

装备科技译著出版基金



高新科技译丛



Springer

Load-Pull Techniques
with Applications to Power Amplifier Design

功率放大器设计中的 负载牵引技术

【加】Fadhel M. Ghannouchi Mohammad S. Hashmi 著
陈鹏 羊恺 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

功率放大器设计中的 负载牵引技术

[加] Fadhel M. Ghannouchi Mohammad S. Hashmi 著

陈鹏 羊恺 译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-147号

图书在版编目(CIP)数据

功率放大器设计中的负载牵引技术/(加)法迪勒
M. 加努希(Fadhel M. Ghannouchi), (加)穆罕默德
S. 哈什米(Mohammad S. Hashmi)著;陈鹏,羊恺译
—北京:国防工业出版社,2018.10

书名原文:Load - Pull Techniques with
Applications to Power Amplifier Design

ISBN 978 - 7 - 118 - 11732 - 5

I. ①功... II. ①法...②穆...③陈...④羊... III.
①功率放大器-设计IV. ①TN722.702

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第216332号

功率放大器设计中的负载牵引技术

Load - Pull Techniques with Applications to Power Amplifier Design

Translation from the English language edition;

Load - Pull Techniques with Applications to Power Amplifier Design by Fadhel M. Ghannouchi
Mohammad S. Hashmi

©Springer Science + Business Media Dordrecht 2013

Springer Street, New York

NY 10013, USA

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media Dordrecht 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13½ 字数 253 千字

2018年10月第1版第1次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

功率放大器是所有通信系统(如射频/微波无线通信系统、高功率微波系统、拒止武器、核磁共振成像仪等)必不可少的关键器件。由于其具有强烈的非线性特性,用传统的分析法或散射参数表征法对功率放大器进行表征和设计已不再可靠。负载牵引技术既能方便地测量晶体管的非线性参数,为晶体管建模提供准确的数据;又能获得晶体的最佳基波和谐波阻抗,为功率放大器达到最优的效率、线性、功率或这三者之间的平衡提供设计方向。随着国内自主氮化镓、砷化镓和磷化铟等晶体管的发展,功率放大器设计中的负载牵引技术将会极大地促进这类器件建模和应用的发展。此外,负载牵引技术还能对混频器和低噪声放大器进行表征,实现在片器件测试和表征。负载牵引已经成为射频/微波设计领域必不可少的技术。

本书主要关注功率放大器设计中的负载牵引技术,包括无源负载牵引技术、有源负载牵引技术、基于六端口的负载牵引技术、高功率负载牵引技术、包络负载牵引技术和波形测量等相关知识。本书可以作为研究生相关课程的教材,也可供从事相关研究工作的科技人员参考。

羊恺翻译了本书的第1章~第3章,陈鹏翻译了本书的第4章~第8章并对全文进行了校正。

装备科技译著出版基金、国家自然科学基金 61601088 及 61571093 和电子科技大学中央高校基本业务费 ZYGX2015KYQD088 对该项目提供了部分经费支持,国防工业出版社的张冬晔编辑在出版过程中出力甚多,研究生李陆坪、薛乔雨、栗立勇和朱鹏飞参与了部分校正工作,在此一并表示致谢。

本书虽然经过反复校正,但受限于译者水平,还存在一些尚未发现的错误或遗漏。敬请读者谅解,并希望得到读者的批评和指正。

译者

2017年10月

前 言

为了识别晶体管的大信号行为,常用的线性 S 参数并不能完全反应晶体管的特性。因此,在非线性域内,晶体管的大信号表征对器件性能评估和确认必不可少。在晶体管器件的大信号表征、优化以及射频、微波和毫米波功率放大器的设计方面,负载牵引是一种值得推荐的技术。

四十年前,负载牵引技术第一次出现在文献报道中。作为先驱,它驱使工程师在晶体管器件和功率放大器的表征、测量和优化等方面进行思维模式转换。第一台负载牵引系统虽然只是初具雏形,但是它为先进的负载牵引技术的发展提前做好铺垫。

本书介绍了基于功率放大器的负载牵引系统的操作、校准、设计和实现方法及应用。它从基本的负载牵引技术概念出发,介绍了很多有意思的负载牵引高级技术,其中包括基于放大器、混频器和噪声测试系统的无源负载牵引系统,有源负载牵引系统,高功率负载牵引系统和包络负载牵引系统。同时本书也包含了波形工程系统本身及其校准技术和应用。

本书可为微波和无线领域的研究生、研究者和设计工程师提供参考。读者需要具有一些基本的射频和微波电路设计知识,也需要对传输线理论和一些通信概念有深入的了解。本书也可作为研究生在大信号测量和表征方面的教材。

第1章简单回顾了功率放大器的特性、指标、工作类型和设计方法;同时也介绍了负载牵引系统和它们的一些重要特性。

第2章专注无源负载牵引系统。本章介绍了无源调谐技术的基本知识和最为常见的两种无源调谐技术:电调谐(ETS)和机电调谐(EMT)。这两种技术都可实现无源阻抗调谐。接着,本章详细讨论了负载牵引测量系统的测量和校准过程。此外,本章还详细介绍了各种无源谐波负载牵引系统架构及其相应的优缺点。最后,本章讨论了能够提升调谐范围的共性技术。

第3章提供了有源负载牵引技术和系统的相关细节。首先介绍了闭环有源负载牵引技术和实现方法,并包含了大量的特殊闭环负载牵引的设计细节。其次介绍了前馈有源负载牵引系统;为了增强调节范围并实现高反射的负载牵引系统,各种混合设备的方法也在讨论之列。有源开环负载牵引通过反复迭代才能收敛到一个最佳的阻抗,因此介绍了一种快速收敛的有源开环负载牵引系统的算法。

第4章介绍了基于正向配置和反向配置六端口反射计的晶体管大信号表征的

理论、技术和原则,另外对与之相关的正反向配置六端口反射计的实现技术也做了介绍。为了实现晶体管噪声测试、混频器测试和设计,以及振荡器线性测试,本章对采用六端口反射计的源牵引技术也做了说明和讨论。本章也对 AM/AM 和 AM/PM 失真测试和基于六端口反射计的无源和有源负载牵引晶体管大信号特性进行了表述和讨论。

第5章着力于高功率微波晶体管器件的表征。传统的无源和有源负载牵引系统在测量高功率微波器件的时候会遇到很多问题。为了克服这些问题,有很多方面需要处理,本章详细地讨论了这些处理方法。本章还对高功率微波器件测量和表征所需的定制负载牵引系统进行了详细阐述和论证。最后,为了迎合大栅宽高功率微波器件的发展,本章也对一些新兴的解决方案进行了讨论。

第6章讨论了有源包络负载牵引(ELP)及其相关的设计和测量技术。本章首先详细地解释了谐波包络负载牵引原理,然后介绍了一些独特的包络负载牵引测量应用。

第7章致力于非线性时域波形测量系统的误差校正理论和方法。本章接着介绍了波形工程的概念并讨论了一些波形工程系统的应用实例。

第8章介绍了一些负载牵引系统的高级应用和配置。本章首先分别讨论了多音激励和调制激励的负载牵引系统概念;实验表明,这个系统对一些现实生活中的实际应用特别有用。本章接着详细描述了采用负载牵引和源牵引系统的噪声测试并展示了混频器的负载牵引表征和测量。

致 谢

诚挚地感谢那些帮助和支持我们的朋友、同事、工作人员和学生；他们分别来自于卡里加尔大学 iRadio 实验室、蒙特利尔巴黎综合理工学院 Poly-grames 研究中心和英国的卡迪夫大学。非常感激我们的学生和研究者，他们的帮助对本书的成书至关重要。特别感谢 R. G. Bosisio 博士和 P. J. Tasker 博士，二位学者提供了有用的评论、讨论和多年以来的协作，本书许多结果都来自于我们和他们多年的协作。同时感谢 C. Heys，她做了最终的审查，完成了符合格式的排版；另外感谢 Ivanad' Adamo 在此事中的领导工作。还需感谢 IEEE 和 Focus Microwaves 公司，它们提供了很多发表在它们杂志和应用文档中的图片和示例的许可。

M. Hashmi 博士感谢加拿大亚伯达的亚伯达创新科技未来 (Alberta Innovates Technology Futures: AITF) 为作者在卡里加尔大学 iRadio 实验室的博士后工作期间所提供的博士后基金，该基金支持了本书的写作。Ghannouchi 感谢来自于加拿大亚伯达的亚伯达创新科技未来、iRadio 实验室、加拿大研究讲座 (Canada Research Chairs, CRC) 和加拿大国家自然和工程理事会 (Natural Science and Engineering council of Canada, NSERC) 的资助和财政支持。

发自肺腑地感谢我们各自的妻子 Asma 和 Rabeya，以及 Layla Ghannouchi、Nadia Ghannouchi 和 Jafar Talal Hashmi 几个孩子，我们花费了很多个夜晚和周末来准备此书，他们对此极为支持并且毫无怨言。我们也分别感谢各自的父母，他们在我们研究生阶段和工作早期提供了鼓励和极为珍贵的支持。

目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 简介	1
1.2 功率放大器特性	2
1.3 功率放大器的指标	4
1.3.1 漏极效率和 PAE	4
1.3.2 交调失真和谐波失真	6
1.3.3 邻信道功率比	7
1.3.4 误差矢量幅度	8
1.4 功率放大器	9
1.5 功率放大器设计技术	13
1.5.1 基于 CAD 的设计技术	13
1.5.2 基于测量的设计技术	14
1.6 非线性微波测量系统	14
1.6.1 负载牵引定义	14
1.6.2 负载牵引优势	15
1.7 负载牵引重要指标	16
1.7.1 反射系数的可重复性	16
1.7.2 调谐范围和分布	17
1.7.3 调谐速度	17
1.7.4 功率容量	17
1.7.5 调谐器分辨率	18
1.7.6 调谐器带宽	18
1.7.7 调谐器体积	18
1.8 常见负载牵引系统	18
参考文献	20
第 2 章 无源负载牵引系统	24
2.1 简介	24

2.2	无源负载牵引系统	25
2.2.1	机电调谐器	25
2.2.2	电子调谐器	27
2.2.3	机电调谐器与电子调谐器的对比	28
2.3	负载牵引测量	30
2.3.1	负载牵引配置	31
2.3.2	系统校准	32
2.4	谐波负载牵引系统	36
2.4.1	基于三工器的谐波负载牵引系统	38
2.4.2	基于谐波抑制调谐器的谐波负载牵引系统	39
2.4.3	单调谐器负载牵引系统	40
2.4.4	谐波负载牵引系统比较	41
2.5	调谐范围增强技术	43
2.5.1	增强环路结构	43
2.5.2	级联调谐器	44
	参考文献	45
第3章	有源负载牵引系统	48
3.1	简介	48
3.2	闭环负载牵引	48
3.2.1	系统实现	49
3.2.2	闭环系统分析	50
3.3	闭环负载牵引系统的结构	54
3.4	环路负载牵引系统的优化设计	56
3.5	前馈负载牵引系统	60
3.6	前馈负载牵引系统优化设计	62
3.7	谐波前馈负载牵引系统	65
3.8	开环负载牵引系统	67
3.9	开环和前馈负载牵引系统的收敛算法	69
3.10	有源负载牵引技术对比	73
	参考文献	74
第4章	六端口负载牵引系统	77
4.1	简介	77
4.2	阻抗和功率流测量	77

4.3 六端口反向配置	79
4.3.1 六端口反射计反向配置中的校准	79
4.3.2 误差框计算	82
4.3.3 讨论	83
4.4 六端口反射计源牵引配置	84
4.5 六端口反射计负载牵引配置	85
4.5.1 无源负载牵引系统	85
4.5.2 有源支路负载牵引系统	86
4.5.3 有源环路负载牵引系统	87
4.6 在片负载牵引测试	88
4.7 源牵引系统的应用	90
4.7.1 低噪声放大器表征	90
4.7.2 混频器表征	91
4.7.3 功率放大器表征	91
4.8 振荡器测量	93
4.9 AM/AM 和 AM/PM 测量	94
4.9.1 操作原则	95
4.9.2 测量流程	97
参考文献	98

第5章 大功率负载牵引系统 100

5.1 简介	100
5.2 已有负载牵引系统的缺点	100
5.2.1 高驻波比所带来的问题	101
5.2.2 负载牵引大功率器件所遇问题	104
5.3 大功率负载牵引	106
5.3.1 预匹配技术	106
5.3.2 环路增强负载牵引	109
5.3.3 $\lambda/4$ 变换器技术	110
5.3.4 宽带阻抗变换器技术	112
5.4 阻抗变换网络对负载牵引功率和驻波比的影响	112
5.5 混合负载牵引系统	116
5.6 校准和数据提取	119
参考文献	122

第6章 包络负载牵引系统	124
6.1 简介	124
6.2 包络负载牵引概念	124
6.2.1 数学公式	125
6.3 工程实现方法	126
6.3.1 控制单元设计方法	127
6.4 包络负载牵引系统校准	129
6.4.1 误差流模型公式	129
6.4.2 误差流模型的化简	130
6.4.3 校准技术	131
6.4.4 校准技术的评估	134
6.5 稳定性分析	136
6.6 包络负载牵引系统的特征	137
6.7 谐波包络负载牵引系统	138
6.8 包络负载牵引系统的特殊应用	140
参考文献	143
第7章 波形测量和波形工程	146
7.1 简介	146
7.2 理论分析	147
7.3 历史回顾	148
7.4 实际的波形测量系统	151
7.5 系统校准	152
7.5.1 第一步:功率通量校准	153
7.5.2 第二步:S参数校准	153
7.5.3 第三步:增强校准	155
7.5.4 校准评估	156
7.6 基于六端口器件的波形测量系统	157
7.6.1 多谐波参考源	158
7.6.2 六端口反射计测量原理	159
7.6.3 多谐波六端口反射计架构	159
7.6.4 多谐波六端口反射计的校准	161
7.6.5 校准验证	162

7.7 波形工程	163
7.8 波形工程的应用	164
7.8.1 晶体管表征	164
7.8.2 融合 CAD 技术	165
7.8.3 功率放大器设计	165
参考文献	167
第 8 章 高级配置及应用	170
8.1 简介	170
8.2 多音负载牵引技术	170
8.3 实时多谐波负载牵引技术	174
8.4 调制信号负载牵引技术	179
8.5 多音包络负载牵引技术	181
8.6 宽带负载牵引技术	184
8.6.1 宽带负载牵引途径	185
8.6.2 系统描述	186
8.7 噪声表征	188
8.7.1 噪声参数测量	188
8.7.2 噪声参数测量系统	191
8.8 混频器表征	193
8.8.1 测量系统	193
8.8.2 实验流程	195
参考文献	196
内容简介	200
作者简介	201

第1章 基础知识

本章介绍三个方面的基础知识:射频功率放大器的基本概念、功率放大器优化设计方法和负载牵引测量系统。

1.1 简介

射频功率放大器(Radio Frequency Power Amplifier, RFPA)是所有无线通信系统中的重要组件。它负责把直流功率转化为射频功率,并通过无线网络,将含有数字信息的射频信号从发射机传输到接收机。射频功率放大器的效率和线性度对无线通信系统的成本、可靠性、体积和性能有着重要的影响。

功率放大器工作在接近饱和区的位置,因此设计高效率和高线性度的功率放大器是一个复杂的过程。功率放大器工作在饱和区能增加它的效率,但是同时也增加了它的失真度。因此,在功率放大器设计中,我们需要在效率和线性度之间进行平衡。效率是衡量功率放大器将直流功率转化为射频功率的能力,这个指标对于任何功率放大器都尤为重要。当功率放大器输出相同的功率量时,低效率的功率放大器需要比高效率的功率放大器消耗更多的直流能量。

手持终端设备一般采用电池作为主要的能量来源,低效率意味着更短的通话时间和更短的待机时间。效率是衡量最终产品能否走向市场的重要因素。另外,低效率产品会产生大量的热量,因此需要为产品安装高容量的散热装置,最终增加产品的成本。

在功率放大器设计中,线性度表示功率放大器能在多大程度上无失真地放大输入信号。功率放大器总是表现出某种程度上的非线性失真;根据应用背景不同,我们对非线性失真的容忍程度也有所差异。例如,基于 CDMA(Code Division Multiple Access)和 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access)的无线系统不仅要求功率放大器具有高效率,而且要求功率放大器在很宽的动态功率输出范围内具有很高的线性度。相对而言,由于 GSM 系统采用恒定包络信号,基于 GSM(Global System for Mobile Applications)的系统对线性度的要求就没有那么严格。

如果采用单一的功率器件,我们不可能使功率放大器同时达到器件本身的最佳效率指标和最佳线性指标;因此科学家研制了各种各样的高级功率放大器结构,以期让功率放大器同时实现较好的效率和线性度^[1-10]。这些高级功率放大器结

构包括 Doherty 结构、Kahn 结构和 LINC (Linear Amplification Using Nonlinear Components) 结构。这些功率放大器拥有较好的性能,但是不可避免地增加了通信系统的复杂度,提高了系统的成本,降低了系统的可靠性。因此,功率放大器设计者一直在设计中面临挑战:他们需要找到一种合适的优化设计方法,才能较好地满足各种给定的功率放大器指标。

1.2 功率放大器特性

在介绍射频功率放大器之前,我们有必要先了解放大器的一些特征。图 1.1 中展示了一个单级射频放大器。它由输入匹配网络、输出匹配网络和晶体管三部分组成。理论上,该结构对小信号功率放大器和大信号功率放大器都适用。

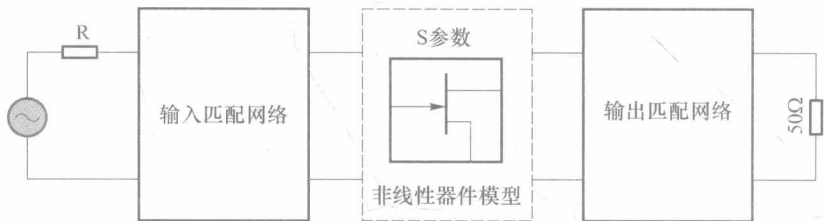


图 1.1 单级射频放大器结构框图

匹配网络在不同的应用中有所不同,对于每一种应用都需要恰当地设计。如需要对极小输入信号进行放大(即低噪声放大器),匹配网络需要让电路保持极低噪声;如需要提高放大器的最大输出功率(即功率放大器),匹配网络则需要让电路实现最大增益。除了根据应用进行分类外,匹配网络还可以根据所采用的元件特点分为三类:集总元件匹配网络;分布元件(传输线)匹配网络;同时含有集总元件和分布元件的混合匹配网络。匹配网络基本上由线性元件构成,可以被当成线性时不变网络。

根据输入信号的功率量级,有源器件既可以是线性网络,又可以是非线性网络^[11]。如果输入信号的功率非常小,输出信号只是在功率上对输入信号进行了放大,此时有源器件工作在线性模式,可以被视为线性器件;相反地,如果输入信号的功率非常大,输出信号产生了谐波分量,此时有源器件工作在非线性模式,则需要被视为非线性器件。图 1.2 对这两种模型进行了描绘。

线性模式可以用散射参数,即 S 参数(Scattering Parameter)进行描述。S 参数随频率变化而变化,也与晶体管偏置条件有关,但是与激励信号的功率无关。然而,S 参数不足以描述晶体管非线性工作模式的特征。为了解决这个问题,科学家们提出了复杂的大信号模型^[12~15]用以描述有源器件的非线性特性。

此外,由于功率放大器的负载线能够表征功率放大器的最大输出功率,设计者通常用它来表征功率放大器的特性。负载线表示晶体管在不同负载条件和偏置

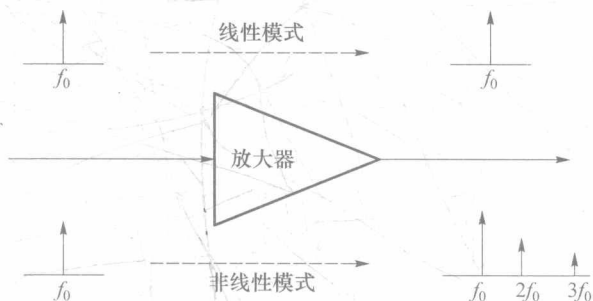


图 1.2 功率放大器的线性和非线性工作模式

条件下电流(i_{DS})和电压(v_{DS})实时变化的轨迹。

为了解释负载线理论,图 1.3 描绘了一个典型的功率放大器原理图。功率放大器的偏置网络由射频扼流电感 L_C 、偏置电压源 V_{DD} 和漏极偏置电流源 I_{DD} 组成。隔直电容 C_0 需要取得足够大,以便在整个射频环节中让电压源 V_{DD} 保持稳定。在稳态的时候,式(1.1)中瞬时电流(i_{DS})和瞬时电压(v_{DS})之间的关系可以表示为

$$i_{DS} = I_{DD} - \frac{v_{DS} - V_{DD}}{Z_L} \quad (1.1)$$

式(1.1)就是负载线方程,它表示了晶体管在特定的静态工作点(I_{DD} 和 V_{DD})及负载阻抗(Z_L)下,各种可能的瞬时电流(i_{DS})和瞬时电压(v_{DS})的轨迹。对于纯实数阻抗来说,负载线方程表示的是一条直线;对于复数阻抗来说,负载线方程表示的是一个平移和旋转过的椭圆^[78]。图 1.4 展示了功率放大器的典型负载线。

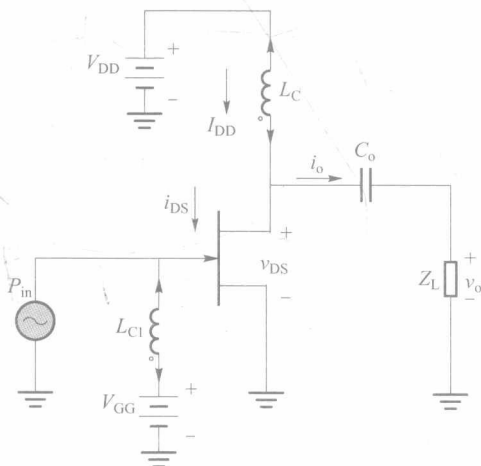


图 1.3 确定负载线的典型功率放大器原理图

在理论上, v_{DS} 可以取任何值,产生任何 i_{DS} 。实际上,负载线受到图 1.4 所描绘的 DCIV 曲线的限制。从图中可以发现,晶体管的轨迹受到膝点电压 (Knee Voltage)

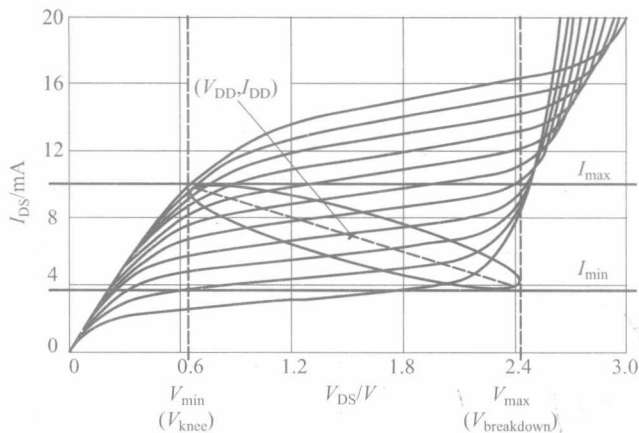


图 1.4 功率放大器的典型负载线
(虚直线表示实数负载阻抗,实椭圆线表示复数负载阻抗)

$V_{\min}$ 或 V_{knee} 、击穿电压 (Breakdown Voltage) $V_{\max}$ 或 $V_{\text{breakdown}}$ 、晶体管最大可承受电流 ($I_{\max}$) 和最小可承受电流 ($I_{\min}$) 的限制。

负载线是一个很有用的工具,因为通过负载线,我们可以直观地观察不同负载阻抗情况下晶体管的工作状态。然而,当晶体管没有匹配网络而直接与 50Ω 阻抗相连接时,负载线的轨迹仍然是一个椭圆而非直线,这是因为晶体管内在的寄生输出电容和 50Ω 阻抗组成了一个复数负载网络。负载线轨迹能够帮助设计者判断匹配网络的匹配情况:当晶体管的输出电容被匹配网络抵消后,在终端得到的负载线将是一条直线。

1.3 功率放大器的指标

无论功率放大器用于何种特定的场合,我们都可以采用通用的指标对功率放大器的性能进行评价,如漏极效率 (η_D)、功率附加效率 (Power - Added Efficiency, PAE)、谐波失真、交调失真、邻信道功率比 (Adjacent Channel Power Ratio, ACPR) 和误差矢量幅度 (Error Vector Magnitude, EVM)。这些指标能够对采用不同技术所设计的功率放大器的性能进行比较。

1.3.1 漏极效率和 PAE

功率放大器的效率有好几种定义,但是最为常用的是漏极效率 (η_D) 和 PAE。为了定义效率,可以观察图 1.5 所示的功率放大器功率流向。 P_{in} 表示在一定频率范围内流向放大器的功率, P_{out} 表示在一定频率范围内流出放大器的功率。如果 P_{in} 仅仅包含一个谐波分量 (即仅有基波分量), 则 P_{out} 表示对应基波分量的输出功率, $(P_{\text{out}})_H$ 表示由于功率放大器的非线性特性所产生的谐波输出分量。

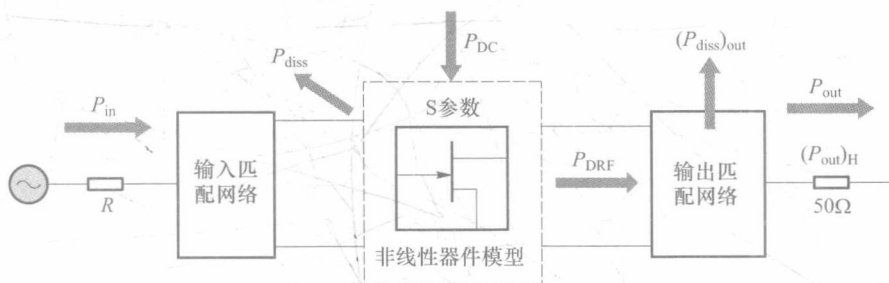


图 1.5 功率放大器的功率流向图

为了保持功率放大器正常工作,直流电源需要给有源器件提供功率,该功率用 P_{DC} 表示。有源器件受到输入交流功率 P_{in} 的激励,将 P_{DC} 和 P_{in} 提供的部分功率通过散热的方式耗散掉,剩下的功率转换为交流功率 P_{DRF} , P_{DRF} 将功率传递给输出匹配网络。输出匹配网络消耗了部分 P_{DRF} 的功率,并将剩下的能量转化为输出功率 P_{out} 和 $(P_{out})_H$ 。功率放大器的最优设计有两个要求,首先是最小化功率放大器各级的功率损耗,其次是在最小的失真条件下,最大化负载功率输出。

漏极效率 (η_D) 被定义为功率放大器的输出功率 P_{out} 和直流功率 P_{DC} 之比,即

$$\eta_D = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (1.2)$$

漏极效率很适合用来衡量高增益功率放大器或输入功率较小的功率放大器;此外,功率放大器的导通损耗与输入功率无关,漏极效率也可以用来比较不同功率放大器的导通损耗。由于漏极效率忽略了输入功率的作用,它可以用于衡量无耗散的输出端口受控电阻的功率放大器效率^[79]。

另一个与效率有关的定义是总效率 (η_T)。它虽然很少使用,但是却具有更重要的物理意义。总效率被定义成输出功率和功率放大器所有输入功率之间的比值。根据图 1.5 的示意,总效率 η_T 被定义为

$$\eta_T = \frac{P_{out}}{P_{DC} + P_{in}} \quad (1.3)$$

总效率可以用来衡量功率放大器在减少热耗散方面的效率。它和系统总的热耗散 $(P_{diss})_T$ 的关系可以表示为

$$(P_{diss})_T = P_{DC} + P_{in} - P_{out} = \left(\frac{1}{\eta_T} - 1 \right) P_{out} \quad (1.4)$$

最为常用的效率指标是 PAE, 它被定义为功率放大器上增加的功率,即输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 的差值,与直流功率 P_{DC} 的比值,即

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \left(1 - \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = \eta_D \left(1 - \frac{1}{G} \right) \quad (1.5)$$