

低压电力电缆用扇形与圆形导体的经济性分析

李高强¹ 马俊杰¹ 张强¹ 马发展²

1.河南金水电集团有限公司, 河南 新乡 453000

2.河南工学院, 河南 新乡 453000

[摘要]在低压电力电缆领域, 扇形导体和圆形导体在电缆外径、导体截面、材料成本、加工工艺等方面存在诸多差异, 为了对比低压电力电缆扇形与圆形铜导体的经济成本和加工工艺性能, 结合不同材料价格、加工工艺、生产效率、质量稳定性等方面, 来分析采用扇形导体与圆形导体的低压电力电缆的整体经济性、可靠性以及产品质量的稳定性, 为后续低压电力电缆在选择导体方面提供参考。

[关键词]低压电力电缆; 扇形导体; 圆形导体; 经济性

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20246

中图分类号: TM244

文献标识码: A

Economic Analysis of Sector and Circular Conductors for Low-voltage Power Cables

LI Gaoqiang¹, MA Junjie¹, ZHANG Qiang¹, MA Fazhan²

1. He'nan Jinshui Cable Group Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453000, China

2. He'nan Institute of Technology, Xinxiang, He'nan, 453000, China

Abstract: In the field of low-voltage power cables, there are many differences between sector conductors and circular conductors in terms of cable outer diameter, conductor cross-section, material cost, processing technology, etc. In order to compare the economic cost and processing performance of sector conductors and circular copper conductors in low-voltage power cables, combined with different material prices, processing technology, production efficiency, quality stability, etc., the overall economy, reliability, and product quality stability of low-voltage power cables using sector conductors and circular conductors are analyzed, providing reference for the selection of conductors in low-voltage power cables in the future.

Keywords: low-voltage power cables; fan-shaped conductor; circular conductor; economy

引言

低压电力电缆作为电力传输的基础元件, 其导体结构设计直接影响产品性能、成本及企业运营效率。大约从 90 年代一直持续到 2010 年左右, 电线电缆行业普遍采用扇形导体, 因其能通过截面紧凑化减少成缆填充、钢带和护套材料消耗从而节省成本^[1], 另外采用扇形导体的成品电缆外径小便于运输、敷设安装等。近年来很多电缆企业开始逐步转向圆形导体, 这一趋势引发行业内对导体结构的选择逻辑进行重新审视。另外扇形导体成型方式的选择同样影响着导体的质量和成本^[2], 本文主要分析常规压轮紧压生产的扇形导体, 对于异型单丝或者分裂导体的扇形导体不在此列。

本文重点以铜导体为例, 通过对电缆外径尺寸、材料价格、工艺优缺点、生产效率等多维度切入, 以低压电力电缆 YJV-0.6/1kV、YJV22-0.6/1kV 两种型号系列规格为例来分析扇形导体与圆形导体的经济性。本文主要以铜导体为例。

1 电缆结构参数及材料成本比较

由于电线电缆用扇形导体一般在 50mm² 及以上规格, 本文即从 50mm²~300mm² 为例, 选四等芯规格来举例介绍, 另外由于铜材的价值较大, 本文主要以铜导体为主来进行说明。

1.1 电缆外径及材料用量

首先是非铠装电缆, 针对扇形导体和圆形导体的电缆成品外径尺寸以及主要材料用量见表 1 和表 2。从成品电缆外径上来讲, 圆形导体的电缆外径偏大, 大约超出扇形导体成品电缆外径约 3~6mm, 然而针对大截面电力电缆外径达几十毫米, 这个外径的差别在安装敷设过程中是可以忽略不计的。材料用量上由于扇形导体有尖角, 另外扇形的外周长(等效圆周长)要比同规格圆形的周长长, 因此绝缘材料的用量扇形导体电缆要超过圆形导体电缆, 一般在 4%~8%^[3]之间, 而整根电缆的材料用量则还是圆形导体电缆的略高。

表 1 扇形铜导体非铠装电缆外径及材料用量

型号电压	规格/mm ²	电缆外径/mm	铜导体/(kg/km)	XLPE 绝缘/(kg/km)	填充/(kg/km)	无纺布/(kg/km)	PVC 护套/(kg/km)	总重/(kg/km)
YJV-0.6/1kV	4*50	26.3	1754.89	130.71	19.00	18.24	211.08	2114.91
	4*70	30.6	2456.84	161.59	19.00	21.63	260.18	2900.24
	4*95	35.0	3334.46	186.65	19.00	25.19	315.02	3861.32
	4*120	38.6	4211.73	227.94	40.00	27.83	380.34	4847.83
	4*150	43.4	5264.66	297.15	40.00	31.61	447.63	6041.06
	4*185	47.9	6492.90	370.49	40.00	35.02	535.78	7434.20
	4*240	53.5	8423.45	448.49	40.00	39.35	645.80	9557.10
	4*300	60.9	10528.60	546.10	40.00	45.18	790.24	11910.13

注：本表 1 及后续表 2~表 8 的数据均为理论计算数据，仅供参考。

表 2 圆形铜导体非铠装电缆外径及材料用量

型号电压	规格/mm ²	电缆外径/mm	铜导体/(kg/km)	XLPE 绝缘/(kg/km)	填充/(kg/km)	无纺布/(kg/km)	PVC 护套/(kg/km)	总重/(kg/km)
YJV-0.6/1kV	4*50	29.6	1754.89	110.32	119.58	21.01	239.85	2126.06
	4*70	34.7	2456.84	146.42	170.81	25.06	297.68	2925.99
	4*95	38.8	3334.46	167.52	218.10	28.28	350.54	3880.80
	4*120	43.1	4211.73	204.34	271.51	31.53	426.82	4874.41
	4*150	47.9	5264.66	266.93	342.84	35.39	497.24	6064.23
	4*185	53.4	6492.90	341.52	431.26	39.67	601.78	7475.87
	4*240	59.7	8423.45	409.76	544.08	44.52	724.97	9602.70
	4*300	65.9	10528.60	483.50	669.99	49.38	859.15	11920.63

表 3 扇形铜导体铠装电缆外径及材料用量

型号电压	规格/mm ²	电缆外径/mm	铜导体/(kg/km)	XLPE 绝缘/(kg/km)	填充/(kg/km)	无纺布/(kg/km)	PVC 内衬层/(kg/km)	钢带/kg/km	PVC 护套/(kg/km)	总重/(kg/km)
YJV22-0.6/1kV	4*50	29.4	1754.89	130.71	19.00	18.24	107.00	175.77	249.50	2436.10
	4*70	35.5	2456.84	161.59	19.00	21.63	151.74	524.34	333.48	3649.61
	4*95	40.0	3334.46	186.65	19.00	25.19	175.09	600.08	394.45	4715.93
	4*120	44.0	4211.73	227.94	40.00	27.83	225.77	663.74	471.92	5828.92
	4*150	48.7	5264.66	297.15	40.00	31.61	254.74	744.27	545.78	7138.22
	4*185	53.6	6492.90	370.49	40.00	35.02	322.43	824.27	647.87	8692.99
	4*240	59.2	8423.45	448.49	40.00	39.35	360.29	916.36	767.87	10955.82
	4*300	66.6	10528.60	546.10	40.00	45.18	411.26	1040.35	923.93	13495.43

表 4 圆形铜导体铠装电缆外径及材料用量表

型号电压	规格/mm ²	电缆外径/mm	铜导体/(kg/km)	XLPE 绝缘/(kg/km)	填充/(kg/km)	无纺布/(kg/km)	PVC 内衬层/(kg/km)	钢带/(kg/km)	PVC 护套/(kg/km)	总重/(kg/km)
YJV22-0.6/1kV	4*50	32.7	1754.89	110.32	119.58	21.01	122.14	199.34	279.79	2487.49
	4*70	39.6	2456.84	146.42	170.81	25.06	174.24	597.30	374.72	3774.57
	4*95	43.7	3334.46	167.52	218.10	28.28	195.39	665.90	433.35	4824.91
	4*120	48.4	4211.73	204.34	271.51	31.53	254.07	742.38	522.44	5966.47
	4*150	53.2	5264.66	266.93	342.84	35.39	283.68	824.71	599.52	7274.90
	4*185	59.2	6492.90	341.52	431.26	39.67	363.04	923.05	718.95	8879.13
	4*240	65.4	8423.45	409.76	544.08	44.52	405.53	1026.39	852.70	11162.34
	4*300	71.7	10528.60	483.50	669.99	49.38	448.01	1129.73	997.43	13636.66

其次是铠装电缆，针对扇形导体和圆形导体的电缆成品外径尺寸以及各部分材料用量见表 3 和表 4。圆形导体的电缆外径比扇形导体电缆外径略微偏大，偏大约 3~6mm。材料用量上同样是扇形导体的绝缘材料用量高于圆

形导体的绝缘材料用量，而整根电缆的材料用量则还是圆形导体电缆略高。

1.2 电缆材料成本及材料价格占比

在实际生产过程中，相同规格的扇形导体和圆形导体，

在满足导体电阻标准要求的情况下实际用量是有差异的。我们下面计算电缆原材料价格的时候首先假定同规格的扇形导体与圆形导体的用量一致，先不考虑导体用量的差异来进行分析（见上表 1~表 4）。

结合当前材料价格，按交联聚乙烯绝缘料 11.0 元/kg、聚丙烯撕裂填充 5.0 元/kg、无纺布 14.0 元/kg、镀锌钢带 18.0 元/kg、聚氯乙烯护套 8.0 元/kg，计算采用扇形导体与采用圆形导体的成本差异情况。

对于非铠装电缆，表 5 与表 6 分别为铜材价格不同时的价格和比例，说明铜价越高，成缆后 PVC 护套材料的价格占比越低，大截面的只有 1.5%左右；而单看表 5 或表 6，在不考虑导体铜用量差异的情况下，铜价 75000 元/吨时圆形导体电缆的材料成本价格略贵，但与扇形导体电缆的材料成本差异基本在 0.5%左右。而表 6 显示在铜价为 35000 元/吨时，圆形导体电缆与扇形导体电缆的材料价格差异也仅仅在 1.0%左右。

表 5 非铠装电缆价格差异（铜价 75000 元/吨时）

型号 电压	规格 /mm ²	扇形导体电缆					圆形导体电缆				
		铜导体		PVC 护套		电缆 材料价 /（元/米）	铜导体		PVC 护套		电缆 材料价 /（元/米）
		单价 /（元/米）	价格占比	单价 /（元/米）	价格占比		单价 /（元/米）	价格占比	单价 /（元/米）	价格占比	
YJV-0.6/1kV	4*50	131.62	96.5%	2.96	2.17%	136.36	131.62	96.0%	3.36	2.45%	137.08
	4*70	184.26	96.9%	3.64	1.92%	190.08	184.26	96.3%	4.17	2.18%	191.25
	4*95	250.08	97.3%	4.41	1.72%	257.00	250.08	96.8%	4.91	1.90%	258.32
	4*120	315.88	97.4%	5.32	1.64%	324.30	315.88	96.9%	5.98	1.83%	325.90
	4*150	394.85	97.5%	6.27	1.55%	405.03	394.85	97.0%	6.96	1.71%	406.96
	4*185	486.97	97.5%	7.50	1.50%	499.23	486.97	97.0%	8.42	1.68%	501.86
	4*240	631.76	97.7%	9.04	1.40%	646.48	631.76	97.2%	10.15	1.56%	649.76
	4*300	789.65	97.8%	11.06	1.37%	807.55	789.65	97.4%	12.03	1.48%	811.03

表 6 非铠装电缆价格差异（铜价 35000 元/吨时）

型号 电压	规格 /mm ²	扇形导体电缆					圆形导体电缆				
		铜导体		PVC 护套		电缆 材料价 /（元/米）	铜导体		PVC 护套		电缆 材料价 /（元/米）
		单价 /（元/米）	价格占比	单价 /（元/米）	价格占比		单价 /（元/米）	价格占比	单价 /（元/米）	价格占比	
YJV-0.6/1kV	4*50	61.42	92.8%	2.96	4.47%	66.16	61.42	91.8%	3.36	5.02%	66.88
	4*70	85.99	93.7%	3.64	3.97%	91.81	85.99	92.5%	4.17	4.48%	92.97
	4*95	116.71	94.4%	4.41	3.57%	123.62	116.71	93.4%	4.91	3.93%	124.94
	4*120	147.41	94.6%	5.32	3.42%	155.83	147.41	93.6%	5.98	3.80%	157.43
	4*150	184.26	94.8%	6.27	3.22%	194.44	184.26	93.8%	6.96	3.55%	196.37
	4*185	227.25	94.9%	7.50	3.13%	239.52	227.25	93.8%	8.42	3.48%	242.14
	4*240	294.82	95.2%	9.04	2.92%	309.55	294.82	94.2%	10.15	3.24%	312.82
	4*300	368.50	95.4%	11.06	2.86%	386.40	368.50	94.5%	12.03	3.08%	389.89

对于铠装电缆，由于成缆后增加了内衬层聚氯乙烯和铠装层镀锌钢带两种材料，相比非铠装电缆而言铜导体的价格占比有所下降，特别是铜价低的时候，见表 8 铜价 35000 元/吨时，铜导体的价格占比达到了 88%左右，而且根据表 8 的电缆材料价格比较，扇形导体电缆与圆形导体电缆的单位材料价格差异平均在 1.73%左右；而根据表 7 来看铜价在 75000 元/吨时，铜材占比还在 94%左右，

扇形导体电缆与圆形导体电缆的单位材料价格差异在 0.86%左右。

由此看来，以铜价 75000 元/吨的情况下，扇形导体电缆与圆形导体电缆的材料价格相比而言看，非铠装电缆的价差只有 0.5%，铠装电缆也就 0.86%左右，相比较于市场铜价材料波动、企业管理成本或者说能耗管理等来讲，这个成本的差异也就相当于一个运费罢了。

表 7 铠装电缆价格差异（铜价 75000 元/吨时）

型号 电压	规格 /mm ²	扇形导体电缆					圆形导体电缆				
		铜导体		铠装钢带 价格占比	PVC 护套 价格占比	电缆 材料价 /（元/米）	铜导体		铠装钢带价 格占比	PVC 护套价 格占比	电缆 材料价 /（元/米）
		单价 /（元/米）	价格占比				单价 /（元/米）	价格占比			
YJV22-0.6/1kV	4*50	131.62	94.4%	2.27%	1.43%	139.42	131.62	93.7%	2.55%	1.59%	140.53
	4*70	184.26	92.2%	4.72%	1.34%	199.76	184.26	91.1%	5.32%	1.48%	202.22
	4*95	250.08	93.3%	4.03%	1.18%	267.94	250.08	92.5%	4.43%	1.28%	270.43
	4*120	315.88	93.9%	3.55%	1.12%	336.51	315.88	93.0%	3.94%	1.23%	339.50
	4*150	394.85	94.3%	3.20%	1.04%	418.56	394.85	93.6%	3.52%	1.14%	421.91
	4*185	486.97	94.7%	2.88%	1.01%	514.33	486.97	93.9%	3.20%	1.11%	518.71
	4*240	631.76	95.3%	2.49%	0.93%	662.96	631.76	94.6%	2.77%	1.02%	668.15
	4*300	789.65	95.6%	2.27%	0.89%	825.89	789.65	95.0%	2.45%	0.96%	830.90

表 8 铠装电缆价格差异（铜价 35000 元/吨时）

型号 电压	规格 /mm ²	扇形导体电缆					圆形导体电缆				
		铜导体		铠装钢带 价格占比	PVC 护套 价格占比	电缆 材料价 /（元/米）	铜导体		铠装钢带价 格占比	PVC 护套价 格占比	电缆 材料价 /（元/米）
		单价 /（元/米）	价格占比				单价 /（元/米）	价格占比			
YJV22-0.6/1kV	4*50	61.42	88.7%	4.57%	2.88%	69.22	61.42	87.3%	5.10%	3.18%	70.33
	4*70	85.99	84.7%	9.30%	2.63%	101.48	85.99	82.7%	10.34%	2.88%	103.95
	4*95	116.71	86.7%	8.03%	2.35%	134.56	116.71	85.2%	8.75%	2.53%	137.05
	4*120	147.41	87.7%	7.11%	2.25%	168.04	147.41	86.2%	7.81%	2.44%	171.03
	4*150	184.26	88.6%	6.44%	2.10%	207.98	184.26	87.2%	7.02%	2.27%	211.32
	4*185	227.25	89.3%	5.83%	2.04%	254.62	227.25	87.7%	6.42%	2.22%	258.99
	4*240	294.82	90.4%	5.06%	1.88%	326.02	294.82	89.0%	5.58%	2.06%	331.21
	4*300	368.50	91.0%	4.63%	1.83%	404.75	368.50	89.9%	4.96%	1.95%	409.76

2 扇形导体与圆形导体生产加工性能比较

2.1 工艺的难易程度

由于扇形导体在生产过程中采用压轮紧压成型，扇形导体对压辊孔型设计^[4]要求较高，模具的加工精准度也比较高。早期还有采用双压轮紧压成型的，实际生产过程中由于不同操作工习惯不同，扇形高度的控制结果就不相同，很容易造成生产过程中导体电阻不合格，当然最近几年新型的采用拉模生产电缆扇形导体的工艺技术^[5]相对会好一点，如果有导体电阻不合格现象出现，对于铜导体的浪费那就要高得多了。另外据《扇形导体截面的工艺控制改进》中提到扇形导体的交检合格率只有 92.9%^[6]，扇形导体的平均合格率较低，当然近几年来随着设备工装、工艺水平的提高扇形导体的合格率有所提高，但是仍然达不到圆形导体的合格率。

另外扇形导体与圆形导体从导体电阻上来讲，由于扇形导体对导体进行的紧压和延伸变形大，要达到同样的导体电阻的情况下，相同规格的铜导体扇形导体的称重截面比圆形导体的称重截面一般要大 1%~2%，被压得形变大的估计多得更多，这样实际成本来讲扇形电缆导体的铜材料成品要高于相同规格圆形导体电缆。

2.2 导体通用性

对于扇形导体来讲，电缆根据不同的芯数，都需要有相对应型号的压轮模具来生产对应截面的扇形导体，比如 3 等芯电缆导体的扇形角度是 120°、4 等芯电缆导体的扇形角度是 90°、5 等芯电缆导体的扇形角度是 90°、3+1 芯电缆的扇形角度是 100° 等，这就造成每一种规格的扇形导体都需要做一定的库存。如果不做库存，在生产过程中生产得多了，就只能等待做对应相同芯数

和规格的扇形导体的时候使用，特别是短头线更麻烦。这就造成了扇形线芯导体的一定程度的积压从而占用资金，或者是将剩余的端头导体报废处理从而也会增加废品费用。

而圆形导体的紧压模具针对不同芯数来讲同规格只需要一个，针对不同芯数的电缆，如 1 芯、2 芯、3 芯、4 芯、5 芯、3+1 芯、4+1 芯等，圆形导体的紧压模具同截面都是通用的，这样能极大地降低生产过程中的成本，不同芯数规格的导体可共享模具，导体半成品库存周转率也可提升 30% 以上。

2.3 生产效率

一方面从生产速度上，由于扇形导体采用压轮紧压成型，有的还采用双压轮紧压，生产速度相比较圆形导体而言会慢。另外由于扇形导体有很多种扇角类型，如 90° 、 100° 、 120° 、 180° 等，同样就有很多种紧压轮，每一种都有上压轮和下压轮。在生产过程中如果要生产不同的规格，（例如做完扇形导体 240mm^2 换 120mm^2 ），或者同种规格的不同芯数类型的扇形导体（例如 3 芯电缆的 120mm^2 扇形导体完成后，换做 3+1 芯电缆的 120mm^2 扇形导体），这种情况都需更换压轮规格，而且压轮的种类较多、重量重，需要用心做好模具的管理。而圆形导体则没有类似情况，只有很小的一个拉拔模具，生产过程中更省心。

2.4 产品质量稳定性

首先扇形导体由于压形过程中有扇角，在挤塑绝缘过程中绝缘的最薄点比较难控制，为了保证绝缘层厚度合格很容易造成测量的绝缘平均厚度偏厚，这样也就增加了材料用量。另外再加上线芯的扇角是锐角，成缆时容易造成线芯表面划痕或绝缘开裂，影响产品质量。第三扇形导体的绝缘线芯在成缆的时候需要退扭，成缆过程中很容易造成扇形绝缘线芯翻身或者成缆后蛇形。第四扇形导体有尖角，尖角处易产生局部放电，电压过高长期运行可能引发绝缘老化。而圆形导体在挤出绝缘的时候就简单多了，而且圆形绞线不存在尖角，所以电场更加均匀，绝缘厚度也更加容易控制。

3 结束语

对于低压电力电缆，选择扇形导体或者圆形导体在国标 GB/T 3956^[7]以及产品标准 GB/T12706^[8]里面是没有强制要求的。然而从成本角度分析，扇形导体电缆本身的材料成本稍微低一点，但是扇形导体的生产技术要求较高，往往伴随着较高的废品率，而且扇形导体线芯通用性不强，导体半成品容易积压或者浪费。相比之下，圆形导体的生产难度较小，废品率也相对较低，产品质量稳定，通用性强，笔者认为圆形导体相对扇形导体略有优势。总体而言，扇形导体和圆形导体各有优缺点，企业在选择时需要根据自身需求和条件做出合适的选择。

[参考文献]

- [1]张仲韬,张伟,刘威.铜、铝扇形导体拉拔紧压工艺的研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2019,11(6):11-12.
- [2]王洪祥,李启,吴玉飞.电缆扇形导体成型方式浅析[J].光纤与电缆及其应用技术,2020,10(1):23-24.
- [3]张林锐,程斌.基于 MathCAD 的扇形与圆形导体电缆成本分析[J].机电信息,2016,11(9):47-50.
- [4]周俊民,蒋炜华,王松显,等.紧压扇形导体压辊孔型的最佳设计方案[J].电线电缆,2010,12(4):39-42.
- [5]张宏涛.电缆导体绞合新技术探索与应用[J].电气技术与经济,2021,12(4):35-39.
- [6]柏凌,生长飞.扇形导体截面的工艺控制改进[C].中国电工技术学会:2003 导体与装备技术研讨会论文集,2003.
- [7]全国电线电缆标准化技术委员会.电缆的导体:GB/T3956-2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [8]全国电线电缆标准化技术委员会.额定电压 1kV($U_m=1.2\text{kV}$)到 35kV($U_m=40.5\text{kV}$)挤包绝缘电力电缆及附件第 1 部分:额定电压 1kV($U_m=1.2\text{kV}$)和 3kV($U_m=3.6\text{kV}$)电缆:GB/T12706.1-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

作者简介:李高强(1982—),男,河南濮阳人,工程师,河南工学院电线电缆专业毕业,现就职于河南金水电缆集团有限公司,从事电线电缆工艺技术、产品设计研发及质量管理工作。