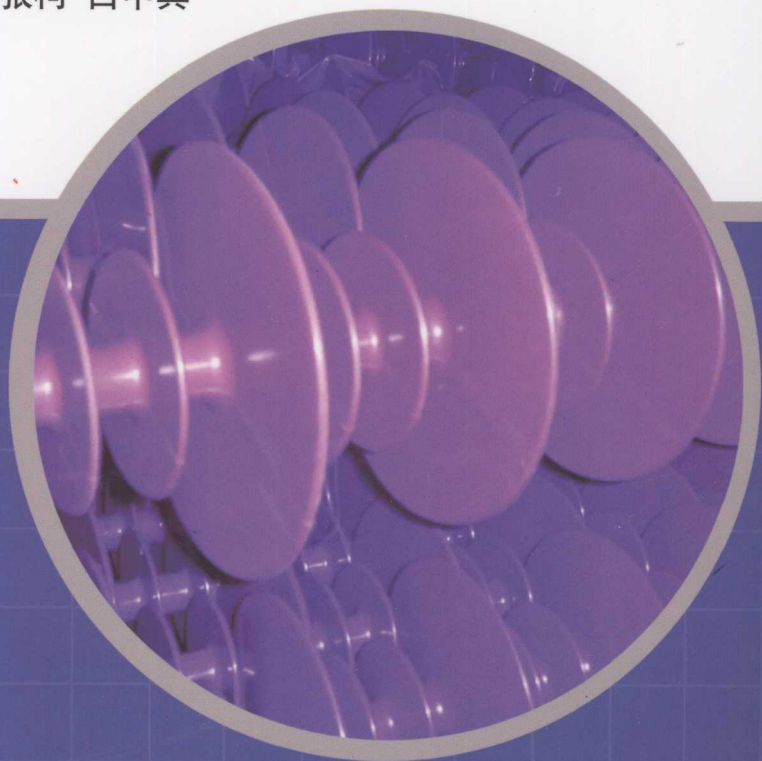




输电线路用 复合绝缘子 运行技术 实例分析

阎东 卢明 张柯 吕中宾



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

输电线路用 复合绝缘子 运行技术 实例分析

阎东 卢明 张柯 吕中宾



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了复合绝缘子的结构、材料、设计、生产、运行、试验等,重点介绍了复合绝缘子现场故障实例分析、防舞动相间间隔棒技术、运行评价、憎水性等内容。全书共分六章,第一章为复合绝缘子在国内外应用,第二章为复合绝缘子技术,第三章为防覆冰绝缘子技术,第四章为相间间隔棒技术,第五章为复合绝缘子性能检测及评价,第六章为复合绝缘子运行故障实例分析。

本书在阐述中列举了较多的实例,内容丰富,突出了理论在现场实际中的应用,并且引用了多个科研项目研究成果,对电力部门、高校、科研院所、制造部门开展相关研究有很好的借鉴意义。

本书可供电力系统线路运行、检修、试验及管理方面的工程技术人员阅读,也可供制造部门、电力用户及大中专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

输电线路用复合绝缘子运行技术及实例分析/阎东等编著.

北京:中国电力出版社,2008.5

ISBN 978-7-5083-6919-8

I. 输… II. 阎… III. 复合绝缘材料-绝缘子-研究
IV. TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 040029 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 17 印张 273 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

复合绝缘子在我国电网中被大量应用,其优良的防污性能很好地解决了电网的防污闪问题,也正因为这一主要优点使得复合绝缘子在我国大量挂网使用,同时随着其使用数量的激增,由复合绝缘子带来的各种问题也日益增多。目前,现场运行维护、技术管理、试验研究等单位的人员迫切需要学习和掌握关于复合绝缘子各方面的知识,包括基本结构、性能检测、事故分析、全过程管理等。

本书汇集了4个科研项目(《河南省线路用复合绝缘子运行特性及可靠性评价》、《输电线路防舞动相间间隔棒的优化设计》、《220kV线路绝缘子覆冰闪络特性及预防措施》、《硅橡胶复合绝缘子憎水性带点监测技术及憎水特性研究》)的研究成果,并结合编者多年来在复合绝缘子现场事故分析方面的经验,是对复合绝缘子方面最新技术的汇总。在此也对几个课题的合作单位——清华大学、重庆大学、华北电力大学表示感谢。

河南电力试验研究院近年来在复合绝缘子现场运行及试验、复合绝缘子防覆冰技术、复合相间间隔棒技术、复合绝缘子憎水性研究等方面有深入的研究,本书中的许多研究成果是首次公开,对其他单位开展相关研究有很好的借鉴意义。

本书从复合绝缘子的结构、材料、设计、生产、运行、试验等方面入手,重点对复合绝缘子憎水性、防舞动相间间隔棒技术、运行评价、现场故障实例分析等进行了重点论述。

本书由阎东、卢明主编,其中第一、六章由卢明编写,第二、四章由阎东编写,张柯、吕中宾参与第二、三、五章的编写。

本书在编写中,参考和引用了国家电网公司最近发布的关于复合绝缘子方面的文件和调查报告,并对有关同志的现场异常分析等研究成果进行了汇总,谨在此向他们表示衷心的感谢。

由于对复合绝缘子技术不断地研究,编者的观点肯定会有不当之处,并且由于编者水平所限,不妥和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正,编者不胜感谢。

编 者

2008年3月

前言

第一章 复合绝缘子在国内外应用	1
第一节 国内外的应用简介.....	1
第二节 复合绝缘子在我国电网的应用统计.....	3
第三节 复合绝缘子应用展望	13
第二章 复合绝缘子技术	18
第一节 概述	18
第二节 硅橡胶防污机理	19
第三节 自然环境下复合绝缘子憎水性变化特性	24
第四节 复合绝缘子结构	38
第五节 线路用复合绝缘子的技术优势	58
第六节 线路用复合绝缘子的经济优势	64
第七节 复合绝缘子选型分析	68
第八节 复合绝缘子的老化问题	71
第三章 防覆冰绝缘子技术	80
第一节 国内外覆冰情况	80
第二节 复合绝缘子在防冰闪中存在的问题	81
第三节 冰闪机理研究	82
第四节 覆冰复合绝缘子电场特性	87
第五节 关于复合绝缘子冰闪的试验研究.....	103
第六节 复合绝缘子防冰闪应采用的措施.....	111
第四章 相间间隔棒技术	114
第一节 概述.....	114
第二节 架空输电线路导线舞动造成的危害.....	116
第三节 舞动机理的研究.....	117
第四节 相间间隔棒结构及设计.....	122
第五节 总结.....	162
第五章 复合绝缘子性能检测及评价	163
第一节 概述.....	163
第二节 复合绝缘子试验.....	164

第三节	线路用复合绝缘子运行评价·····	179
第四节	复合绝缘子的使用·····	198
第六章	复合绝缘子运行故障实例分析·····	204
第一节	复合绝缘子运行故障统计·····	204
第二节	复合绝缘子芯棒脆断实例分析·····	211
第三节	复合绝缘子机械强度下降问题实例分析·····	219
第四节	复合绝缘子界面击穿实例分析·····	222
第五节	复合绝缘子憎水性下降实例分析·····	226
第六节	复合绝缘子老化问题实例分析·····	238
第七节	复合绝缘子鸟害实例分析·····	242
第八节	复合绝缘子雷击故障实例分析·····	251
第九节	复合绝缘子不明原因闪络实例分析·····	256
参考文献	·····	262

复合绝缘子在国内外的应用

第一节 国内外的应用简介

一、国外复合绝缘子应用情况

DL/T 864—2004《标称电压高于 1000V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则》定义棒形悬式复合绝缘子为：杆体和伞套由两种或以上绝缘材料组合构成的棒形悬式绝缘子。

由于有机合成材料加工成形工艺简单，成本低，同时又可以克服瓷和玻璃绝缘子的固有缺点，自 20 世纪 50 年代以来，国外就开始研究和应用复合绝缘子了，当时主要使用环氧树脂浇注结构，一般安装在户外。20 世纪 60 年代后期，出现了由树脂增强玻璃钢芯棒和以橡胶或氟塑料等聚合材料为伞裙护套的复合结构绝缘子，并陆续在 30 多个国家和地区的各种工业线路和试验线路运行，额定电压为交流 15 ~ 1500kV，直流为 400 ~ 500kV。从 20 世纪 80 年代开始，国外复合绝缘子推广应用非常迅速。美国是使用复合绝缘子最早和应用最广泛的国家，据有关资料介绍，截至 1989 年底，复合绝缘子占绝缘子市场的 20%，复合支柱绝缘子占全部支柱绝缘子的 33%，棒形悬式复合绝缘子占悬式绝缘子的 15%，使用电压等级从交流 115 ~ 765kV，直流到 500kV。棒形悬式复合绝缘子平均运行时间已有 7 年，最长使用寿命已达 30 余年。其中 78% 的用户反映使用良好，18% 的用户认为使用还可以，4% 的用户反映有问题。20 世纪 80 年代中期，北美 35kV 及以下电压等级的输电线路至少有 200 万支复合绝缘子在运行，德国积累了 15 万支复合绝缘子的运行经验，瑞士也有近 20 万支复合绝缘子运行 10 年以上。近年来，复合绝缘子已在世界范围内得到了广大电力技术人员的青睐和大量使用，其用量在过去的十年中一直保持稳定增长。

近些年来，加拿大、德国等国家已全面推广使用复合绝缘子。以生产瓷绝缘子为主的日本 NGK 公司也开始研制生产复合绝缘子。从污秽地区复合绝缘子的使用比例来看，用于极轻污秽地区的占 48%，轻污秽区的占

35%，中等污秽区的占10%，重污秽区的占7%。美国对复合绝缘子用于污秽地区是有争议的，估计这与美国复合绝缘子多数用乙丙橡胶材料制造伞裙有关。美国四家复合绝缘子主要生产厂，两家用三元乙丙橡胶（EPDM），一家用乙丙橡胶（EPM）和硅橡胶混合物，只有一家使用高温硫化橡胶（HTV）制造伞裙。目前，硅橡胶材料复合绝缘子的耐污性能是所有各种伞裙材料绝缘子中最好的。德国制造的硅橡胶复合绝缘子运行情况良好，因此使用过德国硅橡胶材料复合绝缘子的电力公司规定，只有高温硫化硅橡胶复合绝缘子才能用于污秽地区。

二、国内复合绝缘子的应用情况

国内复合绝缘子的发展和应用至今已有40多年的历史。早期复合绝缘子材质包括环氧树脂、乙丙橡胶、室温硅橡胶等。20世纪70年代，随着高温硫化硅橡胶复合绝缘子在德国的问世，复合绝缘子比瓷、玻璃绝缘子更加优异的耐污特性充分显现，使复合绝缘子步入了高速发展时期。

我国对复合绝缘子的研制开发始于20世纪80年代初，尽管起步较晚，但起点高。在吸取国外经验教训的基础上，一开始就研制生产出高温硫化硅橡胶绝缘子。国产复合绝缘子从1985年首次挂网试运行至今，得到了生产运行部门的广泛好评，也引起了设计部门的关注。近年来，复合绝缘子不仅在各电压等级交流线路运行调爬中广泛使用，而且在新建线路工程中得到大批量甚至全线路使用。2000年，复合绝缘子开始用于 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路；2005年，复合绝缘子又在750kV线路中批量使用；截至2006年底，全国挂网运行复合绝缘子已超过220万支，使用量仅次于美国，居世界第二位；将于2008年年底投入运行的1000kV特高压线路有60%~70%的绝缘子采用复合绝缘子。

我国电网的高速发展有力地促进了复合绝缘子产业的迅速壮大。目前，我国复合绝缘子的研究、制造和运行已居世界领先水平，运行经验也引起了国际大电网组织（CIGRE）和国际电工技术委员会（IEC）的关注。实际运行表明，使用复合绝缘子是解决我国污秽地区输电线路外绝缘污闪最为有效的方法之一，不仅有效遏制了大面积污闪事故的发生，也大大减轻了繁重的污秽清扫及零值检测等运行维护工作量。随着复合绝缘子制造装备、工艺和管理水平的提高，以及设计和运行经验的积累，复合绝缘子性能将得到进一步改善和提高。可以预见，复合绝缘子必将在高压电网建设中得

到大量应用，为电网安全可靠运行发挥更大的作用。

第二节 复合绝缘子在我国电网的应用统计

以下统计数据均截至 2006 年 10 月，范围包括国家电网公司系统和内蒙古电力集团公司，主要依据国家电网公司生输配〔2007〕27 号文的统计。

一、按电压等级分类

各类绝缘子串使用数量见表 1-1，各类绝缘子串使用比例见表 1-2。

表 1-1 各类绝缘子串使用数量

电压等级 (kV)	复合绝缘子 (支)	玻璃绝缘子 (串)	瓷绝缘子 (串)	合计
110 (66)	1241291	597455	1675194	3513940
220	733070	619961	1174581	2527612
500 (330)	197304	470541	317505	985350
750	456	0	1195	1651
±500	10689	1379	14299	26367
合计	2182810	1689336	3182774	7054920
比例 (%)	31.0	23.9	45.1	100

表 1-2 各类绝缘子串使用比例 (%)

电压等级 (kV)	复合绝缘子 (支)	玻璃绝缘子 (串)	瓷绝缘子 (串)
110 (66)	35.3	17.0	47.7
220	29.0	24.5	46.5
500 (330)	20.0	47.8	32.2
750	27.6	0.0	72.4
±500	40.5	5.2	54.2

(1) 在各类绝缘子中，复合、玻璃、瓷三大类绝缘子的总体使用比例分别为 31.0%、23.9%、45.1%，瓷绝缘子占优势，如图 1-1 所示。

(2) 复合绝缘子使用总量约 220 万支。各电压等级分布比例为：110 (66) kV 占 56.87%；220kV 占 33.58%；500 (330) kV 占 9.04%；750kV 占 0.02%；±500kV 占 0.49%，如图 1-2 所示。

(3) 在各电压等级中，复合绝缘子占使用绝缘子总体的比例为：110

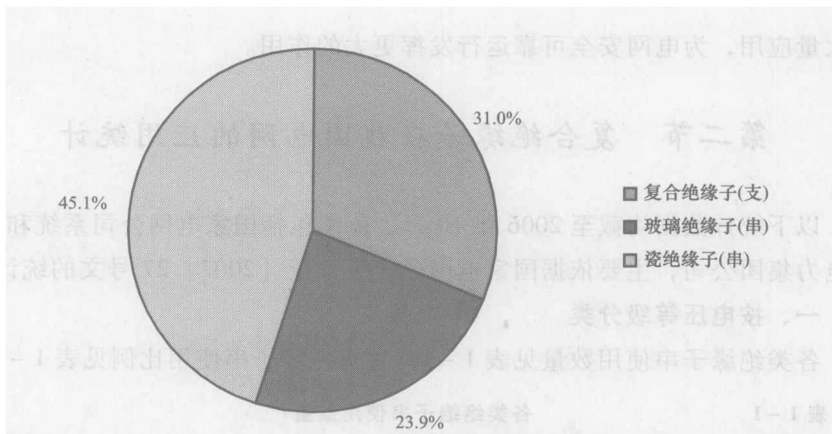


图 1-1 各类绝缘子串的使用比例

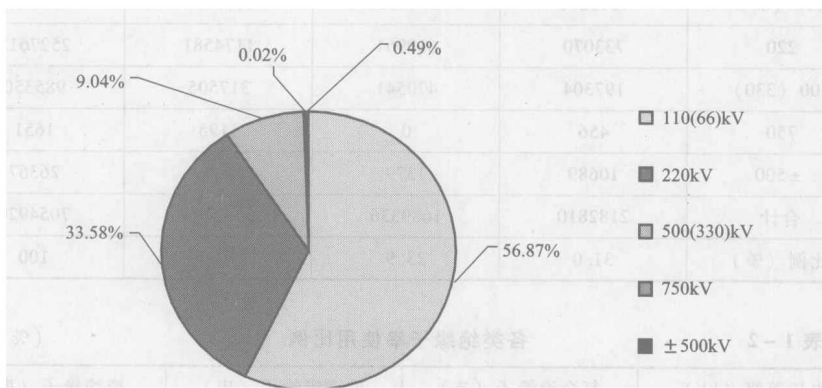


图 1-2 各电压等级中复合绝缘子的分布比例

(66) kV 占 35.3%；220kV 占 29.0%；500 (330) kV 占 20.0%；750kV 占 27.6%；±500kV 占 40.5%，如图 1-3 所示。

二、按使用时间分类

每年投运复合绝缘子的数量如图 1-4 所示。1958 年至今，复合绝缘子的使用数量逐年增加，1994 年后开始大量使用，使用高峰期出现在 2001 年以后，增幅较大。

三、按制造企业分类

复合绝缘子主要供货厂家及供货量见表 1-3，复合绝缘子主要供货厂家各电压等级供货比例及市场占有率见表 1-4。10 家制造企业累计供货总量达 1810727 支，占全部复合绝缘子使用总量的 82.9%。仅山东泰光电气有限公司、

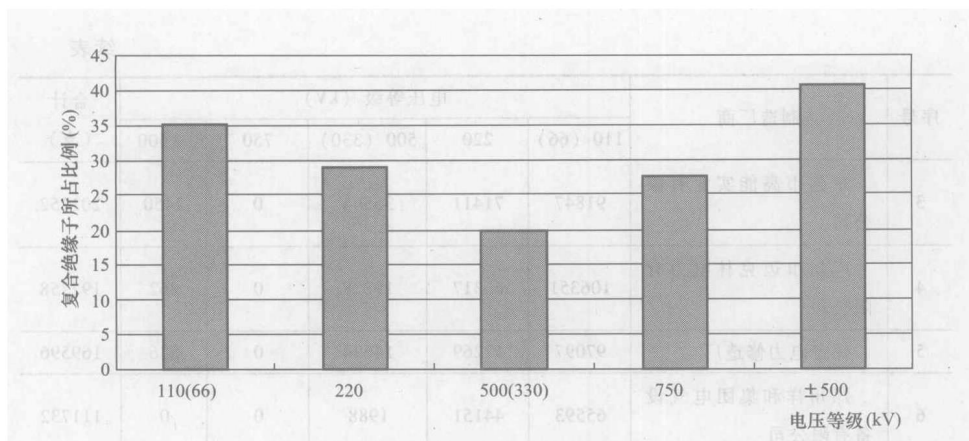


图 1-3 每个电压等级复合绝缘子的使用比例

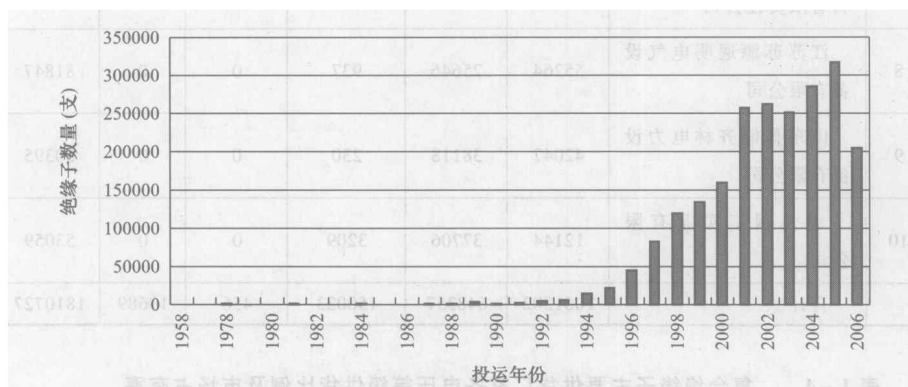


图 1-4 每年投运复合绝缘子的数量

襄樊国网合成绝缘子股份有限公司、东莞市高能实业有限公司、广州市迈克林电力有限公司、保定电力修造厂 5 家企业合计市场占有率就高达 63.1%。

表 1-3 复合绝缘子主要供货厂家及供货量

序号	制造厂商	电压等级 (kV)					合计 (支)
		110 (66)	220	500 (330)	750	±500	
1	山东泰光电气有限公司	251751	132766	49188	289	3840	437834
2	襄樊国网合成绝缘子股份有限公司	201894	146484	25005	167	3001	376551



续表

序号	制造厂商	电压等级 (kV)					合计 (支)
		110 (66)	220	500 (330)	750	±500	
3	东莞市高能实业有限公司	91847	71411	35544	0	2450	201252
4	广州市迈克林电力有限公司	106351	66317	19228	0	862	192758
5	保定电力修造厂	97097	57269	14694	0	536	169596
6	郑州祥和集团电气设备有限公司	65593	44151	1988	0	0	111732
7	新疆天宁电工绝缘材料有限责任公司	77214	28489	0	0	0	105703
8	江苏苏源通明电气设备有限公司	55264	25646	937	0	0	81847
9	山东鲁能齐林电力设备有限公司	42047	38118	230	0	0	80395
10	温州国工实业有限公司	12144	37706	3209	0	0	53059
	合计	1001202	648357	150023	456	10689	1810727

表 1-4 复合绝缘子主要供货厂家各电压等级供货比例及市场占有率

序号	制造厂商	电压等级 (kV)					市场占有 率 (%)
		110 (66)	220	500 (330)	750	±500	
1	山东泰光电气有限公司	57.5	30.3	11.2	0.1	0.9	20.1
2	襄樊国网合成绝缘子股份有限公司	53.6	38.9	6.6	0.0	0.8	17.3
3	东莞市高能实业有限公司	45.6	35.5	17.7	0.0	1.2	9.2
4	广州市迈克林电力有限公司	55.2	34.4	10.0	0.0	0.4	8.8

续表

序号	制造厂商	电压等级 (kV)					市场占有率 (%)
		110 (66)	220	500 (330)	750	±500	
5	保定电力修造厂	57.3	33.8	8.7	0.0	0.3	7.8
6	郑州祥和集团电气设备有限公司	58.7	39.5	1.8	0.0	0.0	5.1
7	新疆天宁电工绝缘材料有限责任公司	73.0	27.0	0.0	0.0	0.0	4.8
8	江苏苏源通明电气设备有限公司	67.5	31.3	1.1	0.0	0.0	3.7
9	山东鲁能齐林电力设备有限公司	52.3	47.4	0.3	0.0	0.0	3.7
10	温州国工实业有限公司	22.9	71.1	6.0	0.0	0.0	2.4
	合计						82.9

注 1. 某电压等级供货比例 = 某电压等级供货量 / 该厂供货总量。

2. 市场占有率 = 该厂供货总量 / 全部复合绝缘子使用总量 2182810 支。

四、按地区分类

1. 华北地区

华北地区绝缘子使用统计见表 1-5。华北地区玻璃绝缘子使用量较少, 复合绝缘子使用量略低于瓷绝缘子 (若剔除内蒙古, 则复合绝缘子使用量略高于瓷绝缘子)。

表 1-5 华北地区绝缘子使用统计

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
110 (66)	339631	22.0	64368	4.2	336531	21.8
220	243654	15.8	65569	4.3	278209	18.1
500 (330)	70393	4.6	64549	4.2	77853	5.1

续表

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
± 500	0	0	0	0	0	0
合计	653678	42.4	194486	12.6	692593	45

注 1. 华北地区统计包含北京、天津、河北、山西、山东和内蒙古地区。

2. 绝缘子串总量为 1540757 串。

2. 华东地区

华东地区绝缘子使用统计见表 1-6。华东地区玻璃绝缘子使用量高于瓷绝缘子和复合绝缘子。直流系统中, 复合绝缘子占主导地位, 而玻璃绝缘子最少。

表 1-6 华东地区绝缘子使用统计

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
110 (66)	287059	16.6	271678	15.7	214019	12.4
220	211206	12.2	285710	16.5	205422	11.9
500 (330)	46710	2.7	128395	7.4	68438	4.0
± 500	4235	0.2	1379	0.1	2927	0.2
合计	549210	31.8	687162	39.8	490806	28.4

注 1. 华东地区统计包含上海、江苏、浙江、安徽和福建地区。

2. 绝缘子串总量为 1727178 串。

3. 华中地区

华中地区绝缘子使用统计见表 1-7。华中地区瓷绝缘子使用量高于玻璃绝缘子和复合绝缘子。直流系统中, 瓷绝缘子占主导地位, 复合绝缘子较少, 无玻璃绝缘子。

表 1-7 华中地区绝缘子使用统计

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
110 (66)	181338	11.5	160182	10.2	428981	27.3
220	144047	9.2	189592	12.1	266965	17.0



续表

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
500 (330)	21427	1.4	110806	7.1	49000	3.1
±500	6454	0.4	0	0.0	11356	0.7
合计	353266	22.5	460580	29.3	756302	48.2

注 1. 华中地区统计包含湖北、湖南、河南、江西、四川和重庆地区。

2. 绝缘子串总量为 1570148 串。

4. 东北地区

东北地区绝缘子使用统计见表 1-8。东北地区瓷绝缘子使用量占明显优势，玻璃绝缘子最少。

表 1-8 东北地区绝缘子使用统计

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
110 (66)	153981	12.9	34018	2.9	455950	38.2
220	77282	6.5	65905	5.5	343403	28.8
500 (330)	16740	1.4	17203	1.4	28243	2.4
合计	248003	20.8	117126	9.8	827596	69.4

注 1. 东北地区统计包含辽宁、吉林、黑龙江地区。

2. 绝缘子串总量为 1192725 串。

5. 西北地区

西北地区绝缘子使用统计见表 1-9。西北地区瓷、玻璃、复合绝缘子使用比例分别为 40.6%、22.5%、37.0%，瓷绝缘子和复合绝缘子使用量略占优势，玻璃绝缘子稍少。

表 1-9 西北地区绝缘子使用统计

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量 (支)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)	数量 (串)	比例 (%)
110 (66)	279282	27.3	68527	6.7	241455	23.6
220	56881	5.6	11185	1.1	30755	3.0
500 (330)	42034	4.1	150264	14.7	142092	13.9

续表

电压等级 (kV)	复合绝缘子		玻璃绝缘子		瓷绝缘子	
	数量(支)	比例(%)	数量(串)	比例(%)	数量(串)	比例(%)
750	456	0.04	0	0.0	1195	0.12
合计	378653	37.0	229976	22.5	415497	40.6

注 1. 西北地区统计包含陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆地区。

2. 绝缘子串总量为 1024126 串。

综上所述,各区域在选择绝缘子时表现出明显的地域特点:

(1) 瓷绝缘子使用比例依次为:东北 69.4%,华中 48.2%,华北 45%,西北 40.6%,华东 28.4%。东北地区仍以传统瓷绝缘子为主。

(2) 复合绝缘子使用比例依次为:华北 42.4%,西北 37.0%,华东 31.8%,华中地区 22.5%,东北地区 20.8%。若不含内蒙地区,华北地区复合绝缘子的使用数量已超过传统瓷绝缘子。

(3) 华东地区使用玻璃绝缘子较多,其使用量高于瓷绝缘子和复合绝缘子,使用比例达 39.8%。

(4) 直流系统中,华东地区复合绝缘子使用量占主导地位,华中地区则是瓷绝缘子使用量占主导地位。

6. 按网省公司统计

各运行单位复合绝缘子使用数量如图 1-5 所示,各网省公司复合绝缘子使用比例如图 1-6 所示,各网省公司前三名复合绝缘子企业供货比例见表 1-10。

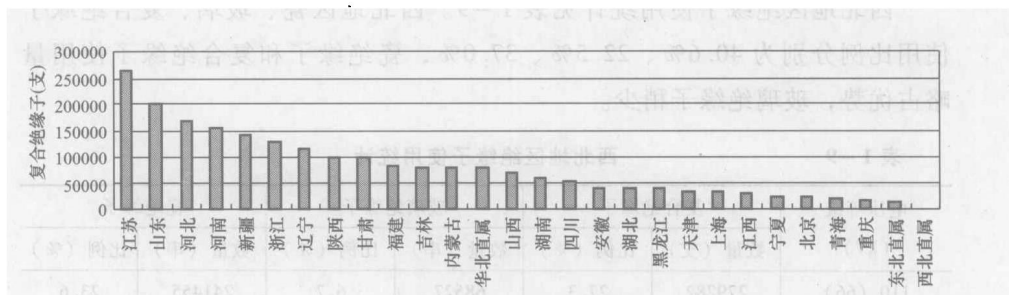


图 1-5 各运行单位复合绝缘子使用数量

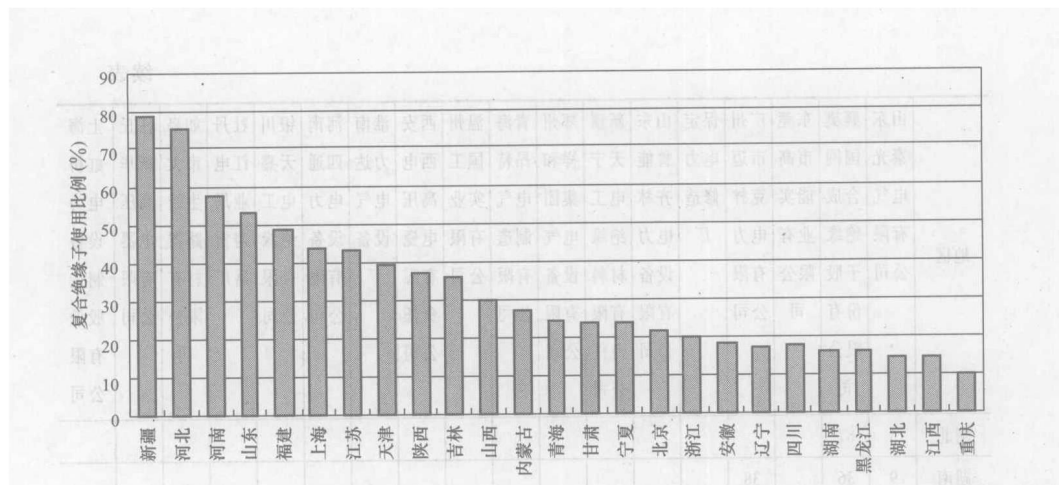


图 1-6 各网省公司复合绝缘子使用比例

表 1-10 各网省公司前三名复合绝缘子企业供货比例 (%)

地区	山东泰光电气有限公司	襄樊国网合成绝缘子股份有限公司	东莞市高能实业有限公司	广州迈克林电力有限公司	保定电力修造厂	山东鲁能齐林电力设备有限公司	新疆天宁电工绝缘材料有限公司	郑州祥和集团电气有限公司	青海昂特电气有限公司	温州国工实业有限公司	西安西电高压电瓷有限公司	淮南力达电气设备厂	河南四通电力设备有限公司	银川天嘉电工绝缘有限公司	牡丹江电业局避雷器厂	如皋市大生线路器材有限公司	任丘新华高压电器有限公司	上海虹桥电力设备制造股份有限公司
华北直属	73		10	6														
北京			27	9	58													
天津	30	21				20												
河北	22	27			25													
山西	21	16		18														
山东	36	17				28												
上海	9								89									
江苏	52			6												22		
浙江		43	15							16								
安徽	28		23									23						
福建	36	30	21															