



行波管

物理及理论问题

PHYSICAL AND THEORETICAL PROBLEMS ON
TRAVELING WAVE TUBES

郭开周◎著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

行波管物理及理论问题

郭开周 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

21 世纪开始以来,在开发介于光波(含红外)和微波之间的尚未被完全认知的电磁波谱(太赫兹)的物理研究中,行波管的研究受到了重视。而在微波/毫米波领域,行波管仍然在雷达、通信、电子对抗系统中发挥着重要作用,并且不断在发展。可惜到现在为止有关行波管的理论研究仍落后于实验研究。本书取名“行波管物理及理论问题”,着重给出有关行波管的物理图像,同时给出了几种至今仍然有深刻影响的理论体系公式和导出这些公式的假设,与物理图像对照可以发现这些理论缺陷出现的根本原因。书中对一些理论研究工作提出了一点粗浅的设想,也给出了一些技术平台的信息和建议,因为任何理论研究都必须用实验去检验。书中也对行波管遇到的挑战归纳出若干应对措施。

本书对行波管研制和理论研究工作具有重要的参考价值和指导意义。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

行波管物理及理论问题/郭开周著. —北京:电子工业出版社, 2011.6

ISBN 978-7-121-13557-6

I. ①行… II. ①郭… III. ①行波管—研究 IV. ①TN124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 087082 号

策划编辑:秦绪军 赵 娜

责任编辑:赵 娜 特约编辑:王 纲

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 9.25 字数: 180 千字

印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 36.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

作者简介

郭开周，中国科学院电子学研究所研究员，1961年毕业于电子科技大学。负责完成多项自行设计实用课题任务。获得：1978年全国科学大会奖、1980年国防科工委二等奖、1984年中国科学院二等奖。



1984年，一个型号的行波管制管3只便达到用户要求的高指标。负责的60W固态微波源，1993年2月被鉴定为：理论设计有特色；研制速度之快，可与国外著名公司相比；填补了国内空白。项目迅速产生了经济效益。1993年11月鉴定了一只行波管可靠性技术，专家认为管子10余年间大量用于我国重大空间任务，无一事故，可靠性达到国际水平，到2008年器件批量应用创28年无事故记录，这在电子产品中是十分罕见的。

1974年，被推为《中小功率行波管设计手册》编写小组成员。1987年9月—1988年10月，应英国皇家学会邀请，赴英国从事合作研究工作。1991年11月，合写的书《Practical Microstrip Circuit Design》在世界6大城市发行。负责并完成5项基金课题（准光腔器件、激光触发半导体光导开关产生超短电磁脉冲、光与微波相互作用等方面的研究）。2008年7月，专著《行波管研制技术》出版。发表文章40余篇，其中7篇被美国，英国，俄罗斯的文摘介绍，1篇被中国文摘介绍。

1985年开始，连任3届（实际应邀参加4届）国家级科技进步奖和发明奖有关行业评委，获政府特殊津贴，获中国科学院优秀研究生导师称号。2009年8月，因参与《中国大百科全书》（第2版）的编纂出版，获中央宣传部、新闻出版总署颁发的“荣誉证书”。

前 言

笔者长期从事实用产品的设计和研制，并不擅长理论研究工作。长期的工作，使笔者养成了从实际的角度来审视各种理论的习惯。笔者和许多科技界同仁一样，认为现代技术科学的主要基础理论早已经建立了。

19 世纪 60 年代，麦克斯韦在前人和自己的发现的基础上，用数学的形式揭示了电场和磁场的联系及它们所服从的规律——麦克斯韦方程组。后来爱因斯坦创立了影响更加深远的相对论。1905 年，爱因斯坦写了一篇有关光电效应的论文。1927 年海森堡发表了“测不准原理”。这些理论加上后来一些杰出科学家的努力，终于建立了量子力学。这些基础理论，特别是相对论和量子力学理论成为了近代物理学的基石，对现代技术科学的发展，起到了巨大的推动作用。

一个世纪之后的今天，在物理学领域里除了宇宙、天体演化和基本粒子研究之外，很难再找到与以上成就能够相提并论的基础科学成果了。

目前，绝大多数科研人员都是在利用那些基础理论成就从事技术科学方面的研究，其目的很明显，就是研制出性能优良的实用产品（当然这些领域也有由基础理论发展出来的分支学科理论和发明、创造）。爱因斯坦曾说：“提出一个问题往往比解决一个问题更重要。提出新的问题、新的可能性，从新的角度去看旧的问题，需要有创造性的想象力，而且标志着科学的真正进步。”爱因斯坦的这句名言颇具哲理性，科技方面不论多大或多小的进步都在推动着科技前进。

笔者读《美华裔教授破百年物理定律》一文时颇为感慨。美国麻省理工学院 2009 年 7 月 30 日宣布，该校动力工程学华裔教授陈刚与其团队的研究，首次打破“黑体辐射定律”的公式，证实物体在极度近距离时的热力传导，可以达到定律公式所预测的 1000 倍之多。德国物理学家普朗克于 1900 年所创的“黑体辐射定律”是公认的物体间热力传导的基本法则，虽然有物理学家怀疑此定律在两个物体极度接近时不能成立，但始终无法证明和予以证实。陈刚教授以务实的态度、高超的设计和实

验技巧，实现了极近距离的测试。麻省理工学院表示，此项发现不但让人们的基本物理有了进一步的了解，在实际中对改良计算机数据存储用的硬盘的“记录头”，以及发展储聚能源的新设计等工业应用也十分重要。

现代技术科学的发展和进步都经历了漫长的岁月。一个学科或分支学科是否有发展前途，不是以所谓的“新”或“旧”来判断的，而应该以是否有实际的应用价值来判断。靠自身携带“喷出物质”而获得前进推力的火箭是中國人在公元 1232 年左右发明的；到 20 世纪 40 年代，德国人研制出了质量巨大的火箭武器；1957 年，前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星；1969 年，美国宇航员首次登上了月球。至今航天事业已形成了一个巨大的产业并迅速地在发展，这是一个历史悠久却又朝气蓬勃的科技领域。

合成孔径雷达（SAR，微波成像雷达）的发展历程也不算短。1951 年 6 月，美国 Goodyear 公司的 Carl Wiley 首次发现通过频率分析可以改善雷达的角分辨率，即“多普勒波束锐化”的构想。很快，美国 Illinois 大学的控制系统实验室独立地用非相干雷达实验验证了“多普勒波束锐化”的概念，并于 1953 年首次获得了（非聚焦的）SAR 的图像。现在在快速获取大面积地面和地表浅层的图像方面，SAR 的功能无与伦比，在民用和军用方面的成就引人注目，因而发展更加快速。

微波半导体器件的发展也有多年的历史。崩越管（IMPATT），W.T.Read 于 1958 年首先提出了 IMPATT 器件，之后得到了科技界的关注而发展起来，至今已有 50 多年的历史。又如 Gunn 器件，1961 年 B.K.Ridley 和 T.B.Watkins 以及 1962 年 C.Hilsum 先期从理论上预测了获得半导体微波负阻效应的可能性，其后许多单位投入力量开展实验研究，于是微波 Gunn 器件发展了，有关的发展历史也快 50 年了。微波半导体器件是微波集成线路和毫米波集成线路的基础，随着如日中天的集成线路的高速发展而迅速发展着。

涉及面较小的行波管的发明和发展也已经有 70 年左右的历史了。它曾陷入过低谷，2000 年后又较快地发展起来。这是因为现代科技、国防领域仍然离不开对电磁波的利用，因此有关学科和分支学科都受到了关注。在现代行业之间的竞争中，哪个学科的产品在实际应用（民用、军用、科研）中发挥重要的作用，受到用户的欢迎，那个就能站住脚，

所在的那个行业就会兴旺而不论其发展历史的长短。至今各种规格的行波管仍然在雷达、通信、电子对抗等系统中发挥着重要作用。

21 世纪以来, 尚未被很好开发的介于光波(含红外)与微波之间的电磁波谱领域, 受到了科技界的重视。高端毫米波及更高的太赫兹(10^{12} 赫兹即 THz) 领域是现代物理学研究的一个课题, 在这个领域里行波管的研究受到了关注。世界上许多国家都在行波管的研究方面投入了力量, 亚洲就有 8 个国家和地区在开展行波管的研究。

本书取名“行波管物理及理论问题”, 从行波管的物理现象出发而讨论到理论问题。关于行波管的发展, 现阶段理论研究明显落后于实际。其标志是许多理论都是在与实际相去较远的若干假设的基础上建立的。根据理论可以编写出计算机软件, 但是这些软件必须在采用了一些基于具体单位实验所获得的经验数据进行修正之后, 才可以使用。单位条件不同或者在新的工作领域, 这样的软件就不太准确了。经验数据并不能算理论。

从事设计工作, 需要自己编写计算机程序。笔者多年以来养成了对各种主要理论体系公式进行严格推导的习惯。笔者发现由于实际问题的复杂性, 关于行波管的各种理论与实际的差距都比较大。笔者在认真推导罗威的大信号公式时, 曾几次请教中国科学院数学研究所的专家, 发现罗威的理论有些勉强。在参加《中小功率行波管设计手册》编写的过程中, 也曾读到一些由《电子管设计手册》编委会印发的文字材料, 国内专家也有类似观点, 他们的分析比笔者更加深入细致。

中国科学院电子学研究所的张恩虬院士在世时, 曾两次对笔者说, 美国华裔科学家叶凯教授与他交流学术问题时谈到, 大家习惯用的 J.E. 罗威有关行波管的大信号理论(至今仍然被广泛应用), 其逻辑混乱。

近年来国际上有关行波管的理论研究有一些进展。2008 年 10 月, 国内一个大科研单位的专家有过详细的综述, 结论是: “行波管大信号模拟的研究工作目前还在继续, 要十分准确地模拟行波管中复杂的相互作用过程不是一件容易的事情。” 一些专家仍然在采用罗威的理论。

这些年, 通过对问题的深入思考, 笔者发现在大功率领域, 电磁场理论关于金属表面的“良导体假设”有必要抛弃了。在功率行波管中如果不对金属慢波线加强散热措施, 慢波线就会被烧毁, 烧毁的能量来自因微波损耗而转化成的热能。对于一些高功率(环杆)行波管还发现与

金属慢波线紧紧相贴的介质杆，因其上的高压（微波电压）而“爬电”击穿，造成管子损坏的事故。这一现象用“良导体假设”是无法解释的。这样的问题不是用一个简单的“冷损耗”就可以说明的。一个完善的理论，应该是一个满足能量守恒的体系。讨论不可忽视的金属表层内部的能量问题，应该用到量子力学理论。

行波管的理论还应该是一个自洽的理论。理论应该能够描述线路上的微波电磁场（一定距离后逐渐增强）调制电子注，被调制电子注逐渐形成群聚，群聚电子注反过来激励线路上的微波电磁场的完善的过程（其中包含对非线性情况的描述）。

再如行波管中的空间电荷问题，电子注从阴极一发射出来，理论处理就有缺陷。泊松方程求解的是具有无限发射能力的阴极，于是获得了关于电子枪的“二分之三次方”定律。可是世界上没有一个阴极具有无限发射能力，理论与实际的差距在要求较大发射电流密度时格外明显。也许不应该说这是泊松方程的问题，而应该是利用泊松方程来处理行波管电子枪的强流电子光学的问题。有关行波管中的空间电荷，从电子枪区域开始，理论处理就有问题，因此还有工作需要做。

关于行波管中的热界面问题，应该跟踪前面提到的美国麻省理工学院的工作。目前纯理论的热传导分析，误差很大，必须采用经验数据修正。因此，理论方面仍然有工作可做。

2010年笔者与某学术刊物的两位资深编辑讨论问题时，他们认为，个别科研人员习惯用国外计算机软件来从事理论研究，长久下去会丧失独立自主的科研能力。国外权威发表在世界顶级刊物上的署名文章未必都是正确的，只有认真思考之后才能够给出自己的判断。2009年美国麻省理工学院华裔教授陈刚与其团队的研究，关于极度近距离时的热力传导，打破了世界著名的德国物理学家普朗克于1900年所创的“黑体辐射定律”，他们对科研的认真态度是值得学习的。

笔者在个别很小的问题上也有自己的体会。应英国皇家学会邀请，笔者于1987年9月—1988年10月赴里兹进行合作研究。因为是改行，所以前半个月工作一筹莫展。正巧笔者辅导的一位博士生要笔者帮助他根据一篇文章编写计算机程序。根据在国内长期养成的习惯，笔者立即推导了那篇文章的理论公式，发现由国际知名教授署名发表在《IEEE

Trans.on MTT》的有关微带线与介质谐振器耦合的文章在物理上有错误。笔者推导出自己的公式，编写出计算机程序，完成了实验。仅半年之后，新文章就在《Electronics Letters》上刊出了。笔者回国后，指导研究生用时域有限差分法（FDTD）分析、研究一些课题，发现《IEEE Journal of Quantum Electronics》上面一篇由国外教授写的文章有错误。当然，在探索新领域的工作中，谁都难免出错，不必过分计较。本来科技的发展就是从“无知”到“有知”的。当时时域有限差分法作为一种新的数值计算方法，还有一些研究工作要做，需要大家讨论。我们在《电子学报》发表了文章，解决了那个小问题，受到了美国《电工文摘》的注意。因此，不必过分迷信外国权威，我们应该有自主的理论和实验研究。

2010年，由于某种原因，我国所有行波管研制单位的科研人员均未能出席在某国召开的国际真空电子学年会（IVEC）。联系到若干年前，某国研制成功的一个型号的行波管在国际著名的军舰火控系统中成为关键器件。当该行波管销售到我国某单位时，该国人士说，该行波管结构精细，“你们仿制不出来”。其实，同不同意我国科研人员到他们国家开会，告不告诉我们关键的技术问题，这些都是别国的主权。但对于我们来说，唯有发展自主的理论和实验研究，提高自身的水平才是最重要的。

关于我国教育和科研方面的问题，笔者2009年6月—2010年9月在《科学时报》上发表了5篇文章。学术讨论是有利于科技进步的，现在就开展自主的行波管理论研究工作，笔者抛砖引玉，在本书中，把自己的观点呈现于各位专家面前。

由于行波管中的物理问题相当复杂，建立完善的理论必定是一项任务艰巨的课题。笔者在这本短小的著作中只能给出一些初步的物理图像，从具体物理现象出发指出理论方面存在的问题。对于个别问题的解决，笔者只给出了一些设想。由于水平有限，书中难免会有差错，希望各位专家批评指正。在本书中也给出了一些技术平台方面的信息和笔者的设想，因为理论研究必须有实验的验证。书中也对行波管如何面对挑战提出了一些建议，也希望得到读者的批评指正。

郭开周

2010年12月27日

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 结构和参量简介	1
1.2 行波管结构和技术发展简史	7
1.2.1 早期为玻璃管壳、线包聚焦、波导输入/输出结构	7
1.2.2 周期永久磁铁 (PPM) 聚焦结构的发明为行波管的 实用化创造了极为有利的条件	7
1.2.3 全金属陶瓷结构的出现和一些工艺材料的发展 全面提升了行波管的性能	9
1.3 行波管面临挑战和应对挑战	11
1.3.1 固态微波器件和功率合成技术正在迅速发展	13
1.3.2 行波管面临固态微波器件功率合成技术的挑战	16
1.3.3 面对挑战行波管的应对措施和一些新进展	17
1.3.4 在未来将有实际用途的深空毫米波通信领域, 行波管具有一定优势	23
1.3.5 高端毫米波及更高的太赫兹领域是现代物理学 研究的一个课题, 行波管受到关注	24
1.3.6 现代相近行业之间的竞争主要是理论认识水平和 技术能力的比拼	25
1.4 行波管的理论研究跟不上技术的发展	26
第 2 章 行波管的物理图像	30
2.1 感应电流	30
2.2 行波管放大微波功率的物理图像	32
2.2.1 不存在电子注时微波传输系统中的物理图像	32

2.2.2	用感应电流概念来给出行波管放大微波功率的物理图像	34
2.3	螺旋慢波线中真实的场分布	37
2.3.1	较为准确的理想螺旋线内部空间的 RF 场分布	38
2.3.2	介质杆和径向翼引起场分布的变化	42
2.3.3	过盈配合 (压力结构) 中螺旋线的实际形状	44
2.4	小信号理论中空间电荷波和模式耦合给出的图像	45
2.4.1	空间电荷波	46
2.4.2	模式耦合	46
2.5	周期永磁聚焦系统的静磁场分布和电子注轮廓	48
2.5.1	周期永磁聚焦系统中的磁场分布和电子轨迹极为复杂	48
2.5.2	三个实际情况需要说明	49
2.5.3	阳极孔漏磁和磁浸没	52
2.6	解读有关相位的两幅实验示图	53
2.7	电磁场理论中良导体假设的困惑	56
2.7.1	过去的理论假设	57
2.7.2	一些数据	57
2.7.3	大功率领域应该摒弃“良导体”假设	60
2.8	金属导体在微波电磁场中的趋肤深度问题	60
2.9	讨论互作用时“电子只存在轴向运动”只是一种近似	61
2.10	微波电磁场并不总是恶化周期永磁聚焦行波管的电子注动态流通率	62
2.11	关于慢波线的“切断”	65
2.12	阴极的实际电子发射能力	67
2.13	栅极的实际问题	68
2.14	一个看似复杂的有关能量的问题	69

2.15	行波管中的热界面问题	70
第3章	螺旋慢波线色散和 阻抗理论工作简介	72
3.1	螺旋导片近似模型的分析	72
3.1.1	单根螺旋线的色散	74
3.1.2	单根螺旋线的阻抗	77
3.1.3	早期关于实际螺旋线行波管色散和阻抗的计算	78
3.1.4	耦合螺旋线的公式	79
3.2	螺旋带模型	81
3.3	慢波线三维实体数值模拟技术是目前最为成功的模拟技术	83
第4章	行波管互作用理论及其缺陷	85
4.1	皮尔斯的行波管互作用小信号理论简介	85
4.1.1	皮尔斯的等效传输线模型	85
4.1.2	皮尔斯的小信号简化假设	87
4.1.3	皮尔斯的小信号工作方程式	88
4.1.4	根据经验数据编写小信号设计软件	88
4.2	格沃兹多维尔的行波管互作用小信号理论简介	90
4.2.1	格沃兹多维尔的螺旋导片模型	90
4.2.2	圆柱坐标系中的麦克斯韦方程	91
4.2.3	力学方程	92
4.2.4	连续性方程	93
4.2.5	小信号假设	93
4.2.6	格沃兹多维尔的小信号公式	94
4.3	J.E.罗威的行波管互作用大信号理论简介	96
4.3.1	J.E.罗威的等效传输线模型	96
4.3.2	线路方程	97
4.3.3	电子运动方程	98

4.3.4	连续性方程	98
4.3.5	J.E.罗威导出的大信号公式	99
4.4	我国科技工作者对罗威理论的一些看法	101
4.4.1	实际计算的误差	101
4.4.2	模型的问题	102
4.4.3	罗威在推导公式过程中采用的一个处理措施 不好理解	103
4.4.4	对罗威空间电荷的简单评价	103
4.5	改进大信号工作方程式的一些努力	105
4.6	笔者关于行波管大信号相互作用理论的见解	106
第 5 章	强流电子光学理论缺陷	108
5.1	一般理论的基本方程式	108
5.2	泊松方程用于实际行波管电子枪的计算有较大的误差	111
5.3	开展理论工作应有实验技术平台的配合	113
5.3.1	有关测量电子注参量的技术平台	113
5.3.2	实用行波管的可调实验装置示意	115
第 6 章	时域有限差分法简介	117
结语		122
致谢		124
参考文献		126

第 1 章 引 言

自 1943 年 11 月 1 日 R.Kompfner 演示了世界上第一只行波管，1946 年 11 月公开报道以来^[1]，几十年过去了。由于行波管的固有优点，这种微波器件至今仍然有着一些重要用途，正向着高频率、宽频带、大功率、高效率、小型化、优良的电性能（如一些非线性参量）、可靠的环模性能、批量产品良好的性能一致性（模块化或功率合成）和长寿命等方面发展。理论分析方面有进一步深入的必要。一切研究的目的都应该与提高实用行波管的研制和生产水平密切联系。

1.1 结构和参量简介

行波管结构示意图（以螺旋行波管为例）如图 1.1 所示。（行波管的包装、冷却系统和各电极的引线未画出）

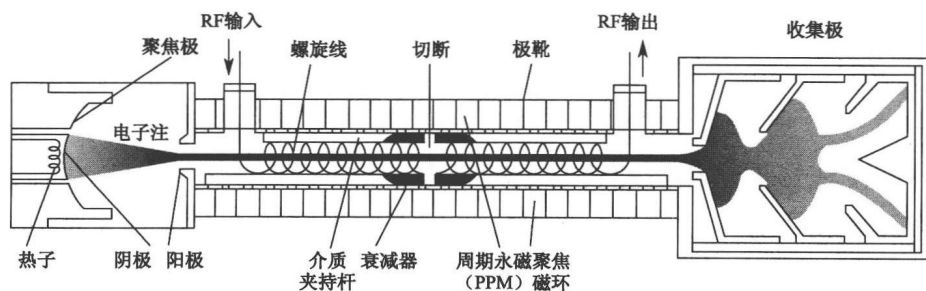


图 1.1 行波管结构示意图

行波管结构和各部件的功能简介如下。

热子加热后阴极发射电子注，电子枪（阴极、聚焦极、阳极）的静电聚焦场压缩、会聚电子注进入慢波线（互作用区），周期永磁聚焦（PPM）系统聚焦因空间电荷力原本要发散的电子注，RF 输入接头输入微波信号，在慢波线区域与电子注发生互作用，根据要求放大几十分贝后，微波信号功率从 RF 输出接头输出，互作用后的电子注被收集极（通常为多级降压收集极）收集（以回收部分能量，提高总效率）。行波管的电子注产生和流经的区域为高真空（如 10^{-8} Pa 或更高）。此外还有冷却系统（是包装件的一部分），这里未画出。

现代行波管主要有螺旋线慢波结构、环杆慢波结构、休斯慢波结构、三叶草慢波结构等。

各类主要管型之间有大概的参量区分。西方国家市售的各类行波管的典型参量（数据摘自《行波管研制技术》^[30]），将在下面分别进行简单介绍。目前，这些管型仍然在进一步发展之中。

图 1.2 给出了螺旋线+介质夹持杆+复合管壳(PPM 极靴)的示意图。

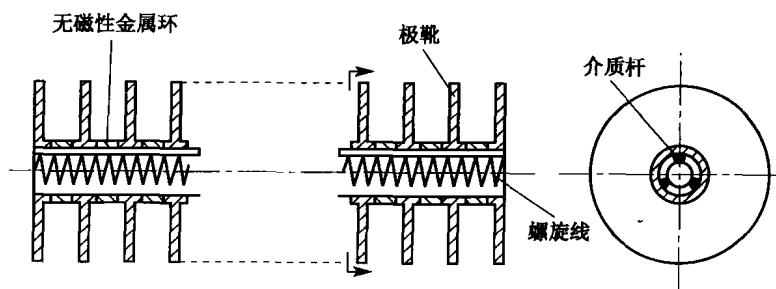


图 1.2 螺旋线+介质夹持杆+复合管壳 (PPM 极靴) 示意图

螺旋线慢波结构行波管是品种最多、应用最广泛的实用行波管。其工作波段已由分米波段、厘米波段扩展至毫米波段。大功率方面，有工作电压 30 kV、工作电流 10 A、峰值功率 30 kW 的研究报道。下面给出一些市售行波管的参量。

No.1 一只无截获栅控脉冲行波管, 工作频率 15 ~ 18 GHz, 输出功率约 4.3 kW, 工作比 2%, 增益约 55 dB, 工作电压 13.3 kV, 工作电流 1.75 A, 行波管总功耗 478 W, 工作环境温度 -35 ~ +85℃。

No.2 一只连续波行波管, 工作频率 7.9 ~ 8.4 GHz, 输出功率 960 ~ 1000 W, 增益 50 dB, 工作电压 6.5 kV, 工作电流 520 mA, 行波管总功耗 3.45 kW, 工作环境温度 -40 ~ +52℃。

No.3 一只脉冲宽频带行波管, 工作频率 6.5 ~ 18 GHz, 输出功率 1450 ~ 2700 W, 工作比 2%, 增益约 45 dB, 工作电压 11.2 kV, 工作电流 1.65 A, 行波管总功耗 280 W, 工作环境温度 -35 ~ +85℃。

No.4 一只连续波宽频带行波管, 工作频率 6.0 ~ 18.0 GHz, 输出功率 325 ~ 400 W, 增益 40 ~ 60 dB, 工作电压 10.3 kV, 工作电流 290 mA, 行波管总功耗 1438 W, 工作环境温度 -40 ~ +85℃。

No.5 一只连续波毫米波行波管, 工作频率 59 ~ 64 GHz, 输出功率 20 ~ 35 W, 增益 45 dB, 工作电压小于 10 kV, 电子效率 10%, 总效率大于 35%, 质量小于 650 g, 总长小于 28 cm, 寿命要求大于 20 年。

图 1.3 给出了环杆线及管壳的示意图, 介质杆没有画出来。

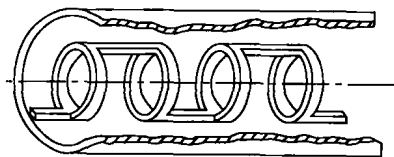


图 1.3 环杆线 (介质杆未画出) 和管壳

环杆慢波结构行波管是为了提高螺旋线慢波结构行波管的峰值功率 (实际上是提高工作电压) 而发明的。管子的型号相对较少。

环杆慢波结构行波管不同实用管型的工作电压在 10 ~ 44 kV 内, 工作电流在 1 安至十几安范围, 输出峰值功率为几千瓦至 200 多千瓦, 平均功率为几百瓦至十几千瓦, 工作频率范围从 UHF、L 到 X 波段, 典型带宽 $\geq 10\%$ 。

由于在同样的波段, 环杆慢波结构的内直径可以大于螺旋线慢波结构的内直径, 且环杆慢波结构行波管最佳工作电压的上限高于螺旋线慢波结构行波管的最佳工作电压的上限, 环杆慢波结构行波管应该能够工作在毫米波段。

如图 1.4 所示为常用的休斯慢波结构行波管的慢波线 (为了使示图清晰, 下面的结构图拉开了一些距离)。

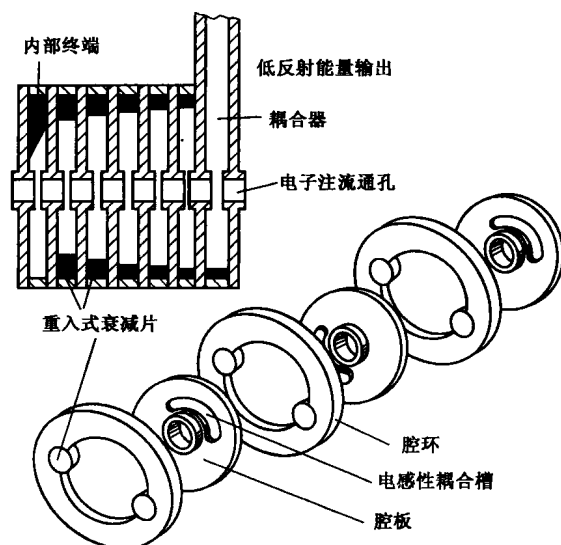


图 1.4 常用的休斯慢波结构行波管的慢波线 (含衰减器)

下面给出几种实用耦合腔行波管的典型参量。

No.1 行波管, 工作频率 5.25 ~ 5.75 GHz, 输出功率 250.0 kW, 工作比 5%, 增益 46 dB, 工作电压 53.0 kV, 工作电流 18.0 A, IS, L, 质量 90.9 kg。

No.2 行波管, 工作频率 9.0 ~ 9.2 GHz, 输出功率 120.0 kW, 工作比 0.25%, 增益 50 dB, 工作电压 43.0 kV, 工作电流 13.5 A, PPM, FA, 质量 15.91 kg。

No.3 行波管, 工作频率 9.45 ~ 10.05 GHz, 输出功率 50.0 kW, 工作比 1%, 增益 53 dB, 工作电压 31.5 kV, 工作电流 8.0 A, PPM, L,