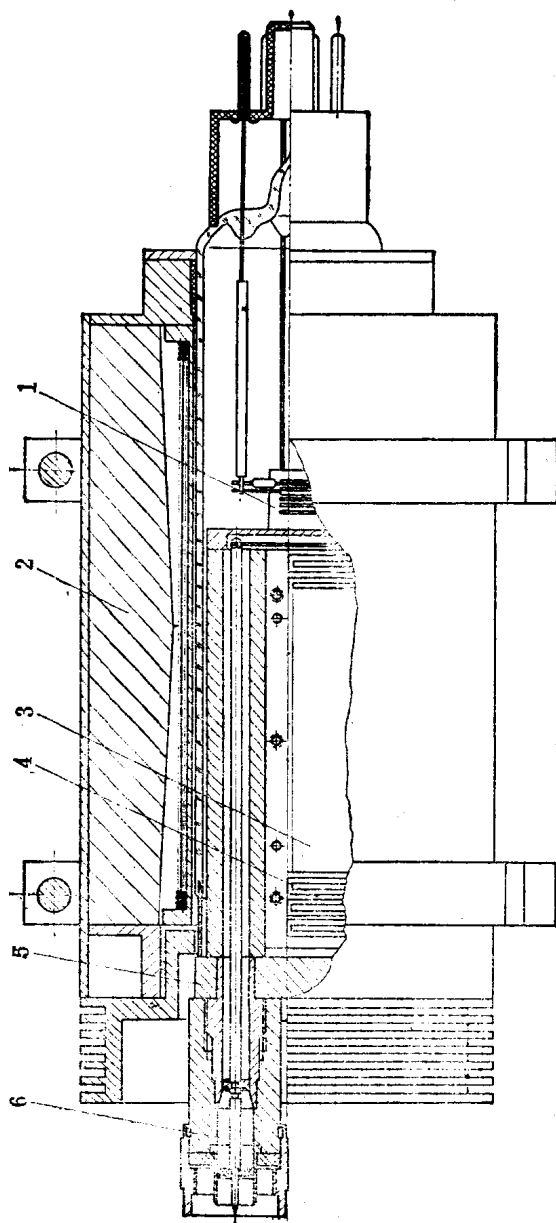


图1.1 返波管的典型结构

1—电子枪, 2—磁聚焦系统, 3—慢波结构,
4—终端吸收器, 5—收集极, 6—能量输出器。

螺旋线和交叉指型慢波结构。

(4) 终端吸收器 它处于慢波结构的终端(靠近收集极端),使慢电磁波在此匹配吸收,以克服波在慢波结构终端产生的反射对管子工作的不良影响。

(5) 收集极 它收集完成换能作用的电子。收集极必须有良好的散热性能。

(6) 能量输出器 它的任务是将管内振荡信号尽量无损耗地传输至外负载。返波管中慢波结构上电磁波能流方向与电子注运动方向相反,故能量输出器位于慢波结构靠近电子枪的一端。它分为同轴输出和波导输出两类。同轴输出结构小巧,易于做到一个倍频程的带宽,所以波长大于 3 cm 的各波段都采用同轴输出。更短波长的返波管则采用波导输出。

如果返波管中工作电流低于起振电流,则可使输入信号产生返波放大,成为返波放大器。返波管也可作为变频器,在这种管中有两段慢波结构,一段使外来信号产生返波放大,另一段作返波振荡产生本振信号。这两个不同频率的信号通过调制电子注发生变频作用。返波放大的增益不易稳定,所以,返波管作放大器或变频器在实用上很少见。

原则上说,一个返波管可以有二个或二个以上倍频程的调谐频宽,但这样的管子其频带两端的输出功率相差悬殊。为使管子全频带的功率落差小,实用返波管的调谐范围取一个倍频程以内的居多数。

§ 1.2 返波管的特性参量

作为一种宽频带电子调谐的微波振荡器,标志返波管特性的有以下一些主要参量:

1. 电子调谐带宽

改变慢波结构上电压 U_0 , 从而改变电子速度,就可以改变返波管的振荡频率,实现返波管的电子调谐。

电子调谐带宽是指在最小的额定输出功率以上,一个返波管

可连续调谐的频率范围。它常以频率覆盖度表示。用 $f_{\max}$ 及 $f_{\min}$ 分别表示返波管的最高工作频率及最低工作频率，则定义返波管的频率覆盖度为

$$D = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (1.2.1)$$

有时也用相对于中心频率的百分比来表示：

$$D_0 = 2 \left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \right) \times 100\% \quad (1.2.2)$$

一般在调谐范围较大时采用 D ，而在调谐范围较小（不足一个倍频程）时用 D_0 。

从原理上讲，返波管可以做到很宽的频带，但实际上受能量输出器带宽及电压范围的限制。采用同轴接头的商品管，频宽为一个甚至 $2 \sim 3$ 个倍频程。在频率较高时（如高于 8 GHz ），一般采用波导型能量输出器，管子的频率覆盖度便取决于波导的通带。此外，当允许的工作电压范围受到限制时，频率覆盖度也很难做到很大。

与 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 相对应的慢波结构电压 $U_{0\max}$ 和 $U_{0\min}$ ，称为返波管的最高和最低工作电压，其范围称为返波管工作电压范围。有时，人们按返波管的最高工作电压分类，将 $U_{0\max} \geq 1000 \text{ V}$ 的称为高压返波管， $U_{0\max} < 1000 \text{ V}$ 的称为低压返波管。用户往往对 $U_{0\max}$ 提出一定限制，设计时应加以考虑。

使用中，为了确保管子在设备上的互换性，要求同型号返波管的电子调谐特性具有“一致性”，即要求同型号各管同一电压所对应的工作频率尽量做到一致。

2. 电子调谐斜率

在规定的工作频带范围内，工作频率与慢波线电压关系曲线的斜率称为电子调谐斜率，即

$$S = \frac{df}{dU_0} \text{ [MHz/V]} \quad (1.2.3)$$

电子调谐斜率主要取决于慢波结构的色散特性。一般分米波

段的 S 约为 1 MHz/V ，厘米波段则为每伏几兆赫到几十兆赫。对于同一只返波管， S 通常在低频端较大，高频端较小。

不同的使用目的对电子调谐斜率有不同的要求。如希望频率稳定，则要求电子调谐斜率小些；如希望实现快速扫频，则要求它大一些。在一定的频带范围内，电子调谐斜率小就意味着调谐电压（即慢波线电压）变化范围大。在设计时，要对电压变化范围和调谐斜率的要求加以综合考虑。

由于多种原因，返波管的电子调谐曲线并不是理想平滑的，往往有起伏，如图1.2所示。为此，引入一个表示电子调谐曲线的“波动性”的参量

$$D_r = \frac{S_{\max}}{S_{\min}} \quad (1.2.4)$$

式中， $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别表示最大和最小电子调谐斜率。对这个参量提出要求时，显然必须注明 D_r 是在多宽的频率范围内取值。

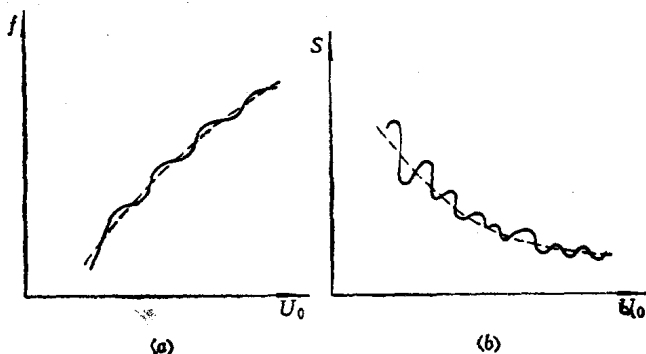


图1.2 返波管的电子调谐特性（虚线为理论曲线）

(a) $f-U_0$ 曲线；(b) $S-U_0$ 曲线。

性能不良的返波管具有较大的 D_r 值，甚至在调谐曲线上出现频率跳变或“断裂”，即出现“死点”或“死区”。在第七章中将对这种现象予以分析讨论。

返波管电子调谐特性出现“波动”，不仅与管子内部的反射有关，而且与管子外接传输系统（包括接头）的反射有关。当负

载处反射增大时, 电子调谐特性的“波动”也加大。此外, 返波管也存在有“长线效应”: 在负载不匹配时, 增加管外传输线长度, 会使电子调谐特性曲线的“起伏”加剧, 甚至发生调谐曲线“断裂”。如果终端吸收器质量好, 此现象可大大减少。因此, 在设计和使用返波管时, 必须力求做到尽可能好的匹配状态, 即驻波系数尽可能小, 特别是终端吸收器要做到良好的匹配吸收。

3. 输出功率

在确定的工作状态下, 返波管输出功率与慢波线电压或频率的关系示于图1.3。由图可见, 输出功率特性实际上是有起伏的。

反映返波管输出功率特性的参量有四个, 即:

(1) 工作频带内的最大输出功率 $P_{\max}$ (通常处在频带的中、高频端);

(2) 工作频带内的最小输出功率 $P_{\min}$ (通常处于低频端);

(3) 工作频带内的最大功率落差

$$D_{P_{\max}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \text{ [dB]} \quad (1.2.5)$$

(4) 规定电压或频率范围内的最大功率落差

$$D'_{P_{\max}} = 10 \lg \left(\frac{P'_{\max}}{P'_{\min}} \right) \text{ [dB]} \quad (1.2.6)$$

式中, $P'_{\max}$ 和 $P'_{\min}$ 分别表示规定的电压或频率范围内的最大和最小输出功率。 $D'_{P_{\max}}$ 说明了输出功率特性的“波动”或“起伏”, 它可以用来检查在小的电压或频率范围内输出功率的“波动”程度。

有时也用频带内相邻的最大功率落差 (即功率曲线上相邻的

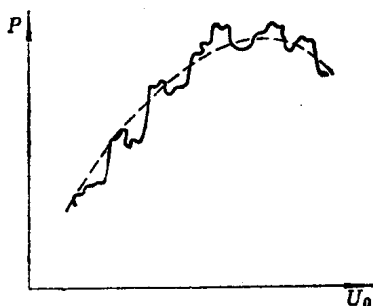


图1.3 返波管的输出功率特性
(虚线为理论曲线)

极大值与极小值之差的最大值)来表示功率的波动程度,这时 $P'_{\max}$ 和 $P'_{\min}$ 分别为有最大落差的相邻的最大功率和最小功率。

使用返波管时,一般要求工作频带内输出功率不低于某一水平,并且希望功率落差小,曲线平滑,无死点、断点。对功率落差的具体要求视整机而定。例如,有的频谱仪要求在整个工作频带内 $D_{P_{\max}} \leq 3 \sim 6 \text{ dB}$,而在 $\Delta f = 30 \text{ MHz}$ 的频率间隔内 $D'_{P_{\max}} < 0.5 \text{ dB}$ 。

与电子调谐特性一样,功率特性的起伏与管外负载有很大关系。负载驻波系数愈大,往往功率特性曲线的波动就愈大。

4. 频谱特性

在频谱分析仪上,可以观察到返波管振荡频率并非是单一的一根谱线。由于多方面的原因,使主振荡频率谱线有一定宽度,而且在主谱线以外尚有一些寄生谱线和噪声谱。反映返波管频谱特性的参量有四个。

(1) 主振荡谱线宽度 Δf_0 。指主振信号有多宽的频带。通常以主振谱线两侧高度50%处的频带宽度计算,称为3 dB带宽。如十厘米波段返波管的 Δf_0 一般约为100 kHz。另外也有按以主振谱线高度25%处的频带宽度来计算的,称为6 dB带宽。

(2) 寄生振荡电平 D_f 。在工作频带内,除主振信号及其各次谐波以外的一切其它振荡均属寄生振荡。主信号谱线幅度与最大寄生振荡谱线幅度之比(以dB表示)称为寄生振荡电平 D_f 。性能良好的返波管其寄生振荡很弱, D_f 可达到100 dB以上。

(3) 信噪比 D_g 。在主谱线外,除寄生振荡外,还会有频带极宽的噪声谱,称为白噪声。主信号幅值与最大噪声电平之比称为返波管的信噪比。

(4) 二次谐波电平 D_2 。在返波管工作频带以外,存在着二倍于主振信号频率的谐波,称为二次谐波。主振信号幅值与二次谐波信号幅值之比称为二次谐波电平。

5. 频率稳定性

作为振荡源来说,返波管振荡频率是否稳定是很重要的。振

荡频率在标称值 f_0 附近某一频带内变化的相对值即 $\frac{\Delta f}{f_0}$ ，定义为频率稳定度。有时也直接用 Δf 表示。

频率稳定度有瞬时频率稳定度和长期频率稳定度之分。在确定的极短时间间隔（如微秒）内，或在脉冲状态工作时，两个脉冲之间返波管主振中心频率变化的相对值称为瞬时频率稳定度。返波管长时间工作过程中频率变化的相对值称为长期频率稳定度。

影响频率稳定度的因素很多，表现也有所不同，有的表现为瞬时变化，有的表现为长期变化。由于影响频率的因素是多样的，故常用不同的系数来表示。

（1）慢波线电压变化的影响 根据式（1.2.3）可得

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{S}{f_0} \cdot \frac{\Delta U_0}{U_0} \cdot U_0 \quad (1.2.7)$$

由此式可定出频率稳定度与电压稳定度（即 $-\frac{\Delta U_0}{U_0}$ ）的关系。

对于返波管所用电源，一般要求电压稳定度约为 $(0.05 \sim 0.2)\%$ ，这时对分米波和厘米波返波管来说，相对频率稳定度约为 10^{-4} 数量级。

（2）频率推移 它表示工作电流变化引起的频率变化。通常定义频推系数为

$$K_f = -\frac{\Delta f}{\Delta I} \text{ [MHz/mA]} \quad (1.2.8)$$

电流变化常由热子电压、控制极电压或阳极电压的变化所引起，故有时直接应用频率与热子电压、控制极电压、阳极电压的关系来计算 Δf 值，并由频率稳定度的要求来定出对电子枪各极电压稳定度的要求。

（3）频率牵引 返波管的振荡频率与外负载的匹配情况有关。通常规定在一定的驻波系数下（例如驻波系数 $S = 4$ ），相位变化 180° 时频率变化的最大范围称为该驻波系数下的频率牵引，常用 Δf_L 表示。