

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

# 中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

第 3 卷

## 电气工程材料及器件

主编 陈 仲 黄崇祺 李 卫 李耀星  
邓长胜 汪继强



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

---

CHINA ELECTRICAL

**中国电气**

**工程大典**

ENGINEERING CANON

---

中国电气工程大典编辑委员会

第 **3** 卷

# 电气工程材料及器件

主编 陈 仲 黄崇祺 李 卫 李耀星  
邓长胜 汪继强



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的，是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第3卷，电气工程材料及器件卷，主要内容包括绝缘材料、磁性材料、导体材料及其制品、电气功能材料、电线电缆及电池。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等学校相关专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

中国电气工程大典. 第3卷, 电气工程材料及器件 / 陈仲等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7372-0

I. 中… II. ①陈…②中… III. ①电气工程-中国②电工材料-中国③电气器件-中国 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 086909 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009年3月第1版 2009年3月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 · 64.375印张 · 2948千字 · 2插页

定价 240.00 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

## 中国电气工程大典卷目

卷 目	篇 目
<b>第1卷 现代电气工程基础</b>	1. 电磁场基础 2. 电路与电网络分析基础 3. 电磁兼容基础 4. 现代电磁测量技术基础 5. 电工材料基础 6. 高电压技术基础 7. 脉冲功率技术基础 8. 电气安全技术基础 9. 电工新技术 10. 电工标准化与合格评定、电工计量
<b>第2卷 电力电子技术</b>	1. 概论 2. 电力电子器件 3. 电力电子器件应用基础 4. 基本电力电子电路 5. 电力电子控制技术 6. 电力电子软开关技术 7. 电力电子多电平技术 8. 电源技术 9. 电力电子系统中的磁技术 10. 电力电子技术在电力传动中的应用 11. 电力系统中的电力电子装置 12. 电力电子电路/系统建模及计算机仿真 13. 电力电子电路/系统电磁兼容设计 14. 电力电子系统集成
<b>第3卷 电气工程材料及器件</b>	1. 绝缘材料 2. 磁性材料 3. 导体材料及其制品 4. 电气功能材料 5. 电线电缆 6. 电池
<b>第4卷 火力发电工程 (上、下)</b>	1. 概论 2. 火力发电厂设计 3. 锅炉 4. 汽轮机 5. 汽轮发电机 6. 自动控制系统 7. 电站系统与辅机设备 8. 超临界、超超临界机组 9. 大型循环流化床锅炉 10. 大型空冷式汽轮机组 11. 热电联产机组 12. 燃气轮机及联合循环机组 13. 燃煤的燃气—蒸汽联合循环机组 14. 内燃机电站 15. 电站环保技术 16. 火力发电厂运行
<b>第5卷 水力发电工程</b>	1. 水力发电工程通论 2. 水轮机 3. 水轮发电机 4. 电气主接线和电气设备 5. 水电站自动控制综合系统与装置 6. 水电站运行 7. 抽水蓄能电站
<b>第6卷 核能发电工程</b>	1. 概论 2. 压水堆核电厂 3. 核电厂的建造 4. 核电厂的调试及营运 5. 先进压水堆核电厂 6. 下一代先进核能系统
<b>第7卷 可再生能源发电工程</b>	1. 概论 2. 太阳能光伏发电技术 3. 太阳热发电 4. 风力发电 5. 生物质能发电 6. 海洋能发电 7. 地热发电

卷 目	篇 目
第 8 卷 电力系统工程	1. 电力系统规划 2. 远距离大容量交流输电系统 3. 高压直流输电系统 4. 灵活交流输电系统 5. 电力系统互联 6. 电力市场 7. 电力系统可靠性 8. 电力系统分析与仿真 9. 电力系统有功功率调整和频率控制 10. 电力系统无功补偿和电压控制 11. 电力系统稳定性及稳定控制 12. 电力系统控制理论与方法 13. 电力系统调度及调度自动化 14. 电力系统继电保护和安全自动装置 15. 电能质量 16. 配电系统及其自动化 17. 电力系统通信 18. 电力信息系统 19. 超导电力技术 20. 分布式能源电力系统
第 9 卷 电机工程	1. 电机通论 2. 同步电机 3. 感应电机 4. 直流电机 5. 特种电机
第 10 卷 输变电工程	1. 输电系统 2. 变电系统 3. 变压器、电抗器、互感器、电容器和调压器 4. 高压开关设备 5. 绝缘子和避雷器 6. 直流输电设备 7. 特高压输电技术 8. 输变电系统过电压与绝缘配合 9. 输变电系统的电磁环境 10. 高电压试验设备与电气绝缘试验 11. 设备状态在线监测与故障诊断技术
第 11 卷 配电工程	1. 概论 2. 低压电器 3. 低压成套开关设备和控制设备 4. 低压电器与成套设备可靠性技术 5. 低压电器试验与检测技术 6. 低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术
第 12 卷 船舶电气工程	1. 概论 2. 船舶电机与电器 3. 船舶电站 4. 船舶电力系统 5. 船舶电力推进 6. 船舶机械电气控制 7. 综合船桥系统 8. 船舶电磁防护技术 9. 船舶电磁兼容 10. 船舶电气工艺
第 13 卷 交通电气工程	1. 汽车电气 2. 轨道交通电气
第 14 卷 建筑电气工程	1. 概论 2. 建筑电气的规范及标准 3. 建筑物电气装置标准 4. 建筑中压配电系统工程 5. 低压供配电系统 6. 建筑工程常用电器系统 7. 建筑照明 8. 建筑电气消防系统 9. 建筑设备监控系统 10. 安全防范系统与工程 11. 通信网络及信息系统 12. 防雷与接地 13. 建筑物电磁兼容技术
第 15 卷 电气传动自动化	1. 概论 2. 电气自动控制策略 3. 计算机控制技术 4. 电气传动控制系统 5. 装备制造电气自动化 6. 电气传动自动化的应用

# 中国电气工程大典

— CHINA ELECTRICAL ENGINEERING CANON —

## 编辑委员会



主任:陆燕荪



主任:陆延昌



执行主任:周鹤良



执行主任:宋天虎



# 中国电气工程大典

— CHINA ELECTRICAL ENGINEERIN —

## 电气工程材料及器件卷主编



陈 仲

桂林电器科学研究所所长、  
教授级高级工程师



黄崇祺

中国工程院院士、  
上海电缆研究所副总工程师、  
教授级高级工程师



李 卫

钢铁研究总院功能材料研究所副所长、  
永磁材料研究室主任、  
教授级高级工程师



李耀星

桂林电器科学研究所绝缘材料  
研究室主任、教授级高级工程师



邓长胜

上海电缆研究所科技开发中心  
副主任、教授级高级工程师



汪继强

中国电子科技集团公司第十八研究所  
副总工程师、教授级高级工程师



# 桂林电器科学研究所



低压触头



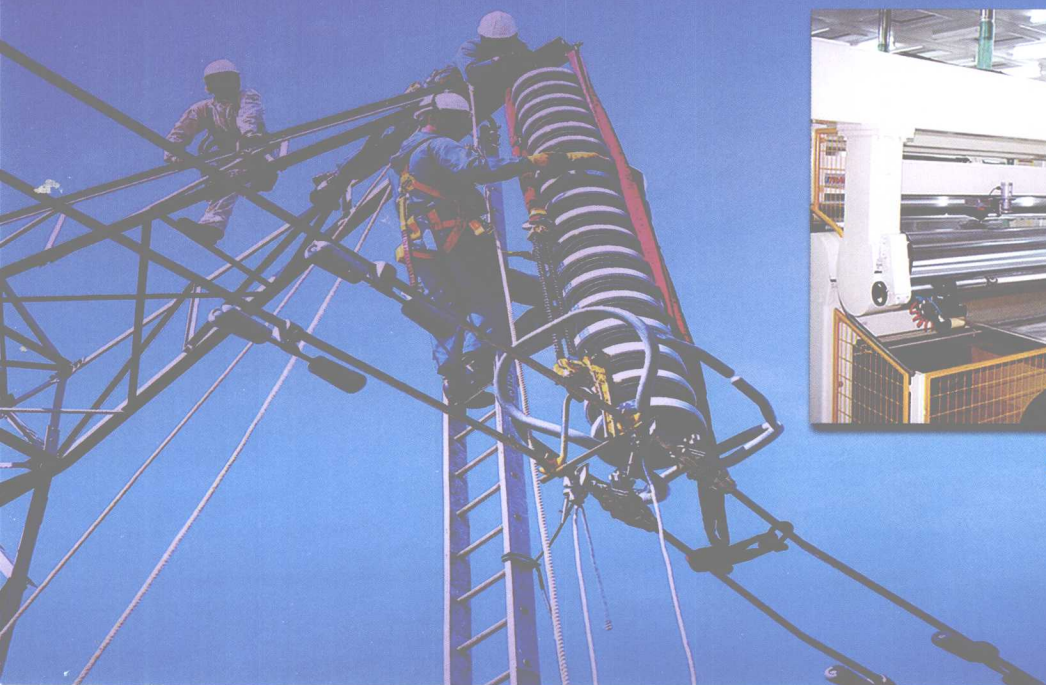
中高压触头元件



磁性材料



绝缘材料



塑料薄膜双轴拉伸生产线

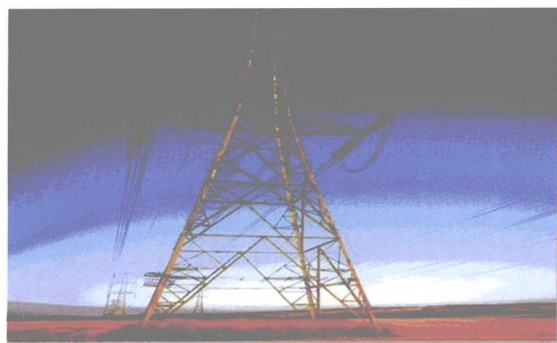




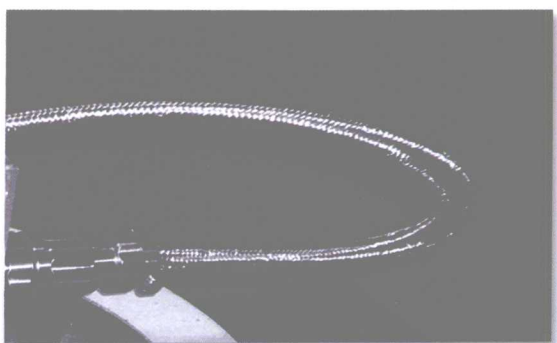
# 上海电缆研究所



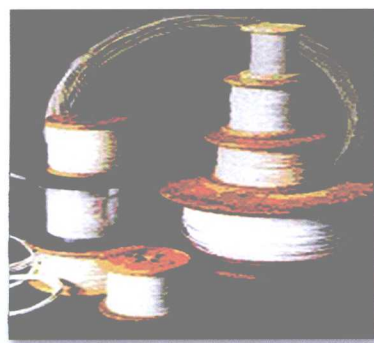
▲ 国家“863”项目—磁悬浮交通工程用长定子电缆研究。通过自主创新，掌握了关键技术，拥有5项发明专利，使我国成为世界上第二个拥有该项技术的国家。



▲ 三峡输变电工程用500kV大容量输电线路技术研究。  
▲ 750kV输变电工程用扩径导线和扩径耐热母线研究。  
▲ 三峡输变电工程用大跨越系列导线与技术研究。



▲ 核反应堆堆顶电缆和连接器组件的研制。  
▲ 该产品自主研发，填补了国内空白，达到国际领先水平。



▲ 特种耐高温耐辐射电磁线的研制。  
▲ 该产品适用于航空航天、核电站等领域。



# 中国电气工程大典

## 编辑委员会

- 主任：**陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师  
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师  
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：**周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师  
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师  
中国机械工程学会常务副理事长
- 副主任：**潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邴凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审

委 员：(按姓氏笔画排列)

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	邬 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘璞岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀苹	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
邴凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集旻	汪樾生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宠惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思琦	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪



胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳叔
施围	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲泱	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铎	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩氏晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程均培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦侬	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	满慧文	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					

# 序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历



时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日



# 前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于 2004 年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过 4 年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共 15 卷约 5000 万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放 30 年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陸延昌



## 本卷前言

《电气工程材料及器件》是《中国电气工程大典》中的卷目之一。

电气工程材料是电气工程的功能性基础材料，新型电气工程材料不断涌现，品种、规格、质量不断提高，为我国电气工业的迅猛发展作出了重要的贡献。

本卷共6篇，主要内容涉及绝缘材料、磁性材料、导体材料、电触头材料、热双金属材料、电瓷材料、压电材料、焊料、电线电缆、电池等。

本卷由陈仲、黄崇祺、李卫、李耀星、邓长胜、汪继强任主编，邀请桂林电器科学研究所、上海电缆研究所、钢铁研究总院、中国电子科技集团公司第十八研究所、四川东材企业集团公司、中国计量科学研究院、昆明理工大学、西安电瓷研究所、湖南大学、哈尔滨庆缘电工材料股份有限公司、株洲时代绝缘材料有限公司、上海电机（集团）公司绝缘材料厂、西安西电电工材料有限公司、杭州泰达实业有限公司、西安交通大学、北京新福润达绝缘材料有限公司、安泰科技股份有限公司、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、北京矿业研究总院、机械工业北京电工技术经济研究所、佛山精密电工合金有限公司、亚通电子有限公司等单位的70位专家和工程技术人员参加撰写和审稿。

各篇的主编如下：

第1篇 绝缘材料	李耀星 赵平
第2篇 磁性材料	李卫 赵红一
第3篇 导体材料及其制品	黄崇祺
第4篇 功能材料	陈仲
第5篇 电线电缆	邓长胜 张兆焕
第6篇 电池	汪继强

本书主要供从事电气工程材料及器件领域研究、制造、应用的工程技术人员和管理人员使用，也可供理工院校相关专业的师生参考。

由于内容繁多和编审者水平所限，书中难免存在不当之处，敬请批评指正。

编者