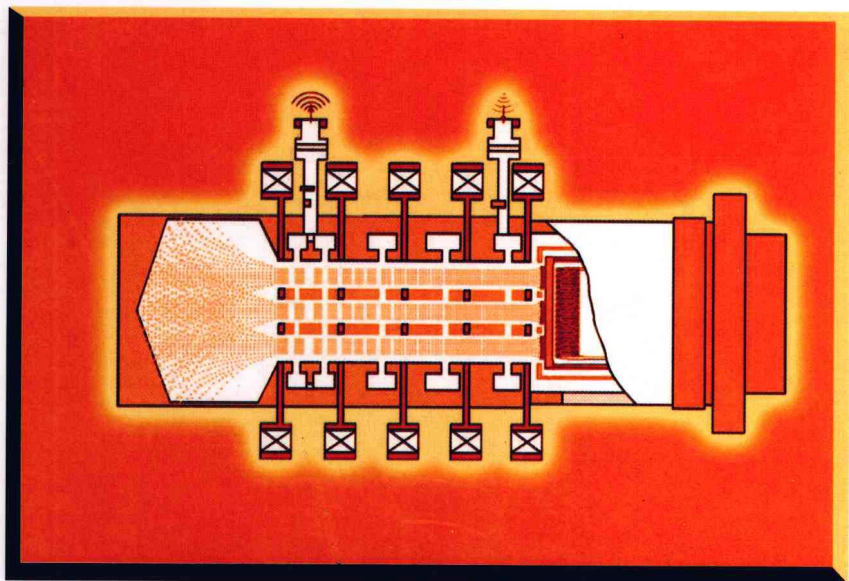


大功率速调管的理论与计算模拟

Theory and Computer Simulation of
High Power Klystron

丁耀根◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大功率速调管的理论与 计算模拟

Theory and Computer Simulation of
High Power Klystron

丁耀根 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

大功率速调管的理论与计算模拟 / 丁耀根著. —北京:
国防工业出版社, 2008. 12

ISBN 978 - 7 - 118 - 06079 - 9

I. 大… II. 丁… III. ①大功率 - 速调管 - 理论②大功率
率 - 速调管 - 计算方法 IV. TN122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 189559 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 13 5/8 字数 345 千字

2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

大功率速调管是一种基于速度调制原理将电子注能量转换成微波能量的微波真空电子器件。在大功率速调管中,由于电子注的产生和成形、电子注与微波电场的相互作用、电子剩余能量的耗散和微波能量的输出是在相互分离的空间中进行的,而且其高频互作用系统是分离的谐振腔,因而它具有高功率、高增益、高效率和高稳定性等优点,是微波真空器件中脉冲功率和平均功率最高的器件。

速调管自 20 世纪 30 年代发明以来,已有 70 多年的历史。在应用需求的推动下,通过速调管理论和技术的发展,特别是近 30 年来计算模拟技术的发展,大功率速调管在功率、效率、带宽和寿命等方面不断提高,在雷达、通信、电视广播、电子对抗、工业辐照和医疗加速器、高能粒子加速器、可控热核聚变的等离子体加热装置和微波加热与处理系统等领域获得了广泛应用,成为最重要的微波真空电子器件之一。我国从 20 世纪 50 年代起开始发展大功率速调管,经过 50 多年的发展,在速调管的理论、设计和计算,材料、工艺和技术,新型速调管的研发等方面取得了显著成绩,为我国军用和民用微波电子系统提供了大量急需的器件。

在发展大功率速调管的过程中,我国一直非常重视理论和实际的结合。1966 年,中国科学院高能物理研究所(原原子能研究所)的谢家麟院士和中国科学院电子学研究所的赵永翔研究员出版了他们的专著《速调管群聚理论》,该书是我国出版的第一部系统介绍速调管理论的著作,对我国速调管的发展起了重要作用。从 60 年代末起,我国开始在电子光学、速调管和行波管等方面开展计算机模拟工作。1974 年,由当时的第四机械工业部(主管电

子工业)组织,在刘盛纲院士的主持下,以电子管设计手册编辑委员会的名义,开始编写速调管、行波管、磁控管和电子光学等设计手册系列。参加《大功率速调管设计手册》编写的有中国科学院电子学研究所的黄国祥、丁耀根、彭钧、赵永翔、陆孝厚、钮得录和朱允淑研究员,以及北京真空电子技术研究所的罗福海研究员等。作者作为主要编写人员,参加了该设计手册部分章节的编写和全书的整理工作。《大功率速调管设计手册》于1979年由国防工业出版社出版,该书比较系统地总结了我国在速调管的设计、制造和应用等方面取得的经验,基本反映了当时国际上速调管的设计水平,成为我国大功率速调管方面的主要参考书之一。

《速调管群聚理论》出版已有42年,《大功率速调管设计手册》出版也有29年,在这期间,计算技术获得了飞速发展,计算机模拟技术已成为速调管研究和设计的主要手段。此外,多注速调管和带状注速调管等新型器件的出现,电真空材料、工艺和技术的不断进步,使大功率速调管的工作频率、功率、效率、带宽、可靠性和寿命等性能获得了进一步提高,并研发出多种新型速调管。作者在中国科学院电子学研究所从事大功率速调管的理论研究和新型速调管的研发已有40多年,将自己和同事们在理论计算和研制方面取得进展和积累的经验进行系统的总结,为从事大功率速调管的研究、制造和应用的科技工作者,特别是年轻的科技工作者提供有价值的参考书,一直是作者的心愿。作者计划出版两本速调管专著,一本为本书《大功率速调管的理论与计算模拟》,另一本为即将出版的《大功率速调管的设计、制造和应用》。

本书在全面总结近年来大功率速调管在理论和计算模拟方面取得的研究成果的基础上,以计算模拟为主要手段,系统地论述大功率速调管中电子注的产生和成形、电子注与高频电场的相互作用,以及高频系统中微波的建立和传输等方面的物理机制和数学描述方法,并结合典型的实例给出了速调管整管性能和部件参数的计算模拟方法,为大功率速调管的设计、制造、测试和应用提供理论基础。

本书共分8章。第1章至第4章为速调管的基本理论,主要

从运动学理论和空间电荷波理论描述速调管的调制和群聚等物理过程,并给出速调管的基本参数;从一维电子圆盘模型、二维电子圆环模型、2.5维和三维粒子模拟等速调管大信号理论和计算方法出发,介绍速调管整管的设计和计算。第5章至第8章介绍速调管重要部件的设计计算,主要包括电子光学系统、以及谐振腔、宽带输出电路和输出窗等高频系统。

阴和俊研究员和吴一戎院士对本书撰写给予了热情的鼓励 and 大力支持,刘濮鲲、王勇和张兆传研究员等阅读了本书,并提出了许多宝贵的修改意见。谢家麟院士、刘盛纲院士、徐承和教授和张克潜教授等国内著名专家多年来一直对作者的研究工作给与热情的指导、鼓励和帮助。在此,作者对他们的鼓励、支持和帮助表示衷心的感谢。

本书的出版也与作者一起工作多年的彭钧、赵永翔、陆孝厚、钮得录、朱允淑、刘铁山、符春玖和张世昌等研究员,以及其他同事的帮助分不开的。他们为我国大功率速调管的发展做了大量卓有成效的工作,是本书撰写和出版的重要基础。此外,在速调管的计算模拟方面,作者与俄罗斯莫斯科大学物理系的 Sandalov 教授和 Rodyakin 博士,圣彼得堡电工大学的 Molokovsky 和 Silaev 教授开展了多年的合作,对速调管注一波互作用、高频系统和电子光学系统计算机软件的开发和应用发挥了重要作用。本书的一些计算模拟是由作者的研究生林福民、陈新桥、沈斌、王树忠和赵鼎等博士完成的,此外沈斌博士和梁源硕士等在本书的编辑和图表绘制方面给予了大力协助。本书的出版还得到国防工业出版社的余敬春副总编辑和宋序一编辑的大力支持和帮助。在此,作者对他们的帮助一并表示由衷的感谢。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 速调管基本原理	2
1.2 速调管的发展历史和现状	3
1.3 速调管理论和计算模拟的发展概况	16
1.4 本书主要内容	20
参考文献	21
第 2 章 速调管中的物理过程	27
2.1 速度调制和群聚	27
2.2 感应电流	33
2.3 耦合系数	35
2.3.1 有栅间隙的情况	35
2.3.2 无栅间隙的情况	37
2.4 电子负载	44
2.4.1 有栅间隙的电子负载	44
2.4.2 无栅间隙的电子负载	47
2.5 相对论效应	54
2.5.1 速度调制的相对论修正因子	54
2.5.2 电子负载的相对论修正因子	55
参考文献	56

第3章 速调管的小信号理论	58
3.1 空间电荷波理论	58
3.1.1 基本方程	59
3.1.2 无限大电子注的情况	62
3.2 等离子体频率缩减因子	64
3.2.1 电子注充满漂移管的情况	65
3.2.2 电子注未充满漂移管的情况	66
3.2.3 空心电子注的等离子体频率缩减因子	67
3.2.4 计算等离子体频率缩减因子的近似方法	68
3.3 考虑空间电荷效应的耦合系数和电子负载	69
3.3.1 单间隙谐振腔中的耦合系数和电子负载	71
3.3.2 双间隙耦合腔中的耦合系数和电子负载	71
3.4 速调管输入段和输出段的等效电路	73
3.4.1 输入腔的等效电路	73
3.4.2 输出腔的等效电路	76
3.4.3 中间腔的等效电路	77
3.5 速调管增益—频率特性的计算	78
3.5.1 线性叠加法	78
3.5.2 等效传输线法	80
3.5.3 速调管群聚段的设计和小信号增益— 频率特性的计算	82
3.5.4 计算实例	83
参考文献	84
第4章 速调管的大信号理论和计算	86
4.1 引言	86
4.2 空间电荷力的计算	88

4.2.1	静电格林函数	88
4.2.2	电子圆盘的空间电荷力	91
4.2.3	电子圆环的空间电荷力	93
4.3	一维电子圆盘模型	95
4.3.1	模型和假设	95
4.3.2	电子圆盘的运动方程	96
4.3.3	空间电荷力的计算	97
4.3.4	谐振腔间隙电场的计算	99
4.3.5	谐振腔间隙中感应电流、电子负载和 间隙电压的计算	100
4.3.6	效率的计算	104
4.3.7	多注速调管中注一波互作用的计算	105
4.3.8	一维速调管大信号计算软件介绍	106
4.3.9	计算实例	107
4.4	二维电子圆环模型	111
4.4.1	模型和假设	111
4.4.2	圆环间的空间电荷力	113
4.4.3	二维速调管大信号计算软件 LSP 介绍	115
4.4.4	计算实例	116
4.5	2.5 维速调管计算软件——Arsenal	119
4.5.1	软件简介	120
4.5.2	基本方程	121
4.5.3	电子注与谐振腔间隙电场相互 作用的计算	126
4.5.4	Arsenal 软件的特点和功能	127
4.5.5	计算实例	131
4.6	2.5 维速调管计算软件——FCI	132
4.6.1	时变空间电荷场的计算	133

4.6.2	粒子运动方程	135
4.6.3	旋转速度	135
4.6.4	数值噪声和不稳定性问题	135
4.6.5	高频谐振腔的模拟	136
4.6.6	计算实例	138
4.7	粒子模拟计算软件 MAGIC 及其在速调管中的 应用	140
4.7.1	MAGIC 的计算方法和特点	140
4.7.2	100MW S 波段高功率速调管的计算模拟 ...	142
4.7.3	X 波段速调管的计算模拟	143
4.7.4	P 波段速调管的计算模拟	145
4.8	速调管计算软件——TESLA	149
4.8.1	物理模型和计算方法	149
4.8.2	模拟计算实例	151
	参考文献	153
第 5 章	电子光学系统的理论和计算	157
5.1	引言	157
5.2	强流电子光学系统的基本理论	162
5.2.1	基本原理和基本概念	162
5.2.2	强流电子光学系统的基本方程组	164
5.2.3	轴对称电子光学系统的基本方程组	165
5.2.4	电子注在空间电荷作用下的发散	167
5.3	电子注的聚焦	168
5.3.1	平行电子注的聚焦	168
5.3.2	阴极为任意程度屏蔽时均匀磁场中的 轴对称电子注	171
5.4	电子光学系统的计算模拟	178

5.4.1	二维电子光学计算模拟	181
5.4.2	三维电子光学计算模拟	184
5.5	大功率速调管电子光学系统的计算举例	187
5.5.1	C波段1.5MW高功率速调管电子 光学系统的计算	188
5.5.2	X波段连续波速调管电子光学系统 的计算	192
5.6	多注电子光学系统的计算模拟	197
5.6.1	周期反转永磁聚焦系统的设计考虑	198
5.6.2	周期反转永磁聚焦系统中横向磁场	200
5.6.3	多电子注系统中的横向磁场	201
5.6.4	电子枪枪区的磁场分布和横向磁场对 电子注聚焦的影响	203
5.6.5	多注电子注的调制方式	207
5.6.6	多注电子枪的设计考虑和举例	209
	参考文献	216
第6章	谐振腔的理论和计算	218
6.1	引言	218
6.2	谐振腔的一般理论	220
6.2.1	谐振腔中电磁场的基本方程	220
6.2.2	谐振腔的自由振荡情况	222
6.2.3	谐振腔的输入阻抗	225
6.2.4	谐振腔与波导腔的耦合	227
6.2.5	流入谐振腔的功率	228
6.3	速调管谐振腔基本参数和等效电路	230
6.3.1	圆柱形谐振腔	230
6.3.2	矩形谐振腔	232

6.3.3	谐振腔的等效电路和基本参数	234
6.4	谐振腔与外电路的耦合	237
6.4.1	计算输出腔外 Q 的方法(一)	237
6.4.2	计算输出腔外 Q 的方法(二)	239
6.4.3	计算输出腔外 Q 的方法(三)	241
6.5	重入式谐振腔等效电路参数的计算	244
6.6	计算重入式谐振腔参数的格林函数法	252
6.7	谐振腔参数的数值计算	257
6.7.1	三维电磁场计算软件 ISFEL3D	258
6.7.2	三维电磁场计算软件 CST-微波工作室	261
6.8	多注速调管谐振腔	264
6.8.1	电子注分布	264
6.8.2	间隙电场分布	266
6.9	高次模谐振腔	268
6.9.1	矩形高次模谐振腔	270
6.9.2	圆柱形高次模谐振腔	271
6.9.3	同轴高次模谐振腔	274
	参考文献	279
第7章	宽带输出电路的理论和计算	283
7.1	引言	283
7.2	滤波器加载宽带输出电路的理论	287
7.2.1	滤波器加载输出电路的基本原理	288
7.2.2	输出间隙与负载的功率交换	289
7.2.3	微波滤波器的基本理论	291
7.2.4	等波纹切比雪夫衰减函数的低通原型 滤波器的设计	306
7.2.5	最小插入衰减为零的切比雪夫低通原型	

	滤波器的元件值的计算	312
7.3	滤波器加载宽带输出电路的设计计算	313
7.3.1	微波滤波器第一节参数的计算	313
7.3.2	最佳等波纹切比雪夫低通原型滤波 器的元件值的确定	315
7.3.3	滤波器加载宽带输出电路的设计步骤	317
7.3.4	滤波器加载宽带输出电路的阻抗频率 特性的计算	321
7.3.5	滤波器加载宽带输出电路的设计举例	322
7.4	双间隙耦合腔输出电路	325
7.4.1	无载双间隙耦合腔的研究	325
7.4.2	双间隙耦合腔输出电路的工作方式	331
7.4.3	有载双间隙耦合腔输出电路的等效电路	332
7.4.4	重叠模双间隙耦合腔输出电路的 设计计算	334
7.4.5	滤波器加载重叠模双间隙耦合腔输出 电路的设计计算	337
7.4.6	滤波器加载双间隙耦合腔输出 电路的设计计算	340
7.5	宽带输出电路阻抗—频率特性的三维计算机 模拟	346
7.5.1	滤波器加载宽带输出电路阻抗频率 特性的三维计算机模拟	347
7.5.2	双间隙耦合腔宽带输出电路阻抗频率 特性的三维计算机模拟	352
7.6	双间隙耦合腔输出电路的稳定性	358
7.6.1	双间隙耦合腔中电子与高频场互作用 分析	358

7.6.2	双间隙耦合腔稳定性分析	361
F7. I	基于耦合谐振腔理论的滤波器加载输出电路的 设计方法	363
F7. I. 1	基本理论	363
F7. I. 2	设计举例	370
	参考文献	371
第 8 章	高功率输出窗的理论和计算	375
8.1	引言	375
8.2	盒型窗	376
8.2.1	等效电路	377
8.2.2	介质窗片引入的等效电容	379
8.2.3	矩形波导与圆波导连接处引入的 电纳 B_1	381
8.2.4	盒型输出窗的设计步骤和设计举例	383
8.2.5	半波长盒型窗的设计计算	385
8.3	矩形波导窗	388
8.3.1	无匹配膜片的矩形波导窗的谐振特性	389
8.3.2	加匹配膜片的矩形波导窗	391
8.3.3	加匹配膜片的矩形波导窗的设计举例	394
8.4	盒型输出窗的谐振模式	396
8.5	输出窗的功率容量	401
8.5.1	峰值功率的限制	401
8.5.2	盒型输出窗热损耗的计算	403
	参考文献	408

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Basic principle of klystron	2
1.2	History and development of klystron	3
1.3	The state art and development on theory and CAD of klystron	16
1.4	The main content of the book	20
	Reference	21
Chapter 2	Physical process in klystron	27
2.1	Velocity modulating and bunching	27
2.2	Induced current	33
2.3	Coupling coefficient	35
2.3.1	Gridded gap	35
2.3.2	Grid – less gap	37
2.4	Beam loading	44
2.4.1	Beam loading in gridded gap	44
2.4.2	Beam loading in grid – less gap	47
2.5	Relativistic effect	54
2.5.1	Relativistic correction factor of velocity modulation	54
2.5.2	Relativistic correction factor of	

	electron load	55
	Reference	56
Chapter 3	Small signal theory	58
3.1	Space charge wave theory	58
3.1.1	Basic equation	59
3.1.2	Infinite electron beam	62
3.2	Plasma frequency reduction factor	64
3.2.1	Drift tube filled fully with electron beam	65
3.2.2	Drift tube filled partly with electron beam	66
3.2.3	Plasma frequency reduction factor for hollow beam	67
3.2.4	Approximate method for calculating plasma frequency reduction factor	68
3.3	Coupling coefficient and beam loading with space charge effect	69
3.3.1	Coupling coefficient and beam loading of single gap cavity	71
3.3.2	Coupling coefficient and of beam loading of double – gap cavity	71
3.4	Equivalent circuit for input and output sections	73
3.4.1	Equivalent circuit of input cavity	73
3.4.2	Equivalent circuit of intermediate cavity ...	76
3.4.3	Equivalent circuit of output cavity	77
3.5	Calculation on gain – frequency characteristics of klystron	78

3. 5. 1	Linear superposition method	78
3. 5. 2	Equivalent transmission line method	80
3. 5. 3	Design of bunching section and calculation of small signal gain – frequency characteristics of klystron	82
3. 5. 4	Example	83
Reference	84

Chapter 4 Large signal theory and calculation of klystron

4. 1	Introduction	86
4. 2	Calculation of space charge force	88
4. 2. 1	Electrostatic Green function	88
4. 2. 2	Space charge force of electron disk	91
4. 2. 3	Space charge force of electron ring	93
4. 3	One dimension electron disk model	95
4. 3. 1	Model and hypothesis	95
4. 3. 2	Motion equation of electron disk	96
4. 3. 3	Calculation of space charge force	97
4. 3. 4	Calculation of electric field in cavity gap	99
4. 3. 5	Calculation of induced current, beam loading and gap voltage in cavity gap	100
4. 3. 6	Calculation of efficiency	104
4. 3. 7	Calculation of beam – wave interaction in multi – beam klystrons	105
4. 3. 8	Introduction of one dimensional large signal klystron code	106