

高等院校电气工程系列教材

四川省精品课程立项教材

电气设备状态监测的理论与实践

吴广宁 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

四川省精品课程立项教材

电气设备状态监测的理论与实践

吴广宁 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍电气设备状态监测的原理与方法。全书共分3篇、16章,从电介质的基本理论、电气设备的绝缘材料和结构以及电气绝缘的监测诊断技术三个方面,分别介绍了气体、液体、固体电介质的极化、电导、损耗、老化及击穿的机理,高压电气设备的绝缘材料、结构及其绝缘检测方法,电气绝缘状态检测的传感器系统、信号处理技术、故障诊断及电气设备寿命的综合管理。

本书内容广泛,既涉及电气设备设计、制造、运行的基础理论,又注重吸收国内外近年来在该领域所取得的新成果,可供高等学校高电压与绝缘技术、电气工程及其自动化等专业的研究生、本科生作为教材,也可供电力部门或相关行业的科研人员作参考用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电气设备状态监测的理论与实践/吴广宁编著. —北京:清华大学出版社,2005.10

(高等院校电气工程系列教材)

ISBN 7-302-11803-5

I. 电… II. 吴… III. 电气设备—监测—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第104521号

出 版 者:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客 户 服 务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:张占奎

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印 张:21.75 字 数:512千字

版 次:2005年10月第1版 2005年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11803-5/TM·67

印 数:1~3000

定 价:32.00元

能源是国民经济发展的基础,电力设备的功能就是产生、运行电力能源。电气设备都是由导体、导磁材料和绝缘组成,绝缘是其中最重要的部分,它决定了电气设备的技术经济性和运行可靠性。近年来,在大型电力系统、高速电气化铁道、国防系统等领域,电气绝缘的重要性愈加突出。大型高压电气设备是电气系统的核心,其运行可靠性是保障电气系统可靠运行的重要指标,因此,有关电气设备设计、运行状态的检测及故障诊断已成为全国各重点高校电气工程专业的学生必修的一门技术基础课程。它以电介质物理、电介质化学、电气绝缘材料科学与工程、电气绝缘结构设计原理、电气绝缘测试技术、高等数学、电路、电磁场、系统工程等学科内容为基础,是一门学习电气设备方案设计、运行分析、状态评估的专业基础知识和技能的重要课程。

本书主要内容由电介质的基本理论、电气设备的绝缘材料及结构、电气绝缘的监测诊断技术三部分组成,旨在帮助读者掌握电气设备设计和运营中的基础理论和关键技术,为培养电气设备的设计、生产、运行及维护等专门技术人才打下良好的专业技术基础。

本书在编写过程中既兼顾了本领域基础理论的学习,又融进了包括作者在内的国内外专家近年来在本领域所取得的最新科研成果,包括本课题组近 10 年的科研体会及技术成果。为便于自学,书中突出了基本理论、试验设计、理论应用等基本科研培训内容,每章后附有思考题。

本书初稿的编校工作得到了张丽丽、张血琴(第 1 篇),温凤香、周利军(第 2 篇),舒雯、高波(第 3 篇)等同志的大力帮助,在此一并表示感谢。

本书在编写过程中曾得到谢恒堃教授的指导,他对本书的内容和编写大纲提出了中肯的建议和意见。清华大学谈克雄教授、西南交通大学贺威俊教授详细审阅了本书的初稿,并提出了很多宝贵的修改意见和建议,在此向他们深表谢意。尤其需要指出的是,谢先生不幸英年早逝,作为他的学生,我们一定牢记先生“自强不息、求实创新”的教诲,为促进电气绝缘教学科研工作的深入发展竭尽全力。

由于作者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

吴广宁

2005 年 3 月于西南交通大学

第 1 篇 电介质的基本理论

第 1 章 电介质的定义及分类	3
1.1 电介质的定义	3
1.2 电介质的分类	3
1.2.1 固体电介质	4
1.2.2 液体电介质	7
1.2.3 气体电介质	9
1.2.4 真空绝缘	10
习题和思考题	10
第 2 章 电介质的极化与损耗	11
2.1 电介质的介电常数	11
2.1.1 介电常数的定义	11
2.1.2 电介质极化的宏观与微观参数的关系	12
2.1.3 电介质的有效电场强度及介电常数	13
2.2 电介质的极化	16
2.2.1 恒定电场作用下电介质的极化	16
2.2.2 交变电场作用下电介质的极化	18
2.3 电介质的损耗	21
2.3.1 气体电介质的损耗	21
2.3.2 液体电介质的损耗	22
2.3.3 固体电介质的损耗	23
2.3.4 不均匀电介质的界面极化和损耗	25
2.4 介电常数与损耗角正切的测量	26
2.4.1 测量原理	27
2.4.2 测量结果的影响因素	28
2.4.3 试样与电极	29
2.4.4 测量方法	32

习题和思考题	36
第3章 电介质的电导	37
3.1 电导的基本概念	37
3.2 气体电介质的电导	39
3.2.1 气体中载流子的形成和浓度的确定	40
3.2.2 气体中离子的迁移率	41
3.2.3 强电场下气体的电导	43
3.3 液体电介质的电导	44
3.3.1 液体电介质的离子电导	44
3.3.2 液体电介质的电泳电导与华尔顿定律	46
3.3.3 液体电介质在强电场下的电导	46
3.4 固体电介质的电导	48
3.4.1 固体电介质的离子电导	48
3.4.2 固体电介质的电子电导	48
3.5 固体电介质的表面电导	53
3.6 电阻率与微电流的测量	56
3.6.1 测量原理	56
3.6.2 测量结果的影响因素	57
3.6.3 试样与电极	58
3.6.4 数字式兆欧表	63
习题和思考题	64
第4章 电介质的老化	66
4.1 老化及其类型	66
4.1.1 概述	66
4.1.2 老化的类型	67
4.2 热老化及试验	68
4.2.1 热老化机理	68
4.2.2 热老化试验	70
4.3 电老化及试验	76
4.3.1 电老化的定义	76
4.3.2 电老化的分类	77
4.3.3 电化学腐蚀	79
4.3.4 电老化试验	79
4.4 特殊环境中的老化	89
4.4.1 高能辐照老化	89
4.4.2 微生物老化	89

4.4.3 绝缘材料的疲劳	90
习题和思考题	90
第5章 电介质的击穿	92
5.1 气体电介质的击穿	92
5.1.1 均匀电场中气体击穿的理论	93
5.1.2 极不均匀电场中气体的击穿	98
5.2 液体电介质的击穿	99
5.2.1 高度纯净去气液体电介质的电击穿理论	99
5.2.2 含气纯净液体电介质的气泡击穿理论	101
5.2.3 工程纯液体电介质的杂质击穿	102
5.3 固体电介质的击穿	104
5.3.1 固体电介质的击穿类型	104
5.3.2 固体电介质的热击穿	104
5.3.3 固体电介质的电击穿	107
5.3.4 不均匀电介质的击穿	108
5.3.5 聚合物电介质的电-机械击穿	112
5.4 介电强度试验	113
5.4.1 概述	113
5.4.2 工频电压下的介电强度试验	113
5.4.3 直流电压下的介电强度试验	120
5.4.4 冲击电压下的介电强度试验	123
习题和思考题	125

第 2 篇 电气设备的绝缘材料及结构

第6章 聚合物绝缘材料及其特性	129
6.1 聚合物的基本概念	129
6.1.1 高分子	129
6.1.2 聚合物的分类及命名	129
6.2 加聚物绝缘材料	130
6.2.1 加聚反应	130
6.2.2 常用的加聚物绝缘材料	130
6.3 缩聚物绝缘材料	133
6.3.1 缩聚反应	133
6.3.2 常用的线型缩聚物绝缘材料	133
6.3.3 常用的体型缩聚物绝缘材料	136

6.4	绝缘纸及织物的浸胶和浸油	137
6.4.1	绝缘纸的特性	137
6.4.2	电介质的吸湿性	137
6.4.3	浸渍工艺及其对复合材料结构的影响	137
	习题和思考题	141
第7章	旋转电机	142
7.1	电机用绝缘材料	142
7.2	电机的绝缘结构	146
7.2.1	低压电机的绝缘结构	146
7.2.2	高压电机的绝缘结构	148
7.2.3	电机线圈的匝间绝缘	148
7.3	电机的绝缘诊断方法	150
7.3.1	常用的绝缘诊断技术	150
7.3.2	其他绝缘诊断方法	152
7.3.3	在线绝缘诊断	153
	习题和思考题	154
第8章	变压器	155
8.1	变压器用绝缘材料	155
8.1.1	充油变压器用绝缘材料	155
8.1.2	油浸式变压器用绝缘材料	157
8.2	变压器绝缘结构的分类	158
8.3	变压器的老化诊断方法	159
8.3.1	绝缘纸的老化诊断法	159
8.3.2	油的老化诊断法	162
8.3.3	变压器本体的老化诊断法	162
	习题和思考题	164
第9章	电力电缆	165
9.1	电缆的绝缘材料及其绝缘结构	165
9.1.1	电缆的绝缘材料	165
9.1.2	电力电缆的绝缘结构	168
9.2	电缆绝缘的诊断方法	169
9.2.1	离线诊断法	171
9.2.2	在线诊断法	179
	习题和思考题	189

第 10 章 绝缘子及套管	190
10.1 绝缘子及套管的材料	190
10.1.1 绝缘子的材料	190
10.1.2 套管的材料	193
10.2 绝缘子和电容套管的结构	194
10.2.1 绝缘子的结构	194
10.2.2 电容式套管的绝缘结构	197
10.3 绝缘子及套管的试验方法	199
10.3.1 绝缘子和套管的预防性试验	199
10.3.2 绝缘子和套管的在线检测方法	205
习题和思考题	209
第 11 章 电力电容器	210
11.1 电力电容器的分类和结构	210
11.2 电力电容器的材料及其性能	213
11.3 电容器的局部放电	219
11.3.1 概述	219
11.3.2 局部放电的影响因素	221
11.3.3 薄膜电容器的局部放电	224
11.3.4 电容器的寿命	225
习题和思考题	226
第 12 章 高压开关设备	227
12.1 断路器的结构	227
12.1.1 SF ₆ 封闭式组合电器	227
12.1.2 高压 SF ₆ 断路器	228
12.1.3 高压真空断路器	230
12.1.4 高压少油断路器	230
12.2 高压开关设备的检测方法	231
12.2.1 高压开关设备的故障分析	231
12.2.2 高压开关设备的状态监测	233
12.3 断路器故障诊断方法的应用	234
12.3.1 SF ₆ 断路器状态监测与诊断	234
12.3.2 真空断路器状态监测与诊断	236
12.3.3 GIS 外部诊断法	238
习题和思考题	244

第 3 篇 电气设备绝缘的监测诊断技术

第 13 章 绝缘监测的传感器系统	247
13.1 电流传感器系统	247
13.1.1 互感器型电流传感器	247
13.1.2 磁敏电流传感器	251
13.2 光纤传感器	251
13.2.1 光纤传感器的表示方法	252
13.2.2 用于高压监测的光纤传感器	253
13.3 微带天线传感器	256
13.3.1 微带天线的原理	256
13.3.2 定子槽耦合器	259
习题和思考题	262
第 14 章 数字信号处理技术	263
14.1 时频联合分析	263
14.1.1 基本概念	263
14.1.2 时频分析原理	266
14.1.3 局部放电信号的时频分析	267
14.2 小波分析	269
14.2.1 小波分析的基本原理	269
14.2.2 绝缘状态检测中的小波分析技术	271
14.3 人工神经网络	275
14.3.1 神经网络的原理	275
14.3.2 人工神经网络应用于绝缘状态判断	280
习题和思考题	281
第 15 章 电气绝缘故障诊断方法	282
15.1 模式识别	282
15.1.1 模式识别的特征样本	282
15.1.2 局部放电的模式识别	285
15.2 专家系统	287
15.2.1 专家系统的基本结构	287
15.2.2 专家系统的分类	288
15.2.3 专家系统的构建	289
15.2.4 电气绝缘故障诊断专家系统实例	290

习题和思考题	293
第 16 章 电气设备的状态维修与寿命管理	294
16.1 电气设备的检修体制	294
16.1.1 设备检修体制的演变	294
16.1.2 我国电气设备检修体制	298
16.1.3 以经济效益为中心的电气设备管理	300
16.2 基于可靠性的设备维修	301
16.2.1 可靠性	301
16.2.2 以可靠性为中心的维修	307
16.2.3 RCM 维修决策的数学分析方法	308
16.2.4 以可靠性为中心维修的实施	312
16.3 电气设备的状态监测	313
16.3.1 概述	313
16.3.2 电气设备的状态监测	317
16.3.3 电气设备的故障诊断	321
16.4 电厂设备管理及检修系统实例	322
16.4.1 系统的总体框架	322
16.4.2 系统的主要功能	323
16.4.3 系统模块及功能模型	327
16.4.4 系统软硬件平台配置方案	329
习题和思考题	332
参考文献	333

第 1 篇 电介质的基本理论

本篇系统阐述电介质的极化、损耗、电导和击穿等性能,及其与物质微观结构关系的基本规律和基本概念,从而揭示电介质的基本电学特性和物理特性,完整地体现其在强电场方面的理论体系。

1.1 电介质的定义

电介质是指在电场作用下能产生极化的一切物质。从广义上说,电介质不仅包括绝缘材料,而且包括各种功能材料,如压电、热释电、光电、铁电等材料。电介质中起主要作用的是束缚电荷,而金属的介电性能与束缚电荷无关,故金属不属于电介质的范畴。电介质材料分布很广,就存在形式来讲,可以是气态、液态或固态。随着科学技术的发展,新的功能材料还会不断出现,电介质涉及的范围将会更广。虽然电介质不一定是绝缘体,但绝缘体都是典型的电介质。绝缘体的电击穿过程及其原理关系到束缚电荷在场强作用下的极化限度。

1.2 电介质的分类

任何电介质的分子均由原子或离子组成,而每个原子或离子均由带正电的原子核和绕核运动的带负电的电子所组成,所以电介质的每个分子都是由正、负电荷组成的系统,根据这些电荷在分子中的分布特性,可以把电介质分为三类:非极性电介质、极性电介质和离子型电介质。当然这样的分类都属极端的情况,中间还有过渡状态。

1. 非极性电介质

在无外电场作用时,分子的正电荷和负电荷中心相重合,故分子的电偶极矩等于零,这种分子称为非极性分子。由非极性分子组成的电介质称为非极性电介质或中性电介质。应用于绝缘的有机材料,如聚乙烯、聚四氟乙烯、石蜡、地蜡等均为非极性电介质材料。

2. 极性电介质

在无外电场作用时,分子的正电荷和负电荷中心不相重合,即分子具有电偶极矩(称为分子的固有偶极矩)。这种分子称为偶极分子或极性分子,由极性分子组成的电介质称为极性电介质,如聚氯乙烯、纤维、某些树脂等。

3. 离子型电介质

与上述非极性电介质和极性电介质不同,离子型晶体电介质通常由正、负离子组成,此时已没有个别的分子,存在于介质中的是离子。属于这一类的有离子型晶体介质(如

碱卤晶体、金红石型离子晶体)、石英、玻璃、云母、陶瓷及其他一些无机电介质。这类电介质的介电常数较大,且变化范围很大($\epsilon_r=4.5\sim 100$),具有较高的机械强度。

一般情况下为便于理解与实际应用,可将电介质按照存在的形态分成几种基本类型:固体电介质、液体电介质、气体电介质和真空。

1.2.1 固体电介质

从形态上划分,固体绝缘材料可分成三种类型:①不发生形变的固体绝缘材料;②通过添加和堆叠制成的片状固体绝缘材料;③最终形态是固体,而在生产过程中以液体形式进行填充或粘合的绝缘材料。

从应用上划分,根据国际电工委员会标准 IEC15,固体绝缘材料分类为:无机(陶瓷和玻璃)材料;塑料膜;柔软绝缘套管;刚性纤维增强型层压板;树脂和漆;压敏胶黏带;纤维材料;混合柔性材料;云母制品;织物绝缘;人造橡胶和热塑性塑料。每种材料分类具体介绍如下。

1. 无机(陶瓷和玻璃)材料

这类材料主要应用在高压输电线路悬式绝缘子及高压变压器和开关设备的套管上,通过法兰盘状串联相接的形式增大沿整个绝缘子表面的爬电距离。其优点是具有易塑性、高介电强度,且表面受到破坏时仍能保持其绝缘特性。

2. 塑料膜

聚酯、聚碳酸酯、聚酰亚胺和聚乙烯萘烷(PEN)等膜材料被广泛应用于多种绝缘结构,如电容器中铝箔间,旋转电机的槽绝缘及作为云母制品的垫板应用在高压设备绝缘上。塑料膜适用于要求尺寸稳定性好、介质强度高、防潮和坚硬的绝缘部位。

3. 柔软绝缘套管

这类绝缘主要应用于绕线部分的主绝缘或次绝缘、电缆保护及捆扎,还可应用于电机、变压器、民用或加热设备、照明装置、电缆连接、开关设备及车辆的动力连线。其优点是便于应用、柔软且介质强度高。适用高、低电压绝缘及各种温度条件($-70^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$)下的绝缘。

4. 刚性纤维增强型层压板

电气设备的生产,有时需要固体板材或固体管型和棒型板材。其形式表现为高密层压木板或纸层压板、棉纺线、玻璃或聚酯等。这种刚性纤维增强型层压板易于加工成形,且在使用年限内可保持其固有的形状和性能。

5. 树脂和漆

树脂和漆除用于层压产品外,还广泛用于电气设备的浸渍和涂层,以改善设备对于工作环境的抵御能力,提高其电气特性并延长工作寿命。传统树脂和漆类材料提炼于天然物质,如沥青、虫胶漆和植物油,现在已发展成热塑、热固树脂和人造橡胶形式的合成产品。典型的有酚、聚酯、环氧、硅树脂和聚酰亚胺等。漆和树脂由于具有填充、涂敷基本绝缘材料的性能,因而可显著延长设备的工作寿命,提高抗灰尘和抵御潮气的能力。

6. 压敏胶黏带

压敏胶黏带(PSA)的作用是黏着、密封或固定设备,它是基于纸、膜或玻璃布织品,并涂上适当的黏合剂,如橡胶、硅树脂或丙烯酸之类黏带的绝缘材料。

7. 纤维材料

由纸、纸板和压制纸制成的材料仍旧在油浸式电力变压器绝缘中扮演着重要的角色,这个领域还包括由纸制造技术生产的芳香尼龙纤维等其他材料。这些材料在高温绝缘、干式变压器或其他类型的电力设备上有很大应用。纤维材料主要与油联合使用,它的多孔特性使其成功地应用于变压器和电缆。

8. 混合柔性材料

为了生产适宜的绝缘材料以满足某些性能指标,如撕裂强度、电气强度和热阻抗,一系列的层压或混合性柔软薄片产品得以发展。与其他材料一样,将纤维质、芳香聚酰胺和玻璃织物与某些塑料膜混合,以新形式来满足应用的需求。混合柔性材料大量用在低压电机中。

9. 云母制品

云母材料在高压旋转电机的设计和制造中发挥了重要的作用。早期工业生产使用裂解云母,目前主要采用云母纸,它是通过化学和机械的方法把云母分成小块,做成浆状再输入传统的造纸机器中制造出来的。云母纸涂上一定的玻璃纸或防光晕层,并在环氧树脂中浸渍,可用定子线棒绝缘。在图 1-1 中可以看到用云母纸构成线圈的对地绝缘。

实际应用的云母纸一般为多树脂的形式,槽周围用于加固的树脂绝缘就包含这种材料。这种加固通常需把线圈或线棒放入大气罐,并采用电加热方法,因此热和压力可以充分愈合多树脂云母片绝缘。如选用真空压力浸渍(VPI)法,进行这种浸渍需在捆绑机器之后注入树脂。VPI的应用避免了用压力加固绝缘的要求。加固既可用流体静力,也可通过将完全做好的线棒或线圈放入槽内来完成。如图 1-2 所示为将大电机定子放入 VPI 箱中。

由于云母制品独特的多样化特性,它在高电压绝缘系统中占主导地位,它的主要特点有:高绝缘强度、高频情况下低介质损耗、高表面电阻和体积电阻、良好的防晕能力和耐电弧腐蚀能力、耐温能力可达 $-273^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、耐火性好、良好的耐化学阻抗性和耐压力性。

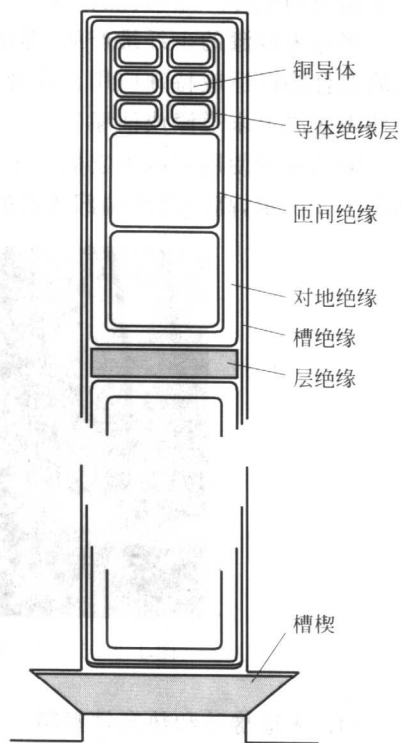


图 1-1 高压电机的定子线圈截面

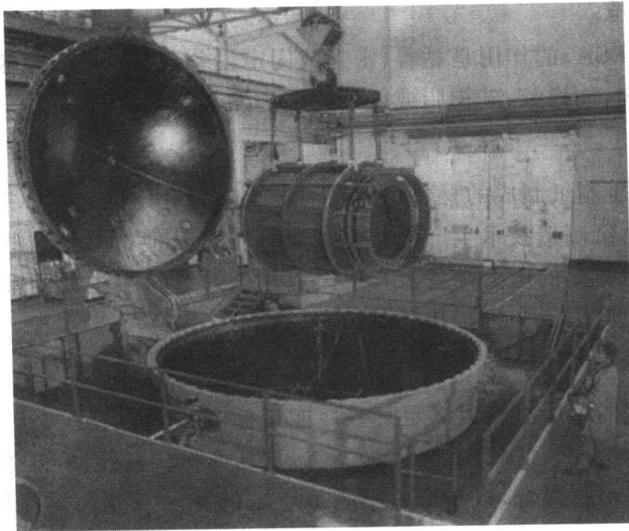


图 1-2 能放入 100MV·A 定子的大型真空压浸式设备

10. 织物绝缘

虽然全漆织品的应用已不再普遍,但用玻璃和聚酯纱线的产品,或较少的棉花和人造纤维制成的绝缘产品,仍然在使用。

多数未浸漆的少纤维产品,即所谓的编织带存在并且还用来制作各种玻璃和聚酯纱线的混合物以适应特殊应用。这种带主要用于装置绝缘顶部如云母纸,以方便在其坚硬的外表面涂上末道漆或油漆。

编织带的使用是因为它们易于应用,有好的一致性和铺垫性,比如它们能用于包裹。如图 1-3 所示,高压电机端部线圈的绝缘就是用编织带缠绕起来的。

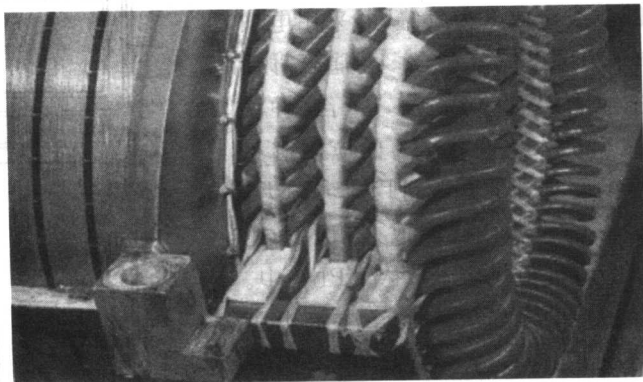


图 1-3 11kV,8MW 感应电机的 4 极定子端部支柱系统

11. 人造橡胶和热塑性塑料

聚合物和橡胶类绝缘材料有很大的应用范围。传统上主要用在电力电缆的连接,一些人造橡胶如硅树脂已经用于套管、牵引系统,更多的用在架空线的绝缘,但它们大多数