

发射机 高压脉冲调制器的 设计与实践

魏 智 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

发射机高压脉冲调制器的 设计与实践

魏 智 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是一部论述雷达发射机的高压脉冲调制器的专著,是作者 40 多年来雷达研究的经验总结。由于高压脉冲调制器是电子管脉冲发射机的重要组成部分,发射机的射频脉冲质量取决于高压脉冲调制器的波形好坏和高压电源纹波的大小,故电子管脉冲发射机的主要设计工作量是高压脉冲调制器 and 高压电源的设计。基于此,书中介绍了各种高压脉冲调制器的工作原理、电路状态分析、工程设计方法,推导了主要的设计公式,并给出了许多颇具代表性的工程设计实例和新颖实用电路。本书内容丰富,全面系统,理论与实践相结合,具有实用参考价值,能具体指导科研实践。如果读者能把《雷达发射机技术》丛书和本书看成是姊妹篇,作为一种互补材料来阅读、理解,定会大有裨益。

本书适合从事雷达发射机研制和从事高能电子、质子直线加速器的工程技术人员参考,并对高等院校电子工程类专业师生、功率电子学专业的研究生、博士生有实用的参考价值。作为进一步研究的基础,本书对雷达发射机和功率电子学方面的专家、学者来说也是一本重要的参考文献。

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

发射机高压脉冲调制器的设计与实践/魏智著. —北京:电子工业出版社,2009.6
ISBN 978-7-121-08832-2

I. 发… II. 魏… III. 高压—脉冲调制—调制发射机 IV. TN832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 074274 号

策划编辑:赵丽松

责任编辑:宋兆武 谭丽莎

印 刷: 北京京师印务有限公司
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张:42 字数:1102 千字

印 次: 2009 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 88.00 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 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

微波电子管脉冲发射机在雷达、导航、遥控、电子对抗,电离层探测(采用的是非相干散射雷达)、正负电子对撞机、同步辐射加速器、工业辐照加速器、医疗加速器、港口海关用的物品探视仪、高功率微波武器、激光聚变等方面,都有着广泛的应用。

高压脉冲调制器,是微波电子管脉冲发射机不可缺少的组成部分,而发射机又是雷达整机中最贵重、技术难度最大的分系统。雷达发射机专家、全国劳动模范徐脉珩主任曾说过:“有发射管,就有发射机,有发射机就有雷达。”这句话很形象地道出了发射机在雷达系统中的重要地位。发射机的射频信号质量直接影响雷达整机的战术技术性能,而影响雷达发射机射频信号质量的主要因素,是脉冲调制器的视频脉冲波形及其高压电源的纹波和稳定性。因此客观地说,微波电子管脉冲雷达发射机的主要设计工作量,就是高压脉冲调制器及其高压电源的设计。

精密脉冲调制器的设计,是保证发射机射频性能的关键。所谓精密脉冲调制器的设计,就是确定调制器电路之后,采用脉内、脉间校平电路来实现脉冲顶部平坦度和相邻脉冲稳定度要求的“大功率脉冲校平技术”。本书详细地介绍和分析了各类脉冲调制器及其各种脉冲校平电路的原理、电路工作状态、并对其中重要的公式进行了必要的推导。有些常用公式是用能量守恒定律和电荷平衡原理给出的,这类公式的物理概念在脉冲调制器电路的分析中用得很多,而且计算简单方便。请读者注意这些公式的应用场合和条件,并加深对其物理意义的理解。

全书共 5 章。第 1 章是总论。第 2,3 章重点介绍了基本刚管调制器和浮动板调制器,它们是现代雷达发射机中应用最多的、技术要求也是最高的,因而也是最重要的。这两章在分析方法和内容方面都有新的发展和补充,给出了 5 种新颖的浮动调制器电路拓扑,改进了预调器的设计,丰富了预调器的内容;对 IGBT-HVSM 的均压网络进行了状态分析,提出了网络参数的选择方法;用较多的篇幅介绍了浮动板调制器、恒流刚管调制器、有各种技术特点的 TWT 栅极调制器的设计方法及其实用电路;还特别介绍了一 120kV 氢闸流管撬棒保护电路的设计分析和自触发、外触发电路的设计实践。第 4 章是线型脉冲调制器,其内容相当丰富、新颖、实用,占了全书的相当大的比重。本章不但在 de-Q 电路、阶梯充电、旁路法等稳幅技术方面进行了系统论述,还对宽匹配电路、反峰电路、阻尼电路等也进行了深入地探讨,并给出了一些实用电路;在超高功率线型调制器应用方面,重点介绍了最近完成的 270MW(450kV、600A)调制器的设计实践。在这一章中,笔者对设计、实践中的技术问题做了全面、系统的分析,并给出了解决方法,其中有的是以前资料中很少讨论的,也是设计师容易忽视的问题。第 5 章介绍了脉冲发射机电源设计中的一些特殊问题,并指出了解决问题的措施;从工程设计角度介绍了高压大功率串联稳压器的应用实例,特别介绍了开关稳压电源在发射机中的重要应用,其中还列举了 140kW 大功率开关电源的设计考虑和使用电路;对目前用得最多的高压硅堆整流电路中的过压、过流等保护方法也作了简要介绍。

本书的大部分内容都通过了实践检验。其中,有些电路是通过试验、改进,创新而用于产

品上的实用电路,是目前资料上很少见的。有些不同于现有资料上的元件参数的选择和计算方法,也是笔者根据理论和实践相结合而提出的更为合适的方法。当然,书中也有一部分是沿用了早期的资料,虽然技术上并不先进,但却具有代表性,仍不失借鉴和参考的价值。本书虽然是针对雷达发射机和高能电子加速器而写的,但其设计方法和实践经验对其他领域的高压脉冲设备的设计也同样适用。

为了满足雷达发射机和高能电子加速器领域的广大科技工作者、新毕业参加科技工作的青年朋友在理论学习和工程设计方面的需求,笔者著写本书时,力图反映雷达发射机电路技术的最近水平,并兼顾 21 世纪该技术领域的进一步发展。这是一本全面、系统、详细地论述各种高压脉冲调制器的、理论与实践相结合的雷达发射机专著,是笔者 40 多年来从事雷达发射机研制工作的经验总结,是向雷达前辈和同行学习的总结,是专业理论学习和对国外资料消化、理解、提高的总结,是基础理论与科研生产实践相结合的著作。如果此书能对从事雷达发射机和电子加速器研制的工程技术人员的理论学习和工程实践有所帮助,对进一步研究、探讨、解决科研生产中遇到的技术问题有所启发,将是笔者莫大的欣慰和荣幸。本书是作者的最后一本科技专著,是毕生从事雷达科研的结晶,是献给 2008 北京奥运会的礼物,也是笔者离开深爱的科研工作的一个纪念。书稿在 2008 年完成,将在 2009 年出版发行,所以本书也可作为中华人民共和国成立 60 周年、中国电子科技集团第十四研究所建所 60 周年的献礼。

在此,对在本书选题策划、编辑、校对、出版过程中付出辛勤劳动并作出重要贡献的策划编辑赵丽松主任,责任编辑宋兆武、谭丽莎同志,对在长期科研工作中曾给予作者许多支持和帮助的雷达前辈徐脉珩主任,对给予作者热情支持、鼓励和信任的读者,对书中各章被引用的参考文献的作者,对在初稿绘图、文字录入工作中给予作者大力帮助的同志,一并表示衷心的感谢。

笔者著写本书,是想为我国雷达事业的发展贡献一份微薄之力。笔者在写作中始终坚持“系统性、新颖性、实用性”相统一的原则,以期为广大读者提供一本内容翔实、全面、系统的、有实用参考价值的、能具体指导科研实践的发射机技术书。但限于作者的水平和经验,书中难免缺点或错误,敬请广大读者、同行专家批评指正。

魏 智

2008 年 8 月 8 日于南京

目 录

第 1 章 总论	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 微波电子管脉冲发射机与其高压脉冲调制器的互存关系	(1)
1.1.2 高压脉冲调制器的设计程序和步骤	(1)
1.1.3 精密脉冲调制器的设计是保证发射机射频脉冲质量的关键	(2)
1.1.4 高压脉冲调制器在电子、质子直线加速器方面的广泛应用	(2)
1.1.5 《发射机高压脉冲调制器的设计与实践》编写始末	(3)
1.2 脉冲调制器的基本参数	(4)
1.3 脉冲调制器的选择	(7)
1.3.1 脉冲调制器的组成和分类	(7)
1.3.2 各种脉冲调制器的基本电路形式	(8)
1.3.3 各种脉冲调制器的性能比较	(10)
1.4 调制器的负载特性	(11)
1.4.1 M 型管的伏安特性对调制器的设计要求	(11)
1.4.2 M 型器件的色散特性对调制器的要求	(12)
1.4.3 M 型管的脉冲调制问题	(13)
1.4.4 O 型管的脉冲调制问题	(14)
1.5 脉冲调制器波形失真对发射机射频性能的影响	(16)
1.5.1 调制波形顶部失真(波动和顶降)引起的幅度调制和相位调制	(17)
1.5.2 调制器脉冲前、后沿对射频脉冲质量的影响	(22)
1.5.3 具有控制极的 O 型管对调制波形的要求	(22)
1.6 高压电源纹波对发射机射频性能的影响	(23)
1.6.1 寄生调制边带的表示法	(23)
1.6.2 调制边带与电源纹波的换算关系	(24)
1.6.3 PD 雷达和 MTI 雷达对电源纹波的要求	(25)
参考文献	(28)
第 2 章 基本刚管调制器	(29)
2.1 基本刚管调制器的波形分析	(29)
2.1.1 脉冲前沿的形成和计算	(30)
2.1.2 脉冲顶部降落的形成和计算	(32)
2.1.3 脉冲后沿的形成和计算	(34)
2.2 基本刚管调制器的充电电路和切尾电路	(38)
2.2.1 电阻充电电路	(38)

2.2.2	电感充电电路	(40)
2.2.3	开关管充电电路(有源切尾电路)	(43)
2.3	刚性开关管工作点的选择及开关管简介	(48)
2.3.1	开关管的选择(包括 IGBT-HVSM 的主要参数)	(48)
2.3.2	调制管工作点的选择	(50)
2.3.3	调制管工作点的测试方法	(51)
2.3.4	电子管刚性开关简介(适用于高压状态的开关管)	(52)
2.3.5	固态刚性开关特性简介(SCR、NMOSFET、IGBT)	(57)
2.3.6	NMOSFET 和 IGBT 的专用驱动模块简介(TLP250、M57962L、IXDN414 等)	(66)
2.3.7	IGBT 和 NMOSFET 串联运用时的均压网络设计(直流和瞬态均压)	(75)
2.3.8	IGBT 高压开关组件(IGBT-HVSM;40kV,400A;100kV,100A)	(78)
2.3.9	IGBT-HVSM 放电回路中缓冲网络(限流网络)的设计考虑	(86)
2.4	用脉冲变压器耦合输出的刚管调制器(以速调管为负载)	(90)
2.4.1	电路形式和变压器的等效电路	(90)
2.4.2	速调管做负载时前沿的设计计算	(90)
2.4.3	脉冲顶降的形成和计算	(93)
2.4.4	脉冲后沿的计算	(95)
2.4.5	脉冲变压器反向电压及其出现的时间、恢复时间的计算	(97)
2.4.6	脉变初级绕组上的 R_d 、 VD_1 阻尼电路的设计	(98)
2.4.7	用钳位器取代 R_d 的最新设计方法(在 T 次级或初级钳位)	(99)
2.5	减小脉冲顶降的几种方法	(103)
2.5.1	用串联阻容网络与负载并联	(104)
2.5.2	用电阻和电感并联的网络与负载串联	(105)
2.5.3	用顶升脉冲来激励恒流工作的调制管	(106)
2.5.4	用低阻抗人工线代替储能电容	(107)
2.6	基本刚管调制器的栅极回路设计	(108)
2.6.1	RC 钳位器原理在调制器设计中的重要应用	(108)
2.6.2	栅偏压的串馈和并馈方式	(110)
2.6.3	“负偏”和“正偏”馈电方式	(115)
2.6.4	反栅流对调制器的影响	(115)
2.7	大功率刚管调制器的预调器设计	(118)
2.7.1	用变压器升压输出的全固态预调器(SCR、IGBT)	(119)
2.7.2	正偏、反偏型预调器电路拓扑的类型及其优缺点(共有 5 种电路拓扑)	(128)
2.7.3	全固态浮动预调器实用电路设计举例	(132)
2.8	脉冲调制器的定时器和编码器	(135)
2.8.1	射频功率放大链要求的定时信号时间关系(包括定时器框图)	(135)
2.8.2	脉冲编码器框图及其设计考虑	(138)
2.8.3	定时脉冲的传输及电缆长度同匹配的关系	(140)

2.9 基本刚管调制器实用电路的设计	(140)
2.9.1 电阻充电的基本刚管调制器设计举例	(140)
2.9.2 电感充电的基本刚管调制器的设计实例	(144)
2.9.3 美 AN/FPS-16 磁控管发射机的编码调制器	(148)
2.9.4 宽脉冲、高工作比变压器输出的刚管调制器的设计	(149)
2.9.5 非相干散射雷达脉冲调制器的设计与实践(TH2134 管做负载)	(164)
参考文献	(187)
第3章 浮动板调制器	(189)
3.1 浮动板调制器简述	(189)
3.2 浮动板调制器的电路形式	(191)
3.2.1 电容耦合浮动板调制器	(191)
3.2.2 全悬浮式直接耦合浮动板调制器	(193)
3.2.3 倍压能量恢复型浮动板调制器	(194)
3.2.4 晶闸管(SCR)浮动板调制器	(197)
3.2.5 具有浮动板结构的串联刚管调制器	(208)
3.3 浮动板调制器的激励器形式	(213)
3.3.1 用高压隔离脉冲变压器驱动开启管和切尾管的基本型激励器	(213)
3.3.2 全固态浮动激励器(驱动器)	(215)
3.4 浮动板调制器的驱动隔离和触发耦合方式	(225)
3.4.1 脉冲变压器耦合隔离方式	(225)
3.4.2 射频耦合方式	(230)
3.4.3 光电耦合方式	(232)
3.5 速调管调制阳极调制器的设计和实践(D4003 和 TH2134)	(241)
3.5.1 调制阳极调制器的方案讨论(D4003)	(241)
3.5.2 浮动板调制器几个重要参数的选择	(247)
3.5.3 浮动板调制器设计中的一些实际问题	(252)
3.5.4 速调管的撬棒保护系统	(265)
3.5.5 用 60kV、70A 的 IGBT-HVSM 代替 TM702F 组成固态浮动板调制器	(276)
3.5.6 非相干散射雷达用调制阳极调制器的工程设计方案	(277)
3.6 恒流工作的串联刚管调制器(串联浮动板调制器)	(279)
3.6.1 恒流串联刚管调制器的特性	(280)
3.6.2 返波管(跳频)用的恒流刚管调制器的设计考虑	(282)
3.6.3 前向波放大器用的恒流调制器的设计考虑	(283)
3.7 栅极脉冲调制器和前向波管的熄灭调制器的实用电路设计	(296)
3.7.1 采用高速高反压管的窄脉冲固态栅极调制器	(296)
3.7.2 高功率行波管用电子轰击半导体开关栅极调制器	(297)
3.7.3 速调管栅极调制器设计考虑	(300)
3.7.4 X 波段栅控 TWT 发射机调制器系统设计与实践	(304)

3.7.5	多功能栅控管(多注管和 TWT)老练试验台的设计与实践	(317)
3.7.6	2kV, 250kHz 全固态栅极调制器的设计实践	(327)
3.7.7	全固态熄灭脉冲调制器的设计实践	(331)
3.8	全固态浮动板调制器实施方案综述	(335)
3.8.1	NMOSFET、IGBT 动态均压网络的参数设计与状态分析(见 2.3.5 节)	(336)
3.8.2	IGBT 或 NMOSFET 串联链的驱动隔离电路设计	(340)
3.8.3	脉冲电压为 100kV 以上, 脉冲电流为 100A 左右的全固态脉冲调制器的 实施方案选择	(343)
3.8.4	国外高压半导体开关模块进展简况(HVS 和 HT5 系列)	(347)
3.9	$\frac{CSNS}{LINAC}$ RFS 用的 -120kV 调制阳极调制器及撬棒电路的设计与实践	(349)
3.9.1	调制阳极调制器和撬棒电路的技术指标要求	(349)
3.9.2	调制阳极调制器的设计考虑	(350)
3.9.3	-120kV 氢闸流管撬棒电路的设计分析和自、外触发电路的设计	(353)
参考文献		(361)
第 4 章	线型脉冲调制器(软管调制器)	(362)
4.1	引言	(362)
4.2	线型脉冲调制器的充电电路	(362)
4.2.1	直流电源 E_0 通过 R_c 对人工线(PFN)电容 C_N 充电	(362)
4.2.2	直流电源 E_0 通过电感 L_c 对 C_N 充电的数学分析	(365)
4.2.3	典型的线型脉冲调制器直流谐振充电回路的参数设计	(373)
4.2.4	储能电容 C_f 通过 L_c 对 C_N 人工线充电	(378)
4.2.5	线型调制器的回扫充电电路(磁能充电)	(381)
4.2.6	线型调制器的阶梯充电电路(磁能充电和电能充电)	(387)
4.3	线型调制器放电回路的设计	(399)
4.3.1	放电过程的简明描述	(399)
4.3.2	实际放电回路的波形分析及脉冲变压器变比的确定	(401)
4.3.3	负载失配对功率传输的影响及放电回路的效率 η_d	(405)
4.4	线型调制器的反峰电路及阻尼电路的设计	(408)
4.4.1	脉冲形成网络 PFN 上的反向电压 U'_N 对调制器工作的影响	(408)
4.4.2	反峰电路的作用及其元件参数的选择	(410)
4.4.3	变压器初级并联的 VD_2 、 R 阻尼电路	(417)
4.5	氢闸流管栅极回路及其全固态触发器的设计	(423)
4.5.1	氢闸流管开关特性简述	(423)
4.5.2	低通滤波器的设计	(427)
4.5.3	栅极回路的设计	(428)
4.5.4	氢闸流管触发器的设计考虑	(430)
4.6	脉冲形成网络 PFN(也称人工线、仿真线)	(444)
4.6.1	链型网络 PFN(链型人工线)	(445)

4.6.2	并联谐振网络(反谐振网络)	(451)
4.7	解决大功率线型调制器升压过程中连通的五种方法(宽匹配电路)	(454)
4.7.1	PFN 两端放电的电路	(454)
4.7.2	人工线延时充电的宽匹配电路	(460)
4.7.3	把正失配转变为负失配的切尾电路	(469)
4.7.4	多线调制器	(472)
4.7.5	无源脉冲校正器及其宽匹配应用	(479)
4.8	de-Q 电路	(488)
4.8.1	反馈型串联降 Q 电路	(488)
4.8.2	电阻 R 损耗型并联降 Q 电路	(501)
4.8.3	阻容 RC 型并联 de-Q 电路(几乎取代了电阻型 de-Q 电路)	(506)
4.8.4	高压反馈型并联 de-Q 电路(并联反馈型高效 de-Q 电路)	(509)
4.8.5	低压反馈型并联 de-Q 电路(串联反馈型高效 de-Q 电路)	(516)
4.8.6	一种新颖的向 PFN 反馈的 de-Q 电路	(523)
4.8.7	充电变压器次级取样电路的改进设计	(528)
4.9	旁路法充电调节器(充电后调节)	(532)
4.9.1	主人工线旁路法	(532)
4.9.2	子人工线旁路法	(533)
4.9.3	与回扫充电同时使用的高精度泄放电路(旁路法)	(535)
4.10	高压大功率线型调制器的设计实践	(540)
4.10.1	65MW(250kV、250A)线型调制器的设计实践	(540)
4.10.2	(超)高功率线型脉冲调制器技术方案综述(65~10 ⁴ MW)	(550)
4.10.3	高功率射频源(HPRFS)实验用 500MW 线型调制器设计	(558)
4.10.4	电阻充电的 0.6 μ s 半正弦电流波调制器的设计实践	(563)
4.10.5	目前国内最大脉冲功率(270MW)线型调制器的设计实践	(579)
	参考文献	(616)
第 5 章	脉冲发射机电源设计中的一些特殊问题	(617)
5.1	电源特性	(617)
5.2	脉冲负载时的 LC 无源滤波器	(620)
5.3	高压串联稳压器(调节器或调整器)	(624)
5.3.1	串联稳压器的原理方框图	(625)
5.3.2	高压大功率串联稳压器	(626)
5.3.3	提高效率 and 减小二次电容的程控开关式稳压器	(628)
5.4	线型调制器用的高压电源	(632)
5.4.1	由晶闸管(SCR)双稳态电路构成的小型化电源	(632)
5.4.2	匹配电容充电的小型化电源	(634)
5.4.3	双电源系统(和差式电源)	(636)
5.5	高频逆变器在现代雷达发射机中的应用	(637)

5.5.1 逆变器和稳定充电逆变器方案 (638)

5.5.2 逆变器后面的高压产生器电路 (641)

5.5.3 正交场放大管用的高频逆变器高压电源 (644)

5.5.4 栅控 TWT 的供电 (645)

5.5.5 用于雷达发射机的 140kW 高压开关电源 (646)

5.5.6 对 2420 μ F(其总储能为 697kJ)电容进行阶梯充电的电源系统 (652)

5.6 串联叠加的高压直流电源(广播发射机、核聚变实验装置中微波加热用) (656)

5.7 高压硅堆整流器的保护问题 (658)

5.7.1 高压硅堆的过流保护 (658)

5.7.2 高压硅堆的过压保护 (660)

参考文献 (662)

第 1 章 总 论

1.1 引言

1.1.1 微波电子管脉冲发射机与其高压脉冲调制器的互存关系

现代雷达有连续波(CW)雷达和脉冲雷达之分。脉冲雷达采用的是脉冲发射机。脉冲发射机可以采用全固态脉冲发射机,也可以采用真空电子管脉冲发射机(常采用微波真空电子管做射频功率放大器)。固态发射机的功放一般工作在 C 类状态,其直流电压为 $25\sim 40\text{V}$ 。大功率固态放大器采用开关稳压直流电源供给多个放大器或组件,为了提高可靠性,往往将多个标准化开关直流电源并联相加输出,并留有很大的冗余度,这样即使有几个放大器或组件坏了整机也能正常工作。用脉冲输出的射频激励器推动 C 类放大器,可以得到脉冲射频功率输出,且一般是对射频激励级进行脉冲调制,而不是专门设计脉冲调制器。当然,有特殊要求时,希望 C 类功放用脉冲电源供电,这时可以用一个晶体开关管与 C 类功放管串联。对晶体开关管进行脉冲驱动,产生调制脉冲代替直流稳压电源,这是低压开关调制器的原理,不是本书讨论的内容。本书重点介绍电子管脉冲发射机用的各种高压脉冲调制器及其电源的工作原理和状态分析方法、工程设计与实践。

微波电子管脉冲发射机,有自激振荡器式 and 主振放大式两种形式。前者通常是用磁控管振荡器做功率输出级,后者是用 O 型器件或 M 型器件做功率放大器。主振放大式发射机实际上就是射频功率放大器,其输出功率如果通过馈线传输到天线发射到空中去,就叫做发射机;如果功率不送到天线,而是作为各类电子直线加速器的微波源时(高功率射频源—HPRFS),就叫做高功率射频放大器。无论是雷达发射机还是加速器中的射频功率放大器,都要求视频高压脉冲调制器提供合乎要求的视频脉冲。加速器中的射频功率源的射频脉冲功率可为几 $\text{MW}\sim 100\text{MW}$,而脉冲调制器峰值功率最大应在 300MW 以上。更大的射频功率源,要求设计 $300\sim 500\text{MW}$ 以上的脉冲调制器。

高压脉冲调制器,是微波电子管脉冲发射机不可缺少的重要组成部分,而发射机又是雷达整机中最昂贵、技术难度最大的分系统。目前几乎没有详细论述各种高压脉冲调制器的专业书,希望本书能弥补这个空白。

1.1.2 高压脉冲调制器的设计程序和步骤

地面对空搜索、远程警戒、导航雷达的工作频率较低,一般在甚高频 VHF 和超高频 UHF 波段;精密测量雷达的工作频率较高,在 UHF 频段;机载雷达,受体积和重量限制,大部分选择 X 波段;警戒引导雷达发射机采用电子三极管、四极管、速调管做功放管,也多采用固态发射机,其工作在频率较低的 P、L、S 波段;精密测量雷达常工作在 L、S、C 波段,多采用速调管、TWT、磁控管、前向波放管;机载雷达多采用栅控 TWT,机载预警雷达可采用多注速调管。由这些微波电子管组成的脉冲发射机,采用的脉冲调制方式不是阴极调制就是阳极调制或栅

极调制。调制器的设计程序是:首先根据雷达总体提出的发射机技术指标来选择不同类型的微波放大管,然后根据不同类型的放大管来选择不同的调制器电路。确定调制器电路拓扑之后,再进行具体参数的设计计算和主要元器件的选择,同时要对高压电源提出指标要求和方案建议。必要时,还要进行方案试验,有把握之后方认可其是可行方案。最后进行调制器和发射机的结构设计。

以上说的是设计调制器的一般程序和步骤。要想真正达到设计性能要求,不仅要根据微波管的负载特性和相移特性来设计调制器电路,还要根据不同雷达体制对发射机提出的指标要求,来确定调制器应该采用哪种脉冲校平电路。脉冲压缩雷达、动目标显示雷达 MTI 和脉冲多普勒(PD)雷达,对调制器的波形失真和电源纹波要求的侧面是不同的。这三种雷达对调制器及电源的具体要求,请参考本章的参考文献[1,2,5]。

1.1.3 精密脉冲调制器的设计是保证发射机射频脉冲质量的关键

现代雷达的研制工作,对脉冲发射机的射频性能提出了苛刻要求,改善射频放大管的幅度、相位灵敏度只能得到一定的收效。而调整射频脉冲质量的重任,还要由脉冲调制器来完成。精密脉冲调制器的设计实际上是通过脉冲校平电路来实现的。本书对各类脉冲调制器电路的工作原理、工作状态进行了分析,对有的重要公式还做了必要的数学推导。对调制器设计中经常遇到的计算问题,有的给出了经验公式,有的用能量守恒定律或电荷平衡原理,简单地推导出了设计公式,这对调制器设计人员的应用来说,既易懂又方便。在本书中,笔者第一次用普通的二极管钳位原理来分析刚管调制器栅偏压增长的机理,并提出了具体解决办法。笔者还利用电荷平衡原理的简明等式给出了计算偏压泄放电阻的常用表达式。在发射机调制器设计中,有许多地方都要用到这个表达式。为了达到相邻脉冲稳定度的要求,本书用大量篇幅讨论了各类 de-Q 电路(包括最新颖的直接向人工线回授的 de-Q 电路),以及回扫充电、旁路法、阶梯充电(磁能充电和电能充电)、直流串联稳压器、直流开关稳压电源、直流和差稳压电源等稳幅电路,并给出了具体设计步骤、设计公式及应用实例。本书也介绍了增幅管等返波管必须用的恒流刚管调制器的设计考虑和实用电路,这种恒流调制器用在阻抗基本不变的负载时,就是稳压输出电路。以上这些电路都是保证相邻脉冲稳定度的脉冲校平电路。保证脉内波形平坦度的脉冲校平电路,是用二极管自生偏压限幅电路(用 RC 产生限幅电平)或用电源 E 。做限幅电平的限幅电路,也称无源脉冲校平电路。由于有源脉冲校平电路的实用性不强,故没有提及。以上所述脉间、脉内稳幅电路都称做脉冲校平器。系统全面的内容,请参考本章参考文献[1]及笔者翻译出版的专辑(本书第 4 章的参考文献[2])。

1.1.4 高压脉冲调制器在电子、质子直线加速器方面的广泛应用

微波电子管脉冲发射机,在雷达、导航、遥控、电子对抗、电离层探测(用的是非相干散射雷达)、正、负电子对撞机、同步辐射加速器、工业辐照加速器、医疗加速器、港口海关用的防走私探测仪、高功率微波武器、激光聚变,强流质子直线加速器等领域都有广泛的应用。

现代雷达发射机的频谱纯度要求比各类电子、质子加速器要高得多。前者要求脉冲调制器的相邻脉冲稳定度高达 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 。与此相对,加速器短期稳定度一般在 10^{-3} 左右,长期稳定度为 1% 就够了。加速器的功率要比雷达高,有的高能加速器要求射频脉冲功率为 100MW 以上,故要求调制器约输出 300MW 的视频脉冲功率。有的加速器要求调制器输出功率在 500MW 以上。电子、质子直线加速器多数采用的是线型脉冲调制器,这类脉冲

调制器的工作比都很低,脉宽也较窄,重复频率 $F_r=5\sim 50\text{Hz}$,脉宽(顶部)为 $2.5\sim 5\mu\text{s}$ (可以采用氢闸流管、SCR管的线型脉冲调制器),可以不用采取宽匹配措施,用二极管谐振充电加上 de-Q 电路等稳幅电路就行了。在 F_r 太低时,希望采用阶梯充电技术,这样既能保证 10^{-3} 的稳定度,又能实现延时充电。这样在 $F_r=5\sim 10\text{Hz}$ ($T_r=200\sim 100\text{ms}$) 这样超低的重复频率下工作时,可以延时 180ms、80ms 对 PFN 充电,避免了给开关管加上近乎直流的高压,也使 PFN 的泄漏放电减少了。充电时间取在 $T_c=16\sim 20\text{ms}$ 就可以了,其余时间开关管上几乎是零电压。

第4章主要介绍了线型脉冲调制器,不仅在 de-Q 电路、阶梯充电等充电稳幅技术方面进行了全面、系统的电路分析,而且对解决线型调制器连通问题的宽匹配电路也进行了深入的探讨,并给出了应用实例。在超高功率线型调制器应用方面,这一章还介绍了 65MW、500MW、270MW 调制器的设计实践,特别是 270MW 调制器的设计实践,有许多实际问题的解决和电路的改进设计,以及一些新的观点,都是以前资料很少见的。第4章的内容占了全书相当大的比重,笔者希望这一章能给从事高能加速器电路设计的工程技术人员和功率电子学专业研究生、博士生提供实用的参考价值和指导作用。

1.1.5 《发射机高压脉冲调制器的设计与实践》编写始末

我国雷达事业经过几代人 40 多年的刻苦努力、共同奋斗,取得了辉煌的成就,进而推动了雷达发射机技术的飞快发展。电子管脉冲发射机作为现代雷达的重要组成部分,其性能和用途也有了根本性的提高和扩展。在 20 世纪 60~80 年代,国外发表了一些关于发射机、调制器和电源方面的资料,但多散见于杂志和会议记录中,缺乏全面、系统的论述,国内有关书刊也很少。20 世纪 80 年代之后,国内外出版了几本论述雷达发射机技术方面的专著,文献[2]的作者对几本书的评价是:“……一直是广大读者,特别是从事雷达发射机设计和研制的工程技术人员很好的参考书,对实际工作也起到了很大的指导和促进作用,即使是在今天,仍然如此。”

20 世纪 80 年代之后,已出版的几本微波电子管雷达发射机专著如下。

① 1985 年北京国防出版社出版了强伯涵、魏智编著的 64 万字的《现代雷达发射机的理论设计与实践》一书,内容丰富、全面、系统,受到国内同行专家和从事雷达发射机研制的工程技术人员的好评。该书共分 7 章:第 1~3 章是有关雷达发射机总体技术要求、总体方案综述和微波电子管原理方面的内容,约 15 万字(由强伯涵教授编著);第 4~7 章是脉冲调制器及其高压电源的设计,约 49 万字(由魏智编著)。1987 年机电部十四所技术处对该书的第 4~7 章进行了成果鉴定,评审组专家对第 4~7 章的内容和先进性、实用性、创新性做了肯定的评价。该书于 1987 年获十四所软件成果一等奖,于 1988 年获机电部科技进步一等奖,并载入《中国机电工业年鉴》(1989 年电子卷)。

② 美国作者 Evell 写的《Radar Transmitters》一书,1983 年出版,1984 年中国引进,有一些专家学者写信给国防出版社,欲申请翻译出版中译本,但都没被列选。因为出版社当时认为此书内容比较简单,不如已列选的《现代雷达发射机的理论设计与实践》一书内容翔实,没有再翻译出版的必要了,所以至今没见到其中文译本。

③ 1994 年美国另一作者 Sivan 写的《Microwave tube Transmitters》一书又和中国读者见面了,该书的内容涉及面较广,对各种用途的电子管发射机的设计要求、技术特点,电路形式都作了简单扼要的介绍,对从事发射机设计的工程技术人员有一定的参考作用,但还是属于科普读物。

④ 2006 年由电子工业出版社出版的,由郑新、李文辉、潘厚忠等编著的《雷达发射机技

术》一书,是王小漠、张光义院士主编的《雷达技术丛书》之一,它可以称做中国的“16本书”(美国“雷达丛书”有28本书,我们称它是“28本”)。《雷达发射机技术》共56万字,由固态发射机和电子管发射机两部分组成,内容新颖、全面、系统,该书从发射机功能、基本原理、组成框图、设计思路和方法方面进行了全面介绍,对发射机设计人员了解发射机技术内容,掌握设计方法,撰写技术方案论证都会有很大帮助和启示,是一本具有参考价值的新书。

⑤ 感谢电子工业出版社让又一本新书——《发射机高压脉冲调制器的设计与实践》问世。1985年由国防工业出版社出版的《现代雷达发射机的理论设计与实践》一书已经出版20多年了。虽然现在的发射机设计人员仍然还把它作为主要参考书使用,并且对实际工作仍起一定的指导作用。但作为其第4~7章的作者对调制器有关章节写得还不够细致,内容也有些陈旧了。目前,国内应有一本内容更新、更全面、系统,包括全固态脉冲调制器在内的发射机新书问世。近几年来,有不少同行读者来电话或面问,能否买到那本1985年的原版书。我说买不到了,国防工业出版社书店和书库里的存书早卖光了,他们又问能否再版。我说,再版谈何容易。上海应用物理研究所(第三代光源课题组)把我手中唯一的一本书借去,并征得我的同意,将第4~7章的调制器内容复印出来,以供单位工程技术人员阅读、学习和参考。

鉴于上述情况,为了满足从事雷达发射机设计的广大技术工作者和新毕业参加工作的青年朋友在科研工作中的需要,笔者著写了《发射机高压脉冲调制器的设计与实践》一书,力图反映电子管脉冲发射机电路技术的最新水平,以及21世纪进一步发展的趋势。如果读者能把《雷达发射技术》丛书和本书作为姊妹篇来互补阅读,定会大有裨益。

1.2 脉冲调制器的基本参数

设计脉冲调制器时,首先要将由雷达总体或发射机总体设计师提出的具体指标要求作为设计依据,设计论证工作才能进行。这些基本指标参数有:脉冲宽度 τ 、脉冲功率 P_0 、平均功率 P_0 、重复频率 F_r (或周期 T_r)、工作比 $D=\tau/T_r$ 、负载阻抗 R_L 、脉冲幅度稳定度(脉内、脉间)、脉冲前沿 τ_r 、脉冲顶降 $\Delta U_L/U_L$ 、脉冲后沿 τ_f 等。下面给出它们的定义和必要的说明。

① 脉冲宽度 τ 。它指的是脉冲波形的持续时间。整个脉冲波形由前沿 τ_r 、顶部 $\tau_{\text{顶}}$ 、后沿 τ_f 三个部分组成。理想波形是矩形脉冲,它的前后沿皆为零,顶部又是平坦的(没有顶降)。在一个具体系统中,产生的波形并不是理想矩形,也就是都有前沿上升边、下降边,顶部也会有线性降落。

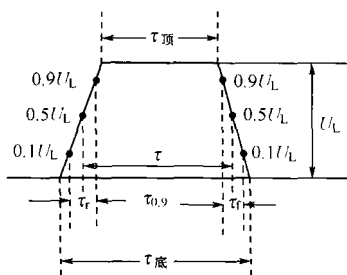


图 1-1 把梯形等效成矩形脉冲

如果用脉冲变压器输出,波形顶部还会产生正弦波动或“上冲”。所以为了使测试验收有个标准可用,一般都对波形的各个部分给出了明确定义。

如图 1-1 所示,把一个梯形脉冲等效成理想矩形时,其宽度 τ 就是定义在矩形的中点 $0.5U_L$ 处,也就是梯形脉冲为 $0.5U_L$ 处的脉宽。这种等效是在计算平均功率和脉冲功率时需要的,也就是说计算工作比时需要等效脉冲宽度 $\tau_{\text{等}}$ 。一般不特别强调时,所谓脉宽都是指 $0.5U_L$ 处的脉宽。在如图 1-1 所示的理想梯形波情况下有下列公式成立:

$$\tau_{\text{等}} = \tau_{0.5} = \frac{(\tau_{\text{底}} + \tau_{\text{顶}})}{2} \approx \tau_{\text{顶}} + \frac{(\tau_r + \tau_f) \cdot \frac{1}{0.8}}{2} \quad (1-1)$$

③ 脉冲顶降 $\frac{\Delta U_L}{U_L}$ 。它是峰值脉冲幅度降落到 U_0 时(B点)的差值 ΔU_L 与 U_L 的比,用百分数表示。脉冲顶降也称脉冲顶部线性降落。

④ 脉冲上冲(过冲) $U_L(t)$ 。它是指脉冲顶部超过峰值脉冲幅度 U_L 的数值,常用的是 $\left(\frac{U_L(t)}{U_L}\right)$,并且一般用百分数表示。

⑤ 反冲(反摆) $\Delta U'_L = U_{hm}$ 。它是指反向脉冲的最大幅度,是零电平以下的部分,用 $\frac{U_{hm}}{U_L}$ 表示其相对值。有时用 U_{hm} 表示反冲电压的最大值 ($U_{hm} = \Delta U'_L$)。

⑥ 恢复时间 τ_B 。它是从零电平算起,到反冲幅度 $\Delta U'_L$ 减小到 $0.1 U_L$ 时所需要的时间。它也称反向电压的持续时间 τ_B 。图 1-3 中没画出全部反向电压占据的时间,也没画出漏感和分布电容所产生的叠加在反向电压上的更高频的振荡波形,也没有画出欠阻尼情况下的回摆(振荡幅度由负 $\Delta U'_L$ 变为正向的 $\Delta U'_L$,称回摆)。

⑦ 波形延迟时间 τ_d 。在 U_L 上升阶段有个固有的延迟时间 τ_d ,它代表从输入信号零点算起,到输出脉冲上升到 $0.1 U_L$ 电平所需要的时间。它通常比 τ_r 短得多。

⑧ 脉冲功率 P_0 。它是指脉冲电压和脉冲电流的乘积。当脉冲电压 U_L 和脉冲电流 I_L 都为矩形时,脉冲功率是定值;如果顶部不平坦,脉冲功率在脉宽 τ 之内有变化时,通常所说的脉冲功率是脉宽内的平均功率。峰值脉冲电压幅值乘上峰值脉冲电流幅值的乘积就等于脉冲峰值功率。对于矩形脉冲来讲,脉冲峰值功率就等于脉冲功率;对于非矩形脉冲来讲,脉冲峰值功率大于脉冲功率。

⑨ 调制器输出的平均功率 $\bar{P}_0$ 。它等于脉冲功率乘上工作比 $\frac{\tau_{0.5}}{T_r}$ 。如果是脉冲群,则 $\tau_{0.5}$ 是指群内所有脉冲宽度($0.5 U_L$ 电平)之和。

⑩ 工作比 $D = \frac{\tau_{0.5}}{T_r}$ 。有时雷达总体给发射机提出变脉宽和变重复周期的要求,如有几个 τ 和几个 T_r ,具体设计时,甚至还要求 τ 从 $1\mu s$ 至数百 μs 可变,而 T_r 也在变,这时用软管方案很难实现,常选择刚管调制器。设计时要以最大工作比来计算。在变 T_r 工作状态,有时脉冲间距不等会给输出脉冲造成幅度差,此时必须采用稳幅措施,不然会引起附加调制,造成假目标。

⑪ 脉冲幅度稳定度。其中,一种是相邻脉冲幅度稳定度,动目标显示雷达一般要求其在 $0.1\% \sim 0.05\%$ 之间。它主要是由电源纹波造成的,电源纹波会影响发射机频谱纯度。另一种是脉冲波形本身的失真(称脉内幅度稳定度),如顶部波动,顶部线性降落,前、后沿大小。波形失真会引起寄生调相和寄生调幅。不同体制的雷达,不同用途的雷达对调制器脉冲波形的稳定度都有不同的要求。

⑫ 调制器的负载 R_L 。调制器负载一般为三极管、四极管, O 型器件和 M 型器件。设计调制器时,既要知道输出的脉冲电压 U_L 和脉冲电流 I_L ,又要知道 M 型放大管的偏压二极管特性,还要知道 O 型放大管电流为电压 U_L 的 $3/2$ 次方特性,由此即可求得其静态阻抗。设计 O 型管调制器时,如果采用软管方案,就要考虑在高压 E_0 升压过程中,调制器如何保证不发生“连通”现象。为保证调制器与负载的匹配,一般采用的是升压脉冲变压器,但必须注意铁芯恢复时间问题,即如果阻尼电阻大,反峰幅度就大,调制管耐压就危险;阻尼电阻小,铁芯恢复就慢了,甚至在 T_r 内不能恢复,会造成工作不正常。特别是在采用宽脉冲变压器时,如采用按 $\tau = 500\mu s$ 设计的变压器,让它同时又能工作在 $50\mu s$,工作比还是一样的, $\tau/T_r = 5\%$,这时用同一个阻尼电阻 R_d 就

式中, τ_r 为脉冲幅度在 $0.1U_L \sim 0.9U_L$ 之间所经过的时间, τ_f 为 $0.9U_L \sim 0.1U_L$ 之间经过的时间, τ_r 、 τ_f 分别称做脉冲前沿和脉冲后沿。

工作中, 往往容易看到顶部脉宽 $\tau_{\text{顶}}$, 则利用式(1-1)可以求 $\tau_{0.5}$ (等效脉宽 $\tau_{\text{等}}$)。实际上, 顶部是不可能没降落的, τ_r 和 τ_f 也不一定相等, 而且可能不是直线倾斜, 有时在 $0.9U_L$ 左右会是指数上升(馒头形的), 但在工程计算上仍可用式(1-1)近似计算。有的用户提出将顶部脉宽作为设计依据, 明确提出“平顶脉宽为 $2.5\mu\text{s}(100\%)$ ”, 同时又提出“顶降为 2% ”, 这种提法是矛盾的。既然有 2% 顶降就没有 100% 处的平顶脉宽, 而 100% 处(A点)的脉宽只能是一个点了。合理的要求是顶部脉宽应指 2% 顶降电平那点(B点)的脉宽。有顶降时的波形如图 1-2 所示。

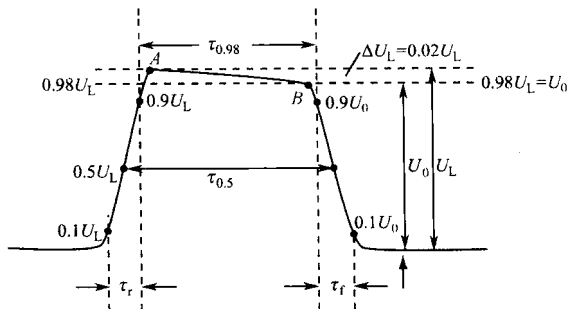


图 1-2 有顶降时的脉冲波形

顶部脉宽应是 $0.98U_L = U_0$ (B点) 时的脉宽, 脉冲顶降相对值为 $\Delta U_L / U_L = 2\%$ 。在此种情况下, 前沿仍是指 $0.1U_L \sim 0.9U_L$ 所需的时间, 而后沿指 $0.9U_0 \sim 0.1U_0$ 所需的时间, $\tau_{\text{等}} = \tau_{0.5}$ 仍然是指 $0.5U_L$ 处的脉宽。但在计算脉冲电流的平均值时, 工作比 D 可按式(1-2)近似求出。

$$D = \frac{\tau_{0.5}}{T_r} = \left[\tau_{0.98} + \frac{(\tau_r + \tau_f) / 0.8}{2} \right] / T_r \quad (1-2)$$

图 1-2 是刚管调制器或浮动板调制器直接输出时可得到的实际波形, 如果加脉冲变压器输出时, 则不论是刚管还是软管调制器, 波形顶部都会有波动或“上冲”, 更会有顶降, 前、后沿也会加大。后沿结束后, 会有“反冲”(反摆), 有时还会有回摆(和 U_L 同极性的), 波形的定义就比较复杂了。图 1-3 是有脉冲变压器时的输出波形。

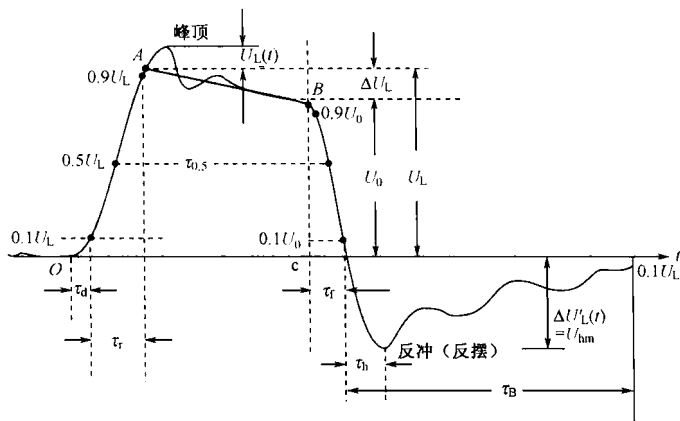


图 1-3 有脉冲变压器时的输出波形

除在图 1-2 中定义过的参数外, 下面还有一些参数需要说明。

② 脉冲幅度 U_L 。它是指顶部的平滑曲线外推线的最大值 U_L (A点) (去掉上冲 $U_L(t)$), U_L 也称峰值脉冲幅度。把 $U_L - \frac{\Delta U_L}{2} = \bar{U}_L = \frac{1}{2}(U_L + U_0)$ 称平均脉冲幅度(脉冲幅度在脉冲内的平均值)。如果脉冲很宽, ΔU_L 较大时, 用 $\bar{U}_L$ 较为准确。一般求平均功率时用 $\bar{U}_L$ 。