

脉冲功率系统的原理与应用

Pulsed Power Systems: Principles and Applications

(德) H. Bluhm 著
江伟华 张弛 译



清华大学出版社



Springer

脉冲功率系统的原理与应用

Pulsed Power Systems Principles and Applications

(德) H. Bluhm 著

江伟华 张弛 译



清华大学出版社
北京

 Springer

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2007-1433

Translation from the English language edition:

Pulsed Power Systems Principles and Applications, H. Bluhm

Copyright © Springer 2006

Springer is a part of Springer

Science+Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部门。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

脉冲功率系统的原理与应用/(德)布鲁姆(Bluhm, H.)著;江伟华,张弛译. —北京:清华大学出版社,2008.11

书名原文: *Pulsed Power Systems Principles and Applications*

ISBN 978-7-302-18663-2

I. 脉… II. ①布… ②江… ③张… III. 高电压—大功率—脉冲电路
IV. TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149753 号

责任编辑:张占奎

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:17.5 字 数:330 千字

版 次:2008 年 11 月第 1 版 印 次:2008 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:40.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024480-01

> PREFACE

译者序

脉冲功率技术是近几十年内迅速发展起来的一门新兴学科。早期的核聚变研究给它创造了成长的环境,国防基础科研的需求为它提供了发展的动力,近年来快速出现的各种工业应用使它逐步趋于成熟。如今,脉冲功率技术已被广泛应用于能源、军工、环境、材料、医疗和生物等领域。

本书是一本概括脉冲功率技术和应用的专著,它是原著作者多年教学和工作经验积累的结果。本书的特点是注重系统性和连贯性,而且在突出物理概念的同时强调工程设计方法。另外,本书注重脉冲功率的工业应用,并给出多个具体应用实例,十分有参考价值。

本书的内容可以分成两个部分。第一部分较全面地概述了脉冲功率技术的基础知识,包括脉冲功率系统的工作原理和各种诊断方法,内容由浅入深、结构严谨,非常适用于本科高年级学生和研究生作为教材或自学使用。第二部分主要介绍脉冲功率技术的应用方法,特别着重介绍近年来迅速发展的工业应用,其中大部分内容与作者的工作经历直接相关,因此内容叙述详细,实验条件和参数描述具体。这部分内容适合于工程技术人员进行具体系统设计时做参考,它也对科技人员了解脉冲功率的工业应用很有帮助。

原著作者 H. Bluhm 教授对本书的翻译工作给予了热情的支持和配合。在他的建议下,对第 2 章的部分文字和插图进行了修改,使内容较原著更为清晰和准确。另外,他还为中译本的出版作序。在此对 H. Bluhm 教授表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,译本中不妥和错误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

江伟华

2008 年 8 月

于清华园

> PREFACE

序

在过去的很长一段时间里,脉冲功率技术的发展相对集中在美国和前苏联。其中大多数的开发项目具有国防背景,当然也有一部分属于基础科研。脉冲功率的工业应用的价值在最近的一二十年内才被充分认识到,而这方面的主要成就是由欧洲和日本的研究人员取得的,近年来中国也在脉冲功率技术领域里作出很多贡献。因此,未来脉冲功率技术发展的核心有可能发生转变,2006年9月在中国成都召开的第一届欧亚脉冲功率技术会议就是一个很好的开端。在这次会议上,除了很多中国单位报告的研究成果受到人们关注以外,脉冲功率领域的中国年轻学者和学生的数量以及他们的学术热情给人留下很深的印象。我希望这本书将对他们的学习和工作有所帮助。因此我对为本书的翻译工作付出了很多劳动的江伟华教授等表示衷心感谢,也为能有这样的知名学者翻译此书而感到欣慰。

Hansjoachim Bluhm

于德国 Karlsruhe 市,2007年11月

> FOREWORD

前言

本书是我在 Karlsruhe 科技大学(Technical University of Karlsruhe)从事了 10 年教学工作的结晶。起初我们讲授的课程主要是面向德国学生,从 1998 年开始接收来自世界各地的留学生。本书的主要目的是为学生提供必要的基础知识,同时也为其他领域的学者和工程技术人员讲解脉冲功率技术的基本原理和应用方法。脉冲功率的主要特点是瞬间功率与平均功率之比很高,从而为达到超越临界的非线性领域提供了手段。另一方面,时间很短的脉冲可以帮助我们提高时间分辨率(如脉冲雷达等应用),或者避免负面效应(如电场击穿或热传导损失)。脉冲功率技术已经在电气工程、实验物理、生物技术、食品加工及材料制作等学科或工艺中得到广泛应用。

我于 1995 年开始教这门课时,发现很难找到一本合适的教科书。J. C. Martin 先生于 20 世纪 60—70 年代在 Aldermaston 作出的许多杰出工作及其成果,以大量的学术论文的形式为广大科研人员和技术人员提供了重要的资料及知识来源,但这些论文本身无法直接用来做教科书。之后由 T. Martin, A. Guenther, M. Kristiansen 等编写出版的 *J. C. Martin, On Pulsed Power* (1996) 依然没有改变这个状况。当然, J. C. Martin 等得到的很多经验公式至今对于脉冲功率系统的设计也是十分有用的,因此在本书中大量使用,并基本保持原来的实用单位。

完全理想的教科书显然是不存在的,因为科学技术的发展是无止境的。要得到最新的脉冲功率技术信息,还需随时关注 IEEE 出版的国际脉冲功率会议文集或国际高功率粒子束会议文集。

多年来,美国一直被认为是脉冲功率技术的主要发源地。1976 年以来,每两年召开一次的国际脉冲功率技术会议从未离开美国的事实就证实了这一点。我本人也是于 1980 年在美国康奈尔大学最初步入脉冲功率领域的。然而,直到冷战结束后人们才清楚地认识到,前苏联的科学家们在脉冲功率技术领域所取得的成就与进展也毫不逊色。虽然当时主要的研究目的是军事应用,但很多技术成果可以

比较容易地转向民用。正是这些技术,后来被来自欧洲、日本和美国的部分高校的学者和技术人员迅速地移植并成功地转化为一般工业生产技术。比如有关脉冲电场与生物细胞的相互作用的研究,已经在美国(Old Dominion University)、日本(熊本大学)和德国(Forschungszentrum Karlsruhe 研究所)等发展成为电生物学的一个重要分支。可以说本书中有关脉冲功率应用的章节主要偏重于我本人的工作经历,以及由我负责的 Forschungszentrum Karlsruhe 研究所脉冲功率与微波技术研究室的工作内容。

虽然本书的大部分编写主要在周末和夜晚来完成,但我在熊本大学做客座教授的这6个月推进了本书的完成。因此我衷心感谢秋山教授对我的帮助。另外,如果没有 G. Kessler 先生 1979 年以来在强流轻离子束与惯性约束聚变等领域的先驱性工作和之后的不懈努力,就不会有今天 Forschungszentrum Karlsruhe 研究所这支强大的脉冲功率技术队伍。遗憾的是在他 1999 年退休后不久,所里决定放弃有关轻离子束的研究项目。在科学研究过程中,危机总是伴随着机遇,因此我由衷地感谢 M. Thumm 对组建现在的脉冲功率与微波技术研究室所给予的大力协助。同时也感谢我的其他同事: W. An, K. Baumung, W. Frey, H. Giese, P. Hoppé, G. Müller, M. Sack, C. Schultheiß 和 A. Weisenburger, 他们的很多专业知识被融合到了本书的内容中。

最后感谢我的妻子 Ursula 为本书的工作所付出的耐心和支持。

Hansjoachim Bluhm

于德国 Karlsruhe 市, 2006 年 3 月

主要符号

A	矢势, 矢量面积元
A	面积
B	磁感应强度
C	电容量; 0.577 (Eulerian 常数)
c	光速
c_v	单位质量比热
D	电位移
d	距离
E	电场强度
e	基本电荷
F	力
$F(E, t)$	电场 E 在时间 t 时发生击穿的概率
$F(W)$	能量 W 的 Fermi-Dirac 函数
G	电导率; 剪切模量
$G(p)$	传送函数
$G_{n,p}$	电子和空穴的产生速率
g	集合因子
H, H	磁场强度
$H \cdot$	Hamiltonian 函数
$H(t)$	Heaviside 函数
h	Planck 常数; 厚度
I	电流
I_0	真空线中的总电流
I_a	Alfven 电流
I_{cr}	临界电流
I_w	壁电流
i	复数的虚部单位 ($\sqrt{-1}$)
$i(p)$	Laplace 或 Fourier 变换电流

$i(t)$	小信号电流
J	电流密度积分
j	电流密度
K	Kerr 常数
k	Boltzmann 常数; 迁移率
k_{\pm}	常数
L	电感
L_d	扩散长度
l	长度
M	宏观质量
m	粒子质量
m_0	粒子静止质量
N	粒子总数
n	单位体积的原子数
P	正则动量
P	极化
P_{at}	匹配负载功率
P_{ab}	从状态 a 向状态 b 的跃迁概率
p	气体压强; Laplace 算子
Q	热能; 比能量密度; 真空线中单位长度的电子电荷
q	表面电荷密度
R	电阻
$R_{n,p}$	电子和空穴的复合速率
r	半径
S	Poynting 矢量
S	应力参数
s	通道长度
T	周期; 通过时间; 传送系数; 温度
t	时间
U	电压
u	速度
$u(p)$	Laplace 变换电压
$u(t)$	小信号电压

$\langle u \rangle$	粒子群平均速度
V	体积; Verdet 常数
W_+, W	能级
W_{kin}	动能
ω_{kin}	动能密度
x	空间坐标
Y	Young 模量
Z	阻抗
$Z(W)$	W 附近单位能量间隔内的允许能态
α	电离系数
α_n, α_p	半导体中电子和空穴的电离系数
β	$u/c =$ 粒子速度与光速之比; 场增强因子
Γ	Gamma 函数
γ	ω/α ; 相对论因子
δ	最大强度/平均强度; 脱落系数
δ_{Φ}	磁通趋肤深度
$\tan \delta$	损失因子
ϵ	相对介电常数
ϵ_0	自由空间介电常数
ζ	表面能量
η	效率; 电子附着系数
Θ	转动惯量
Λ_{ab}	重构能量
λ	平均自由程; 热传导率
μ	相对磁导率
μ_0	自由空间磁导率
μ_n, μ_p	半导体中电子和空穴的迁移率
ν	频率
ν_{ei}	电子-离子碰撞频率
$\xi(S)$	强度 S 作用下发生破坏的期待率
Π	Paschen 函数
ρ	反射系数
Σ	宏观截面

Σ_y	屈服强度	屈服强度	σ_y
σ	拉伸强度	拉伸强度	σ
σ_a	标准偏差	标准偏差	σ_a
τ	时间常数; 碰撞间隔时间	时间常数; 碰撞间隔时间	τ
Φ	磁通量	磁通量	Φ
φ	势; 功函数	势; 功函数	φ
χ	比热的比	比热的比	χ
$\psi(S)$	强度 S 下不发生破坏的概率	强度 S 下不发生破坏的概率	$\psi(S)$
ω	角频率; 二次电子发射系数	角频率; 二次电子发射系数	ω

> CONTENTS

目录

译者序	I
序	III
前言	V
主要符号	VII
第 1 章 脉冲功率的基本概念	1
第 2 章 绝缘材料的静态与动态耐压强度	6
2.1 引言	6
2.2 气体	7
2.2.1 静态击穿	7
2.2.2 脉冲击穿	14
2.2.3 火花放电的形成	19
2.3 液体	22
2.3.1 基本过程	22
2.3.2 流注击穿	27
2.3.3 实用上的考虑	32
2.4 固体	35
2.4.1 基本现象	35
2.4.2 电荷的传输、注入与击穿现象	38
2.5 击穿场强的统计学处理	42
第 3 章 能量储存	46
3.1 脉冲电容器	46
3.2 Marx 发生器	51

3.2.1	标准 Marx 发生器	51
3.2.2	LC Marx 发生器	57
3.2.3	能量传输过程	57
3.3	电感储能	60
3.4	转子和单极发生器	62
第 4 章	开关	67
4.1	闭合开关	67
4.1.1	气体开关	67
4.1.2	半导体开关	82
4.1.3	磁开关	92
4.1.4	小结	94
4.2	断路开关	95
4.2.1	电爆炸丝	95
4.2.2	机械式断路器	96
4.2.3	超导断路开关	98
4.2.4	等离子体断路开关	98
4.2.5	等离子体流动开关	101
4.2.6	半导体断路开关(SOS)	101
第 5 章	脉冲成形电路	106
5.1	传输线	106
5.1.1	终端和接点	108
5.1.2	有损耗的传输线	110
5.1.3	脉冲电路中的传输线	111
5.1.4	无损耗传输线的脉冲成形	113
5.2	RLC 网络	113
5.3	采用 LEITER 软件的电路模拟	119
第 6 章	脉冲传输与变换	122
6.1	真空传输线中的磁绝缘	122
6.1.1	金属表面的真空击穿	124
6.1.2	磁绝缘的定性描述	125

6.1.3	磁绝缘的定量描述	126
6.2	脉冲变压器	138
6.3	高压充电器	142
6.3.1	电容器的充电方法	142
6.3.2	级联电路	145
6.4	变阻抗线	147
第 7 章	功率叠加与电压叠加	149
7.1	功率叠加	149
7.2	电压叠加	149
7.2.1	传输时间隔离法	149
7.2.2	感应隔离法	150
7.2.3	Blumlein 发生器	152
7.2.4	累加型脉冲成形线	152
第 8 章	典型的脉冲功率发生器	156
8.1	单次脉冲发生器	156
8.1.1	KALIF	156
8.1.2	PBFA-2 与 Z 装置	157
8.1.3	HERMES-III	160
8.2	重复频率脉冲发生器	160
8.2.1	RHEPP	161
8.2.2	采用断路开关的脉冲发生器	161
第 9 章	诊断	163
9.1	电磁场传感器	163
9.1.1	容量耦合传感器	164
9.1.2	感应耦合传感器	166
9.2	分流器	168
9.3	利用 Faraday 效应的电流测量	170
9.4	利用电光效应的电场测量	171
9.5	磁偏转粒子能量分析器	172
9.6	真空电压探测器	173

第 10 章 脉冲电场和脉冲磁场的应用	175
10.1 脉冲电场	175
10.1.1 引言	175
10.1.2 脉冲的产生	179
10.1.3 植物细胞处理	179
10.1.4 杀菌消毒	182
10.1.5 脉冲电场处理法的其他应用	183
10.2 脉冲磁场	184
10.2.1 引言	184
10.2.2 非破坏型磁场线圈的极限	185
10.2.3 破坏型磁场线圈的极限：单匝圆筒线圈	190
10.2.4 磁通压缩	192
第 11 章 脉冲辐射及其应用	198
11.1 高功率脉冲电子束	198
11.1.1 束流自身的作用力与传输极限	198
11.1.2 大电流脉冲电子源	199
11.1.3 脉冲电子束二极管	200
11.1.4 材料的表面处理	200
11.1.5 高功率 KrF 激光	205
11.1.6 闪光 X 射线摄影	207
11.2 高功率脉冲离子束	209
11.2.1 加速器物理	209
11.2.2 离子束传输	214
第 12 章 固体和液体介质中脉冲放电的应用	216
12.1 体外冲击波碎石	216
12.2 固体绝缘材料的电脉冲破碎	218
12.2.1 一般现象与能量关系式	218
12.2.2 破碎作用的选择性	222
12.2.3 电脉冲破碎装置	223
12.3 工业应用	226

12.3.1	建筑材料的再生处理	226
12.3.2	燃灰处理	228
12.3.3	表面层的清除处理	229
12.3.4	其他物品的再生处理	232
12.3.5	弹性塑料的再生处理	232
12.3.6	再生处理系统的大规模化及其经济可行性	235
参考文献		237
索引		254



脉冲功率的基本概念

脉冲功率具有这样的特点：它将储存的能量以电能的形式，用单脉冲或重复频率的短脉冲方式加到负载上。本书主要阐述与高功率及高能量脉冲功率的产生和应用有关的物理概念和基本技术。一般来说，脉冲功率适用于那些只能以脉冲方式工作，或以脉冲方式能工作得更好的负载。

如果一个脉冲的电功率达到 $1\text{GW}(10^9\text{W})$ 量级并且能量在 1kJ 以上，它显然是脉冲功率。到目前为止，我们所见过的最大单脉冲能量和峰值功率分别在 10^8J 和 10^{14}W 的量级，与之相对应的电压与电流范围分别是 $10\text{kV}\sim 50\text{MV}$ 和 $1\text{kA}\sim 10\text{MA}$ 。

除功率和能量外，脉冲的波形也十分重要。描述波形的主要参数包括上升时间、下降时间、脉冲宽度和平顶的平坦度等。通常，我们所考虑的高功率脉冲的时间宽度在几纳秒到几微秒之间。脉冲波形的一些重要参数如图 1.1 所示。

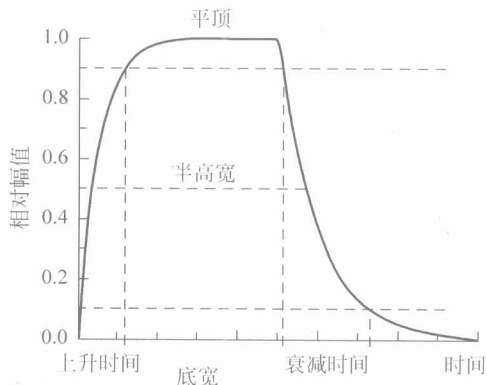


图 1.1 脉冲波形的主要参数

脉冲的上升时间定义为电压从峰值的 10% 上升到 90% 所需要的时间。用同样的方法可定义脉冲下降时间(或衰减时间)。通常脉冲的上升时间和下降时间依