



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 硅橡胶复合绝缘子 ——材料、设计及应用

**Silicone Composite Insulators  
Materials, Design, Applications**

[瑞士] 康斯坦丁 O. 帕派莱尔 (Konstantin O. Papailiou)  
弗兰克·斯马克 (Frank Schmuck)

著

刘云鹏 梁英 王胜辉 耿江海

译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 硅橡胶复合绝缘子—— 材料、设计及应用

Silicone Composite Insulators Materials, Design, Applications

[瑞士] 康斯坦丁 O. 帕派莱尔 (Konstantin O. Papailiou) 著  
弗兰克·斯马克 (Frank Schmuck)

刘云鹏 梁 英 王胜辉



机械工业出版社

Translation from English language edition:

Silicone Composite Insulators

by Konstantin O. Papailiou and Frank Schmuck

Copyright © 2013 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from the Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and TaiWan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-1841 号。

### 图书在版编目（CIP）数据

硅橡胶复合绝缘子：材料、设计及应用/（瑞士）康斯坦丁·O. 帕派莱尔等著；刘云鹏等译. —北京：机械工业出版社，2017. 12

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications

ISBN 978-7-111-58321-9

I. ①硅… II. ①康…②刘… III. ①硅橡胶-复合绝缘子 IV. ①TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 253807 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：赵玲丽 责任编辑：赵玲丽

责任校对：刘 岚 封面设计：马精明

责任印制：张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25.75 印张 · 484 千字

0 001—2 500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58321-9

定价：129.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

复合绝缘子在电力系统中已成功应用 40 多年，目前业已运行在最高的电压等级中。本书重点对当前应用较多的硅橡胶复合绝缘子进行了论述，就复合绝缘子的电气性能、力学性能、材料属性、绝缘子设计及现场应用等方面进行了详细阐述，并着重对复合长棒形绝缘子、复合支柱绝缘子、复合绝缘横担、相间间隔棒和复合空心绝缘子的力学性能展开论述。同时，叙述了绝缘子的制造工艺现状，防电弧金具、防电晕金具的选择及布置方式，退役绝缘子的评估测试等内容。最后讲解了最新的试验方法和 IEC 标准。

本书内容是欧洲众多知名复合绝缘子及附件生产商们 30 多年的经验总结，他们长期活跃在 CIGRE 和 IEC 相关的工作组，经验十分丰富。因此，本书可为电力运行及制造部门的工程师提供解决方案，也可作为相关学术人员的参考书。

# 译 者 序

复合绝缘子在国内外的研究起步较早，本书的翻译出版有助于相关领域从业人员借鉴国外的一些技术经验，提升复合绝缘子在我国的认识水平。

原著作者 Konstantin O. Papailiou 和 Frank Schmuck 曾在复合绝缘子生产企业从事实际的工程工作，同时参与了国际大电网会议（CIGRE）的基础科学研究及国际电工委员会（IEC）的标准起草工作，在复合绝缘领域具有丰富的实践经验和渊博的学识。本书首先介绍了复合绝缘子在世界范围内的使用概况；之后，对复合长棒形绝缘子、复合支柱绝缘子、紧凑型线路用绝缘横担、相间间隔棒及复合空心绝缘子等各种复合绝缘结构的具体特性和实际问题进行了详细的阐述；接着对复合绝缘子的三个“简单”组成部分的材料选择、制备工艺等进行了逐一阐述；最后讨论了复合绝缘子的现场评估及标准制定等问题。本书既是一个整体，各章节又相对独立，便于读者查找学习。

译完本书，在以下方面体会较深：

1) 本书涵盖了绝缘子各组成部分的结构设计、材料选择、制备工艺，运行应用及特性评估等多方面，内容丰富全面。

2) 本书针对绝缘子运行中出现的常见故障，给出了相应的工程实例，实践性强且图文并茂，便于读者对照理解。

3) 本书针对特定复合绝缘结构存在的问题，从理论分析、数值计算、试验验证等方面分别进行了阐述、解释，研究之深度和广度值得学习。

总之，翻译本书要求译者不仅需要具备深厚的电学知识，还需要具备材料学、力学、物理化学、工业设计甚至生物学等学科的基本知识。

在本书翻译和审校的过程中，得到了河北省输变电设备安全防御重点实验室多位同事和在读研究生的大力支持，同时，相关企业的朋友对书中一些关键问题给出了专业的解释说明。

本书由耿江海承担第1、2、4、11章的翻译工作，王胜辉承担第3、5、6、9章及原书前言的翻译工作，梁英承担第7、8、10章的翻译工作。全书由梁英定稿，刘云鹏组织协调整书的翻译工作。研究生高丽娟、高婷承担部分文字整理工作，在此表示感谢。

由于译者水平有限，时间仓促，本书难免有错漏和不当之处，恳请广大读者谅解并提出宝贵意见。

译者

2017年6月

# 原书序言

100多年以来，相比其他能源载体来说，通过电来传输能量是一种环保的解决方案。因此，电气能源部门将相当多的精力放到了输电线路的发展和建设上。早在1891年，德国即建成了第一条10kV的高压输电线路，其全长超过176km。当时，人们还很难想象可以架设起一条跨越1000km甚至几千公里的1100kV交流架空线路或800kV（传输功率达6000MW）的直流线路。从1912年的110kV开始，到20世纪70年代，工作电压已经达到了765kV，这是一个巨大的进步。过去的30年里，由于电能需求增量的停滞导致对更高电压的尝试一直未获成功。直到2009年，中国完美地将电压等级提升至1100kV，这使得人们对于以更高电压输送电能的态度又变得乐观起来，随着电压等级的升高，涌现出大量的创新型项目。

比如开始采用了八分裂导线，在输电线路取得了较大的技术进步，同时，在杆塔建设和设计上也已取得长足的进步。为更好地理解掌握电网和周围环境之间在机械和电气上的相互作用现象，科研和工作人员进行了大量的仿真和试验研究。自始以来，传统长棒形和盘形悬式绝缘子一般采用瓷作为绝缘材料，后来由于成本原因以及技术方面的考虑，玻璃也被应用于盘形悬式绝缘子。

在各种技术改进和架空输电线路近百年历史的发展进步中，复合绝缘子成为了高压电气绝缘系统中最重要的创新之一，这一发明预示着绝缘子从天然绝缘材料，如玻璃、陶瓷，到具有更多优点的复合材料的转变。与传统材料相比，复合材料更易于使用且表现出了更好的特性。复合绝缘子具有重量轻、结构尺寸小的特点，与此同时，其力学性能和抗污闪性能上也得到了较大的提高。例如，它可用于“紧凑型线路”，使之结构尺寸更轻巧且在线路走廊有限的情况下具有更好的经济效益。复合绝缘子具有更好的抗枪械子弹射击能力，这也提高了在受该问题影响的危险地区架设的变电站和架空线路的安全性。

对于现代技术的发展，复合绝缘子的成功之路是曲折的。在这过程中需要克服诸多问题：如脆断，界面区域的设计，对电晕或太阳辐射的敏感性，大雨后憎水性的暂时丧失，电弧防护和鸟害等。同时，工程师们还一直致力于解决如何对新的绝缘子进行测试的问题。这些挑战现在已经被克服并在技术上得到全面发展。作为高压或特高压架空输电线路的重要和关键部件，复合绝缘子在路线设计和施工中的知名度也越来越高，电气设备生产商也看好复合空心绝缘子在许多领域的应用前景。因此，复合空心绝缘子用于套管的支撑和绝缘外壳以及互感器、避雷器和断路器等比例将会越来越高。

本书对复合绝缘子的诸多方面进行了详细而全面的探讨。对材料特性和相应

的生产过程进行了清晰的介绍，描述了复合绝缘子的优点，金属附件和玻璃纤维芯棒的机械特性，详细介绍了电晕和电弧防护等问题。本书还给出了架空输电线路的设计和应用实例，甚至专门列出了紧凑型线路和相间间隔棒的例子，还考虑了复合绝缘子的测试方法。本书将理论和与之相对应的技术以及实践应用进行了有机的融合，将使读者在架空输电线路建设的许多领域，特别是在复合绝缘子方面获得相关知识。本书对许多重要的细节进行了整理和总结，这将有助于经验丰富的高压工程师对文献资料进行深入研究。就我个人而言，在我见过的文献之中，本书对复合绝缘子的技术现状及其应用情况的总结则最为全面和详细。

**Klaus Fröhlich 教授**  
**国际大电网会议技术委员会主席**

# 原书前言

本书总结了多位作者在高压架空输电线路方面多年以来的研究经验，他们中的很多人都致力于硅橡胶绝缘子革新性的技术研究。以前，复合绝缘子由于生产数量较少、造价昂贵等原因，往往仅应用于有特殊需求（如严重污染）的地区。但由于缺乏生产标准、长期运行经验以及设计上的缺陷常常引发绝缘事故。随着复合绝缘子性能的不断改进，其质量逐渐达到了可以替换瓷和玻璃绝缘子的程度，随着其在全球范围内表现出的良好运行特性，复合绝缘子逐渐获得了较好的口碑，相应产量也逐步提高。一些国际知名的制造商以及用户逐渐认识到了复合绝缘子的发展潜力，对其进行了大量开创性的研究。研究工作主要包括对复合绝缘子的三种材料（金具材料、护套材料和芯棒材料）的研究以及复合绝缘子的界面特性研究。研究部门已建立了描述护套材料与其周围环境间相互作用的动态模型，加之良好的设计，目前复合绝缘子几乎已经可以做到免维护。随着认识水平的提升以及生产数量的不断增加，带动了产品的优化以及生产过程的自动化，从而使得高质量的复合绝缘子也具有较低的生产成本。回顾过去，作者们能够在其中一家叫作 PFISTERER 的复合绝缘子生产企业从事实际的工程工作实属有幸。鉴于本书的作者主要从事管理工作，因而能够做出一些推动复合绝缘子发展的决策。此外，他们从一开始就一直参与国际大电网会议（CIGRE）和国际电工委员会（IEC）的相关主题工作组，并且参与了基础科学的研究（CIGRE）和标准起草工作（IEC），这为他们编写此书提供了一个良好的机会。鉴于目前还没有一本系统而详细的介绍复合绝缘子的相关书籍，将他们的集体经验整理和传承到一本专业书上的愿望也促使我们完成了本书的编写。

由三个“简单”部分组成的复合绝缘子结合了电学、力学、化学、工业设计，甚至生物学这些交叉学科，这的确让人着迷。本书的主要结构安排如下：

首先是绝缘子的简介，包括了不同类型绝缘子在全球的使用情况、机械特性及应用情况。具体而言，包括复合棒状绝缘子，复合支柱绝缘子，紧凑型线路中的绝缘横担，相间间隔棒以及复合空心绝缘子。

对于棒状绝缘子，需特别注意其在拉伸负荷下的长期特性，其与金属附件的设计合理性紧密相关。而对于支柱绝缘子来说，由于绝缘子在运行过程中承受多种载荷，同时其可靠运行对电网的运行安全又至关重要，因此作者对其极限损坏载荷进行了物理解释和阈值进行了研究。对于上述两种绝缘子，采用了解析法和仿真的方法进行研究，从而获得了保证绝缘子安全运行的结构尺寸。

随后的两个章节讨论了现代电网中使用的紧凑型线路绝缘子和相间间隔棒，作者在此领域做出了重要的贡献。绝缘横担不仅减少了线路占地，同时还能限制



电场和磁场强度。紧凑型线路的绝缘横担机械系统复杂，需要大量的运行经验来保证设计的可靠性。对于横担本身，除了选择合适的复合绝缘子，还要更多地考虑稳定性问题。

当冰从覆冰导线上脱落、短路和舞动会导致导线靠近，需考虑安装相间间隔棒来避免上述情况发生。如果所设计的塔头需要用于紧凑型线路，且还要保持正常跨度，则也需要使用相间间隔棒。相间间隔棒属于一种细长的结构形式，因而需要特殊的计算方法，本书中也将对此进行介绍。

作为电气设备的外壳，如套管、电缆终端、避雷器等，复合空心绝缘子是不可缺少的，这是因为：一方面其在高压或地震的情况下具有优良的力学性能，另一方面在高污秽情况下具有较好的憎水性。本书的相关章节将重点关注它们的力学特性。

对于复合绝缘子，材料的选择和生产方法是密切相关的，这对它们的运行性能和可靠性具有很大影响。硅橡胶材料得到了广泛的认同并应用于更高的电压等级，本书将在后续章节对其进行详细介绍。

复合绝缘子的电晕和电弧防护非常关键，但由于设计上的多样性，很难制定统一的标准，因而市场上出现了个性化的解决方案。迫于成本压力，缺乏产品知识，在大型招标的情况下，一些没有经验的供应商在没有进行测试的情况下就把完整的绝缘子串作为一种产品进行投标，这样会导致在运行中出现的问题。这些问题并非是复合绝缘子技术的原因。为此，对电晕和电弧防护问题，本书在接下来的两章中进行了详细介绍。

对电网中老旧复合绝缘子的评价主要是基于 PFISTERER 公司的产品，该公司的产品已拥有超过 30 年的运行经验。

本书最后一章涉及复合绝缘子的标准化和测试，并在 IEC 标准下对复合绝缘子和常规绝缘子的标准进行了对比。为进一步评估复合护套材料的相关属性，主要对比了一些关键属性，如憎水性和憎水性迁移以及 CIGRE 当前的研究主题，还有材料特性等方面。

一般来说，多数材料都来源于作者们自己的研究成果，如他们自己的出版物或他们在其中做出积极贡献的 CIGRE 和 IEC 工作组的出版物。另一个主要来源是他们与瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 合作的两个工程项目，以及多年以来的产品发展过程中的测试报告，另外还有来自于 PFISTERER SEFAG 的产品支持。同时还引用了许多同事在这一领域积累的多年的工作经验。在书中，不是来源于我们自己的数据和图表内容，则给出了相应的参考文献。

在这里很难一一感谢多年来一直以某种方式帮助本书作者在这一领域中开展深入研究的同事和朋友。作者想特别感谢 Claude de Turreil 博士，他是 CIGRE 绝缘子工作组的长期会议召集人，于 2006 年 3 月不幸去世，他是一位让人尊敬的同事和朋友。

还要感谢国际大电网会议技术委员会主席 Klaus Fröhlich 教授，他通读了本

书并提出了建议，并为本书作序。

如果知识不能以书面形式传递给公众，那它也没有多大用处。在著名的 Springer 出版社及高级工程编辑 Dr. C. Baumann 的帮助下，作者得以轻松完成了相关工作。作者还要感谢 Steffen Großmann 教授以及 J. Pilling, R. Bärsch, V. Hinrichsen, L. Gau 和 P. Ermanni 教授对手稿的细致研究和提出的批评意见。

同时，作者想提前感谢注意到本书错误或对本书进一步修订和更新提供任何建议的所有读者。

最后还要感谢家人对我们工作长期以来的支持，终于促使我们圆满完成了相关工作。

**Konstantin O. Papailiou**

**Frank Schmuck**

**Malters, 2012 年 8 月**

# 目 录

译者序

原书序言

原书前言

第1章 绪论 .....	1
1.1 复合绝缘子的优点及发展历程 .....	1
1.2 复合绝缘子的运行经验 .....	2
1.3 复合绝缘子在高压架空输电线路中的应用 .....	4
1.4 复合绝缘子在电气设备及户外变电站中的应用 .....	5
1.5 标准化现状 .....	6
参考文献 .....	6
第2章 复合长棒形绝缘子 .....	7
符号和缩写 .....	7
2.1 复合长棒形绝缘子的应用 .....	8
2.2 复合长棒形绝缘子的力学性能 .....	10
2.2.1 复合长棒形绝缘子的长期运行性能 .....	11
2.3 复合长棒形绝缘子的动载性能 .....	20
2.4 复合长棒形绝缘子金具的设计及安装 .....	23
2.4.1 金具工艺技术的发展及现状 .....	23
2.4.2 压接式金具设计的基本要求 .....	24
2.4.3 压接式金具的安装 .....	26
2.4.4 计算 .....	27
2.4.5 简易分析方法 .....	27
2.4.6 复杂分析方法 .....	28
2.4.7 数值仿真方法 .....	34
参考文献 .....	42
第3章 复合支柱绝缘子 .....	43
符号和缩写 .....	43
3.1 主要属性 .....	45
3.2 复合支柱绝缘子的应用 .....	46
3.3 复合支柱绝缘子的弯曲特性 .....	49
3.3.1 概述 .....	49

3.3.2 极限破坏应力 .....	49
3.4 基于 SCL/MDCL 的制造要求 .....	56
3.5 复合支柱绝缘子的安全失效模式 .....	56
3.6 组合负荷 .....	59
3.6.1 负荷图 .....	60
3.6.2 实例 .....	61
3.6.3 计算机仿真 .....	62
3.6.4 测试 .....	62
3.7 动态负荷 .....	63
3.7.1 试验试样 .....	63
3.7.2 试验方法 .....	63
3.7.3 试验结果 .....	64
3.8 端部金具的结构要求 .....	64
3.9 解析计算方法 .....	66
3.9.1 简易解析分析法 .....	66
3.9.2 复杂解析分析法 .....	67
3.10 数值仿真 .....	70
3.10.1 有限元模型 .....	70
3.10.2 测试布置 .....	71
3.11 复合支柱绝缘子的失效行为 .....	73
3.12 敏感性分析 .....	77
参考文献 .....	78
<b>第4章 紧凑型线路用绝缘横担 .....</b>	<b>79</b>
符号和缩写 .....	79
4.1 简介 .....	80
4.2 紧凑型设计原则 .....	80
4.2.1 导线形式对杆塔参数的影响 .....	80
4.2.2 紧凑型线路结构 .....	81
4.3 绝缘横担的机械设计 .....	84
4.3.1 固定绝缘横担 .....	85
4.3.2 旋转式绝缘瓷横担（与水平布置的对比） .....	87
4.3.3 动态负荷 .....	91
4.3.4 稳定性试验 .....	93
4.4 紧凑型线路的发展 .....	99
4.4.1 瑞士 400kV 线路用空心绝缘子 .....	99
4.4.2 复合绝缘子的应急恢复系统 .....	100
4.4.3 420kV 双回路用实心复合横担 .....	101
参考文献 .....	103
<b>第5章 相间间隔棒 .....</b>	<b>104</b>
符号和缩写 .....	104

5.1 简介 .....	106
5.2 CIGRE 调查 .....	106
5.2.1 调查结果的评估 .....	106
5.2.2 运行经验 .....	108
5.3 连接技术 .....	109
5.4 相间间隔棒的机械设计 .....	111
5.4.1 舞动 .....	112
5.4.2 覆冰负荷的脱落 .....	117
5.4.3 短路电动力负荷 .....	119
5.4.4 相间间隔棒的弯曲特性 .....	122
5.5 相间间隔棒的电气设计 .....	126
5.5.1 最小长度 .....	126
5.5.2 电晕效应 .....	127
5.5.3 污秽 .....	128
5.6 应用 .....	128
5.6.1 中压紧凑型线路 .....	128
5.6.2 覆冰脱落引起线路舞动时的相间间隔棒 .....	130
5.6.3 网球拍杆塔 .....	131
参考文献 .....	132
<b>第 6 章 复合空心绝缘子 .....</b>	<b>134</b>
符号和缩写 .....	134
6.1 复合空心绝缘子的主要性能 .....	135
6.2 户外变电站的复合绝缘子 .....	135
6.2.1 套管 .....	136
6.2.2 避雷器 .....	137
6.2.3 户外挤压绝缘电缆接头 .....	137
6.2.4 电流和电压互感器 .....	138
6.2.5 户外断路器 .....	140
6.3 运行经验 .....	140
6.4 复合空心绝缘子的主要组成 .....	142
6.4.1 FRP 管 .....	142
6.4.2 端部金具 .....	142
6.5 复合空心绝缘子在弯曲负荷下的力学特性 .....	142
6.5.1 复合空心绝缘子的失效机理及诊断方法 .....	143
6.5.2 复合空心绝缘子的“损坏极限负荷” .....	143
6.6 复合空心绝缘子的试验 .....	145
6.6.1 负荷的定义 .....	145
6.6.2 弯曲负荷 .....	145
6.6.3 压缩负荷 .....	146
6.6.4 基于 IEC 61462 标准的实际测试实例 .....	148

10.4 常用试验方法 .....	317
10.4.1 试样的确定 .....	317
10.4.2 试验流程 .....	317
10.4.3 试验方法和失效标准概述 .....	330
10.5 试验实例(试验流程及相关结果) .....	330
10.5.1 例1:运行10年的420kV复合绝缘子(逐步注射成型) .....	330
10.5.2 例2:运行10年的420kV复合绝缘子(模块化成型) .....	338
10.5.3 例3:铁路隧道系统运行15年的15kV复合绝缘子 .....	345
10.5.4 例4:铁路隧道15kV绝缘子运行30年后的表面憎水性及锌层厚度分析 .....	349
10.5.5 例5:123kV绝缘子产品质检评估 .....	353
10.5.6 获取可靠性数据的实例 .....	356
10.6 小结 .....	358
参考文献 .....	358
<b>第11章 复合绝缘子的相关标准及试验 .....</b>	<b>362</b>
符号和缩写 .....	362
11.1 简介 .....	363
11.2 复合绝缘子当前 IEC 标准化及其与传统绝缘子串(组)的相似性比较 .....	364
11.3 特殊耐电蚀损试验 .....	366
11.4 聚合护套材料属性评估的试验方法 .....	367
11.5 斜面法试验 .....	370
11.5.1 耐电蚀损 .....	370
11.5.2 斜面法评估憎水性的实验原理 .....	381
11.5.3 斜面法评估憎水性迁移的实验原理 .....	382
11.6 聚合护套材料的指纹分析 .....	384
11.6.1 背景 .....	384
11.6.2 过程概述 .....	385
11.6.3 过程与实例:更细致的分析 .....	385
11.7 小结 .....	390
参考文献 .....	391

# 第 1 章 绪 论

高压绝缘子对于保证电力传输系统的安全、高效运行具有重要意义，因此对这些元件的运行可靠性要求也较高。除了传统的瓷质长棒形绝缘子及玻璃或瓷质盘形悬式绝缘子以外，近年来复合绝缘子在中压和高压架空输电线路和变电站用绝缘领域方面获得了广泛应用。

## 1.1 复合绝缘子的优点及发展历程

复合绝缘子的概念实际上是由美国在 20 世纪 50 年代首先提出来的。然而，直到 20 世纪 70 年代，当复合绝缘子芯棒基本组成材料（纤维增强材料）和复合绝缘子护套基本组成材料（聚合物）取得重大进步的时候，该技术才得以重视。尤其是硅橡胶材料在面对外界污染时<sup>[1]</sup>展现的强抗污能力和复合绝缘子强抗负载冲击能力，使复合绝缘子被人们广泛接受，并且它的这些重要特性很快征服了许多原来对其产生质疑的用户。复合绝缘子若在生产制造及材料选择等方面设计得当，其质量便可得到保证。以上特性与传统的瓷质绝缘子和玻璃绝缘子相比，虽不可能在力学性能或电气性能方面独立优化，但当为复合绝缘子选择材料时，可以分别单独考虑这些性能指标。复合绝缘子整体结构可分为三个部分<sup>[2]</sup>（见图 1.1）：

- 1) 用以承受外加载荷的高机械强度芯棒。
- 2) 环绕在芯棒四周的聚合物护套，用以提供泄漏距离和电气绝缘。
- 3) 芯棒两端用来连接机械负载的金具。

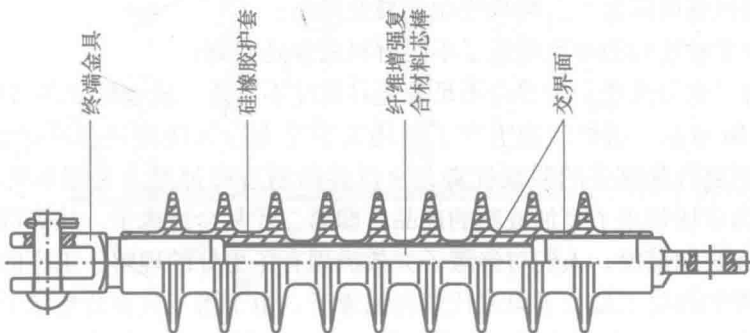


图 1.1 复合绝缘子的外形及部件组成

由于复合绝缘子上不同组件交界面处可能经常出现电气和机械问题，因而应特别重视交界面处的处理工艺<sup>[3]</sup>。

复合绝缘子的另一个优点是重量轻，从而使其更加容易运输和装配，并可以架设在低吨位杆塔上。在高电压等级输电线路中，传统绝缘子的重量约占杆塔上全部垂直负载的20%。相比之下，复合绝缘子能比传统绝缘子减少90%以上的重量。复合绝缘子对于由电弧或动态机械荷载引起的冲击负荷感应灵敏度比传统绝缘子要低很多。由于复合绝缘子为细长件，因此当遭受射击等外力破坏时不易成为击中目标。复合绝缘子也非常适合应用于铁路接触网，因为它的低重量在很大程度上避免了铁路接触网系统中的不可控振动，特别是在不断提高的运行速度下，这点尤为重要。

## 1.2 复合绝缘子的运行经验

50多年以前，美国率先开始采用有机材料制造架空输电线路用绝缘子，并大规模推广应用。这些绝缘子被称为树脂成型绝缘子；经过短时间的使用之后，由于频发各种问题，它们中的许多产品都被替换了。借鉴这些运行经验，第一批“真正”意义的复合绝缘子出现了，这种绝缘子的护套采用瓷质材料，内部为FRP芯棒（FRP即纤维增强塑料，一般称之为树脂）。这种绝缘子主要用于中压线路。几年后，来自德国、美国、法国、英国、意大利及瑞士的制造商，开始制造我们现在所熟知的这种结构的复合绝缘子。基于前述优点，第一代复合绝缘子引发了全球范围内线路运行单位的兴趣。不久，许多电力部门开始对复合绝缘子进行一系列实验并尝试将其应用到短距离区段线路上，尤其是更能够体现其优越性能的线路上。遗憾的是，第一代绝缘子产品出现了许多问题，例如：

- 1) 伞裙材料的长期耐受能力低和表面腐蚀问题；
- 2) 电弧导致的闪络，特别是由于老化引起的伞裙表面闪污性能下降；
- 3) 机械强度降低，芯棒从终端金具处滑出；
- 4) 由于粘连问题导致绝缘子不同材料交界处剥离；
- 5) 由于水分渗透、附着力不足及金具尺寸不合适，玻璃纤维芯棒脆断。

大约30年前，这些问题引发了一场关于是否应该使用复合绝缘子的反思。但是考虑到复合绝缘子的明显优势，全世界的制造商都努力处理和解决这些问题，并且为市场带来了更加成熟的产品，即第二代复合绝缘子。从那以后，由于系统研究和长期试验，人们对绝缘子失效机理有了更好的理解，工序的最优化和对质量保障的高要求促生了第三代复合绝缘子。由于第三代复合绝缘子工业化生产并且具有长达50多年的预期寿命，因此其具有很高的可靠性。毫无疑问，近年来这种复合绝缘子在全世界有了越来越广泛的使用，同时它也被人们认可是瓷



质绝缘子和玻璃绝缘子的替代品, 相关结论已由国际大电网会议 CIGRE 和美国电气电子工程师学会 (IEEE) 的数据调查和统计结果所证实。这两个组织发布的调查和统计结果将会在下面总结概括<sup>[4]</sup>。

与作者合作多年的 CIGRE 工作组 22.03 开展了一项很有价值的研究工作, 那就是汇集全世界的运行经验, 并开展了对电力部门的第一次调查, 相关调查结果于 1990 年发布<sup>[5]</sup>。1997 年, 工作组开始进行更进一步的调查, 并于 2000 年公布了调查结果<sup>[6]</sup>。以下结论是这次调查的一个总结, 这次调查被限制在 100kV 以上的传输电压。

特别指出的是, 运营商给出的之所以使用复合绝缘子的原因是很有意思的 (见图 1.2)。

图 1.3 所示的安装数量很清楚反映了从传统绝缘子到复合绝缘子的发展趋势。遗憾的是, 此次调查范围并不涵盖最大的复合绝缘子市场——美国, 因此目前实际数量预计比现有统计数据多约 700000 支 (1990 年仅多约 50000 支)。

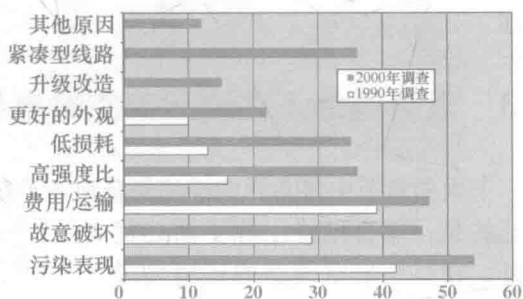


图 1.2 应用复合绝缘子的原因

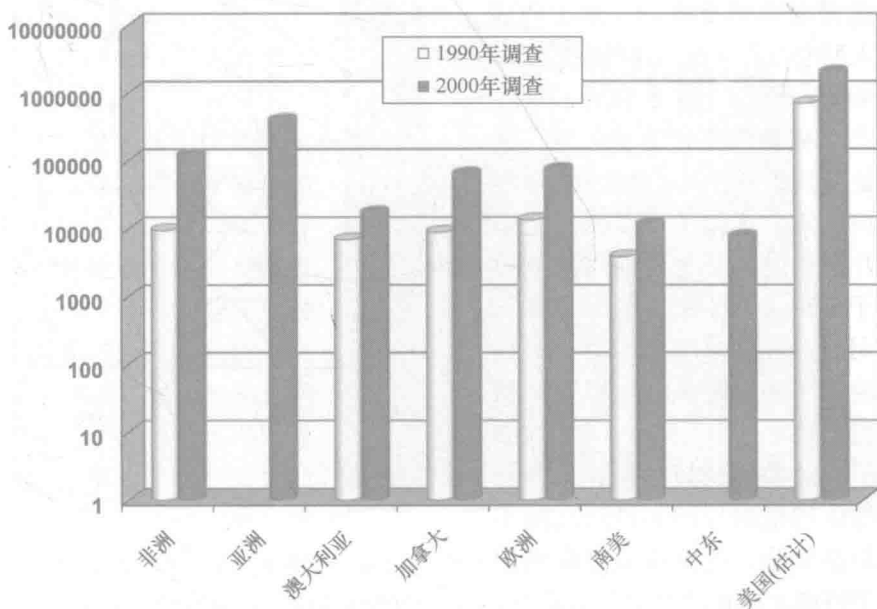


图 1.3 复合绝缘子使用国家及数量