

# 强磁场发展动态与趋势\*

彭涛<sup>†</sup> 辜承林

(华中科技大学电气与电子工程学院 武汉 430074)

**摘要** 文章主要介绍了强磁场的发展状况和最近取得的一些进展,包括 45T 稳态磁场、60T 长脉冲磁场、80T 非破坏性脉冲磁场和百特斯拉级磁场,同时文章也介绍了强磁场的发展趋势和各磁场实验室的强磁场发展计划。

**关键词** 强磁场 稳态磁场,长脉冲磁场,非破坏性脉冲磁场,百特斯拉级磁场

## Development of strong pulsed magnets

PENG Tao<sup>†</sup> GU Cheng-Lin

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Worldwide progress in the development of high magnetic fields is reviewed, including 45T steady-state, 60T long-pulse, 80T nondestructive and megagauss magnetic fields. Future trends and development plans for the future are also presented.

**Key words** high magnetic field, steady-state magnetic field, long-pulse magnetic field, nondestructive pulsed magnetic field, megagauss field

## 1 引言

磁场装置是凝聚态物理学领域的重要研究工具,通过它发展起来的技术,例如核磁共振(NMR)、电子顺磁共振(EPR)、磁共振成像(MRI)对当代化学、生物学甚至医疗领域有着广泛的影响。而强磁场则已成为现代物理研究不可缺少的工具,利用它,我们可以发现许多新的物理现象,或者对已知的现象作更进一步的研究。尤其是随着我们对物质结构研究的不断深入,强磁场发挥着越来越重要的作用,在固态物理学、生物分子学、核聚变与等离子体物理研究等许多重大科学工程中已成为必不可少的技术基础。正因为如此,在世界范围内,一大批强磁场实验室相继建立起来,并且取得了骄人的成绩。这中间以美国 Los Alamos 实验室和日本东京大学以及大阪大学磁场实验室为主要代表。

## 2 稳态磁场

稳态磁场可以长时间工作,是物理研究中最理想的实验工具。它的内径通常在 50mm 左右,随着磁

场强度的提高,由于电源等方面的限制,内径将减少至 30mm 左右。对于这样的稳态磁体,通常需要一个 20MW 的电源<sup>[1]</sup>,因此,只有比较大的实验室才具备这个条件。

目前,美国佛罗里达 NHMFL 实验室的混合磁体仍然保持着稳态磁场的最高记录。该磁体由超导磁体和水冷磁体两部分组成,其中水冷磁体内径为 32mm,电源为 24.6MW,产生的磁场为 31T。超导磁体共包括三个超导线圈:一个外层 Nb-Ti 线圈和两个内层 Nb<sub>3</sub>Sn 线圈,内径为 615mm,在室温时产生 14.3T 的磁场<sup>[2]</sup>。当超导部分和水冷部分同时工作时,就可以产生 45T 的稳态磁场。

在该磁体的设计过程中,共有 17 家公司参与了材料、元件和系统的设计与制造。目前,他们的计划是将水冷磁体的水平提高到 36T<sup>[3]</sup>,从而产生 50T 稳态磁场。

除此之外,在其他实验室也还分布着一些高性能的稳态磁体。在日本,东芝公司为 Tohoku 大学制

\* 2003-10-31 收到初稿,2004-02-05 修回

† 通讯联系人, E-mail peng\_hust@sina.com

造了一个 31T 的混合磁体,位于 Tsukuba 的国家金属研究室也计划制造一个 40T 的混合磁体,在法国 Grenoble 已建成了 31.4T 的混合磁体;在荷兰的 Nijmegen 强磁场实验室,MIT 为他们制造了两个混合磁体,其中一个可以产生 30T 的磁场,他们还计划将线圈和供电系统升级到 20MW,从而可能产生 40—45T 范围内混合磁场.位于合肥的中国科学院等离子体物理研究所是我国稳态磁场的主要研究单位,1992 年,该所的混合磁体产生了 20.2T 磁场,并开始对外进行开放性实验.现在,这里也有进行 45T 稳态强磁体研究的计划<sup>[4]</sup>.

就目前而言,稳态磁体运行费用较高,并且它所能达到的最高值最终受制于直流电源的容量<sup>[5,6]</sup>,因此,从长远的角度来看,超导磁体将很可能成为稳态磁体的主体,其余为数不多的将是 50T 甚至 60T 的混合磁体.

### 3 长脉冲磁场

我们通常将脉宽达到 1s 数量级的脉冲磁场称为长脉冲磁场.长脉冲磁场的优点是波形具有可控性,我们可以根据需要产生特殊的波形,它的缺点是电流整形后的纹波较大.

目前,Los Alamos 实验室的长脉冲磁场装置处于世界领先水平,是惟一能够产生 60T 长脉冲磁场的装置.该装置于 1997 年夏季组装完毕,电源部分如图 1 所示.它主要包含一个从核电站得到的 1430MW/650MJ 的电动发电机和 5 个 64MW 的整流器模块.每个模块的空载电压为 4kV,满载电压为 3.2kV,电流为 20kA.磁体部分主要由 9 个嵌套在一起的线圈组成,这 9 个线圈在电气上分为 3 组,每组均由独立的电源模块供电.根据不同功率需要,第一组(线圈 1—5)由单个电源模块供电,第二组(线圈 6 和 7)和第三组(线圈 8 和 9)分别由两个串联的电源模块供电<sup>[7,8]</sup>.

组装完后的长脉冲磁体内径为 32mm,60T 长脉冲的脉宽可达 2s,其中平顶部分为 100ms,是同类装置中性能最好的,另外,它还能产生许多其他形状的可控脉冲波.自 1997 年运行以来,该装置共进行了 800 多次实验,其中 400 多次达到了 60T<sup>[8]</sup>.

在日本的 Kashiwa,东京大学也建立了长脉冲磁场实验装置.他们的电源是一个 3 × 300kJ 电容器组,根据需要,这三个电容器组可以单独使用,也可以组合起来使用.另外,电容器组的输出电压可以通过改变开关连接方式在 5kV 和 10kV 之间转换.磁

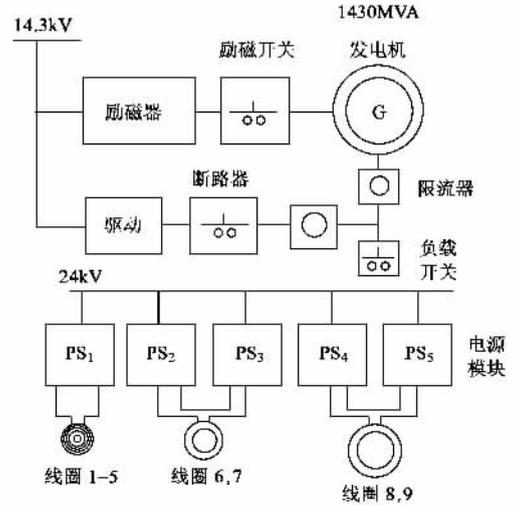


图 1 Los Alamos 实验室 60T 长脉冲磁场装置电源布局图

体的导体材料是用 Nb-Ti 合金加固的铜导线,产生的磁场可达 58T.最近,在大阪大学的帮助下,东京大学也开始了 60T 长脉冲磁体的设计工作,他们采用的导体材料是 Cu-Ag 合金.目前制造的磁体内径为 24mm,可以产生 51T 的长脉冲磁场<sup>[9]</sup>,预计不久就能设计出强度更高、持续时间更长的磁体.

除此之外,在法国 Grenoble 利用储能电感作为电源的新型长脉冲磁体已经建成,磁场最大值达 57.2T.在德国 Dresden,一项雄心勃勃的计划也正在进行之中,他们已经得到政府的资助,准备制造出一个 50MJ 的电容器电源,并希望成为 Los Alamos 长脉冲磁体项目的欧洲伙伴.

### 4 非破坏性脉冲磁场

非破坏性脉冲磁场是相对于长脉冲磁场而言的.长脉冲磁体成本比较高,一般处于非常保守的运行状态,工作磁场强度远低于它的最大磁场水平.非破坏性脉冲磁体则不同,它的成本较低.典型的非破坏性脉冲磁体用 100kJ—2MJ 的电容器作为电源,磁体重约几公斤,一个熟练工人只要一周时间就可以完成,因而它常常处于临界应力状态下运行,这样即使遭到破坏,磁体也很容易更换.

目前,非破坏性脉冲磁场的最高纪录为 80.3T,它是由日本大阪大学创造的.产生这个磁场的磁体是一个双层结构,内层是一个用马氏体铁筒加固的单匝线圈,内径为 10mm,外径为 18mm,产生的磁场为 10T.外层是一个 70.3T 的磁体,如图 2 所示,它的内径为 18mm,外径为 60mm,高为 150mm.绕组由 9 层线圈构成,导体材料是 2 × 3mm<sup>2</sup> 的 Cu-Ag 合金,

抗拉强度为 900MPa,外面用 45mm 厚的马氏体铁圆柱加固.通过实验得到,内外层一起可以产生 80.3T/8ms 的脉冲磁场<sup>[10]</sup>.

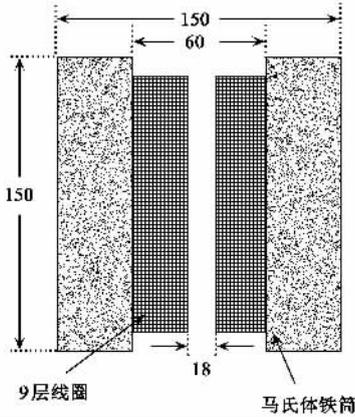


图2 外层 70T 磁体结构

现在,对非破坏性脉冲磁体,磁体专家都将关注的目光集中在 100T 的水平上.通过多年的研究,他们一致认为,100T 的非破坏性脉冲磁体在设计上基本遵从以下两条原则:

(1)为了降低对电源的要求,通常采用多层线圈结构,外层用来产生背景磁场,内层产生叠加磁场;

(2)为了克服强大的磁应力,导体材料采用强度较高的 Cu-Ag 或 Cu-Nb 合金丝<sup>[11]</sup>.

根据这个指导思想,大阪大学已经设计出一个内径为 58mm、外径为 100mm 的磁体,用它产生了 44.4T 的磁场.接下来他们希望用这个磁体作为外层,然后用一个 45T 的 9 层线圈磁体作为内层<sup>[10]</sup>,从而产生 90T 的磁场.

2000 年,Los Alamos 实验室也在美国能源部的资助下进行 100T 磁场的研究.他们的做法是用一个内径为 220mm 的 50T 磁体作为内层,用一个 60T 的长脉冲磁体作为外层,工作时让两者均产生 50T 的磁场<sup>[12]</sup>,一共产生 100T 的非破坏性脉冲磁场.

在欧洲,各大实验室也正在着手 100T 磁体的设计工作.欧洲科学基金同意建立一个欧洲磁场实验室,希望设计出 100T 的脉冲磁场,以取得在非破坏性脉冲磁场技术上与美国和日本竞争的地位.他们的第一步是在法国的 Toulouse 设计 80T 的实用脉冲磁体,目前,14MJ 的电容器组已经组装完毕.成立于 1987 年的中国科学院物理研究所磁学开放实验室(1990 年更名为磁学国家重点实验室)曾从事非破坏性磁场研究主要专注于磁光共振、磁各向异性和

磁瞬变现象的研究.该实验室开发了多种高强度材料,尤其是绝缘材料,设计的脉冲磁体产生了 50T 的磁场.2002 年,华中科技大学也已经通过了教育部的评审,准备在华中科技大学建立脉冲强磁场实验室,搭建基础科学研究的实验平台.同时,我们还和比利时 K. U. Leuven 大学强磁场实验室建立起了联系,正在开展脉冲强磁场方面的国际合作.双方合作从 2003 年开始,其中脉冲强磁场设计软件开发、新型复合材料测试等工作已基本完成,下一步的工作将是在 K. U. Leuven 大学的协助下,在华中科技大学建设脉冲强磁场实验室,并进行高性能脉冲磁体测试工作.

## 5 百特斯拉级磁场

到目前为止,因为磁应力的原因,要想得到百特斯拉级强磁场,就必须以破坏磁体为代价.而在实现方法上,几十年来还没有重大突破,主要还是采用单匝线圈法、电磁压缩法和爆炸压缩磁通法.不过,这三种方法对实验室得要求较高,只有少数实验室在开展这方面的研究工作,现简要介绍如下.

(1)单匝线圈法.最近,在日本的东京大学和德国柏林的 Humboldt 大学分别建立了两个单匝线圈装置.这两个装置都在液氮温度下产生了 250T 的实用磁场和 300T 的最高纪录.

(2)电磁压缩法.在东京大学用于电磁压缩的主电容器为 5MJ/40kV,副电容器为 1.5MJ/10kV,用该电容器作为电源,产生的磁场达 606T,他们计划的下一个目标是 750T<sup>[13]</sup>.

(3)爆炸压缩磁通法.前苏联科学家 Pavlovaskii 及其同事采用该方法产生了 1600T 的磁场记录<sup>[14]</sup>.目前只有俄罗斯的 Sarov 实验室还在从事该方法的研究,他们希望在 Pavlovaskii 的基础上有所突破,产生出更强的实用磁场.

## 6 结束语

强磁场已经成为科学家们(物理学家、化学家、生物学家、材料科学家、医学放射学家)一种强有力的工具,能够实现弱磁场所不能实现的强聚焦效果.强磁场技术的突飞猛进,以及它在现代化工业中的推广与应用,有力地推动了半导体材料、超导材料以及磁性材料的迅猛发展.此外,利用核磁共振(NMR)增加磁场强度,使得在弱磁场下不能详细观察到的物质结构成为可能,核磁共振成像(MRI)已经成为迄今为止发明的最强有力的诊断工具之一.

2003年,诺贝尔生理医学奖就授予了核磁共振成像技术的发现者。

从最初的奥斯特到法拉第,再到卡皮察(Kapitza)和贝尔维尤(Bellevue),以及后来的莱顿(Leiden)实验室,欧洲都取得了一系列的成就,直到现在,欧洲在强磁场的产生和装置上都有着很强的创新。在强磁场设备的生产和销售方面,欧洲也一直居于世界领导地位(部分5000NMR磁场和3500MRI磁场由一家公司生产)<sup>[15]</sup>。在过去的十年中,欧洲委员会遵循他们的咨询委员会关于大型设备的建议,建立了一个研究大型磁场的研究小组,该小组考虑的是如何拓展欧洲科学家对强磁场的研究,并在K. U. Leuven大学设立了两个欧洲强磁场实验室。但自从1990年以来,美国在兴建国家强磁场实验室(NHMFL)方面进行了大量的投资,使美国在强磁场研究的许多领域里处于领先的地位。NHMFL已经具备了在瞬时产生多级强磁场的的能力。NHMFL还在世界上率先提出了25T的固态NMR。他们在长脉冲磁场领域里占有了一席之地,目前他们能够产生高达60T的长脉冲强磁场并用于实验。他们拥有600MJ的脉冲电源,并向100T的强脉冲领域迈进,给人们留下了深刻的印象<sup>[16,17]</sup>。而日本,作为自爆破系统的一直领航者,最近在东京大学和大阪大学的实验室加大了投资,目前已成为直流磁场领域的领头羊<sup>[18-20]</sup>。由此可见,欧洲、美国和日本在磁场技术上的竞争已经十分激烈,这也必将推动强磁场技术的

迅速发展。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Herlach F. *Physica B*, 2001, 294—295 500
- [ 2 ] Branndt B L, Hannahs S, Schneider-Muntau H J *et al.* *Physica B*, 2001, 294—295 505
- [ 3 ] Lubkin, Gloria B. *Physics Today*, 1994, 47( 11 ) 21
- [ 4 ] 曹效文. *物理*, 1996, 25 :552 [ Cao X W. *Wuli ( Physics )*, 1996, 25 :552 ( in Chinese )]
- [ 5 ] Frings P, Huang Y K, Hennes E. *Physica B*, 2002, 319 330
- [ 6 ] Feder T. *Physics Today*, 1999, 52 60
- [ 7 ] Lubkin, Gloria B. *Physics Today*, 1998, 51( 10 ) 21
- [ 8 ] Schilling J, Boenig H, Gordon M *et al.* *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, 2000, 10( 1 ) :526
- [ 9 ] Miura N, Matsuda Y H, Uchida K *et al.* *Physica B*, 2001, 294—295 562
- [ 10 ] Kindo K. *Physica B*, 2001, 294—295 585
- [ 11 ] Pernambuco-Wise P, Schneider-Muntau H J *et al.* *IEEE Trans. Magn.*, 1994, 30( 4 ) :2226
- [ 12 ] Robert F Service. *Science*, 1998, 281 :1262
- [ 13 ] Toni F. *Physics Today*, 1999, 52 59
- [ 14 ] 刘智民. *物理*, 1997, 26 :735 [ Liu Z M. *Wuli ( Physics )*, 1997, 26 :735 ( in Chinese )]
- [ 15 ] Herlach F. *Physica B*, 2002, 319 321
- [ 16 ] Crow J E, Parkin D M, Schneider H J *et al.* *Physica B*, 1996, 216 146
- [ 17 ] Crow J E, Campbell L, Parkin D M *et al.* *Physica B*, 1995, 211 30
- [ 18 ] Motokawa M, Watanabe K, Miura S *et al.* *Physica B*, 1998, 246—247 360
- [ 19 ] Maeda H, Inoue K, Kiyoshi T *et al.* *Physica B*, 1996, 216 : 141
- [ 20 ] Kido G, Takehana K, Uji S *et al.* *Journal of magnetism and magnetic materials*, 1996, 157—158 550

## 光 学 元 件 库 — 欧 普 特 科 技

北京欧普特公司参照国际通常规格及技术指标, 备有完整系列的精密光学零部件( 备有产品样本供参考) 供国内各大院校、科研机构、实验室随时选用, 我公司同时可为您的应用提供技术咨询。

光学透镜: 平凸, 双凸, 平凹, 双凹, 消色差胶合透镜等。直径1~150mm; 焦距1~1000mm; 材料包括光学玻璃, 紫外石英玻璃, 有色光学玻璃, 红外材料。

光学棱镜: 1~50mm 各种规格直角棱镜, 及其它常用棱镜。

光学反射镜: 各种尺寸规格的镀铝, 镀银, 镀金, 及介质反射镜。直径5~200mm。

光学窗口: 各种尺寸规格, 材料的光学平面窗口, 平晶。直径5~200mm。

各种有色玻璃滤光片: 规格5~200mm(紫外, 可见, 红外)。

紫外石英光纤: 进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头, 紫外石英聚焦探头。

单位: 北京欧普特科技有限公司

地址: 北京市海淀区知春路49号

希格玛大厦B座#306室

电话: 010-88096218 / 88096217

传真: 010-88096216

邮编: 100080

网址: [www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

电子邮件: [optics@goldway.com.cn](mailto:optics@goldway.com.cn)

[sms@goldway.com.cn](mailto:sms@goldway.com.cn)

联系人: 粟曼珊女士

石冀阳小姐