

出版者的話

随着工农业的大跃进，各省、市、专区、县和有条件的农业生产合作社，都在迅速地建設着中小型的火力发电厂和水电站。因之电气工人必将大量增加。为了适应电气工人的技术学习和工作的需要，我們决定出版一套“发电厂和变电所的电气工人丛书”。这套丛书共二十三册，内容包括：发电厂和变电所的电气设备概論；发电机和調相机；电机的檢修和試驗；交流电动机和励磁机；发电厂和变电所的自用电；电力变压器和調压装置；开关设备；配电装置；电纜；电力整流装置；蓄电池；繼电保护和二次回路；电气仪表；发电厂和变电所的过电压保护；发电厂和变电所的安全设备和用具；发电厂和变电所的自动控制和信号设备；发电厂和变电所的遙远测量和遙远調整；发电厂和变电所的通訊设备；发电机和发动机的安裝；电力变压器的安裝；开关安裝和母綫的安裝等。文字通俗易懂，沒有高深的理論，并适当地附了一些插图来帮助理解文字叙述；它能使具有高小至初中文化程度的电气工人比較系統地从書中得到发电厂和变电所电气设备的結構、性能、安裝、运行和維護等各方面的知識。

因为担任这套丛书編写工作的各位作者写作进度不一，所以这套丛书将不根据順序出版，而是根据作者脫稿的先后陸續出版。在編写这套丛书时，我們考虑了丛书的系統性，也考虑了每册的独立性，所以不按順序出版，对讀者的影响不会太大。我們誠懇的希望讀者提出宝贵意見。

目 录

第一章 概說	5
1. 電纜的簡單历史	
2. 電纜的用途及其优缺点	
第二章 電纜的構造	7
3. 電纜構造的主要部分	
4. 不同型式的電纜構造及其优缺点	
5. 各种电力電纜的牌号及其应用范围	
6. 電纜構造質量的檢查	
第三章 電纜的敷設	28
7. 電纜綫路的选择	
8. 電纜敷設的方法	
9. 在寒冷季节敷設電纜的措施	
第四章 電纜接头盒和終端盒	45
10. 電纜接头盒和終端盒的作用及其基本要求	
11. 電纜終端盒的种类及其不同型式的优缺点	
12. 35千伏以下接头盒和終端盒的制作	
13. 電纜接头工作时应注意事項	
第五章 電纜載流量的确定	72
14. 电力電纜的最高容許溫度及其周圍溫度	
15. 电力電纜容許連續載流量的确定	
16. 電纜短期过負荷和短路容量的計算	
第六章 電纜的試驗	84
17. 電纜試驗的种类和目的	
18. 纜芯导体电阻的測量	
19. 电容的測量	

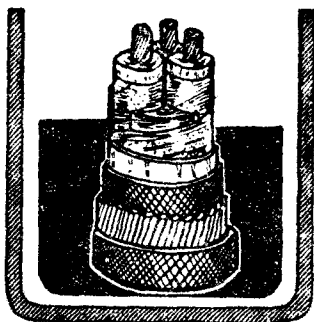
20. 正序阻抗及另序阻抗的測量	
21. 絕緣电阻試驗	
22. 介質損失角的測量	
23. 交流耐压試驗	
24. 直流耐压試驗	
25. 絕緣的加速老化試驗	
第七章 電纜綫路故障原因的分析及防止对策	106
26. 故障的定义及分类	
27. 故障情况的檢查和資料的收集	
28. 故障原因的分析	
29. 接头及終端头的常見故障	
30. 防止電纜事故的基本措施	
第八章 電纜綫路故障測寻的方法	116
31. 故障性質的确定	
32. 低电阻接地或短路故障的測寻	
33. 高电阻接地或短路故障的測寻	
34. 完全断綫故障的測寻	
35. 不完全断綫故障	
36. 断綫并接地故障	
37. 閃絡性故障	
38. 声測試驗	
第九章 控制電纜	132
39. 控制電纜的結構及型式	
40. 控制電纜的安裝	
第十章 電纜的运行、維護与技术管理	136
41. 電纜綫路的运行	
42. 電纜綫路的維護	
43. 電纜綫路的技术管理	
附录一 電纜容許載流量及矯正因数表	147
附录二 多芯電纜的基本电气常数	151

電 纜

鄭 肇 驥 著

第 十 冊

发电厂和变电所的电气工人叢書



水利电力出版社

出版者的話

随着工农业的大跃进，各省、市、专区、县和有条件的农业生产合作社，都在迅速地建設着中小型的火力发电厂和水电站。因之电气工人必将大量增加。为了适应电气工人的技术学习和工作的需要，我們决定出版一套“发电厂和变电所的电气工人丛书”。这套丛书共二十三册，内容包括：发电厂和变电所的电气设备概論；发电机和調相机；电机的檢修和試驗；交流电动机和励磁机；发电厂和变电所的自用电；电力变压器和調压装置；开关设备；配电装置；电纜；电力整流装置；蓄电池；繼电保护和二次回路；电气仪表；发电厂和变电所的过电压保护；发电厂和变电所的安全设备和用具；发电厂和变电所的自动控制和信号设备；发电厂和变电所的遙远测量和遙远調整；发电厂和变电所的通訊设备；发电机和发动机的安裝；电力变压器的安裝；开关安裝和母綫的安裝等。文字通俗易懂，沒有高深的理論，并适当地附了一些插图来帮助理解文字叙述；它能使具有高小至初中文化程度的电气工人比較系統地从書中得到发电厂和变电所电气设备的結構、性能、安裝、运行和維護等各方面的知識。

因为担任这套丛书編写工作的各位作者写作进度不一，所以这套丛书将不根据順序出版，而是根据作者脫稿的先后陸續出版。在編写这套丛书时，我們考虑了丛书的系統性，也考虑了每册的独立性，所以不按順序出版，对讀者的影响不会太大。我們誠懇的希望讀者提出宝贵意見。

目 录

第一章 概說	5
1. 電纜的簡單历史	
2. 電纜的用途及其优缺点	
第二章 電纜的構造	7
3. 電纜構造的主要部分	
4. 不同型式的電纜構造及其优缺点	
5. 各种电力電纜的牌号及其应用范围	
6. 電纜構造質量的檢查	
第三章 電纜的敷設	28
7. 電纜綫路的选择	
8. 電纜敷設的方法	
9. 在寒冷季节敷設電纜的措施	
第四章 電纜接头盒和終端盒	45
10. 電纜接头盒和終端盒的作用及其基本要求	
11. 電纜終端盒的种类及其不同型式的优缺点	
12. 35千伏以下接头盒和終端盒的制作	
13. 電纜接头工作时应注意事項	
第五章 電纜載流量的确定	72
14. 电力電纜的最高容許溫度及其周圍溫度	
15. 电力電纜容許連續載流量的确定	
16. 電纜短期过負荷和短路容量的計算	
第六章 電纜的試驗	84
17. 電纜試驗的种类和目的	
18. 纜芯导体电阻的測量	
19. 电容的測量	

20. 正序阻抗及另序阻抗的測量

21. 絕緣电阻試驗

22. 介質損失角的測量

23. 交流耐压試驗

24. 直流耐压試驗

25. 絕緣的加速老化試驗

第七章 電纜綫路故障原因的分析及防止对策106

26. 故障的定义及分类

27. 故障情况的檢查和資料的收集

28. 故障原因的分析

29. 接头及終端头的常見故障

30. 防止電纜事故的基本措施

第八章 電纜綫路故障測寻的方法116

31. 故障性質的确定

32. 低电阻接地或短路故障的測寻

33. 高电阻接地或短路故障的測寻

34. 完全断綫故障的測寻

35. 不完全断綫故障

36. 断綫并接地故障

37. 閃絡性故障

38. 声測試驗

第九章 控制電纜132

39. 控制電纜的結構及型式

40. 控制電纜的安裝

第十章 電纜的运行、維護与技术管理136

41. 電纜綫路的运行

42. 電纜綫路的維護

43. 電纜綫路的技术管理

附录一 電纜容許載流量及矯正因数表147

附录二 多芯電纜的基本电气常数151

第一章 概 說

1. 電纜的簡單历史

電纜的使用，远在 140 年前就已开始。最初是用于電訊和炸矿方面，1812 年俄国科学家 И. И. 西林格第一个試驗成功，他用橡皮帶絕緣的電纜埋在涅瓦河底来炸矿，以后据說又在慕尼黑附近的伊薩江中安裝了一条通訊電纜。此后英、美、德各国也相繼創造了一些不同形式的原始電纜，其中包括把銅綫裝在玻璃管中，以及用松香、洋干漆、瀝青等来浸漬紗麻，包在導綫外面作为絕緣。橫越美国紐約港的水底通訊電纜是用橡皮絕緣的，外面用黃麻和瀝青保护，在 1842 年投入运行。1866 年橫越大西洋的海底電纜是用馬來樹膠絕緣的，外面裝了鉄絲裝甲。到 1879 年白熾电灯出世之后，電纜在电力方面的使用才开始了新阶段。高压电力電纜的发展約在 1890 年开始；这时英国的 10 千伏電纜在倫敦安裝成功，这条電纜是用紙帶包在銅管外面做成的，每段約 20 呎，全長 30 哩。与此同时，鉛包銅絞綫的電纜也开始制造了。自 1890 年到 1910 年的二十年間，電纜技术沒有很大进步，20 千伏的三芯電纜在 1910 年以后才逐漸普遍使用，而 35 千伏的電纜則在第二次世界大战时才开始制造。那时虽然对于高的电压采取了加厚絕緣的办法，但是由于对三芯統包型電纜在設計上的一些缺点沒有充分加以估計，所以造成了很多故障。这种缺点直至屏蔽型電纜发明之后才得到解决。到目前为止，所有高压和超高压的電纜都仍旧采用这种型式，它是德国科学家 M. 霍斯司特达在 1914 年发明的，因此常用

他的名字首一个字母H来代表它。至1923年苏联工程师C.M. 布拉根和C.A. 雅可夫列夫又进一步創造了分相鉛包電纜，它除了具有与屏蔽型同样的优点外，还有很多其他的优点。这种電纜在英美各国常常叫做HSL型，其中SL兩字即是分相鉛包的意思。

2. 電纜的用途及其优缺点

在电力工业和有綫電訊工程中，電能的傳送必須依賴金屬导体，这些导体通常叫做電綫。虽然在发电和送电部分还有很多其他設備如发电机、变压器、开关、刀閘、保險等，但是電綫的投資一般要大大超过这些設備中任何一个項目，因此電綫的設計和运用就具有特殊的意义。不仅如此，電綫的分布遍及于城市的每个角落，对于公共的安全也有重大关系。在建筑物与居民密集的地区，交通道路兩側地位有限，不允許架設杆塔和輸電綫，在这种情形下就必须采取其他方式来放置電綫。同样，在发电厂和变配电所中，要引出很多的架空綫路，住往也因地位不够受到限制。这些問題都需要一种既安全可靠又节省地位的電綫来取得解决，这就是電纜的主要作用。電纜的導綫和架空導綫起着同样的送电作用，但是它的絕緣是用比較空气好得多的絕緣材料，所以能够大大减少綫与綫間的距离。由于電纜的技术日新月异，制造質量不断提高，应用的範圍亦隨之日广。

電纜和架空綫比較，有次列的优点：（1）供电可靠，不受外来扰乱的影响例如雷击、风害、挂冰、风箏和鳥害等，架空綫路常見的断綫、倒杆、瓷瓶閃絡和破碎以及導綫摆动造成的短路和接地事故等也不存在；（2）对公共比較安全；（3）不需在路面架設杆塔和導綫，使市容整齐美观，（4）不

受路面建筑物的影响，易于在城市中供电工业地区；（5）运行簡單方便，維護工作少，費用低；（6）電纜的电容有助于提高功率因数。

電纜虽然有上述的优点，但也有缺点：（1）成本昂貴，投資費用大，約为架空綫的 10 倍；（2）敷設后不易更动，不适宜于临时性的使用；（3）綫路分支不易；（4）寻找故障困难，不能象架空綫一样可以看見；（5）修理費時間，費用大；（6）需要受过特別訓練的電纜技工。

第二章 電纜的构造

3. 電纜構造的主要部分

電纜的構造主要包括三个部分，即导体、絕緣层和保护包皮。导体是用以傳导电流的通路，它必須具有高度的导电性以减少电力在綫路上的損耗；絕緣层是用以隔离导体使与其他导体以及保护包皮互相隔离，它必須經久耐用，有一定的耐热性能，保持絕緣質量不变；保护包皮是用以保护絕緣层使其在运输、敷設和运用中不受外力的损伤和水分的侵入，它具有一定的机械强度，并且在油浸紙絕緣電纜中，还有防止絕緣油外流的作用。

导体 銅是制造電纜导体最常用的金屬，这是因为它的导电性好，导热率高，而且易于冷加工使其变形以适应制造的要求。除了純銀之外，銅的导电系数最高，鋁約为銅的 62% 左右。但因为鋁的比重輕，在运输上和敷設上有一定的便利，所以也常被采用，尤以第二次世界大战后数年中，銅的价格不断上漲，影响制造成本，鋁的使用就更加多了。由

于铝的导电系数较铜为低，在同样的长度和电阻下，铝制导体的截面积约为铜的1.65倍。换言之，即输送相同的容量时，其直径与铜制导体之比为 $\sqrt{1.65}:1$ 或1.28倍，结果使绝缘和保护包皮的材料都相对的加多，电缆总的外径也加大了。铜和铝的比重分别为8.9及2.7，如果按同样长度和相等电阻的情况计算，则铜的重量约为铝的两倍，所以就裸电线而言，假如铝和铜价格之比不大于2，则采用铝线当较为经济。

导体一般是由多股的小线绞合而成，这样可以增加电缆的柔软性，允许在一定程度内的弯曲而不变形，以保证制造工艺和安装敷设的可能性。电缆的可曲性大约和绞线数目的平方根成正比，绞线愈多弯曲愈易；但是电缆的可曲性同时也受到外面保护包皮的限制，所以绞线过多往往会徒然增加制造上的困难，对于可曲性仍是无补于事。制造电缆导体用的铜线和普通架空用的硬拉铜线不同，它必须经过轧炼以恢复其可延性和导电性。导线的绞合一般分为数层，为了使绞合均匀，防止扭歪现象，各层绞绞的方向是相反的；这样，可以使每层导线都有相对固定位置不易散开，而且当遭受弯曲时，每层导线的伸长程度也相同。导体的截面积各国的标准不同，苏联和我国制造的电缆均采用下列的标准截面积：0.75；1.0；1.5；2.5；4；6；10；16；25；35；50；70；95；120；150；185；240；300；400；500；625；800；1000平方公厘。

各种不同电压的电缆并不全部按照上列的截面积来制造。截面积在35平方公厘以内的规定可用单根导线，不必用绞线。垂直敷设用的干绝缘电缆，使用单根导线的截面积还可适当地加大，以简化制造手续和降低成本。

絕緣層 制造電纜用的絕緣可分為均勻質的和纖維質的兩類，前者包括橡膠、瀝青、聚乙烯、聚丁烯等，后者包括棉、麻、絲、綢、紙等。這兩類材料的差異從絕緣的質量方面來說，主要在於吸收水分的程度不同。

均勻質的絕緣具有高度抗潮性，不需要外面的金屬保護包皮，但這類材料很容易受空氣，特別是熱空氣，和光綫的直接影響而變壞。橡膠絕緣遇到汽油，煤油以及其他油類和它們的化合物時很快會被損壞。橡膠絕緣的耐熱性差，所以容許的運用溫度較低，在高電壓下它容易受電量作用產生罅裂，因此到現在為止，用這類材料制造的電纜，最高電壓還沒有超過10千伏。它的使用大半限於小的低壓配電綫、路燈、信號、操作綫路等。這類電纜的可曲性比較好，能够在嚴寒的氣候下敷設，因為電纜內部沒有浸漬絕緣劑，所以特別適用於垂直安裝。

纖維質的絕緣極易吸收水分，使絕緣性能完全受破壞，因此它必須借外面的包皮來防止水分的侵入。為了提高絕緣質量，這類材料必須除去所含水分并用適當的絕緣劑加以浸漬。電力電纜，特別是高壓的，大多採用浸漬紙絕緣，這是因為它和其他絕緣比較具有次列的優點：（1）價格便宜；（2）耐熱能力強，經常運用溫度可達 90°C ；（3）介質損耗低，耐壓强度高；（4）經久耐用，一般可使用50年左右；（5）不易受電量的氧化作用，適宜於制造高壓電纜。

浸漬紙絕緣電纜的可曲性比較差，而且不能在低溫時敷設，否則絕緣會受損傷。由於絕緣層內浸漬絕緣劑的流動，一般不宜作兩端水平位置相差過大的傾陡或垂直安裝。

制造紙絕緣電纜所用的紙，從前多採用馬尼拉紙，主要由舊繩索的纖維物體制成；這種材料現在已很少用，而改用

質量較好的木漿紙。木漿紙是用化學方法將各種木材制成漿液，除去其中不穩定的成分后制成的，厚度一般為0.1~0.2公厘。電纜用的紙在制造過程中不可使用膠料，在漂白和烘干方面亦有一定的限度，否則會影響電氣的特性和使用的壽命。良好的電纜絕緣紙必須符合下列的要求：（1）機械強度好；（2）雜質少（不應含有酸鹼等物質）；（3）纖維長；（4）易于吸收浸漬的油劑。

未經浸漬的絕緣紙帶（15公厘寬，250公厘長）其沿長度方向的拉力強度約為70公斤每公厘厚；沿寬度方向的拉力強度則較差，約為長度拉力的一半。

浸漬紙絕緣用的絕緣劑可由二種油類制成：（1）礦物油如石油、汽缸油、變壓器油等；（2）植物油如松脂油、木松脂、樹脂松脂等。

礦物油類採用較為廣泛，主要有白蠟型和焦油腦型二種，前者屬於開鏈式的炭氫化合物，后者則屬於閉鏈式的。根據過去試驗證明各種不同的油如不含雜質和水分，其耐壓強度均相仿，且和粘度沒有什麼關係。在20°C時用13公厘直徑球極，4公厘間隙試驗可達70~100千伏左右。其膨脹系數在10~100°C內約為0.0006~0.0008每度攝氏。

為了使紙絕緣能夠得到充分的浸漬，一般質地松的紙可用粘度較高的絕緣劑，質地密的紙則需要用粘度較低的絕緣劑；但不論在那一種情況下，粘度都不應因溫度的增高而降低得太快。合乎理想的是在浸漬紙絕緣的過程中（105~130°C），絕緣劑的粘度要很低，使易于浸漬，而在電纜最高容許運用溫度下，它仍保持相當的粘度，不會造成在電纜內部過易的流動。

除了對粘度的要求外，浸漬絕緣劑還必須具有良好的潤

滑性，以减少電纜在弯曲时紙絕緣受损伤，同时并应符合下列电气性能和稳定性的要求：（1）介質損耗低；（2）不易氧化；（3）不易受外物染污；（4）不易产生气体游离。

欧洲各国制造的電纜多采用松香与矿物油的混合剂，約含15~30%的松香。美国則認為松香对介質損耗不利，故多改用質量較厚的純石油。

保护包皮 为了保护絕緣使不受损伤起見，電纜外面都有保护包皮。各种電纜所用的保护包皮不尽相同，膠皮絕緣電纜的包皮主要目的在于防止光綫、空气和机械的損害，浸漬紙絕緣電纜的包皮則必需是防水的，同时也防止浸漬絕緣剂外流和机械的損害。鉛在很早以前就被認為是最好的包皮材料，这是因为：（一）它的熔化点低，在制造过程中不会使紙絕緣过热而损坏；（二）韌性好，質軟，不影响電纜的可曲性；（三）化学性能呆鈍，不易受酸碱等的化学作用。鉛質柔軟对于压制鉛包固然是有利的条件，但从電纜运行方面來說，它是不利的。浸漬紙用絕緣剂的膨脹系数較鉛为大，当電纜載荷时，溫度增加，絕緣剂比鉛膨脹得快，使電纜內部产生压力，造成鉛包的过度伸展，不能够随溫度的下降而回复至原来的狀況，結果造成電纜內部的空隙，以致发生游离作用，最后使絕緣崩潰。鉛制保护包皮用于單芯電纜时，还有一个缺点，就是当交流电流通过导体时，产生磁力綫，使鉛包产生感应电压，如果電纜兩端鉛包接地，則在鉛包上將有电流循环，結果使電纜溫度增加，限制了載流量。在某些特別严重的情形下，可能影响載流量达50%左右。如果鉛包不接地或仅有一端接地，則所产生的感应电压可能危及人身的安全。鉛包電纜埋在地下时，还必須注意避免受直流杂散电流的作用而发生腐蝕。虽然鉛包皮有了上述这些缺点，

但至今还没有更好的材料可以代替它。最近几年苏联和欧美各国都在試用鋁和各种塑膠来制造電纜包皮，这些新技术还在繼續研究和发展中，它对于改善電纜質量，降低成本，都有很大的好处，不仅可以大大减少鉛料的消耗，而且可以使電纜的重量大为降低。在很多情况下，还可以延長電纜的使用寿命，因为鋁和塑膠对于酸类的抵抗力比鉛强，而且耐震的能力也較好。

为了增加電纜鉛包的机械强度起見，在鉛料中常攪以极小量的錫和銻。經驗証明，这种鉛包对于防止腐蝕也有一定的帮助。鉛包外面有一层或二层用克利苏油或瀝青浸漬过的紙帶，它可以防止水分及空气与鉛包接触发生化学腐蝕，所以叫做防腐紙帶。在有直流电流的地区，由于防腐紙帶增加了鉛包对周圍土壤的絕緣电阻，也减少了杂散电流对鉛包的电解作用。防腐紙帶外面有麻帶，可以避免鉛包受裝甲軋伤。裝甲的主要作用是防止電纜受外力損坏。裝甲有鋼絲的和鋼帶的二种，鋼絲裝甲能够承受拉力，因此水底電纜及垂直敷設的電纜都用它。電纜最外层的麻帶是用来保护裝甲，使不易銹爛。

4. 不同型式的電纜構造及其优缺点

电力電纜有單芯、双芯、三芯和四芯的。電纜芯导体的截面积占電纜总截面积的百分比愈大，使用愈經濟，多芯电力電纜就有这个优点。此外，在安裝方面采用多芯電纜也有好处，例如把電纜裝在隧管中时，可以节省隧管的数量，减少投資費用。

電纜除了芯数不同外，导体的形狀也有很多型式。它的主要目的是使電纜直徑减小，节省制造材料和減輕電纜重

量。导体的型式有圓形、腰圓形、半圓形、扇形、空心形及同心圓筒形等如图 1 所示。

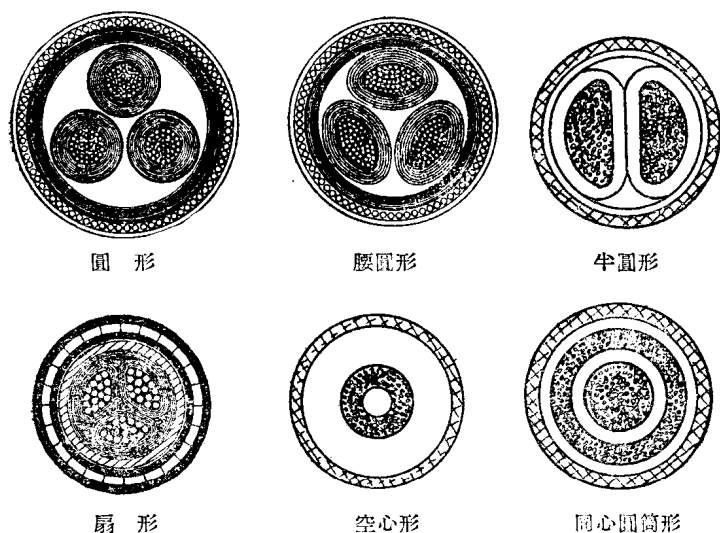


图 1 電纜芯导体的形式

單芯電纜总是圓形的，但导体銅綫在絞合过程中可用壓縮方法使其变形，使銅綫更紧密地靠在一起，以达到减少导体直径的目的（图 2）。

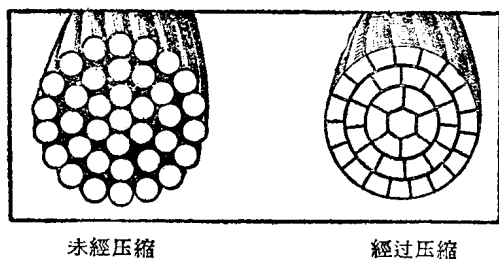


图 2 圓形電纜芯导体

三芯電纜多采用扇形及腰圓形的芯子。同樣的導體截面積，用扇形芯子可以使電纜總外徑縮小 $8 \sim 15\%$ ，重量減輕 $10 \sim 18\%$ ，因而降低成本 $10 \sim 15\%$ 。扇形導體也有缺點，就是電場分布不均勻，有尖端使應力增大，所以 $20 \sim 35$ 千伏電纜多改用腰圓形。這種型式的特点是導體受熱膨脹時，有趨向最大面積，即圓的形狀，結果短軸增長，而長軸則縮短，因此減少了機械應力，同時也減少了導體與紙絕緣間由於熱脹冷縮造成的空隙。

電纜的構造型式，除芯數及導體形狀不同外，主要可分為三種，即統包型，屏蔽型和分相鉛包型。茲將各種型式的結構及優缺點分述如下：

統包型 統包型電纜有時稱為帶條式電纜，其結構見圖3。各芯導體外包有紙絕緣，厚度視電壓而定。芯與芯間填以紙或麻的填料，連同各芯絞成圓形，外面再用紙絕緣統包起來，其厚度與電力系統的中心點接地與否有關；不接地者較厚，接地者較薄。統包絕緣的作用除了補足各芯對鉛包的絕緣外，同時也扎緊各芯子，使不會散開，減少製造上的困

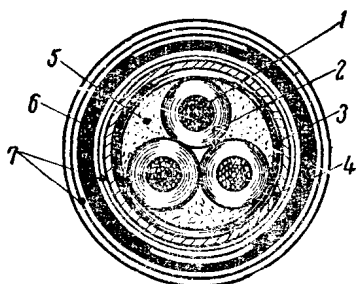


圖3 三芯統包型電纜

1—導體；2—紙絕緣；3—統包紙絕緣；4—鉛包；5—填充物；6—鋼帶甲；7—黃麻層。

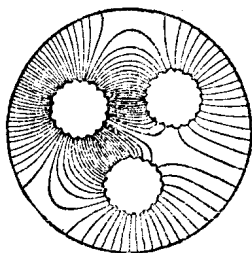


圖4 三芯統包型電纜的內部電場