



国家电网公司
电力科技著作出版项目

碳纤维 复合芯导线及应用

陈 原 宋福如 周国华 卢 毅 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

碳纤维 复合芯导线及应用

陈 原 宋福如 周国华 卢 毅 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

碳纤维复合芯导线具有重量轻、线胀系数低、强度高、弹性模量高、耐高温、耐疲劳、耐腐蚀等技术优势,既能够用于提高电力输送能力,又可有效提高线路安全运行水平、降低输电损耗,是具有发展潜力的新型导线品种之一。本书基于国内自主研发成果,全面论述了碳纤维复合芯导线技术及其发展。全书共8章,包括新型导线技术综述,碳纤维复合芯导线制造,碳纤维复合芯导线检测,碳纤维复合芯导线配套金具、施工及运行维护,碳纤维复合芯导线应力—弧垂计算,碳纤维复合芯导线标准化,碳纤维复合芯导线适用范围,碳纤维复合芯导线应用。

本书可供从事碳纤维复合芯导线科研生产制造人员以及输电线路设计、施工、运行维护人员学习使用,也可作为大专院校相关专业师生的自学用书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碳纤维复合芯导线及应用 / 陈原等著. —北京: 中国电力出版社, 2015.1

ISBN 978-7-5123-5644-3

I. ①碳… II. ①陈… III. ①碳纤维-复合材料-输电导线 IV. ①TM24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 044063 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.75 印张 165 千字

印数 0001—2000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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



碳纤维复合芯导线具有重量轻、线膨胀系数低、强度高、弹性模量高、耐高温、耐疲劳、耐腐蚀等技术优势,是具有发展潜力的新型导线品种之一。2006 年国家电网公司将该产品列入第一批重点应用新技术目录,2008 年又立项该产品的自主研发及应用,2010 年该项目列入国家高技术发展研究规划(863 计划),促进了碳纤维复合芯导线技术的迅速发展,导线、配套产品、设计、施工、运行维护、技术标准等均日益成熟。随着国产技术水平的提高以及产品价格的逐步合理回归,碳纤维复合芯导线可在电网建设及升级改造中发挥重要作用。

为促进电力系统及相关行业比较广泛和全面地认识和掌握该项技术,促使碳纤维复合芯导线发挥应有的作用,特撰写本书。

本书是对碳纤维复合芯导线技术的全面梳理和总结,既包括产品基本原理,又包括较深入的产品制造、配套技术等,可作为从事碳纤维复合芯导线科研、生产制造人员以及输电线路设计、施工、运行维护人员的重要参考资料。

本书在写作过程中,得到了众多同事及其他电力行业、制造行业人员的帮助,在此致以衷心的感谢。

编 者

2013 年 10 月

目录

前言

第1章 新型导线技术综述	1
1.1 新型导线技术	1
1.2 碳纤维复合芯导线技术	7
1.3 自主研发碳纤维复合芯导线的背景	9
1.4 小结	13
第2章 碳纤维复合芯导线制造	14
2.1 碳纤维丝制造	14
2.2 碳纤维复合芯制造	17
2.3 碳纤维复合芯铝绞线制造	20
2.4 小结	30
第3章 碳纤维复合芯导线检测	32
3.1 常规参数测试	33
3.2 人工加速老化试验	44
3.3 机械疲劳试验	68
3.4 小结	81
第4章 碳纤维复合芯导线的配套金具、施工及运行维护	83
4.1 常规导线的接续金具	83
4.2 楔接式接续金具及存在的问题	84
4.3 压接式接续金具与张力放线	86
4.4 预绞—楔接组合式接续金具	96

4.5	组合式放线滑车与特殊条件下的施工	100
4.6	导线修补试验	108
4.7	小结	113
第5章	碳纤维复合芯导线的应力—弧垂计算	114
5.1	应力—弧垂计算原理	114
5.2	应力—弧垂计算示例	115
5.3	小结	118
第6章	碳纤维复合芯导线的标准化	119
6.1	产品技术条件	119
6.2	施工工艺及验收导则	119
6.3	运行维护技术导则	120
6.4	小结	132
第7章	碳纤维复合芯导线的适用范围	133
7.1	线路增容应用	133
7.2	大跨越线路应用	136
7.3	提高线路安全运行裕度	142
7.4	降低线路运行损耗	148
7.5	研发低价位碳纤维复合芯导线的必要性	150
7.6	小结	151
第8章	碳纤维复合芯导线的应用	152
8.1	国外产品的应用	152
8.2	自主研发产品的应用	154
8.3	应用实例	156
8.4	小结	163
参考文献		164
索引		165

第1章

新型导线技术综述

随着电力负荷的大幅增加和输电走廊选择的日益困难,提高单位走廊传输功率的需求愈发迫切,常规的钢芯铝绞线(ACSR)已难以满足输电需求。在此背景下,国内外发展了一系列可用于输电线路增容的导线,包括大截面钢芯铝绞线及钢芯耐热铝合金绞线、殷钢芯耐热铝合金绞线、铝基陶瓷纤维芯耐热铝合金绞线、碳纤维复合芯铝绞线等新型导线。大截面钢芯铝绞线仍属于钢芯铝绞线范畴,只是提高铝股截面以达到增容目的;钢芯耐热铝合金绞线(TACSR)是在金属铝中加入锆元素,以提高铝材耐热性能,具有较宽的运行温度范围;殷钢芯耐热铝合金绞线(ZTACIR)是在钢中加入适当比例的镍元素,使芯线在较宽的运行温度范围内具有较低的线膨胀系数;铝基陶瓷纤维芯铝绞线(ACCR)及碳纤维复合芯铝绞线(alumium conductor composite core, ACCC)统称复合芯铝绞线,是目前综合性能最佳的导线,不仅具有较宽的运行温度范围和较低的线膨胀系数,还具有较低的单位长度质量。复合芯铝绞线打破了传统导线的结构形式,从而具备了众多技术优势,是输电导线的一项重要革新。

1.1 新型导线技术

1.1.1 生产工艺比较

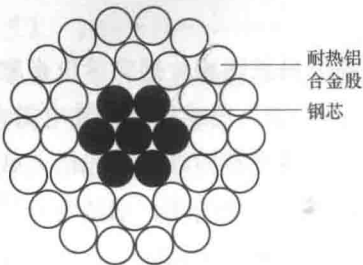
1. 大截面钢芯铝绞线

大截面钢芯铝绞线只是铝股截面较大、通流能力较高的普通导线,实质上并不属于新型导线范畴。用于线路增容改造的大截面钢芯铝绞线的单位长度质量及外径均大于原导线,因此各种运行工况下的导线张力及弧垂相应超

过原导线，而杆塔强度、高度等参数是与原导线相配套的，更换大截面导线必然要更换铁塔（包括增大强度、提高高度），导致线路改造工作量及资金投入过大。

2. 钢芯耐热铝合金绞线

钢芯耐热铝合金绞线的结构及生产工艺与钢芯铝绞线基本相同，其结构示意图见图 1-1，主要是用耐热铝合金线代替常规的硬铝线。耐热铝合金绞线



生产工艺有固溶型和固溶析出型，通过在铝材中加入金属锆元素形成微小的 Al_3Zr 阻止金属再结晶，从而提高铝材的耐热性，可在较高温度下运行而强度的损失不超过允许值。但锆元素的加入对导电性能产生劣化影响，即耐热铝合金

绞线的耐热性能与其导电性能构成一对矛盾。耐热铝合金单线分 AT1、AT2、AT3 和 AT4 四种，其系列型号对照见表 1-1，电导率为 58% IACS 的普通耐热铝合金单线和超耐热铝合金单线的电阻率较高，线损较大，已被较高电导率（60%IACS^①）的耐热铝合金单线取代。

表 1-1 钢芯耐热铝合金系列型号对照表

线 种	日本型号	IEC 型号	电导率 (%IACS)	抗拉强度 (MPa)	长期允许使用温度 (℃)
58%耐热铝合金	58TAI		58	159~169	150
60%耐热铝合金	60TAI	AT1	60	159~169	150
高强度耐热铝合金	KTAI	AT2	55	225~248	150
超耐热铝合金	UTAI		58	159~169	200
高导电超耐热铝合金	ZTAI	AT3	60	159~176	210
特耐热铝合金	XTAI	AT4	58	159~169	230

常温下耐热铝合金单线的抗拉强度与硬铝线基本相同，因此相同截面的普通导线和耐热铝合金绞线的机械性能基本一致，在线路设计中的机械力学性能方面与普通导线无本质区别。

① 国际退火铜标准，电导率为 58MS/m 确定为 100% IACS。

3. 殷钢芯耐热铝合金绞线

殷钢芯耐热铝合金绞线结构示意图见图 1-2, 它是以殷钢芯替换钢芯耐热铝合金绞线的钢芯制成的, 耐热铝合金绞线为梯形型线。殷钢芯耐热铝合金绞线在 20 世纪 80 年代初研制成功, 殷钢 (invar) 也称为因瓦合金, 是一种镍铁合金, 成分为镍 36%、铁 63.8%、碳 0.2%, 该导线在较宽的温度范围内具有较低的线膨胀系数。

殷钢合金的生产工艺之一是采用真空感应炉或非真空感应炉冶炼, 经热加工后, 进行轻度冷变形和酸洗, 再冷加工成丝材。殷钢合金丝可根据需要进一步制成镀锌殷钢合金丝或铝包殷钢合金丝, 再与耐热铝合金型线绞合, 制成殷钢芯耐热铝合金绞线。

4. 铝基陶瓷纤维芯铝绞线

铝基陶瓷纤维芯铝绞线与钢芯铝绞线结构基本相同 (见图 1-3), 区别在于材质或铝线的形状不同, 由铝基陶瓷纤维芯替代了钢芯, 耐热铝合金线替代了硬铝线, 耐热铝合金线可以为圆形结构, 也可以为梯形结构。铝基陶瓷纤维芯的每根芯线由数千根直径为 $12\mu\text{m}$ 的高强度铝氧化物纤维与陶瓷纤维连续且方向一致地嵌在纯铝芯线中。

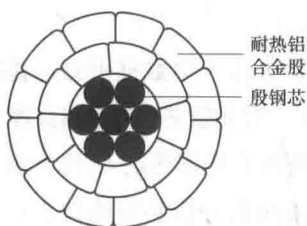


图 1-2 殷钢芯耐热铝合金绞线结构示意图

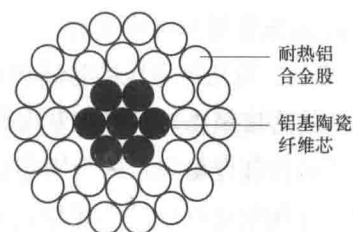


图 1-3 铝基陶瓷纤维芯铝绞线结构示意图

铝基陶瓷纤维芯铝绞线的芯线生产工艺为: 用粉碎装置对纤维进行粉碎、除渣, 用真空压滤法制成梯度形预制件, 用挤压渗透铸造法制造梯度形复合材料。首先将预热好的预制件放入模具中, 浇入精炼好的铝合金液加压, 铝液在压力下渗透到预制件空隙中, 保压至铝合金液完全凝固, 卸压后取出, 得到复合材料。通过调节预制件与挤压铸造模具的预热温度以及挤压铸造压力、速度等参数可确保预制件完全被渗透, 得到高质量的梯度形复合材料。复合材料制成芯线后与耐热铝合金线绞合成铝基陶瓷纤维芯铝绞线。

5. 碳纤维复合芯铝绞线

碳纤维复合芯铝绞线源自美国、日本等发达国家,其中美国 CTC 公司产品为碳纤维复合芯软铝型线结构,见图 1-4。碳纤维复合芯铝绞线与传统钢芯铝绞线的差异在于芯线和铝线的材质、形状的不同,单根高强度耐热碳纤维复合芯替代了多股钢芯,碳纤维复合芯的主要原材料为聚丙烯腈(PAN)炭化而成的碳纤维和高温固化树脂,经拉挤工艺成型。美国 CTC 公司产品以高电导率软铝梯形铝股替代圆形硬铝铝股,碳纤维复合芯与软铝梯形铝股绞合

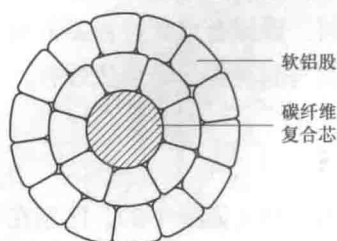


图 1-4 碳纤维复合芯软铝绞线结构示意图

成为碳纤维复合芯铝绞线。但因软铝机械强度、硬度偏低,施工、检修中易受损伤且施工工艺相对复杂,因此近年来国家电网公司组织自主研发的碳纤维复合芯导线也采用耐热铝合金线,以解决铝股机械强度偏低问题,并试制硬铝股的碳纤维复合芯导线,以兼顾铝股的电导率和机械强度。

1.1.2 性能比较

1. 芯线密度和强度比较

表 1-2 为几种导线的芯线物理机械性能比较,由表中数据可知,碳纤维复合芯的密度最小,仅为铝基陶瓷纤维芯的 1/2,为其他芯线的 1/4;碳纤维复合芯抗拉强度最大,约为钢芯、殷钢芯、铝基陶瓷纤维芯的 2 倍。碳纤维复合芯导线的比强度是上述导线中最大的,铝基陶瓷纤维芯导线次之,而导线质量对弧垂的影响是最显著的,因此在相同的初始温度和导线张力条件下,碳纤维复合芯导线具有最小的弧垂。

表 1-2 几种导线芯线的物理机械性能比较

导线种类	ACSR	TACSR	ZTACIR	ACCR	ACCC
芯线材料	镀锌(铝包)钢线	镀锌(铝包)钢线	镀锌(铝包)殷钢线	铝基陶瓷纤维芯	碳纤维复合芯
密度(g/cm^3)	7.8	7.8	7.1	3.3	1.6~1.9
抗拉强度(MPa)	1300	1300	1080	1275	2400
弹性模量(GPa)	200	200	152	216	120

2. 耐热性能比较

几种扩容导线耐热性能比较见表 1-3。

表 1-3 几种扩容导线耐热性能比较

导线种类	允许连续使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)	迁移点温度 ($^{\circ}\text{C}$)	迁移点以下线膨胀 系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	迁移点以上线膨胀系 数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
ACSR	≤ 90	120	19.4×10^{-6}	11.5×10^{-6}
TACSR	≤ 150	120	19.4×10^{-6}	11.5×10^{-6}
ZTACIR	$\leq 200 \sim 210$	100	17×10^{-6}	3.7×10^{-6}
ACCR	≤ 210	130	16.3×10^{-6}	6.3×10^{-6}
ACCC	≤ 160	85	$12.8 \sim 19.6 \times 10^{-6}$	2.0×10^{-6}

由表 1-3 可知, 碳纤维复合芯导线等扩容导线的允许连续使用温度在 150°C 以上, 大大高于钢芯铝绞线的 90°C , 且具有较小的线膨胀系数。

在相同的载流量时, 同直径碳纤维复合芯软铝绞线弧垂仅为钢芯铝绞线的 $1/6$, 图 1-5 和图 1-6 分别为规格 1020kcmil 的 ACCC/TW 导线与规格 795kcmil 的钢芯铝绞线 (ACSR) 的温度—弧垂曲线和温度—张力曲线。两者的弧垂特性比较见表 1-4 (试验条件为导线档距 65.5m, 导线初始张力为 25%RTS)。

高温条件下, 碳纤维复合芯导线的弧垂小是因迁移点温度以上的线膨胀系数最小, 殷钢芯导线次之, 因此随着温度上升, 碳纤维复合芯导线与其他导线的弧垂差异将进一步增大。

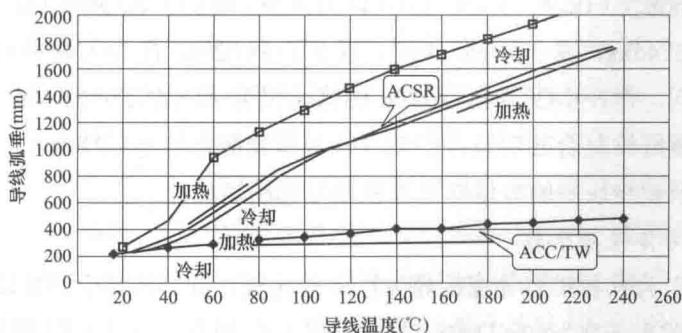


图 1-5 ACSR 及 ACCC/TW 导线温度—弧垂曲线^[2]

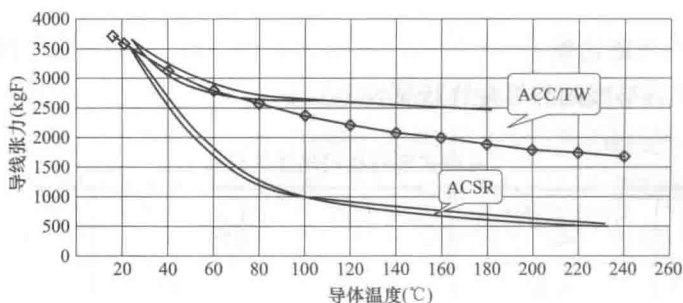


图 1-6 ACSR 及 ACC/TW 导线温度—张力曲线^[2]

注: $1\text{kgF} \approx 9.8\text{N}$

表 1-4 ACC/TW 与 ACSR 弧垂特性的比较

导线种类和规格	弧垂 (mm)			张力 (kgF)		
	26°C	183°C	变化量	26°C	183°C	变化量
ACSR (795kcmil)	236	1422	+1186	3566	622	-2944
ACC/TW	198	312	+114	3745	2471	-1274

由表 1-4 可知,在相同试验条件下,当温度从 26°C 升高到 183°C 时,ACSR 的弧垂从 236mm 增加至 1422mm,增加了 1186mm,增大 5 倍;而 ACC/TW 的弧垂从 198mm 增加至 312mm,增加了 114mm,仅增大 0.57 倍,即 ACC/TW 弧垂的变化量仅为 ACSR 的 1/10。由图 1-5 也可看出,ACC/TW 在拐点(迁移点)温度以上的弧垂变化非常小,而 ACSR 的变化较大。图 1-6 为对应温度的导线张力变化曲线,当温度从 26°C 升高至 183°C 时,ACSR 的张力由 3566kgF ($1\text{kgF} \approx 9.8\text{N}$) 减小至 622kgF,减小了 82.56%,而 ACC/TW 的张力由 3745kgF 减小至 2471kgF,减小了 34.02%,在 26°C 时两种导线的张力基本相同,而在 183°C 时,ACSR 的张力仅为 ACC/TW 的 1/4。

利用碳纤维复合芯铝绞线的质量轻、线膨胀系数小的特点,可以降低铁塔的高度或较少铁塔的数量并降低铁塔基础的造价。

3. 铝导体性能比较

表 1-5 为几种扩容导线铝导体性能的比较。碳纤维复合芯软铝绞线的铝导体 20°C 时电导率 $>62\% \text{IACS}$,比殷钢芯耐热铝合金绞线及铝基陶瓷纤维芯铝绞线的输电损耗降低 5%;但碳纤维复合芯导线的软铝股的抗张强度仅为

59MPa，不到硬铝和铝合金股的 50%。

表 1-5 几种扩容导线铝导体性能的比较

导线种类	ACSR	TACSR	ZTACIR	ACCR	ACCC
铝股材料	硬铝	铝合金	铝合金	铝合金	软铝
电导率 (20℃)	61%IACS	60%IACS	60%IACS	60%IACS	62%IACS
铝股截面 (mm ²)	403	403	413	403	517
铝股强度 (MPa)	158~183	158~183	158~183	139	60
短时允许温度 (℃)	≤120	≤180	≤240	≤240	≤160

4. 其他性能比较

对于芯材，除碳纤维复合芯铝绞线和铝基陶瓷纤维芯铝绞线外，耐热铝合金绞线、股钢芯耐热铝合金绞线及普通的钢芯铝绞线均为磁性金属材料，在线路运行过程中存在涡流磁损及芯与铝导体之间的电化学腐蚀；而碳纤维复合芯由于绝缘树脂的包裹，不存在涡流磁损及芯与铝导体之间的电化学腐蚀，耐环境腐蚀性能优异。此外，碳纤维复合芯铝绞线的芯线具有自阻尼结构，抗风振能力较好。

1.2 碳纤维复合芯导线技术

1. 碳纤维复合芯导线技术优势

架空输电线路一般采用钢芯铝绞线，中心为钢绞线，主要用于承受导线张力；外部为铝股，主要用于传输电流并承受部分导线张力。碳纤维复合芯导线以碳纤维复合芯替代钢绞线，主要技术优势如下：

(1) 导线允许运行温度大幅度提高，输电能力大幅度提高，节省输电走廊。碳纤维丝具有优异的耐高温性能，达 2000℃ 时强度不降低。通过选取合适的树脂基体与配方，与碳纤维丝制成导线用复合芯，确保高温下复合芯的机械强度无显著降低，因此碳纤维复合芯导线高温运行时，能够由碳纤维复合芯承担全部导线张力，外部铝股仅承担传输电流的作用，解决了常规导线高温运行时机械强度下降的问题，从而可通过提高导线允许运行温度实现输电能力的提高，以 LGJ-400/35 型钢芯铝绞线替换为相同铝截面的碳纤维复合

芯导线为例,按运行温度 160°C ,环境温度 40°C ,日照强度 $300\text{mW}/\text{m}^2$,风速 $0.5\text{m}/\text{s}$ 计算,导线允许运行温度由 70°C 提高至 160°C ,传输电流可由 732A 提高至 1452A ,输送功率提高 98% ,即一条使用碳纤维复合芯导线的线路可达到两条常规线路的输电能力。

(2) 导线质量轻、线膨胀系数小、导线弛度小,对杆塔强度、杆塔高度、杆塔基础的要求降低。碳纤维复合芯具有远高于钢芯的比强度,相同拉断力下,碳纤维复合芯质量不到钢芯的 20% ,导线整体质量也相应大幅度降低,以尺寸相同的 LGJ300/50 型钢芯铝绞线(单位长度质量 $1.21\text{kg}/\text{m}$,额定拉断力 103.4kN)与 JLNRF2B-300/65 型碳纤维复合芯导线(单位长度质量 $0.92\text{kg}/\text{m}$,额定拉断力 170.5kN)相比,碳纤维复合芯导线的质量仅为钢芯铝绞线的 76% ,而抗张强度却比后者高 65% 。因此,在综合考虑导线弹性模量、线膨胀系数、蠕变性能前提下,如果保持导线最大使用张力及年平均运行张力不变,则以碳纤维复合芯导线替换常规导线,弧垂可显著减小。如: 500kV 万顺三线(万全—顺义) $471\sim 472$ 档更换为碳纤维复合芯导线,相同导线温度下弧垂减小 $3\sim 4\text{m}$,即使考虑碳纤维复合芯导线允许运行温度为 160°C ,远高于常规导线的 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$,但碳纤维复合芯导线在迁移点温度以上的线膨胀系数接近零,弧垂增加量有限,仍可保证碳纤维复合芯导线在最高运行温度下的弧垂优势。因此:① 新建线路使用碳纤维复合芯导线可适当增大档距、减少杆塔数或降低杆塔高度,节省杆塔或塔材,或降低对杆塔强度及杆塔基础的要求;② 运行线路更换碳纤维复合芯导线不仅无需更换杆塔或加强杆塔,还可有效增大导线对地距离及对线路周围的树木、建筑物、山体距离,提高线路安全运行裕度。

(3) 碳纤维复合芯具有优良的耐疲劳性,确保线路长期安全可靠运行。架空输电线路的机械故障中有较大比例原因与金属材料的疲劳断裂有关。选用合适的树脂基体与配方,与碳纤维丝制成具有自阻尼性能的复合材料,经过一千万次拉一拉应力疲劳试验,碳纤维复合材料的剩余强度仍能够达到初始强度的 90% ;而在相同试验条件下,钢材的剩余强度仅为初始强度的 $30\%\sim 40\%$ 。

(4) 碳纤维复合芯具有优良的耐腐蚀、耐老化性能,确保线路长期安全可靠运行。选用合适的树脂基体与配方,与碳纤维丝制成的复合材料具有优异的抗腐蚀性能及耐大气老化性能,在自然条件下无需维护,该材料的抗腐

蚀和耐老化能力可超过 100 年,是碳纤维复合芯导线长期安全可靠运行的有力保障。

(5) 碳纤维复合芯在常温及高温下具有超高强度,其在运行中可承受全部导线张力,使外部铝股可采用机械强度较低而导电性更佳的金属材料,有效降低线损。碳纤维复合芯导线的铝股如果以软铝替代常规导线的硬铝,则电导率由 61%IACS 提高至 62%IACS;且碳纤维复合芯替代钢芯,复合芯内不会产生涡流损耗。因此,在相同铝股截面、相同传输功率条件下,软铝与复合芯的采用可使线损有效降低。

2. 碳纤维复合芯导线存在问题

软铝与碳纤维复合芯的结合可使线损有效降低,但由于软铝的机械强度等指标偏低,与复合芯构成导线后易受损伤,在施工及运行中存在一定不利因素,如检修导线时使用出线飞车易导致铝股变形、损伤。此外,还存在由于国外技术的楔接式配套金具尺寸(包括直径、长度)过大导致碳纤维复合芯导线不能实施带接续金具的连续张力放线,碳纤维复合芯导线价格相对较高等问题,这些问题近年来在国家电网公司自主研发碳纤维复合芯导线项目中已经或正在逐步得到完善、解决。

1.3 自主研发碳纤维复合芯导线的背景

1.3.1 电网建设与升级改造的需要

1.3.1.1 提高电网输送能力的需要

中国土地资源有限,输电走廊的选择受到制约,提高单位走廊传输功率的需求日益迫切。加快各级电网升级改造,提高电网输送能力与效益,节约资源、降低消耗已列为国家电网公司电网建设重点工作目标之一。

围绕负荷中心的中短距离线路以及部分 $N-1$ 方式运行的长距离线路[如增加串补设备的原 500kV 大房线(大同一房山)],输电能力取决于导线的热稳定性能。提高上述线路输送能力的方式主要分为以下两类。

第一类是对线路本体不做改造,而通过以下两种方式提高输电能力:

- ① 提高导线允许运行温度,普通钢芯铝绞线的允许运行温度由 70℃ 提高至 80~90℃。
- ② 导线允许运行温度不变,但在线路上安装导线温度、环境温度

等参数的在线监测装置，实时获取线路运行数据，核算导线载流量，对线路输送功率实行动态管理，以挖掘线路输电潜力。

第二类是通过直接更换大容量导线（如大截面钢芯铝绞线、钢芯耐热铝合金绞线等），提高线路输送能力。

比较而言，第二类方式效果更加显著，但因大容量导线（如大截面钢芯铝绞线）通常质量增大，在更换导线的同时需要更换杆塔或加强杆塔；对于钢芯耐热铝合金绞线，还须考虑导线高温运行时的弛度增大、对地（树木、建筑）距离减小等问题。因此，输电线路输送能力的提高需要碳纤维复合芯铝绞线等综合性能更加优越的新型导线。

1.3.1.2 提高电网安全运行水平的需要

近年来，随着大风、覆冰等极端恶劣气候的频繁出现，导线风偏、舞动引发的线路故障也频繁发生，严重影响电网安全稳定运行，如 2007 年 2 月底至 3 月初，华北地区出现罕见的大风暴雪恶劣气象条件，导致电网多条 500kV 及以下线路跳闸，造成多个电厂停机、减出力。2012 年 3 月、11~12 月，华北地区再次出现大风暴雪恶劣气象条件，多条 500kV 重要线路频繁跳闸甚至断线。主要原因是大风、大雪（暴雪）恶劣气象条件伴以微地形、微气象条件引起线路导（地）线覆冰舞动、风偏（含不同期摇摆）、脱冰跳跃等，导致相间、相对地距离改变，同时紧凑型线路由于其自身结构特点，抗风偏、舞动能力相对较低，最终造成相间、相对地放电跳闸和导地线损伤。此外，近年来施工机械、车辆碰线等人为因素也构成线路安全运行的严重隐患。更换质量轻、低弧垂、高强度、耐疲劳的碳纤维复合芯导线在一定程度上可有效抑制上述故障和缺陷，提高电网安全稳定运行裕度。

1.3.1.3 降低电网损耗的需要

高强度复合芯能够承受碳纤维复合芯导线的全部张力，因此碳纤维复合芯导线外层可采用导电性更佳而机械强度适当偏低的铝股（如软铝股）。此外，碳纤维复合芯在运行中没有涡流损耗，这些因素均可有效降低输电损耗。

1.3.2 打破技术和价格垄断的需要

1.3.2.1 碳纤维技术的垄断

碳纤维复合芯铝绞线的核心是含碳量 90%以上的、高强度的聚丙烯腈基

碳纤维，是目前唯一能够在 2000℃ 条件下机械强度不降低的材料，是航空航天与军工必不可少的原料。作为重要军用物资，西方国家对我国国防军工等领域长期实行高性能碳纤维材料的封锁和禁运。世界上高强碳纤维的研究起步于 20 世纪 60 年代，经过 70~80 年代的稳定期，90 年代的飞速发展期，到 21 世纪初期其制备技术和工艺已基本成熟。日本的东丽公司、东邦公司及三菱人造丝公司凭借碳纤维原丝生产和性能的优势，大量生产高性能碳纤维，使日本成为碳纤维大国，质量和生产数量均处于世界领先地位，原丝产量占世界总产量的 78%。英国、美国、法国等少数几个发达国家也是碳纤维的重要生产国。

我国自 20 世纪 60 年代开始进行碳纤维研究，但因投资少，配套工业不完善，国外技术封锁等原因，研究水平远远落后于世界先进国家，飞机、导弹、火箭、航空航天及型号武器中的结构材料用高性能碳纤维基本依赖进口。科技部将 T700 碳纤维的攻关列入“十五”规划，并在“十一五”规划中继续加大支持力度，以期彻底摆脱国外束缚，大力推动国产碳纤维事业的发展。目前，我国碳纤维研发已取得较大突破，在实验室实现了 T700 高性能碳纤维的成功试制，并于 2009 年建成国内第一条干喷湿纺高性能碳纤维原丝工业化生产线，近年来已有多家企业着手高性能碳纤维的工业化生产。

1.3.2.2 碳纤维复合芯导线技术的垄断

国外碳纤维复合芯导线生产技术相对先进的生产厂家有两个，分别是美国 CTC 公司（Composite Technology Corporation）和美国水银电缆公司（Mercury Cable & Energy LLC）。其中美国 CTC 公司研制的碳纤维复合芯导线（型号为 ACCC/TW）的复合芯为单芯形式，复合芯的中心为碳纤维丝增强的环氧树脂芯棒，外层为玻璃纤维与环氧树脂构成的隔离层。

日本最大的钢丝、钢缆制造厂商日本东京制钢株式会社也开始研发碳纤维复合芯，供给其他导线厂商生产碳纤维复合芯导线。其复合芯绞线结构形式与美国的棒材结构不同，为绞线结构。制钢株式会社的资料显示，绞线结构具有弯曲柔软性和拧绞柔软性优于棒状芯的特点，即绞线结构复合芯的柔软性应优于棒状复合芯。此外，由于其是由多股细碳纤维芯绞制而成，所以理论上可以分散外力作用，改善受力状况，增加复合芯的抗疲劳性。而且绞