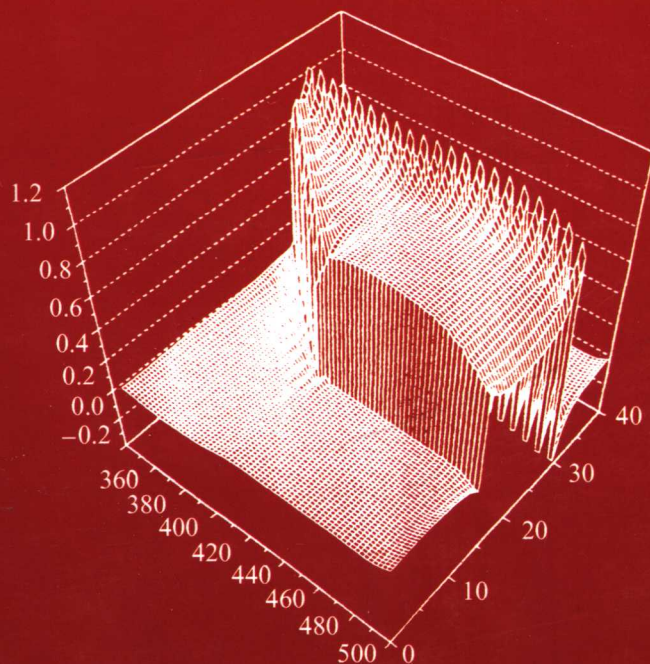


# 磁通量 *Magnetocumulative* 压缩发生器 *Generators*

L.L.Altgilbers M.D.J.Brown I.Grishnaev  
B.M.Novac I.R.Smith I.Tkach Y.Tkach  
孙承纬 周之奎 译

著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

TM26/10

2008

# 磁通量压缩发生器

L. L. Altgilbers M. D. J. Brown I. Grishnaev  
B. M. Novac I. R. Smith I. Tkach Y. Tkach 著  
孙承纬 周之奎 译 龚兴根 校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2007-038 号

图书在版编目(CIP)数据

磁通量压缩发生器 / (美)阿吉伯斯(Altgilbers, L. L.)  
等著;孙承伟,周之奎译. —北京:国防工业出版社,2008.4

书名原文:Magnetocumulative Generators

ISBN 978-7-118-05352-4

I. 磁... II. ①阿...②孙...③周... III. 爆炸力学-应用-  
脉冲技术 IV. TN78

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第136025号

Magnetocumulative Generators L. L. Altgilbers M. D. J. Brown B. M. Novac et al © 2000 Springer - Verlag New York, Inc.

本书中文简体版由 Springer - Verlag New York, Inc. 授予中国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100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 500 千字

2008年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 69.00 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

## 译者前言

炸药是一种常见的能量密度较高的化学能源,若干千克炸药的爆轰可在  $10^{-5}\text{s}$  内和  $10^{-3}\text{m}^3$  中释放出  $10^{12}\text{W}$  量级的瞬时功率。长期以来,人们一直在探讨如何把炸药爆炸能量有效地转换为更易控制的其他能量形式,尤其是研制炸药爆炸驱动的脉冲电源,如爆炸铁电体电源、爆炸磁流体力学发电机和本书阐述的爆炸磁通量压缩发生器等。后者是当前技术最为成熟、应用途径广泛、发展前景特别重要的脉冲电源和强磁场发生器装置,受到了高能量密度物理和新概念武器实验技术研究领域的高度关注。

爆炸磁通量压缩发生器(MFCG),又称为磁压缩发生器(FCG)、磁聚积发生器(MCG)等,其原理是利用炸药爆炸驱动导体电枢快速压缩定子绕组围成空腔内的磁通量,使之在小体积内聚积形成超强磁场,或者使得与定子、电枢连接的负载中电流(及电磁能量)得到放大。磁压缩发生器的原理最初于 20 世纪 50 年代由苏联萨哈罗夫院士提出,在 V. F. Chernyshev、C. M. Fowler 等科学家带领下,俄、美两国核武器实验室经过几十年努力,使磁压缩发生器及其相关技术得到了长足发展,研制成功多种类型、不同用途的装置或系统。

虽然磁压缩发生器有很强的电脉冲输出能力,但对负载性质有很多限制,只适合于一些特殊的应用,而且为了与各种性质的负载相匹配,往往需要使用特殊的功率调节电路。超强磁场发生器研究的早期目标是纯热核聚变装置,现在这种发生器能够可靠地产生超过 2000T 的超强磁场,是研究强磁场物理、材料合成和高压相变(如金属氢)的重要实验工具。如近十年来美、俄等国联合进行的金属氩生成实验和研究强磁场中固体性质的 Dirac 计划等。

磁压缩发生器作为强脉冲电源,有 3 类不同规模的装置。大型装置(往往是多级发生器组成的系统)能够向低电感负载输出  $10\text{MA} \sim 10^2\text{MA}$  电流和  $10\text{MJ} \sim 10^2\text{MJ}$  能量,使用炸药量达数十千克至数百千克以上,如全俄实验物理研究院的 POTOK 系列大型螺线圈型发生器和 DEMG 系列圆盘型发生器、美国 Los Alamos 国家实验室的 Mark IX 型发生器和长度分别为 0.43m、0.76m 和 1.4m 的 Ranchero 系列轴线起爆式螺线圈型发生器等。研制大型发生器的初衷显然与热核聚变装置(以固体套筒压缩 DT 等离子体)有关,然而几十年来这方面技术路线已有较大改变,目前俄、美两国仍在探索的方向是磁化靶聚变(MTF),他们的实验装置分别是 MAGO(磁发生器)和 FRC(反场构形)。1992 年俄、美科学家联合进行了圆盘型发生器驱动 MAGO 装置实验,产生的等离子体温度  $100\text{eV} \sim 300\text{eV}$ ,持续时间  $2\mu\text{s}$ ,得到热核中子的产额为  $4 \times 10^{13}$ ,是目前非核装置的最高记录。

Los Alamos 实验室发展大型发生器的主要应用是通过电磁内爆得到强 X 射线源,如固体套筒内爆压缩 DT 等离子体的 Athena 计划、箔筒等离子体内爆计划(Foil Implosion),

后者自 20 世纪 80 年代起历经 Pioneer、Laguna 等装置的沿革,发展到比较成熟的 Procyon 系统。90 年代 Procyon 系列试验取得很好成绩,最好一发结果软 X 射线产额为 1.7MJ、等离子体温度 60eV、脉宽 250ns,能谱中高于 100eV 和 300eV 部分的能量分别约为 0.65MJ 和 0.6MJ。对于核武器物理模拟实验和惯性约束聚变(ICF)辅助研究来说,软 X 射线的功率(或等离子体辐射源(PRS)的黑体温度)是最重要的。2000 年前后 Sandia 实验室 20MA、110ns 的 Z 机器上重金属丝阵 Z 箍缩内爆等离子体的软 X 射线辐射功率达到 200TW 以上,动力黑腔的温度达到 150eV 左右,取得了明显突破。相形之下,以磁压缩发生器为能源的系统要达到这样的水平还有很大困难,这条技术途径因此被暂时搁置。

当前美、俄两国大型发生器的主要应用已经转向以几十兆安电流驱动固体套筒内爆为基础的高能量密度流体动力学研究,如冲击压缩、等熵压缩和物态方程实验,内爆条件下流体动力学不稳定性与湍流混合,武器组件结构中复杂流动模拟实验,材料动态强度、黏性、失效和界面摩擦特性,温密物质物态方程,强耦合等离子体和强磁场物理研究。

电磁加载技术和物态方程测量目前兴起的新方向是,金属平面样品的超高压等熵压缩和磁驱动超高速飞片的实验研究,Los Alamos 实验室用平板型发生器系统已得到较好结果,他们还提出用 Ranchero 系统在钨样品中达到 2TPa 等熵压力的设想。这种发生器能输出接近 30MA~50MA 的电流,设想中多个并联的电流输出能力可达数百兆安。为了缩短负载电流的上升时间,要求功率调节系统中各种高电压开关动作的定时高度准确;同时为了有效地避免冲击波产生,实现磁压力平滑上升,必须把负载电流波形进行优化调整。考虑到多种开关组成系统电参数的量级(兆安、兆伏)和对动作时间准确性的要求(总抖动小于数十纳秒),这些关键技术问题难度很大。

基于容易理解的原因,美、俄核武器实验室大型发生器的研究情况本书很少提及,公开发表的技术资料也很少。为了弥补这方面的缺憾,我们请孙奇志撰写了有关圆盘型发生器先进概念、理论设计以及一些应用的介绍(附录 C)。有兴趣的读者可以查阅有关的参考文献,进一步了解有关情况。

中小型发生器的原理、技术和应用是本书的主要内容。这些装置在脉冲中子发生器(如 DPF)、电磁轨道炮、高压雷击模拟器、强激光和高功率微波源和其他一些实验中的应用,书中也有相当叙述,已有较多研究单位从事这方面工作。微型磁压缩发生器是指尺度为若干厘米、炸药量数克的电源器件,在要求高度小型化的系统中有着特殊的需求,并且比较适合于一些大学开展应用基础研究的状况,附录 A 介绍了美国的有关结果。

虽然磁压缩发生器的研究已有半个世纪的历史,各种几何构型和相关技术已得到较充分的探讨,但因研究单位和应用性质的特殊性,还未形成一个专门的技术领域。有些书籍的部分章节涉及到这门技术,若从关于磁压缩发生器及其相关技术的全面、系统性论述来说,本书确系国际上第一本名副其实的专著。

本书第一作者 L. L. Altgilbers 早年在立陶宛维尔纽斯半导体物理研究所获得博士学位。1991 年以来在美国陆军空间与导弹防御司令部(SMDC)从事定向能武器研究工作,尤其是爆炸脉冲功率和射频技术。目前任职于 SMDC 的先进技术管理局,至今已发表了 50 篇以上的技术论文,出版了两部专著,即本书和《非常规武器》(“Unconventional Weap-

ons”)。本书作者 M. D. J. Brown 博士也长期在 SMDC 从事定向能武器和新型制导技术研究。B. M. Novac 博士曾任罗马尼亚等离子体物理实验室主任,现为 Loughborough 大学电子与电机工程系高级研究员,对爆炸和电磁驱动的磁通量压缩发生器技术及其应用有很深造诣。I. R. Smith 教授曾任英国 Loughborough 大学副校长,现为该校工程学院院长、电子与电机工程系主任,英国工程院院士,是著名的脉冲功率技术专家。本书其余 3 位作者分别来自俄罗斯军事工程学院和乌克兰电磁研究所。

为了提高磁压缩发生器的效率并适合于各种性质负载的应用,人们构思了多种巧妙的构型和电路,近年来不少国家和部门对这门技术重新焕发了兴趣,研究思想活跃,色彩纷呈。为了让读者深入理解有关的物理思想和发展动态,在征得原作者同意后,我们把 C. M. Fowler 博士和本书第一作者的近作“Magnetic flux compression generators: A tutorial and survey”(《磁通量压缩发生器——辅导和述评》)翻译后列为附录 A。这是 Fowler 博士对于美国 Los Alamos 实验室近半个世纪相关基础研究工作的经验总结,全文深入浅出、高屋建瓴,对世界范围的研究状况作了扼要评述。另外, Fowler 博士建议把他们关于磁扩散理论的文章“Losses in Magnetic Flux Compression Generators: Linear Diffusion”(《磁通量压缩发生器中的损失:线性磁扩散理论》)列为附录 B。磁扩散是磁压缩发生器最重要的理论基础之一,这方面的专门论述甚少见到,增加这部分宝贵的内容必将有利于深化读者的理论水平。为了使读者对国内的研究工作也有所了解,我们把公开发表的我国作者部分文献目录列为附录 D,相信这将对希望了解全面情况的读者有所裨益。

作者 L. L. Altgilbers 博士大力帮助了本书的翻译工作,提供了附录 A、附录 B 等相关材料,亲自撰写了中文版序言。我们在此向他和 C. M. Fowler 博士长期以来对我国磁压缩发生器研究工作的支持表示敬意和感谢。在本书翻译工作即将完成之际,惊闻 Fowler 博士于 2006 年 2 月 28 日晚上平静去世,我们愿将本译著的出版作为对他最好的安慰和怀念。

本书序言、第 1 章~第 3 章、第 8 章和附录 A、B 由孙承纬翻译,第 4 章~第 7 章由周之奎翻译,附录 C、D 由孙奇志撰写,全书由孙承纬整理统稿。对原书中部分印刷错误基本上已予改正。龚兴根对全书进行了认真校对和更正,陶洁贞担负了文稿打印和图形修改整理工作。译者谨向他们表示由衷的谢意。

爆炸磁通量压缩发生器作为目前最强的脉冲电源和脉冲磁场装置,在涉及超强电脉冲的高能量密度物理实验和一些重要应用中是无可替代的,随着发生器设计及功率调节技术的发展,其发展潜力和应用前景十分远大。我们希望本书的出版将有助于国内相关领域研究人员更好地掌握和应用这门技术,并恳请读者对本书编译中的错误批评指正。

孙承纬

2006 年 3 月 9 日

中国工程物理研究院流体物理研究所

## 中文版序言

爆炸脉冲功率技术是从美国、英国和苏联的核武器计划中发展出来的,研制并试验过许多不同种类的爆炸脉冲功率装置,其中人们一直在大力研究的主题是磁通量压缩发生器(Magnetic Flux Compression Generator, MFCG),也可称为磁聚积发生器(Magnetocumulative Generator, MCG)。这类发生器利用炸药的化学能产生极强的磁场,用以研究材料在极端条件下的性态;或者产生极强的电能和电流,激励各种类型的负载。一些磁压缩发生器已被用来驱动诸如等离子体焦点装置、轨道炮、强激光器、高功率微波源等,因此我们认为非常必要撰写这方面的专著。

许多年来,国际上举行了一系列简称为“百万高斯磁场”的学术会议,致力于超强磁场相关的论题研究,这个国际系列会议的论文集保存了磁压缩发生器研究和发展中获得的知识。然而一些早期的会议论文集现在已很难查找,这也是撰写本书的原因之一。

对于 20 世纪 50 年代爆炸脉冲功率技术的建立起到重要作用的两位科学家近来永远离开了我们,全俄实验物理研究院(VNIIEF)的 V. Chernyshev 和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)的 C. M. Fowler 于 2005 年和 2006 年相继去世。这两位科学家为磁压缩发生器技术研究和促进国际“百万高斯磁场”会议付出了毕生的努力,人们沉痛地缅怀他们。

作者为本书被翻译为中文版而深感荣幸,尤其是主译者孙承纬博士是我们的老朋友,他是中国在爆炸及其应用方面的一位主要研究者。我们同孙博士的交往可以追溯到 1986 年,当时他参加了在美国新墨西哥州圣塔菲市举行的第四次“百万高斯磁场”会议。我们希望保持长久的相互联系。

在那次会议上,我们十分高兴地了解到中国自 1967 年起就开始了活跃的磁压缩发生器研究计划。回顾近年来的技术文献,我们看到了中国研究人员在爆炸脉冲功率技术领域做出的重要贡献。为此,我们希望本书既对于专业研究人员,也对于向往参与脉冲功率事业的年轻人能起到应有的作用。

L. L. Altgilbers

## 前 言

把爆炸能量转变为电磁能量的装置,在美国通常称为磁通量压缩发生器(Flux Compression Generator, FCG),而在俄罗斯一般称为磁聚积发生器(Magnetocumulative Generator, MCG)。由于书中更多地引用了俄罗斯的技术文献,本书则按照后一种称呼取名。总之,这类装置的基本过程是利用炸药爆炸,以磁通量损失为最低的方式,把初始磁通量压缩到一个电感较小的区域中。如果过程中没有磁通量损失,与磁通量有关的磁能将反比于电感,从而得到磁能的放大。用良导体把磁通量区域封闭起来,就可以使压缩过程中的磁通量损耗降为最小,同时这个导体又受到炸药的驱动,使得系统的电感降低。导体被强制抵抗磁场运动而做功,使磁能增大,归根到底能量由驱动导体的炸药提供。正如读者猜想的那样,磁压缩发生器有多种类型,其中有一些也许很难被认为是磁聚积发生器。尽管如此,它们都具有上面所概括的特点。

炸药作为能源有着一些独有的特色。炸药爆轰具有很高的可利用的能量密度,能量释放很快,也就是功率很高,并且能够达到很高的压力。在磁压缩发生器的发展历史上,人们对上述特点的利用有两条不同的途径:用于超强磁场发生器,或作为需要很强脉冲功率的设备的小型化电源。这些装置已经达到的若干最高性能水平如下:最近报道的磁场已超过 2000T;单次脉冲电源功率可以达到若干太瓦,提供数百兆焦的能量;已经实现用火箭把此类发生器发射至电离层的实验,这种情形只能使用小型化的爆炸驱动的电磁源。

理解、设计和制造这类发生器装置需要多学科的知识,如处于高压、高温和强磁场等极端条件下材料的物态方程,冲击波物理,电磁学理论的许多内容(包括磁扩散),炸药爆轰行为以及其他方面的论题。过去年代里人们写出了综合上述学科分支的许多专著,但是可见到的书中只有一本对上述主题作了深入的论述,这就是众所周知的 H. Knoepfel 的书《脉冲强磁场》(“Pulsed High Magnetic Fields, North - Holland, Amsterdam - London”, 1970)。这本书的主要推动来自强磁场的产生和利用,以及强磁场产生系统的设计问题。书中一些论述与脉冲电源有关,但毕竟是有限的,因为政府所属庞大的武器实验室在这方面的贡献——大多数此类装置的技术信息源是受限制的。

这个领域中大约超过 80% 的出版物发表在自 Knoepfel 的书出现后的 30 年内,此领域的主要论坛——8 次以上的“百万高斯磁场”国际会议的多数,也是在该书出现后的时期内召开的。第一次“百万高斯磁场”会议的论文集只包含 26 篇文章,而以后的 7 次会议共发表了 800 篇以上的文章。本书成功地跟上了这个领域前进的步伐,尤其是在作为脉冲电源设计的磁压缩发生器的论述方面。对于如此宽广的一个领域,作者们自然不得不限制本书的范围,他们略去了有关强磁场的论述,把脉冲电源磁压缩发生器的主要内容限制于一类称为螺线圈型发生器的装置,并且在应用方面的讨论只涉及很少几种装置。



由于作了这些限制,可以使本书的论题得到更充分的讨论。

第1、2章对有关学科进行了综述,这是为更好地理解本书主题所必需的,包括了磁压缩发生器运行过程涉及的相当广泛的电动力学基础,也包括了炸药性质及效应的简短概述。第3、4章介绍了各种应用中使用的若干发生器的类型,进而讨论了调整发生器输出脉冲形状,使之适合于各种不同应用的技术。第5章包含了不同发生器——负载构形的集中参数解的广泛集合,一部分已经用已知函数表示为封闭解的形式。上述各章在某种程度上可以作为指引读者的入门导论。第6章通过一个螺线圈发生器的完整设计,体现了前面叙述的很多资料的应用。第7章讨论了各种实验技术,帮助读者增加对于本领域使用的各种诊断技术的见识。第8章论述磁压缩发生器作为不同装置电源的应用,首先是激光和微波的装置。

本书得益于200多张图片的充分利用,是对磁压缩发生器领域适时而有效的补充。

C. M. Fowler

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室

1999年3月20日

# 序 言

在 20 世纪 50 年代,几个研究组都提出应用炸药爆炸快速缩小一个磁场所占据的体积,从而形成很强的磁场。在这些建议中最有前途的是 A. 萨哈罗夫(Sakharov)的想法,他是一个著名的创新思想家,因其在原子科学技术很广泛范围中的理论工作而颇受尊重。位于俄罗斯沙洛夫市的全俄实验物理研究院和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的实验科学家们,相继成功地探讨了上述初步研究所提出的基本概念,他们设计、制造和试验了通称为磁聚积发生器(MCG)或磁通量压缩发生器(FCG)的第一批工作模型。

多年以来,出现过许多结构很不相同的、几何形状通常十分简单的发生器,它们在发展基础和研究的的前沿领域中得到了应用,当前主要用来产生很强的磁场,或者产生大能量和强电流的电脉冲。因为无论何种应用所涉及的基础科学是相同的,所以本书考虑的那些应用主要描述磁压缩发生器作为脉冲功率源的用途,在诸如高功率激光和微波发生器,雷管组系统和电磁轨道炮,离子、电子和中子辐射源以及其他很多领域中,都有典型的应用。

为了确保对相关的科学与技术有充分的了解,本书在介绍已经制成并且试验过的一些基本发生器的设计之前,先综述必要的基础物理内容。本书还专门研究了一个具有特殊应用的典型发生器的设计和制作,说明负载在全部设计过程中有着重要的作用。

应当指出,本书介绍的大部分内容仅仅源自于几位作者的经验、见解和贡献,更何况磁压缩发生器的研究工作也还在其他国家的一些实验室中开展。本书作者并非有意地忽视其他研究者有价值的贡献,但由于本书篇幅有限,我们决定只局限于自己最熟悉的那些素材。

为了达到本书的目的并对磁压缩发生器做出较为一致的阐述,第 1 章全面介绍了这类装置,并提供了为理解以后各章所需的电磁学、冲击波理论和炸药技术的基础。第 2 章描述了影响磁通量压缩的条件,叙述如何做到磁通量压缩的理论,提出了一些重要的设计问题。第 3 章综述了各种基本的磁压缩发生器的设计,包括柱形同轴、锥形、螺线圈、平板、圆盘和半导体发生器等,该章结尾讨论了由两个或更多个基本型设计以及专门用途的短脉冲设计所构成的级联磁压缩发生器装置。第 4 章介绍能够确保磁压缩装置向负载输出设定电脉冲的各种辅助电路组件,包括已经开发的新型开关、变压器和传输线。由于这些电路组件的确切形式同负载的特征有关,第 5 章介绍了一些可能的负载以及它们对磁压缩发生器运行状态产生的影响。第 6 章介绍了由英国 Loughborough 大学研制、称为 FLEXY-I 型的螺线圈磁压缩发生器的设计、制作和试验技术。第 7 章介绍 FLEXY-I 型发生器使用的开关和功率调节电路,用来测量这种发生器运行参数的实验技术,并介绍炸药爆炸实验室的有关内容。第 8 章介绍了磁压缩发生器装置作为高功率激光和微波发生

器电源的应用,选择上述题目的原因是目前有些国家对这些高水平的研究和发展很有兴趣。

大量工作发生在写作本书的3年以上时间里,我们需要结识很多人员以取得他们的指导和帮助。我们首先感谢美国陆军导弹防御和空间技术中心的 J. R. Fisher 博士(主任)、M. J. Laven 博士(先进技术管理局主任)和 I. Merritt 博士(概念判断和应用分析部主任),还要感谢 P. Tracy 先生(Teledyne Brown 工程公司)、S. Balevicius 博士(爱沙尼亚半导体物理研究所)、K. Kristiansen 博士(美国得克萨斯技术大学)、A. Prishchenko 博士(俄罗斯高山地球物理研究所)、C. M. “Max” Fowler 和 D. Tasker 博士(美国洛斯阿拉莫斯国家实验室)、R. Hoeberling 博士(美国爆炸脉冲功率公司)、J. M. Lyons 博士(英国 DERA 公司)以及 M. J. Kearney 教授(英国 Loughborough 大学)。此外,我们还要特别感谢 Springer - Verlag 出版社的技术编辑 L. Davison 博士,他为本书的内容和编排提出了宝贵的建议。

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 炸药驱动电源 .....             | 1  |
| 1.1 引言 .....                   | 1  |
| 1.2 炸药驱动电源概述 .....             | 1  |
| 1.3 磁通量压缩发生器的<br>历史 .....      | 3  |
| 1.4 电磁理论 .....                 | 5  |
| 1.4.1 场论:麦克斯韦方程组 .....         | 5  |
| 1.4.2 电路方程:基尔霍夫<br>方程 .....    | 8  |
| 1.5 电磁现象 .....                 | 9  |
| 1.5.1 磁压和磁扩散 .....             | 9  |
| 1.5.2 磁力 .....                 | 10 |
| 1.5.3 磁压力 .....                | 11 |
| 1.5.4 电场 .....                 | 11 |
| 1.6 冲击波和爆轰波 .....              | 12 |
| 1.7 炸药和炸药部件 .....              | 14 |
| 1.7.1 炸药种类 .....               | 14 |
| 1.7.2 炸药部件 .....               | 15 |
| 1.8 磁通量压缩发生器引论 .....           | 16 |
| 1.8.1 电路方程组 .....              | 16 |
| 1.8.2 电磁场方程 .....              | 17 |
| 1.8.3 磁通量压缩发生器的<br>性能 .....    | 18 |
| 参考文献 .....                     | 18 |
| 第 2 章 磁通量压缩发生器的物理<br>和设计 ..... | 20 |
| 2.1 影响磁场压缩的条件 .....            | 20 |
| 2.1.1 磁场扩散 .....               | 20 |
| 2.1.2 套筒的可压缩性 .....            | 21 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 2.1.3 电导率的变化 .....             | 23 |
| 2.1.4 表面不稳定性 .....             | 23 |
| 2.2 磁压缩电流发生器的理论 .....          | 25 |
| 2.3 电流发生器的设计问题 .....           | 27 |
| 2.3.1 消除电击穿 .....              | 27 |
| 2.3.2 能量放大倍数的提高 .....          | 28 |
| 2.3.3 向负载输送最大可能<br>的能量 .....   | 28 |
| 2.3.4 达到最大可能的增益 .....          | 29 |
| 2.3.5 不受限制的能量放大 .....          | 29 |
| 参考文献 .....                     | 31 |
| 第 3 章 磁通量压缩发生器 .....           | 32 |
| 3.1 引言 .....                   | 32 |
| 3.2 磁压缩发生器的分类 .....            | 32 |
| 3.3 同轴型磁压缩发生器 .....            | 34 |
| 3.4 螺线圈型磁压缩发生器 .....           | 38 |
| 3.5 平板型磁压缩发生器 .....            | 43 |
| 3.6 环圈型磁压缩发生器 .....            | 47 |
| 3.7 圆盘型磁压缩发生器 .....            | 50 |
| 3.8 半导体磁压缩发生器 .....            | 52 |
| 3.8.1 运行理论 .....               | 53 |
| 3.8.2 冲击波磁压缩发生器的<br>工作物质 ..... | 55 |
| 3.8.3 冲击波磁压缩发生器<br>的设计 .....   | 56 |
| 3.9 级联式爆炸磁压缩发生器 .....          | 60 |
| 3.10 短脉冲爆炸磁压缩<br>发生器 .....     | 61 |
| 参考文献 .....                     | 67 |

## 第4章 脉冲形成网络 ..... 69

### 4.1 高速断路开关 ..... 70

#### 4.1.1 炸药爆炸断路开关 ..... 70

#### 4.1.2 电爆炸开关 ..... 71

#### 4.1.3 爆炸等离子体开关 ..... 74

### 4.2 脉冲变压器 ..... 76

### 4.3 电火花隙开关 ..... 81

### 4.4 脉冲形成线 ..... 84

### 4.5 高电压磁压缩发生器系统 ... 87

#### 4.5.1 磁通量俘获 ..... 88

#### 4.5.2 不用变压器的磁通量 俘获 ..... 91

#### 4.5.3 使用变压器的磁通量 俘获 ..... 91

### 参考文献 ..... 94

## 第5章 电负载 ..... 96

### 5.1 至负载的直接连接 ..... 96

#### 5.1.1 情形1: $R_c = 0$ , $L(t) = L_0 \exp(-\alpha t)$ ..... 96

#### 5.1.2 情形2: $R_c = 0, L =$ $L_0(1 - \alpha t)$ ..... 98

#### 5.1.3 情形3: $R_c \neq 0, L =$ $L_0(1 - \alpha t)$ ..... 99

#### 5.1.4 情形4: $C_L = 0$ ..... 100

#### 5.1.5 情形5: $C_L = 0, R_c = 0$ ... 101

### 5.2 通过脉冲变压器的连接 ..... 101

#### 5.2.1 情形1: 复杂负载 ..... 101

#### 5.2.2 情形2: 电阻性和 电感性负载 ..... 104

#### 5.2.3 情形3: $R_1 = 0, I_{20} = 0$ ... 106

#### 5.2.4 情形4: 低电阻负载 ... 107

#### 5.2.5 情形5: $R_1 = 0, R_2 = 0$ , $C_L = 0$ ..... 109

#### 5.2.6 情形6: $R_1 = 0$ 时的有源 负载 ..... 112

#### 5.2.7 情形7: 脉冲成形

#### 变压器 ..... 114

### 5.3 通过电爆炸开关的连接 ..... 117

#### 5.3.1 复数负载 ..... 117

#### 5.3.2 有源负载 ..... 119

#### 5.3.3 开关电感对电感性负载 能量耦合系数的影响 ... 120

### 5.4 脉冲变压器和电爆炸开关 ... 123

#### 5.4.1 复数负载 ..... 124

#### 5.4.2 有源负载 ..... 127

### 参考文献 ..... 129

## 第6章 设计、制作和试验 ..... 131

### 6.1 FLEXY - I 型磁压缩 发生器简述 ..... 131

### 6.2 计算模型 ..... 131

#### 6.2.1 螺线圈型磁压缩发生器 的简单零维模型 ..... 132

#### 6.2.2 螺线圈型磁压缩发生器 的简单二维模型 ..... 141

#### 6.2.3 与其他计算编码的 比较 ..... 151

### 6.3 螺线圈型发生器的设计 ..... 152

#### 6.3.1 基本输入数据 ..... 152

#### 6.3.2 螺线圈的设计规则 ..... 153

### 6.4 FLEXY - I 型磁压缩发生器 的制作 ..... 155

### 6.5 FLEXY - I 型磁压缩 发生器的试验 ..... 158

### 6.6 理论与实验结果的比较 ..... 159

### 6.7 小结 ..... 160

### 参考文献 ..... 161

## 第7章 实验方法与技术 ..... 164

### 7.1 实验方法 ..... 164

#### 7.1.1 电磁学技术 ..... 164

#### 7.1.2 爆轰技术 ..... 167

|       |                                |     |       |                                                    |     |
|-------|--------------------------------|-----|-------|----------------------------------------------------|-----|
| 7.2   | 爆炸脉冲功率实验室 .....                | 172 | 8.1.1 | 固体钕玻璃激光器 .....                                     | 198 |
| 7.3   | 快速开关和功率调节电路<br>的试验 .....       | 173 | 8.1.2 | 光解碘激光器 .....                                       | 200 |
| 7.3.1 | 爆炸箔的经验模型 .....                 | 174 | 8.2   | 高功率微波源 .....                                       | 201 |
| 7.3.2 | 磁通量压缩发生器/断路<br>开关实验 .....      | 176 | 8.2.1 | 微波源的自备电源 .....                                     | 201 |
| 7.3.3 | 爆炸箔断路和闭路<br>开关 .....           | 178 | 8.2.2 | 虚阴极振荡器 .....                                       | 207 |
| 7.3.4 | 快速开关技术 .....                   | 181 | 8.2.3 | 多波契伦柯夫发生器 ...                                      | 210 |
| 7.3.5 | 爆炸箔尺寸的优化 .....                 | 184 | 8.2.4 | 磁绝缘线性振荡器 .....                                     | 212 |
| 7.4   | 磁通量压缩发生器之间的<br>磁耦合 .....       | 185 | 8.2.5 | 渡越辐射发生器 .....                                      | 220 |
| 7.4.1 | FLUXAR 系统 .....                | 186 | 8.3   | 直接驱动的器件 .....                                      | 221 |
| 7.4.2 | FLUXAR 系统的控制<br>方程组 .....      | 187 | 8.3.1 | 电磁弹药的类型 .....                                      | 221 |
| 7.4.3 | FLUXAR 系统的技术和<br>性能 .....      | 189 | 8.3.2 | 爆炸磁频率发生器 .....                                     | 223 |
| 7.4.4 | 一个实例的研究 .....                  | 192 | 8.3.3 | 柱形冲击波源 .....                                       | 231 |
| 7.5   | 螺线圈型磁压缩发生器的<br>局限性 .....       | 194 | 8.4   | 总结 .....                                           | 235 |
| 7.6   | 提要 .....                       | 195 |       | 参考文献 .....                                         | 235 |
|       | 参考文献 .....                     | 195 | 附录 A  | 磁通量压缩发生器——辅导<br>与述评 .....                          | 238 |
| 第 8 章 | 爆炸磁压缩发生器在激光和<br>微波技术中的应用 ..... | 198 | 附录 B  | 磁通量压缩发生器中的<br>损失: 线性磁扩散理论 .....                    | 294 |
| 8.1   | 激光器 .....                      | 198 | 附录 C  | 圆盘型爆炸磁压缩发生器 ...                                    | 325 |
|       |                                |     | 附录 D  | 中国作者发表的爆炸<br>磁压缩发生器学术论文部分<br>目录(1986 年—2005 年) ... | 333 |

# 第1章 炸药驱动的电

## 1.1 引言

高能、强电流脉冲的产生对于许多科学和工程项目的成功是关键性的,例如,在实验室条件下用高能强电流脉冲加速等离子体,为气体放电强光源供电,加速强流电子束,激励强激光器和强微波源,用轨道炮加速弹丸,产生很高的压力脉冲,以及加热热核聚变反应器中的等离子体<sup>[1,2]</sup>。这些强电流脉冲还用于模拟强爆炸时空间中发生的各种过程和空气动力学过程,以及在工业生产过程中产生强冲击波和等离子体流。与产生强电脉冲有关的技术称为“脉冲功率技术”,专门应用于产生很强电磁脉冲,并把这些脉冲耦合到负载中<sup>[3]</sup>。

虽然人们开发过很多产生高能、强电流脉冲的装置,本书关注的只是把高能炸药的化学能转变为电能的脉冲功率发生器。因为炸药提供了一种可实际应用的密度最高的能源,炸药驱动的发生器可以做得比那些使用其他能源的装置更小、更轻。应当指出,爆炸电源对某些应用并不适合,因为每个这类装置都是单次使用的,高能炸药会摧毁电源装置本身,也很有可能摧毁负载。

人们曾经设计炸药驱动的发生器用来产生大电流和高能量脉冲,但是需要有辅助装置(如开关、变压器和传输线)把经过适当整形的脉冲输送到负载。负载特性对系统的运行有很大影响,必须细心、协调地设计发生器和辅助装置,才能使脉冲恰当整形,得到有效的能量传输。

本书在简单介绍几种爆炸电源之后,集中关注这些装置中用途最广、最有效的磁通量压缩发生器(Magnetocumulative Generator, MCG<sup>①</sup>)及其物理性质。接下来在第3章叙述了不同种类的磁压缩发生器,第4章是与磁压缩发生器有关的辅助装置,它们与不同类型负载之间的关系在第5章中讨论。第6章、第7章详细介绍了一种类型发生器及其辅助装置的设计、制作和试验。第8章讨论了两个专门的例子——用磁压缩发生器激励高功率激光和微波源。

## 1.2 炸药驱动电源概述

在产生电磁能量高功率脉冲的电源中,只有很少几种能在较宽的时域范围内(从几十纳秒到1s量级)储存、转换并释放这种能量。几种这样装置的特性在表1.1中介绍,其中只有使用化学炸药和可充电电池的装置可自给自足的,电容器组、储能电感和旋转电机都必须与外部更基本的能源连接。

---

① Magnetocumulative Generator, MCG,按俄罗斯学术名词应译为“磁聚积发生器”,本书按西方和中国的学术用语译为“磁通量压缩发生器”,简称“磁压缩发生器”,有时也称为“爆炸磁通量压缩发生器”,简称为“爆磁发生器”(译者注)。

表 1.1 初级能源和储能系统

| 能源    | 能量密度/(MJ/m <sup>3</sup> ) | 脉冲长度/μs | 转换效率/(%) |
|-------|---------------------------|---------|----------|
| 化学炸药  | 8000                      | 0.1     | 2        |
| 电容器组  | 0.01 ~ 0.1                | 0.01    | 80       |
| 旋转电机  | 100 ~ 500                 | 100     | 30       |
| 储能电感  | 10                        | —       | —        |
| 可充电电池 | 500                       | 1000    | 0.5      |

所储存的电磁能在空间上必须集中,也就是说必须处于电容器组、储能电感和其他储能装置的界限之内。通常可以不考虑电磁场的波动性质,允许用准静态理论的方法描述这些储能器。在储能电感场合,可以仅用导体中流过的电流描述能量的传输,这是因为磁场正比于电流,而磁能又是磁场的函数。例如,在一根长直金属导线的情形,径向距离  $r$  处(大于导线本身的半径  $r_0$ )的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1.1)$$

式中: $I$  为导线中流过的电流,单位体积中储存的能量是  $E = BH/2 = \mu_0 H^2/2 = B^2/2\mu_0$ ,这里  $B$  为磁通量密度, $\mu_0$  为自由空间磁导率。

表 1.1 所列的装置依靠电场、磁场以及(或者)化学键储存能量。表 1.1 中的能量密度是指单位体积中储存能量的最大值,脉冲长度和转换效率则是指利用功率调节系统已经达到的参数。本书首先关注的是储存能量来自炸药分子键的装置,但可以看到当此能量从炸药中释放时,在它以电流形式传向负载之前必须先储存在磁场中。

1914 年 H. Deslanders、A. Perot 以及 1920 年 P. L. Kapitza 首次进行了产生超强磁场的实验<sup>[4]</sup>。在 Deslanders 和 Perot 进行的实验中,用一个可充电电池连接于一个专门设计的电感储能装置,在其中很小的体积内产生了 50kOe ( $1\text{Oe} = 10^3/4\pi \text{ (A/m)}$ ) 的磁场。利用连接于多匝螺线圈的交流发电机转子的动能,Kapitza 在  $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  的体积内得到了 320 kOe 的脉冲磁场,持续时间为 0.01s。在 20 世纪 50 年代早期,人们进行了把高级炸药的能量作用于螺线管的实验,在这些实验及其后继的工作中得到了百万高斯等级的脉冲磁场。这些装置就是后来磁聚积发生器(MCG),也称为磁通量压缩发生器(MFCG)或通量压缩发生器(FCG)的基础。

高能物理实验室通常使用高压电容器组作为其储能系统的基础。经过广泛的研究,电容器组能源对单匝线圈放电可以得到超过 1MOe 的磁场。然而这种螺线圈的尺寸很大,不可能把它们总电感降到较低的程度。电容器中能够储存的能量密度为  $80\text{kJ/m}^3$  ( $40\text{J/g}$ ),这个极限量是根据电场强度  $10^9 \text{ V/m}$  之下因电子自发射引起电介质击穿的限度所设定的。例如,要使电介质以  $10^5 \text{ J/m}^3$  的能量密度储存 100MJ 的能量,则需要体积  $1000 \text{ m}^3$ 、重量  $25 \times 10^5 \text{ kg}$ ,这样做成的电容器组将十分巨大、低效而且费用很高。

解决大型电容器组相关问题的需求,推动了人们对于把高能炸药的化学能转变为电感储能器中电磁能装置的广泛研究,这类工作已在美国、俄罗斯、中国、日本、英国和其他国家开展,可以统称这种炸药爆炸驱动的能源为爆磁发生器(EMG)。按照如何把化学能转变为电磁能的方式,它们又可划分为若干类,下面列出 5 类爆磁发生器:

(1) 铁磁发生器(FMG),依靠磁性材料在爆炸产生的冲击波作用下发生退磁而产生



电动势；

(2) 铁电发生器(SEG)<sup>①</sup>,依靠铁电材料的去极化产生电动势；

(3) 磁流体动力学发生器(MHDG),当等离子体在磁场中运动时产生电动势；

(4) 磁电发生器(MEG),爆炸推动一个磁体通过磁场时,由于改变磁场结构而产生电动势；

(5) 磁聚积发生器(MCG<sup>②</sup>),依靠压缩磁场而产生电动势。

在上述这些装置中,最先进的是磁通量压缩发生器,实质上这是可产生高能量密度和很高功率的脉冲电流源。在这类装置运行的最后阶段,磁场压缩过程已经完成,装置变为一个电感储能器。储存在发生器中的最高能量密度可达到  $10^9 \text{ J/m}^3$ ,也就是说储存在  $0.1 \text{ m}^3$  体积中的能量为  $10^8 \text{ J}$ 。这就很好地说明了磁通量压缩发生器的一个优点是其储存的能量密度大大高于表 1.1 所列的其他电源;磁通量压缩发生器的另一个优点是其成本比其他电源都要低。

### 1.3 磁通量压缩发生器的历史

磁通量压缩技术的发展于 20 世纪 50 年代早期从俄罗斯和美国开始,随后在 20 世纪 60 年代英国、法国、意大利和中国也开始了这项研究,之后,又有日本、波兰、德国和罗马尼亚的研究组加入了这个被称为“兆高斯(MG)磁场俱乐部”的活动。有关国家及其成就概括于表 1.2 中。

表 1.2 20 世纪 50 至 70 年代开始磁通量压缩发生器研究计划的国家

| 国家           | 磁场强度/<br>MG( $10^2 \text{ T}$ ) | 能量/<br>MJ | 电流/<br>MA | 研究计划开始时间 |
|--------------|---------------------------------|-----------|-----------|----------|
| 俄罗斯(苏联)      | 17/28                           | 100       | >300      | 1952     |
| 美国           | 10/14                           | 50        | 320       | 1950     |
| 法国           | 10/11.7                         | 8.5       | 24        | 1961     |
| 日本           | 5.5                             | —         | —         | 1970     |
| 欧洲原子能组织(意大利) | 5.4/7                           | 2         | 16        | 1961     |
| 英国           | 5                               | 10        | 20        | 1956     |
| 罗马尼亚         | 5/7.5                           | 0.5       | 12        | 1979     |
| 波兰           | 3.5                             | —         | 0.8       | 1973     |
| 中国           | —                               | —         | 2(?)      | 1967     |
| 德国           | —                               | —         | 1.2(?)    | 1975     |

注:“磁场强度”一列中第二个数字反映实验中也也许很少达到的量值;“—”号表示缺少可引用的数据;“?”号表示也许曾达到过高得多的量值

① 1930 年,在列宁格勒约飞技术物理研究所工作的 I. V. 库尔恰托夫研究了电介质材料的性质。研究过程中他考察了罗谢尔盐(四水酒石酸钾钠晶体)电介性质的反常现象,从而导致一类特殊晶体的发现。这类晶体在电场中的性态完全类同于铁磁体在磁场中的行为,现在被称为铁电体,可是当时库尔恰托夫用法国化学家 Segnier 的名字,命名它们为塞格涅特电体(Segnetoelectrics)。

② 根据国内学术界的习惯,本译著中称之为磁通量压缩发生器(译者注)。