

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：第二代高温超导带材交流损耗特性研究

学生姓名：许经纬

学生学号：5080309339

专    业：电气工程与自动化

指导教师：金之俭、洪智勇、李柱永

学院(系)：电子信息与电气工程学院

## 第二代高温超导带材交流损耗特性研究

### 摘要

自 1911 年汞的超导现象被荷兰科学家 Onnes 发现之后, 超导方向的研究蓬勃发展, 至今已经取得了很大的进展。不论是低温超导还是高温超导都进入了逐步应用到生产实践的环节。近年来随着国民经济的告诉发展, 对用电的需求急剧上升, 传统的输电线路容量已经很难满足要求, 并且电力系统容量的不断增大会使相应的短路电流水平因此变大, 如此等等的问题都可以利用超导技术得到有效的解决。高温超导带材是超导应用的基本单位, 其交流损耗特性直接关系到超导装置的设计、安装、运行成本以及稳定性等。研究高温超导带材的交流损耗特性对开展超导应用设计具有重要意义。

本文首先从超导的特性、发展历程、应用前景等方面为读者引入了超导的基本概念。接着从仿真和实验两种方法对第二代高温超导 YBCO 超导带材的交流损耗特性进行分析研究。仿真主要使用了有限元分析软件 COMSOL 搭建出单根超导带材模型, 计算交流损耗数值。在此基础上, 利用该模型对多根甚至更复杂一些的情况下的带材进行仿真, 得出交流损耗特性变化趋势, 并从电场、磁场的角度分析变化原因。之后搭建带材实验平台, 通过实验实际测量出交流损耗, 并与仿真数值相对比。

**关键词:** 第二代高温超导带材, 交流损耗, 数值仿真, 电测法

# MEASUREMENT AND ANALYSIS OF AC LOSSES OF SECOND GENERATION HTS TAPES

## ABSTRACT

Since 1911, when Netherlands scientist Onnes discovered the superconducting phenomenon of mercury, researches in superconductivity have flourished and made great progress. Both low temperature and high temperature superconductors are applied to production gradually. In recent years, with the development of the national economy, there is a sharp increase in the demand for electricity. As a result, the capacity of traditional transmission line is hardly to meet the requirements. Moreover, as the capacity of power system increased, the appropriate level of short-circuit current became so large. These problems can be effectively solved as long as using superconducting technology. HTS tapes are the basic unit of the applied superconductor, and their AC losses have direct effects on the stability of HTS apparatus. The investigation of AC losses of HTS tapes has always been one of the most important research branches of HTS applications.

In this paper, the basic concepts of superconductivity are introduced first through its characteristics, development and application prospect. Then, in the aspect of both simulation and experimental analysis, investigation in AC loss of the second-generation high temperature superconductor YBCO strip is conducted. In the part of simulation, the finite element analysis software COMSOL is mainly used to build a single superconducting strip model to calculate the value of AC loss. On the basis of this model, more strips in more complex case are simulated. Through this, we get the trend of AC loss characteristics, and try to explain it in the aspect of electric and magnetic fields. At last, the experimental platform is established to measure the AC loss. And the results are compared with the simulation ones.

**Key words:** 2G HTS tapes, AC losses, numerical simulation, electrical method

## 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 绪论                       | 1  |
| 1.1 超导技术简介                   | 1  |
| 1.2 高温超导应用和发展前景              | 3  |
| 1.3 交流损耗产生原因，影响因素及研究意义       | 3  |
| 1.4 论文主要工作及章节安排              | 4  |
| 第二章 软件介绍                     | 6  |
| 2.1 COMSOL Multiphysics 简介   | 6  |
| 2.2 COMSOL Multiphysics 应用范围 | 7  |
| 2.3 本章小结                     | 7  |
| 第三章 超导交流损耗仿真模型               | 8  |
| 3.1 超导理论模型                   | 8  |
| 3.1.1 London 模型              | 8  |
| 3.1.2 G-L 模型                 | 9  |
| 3.1.3 Bean 模型                | 9  |
| 3.1.4 Kim 模型                 | 10 |
| 3.1.5 E-J 指数模型               | 10 |
| 3.2 超导交流损耗的数值分析方法            | 10 |
| 3.2.1 A-V 方程式                | 10 |
| 3.2.2 T- $\Omega$ 方程式        | 11 |
| 3.2.3 H 方程式                  | 11 |
| 3.3 本论文数学仿真模型的建立             | 12 |
| 3.4 本章小结                     | 14 |
| 第四章 超导带材交流损耗的仿真              | 15 |
| 4.1 超导带材的介绍                  | 15 |
| 4.2 单根带材的交流损耗                | 16 |
| 4.2.1 基于美超带材参数仿真             | 16 |
| 4.2.2 上交大带材仿真                | 17 |
| 4.2.3 从磁场角度看带材损耗             | 19 |
| 4.3 不同的根数及排列对交流损耗的影响         | 20 |
| 4.3.1 双根                     | 20 |
| 4.3.1.1 水平排列                 | 20 |
| 4.3.1.2 垂直排列                 | 21 |
| 4.3.1.3 角度改变                 | 22 |
| 4.3.1.4 结果分析与讨论              | 23 |
| 4.3.2 三根                     | 26 |
| 4.3.2.1 水平排列                 | 26 |
| 4.3.2.2 垂直排列                 | 27 |
| 4.3.2.3 结果分析与讨论              | 28 |
| 4.4 10KV 超导限流器中，限流单元的交流损耗    | 31 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.5 本章小结-----           | 31 |
| 第五章 单根带材交流损耗的测量-----    | 32 |
| 5.1 临界电流的测量-----        | 32 |
| 5.1.1 实验平台-----         | 32 |
| 5.1.2 实验结果-----         | 33 |
| 5.2 交流损耗的测量-----        | 34 |
| 5.2.1 实验平台-----         | 34 |
| 5.2.2 实验结果及与仿真值的比较----- | 35 |
| 5.3 本章小结-----           | 37 |
| 第六章 总结-----             | 38 |
| 6.1 结论-----             | 38 |
| 6.2 展望-----             | 38 |
| 参考文献-----               | 40 |
| 谢辞-----                 | 42 |

## 第一章 绪论

随着现代科学技术的发展，新型材料技术、低温技术、生产加工技术等飞速向前迈进。得益于这些基础科学的进步，人们对于超导及其特性也在不断的加深，对于它的发展前景也逐渐从狭隘到宽阔。高温超导技术被喻为 21 世纪最具潜力的电工技术。现有的电力系统约有 8%—10% 的电损耗在传输环节，如果采用超导技术来传输，几乎可以达到零损耗，全国节电效果将超过千亿度电，超过了三峡水电站全年的发电量。许多国家已将发展超导产业上升到战略高度，美国将其 2030 智能电网的目标定为超导电力。超导体拥有很多目前在常温状态下难以获得的奇特性质，如完全抗磁性，零电阻性等。超导应用技术的发展起源于超导物理、超导材料、和低温技术。本章节重点介绍超导技术的基本特性、重要参数、发展应用的前景以及它的交流损耗产生机理与影响因素。

### 1.1 超导技术简介

超导现象的发现始于 1911 年荷兰科学家昂内斯发现汞电阻在 4.15K 的低温条件下突然降为零<sup>[1]</sup>。在之前的 1908 年同样是昂内斯成功的将氦气液化，为超导现象的发现提供了温度上的条件。随后的实验发现，处于超导态的汞电阻率仅有  $10^{-23}\Omega\cdot\text{cm}$ ，而被认为是良导体的铜在相同的低温条件下电阻率有  $10^{-9}\Omega\cdot\text{cm}$ ，远大于超导态的汞。这一重大发现标志着人类研究超导现象的开端。上述在低温条件下，电阻突然消失的现象称为超导的零电阻现象，当温度降低到特定的临界点  $T_c$  时电阻陡降为零。临界温度  $T_c$  是最重要的超导临界值之一。常规超导体如元素超导体、合金和化合物超导体等有较低的临界温度  $T_c$ ，需要在液氮(4.15K)低温条件下工作，因而也被称作低温超导体；非常规超导体如有机超导体，低载流子浓度超导体，磁性超导体等具有较高的临界温度，使得可以在液氮(77K)环境下呈超导态，所以也被称为高温超导体。自从液氮区的高温超导体被发现之后，超导电性的实验研究摆脱了昂贵、苛刻的液氮低温条件，对超导装置和制冷技术的也要求大大降低，这为超导装置的应用铺设了更加光明的前景。

超导体除了具备广为人知的零电阻效应还有完全的抗磁性，也被称为迈斯纳效应<sup>[2]</sup>，是由 1933 年迈斯纳和奥克森菲尔德发现。迈斯纳效应是指处于超导态的超导体内部磁感应强度为零。如图 1-1，在常温下给超导体外加磁场时磁通线可以完全通过超导体，但是当温度低于临界温度时，外加磁场不能穿过超导体，磁通线被排斥在超导体之外。同时研究还表明，不论冷却至临界温度以下还是外加磁场的先后次序，超导体内部的磁通总是为零。所以说超导体的磁状态是热力学状态，在给定的条件下，它的状态总是确定的、唯一的，与达到该状态的途径和方式无关。

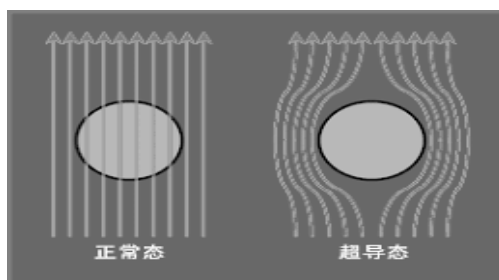


图 1-1 超导体的完全抗磁性

零电阻现象<sup>[1]</sup>和迈斯纳效应<sup>[2]</sup>是实验上判断是否是超导体两大基本要素，两者相互独立同时又是相互联系的。零电阻特性不能推出迈斯纳效应，但又是迈斯纳效应存在的必要条件<sup>[3]</sup>。某种材料要成为超导体，必须同时具备上述两种效应。

超导体具有三个临界值，除了前面提到的临界温度  $T_c$ ，还有临界磁场  $H_c$  和临界电流密度  $J_c$ 。

(1) 临界温度。如前面所述，在临界温度以下，超导体处于超导状态，在临界温度以上则处于常态，不同的超导体具有不同的临界温度。常规超导体临界温度较低，非常规超导体临界温度较高。1986 年 4 月，贝德罗兹 (J. G. Bednorz) 和缪勒 (K. A. Muller)<sup>[4]</sup>发现了 Ba-La-Cu-O 系氧化物超导体。1993 年，Putlin 与 A.Schilling<sup>[5,6]</sup>等发现了 Hg-Ba-Ca-Cu-O 氧化物超导体，临界温度达到了 135K，是至今为止发现的临界温度最高的超导体。

(2) 临界磁场。当超导体处在临界温度以下时，存在外加磁场强度  $H$ ，若  $H$  小于某一个临界磁场强度  $H_c$  时，超导具有零电阻特性，处于超导态；若  $H$  大于该临界磁场强度  $H_c$  时，超导体恢复到电阻态。使得超导体由超导态恢复到常态的磁场值称为临界磁场  $H_c$ 。在临界温度以下， $H_c$  是关于温度  $T$  的函数，公式为：

$$H_c(T) = H_c(0)[1 - (T/T_c)^2]$$

其中  $H_c(0)$  是物质常数，为在  $T=0K$  时超导体的临界磁场强度，不同材料对应的  $H_c(0)$  不同； $T_c$  是零磁场时的临界温度。

(3) 临界电流密度。实验发现，当通过超导体的电流达到一定的电流密度时，超导体不再呈现超导态，即此时的电流密度为临界电流密度。西尔斯比对此解释为是由于电流所产生的自场磁场导致超导体达到临界磁场从而失超。由于电流和磁场是互相影响的，除了超导体自身流过电流产生自场外，外部也存在磁场，这种情况下临界电流受影响较大，并且与外部磁场与电流的相对方向有关。高温超导体在不同方向的磁场下临界电流密度特性有很大的不同，有明显的各向异性<sup>[7]</sup>。

综上，超导的临界值有如图 1-2 所示的关系。如果三个参数均处在曲面的内部，则导体处在超导态，否则处于常态。超导体的应用特性不仅仅取决于这三个参数的大小也决定于三者的互相影响。

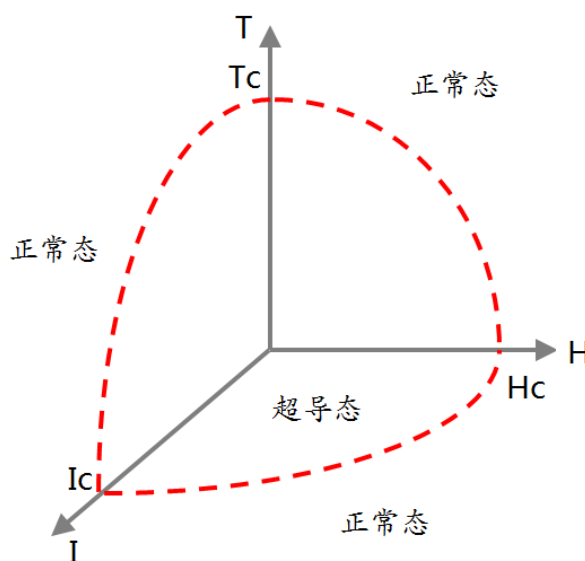


图 1-2 超导体临界值及相互关系



## 1.2 高温超导应用和发展前景

高温超导体有普通导体无法比拟的特性,使得在强电和弱电应用上都有着广泛的前景和优势。高温超导既给现有技术带来了性能上的大幅提升,也为今后的设计提供了新的概念和思路。自从高温超导体开发出来后,其优异的性能和潜在的应用价值吸引了许多不同的领域如材料、电力、物理等迅速开展研究。

目前美国、日本、欧洲乃至韩国等都相继成功研制出了超导输电电缆、超导限流器、超导储能系统、超导变压器、超导发电机和电动机等多种超导电力装置实验样机。我国“十五”期间也开发了多种超导电力装置,这些都标志着电力科技的发展将进入一个崭新的阶段。

高温超导材料最主要的应用领域在电力和强电磁装置中。随着技术的不断变革和需求的不断增大,大电流和强磁场在强电领域中十分常见,与此相对应的高温超导大电流导线和磁体装置具有许多理想特性而被广泛研究,一些装置已经初步具备了产业化的雏形。高温超导强电应用具体包括电力系统中的各种装置,典型的有如下:

(1) 超导电缆<sup>[8]</sup>:体积小、重量轻、相同截面情况下其载流量约为普通铜芯电缆的 3~5 倍,电能损耗极小,且重量要轻得多。对于人口密集的大城市来说,在供电电压不变且铺设电缆空间有限的情况下,使用超导电缆来取代原有地下管道内的普通铜芯电缆来扩大输电能力可以极大的满足日益增长的电力需求。

(2) 超导储能<sup>[9]</sup>:能量密度极高,可以贮存巨大的电能。由于超导体直流电阻为零,因此这种能量储存只在接头处产生极微小的损耗,可以实现近乎 100% 的转换效率。与抽水蓄能、蓄电池储能等储能形式相比,具有响应速度快、储能效率高、不受建造场地限制等优点。超导储能能在输电网络中用电低谷时将多余的电力储存起来,当用电高峰时释放出来,解决用电不平衡的矛盾,有效的抑制系统功率振荡,快速补偿系统的不平衡功率,提高系统的运行稳定性。

(3) 超导电机<sup>[10]</sup>:超导体的电流密度远远超过铜的电流密度,这表明超导电机单机输出功率可以大大增加。另一方面机端电压得到提高,在特定的场合下有望取消升压变直接并入电网运行。此外超导发电机利于改善电力系统稳定性,其电抗只有普通发电机的 1/4 左右,因此在系统电抗相对较小时,稳定极限得到大幅度增加。

(4) 超导变压器<sup>[11]</sup>:变压器的总损耗大大减小,高电流密度可以提高电力系统的效率,采用超导变压器将会大大节约能源,减少其运作费用;从绝缘运行寿命上看,超导变压器的绕组和固体绝缘材料都运行于深度低温下,不存在绝缘老化问题,即使在两倍于额定功率下运行也不会影响运行寿命。此外因为不用变压器油而没有火灾危险,即使泄漏,液氮汽化到空气中也不会对环境造成危害。

(5) 超导限流器<sup>[12]</sup>:线路正常工作时限流器呈超导态,当短路发生时,短路电流超过超导材料能承受的临界电流,从而使超导失超变成非导体并呈现大电阻,因此限制了短路电流。超导限流器在抑制短路电流方面的作用显著,可将故障电流限制在系统额定电流 2 倍左右,比常规断路器开断电流小一个数量级。

(6) 超导悬浮列车<sup>[13]</sup>、高速离心机、飞轮储能、航空陀螺仪、电子束磁透镜等等。

同样,超导在弱电方面也因为许多优异特性而获得青睐,主要用于电子、测量和通信领域。超导微波器件提高了基站接收机的抗干扰能力,可以充分利用频率资源,扩大基站能量;能够减少输入信号的损耗,提高了基站系统的灵敏度,从而扩大了基站的覆盖面积,同时改善通话质量,提高数据传输速度。

## 1.3 交流损耗产生原因,影响因素及研究意义

高温超导体有两个临界磁场,即下临界场  $H_{c1}$ , 和上临界场  $H_{c2}$ 。高温超导体的下临界



场较低,典型的YBaCuO的下临界场仅0.1T,但是上临界场很高。因此,大部分高温超导体工作在上临界场与下临界场之间的混合态<sup>[14]</sup>。

在应用于电力行业时,高温超导体需要传导交变的电流和磁场,一般在混合态下工作。此时会有部分磁通侵入到超导体的内部,当电流流经超导体时在磁场的影响下会受到洛伦兹力而移动产生感应电势,在导体内部产生了损耗,不利于超导体的稳定。为了防止磁通运动,人们通过人为地对超导体添加部分杂质或者制造部分缺陷来使导体内部有些地方磁通易通过,另外一些地方磁通难以通过,这让磁通运动受阻,这种阻力学术上称为钉扎力。钉扎力的存在使在交变磁场下入侵超导内部的磁通受到阻碍,产生了磁滞现象,因此,在交变磁场中,超导体内部会产生磁滞损耗<sup>[15]</sup>。

除了超导层本身以外,超导体还包含基带、保护层等等,变化的磁场在复合超导体基带中会感应出涡流而产生涡流损耗。在多芯超导体或者超导带材之间还会由于耦合电流在芯间基底材料中产生了耦合损耗,从本质上来说耦合损耗也是一种涡流损耗。扭绞可使得多芯复合带材中外场的耦合损耗相互抵消,但扭绞一般不能消除晶内损耗及自场损耗<sup>[16-17]</sup>。

高温超导材料的各向异性决定了交流损耗也具有各向异性的特征,交流损耗的各向异性主要取决于钉扎力的各向异性和带材的宽厚之比。在磁场为平行场的情况下,超导体的临界电流密度最大,此时损耗较小;随着磁场与带材表面夹角增大,临界电流密度随之下降,交流损耗变大。不同形状的带材的宽厚比不同,内部退磁因子也不相同,这使得不同形状的超导体在相同磁场下引起的交流损耗也不相等。

交流损耗除了受磁场影响外,还会受到外力的影响<sup>[18]</sup>。应力---应变改变了超导体内部的微观结构,比如超导晶粒的偏移、产生裂纹甚至是断裂等,这使得超导电流传导受到干扰,临界电流减小。对于拉伸应变,当应变小于不可逆限时,超导带材的微观结构改变较小,临界电流基本不变,并且当外加拉伸力消失后,超导还可以恢复到原来的临界电流;当应变大于不可逆限时,超导带材微观结构发生了损坏,并且是不可逆的,当拉伸力消失后,超导的临界电流不再可逆。对于弯曲应变,情况较前者更为复杂,产生的破坏也更大。弯曲应变在超导带材中分布是不均匀的,内侧收到压缩,外侧收到拉伸,当弯曲引起了裂纹后,超导发生不可逆的损坏,临界电流的下降不可逆。

交流损耗会引起高温超导体温度的提高,由图1-2可知,温度的上升引起超导体临界电流的下降,使得超导特性折损。同时交流损耗的存在将加重制冷系统的负担,引起超导装置的不稳定。只有在交流损耗很小的情况下,超导装置的经济性和性能有异性才能得到体现,所以,交流损耗是设计高温超导设备必须考虑的重要因素,减小交流损耗则是超导应用研究的重要方面。

## 1.4 论文主要工作及章节安排

本文阐述了高温超导带材交流损耗的产生机理,主要从仿真和实验两个方面来对第二代高温超导带材的交流损耗进行数值计算和测量。构建出超导带材在有限元仿真软件COMSOL环境下的仿真模型,可以针对不同结构的带材,在不同状态下的交流损耗特性进行研究。同时详细介绍交流损耗测试平台的硬件系统与软件系统,阐述搭建电测法实验平台的过程,并使用搭建的平台对超导带材进行交流损耗测量,与仿真的结果相对应,验证仿真模型的正确性,得到比较精确的不同带材的交流损耗特性。本论文的结论将作为评估超导设备运行效率以及稳定性的重要依据,也将作为之超导电阻型限流器等设备制冷系统中液氮蒸发量一个重要的数据。

具体内容与安排如下:

第一章绪论是整篇论文的综述部分。主要介绍了超导的特性、主要参数,超导在强电和弱电方面的应用及发展前景,阐述了高温超导体交流损耗产生的原因和影响因素,指出了交

流损耗研究的重要性。

第二章是论文使用的仿真软件介绍，主要是讲述了一款有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 的功能及其应用的范围。

第三章是介绍如何在仿真软件的环境下从几何尺寸、参数设定、边界条件以及方程式输入等方面搭建出高温超导带材的仿真模型，达到数值计算交流损耗的目的。

第四章是在仿真模型搭建完的基础上，分析不同形状、不同临界电流密度以及不同根数和不同分布的带材交流损耗的大小，并计算绘制出带材的磁场分布，研究不同分布的带材与交流损耗、磁场分布的关系，对结果进行分析讨论，得出。

第五章首先介绍了实验测试交流损耗的硬件设备及其技术参数，本着减小干扰，提高测量精度，简化测试过程，物尽其用的原则，将设备搭建成交流测量平台。之后利用该平台进行了超导短样的自场损耗测量，将结果与相同仿真模型的计算交流损耗对比，分析实验数据，对重要的结果进行讨论和分析。

第六章是全文的总结，概述了毕设期间的主要工作，总结实验和仿真的主要成果，分析存在的问题，指出不足，并对今后的工作开展进行展望。

## 第二章 软件介绍

### 2.1 COMSOL Multiphysics 简介

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件，由瑞典 COMSOL 公司开发，广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算<sup>[19]</sup>。作为一款多物理场直接耦合分析软件，它适用于模拟科学和工程领域中的各种物理过程，以高效率的计算性能实现了多物理场下的高精度的数值仿真。多物理场的本质就是偏微分方程组（PDEs），所以只要是可以用偏微分方程组描述的物理现象，COMSOL Multiphysics 都能够很好的计算、模拟、仿真。

COMSOL 是基于有限元分析的软件，基本概念是用简单的问题代替复杂问题后再进行求解。有限元法基本思想的提出，以 1943 年纽约大学教授 Richard Courant 开创性工作为标志，他第一次尝试应用定义在三角形区域上的分片连续函数和最小位能原理相结合来求解 St.Venant 扭转问题。直到 20 世纪 60 年代初 Clough 的平面弹性论文中首次使用“有限元法”这个名称<sup>[20]</sup>。经过短短数十年的努力，随着计算机技术的快速发展和普及，有限元方法迅速从结构工程强度分析计算扩展到几乎所有的科学技术领域，成为一种丰富多彩、应用广泛并且实用高效的数值分析方法。

COMSOL 使用有限元法将函数定义在简单几何形状（如二维问题中的三角形或任意四边形）的单元域上，且不必考虑整个定义域的复杂边界条件，这也是有限元法优于其他近似方法的原因之一。对于不同物理性质和数学模型的问题，COMSOL 的求解方法是基本相同的，不同的只是具体公式和自定义的函数等。通常，求解问题的步骤如下：

第一步：绘图。根据实际问题 and 模型的几何尺寸和结构构建仿真软件中的几何求解区域和几何模型。

第二步：表达式设定，求解域设定。COMSOL 会对根据所构造出来的几何模型自动划分区域，分别输入在这些区域中所要求解的变量和表达式。并且 COMSOL 内部带有积分耦合表达式，投影耦合表达式，拉伸耦合表达式等，可以方便使用者套用。如果用户需要输入复杂的表达式，可以在此步骤中利用软件带有的函数功能，将一些特有的函数和曲线先录入到其中，之后便可以直接调用函数名来使用。

第三步：物理量设定。这是联系仿真模型与实际物体的重要环节，该步骤主要是设定上述每一个划分区域的材料特性，COMSOL Multiphysics 软件带有很丰富的材料库，材料库中包含了元素、矿物质、合金、热绝缘材料、半导体和压电材料等材料的数据。拥有多种属性，包括热、结构、电学性能等。这些属性还可以设置为其他参数（通常为温度）的函数，而且这些函数定义还可以被修改或添加。同时，在多物理场直接耦合分析中，这些参数还可以是其他物理场的变量。使用者可以直接从库中导入实际物体的材料属性。通过材料浏览器，用户还可以在同一位置对模型中用到的材料进行管理，并可以利用材料库补充材料属性，建立自己的材料库等；同时使用者在这个步骤中还需要将区域的约束条件输入模型，设定好所有区域的边界条件，使模型运行在实物所处的环境中。

第四步：网格划分。软件带有自动或手动进行结构化/非结构化网格剖分，支持移动网格、自适应网格。用户在进行有限元网格划分时既可让 COMSOL 软件自动划分网格，也可根据区域的形状和重要性等自己选择划分网格的形状和个数。网格越细，计算结果越精确，但计算量和仿真时间都会增大。另外，网格的多少还需要与下面一步的求解步长时间相配合。

第五步：求解。在求解之前需要先设定求解的时间，如在测量交流损耗时，一般需要测

量一周波的损耗,则可以将求解时间设为电流的一个周期。在这边需要注意的是如果网格剖分的很密,则要将最大时间步长设定的小,否则有可能造成计算时得到的结果不收敛,使计算错误。

第六步:最后是各种数据、曲线、图片及动画的分析与导出等的后处理。作为一款图形化的有限元仿真软件,COMSOL 在求解完整个模型后,除了可以显示出用户需要的最终结果,还可以用图像等形式显示运算的不同时刻的变量值,表示成粒子追踪、流线、等位面、最大最小值等形式,方便用户分析仿真的过程,这是实物测量所没有的功能。

综上,COMSOL Multiphysics 软件是基于模型树的流程化操作界面,提高用户的建模分析效率。概括起来可分成三个阶段,前处理、处理和后处理。前处理是建立仿真模型,完成单元网格划分;后处理则是采集处理分析结果,方便用户提取信息,了解计算结果。

## 2.2 COMSOL Multiphysics 应用范围及特征

COMSOL Multiphysics 目前主要包含一个基本模块和 AC/DC 模块、射频模块、声学模块、化学工程模块、地球科学模块、传热模块、微机电系统模块、结构力学模块等 8 个专业模块。用户可以任意组合不同模块的应用模式实现多物理场的耦合模拟。涉及到的领域包括声学、生物科学、化学反应、电磁学、流体动力学、燃料电池、地球科学、热传导、微系统、微波工程、光学、量子力学、射频、半导体、结构力学、波的传播等,获得了广泛的应用。

在应用 COMSOL 时模型定义灵活,材料的属性、源项和边界条件等可以是常数、逻辑表达式、任意变量的函数、甚至是直接代表实测数据的插值函数。总的来说,应用方面主要具备以下一些特征<sup>[21]</sup>:

(1)应用模式广泛而简单——软件带有大量预定义的物理应用模式,范围涵盖从流体流动、热传导、到结构力学、电磁分析等多种物理场,用户可以快速的建立模型。模型内部方程被封装成预定义的应用模式,用户可以在图形界面中方便输入各种物理参数;

(2)模拟过程开放透明——COMSOL 采用完全开放的架构,在图形界面中用户可以轻松修改或添加控制方程,模拟过程各个步骤是开放的,用户可以查看建模视窗中的物理方程,也可以进行修改;

(3)模型库详细丰富——丰富的模型库包含详细说明文档和模型,帮助用户理解数值模拟的作用和意义;

(4)PDE 模式——预定义的多物理场应用模式,能够解决许多常见的物理问题。用户也可以自主选择需要的物理场并定义他们之间的相互关系。如果还未能满足要求,用户也可以输入自己的偏微分方程(PDEs),并指定它与其它方程或物理之间的关系。软件提供标准的 PDE 接口,用户可根据需要修改方程的系数,解决各种复杂问题;

(5)帮助文件详尽——内置专业的动态帮助系统和在线帮助文档方便使用者在仿真的各个阶段解决遇到可能的问题,省去很多查找说明文档的麻烦。

本次论文使用了 COMSOL 的 PDE 功能,在其提供的 PDE 接口下修改成符合超导特性的方程式。通过模型的仿真可以用来分析超导带材在自场下的电流密度、电磁场的分布,探讨影响带材交流损耗的因素,较实验而言仿真在实现上更方便和直观,因此该软件很适用于本课题损耗的研究。

## 2.3 本章小结

本章系统介绍了 COMSOL Multiphysics 软件的适用范围和应用特征,从概括的角度阐述了使用该软件搭建、分析模型的方法和步骤,对之后具体仿真超导带材模型有指导意义。



## 第三章 超导交流损耗仿真模型

### 3.1 超导理论模型

超导理论模型已经有 70 多年的发展历史。总的来说，超导的电磁特性可以通过一系列微观理论中的麦克斯韦等式来表述。超导模型可以分为微观模型和宏观模型两类，其中微观模型有 London 模型<sup>[22]</sup>，BCS 模型和 G-L 模型；宏观模型也称作为临界态模型，是基于实验数据而得出的结论，包括 Bean 模型，Kim 模型和 E-J 指数模型。

#### 3.1.1 London 模型

London 模型是最早的描述超导现象的模型之一，但是只适用于第一代超导。在 1935 年 London 兄弟为了描述迈斯纳特性而建立了该模型。根据模型，定义超导电流密度  $J$  如下：

$$J = n_s e v \quad (3-1)$$

其中  $n_s$  是超导电荷密度， $v$  是电荷运动速度， $e$  为单位电荷量。电荷的运动方程为：

$$m \frac{dv}{dt} = eE \quad (3-2)$$

其中  $m$  为电荷质量， $E$  为电场强度，结合公式(3-1)和 (3-2)，有

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{n_s e^2}{m} E \quad (3-3)$$

将一维麦克斯韦方程关于  $E$ 、 $J$  和  $H$  的关系代入到公式 (3-2) 中可以得到

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 \frac{dH}{dt}}{\partial x^2} = \frac{dH}{dt} \quad (3-4)$$

其中  $\lambda = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}}$ ，称为伦敦穿透深度，指磁场从超导体表面渗透到内部的距离。同

时为了简化公式形式，用  $\dot{H}$  代替  $dH/dt$ ，于是有

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} = \dot{H} \quad (3-5)$$

超导内部的场强为 0，所以对于上式的解可以用下面形式表达：

$$H(x) = H_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (3-6)$$

$H_0$  是超导表面的时变场强。如图 3-1 描述了在超导体内部的磁场。

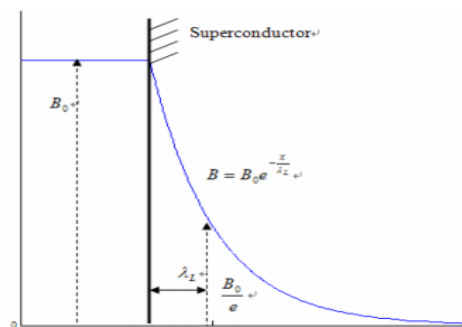


图 3-1 磁场渗透距离

### 3.1.2 G-L 模型

伦敦模型只适用于导体内电子数量固定的情况下，当电子数发生改变时就不再合适<sup>[23]</sup>。这种情况下可以使用 G-L 模型来描述超导的宏观特性。G-L 模型使用一个复杂阶参数  $\Psi$  来表达进入超导内部的深度。

在一个超导体中，它的自由能  $F$  可以表示为：

$$F = F_n + \alpha |\Psi|^2 + \beta \frac{|\Psi|^4}{2} + \frac{1}{2m} |(-i\hbar\nabla - 2eA)\Psi|^2 + \frac{\mu_0 |H|^2}{2} \quad (3-7)$$

其中  $F_n$  为在正常相位下的自由能， $\alpha$  和  $\beta$  是唯相参数， $A$  是电磁场的向量势， $H$  为磁场强度， $\hbar$  是普朗克常量。为了求得  $\Psi$  和  $A$ ，将上式简化为

$$\alpha\Psi + \beta|\Psi|^2\Psi + \frac{1}{2m}(-i\hbar\nabla - 2eA)^2\Psi = 0 \quad (3-8)$$

$$J = \frac{e}{m} [\Psi(-i\hbar\nabla - 2eA)\Psi] \quad (3-9)$$

公式 (3-8) 给出了有序参数  $\Psi$ ，公式 (3-9) 描述了超导电流。当超导体在零磁场环境中时，通过 3-8 我们可以得到均衡值  $\Psi_0$ ：

$$|\Psi_0|^2 = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (3-10)$$

当超导体在低场强中时，等式 3-9 可以变形为：

$$J = -\frac{4e^2}{m} A |\Psi_0|^2 \quad (3-11)$$

结合 (3-11) 和  $\lambda = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}}$  可以得到：

$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{4\mu_0 e^2 \psi_0^2}} \quad (3-12)$$

综上，G-L 模型通过公式 (3-12) 描述了在超导体内部的电流和磁场渗透深度的关系。

### 3.1.3 Bean 模型

Bean 模型<sup>[24]</sup>可用公式 (3-13) 和 (3-14) 来描述，并如图 3-2 和 3-3 所示，假定模型临界电流密度  $j_c$  在超导体内是一个常数， $F_p$  是超导体本征刺痛钉扎力。Bean 模型的表达式为：

$$j(r) = C \quad (3-13)$$

$$\frac{dB}{dx} \propto F_p \propto j_c = C \quad (3-14)$$

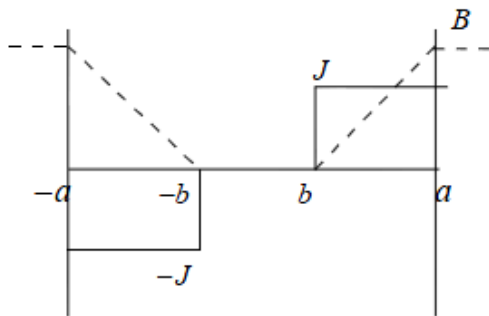


图 3-2 低场下超导内电磁场分布

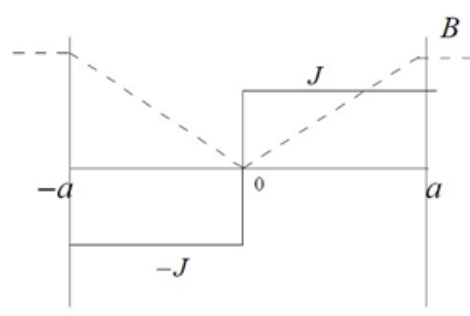


图 3-3 强场下超导内电磁场分布

### 3.1.4 Kim 模型

Kim 模型<sup>[25,26]</sup>可用公式 (3-15) 和 (3-16) 来描述, 模型考虑了临界电流密度与温度和磁场的关系。

$$J_c(B) = \frac{\alpha(T)}{B+B_0} = J_{c0}(T) \frac{1}{1+\frac{B}{B_0}} \quad (3-15)$$

$$\frac{dB}{dx} \propto F_p \propto J_c(B) \quad (3-16)$$

其中  $B_0$  为材料决定的常量有,  $J_{c0}(T) = \alpha(T)/B_0$ 。

### 3.1.5 E-J 指数模型

在指数模型中, 高温超导体的电势  $E$  和电流密度  $J$  用公式(3-17)来表示:

$$E = E_0 \left( \frac{J}{J_c(B)} \right)^n \quad (3-17)$$

指数模型被用来计算超导体内部由外部不均匀磁场引起的感应电流分布, 并可以得到超导体的磁通密度分布图。这是一个介于线性电阻与超导状态之间的一个等效公式, 有如下解释:

- (1) 如果  $n \rightarrow \infty$ , 则当  $J < J_c(B)$  时,  $E=0$ ; 当  $J > J_c(B)$  时,  $E \rightarrow \infty$ , 蜕变成 bean 模型;
- (2) 如果  $n=1$ , 则类似于正常的导体, 电势  $E$  正比于电流密度  $J$ ;
- (3) 如果  $1 < n < \infty$ , 超导体, 表示磁通蠕变。

本次仿真使用的模型是基于超导的宏观特性的, 综合上述介绍的模型, E-J 指数模型相比与其他宏观模型在电流分布求解上适用性更好, 精度更高, 因而本文适用的模型都是基于 E-J 指数模型。

## 3.2 超导交流损耗的数值分析方法

现今的数值分析高温超导带材大多采用在 2D 或者 3D 模型中有限元方法来求解麦克斯韦方程, 适用的主要方程式有: A-V 方程式<sup>[27]</sup>, T- $\Omega$  方程式<sup>[28]</sup>以及 H 方程<sup>[29]</sup>。

### 3.2.1 A-V 方程式

A-V 方程<sup>[27]</sup>由麦克斯韦方程组以及 E-J 指数方程联立而得, 其中  $A$  代表磁场矢量势。方程推导如下:

由麦克斯韦方程组可有:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3-18)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3-19)$$

磁场矢量势  $A$  与磁通  $B$  的关系有:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3-20)$$

又  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , 结合上面三式可以得到:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3-21)$$

两边同时消去 curl, 得到

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (3-22)$$

其中  $V$  为电势, 将(3-22)带入(3-19)有



$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (3-23)$$

$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ，上式简化为：

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (3-24)$$

综上，公式(3-22)、(3-24)以及代表 E-J 指数模型的公式(3-17)共同组成了 A-V 方程式。

### 3.2.2 T- $\Omega$ 方程式<sup>[28]</sup>

方程式中 T 为电流矢量势， $\Omega$  为磁场标量势。由于定义了 T 为电流矢量势，故有

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (3-25)$$

又从(3-19)联合求解得到

$$-\nabla \Omega = \mathbf{H}_s - \mathbf{T} \quad (3-26)$$

总的磁场可以表示成外部磁场和超导内部电流产生的磁场强度之和，即

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_s = \mathbf{H}_0 + \mathbf{T} - \nabla \Omega \quad (3-27)$$

结合(3-27)和公式(3-18)以及  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ ，得到

$$\begin{aligned} \nabla \times \left( \frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{T} \right) &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H}_0 + \mathbf{T} - \nabla \Omega) \\ \nabla \cdot \mu \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H}_0 + \mathbf{T} - \nabla \Omega) &= 0 \end{aligned} \quad (3-28)$$

注意到 E-J 指数关系，上式中的  $\sigma$  应该表示为

$$\sigma = \frac{J_0^n}{E_0} \mathbf{J}^{1-n} = \frac{J_0^n}{E_0} (\nabla \times \mathbf{T})^{1-n} \quad (3-29)$$

解方程组(3-28)和(3-29)需要采用迭代的方法，即通过(3-28)解出结果送给(3-29)，得到  $\sigma$  后再代入(3-28)计算下一步的结果，知道前后得到的两次 T 值足够接近，运算结束。

### 3.2.3 H 方程式

Pecher 和 McCulloch<sup>[29]</sup>将磁场强度 H 作为主要变量运用有限元方法来解决三维空间中的超导问题。通过刻画一条平滑的 E-J 关系曲线来描述第二代超导体，同时使用了 Galerkin 方法解决非线性涡流问题。

考虑一种普通的涡流情况，将区域分为两个或多个求解域，如代表导电材料的区域  $\Omega_c$  和代表绝缘材料的区域  $\Omega_d$ 。此时通过一个时变的磁场  $\mathbf{H}_s$ ，产生了一个渗透到区域  $\Omega_c$  的涡流，用电流密度  $\mathbf{J}_e$  表示。

此方法中解决涡流的关键在于确定磁化强度  $\mathbf{H}_e$ ，因此总的磁场强度可以表示为：

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_e \quad (3-30)$$

一般来说外加电流或者磁场的频率较低，适用于准静态的麦克斯韦方程组，即

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

同时磁场强度 H，磁通密度 B，电流密度 J 以及电势 E 有如下关系：

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \\ \mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J} \end{cases} \quad (3-32)$$

H 方程式描述第二代超导的特性的关键在于使用了公式(3-17)。从公式(3-30)到(3-32)以

及结合(3-17)共同组成了数值计算三维第二代超导数学模型的方法。本文中使用的模型都是基于 H 方程的。

### 3.3 本论文数学仿真模型的建立

在本小结中代表超导特性的公式和参数将被设置完毕，仿真模型建立。如图 3-4，超导截面处在 x-y 截面，电流方向在 z 轴方向。电流感生出 x-y 平面的磁场  $H_x$  和  $H_y$ 。

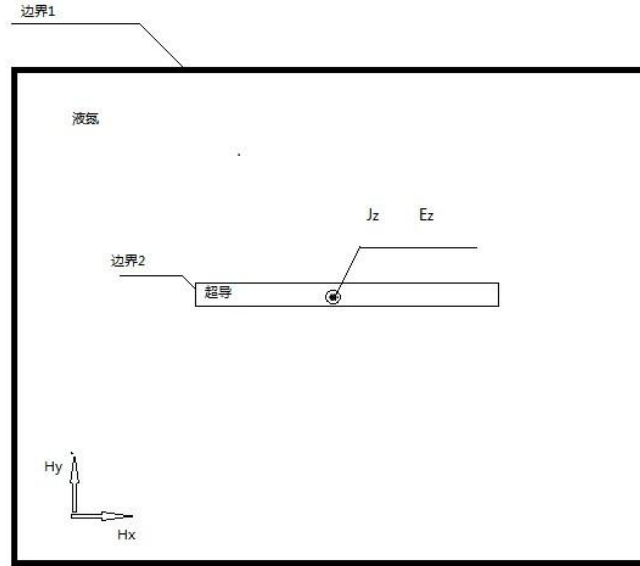


图 3-4 超导体求解区域和边界

根据法拉力定律,并且  $B=\mu_0\mu_r H$ 。由于只有 x-y 平面内产生磁场，所以在二维模型中磁场强度 H 可以分解为两个独立的分量  $H_x$  和  $H_y$ ，也即  $H=[H_x H_y]$ 。将它代入到法拉力定律中可知，

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3-33)$$

而 H 只含有 x 和 y 分量，所以 E 只有 z 轴方向的分量，即  $\mathbf{E}=E_{z\_sc}$ ， $\mathbf{J}=J_{z\_sc}$ 。对于超导区域，此种状态下的  $\mathbf{E}-\mathbf{J}$  指数方程变形为：

$$E_{z\_sc} = E_0 \left( \frac{J_{z\_sc}}{J_c(B)} \right)^n \quad (3-34)$$

其中  $E_0=10^{-4}$  V/m， $J_c(B)$ 是临界电流密度。注意到测量交流损耗时，超导一定是处在超导态的情况下，产生的热量损耗是很有限的，而超导浸没在液氮中，热量的传递不足以使得超导周围的温度变高，因而可以认定整个仿真的环境温度是恒定的，临界电流密度  $J_c$  与温度无关。 $n$  值对于不同超导体来说有不同值， $n$  值越大超导特性越理想，它的确定需要用实验数据来拟合得到，在第五章会有详细的实验数据来进行拟合。

根据安培定理,并且 J 只有 z 轴分量，所以安培定理可以表示为

$$J_{z\_sc} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3-35)$$

将公式(3-35)、(3-34)一同代入到(3-33)，可以得到下面的一组公式，分别代表 x 轴方向的等式和 y 轴方向的等式关系。

$$\frac{\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}}{\frac{\partial(E_0(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y})^n)}{\partial y}} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3-36)$$

$$-\frac{\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}}{\frac{\partial(E_0(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y})^n)}{\partial x}} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3-37)$$

公式(3-36)和(3-37)包含了两个 PDE 以及两个标量变量  $H_x$  和  $H_y$ ，将此函数公式加上适当的边界条件就可以输入到有限元软件 COMSOL 中求解超导区域的问题了。

对于非超导区域，比如液氮区和银层区域等，可以直接利用欧姆定律，即  $E=\rho J$ ，相应的非超导区公式为：

$$\frac{\partial(\rho(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}))}{\partial y} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3-38)$$

$$-\frac{\partial(\rho(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}))}{\partial x} = -\mu_0\mu_r \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3-39)$$

在外边界处，设定狄利克雷边界条件，有

$$\left\{ \begin{array}{l} H_x = f_x(t) \\ H_y = f_y(t) \end{array} \right. \quad (3-40)$$

其中  $f_x(t)$  和  $f_y(t)$  是刻画外部区域磁场在  $x$  轴和  $y$  轴方向随时间变化的分量函数。

本次仿真主要任务时数值计算带材的交流损耗，只要对通电过程中，全区域的产生热量进行积分，并对时间积分，便可以得到带材单周期的功率损耗情况。每一点产生的热量  $Q$  可以用公式

$$Q_{sc} = |E_{z\_sc} * J_{z\_sc}| \quad (3-41)$$

来计算得到。于是单周期的功率损耗可以表示为：

$$ac\_loss = \int_0^T (intQ_{sc}) dt \quad (3-42)$$

其中  $intQ_{sc} = \int Q_{sc} ds$  是区域产生的热量。

至此，搭建模型的基本理论都已经完善，只需要按第二章中 COMSOL 仿真步骤设置模型特性：

- 1、绘制几何模型；
- 2、表达式的确定：将公式(3-35)和(3-41)输入标量表达式,将(3-34)以及  $E=\rho J$  输入到求解域表达式。
- 3、求解域变量积分：在每个求解区域中将  $Q_{sc}$  做面积分，可以得到该区域产生的热量。
- 4、求解域方程式及约束条件：(3-38)和(3-39)作为求解超导层磁场强度  $H$  的核心公式输入到模型中，同时需要限定一些约束条件，如电流大小以及流入、流出方向等。
- 5、边界条件设定，如公式(3-40)。

### 3.4 本章小结

本章主要介绍了超导带材模型的发展和变化以及目前建立超导临界态模型的几种常用数学方法,着重讲述了本次仿真使用的  $H$  方程的推导过程以及如何从几何模型、方程式、边界条件等多个方面讲  $H$  方程运用到有限元仿真软件中去。本章还给出了交流损耗在仿真软件中的计算原理和计算公式,对模型的仿真结果以及与实验对比情况将在第四章和第五章进行详细的介绍。

## 第四章 超导带材交流损耗的仿真

YBCO 涂层导体在美国、日本、欧洲各国以及韩国等国家都受到大量人力、物力、财力的支持研究。美国和日本起步较早，在国际上处于领先地位，欧洲紧随其后。在国内，上海交大物理系科研团队历时三年成功掌握了第二代高温超导带材的制备工艺，实现了国内超导带材领域的新突破，使我国跻身该技术领域国际先进行列，成为继美国、日本、德国等国后掌握该技术的国家。目前，第二代超导带材主要有 2 种结构：第一种是无铁磁基带的超导带材；第二种是铁磁基带的超导带材。本章在第三章模型搭建完善的基础上，仿真了未加铁磁基带的带材，并与理论 Norris 带材曲线相比较，验证准确性。在这基础上从简单到复杂，研究了单根、双根到多根带材的仿真情况，分析讨论了带材的根数以及排列对周围电磁场的影响，探索其对每根带材交流损耗大小的关系。

### 4.1 超导带材介绍

下图为美国超导公司生产的带材（AMSC），简称美超，具有轧制辅助双轴织构基带，各个层的宽度和厚度可以见表 4-1：

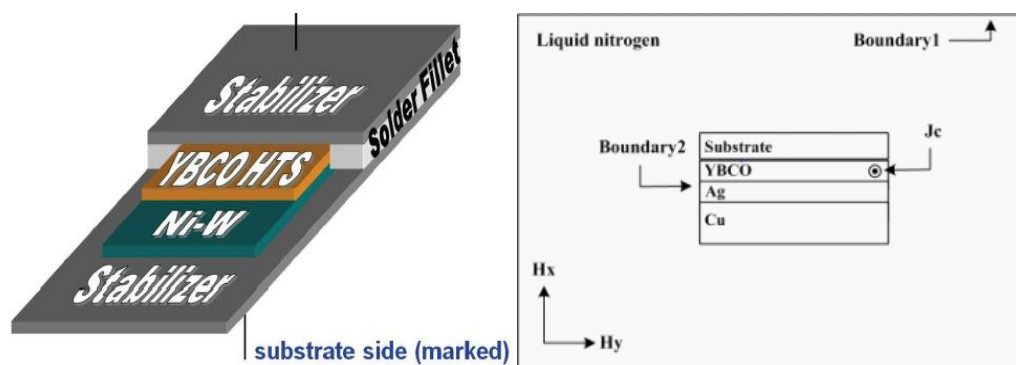


图 4-1 AMSC 超导带材结构示意图

表 4-1 超导带材各层参数

| 参数名称     | 数值.       |
|----------|-----------|
| YBCO 层厚度 | 0.004[mm] |
| 银层厚度     | 0.004[mm] |
| 超导带材宽度   | 4.5[mm]   |

图 4-2 为美国 Superpower 公司生产的第二代高温超导带材，较 AMSC 优点在于没有铁磁基带，但是机械强度不如前者。

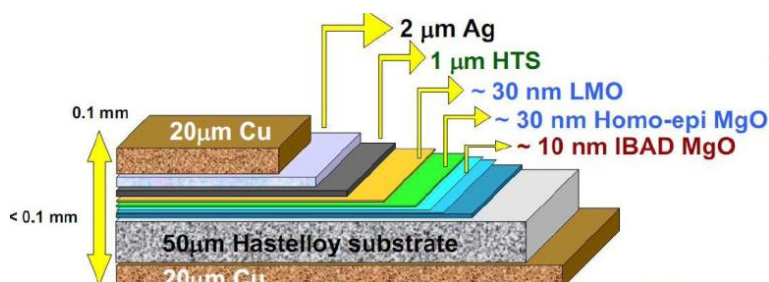


图 4-2 Superpower 超导带材结构示意图

本论文中主要研究对象是超导层，因此仿真研究对象和 Superpower 的带材一样不考虑铁磁基带。

## 4.2 单根带材的交流损耗

### 4.2.1 基于美超带材参数仿真

带材宽度为 4.5mm，临界电流  $I_c=87A$ 。模型仅包含带材中的超导层，未加上含铁磁材料的基带，因此并不是美超带材实际的损耗。改变加载在超导横截面的电流，可以得到如表 4-2 的单周期每米带材上的交流损耗。

表 4-2  $I_c=87A$  Superpower 带材单周期内交流损耗

| $I_{app}(A)$ | ac_loss (J/m/cycle) |
|--------------|---------------------|
| $0.1I_c$     | 3.57E-10            |
| $0.2I_c$     | 1.02E-06            |
| $0.3I_c$     | 4.46E-06            |
| $0.4I_c$     | 1.37E-05            |
| $0.5I_c$     | 3.23E-05            |
| $0.6I_c$     | 6.69E-05            |
| $0.7I_c$     | 1.25E-04            |
| $0.8I_c$     | 2.25E-04            |
| $0.9I_c$     | 3.79E-04            |
| $1I_c$       | 6.38E-04            |
| $1.1I_c$     | 1.10E-03            |
| $1.2I_c$     | 2.60E-03            |

绘制 I-ac\_loss 曲线，可以得到如图 4-3

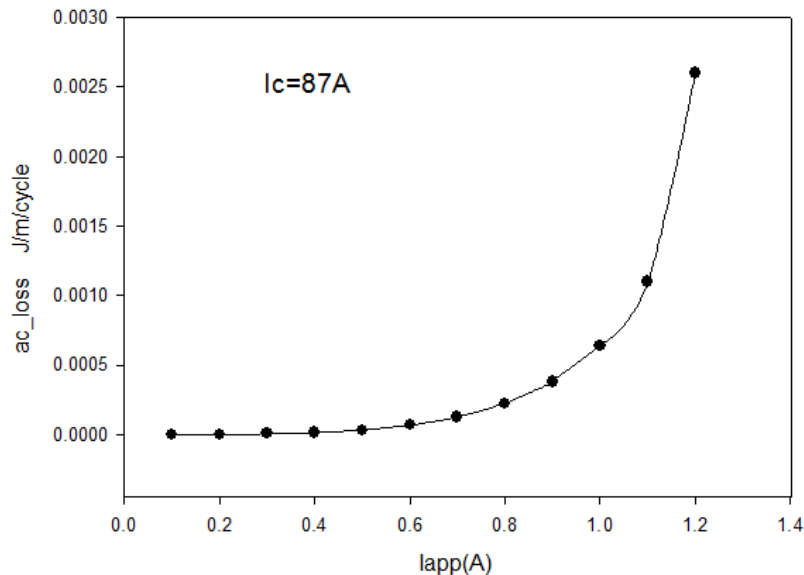


图 4-3 带材交流损耗

为了验证仿真结果的准确性需要将此仿真结果与 Norris 公式<sup>[30]</sup> (4-1) 对比

$$Q_{sf} = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \{ (1-F) \ln(1-F) + (1+F) \ln(1+F) - F^2 \} \quad (4-1)$$

其中  $F = \frac{I}{I_c}$ 。对比图 4-4 如下：



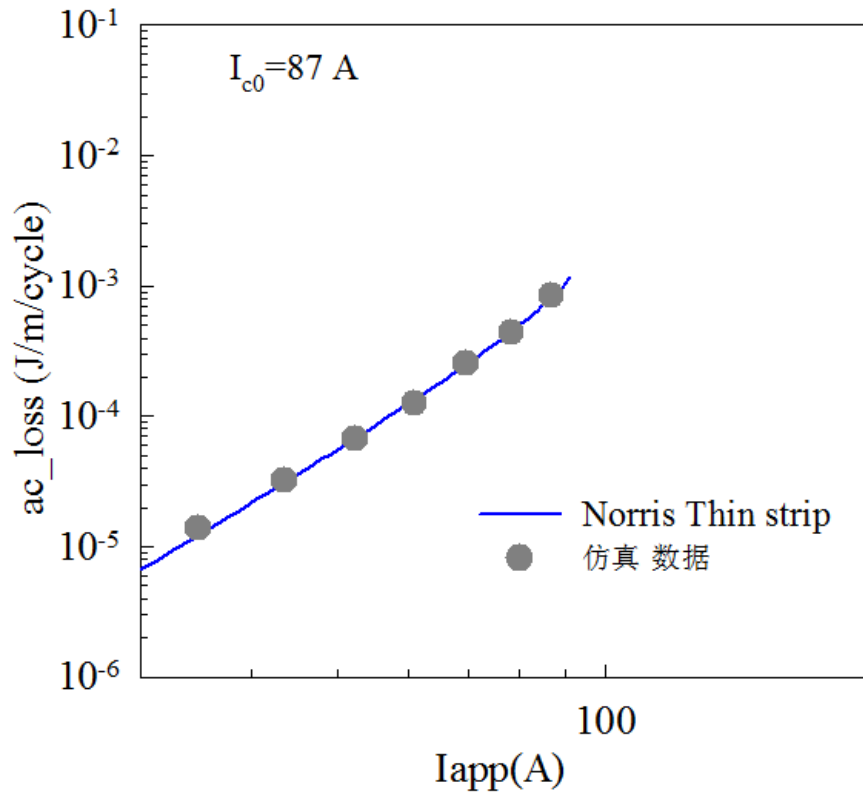


图 4-4 仿真值与理论值对比

图中的纵坐标为对数坐标，可以看出，仿真数据和理论值拟合的很好，验证了通过 H 方程式在 COMSOL 仿真软件软件中搭建模型的正确性。值得注意的是，此模型只是对超导带材中的超导层进行了仿真。

#### 4.2.2 上交大带材仿真

上海交大物理系带材的宽度设计为 10mm，临界电流比美超的要高，并且不含有铁磁性强的基带。受不同时间生产工艺以及生产批次的影响，临界电流从 150A 到 330A 不等，此次仿真选取了临界电流为 150A、200A 以及 330A 进行了数值计算。如下表

表 4-3  $I_c=150A$  交大带材单周期内交流损耗

| $I_{app}(A)$ | $ac\_loss (J/m/cycle)$ |
|--------------|------------------------|
| $0.1I_c$     | 2.33E-07               |
| $0.2I_c$     | 3.91E-06               |
| $0.3I_c$     | 1.37E-05               |
| $0.4I_c$     | 4.28E-05               |
| $0.5I_c$     | 9.31E-05               |
| $0.6I_c$     | 1.88E-04               |
| $0.7I_c$     | 3.52E-04               |
| $0.8I_c$     | 6.18E-04               |
| $0.9I_c$     | 1.04E-03               |
| $1.0I_c$     | 1.73E-03               |
| $1.1I_c$     | 2.93E-03               |
| $1.2I_c$     | 5.75E-03               |

表 4-4  $I_c=200A$  交大带材单周期内交流损耗

| $I_{app}(A)$ | $ac\_loss (J/m/cycle)$ |
|--------------|------------------------|
| $0.1I_c$     | $4.50E-07$             |
| $0.2I_c$     | $6.40E-06$             |
| $0.3I_c$     | $2.39E-05$             |
| $0.4I_c$     | $6.83E-05$             |
| $0.5I_c$     | $1.58E-04$             |
| $0.6I_c$     | $3.21E-04$             |
| $0.7I_c$     | $5.99E-04$             |
| $0.8I_c$     | $1.05E-03$             |
| $0.9I_c$     | $1.77E-03$             |
| $1.0I_c$     | $2.92E-03$             |
| $1.1I_c$     | $4.86E-03$             |
| $1.2I_c$     | $8.93E-03$             |

表 4-5  $I_c=330A$  交大带材单周期内交流损耗

| $I_{app}(A)$ | $ac\_loss (J/m/cycle)$ |
|--------------|------------------------|
| $0.1I_c$     | $1.23E-06$             |
| $0.2I_c$     | $1.70E-05$             |
| $0.3I_c$     | $6.26E-05$             |
| $0.4I_c$     | $1.79E-04$             |
| $0.5I_c$     | $4.12E-04$             |
| $0.6I_c$     | $8.32E-04$             |
| $0.7I_c$     | $1.55E-03$             |
| $0.8I_c$     | $2.70E-03$             |
| $0.9I_c$     | $4.52E-03$             |
| $1.0I_c$     | $7.38E-03$             |
| $1.1I_c$     | $1.21E-02$             |
| $1.2I_c$     | $2.07E-02$             |

从上面三个表格大致可以看出随着临界电流和单位周期内的交流损耗的关系, 将它们放入同一张图中可以看到:

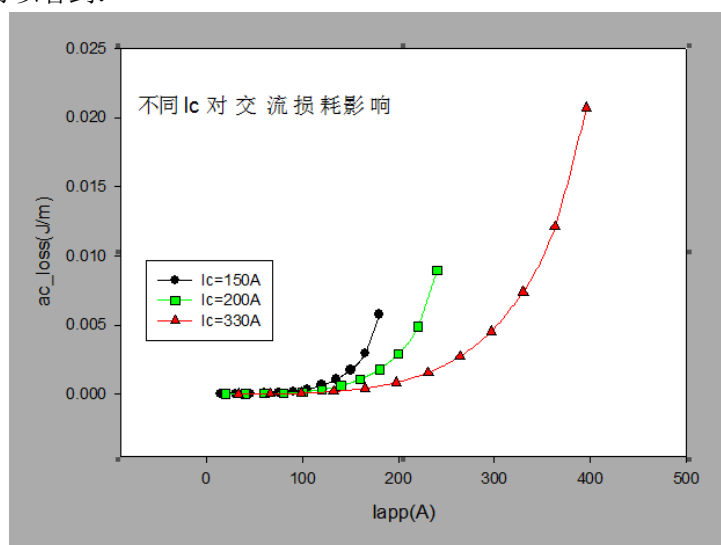


图 4-5 相同传导电流下交流损耗对比

从图中可以发现,流经超导带材的实际电流相同时,临界电流越大交流损耗越小。所以随着技术和工艺的发展,超导带材临界电流越大不仅能适应容量更大的系统还能在相同容量下的系统中减少交流损耗。

#### 4.2.3 从磁场角度看带材损耗

上面两节分别介绍了以美超尺寸参数为基准的带材模型和交大物理系带材数值仿真交流损耗的结果,这一节将重点利用软件的描述电磁场分布功能,从磁场的分布看交流损耗的产生。

如图 4-6 为软件中的整个带材表面的磁场分布情况,但没有具体的磁场数值。图 4-7 为  $I_c=87A$  带材加  $0.7I_c$  的电流,在流入电流最大的时刻  $t=0.015s$  情况下超导层上表面磁场强度  $H$  分布情况,其中  $x$  轴代表带材的宽度,即带材  $4.5mm$ ,从  $x$  轴  $-2mm$  到  $+2.5mm$ ;  $y$  轴代表磁场强度的大小。图 4-8 为交大物理系带材  $I_c=150A$ ,宽度为  $10mm$  情况。

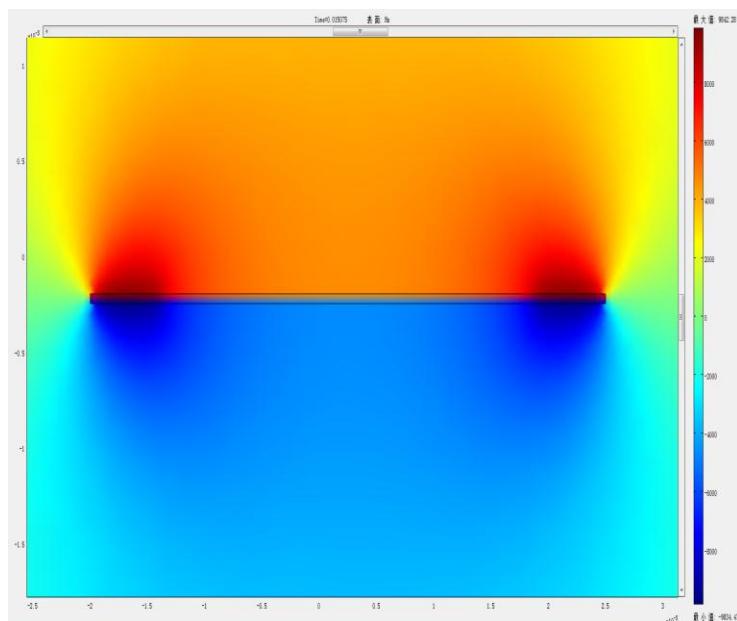


图 4-6 带材表面磁场分布图

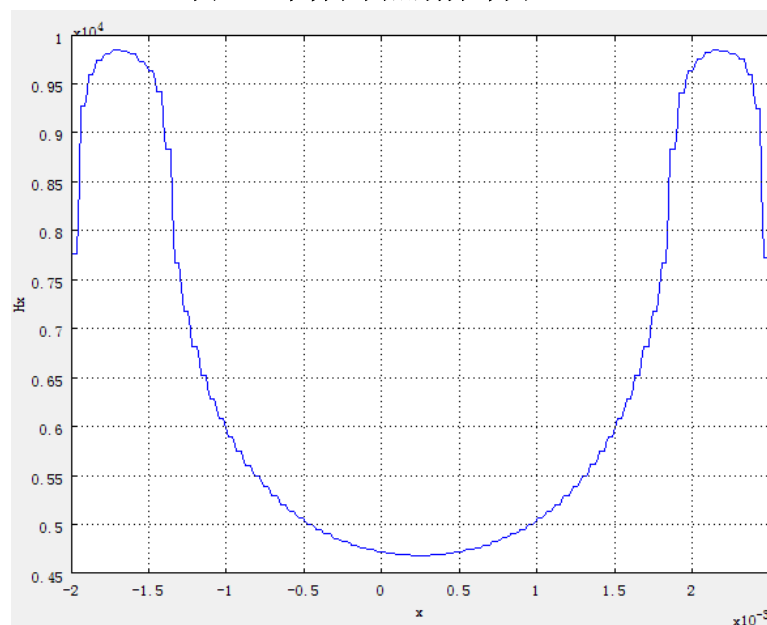


图 4-7 美超参数模型带材上表面磁场分布

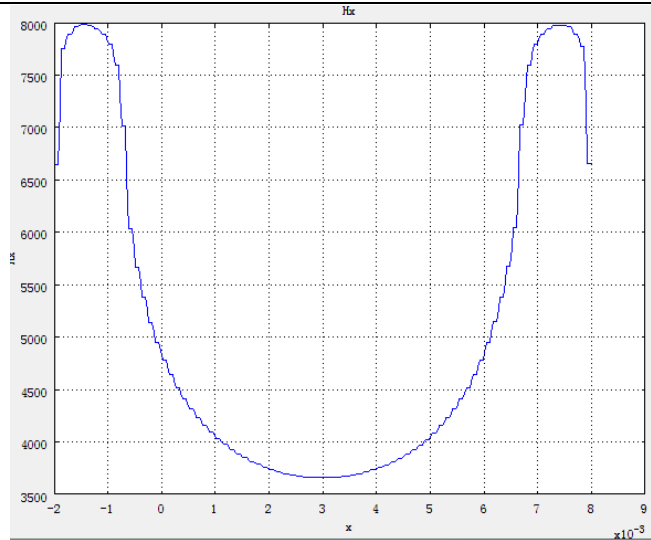


图 4-8 物理系带材上表面磁场分布

从上面两张图中可以清楚的看到，不论是美超带材还是物理系的带材，电流在超导带材中产生的磁场不是均匀分布的，而是磁场强度集中在带材的两端，很长一段的中间磁场强度还不足两端的一半，也就是说超导带材中流经的电流主要分布在两端，从中间流过的较少。根据公式：

$$E_{z\_sc} = E_0 \left( \frac{J_{z\_sc}}{J_c} \right)^n \quad (3-34)$$

$$Q_{sc} = |E_{z\_sc} * J_{z\_sc}| \quad (3-41)$$

$$ac\_loss = \int_0^T (int Q_{sc}) dt \quad (3-42)$$

其中  $int Q_{sc} = \int Q_{sc} ds$  是区域产生的热量， $n=21$ 。由于  $J_{z\_sc}$  集中在两端， $E_{z\_sc}$  以及  $Q_{sc}$  在带材两端的值相应变得很大，所以可以得出结论：带材交流损耗的产生主要由两端引起，中间只占整个损耗的一小部分。

### 4.3 不同的根数及排列对交流损耗的影响

在上一节单根带材仿真的基础上，本节将重点讨论在稍微复杂情况下带材的交流损耗变化，并与单根的仿真值相互比较，为实际安装带材的分布提供一些有用的结论。

#### 4.3.1 双根

##### 4.3.1.1 水平排列

将两根带材水平放置，通以一进一出两个方向的电流  $I=0.7I_c$ ，分别测量两根带材中的交流损耗值，由于结构完全的对称，所以两根的交流损耗值大小一样。与单根  $I=0.7I_c$  相比较，之后再改变水平放置两根带材之间的距离，从 3mm 到 25mm，再分别求出它们的损耗与单根损耗的比值，绘制成图表。结果如下：

表 4-6 水平距离改变后交流损耗值

| D (mm) | ac_loss (J/m/cycle) |
|--------|---------------------|
| 3      | 5.13E-04            |
| 4      | 4.85E-04            |
| 5      | 4.63E-04            |
| 8      | 4.20E-04            |
| 10     | 4.02E-04            |
| 12     | 3.89E-04            |

续表 4-6

| D (mm) | ac_loss (J/m/cycle) |
|--------|---------------------|
| 15     | 3.77E-04            |
| 18     | 3.70E-04            |
| 20     | 3.65E-04            |
| 25     | 3.62E-04            |

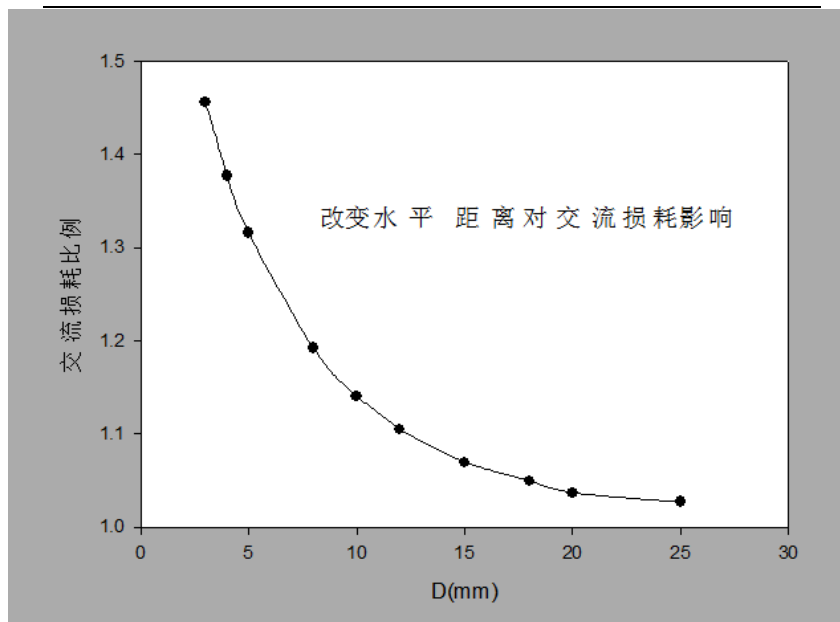


图 4-9 水平距离改变对交流损耗影响

绘制成如图 4-9 的曲线，可以清楚的看出，两根带材水平放置后，由于对方都产生了对于各自来说的外界磁场，使得每根的交流损耗值都要比单根的损耗要大。从曲线变化的趋势可以得到，随着两根带材之间的距离变大，交流损耗的比例越来越接近于 1，也就是说当两根带材之间的距离超过约 10mm 后互相的影响就基本可以忽略，这对之后的带材安装提供了一条信息。

#### 4.3.1.2 垂直排列

将两根带材垂直放置，通以一进一出两个方向的电流  $I=0.7I_c$ ，分别测量两根带材中的交流损耗值，由于结构完全的对称，所以两根的交流损耗值大小一样。与单根  $I=0.7I_c$  相比较，之后再改变水平放置两根带材之间的距离，从 2mm 到 25mm，再分别求出它们的损耗与单根损耗的比值，绘制成图表。结果如下：

表 4-7 垂直距离改变后交流损耗值

| D (mm) | ac_loss (J/m/cycle) |
|--------|---------------------|
| 2      | 6.84E-05            |
| 4      | 1.40E-04            |
| 6      | 1.96E-04            |
| 8      | 2.35E-04            |
| 10     | 2.63E-04            |
| 12     | 2.78E-04            |
| 14     | 2.98E-04            |
| 16     | 3.09E-04            |
| 20     | 3.18E-04            |
| 25     | 3.30E-04            |

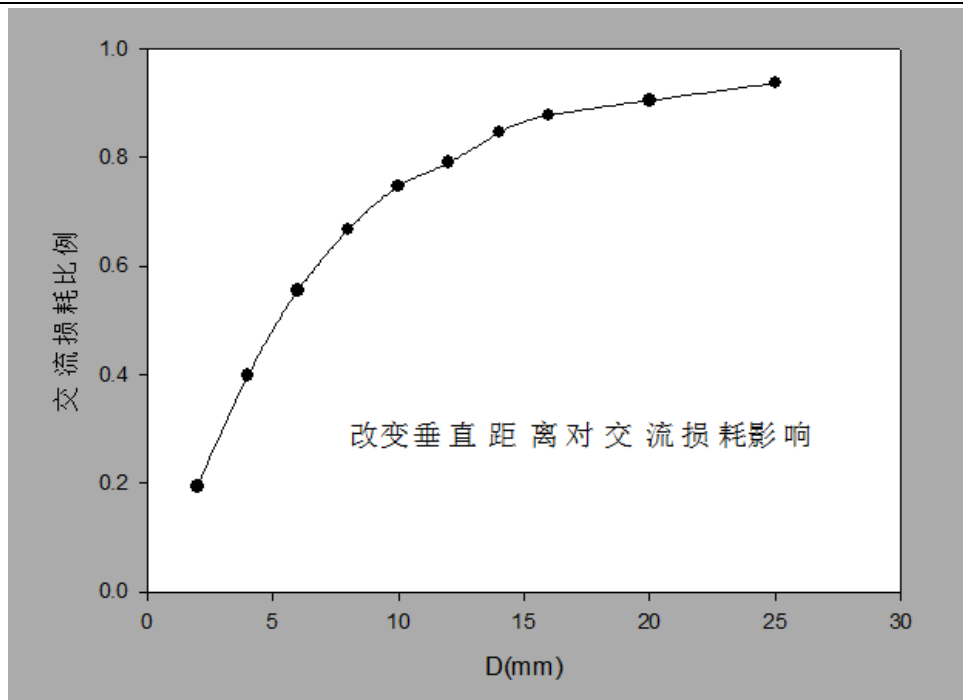


图 4-10 垂直距离改变对交流损耗影响

绘制成如图 4-10 的曲线，可以清楚的看出，两根带材垂直放置后，由于对方都产生了对各自来说的外界磁场，使得每根的交流损耗值都要比单根的损耗要小。从曲线变化的趋势可以得到，随着两根带材之间的距离变大，交流损耗的比例越来越接近于 1。对今后实际应用的指导意义在于，当设计两根带材垂直放置时，并且通入的电流方向相反时，可以尽量将两者的距离缩小，既能节省空间又能减少交流损耗的产生。

#### 4.3.1.3 角度改变

将带材间的距离固定为 10mm，然后固定其中一根，改变另外一个带材摆放的角度，如图 4-11。



图 4-11 带材角度变化

通以一进一出两个方向的电流  $I=0.7I_c$ ，分别测量两根带材中的交流损耗值，由于结构不再对称，两者的交流损耗值不同，需要分别列出左侧和右侧的损耗值。之后改变右侧带材旋转的角度从 0° 到 90°，计算两根交流损耗与单根损耗的比值，绘制成图表，结果如下：

表 4-8 角度变化后交流损耗值

| Degree (°) | 左侧 ac_loss (J/m) | 右侧 ac_loss (J/m) |
|------------|------------------|------------------|
| 0          | 4.94E-04         | 4.95E-04         |
| 20         | 4.88E-04         | 4.83E-04         |
| 30         | 4.89E-04         | 4.70E-04         |
| 45         | 4.94E-04         | 4.41E-04         |



| Degree (°) | 左侧 ac_loss (J/m) | 右侧 ac_loss (J/m) |
|------------|------------------|------------------|
| 50         | 4.96E-04         | 4.30E-04         |
| 60         | 5.00E-04         | 4.03E-04         |
| 70         | 5.06E-04         | 3.74E-04         |
| 80         | 5.12E-04         | 3.44E-04         |
| 90         | 5.31E-04         | 3.15E-04         |

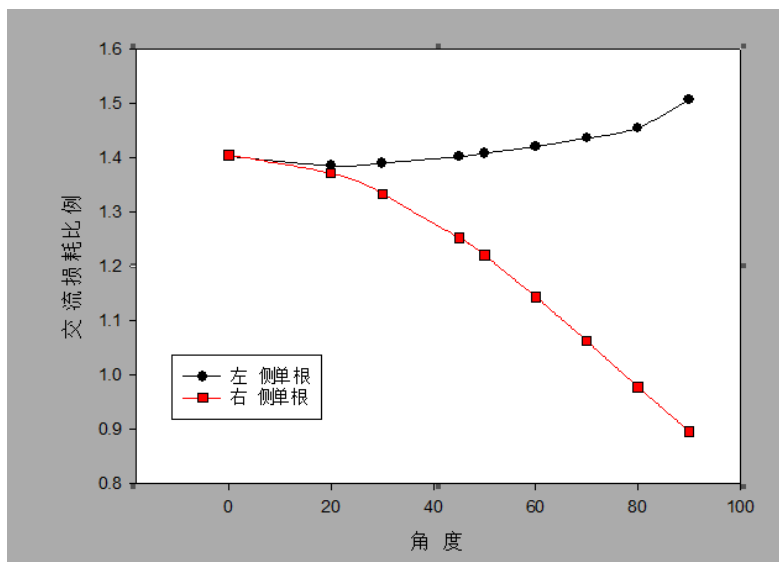


图 4-12 角度变化引起的交流损耗

图 4-12 可以看出,随着右侧带材角度的变化两根带材的损耗值也发生了改变。其中固定不动的带材产生的损耗不断变大,但是发生的改变十分小,只有几乎百分之十的上升;但是右侧不断变化角度的带材交流损耗一直在下降,并且改变的幅度很大,到最后的交流损耗甚至比单根带材产生的还要小。对于此可以有这样的指导意义:当带材之间的距离固定时,可以适当改变其中一根的角度,这种形式在空间上可能不如两根带材水平摆放利用率那么高,但是却能减小带材的中损耗。

#### 4.3.1.4 结果分析与讨论

从上两节可以看出双根带材在水平放置、垂直放置和一定角度摆放时交流损耗或增大、减小,下面从电磁场的角度分别分析形成交流损耗变化的原因。

##### (1) 水平距离改变影响

图 4-13 与图 4-14 分别为物理系单根 ( $I_c=150A$ ,  $I_{app}=0.7I_c$ ,  $t=0.015s$ ) 磁场与双根 (水平间距为 6mm) 左右磁场的对比图,其中图 4-14 中右侧的带材流入的电流方向与单根相反,因而磁场的数值为负。从图中可以看到由于带材之间的相互影响,各自的磁场分布相对于单根发生了畸变,由原来的对称分布变为一边变小一边升高。分析指数型公式

$$E_{z_{sc}} = E_0 \left( \frac{J_{z_{sc}}}{J_c(B)} \right)^n$$

其中  $n=21$ , 假设变小的幅度与变大的幅度相同,则经过指数的运算,磁场变小的一侧所减小的损耗总是小于磁场变大的一侧所增大的损耗。因而使得双根各自的损耗都要比单根大。

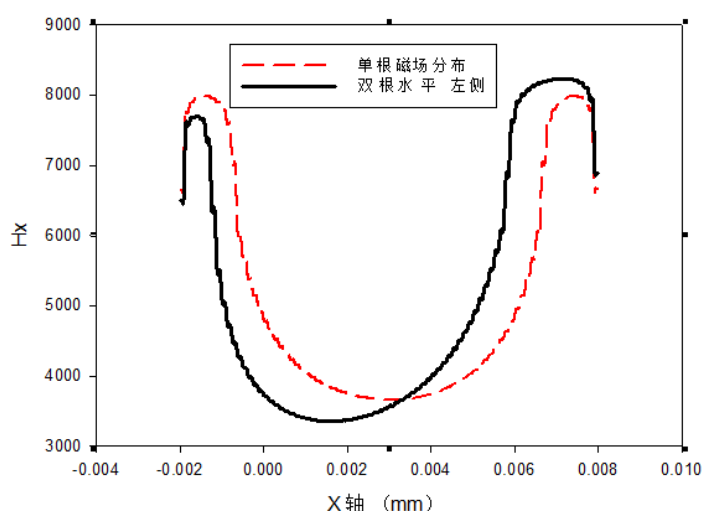


图 4-13 单根磁场与双根左侧磁场对比

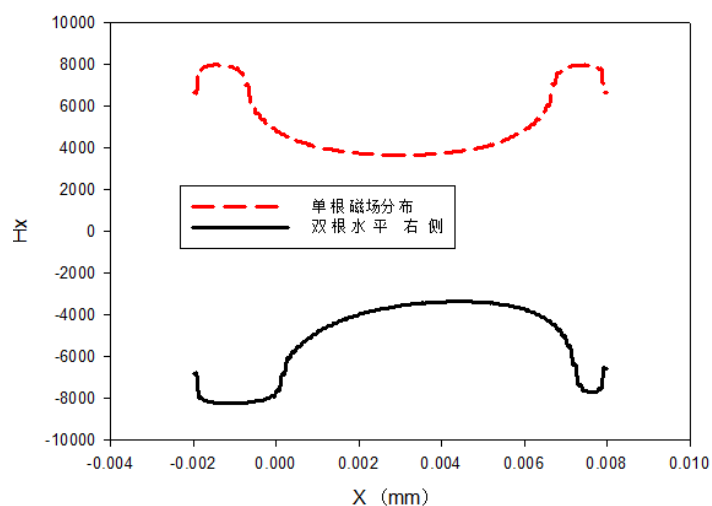


图 4-14 单根磁场与双根右侧磁场对比

## (2) 垂直距离改变影响

图 4-15 与图 4-16 分别为单根 ( $I_c=150\text{A}$ ,  $I_{app}=0.7I_c$ ,  $t=0.015\text{s}$ ) 磁场与双根 (垂直间距为  $6\text{mm}$ ) 上下磁场的对比图, 其中图 4-16 中下方的带材流入的电流方向与单根相反, 因而磁场的数值为负。从图中可以看到由于带材之间的相互影响, 各自的磁场分布相对于单根发生都有了很大的减小, 磁场分布更加的均匀, 因此仿真得到的交流损耗比单根小很多, 特别是两根间距越小, 磁场数值越小, 损耗越小。

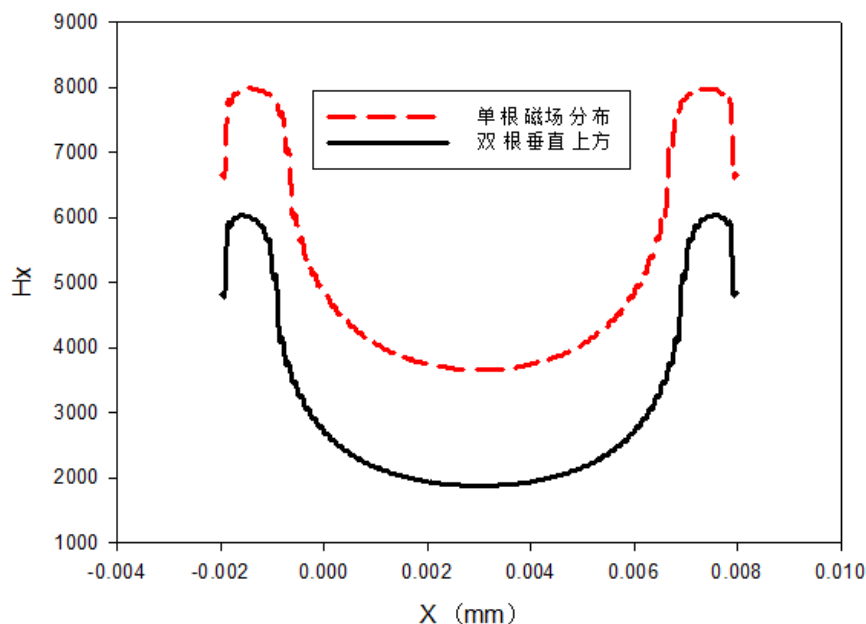


图 4-15 单根磁场与双根上方磁场对比

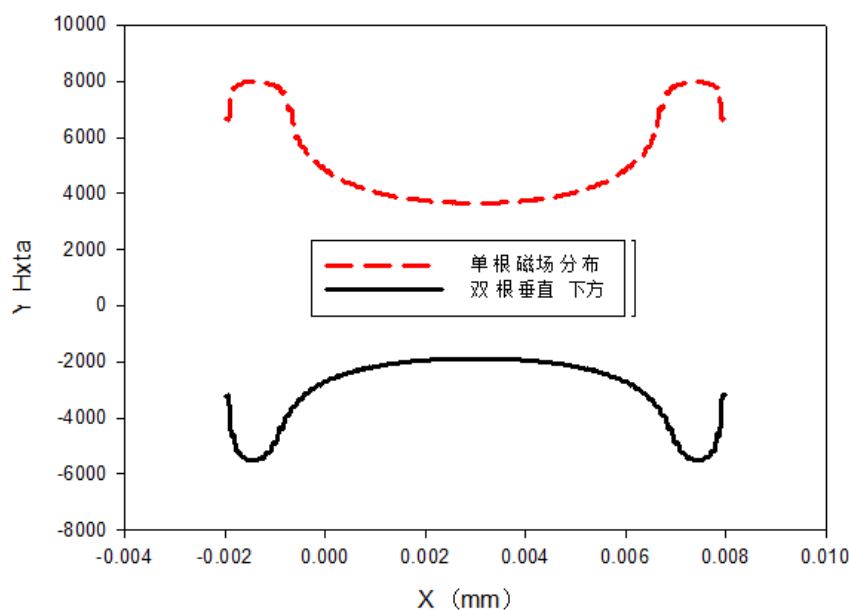


图 4-16 单根磁场与双根下方磁场对比

### (3) 角度变化影响

图 4-17 与图 4-18 分别为单根 ( $I_c=150\text{A}$ ,  $I_{app}=0.7I_c$ ,  $t=0.015\text{s}$ ) 磁场与双根 (水平间距为  $10\text{mm}$ , 角度为  $45^\circ$ ) 左右磁场的对比图。从图中可以看到图 4-17 与 4-13 类似, 由于带材之间的相互影响, 磁场分布相对于单根发生了畸变, 由原来的对称分布变为一边变小一边升高, 交流损耗值变大。而图 4-18 则与前面所有的对比图不同, 双根角度变化中右侧 (角度变化的一根) 的磁场出现了两个方向, 损耗大小不能从图形的趋势来判断, 但是从实验结果来分析, 角度发生变化的带材相同情况下产生的损耗小于单根, 磁场的分布向着有利于减小损耗的方向发展, 并且角度旋转越大, 损耗减小的越多。

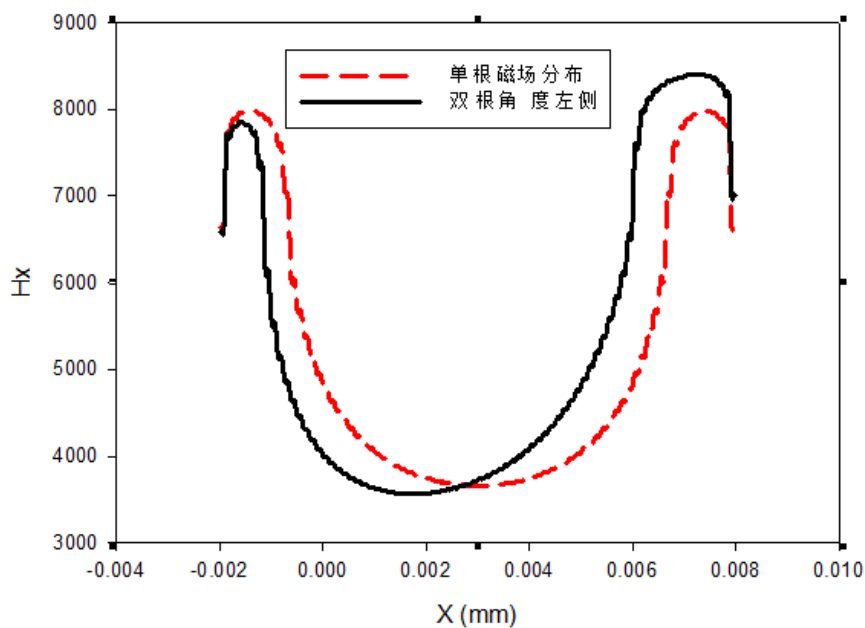


图 4-17 单根磁场与双根角度变化左侧对比

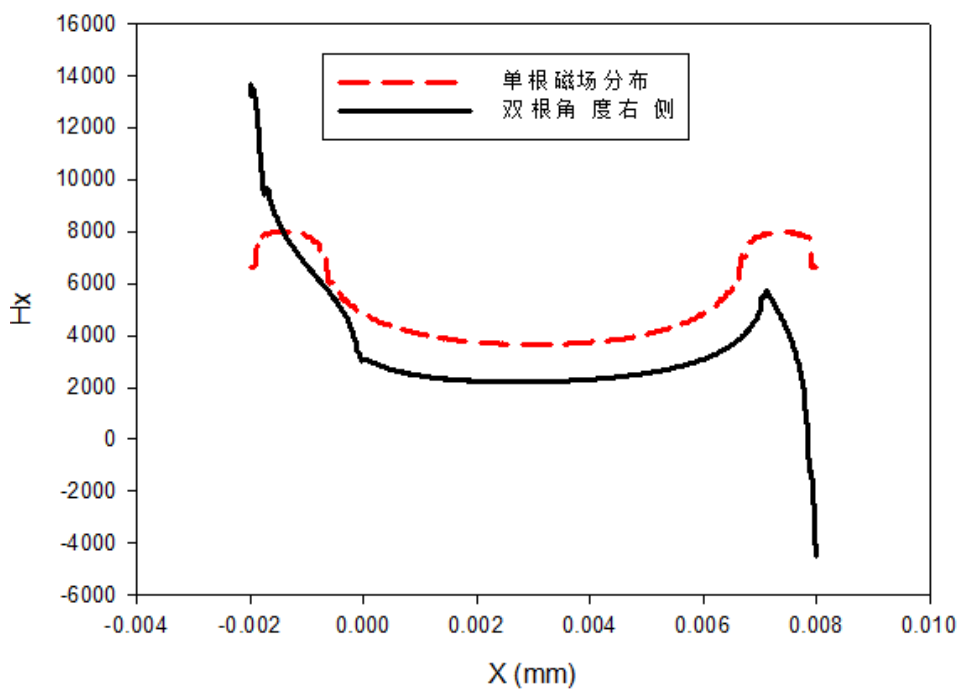


图 4-18 单根磁场与双根角度变化右侧对比

### 4.3.2 三根

#### 4.3.2.1 水平排列

将三根带材水平放置，通以一进两出三个方向的电流  $I=0.7I_c$ ，分别测量三根带材中的交流损耗值，由于结构不完全的对称，两边的两根的交流损耗值大小一样，中间的一根与其他两根不同，需要分别列出中间和两侧的损耗值。与单根  $I=0.7I_c$  相比较，之后再改变水平放置三根带材之间的距离，从 2mm 到 25mm，再分别求出它们的损耗与单根损耗的比值，绘制成图表。结果如下：

表 4-9 三根带材水平距离变化交流损耗值

| D (mm) | 两侧 ac_loss (J/m) | 中间 ac_loss (J/m) |
|--------|------------------|------------------|
| 2      | 6.18E-04         | 7.25E-04         |
| 4      | 5.11E-04         | 5.57E-04         |
| 6      | 4.65E-04         | 4.86E-04         |
| 8      | 4.38E-04         | 4.65E-04         |
| 10     | 4.21E-04         | 4.22E-04         |
| 12     | 4.17E-04         | 4.13E-04         |
| 15     | 4.05E-04         | 3.97E-04         |
| 18     | 3.97E-04         | 3.86E-04         |
| 20     | 3.86E-04         | 3.74E-04         |

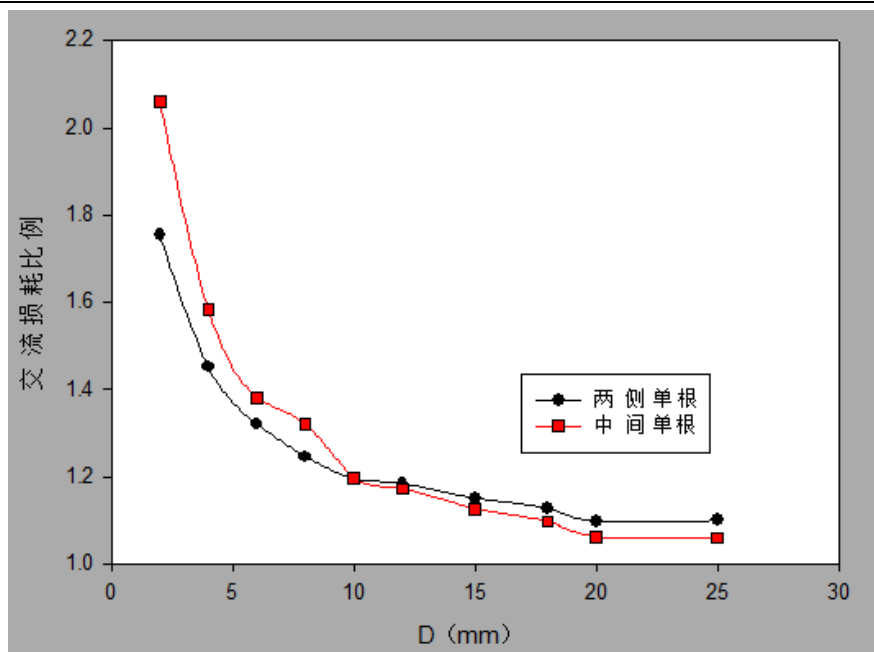


图 4-19 三根水平距离对交流损耗影响

绘制如图 4-19，随着三根带材之间的水平距离的加大，各自的交流损耗值都在不断的减小。其中最中间的带材交流损耗在距离小时很大，但随着距离的增大下降幅度也最大，特别是在间隔达到 10mm 之后，中间带材的损耗小于两侧带材。

#### 4.3.2.2 垂直排列

将三根带材上下垂直放置，通以一进两出三个方向的电流  $I=0.7I_c$ ，分别测量三根带材中的交流损耗值，由于结构不完全的对称，上下两根的交流损耗值大小一样，中间的一根与其他两根不同，需要分别列出中间和两侧的损耗值。与单根  $I=0.7I_c$  相比较，之后再改变水平放置三根带材之间的距离，从 2mm 到 25mm，再分别求出它们的损耗与单根损耗的比值，绘制成图表。结果如下：

表 4-10 三根带材水平距离变化交流损耗值

| D (mm) | 上下 ac_loss (J/m) | 中间 ac_loss (J/m) |
|--------|------------------|------------------|
| 2      | 1.98E-04         | 2.56E-05         |
| 4      | 2.42E-04         | 5.23E-05         |
| 6      | 2.68E-04         | 1.00E-04         |
| 8      | 2.90E-04         | 1.47E-04         |
| 10     | 3.06E-04         | 1.85E-04         |

| D (mm) | 上下 ac_loss (J/m) | 中间 ac_loss (J/m) |
|--------|------------------|------------------|
| 12     | 3.19E-04         | 2.16E-04         |
| 15     | 3.32E-04         | 2.48E-04         |
| 18     | 3.40E-04         | 2.70E-04         |
| 20     | 3.44E-04         | 2.80E-04         |

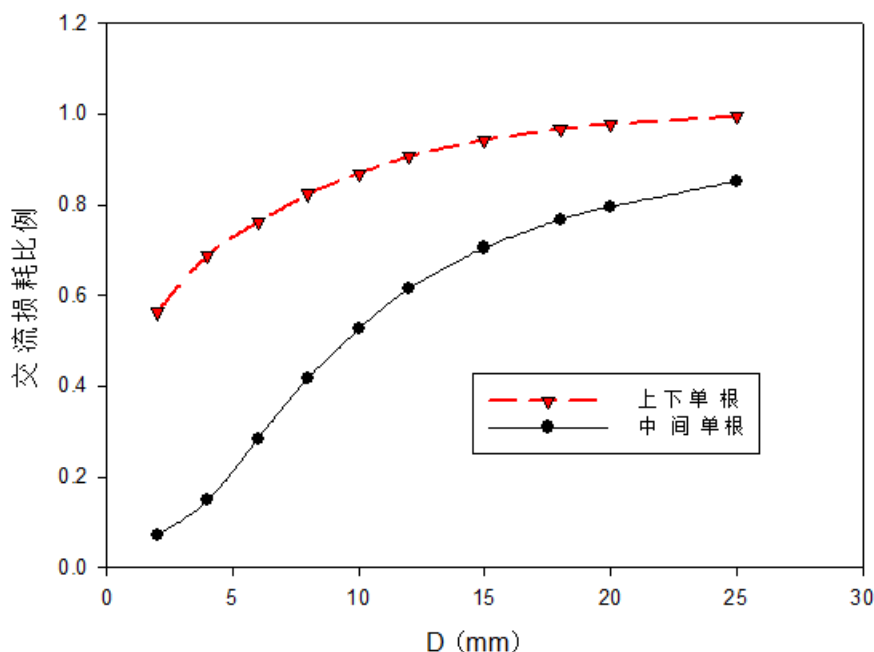


图 4-20 三根垂直距离对交流损耗影响

绘制成如图 4-20 的曲线，可以清楚的看出，三根带材垂直放置后，每根的交流损耗值都要比单根的损耗要小，其中中间的单根交流损耗减小的最多。从曲线变化的趋势可以得到，随着三根带材之间的距离变大，交流损耗的比例越来越接近于 1。对今后实际应用的指导意义在于，当设计带材垂直放置时，并且相邻单根带材通入的电流方向相反时，可以将带材间的距离缩小，既能节省空间又能减少交流损耗的产生。

#### 4.3.2.3 结果分析与讨论

从上两节可以看出三根带材在水平放置、垂直放置分别使得交流损耗增大好减小，下面从电磁场的角度分别分析形成交流损耗变化的原因。

##### (1) 水平距离改变影响

图 4-21 与图 4-22 分别为单根 ( $I_c=150A$ ,  $I_{app}=0.7I_c$ ,  $t=0.015s$ ) 磁场与三根 (水平间距为 6mm) 带材磁场的对比图，其中图 4-22 中左右两侧的带材流入的电流方向与单根相反，因而磁场的数值为负。从图中可以看到由于带材之间的相互影响，各自的磁场分布相对于单根发生了改变，中间带材磁场依然对称，但是分布较单根不均匀，两端的磁场强度更大；上下两根带材磁场分布不均匀，根据图 4-13 双根磁场的分析可知，其损耗也变大，所以水平排列使得三根各自的损耗页都要比单根大。

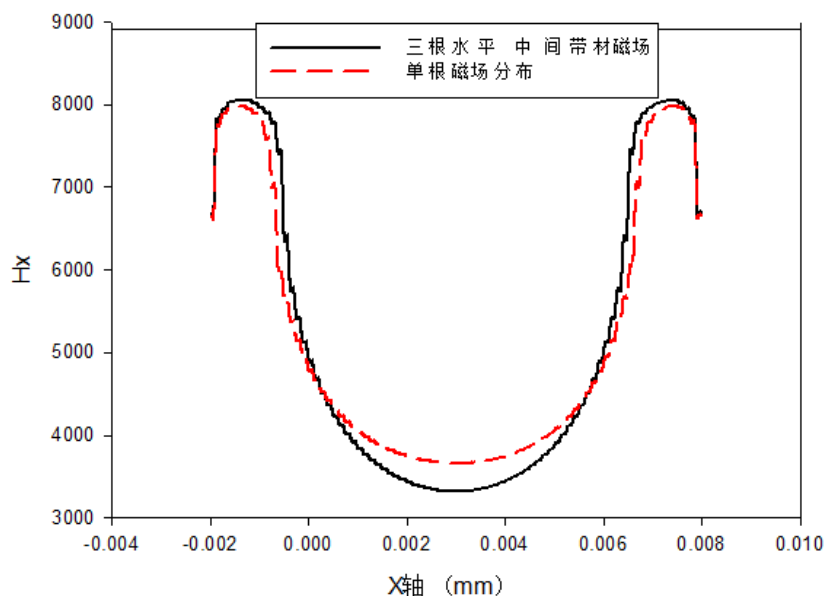


图 4-21 单根磁场与三根中间磁场对比

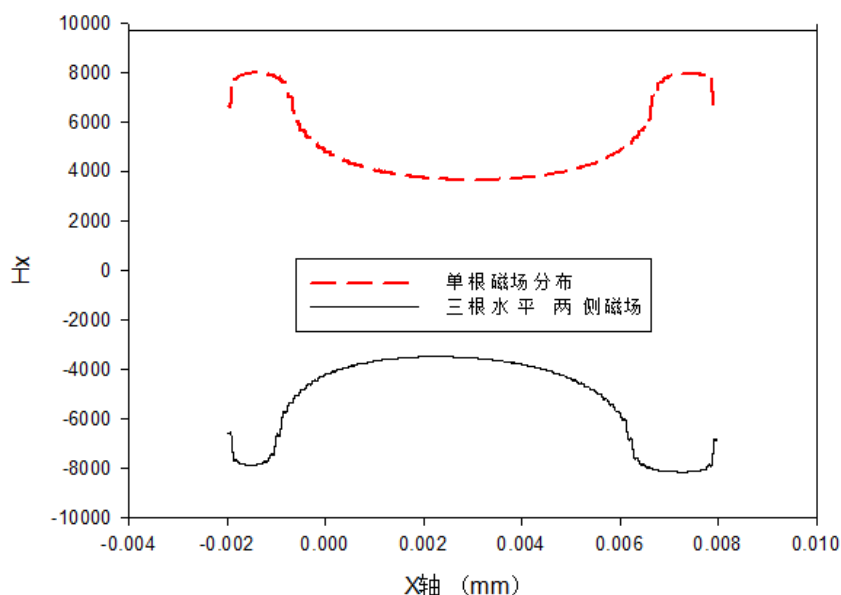


图 4-22 单根磁场与三根两侧磁场对比

## (2) 垂直距离改变影响

图 4-23 与图 4-24 分别为单根 ( $I_c=150A$ ,  $I_{app}=0.7I_c$ ,  $t=0.015s$ ) 磁场与三根垂直排列 (垂直间距为  $6mm$ ) 磁场的对比图, 其中图 4-24 中上下两边的带材流入的电流方向与单根相反, 因而磁场的数值为负。从图中可以看到由于带材之间的相互影响, 各自的磁场分布相对于单根发生都有了很大的减小, 磁场分布更加的均匀, 因此仿真得到的交流损耗比单根小很多, 特别是两根间距越小, 磁场数值越小, 损耗越小。



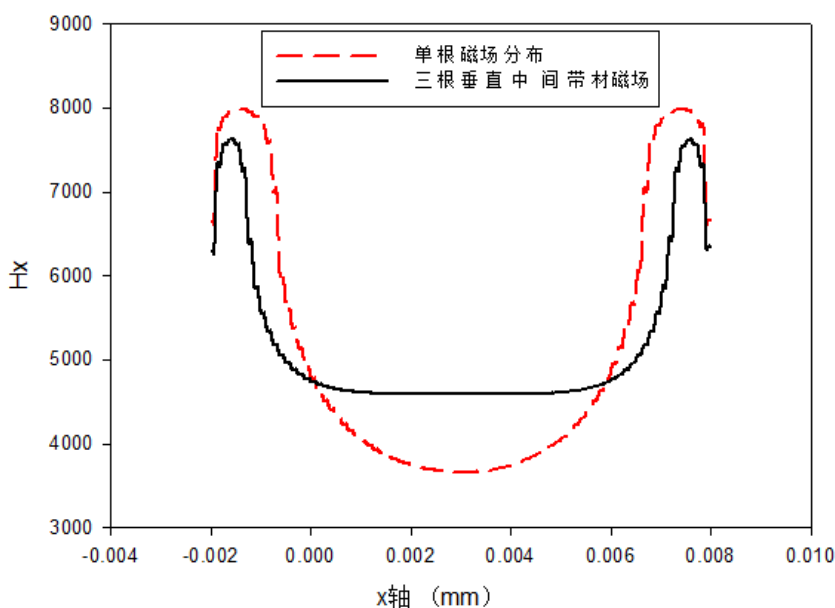


图 4-23 单根磁场与三根中间带材磁场对比

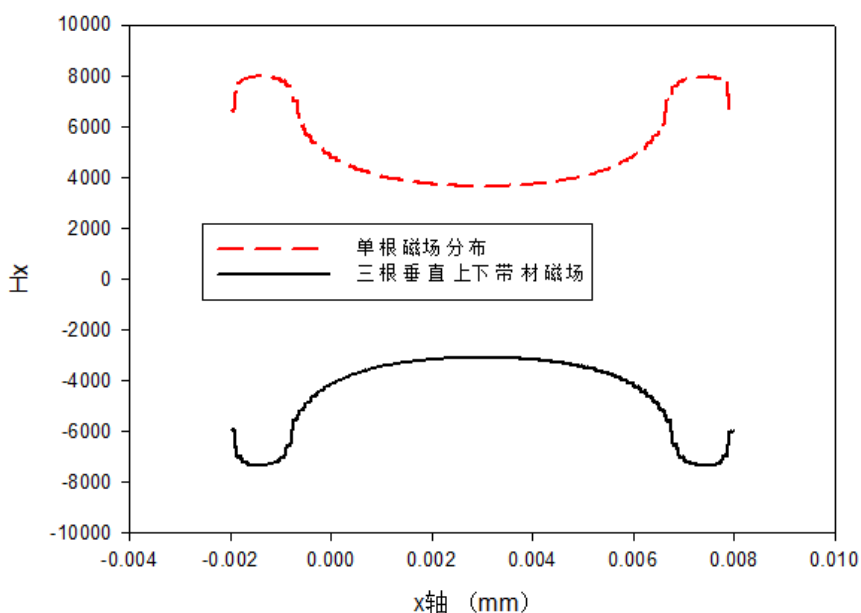


图 4-24 单根磁场与三根上下两边带材磁场对比

综合上面两根和三根带材的仿真，不难发现一个规律，即一般来说水平摆放的带材之间的影响会使每一根的交流损耗变大，距离越大影响越小；垂直或者成一定角度摆放的带材之间的影响会使整体的交流损耗变小。这是因为水平摆放的带材相互产生的磁场垂直进入带材，对超导内部的磁场分布影响比较大；垂直摆放的带材相互产生的磁场水平进入带材，对超导磁场分布影响较小，也即前面提到的超导体的各向异性。对于在设计带材组装成模块的时候，若遇到需要水平放置的情况我们可以适当加大之间的距离，注意到上面的仿真数据，在距离达到 15mm 以上的时候带材相互之间的影响就会削弱很多，与单根带材交流损耗的比值也接近于 1，所以水平分布带材之间的距离在 15mm 左右为好，既不浪费更多的空间也能减少交流损耗。

#### 4.4 10kV 超导限流器中，限流单元的交流损耗

在进行了一些简单的根数仿真后，我搭建了实验室实际使用的 10kV 超导限流器中使用的超导模块。这是一个圆柱形摆放的设计，里面包含了 12 根带材，如下图 4-25。

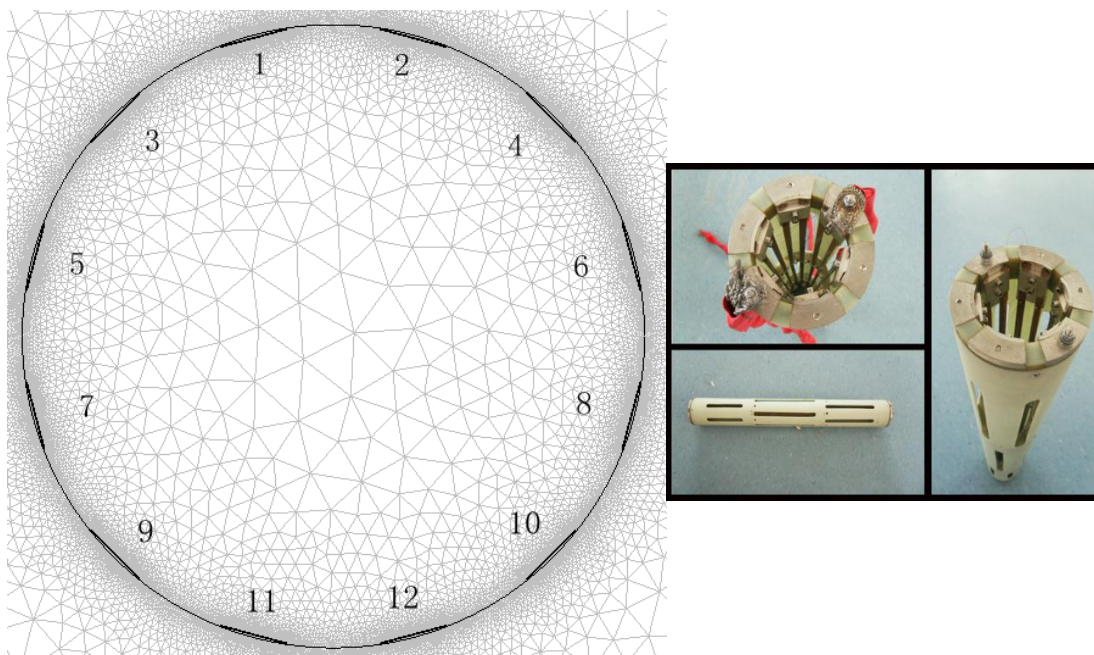


图 4-25 10kV 超导限流器模块仿真

电流从标号为 1 和 2 的两根带材流入，然后分为两路，一路从 1-3-5-7-9-11，直到流出模块，一路从 2-4-6-8-10-12 流出模块。所以除了第 1 和第 2 以及第 11 和第 12 根带材的电流流向是相同的，其他相邻带材流经的电流时相反的。仿真电流设为  $0.7I_c$ 。损耗值分为两种情况，一种是电流输入和输出端 1、2、11、12，另外一种是剩下来电流流经的端口。需要分别计算，结果如下：

表 4-11 10kV 超导限流器交流损耗值

| $I_{app}$ | 始末端 ac_loss (J/m) | 中间段 ac_loss (J/m) |
|-----------|-------------------|-------------------|
| $0.7I_c$  | 5.11E-04          | 4.09E-04          |

表 4-12 10kV 超导限流器模块交流损耗比值

|        | 始末端 ac_loss (J/m) | 中间段 ac_loss (J/m) |
|--------|-------------------|-------------------|
| 交流损耗比值 | 1.45              | 1.16              |

从表中可以看到，限流器模块由于带材之间都呈一定的角度，并且之间的距离在 10mm 左右，所以中间的八根带材的损耗跟单根相差不大，只有在输入端和输出端的端口由于通入的电流时同向，所以交流损耗偏大。可以想到，当电路中电流突然增大时，始端和末端产生的损耗必然会大于其他地方，也最容易发生折损变形，所以对于始端和末端的带材需要特别的保护。

#### 4.5 本章小结

本章是论文的仿真主体部分，从单根到多根，利用第三章的模型对实验室用的超导带材进行了数值仿真计算，得到了在上述各个情况下的交流损耗的大小，总结了变化的趋势，得到了一些能够指导实际安装使用时的结论。在此基础上，利用软件的电磁场分析功能，从磁场的角度解释了交流损耗变化的原因。

## 第五章 单根带材交流损耗的测量

高温超导体交流损耗的测量一般分为三种方法：热测法、电测法和磁测法。本次实验采用的是电测法。电测法也称为传输电流法，具有耗时短，灵敏度高的特点，对超导短样带材的交流损耗测量非常有效。它通过测量电路中的传输电流和高温超导带材两个电压引线接点间经过补偿线圈补偿掉感性分量的阻性电压来计算交流损耗。单位周期的损耗计算公式为：

$$Q = \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (5-1)$$

其中， $Q$  代表交流传输单位周期的损耗； $u(t)$  表示超导带材电压引线接点间经过补偿感性分量的阻性电压； $i(t)$  表示传输电流。本章将重点介绍测量平台的搭建、实验数据的测量以及之后的分析对比。

### 5.1 临界电流的测量

在测量交流损耗之前必须知道带材的临界电流的大小以防止在测量损耗过程中加载的激励过大，使带材损坏。这就需要知道带材的伏安特性曲线。

#### 5.1.1 实验平台

伏安特性曲线测试是二代高温超导带材最为主要的性能指标——临界电流测量的基本方法。临界电流的大小和伏安特性曲线的陡峭程度直接决定了带材的好坏。由于当电流小于临界电流时超导是完全零电阻的状态，并且即使是在电流超过临界电流后，超导带材还存在着银层、同层等辅助层，使得测量处的直流电压也不会很大，所以整个电路的测量精度要求非常高。

伏安特性测试实验主要使用的是纳伏表，其最小可以测量到纳伏级别的信号。直流源提供电流信号，测试的电路图如图 5-1。通过控制直流源的旋钮，从电流源的前面板中直接读取输出电流的大小，将整个回路的电流上升，读取纳伏表的数值，记录对应的电流电压值。当电流接近产品手册中估量的临界电流  $I_c$  (约 90A) 时，需要缓慢增加电流，防止带材损坏。

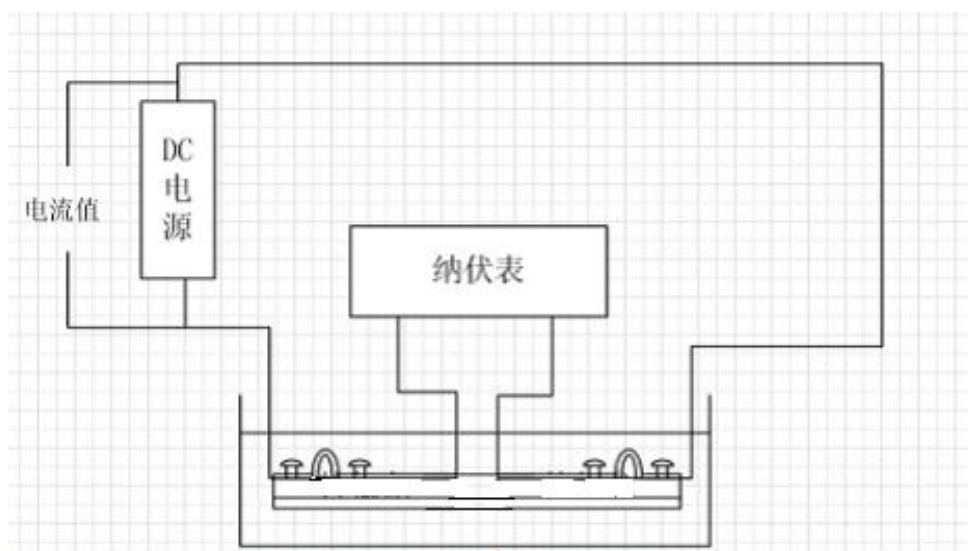


图 5-1 伏安特性曲线测量电路图

上述系统中包括的主要设备有：

1、直流电源。系统采用 Ametek- DLM5-450E 作为整个测量回路的激励源，可以切换直流电压源和直流电流源两种模式。电压源量程为 0-5V，电流源量程为 0-450A，满足实验的范围。



图 5-2A 电源

2、纳伏表。本系统采用 Agilent 34420A 纳伏表，内置低噪声双通道扫描仪，低噪声输入放大器和高调谐输入保护方案把读数噪声降到 8nVpp，较长的积分时间进一步改善了噪声性能，测量电压的精度达到 100 pV。



图 5-2B 纳伏表

3、带材承载平台。平台上固定有 1m 长的带材，从中间的 60cm 间距的两点引出电压导线，交叉缠绕，形成绞线，接入到纳伏表的输入端。需要尽可能保证电压引线的对称，防止外界电磁干扰的影响。

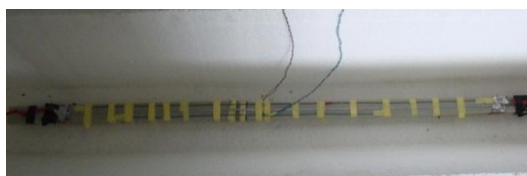


图 5-2C 承载平台

### 5.1.2 实验结果

下表为自场条件下测量带材伏安特性曲线的数据：

表 5-1 自场条件下 60 厘米超导带材伏安特性测量数据

|              |     |     |     |     |     |     |     |      |    |      |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|------|
| $I_{app}(A)$ | 10  | 20  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 82   | 86 | 87   |
| $U(uV)$      | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 9.1 | 16.2 | 37 | 60.1 |

由公式 (3-17) 可知：

$$E = E_0 \left( \frac{J}{J_C(B)} \right)^n \quad (3-17)$$

其中  $E_0=1\mu V/cm$ 。经过简单的变形可以得到公式 (5-2)，即

$$U = U_0 \left( \frac{I_{app}}{I_c} \right)^n \quad (5-2)$$

由于测量电压的两点间距为 60cm，因此式中  $U_0=E_0*60cm=60 \mu V$ ，所以当  $U=U_0$  时， $I_{app}=I_c$ 。根据数据表格 5-1，可以得到到  $U=60.1$  时， $I_c=I_{app}=87 A$ ，即测量的带材临界电流为 87A。在确定了临界电流后还需要得到式(5-2)中的 n 值，以方便仿真模型的建立。将电流  $I_{app}$  归一化处理，得到  $I_{app}/I_c$ ，以此作为横坐标，画出曲线如图 5-3。

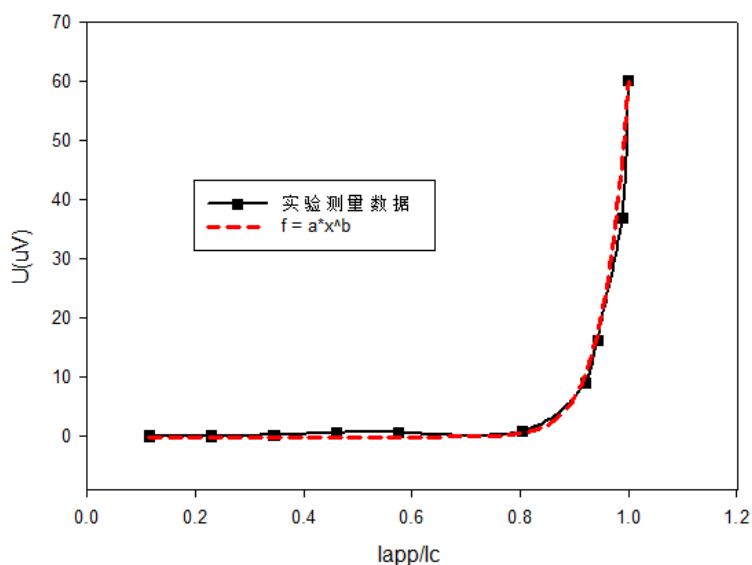


图 5-3 自场条件下 60 厘米超导带材伏安特性曲线及拟合图

经过拟合对比，设置约束条件  $a=60$ ，发现当  $b=21$  时拟合曲线与实验测量数据曲线最为吻合，也即式 (5-2) 中的  $n$  值为 21，这解释了第三章和第四章中设置仿真模型时  $n$  值的来源。

## 5.2 交流损耗的测量

### 5.2.1 实验平台

对于一个超导器件来说交流损耗的大小直接决定了它的液氮消耗量和补充周期。交流损耗是超导带材工作在正常电流下的损耗，因此测量时通过的电流峰值应该小于带材的临界电流，同时本次测试为带材自场下的交流损耗，所以量取的电压信号是十分微小的。为了有利于测量的准确性，实验测量的为无铁基带材上间距 60cm 的两点电压。

交流损耗测试主要使用的是录波仪。通过电流互感器将回路电流信号传入录波仪，再通过电压引线将带材上两点间的电压以及从线路中感生出来的补偿电压输入到其中。之后使用录波仪中的 math 功能，将测量电压和补偿电压相减，得到补偿后的阻性电压分量。该分量即为上文提到的  $u(t)$ ，它与回路中的电流  $i(t)$  相位上应该一致。在得到  $u(t)$  和  $i(t)$  波形参数的基础上，将数据导出到计算机中，利用公式 (5-1) 求解带材的交流损耗。下图为交流损耗测试平台的原理图。

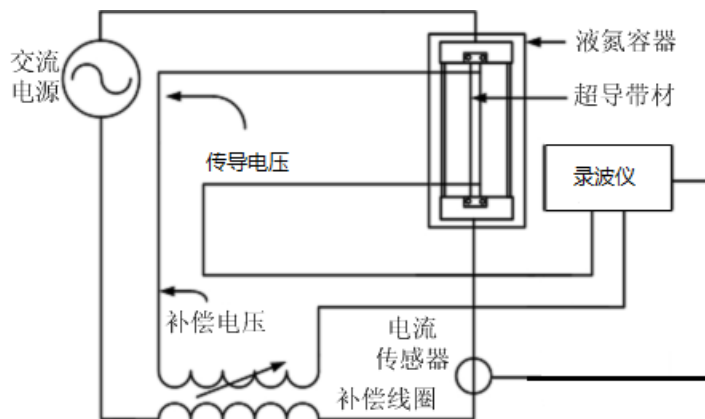


图 5-4 交流损耗测试平台示意图



上述系统中包括的主要设备有：

1、录波仪。测量系统使用 YOKOGAWA-DL850 录波仪来存储和显示回路中的电压和电流波形。该录波仪具有高速、多通道、绝缘和抗噪能力强等特点。多种模块的选择可以满足不同的测量精度需求。本平台使用两个 701250 模块，支持四个通道的同时输入，采样率为 10MS/S，分辨率为 12-Bits，能够自动滤除高频部分噪声。内置的 math 函数、FFT 功能方便用户在该设备中进行波形的处理和分析。



图 5-5A 录波仪

2、交流电源。仪器型号为 California Instruments 4500FX 的交流电源为整个平台提供激励。该电源提供从 20mA 到 200A 的可控恒流十分广泛的输出范围。电流源部分具有三个范围，以确保在低电流设置下具有好的分辨率。2A 范围可下降到 20mA，20A 至 200A 输出可通过母线输出，所有电流水平均为均方根值，即为有效值。输出的频率为从 45 赫兹到 66 赫兹



图 5-5B 交流电源

3、电流传感器。设备型号为 PEM CWT30B 的电流转换器作为回路中电流的测量装置。它提供电压与电流的比例（1mV/A），实时跟踪电流随时间的变化，可以在录波仪上再现波形。其线圈柔软、便于拆卸，且使用高性能感应套环，干扰很低，测量方便。能够测量得到的电流峰值为 6KA，最大噪声为 5mVp-p，低频带宽为 0.6Hz，高频带宽为 17MHz，满足测量需求。



图 5-5C 电流传感器

### 5.2.2 实验结果及与仿真值的比较

如图 5-6 为录波仪在测量过程中的数据波形，在未加上补偿电压之前，传导电压超前电流波形约 90 度，表明带材上测得的电压基本为感性电压，需要测得的阻性电压被淹没在其中。引入相位滞后传导电压 180 度的补偿电压（利用线圈耦合传导电流互感出的纯感性电压后，将两者相加，便可以大大的消除原来传导电压中的感性分量，得到补偿后的电压。从图 5-6 中可以看到，补偿后的电压波形相位与线路电流波形相位基本一致，但是也还是存在一定分量的感性电压。考虑到残存在感性分量在使用公式(5-1)计算交流损耗时会因为积分的关系而消除，对结果影响不大，该补偿后电压波形的准确性是可以接受的。

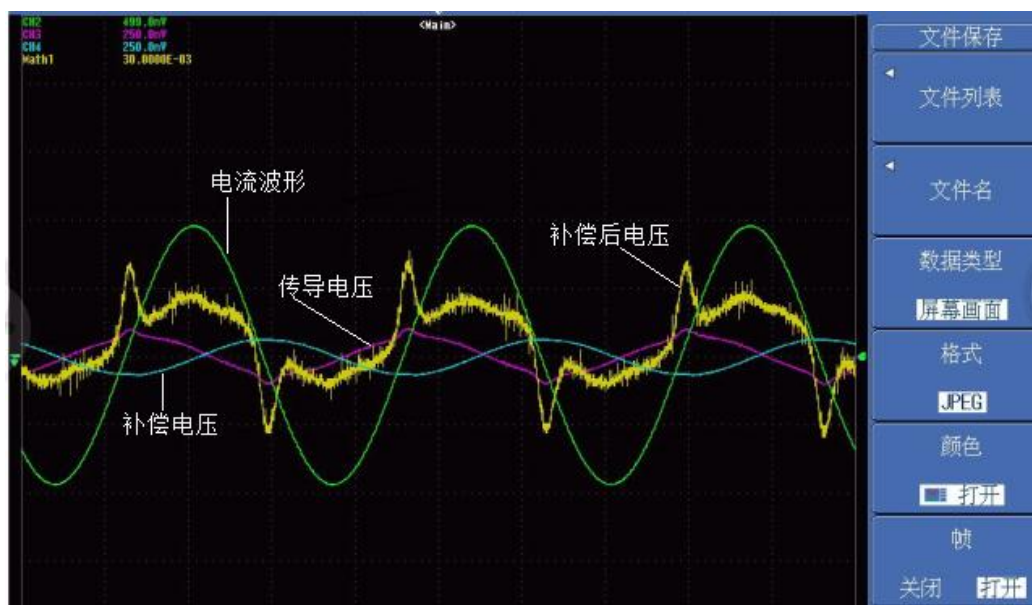


图 5-6 交流损耗测量过程波形

在得到如图 5-6 所示的波形后，利用录波仪记录下数据，并导入到计算机。在 sigmaplot 软件中截取一个周期内的波形数据，然后使用公式(5-1)对数据进行处理。需要注意的是，该测量损耗为 60cm 长度带材的损耗，为得到标准的损耗值还需要进行归一化处理，将公式(5-1)计算得到的损耗除以 0.6。经过整理后，可以得到如表 4-2 的数据。

表 5-2 交流损耗测量数据

| $I_{app}(A)_p$     | 40     | 60      | 80       | 90     | 100     |
|--------------------|--------|---------|----------|--------|---------|
| ac_loss(J/m/cycle) | 2.1e-5 | 3.07e-4 | 6.159e-4 | 1.1e-3 | 2.01e-3 |

绘制成曲线，得到图 5-7。

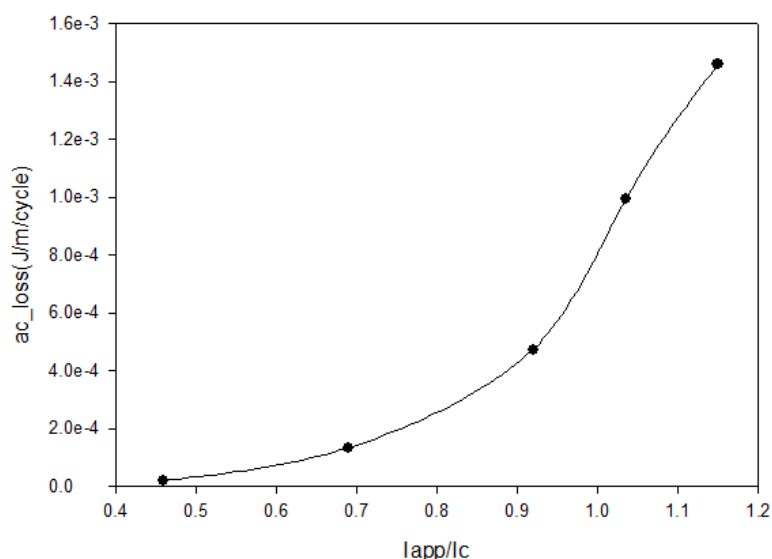


图 5-7 交流损耗随加载电流变化曲线

得到实验测量的交流损耗值后需要和仿真值对比以验证结果。图 5-8 给出了实验与仿真的对比图，从图中可以看到无铁基带材的交流损耗测量值与第四章中的仿真值相互匹配，实验测量值稍稍高于 Norris 曲线和数值计算损耗值。可能的误差来源有带材其他层产生了损耗



以及空间电磁场干扰，总的来说，实验数据和仿真数据能够互相印证正确性和准确性。

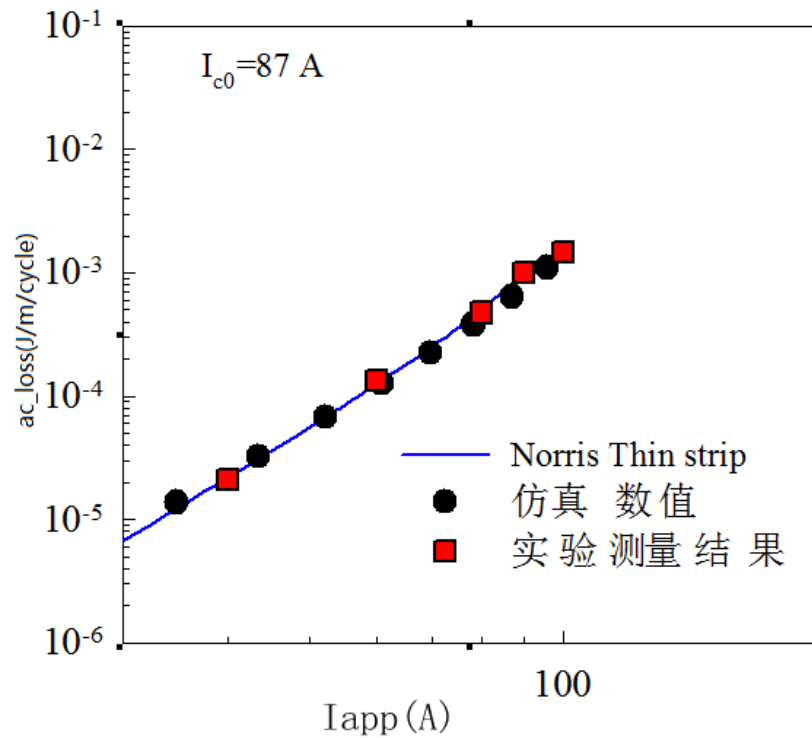


图 5-8 实验仿真对比图

### 5.3 本章小结

本章主要介绍了伏安特性曲线测试平台以及交流损耗测试平台的搭建，描述了硬件设备的具体参数，阐明了本次实验中测量交流损耗的方式和计算方法。在此基础上进行了测量分析，得到了 E-J 指数曲线的  $n$  值，临界电流以及自场下的交流损耗。之后将测量值与第四章中的仿真值作比较，解释了测量值与仿真值之间的联系和区别，验证了仿真模型的可靠性和实验测量方法的正确性。

## 第六章 总结

### 6.1 结论

本文阐述了高温超导带材交流损耗产生的机理,主要从仿真和实验两个方面来对第二代高温超导带材的交流损耗进行数值计算和测量。构建出超导带材在有限元仿真软件 COMSOL 环境下的仿真模型,可以针对不同结构的带材,在不同状态下的交流损耗特性进行研究。同时详细介绍了交流损耗测试平台的硬件系统与软件系统,阐述搭建电测法实验平台的过程,并使用搭建的平台对超导带材进行交流损耗测量,与仿真的结果相对应,验证出仿真模型的正确性。最终的设计基本完成了原定计划,但是在具体实验测量方法上较原计划有所改动。通过本次毕业设计,对第二代高温超导带材交流损耗有了比较深入的理解,能够熟练使用仿真模型和实验测量设备对带材的交流损耗进行测量和分析。

在使用仿真模型时,通过对带材的不同参数和不同分布进行分析,得到的结论如下:

- (1) 在流经超导带材的电流相同时,超导带材的临界电流越大交流损耗越小。所以随着技术和工艺的发展,超导带材临界电流越大不仅能适应容量更大的系统还能在相同容量下的系统中减少交流损耗。
- (2) 对于水平放置的带材,它们都产生了对各自来说的外界磁场,使得每根的交流损耗值都要比单根的损耗要大。不过随着带材之间的距离变大,与单根交流损耗的比例越来越接近于 1,当带材之间的距离超过约 10mm 后互相产生的影响就基本可以忽略。
- (3) 对于垂直放置的带材,互相产生的磁场使得各自的磁场分布在带材上更加的均匀,每根的交流损耗值都要比单根的损耗要小。随着距离变大,这种效果也逐渐减弱。在实际设计带材垂直放置,并且通入的电流方向相反时,可以尽量将带材间的距离缩小,既能节省空间又能减少交流损耗的产生。
- (4) 对于两根带材呈一定角度摆放时,随着角度的变大,固定不动的带材产生的损耗变大,但是发生的改变十分小;不断变化角度的带材交流损耗一直在下降,并且改变的幅度很大,到最后的交流损耗甚至比单根带材产生的还要小。所以,当带材之间的距离固定时,可以适当改变其中一根的角度,这种形式在空间上可能不如两根带材水平摆放利用率那么高,但是却能减小带材的中损耗。

### 6.2 展望

超导的交流损耗是超导应用时必须考虑的最基础的一项参数,本文虽然通过实验和仿真得到一些结论,但由于时间有限,实验测量平台搭建还不够完善,还有很多工作需要进一步的探索:

- (1) 本次实验仅仅是对自场条件下的带材进行了交流损耗的测量,而实际应用时超导带材会处在丰富的外界磁场中,损耗的产生将更加复杂,今后需要考虑到更加多样化的外界条件进行实验测量。
- (2) 实验及仿真模型为了从简单出发,针对的都是不含铁磁基带的带材,而美超带材中铁磁基带的损耗在总损耗中还是占据一定比例的,所以对铁磁材料的研究还需要进一步探索。
- (3) 实验测量中使用的补偿线圈制作不够完善,还需要每次进行手动的调整来获取

视觉上使补偿后的电压波形与电流同相位的补偿电压，操作带有偶然性和主观性。提交工厂加工的补偿线圈还没有到位，之后在其制作完成后可以使实验更加精确和客观。

- (4) 由于目前使用的录波仪低通滤波只能将 500Hz 以上的噪声消去，但是对工频的三次、五次谐波的电磁干扰无能为力，在实验中还是会受到噪声的干扰，特别是低电流时待测信号微弱，导致测量结果的不准确。因此理想的方法在录波仪前还要加上一个滤波器和放大器，使干扰信号滤除、待测信号放大，这样更有利于后续的数据读取和处理。
- (5) 由于时间的限制，当前只做了超导带材的交流损耗测量，并且数据还不够丰富，而实际应用中除了超导带材的应用外还有很多地方需要使用超导线圈，线圈的交流损耗测量方法不同于带材，还要深入的研究和探索。
- (6) 之前所做的实验测量都需要在获取数据后人工的进行计算得到交流损耗。考虑到交流损耗是一个系统工程，单纯的人工分析不仅耗时量大而且容易出现失误，今后需要搭建出交流损耗的自动测试平台，利用 labview 等软件自动计算交流损耗。

## 参考文献

- [1] Onnes H K. The resistance of pure mercury at helium temperatures[J]. Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1911:119/120/122.
- [2] Meissner W, Ochsenfeld R. Ein neuer effecter bei eintritt der supraleitfähigkeit[J]. Naturwissenschaften, 1933(21):787-788.
- [3] 金建勋. 高温超导直线电机[M]. 北京: 科学出版社, 2011:4-5.
- [4] J. G. Bednorz, K. A. Muller. Possible high superconductivity in the Ba-La-Cu-O system[J]. Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter, 1986, 64(2): 189~193.
- [5] Putlin S N, Antipov E V, Chmaissem O, Marezio M. Superconductivity at 94K in HgBa<sub>2</sub>CuO +  $\Delta$ [J]. Nature, 1993, 362(6417): 226~228.
- [6] Schilling A, Cantoni M, Guo J D, Ott H R. Superconductivity above 130K in the Hg-Ba-CaCu-O system[J]. Nature, 1993, 363 (6424): 56~58.
- [7] Masaru Tomita, Masato Murakami. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29K[J]. Nature, 2003, 421(6922):517-520.
- [8] 周华锋, 李敬东, 等. 高温超导电力电缆的发展[J]. 电力系统自动化, 2001(8): 71-74.
- [9] Tixador, Pascal. Development of superconducting power devices in Europe[J]. Physica. C, 2010, 470(20):971-979.
- [10] 王定稳. 超导发电机的原理与特性[J]. 高电压技术, 1979(1):43-46.
- [11] 范方吼. 超导变压器[J]. 电工电能新技术, 1988(3):48-52.
- [12] 肖立业, 林良真. 超导限流器——超导技术产业化的领头产品[J]. 科技导报, 1999, (7):37-40.
- [13] 王素玉, 王家素. 超导磁浮列车的研究与发展[J]. 低温与超导, 1995(4):1-7.
- [14] Jan Evetts, Archie Campbell. Critical Currents in Superconductors[J]. London: Taylor & Francis Ltd. 1972.
- [15] Baldan. C. A, Lamas. J. S, Shigue. C. Y, and Filho. E. R, "Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor—The Limiting Factor and Its Recovery Time" [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond, 2009(19):1810-1813.
- [16] Y. Yang, T. J. Hughes, E. Martinez, and C. Beduz. Reduction of AC losses in Ag sheathed PbBi<sub>2</sub>223 tapes with twisted filaments in external and self-fields[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999(9):1177-1180.
- [17] R. Flukiger, G. Grasso, J. C. Grivel, F. Marti, M. Dhalle. [J]Supercond.Sci.Technol, 1997 (10):A68.
- [18] G. M. Zhang, J. Schwartz, P. V. P. S. Sastry, L. Lin, L. Xiao, Y. Yu, "The effects of bending strain on the critical current and AC loss of BSCCO/Ag tapes"[J]. Supercond.Sci.Technol. 2004(17):1018-1021.
- [19] 中仿科技公司. COMSOL Mutiphysics 有限元法多物理建模与分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [20] 刘扬, 刘巨保, 罗敏. 有限元分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [21] 中仿科技公司. 高等学校仿真教学平台 [J/OL]. CnTech Co. Ltd, 2012. [http://www.cntech.com.cn/slave/subsite/comsol\\_edu\\_pdf.pdf](http://www.cntech.com.cn/slave/subsite/comsol_edu_pdf.pdf).
- [22] F. London and H. London. [J]Proc. Roy. Soc. 1935(155):71.

- [23] Zhiyong Hong. PhD thesis[D]. Cambrige 2007:14-15.
- [24] Thomas P.Sheahen. Introduction to High-Temperature superconductivity [J]. Plenum Press,1994:373-374.
- [25] Kim. Y. B, Hempstead. C. F, and Strnad. A. R. Critical persistent currents in hard superconductors[J]. Physical Review Letters, 1962(9):306-309.
- [26] Kim. Y. B, Hempstead. C. F, and Strnad. A. R. Magnetization and critical supercurrents[J]. Physical Review,1963(129): 528-536.
- [27] Brandt. E. H. Superconductors of finite thickness in a perpendicular magnetic field: Strips and slabs[J]. Physical Review B,1996(54): 4246-4264.
- [28] Amemiya. N, Murasawa. S, Banno. N, and Miyamoto. K. Numerical modelings of superconducting wires for AC Loss calculations[J]. Physical Review C,1998(310):16-29.
- [29] Pecher. R, McCulloch. M. D, Chapman. S. J, Prigozhin. L, and Elliottk. C. M. 3D-modelling of bulk type-II superconductors using unconstrained H-formulation[J]. European Conf. Applied Superconductivity, 2003.
- [30] W. T. Norris. Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets[J]. Phys.1970(D3):489-507

## 谢辞

在本文的结尾，首先我要对金之俭老师、洪智勇老师和李柱永老师对我的悉心辅导表示衷心的感谢。他们对工作的一丝不苟的态度、认真严谨的治学精神激励着我不断向前。老师们为我们营造了良好的实验室环境和科研设备，促进了我的各方面能力。正是在各位老师的帮助下我才能在一个以前完全没有接触过的领域中完成毕业设计的任务。

其次要感谢在实验和仿真过程中给予我许许多多帮助的师兄们。应立师兄从我开始进入实验室的时候便一直带领我，一起参与实验数据的测量，给了我很多的建议和帮助。途中也遇到过各种各样的挫折，一度实验无法进行下去，应立师兄一直在鼓励我，帮着一同分析，不断修正原来的方法，最终才取得了成功。盛杰师兄在仿真模型的搭建过程中不厌其烦的指导我各个参数的意义和公式的原理，让我能在较短的时间内比较透彻地了解了数值仿真超导带材的核心方法，少走了许多弯路。同时还要感谢林柏桦、李帅波师兄，陈妍君师姐以及和我一同做毕业设计的同学们，我从他们的身上学到了很多。有了大家共同的奉献和努力才使得毕设顺利完成。

最后，感谢我的父母和朋友，感谢实验室李姐给我在生活中提供的帮助。



## MEASUREMENT AND ANALYSIS OF AC LOSSES OF SECOND GENERATION HTS TAPES

In recent years, with the development of the national economy, there is a sharp increase in the demand for electricity. As a result, the capacity of traditional transmission line is hardly to meet the requirements. Moreover, as the capacity of power system increased, the appropriate level of short-circuit current became so large. These problems can be effectively solved as long as using superconducting technology. HTS tapes are the basic unit of the applied superconductor, and their AC losses have direct effects on the stability of HTS apparatus. The investigation of AC losses of HTS tapes has always been one of the most important research branches of HTS applications. In this paper, the basic concepts of superconductivity are introduced first through its characteristics, development and application prospect. Then, in the aspect of both simulation and experimental analysis, investigation in AC loss of the second-generation high temperature superconductor YBCO strip is conducted. In the part of simulation, the finite element analysis software COMSOL is mainly used to build a single superconducting strip model to calculate the value of AC loss. On the basis of this model, more strips in more complex case are simulated. Through this, we get the trend of AC loss characteristics, and try to explain it in the aspect of electric and magnetic fields. At last, the experimental platform is established to measure the AC loss. And the results are compared with the simulation ones.

The high-temperature superconductors have characteristics which ordinary conductors can not match, leading a wide range of prospects and advantages in the electric and electronic applications. The high-temperature superconductivity has brought significant improvements in performance to the existing technology, and new concepts and ideas for the future design. Since the high-temperature superconductors was developed, its superior performance and potential applications have attracted many different areas such as materials, electricity, physics and others.

The United States, Japan, Europe and even South Korea, have successfully developed superconducting power transmission cable, SFCL, the superconducting magnetic energy storage system, the superconducting transformer, superconducting generators and motors. China's Tenth Five-Year period has also developed a variety of superconducting electrical installations.

The main fields of application of the high-temperature superconducting materials are in the electricity and strong electromagnetic devices. As technology continues to change and the demand continues to increase, high current and strong magnetic field in the strong electric field is very common to see. In this case, the corresponding high-temperature superconducting high-current wires and magnet devices have been extensively studied, some of them have had a prototype in industrialization.

Nowadays, YBCO coated conductor have been supported with a lot of manpower, material and financial resources in the United States, Japan, Europe, and South Korea and other countries. There is an early start in the United States and Japan, and they are in the international leading position, followed by Europe. In China, the Department of Physics research team of Shanghai Jiao

Tong University took three years to master the skills of second-generation HTS tapes preparation process, and achieved new breakthroughs in the field of domestic superconducting strip, so that it bring advanced ranks among the technology areas, following the United States, Japan, and Germany. At present, the second generation superconducting tapes are mainly two kinds of structure: the first is a non-ferromagnetic base-band superconducting tapes; And the second is ferromagnetic base-band superconducting tapes.

In this paper, it describes the mechanism of the AC loss in HTS tapes in terms of both simulation and experiment. It conducts both the numerical calculation and the measurement of AC loss of the second-generation high-temperature superconducting strip. In simulation, the model of the superconducting tapes are under the environment of the finite element simulation software COMSOL. The model contributes to the research of the different structure of the strips and the AC loss characteristics in different conditions. It also introduces the hardware and software in the AC loss test platform, and describes the process of setting up the experimental platform with electrical measuring method. It was used to get the AC loss of superconducting tapes in experiment, which is compared with the simulation results to verify the accuracy of the simulation model. The final paper mostly completed the task as planned. But in detail experimental methods, it has changed. Through the graduation project, I have a in-depth understanding of the AC losses in the second-generation HTS tapes and familiar with the simulation model and experimental measurement equipment, so that I can use them to measure and analyze the AC losses of the strip.

Using the simulation model to analyze strips in different parameters and different arrangements, the conclusions are as follows:

(1)When the current flowing through the superconducting strip is the same, the larger the critical current in superconducting tapes is, the smaller the AC loss is. With the development of technologies and processes, the critical current of superconducting tapes can be greater, which can not only adapt to greater capacity of the system but also reduce AC loss in the same capacity system.

(2)For the horizontal strips, external magnetic field comes into being, which leads the AC loss value of each of strips is larger than a single one. But the larger the distance between the high-temperature superconducting strips is, the more close to 1 the ratio of the AC loss to the single one becomes. That means the impact of each other can be ignored when the distance between the strips is more than about 10mm.

(3)For the vertical strips, the external magnetic field makes the magnetic field distribution in the strip more uniform respectively, and AC loss value of each strip is smaller than a single one. As the larger distance between the high-temperature superconducting strips is, the more weak this effect is. In practical design, when strips are placed vertically and the current is in the opposite direction, the distance between the strips should shrink, which can save space and reduce the generation of the AC loss at the same time.

(4)For the two strips which are placed in a certain angle, as the angle becomes larger, the loss of the stationary strip becomes larger, but the occurrence of the change is very small; The AC loss of the constantly changed angle strip has been declining, and changes in magnitude. At last, the AC loss becomes even smaller than a single strip. Therefore, when the distance between the strip fixed, appropriate changes in one of the strips may be taken. This method may not be as efficiency as the two strip level placed in place, but was able to reduce the strip in the aspect of AC loss.

As the most basic one parameter, the AC losses of superconducting must be considered in

superconducting applications. This article gets some conclusions through experiment and simulation, but due to limited time, the experimental platform is still not perfect, there are a lot of work need to be done. In this experiment, the AC loss measurement of the strip only be taken in the self-field conditions, but the practical application of superconducting tapes is in the wealth of the external magnetic field, and the loss will be more complicated. So in the future there is a need to consider experimental measurements in a more complicated external conditions. Both experimental and simulation models have excluded ferromagnetic baseband strips, while the U.S. strip(AMSC) has a ferromagnetic base, which occupy a certain proportion in the total loss. As a result, the research also need further exploration. Another limit is that in the experimental measurement, the compensation coil is not perfect. It needs manually adjusted to obtain the visual compensated voltage waveform and current. It is because the compensation coil submitted to the factory for processing is not yet in place. After their production, it is planned to make the experiment more accurate and objective. Currently, the wave recording instrument used has a low-pass filter only above 500Hz noise elimination, but three and the fifth harmonic of the power frequency electromagnetic interference. As a result, the experiment will be subject to noise interference, especially when the test signal is weak, resulting in inaccurate measurements. The ideal way is that there must be added a filter and amplifier before the wave recording instrument, so that the interference signal can be filtered, which is more conducive to read and process follow-up data.

High temperature superconductor materials are increasingly showing promise for use in a variety of industrial sectors. Many researchers are devoting themselves to researching superconducting machines throughout the world. There are significant merits for superconducting motors compared with conventional motors: only 1/3-1/5 volume and mass, energy savings of 40-50% for the same load, high efficiency, and last but not least, environmental friendliness. To meet the requirements, all these factors above should be considered. And the conclusions are useful for reduce the AC loss. Anyway, further research and more work need to be done in the future.