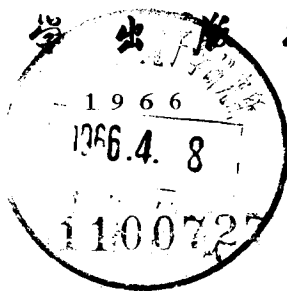


速调管群聚理论

謝家慶 赵永翔 著

科学出版社



内 容 简 介

群聚(相聚焦)是带电粒子束与电磁场相互作用产生能量转换的一个关键过程。本书全面探讨了线型束群聚现象的有关理论问题,包括运动学理论、去聚理论、空间电荷波理论和大信号理论等等。由于目前理论发展尚不完整,在实际工作中常需根据具体情况灵活抉择或综合使用,因此书中着重阐明各种理论的物理图象和实验验证,指出优缺点和局限性,以便使读者能掌握其适用范围。本书主要目的是为直射式速调管的研究、设计工作者提供理论基础,所以也包括了对多次群聚、宽频问题和在实际工作常常遇到的一些现象的理论分析。另外,作为理论应用的一个方面,书中也联系了带电粒子加速器中的有关问题。

本书可供电物理、电真空器件等方面研究人员、工程师、高等院校教师及高年级学生使用,也可作为学习电动力学的参考读物。

0013/17

速调管群聚理论

谢家驷 赵永翔 著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1966年1月第一版 开本:787×1092 1/18
1966年1月第一次印刷 印张:18 7/9
精装:0001—1,120 插页:3
平装:0001—1,030 字数:388,000

统一书号:15031·219

本社书号:3359·15—7

定价:[科七] 精装本 3.40 元
平装本 2.70 元

序 言

羣聚(相聚焦)是带电粒子束与高频场相互作用、实现能量转换的关键物理过程。20年来随着微波电子学的发展,这方面累积了大量的研究成果,从应用和培训的角度看来,总结与整理是迫切需要的工作。

本书的目的是以大功率速调管为中心,比较系统地介绍有关羣聚的理论知识。由于理论研究尚不十分完善,在设计工作中常常需要根据具体情况,灵活抉择或综合使用,因此书中强调指出各种理论的优缺点和局限性,并尽可能地包括完整的推导过程,不过为了便于读者阅读,我们也有意地避免过于繁复的数学运算。

高频线路和电子束的成形本来也是微波电子器件的重要组成部分,应该同时讨论。不过,鉴于有关谐振腔,慢波结构和强流电子光学的专著较多,为了节省篇幅,就决定不包括在本书之内了。微波电子学的内容十分广阔,希望这样有所侧重的作法可以缩小范围,能使问题的讨论比较深入。基于这个原则,我们也假设读者对微波电子学已有一些初步的知识,这样,谈到各种器件时,也就不求详细介绍,次序安排也就可以比较灵活了。

书中内容大致如下:第一章概括地提出主题,第二至四章分别讨论质点力学模型和流体力学模型的基本理论,第五章是理论的应用并侧重了宽频速调管的分析,第六章介绍非线性问题,第七章引入高压工作状态的相对论效应。以上这些章节可以说是大功率速调管物理设计的基础知识。第八章特殊问题,介绍在实际工作中大功率速调管有时发生的一些反常现象的物理解释和避免途径。第九章简单地讨论了行波羣聚问题,一方面是速调管的出现和混型管的发展,另一方面也是为第十章作准备。第十章是羣聚理论在加速器中的应用。事实上,前些章的许多材料对加速器工作者也是

着手编写本书之前,1960年,谢家麀曾在某单位讲授“速调管理论基础”,事后因听希望有讲义,经刘春夔同志倡议,准备将讲稿进一步整理印发,后来又为满足其他日的要求,便在这次讲授的讲稿的基础上,经过补充与修改,最后始成此书。在补呈,我们虽然尽量引入这方面不断出现的新的研究成果,并把内容进一步充实,但并无限,有些问题,如空间电荷波的空隙理论、功率定理及模式正交性、磁聚焦电子格的相对论性处理等等,都只好暂时割爱了。另外,由于作者水平的限制,书中内论在论述或计算方面都难免错误,我们恳切地希望读者随时予以指正。

1100727

本书的产生,是与刘春夔同志的鼓励与支持分不开的;完稿之前,曾请张克潜、彭钧、任裕安和其他一些同志阅读过初稿的大部分或一部分,他们提出了不少宝贵的意见,我们在此一并向他们表示感谢。

著 者

目 录

序 言	iii
第一章 绪 论	1
§ 1.1 线型束微波电子器件的羣聚问题	1
§ 1.2 各种理论一瞥	4
§ 1.3 微波管与加速器	7
第二章 运动学理论	10
§ 2.1 速调管简单羣聚理论	10
2.1-1 调速及羣聚过程	10
2.1-2 理想羣聚	18
2.1-3 复波调制的分析	19
2.1-4 速度不均匀性对羣聚的影响	21
§ 2.2 间隙效应	24
2.2-1 有栅网间隙的耦合系数	24
2.2-2 任意间隙的耦合系数	26
2.2-3 感应电流	32
2.2-4 有栅间隙的电子负载	34
2.2-5 任意间隙的电子负载	39
§ 2.3 大讯号分析方法	43
2.3-1 展开法	44
2.3-2 稳相法	47
2.3-3 间隙非线性调制的严格解	52
2.3-4 输出间隙的大讯号效应, 图解法	54
第三章 空间电荷效应	57
§ 3.1 静态空间电荷对羣聚的影响	58
§ 3.2 Webster 去聚理论	60
§ 3.3 电子流振荡理论	64
3.3-1 电子流振荡方程	64
3.3-2 对羣聚现象的描述	67
3.3-3 特殊情况及与其他理论比较	70

§ 3.4 考虑空间电荷的间隙效应	72
3.4-1 间隙耦合系数	73
3.4-2 间隙的输出电流及电子负载	75
3.4-3 有扰动电子流穿过间隙的效应	78
第四章 空间电荷波理论	82
§ 4.1 导论	82
4.1-1 有源波动方程式	82
4.1-2 线性化	84
4.1-3 与波导理论比较	85
§ 4.2 简单空间电荷波理论	88
4.2-1 空间电荷波的基本概念	88
4.2-2 对群聚现象的描述	89
4.2-3 与运动学理论比较	93
§ 4.3 多模空间电荷波理论	94
4.3-1 等离子体频率的缩减因子 F	94
4.3-2 电子束充满漂移管的情况	95
4.3-3 输出腔激励电流	98
4.3-4 电子束未充满漂移管的情况	100
§ 4.4 有限聚焦磁场情况之空间电荷波	104
4.4-1 “静态”电子束	104
4.4-2 “动态”电子束	108
4.4-3 限制流的色散方程	111
4.4-4 布里渊流	113
§ 4.5 空间电荷波理论的其他应用	117
4.5-1 双束管	118
4.5-2 其他微波管	120
第五章 多腔速调管	125
§ 5.1 速调管的发展	125
§ 5.2 多腔速调管的定性分析	126
§ 5.3 多次群聚的空间电荷波分析	128
§ 5.4 三腔速调管群聚的分析	131
5.4-1 普遍式的推导	131
5.4-2 中间腔的作用	134
§ 5.5 宽频速调管概述	139

§ 5.6 羣聚频宽的线性分析	144
5.6-1 谐振迴路	144
5.6-2 跨 导	146
5.6-3 多腔速调管的增益	147
5.6-4 求频率响应曲线的零点-极点法(作图法)	150
5.6-5 差调宽频工作	150
5.6-6 零点的讨论	151
§ 5.7 高电平羣聚与输出电路	153
5.7-1 高电平羣聚	153
5.7-2 优劣因子	154
5.7-3 间隙与电子束参数的选择	159
5.7-4 耦合输出电路	161
§ 5.8 实验结果举例	164
第六章 大讯号理论	171
§ 6.1 大讯号理论的含义	171
§ 6.2 一维理论	175
6.2-1 Webster 公式的外推	175
6.2-2 Roe 修正解	177
6.2-3 Solymar 方法	178
§ 6.3 圆盘模型理论	180
6.3-1 圆盘模型	180
6.3-2 空间电荷力的计算	181
6.3-3 研究羣聚过程的方程组	183
6.3-4 计算结果	186
6.3-5 多腔速调管的大讯号分析	190
§ 6.4 非线性空间电荷波理论	192
6.4-1 非线性方程的推导	192
6.4-2 逐步近似解	193
§ 6.5 实验结果	197
第七章 相对论效应修正	201
§ 7.1 相对论性运动	201
§ 7.2 计及质量变化引起的修正——第一类修正	205
7.2-1 电子枪导流系数的修正	205
7.2-2 速度调制的修正	206

7.2-3 等离子体振荡频率的修正	207
7.2-4 电子负载的修正	207
§ 7.3 电子束本身磁场的效应——第二类修正	208
§ 7.4 空间电荷波理论的修正——第三类修正	209
第八章 特殊问题	212
§ 8.1 二次电子谐振效应	212
8.1-1 导言	212
8.1-2 双平面电极的二次电子谐振	215
8.1-3 有垂直磁场的情况	221
8.1-4 其他影响二次电子谐振的因素及抑制方法	223
8.1-5 单平面二次电子谐振	225
§ 8.2 寄生振荡	228
8.2-1 寄生反馈振荡	229
8.2-2 负阻·寄生电路型振荡	232
§ 8.3 其他不稳定现象	233
8.3-1 正离子振荡	234
8.3-2 张弛振荡	239
8.3-3 热调谐效应	240
§ 8.4 集电极压抑	241
8.4-1 集电极压抑的效果和困难	242
8.4-2 速调管的电子速度分布特性	243
8.4-3 各种不同型式的集电极结构	246
第九章 行波作用羣聚	251
§ 9.1 小讯号分析	252
§ 9.2 空间电荷对行波作用羣聚的影响	257
§ 9.3 大讯号行波作用羣聚	259
§ 9.4 电子束对电磁波的反作用	266
§ 9.5 行波管的自洽解	268
9.5-1 均匀延迟线情况	269
9.5-2 非均匀延迟线情况	274
§ 9.6 行波管与多腔速调管和线型加速器之间的联系	277
第十章 线型加速器中的羣聚问题	281
§ 10.1 线型加速器的工作原理	281

§ 10.2 加速器中的自然羣聚	284
§ 10.3 注入状态与能谱的关系	288
§ 10.4 控制注入相位的各种方法	290
10.4-1 切割调制法	291
10.4-2 发射调制法	291
10.4-3 速度调制法	292
§ 10.5 去聚器	296
§ 10.6 结 语	298
附录 A 本书所用贝塞尔函数公式汇集	300
附录 B 间隙参数(资料)	301
附录 C 直流空间电荷对电子束最大电流的限制	305
附录 D 关于电子流振荡一维理论的讨论	309
附录 E 空间电荷波公式的推导	311
附录 F 等离子体频率缩减因子 F (资料)	316
附录 G 复波调制及多次羣聚公式的推导	320
附录 H 二次电子谐振的两种理论与实验的比较	322
主要符号和标记	326

第一章 緒 論

微波电子器件的功能在于完成各种形式的能量转换。在微波管(減速器)中,电子首先在直流场中受到加速,获得动能,然后与高频场作用将其动能转换为高频场的场能。由于高频场的极性是随时间和空间变化的,为了有效地转换能量,显然应该使尽多的电子处在高频场的減速时空内、尽少的电子处在高频场的加速时空内才行。羣聚理论的任务就是研究电子受到速度调制后的运动规律,以便保证将尽多的电子羣聚(相聚焦)在高频场的減速相区,从而实现有效的能量转换。在加速器中,能量转换的方向正好与微波管相反,带电粒子在高频场中受到加速,场的能量转换为粒子的动能,但是这里也同样存在着有关羣聚的问题。

虽然羣聚现象几乎可以说存在于一切微波电子器件中,不过不同的器件电子运动与形成羣聚的方式千差万别。本书以讨论大功率速调管为主,因此,只限于处理与带电粒子束的运动垂直的方向上没有靜电、磁场的情况(綫型束器件)¹⁾的羣聚问题。

本章的内容: § 1 描述綫型束器件的物理结构,并以速调管为代表,说明羣聚的原理,作为以后各章理论分析的基础。§ 2 概括地介绍了微波电子学的各种理论方法。§ 3 简要地阐明微波管与加速器的联系。

§ 1.1 綫型束微波电子器件的羣聚問題

綫型束微波电子器件主要包括以下三方面的问题:

- (1) 电子束的成形;
- (2) 高频线路;
- (3) 电子与高频场的相互作用。

电子是能量转换的媒介,高频线路是高频场的依凭,而只有它们之间存在彼此耦合时才能实现能量的转换。采用不同型式的电子束、高频线路和耦合方式就构成了形形色色的微波电子器件。

綫型束器件主要是速调管、O型行波管和返波管等。这类器件的共同点是直射的电

1) 微波电子器件中无横向靜电、磁场的可称为O型器件或綫型束器件,如速调管、O型行波管;具有橫靜电场的可称为E型器件,如旋束管;具有交叉靜电、磁场的可称为M型器件,如磁控管等。较狭义的分类方法则是将O型、E型和M型只作为行波管中的细类。

子束,其运动方向与高频作用电场方向是一致的,故称为纵向相互作用。图 1.1 是这种系统的示意图。电子从阴极发射,在电子枪受到直流电场加速并形成直射的电子束。在穿过高频线路时它与高频场发生相互作用,从而实现能量转换。最后,“完成了任务”的电子束

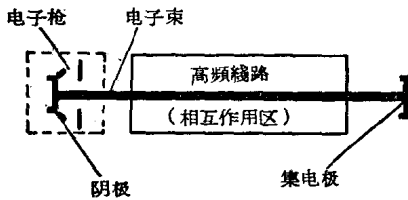


图 1.1 线型束器件示意图

束达到集电极,把剩余的能量转化为热能。

不难看出,这类器件的交、直流场不在同一空间并存。进入相互作用区以前的电流密度是均匀的,而电流调制则是依靠速度调制(或渡越时间调制)来实现的。

现在逐一讨论以上三方面的问题:

电子束的成形对于多数线型束器件都是基本上相同的。它又包括两个问题:首先是电子枪的设计——考虑枪的结构和阴极的发射性能,使之产生大密度的均匀的电子束;其次是聚焦问题——保证电子束在整个器件中维持直线运动,不因空间电荷排斥力及高频场的扰动而扩散。近代大功率器件的发展对电子束不断地提出了更高的要求。如大导流系数,大电流密度,高压压缩比,高通导率及高稳定性等等。事实上电子束的成形已经单独形成了一个科学分支——强流电子光学。

高频线路的形式是多种多样的。在速调管中采用谐振腔,其中高频场是驻波场。在行波管及返波管中采用慢波结构,高频场是行波场。一般说来,空间电荷场比线路场小得很多,因此,为了使问题简化,在研究高频线路的场型结构时,作为第一次近似可以不考虑电子流的存在,而只研究纯粹线路中的电磁过程。

相互作用是实现能量转换的中心问题。可以把它分为两个方面讨论:一方面是高频场对电子束的作用,如产生速度调制,从而形成群聚;另一方面是电子束对高频场的“反作用”,如在高频线路感应电流,实现能量转换。有些器件,如行波管,群聚过程与换能过程是同时进行的——“混合的”过程,电子在运动过程中不断地受到线路场的作用——“分布的”作用。也有一些器件,如速调管,群聚过程与换能过程基本上是分开的——“分别的”过程,电子束只是在较窄的间隙内受到线路场的作用——“集总的”作用。

显然,后者的物理过程是比较简单的,它是我们首先和主要的讨论对象。

为了系统完整起见,下面简要地说明直射速调管的工作原理。并引入一些将要使用的术语。

图 1.2 是双腔速调管示意图。在电子枪出口处形成均匀的直射电子束。(所谓均匀电子束,是指:(1)电流密度不变,(2)所有电子速度相同,这里暂不考虑热运动及静电电位垂造成的不均匀性。)然后,电子束进入高频作用区——穿过第一谐振腔(又称输入腔或调制腔)。当有高频讯号送入输入腔时,在间隙处就会建立起高频电场,电子就要受到该

电场的作用。在正半周穿过的电子受到加速,而负半周穿过的电子受到减速,因而在间隙出口处电子的速度已经不再均匀了。在这种情况下,我们说电子束速度受到了“调制”。但这时电子的相对位置还来不及改变,因而电流密度还可以认为是均匀的,所以我们说电流密度还没有“调制”。

从第一腔出来的电子束,由于速度不等,快的电子逐渐赶上了前面的慢电子,于是电子束变得有稀有密,而不再是均匀的了。电子密集的区域我们称之为“羣聚块”。形成“羣聚块”的过程称之为“羣聚过程”,或者说电子流由“速度调制”转变为“密度调制”。这时电子流中包含着丰富的谐波。

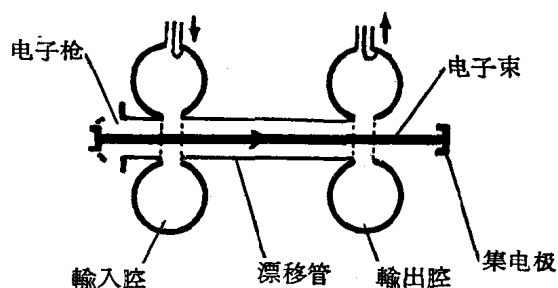


图 1.2 双腔速调管示意图

已羣聚的电子流穿过第二个腔(称为输出腔或获能腔)时,就在腔内激起了高频感应电流。如果谐振腔与电流中的某一次谐波谐振,腔的作用间隙上就会建立起这个频率的高频电场,它反过来又作用于电子束上。由多数电子聚集成的羣聚块在感应电场的负半周穿过间隙,因此受到了减速。其余少数电子虽在正半周穿过,受到加速,但总的来说电子束失去的能量比获得的为多,两者之差即转换为高频场的能量。高频场获得能量,谐振腔的振荡就得以维持,同时大部分能量通过腔与外电路的耦合传输出去,完成了电磁能量的放大。

最后,电子束达到集电极上而将剩余能量转化为热能。

以上是以双腔速调管作为具体的例子来说明羣聚问题的。其他线型束器件与双腔速调管的差别,主要是在与电子束作用的高频线路上,而高频线路一般是由以下几种元件组成的:

- (1) 集总式的谐振腔——驻波场,电子束受到短暂的集中的作用。
- (2) 两端短路的慢波线——分布式的谐振腔、驻波场,由直行波与反向波迭加而成,电子受到分布的作用。
- (3) 匹配的慢波线——线路上只有直行波,电子与此行波作用。
- (4) 漂移管段——管内无高频场传播,电子不与外场作用。它的功用一方面是使电子束有足够的时间形成羣聚,另一方面作为高频元件之间的隔离。

图 1.3 给出表示这几种元件的符号。电子束依次穿过这些元件的组合物就会构成各种不同的微波管,如图 1.4 所示。普通速调管是图 1.4 中 a、d 的组合。普通行波管是两节或更多的匹配慢波线的组合。短路的慢波线的组合形成“分布式速调管”(distributed

klystron)。而谐振腔与匹配慢波线的组合就构成了“混型管”(hybrid tube)。

不难看出,所有线型束微波管的阴极、高频作用区,散热阳极(集电极)是彼此分割的,这一特点十分有利于它们向大功率发展。

本书就是以研究大功率速调管的聚过程 and 换能过程为重心的。至于电子束的成形及高频线路两方面的问题,专著较多,为了节省篇幅,就不拟在本书讨论了。

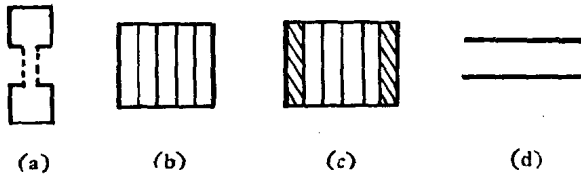


图 1.3 高频线路元件符号

(a) 集总式谐振腔; (b) 分布式谐振腔(短路慢波线);
(c) 匹配慢波线; (d) 漂移管段

§ 1.2 各种理论一瞥

研究电子束的聚,或者一般地研究电子流的运动过程的理论已经非常丰富了。

最早的理论是“运动学理论”。Webster 首先用以分析速调管中的聚问题(详见 § 2.1)。它是以电子作为孤立的质点的概念为基础,略去了彼此之间的排斥力来讨论个别电子的轨迹。这个理论虽然比较粗糙,但是它表明了基本的运动过程,给出了清晰的物理图象。特别是它所揭示的电子超越现象正是一切线型束功率放大器件所具有的。因此,运动学理论对于了解电子束的大讯号工作状态是很重要的。

由于线型束微波管中使用的电流密度一般很大,实际上空间电荷的效应是不容忽略的。所以运动学理论用作定量计算时误差较大。在运动学概念的基础上考虑到空间电荷本身排斥力引起的修正的理论,我们称之为“考虑空间电荷的运动学理论”,或者称之为“去聚理论”(Debunching Theory)¹⁾。这种修正指出了当电子的速度调制不大时,运动具

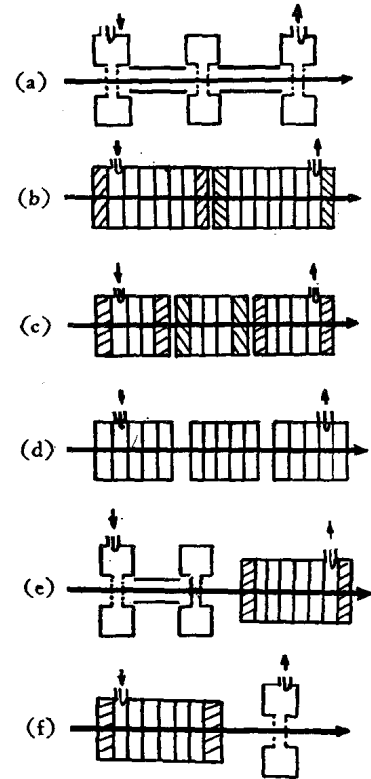


图 1.4 各种微波管的结构

(a) 多腔速调管; (b) 行波管; (c) 多段行波管; (d) 分布式多腔速调管; (e)(f) 混型管

1) “去聚”是指空间电荷引起的反聚的效应。这一名词不尽反映实际物理过程。虽然直观地看来,空间电荷自身排斥力将阻碍电子的聚集,但有时它只是使聚过程减慢,而并不减弱,而有时甚至还可能使聚加强(详见 § 6.3)。

有振荡的特征(详见第三章)。

Кацман 在对羣聚问题的处理上,采用了不同的数学方法。他所提出的描述电子运动的微分方程突出了电子的振动过程,称为“电子流振荡理论”(详见第三章)。它的特点是便于分析多次羣聚问题,并且可以把羣聚过程和换能过程(间隙效应)用统一的数学形式加以描述。

由 Hahn 和 Ramo 提出的“空间电荷波理论”依据了完全不同的概念(详见第四章)。它不注意电子的个体运动,而把电子束看成是连续的媒质,研究在一定的几何条件下其中可能存在的波动状态——空间电荷波,并以这种波来描述羣聚现象。在分析中采用小振幅的假设,使波动方程线性化,这样就可以利用处理线性问题的许多强而有力的数学工具。当处理二维问题或有限磁场的情况时,它的优点特别突出。但是它没有反映出实际存在的非线性过程,特别是超越现象。因而很难用于功率放大的分析。

在空间电荷波理论中电子束各种物理参量都是以波动形式表示的,而在一定的起始条件和边界条件下的羣聚状态,则可以用不同的参数组来表征,例如用电流密度及速度、电流及动电压等。这样,参数组中两参数的关系正好与传输线方程的电压与电流之间的关系在形式上完全相似。因此,我们就可以从传输线理论熟知的一些结论中得到新的启示。甚至也可以利用“模拟传输线”来对电子束的羣聚状态进行模拟实验。

运动学理论和空间电荷波理论是讨论羣聚问题的两种主要理论体系。它们在实际器件中得到了广泛的应用。

此外,从理论上研究电子束和场的相互作用规律还可以采用皮带(hose-pipe)坐标^[8]讨论轨道畸变,或是利用弹性力学的极化位概念分析电子的位移^[7,9,11],这两种理论方法虽然各有特点,但应用不广,在这里就不打算介绍了。

电子束的运动规律,尽管千变万化,但它必须遵守能量守恒这个最基本的要求。事实上,能量守恒关系既是各种理论正确性或适应性的试金石,同时它本身也是分析问题的出发点。朱兰成(Chu, L. J.)首先论证了电子束(直线流)的能量守恒关系——动功率定理^[2]。随后其他理论工作者将它的应用范围加以推广,同时也求出了在不同条件下具有的不同形式。动功率定理阐明了电子束中场能与电子动能之间的关系。它可以用于检验空间电荷波的线性理论的自洽性,论证模式的正交性,和研究空间电荷波的间隙理论等等。

耦合模理论^[22-24](或称模式耦合理论)是完全另一方面的理论体系。它不具体讨论电子的运动状态,而是概括地讨论电磁系统中相互作用的规律。(其中有电子束的情况只是一种特例。)我们知道,无论在电磁线路或电子流(小讯号)中都存在着许多确定的模式。在许多情况下,这些分立的模式构成广义傅里叶级数的正交函数组。正如任何(有实义

的)函数都可以用这些正交函数的线性组合表示一样,一个电磁线路或电子束中的某一特定物理状态可用这些模式的线性组合来表示。因而状态的改变可以认为是模式之间的耦合引起的。从这个观点出发,概括地研究相互作用的规律就是“耦合模理论”。

如所周知,在波导系统中,任何不均匀性都会激起反射波和高次模式,因此可以认为它是一种耦合元件,使直波与反波耦合,也使基模与高次模耦合。耦合可以是分立的,也可以是周期性的或连续的,不论那种情况,随着耦合必然发生能量的交换,耦合参数也就是能量交换的表征。

耦合模理论可以将许多外观性质极不相同的器件中的物理过程[例如无源波导(包括方向耦合器)、微波管及参量放大器等等]用统一的理论描述,并为它们内部的联系提供新的线索。这是具有很強的概括性的理论。不过,它并不能代替具体物理过程的分析。此外,它是一种线性理论,当然也不能描述大讯号现象。

考虑到电子流速度的统计特性的理论我们称之为“多速理论”^[25-31]。这种理论的基础是将电子束的状态用分布函数 $f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})$ 表征: 如电荷密度 $\rho(t, \mathbf{r}) = e \int f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v}) d\mathbf{v}$, 电流密度 $\mathbf{i}(t, \mathbf{r}) = e \int \mathbf{v} f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v}) d\mathbf{v}$, 使用玻耳兹曼方程代替一般的运动方程,再结合麦克斯韦方程,这样就构成了一个完整的方程组,描述包括电子流速度分布效应的电子束与高频场的相互作用。

多速理论的求解过程一般是异常复杂的。因此,电子的杂散运动(热运动)比定向运动小得多时,通常并不采用多速理论的方法。但在研究噪声和冷阴极器件(冷阴极的电子离散速度的等效温度有时高达 $150,000^\circ\text{K}$) 时,热运动的效应显然是不能忽略的。对大功率器件而言,当电子束很长时,或者作基础性的研究时,速度离散也应该考虑,它的影响常常是使增益及效率有所下降。

最后, Smith, Гинзбург 等曾用“量子力学方法”来研究电子束与高频场的相互作用^[32-35]。根据量子力学的观点,电子并不是连续地将能量转递给场,能量每次转换总是 $h\nu$ (量子)的整数倍。其次,并不是所有在同一时间穿过作用场的同一能量的电子交换的量子数都相等,而是服从一定的统计分布,因而作用后的能量是离散的。但是在微波波段,例如 $\nu = 3,000$ 兆赫, $h\nu \approx 1.2 \times 10^{-5}$ 电子伏,这比热运动的能量离散还小得很多。因此能量转化的量子性完全可以忽略。能量交换的统计性由于交换的平均量子数愈大,离散的相对宽度愈窄,因此在微波管中也是可以忽略的。

量子力学方法给出电磁场与粒子能量交换的量子化关系,在一般情形下,这个结论并没有多大重要性。另一方面——可能意义较大的一方面——就是量子力学方法提供了与

经典力学不同的描述场与粒子相互作用的数学形式,这对某些问题的研究可能是有积极贡献的。

此外,处理速度调制问题,也可以采用位阱模型,即将间隙视为电子的位阱,然后根据被俘获的电子的振幅、振荡频率和辐射的功率,讨论场与粒子的相互作用。由于使用这种模型的研究工作很少,它的实际意义还是不很明确的。

§ 1.3 微波管与加速器¹⁾

微波管和加速器(高频)都是通过带电粒子与高频场相互作用,以实现能量转换为目的的微波电子器件。因此,尽管两者外观不同,用途各异,而在实质上却有着许多内在的联系。最明显的例子就是速调管与单腔加速器、行波管与线型加速器、磁控管与迴旋加速器等的一一对应。它们的联系一方面表现在结构的相似上,譬如都由带电粒子源、高频线路、导向场或聚焦场、集电极或靶等部件组成;另一方面在研究方法上,两者都常常是从把荷电粒子看作孤立的质点的近似出发,然后再进一步考虑粒子之间库仑力的作用和对外界线路的影响。此外,羣聚过程和相位选择机理——自动把与所要求的能量转换方向不同的粒子清除掉的过程——也同样存在于微波管与加速器中。

微波管与加速器固然有许多共同之处,但同时它们也各有其自身的特点。从粒子运动速度来看,微波管的加速电压一般为千伏的量级(近代大功率管也只有百千伏量级),相对论效应并不很显著,但在加速器中,带电粒子运动速度很大,相对论效应十分重要。尤其是电子加速器,在一百万电子伏的能量时,速度已是光速的94.5%了,因此,能量继续提高,就不再表现为速度的增加,而是表现在质量的增加上了。从研究粒子运动的方法上看,处理微波管问题虽然也希望得出严格的大讯号理论,但是建筑在微扰假设上的近似计算(小讯号理论)在一定条件下,也能够很好地描述器件的工作特性。由于一般使用的电荷密度较大,电子之间的排斥力常常是更需要考虑的问题。在加速器中情形就不同了。为了使粒子很快地加速,通常采用很强的电场,这时显然只有较严格地求解运动方程才有实际意义;而电流密度一般不大,空间电荷效应可待进一步考虑。另外,在使用横向磁场的器件中,微波管采用交叉的静电场和静磁场,它的作用一方面是导引电子束沿固定的轨道运动(导向),另一方面,电子在静电场中的位能也参与了能量的转换。但在加速器中只用单纯的磁场,其作用也只是导向而已。固然在工作时导向磁场强度随时间变化的同步加速器中,粒子也要受到变磁场的加速,不过那并不是主要的过程。

1) 加速器中一般使用静电场、交变磁场或是交变电场加速带电粒子,其中只有使用交变电场的加速器能够将粒子加速到极高的能量,这里加速器一词,实际就是指这种高频加速器而言的。

不难看出,在大功率微波管和强流加速器中,上面谈到的两者之间的差异就变得愈来愈小了。近代大功率速调管的电压已使用到400千伏,这时相对论效应不容忽略,同时为了正确了解功率放大的特性,也必须使用大讯号数值分析。而在强流加速器中,大电流的一些效应,例如粒子束的散焦,相振荡稳定区的压缩,对高频源的反作用,漂移空间激发振荡的可能性等问题,也都提上了日程。这样,大功率微波管与强流加速器就具有许多共同的理论与实际的问题了。

参 考 文 献

一般问题、电子动力学问题

- [1] D. Gabor: "Energy Conversion in Electron Devices". JIEE 91, pt III, 128, (1944).
- [2] Chu L. J.: "A Kinetic Power Theorem". IRE-PGED ED Res. Conference, Durham, New Hampshire, June (1951).
- [3] J. R. Walker: "Stored Energy and Power Flow in Electron Beams". JAP 25, 615, (1954).
- [4] J. R. Walker: "Power Flow in Electron Beams". JAP 26, 1031, (1955).
- [5] W. H. Louisell & J. R. Pierce: "Power Flow in Electron Beam Devices". PIRE 43, 425, (1955).
- [6] H. A. Haus, F. N. H. Robinson: "The Minimum Noise Figure of Microwave Beam Amplifiers". PIRE 43, 980, (1955).
- [7] C. C. Wang: "Linear Beam Tube Theory". IRE Trans. ED-4, p. 92, (1957).
- [8] H. A. Haus & D. Bobroff: "Small Signal Power Theorem for Electron Beams". JAP 28, 694, (1957).
- [9] P. A. Sturrock: "A Variational Principle and an Energy Theorem for Small Amplitude Disturbances of Electron Beams and of Electron Plasmas". Ann. Phys. (New York) 4, 306, (1958).
- [10] H. A. Haus: "Electron Beam Wave in Microwave Tubes". Symposium Proceedings Vol. 8, 89, "Electronic Waveguides". N. Y. (1958).
- [11] D. L. Bobroff & H. A. Haus: "Orthogonality of Modes of Propagation in Electronic Waveguides". *ibid.* pp. 407—413.
- [12] O. Buneman: "Electronic Waveguide". *ibid.* pp. 133—148.
- [13] J. W. Klüver: "Small Signal Power Conservation Theorem for Irrotational Electron Beams". JAP 29, 618, (1958).
- [14] Chu E. L.: "Two Alternative Definitions of Small Signal rf-Power of Electron Beams". JAP 30, 1617, (1959).
- [15] E. L. Chu: "Comments on Klüver's Paper (above)" JAP 30 1618, (1959).
- [16] E. L. Chu: "On the Concept of fictitious Surface Charge of an Electron Beam". JAP 31, 381, (1960).
- [17] H. W. König: "Das Elektronkinetische Leistungs-Theorem". «Mikrowellenröhren» Munich Conf. (1960).
- [18] W. W. Rigrod: "Power Flow and Stored Energy in the Electron Beams". JAP 31, 1147, (1960).
- [19] M. C. Pease: "Conservation Laws of Uniform Linear Homogeneous Systems". JAP 31, 1988, (1960).
- [20] M. C. Pease: "Conservation Laws of an Interacting Electron Beam". *ibid.* p. 2028.
- [21] D. L. Bobroff, H. A. Haus & J. W. Klüver: "On E. L. Chu's Definition of Small Signal rf Power of Electron Beams". JAP 32, 749, (1962).