

管 波 行

J. R. 皮尔斯 著



科学出版社

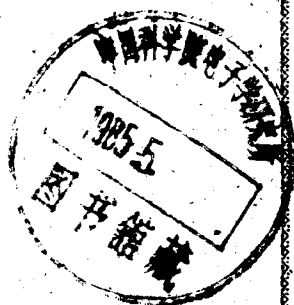
73.68
32

管 波 行

J. R. 皮尔斯 著

吳 鴻 适
田 志 仁 譯

中国科学院图书馆
1965.5
110.1175



科 学 出 版 社

1961

110.1175

Di 30/06

J. R. PIERCE
TRAVELING-WAVE TUBES
D. Van Nostrand Co., Inc., 1950

內 容 簡 介

本书是有关行波管基本理論的一本較好的著作，虽然初版于 1950 年，其中某些內容迄今已有很大发展，但大多数的材料还有一定参考价值。书中首先給出了行波管的一般描述，討論了各种慢波結構，然后引入了行波管的簡化方程并求出解答，再用来討論行波管的各方面的特性。全书大多章后附有习题。附录中包括了許多有用的公式、图表和曲线（供对行波管进行計算之用）。

本书可供行波管研究、設計及制造人員以及大专院校超高频电子器件专业学生参考之用。

行 波 管

J. R. 皮尔斯 著

吳 鴻 邁 譯
田 志 仁

科学出版社出版（北京朝陽門大街 117 号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1961 年 8 月第 一 版

书号：2374 字数：202,000

1961 年 8 月第一次印刷

开本：787×1092 1/27

（京）0001--9,000

印张：9 5/27

定价：0.98 元

譯 者 序

到目前为止，美国贝尔电话实验室电信科学研究主任 J. R. Pierce 在 1950 年所著的“行波管”一书，虽然其中某些内容迄今已有很大发展，但仍然是有一定参考价值的一本较好的著作。书中首先给出了行波管的一般描述和特例分析，然后讨论了慢波结构，引入了行波管的简化方程并求得解答。根据这些方程的解，作者讨论了行波管的总增益、插入损耗、交流空间电荷效应、噪声、场的分析、横向场的运用、反向波、功率输出等。最后并简要地讨论了行波磁控放大管和双注放大管。大多数章后附有习题。在附录中还包括了许多有用的公式、图表和曲线，以供对行波管进行计算之用。

译者根据 Pierce 的英文原本，并参考了苏联无线电出版社 1952 年的俄译本面进行翻译。在翻译过程中发现凡在英文原本中有叙述不很清楚或过于累赘的，在俄译本中已得到改正或删除，因此从俄译本。又英文原本中的脚注及习题在俄译本中已经删去，但译者觉得还有参考价值，因此从英文原本。有些公式符号及数字在英、俄文本中均有错误，译者都尽了最大努力在中文本中加以改正。

由于译者学识浅薄，在翻译时，难免有许多不当和错误之处。特别有些名词因系首次翻译，不得不加以杜撰，是否恰当，都希望各方面的读者能予以指正，以便在以后能加以修正。

目 录

第一章	引言	1
第二章	行波管增益的简单理论	5
2.1	行波管的描述	5
2.2	所用的分析的特点	6
2.3	由外加电流所引起的场	7
2.4	由场所生的对流电流	9
2.5	合总的线路和电子方程	12
第三章	螺旋线	17
3.1	螺旋导片	17
3.1a	相速	18
3.1b	阻抗参量($E^2/\beta^2 P$)	20
3.1c	螺旋线的阻抗	23
3.2	展开的螺旋线	25
3.3	导线尺寸的影响	28
3.3a	每波长两圈的情形	29
3.3b	每波长四圈的情形	35
3.4	传输线方程和螺旋线	36
3.4a	介质对螺旋线阻抗参量的影响	37
3.4b	耦合螺旋线	37
3.5	螺旋线的损耗	40
第四章	滤波型线路	42
4.1	场的解	42
4.2	实际的线路	50
4.3	具有集总常数的等效线路	51
4.4	行进场的分量	64
4.5	有效场与有效电流	65
4.6	驻波的运用	67

第五章 慢波綫路的一般特性	69
5.1 羣速与相速	69
5.2 行波管的增益和頻寬	71
5.3 各种慢波綫路的比較	73
5.3a 在場中有均匀的电流密度	73
5.3b 細电子注	75
5.4 实际上的限制	80
5.4a 壁厚的影响	80
5.4b 渡越時間	81
5.4c 固定的隙縫間隔	82
5.5 衰减	83
5.5a 慢波綫路的衰减	84
第六章 分解为正宗模式的場	87
6.1 纵向电流激励的橫磁模式	87
6.2 与第二章的結果的比較	92
6.3 展开的另一形式	93
6.4 周期性結構	95
第七章 行波管方程式	96
7.1 近似方程式	96
第八章 波的性質	101
8.1 电子速度变化的效应	101
8.2 衰减的效应	104
8.3 空間电荷效应	108
8.4 微分关系	112
第九章 不連續段	115
9.1 普遍边界条件	115
9.2 无耗螺綫, 同步速度, 无空間电荷	118
9.3 螺綫中的損耗	119
9.4 空間电荷	119
9.5 損耗的变化	120
9.6 切断的螺綫	122
9.7 有漂移空間的切断螺綫	124

9.8 管子的总特性	127
第十章 噪声系数	128
10.1 注流中的散粒噪声	128
10.2 二极管方程式	129
10.3 总噪声系数	134
10.4 其它噪声的考虑	138
10.5 横向场行波管中的噪声	138
第十一章 反向波	140
第十二章 功率输出	144
第十三章 电子的横向运动	153
13.1 线路方程	153
13.2 运动方程	156
13.3 复合方程	157
13.4 纯横向场	158
13.5 混合场	163
第十四章 场解	166
14.1 系统与方程	166
14.2 没有电子时的波	170
14.3 有电子时的波	172
14.4 解的一种特殊型式	177
14.5 与以前理论的比较	179
14.5a 线路方程的比较	179
14.5b 电子方程的比较	180
14.5c 复根	185
14.6 关于复根的一些评论	186
第十五章 磁控放大管	189
15.1 线路方程	190
15.2 运动方程	191
第十六章 双注放大管	196
16.1 双注放大管的简单理论	196
16.2 进一步的考虑	202
第十七章 结论	204

附录 1	各种参考資料.....	206
附录 2	电磁波在螺旋传导圓筒上的传输.....	213
附录 3	慢波結構的儲能.....	217
附录 4	空間电荷参量 Q 的計算.....	220
附录 5	Llewellyn-Peterson 二极管方程式.....	223
附录 6	細实心电子注阻抗与 Q 的計算.....	226
附录 7	行波管增益的計算.....	236
参考文献		240

第一章 引言

天文学家热衷于羣星和銀河，物理学家热衷于原子和晶体，而生物学家却热衷于細胞和組織，这是因为这些自然界的物体就环绕着我們，而我們必須去理解它們。行波管是一个复杂的組成，只有当行波管能胜利地与各种新的和旧的微波电子器件进行竞争时，我們才会热衷于它。在这种相对的意义下，行波管得到了胜利，因此是一种重要的器件。

但这并不意味着在所有方面行波管都比其它微波管优越。迄今为止它的效率虽然达到过百分之十以上，但比大多数的磁控管甚至某些速調管要低。可以合理地想象，行波管的效率将随時間的进展而得到改进。它的姊妹器件——磁控放大管*可以給出高效率。当然，效率不是衡量行波管好坏的主要指标。

虽然行波管的增益可达 30 分貝以上，它可和較新的双注放大管以及多腔速調管相抗衡，但增益也不是衡量行波管的主要指标。

在噪声系数上，行波管优于其它微波管，文献上已記載得到过 12 分貝左右的噪声系数**，这肯定是对行波管有利的很重要的一点。

在結構上行波管是简单的，这也是很重要的一点。简单的結構使行波管可能在高到 48,000 兆赫 (6.25 毫米波长) 作为一个完滿的放大器。当考虑到行波管曾成功地工作于 200 兆赫，我們发现行波管放大器复盖了一个多么巨大的頻率范围。

行波管的真正重大特点，使它不同于和优于早期的其它微波电子器件，是它的惊人的頻帶寬度。

* 譯者注：即 M 型行波管。本书中的行波管一般均指 O 型的。

** 譯者注：书中所列的发展水平数值迄今已有很大变动，請參閱书末参考文献。

可以比較容易地設計一些管子在 4,000 兆赫具有百分之二十的頻寬，即頻寬為 800 兆赫。L. M. Field 曾報告過 3 比 1 的頻寬，即從 350 兆赫延伸到 1,050 兆赫。似乎沒有理由說不能達到更大的頻寬。

在一般通信的應用中，通常要求較大的頻寬。例如用電報、電話或傳真所能傳輸的信息的速度直接與頻寬成正比。隨着在這些領域內更多信息的傳輸，就要求更大的頻寬。

除此之外，新的應用比舊的應用還要求更大的頻寬。4,000 赫的頻寬滿足了電話的通信。對一個高逼真度的廣播節目則需要 15,000 赫。一個簡單的黑白電視信道則佔據了約 4 兆赫的頻寬，或大約為電話所要求頻寬的一千倍。

除了為傳輸大量信息和新的應用需要大頻寬外，還有通常對較大頻寬的第三個要求。在調頻廣播中，需要高頻帶寬 150 千赫來傳輸 15 千赫的聲頻信道。這樣頻寬的成十倍加寬並不意味着浪費掉頻率空間，而額外的頻寬可以使得信號免于噪聲與干擾之害。另外一些有希望的調制方法如脈碼調制也是利用寬頻帶來避免畸變、噪聲與干擾。

目前在一單根同軸綫上利用 3 兆赫頻寬大約可傳送 600 路電話。很難作出一個具有為單邊帶傳輸所需的高質量放大器，而它的頻寬比以上還要再寬幾倍。在電視廣播上，採用了一些約 100 兆赫的載波頻率。在這樣低的頻率很難得到足夠數量的寬頻信道，以有效地增加電話和電視的傳送路數。

微波的廣泛應用提供了新的廣大的頻率空間。例如，整個廣播段才不過約 1 兆赫寬，還不足以傳送一路電視信號。而在微波波段從 6 到 7.5 厘米這一小部分內却有 1,000 兆赫的頻寬，可以用來同時傳送許多路電視以及需要寬頻帶的頻率調制或脈碼調制的信號。

為了充分利用微波頻率，就需要有相應的寬頻帶放大器。這是因為要在微波範圍內傳送大量的信息：許多路電話以及許多路電視。還有一個原因要求在微波範圍內有極寬的頻段。即為了

提供一个完整的全国性的电信业务,需要許多中繼站来放大信号。在同軸系統中对单边带信号的放大,或即使是幅度調制信号的放大,都要求放大沒有畸变,这在微波頻率看来是极难达到的;同时还希望避免干扰,这也是非常困难的。为了这些原因,看来几乎只能依赖于一个办法,就是采用寬頻带的調制方法,以克服放大器畸变和受干扰的缺点。

許多微波放大器在頻寬方面都不如較低頻率的放大器。速調管的頻寬可能比一个好的低頻五极管还要窄些。最近在貝尔實驗室研制的 416A 三极管,在 4,000 兆赫中心頻率时給出的頻寬比低頻时要大些。但速調管和三极管都有和其它一般管子相同的基本限制。在任一頻率若頻带加寬,增益就必然減低;对一給定管子頻寬超过某一数值就会沒有增益。这是因为信号必須通过某种諧振迴路才能加到管子輸入端的电容上。

在行波管中这个限制完全被取消了。既沒有輸入电容,也沒有諧振迴路。管子本身是一段均匀的傳輸綫,在前进方向有負衰減(即放大),在反方向則有正的衰減。頻寬只受将管子連接到信号源或負載的輸入輸出匹配結構所限制,而这类匹配結構的頻带可以作得很寬。行波管的增益随頻率有逐漸的变化,它允許頻寬为三倍或三倍以上。这意味着在微波范围内可以得到 1,000 兆赫以上的頻寬。頻带是如此之寬,一直到現在还没有办法去充分加以利用。

总起来說,在增益、噪声系数、結構的簡單性以及頻率范围方面,行波管都比其它微波电子器件优越。虽然它的效率不及磁控管高,但能达到合理的数值,同时預期也能得到更高的效率。最后,它能在与微波波段相称的頻率范围内进行放大。

本书目的在于对行波管的爱好者以及行波管的設計和研究人員,收集和提供一些有用的理論性材料。其中部分材料已发表过,另一部分是新的。

书中内容涉及到行波管的电子特性的真頻問題,以及它的內部綫路特性。慢波結構的輸入輸出匹配問題沒有討論。电子注的

产生和聚焦另有专书¹⁾，在此也不討論，还有管子的机械結構以及散热問題也不在討論之列。

在所討論的範圍內，作者企图选择一些有实用价值的材料，并使它尽可能容易懂。更細節的問題需要閱讀参考文献。书中只在對理論性的推論作一般性的評價时才偶尔用到实验的数据。

如果不先給出整个行波管的全景，要进行它的理論分析是困难的。为此下一章先給出行波管的簡要描述以及它的运用的簡要和特例分析。这章的目的在于給讀者一个对以后要分析的問題的粗略全貌。第三章到第六章討論了慢波結構的質和量的概念以及其限制。然后引入并解出行波管的总特性的簡化方程，考虑了总增益、插入損耗、交流空間电荷效应、噪声系数、場解以及橫向場的运用等。还給出了关于輸出功率的簡要討論。

最后两章簡要地討論了两类很相近的管子：行波磁控放大管以及双注放大管。

1) J. R. Pierce, "Theory and design of electron beams", Van Nostrand, 1954, 第二版。

第二章 行波管增益的簡單理論

2.1 行波管的描述

图 2.1 表示一个运用在 4,000 兆赫左右的典型行波管。它可以工作于阴极电流 10 毫安, 电子注压約 1,500 伏。一个行波放大管由两个主要部分组成; 一个是螺旋綫 (以后簡称螺綫) 用来产生具有軸向電場的慢电磁波; 另一个是电子流。在輸入端电磁波从

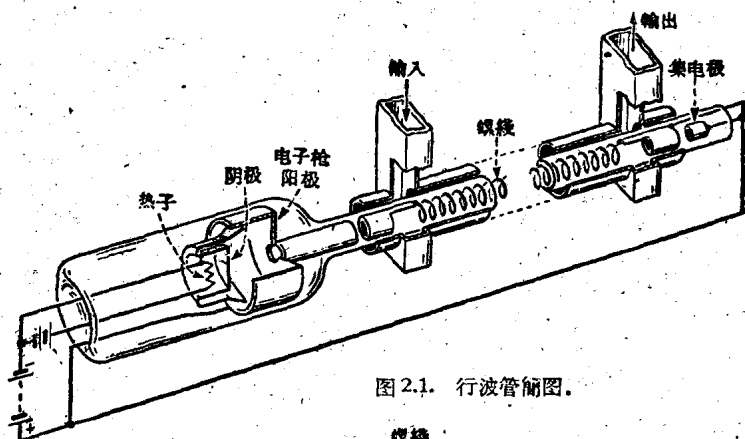


图 2.1. 行波管簡图。

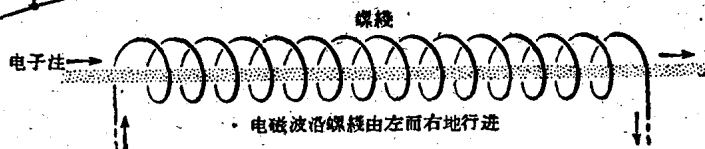


图 2.2. 有关电子与高频场相互作用而得到高频增益的行波管部分。

波导通过一根短天线而传送到螺綫, 同样在輸出端电磁波从螺綫轉移到一根短天线, 然后輻射到輸出波导。电磁波沿螺綫导絲以大致为光的速度在运行。当工作于 1,500 伏时, 它相当于光速的 $1/13$, 螺綫导絲的长度將約为螺綫沿軸长度的 13 倍, 这样才能使

沿螺綫軸的波速約為光速的 $1/13$ 。還採用一個約几百高斯的軸向聚焦磁場制束着電子注,使它能完全通過工作在 4,000 兆赫約 1 呎長的螺綫軸向長度。

在分析行波管的工作時,必須集中只注意兩部分,如圖 2.2 所示,即綫路(螺綫)和電子流。

2.2 所用的分析的特點

行波管的數學分析非常重要,它的重要性倒不只在於給出一個對運用的精確的數值預計,而更在於能給出關於運用的圖象,使得能至少定性地指出各種物理參量變化的影響。但要把行波管的所有現象都用一個很簡單而又能給出有用結果的理論來作滿意的描述似乎是不可能的。大多的分析都只是關於行波管的小信號或直綫性理論。電子注中的電流分布對管子的運用有重要的影響,但在一個實驗管中很難說到底是怎樣分布的。即使對直綫性特性比較細致的分析也是假定沿注截面具有恆等的電流密度。同樣,在大多數實際的行波管中,一部分電流損失在螺綫上,但在通常的理論中卻沒有考慮這一點。

一個關於行波管的絕對完整的理論是不可能建立的。看起來能得到最好數字解的辦法是先寫下在螺綫里面和外面的電子注微擾的合適的偏微分方程式。採用這個方法的有朱蘭成和 Jackson¹⁾ 以及 Rydbeck²⁾。從這方法可以得出一些從簡單理論只能進行估計的量,此外從這方法与從簡單理論得到的結果不單在性質上相同,在數量上也很接近。

在這裡所選擇的分析中,一開始就採用了一些近似。這不只簡化了數學計算,而且也削減了參量的數目,並給這些參量以簡單的物理意義。許多牽涉到噪聲、衰減以及各種邊界條件的有趣問

1) L. J. Chu and J. D. Jackson, "Field theory of traveling-wave tubes", PIRE, 36, 853—863, July, 1948.

2) O. E. H. Rydbeck, "The theory of the traveling-wave tube", Ericsson Technics, No. 46, 1943.

題都可以借助于这簡單理論的参量而得到解答。如果用更复杂的理論,那么每一个問題的解就不只是应用不同的公式,而几乎变成一个全新的問題。

从这种簡單理論中看不出的一些結果可以从对行波管更普适的討論中得到。其中某些內容将在第十二、十三和十四章中討論。

这里的理論是小信号理論,它意味着有关电子流动的方程已被綫性化,即略去了当信号小时可以忽略不計的某些量。結果可得一种波型的解。除了对分析的小信号限制以外,所采用的主要簡化假定是在电子流中的所有电子都受着同一个或至少是已知的交流場的作用。当电子注的直径足够地小,或在一个軸对称綫路中的空心圓筒形电子注中,所有电子将基本上被同样的場所作用着。

除了这些假定以外,在本节中还假定所有电子受交流場的作用只沿軸向产生位移。在第十三章中将討論电子与向移动的影响。

在本章中还采用了一个近似关系来計算电子与綫路的相互作用,即电子速度小于光速。

第六章中将討論对快波有效的、外加电流与綫路場間的更普适的关系。全书中都用了非相对性的运动方程。不論波速是多少,将假定电子速度总經常小于光速。

我們这里考虑的是在一个能传播慢电磁波的綫路和一束电子注之間的相互作用。可以认为綫路中的信号电流是由于扰动的电子流作用于綫路的結果,而电子流上的扰动却是由于綫路上的場作用于电子的結果。这样,問題本身自然就分成了两个部分。

2.3 由外加电流所引起的場

我們首先考虑由一个羣聚的电子流在綫路上产生扰动的問題。在本节中考虑这問題时,为了要使它适合于慢波以及电子速度小的条件,我們將采用图 2.3 所示的具有均匀分布的串联电感和并联电容以及电流 I 和电压 V 的綫路或網路。这綫路向 z 方向无限延展。一个电子对流电流 i 很接近于綫路而流动着。流入电

子注中任一小体积的位移电流与对流电流的总和必等于零。由于对流电流随流动方向的距离而变,所以将有 J 安/米的位移电流强

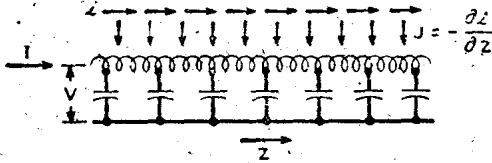


图 2.3. 行波管的等效线路。分布电感和电容选择得与作用于电子的相速与场强相一致。电子造成的外加电流是 $- \partial i / \partial z$, 这里 i 是电子对流电流。

加到传输线路上。我们假定电子注非常之细,同时非常接近线路,以致沿电子注的位移电流比起从电子注到线路的位移电流,可以忽略不计。在这情形下,流到线路的位移电流等于对流电流随距离的变化率。

如果对流电流 i 和外加电流 J 都是按正弦波随时间而变化,则图 2.3 中网路的方程式是

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -jBV + J, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -jXI; \quad (2.2)$$

式中 I 和 V 分别为线路中的电流和电压, B 和 X 分别为单位长度的并联电纳和串联电抗, J 是单位长度的外加电流。

可能有人反对,认为这些“网路”方程式不适合于高频率的传输线。诚然,在这线路中电场不能用一个标量电位来描述。但无论如何我们可以选择 BX , 使图 2.3 线路中的相速和某一个特定的行波管中一样。还可以进一步选择 X/B 使得在单位功率流的情况下,根据图 2.3 作用于电子的纵向场 $-\partial V / \partial z$ 等于某一特定行波管中的真正的场。这就使得(2.1)和(2.2)式变得有理。当相速小于光速时,从这些方程式得到的结果实际上是一个很好的近似,这以后将在第六章中得到证明。

我们感兴趣的是当所有量随距离以 $\exp(-\Gamma z)$ 而变化的情况。在这种情形下,可以用乘 $(-\Gamma)$ 来代替对 z 的微分。单位长度

的外加电流是

$$J = -\frac{\partial i}{\partial z} = \Gamma i. \quad (2.3)$$

式(2.1)和(2.2)变成

$$-\Gamma I = -jBV + \Gamma i, \quad (2.4)$$

$$-\Gamma V = -jXI. \quad (2.5)$$

如消去 I , 可得

$$V(\Gamma^2 + BX) = -j\Gamma Xi. \quad (2.6)$$

如果没有外加电流, 式(2.6)的右边将为零, 式(2.6)将变成通常的传输线方程。在这情形下, Γ 采取 Γ_1 , 即传输线的固有传播常数的值,

$$\Gamma_1 = j\sqrt{BX}. \quad (2.7)$$

前向波在线上以 $\exp(-\Gamma_1 z)$ 随距离而变, 反向波则按 $\exp(+\Gamma_1 z)$ 而变。

传输线的另一重要参量是它的特性阻抗 K ,

$$K = \sqrt{X/B}. \quad (2.8)$$

可以将串联电抗 X 表为 Γ_1 和 K 的关系,

$$X = -jK\Gamma_1; \quad (2.9)$$

这里符号的选择是在(2.7)式中的符号下保证 X 为正值。(2.6)式也可表为 Γ_1 和 K 的关系:

$$V = \frac{-\Gamma\Gamma_1 Ki}{(\Gamma^2 - \Gamma_1^2)}. \quad (2.10)$$

在(2.10)式中, 假定了对流电流 i 按正弦波形随时間变, 而按 $\exp(-\Gamma z)$ 随距离变。这电流将在线上产生电压 V 。式(2.10)中所给的电压也将按正弦波形随时間变, 而按 $\exp(-\Gamma z)$ 随距离变。

2.4 由場所生的对流电流

问题的另一面是去寻求由线路上的场在电子流上所产生的扰动。在这分析中, 我们将采用下列符号(均为 MKS 单位制):¹⁾

1) 各种物理常数列載于附录 1。