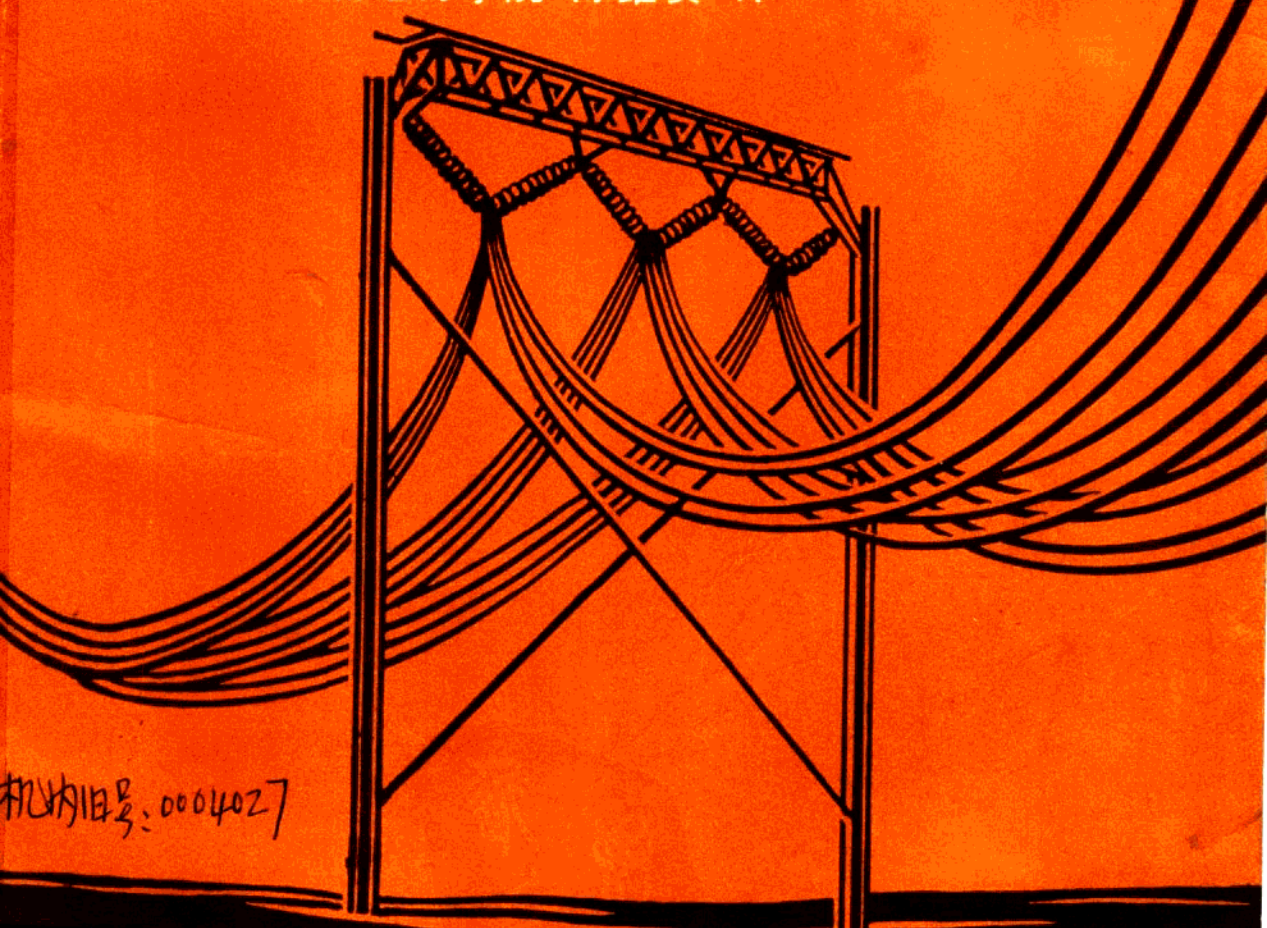


4617

动力系统 传输电能 新方法

〔苏〕Г. Н. 阿历克山德罗夫
武汉水利电力学院 陈维贤 译



机内旧号: 0004027

0004207

TM71

水利电力出版社

动力系统传输电能新方法

[苏] Г.Н.阿历克山德罗夫
武汉水利电力学院 陈维贤 译

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书是阐述电能传输新方法的一本集体专著。书中着重论述了紧凑型架空输电线路的结构,分析了在苏联电力系统中采用高自然功率线路的有效性。全书共分七章,包括动力系统中交流架空线路工作条件的一般分析,高自然功率架空线路的原理、参数及结构特点,采用高自然功率线路的效益,单相自动重合闸时高自然功率线路中潜供电弧的熄灭,远距离交流输电线路中可控电抗器与饱和电抗器的应用等。书末还列有七种附录和参考文献。

本书可供电力系统设计和运行部门的技术人员以及高等学校电气专业的师生阅读。

НОВЫЕ СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ
Г. Н. Александров

1987年

动力系统传输电能新方法

[苏] Г. Н. 阿历克山德罗夫
武汉水利电力学院 陈维贤 译

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路8号)

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10.625印张 239千字

1992年1月第一版 1992年1月北京第一次印刷

印数0001—3100册

ISBN 7-120-1344-0/TM·386

定价 8.25 元

限国内发行

中文版前言

两个问题愈来愈吸引着电工技术领域内专家们的注意力——提高输电线路的传输能力和缩小它们的几何尺寸，然而常规的办法难于解决这些问题。到目前为止，在世界范围内，对于每一个电压等级的输电线路，传统上采用了最少的每相导线分裂数，这就决定了输电线路具有最大的电感值和波阻抗，结果只能利用提高额定电压的方法来增大线路的传输能力。虽然可以采用一些附加措施（如设置串联电容补偿等）提高线路的传输能力，但也不超过30%，因而不能作为一种主要的解决办法。

提高线路的额定电压牵涉到增大它们的尺寸，而且也会增大线路场强对生物机体的影响。在中国，由于线路距离很长和人口的高度密集，上述两个问题也就显得更为突出。

这些问题的根本解决办法在于不要限制每相导线的分裂数。分裂数可以无限增加，相应地导线的电感和波阻抗就能无限下降，传输能力也就无限上升。分裂导线数的增加可以大大缩短相间距离和相应地减小线路的几何尺寸。

在呈现于中国读者面前的这一著作中，详细地叙述了高自然功率紧凑型线路的结构原理。这些内容乃是圣彼得堡工业大学与“动力网络设计院”西北分院（列宁格勒）专家们共同合作的研究成果。这一合作使得科学研究与设计工作间的脱节现象缩减到最低限度，其结果导致工业试验性的110kV紧凑型线路得以建立，并已运行两年多。分裂导线数增加一倍的220kV和330kV紧凑型线路正在西北地区和西伯利亚建造。若干条扩大分裂导线数的紧凑型线路也在设计之中，其中包括额定电压为500kV和750kV的紧凑型线路。

所有这些工作都令人信服地显示了大功率紧凑型线路很高的经济效益。

本书总结了这些线路的设计经验，它可帮助中国专家们更快地越过认识阶段而进入到紧凑型线路的大量建设方面来。在我1988年访问北京、重庆和武汉期间，中国专家所显示出来的对紧凑型线路的巨大兴趣使我能够期望本书在中国专家之间得到普及，它也能够帮助恢复俄中两国专家之间在过去数十年中所失去的创造性的科技交往。

本书的内容也许并非全部能够叙述恰当，某些缺陷会在译文之中进一步地觉察出来，因此作者期待友好的批评意见以便纠正这些缺点。

圣彼得堡工业大学教授
国际电气电子工程师学会名誉会员
格·尼·阿历克山德罗夫

献给 符·弗·米德凯维奇 院士

前 言

在本世纪的头十年中，当大学生们坐满了彼得堡的新的工学院教室之后不久，沿着公园的主干林荫大道上建立起了架空线路，其导线束悬挂在绝缘子链上。第一个档距内只有一根导线，最末档距内的导线束则有24根。在黑暗之中，可以看到对当时来说是一种新颖的现象——导线上的浅蓝色光——电晕放电，这项实验是由年轻的学者——后来成为院士的米德凯维奇所主持的。

这一实验工作的结果成为往后好几十年内电能传输技术的发展基础⁽²⁸⁾。但是最近时期来，由于发现了交流架空分裂导线的许多特点，米德凯维奇的思想得到了新的发展，这就是有可能改变导线的电感值（和波阻抗），使之与每相的分裂导线数成反比，这正如有效电阻与分裂导线数成反比的情况一样。

这样，在列宁格勒工学院①的领地上重新悬挂起一系列的平行导线，而这一次则使用了更高的新技术——2.25MV的串接试验变压器和7MV的冲击电压发生器。试验证明了将架空线路紧凑化的可能性，即可使相邻两相之间的导线距离大大靠近，并且建立起具有无限传输能力的架空线路。

由此就可形成完全新颖的电网和电力系统的建设原则，从而大大提高电力系统的经济性、可靠性和生存能力。

系统地叙述上述研究方向的成果，不仅对于从事架空线路设计、建设和运行的广大工程技术工作者，而且对于更新教学过程都是必要的。

在写作本书时，作者使用了列宁格勒工学院、莫斯科动力学院和电网设计院西北分院的研究成果，也使用了已经公布的苏联和国外的文献资料。

第1～4章由格·尼·阿历克山德罗夫编写，参编的有尤·格·舍列兹涅夫（2.4，2.5和3.3节）、格·符·波德卜尔金（3.1，3.2，3.3，3.4节）、戴·符·里索契金娜（4.1，4.2节）和依·姆·诺索夫（第4章）。第5～7章由格·阿·叶夫多古宁编写，格·尼·阿历克山德罗夫参编（第5章）。手稿的统编工作由格·尼·阿历克山德罗夫完成。

对于进一步地改进本书的意见和建议，作者将表谢忱。

格·尼·阿历克山德罗夫

① 现更名为圣彼得堡工业大学——译者注。

目 录

中文版前言

前言

绪论

第一章 动力系统中交流架空线路工作条件的一般分析	(3)
1.1 交流架空线路的结构	(3)
1.2 传输功率与自然功率的关系	(8)
第二章 高自然功率线路的原理	(14)
2.1 提高线路自然功率的结构方法	(14)
2.2 紧凑型线路原理	(21)
2.3 架空导线有效截面的选择	(27)
2.4 架空线路相线结构的优化	(30)
2.5 考虑金属杆塔影响时分裂相线结构的优化	(37)
第三章 高自然功率架空线路的参数	(40)
3.1 35~110kV平面型相线的架空线路	(40)
3.2 220kV架空线路平面型相线的结构特点及其参数	(45)
3.3 330kV及以上架空线路的参数和结构	(49)
3.4 同轴线路的参数	(53)
3.5 带有半相备用接线的超高压线路(四导线线路)	(68)
第四章 高自然功率线路的结构特点	(73)
4.1 架空线路最佳档距的选择	(73)
4.2 高自然功率线路与常规结构线路技术经济指标的比较	(81)
4.3 高自然功率架空线路绝缘支架的特点	(85)
4.4 高自然功率架空线路杆塔结构的优化	(90)
第五章 动力系统中采用高自然功率架空线路的效益	(95)
5.1 保证电力系统中的无功平衡	(95)
5.2 配电网中电压工况的优化	(98)
5.3 采用高自然功率紧凑型架空线路效益的技术经济评价	(104)
5.4 高自然功率线路的空载运行方式	(108)
第六章 单相自动重合闸时高自然功率线路中潜供电弧的熄灭	(111)
6.1 高自然功率线路中稳态潜供电流和弧道恢复电压的确定	(111)
6.2 220~500kV高自然功率线路中潜供电弧熄灭时的暂态过程	(115)
第七章 远距离交流输电线路中可控电抗器与饱和电抗器的应用	(120)
7.1 芯式可控与饱和铁磁电抗器	(120)
7.2 高自然功率的远距离输电线路	(121)

7.3	利用不同类型的电抗器限制对称线路中的过电压	(125)
7.4	可控与饱和电抗器在不对称运行方式中的工作特点	(129)
7.5	利用可控电抗器限制不同操作方式下的过电压	(132)
附录 1	35~750kV 架空线路钢芯铝线的基本计算数据 (国家标准 839-80)	(136)
附录 2	相间间隙电气强度的试验研究	(137)
附录 3	高自然功率高压线路参数的程序计算方法	(142)
附录 4	高自然功率高压线路分裂相线优化结构的草图	(144)
附录 5	110~330kV 的常规结构线路与不同分裂导线数、优化档距的高自然功率 线路的价格指标	(147)
附录 6	在任意相线排列情况下计算线路稳态运行方式的方法和程序	(153)
附录 7	交流开放电弧的数学模型	(157)
参考文献		(162)

绪 论

苏联正在大规模地进行高压和超高压架空线路的建设工作，形成了统一的电力动力系统，它实际上覆盖了全部的居民地区。架空线路的总长(km)为：

电压等级 $U_{ном}$ (kV)	1975年	1980年	1985年
35	241.6	307	350
110(150)	251.9	315.4	402
220	70.3	92.8	116.4
330	19.4	24.3	29.4
500(400)	19.4	25.5	38.1
750	1.7	2.18	6.2
1150	—	—	1.3

在这样的条件下，具有十分重要的意义的问题乃是电网建设的经济性，即在提高整个动力联合体可靠性时最大限度的降低成本，以及提高用户供电的可靠性和质量。

长时期来，电网建设中所采用的导线和线路结构基本上决定了输电能力，此输电能力接近于最小数值。为能提高这一输电能力，采取了与电网结构有关的技术措施——补偿线路感抗的串补装置，设置同步或静止补偿器以保证重负荷下的无功平衡。由于上述方法在提高输电能力方面有一定限度，在苏联以及其他国家出现了多回线路（两回以上），与此同时，由于无功电源问题又使得电网的建设难以进展。此外，这种线路的特点是电网中存在巨大的电能损耗。

建设上述具有较小输电能力电网的困难性启发出许多可供选择的电能传输方法的建议，其中包括直流输电线路和充气管道等等。

苏联和其他国家建造的带有分裂导线的架空线路很少改变上面的格局，这是因为，所采取的结构原则（固定的导线间距30~40cm）仅比同级单导线线路的传输能力略有增大。增加传输能力的指标可用每相不同导线数时的线路感抗(Ω/km)来表示：

每相导线数	1	2	3	4
线路感抗 (Ω/km)	0.4	0.33	0.30	0.28

可以看出，从一根导线转为双分裂时，感抗减小21%，三分裂时为33%，四分裂时为43%，显然，这不能保证有效地利用分裂导线的截面积。这样，导线的分裂化首先作为限制超高压线路电晕放电的一个方法，它起到稍稍增大线路传输能力的附加作用。

在第一条用分裂导线的古比雪夫-莫斯科线路上曾经设立过串联电容补偿装置（1956年），这不是偶然的。其后，串联补偿装置作为提高传输能力的一种措施曾在分裂导线的线路中加以使用。例如，60年代初期建造了伊尔库茨克-布拉茨卡雅水电站的500kV线路，导线截面为 $3 \times 500\text{mm}^2$ ，长度600km，感抗的30%受到补偿。70年代末期建成了穆尔达夫斯卡雅电站-多勃鲁查的400kV线路，导线截面为 $3 \times 500\text{mm}^2$ 和 3×400

mm^2 ，同样设置了串补装置。

在220kV及以下的线路中，由于电晕放电对导线结构的选择实际上没有影响，故曾认为这种线路不适于采用分裂导线。列宁格勒工业大学和动力网络设计院在最近十年期间的研究工作表明，按照这样的观点来建造分裂导线的输电线路乃是错误的^[3,34]。业已证明，如果导线间的距离不加限制，建造具有任何传输能力的输电线路在技术上是可行的，在经济上也是合理的，此时导线感抗（和波阻抗）与每相导线的数量成反比，相应的传输能力则与每相导线的数量成正比。

在按这样的方式来改变架空线路结构原则和导线参数的情况下，显然有必要重新考虑有关增加每相分裂导线数的问题，使之超过最小数值（决定于限制电晕放电），同时也要考虑35~220kV线路中导线的分裂问题，以便成倍地降低导线的感抗，与此同时，线路的传输能力成倍上升。这就完全可以不采用多回线路和显著扩大各个已有电压等级线路的使用范围（对传输功率和传输距离而言），并按新的方式来解决电力系统中的无功平衡问题。

这种对架空线路建设和主要设计原则的重大改变，需要仔细地论述和证明它的有效性，因为这不仅关系到改变设计者的思维方式的必要性，还要深入研究杆塔、基础和导线绝缘悬挂体的新结构，而这些则完全决定了物质器材的消耗。

第一批设计研究的新型架空线路证实了建造高传输能力线路的初始前提的正确性^[15]。

然而，本书作者与设计机构的协作经验令人信服地说明，有必要系统地阐明高传输能力线路的基本设计原则，并论证其应用在动力系统中的有效性。

本书的出版要比大规模的设计工作稍为提前，这为转向广泛使用高传输能力线路的阶段奠定了基础。

第一章 动力系统中交流

架空线路工作条件的一般分析

1.1 交流架空线路的结构

架空输电线路的主要部件是导线，它悬挂在杆塔的绝缘子上。在苏联，35kV 及以上的线路采用钢芯铝线（见附录 1），铝截面部分（有效面积）为 35mm^2 及以上（最大为 600mm^2 ）⁽¹⁹⁾，并由若干层钢芯和铝截面部分组成（图 1）。如中间为一根导线，而其它各根导线的直径相同，则第一层有六根导线，以后各层均比前层增加六根，故一层共有七根，两层 19 根，三层 37 根。同一层导线的直径相同，不同层次的导线直径可能有所不同。

当铝导线的层数为奇数时，由于存在着未被补偿的磁通，导线中的能耗将会增大，故 1986 年的电气设备规程中⁽³²⁾ 推荐采用偶数铝层数的导线。

由于导线截面包括钢芯和铝导线间的空隙，故导体部分（铝导线）的排列空间未能加以充分利用，其有效面积 F_0 与包含全导体的直径为 r_0 的圆面积不同：

$$F_0 = \pi r_0^2 \kappa_s \quad (1.1)$$

式中 κ_s 为导体的填充系数。

根据苏联国标 839—80，苏联生产的导线按其结构和机械特性可区分为以下各组：

（1）最通用的导线，铝钢截面之比为 $F_0 : F_{CT} \approx 6.2$ ，填充系数 $\kappa_s \approx 0.65$ 。本组的导线截面为 $16 \sim 400\text{mm}^2$ ，标号例子为 AC150/24。

（2）加大钢截面的导线（ $F_0 : F_{CT} \approx 0.43$ ）， $\kappa_s \approx 0.61$ ，有效截面为 $120 \sim 400\text{mm}^2$ ，主要用在多覆冰地区。

（3）减小钢截面的导线（ $F_0 : F_{CT} \approx 8$ ），其填充系数在狭窄的范围内变动： $0.66 \leq \kappa_s \leq 0.67$ 。

（4）专用加强型导线（ $E_0 : F_{CT} \approx 1$ ）， $\kappa_s \approx 0.45$ ，截面 $185 \sim 500\text{mm}^2$ ，在通过大河和水障时使用；另有用作避雷线的导线，其 $\kappa_s \approx 0.35$ ，截面为 70mm^2 和 95mm^2 （AC70/72 和 AC95/141）。

计算用的导线的物理机械性能如表 1 所示。

目前，35~110kV 架空线的每相导线只用一根，330kV 及以上架空线路采用分裂导线，220kV 线路则有时采用分裂导线。

从单根导线转向分裂导线，这取决于限制电晕的需要，电晕会引起无线电干扰和电晕

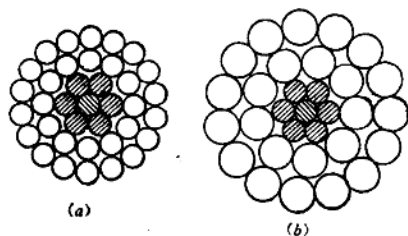


图 1 钢芯铝线 300/39 的结构

表 1

导线型号和截面 mm ²	相对于本体重量的 折算负载	弹性系数	线性膨胀 温度系数	拉强极限
	10 ⁻³ N/m·mm ²	10 ³ N/mm ²	10 ⁻⁶ 度 ⁻¹	N/mm ²
正常型(95以下)	3.47	82.5	19.2	250
120及以上	3.56	84.5	18.9	290
各种截面的轻型	3.39	78.5	19.8	270
各种截面的加强型	3.73	89.0	18.3	310
各种截面的特殊加强型	4.95	118.2	15.5	510

损耗。为了限制无线电干扰水平(与电压等级及每相导线根数无关),导线表面的最大场强不应超过容许值(有效值, kV/cm):

$$E_{\text{a.o.n}} = 22.7(1 - 0.545 \lg r_0) \quad (1.2)$$

$E_{\text{a.o.n}}$ 随分裂导线半径 r_0 (cm)的增加而减小。在海拔高度 $H > 500\text{m}$ 的情况下,上式中的 $E_{\text{a.o.n}}$ 应减去 $H/1000$ 。

为了限制电晕损耗,线路的平均运行电压至少要比三相平均起始电晕电压 U_H 低10%:

$$U_H = \frac{2\pi\epsilon_0 n r_0 E_H}{C k_H} \quad (1.3)$$

式中 E_H 为导线上的起始电晕场强,其有效值为

$$E_H = 17m_H\delta \left(1 + \frac{0.62}{\delta^{0.3} r_0^{0.38}}\right) \quad (1.4)$$

$\bar{C}$ 为每相导线的平均工作电容; k_H 为考虑分裂导线表面场强不均匀分布的不均匀系数; δ 为相对空气密度; m_H 为导线表面的不光滑系数。

35~110kV线路的最大场强远比限制电晕条件的容许值要低,因而不需采用分裂导线。对于330kV线路,只有AC600/72型的单根导线才满足限制电晕的要求,故在截面较小时采取每相双分裂(很少三分裂)导线。

反之,对于通常结构的220kV线路,其相间几何均距为8~9m,根据限制电晕放电的要求,容许采用截面积不小于240mm²的单根导线,在年均空气密度较高的地区,可用截面积为185mm²的导线;如用小截面的导线,每相应取2根及以上的分裂导线。

式(1.3)表明,如单根导线的半径不变,起始电晕电压与每相分裂数成正比,故在任意额定电压下,限制电晕损耗的条件可以得到满足。由于这一原因,当分裂导线的半径实际不变时,分裂数将随电压等级的升高而增加^[34]。

增加分裂数同样可以满足限制无线电干扰的要求。如果最大场强 $E_{\text{max}} \leq E_{\text{a.o.n}}$,则增加分裂数不会增大无线电干扰水平,因为此时流注电晕源的数量虽有增加,但却加强了邻近分裂导线的电磁屏蔽影响。

式(1.3)同时还指出,分裂导线的起始电晕电压随着 k_H 的减小而增大。当分裂导线安放在圆周上时(图2), k_H 由下式决定

$$k_H = 1 + (n-1)r_0/r_s \quad (1.5)$$

这里 r_s 为圆的半径,即分裂半径。

由式(1.5)可知, r_s 愈大, k_H 愈小,工作电容随之增大(见1.2节)。由于这一原

因,在某一 r_0 值条件下,起始电晕电压具有最大值, r_0 的大小与分裂数、导线半径有关,即

$$r_0 = 3.3nr_0 \quad (1.6)$$

此外,由式(1.5)得 $k_H = 1 + 0.3(1 - 1/n)$,当 n 增加时, k_H 缓慢地从1.15($n=2$)增至1.3(n 很大时)。

分裂距离 d 由下式决定⁽³⁴⁾:

$$d = 2r_0 \sin(\pi/n) \quad (1.7)$$

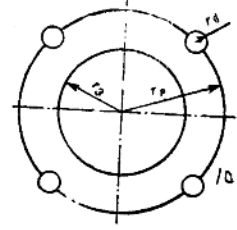


图2 单相分裂导线的布置

考虑到式(1.6),可得到最佳分裂距离(根据 U_H 为最大值的条件)与分裂导线直径之比:

$$d/2r_0 = 3.3n \sin(\pi/n)$$

此比值只与分裂数成函数关系。在最小分裂数 $n=2$ 时,比值 $d/2r_0=6.6$ 。当分裂数很大时, $\sin \pi/n \approx \pi/n$, $d/2r_0 = 3.3\pi \approx 10.4$ 。因此,最佳分裂距离约比导线直径大10倍以上。最通用的导线为AC300/48,直径为24.1mm,故分裂导线间的最佳距离 d 在16~25cm之间变动:

n	2	3	4	6	8	12	16	24
$d/2r_0$	6.6	8.6	9.3	9.6	10.1	10.25	10.35	10.4
$d(2r_0=24.1\text{mm时})$	16	20.7	22.4	23.9	24.2	24.7	25	25.1

然而实际线路上的分裂间距远比上述的要大,这一差异取决于保证导线可靠运行的需要。

为了保持外部尺寸的稳定性,分裂导线每隔60m安装一组支撑间隔棒。在此情况下,当分裂导线中的一根进入由邻近分裂导线袭来的气流动力通道中时,可能产生0.7~2 Hz 频率的振荡,其幅值足以使得间隔棒大量破坏和导线磨损。这样的振荡可能在分裂间距小于12倍导线直径的情况下发生。考虑到导线直径不超过30mm,邻近分裂导线间的距离 d 取40cm。这一距离远比最佳值为大,最佳值是根据在分裂数和导线直径一定时达到最大电压 U_H 的判据而确定的。因此,上述从下限确定的间距限制(根据技术概念)也可看作受到上限的制约,其结果使得导线的分裂间距长期来被硬性固定为40cm。

这种状态导致不正确地评价采用分裂导线的有效性质,这对35~220kV以及更高电压的线路均如此。按照这一方法来增加分裂数($d=40\text{cm}$ 时)导线的感抗只是略有下降(见绪论),因而实际上并不能影响架空线路的运行条件,导致人们对35~220kV线路上采用分裂导线不感兴趣。由于这一原因,长期以来在估计未来的电压等级(高于500kV)线路的技术经济指标时,取分裂导线数 $n=4$,从而导致不适宜采用高于750kV额定电压的错误结论。

错误在于,由于过分重视导线的两个新的优化判据(精确地说,其中一个为判据,而另一个是限制),而放松了另外一些与架空线路相联系的判据,这些判据的重要性并不比前面的判据差,它们在用户要求高电能质量的情况下保持动力系统在正常和故障方式下运行的可靠性。这里具有决定意义的是线路感抗(波阻抗),它随着分裂距离的增加而迅速下降(见第1.2节)。

如前所述,分裂间距的增加并不与间隔棒间($d \geq 40\text{cm}$)限制导线次挡距振荡的要求相

矛盾。至于起始电晕电压，它随着导线分裂间距的增加（导线直径不变）而下降极慢，因为此时系数 k_n 下降。此外，感抗的下降将导致线路传输能力的增大。这样，通过增加导线半径 r_0 或每相导线分裂数来增大导线截面是适宜的，而根据式（1.3）可知，这又提高了起始电晕电压。

在超高压线路中，增加导线分裂数的同时增大分裂间距的有效性已在1973年得到证明^[30]。那篇文章第一次指出，在宽广范围内增大分裂间距（增大分裂半径）导致减小电能输送的价格。

根据上面的叙述，以后在谈到限制分裂间距时仅指其下限值为 $d > 24r_0$ 。

表 2

额定电压 (kV)	在如下弧垂时导线间的最短距离* (m)							
	3	4	5	6	8	12	16	20
35	2.5	2.5	2.75	2.75	3.0	3.25	3.75	—
110	3.0	3.25	3.5	3.5	3.75	4.0	4.50	—
220	—	—	4.25	4.5	4.75	5.0	5.50	—
330	—	—	—	5.5	5.75	6.0	6.50	—
500	—	—	—	7.0	7.25	7.5	8.00	—
750	—	—	—	—	9.50	10.00	10.25	10.50

注 本表根据部门规程由作者加以补充，表中短横线表示该弧垂的线路不予建造。

* 导线水平排列。

在最少导线分裂数情况下力求获得最大起始电晕电压的作法还导致这样一个离奇的技术决策，即增加相间距离以使其大于最小容许值，此容许值在考虑风偏影响而相间导线接近时（根据电气装置安装规程）保证能在工频电压和过电压下的安全运行（表 2）。

表 3

额定电压 (kV)	相间距离 (m)
35	4 *
110	5 *
220	8~9 *
330	9
500	12
750	13.5~22.5

* 几何均距。

到了广泛应用^[48]。

与表 2 数据中的相间距离相对应的乃是很高的操作过电压水平：

额定电压 (kV)	110	220	330	500	750
过电压计算水平					
（根据1986年电气装置安装规程）	3.0	3.0	2.7	2.5	2.1

在设计各级电压的架空线路时，采用了非常大的相间距离（表 3）。

比较表 2 和表 3 可说明，如果相应地改变导线结构（例如增加分裂导线数）以保证限制电晕放电，则相间距离可以大大缩短。

很大的相间距离排除了先进杆塔结构（相间距离减小）的采用，这种杆塔结构近期已在苏联研制^[34,24]并在其他，国家得

现代的限压设备（包括非线性限制器●）可将各个电压等级线路中的操作过电压限制到不超过1.8倍^[29]，并使相间距离小于表2中的数据。

根据上面叙述的情况，苏联建造了35~750kV架空线路的中间杆塔结构。对于35~220kV的单回和双回线路，采用直立金属塔（图3,a,b）和带有金属横担的直立单柱水泥杆塔（图3,c,d）。

对于330kV及以上的线路，照例采用门型拉线杆塔（图4,a）和V型拉线杆塔（图4,b）。

所有上述结构的特点在于在相邻两相导线之间插进了杆塔接地部件。对于塔式或单柱式杆塔，这些中间部件既是塔身，也是金属横担（图3）。此外，位于垂直方向（双回杆塔，图3,b,d）相邻两相之间的是绝缘链。在水平方向，必需根据沿线路径的气候条件考虑到计算风速作用下的导线偏转。其结果使得导线至接地杆塔结构的所需绝缘距离之和（表4）、构件（横担、塔身）的横向尺寸以及绝缘链的长度大大地（约1.5倍）超过了表2中的相间允许距离。

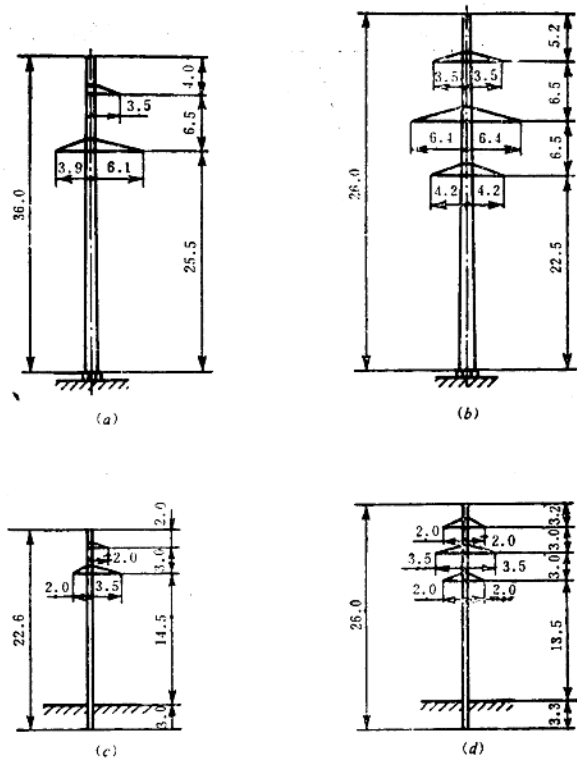


图3 直立中间杆塔的结构
(a) 220kV单回塔式；(b) 220kV双回塔式；
(c) 110kV单回单柱式；(d) 110kV双回单柱式

表4

计算条件	下述额定电压(kV)下的最小绝缘距离(m)					
	35	110	220	330	500	750
按雷电过电压	0.40	1.00	1.80	2.60	3.20	—
按内过电压	0.30	0.80	1.60	2.15	3.00	4.3(4.4)
按工作电压	0.10	0.25	0.55	0.80	1.15	1.5
按安全登杆条件	1.50	1.50	2.50	3.50	4.50	5.1(5.2)

注 括号内为V形绝缘链时的绝缘距离。

对于拉线门型和V型杆塔的330kV及以上的线路，相间距离决定于导线至塔身（或

● 即金属氧化物避雷器——译者注。

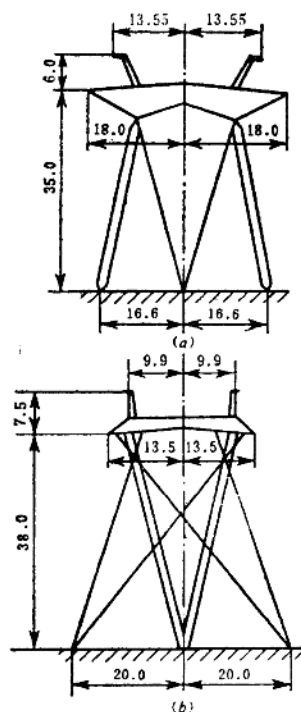


图 4 超高压架空线的拉线中间杆塔结构
(a) 750kV 门型塔; (b) 750kV V 型塔

传输总功率为

$$S = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} F J = 3 U_{\phi . \text{H}} F J \quad (1.8)$$

式中 $U_{\text{НОМ}}$ 和 $U_{\phi . \text{H}}$ 为额定线电压和相电压^①。S 的变动范围为

$U_{\text{НОМ}}$ (kV)	35	110	220	330	500	750
S (MW)	2~11	11~90	90~300	250~600	750~1500	1500~2100

在恒定的相间距离和分裂间距 (40cm) 的情况下, 导线截面变化使得线路自然功率 P_{H} 略有变动, P_{H} 用下式表示:

$$P_{\text{H}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{z_{\text{B}}} = \frac{3 U_{\phi . \text{H}}^2}{z_{\text{B}}} \quad (1.9)$$

式中 z_{B} 为导线波阻抗, 即

$$z_{\text{B}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = v_{\text{B}} L = \frac{1}{v_{\text{B}} C} \quad (1.10)$$

① 这句话由译者增补——译者注。

至拉线) 的必需距离、塔身宽度、在导线高度处塔身与拉线间的距离 (图 4) 以及计算风速作用下的导线偏距, 其结果正如塔型杆一样, 相间的实际距离大大超过了容许数值 (见表 2、3)。

1.2 传输功率与自然功率的关系

在设计架空线路时, 作为原始数据的乃是传输功率、额定电压和经济电流密度 $J_{\text{э}}$ 。 $J_{\text{э}}$ 与运行的地区有关, 约取 $J_{\text{э}} = 1 \sim 1.5 \text{ A/mm}^2$ 。在故障情况下, 允许导线过载至 2 A/mm^2 及以上, 因为此时 $J_{\text{э}}$ 不受导线的能耗所限制, 而是决定于导线发热和导线一大地之间容许尺寸的可能破坏。

导线截面 F (mm^2) 与传输功率 (最大线路负荷的计算工况) 有关, 并在广泛范围之内变动:

35kV 线路: 35~120 (mm^2)

110kV 线路: 70~300

220kV 线路: 185~600

330kV 线路: 480~1000 ($2 \times 240 \sim 2 \times 500$)

500kV 线路: 900~1500 ($3 \times 300 \sim 3 \times 500$)

750kV 线路: 1200~1600 ($5 \times 240 \sim 4 \times 400$)

在上述经济电流密度和导线截面的变动范围内,

这里 L 和 C 为单位长度导线的电感和(工作)电容, v_B 为波速,

$$v_B = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.11)$$

L 和 C 可按下式计算:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{CP \cdot r}}{r_g} + \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{1}{4n} \right) \quad (1.12)$$

$$C \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{CP \cdot r}}{r_g}} \quad (1.13)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, $\epsilon_0 = 1/(4\pi \times 9 \times 10^9)$ 分别为真空的导磁系数和介电系数;
 μ 为导线的导磁系数; $D_{CP \cdot r}$ 为相间距离的几何均距; r_g 为导线的等效半径, 它在单导线时等于导线的外部半径, 而当分裂导线均匀分布在半径为 r_s (分裂半径) 的圆周上时, r_g 为

$$r_g = r_s \sqrt[n]{n r_0 / r_s} \quad (1.14)$$

如果三相导线的对地高度 H_g 相等 (导线水平排列), 相电容的平均值 $\bar{C}$ 为

$$\bar{C} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left\{ \frac{3\sqrt{2} - D_0}{r_g} \left[\left(1 + \left(\frac{D_0}{2H_g} \right)^2 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_g} \right)^2} \right]^{-\frac{1}{3}} \right\}} \quad (1.15)$$

式中 D_0 为相邻导线的中心距离, 同时

$$H_g = r + \frac{f}{3} \quad (1.16)$$

这里 r 为导线对地的容许距离, f 为弧垂。

电磁波沿导线的传播速度 v_B 要比光速 v_c 略小些, $v_B < v_c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

考虑到式 (1.12) 和 (1.13), 三角形排列或垂直排列 (例如布置在单柱杆塔两侧的双回路) 时的导线波阻抗为

$$Z_s \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{D_{CP \cdot r}}{r_g} = 60 \ln \frac{D_{CP \cdot r}}{r_g} \quad (1.17)$$

当三相导线对地高度相等时, 由式 (1.12) 和 (1.15) 可得

$$z_B \approx 60 \sqrt{\ln \frac{3\sqrt{2} - D_0}{r_g} \ln \left\{ \frac{3\sqrt{2} - D_0}{r_g} \left[\left[1 + \left(\frac{D_0}{2H_g} \right)^2 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_g} \right)^2} \right]^{-\frac{1}{3}} \right\}} \quad (1.18)$$

对于 35kV 线路, 几何均距 $D_{CP \cdot r}$ 约为 4m, 110kV 时约为 5m, 220kV 时为 8~9m。更高电压的线路通常为单回方式, 330kV 的三相对称轴间的距离为 9m, 500kV 时为 12m, 750kV 时为 16.5~20m。

根据这些数据, 波阻抗和相应的自然功率均在窄小的范围内变动;

$U_{\text{НОМ}} (\text{kV})$	35	110	220	330	500	750
$z_{\text{B}} (\Omega)$	415~375	405~362	400~375	300~295	284~277	290~280
$P_{\text{H}} (\text{MW})$	2.9~3.3	30~33	120~130	363~370	880~908	1930~2000

将此数据与前文所列自然功率的变动范围相比说明, 大截面导线的传输功率 S 超过 P_{H} 值 2 ~ 3 倍以上。电压等级愈高, S 与 P_{H} 的比值愈低。对于现有导线结构的 750kV 线路, S 值实际上不超过 P_{H} 。这些结果是由高压线路中导线结构的有限的组合方式所决定的。

上述结果可用解析方式表示。任意 n 根分裂导线的每相截面积 F 为

$$F = nF_0 = n\pi r_0^2 \kappa_0 \quad (1.19)$$

式中的 F_0 为每根导线的有效截面积, κ_0 为填充系数。由此可得导线半径为

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi \kappa_0 n}} \quad (1.20)$$

利用以上各式, 并由式 (1.8) 和 (1.10) 可得单根导线 ($n = 1$) 时传输功率与自然功率之比为

$$\frac{S}{P_{\text{H}}} = \frac{3 U_{\Phi \cdot \text{H}} F J z_{\text{B}}}{3 U_{\Phi \cdot \text{H}}^2} = \frac{z_{\text{B}} F J}{U_{\Phi \cdot \text{H}}} \approx 60 \frac{F J}{U_{\Phi \cdot \text{H}}} \ln D_{\text{CP} \cdot \Gamma} \sqrt{\frac{\pi \kappa_0}{F}} \quad (1.21)$$

考虑到式 (1.14) 和 (1.20), 采用分裂导线时的比值为

$$\frac{S}{P_{\text{H}}} = 60 \frac{F J}{U_{\Phi \cdot \text{H}}} \ln \frac{D_{\text{CP} \cdot \Gamma}}{r_p} \sqrt[3]{\frac{n}{r_p} \sqrt{\frac{\pi \kappa_0}{n F}}} \quad (1.22)$$

当三相导线对地高度相等时, 有

$$\frac{S}{P_{\text{H}}} = \frac{60 F J}{U_{\Phi \cdot \text{H}}} \sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_p} \cdot \sqrt[3]{\frac{n}{r_p} \sqrt{\frac{\pi \kappa_0}{n F}}} \ln \frac{\sqrt[3]{2} D_0}{r_p} \frac{\sqrt[3]{\frac{n}{r_p} \sqrt{\frac{\pi \kappa_0}{n F}}}}{\sqrt[3]{\left[1 + \left(\frac{D_0}{2H_s}\right)^2\right] \sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{H_s}\right)^2}}}} \quad (1.23)$$

以上公式表明, 比值 S/P_{H} 随着导线总截面与电流密度乘积的增加而增大。在单导体线路中, 由于乘数 F 的影响很小, 故在乘积 FJ 增大的情况下要保持比值 S/P_{H} 不变是不可能的。在分裂导线的线路中, 可用增大分裂半径的办法来补偿乘积 FJ 的增大。

式 (1.21) 和 (1.23) 用来计算不同导线截面和不同电流密度时常规线路中的比值 S/P_{H} (表 5 ~ 10)。