

电网工程部送电电气专业技术培训专题

专题之十一 特种导线及大截面导线应用研究

2011 年 12 月

批准:

审核:

校核:

编写: 李晨

目 录

1 概述.....	5
2 导线结构与耐热机理.....	9
2.1 碳纤维芯铝（耐热铝合金）导线.....	9
2.2 钢芯耐热铝合金线.....	10
2.3 特强钢芯软铝绞线.....	10
2.4 耐钢芯耐热铝合金绞线.....	12
3 工程应用情况.....	13
3.1 碳纤维芯导线.....	13
3.2 钢芯耐热铝合金线.....	22
3.3 特强钢芯软铝绞线.....	26
3.4 耐钢芯耐热铝合金导线.....	28
4 导线性能综合比较.....	30
4.1 导线特性参数.....	30
4.2 各种导线载流量计算.....	32
4.3 机械特性比较.....	33
4.4 经济比较.....	37
4.5 小结.....	51
5 碳纤维芯导线及其应用.....	52
5.1 碳纤维芯导线.....	52
5.2 国内外生产情况.....	53
5.3 220kV 改造线路应用分析	55
5.4 500kV 输电线路中的应用实例	59
5.5 小结.....	61
6 配套金具情况.....	62
6.1 新型增容导线耐热金具.....	62

6.2 耐张线夹、接续管	64
6.3 耐张线夹补强条	67
6.4 悬垂线夹	68
6.5 防振金具	69
7 施工工艺及注意事项	69
7.1 铝包股钢芯耐热铝合金绞线及钢芯耐热铝合金导线	69
7.2 碳纤维复合芯导线	71
7.3 特强钢芯软铝绞线（低弧垂软铝导线）	74
7.3.1 导线安装	74
7.3.2 安装注意事项	76
8 新型复合材料合成芯导线的应用建议和相关问题	77
8.1 适用范围	77
8.2 设计原则	78
8.3 各类型新型复合材料合成芯导线选用特点	78
8.4 注意的问题	79
9 结论	81
9.1 技术特点	81
9.2 综合经济比较	82
9.3 碳纤维复合材料芯软铝导线	85
9.4 配套金具及施工问题	86
9.5 小结	86

1 概述

随着国民经济的飞速发展，我国电力工业有了突飞猛进的进步。根据“西电东送，南北互供、全国联网”的战略部署，远距离，特高压，大容量输电势在必行，这对架空输电线路的导线提出更高的要求。提高输送容量，主要靠两个途径解决：一是提高输电电压，二是提高输送电流。在电压一定的前提下，提高输电电流密度，即提高导线单位面积的电流量就显得十分重要，目前我国输电线路使用的导线基本上还是传统的钢芯铝绞线（ACSR），为了输送更大容量，研究新型增容导线在工程中的应用是很有必要的。

我国土地资源紧张，电网密集，在城市化进程中，线路走廊资源将越发匮乏。如果能采用新型复合材料合成芯导线传输电能，则可以通过提高运行温度增大导线载流量，提高单位走廊输电能力，同时减少占地，环保节能，实现资源的有效利用。由于复合材料合成芯导线与输送等容量的钢芯铝绞线相比，外径更小，单重更轻，弧垂更小，因此可以节省塔材和基础的投资。另外，推广复合材料合成芯导线的应用，有利于提升我国导线研发、制造水平，推动产业结构优化升级。

在电力工业发展史上传统的钢芯铝绞线作为输电线路输送电能的主要载体，占据统治地位的历史已有一个多世纪。据国际大电网会议（CIGRE）2004年对世界上15个国家共计71个电力公司的统计，目前输电线路所使用的导线中，大部分仍然为钢芯铝绞线，约占总数的82%。随着对电力需求的增长和线路扩容的需要，在许多场合，若仍旧采用普通的钢芯铝绞线往往在技术上难以满足要求，或

者在经济上不可行，对普通的钢芯铝绞线进行改造势在必行。通过上世纪后半叶各国科技工作者长期的研究开发，并借助于材料科学技术的不断进步，各种新型复合材料合成芯导线应运而生。

新型复合材料合成芯导线以下简称“增容导线”，是在架空输电线上使用的特种导线，它是在具有相等导体截面积的情况下，相对于传统的钢芯铝绞线 ACSR (Aluminium Conduotor Steel Reinforced) 能输送更多电能的若干种类导线的总称。“增容导线”目前尚不能算作为专有术语，而是一种习惯称谓。行业内也有将其俗称为“倍容量导线”或“高温导线”的。

长期以来，架空输电线路导线主要采用钢芯铝绞线以及相关产品。电力工业的飞速发展对架空输电线路导线提出了更高的要求，促使各国科技人员研究开发各种新型导线。高分子有机复合材料是国际上于上世纪 70 年代后期开发出来的新型材料，比重约为钢的 $1/4$ ，强度为钢的 2 倍，硬度为钢的 5 倍。由于它具有重量轻、强度大、热稳定性好、绝缘性能好、耐腐蚀等优点，很快就应用到建材、化工、宇航、汽车、体育用品(滑雪板、冲浪板)、游艇、医疗器材、家庭用品、家具等各个领域。随着材料科学的不断进步，在上世纪 90 年代，人们尝试用有机复合材料代替金属材料来制作导线的芯材，并开发出几种复合材料合成芯导线。这种新型复合材料合成芯导线充分发挥了有机复合材料的特长，与现有的各种架空导线相比，具有重量轻、强度大、耐高温、耐腐蚀、线损低、弛度低等优点。

增容导线大都为组合绞线，即由导线基体和承力芯二部分组成。

架空导线的结构组合有:圆线同心绞架空导线和型线同心绞架空导线二种。还有间隙型结构。

导电基体主要为硬铝线、软铝线及各种性能的耐热铝合金线,其主要特性如下表:

表 1-1 硬铝线、软铝线与各种耐热铝合金线的主要特性

类别	导电率 (%IACS)	抗拉强度 (MPa)	延伸率(%)	弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	运行温度 ($^{\circ}\text{C}$)
硬铝线(LY9)	≥61	160~200	1.2~2.0	55	23.0	70~90
软铝线(LR)	≥63	60~80	20~30	55	23.0	长期 150 $^{\circ}\text{C}$, 短时 200 $^{\circ}\text{C}$
超耐热铝合金线(NRLH3)	≥60	160~200	1.2~2.0	55	23.0	长期 210 $^{\circ}\text{C}$, 短时 240 $^{\circ}\text{C}$
耐热铝合金线(NRLH1)	≥60	160~200	1.2~2.0	55	23.0	长期 150 $^{\circ}\text{C}$, 短时 180 $^{\circ}\text{C}$

承力芯有各种镀锌钢线,铝包钢线,殷钢线,碳纤维加强线和聚合物复合的加强线(如铝基陶瓷纤维加强线)等.其性能如下:

表 1-2 高强度钢线的主要特性

类别	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	耐腐蚀性	密度 (g/cm ³)
普通镀锌钢线(St)	1226~1324	190	11.5	一般	7.8
特高强度镀锌钢线(EST)	1700~1770	190	11.5	一般	7.8
特高强度铝包钢线(LB)	1500~1770	170(LB14)	12(LB14)	良好	约 7.1
殷钢线	1000~1100	162	2.8	一般	7.1
铝包殷钢线(LBY)	850~1100	170(LBY10) 155(LBY14)	3.7	良好	约 6.5
铝基陶瓷纤维芯	1275	216	6.3	良好	3.3
碳纤维复合芯	2597	110	1.6	良好	1.95

各种新型增容导线组合情况见下表。

表 1-3 增容导线用的导体加强材料及其组合导线

导线线种	代号	导电率%IA CS	抗拉强度 Mpa	允许强度		加强材料线种	增容组合导线	
				连续	短时		名称	代号
电工铝园线或电工铝型线耐热铝合金	HAl	61	158-175	90	120	热镀锌钢线（镀纯锌或锌-5%铝-稀土的GALFAN合金）	1. 钢芯软（退火）铝绞线	ACSS
	SAl	63	59-76	200	250		2. 钢芯软铝型线	ACSS/TW
	58TA1	58	158.8-175	150	180	碳纤维和聚合物复合的加强线	3. 碳纤维和聚合物复合芯耐热铝合金绞线	ACFR TACFR
	60TA1	60	158.8-175	150	180	热镀锌钢线	4. 钢芯耐热铝合金绞线	SB 或 60TACSR
						铝包钢线	5. 铝包钢芯耐热铝合金线	SB 或 60TACSR TACSR/ACS
超耐热铝合金	58UTA1	58	158.8-175			热镀锌钢线	6. 钢芯超耐热铝合金绞线	SB 或 60TACSR ZTACSR, XTACS R
	XTA1	58	158.8-175	230	290			
		60	158.8-175	210	240			
	60UTA1	60	158.8-175					
	ZTA1	60	158.8-175	210	310	热镀 GALFAN 合金高强度殷钢 (INVAR-Fe-36%Ni) 线或铝包殷钢线	7. 殷钢芯低弧垂超耐热铝合金绞线	XT 或 ZTACSR
							8. 碳纤维芯超耐热铝合金线	ZTACFR
特别耐热铝合金		58	158.8-175	230	310			
高强度耐热铝合金	KTA1	55	225.0-252	150	180	热镀锌钢线	9. 钢芯高强度耐热铝合金绞线	KTACSR
		50	274.4	150	180	铝包钢线	10. 铝包钢芯高强度耐热铝合金绞线	KTACSR/ACS
		50	235.2	150	180			

随着电力需求的增长和材料科学技术的不断进步，各种新型增容导线应运而生。增容导线包括耐热铝合金导线、高强钢芯软铝绞线、复合材料合成芯导线等种类。综合性能、价格和国内外使用情况，本报告重点研究以下四种增容导线：

1) 碳纤维芯铝（耐热铝合金）导线

- 2) 加强钢芯耐热铝合金线
- 3) 特强钢芯软铝绞线
- 4) 殷钢（铝包殷钢）芯耐热铝合金导线

2 导线结构与耐热机理

2.1 碳纤维芯铝（耐热铝合金）导线

碳纤维芯导线为新型复合材料合成芯导线，它的芯线是由碳纤维中心层和玻璃纤维层包覆制成的单根芯棒，外层与邻外层铝线股可根据不同要求制成型线或圆线，材质可为耐热铝合金或软铝合金等。由于芯棒的外表面为绝缘体的玻璃纤维层，芯棒与铝股之间不存在接触电位差，保护铝导线免受电腐蚀。这种碳纤维芯导线已完成了各种型式试验，包括机械全性能、应力—应变曲线、蠕变、线膨胀系数、载流量、自阻尼和高温特性等，表明该导线具有良好的机械和电气特性，特别是验证了高温条件下的低弛度特性。与常规的钢芯铝绞线相比，在相同的外径时，碳纤维芯导线外层允许缠绕超过 29% 的导电铝型线；在相同铝截面时，成品重量与常规的钢芯铝绞线相比轻 10–15%；梯形铝最里层运行的温度可达 180°C，长期连续运行温度可达 165°C；碳纤维芯导线导电部分软型铝的电导率达到 63 (%IACS) 以上。



图 2-1 碳纤维芯型线图片

2.2 钢芯耐热铝合金线

钢芯耐热铝合金绞线(TACSR)，是在传统的钢芯铝绞线中用耐热铝合金线(TA1)代替普通硬铝线(HA1)而产生的，使其能在较高的温度下保持正常的工作机械强度，它的连续允许工作温度及短时容许工作温度比常规的钢芯铝绞线(ACSR)要提高 60℃以上，分别为 150℃及 180℃，大大提高了输电能力。钢芯耐热铝合金绞线中的耐热铝合金线有 58% 导电率耐热铝合金线(58TA1，一般简称为 TA1)和 60% 导电率耐热铝合金线(60TA1)2 种，其导电率分别为 58%IACS 和 60%IACS。相应的导线分别称为 50TACSR 和 60TACSR 钢芯耐热铝合金绞线。

2.3 特强钢芯软铝绞线

特强钢芯软铝导线是采用特高强度钢芯(EST)和 1350-0 全退火软铝线同心绞合而成的一种特种架空输电导线，其结构如图 2-2。钢芯铝绞线的铝股线是硬铝，而特强钢芯软铝绞线是 63%IACS 导电率的全退火软铝线，有显著的节能、增容效果，不仅可以增容 50%以上，

而且在高温下弧垂下降更小，比普通导线具有低弧垂效果。

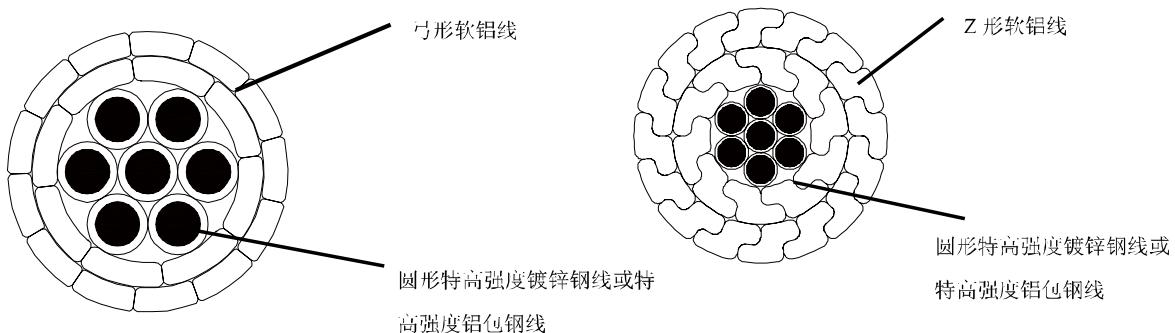


图 2-2 特强钢芯软铝绞线结构

软铝导线使用的软铝线强度为 60–80MPa，需要使用特强钢芯来提高导线抗拉强度。导线长期运行温度可达 150℃，是常规导线长期运行温度 70℃时载流量的 1.5 倍以上，具有显著增容特性。软铝线导电率为 63%IACS，超过硬铝线 61%IACS 导电率约 2%，相同截面相同温度提高输电能力，可节能 2%。在输送相同电流的条件下，减少输电线损约 3.0%，具有显著节能降耗特性。

低弧垂特性：通过创新的工艺实现铝部应力转移，高温时软铝线几乎不受力，运行张力大部分由钢芯承受，其高温弧垂受铝股长期蠕变的影响较小，显著降低高温运行时导线线膨胀系数，实现增容 1.5 倍以上，高温时软铝导线的弧垂与相同截面钢芯铝绞线 70℃时弧垂几乎相当。

优良机械特性：与圆线导线相同铝截面积，直径将降低 10–15%，可降低风冰荷载；与圆线导线相同直径，铝截面将增大 20–25%，可提高载流能力；导线表面圆滑平整，绞线间隙极小，减少风阻，自阻尼性能和耐振性能较高，不易粘积冰雪，能降低电晕和无线电干扰的

水平。

2.4 殷钢芯耐热铝合金绞线

殷钢芯耐热铝合金绞线的钢芯采用镀锌殷钢芯或铝包殷钢芯，殷钢芯采用铁镍（镍约占 36%~40%）合金材料制成。由于这种材料的线膨胀系数比普通钢芯的线膨胀系数低许多，具有长度基本上不随温度变化（Invariable）的特点，因此被称为“殷钢”。普通钢芯的线膨胀系数为 $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，铝线的线膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而殷钢芯的线膨胀系数仅为 $3.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，是普通钢芯的 $1/3$ ，是铝线的 $1/6$ 。殷钢芯耐热铝合金绞线的迁移点温度约为 $80\sim100^{\circ}\text{C}$ ，在工作温度位于迁移点温度以下时，殷钢芯耐热铝合金绞线的线膨胀系数约为 $18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；当工作温度位于迁移点温度以上时，由于耐热铝合金线和殷钢芯的线膨胀系数的差异，导线的机械荷载全部转移到殷钢芯上，耐热铝合金线不再承受导线的张力，此时殷钢芯的线膨胀系数即为殷钢芯耐热铝合金绞线的线膨胀系数 $3.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，因此，殷钢芯耐热铝合金绞线在较高的温度状态下工作时，其弛度的增加量很小，是一种低弛度导线。



图 2-3 殷钢芯耐热铝合金绞线图片

3 工程应用情况

3.1 碳纤维芯导线

碳纤维芯导线已在日本东北电力公司宫城支店的 66kV 输电线上试用。美国从 2004 年 8 月开始在德克萨斯州 3.2km 长的 230kV 输电线路上安装了碳纤维芯导线 (ACCC/TW)；以后又在密歇根州荷兰镇 1.6km 共 3 档的 12.74kV 配电线路上置换安装了 ACCC/TW 导线；2005 年 11 月在亚利桑那州凤凰城和太平洋电力公司盐湖城的 230kV 线路等输电线上安装了 ACCC/TW 导线；2006 年在西部地区圣安东尼奥和加利福尼亚州的 230kV 线路等多条输电线上安装了 ACCC/TW 导线；在堪萨斯州的 Kingman 市计划架设一条 34km 长的 34.5kV 输电线路，将全部使用 ACCC/TW 导线。此外，近期美国还有多条改造或新建线路计划使用 ACCC/TW 导线，其中有若干条 230kV 的线路。法国也在进行 ACCC 导线的应用试验，计划近期在输配电线路上的改造中使用

ACCC/TW 导线。

在我国，2006 年 7 月，龙岩电业局完成了 220kV 曹园线导线更换为碳纤维复合芯铝绞线改造工程，改造线路长度 5.2km，采用了美国生产的 ACCC/TW 导线，总投资 550 万元，是我国第一条采用碳纤维复合芯导线的 220kV 输电线路。

2009 年 1 月，我国远东复合技术有限公司生产的碳纤维复合导线在山东泰安 220kV 天园线、园汶线改造工程挂网运行，这是山东地区第一条采用碳纤维复合芯导线的输电线路。

2009 年 3 月，220 千伏武银乙线、220 千伏银花线双回路银川变出线段约 6km 导线采用碳纤维复合芯导线进行增容改造的工作顺利完成并通过验收，改造后的导线输电能力比原先提高近 2 倍，此次改造也是西北地区碳纤维复合芯导线的首次应用。

2009 年上半年国内建成投运的华北地区万泉-顺义 500kV III 回送电线路工程有 1.5km 线路采用碳纤维导线，这是国内首条应用碳纤维导线的 500kV 输电线路工程。

自 2006 年 6 月第一条碳纤维复合芯软铝导线开始在福建省 220kV 线路工程中使用算起，至 2010 年 9 月已有近百条使用该种导线的线路（电站）投运，其中主要以增容改造或扩建为主，单线总长度为 2563km。华北电网公司碳纤维导线项目成功自主研发以来，产品已成功应用于多条输电线路，另据华北电力科学研究院有限公司介绍，其研制的碳纤维复合芯耐热铝合金绞线应用在十来条线路改造上，单线总长度为 84.5km.

综上所述，可见具备研制碳纤维复合材料芯导线能力的只有美国、日本和中国；碳纤维复合材料芯导线在国外应用的线路数量和单线公里数都远少于在中国的应用数量。

表 3-1 碳纤维复合芯软铝导线国内运行使用情况表

地区	工程名称	工程业主	安装地点	导线型号规格	导线数量(米)
北京	220kV 邵府-翟各庄一回线路	华北电网有限公司	廊坊	ACCC/LH-500/50	30440
	500kV 万顺线	华北电网有限公司	北京	ACCC/LH-300/50	15000
	通惠(八代线)220kV送电工程	北京市电力公司	北京	JLRX/T 413/52	21000
江苏	110kV 孟村-陆区变线路工程	无锡电力公司	无锡	JLRX/T 218/28	13000
	110kV 扬名-红旗线增容改造工程	无锡电力公司	无锡	JLRX/T-310/40	24350
	220kV 无锡至梁溪线路改造工程	无锡电力公司	无锡	JLRX/T 413/52	12900
	110kV 常州常滆线路改造工程	常州供电公司	常州	JLRX/T 218/28	16000
	220kV 南京莫双线改造工程	南京供电公司	南京	JLRX/T 413/52	14300
	220kV 南通天刘天秀线改造工程	南通送变电公司	南通	JLRX/T 413/52	47746
	220kV 邵场-梨园 I 线改造工程	徐州供电公司	徐州	JLRX/T 413/52	49110
	220kV 芙季线工程	江阴供电局	江阴	JLRX/T 361/47	3180
	220kV 谦浦-谦泰线路改造工程	镇江电力局	镇江	JLRX/T 413/52	900
	新沂市 110kV 姚恒送点线路	新沂供电公司	新沂	JLRX/T 310/40	36000
	徐州 110kV 中能硅业送电线路工程	硅业集团	徐州	JLRX/T 310/40	1750
	常州 110kV 岱西线改造工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 218/28	8091
	常州 110kV 郑潞改造工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 218/28	10585
	镇江 110kV 华阳-福地线	镇江电力公司	句容	JLRX/T 218/28	14000
	110kV 焦山变扩建工程	徐州电力公司	徐州	JLRX/T 218/28	44000
	110kV 遥常线改线工程	常州供电公司	常州	JLRX/T 218/28	9530

	220kV 徐潘 2631 工程	徐州供电公司	徐州	JLRX/T 413/52	800
	110kV 沙焦线二线改造工程	徐州供电公司	徐州	JLRX/T 218/28	39050
	35kV 铝箔厂进线工程	常熟电力公司	常熟	JLRX/T 218/28	13420
	苏州 110kV 金寒线路改造工程	苏州电力公司	苏州	JLRX/T 310/40	18800
	220kV 蜀岗~蒋王线路改造工程	扬州电力公司	扬州	JLRX/T 413/52	50198
	110kV 漏阳线增容工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 310/40	12530
	110kV 遥洛线增容工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 185/28	13020
	110kV 遥坂线增容工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 185/28	6600
	111kV 马遥线增容工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 413/52	23310
	220kV 盐城南庄变改造工程	盐城电力公司	盐城	JLRX/T 413/52	4000
	220kV 水北变-溧阳变改造工程	常州电力公司	常州	JLRX/T 413/52	101760
	220kV 东溧线、殷溧线改造工程	南京供电公司	南京	JLRX/T 619/60	25600
	金陵分公司 110kV 线路改造工程	中石油金陵公司	南京	JLRX/T 310/40	19000
	盐城东台 20kV 正祥改造工程	东台供电公司	东台	JLRX/T 218/28	10710
	35kV 铝箔厂进线工程二期	常熟电力公司	常熟	JLRX/T 218/28	780
	220kV 苏州东-吴淞变工程	苏州电力公司	苏州	JLRX/T 310/40	1500
	220KV 东科殷溧线	南京华恒输变电有限公司	南京	ACCC/LH-630/50	13722
	淮安 220kV 朱桥变间隔扩建(淮阴电厂 2 出线)及母线改造工程	江苏发电有限公司	淮阴	ACCC/LH-400/50	4500
辽宁	220kV 辽阳前草线	辽阳供电公司	辽阳	JLRX/T 413/52	13041
	220kV 盘兴线工程	盘锦供电公司	盘锦	JLRX/T 361/47	48690
	220kV 清虎丙线沈阳工程	沈阳供电公司	沈阳	JLRX/T 310/40	63015

	220kV 辽元 1#线工程	抚顺供电局	抚顺	JLRX/T 361/47	48455
福建	220kV 甘棠-白花线路改造工程	宁德电业局	宁德	JLRX/T 413/52	12000
	220kV 甘棠-白花线路改造工程	宁德电业局	宁德	JLRX/T 310/40	18760
	220kV 古田-杨真线路改造工程	福建省电力公司	南平	JLRX/T 517/71	11720
	220kV 角李 I 回线路增容工程	厦门电力公司	厦门	JLRX/T 413/52	17300
	110kV 兰田-烟亭线路改造工程	福州电力公司	永安	JLRX/T 310/40	22260
	甘棠-霞浦 220kV 线路跨江工程	福建电力公司	宁德	JLRX/T 517/71	5040
	220kV 园田塘-曹溪线路改造工程	福建电力公司	龙岩	JLRX/T 517/71	16140
	220kV 甘棠-白花线路二期改造工程	宁德电业局	宁德	JLRX/T 413/52	215000
浙江	嘉善变改工程	嘉兴电力局	嘉兴	JLRX/T 413/52	1800
	嘉善变改工程	嘉兴电力局	嘉兴	JLRX/T 619/60	200
	220kV 河慈、河溪线改造工程	宁波电业公司	宁波	JLRX/T 517/71	116742
	湖州莫梁变电所 1#主变更换工程	泰仑电力公司	湖州	JLRX/T 361/47	360
	湖州莫梁变电所 1#主变更换工程	泰仑电力公司	湖州	JLRX/T 413/52	250
	220kV 汾嘉-汾善线路改造工程	嘉兴电力局	嘉兴	JLRX/T 413/52	73767
	嘉兴市 220kV 瓦山变改工程	全富达电力公司	嘉兴	JLRX/T 619/60	1810
	110kV 百桃-桐乡线路改造工程	巨石集团	嘉兴	JLRX/T 310/40	19700
	湖州莫梁变电所 1#主变更换工程	湖州供电公司	湖州	JLRX/T 310/40	1300
	湖州莫梁变电所 1#主变更换工程	湖州供电公司	湖州	JLRX/T 517/71	600
	220kV 龙泉-龙华改造线路工程	金华电业局	金华	JLRX/T 517/71	6750

	220kV 天湖—崇贤输电线路工程	杭州电力公司	杭州	JLRX/T 413/52	30500
	220kV 苍岩-嵊东双回改造工程	宁波供电公司	嵊州	JLRX/T 517/71	9300
	台州发电厂 220kV 电厂联络工程	浙江台州发电厂	台州	JLRX/T 517/71	7800
上海	220kV 金都变~闵行电厂吴泾工程	上海市电力公司	闵行	JLRX/T 517/71	39600
	220kV 金都变~闵行电厂金吴工程	上海市电力公司	闵行	JLRX/T 517/71	99900
	上海 220kV 蕴浏线增容改造工程	上海电力公司	上海市	JLRX/T 517/71	14410
天津	220kV 刘安庄输电工程	天津市电力公司	天津市	JLRX/T 218/28	144706
湖南	220kV 衡阳-麻塘双回线路工程	电网建设分公司	衡阳	JLRX/T 517/71	18958
	万溶江-吉凤变 110kV 送电工程	湘西电业局	万吉	JLRX/T 310/40	6505
	220kV 永州-曲河送电线路工程	湖南电力公司	永州	JLRX/T 517/71	8670
	220kV 徉清 I 线、徬沙 I 线龙门架横跨改造	湖南汀中输变电建设公司	汀中	ACCC/LH-500/50	400
安徽	220kV 洛燕线 2778 线路大修工程	广源电网公司	蚌埠	JLRX/T 517/71	32700
	220kV 永秋 2783/2790 线改造工程	合肥供电局	合肥	JLRX/T 413/52	19500
	220kV 洛振线改造工程	合肥供电局	合肥	JLRX/T 413/52	230000
内蒙	220kV 包头一电厂 220kV 线路工程	包头电力局	包头	JLRX/T 218/28	30372
	西水创业 10kV 送电线路	乌海电力公司	乌海市	JLRX/T 218/28	3327
	哈图乌素变电站 10kV 母线工程	乌海电力公司	乌海市	JLRX/T 361/47	1120
江西	220kV 乐档 II 回改造工程	赣东北电力公司	乐平	JLRX/T 413/52	18483
黑龙江	110kV 新南线改造工程	大庆电力公司	大庆	JLRX/T 218/28	1800
	大庆 110kV 宋芳屯变电所	大庆电力公司	大庆	JLRX/T 218/28	2500

	佳木斯电厂 110kV 变电所改造工程	火电第一公司	佳木斯	JLRX/T 413/52	1000
山东	泰安 220kV 天园线路	泰安电力公司	泰安	JLRX/T 413/52	7416
	日照 110kV 港华线双回改造工程	日照电力公司	日照	JLRX/T 310/40	18981
	莱州 35kV 土沙线送电线路工程	莱州西海公司	莱州	JLRX/T 150/28	27500
	35kV 州刘线输电线路工程	莒县供电公司	莒县	JLRX/T 218/28	20001
新疆	220kV 奎屯变增容扩建工程	新疆电力公司	奎屯	JLRX/T 619/60	1150
	新疆伊宁河川 110kV 变电站	伊河建管局	伊宁	JLRX/T 361/47	1000
	110kV 玛一南 I 、 II 回换线工程	昌吉吉电业局	昌吉	JLRX/T 240/28	35536
宁夏	银川市 220kV 银武、银花线路工程	银川供电公司	银川	JLRX/T 361/47	34900
湖北	220kV 葛洲坝-白家冲 I 、 II 回工程	鄂能物资公司	宜昌	JLRX/T 310/40	119706
	220kV 葛洲坝-白家冲 I 回工程	宜昌供电公司	宜昌	JLRX/T 310/40	1680
	220kV 鄂州电厂~武东变输电线路	鄂能物资公司	武汉	JLRX/T 540/47	156000
	鄂州二期-凤凰山线路工程	鄂能物资公司	武汉	JLRX/T 540/47	12000
广东	220kV 西乡变电站	深圳供电局	深圳	JLRX/T 619/60	1300
	220kV 韶朗线工程	韶关供电局	韶关	JLRX/T 218/28	16060
河南	220kV 北卫 I 、 II 回增容改造工程	新乡供电公司	新乡	JLRX/T 218/28	27760
广西	广西 110kV 社南线改造工程	贵港电力公司	贵港	JLRX/T 185/28	45000
重庆	220kV 巴南-金家岩双回送电线路	重庆电力公司	重庆	JLRX/T 361/47	6780
四川	110kV 攀方 1147 线路改造工程	四川攀钢	攀钢	JLRX/T218/28	3600

	110kV 攀钢 1108 线路改造工程	四川攀钢	攀钢	JLRX/T 310/40	3300
陕西	陕西 330kV 碇石变 110kV 送出工程	陕西电力公司	宝鸡	JLRX/T 361/47	27701
青海	330kV 积石峡变电站 I 、 II 回工程	西宁电力公司	西宁	JLRX/T 530/60	1980
河北	220kV 西柏坡—平山双回送电线路	石家庄电力公司	西柏坡	JLRX/T 600/71	85600
贵州	贵州金阳—赵斯 220kV 线路工程	贵州电力公司	贵阳	JLRX/T 480/52	75160
新疆	220kV 红满线 46#-老满城变更换倍容量导线工程	乌鲁木齐电业局	乌鲁木齐	ACCC/LH-350/35	53853

3.2 钢芯耐热铝合金线

由于耐热铝合金导线能比同样规格的普通钢芯铝绞线输送更多的电能，在它问世后不久即受到人们的关注，并随着性能的不断提高和品种的不断扩大，数十年来它的应用得到了很大的发展。1990 年日本的 500kV 输电线路的输电导线已经全部使用耐热铝合金导线。1997 年在日本仙台市召开的国际大电网会议(CIGRE SC22 1997SENDAI MEETING) 上，日本专家称：随着近年来电力需要的增大，使用大容量导线的必要性也越来越大，日本已经大量使用钢芯 60% 导电率耐热铝合金绞线(60TACSR) 以代替普通钢芯铝绞线(ACSR)，现在的使用量已经达到全国输电线路总长的 70%。

美国、加拿大、法国在输电线上使用耐热铝合金导线也有相当的数量，近 20 年来，东南亚地区耐热铝合金导线的使用量也有不小的增

在我国，耐热铝合金导线最早用于输电线路扩容是在 1995 年，由武汉市供电局设计院承担对该市 110 kV 英栖线路共 4 km 的扩容改造设计，采用国产钢芯 58% 导电率耐热铝合金导线(NRLH58GJ-240/30) 更换旧导线。

2001 年，深圳供电规划设计院承担该市南山电厂、月亮湾电厂送出工程的 I 回、II 回 110 kV 线路扩容改造设计，线路全长 8km，采用同规格的国产钢芯 58% 导电率耐热铝合金导线(NRLH58GJ-240/30) 更换旧导线。同年，山东 220 kV 石平线路扩容改造，全长 7.29 km，用耐热铝合金导线(NRLH58GJ-240/30) 更换旧导线(LGJQ-400/50)。

类似的工程还有广东电力局的广东—佛山线路工程、万板线工程、银川供电局的水石线路工程、临汾供电局的桥北—临钢线路工程、宁夏电力局的青铜峡—平吉堡线路工程、苏州供电局的车松

线路工程等。

武汉电缆厂是国内最早生产用于架空线路的耐热铝合金导线的厂家。目前已有多家电缆厂生产耐热铝合金导线，如青岛汉河电缆厂、浙江富春江集团杭州电缆厂和湖北红旗电缆厂等。从1995至2004年，仅武汉电缆厂有3000多吨耐热铝合金导线用于各类线路建设和改造工程中，导线截面从70mm²到630mm²。武汉电缆厂生产的NRLH58GJ-630导线已在内蒙古220kV横盘锦工程、广东深南电工程中应用。2004年，上海蒲新送变电的中双港工程使用了363t NRLH58GJ-630/55导线。2007~2008年，北京电力迎“奥运”、消除电力隐患的工程中使用了几千吨的60%IACS耐热合金绞线。

表 3-2 钢芯耐热铝合金线部分使用情况表

序号	项目单位	工程名称	设备/材料名称	电压等级	规格型号	供货 数量 (吨)
1	广西安宁供电局	220KV 林五线技术改造工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH58GJ-450/40	88.054
2	福建亿力电力物资有限公司	林中-涵江 220kV 开断进上迳变工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH58GJ-300/25	121.838
3	上海浦新送变电物资有限公司	220kV 徐行送变电线路工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH58GJ-300/25	302
4	上海电力高压公司	220kV 电力线路	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60GJ-400/35	210
5	北京电力公司	北通 220kV、蓟北 220kV、湖黄 110kV、君黄线路改造工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60GJ-400/35	707
6	浙江省送变电工程公司	500KV 嘉善~王容增容线路工程	耐热铝合金导线	500KV	JNRLH60/G2A-400/35	100.4
7	云南电网公司红河供电局	110KV 云龙变-建水变电线路改造工程	耐热铝合金导线	110KV	NRLH58GJ-150/20	82.52
8	江苏电力公司	220KV 上华 I 线技改工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60GJ-400/35	124.3
9	北京电力公司	南塑 110KV、110KV 水口二线路、怀密 110KV 线路改造工程	耐热铝合金导线	110KV	NRLH60GJ-400/35	205.46
10	昆明龙翔电器成套设备有限公司	无	耐热铝合金导线	220KV	NRLH58GJ-240/30	94.332
11	山东省电力公司	220KV 安东~岚山送电工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB14-400/35	199
12	山东鲁能物资集团有限公司	220KV 安东至岚山送电工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB14-400/35	183.24
13	内蒙古电力公司	国电东胜电厂至北郊变双回 220KV 送电线路工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60/LB20-300/25	113.96
14	湖北鄂能物资有限责任公司	220KV 兴潜线路改造工	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60GJ-400/35	101.84

15	云南电网公司建设分公司	500KV 厂口 220KV 进出线路工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/G2A-400/50	126.932
16	河南第二火电建设公司	豫联电厂接入峡窝 220KV 输电工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60GJ-300/40	265.6
17	华北电网有限公司	南魏 110KV 线路改造工程	耐热铝合金导线	110KV	NRLH60GJ-400/35	114.74
18	洛阳市电力物资供销公司	龙朝线接安东变 220KV 线路工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB1A-240/40	89.4
19	上海高雅电力物资有限公司	220KV 南桥~闵行线路增容工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60/LB14-630/45	168.64
20	湖南省送变电建设公司	豹南山至上渡 220KV 线路改建工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60/LB14-400/50	92.37
21	福建亿力电力物资有限公司	220kV 厦门 LNG--翔安变线路工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB1A-630/45	343
22	江苏省电力物资有限公司	220kV2991、2992 车宝线更换备容量导线工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH58/G3A-400/35	139.666
23	上海浦新送变电物资有限公司	220kV 航吉变电站进线工程	耐热铝合金导线	220KV	NRLH60/LB1A-630/45	103.6
24	华东电网有限公司	500kV 海宁~乔司 II 回输变电工程	耐热铝合金导线	500KV	NRLH60/G1A-400/35	165.2
25	国家电网公司	向家坝~上海±800kV 特高压直流输电示范工程复龙换流站接地极线路	耐热铝合金导线	±800KV	NRLH60/G1A-500/45	1149.6
26	江苏省电力公司物资采购与配送中心	220kV 谙壁至南风至东岱线路改造工程	耐热铝合金导线	220KV	NAHJGJQ-1440	90.614
27	海南电网公司	罗大线II接入东方电厂 220KV 线路工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB41A-400/50	123.7
28	浙江省电力公司	220kV 绍北(500kV)~临化双回输电线路工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB20A-500/45	130.01
29	上海市电力公司	500kV 南汇变电站 220KV 出线工程	耐热铝合金导线	500KV	NRLH60/LB14-630/45	314.9
30	广西电网公司北海供电局	钦州久隆~冲口 220KV 线路改造工程	耐热铝合金导线	220KV	JNRLH60/LB14-400/50	309.97

3.3 特强钢芯软铝绞线

20世纪80年代，美国和加拿大等北美国家已经在电力线路系统中应用钢芯软铝绞线，是北美地区广泛应用成熟的产品。2007年中天科技开发成功特强钢芯软铝绞线，2008年12月成功通过中国电力企业联合会组织的产品鉴定。由于目前价格和产能因素，该导线在国内的使用案例不多，据现有资料，福建龙岩、江苏无锡等地为线路增容改造使用了特强钢芯软铝导线，使用情况见下表：

表 3-3 特强钢芯软铝绞线国内运行使用情况表

序号	项目单位	工程名称	电压等级(kV)	规格型号	单位	供货数量
1	福建省龙岩电业局	龙岩适中变-新祠变线路改造工程	110	JLRX/EST-250/33	km	21.3
2	江苏省无锡供电公司	望亭电厂技改送出线路工程	220	JLRX/EST-350/55	km	0.6
3	辽宁省鞍山市申普电力安装有限公司	樱桃园变电站扩建工程	220	JLRX/EST-400/50	km	0.72
4	辽宁省鞍山市申普电力安装有限公司	代家沟变电站扩建工程	220	JLRX/EST-400/50	km	6.01
5	福建省闽清县供电有限公司	闽清~梅城Ⅱ回 T 接大梅线 110kV 线路工程	110	JLRX/EST-250/33	km	4.41
6	辽宁省鞍山市申普电力安装有限公司	220kV 海城变工程	220	JLRX/EST-400/50	km	2.36
7	四川广安智丰建设工程有限公司福宁分公司	福建 110kV 湾坞~鼎信线路工程	110	JLRX/EST-300/40	km	21.55
8	河南省电力公司许昌供电公司	许昌春秋 110kV 输变电工程	110	JLRX/EST-250/33	km	24.85
9	邢台兴力集团有限公司	邢台 110kV 天河/石门站—邢钢架空线路切改工程	110	JLRX/EST-240/40	km	45.855
10	四川华兴建设有限公司福建分公司福安项目部	福建 110kV 湾坞~鼎信线路 π 接工程	110	JLRX/EST-300/40	km	45.769

3.4 殷钢芯耐热铝合金导线

殷钢芯导线在国外已有三十几年应用史，但由于价格太高，在国内工程中应用实例较少，仅有福建在增容改造工程中使用过的报道。尽管如此，其特有的高温弧垂特性、抗老化性和超耐热性能已经得到了电力部门的认可。随着国产化的成功，其价格和交货期将具有很大的竞争优势，将为国内电力系统在特殊条件下的线路改造提供一个良好的可选线种。

表 3-4 殷钢芯耐热铝合金导线国内运行使用情况表

序号	项目单位	工程名称	电压等级(kV)	规格型号
1	江苏省南京供电公司	东善桥一大定坊线路改造工程	220	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₄ -350/55
2	江苏省常州供电公司	常州变—清凉变线路改造工程	110	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₄ -150/40
3	江苏省无锡供电公司	无锡石塘湾牵引站配套工程	220	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₄ -630/55
4	江苏省徐州供电公司	东陇海铁路电气化潘家庵更换线路工程	220	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₄ -350/55
5	甘肃省兰州供电公司	张碳二回线路改造工程	110	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₄ -180/30
6	黑龙江绥化电业局	绥化康金变改造工程	110	JLHNR3/LBY ₁₄ -240/30
7	江苏省电力公司物资采购与配送中心	盐城 220KV 陈堡变 1#主变换型工程	220	JLHNR3/LBY ₁₄ -470/40
8	南京华恒输变电有限公司电力器材经营部			ZTACIR/AS-350/57SQ
9	江苏省电力公司物资采购与配送中心	110KV 殷山、殷民线、大殷线吉龙支线迁移改造工程	110	JLHNR ₆₀ /LBY ₁₀ -190/40
10	常州供电公司	110kV 常荡线增容工程	110	JNRLH1/LBY-150/35
11	常州供电公司	110kV 三永线增容工程	110	JNRLH1/LBY-130/25
12	通辽供电公司	220KV 右中变电站扩建工程	220	JNRLH3/LBY-420/45
13	四川省电力公司	绵阳 110kV 仙人桥站 10kV 出线增容改造工程	10	JNRLH3/LBY-80/35

4 导线性能综合比较

本报告按 500kV 单回输电线路对碳纤维芯导线、钢芯耐热铝合金线、特强钢芯软铝绞线和殷钢芯耐热铝合金导线与钢芯铝绞线进行电气、机械及经济方面的综合比较。

4.1 导线特性参数

导线材质和型号列入下表：

表 4.1-1 导线材质和型号

序号	导线型号		导线类型
1	630 截面	LGJ-630/45	钢芯铝绞线
2	300 截面	ACCC/TW-310	碳纤维芯软铝导线
3		JNRLH60/G3A-300/40	钢芯耐热铝合金线
4		TACIR-300/50	铝包殷钢芯耐热铝合金导线
5		JLRX/EST-300/40	特强钢芯软铝绞线
6		ACCC/TW-413	碳纤维芯软铝导线
7	400 截面	JNRLH60/G3A-400/50	钢芯耐热铝合金线
8		TACIR-400/65	铝包殷钢芯耐热铝合金导线
9		JLRX/EST-400/52	特强钢芯软铝绞线
10		ACCC/LH-500	碳纤维芯耐热铝合金导线
11	500 截面	JNRLH60/G3A-500	钢芯耐热铝合金线
12		JLRX/EST-500/65	特强钢芯软铝绞线
13		ACCC/LH-630	碳纤维芯耐热铝合金导线
14	630 截面	JNRLH60/G3A-630	钢芯耐热铝合金线
15		TACIR-630	铝包殷钢芯耐热铝合金导线
16		JLRX/EST-630/80	特强钢芯软铝绞线
17		ACCC/TW-619	碳纤维芯软铝导线
18	800 截面	ACCC/TW-796	碳纤维芯软铝导线

现将各导线的特性参数列入下表。

表 4.1-2 导线特性参数

序号	导线型号		截面 mm ²	直径 mm	破坏张力 N	单位重量 kg/m	直流电阻 Ω/km	弹性系数 MPa	温度系数 10 ⁻⁶ /°C	芯截面 mm ²	芯弹性系数 MPa	芯温度系数 10 ⁻⁶ /°C	外层温度系数 10 ⁻⁶ /°C
1	导线	LGJ-630/45	666.55	33.6	148700	2.06	0.0521	63000	20.9	43.1	190000	11.5	23
2	300 截面	ACCC/TW-310	349	21.78	103130	0.927	0.1015	58000	13.1	39	110000	16	23
3		JNRLH60/G3A-300/40	339	23.94	102600	1.136	0.1099	65000	20.5	38.9	190000	11.5	23
4		TACIR-300/50	348.4	24.26	92500	1.1753	0.1058	69000	16.9	48.8	152000	3.7	23
5		JLRX/EST-300/40	345.07	22.3	81300	1.169	0.1029	70900	19.4	40.67	190000	11.5	23
6		ACCC/TW-413	465	25.14	135140	1.235	0.0749	58000	13.1	52	110000	16	23
7	400 截面	JNRLH60/G3A-400/50	451.5	27.6	136300	1.511	0.0838	65000	20.5	51.82	190000	11.5	23
8		TACIR-400/65	464	28	120600	1.5655	0.078	69000	16.9	65.1	152000	3.7	23
9		JLRX/EST-400/52	454.9	25.6	105000	1.518	0.0764	70500	19.4	52.2	190000	11.5	23
10		ACCC/LH-500	545.29	30	130000	1.44	0.0664	69059	17.29	56.71	180000	20	23
11	500 截面	JNRLH60/G3A-500	531.36	30	129000	1.642	0.0667	65000	20.5	34.36	190000	11.5	23
12		JLRX/EST-500/65	564.3	28.5	131400	1.906	0.0629	70700	19.4	65.4	190000	11.5	23
13		ACCC/LH-630	680.16	33.6	130000	1.82	0.0523	66452	18.25	56.71	180000	20	23
14	630 截面	JNRLH60/G3A-630	666.6	33.6	159900	2.06	0.0529	65000	20.5	43.1	190000	11.5	23
15		TACIR-630	696.2	34.32	151300	2.1699	0.0505	63100	19.2	56.3	152000	3.7	23
16		JLRX/EST-630/80	716.4	32.2	165800	2.417	0.0492	70500	19.4	82.4	190000	11.5	23
17		ACCC/TW-619	679	30.4	172832	1.823	0.0503	58000	13.1	60	110000	16	23
18	800 截面	ACCC/TW-796	857	34.16	182256	2.309	0.0395	58000	13.1	61	110000	16	23

4.2 各种导线载流量计算

载流量计算公式采用摩尔根公式，各种导线的载流量如下：

表 4.2-1 各种导线载流量

序号	规格型号	铝截面面积 (mm ²)	导线外径 (mm)	20℃直流电阻 (Ω/km)	环境温度 15℃, 载流 560A		环境 35℃, 导线温度 150℃		
					导线温度 (℃)	交流电阻 (Ω/km)	导线载流量 (A)	输送容量 (MW)	与 LGJ-63045 输送容量之比
1	LGJ-630/45	623.45	33.6	0.04633	38.9	0.0521	1050(80℃)	3455	100.0%
2	ACCC/TW-310	310	21.78	0.0902	49.2	0.1015	1168	3842	111.2%
3	JNRLH60/G3A-300/40	300.1	23.94	0.0977	50	0.1099	1159	3814	110.4%
4	TACIR-300/50	299.5	24.26	0.0944	49.2	0.1058	1184	3897	112.8%
5	JLRX/EST-300/40	304.4	22.3	0.0917	49.2	0.1029	1169	3846	111.3%
6	ACCC/TW-413	414	25.14	0.0676	43.2	0.0749	1410	4640	134.3%
7	JNRLH60/G3A-400/50	399.7	27.6	0.0736	44.5	0.0838	1369	4506	130.4%
8	TACIR-400/65	398.9	28	0.0708	43.4	0.078	1432	4713	136.4%
9	JLRX/EST-400/52	402.7	25.6	0.0693	43.4	0.0764	1405	4623	133.8%
10	ACCC/LH-500 (耐热铝合金)	488.6	30	0.0601	41.3	0.0664	1582	5207	150.7%
11	JNRLH60/G3A-500	497	30	0.0591	41.3	0.0667	1568	5161	149.3%
12	JLRX/EST-500/65	498.9	28.5	0.056	40.8	0.0629	1585	5215	150.9%
13	ACCC/LH-630 (耐热铝合金)	623.5	33.6	0.0472	38.9	0.0523	1846	6074	175.8%
14	ACCC/TW-619	619	30.4	0.0453	38.6	0.0503	1819	5988	173.3%
15	JNRLH60/G3A-630	623.5	33.6	0.0471	39	0.0529	1821	5993	173.4%

16	TACIR-630	639.9	34.32	0.045	38.7	0.0505	1876	6175	178.7%
17	JLRX/EST-630/80	634	32.2	0.044	38.4	0.0492	1859	6118	177.1%
18	ACCC/TW-796	797	34.16	0.0351	37	0.0395	2131	7012	202.9%

环境温度 15℃下，所有对比导线在载流 560A 时，导线温度均在 50℃以下，未达到各自的拐点温度。但各种导线的电能损耗存在较大差异，电能损耗及经济性的比较在后文中给出。

对比各种导线的载流量，环境温度设定为 35℃，新型增容导线的温度设定为 150℃（LGJ-630/45 为 80℃）。实际上各类新型增容导线的耐热性能有较大差别，它们的极限载流温度有几十摄氏度的差异，但根据目前新型导线的应用情况，宜将各种导线的高温载流能力在 150℃导线温度下进行比较。在对比中可以看到（新型增容导线温度 150℃，LGJ-630/45 导线温度 80℃），300 截面的新型增容导线输送容量可达 LGJ-630/45 的 1.1 倍；500 截面的新型增容导线输送容量可达 LGJ-630/45 的 1.5 倍；630 截面的新型增容导线输送容量可达 LGJ-630/45 的 1.75 倍；800 截面的新型增容导线输送容量可达 LGJ-630/45 的 2 倍。

4.3 机械特性比较

各种导线按平均档距 400m 计算的机械特性见下表：

表 4.3-1 机械性能比较表

序号	导线型号	水平荷载(大风)		垂直荷载(覆冰)		最大张力		50℃弧垂(m) L0=400m	120℃弧垂(m) L0=400m	弧垂差值 (m)	
		N / m	%	N / m	%	kN	%				
1	常规导线	LGJ-630/45	15.28	100	30.27	100	59.48	100	12.99	/	0
2	300mm ² 截面	ACCC/TW-310	10.11	66	17.9	59	41.25	69	/	9.81	3.18
3		JNRLH60/G3A-300/40	11.11	73	20.55	68	41.04	69	/	13.55	-0.56
4		TACIR-300/50	11.26	74	21.03	69	37	62	/	13.31	-0.32
5		JLRX/EST-300/40	10.35	68	20.42	67	32.52	55	/	15.18	-2.19
6	400mm ² 截面	ACCC/TW-413	11.67	76	21.85	72	54.06	91	/	9.93	3.06
7		JNRLH60/G3A-400/50	12.81	84	25.24	83	54.52	92	/	13.22	-0.23
8		TACIR-400/65	12.99	85	25.89	86	48.24	81	/	12.87	0.12
9		JLRX/EST-400/52	11.88	78	24.76	82	42	71	/	14.56	-1.57
10	500mm ² 截面	ACCC/LH-500	13.92	91	25.21	83	52	87	/	12.65	0.34
11		JNRLH60/G3A-500	13.92	91	27.19	90	51.6	87	/	14.47	-1.48
12		JLRX/EST-500/65	13.23	87	29.37	97	52.56	88	/	14.37	-1.38
13	630mm ² 截面	ACCC/LH-630	15.59	102	29.94	99	52	87	/	14.69	-1.7
14		JNRLH60/G3A-630	15.59	102	32.29	107	63.96	108	/	14.19	-1.2
15		TACIR-630	15.93	104	33.57	111	60.52	102	/	14.08	-1.09
16		JLRX/EST-630/80	14.94	98	35.4	117	66.32	111	/	14.42	-1.43
17		ACCC/TW-619	14.11	92	29.08	96	69.13	116	/	10.97	2.02
18	800mm ² 截面	ACCC/TW-796	15.85	104	34.89	115	72.9	123	/	12.49	0.5

从上表可以看出：

(1) 水平荷载方面：

300mm^2 截面新型增容导线的水平荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 66%~74%，其中 ACCC/TW-310 碳纤维芯软铝导线的水平荷载最小，为 LGJ-630/45 水平荷载的 66%；

400mm^2 截面新型增容导线的水平荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 76%~85%，其中 ACCC/TW-413 碳纤维芯软铝导线的水平荷载最小，为 LGJ-630/45 水平荷载的 76%；

500mm^2 截面新型增容导线的水平荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 87%~91%；

600mm^2 截面新型增容导线的水平荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 92%~104%，与 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的水平荷载基本相当；

其他截面(ACCC/TW-796) 碳纤维芯软铝导线的水平荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 104%。

(2) 垂直荷载方面：

300mm^2 截面新型增容导线的垂直荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 59%~69%，其中 ACCC/TW-310 碳纤维芯软铝导线的垂直荷载最小，为 LGJ-630/45 垂直荷载的 59%；

400mm^2 截面新型增容导线的垂直荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 72%~86%，其中 ACCC/TW-413 碳纤维芯软铝导线的垂直荷载最小，为 LGJ-630/45 垂直荷载的 72%；

500mm² 截面新型增容导线的垂直荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 83%~97%;

600mm² 截面新型增容导线的垂直荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的 96%~117%;

其他截面(ACCC/TW-796) 碳纤维芯软铝导线的垂直荷载是 LGJ-630/45 钢芯铝绞线 115%;

(3) 弧垂特性及塔高方面:

300mm² 截面新型增容导线:

JNRLH60/G3A-300/40 钢芯耐热铝合金线及 TACIR-300/50 铝包股钢芯耐热铝合金绞线在 400m 档距下的弧垂分别比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂大 0.56m 和 0.32m, 弧垂特性基本相当; ACCC/TW-310 碳纤维芯软铝导线的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂小 3.18m, 弧垂特性较好; JLRX/EST-300/40 特强钢芯软铝型绞线弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂大 2.19m, 弧垂特性较差;

400mm² 截面新型增容导线:

JNRLH60/G3A-400/50 钢芯耐热铝合金线及 TACIR-400/65 铝包股钢芯耐热铝合金绞线在 400m 档距下的弧垂分别比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂大 0.23m 和小 0.12m, 弧垂特性基本相当; ACCC/TW-413 碳纤维芯软铝导线的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂小 3.06m, 弧垂特性较好; JLRX/EST-400/52 特强钢芯软铝绞线弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂大 1.57m, 弧垂特性较差;

500mm² 截面新型增容导线:

JNRLH60/G3A-500 钢芯耐热铝合金线及 JLRX/EST-500/65 特强钢芯软铝型绞线在 400m 档距下的弧垂分别比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂大 1.48m 和 1.38m, 弧垂特性相对较差; ACCC/LH-500 碳纤维芯耐热铝合金导线的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂小 0.34m, 弧垂特性相当;

600mm² 截面新型增容导线除 ACCC/TW-619 碳纤维导线在 400m 档距下的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂小 2.02m, 弧垂特性相对较好外, 其他导线在 400m 档距下的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线大 1.09m~1.7m 左右, 弧垂特性较差;

其他截面(ACCC/TW-796)碳纤维芯软铝导线在 400m 档距下的弧垂比 LGJ-630/45 钢芯铝绞线的弧垂小 0.5m, 弧垂特性相当。

4.4 经济比较

4.4.1 最小年费用的计算

为了进一步分析各种导线的经济性, 我们采用年费用法对各种导线型式的年费用进行了计算。

(1) 计算方法

$$NF = Z \left[\frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \right] + u$$

式中: NF—年费用(平均分布在 m+1 到 m+n 期间的 n 年内)

Z—折算到第 m 年的总投资

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t (1 + r_0)^{m+1-t}$$

u—折算年运行费用

$$u = \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \left[\sum_{t=t'}^{t=m} u_t (1 + r_0)^{m-t} + \sum_{t=m+1}^{t=m+n} u_t \frac{1}{(1 + r_0)^{t-m}} \right]$$

m—施工年数

n—经济使用年数

t—从工程开工这一年起的年份

t'—工程部分投产的年份

ro—电力工程投资的回收率

(2) 计算原则

年费用的计算原则如下：

经济使用年限为 30 年

按第一年投资 60%，第二年投资为 40%

年损耗小时数按 1400、3000 小时计

设备运行维护费率为 1.4%

电力工程回收率按 8%、10%、12% 计

上网电价按 0.30 元/kWh、0.40 元/kWh、0.50 元/kWh、0.60 元/kWh 四种电价计。

4.4.2 损耗及本体投资比较

各种导线方案的投资估算及损耗如下表：

表 4.4-1 损耗及本体投资

序号	分类	导线型号	电阻损耗 (kW/km)	电晕损耗 (kW/km)	本体投资 (万元/km))				
					导线	铁塔	基础	其它	合计
1	常规导线	LGJ-630/45	195.9	1.94	40.8	45.5	10.7	22.3	119.3
2	300 截面	ACCC/TW-310	382	8.98	90.0	35.4	9.7	22.3	157.4
3		JNRLH60/G3A-300/40	413.5	6.40	27.3	41.0	9.9	22.3	100.5
4		TACIR-300/50	398.2	6.10	112.8	40.2	9.9	22.3	185.3
5		JLRX/EST-300/40	387.1	8.25	35.1	41.6	9.8	22.3	108.8
6	400 截面	ACCC/TW-413	282	5.37	96.0	37.4	10.0	22.3	165.8
7		JNRLH60/G3A-400/50	315.3	3.86	36.3	43.2	10.2	22.3	112.1
8		TACIR-400/65	293.5	3.67	150.3	42.7	10.2	22.3	225.5
9		JLRX/EST-400/52	287.4	5.04	45.5	43.2	10.0	22.3	121.1
10	500 截面	ACCC/LH-500	249.9	2.88	102.0	43.2	10.5	22.3	178.0
11		JNRLH60/G3A-500	250.9	2.88	39.4	45.5	10.5	22.3	117.7
12		JLRX/EST-500/65	236.7	3.45	57.2	44.8	10.3	22.3	134.7
13	630 截面	ACCC/LH-630	196.8	1.94	108.0	47.3	10.8	22.3	188.4
14		JNRLH60/G3A-630	199.1	1.94	49.4	47.8	10.8	22.3	130.3
15		TACIR-630	190	1.81	208.3	47.5	10.8	22.3	288.9
16		JLRX/EST-630/80	185	2.25	72.5	47.7	10.6	22.3	153.1
17		ACCC/TW-619	189.1	2.75	114.0	42.6	10.5	22.3	189.4
18	800 截面	ACCC/TW-796	148.1	1.84	120.0	46.8	10.8	22.3	199.9

从上表可以看出：

(1) 电能损耗

- 1) 同种材质、不同截面的导线，随着截面积的增加，导线的电阻损耗相应减小。
- 2) 相同截面，不同材质的新型导线中，加强钢芯耐热铝合金导线的的电阻损耗最大。
- 3) 新型导线和常规导线 LGJ-630/45 的电阻损耗相比，300 截面导线约是 LGJ-630/45 的 2 倍，400 截面导线约是 LGJ-630/45 的 1.5 倍，500 截面导线约是 LGJ-630/45 的 1.3 倍，630 截面导线跟 LGJ-630/45 基本相当。

(2) 本体投资

- 1) 本体投资主要包括导线、铁塔、基础和其它（绝缘子和金具）四部分。
- 2) 同种截面、不同材质的导线，加强钢芯耐热铝合金导线的本体投资最低，铝包股钢芯耐热铝合金绞线的本体投资最高。由于截面积相同，铁塔和基础的投资基本相当，本体投资的差异主要由导线价格的差异引起。

4.4.3 年费用计算结果

根据上述原则对年费用计算如下表：

表 4.4-2 年费用计算结果

(8%回收率，最大负荷利用小时数 3000，损耗小时数 1400 小时)

序号	导线型号		年费用(万元/km·a)			
			0.3(元/度)	0.4(元/度)	0.5(元/度)	0.6(元/度)
1	常规导线	LGJ-630/45	22.4	25.3	28.2	31.1
2	300 截面	ACCC/TW-310	36.4	42.6	48.7	54.8
3		JNRLH60/G3A-300/40	30.6	36.9	43.3	49.6

4		TACIR-300/50	39.6	45.7	51.8	57.9
5		JLRX/EST-300/40	30.9	37	43.2	49.3
6	400 截面	ACCC/TW-413	32.2	36.7	41.1	45.5
7		JNRLH60/G3A-400/50	27.1	31.8	36.6	41.4
8		TACIR-400/65	39.1	43.6	48	52.4
9		JLRX/EST-400/52	27.3	31.7	36.2	40.7
10	500 截面	ACCC/LH-500	31.6	35.4	39.1	42.9
11		JNRLH60/G3A-500	24.8	28.5	32.3	36.1
12		JLRX/EST-500/65	26.3	29.9	33.5	37.1
13	630 截面	ACCC/LH-630	30.4	33.3	36.2	39.1
14		JNRLH60/G3A-630	23.8	26.8	29.7	32.7
15		TACIR-630	41.5	44.4	47.2	50
16		JLRX/EST-630/80	25.9	28.7	31.5	34.3
17		ACCC/TW-619	30.4	33.3	36.1	39
18	800 截面	ACCC/TW-796	29.6	31.8	34.1	36.3

表 4.4-3 年费用计算结果
(10%回收率, 最大负荷利用小时数 3000, 损耗小时数 1400 小时)

序号	导线型号		年费用 (万元/km·a)			
			0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)
1	常规导线	LGJ-630/45	25.2	28.1	31	33.9
2	300 截面	ACCC/TW-310	40.1	46.2	52.3	58.5
3		JNRLH60/G3A-300/40	32.9	39.2	45.6	51.9
4		TACIR-300/50	43.8	50	56.1	62.2
5		JLRX/EST-300/40	33.4	39.5	45.7	51.8
6	400 截面	ACCC/TW-413	36.1	40.5	44.9	49.3
7		JNRLH60/G3A-400/50	29.7	34.4	39.2	43.9
8		TACIR-400/65	44.3	48.8	53.2	57.6
9		JLRX/EST-400/52	30.1	34.5	39	43.5
10	500 截面	ACCC/LH-500	35.8	39.5	43.3	47

11		JNRLH60/G3A-500	27.5	31.3	35	38.8
12		JLRX/EST-500/65	29.4	33	36.6	40.2
13	630 截面	ACCC/LH-630	34.7	37.6	40.6	43.5
14		JNRLH60/G3A-630	26.8	29.8	32.7	35.7
15		TACIR-630	48.2	51.1	53.9	56.7
16		JLRX/EST-630/80	29.4	32.2	35	37.8
17		ACCC/TW-619	34.7	37.6	40.5	43.4
18	800 大截面	ACCC/TW-796	34.2	36.5	38.7	40.9

表 4.4-4 年费用计算结果
(12%回收率, 最大负荷利用小时数 3000, 损耗小时数 1400 小时)

序号	导线型号		年费用 (万元/km·a)			
			0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)
1	常规导线	LGJ-630/45	28.2	31.1	34	36.9
2	300 截面	ACCC/TW-310	44.1	50.2	56.3	62.5
3		JNRLH60/G3A-300/40	35.4	41.8	48.1	54.5
4		TACIR-300/50	48.5	54.7	60.8	66.9
5		JLRX/EST-300/40	36.2	42.3	48.5	54.6
6	400 截面	ACCC/TW-413	40.3	44.7	49.1	53.5
7		JNRLH60/G3A-400/50	32.5	37.3	42	46.8
8		TACIR-400/65	50.1	54.5	58.9	63.4
9		JLRX/EST-400/52	33.1	37.6	42.1	46.5
10	500 截面	ACCC/LH-500	40.3	44	47.8	51.5
11		JNRLH60/G3A-500	30.5	34.3	38	41.8
12		JLRX/EST-500/65	32.8	36.4	40	43.7
13	630 截面	ACCC/LH-630	39.5	42.4	45.3	48.3
14		JNRLH60/G3A-630	30.1	33.1	36	39
15		TACIR-630	55.6	58.4	61.2	64
16		JLRX/EST-630/80	33.3	36.1	38.9	41.7

17		ACCC/TW-619	39.6	42.4	45.3	48.2
18	800 截面	ACCC/TW-796	39.3	41.5	43.8	46

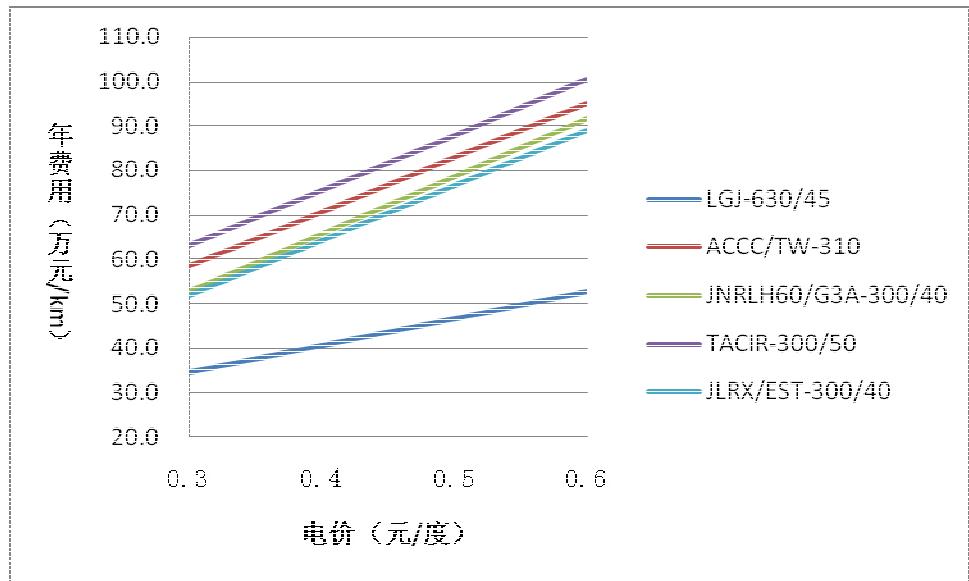


图 4.4-1 300 截面新型增容导线与常规 LGJ-630/45 导线年费用相对关系

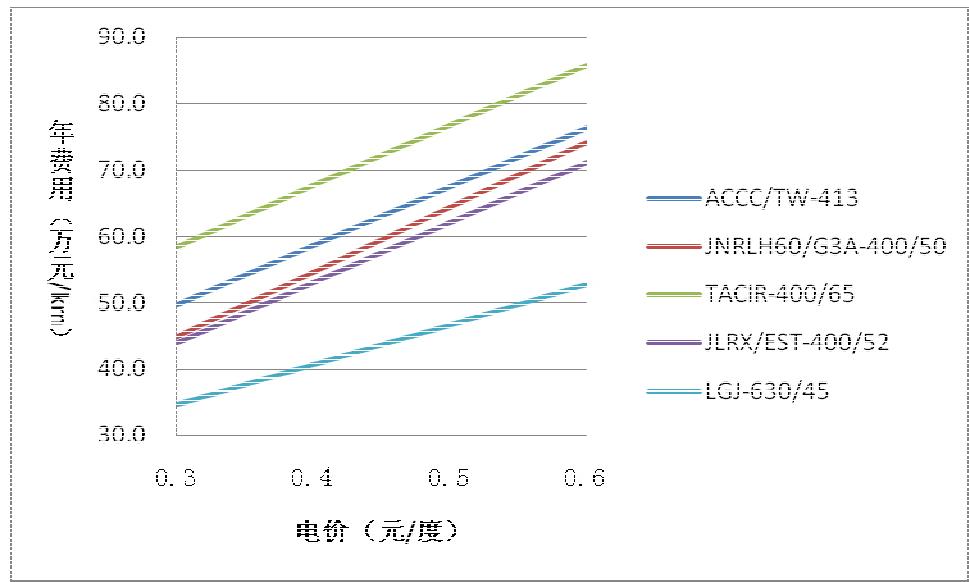


图 4.4-2 400 截面新型增容导线与常规 LGJ-630/45 导线年费用相对关系

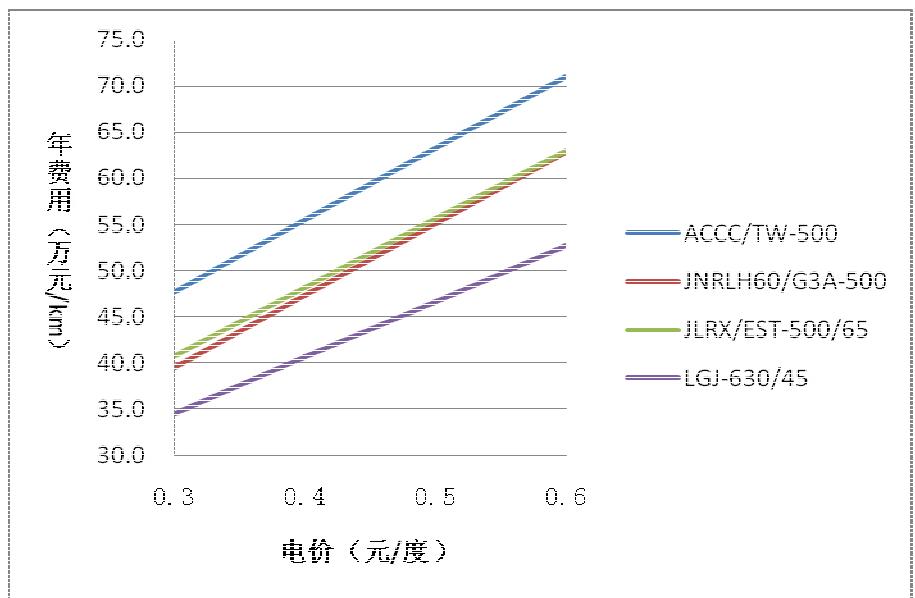


图 4.4-3 500 截面新型增容导线与常规 LGJ-630/45 导线年费用相对关系

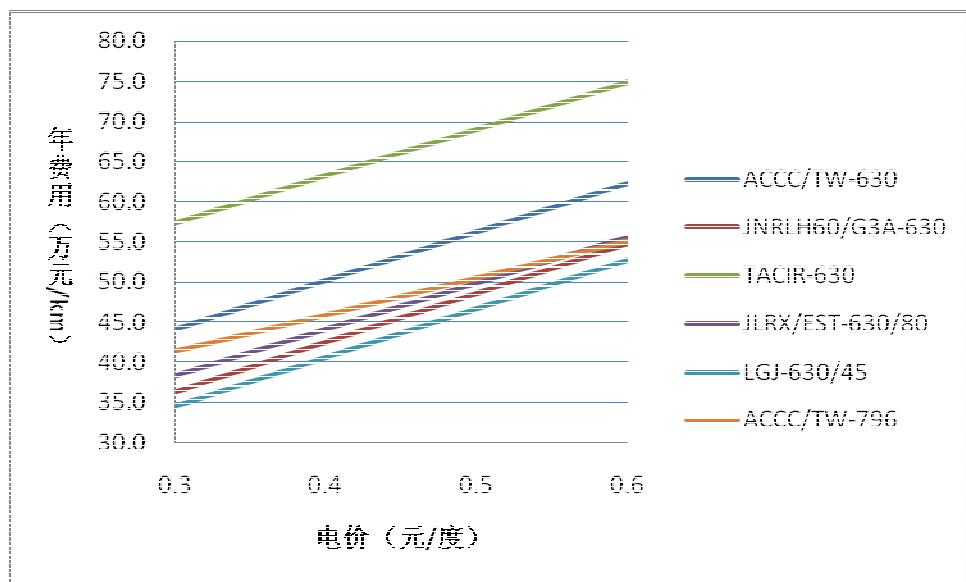


图 4.4-4 630 截面新型增容导线与常规 LGJ-630/45 导线年费用相对关系

表 4.4-5 年费用计算结果

(8%回收率，最大负荷利用小时数 5000，损耗小时数 3000 小时)

序号	导线型号		年费用 (万元/km·a)			
			0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)
1	常规导线	LGJ-630/45	31.8	37.8	43.9	49.9
2	300 截面	ACCC/TW-310	54.8	67	79.3	91.5
3		JNRLH60/G3A-300/40	50.4	63.4	76.3	89.3
4		TACIR-300/50	58.7	71.1	83.6	96.1
5		JLRX/EST-300/40	49.5	61.8	74.1	86.5
6	400 截面	ACCC/TW-413	45.8	54.7	63.6	72.6
7		JNRLH60/G3A-400/50	42.2	52	61.8	71.6
8		TACIR-400/65	53.2	62.3	71.5	80.6
9		JLRX/EST-400/52	41.1	50.1	59.2	68.2
10	500 截面	ACCC/LH-500	43.6	51.4	59.1	66.9
11		JNRLH60/G3A-500	36.8	44.6	52.4	60.2
12		JLRX/EST-500/65	37.6	45	52.4	59.8
13	630 截面	ACCC/LH-630	39.8	45.9	51.9	58
14		JNRLH60/G3A-630	33.4	39.5	45.6	51.8
15		TACIR-630	50.7	56.5	62.4	68.2
16		JLRX/EST-630/80	34.8	40.5	46.3	52
17		ACCC/TW-619	39.4	45.4	51.3	57.2
18	800 截面	ACCC/TW-796	36.7	41.3	45.9	50.5

表 4.4-6 年费用计算结果

(10%回收率，最大负荷利用小时数 5000，损耗小时数 3000 小时)

序号	导线型号		年费用 (万元/km·a)			
			0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)
1	常规导	LGJ-630/45	34.6	40.6	46.7	52.7

	线					
2	300 截面	ACCC/TW-310	58.4	70.7	82.9	95.2
3		JNRLH60/G3A-300/40	52.7	65.7	78.7	91.6
4		TACIR-300/50	63.0	75.4	87.9	100.4
5		JLRX/EST-300/40	52.0	64.3	76.7	89.0
6	400 截面	ACCC/TW-413	49.6	58.6	67.5	76.4
7		JNRLH60/G3A-400/50	44.8	54.6	64.4	74.2
8		TACIR-400/65	58.4	67.6	76.7	85.8
9		JLRX/EST-400/52	43.9	52.9	62.0	71.1
10	500 截面	ACCC/LH-500	47.8	55.5	63.3	71.0
11		JNRLH60/G3A-500	39.5	47.3	55.1	62.9
12		JLRX/EST-500/65	40.8	48.2	55.6	63.0
13	630 截面	ACCC/LH-630	44.2	50.2	56.3	62.4
14		JNRLH60/G3A-630	36.4	42.5	48.7	54.8
15		TACIR-630	57.4	63.2	69.1	74.9
16		JLRX/EST-630/80	38.3	44.1	49.8	55.6
17		ACCC/TW-619	43.8	49.7	55.7	61.6
18	800 截面	ACCC/TW-796	41.3	45.9	50.5	55.2

表 4.4-7 年费用计算结果
(12%回收率, 最大负荷利用小时数 5000, 损耗小时数 3000 小时)

序号	导线型号		年费用 (万元/km·a)			
			0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)	0.3 (元/度)
1	常规导线	LGJ-630/45	37.6	43.6	49.7	55.7
2	300 截面	ACCC/TW-310	62.4	74.7	86.9	99.1
3		JNRLH60/G3A-300/40	55.3	68.3	81.2	94.2

4		TACIR-300/50	67.7	80.1	92.6	105.1
5		JLRX/EST-300/40	54.7	67.1	79.4	91.8
6	400 截面	ACCC/TW-413	53.8	62.8	71.7	80.6
7		JNRLH60/G3A-400/50	47.7	57.5	67.3	77.1
8		TACIR-400/65	64.2	73.3	82.4	91.5
9		JLRX/EST-400/52	46.9	56	65.1	74.1
10		ACCC/LH-500	52.3	60	67.8	75.5
11	500 截面	JNRLH60/G3A-500	42.5	50.3	58.1	65.9
12		JLRX/EST-500/65	44.2	51.6	59	66.4
13		ACCC/LH-630	48.9	55	61.1	67.2
14	630 截面	JNRLH60/G3A-630	39.7	45.8	52	58.1
15		TACIR-630	64.7	70.5	76.4	82.3
16		JLRX/EST-630/80	42.2	48	53.7	59.5
17		ACCC/TW-619	48.6	54.5	60.5	66.4
18	800 截面	ACCC/TW-796	46.4	51	55.6	60.2

从以上经济性比较可以得出：

(1) 按导线生产厂家报价计算，通过按年费用比较，常规钢芯铝导线最优，新型增容导线方案的优劣依次为：加强钢芯耐热铝合金导线、高强钢芯软铝导线、碳纤维芯软铝导线（碳纤维芯耐热铝合金导线）、铝包股钢芯软铝导线。

(2) 损耗小时数 1400、回收率为 8%、10% 和 12% 时，相同截面、不同材质的各种新型增容导线年费用变化规律如下：

1) 300 截面导线中，与不同电价下，常规导线 LGJ-630/45 相比，新型导线比 LGJ-630/45 高 8-18 万/km。在四种新型增容导线中，JNRLH60/G3A-300/40 导线的年费用最小，比 LGJ-630/45 高 8 万

/km, JLRX/EST-300/40 年费用与 JNRLH60/G3A-300/40 基本相当。

TACIR-300/50 和 ACCC/TW-310 两种导线年费用最高。

2) 400、500 和 630 截面导线中, 四种材质导线年费用大小关系与截面为 300mm^2 时相同。随着截面积的增大, 加强钢芯耐热铝合金导线的经济优势越来越明显, 但 630 截面导线中 JNRLH60/G3A-630 导线的年费用仍比 LGJ-630/45 导线的年费用高 1.4-1.6 万/km。

(3) 损耗小时数 3000、回收率为 8%、10% 和 12% 时, 相同截面、不同材质的各种新型增容导线年费用变化规律如下:

最大损耗小时数为 3000 时, 对于 300 和 400 截面导线, 特强钢芯软铝导线的年费用最低, 和特强钢芯耐热铝合金导线的年费用基本相当。对于 500 和 630 截面, 特强钢芯耐热铝合金导线的年费用最小。

(4) 不同方式导线价格比较

根据年费用给出三种方式下的导线价格见表 4.4-8。

表 4.4-8 年费用及导线价格 (回收率 8%、年损耗小时数 1400 小时)

序号	分类	导线型号	导线价格根据厂家报价 (考虑损耗)			年费用平衡点导线价格 (考虑损耗)			本体投资相同时导线价格 (不考虑损耗)		
			单价(万/t)	本体投资(万/km)	年费用(万元/km.a)	单价(万/t)	本体投资(万/km)	年费用(万元/km.a)	单价(万/t)	本体投资(万/km)	年费用(万元/km.a)
1	常规导线	LGJ-630/45	1.65	119.3	22.4	1.65	119.3	22.4	1.65		
2	截面	ACCC/TW-310	8.09	157.4	36.4	1.65	85.8	28.2	4.67	119.3	13.7
3		JNRLH60/G3A-300/40	2.00	100.5	30.6	1.65	95.8	30.0	3.38		
4		TACIR-300/50	8.00	185.3	39.6	1.65	95.8	29.3	3.32		
5		JLRX/EST-300/40	2.50	108.8	30.9	1.65	96.9	29.5	3.25		
6		ACCC/TW-413	6.48	165.8	32.2	1.65	94.3	24.1	3.34		
7	截面	JNRLH60/G3A-400/50	2.00	112.1	27.1	1.65	105.8	26.4	2.40	119.3	13.7
8		TACIR-400/65	8.00	225.5	39.1	1.65	106.2	25.5	2.35		
9		JLRX/EST-400/52	2.50	121.1	27.3	1.65	105.6	25.5	2.40		
10		ACCC/LH-500	5.90	178.0	31.6	1.65	104.5	23.2	2.51		
11	截面	JNRLH60/G3A-500	2.00	117.7	24.8	1.65	110.8	24.0	2.08	119.3	13.7
12		JLRX/EST-500/65	2.50	134.7	26.3	1.65	115.2	24.0	1.83		
13		ACCC/LH-630	4.95	188.4	30.4	1.76	118.9	22.4	1.78		
14	截面	JNRLH60/G3A-630	2.00	130.3	23.8	1.65	125.9	22.8	1.55	119.3	13.7
15		TACIR-630	8.00	288.9	41.5	1.65	123.6	22.6	1.49		

16		JLRX/EST-630/80	2.50	153.1	25.9	1.65	128.6	23.1	1.33		
17		ACCC/TW-619	5.21	189.4	30.4	2.03	119.9	22.4	2.01		
18	800 截面	ACCC/TW-796	4.33	199.9	29.6	2.06	136.9	22.4	1.42		

上表中，第一种计算结果是按厂家报价计算出的年费用。碳纤维芯导线和铝包股钢芯耐热铝合金绞线两种导线的报价最高，约是常规导线 LGJ-630/45 导线的 3.5-5 倍；特强钢芯耐热铝合金导线和特强钢芯软铝导线的厂家报价略高于 LGJ-630/45。

第二种计算结果是在同时考虑初投资和电能损耗，使不同新型增容导线的年费用和常规导线相当的情况下反推出来的新型导线的价格。如果当导线价格降到和 LGJ-630/45 导线价格相等时，年费用仍不能等于 LGJ-630/45 导线，则可以得出该种导线与 LGJ-630/45 的经济性不具可比性。

1) 从计算结果可以看出，300、400 和 500 截面的新型增容导线价格降到 1.65 万/t 时，年费用仍大于 LGJ-630/45 导线。

2) ACCC/LH-630、ACCC/TW-619 和 ACCC/TW-796 三种导线价格分别降到 1.76 万/t、2.03 万/t 和 2.06 万/t 时，可以保证年费用和 LGJ-630/45 的年费用相同。此时，ACCC/LH-630 和 ACCC/TW-619 的本体投资与 LGJ-630/45 相当，ACCC/TW-796 的本体投资比 LGJ-630/45 多 16 万/km。

3) JNRLH60/G3A-630、TACIR-630、JLRX/EST-630/80 三种新型增容导线价格降到 1.65 万/t 时，年费用略高于 LGJ-630/45 导线。

第三种导线价格是仅考虑初投资、不考虑电能损耗的情况下，即等投资时反推出来的导线价格。

4.5 小结

经过以上分析和比较，可以得出以下结论：

(1) 按年费用比较，常规钢芯铝导线最优，新型增容导线方案的优劣依次为：加强钢芯耐热铝合金导线、特强钢芯软铝导线、碳纤维芯导线、铝包股钢芯软铝导线。

(2) 考虑到新型增容导线方案初期投资的减少，若按年费用相等为控制条

件推算导线价格，500 截面以下的新型增容导线，由于电能损耗的大大增加无任何优势，即价格应低于 LGJ-630/45 导线；大截面碳纤维芯软铝（碳纤维芯耐热铝合金）导线具有一定优势，碳纤维芯耐热铝合金导线 ACCC/LH-630 的价格可比 LGJ-630/45 增加 6.7%，碳纤维芯软铝导线 ACCC/TW-619 的价格可比 LGJ-630/45 增加 23.0%。

(3) 新型增容导线发热允许输送容量 (150℃) 远比 LGJ-630/45 导线 (80℃) 大， 500mm^2 截面的碳纤维芯软铝导线 (碳纤维芯耐热铝合金导线) 比 LGJ-630/45 增加 70% (50%)，即碳纤维芯导线具有很强的发热输送能力，在清洁能源发电的并网送出具有使用潜力。

5 碳纤维芯导线及其应用

5.1 碳纤维芯导线

碳纤维芯导线为新型复合材料合成芯导线，它的芯线是由碳纤维为中心层和玻璃纤维层包覆制成的单根芯棒，其中中心层由上万根直径 $7\mu\text{m}$ 左右的碳纤维与热固性改性环氧树脂粘合而成，芯线外部由玻璃纤维和热固性改性环氧树脂粘合而成。外层与邻外层铝线股可根据不同要求制成型线或圆线，材质可为耐热铝合金、软铝合金或硬铝合金等。由于芯棒的外表面为绝缘体的玻璃纤维层，芯棒与铝股之间不存在接触电位差，保护铝导线免受电腐蚀。这种碳纤维芯导线已完成了各种型式试验，包括机械全性能、应力—应变曲线、蠕变、线膨胀系数、载流量、自阻尼和高温特性等，表明该导线具有良好的机械和电气特性，特别是验证了高温条件下的低弛度特性。

与常规的钢芯铝绞线相比，碳纤维复合芯导线的基本特性：

重量轻：碳纤维复合芯的密度只有 1.95g/cm^3 ，仅为钢的 $1/4$ 左右，其重量比钢芯铝绞线轻 15-20%。

抗拉强度大：碳纤维抗拉强度超过 3000MPa，试验结果表明，其拉断力是相同截面钢芯铝绞线的 1.22 倍。

耐高温：试验结果表明，碳纤维复合芯导线能在 150℃温度下长期有效地运行，短时温度可达 180℃。

载流量大：试验结果表明，在环境温度 40℃时，碳纤维复合芯导线传输载流量约是普通钢芯铝绞线的 2 倍，如果环境温度 30℃时，载流量则可达到普通钢芯铝绞线的 2.5 倍左右。

线损低：碳纤维复合芯导线的导体部分采用软铝，其导电率相比硬铝提高 3.3%，而且梯形排列结构紧凑填充系数高；复合芯是非铁磁性材料，当交流电流通过时，不会产生磁滞损耗和涡流损耗。

弧垂小：碳纤维复合芯导线的热膨胀系数仅为钢的 1/7。当导线载流温度升高以后，外层软铝承受张力越来越小，当温度高于迁移点温度后，所有张力均由复合芯承受，导线的热膨胀系数即为芯线的热膨胀系数，所以弧垂较小。

5.2 国内外生产情况

碳纤维复合材料的比重为钢的 1/4、强度为钢的 2 倍、线膨胀系数为钢的 1/10，由于其优异力学特性和热稳定性，首先被应用于军事领域的航天、航空器和武器减重；随后被用于民用飞机、竞技体育的器材。随着碳纤维大规模生产技术的解决，碳纤维复合材料开始进入工业和生活领域。上世纪 90 年代后期，技术先进国家开始尝试采用纤维增强复合材料代替金属材料来制作导线的承力元件，1997 年日本首先开发出碳纤维复合材料芯铝绞线和耐热型的碳纤维复合材料芯耐热铝合金绞线，进行了短距离的应用试验，由于施工和耐张接续存在困难，并且碳纤维复合芯的生产效率及成本太高，而没有实现商品化；英国开发的导线用碳纤维复合芯模量太高、缺乏必要的韧性，

且没有解决碳纤维复合芯与导线铝之间的电化学腐蚀问题，最终没有也没有商品化；

国外碳纤维复合芯导线生产技术比较领先的厂家有两个，均在美国，分别是 CTC 公司（Composite Technology Corporation）和水银电缆公司（Mercury Cable & Energy LLC）。其中 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。

目前，日本最大的钢丝制造厂商日本东京制钢株式会社也在开始生产碳纤维复合芯。其复合芯绞丝结构形式与美国公司的棒材结构不同，为绞线结构。制钢株式会社资料显示，绞线结构具有弯曲柔软性和拧绞柔软性优于棒状态芯的特点。另外，由于其结构是由多股细碳纤维芯绞制而成，所以理论上说可以分散外力作用，改善受力状况，增加复合芯的抗疲劳性。而且如果绞制的部分单芯受损时对整个线芯的影响也较小，其结构也更接近现有的钢芯铝绞线。但这种结构形式的复合芯尚没有电力行业的应用业绩，即一切数据还都来源于实验室。对于施工运行等各方面可能出现的问题还是未知数。

2005 年美国 3M 公司开发的铝基陶瓷纤维芯导线投入商业运行，2007 年在中国上海增容改造了一条线路，由于施工的不适应和导线价格问题，在中国和其它地区的推广应用出现了障碍；2004 年美国复合技术公司完成开发的碳纤维/玻璃纤维复合材料芯铝导线及配套金具投入商业运行，远东复合技术公司 2006 年开始引进该产品和制造技术，在中国已有超过 100 条线路（电站）在运行。目前，国内有意涉足碳纤维复合芯导线的单位较多，江苏远东电缆有限公司、河北硅谷化工有限公司、常州鸿泽澜线缆有限公司和中国电力科学研究院等单位生产的碳纤维复合芯导线已经挂网运行。

远东复合技术有限公司碳纤维复合芯导线应用业绩较多，其为江苏远东

控股集团的全资子公司，该公司碳纤维复合芯仍全部进口。

2007 年，华北电网有限公司立项研发碳纤维复合芯导线，华北电力科学研究院为技术总负责单位，邯郸市硅谷新材料有限公司和山东大学为合作单位。项目形成的产品由邯郸市硅谷新材料有限公司负责生产和销售。生产的 T700 碳纤维丝已通过验收，并投入实际使用。

2007 年至今，中国电力科学研究院承担了国家电网公司“碳纤维复合芯扩容导线的研制开发”课题。经过研发，在碳纤维复合芯配方与拉制工艺、导线设计与绞制、配套金具研制等方面获得一系列重要研究成果。研制的碳纤维复合芯导线已经通过型式试验检测。中国电力科学研究院深入研究了基于国产耐热树脂体系和国外耐热树脂体系的两个成熟配方，研究了两种碳纤维复合芯配方、研制拉制设备、制定拉制工艺，形成可连续稳定生产复合芯的能力。其研制生产的导线已经挂网运行。

鸿联集团常州洪泽澜线缆有限公司与中国国防科技大学联合研发的碳纤维复合芯铝导线及金具项目，开发的产品于 2009 年挂网运行，目前主要采用进口碳纤维拉挤制造复合芯，在进行绞制。

除上述碳纤维复合芯导线的研发、生产厂家能自主或外协生产碳纤维复合芯外，一些有技术基础和设备基础的厂家也先后加入到碳纤维复合芯的研发生产行列。

5.3 220kV 改造线路应用分析

在我国由于经济发展较快，用电负荷激增，增容改造的需求比较大，由于时间和经费的约束，选择在旧有线路改造的比重较大，在原有杆塔上通过将原有导线更换为碳纤维复合材料芯导线而达到倍容的例子很多。这样的改造线路若按电压等级来划分，220kV 线路所占比重最大。

若想达到改造后倍容的目的，可以有两种方案：一是采用推倒重建（换

塔换线)的方式，二是采用不换塔只换线的方式，下面对这两种方案进行技术经济比较。

5.3.1 线路模型

实际的线路工程十分复杂，为了对比方便，建立一个线路模型，对比采用钢芯铝绞线与碳纤维复合材料芯导线的技术经济性。

电压等级：220kV，单回，线路长度为20km。

以某改造工程为例，根据原有线路的设计气象条件与运行经验，改造工程设计气象条件仍取原有线路在此段的设计气象条件，气象条件组合见下表。

表5.3-1 气象条件

项目	气象要素	温度 °C	风速 m/s	冰厚 mm
大风	15	30	0	
低温	-10	0	0	
平均气温	15	0	0	
高温	40	0	0	
覆冰	-5	10	5	
操作过电压	15	15	0	
雷电过电压(有风)	15	10	0	
雷电过电压(无风)	15	0	0	
安装	0	10	0	

5.3.2 容量对比

原有线路的导线为2×LGJ-400/35，若想达到倍容的目标，若推倒重建则可选择的导线为4×LGJ-400/35，若不换塔只换线则可选择的导线为2×JRLX/T2-415/50，两种导线的主要参数见下表。

表5.3-2 导线参数对比

导线型号	LGJ-400/35	JRLX/T2-415/50
导线结构	铝股 48×3.22 钢芯 7×2.50	梯形铝股 19 复合芯 1×8.13

计算截 面积 mm^2	铝	390.88	413.61
	钢(合成)芯	34.36	51.89
	总	425.24	465.48
外径 mm		26.82	25.15
单位长度重量 kg/km		1349	1235.18
弹性系数(MPa)		65000	62000
热膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		20.5	17.8
计算拉断力(N)		103900	135000
20°C直流电阻(Ω/km)		0.07389	0.067614

改造前后输送容量的详细数据见下表。

表5.3-3 改造前后输送容量对比

项目	原有工程	推倒重建(换塔换线)	不换塔换线
导线	2×LGJ-400/35	4×LGJ-400/35	2×JRLX/T2-415/50
载流量	1320A(70°C)	2640A(70°C)	2640A(137°C)
极限输送容量	500MVA	1000MVA	1000MVA

5.3.3 导线机械性能对比

对这两种导线方案的机械性能进行对比，详细数据见下表。

表5.3-4 导线参数对比

导线型号	LGJ-400/35	JRLX/T2-415/50
平均运行应力(%)	25	20
安全系数	2.5	3.5
最大使用张力(N)	41560	38571
600米档距 40°C 弧垂(m)	24.3	20.4
600米档距 137°C 弧垂(m)	/	24.2

通过上述比较，可知在满足铁塔受力情况下，由于碳纤维复合材料芯导线重量较轻、拉重比大，在满足系统输送容量要求时（约137℃），弧垂可满足现有铁塔高度要求，不用更换铁塔。

5.3.4 造价比较

在造价比较时依据现有预算编制与计算标准进行估算，需要说明的是，碳纤维复合材料芯导线与普通导线的架线方式都采用张力放、紧线，长度相同，因此，两种导线的架线安装工程费用相同，参照《电力建设工程预算定额》；装置性材料费中，导线的施工损耗率都按0.8%计列，普通导线LGJ-400的价格为16800元/吨计算，碳纤维复合材料芯导线的价格按96元/米计算；具体造价见表4-5。由于国产T1和T2的用量少、市场价不明朗，而T3价格较清晰，故以其市场价作为比较依据。同样直径下，T1和T2的价格差异不大，但T3比T1和T2高30%左右，导线则贵15~20%。

表5.3-5 造价对比

导线型号 具体项目		普通导线 4×LGJ-400/35 推倒重建	碳纤维导线 2 × JRLX/T3-415/50 不换塔换线
土方工程 (元)	直接工程费	616164	0
基础工程 (元)	直接工程费	2875432	0
杆塔工程 (元)	直接工程费	7804744	0
架线工程 (元)	直接工程费	6091277	12038816
	安装工程费	608597	426656
	装置性材料费	5482680	11612160
附件工程 (万元)	直接工程费	45	50
	单位公里造价(万元/km)	2.25	2.5
合计(万元)		1782.4	1253.9
单位路径长度造价(万元/km)		89.12	62.69

JRLX/T3-415/50的以往售价有过120元/m，现在的售价大约为90-110元/m，若考虑随着生产厂家的增多，其售价应该呈下降趋势。若以当前 LGJ-400/35 和JRLX/T3-415/50的价格，在不考虑线路走廊增加产生的费用的前提下，采用碳纤维复合材料芯导线（不换塔只换线）比采用换塔换线的方式仅本体造价每公里就节约30%，所以在改造线路上采用碳纤维复合材料芯导线不仅技术可行，还节约费用。

5.3.5 小结

从上述针对220kV改造线路进行的模拟计算、分析，可得下述结论：若想达到改造后倍容的目的，推倒重建和不换塔只换碳纤维复合材料芯导线在技术上都是可行的。若按当前两种导线的价格，采用不换塔换线的方式，仅本体造价每公里就节约30%；若考虑将来碳纤维复合材料芯导线单价下降的趋势则采用碳纤维复合材料芯导线的优势更加明显。

5.4 500kV输电线路中的应用实例

5.4.1 概述

为检验项目研制的国产碳纤维复合芯导线的实际运行效果，华北电网有限公司在万顺III回输电线路的改造过程中，依据《碳纤维复合芯导线选线报告(万顺三线)》，在 N687-N690 耐张段改造中，将原有导线更换为碳纤维复合芯导线。成为国内首条应用碳纤维复合芯导线的 500kV 输电线路。

5.4.2 使用条件

万顺三回 N687-N690 耐张段全长 1.22 公里，位于顺义变出口约 2 公里处，平地，共四基塔，三档线。

电压等级：500kV

线路回路数：单回路。

线路长度：耐张段长 1.22km。

地形划分：平地

线路所经地区：非居民区。

气象条件如下：

气象要素	气温(℃)	风速(s/m)	覆冰 (mm)
最低气温	-30	0	0
平均气温	10	0	0
最大风速	-5	30	0
最大覆冰	-5	10	5
最高气温	40	0	0
安装情况	-15	10	0
大气无风	15	0	0
大气有风	15	10	0
操作情况	10	15	0
冰的比重	0.9g/cm ³		
雷暴日数	40 天/年		

5.4.3 导线设计情况

万顺原线路工程导线采用 LGJ-400/35 钢芯铝绞线，每相为 4 分裂，分裂间距为 450mm。本工程换用的碳纤维复合芯导线，命名为 ACCC-300/50，导线布置同原导线。导线的物理特性见下表所示。

导线的物理特性

导线型号	原导线 LGJ-400/35	更换导线 ACCC-300/50
铝股数/每股直径(根/mm)	48/3.22	26/3.83
钢(碳纤维)股数/每股直径(根/mm)	7/2.50	1/8.95
铝截面/钢截面(mm ²)	390.88/34.36	299.6/62.9
综合截面(mm ²)	425.24	362.5

外径(mm)	26.82	24.27
单位质量(kg/m)	1.349	0.92035
计算拉断力(kN)	103.9	120
弹性模量(kN/mm ²)	65	71.45
线膨胀系数(1/°C)	20.5×10^{-6}	12.4×10^{-6} (80°C 以下) 1.6×10^{-6} (80°C 以上)

碳纤维复合芯导线的拉断力还没有试验数据，根据电科院给定的计算拉断力 120kN，导线安全系数取 2.9，最大使用张力为 39.31kN。导线年平均运行张力取为 24.78kN，安全系数为 4.6。本工程采用降温法来补偿由于导线的塑性伸长对弧垂的影响。ACCC-300/50 导线按降温 25°C 处理。

5.4.4 运行情况

碳纤维复合芯导线在该线路上应用后，相关参数符合规范要求，运行情况良好。超高压公司对万顺 III 回线路进行了实地测量分析，得出如下结论：

- (1) 碳纤维复合芯导线试运行期间未发生各类机械、电气故障。
- (2) 更换碳纤维复合芯导线后，导线弧垂比同档原钢芯铝绞线小 3-4 米，弧垂优势更为显著。
- (3) 更换的导线在约 1000MW 负荷下，温度比相邻档钢芯铝绞线低 0-10°C，其中运行初期温差偏大，后期温差逐渐缩小。
- (4) 更换的配套专用耐张线夹与相邻档普通耐张线夹温度差别不大。
- (5) 对试运行线路段地面电场强度、磁场强度、可听噪声、无线电干扰、铁塔倾斜及扭转等参数的测量结果均满足相关标准和规定的要求。

5.5 小结

- 1) 碳纤维复合材料芯的共同特点是重量轻、线膨胀系数小，由其制作的

导线与普通导线相比，在相同标称截面积时碳纤维复合材料芯导线重量较轻或在相同重量时碳纤维复合材料芯导线标称截面积更大。因此，采用碳纤维复合材料芯导线可以提高输送容量并可避免由于容量增加使得架空输电线路导线弧垂过大、对地距离不足的问题，提高输电线路的安全稳定性。

2) 根据国内外收资调研情况可见，碳纤维复合材料芯导线的研究首先在国外发达国家开展，但应用较少；国内的相关研究工作方兴未艾，在应用数量上遥遥领先。在世界范围内碳纤维复合材料芯导线应用的最高电压等级为230kV，没有更高电压等级的应用经验。究其原因，碳纤维芯复合导线价格较贵是主要因素。

3) 通过对220kV改造线路、500kV新建线路以及特高压输电线路进行分析可知，在改造线路中使用碳纤维复合材料芯导线倍容，技术可行，在降低造价时具有巨大优势。

6 配套金具情况

6.1 新型增容导线耐热金具

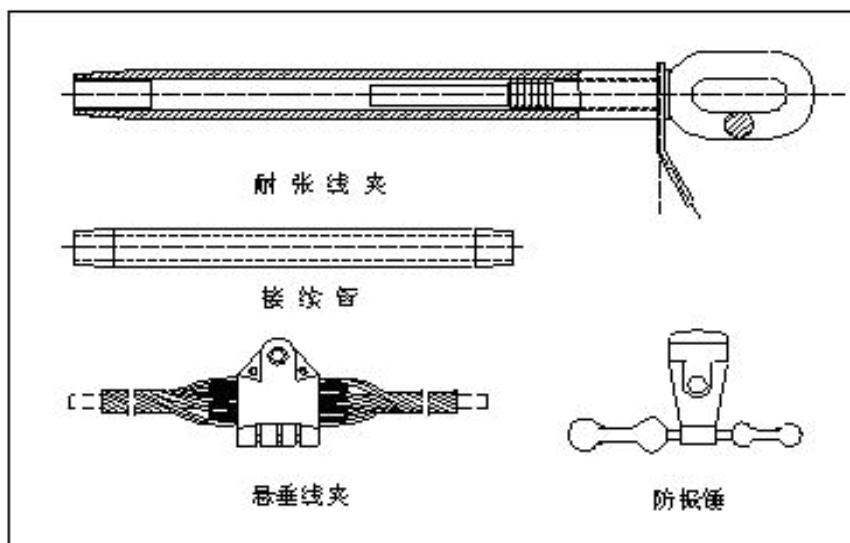


图 6-1 新型导线的配套金具

新型增容导线需要在较高温度下运行，会使导线与金具或接头的接触面发热而烧坏导线或金具，同时导线的热量容易通过金具向绝缘子传导，使绝缘子片受热不均。因此必须同步开发配套的耐热金具。作为导线的配套金具，主要包括耐张线夹、接续管、悬垂线夹和防振金具（防振锤、护线条）、补修管、间隔棒夹头橡胶。

许多金具厂家多已开发试制出该产品，如：耐张线夹采用 Y 型引流板耐张线夹，间隔棒橡胶也通过 150℃试验，2 小时橡胶性能无变化，因此耐热导线的金具与常规导线金具有所不同。

耐热耐张线夹及接续管可以在高温下满足其机械张力和电气连接的作用。同时铝管的设计超过导线截面，可增大导线的散热面积，保护绝缘子不致受热加速老化。

耐热导线配套金具的制造核心技术是设计合理的金具尺寸，保证较高温度运行时金具对导线的握力，耐热金具的制造工艺，金具的压接工艺。这三项核心技术有效地保证金具运行温度在较低的范围内，以及保证输电线路的安全运行。耐热金具设计如表所示。

表 6-1 耐热金具与普通金具对比

导线名称	钢芯铝绞线	特种增容耐热导线	
耐张金具	压接型	耐热材料，压接型(稍长) 和楔型结构	特殊材料、特殊设计、特殊 尺寸、特殊压接工艺
接续管	标准件	耐热材料，压接型(大尺寸) 和楔型结构	
悬垂金具	标准螺栓型	标准螺栓型	含耐热护线条
防振锤	标准件	标准件	含耐热护线条
		特殊施工安装工具	特殊牵引头、紧线线夹

由于新型增容导线允许使用温度为 150℃，所以与之配套的金具也应具

有耐热 150℃以上的特性，其力学性能不降低。

耐张线夹和接续管为压接型结构除具有耐热性能外，一般尺寸需略加长些，以保证与导线间有足够的拉力。

目前针对新型增容导线已研制出适应于该导线的配套金具，这些金具，无论是机械强度还是电气性能指标均满足现行国家标准、行业标准及规范的要求，满足工程的使用要求。已经有了一定的运行经验。

6.2 耐张线夹、接续管

6.2.1 碳纤维导线金具

由于碳纤维芯线不同于普通钢芯铝绞线的钢芯，芯线不能被压接，所以碳纤维复合芯导线配套用耐张线夹及接续管需采用特殊结构。此外，碳纤维复合芯导线在正常运行中，导线温度可以达到 150℃，短时运行温度可更高，这就需要其耐张压接管、接续管等导线连接金具也能承受高温度。而对于其它类别的金具，如防振锤、联板、挂板等非导线连接金具，可选用与普通导线所采用的金具一样，没有特殊要求。

碳纤维复合芯导线配套的耐张线夹一般由内锥环、外锥环、钢锚、铝衬管和铝管等五部分组成，内锥环和外锥环构成的楔型结构握紧碳纤维复合芯，再由钢锚与需要固定的部位连接，因此对碳纤维复合芯无损伤。铝股与套装于其上的铝衬管、铝管压接承担通流导电作用。铝股部分的压接与常规的用于钢芯铝绞线的耐张线夹相同。

碳纤维复合芯导线的接续管与耐张线夹原理类似，接续管包括外压接铝管和内衬铝管，外压接管内的中心设置钢连接器，连接器的两端对称连接 1 个内置楔形夹的楔形夹座握紧被接续导线芯棒端部，并在外压接管内的两侧分别设置内衬管。

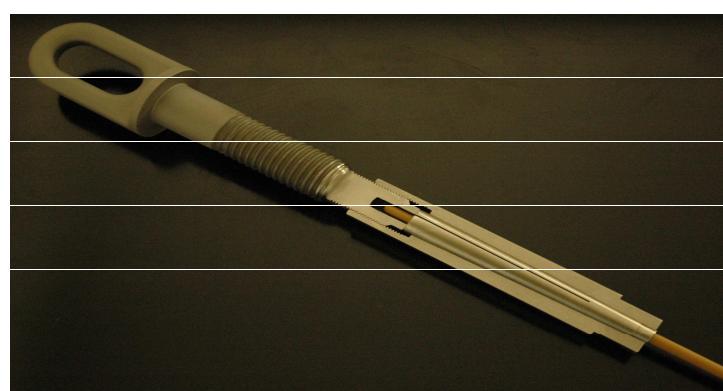


图 6.2-1 耐张金具

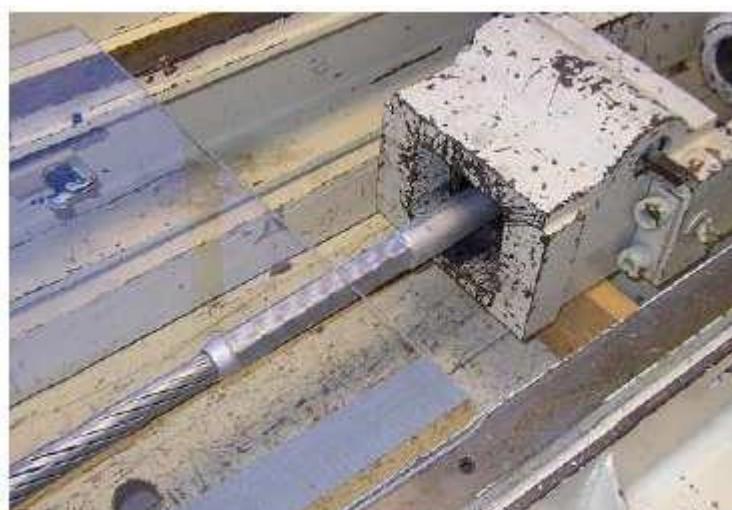


图 6.2-2 导线金具的压接



图 6.2-3 耐张压接管配件



图 6.2-4 直线压接管配件

上述金具有强度高、握力强、耐腐蚀性好以及安全性等优点，但是在碳纤维复合芯导线应用过程中，金具的楔型结构对金具的加工精度要求非常高，金具与导线配合完好才能发挥其作用，这也使得现有碳纤维复合芯导线配套金具价格昂贵，是普通钢芯铝绞线的常规金具价格的 10 倍以上。

另外，由于接续管采用了背靠背楔型结构或者类似结构的连接形式，使其长度和直径增加很多，常规接续管长度一般在 80cm 以下，而碳纤维复合芯导线使用的特殊楔接式接续管长度达到了 170cm 以上，楔接式接续管因长度过长、外径过大导致过滑车时易折断或损伤碳纤维复合芯导线，导致在使用这种接续管的情况下，碳纤维复合芯导线在施工过程中不能实现连续张力放线，这给长距离线路施工带来很大困难。

针对以上金具问题，近年来国内相关单位在有关配套金具和施工技术的问题上进行了技术攻关，取得较大突破，改变了耐张线夹和接续管的楔接式结构，采用压接方式。

6.2.2 特强钢芯软铝绞线、铝包钢芯耐热铝合金绞线、钢芯耐热铝合金绞线

这几种导线的配套金具采用耐热材料（高纯度铝合金）制造，具有高强度、高导电、强耐热的特点。耐张线夹和接续管均为压缩型，耐张线夹采用单引流板和双引流板结构，根据截面大小设计，对导线的握力强度为 95%RTS。

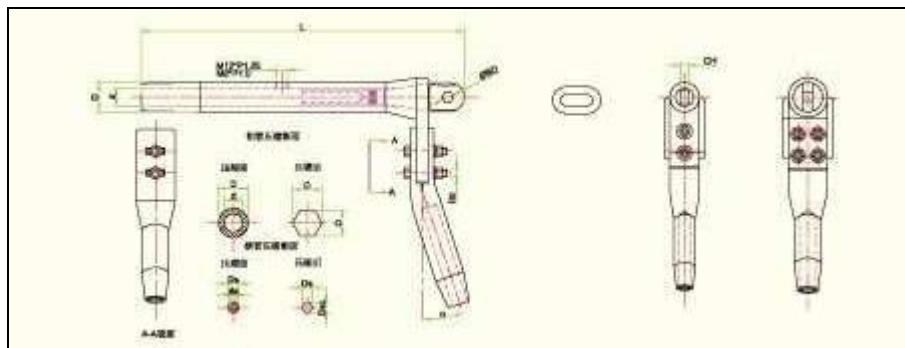


图 6.2-5 耐热压接式耐张线夹

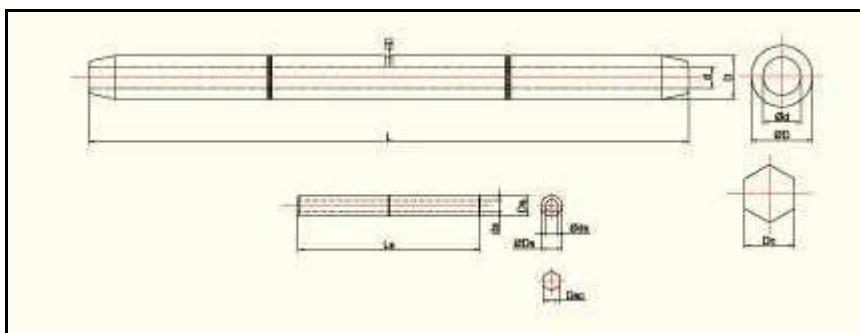


图 6.2-6 耐热压接式接续管

6.3 耐张线夹补强条

压缩型耐张金具引流板与本体是面接触，是耐张线夹最薄弱部分，容易发生过热现象，在国内线路上曾经发生过多起引流板断裂事故。为保险起见，

可以考虑引流板补强条。其作用主要有：1、具有稳定引流板的作用；2、分解耐张本体的电流作用，增加电流通道；3、防止恶劣自然环境对耐张金具的影响。

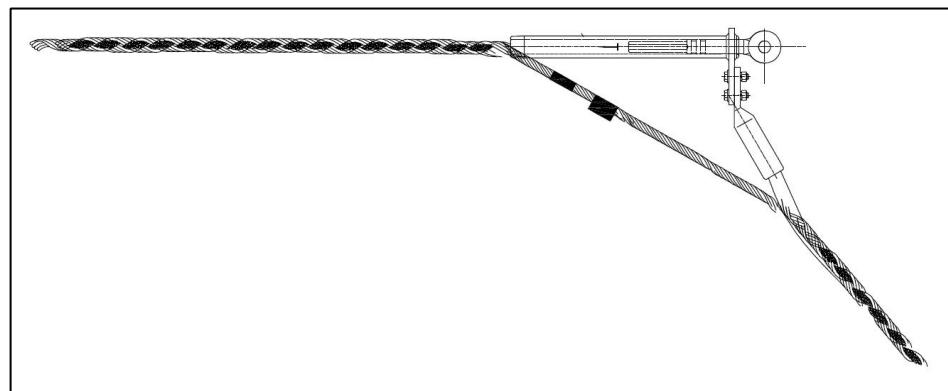


图 6.3-1 耐张线夹补强条

6.4 悬垂线夹

悬垂线夹有两种方案：1) 提包式悬垂+护线条；2) 预绞丝悬垂线夹。



图 6.4-1 提包式悬垂+护线条

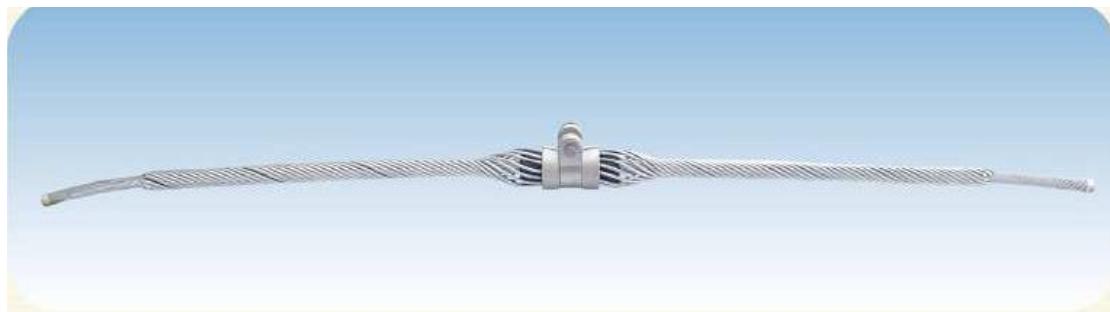


图 6.4-2 预绞丝悬垂线夹

传统悬垂线夹的线夹本体和盖板可能引起内层绞线变形和轻度的齿状压痕，虽然正常的变形和压痕对导线性能不会带来影响，特别是导体若采用软铝，软铝强度低、易擦伤，因此悬垂线夹采用有预绞丝保护导线，耐热橡胶衬垫的结构。采用目前在导线上广泛使用的单支点或双支点预绞式悬垂线夹，可避免不必要的变形和压痕。

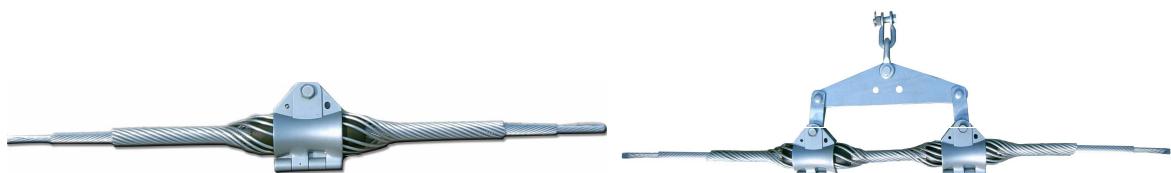


图 6.4-3 预绞式悬垂线夹

6.5 防振金具

对防振金具，由于新型导线有较优良的自阻尼特性，导线的防振措施只要借鉴常规导线即可。安装防振锤等金具时，在导线的接触处，都应该用预绞丝包裹保护。

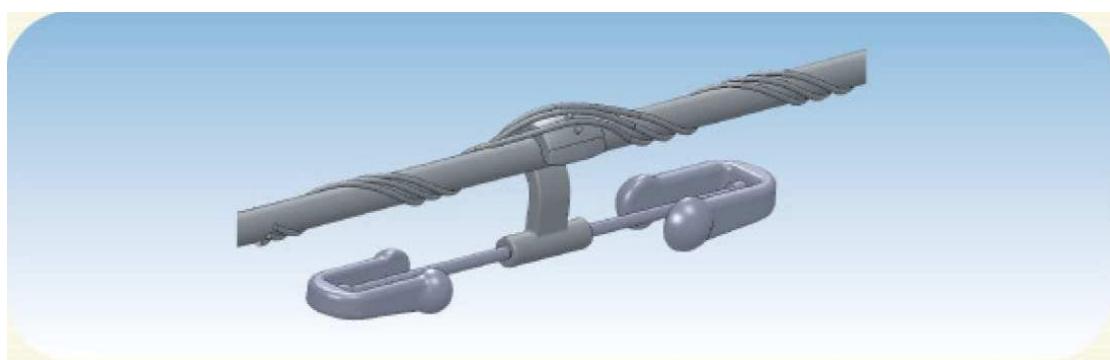


图 6.5-1 预绞丝橡胶防振锤

7 施工工艺及注意事项

7.1 铝包钢芯耐热铝合金绞线及钢芯耐热铝合金导线

铝包股钢芯耐热铝合金绞线及钢芯耐热铝合金导线与传统的架空电力线施工安装方式基本一致。必须根据具体的线路情况、施工安装单位规范和经验及施工机械，制订详细的施工方案。确保股钢芯耐热铝合金绞线及钢芯耐热铝合金导线的施工安装的顺利进行。

7.1.1 搬运方式

按以下方式搬运：

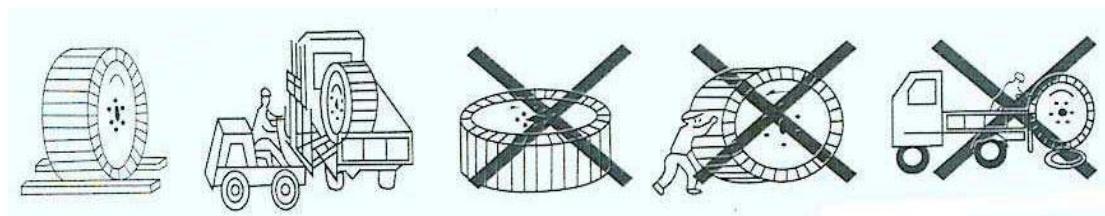


图 7.1-1 导线搬运示意图

7.1.2 导线安装

- 1) 安装导线应控制张力，保持足够的放线张力，确保任何时候导线都不会接触地面，导线线盘应合理设置，使其旋转方向与张力机一致，以避免钢丝打结。
- 2) 牵引和制动系统应平滑地运作，以防止对导线造成任何突然的撞击（人工放线时更应注意），能随时调整张力和放线速度；张力机和牵引机上应有张力指示和限制装置，使导线在任何时候都能维持特定的张力值平稳地运行。张力机、牵引机都应有灵活的制动装置，使得暂停导线时仍维持张力不变。原则使用自动保护型的制动装置。

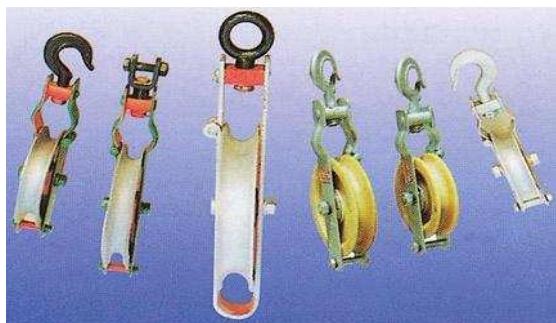


图 7.1-2 滑 轮 组

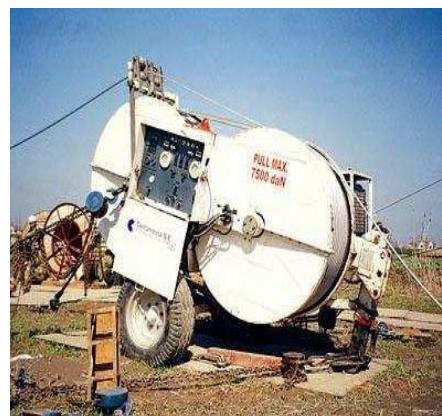


图 7.1-3 主动式液压张力机图

3) 安装前应对滑轮组进行适当的检验和维护，防止滚轮损伤，在安装前装上橡胶槽。滑轮应处于良好的工作状态，并适当地加以润滑，使导线受到平滑的牵引，以减少对导线外层绞线的磨损。滑轮应该接地，至少两个牵引端的滑轮应和杆塔一同接地。滑轮一般都与杆塔、抱箍、横担等结构直接相连，在杆塔上用一个“U”型环来保证滑轮的自由运动，用于悬挂滑轮的抱箍、横担等铁附件，应根据导线所受的张力和滑轮的型号而定。

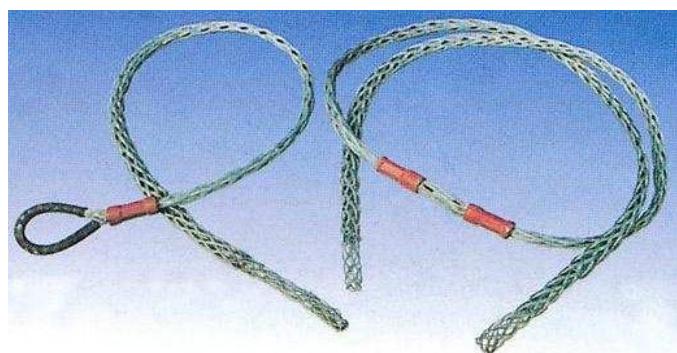


图 7.1-4 牵引网套

7.2 碳纤维复合芯导线

7.2.1 导线安装

碳纤维芯导线由于芯线能够承受导线的全部张力，因而导体部分通常选

用导电性能优良的软铝型线。软铝股的硬度、机械强度较低，储运和吊装过程中，导线的表面绝对要避免接触地面。可以在地面上铺上纸，或者其他材料来避免铝线着地。

虽然碳纤维芯强度很高，但需强调，导线牵引角度不能超过 30 度，牵引角度过大，线芯就会受到损伤。放线盘、张力机主轮和第一个放线轮，三者尽量保持直线，且第一放线轮越大越好。张力机主轮到第一个铁塔的距离，应该为放线滑车高度的 3 倍。塔上过线宜使用双滑轮，滑轮直径应大于导线直径的 20 倍（尺寸从滑轮槽底算起），滑轮槽应该用橡胶条衬好，在安装过程中保护导线表面。导线表面不能被磕损，导线应该能够通畅地从滑轮槽通过。在安装过程中，如果由于牵引角度过大，或者其他原因对导线造成了损坏，而这段导线还要承受拉力，则其损坏部分必须截断，采用直线接续管进行连接。

网套一端配有卡具，能保证拉绳过程中，导线不会旋转；在网套与导线联结一端，用两个金属夹片夹住导线，然后用胶带缠住夹片，确保防线导轮槽内的橡胶不会被损坏。紧线工作，选用预绞丝型紧线装置，勿使用接触面小的紧线器。

以上施工工艺中，有一些是针对碳纤维芯的特点，另一些是针对软铝的特点。应当指出，碳纤维芯导线的导体部分也可采用硬铝，国内厂家就有采用耐热铝合金作为导体的，相对软铝而言，采用铝合金导线可以部分程度简化施工，但无法利用软铝相对降低线损的优点。

此外，楔接式接续管长度达到 170cm 以上，楔接式接续管因长度过长、外径过大导致过滑车时易折断或损伤碳纤维复合芯导线，导致在使用这种接续管的情况下，碳纤维芯导线在施工过程中不能实现连续放线，目前施工均采用不超过 5 公里一段的分段放线方式，这给长距离线路施工带来很大困难，

施工中需要进行次数较多的转场，大大增大工作量、工作难度和施工费用。国内相关单位研制了压接式的耐张线夹和接续管，有效简化了施工工艺，大大缩短接续管长度及外径，接续管长度仅约 70cm，解决碳纤维芯导线施工过程中连续张力放线问题。

7.2.2 安装注意事项

导线施工工艺与常规钢芯铝线施工工艺基本相同，由于碳纤维导线结构的特殊性，施工应注意以下事项：

(1)因采用高温退火纯铝锥梯形排列，铝十分松软，故应采用各种措施严防导线起股和磨损。

(2)复合芯易折断，在施工和试验时，裸露复合芯稍不注意就会折断，故在牵引过程中应平稳缓慢，减少冲击力。牵引角度不能超过 30°，采用滑轮的直径和张力主轮的直径应不小于导线直径的 40 倍，紧线的同时应注意张力的选择要与导线外层铝绞线的方向相匹配，在进行挂线等工序时，应同样采用有效措施。

(3)导线压接时，应执行《架空送电线路及避雷线液压施工工艺规程》(SDJ266-87)。

(4)金具安装时，应按其结构要求进行安装。

(5)导线受外力破坏的修补问题

《架空输电线路导地线修补导则》(DL/T 1069-2007) (以下简称为《导则》) 中对碳纤维复合芯导线修补原则进行了阐述，原文为：“碳纤维复合芯由于其固有的机械特性，不可横向受压，故当其外层发生断股而确认碳纤维复合芯未受损需进行补修时，可采用补修条、护线条或接续条进行补修。对于损伤严重的情况应采用碳纤维复合芯特制补修管进行补修。”

《导则》中仅仅是定性的描述，而不是定量的描述，这对于线路在运行

中遇到实际问题指导操作性不强。损伤程度多少是采用补修条修补，损伤程度多少是采用接续管修补，损伤程度多少应割断重接等。这是线路在今后运行中的特别需要关注的难点。

(6) 红外测温的缺陷判定问题

碳纤维复合芯导线的线路，运行中红外测温的相关规范不够健全，特别是当测温结果有异常情况下如何判定是否缺陷、是否可以运用现行红外测温规范中的“相对比较法”、判定的界限标准如何取值等问题，这些都增加了线路运行的难度。

7.3 特强钢芯软铝绞线（低弧垂软铝导线）

特强钢芯软铝导线（低弧垂软铝导线）是一种同心绞合架空导体，中心加强芯为圆形特高强度镀锌钢丝（EST）绞合组成，外层导电基体由一层或多层 1350-O 全退火软铝线同心绞合组成。软铝线可制成圆形线，也可制成形线。而钢芯铝绞线（LGJ 或 ACSR）的铝股线是硬铝，这是两种导线的最大区别。全退火软铝线比硬铝线更软、更好延展性，安装和操作时更易受到影响。

7.3.1 导线安装

1) 特强钢芯软铝导线（低弧垂软铝导线）的安装操作方法与常规钢芯铝绞线(LGJ 或 ACSR)基本相同，推荐采用张力放线。

必须采用液压轮式多槽道张力机，若是单 V-槽道张力机可能导致软铝导线的损伤。张力机轮槽应为半圆形，深度不小于导线直径的 50%，槽壁的张角在 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间（相对于凹槽的中垂线），张力机轮的直径（从凹槽的底部算起）必须大于导线直径的 40 倍并不小于 1200mm。为确保外层软铝线不被刮伤，张力机轮槽中应包覆氯丁橡胶或其他合适材料，以减少磨损。为了避

免人为的增加导线扭力，导线端头在从线盘上拉出后，不能直接往张力机上缠绕，应先采用软绳缠绕在张力机上再牵引通过（见图 6-5、图 6-6）。

2) 悬挂放线滑车与展放牵引钢丝绳

放线滑轮建议采用橡胶滑轮，若是铝滑轮，其轮槽宜包覆氯丁橡胶弹性缓冲层，滑轮的支架边缘应光滑或有胶体保护，滑轮间隙不超过 10mm。滑轮槽底直径应尽可能大，建议采用 $\Phi 800\text{mm}$ 以上，在任何情况下不能小于导线直径的 20 倍，槽底宽度不得小于导线直径。放线滑轮应布置在同一直线上，且处于良好的工作状态，并适当加以润滑。对于大转角杆塔，采用组合滑轮以增大出口角度，并减少侧向压力（见图 6-7）。通过的滑轮数不多于 16 次。



图 7.3-1 主动式液压张力机



图 7.3-2 牵引机

3) 预拉

紧线后挂线前，再采用一个规定的大张力进行预拉，目的是使外层软铝线产生塑性伸长从而张力产生转移，导线在正常运行时由钢芯提供所有张力。由于铝线几乎不承受张力，导线的初始和最终弧垂、张力基本相同。预拉是降低弧垂和增强自阻尼性能的一种手段。由于软铝导线的优良自阻尼特性，因此也可以取消安装防振锤。

- (1) 利用牵引钢丝绳直接牵拉终端耐张金具或采用专用铝卡线器或预绞丝紧线器进行牵拉。
- (2) 施加张力达到规定的预拉力并持续保持 10-15 分钟。预拉力必须基于

当时环境温度下的计算张力(一般预拉力为 40%RTS)。且不能在超过 45⁰ 线路转角的放线滑轮上进行张拉。

(3) 然后卸载到较小张力,再按传统方式进行挂线,并调整最终弧垂张力。

(4) 施加预拉力卸载后,导线的铝绞层近似于松套在钢芯上。若导线完全松弛,铝层容易产生“鸟笼”,因此应使导线总是保持一定张力状态。

4.) 修补管或预绞式修补条:当导线外层铝线损伤小于 1/3 时,可采用修补管或全张力预绞式修补条恢复 95%RTS 导线张力。由于特强钢芯软铝导线(低弧垂软铝导线)的铝层几乎不受力,推荐使用预绞式修补条可简化安装(见下图)。



图 7.3-3 预绞修补条

7.3.2 安装注意事项

由于特强钢芯软铝导线特殊的结构和材料,以下方面应该给予特别关注:

1) 细心保护外表面。软铝导线的外层是全退火软铝线,必须格外小心防止导线表面受到刮擦、磨损等,不允许导线在裸露的地面、岩石、栅栏、道路保护架等上面拖拽。

2) 特强钢芯软铝导线(低弧垂软铝导线)在施工过程中出现隆起或“鸟笼”是正常现象,但要尽量避免出现这些情况。如果导线出现微小的隆起或“鸟笼”可用木块或橡皮锤敲击修复,若出现严重的损伤需用修补管或预绞丝修补条修复。

3) 特强钢芯软铝导线(低弧垂软铝导线)要用推荐的较大张力进行预拉,并持续 10-15 分钟。预张力通过测力计或经纬仪来确定。这是区别于普

通导线的最特殊的施工步骤和工艺。

4) 由于特强钢芯软铝导线（低弧垂软铝导线）的结构和材料特点决定，施工工艺较普通导线稍微复杂，所以施工进度一般较慢。随着施工经验的不断积累，施工方法的不断改进，工程进度会有大幅提升空间。

8 新型复合材料合成芯导线的应用建议和相关问题

8.1 适用范围

新型复合材料合成芯导线是一种利用提高导线允许运行温度来增加输送能力的特殊导线，与钢芯铝绞线相比价格昂贵、施工复杂、损耗较大。单从节能降耗的角度来看，采用增容导线是不经济的。但在改造线路中使用复合材料芯导线，通过选择合理的产品，可以在充分利用原线路铁塔、基础的前提下，尽量降低导线的直流电阻、降低运行温度、减少线路损耗，在降低造价方面具有巨大优势。

通过对新型复合材料合成芯导线的设计、施工和生产等多方面的调研和分析，得出建设增容导线项目应参考以下条件：

1) 限制使用的条件：

- (1) 有通道条件时不应采用；
- (2) 不应长距离使用；在使用中尽量缩短使用长度和范围；
- (2) 近期需要改造、退役的线路不应采用；
- (3) 原线路基本条件不满足架设增容导线要求时不宜使用；
- (4) 负荷较重、负载率较高的线路及电厂送出线等不宜使用；
- (5) 重要线路（由于抢修要求）不宜使用。

2) 适合使用的条件：

- (1) 没有新的架空线路通道；

(2) 线路原通道没有铁塔、基础改造条件；
(3) 线路输送容量限制时；
(4) 工程紧急，施工工期紧急时可以考虑采用；
(5) 在负荷变化比较大的线路中采用。风电具有“风”的间歇性、波动性、随机性的特点。而新型增容导线恰恰适用于这种情况，在规模不增加的同时具有较大的短时输送能力的，与风电电源的特性匹配，只要相关导线价格进入经济性合理的范围，可望在负荷变化比较大的线路中发挥重要作用。

8.2 设计原则

在改造工程中应用增容导线的基本条件：

在保持现有杆塔的载荷不变、增容导线安全系数不小于 2.5、增容导线平均运行张力不超过规程规定的条件。

对于老旧线路改造用增容导线选型而言，由于受到原有杆塔条件及运行条件的限制，只能通过提高线路运行温度来提高输送容量。通过分析可知，要满足要求，替换的增容导线单位长度重量和外径要比原有旧导线小。这样才能保证在安装时弧垂不大于原有导线。

保证增容条件下的导线弧垂不大于原线路导线 70℃下弧垂或基本一致。

在线路增容导线项目的实施过程中，要关注相关变电站设备的同步增容问题和增容导线线路建成后的运行问题。

8.3 各类型新型复合材料合成芯导线选用特点

技术经济性较好的增容导线主要有碳纤维复合芯软铝绞线。殷钢芯导线由于价格没有竞争性和弧垂特性略差，应用已在减少。碳纤维复合芯软铝绞线具有良好的弧垂特性和节能特点，但价格相对较高，复合芯棒的寿命及使用安全性还有待时间的考验和充分验证。

钢芯软铝导线是一种节能型新型导线，在新建工程中有广阔的前景。其派生产品应力转移性钢芯软型铝导线是一中具有间隙型导线特点的增容导线。

用殷钢芯导线代替同截面的钢芯铝绞线，在倍容条件下通常不能满足弧垂要求。在原线路交叉跨越间隙有裕度时以及可以更换部分杆塔时可以考虑采用；在减小殷钢芯导线铝部截面、提高导线运行温度时可以在没有大档距的工程中使用；

根据工程设计经验，对于放松导线张力、档距较小的钢管塔线路，通常采用各种增容导线在“倍容”时大多可以满足弧垂要求。

8.4 注意的问题

8.4.1 增容导线加强芯的安全性

提高导线运行温度后，增容导线及其加强芯的安全性能是否满足要求，是应用增容导线的重要问题。

根据增容导线的设计原理，当导线达到使导线铝线股承受的张力全部转移到加强芯上的温度（即拐点温度）时，加强芯的安全系数也就是增容导线的安全系数，此时的导线的安全系数最小，是验算增容导线安全性的关键。

由于不同增容导线的拐点温度不同，且随档距、环境温度等各种条件变化。如在工程中应用，应专门研究增容导线在拐点温度前后机械特性。计算增容导线在不同条件下、拐点附近的导线及加强芯安全系数，以满足工程要求。

8.4.2 增容导线的损耗分析

由于增容导线是一种利用提高导线允许运行温度来增加输送能力的特殊导线，所以工程可行性研究中应分析增容导线的热损耗对增容导线经济性的

影响。

增容导线的损耗 $W=I^2R$, 与线路长度、导线直流电阻、运行温度及运行时间成正比, 与输送电流的平方成正比。

通过对几种主要增容导线应用中的发热计算结果看来。

1) 以 $2\times LGJ-300/25$ 导线为例, 其正常输送电流(按经济电流密度考虑)下导线运行温度约 $53\text{--}58^\circ\text{C}$ (环境温度 $35\text{--}40^\circ\text{C}$)。由于增容导线替代的是两根同截面的钢芯铝绞线, 在正常运行条件下增容导线的运行温度约为 90°C , 所以其损耗是被替代导线的 2 倍以上。从广义上说增容导线不是节能导线。

2) 当线路在非正常运行状态下“倍容”送电时, 增容导线的损耗是被替代的两根同截面的钢芯铝绞线的 2.5-3 倍左右, 单回路功率损耗约 450kW/km 。

3) 由于输送容量增加、运行温度增高, 线损较被替代的常规钢芯铝绞线增加的比例较高。由于“倍容”状态为非正常运行状态, 时间并不长, 所以如果增容导线线路长度较短时, 能量损耗相对并不很大。

8.4.3 导线标准化问题

由于目前增容导线结构型式诸多、型号繁杂, 导致导线选型工作繁杂, 给今后金具研制等工作也带来一定困难。

建议进一步完善碳纤维复合芯导线和其他增容导线在国内应用的系列化、标准化工作, 并形成国内标准。为以后线路设计和导线选型提供参考依据, 尽可能发挥增容导线的各项优势性能。

8.4.4 增容导线的施工和运行中存在的问题

增容导线在我国输电线上使用还处于起步阶段, 目前国内相关施工、验收的标准、规范大部分还是空白状态, 这为线路的验收、运行等工作带来了根本性的难度。据了解《碳纤维复合芯铝绞线施工工艺及验收导则》最近

已通过审查，使碳纤维导线的施工及验收有据可依。

增容导线在 220kV 线路上的应用，已经积累了一定的施工和运行经验。在 500kV 线路中虽已应用，但只有一条且运行时间较短，故施工和运行经验尚不足，500kV 以上电压等级的输电线上更是空白，需要进一步的摸索。

8.4.5 增容导线的应用前景

增容导线与同截面铝绞线相比价格较高，虽然价格已由过去的 8-10 倍降至目前的 2-5 倍，但还是影响了其使用的经济性。本文通过导线年费用比较，提出了各种新型复合材料合成芯导线在工程应用时的价格平衡点。希望随着碳纤维复合芯的国产化和批量生产，其价格也能有所下降，为其在工程推广使用中创造条件。

8.4.6 复合芯导线运行寿命的评估

复合芯导线如碳纤维导线的特点是芯主要由碳纤维和热硬化性树脂复合而成。在纤维性能一定的情况下，树脂的配方对复合芯性能起到了关键作用。复合芯的性能首先由树脂基体配方决定，不同的配方会导致复合芯的性能不尽相同，包括其老化性能，运行寿命不同，如何评估整根碳纤维复合芯导线的热老化寿命（包括老化终止性能指标选择，数学模型确立，环境当量的确定，寿命的预估等）还要进行很多工作。

9 结论

9.1 技术特点

各种增容导线的特点虽然各不相同，但均能通过提高线温，不同程度上提高载流量，提高线路输送能力。从增容导线的耐热机理来说，耐热铝合金导线是单纯从材质上更新，碳纤维芯导线、特强钢芯软铝绞线和殷钢（铝包殷钢）导线是从材质和结构的总体上更新。耐热铝合金导线材质与结构与钢

芯铝绞线类似，耐热性能源于外层导电基体用耐热铝合金线(TA1)代替普通硬铝线(HA1)，使其能在较高的温度下保持正常的工作机械强度；其他三种增容导线外层导电基体也由耐热铝合金或软铝构成，使其耐热性增强，另外，它们的温度迁移点都较钢芯铝绞线低，在温度逐渐升高至超过迁移点的过程中，铝部受力逐渐减小直至张力全部转移到承力芯上，由此获得较低的弛度，减小了弧垂，同时由于导电基体受力小或不受力，在高温条件下运行安全度更高。

9.2 综合经济比较

通过对不同导线方案输电线路本体投资的分析，得出以下结论：

(1) 按导线生产厂家报价计算，新型增容导线方案初期投资的优劣依次为：加强钢芯耐热铝合金导线、高强钢芯软铝导线、碳纤维芯软铝导线（碳纤维芯耐热铝合金导线）、铝包股钢芯软铝导线。

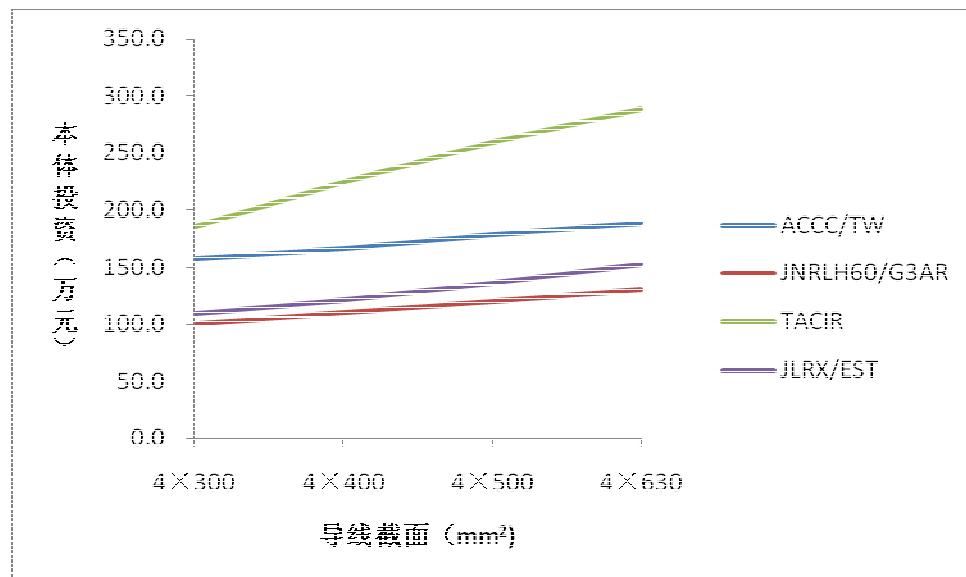


图 8-1 新型增容导线本体投资

(2) 4×ACCC/TW-310、4×ACCC/TW-413、4×ACCC/LH-500、4×ACCC/LH-630、4×ACCC/TW-619 导线的本体投资较 4×LGJ-630/45 导线增

加约 38.1 万元/km (+32%)、46.5 万元/km (+39%)、58.7 万元/km (+49%)、69.1 万元/km (+58%)、70.1 万元/km (+59%)。

(3) 加强钢芯耐热铝合金导线 4×JNRLH60/G3A-300/40、4×JNRLH60/G3A-400/50、4×JNRLH60/G3A-500/45 比 4×LGJ-630/45 导线的本体投资减少 8.8 万元/km (-7.4%)、7.2 万元/km (-6.0%)、1.6 万元/km (-1.3%)，4×JNRLH60/G3A-630/45 比 4×LGJ-630/45 导线的本体投资增加 11.0 万元/km (+9.2%)。

(4) 4×TACIR-300/50、4×TACIR-400/65、4×TACIR-630 导线的本体投资较 4×LGJ-630/45 导线增加 66.0 万元/km (+55.3%)、106.2 万元/km (+89%)、169.6 万元/km (+142.2%)。

(5) 4×JLRX/EST-300/40 比 4×LGJ-630/45 导线的本体投资减少 10.5 万元/km (-8.8%)，4×JLRX/EST-400/52、4×JLRX/EST-500/65、4×JLRX/EST-630/80 导线的本体投资较 4×LGJ-630/45 导线增加 2.0 万元/km (+1.7%)、15.4 万元/km (+12.9%)、33.8 万元/km (28.3%)。

(6) 按本体投资相等为控制条件推算导线价格，得出以下结论：

1) ACCC/TW-310、ACCC/TW-413、ACCC/LH-500、ACCC/TW-619 导线价格可比 LGJ-630/45 导线增加约 26.5%、21.2%、6.0%、7.5%；ACCC/LH-630 导线价格应比 LGJ-630/45 导线减少约 -4.6%。

2) JNRLH60/G3A-300/4、JNRLH60/G3A-400/50、JNRLH60/G3A-500/45 比 4×LGJ-630/45 导线价格可比 LGJ-630/45 导线增加 12.8%、6.7%、0.5%；JNRLH60/G3A-630/45 导线价格应比 LGJ-630/45 导线减少 5.8%。

3) TACIR-300/50、TACIR-400/65 导线价格可比 LGJ-630/45 导线增加 14.7%、7.9%；TACIR-630 导线价格应比 LGJ-630/45 导线减少 5.1%。

4) JLRX/EST-300/40、JLRX/EST-400/52、JLRX/EST-500/65 导线价格可

比 LGJ-630/45 导线增加 11.6%、7.2%、2.6%；JLRX/EST-630/80 导线价格应比 LGJ-630/45 导线减少 5.1%。

通过对不同导线方案输电线路综合经济比较，得出以下结论：

(1) 按年费用比较，常规钢芯铝导线最优，新型增容导线方案的优劣依次为：加强钢芯耐热铝合金导线、高强钢芯软铝导线、碳纤维芯软铝导线（碳纤维芯耐热铝合金导线）、铝包股钢芯软铝导线。

(2) 4×ACCC/TW-310、4×ACCC/TW-413、4×ACCC/LH-500、4×ACCC/LH-630、4×ACCC/TW-619 导线的年费用比 4×LGJ-630/45 导线增加约 14.0 万元/km、9.8 万元/km、9.2 万元/km、8.0 万元/km、8.0 万元/km。

(3) 4×JNRLH60/G3A-300/40、4×JNRLH60/G3A-400/50、4×JNRLH60/G3A-500/45、4×JNRLH60/G3A-630/45 导线的年费用比 4×LGJ-630/45 导线增加约 8.2 万元/km、4.7 万元/km、2.4 万元/km、1.4 万元/km。

(4) 4×TACIR-300/50、4×TACIR-400/65、4×TACIR-630 导线的年费用比 4×LGJ-630/45 导线增加 17.2 万元/km、16.7 万元/km、19.1 万元/km。

(5) 4×JLRX/EST-300/40、4×JLRX/EST-400/52、4×JLRX/EST-500/65、4×JLRX/EST-630/80 导线的年费用比 4×LGJ-630/45 导线增加 8.5 万元/km、4.9 万元/km、3.9 万元/km、3.5 万元/km。

(6) 按年费用相等为控制条件推算导线价格，500 截面以下的新型增容导线，由于电能损耗的大大增加无任何优势，即新型增容导线价格应低于 LGJ-630/45 导线。等截面碳纤维芯软铝（碳纤维芯耐热铝合金）导线具有一定优势，碳纤维芯耐热铝合金导线 ACCC/TW-630 的价格可比 LGJ-630/45 增加 6.7%，碳纤维芯软铝导线 ACCC/TW-619 的价格可比 LGJ-630/45 增加 23.0%。

(7) 同塔双回输电线路应用等截面和等外径碳纤维芯软铝（碳纤维芯耐热铝合金）导线，其价格可比钢芯铝导线价格增加约 30.0%。

(8) 新型增容导线发热允许输送容量(150℃)远比 LGJ-630/45 导线(80℃)大， 500mm^2 截面的碳纤维芯软铝导线（碳纤维芯耐热铝合金导线）比 LGJ-630/45 增加 70% (50%)，即碳纤维芯导线具有很强的发热输送能力，在清洁能源发电的并网送出具有使用潜力。

(9) 相对于传统导线，新型增容铝导线具有能在高温条件下安全运行，提高运行温度能够大幅提高输送容量等优点，随着碳纤维材料成本的降低，以及碳纤维芯铝导线的价格降低，在输电线路中采用该导线将具有突出的经济效益。

9.3 碳纤维复合材料芯软铝导线

碳纤维复合材料芯软铝导线的力学、热学、电学特性均优于传统导线，它综合解决了架空输电领域存在的各项技术瓶颈，代表了未来架空导线的技术发展趋势。中国目前在开展碳纤维复合芯导线开发研究的单位超过10家。碳纤维复合材料芯导线能否在新建线路和扩容改造工程中的应用，不仅要在技术上可行还要在经济上合理，因此要结合具体的工程进行技术经济比较。

1) 碳纤维复合材料芯的共同特点是重量轻、线膨胀系数小，由其制作的导线与普通导线相比，在相同标称截面积时碳纤维复合材料芯导线重量较轻或在相同重量时碳纤维复合材料芯导线标称截面积更大。因此，采用碳纤维复合材料芯导线可以提高输送容量并可避免由于容量增加使得架空输电线路导线弧垂过大、对地距离不足的问题，提高输电线路的安全稳定性。

2) 根据国内外收资调研情况可见，碳纤维复合材料芯导线的研究首先在国外发达国家开展，但应用较少；国内的相关研究工作方兴未艾，在应用数量上遥遥领先。在世界范围内碳纤维复合材料芯导线应用的最高电压等级为

230kV，没有更高电压等级的应用经验。究其原因，碳纤维芯复合导线价格较贵是主要因素。

3) 通过对220kV改造线路进行分析可知，在改造线路中使用碳纤维复合材料芯导线倍容，技术可行，在降低造价时具有巨大优势；碳纤维导线在500kV输电线路工程中已有所应用，使碳纤维复合材料芯导线在高电压等级中的应用成为可能。

9.4 配套金具及施工问题

新型增容导线需要在较高温度下运行，普通金具会使导线与金具或接头的接触面而烧坏导线或金具，同时导线的热量容易通过金具向绝缘子传导，使绝缘子片受热不均。因此必须同步开发配套的耐热金具。

本文对厂家研发试制的新产品进行了介绍。作为导线的配套金具，主要包括耐张线夹、接续管、悬垂线夹和防振金具（防振锤、护线条）、补修管、间隔棒夹头橡胶。这些金具，无论是机械强度还是电气性能指标均满足现行国家标准、行业标准及规范的要求，满足工程的使用要求。已经有了一定的运行经验。

9.5 小结

本文对国内输电线路中4种新型复合材料合成芯导线的应用进行了系统研究，在充分调研、收资、分析、研讨的基础上，归纳总结了国内多年来在增容导线项目建设中的经验，

对目前应用的新型增容导线进行了全面的计算，系统地分析比较了各种导线的技术、经济特点，以及施工、运行方面的主要特征。

通过各类型新型复合材料合成芯导线的电气、机械和技术经济等方面的比较，得出不同类型导线的选用特点。提出了新型增容导线在工程中的适用

条件及使用范围，及增容导线应注意的相关问题。为推进新型复合材料合成芯导线在工程中的应用，建设资源节约型、环境友好型电网提供依据。

参考文献：

- [1] 尤传永.架空输电线路新型复合材料合成导线的开发研究 [J].电力建设.
- [2] 牛海军, 万建成, 董玉明, 等.碳纤维复合芯梯形软铝导线的研究开发 [J].电力建设.
- [3] 梁旭明, 余军, 尤传永.新型复合材料合成芯导线技术综述 [J].电网技术.
- [4] 尤传永.耐热铝合金导线的耐热机理及其在输电线路中的应用 [J].电力建设.
- [5] 尤传永.架空输电线路钢芯软铝绞线的应用研究 [J].电力建设.
- [6] 中国电力工程顾问集团公司.新型导线在输电线路上的应用.