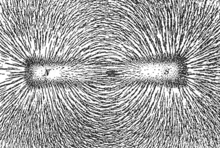
# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

### 1.1.1 磁场研究背景与意义

在磁学领域中，磁场实际上是一种既看不见又摸不着的具有特殊性质的客观存在的物质，磁场虽并非由原子或分子构成，但实际存在。磁体空间范围内存在磁场，恰恰是因为磁场的存在磁体间才能相互作用，因此两磁体实际并不发生接触就能相互作用。事实上，电流、运动电荷、磁体或变化电场等周围空间都具有磁场。这是因为磁体的磁性实际上是由电流产生的，而电流又是电荷的运动。因此总的来说，运动电荷或电场的变化是磁场产生的根本原因。从现代物理学角度来讲，由于电子和质子是客观存在的物质能够形成电荷的根本来源，因此正负电荷分别为带有过剩电子和质子的点物体。同理，运动中的电荷所能够形成磁场的根本原因是电子或质子，例如电流周围空间的磁场是由电流中所有运动电子的磁场和形成的。

人类对磁场的应用研究是在不断探索过程中而进步与发展的。早在2000多年前，人类已经学会将磁场应用于生活中。当时的学者充分利用地球这个大磁场，基于感应原理进行方向的辨识，为舰船的导航带来了巨大的便利【1】。随着人类对磁场认识的不断深入，其应用范围与领域也越来越广泛，包括利用磁场对通电导线的安培力而生产的电流天平、电磁炮、电磁泵等，利用磁场对运动电荷的洛伦兹力而制造的速度选择器、磁流体发电机、电磁流量计、质谱仪、回旋加速器、电视机显像管等，利用材料的磁性而发明的磁悬浮列车、指南针、软盘、硬盘、信用卡等【2】【3】。可见，磁场的应用给人类的生产生活带来了诸多益处。



**图1.1 透过铁粉显示出的磁场线**

在探索磁场的过程中，人类发现了一种将看不见摸不着的磁场人为地转换为实际存在的一种物质的方法，如图1.1，在磁体周围分布的铁粉客观的将其周围的磁场表现出来。磁场的存在与人类的生活息息相关，不仅对社会的进步与发展做出巨大贡献，而且也会产生一些不利的影响，主要包括以下几方面【4-9】：

(1) 宇宙本身存在的磁场空间给人类提供了生活所必须的环境，没有宇宙强大的磁场力，也就没有自然界生物细胞的合成，地球上面的生物也就不可能存在。地球，恒星(如太阳)，星系(如银河系)，行星、卫星，以及星际空间和星系际空间，都存在着磁场。在自然界中，存在着地磁和大量的宇宙空间物质射线以及太阳[磁暴](http://baike.so.com/doc/5924280-6137201.html)辐射波，这些磁波会对人类的大脑和脏器形成刺激性影响。这些磁波辐射对生物成长有一种促进作用。

(2) 在现代科技和人类生活中，处处可发现磁场。例如，在对磁场应用最为广泛的电力行业中，包括[发电机](http://baike.so.com/doc/478010-506128.html)、电动机、[变压器](http://baike.so.com/doc/5327972-5563144.html)、电报、电话、收音机以及加速器、[电磁测量](http://baike.so.com/doc/7526841-7800934.html)仪表等设备的应用无不与磁现象有关。这些设备的生产应用无疑对人类的生活具有重要的意义。

(3) 在生物体内，伴随着[生命活动](http://baike.so.com/doc/2568573-2712529.html)的存在，某些组织和器官内也会产生微弱的磁场，正是因为弱磁场的存在使得生物能够迅速正常。有研究表明，低强度磁场下大肠杆菌生长具有明显的优势，高强度磁场下这种生长优势消失。因此，磁场也被应用于农业生产研究中。

(4) 人类的梦中幻觉，多数由空间中存在的磁辐射引起，强大的磁波辐射也可能给人类造成重大的伤害，还有可能引起空间的人体核磁共振效应。自然界的诸多奇异现象都存在强磁场的作用，可造成信鸽对地理位置辨别的失效，可造成人类方向性的判别错误，也可造成人类大脑的噩梦幻觉联想等。

随着现代科技的发展，电抗器应运而生，其在实际应用过程中也会产生磁场。电抗器的空间磁场分布指的是当电抗器中存在电流时，其周的空间内任意一点会产生磁场，周围所有点磁场的集合共同构成其空间磁场，具体的某一方向上磁场强度分布规律称为其空间磁场分布。电抗器在使用过程中一般都会通入工频电流，因此其周围产生的磁场称为工频磁场。如上所述，电抗器周围工频磁场的存在既有有利的一面，又有有害的一面。工频磁场计算一直以来都是电抗器研究的热点问题，磁场分布的变化不仅能够反应电抗器的运行状态，而且可以指导电抗器的设计、安置以及磁场屏蔽等【10】。因此，研究电抗器工频磁场问题成为电抗器研究问题的一个主要方面【11-13】。

### 1.1.2 电抗器故障研究背景与意义

近年来，随着电力系统电压等级的不断升高，各种适用于高电压等级的设备也随之发展起来。然而，电压等级越高对设备的安全稳定运行要求就越高，因此必须采取一定的措施尽量防止用电设备发生故障。保证用电设备正常运行的措施包括：对设备进行出厂检测、合理使用设备、降低设备周围环境干扰等等【14】。但采取了一系列的预防措施后仍有一些不可避免的故障会发生，这就需要对设备进行故障监测，实时监测设备的运行状态，及时发现设备的不正常运行，预防故障发生并进一步减小故障影响程度及范围【15】。

电抗器作为电力系统中不可缺少的元件之一，在电力系统的发展中具有重要的作用，因此，针对电抗器进行研究有利于电力系统的发展【16-17】。然而，电抗器在电网运行中发生故障进而引起火灾等严重现象已屡见不鲜，由于缺乏有效的检测手段及保护措施，故障发生前无法及时检测并采取必要的预控措施，导致电网及设备出现了不必要的损失【18】。因此，研究电抗器的故障影响及监测方法显得十分必要。

在现代电力系统中，电力变压器、GIS、避雷器以及高压开关柜的故障监测技术已经相对成熟，这些设备的故障监测经过不断的研究改进，其主要的局部放电故障检测方法主要有以下几种：

（1）特高频（ultra high frequency,UHF）检测法【19】

UHF检测技术通过接收设备内部局部放电所激发的UHF电磁波，实现局部放电的检测及定位。可采用300MHz～3GHz的UHF信号检测技术对所发生的局部放电信号进行监测，电力系统中的电晕放电频率一般在100MHz以下，并且衰减很快，所以选择UHF段的电磁信号作为检测信号，可以较为灵敏地捕捉到空气中的电磁信号。这种检测技术主要用于变压器故障的监测中，也可以用于对GIS和电缆设备故障检测中。

（2）脉冲电流检测法【20】

该方法通过高压电源与耦合电容器测量和分析局部放电产生的电流脉冲。主要是利用局部放电频谱中的较低频段部分，一般为数kHz至数百kHz，以避免无线电干扰。这种方法简单易于实现，但现场应用中无法避免电磁噪声的影响，灵敏度也较低。脉冲电流法应用广泛，已成为局部放电测试中最基本的方法，但主要用于出厂测试，在线监测应用较少。

（3）超声波检测法【21】

超声波检测法是通过安装在外壳上的超声波传感器测量GIS内产生局部放电信号时产生的振动及声音信号。超声波方法可以进行局部放电的定位，但其灵敏度较低。超声波法是目前使用的除UHF方法之外较为成熟的局部放电监测方法，由于其检测特点，主要作为便携式带电检测使用。

(4) 联合检测法【22】

甚高频（very high frequency, VHF）传感器可安装在电缆终端或中间接头附近的电缆本体上或者接地引线上，检测到带有背景噪声的等干扰的局放电脉冲信号。同时采用UHF传感器检测电缆局部放电，具有良好的抗干扰性能和较高的灵敏度，与体外式VHF钳型传感器联合起来进行局部放电检测，通过时域开窗的办法，利用UHF捕捉到的局部放电信号将VHF传感器测到的相对应的局部放电信号从复杂的背景噪声及干扰信号中提取出来，并由VHF传感器标定其放电量的大小。这样既可以排除现场的干扰，又可以检测到局部放电的放电量。

(5) 其它检测方法

当开关柜内发生绝缘故障时，将会产生一系列光、声等物理现象，因此我们可以根据这些物理现象来判定绝缘故障的类型和造成绝缘损伤的严重程度【23】。目前变电站对开关柜设备进行在线检测所使用的技术一般为暂态地电波法和超声波检测法联合法。

上述介绍的几种在线监检测法所应用的原理也可以应用于电抗器的故障监测中，但是其适用性差，不能针对电抗器的结构特点进行专项监测。因此，总结已经成熟的故障检测方法、学习其研究思路，进而从中研究一种适用于电抗器故障的监测方法具有重要意义。

## 1.2 电抗器概述

### 1.2.1 电抗器的发展史

过去的一段时间，电抗器产品的设计层出不穷、技术更是不断的上升。电抗器的创新设计、制造方法、试验技术和维护方式等各个方面都在业内人士间交流和竞争，很大程度上促进了电抗器的进步，甚至有所突破【26】。

发电机满负载试验用的电抗器作为并联电抗器的前身。在投入到设备使用中，存在大量缺陷，震荡强烈，噪声太大，而且安全系数太低，所以很快被新的电抗器产品取代。1967年上海电机厂的技术人员在原有的三相油浸铁芯式电抗器的基础上对其进行技术改造，生产了同类型60Mvar电抗器。该电抗器首次采用了辐射式铁芯饼和用弹簧强力压紧装置压紧铁芯柱，使并联电抗器的振动和噪声有所降低。

1970年我国开始在西北地区建设第一条330kV超高压线路，西安变压器厂(西安西电变压器有限责任公司前身，以下简称西变)为之提供了3X30Mvar／363kV并联电抗器。为了便于单相重合闸，消除单相接地故障以后的潜供电弧电流，超高压电抗器除了设置中性点电抗外，还要求减少相间耦合，因此都用单相。为了减少漏磁，30Mvar电抗器为单柱带磁轭回路，不但铁芯饼为辐射式，磁轭回路也辐射排列。

1980年，我国第一条用国产设备装备的500kV线路的元宝山-辽阳-锦州段在锦州设置了3X40Mvar／500kV并联电抗器。当时为了使500kV绕组具有更大的纵绝缘裕度，绕组二柱串联，故电抗器为二柱铁芯式。尽管磁通密度选用偏低，但由于制造技术还不完善，铁芯饼浇注工艺落后，电抗器运行中噪声仍接近90dB。

1985年，电抗器的制造技艺有了本质性突破，铁芯饼更加密实，浇注工艺更上一个台阶，并且电抗器中采用更为紧密的间隙材料，使电抗器噪声水平降低到80dB以下。但由于电抗器的技术要求，饱和以后的电压--电流特性曲线的斜率为饱和前的2／3，因此其空心电感值很大，漏磁相应就很大。运行后有低温过热现象。投运不久，在色谱分析中总烃、氢含量即达到注意值，干扰了正常的对电抗器故障的判断。铁芯式电抗器由于分段铁芯饼之间存在着交变磁场的吸引力，因此尽管采取了各项措施，其噪声一般要比同容量变压器高出10dB左右。

随着大城市地下电缆配电系统的不断扩展，电缆容性充电电流引起的轻负荷期的电压升高也日益引起重视。一些供电部门要求装设10kV、35kV三相铁芯式并联电抗器，容量为5Mvar～10Mvar。为了与配电装置相适应，这些电抗器都要求装在室内。采用铁芯式的目的是为了减少漏磁对建筑物的影响。为适应无油化趋势，又要求为干式。顺德特种变压器厂(顺特电气有限公司前身)于90年代开发了此类产品。

90年代以后，干式空心并联电抗器投入生产，使电网设备工作更加稳定，极大程度上保证了运行的安全性。不久之后，便出现了阻尼电抗器，也称为串联电抗器。滤波电抗器的出现，有效地抑制的电网谐波的污染。近年来，可控电抗器成为电气企业热议的话题，电抗器能做到容量可调，且能快速反应，则更为理想。随着紧凑型线路的引入，这一要求显得更为迫切。电能是最易受控的清洁能源，而电抗器作为无功功率补偿的必备设备，在电网中是必不可少的。随着我国科学技术和经济的不断发展，无论是装机容量或用电总量都将进人世界第2位，特别是近几年内，城乡缺电再度成为经济发展的瓶颈，加快电力建设势在必行，电抗器的需求相应增长。通过进一步降低噪声，控制谐波，保证安全，电抗器的未来仍有其发展前途。

此外，在特高压电网不同的发展时期，特高压输电线路传输的功率有较大差别，因此无功功率的变化也很不一样【27】。特高压电网在建设初期，主要是实现点对点的电能输送，受系统阻抗特性及稳定极限的限制，输送功率将小于线路的自然功率，线路发出的容性无功功率过剩。随特高压电网的进一步建设，特高压电网将实现各区域电网的互联，电网的输送功率将有很大的提高；而且，为了充分利用各区域电网的发电资源，实现水火电和更大范围内的资源优化配置，特高压电网的输送功率将随时变化，因而输电线路的无功功率也将频繁变化。

随着特高压电网的进一步发展，特高压线路无功的补偿度也应该随负荷的变化进行调整，否则它将使线路损耗增大造成受端电压过低，影响特高压线路的输电能力，使其达不到设计值。所以理想的高压并联电抗器是可以随着线路潮流和电压自动调节电抗器值的可控电抗器，这是未来特高压电抗器发展方向之一。

### 1.2.2 电抗器的分类及结构

电抗器是一种非常具有发展前景的电力设备。从电抗器的构成原理上讲，它属于电感元件，也正是因为其具有电感特性而被电力系统中广泛应用，它在系统中起着无功补偿、限流、稳流、滤波、阻尼、移相等作用，是电力系统中一种既常用又重要的电力设备【24】。电抗器主要按照结构型式、产品用途、绝缘结构以及使用条件等进行分类【25】。按照电抗器在结构上的差异可将其分为空心电抗器和铁芯电抗器两大类；按照电抗器在绝缘机构上的不同将电抗器分为干式电抗器和油浸式电抗器两种。

**1）按结构形式分类**

**(1) 空心电抗器**

顾名思义，空心电抗器指的是电抗器线圈中不存在铁芯结构，因此电抗器磁场便完全暴漏在空气当中，其磁通只能够经由空气形成闭合的磁回路。这种结构的电抗器不能有效的将磁场耦合在电抗器内部，因此会产生很强的漏磁，漏磁会对周围一些闭环金属体产生磁场影响。也正是由于空心电抗器不需要铁芯的构造大大降低了电抗器的生产制造成本。

**(2) 铁芯电抗器**

与空心电抗器相反，铁芯电抗器的构成必不可缺少的一部分便是铁芯，铁芯的存在使其磁通全部或大部分经铁芯闭合。其优缺点也与空心电抗器相反，铁芯电抗器虽减少的磁场干扰的危害，但是却在很大程度上增加生产了成本，而且结构相对复杂，运行维护也相对繁琐。

**2）按绝缘结构分类**

**(1) 干式电抗器**

干式电抗器是指电抗器线圈完全敞露在空气中，其线圈间的绝缘仅仅依靠空气介质，在电抗器的结构上不需要另外装设绝缘介质。干式电抗器的结构特点使得其具有结构简单、重量轻、噪音低、不渗油、维护方便等优点；但是在应用过程中，该类电抗器凸显了温升高、损耗相对大、使用寿命较短、可靠性低等缺点。

**(2) 油浸式电抗器**

油浸式电抗器的线圈通过装在油箱中的绝缘油进行绝缘，电抗器通过纸、纸板来达到对地绝缘的目的，同时利用变压器油来实现匝间绝缘。正是由于绝缘油的加入使油浸电抗器的绝缘水平增加，但也具有漏油、易燃等缺点。其整体的寿命周期成本较低，影响供电时间较短、效果好。

**3) 干式空心电抗器**

按照上述分类电抗器的分类特点，如图1.2所示的干式空心电抗器（Dry-type Air-core Reactors, DAR）既属于干式电抗器又属于电抗器，其是按照结构形式与绝缘结构两种分类方法相结合进行分类的多种电抗器组合的一种。作为电感元件电抗器的一种，DAR凭借自身结构与绝缘两方面的优势，以及近年来国内外在电磁感应与无功补偿领域的迅速发展，其在高压输电系统中具有较为广泛的应用前景，受到广泛关注。



**图1.2 干式空心并联电抗器实物图**

在DAR生产应用初期，电抗器结构多采用水泥来架设，但是水泥本身具有绝缘水平低、比较容易开裂、以及损耗大、占地面积大和安装使用不便等缺点，因此水泥式DAR应用领域逐步减少甚至变无；随着环氧树脂材料的不断发展与进步，目前DAR通常会采取环氧玻璃纤维来强固电抗器的多包封并联构架，整体经高温固化，层间有通风道，线圈内设有接头，所有端部连接都是焊接在铝制的星形接线壁上。因此，DAR的主要部件有星形接线壁、线圈、撑条、支柱绝缘和底座等。如图1.3便是目前广泛采用的结构，该种结构具有以下特点【44-46】：



**图1.3 DAR简化结构图**

1)无油结构，杜绝了油浸电抗器漏油、易燃等缺点，保证了运行安全。没有铁芯，不存在铁磁饱和，电感值的线性度好；

2)应用计算机进行优化设计，可以按照用户的不同使用要求快速准确的设计出最理想的结构参数；

3)采用多层绕组并联的筒形结构，各包封之间有成通风气道，散热性好，热点温度低；

4)绕组选用小截面圆导线多股平行绕制，可使涡流损耗和漏磁损耗明显减小；

5)绕组外部用浸渍环氧树脂的玻璃纤维缠绕严密包封，并经高温固化，使之具有很好的整体性，其机械强度高，耐受短时电流的冲击能力强；

6)采用机械强度高的铝质星形接线架，涡流损耗小；

7)空心电抗器的整个内外表面上都涂有抗紫外线防老化的特殊防护层，其附着力强，能耐受户外恶劣的气候条件；

8)安装方式可三相垂直，也可“品”字或“一”字形；户外露天使用可大大减少基建投资；

9)运行安全、噪音低，不需经常维护；

10)根据用户要求，其电感量可以做成可调的，调节范围可达5%或更大一些。

## 1.3 DAR匝间短路故障问题研究现状

电机或其它带线圈的电器，因为绝缘等损坏造成线圈之间短路连接，使线圈电阻减小的现象，就是匝间短路。DAR的匝间短路是指电抗器匝间线圈由于绝缘遭受破坏导致发生短路故障。首先从DAR的结构上来讲，DAR本质上来讲是由导线绕制的电感线圈，其周围工频磁场分布由每一层线圈叠加而成。当DAR由于绝缘故障，发生短路时，原有线圈的电流被打乱，叠加磁场产生变化，反应到其周围工频磁场分布上，通过比较正常运行时的工频磁场分布水平，可以检测到匝间短路故障的发生。此外，DAR发生匝间短路故障后，还会发生一系列的参数变化及影响。

### 1.3.1 匝间短路故障对DAR参数影响

DAR设备中存在匝间故障时，在结构上首先对其电感参数造成影响，进而使得电抗器中的电流及电压参数发生变化，在磁场方面，对周围磁场分布参数也会产生明显的影响。而通过准确计算与测量这些参数进一步判断DAR的运行状况具有很重要的意义。

1）匝间短路对DAR电感参数的影响

DAR电感参数的计算方法主要包含感应系数法、Bartky变换法、能量变换法等。感应系数法就是一种传统的手工计算方法，计算比较准确但计算速度慢、精度低；Bartky变换法采用了数学变换的方法来解决物理计算问题，其计算速度与精度都得到了很大程度的改善；能量变换法根据有限元法计算DAR的磁场分布，进一步求出电抗器的电感，计算结果较为准确【干式空心电抗器电感的计算】。

文献【匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究】分别采用了解析法和有限元法计算一个完整电抗器线圈电感参数，确定计算结果的准确性，然后采用有限元法模拟线圈匝间短路，针对不同短路位置，计算线圈电感变化量。通过电路仿真，不同位置处故障，所测波形的衰减频率的不同，验证了电抗器匝间绝缘检测的有效性。

2）匝间短路对DAR电压电流参数的影响

早在上个世纪90年代，吴健儿等学者就对DAR匝间绝缘的试验方法进行了研究【干式空心电抗器匝间绝缘试验方法研究】。他们通过研究电抗器发生匝间短路前后电压和电流波形的变化，得出在两种情况下波形的变化特征，总结出匝间短路故障后电抗器的电压和电流衰减程度要比正常时迅速、衰减频率要比正常时高的结论。在近几年来，也不断有研究人员在这方面进行了更加深入的研究，文献【干式空心电抗器匝间过电压试验技术研究】依据匝间短路对电抗器电压参数的影响原理研究出匝间过电压试验电路采用可控放电球隙是必要的。

3）匝间短路对DAR磁场分布的影响

文献【开放实验的实践—干式空芯电抗器匝间短路磁场分布的研究】以一台试验电抗器样机为前提，借助Ansoft Maxwell工程数值仿真软件及MATLAB编程软件研究了干式空芯电抗器在不同位置出现匝间短路时的磁场分布的情况。虽然匝间短路对除短路匝以外其余电路的参数没有明显影响，但由于短路匝的电流很大，因此会产生比较明显的磁场效应。电抗器正常工作时，其磁场分布情况应是上下对称的，如果出现短路匝，则必定会破坏对称性。

当电抗器发生匝间短路故障后，其周围磁场势必会发生变化。感应线圈监测的方法【基于探测线圈法的干式并联电抗器故障监测研究】就是通过在DAR底部大地电位处布置感应线圈，从而通过测量在感应线圈中由于磁场变化为感应出的电气参数来进一步判断DAR的运行状态或故障位置电。

### 1.3.2 匝间短路故障检测技术

现阶段电力系统的安全稳定运行越来越受到关注，为提高系统的安全系数，凭借其低损耗、低噪音、电抗值线性度好、设计寿命长、维护简单等优点得到了广泛应用。在电力系统中主要起限制合闸涌流、限制短路电流、补偿杂散容性电流、滤波等作用，是电力系统中重要的应用设备之一。随着干式电抗器投运数量及投运时间的增加，故障也逐步增多【28-31】。而匝间短路故障是最常见的故障之一，短路环中产生的大电流会对线圈造成损坏，甚至烧毁电抗器，故尽早发现电抗器匝间短路故障具有重要意义。为了减少的匝间短路故障问题，除提高电抗器的制造水平、弄清电抗器的运行环境外，还要有简单有效的检测方法【32】。

是电力系统中一种重要的无功补偿装置，其运行的稳定性直接关系着电力系统中的电能质量。然而，局部过热、散热不良、绝缘材料劣化、谐波影响等都是造成匝间短路故障的原因【33】，进而引起电抗器的损坏，电抗器匝间短路问题，现阶段有许多不同的监测方法，主要包括电气量监测法、烟感监测法、温感监测法、应力感应监测法以及探测线圈监测法等，具体为：

(1) 电气量监测法

干式电抗器的故障监测由于没有绝缘油介质的间接信息载体，最直接的方法是对电抗器的电气量寻求故障信息【34】。由于干式电抗器的电气量受电力系统运行方式的变化影响较大，加上自感特性的影响，无论是电流、电压还是阻抗，正常运行和异常方式下的变化值不明显，严重异常即故障时电气量保护装置动作，切除故障电流，所以对电气量进行监测不能达到预警的目的。

(2) 烟感监测法

如果干式电抗器发生过热而燃烧，产生的烟气可以被烟感探测器检测到，可实现监测的目的，很多室内消防系统就是基于该特征建立的。烟感探测器能探测到烟雾或某些特定的气体，用于检测环境是否有烟雾和烟雾的浓度，例如检测起火时的浓烟【35】。但是，电力电抗器一般被安装于户外运行，发热产生的烟气很容易被风吹散，不易集中成一定浓度，难以准确检测得到。

(3) 温感监测法

文献【36】中指出烟气产生于发热，对烟气监测不如对发热监测。正常运行时，干式电抗器的发热仅仅是运行电流产生，电抗器的温度随着环境温度和运行电流变化而变化，特别是受环境温度影响较大。当干式电抗器发生异常或故障时，电抗器的故障区域发热，温度上升，可以通过对温度进行监测来判断电抗器的运行状态。但是，这种检测方法也有某些缺点，无线温度传感器的无线信号发送受功率和障碍物影响，不能远距离传输，需要信号接收终端处理并转换成有线信号远传至后台计算机。

(4) 应力感应监测法

文献【37】提出一种能够感应内部因受热膨胀及电磁力等因素影响产生应力的光纤Bragg光栅(Fiber Bragg Grating，FBG)应变传感器，实现了固化中电抗器包封应变的在线监测。其本质也是监测电抗器中温度变化，当发生匝间短路故障时，电抗器包封温度变化明显，FBG应变传感器的Bragg波长移位也受温度影响，所以在FBG应变传感器旁边安装一个FBG温度传感器作为温度补偿。该温度传感器中的FBG处于悬空状态，对应变不敏感。由此，实现包封应变的测量。通过测量电抗器包封内应变的变化来监测设备是否处于正常运行状态。但是，这种监测方法对传感器的灵敏度有一定的要求，测量中易受环境影响。

(5) 探测线圈监测法

探测线圈监测法的本质是匝间短路会引起的电机内部磁场分布发生变化，而磁场变化会使短路环产生涡流并反映在探测线圈感应出的电压波形中【38】。涡流具有去磁效应使得导线内部磁通减小【39】。把电抗器看成若干绕组并联，当其发生匝间短路时，短路环产生的反向磁场也会部分抵消原来正常状态下的磁场，造成总磁场减小并使其磁场的空间分布发生变化。匝间短路发生后磁场关于电抗器的横轴已经不再对称。探测线圈监测法正是基于电抗器周围空间磁场分布的一种间接测量匝间短路故障的方法，能够及时准确地监测故障反生，但是其监测设备的安装运行可能会影响到电抗器的正常工作，给电抗器的应用带来不便。在电抗器两端放置探测线圈，故障发生后磁场分布不再关于横轴对称，两端探测线圈磁通量差值作为监测判据。主要问题是：1）对于电抗器内部短路，短路面数少，所引起的磁通量的变化不明显。2）虽然一定程度上弥补了过流保护不动作的问题，但是由于电抗器横轴附近故障时两侧磁通量差值无变化，存在故障监测死区。以上介绍的这些监测方法都有一定的局限性，而故障后势必会发生磁场分布上的变化。磁场分布受周围环境的影响相对较小，因此电抗器的运行状况可通过磁场的分布来监测。而目前针对电抗器匝间短路故障下磁场的分布特性还未被深入分析，针对这一问题开展研究具有重要的工程意义【40-42】。基于以上对电抗器匝间短路故障监测方法的比较，本文提出一种基于空间磁场变化的匝间短路故障监测法：通过监测电抗器故障前后周围磁场分布的变化规律，确定电抗器是否故障以及故障位置。

## 1.4 本文主要工作

本文主要研究DAR周围空间磁场分布规律，通过分析电抗器发生匝间短路故障时周围磁场分布的变化提出一种监测电抗器匝间短路故障的方法，主要内容包括以下几个方面：

1.首先，在介绍的结构特点及电气特性的基础上，进一步了解电抗器的构造并分析出电抗器的等效电路，为后续研究电抗器匝间短路故障奠定基础。此外，依据电抗器电感与磁感应强度的计算原理，通过比较选择出一种简单可靠的软件仿真计算法来进行后续电抗器匝间短路故障的磁场检测分析。

2.其次，利用解析法分析电抗器匝间短路故障。解析计算电抗器电感故障前后的变化

电感、电流、磁场变化规律理论分析

3. 仿真及实验验证分析

验证3分析，并分析区别的原因

# 第二章 DAR匝间短路磁场计算理论基础

DAR线圈中存在电流时，其周的空间内任意一点会产生磁场，周围所有点磁场的集合共同构成其空间磁场分布。为基于电抗器的空间磁场分布进一步研究电抗器匝间短路故障问题首先要建立基本的理论基础，主要包含电抗器的等效分析、电感计算理论以及磁场计算理论等。

## 2.1 DAR的等效电路分析

为提高远距离输电线路的传输能力并改善线路运行情况，常常需要在线路上装设电抗器、电容器等无功补偿装置，目前采用最多的是并联DAR和并联电容器组。在远距离输电线路上，装设并联DAR的目的主要有以下几点：

（1）削弱空载或轻载时长线路的电容效应—工频电压升高。这种电压升高是由于空载或轻载时，线路的电容（对地电容和相间电容）电流在线路的电感上的压降所引起的，国外称这种电压升高为“弗兰梯”效应，如图2.1所示为长线电容效应所引起的工频电压升高。它将使线路电压高于电源电压。当愈接近末端时，电压升高愈严重。通常线路愈长，则电容效应愈大，工频电压升高也愈大。



（a）电路图； （b）向量图；



（c）沿线电压分布

**图2.1 长线电容效应所引起的工频电压升高**

（2）改善沿线电压分布和轻载线路中的无功分布并降低线损。当线路上传输的功率不等于自然功率时，则沿线各点电压将偏离额定值，有时甚至偏离较大，如依靠并联电抗器的补偿，则可抑制线路电压的升高。通常是根据不同的传输容量，采用投、切电抗器的方法来改善沿线电压分布及降低有功功率损失。

并联电抗器的容量、数目及装设位置的选择一般是按照在空载、轻载以及接通空载线路等运行方式下保证设备得到允许电压，以及考虑与输电线路相连的系统的无功平衡等条件来确定的。当线路的输送功率加大时，必须适当切除电抗器以保证系统的电压和稳定性；在轻载时并联电抗器对充电功率进行了补偿，降低了线路的有功损耗。另外，随着沿线及受端电压的改善，也增加了系统的稳定性并相应增大了输送功率。

（3）减少潜供电流，加速潜供电弧的熄灭。所谓潜供电流，是指当发生单相瞬时接地故障时，在故障相自两侧断开后，故障点处弧光中所存在的残余电流，如图2.2所示。



**图2.2 单相接地与潜供电流**

潜供电流的存在使短路处的弧光不能很快自灭，从而影响单相自动重合闸的成功率，因此不得不增加单相重合闸的时间。线路越长，则潜供电流愈大，潜供电弧也愈不容易自行熄灭。另外，人们还把潜供电弧熄灭瞬间故障相短路处的对地电压称为恢复电压，其值也不能过大，否则将有使电弧重燃的可能。

可以采用在并联电抗器的中性点接小电抗接地的方法来补偿潜供电流，从而加快潜供电弧的熄灭。这时只要适当选择小电抗的值，就可以得到适当的相间电抗及相对地电抗以补偿形成潜供电流源的相间电容和相对地电容，从而减少潜供电流并加速潜供电弧的自灭。根据上述补偿原理可看出，如果把并联电抗器直接接地时，则只有相对地电抗而不存在相间电抗，这时补偿效果将大为减少；特别是当电抗器引出端发生故障时，故障相对地的并联电抗也被短接，这样就完全失去了补偿效果。

（4）有利于消除发电机的自励磁。当同步发电机带容性负载时，发电机的电压将自行建立而不与发电机的励磁电流相对应，这种现象称为自励磁。当发电机自励磁时，系统电压将超过其允许值而危及线路和变电设备的绝缘。当远距离输电线路空载或轻载运行时，就有可能产生这种自励磁现象。

理论分析表明：是否产生自励磁现象取决于发电机的参数以及发电机端点出口阻抗的性质及其数量关系。实践证明，通过在高压线路上接入并联电抗器的方法来改变发电机端点的出口阻抗是防止产生自励磁的一种有效措施。

并联电抗器必须能在系统最高运行电压下安全可靠地运行。其电感一般要求在120%~140%的额定电压时保持不变；在150%的额定电压时，其电感的降低不大于5%。

### 2.1.1 电抗器的电气特性分析

**1. 电磁特性**

从理论上讲，并联电抗器周围的磁场分布仍然符合理想条件下的电磁场分布特点，即完全满足麦克斯韦基本方程组：

2-1

其中，***H***(A/m)和***E***(V/m)分别为磁场强度和电场强度，***B***(T)和***D***(C/m2)分别为磁感应强度和电位移向量，***J***(A/m2)和*ρ*(C/m3)分别为两个元变量电流密度和电荷密度。

这里需要说明的是几个变量之间满足以下关系式三个媒质的构成关系式如下：

2-2

可见，根据以上给出的两组方程组能够推导出电抗器周围具体的电磁分布形式。

**2. 谐波特性**

当并联电抗器两端加正弦电压时，其中会产生非正弦周期稳态电流外，通过傅立叶展开可得到各次谐波分量，即求得通过电抗器的谐波电流值。

假设正弦电压为*u*(*t*)，则其具体的表示形式为：

2-3

其中，*U*、和分别表示电压幅值、角频率和初相角。

则非正弦稳态电流*i*(*t*)的傅立叶展开式可表示为：

2-4

其中，

；

，；

，；

，；

（）。

*Ik*为*k*次谐波的电流幅值，当时，*I*1为基波电流。

**3. 伏安特性**

电抗器正常工作情况下，将激励电压的额定幅值*U*设定为基准值，其相对应的基波电流*I*1设定为电流基准值，通过求取实际基波电流幅值标幺值与实际激励电压幅值标幺值得到伏安特性曲线，进一步研究具体的伏安特性。

### 2.1.2 DAR等效电路计算

从电抗器的结构特点及电气特性可以看出，由多个并联线圈组成，假设线圈个数为*n*，每条线圈支路等效为直流电阻*Ri*和自感*Li*的串联，线圈与线圈之间还包含有互感*Mij*。其具体的线圈计算模型如图2.3所示。



**图2.3 电抗器正常运行情况下的等效电路计算模型**

根据等效电路可以列写出线圈电路的计算方程组为：

2-5

为了计算简便迅速，将等效方程组写成矩阵形式为：

2-6

其中，，，**，。

由于电抗器等效电路是由多个支路并联而成，则矩阵方程中各个支路总电压相等，即。

同理，当电抗器内部某一层线圈中发生匝间短路故障时，短路位置等效电阻和自感分别为*Rn*+1和*Ln*+1，其等效电路的对外等效电压为零；而其他非故障处等效电阻与自感都有一定的变化，这里记作和自感，线圈之间的互感为。其具体的电抗器的匝间短路故障计算模型如图2.4所示。



**图2.4 电抗器匝间短路故障时的等效电路计算模型**

根据等效电路可以列写出电抗器发生匝间短路故障后的电路计算方程组为：



同样，为计算需要，其简化矩阵形式为：



其中，，，，。

由于电抗器发生匝间短路故障后其外部所加激励电压保持不变，则矩阵方程中各个支路中的电压仍满足公式，其匝间短路故障处的电压。

## 2.2 DAR电感与磁场计算原理与方法

### 2.2.1 电感计算分析

**1. 原理介绍**

从原理上讲，是由多个通有电流的同轴线圈并联组成，每个载流线圈等效为一个含有若干匝数的螺线圈。正是因为这个原因，电抗器中单个线圈的自感以及各个线圈之间的互感也就等效于每个螺线圈的自感以及各个螺线圈之间的互感，而对于含有*N*匝线圈的螺线圈从本质上又等效于*N*个通有相等电流的等径线圈，具体的等效示意图如图2.5所示。



**图2.5 两层同轴螺线圈及其坐标模型**

注：假设两螺旋线圈中心点之间的纵坐标距离为*S*。

由纽曼公式以及毕奥—萨伐定律可得，螺线圈1上*z*1处与位于螺线圈2上*z*2处的单匝圆环的互感可以表示为：



设螺线圈1、2的单位长度内的匝数分别为*n*1和*n*2，则螺线圈1上*z*1处单匝通电圆环对整个螺线管2的互感可以表示为：



对于高度分别为*H*1和*H*2、半径为*R*1和*R*2、单位长度匝数分别为*n*1和*n*2的空心电抗器的两层螺线圈的互感，可以使*S*=0；对于自感可以按照*H*1=*H*2=*H*、*R*1=*R*2=*R*、*S*=0来考虑。将*M*1对*z*1积分，则由积分原理可进一步推导出，两层螺线圈之间的互感*M*12计算公式为：



**2. 实例计算**

为了提高求解时计算的收敛速度，采用Bartky变换法，经过该变换后，用计算机编程，就很容易求取电抗器自感与互感，但是计算量仍较大。本文中将充分利用Ansoft软件计算带电导体电感的强大功能，在Ansoft软件中仿真计算电抗器的自感与互感，并将计算结果与解析法计算相比较以证明Ansoft仿真软件计算电感的准确性。

选取仅有三层线圈的电抗器来建立简单的模型，具体的模型参数如表2.1所示。

**表2.1 单相电抗器结构参数表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 线圈 | 中经（mm） | 线圈高（mm） | 匝数 | 螺线直径（mm） |
| 1 | 606.22 | 525.3 | 147.58 | 3.15 |
| 2 | 612.66 | 512.91 | 144.1 | 3.15 |
| 3 | 675.48 | 524.99 | 131.92 | 3.55 |

各层线圈半径*R*1、*R*2和*R*3以及单位长度匝数*n*1、*n*2和*n*3的取值均按表2.2中所示，线圈高度*H*1、*H*2和*H*3取表2.1线圈高。将参数带入上述介绍的电感计算公式得到的电感参数如表2.2。

**表2.2 单相电抗器公式计算电感参数表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 线圈 | 线圈半径*R*（mm） | 单位长度匝数*n*（匝/mm） | 自感（mH） | 互感（mH） |
| 1 | 303.11 | 0.2809 | 9.7507 | 9.5122（M12） |
| 2 | 306.33 | 0.2809 | 9.6055 | 8.1661（M23） |
| 3 | 337.74 | 0.2513 | 9.3094 | 8.1191（M31） |

已知电抗器的结构参数便可在Ansof软件中建立仿真模型，在软件中仿真计算出的电感参数如表2.3。

**表2.3 单相电抗器仿真计算电感参数表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 线圈 | 1 | 2 | 3 |
| 自感（mH） | 9.8107 | 9.6678 | 9.3567 |
| 自感误差（%） | 0.6153 | 0.6486 | 0.5081 |
| 互感（mH） | 9.6311（M12） | 8.2555（M23） | 8.1990（M31） |
| 互感误差（%） | 1.2500 | 1.0948 | 0.9745 |

比较两表格中自感和互感的数据，可以看到解析法与有限元法求取的自感与互感误差不到2%，说明在Ansoft中仿真计算线圈的电感参数具有很高的精确度。

在计算过程中，参数带入公式法只能计算正常电抗器的电感参数，如果该电抗器存在匝间短路故障时，该方法则难以计算出该电抗器的电感参数。而在Ansoft中，可以模拟存在短路环并计算电抗器的电感参数。

### 2.2.2 磁场计算分析

**1. 原理介绍**

从物理学角度讲，磁感应强度*B*的定义公式为：



其中，H/m，*r*为两点之间的距离，*e*为单位方向相量，*I*为通电导体中的电流。

为直观分析单匝通电线圈周围空间中的磁感应强度（以下简称磁场）建立如图2.6所示的示意图。在图2.6中：空间内有一圆形单匝通电线圈，其圆心为O1，半径为*R*1，电流为*I*；以平行于线圈所在平面、距离线圈*Z*1处为XOY平面建立空间坐标系，空间内任意一点P（*x*，*y*，*z*），分析P点的磁场*B*；以P点距Z轴的距离*R*2为半径，O2为圆心，作一平行于通电线圈的圆，这里，P点距离XOY平面的距离*Z*2=*z*；通电圆环上任意一点*dl*，O1*dl*与PO2的夹角为。由于单匝通电线圈在P点产生的磁场*B*1具有对称性，P点的磁场除轴向与径向分量外都相抵消，因此只分析轴向与径向分量即可。



**图2.6 单匝通电线圈磁场计算示意图**

这里的P点轴向与径向分别指的是P的Z轴（即O1O2）方向与半径的方向（即圆心O1指向圆周）方向。根据磁场的定义，在P(*R*2, *Z*2)处由于单匝通电线圈而产生的磁场*B*1的径向分量和轴向分量计算公式为：



通过积分计算可得含有*n*匝线圈的单层绕组在空间任意一点P(*R*2, *Z*2)处的磁场*BnH*的径向分量和轴向分量为：



其中，*H*为单层绕组的高度，*n*为线圈匝数。

推广至含有*m*层线圈的电抗器中，则在空间任意一点P(*R*2, *Z*2)处的磁场*Bm*的径向分量和轴向分量为：



**2. 实例计算**

以上介绍的计算磁场的公式可以精确地计算DAR空间内任意一点的磁场，然而公式计算比较繁琐，计算量比较大且计算时间久。与计算电感相同，本文中将充分利用Ansoft软件计算带电导体周围磁场的功能。在Ansoft软件中仿真计算电抗器周围某点的磁场，并将软件仿真计算结果与普通的公式计算结果相比较，以证明Ansoft仿真软件计算磁场的准确性。此外，Ansoft软件仿真还能够通过分布云图的形式直观地展示电抗器周围磁场的分布，为分析电抗器周围磁场规律提供了一种简便的途径。

利用Ansoft软件计算电抗器电感，使用MATLAB编程求解电抗器电路方程组，将求得的电流值以激励的形式加入到Ansoft中的电抗器模型，进一步得到电抗器空间磁场分布。

将上节仿真求解得到的电抗器电感带入式（2-5）中，通过计算得出每层线圈中的电流激励*I*1，*I*2和*I*3分别为：

A

将计算的电源激励分别带入公式和仿真模型来计算电磁场，进一步分析电抗器周围磁场分布。这里选取电抗值周围的几个特殊点来计算磁场，其中坐标系的选取如图2.7：选取电抗器的中心为三维坐标原点，电抗器的轴线方向为Z轴，在过坐标原点垂直于轴线的平面内任取两个相互垂直的线作为X轴与Y轴。这里取三个比较特殊的点*P*1、*P*2和*P*3来验证仿真分析与公式计算电抗器周围磁场的误差。其中*H*为电抗器中线圈最高的那层高度值，*R*为最外层线圈的半径。

经过Ansoft软件仿真与公式计算得到这三个点的磁场如表2.4所示，由表中数据可见：软件仿真得到的磁场与公式计算结果相差不大，误差比不到3%，因此，为了提高计算速度与任意设置测量点，完全可以通过Ansoft软件仿真来计算电抗器周围磁场分布。



**图2.7 电抗器磁场计算坐标示意图**

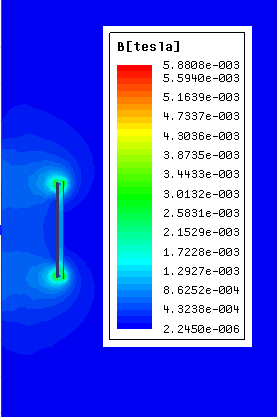
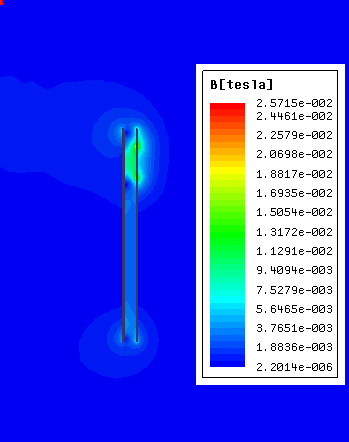
**表2.3 单相电抗器仿真计算电感参数表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 位置 | 公式计算磁场（μT） | 软件计算磁场（μT） | 相对误差（%） |
| *P*1（0，0，0） | 515.6842 | 521.4324 | 1.1147 |
| *P*2（0，0，*H*/2） | 629.3795 | 636.5392 | 1.1376 |
| *P*3（0，*R*，0） | 51.9961 | 53.2501 | 2.4117 |

## 2.3 DAR运行状态与其空间磁场分布之间的关系

从电抗器电感与磁场计算的原理可以看出：电抗器匝间短路故障影响其等效电路中电感矩阵值，进而会影响到并联电抗器内部通过的电流值，即会影响到电抗器周围原有磁场分布。反而言之，电抗器空间磁场的分布规律会在一定程度上反应电抗器的运行状态。下面以2.2.1节所建的简单电抗器模型发生故障后磁场分布的变化为例简单说明电抗器运行状态与磁场分布之间的关系。

如图2.8(a)所示为电抗在正常运行时其空间磁场分布云图的剖面图，可以看出磁场分布具有很强的对称性。图2.8(b)则为该电抗器发生一非对称性匝间短路故障后其磁场剖面图，可见电抗器发生非对称性匝间短路故障后，其磁场不再成对称分布，越靠近故障位置磁场变化明显。

(a)正常运行状态 (b)非对称匝间短路故障

**图2.8 DAR空间磁场分布剖面图**

DAR匝间短路故障在短时间内虽然电抗器以外其余电路的参数没有显著影响，但由于短路故障线圈的电流很大，因此会产生比较明显的磁场变化：电抗器正常工作时，其磁场分布在空间范围内具有轴对称性，在剖面图上具有上下对称性；如果出现非对称性匝间短路故障时，则必定会破坏电抗器原有空间磁场分布的对称性。因此，在电抗器空间范围内通过测量磁场分布的变化量来检测电抗器匝间短路的检测方法是可行的。

## 2.4 本章小结

本章首先从的结构特点及电气特性出发分析了的特性，进而根据其构造特点分析出具体的等效电路，为后续文中对电抗器匝间短路故障研究奠定了基础。为说明的电气特性，这里通过介绍其具体的用途来引出电抗器的特性，并描述了电抗器的电磁特性、谐波特性和伏安特性。其次，本章叙述电抗器电感计算的原理与方法，通过不同的算法比较得出仿真分析的优势与准确性，为进行仿真实验研究提供了理论依据。最后，本章仿照电抗器电感计算的分析方法，对软件仿真计算电抗器磁场分布的准确性也进行了推理验证。

# 第三章 DAR匝间短路单故障磁场分析

电机或其它带线圈的电器，因为绝缘等损坏造成线圈之间短路连接，使线圈电阻减小的现象，就是匝间短路。DAR的匝间短路是指电抗器匝间线圈由于绝缘遭受破坏导致发生短路故障。DAR在发生的故障在95%以上属于匝间短路故障。当电抗器发生短路故障时，原有线圈的电流被打乱，叠加磁场产生变化，反应到其周围工频磁场分布上，通过比较正常运行时的工频磁场分布水平，可以检测到匝间短路故障的发生。

针对DAR匝间短路故障后磁场的分析，已有很多国内外学者对此进行了大量研究。由于实验测量法必须破坏原有电抗器的结构，实现难度不仅高而且耗费资源多，因此目前多选用仿真计算法分析DAR匝间短路故障磁场以达到研究目的。DAR匝间短路故障可能是发生在单一位置，也可能发生在多处，将单一位置的匝间短路故障简称为单故障、多处的匝间短路故障简称多故障。

## 3.1 电抗器单故障的模型建立

### 3.1.1 故障分析流程



**图3.1 匝间短路故障检测分析流程**

在进行分析电抗器匝间短路故障空间磁场分布规律时，首先要确定具体的分析流程。第二章已对电抗器故障的分析方法做出研究比较，因此，本文选用计算迅速简便易实现的仿真法进行求解。图3.1所示为本章建立DAR匝间短路模型并进行分析的基本流程：首先，明确电抗器结构参数并建立电抗器模型；其次，通过软件仿真计算电抗器内所有线圈自感以及线圈与线圈之间的互感，确定短路故障后的电感矩阵；再次，通过按照DAR短路后的等效电路求解每层线圈中的电流；然后，在仿真模型的线圈中加入与计算电流相等的电流激励并计算出电抗器周围磁场；最后，总结分析电抗器故障前后空间磁场变化规律，进一步研究出电抗器空间磁场变化与匝间短路故障位置以及故障匝数之间的关系。

### 3.1.2 电抗器的Ansoft仿真模型

**表3.1 仿真电抗器结构参数表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 包封号 | 层号 | 中经（mm） | 线圈高（mm） | 匝数 | 电阻（Ω） | 线径（mm） |
| 一 | 1 | 2006.5 | 1846.9 | 727 | 38.85848 | 2.54 |
| 2 | 2011.7 | 1832.0 | 721 | 38.64536 |
| 3 | 2016.9 | 1818.4 | 716 | 38.45679 |
| 4 | 2022.1 | 1805.9 | 711 | 38.29154 |
| 二 | 5 | 2085.3 | 1817.5 | 675 | 32.55087 | 2.69 |
| 6 | 2090.8 | 1806.3 | 671 | 32.43379 |
| 7 | 2096.3 | 1796.2 | 667 | 32.33699 |
| 8 | 2101.8 | 1787.2 | 664 | 32.25967 |
| 三 | 9 | 2165.2 | 1834.9 | 645 | 28.30100 | 2.85 |
| 10 | 2171.0 | 1826.9 | 642 | 28.25233 |
| 11 | 2176.8 | 1820.1 | 640 | 28.22255 |
| 12 | 2182.6 | 1814.5 | 638 | 28.21118 |
| 四 | 13 | 2246.2 | 1810.7 | 625 | 27.28894 | 2.9 |
| 14 | 2252.1 | 1807.0 | 624 | 27.30552 |
| 15 | 2258.0 | 1804.6 | 623 | 27.34017 |
| 16 | 2263.9 | 1803.4 | 623 | 27.39287 |
| 五 | 17 | 2327.6 | 1801.0 | 622 | 28.12656 | 2.9 |
| 18 | 2333.5 | 1801.8 | 622 | 28.21071 |
| 19 | 2339.4 | 1803.9 | 623 | 28.31426 |
| 20 | 2345.3 | 1807.2 | 624 | 28.43764 |

针对DAR本身的结构特点及特性，在本章的分析过程中选用的电抗器额定电气参数为：单相容量*Sn*=2000kV.A；工作相电压*U*=35kV；含有5个包封，每个包封有4层线圈相并联。其具体参数如表4.1所示。

在分析每层电抗器线圈时，由于实际电抗器线圈匝与匝间是均匀且紧密分布的，为方便建模可以将模型进行适度等效简化。以三包封电抗器为例，如图3.2所示：在保证每层线圈基本参数（即直径与线圈高度）的基础上，将电抗器线圈圆形的横截面简化为小矩形；又因为线圈匝间排列紧密，可将简化后的每个小矩形连接成一个长为线圈高度、宽为线圈线径的大矩形。因此，每层电抗器线圈可以简化等效为一个中空的圆柱体，其简化等效后的电抗器横截面排列形式如图3.2(b)所示。

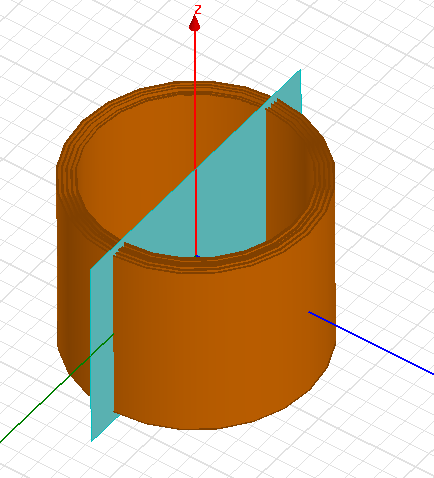
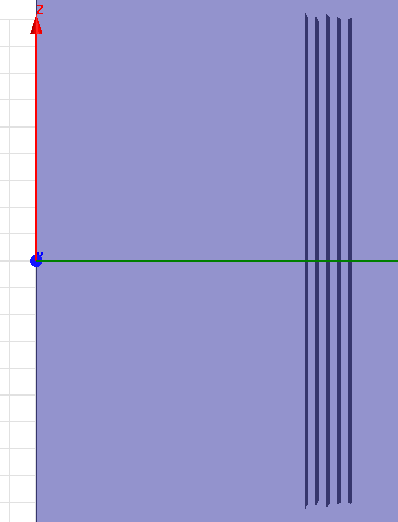
(a)实际线圈分布 (b)简化线圈分布

**图3.2 二维模型线圈等效处理示意图**

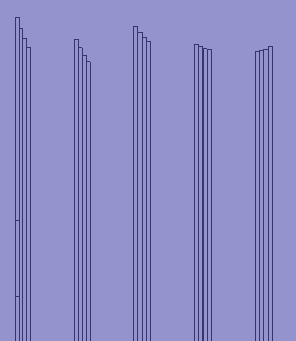
依据表3.1的电抗器参数建立DAR仿真模型，所建三维模型如图3.3(a)所示，可见DAR电抗器结构具有很好的对称性。为了分析方便，以DAR三维模型图中的Z轴与Y轴建立如图3.3(b)所示的二维模型。如图3.3(c)所示，在仿真模型中设定匝间短路故障时需对发生故障线圈进行修正：在短路位置作一矩形表示短路环，其中矩形的宽与线圈线径相同，矩形的长*h*为线圈线径与短路匝数的乘积；使用软件中的逻辑减法处理被短路，其他非故障线圈几何模型不作处理。当第*k*层线圈发生匝间短路故障时，定义匝间短路的故障程度*s*为：



其中，*Hk*为第*k*层线圈的高度，*h*为短路环的高度。

(a)三维模型 (b)二维模型



(c) 匝间短路故障模型

**图3.3 DAR仿真模型图**

如图3.4所示：在所建立的电抗器模型中将线圈*m*进行编号，其中第一包封第一层线圈编号为1、第二层为2，依此类推，第四包封第五层线圈编号20……，按照这样的编号命名各层线圈所加的电流激励为Current1，Current2，Current3……。将短路线圈编号为SC，相应的短路激励为CurrentSC。由于DAR发生匝间短路故障的匝数过多，则电抗器故障检测变得毫无意义，这里仅研究故障匝数不超过本层线圈匝数的1/3的情况。将匝间短路故障的中心位于电抗器总高度2/3以上时定义为“上部故障”，故障中心低于总高度2/3且高于1/3时为“中部故障”，故障中心低于1/3时为“下部故障”。



**图3.4 电抗器故障位置示意图**

## 3.2 电抗器电感仿真求解分析

建立DAR的基本模型后，要想求得电抗器电感矩阵，则需在求解器为静态磁场的环境中进行求解；将激励电流设定为任意值；场域范围取值需大于7倍的电抗器模型并设为气球边界；设定求解电感的参数矩阵，并在矩阵的“后处理”中输入指定线圈匝数，当电抗器匝间短路故障需改变短路匝数时，求解电感的参数矩阵中线圈匝数设定随之改变。

按照本章电抗器参数建立模型并定义各层线圈，则求得的当电抗器不发生短路故障时电感矩阵如式（），显然电感矩阵具有对称性。为观察每层线圈自感以及线圈之间互感与线圈位置的关系，将电感矩阵绘制成图3.5，在图3.5中纵坐标代表电感值，横坐标表示电抗器线圈编号。

由图3.5可见：DAR在非故障状态下，每层电抗器的自感值总是大于本层线圈与其它任意线圈间的互感值，说明在并联电抗器中每层线圈电流的的大小主要由本层线圈的自感决定；在每层电抗器中，其互感值随线圈之间距离的增大而减小，说明电抗器线圈对相邻线圈中电流的影响力比较大；各层线圈的电感值不尽相同，说明电抗器的自感与其各自线圈的参数有关，因此，电抗器线圈的电感与匝间短路故障之间的关系研究需对每层线圈分别分析。

(3-2)



**图3.5 电抗器非故障状态下线圈的电感**

### 3.2.1 故障位置相同程度不同电感变化

已知DAR在非故障运行状态下的电感矩阵，为分析匝间短路故障对电抗器电感的影响，本节首先分别分析在不同线圈的中部、上部以及下部三处发生短路故障时电感随短路匝数的变化规律。由于本章仿真模型中电抗器线圈层数较多，这里随机选取编号分别为*m=*1、*m=*11和*m=*20的三个电抗器线圈分别进行研究。

**1. 电抗器发生上部故障时电感变化**

DAR上部发生匝间短路故障时，将短路故障的故障中心固定于“上部故障”的中心。在故障程度*s*不同的情况下，电抗器的第1、11和20层线圈电感分布曲线分别如图3.6(a)、图3.6(b)和图3.6(c)所示。



(a) 线圈层编号*m*=1 (b) 线圈层编号*m*=11



(c) 线圈层编号*m*=20

**图3.6 电抗器发生上部短路故障时线圈的电感值**

当故障程度*s*较小时，发生匝间短路故障的线圈中仍然是自感值最大，自感值对自身线圈中电流的大小起决定作用；随着故障程度*s*的增大，故障层线圈的所有电感均减小但是减小程度有所不同，自感的减小程度最大且减少到自感小于与相邻线圈间的互感，这时本层电抗器线圈的自感不再是决定其线圈电流的最主要因素，而变为本层线圈与相邻线圈层的互感值。

**2. 电抗器发生中部故障时电感变化**

DAR中部发生匝间短路故障时，将短路故障位置的中心固定在“中部故障”的中心，电抗器的第1、11和20层线圈电感变化随匝间短路的故障程度*s*的变化曲线分别如图3.7(a)、图3.7(b)和图3.7(c)所示。

(a) 线圈层编号*m*=1 (b) 线圈层编号*m*=11



(c) 线圈层编号*m*=20

**图3.7 电抗器发生中部短路故障时线圈的电感**

当故障程度*s*较小时，线圈的自感最大，其对自身线圈中电流的大小影响最大；随着故障程度*s*的增大，与本层线圈相关的所有电感均减小但减小程度不同，自感的减小最大且减少到小于与相邻线圈间的互感，因此，本层线圈与相邻线圈层的互感是决定其线圈电流的主要因素。

**3. 电抗器发生下部故障时电感变化**

DAR下部发生匝间短路故障时，将短路故障位置的中心固定在“下部故障”的中心（该中心与“上部故障”中心相对称），电抗器的第1、11和20层线圈电感变化随匝间短路的故障程度*s*的变化曲线分别如图3.8(a)、图3.8(b)和图3.8(c)所示。

(a) 线圈层编号*m*=1 (b) 线圈层编号*m*=11



(c) 线圈层编号*m*=20

**图3.8 电抗器发生下部短路故障时线圈的电感**

在不考虑外因干扰情况下，电抗器线圈发生“下部故障”时，其线圈电感随故障程度的变化规律与发生“上部故障”时几乎完全相同。当故障程度*s*较小时，电抗器线圈自感值最大；随着故障程度*s*的增大，故障层线圈的自感减小程度最大且减少到自感小于与相邻线圈间的互感。

综上三种情况可见：在理想条件下，电抗器发生“上部故障”、“中部故障”以及“下部故障”时，随故障程度的变化电抗器电感变化的规律大致相同，随故障程度的增加电感变化越大；当故障程度较小时，电抗器线圈自感值最大；随着故障程度的增大，故障层线圈电感均减小，自感减小程度最大且减少到自感小于与相邻线圈间的互感。

### 3.2.2 故障程度相同位置不同电感变化

本节研究的不同故障位置指的是同一层线圈的不用位置和不同线圈的同一位置，以下针对这两种情况下电抗器电感的变化百分比进行研究。由上节可知：电抗器在上部与下部发生匝间短路故障时，其对电感的影响几乎相同，因此，本节对线圈位置变化只研究“上部故障”与“中部故障”；当电抗器线圈发生不同程度的故障时，故障程度大于5.78%时电抗器电感变化趋势一致，因此本节针对故障程度为0.28%和5.78%两种情况分别进行研究。

(a) 故障程度*s*=0.28% (b) 故障程度*s*=5.78%

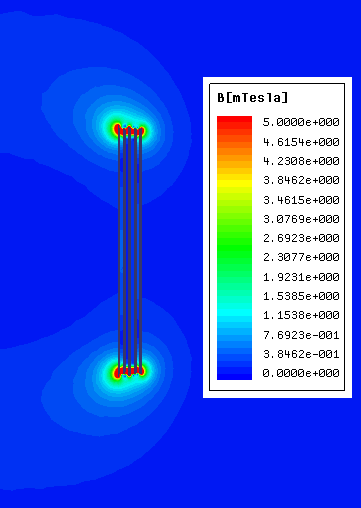
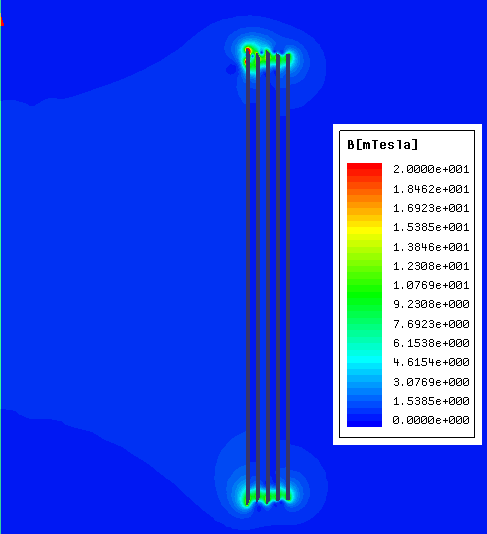
**图3.10 电抗器在不同位置发生故障时线圈电感变化**

图3.10所示为电抗器在不同位置发生匝间短路故障时线圈电感的变化，由图可见：故障程度为0.28%时，“中部故障”对电抗器线圈电感的影响比“上部故障”影响大，外层线圈比内层线圈更易受匝间短路故障影响；故障程度为5.78%时，“中部故障”对电抗器线圈电感的影响仍比“上部故障”影响大，外层线圈与内层线圈受匝间短路故障的影响程度基本相同。

## 3.3 DAR匝间短路单故障磁场分布

电抗器发生匝间短路故障后各个参数都有所变化，上述已研究出电感的变化特性，但是实际中电感的测量相对复杂，而电感的变化进一步会引起磁场的变化，另外，磁场的测量简单易行。因此，通过测量磁场分布来检测DAR匝间短路故障是一种非常可实现的检测方法。本节主要研究电抗器匝间短路故障后磁场的变化规律。

通过仿真计算所得的电抗器在正常运行时周围磁场分布云剖面如图3.11(a)所示：DAR在理想条件下正常运行时，电抗器周围的磁场分布具有良好的对称性，其磁场分布的横截面上下对称。选取编号为1的电抗器线圈顶端发生20匝的匝间短路故障，其仿真得到的磁场云图如图3.11(b)所示：电抗器发生不对称性的匝间短路故障时，电抗器磁场分布的对称性受到破坏，在故障位置处的磁场强度明显增大。

(a) 电抗器正常运行 (b) 电抗器发生匝间短路故障

**图3.11 电抗器磁场分布云图**

由上述简单的比较可见，当电抗器发生匝间短路故障后，其磁场分布不再对称。文献【Simplified Magnetic Field Modeling and Calculation of Large Air-core Reactor Coils】通过研究如图3.12所示电抗器周围径向中心轴（Axial Traverse in Center, ATC）、径向侧轴（Axial Traverse in Side, ATS）、横向中心轴（LTC）、横向顶端轴（LTT）、横向中间轴（LTH）五个方向上磁场的分布来研究电抗器简化模型对电抗器磁场的准确预测。本节所建立的仿真模型采用的是实际的电抗器参数，因此，仅选取其中ATC和LTC两个对称轴方向对电抗器匝间短路故障后磁场分布进行研究；本节选取故障程度分别为*s*1=0.28%、*s*2=16.78%和*s*3=33.29%的三种故障，以及*m*分别为1、11和20的线圈的上部、中部和下部故障位置。



**图3.12 电抗器磁场分布测量方向**

仿真计算所得DAR正常运行时ATC与LTC方向的磁场分布如图3.13所示。由图可见：电抗器正常运行时，其中心位置的磁场比较小，在ATC与LTC两个方向的磁场均随距离的增加先增大后减小。



**图3.13 DAR正常运行时磁场分布**

### 3.3.1 ATC方向磁场分布规律

建模计算出电抗器在发生各种故障情况下的磁场分布变化，分析其在ATC方向上的磁场分布特点。DAR在第1、11和20层线圈发生匝间短路故障后其在ATC方向的磁场变化百分比曲线如图3.14、3.15和3.16，沿ATC方向取10m的距离，用*d*A表示。

S=0.28% S=16.78%



S=33.29%

**图3.14 第1层线圈故障时，ATC方向磁场变化曲线图**

由图3.14可见：所有曲线的最大磁场变化百分比对应的*d*A均小于1m；当*d*A＞1m时，*s*=0.28%曲线波动很小，随s的增大曲线波动增大；当*d*A＞1m时“中部故障”变化百分比均大于零，“上部故障”与“下部故障”百分比整体小于零。



**图3.15 第11层线圈故障时，ATC方向磁场变化曲线图**

由图3.15可见：所有曲线的最大磁场变化百分比对应的*d*A均小于1m；当*d*A＞1m时，*s*=0.28%曲线波动很小，随*s*的增大曲线波动增大；当*d*A＞1m时“中部故障”变化百分比均大于零，“上部故障”与“下部故障”百分比整体小于零，且二者曲线分布相差不大。





**图3.16 第20层线圈故障时，ATC方向磁场变化曲线图**

由图3.16可见：所有曲线的最大磁场变化百分比对应的*d*A均小于1m；当*d*A＞1m时，*s*=0.28%曲线波动很小，随*s*的增大曲线波动增大；当*d*A＞1m时“中部故障”变化百分比均大于零，“上部故障”与“下部故障”百分比整体小于零，且二者曲线分布几乎相同。

综上可得，电抗器线圈发生匝间短路故障ATC方向磁场分布特点如下：

1.ATC方向磁场受到影响最大处均位于电抗器内部；

2.在同一故障位置处，随故障程度的增加电抗器在ATC方向的磁场受到的影响越来越大；

3.在同一故障程度下，“中部故障”增加了电抗器ATC方向的整体磁场，而“上部故障”与“下部故障”均使电抗器ATC方向磁场减小，减小程度有所不同，“上部故障”对ATC方向影响相对较大；

4.故障线圈越靠近外层，“上部故障”与“下部故障”对ATC方向磁场的影响越相近。

### 3.3.2 LTC方向磁场分布与故障关系

为分析DAR发生匝间短路故障后LTC方向上的磁场分布特点，本节绘制了电抗器第1、11和20层线圈发生匝间短路故障后LTC方向的磁场变化百分比曲线。具体如图3.17、3.19和3.19，沿LTC方向取10m的距离，用*d*L表示。

## 3.5 本章小结

本章在理论分析DAR匝间短路故障磁场变化的基础上建立

1. 对于同一位置，随着匝间短路严重程度加深，电感值减小速度越快，变化率越大，电感变化率与匝间短路严重程度成正相关。

2. 在匝间短路严重程度相差不大的情况下，短路发生位置对电感的变化有影响:当匝间短路故障发生在空心电抗器端部时，对电感的变化影响最小，越靠近中部时，对电感变化率的影响越大。

3. 空心电抗器发生匝间短路时，中心轴线上磁感应强度整体增强，故障越严重，增强幅度越大。

4. 在发生匝间短路的那一段区域，由于有效匝数的减少，中心轴线上磁感应强度降低，故障越严重降低幅度越大。

# 第四章 DAR匝间短路多故障磁场分析

由于DAR匝间短路故障可能仅发生在单一位置，也可能发生在多处，在上一章中已对电抗器匝间短路单故障磁场分布进行了研究，本章将继续采用上一章的分析方法对多故障进行研究。本章以电抗器发生2处匝间短路故障为例进行研究来说明电抗器匝间短路故障磁场分布特点，对于3处及3处以上的匝间短路故障本文将不再赘述。

## 4.1 DAR多故障仿真建模

本章对DAR多故障模型的建立仍采用上一章的计算原理，其

## 4.2 电抗器两故障磁场分布

### 4.2.1

### 4.2.2

## 4.5 本章小结

# 第五章结论与展望

## 5.1 结论

## 5.2 展望

特高压并联电抗器的发展方向：

# 参考文献