

华北电网有限公司华北电力技术院  
华北电力科学研究院有限责任公司 组编

# 特大电网高压输变电技术与设备

T E D A  
D I A N W A N G  
G A O Y A  
S H U B I A N D I A N  
J I S H U Y U  
S H E B E I



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TEDA DIANWANG GAOYA SHUBIANDIAN  
JISHU YU SHEBEI

# 特大电网高压输变电 技术与设备

华北电网有限公司华北电力技术院 组编  
华北电力科学研究院有限责任公司



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书以华北电网为例来介绍特大电网高压输变电技术与设备。全书共分 10 章,重点介绍华北电网近年来的研究成果,包括紧凑型输电技术、串联补偿电容器技术、防污闪技术、带电作业技术、电力系统雷电防护技术、电力系统接地技术、高电压试验新技术、直升机巡线技术、无功补偿技术、新型导线技术,并且在各章节介绍了各项新技术的应用、对新技术新设备的推广及其对电网的影响等。

本书的编写方式能满足不同读者的需求。首先,本书适合高电压专业工程技术人员阅读,有利于技术人员对当前华北特大电网中研发应用的一些新技术进行深入研究;其次,本书以华北特大电网的实际运行为背景,提出特大电网技术的特点,有利于大中专院校对口专业学生对特大电网进行深入了解;最后,本书内容来源于实践,应用于实践,提炼于实践,是一本难得的理论和实践相结合的书籍,适合社会各界对特大电网感兴趣的专业人士学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

特大电网高压输变电技术与设备/华北电网有限公司华北电力技术院,华北电力科学研究院有限责任公司组编. —北京:中国电力出版社, 2011. 3

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1492 - 4

I. ①特… II. ①华… ②华… III. ①电网-输电-电力工程-中国②电网-变电所-电力工程-中国 IV. ①TM7②TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 041159 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26 印张 622 千字

印数 0001—3000 册 定价 70.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编 审 人 员 名 单

|       |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 主 编   | 巩学海 |     |     |     |
| 副 主 编 | 王金萍 | 张章奎 | 邓 春 |     |
| 编 审   | 何金良 | 谈克雄 | 曾 嵘 | 姜齐荣 |
|       | 周远翔 | 李志宏 | 朱普轩 |     |
| 编写人员  | 陈 原 | 刘 亮 | 袁亦超 | 王 剑 |
|       | 李 雨 | 郝旭东 | 刘少宇 | 徐党国 |
|       | 马继先 | 沈丙申 | 蔡 巍 | 白 恺 |
|       | 罗 毅 | 谢丽芳 | 赵升月 |     |

# 前 言

华北电网是超高压、大容量、远距离输电的特大电网，它覆盖京、津、冀、晋、鲁二市三省以及内蒙古大部分地区，供电面积 125km<sup>2</sup>，供电人口 2.3 亿，其负荷中心集中在华北东部地区，主要电源则相对集中在西部地区。华北电网担负着确保首都安全可靠供电的重要任务。华北电网目前已形成以 500kV 为主网架、以 220kV 为骨干网的现代化区域特大电网。华北电网总装机容量和负荷 2006 年就已经双双突破 1 亿 kW，电网 500kV 资源优化配置的能力不断加强，500kV 变电容量达到 5400 万 kW，500kV 线路长度超过 14 000km，接于 500kV 的装机容量已达 30 000MW 以上，其中京津唐电网从 500kV 线路受电已接近总负荷的 50%。华北电网已经步入“特大电网时代”。

为满足华北电网安全、不间断运行的要求，致力研究停电原因中电网电气设备的绝缘水平和限制过电压的措施至关重要。电网中电气设备的绝缘不仅经常受到工作电压的作用，也受到瞬时过电压、操作过电压和大气过电压的侵袭。电网中电气设备的绝缘在上述各种电压作用下呈现出相应的绝缘强度。要根据电网电气设备上可能出现的电压，科学合理地选择电网中电气设备的绝缘水平。

高电压技术的研究对象是各种形态的高电压和各种性能的介质，需要有各种高电压测试设备来研究介质在各种高电压下的物理性能。尽管近百年来高电压技术有了很大发展，但对于介质击穿的一些机理，特别是在特高压电网中空气间隙的放电电压在操作过电压下的特性和特征，还不十分清楚，近年来在华北电网中许多高电压技术的实际问题是依靠实验来研究的。试验技术对高电压技术来说十分重要，其使用的方法丰富、技术复杂，已成为高电压技术领域中的一个重要方面。

华北电网“高电压紧凑型输电技术实验室”被命名为国家电网公司实验室，其研究成果紧凑同塔双回、组合电容、大容量变压器等先进技术得到积极应用，进行的 1000kV 交流输电设备交接及预防性试验研究等国家电网公司重大项目研究取得丰硕成果，在输变配等方面开展了关键技术的研究。

本书以华北电网为例来介绍特大电网高压输变电技术与设备，重点介绍华北电网近年来高电压技术的研究成果。本书共分为 10 章，主要内容有：第一章紧凑型输电技术；第二章串联补偿电容器技术；第三章防污闪技术；第四章带电作业技术；第五章电力系统雷电防护技术；第六章电力系统接地技术；第七章高电压试验新技术；第八章直升机巡线技术；第九章无功补偿技术；第十章新型导线技术。

由于时间仓促和水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编写组  
2011 年 6 月



# 目 录

前言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第一章 紧凑型输电技术</b> .....    | 1   |
| 第一节 紧凑型输电技术的基础理论 .....      | 1   |
| 第二节 紧凑型输电技术在国内外的的发展 .....   | 12  |
| 第三节 我国紧凑型输电线路的相关技术参数 .....  | 19  |
| 第四节 紧凑型输电线路的技术问题 .....      | 31  |
| 第五节 紧凑型线路的推广 .....          | 51  |
| <b>第二章 串联补偿电容器技术</b> .....  | 53  |
| 第一节 串联补偿的技术原理 .....         | 53  |
| 第二节 串联补偿装置的结构组成及功能 .....    | 55  |
| 第三节 串联补偿装置的保护配置 .....       | 57  |
| 第四节 国内外串联补偿技术的应用情况 .....    | 60  |
| 第五节 次同步振荡问题研究 .....         | 64  |
| <b>第三章 防污闪技术</b> .....      | 79  |
| 第一节 输变电设备防污闪技术综述 .....      | 79  |
| 第二节 防污闪技术政策 .....           | 80  |
| 第三节 污区分级技术 .....            | 82  |
| 第四节 线路复合绝缘子 .....           | 90  |
| 第五节 防污闪涂料 .....             | 102 |
| 第六节 防污闪辅助伞裙 .....           | 116 |
| <b>第四章 带电作业技术</b> .....     | 122 |
| 第一节 带电作业技术定义与分类 .....       | 122 |
| 第二节 各种带电作业技术 .....          | 128 |
| 第三节 综合效益分析及相关规程标准 .....     | 194 |
| <b>第五章 电力系统雷电防护技术</b> ..... | 197 |
| 第一节 雷电对电网的危害 .....          | 197 |
| 第二节 雷电活动参数 .....            | 197 |
| 第三节 雷害分级与雷害分布图 .....        | 201 |
| 第四节 输电线路防雷 .....            | 209 |
| 第五节 变电站的雷电防护 .....          | 231 |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第六章 电力系统接地技术</b> .....    | 239 |
| 第一节 接地的概念及意义.....            | 239 |
| 第二节 接地的分类.....               | 239 |
| 第三节 发电厂、变电站的接地设计.....        | 240 |
| 第四节 降低接地阻抗技术.....            | 243 |
| 第五节 接地阻抗测试技术.....            | 244 |
| <b>第七章 高电压试验新技术</b> .....    | 257 |
| 第一节 高压并联电抗器局部放电试验.....       | 257 |
| 第二节 高压并联电容器局部放电试验.....       | 262 |
| 第三节 变压器绕组变形测试技术.....         | 269 |
| 第四节 GIS及罐式断路器局部放电带电检测技术..... | 282 |
| 第五节 金属氧化物避雷器带电巡检技术.....      | 293 |
| 第六节 六氟化硫气体状况现场检测技术.....      | 298 |
| <b>第八章 直升机巡线技术</b> .....     | 315 |
| 第一节 直升机巡线技术概述.....           | 315 |
| 第二节 直升机巡线与人工巡线对比研究.....      | 317 |
| 第三节 巡线用直升机的选择.....           | 322 |
| 第四节 巡线设备的选型.....             | 325 |
| 第五节 巡线技术与制度.....             | 329 |
| <b>第九章 无功补偿技术</b> .....      | 339 |
| 第一节 无功补偿技术综述.....            | 339 |
| 第二节 无功补偿技术在电网中的应用.....       | 340 |
| 第三节 无功补偿装置的有关问题.....         | 348 |
| <b>第十章 新型导线技术</b> .....      | 356 |
| 第一节 新型导线技术综述.....            | 356 |
| 第二节 自主研发碳纤维复合芯导线的背景.....     | 362 |
| 第三节 碳纤维复合芯的制造.....           | 366 |
| 第四节 碳纤维复合芯导线的制造.....         | 371 |
| 第五节 碳纤维复合芯导线的检测.....         | 379 |
| 第六节 碳纤维复合芯导线的配套金具与施工.....    | 385 |
| 第七节 碳纤维复合芯导线的应力—弧垂计算.....    | 389 |
| 第八节 碳纤维复合芯导线的适用原则.....       | 392 |
| 第九节 碳纤维复合芯导线的应用.....         | 398 |
| <b>参考文献</b> .....            | 405 |

## 第一章

# 紧凑型输电技术

## 第一节 紧凑型输电技术的基础理论

华北电网是超高压、大容量、远距离输电的特大电网，它覆盖京、津、冀、晋、鲁三省二市以及内蒙古大部分地区，供电面积  $125\text{km}^2$ ，供电人口 2.3 亿，其负荷中心集中在华北东部地区，主要电源则相对集中在西部地区。华北电网担负着确保首都安全可靠供电的重要任务。目前华北电网已形成 500kV 为主网架，220kV 为骨干网的现代化区域特大电网。华北电网总装机容量和负荷在 2006 年就已经双双突破 1 亿 kW，电网 500kV 资源优化配置的能力不断加强，500kV 变电容量达到 5400 万 kW，500kV 线路长度超过 14 000km，接于 500kV 的装机容量已达 30 000MW 以上，其中京津唐电网从 500kV 受电已接近总负荷的 50%。华北电网已经步入“特大电网时代”。

本书介绍的各项技术措施均是华北电网正在广泛应用的技术，其目的正是为了保障华北特大电网安全、不间断运行。这些技术具有较好的发展前景，值得了解和掌握。

特大电网通常采用紧凑型输电技术。

### 一、紧凑型输电技术概述

紧凑型架空输电线路技术（简称紧凑型输电技术）是 20 世纪 70 年代，由前苏联圣彼得堡工业大学的阿历克山德罗夫教授基于交流输电的基本原理提出的，作为一项重大输电技术，近 10 年来在中国迅速得到研究、发展和应用。紧凑型输电技术是在保证线路安全运行的前提下（满足安全性的约束条件），通过缩小相间距离、优化导线排列、增加相分裂子导线根数和相导线等效半径等改变线路几何结构的方法，压缩线路走廊占地面积并大幅度提高自然输送功率的新型输电技术。

20 世纪以来，伴随着世界经济的发展和文明的进步，人类对电力能源的需求与日俱增，同时也越来越清醒地认识到土地、资源、环境等因素对人类进一步发展的重要性，从而开始探索资源节约、环境友好、输送能力强的高效输电模式。紧凑型输电技术具有提高输电线路输送能力、压缩走廊宽度、减少线路对环境的电磁污染等特点，这也使该项技术被国内外电力系统广泛研究和采用，并取得了明显的经济效益和社会效益。

紧凑型线路又分为高自然功率紧凑型线路和一般紧凑型线路。

(1) 高自然功率紧凑型线路突破传统的设计原则，采用加大分裂间距和增加分裂数目、改造分裂结构、优化导线排列的方法，增大导线的电容，减少线路的波阻抗，从而大幅度提



高线路的输电能力，通常能将线路的传输功率提高 50%~70%。高自然功率紧凑型线路子导线表面的场强分布比常规线路要均匀得多，并且大大提高了导线表面的利用率，在无线电干扰和电晕损失等方面均能控制在一个可以接受的水平。但高自然功率紧凑型线路子导线的排列一般呈椭圆形、抛物线形等不规则不对称分布，各个相邻子导线间的距离又有差异，因此线路导线结构往往过于复杂，增加了线路工程建设和运行维护检修的复杂性。所以目前高自然功率紧凑型线路的实际应用在国内都不多见。

(2) 一般紧凑型线路的导线结构和杆塔型式与常规线路相比并不作重大改变，只是导线增加了相分裂子导线根数，取消杆塔的相间立柱，三相导线都布置在塔窗之内，同时，三相导线常采用三角形排列、V 型绝缘子串以限制摇摆幅度、缩小相间距离等简单措施。通常能将线路的传输功率提高 30% 左右。一般紧凑型线路的相导线布置和分裂导线结构全部采用对称分布，便于施工和维护，国内外已有长期安全运行和维护的经验。

我国对于紧凑型线路设计的相关标准有电力行业标准 DL/T 5217—2005《220kV~500kV 紧凑型架空送电线路设计技术规定》、Q/GDW 110—2003《500kV 紧凑型架空送电线路设计技术规定》。从目前的技术水准来看，标准中的相关规定都是正确的。但从国内外发展情况分析，紧凑型线路的相关参数如分裂导线数、子导线半径、相间距离等都有进一步优化的空间。

一般紧凑型线路与相比常规输电线路相比，直接经济效益巨大，其表现主要有：

(1) 降低杆塔的钢材耗用量，降低线路中有色金属的使用量。

(2) 使线路的走廊宽度显著减小。如 220kV 线路的宽度可从 13m 最小减少至 3.4m（不含防护通道，下同），500kV 线路（以内部过电压的 1.8 倍计）可从 23~24m 减为 7.5m，大量节约用地。

(3) 减少对环境的污染（指场强对人体生理方面的不利影响，电晕对无线电和电视信号的干扰等）。紧凑型线路导线下离地面 1m 高度处电场强度超过 4kV/m 的高电场区的宽度仅是常规线路的约 1/3，降低了电磁污染对周围居民区及生态的影响，有利于环保。

(4) 大幅提升线路传输的自然功率。220kV 紧凑型线路自然输送功率较常规线路提高约 60%，330kV 紧凑型线路自然输送功率较常规线路提高约 44%，500kV 紧凑型线路自然输送功率较常规线路提高约 34%。

紧凑型线路产生的其他效益还有：其运行中的电能损耗和电压降远低于传统结构线路，特别适用于远距离大容量输电，可大大减少系统无功电源的需要量。

紧凑型输电线路能够满足我国电力工业持续发展对超高压、远距离输电减少占地、降低工程综合造价的要求，从而提高我国输电技术的整体水平。因此，在各个电压等级上推广和采用紧凑型线路在技术和经济上都是合适的。

## 二、紧凑型输电技术提升自然功率的原理

根据功率的计算公式  $P=UI=U^2/Z$ ，为增加线路的输送能力，一般采用的方式主要为提高线路的输电电压或减小线路阻抗、提升输送电流。在 20 世纪 70 年代以前，世界各国主要依靠提高输电电压来增加线路的输电能力。虽然提高输电电压能大幅度地提高线路传输的功率、减小系统的短路容量并且能改善线路的静态稳定性，但是随着电压的提升，在相应的绝缘水平和输变电设备制造等方面会产生一定的技术难题。因此，多数国家在将其线路最高输电电压升至 500kV 的水平后，转而研究其他新的架空输电技术，在不提高输电电压的

前提下提高线路输送能力。紧凑型输电技术就是这样一种新型的输电技术。

紧凑型输电技术提升功率的原理主要在于紧凑型线路降低了波阻抗，可以提升线路的自然功率。自然功率是指线路在自然工作状态下传输的功率。在线路的电场和磁场功率相等时，线路无功功率为零，其末端只有有功负荷，且其等值电阻与线路的波阻抗相等，这时线路的工作状态就称之为自然工作状态。在此工作状态下，线路的损耗最小，无须安装补偿设备，电力系统的投资最省。自然功率  $P_H$  和波阻抗  $Z_B$  可分别用下列公式计算：

$$P_H = \frac{3U_{\text{phN}}^2}{Z_B} \quad (1-1)$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} = v_B L = \frac{1}{v_B C} \quad (1-2)$$

式中  $U_{\text{phN}}$ ——额定相电压；

$Z_B$ ——线路波阻抗；

$L, C$ ——单位长度线路的电感、电容；

$v_B$ ——波速，比光速略小。

其中

$$v_B = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1-3)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{D_{\text{cp}\Gamma}}{r_a} + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{1}{4\pi} \right) \quad (1-4)$$

$$C \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{\text{cp}\Gamma}}{r_a}} \quad (1-5)$$

式中  $\mu$ ——导线的磁导系数；

$\mu_0$ ——真空磁导系数，取  $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ；

$\epsilon_0$ ——真空介电常数，取  $1/(4\pi \times 9 \times 10^{-9}) \text{F/m}$ ；

$D_{\text{cp}\Gamma}$ ——相间距离的几何均距；

$r_a$ ——导线的等效半径。

对于单导线， $r_a$  等于导线的外部半径；而对于各子导线均匀分布在半径  $r_p$ （分裂半径）的圆周上的分裂导线， $r_a$  为

$$r_a = r_p \sqrt[n]{nr_0/r_p} \quad (1-6)$$

式中  $r_0$ ——子导线半径；

$n$ ——每相导线分裂数。

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

$$\bar{C} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{2D_0}}{r_a} \left[ \left[ 1 + \left( \frac{D_0}{2H_a} \right)^2 \right] \sqrt{1 + \left( \frac{D_0}{H_a} \right)^2} \right]^{-\frac{1}{3}} \right\}} \quad (1-7)$$

$$H_a = \Gamma + f/3 \quad (1-8)$$

式中  $D_0$ ——相邻导线的中心距离；

$\Gamma$ ——导线对地的允许距离；

$f$ ——弧垂。

考虑到式 (1-4) 和式 (1-5), 当导线呈三角形或垂直排列时, 线路波阻抗为

$$Z_B \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{D_{cp\Gamma}}{r_a} = 60 \ln \frac{D_{cp\Gamma}}{r_a} \quad (1-9)$$

当三相导线对地高度相等时, 波阻抗为

$$Z_B \approx 60 \sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{2D_0}}{r_a} \ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{2D_0}}{r_a} \left[ 1 + \left( \frac{D_0}{2H_a} \right)^2 \right] \sqrt{1 + \left( \frac{D_0}{H_a} \right)^2} \right\}^{-\frac{1}{3}}} \quad (1-10)$$

通过式 (1-9) 和式 (1-10) 可以看出, 波阻抗与导线的相间距离和导线半径密切相关。减小波阻抗, 需减小导线相间距离与导线等效半径的比值, 即增大导线等效半径, 减小相间距离。对于分裂导线而言, 根据式 (1-6) 可看出, 增加分裂子导线的根数、增大分裂半径可以增大导线的等效半径, 从而减小波阻抗。紧凑型线路正是基于这一原理, 减小线路的波阻抗, 提升传输的自然功率。

虽然扩大导线等效半径以及减小相间距离可以有效地减小波阻抗, 但对于输电线路而言, 不能盲目地扩大导线等效半径、减小相间距离, 因为导线等效半径的扩大可能会增加导线表面的电场不均匀度, 使允许场强降低, 在传输过程中易产生电晕。同时, 减小相间距离可能会产生相间放电, 造成闪络事故。因此, 在利用紧凑型线路提升线路自然功率时, 还需优化导线的排列, 尽量增加导线的允许场强, 而相间绝缘距离主要依靠放电试验确定。

### 三、自然功率与分裂导线结构的关系

常规输电线路的导线选择应遵循以下 3 个基本原则:

(1) 导线的截面积应满足经济电流密度的要求。

(2) 导线表面的最大场强  $E_{\max}$  不应超过允许值  $E_p$ , 而  $E_p$  不应大于允许的电晕干扰场强, 也不应大于允许的电晕损耗场强。一般取  $E_p = 0.9E_c$ ,  $E_c$  为导线表面的起始电晕场强。

(3) 选择最少的相导线分裂 (子导线) 数  $n$ 。

而苏联圣彼得堡工业大学的阿历克山德罗夫教授经过研究指出, 上述选取最小  $n$  值的传统原则是错误的。如对导线的分裂结构形式进行改造, 优化子导线的排列, 尽量使电荷在子导线间均匀分布, 每根子导线表面的最大场强接近导线的允许场强, 以获得较高的导线利用率, 那么自然功率将与  $n$  成正比关系, 即当  $n$  值无限增大时, 自然功率值无限上升, 这就得到了高自然功率的紧凑型线路。其计算原理介绍如下。

对于单根无限长导线, 由高斯定理有

$$q = 2\pi\epsilon_0 r_0 E \quad (1-11)$$

式中  $q$ ——导线单位长度的电荷量;

$\epsilon_0$ ——真空介电常数;

$r_0$ ——导线半径;

$E$ ——导线表面场强。

相应的电流  $I$  和电流密度  $J$  为

$$I = qv = 2\pi\epsilon_0 v r_0 E \quad (1-12)$$

$$J = I/S = 2\varepsilon_0 v E / r_0 K_3 \quad (1-13)$$

式中  $S$ ——导线截面积；

$v$ ——沿线路的电磁传播速度；

$K_3$ ——导线的填充系数。

当考虑采用分裂导线的三相交流紧凑型架空线路时，因综合场强的各种不均匀分布需引入系数  $K_1$ ，于是式(1-11)~式(1-13)可改写为

$$q = 2\pi\varepsilon_0 n K_1 r_0 E_{\max} \quad (1-14)$$

$$I = 2\pi\varepsilon_0 n K_1 v r_0 E_{\max} \quad (1-15)$$

$$J = 2\varepsilon_0 K_1 v E_{\max} / r_0 K_3 \quad (1-16)$$

式中  $n$ ——每相导线分裂数；

$K_1$ ——子导线表面的平均场强和最大场强的比值；

$E_{\max}$ ——子导线表面的最大场强。

对于超高压远距离输电线路，最适宜的传输功率应接近于线路的自然功率，在这种情况下线路的自然功率为

$$P_H = 3U_{\text{phN}} I = 6\pi\varepsilon_0 n K_1 v r_0 U_{\text{phN}} E_{\max} \quad (1-17)$$

式中  $P_H$ ——自然功率；

$U_{\text{phN}}$ ——相电压。

为了将线路的电晕损耗和无线电干扰限制在一定的水平，导线表面的最大场强存在一允许值  $E_p$ 。欲使导线表面得到充分利用，希望导线表面的最大场强接近其允许场强  $E_p$ ，可通过优化子导线排列来实现。

在  $E_{\max} = K_2 E_p$  时，电荷、电流、电流密度和自然功率的极限值分别为

$$q = 2\pi\varepsilon_0 n K r_0 E_p \quad (1-18)$$

$$I = 2\pi\varepsilon_0 n K v r_0 E_p \quad (1-19)$$

$$J = 2\varepsilon_0 K v E_p / r_0 K_3 \quad (1-20)$$

$$P_H = 6\pi\varepsilon_0 n K v r_0 U_{\text{phN}} E_p \quad (1-21)$$

式中： $K = K_1 K_2$ 。

电荷和电流越接近极限值，导线表面场强的利用效率越好，而此时  $K$  反映了导线的利用情况，称之为导线的有效利用系数。为了能更好地利用导体的表面，应使  $K$  尽可能趋于 1。

式(1-21)表明，线路的自然功率与子导线的半径、允许场强、导线的有效利用系数以及分裂数等因素有关。为了提高线路的自然功率，一方面可以使用截面较大的导线，或提高导线分裂数，前面已通过波阻抗的计算证实；另一方面需研究导线的结构和排列方式，尽可能地增大导线的允许场强和导线的有效利用系数。因此，对导线结构的优化程度直接影响自然功率的大小。

在超高压远距离输电中，电流密度  $J$  是按经济电流密度确定的。根据式(1-20)，当扩大导线半径时，电流密度下降，偏离经济电流密度，导致经济指标的劣化，使导线利用率降

低。因此，紧凑型线路中所采用的导线截面不宜过大，但过小的导线截面会限制线路的传输容量。因此，导线截面应控制在合适的水平。而从式(1-20)和式(1-21)中还可看出，当其他条件不变时，自然功率和分裂数成正比，而电流密度与分裂数无关。为了维持导线的利用系数不降低，应尽量避免增加导线的半径，所以在紧凑型线路中，提高自然功率的有效方法主要是加大分裂数。

另外，在同一电压等级的紧凑型线路中，可以按照不同的功率要求选择不同的分裂结构和排列方式，各种结构都对对应着一种较合理的结构尺寸和自然功率。按式(1-18)~式(1-20)有效利用导线表面和截面，用分裂子导线的最优布置改善电荷的分布，通过合理选择分裂数和导线截面，可获得最有利的结构。

#### 四、导线各参数对自然功率的影响

表 1-1 集中反映了导线各种参数对自然功率的影响。

表 1-1 各种提高线路自然功率因素的比较

| 参数     | 自然功率 | 单相总面积 | 电晕起始场强 | 导线表面利用系数 | 单位截面自然功率 |
|--------|------|-------|--------|----------|----------|
| 导线直径 ↗ | ↗    | ↗     | ↘      | ↘        | ↘        |
| 分裂根数 ↗ | ↗↗   | ↗↗    | →      | ↘↘       | ↘↘       |
| 分裂间距 ↗ | ↗    | →     | →      | ↗        | ↗        |
| 相间距离 ↘ | ↗    | →     | →      | ↗        | ↗        |
| 对地距离 ↘ | →↗   | →     | →      | →↗       | →↗       |

注 ↗表示增加，↗↗表示显著增加，→↗表示微弱增加，→表示保持不变，↘表示下降，↘↘表示显著下降。

为了提高线路的自然功率，优先考虑采用的措施是增加线路的分裂根数，由于该措施同时会降低导线表面利用系数，即降低线路的经济性，因此实际选用的分裂根数并非越多越好，应该选择一个比较合适的数值，在保证自然功率满足要求的同时，保证导线表面利用系数达到50%~60%以上。在增加分裂根数的基础上，适当减小导线直径，在损失一定自然功率的前提下，进一步提高导线表面利用系数。

在上述两项措施的基础上，结合其他的外部限制条件，尽可能地增加线路的分裂间距、减小线路相间距离，可以进一步提高线路的自然功率以及导线表面利用系数。改变导线对地距离的措施对于提高线路自然功率的效果非常微弱，可以不予重点考虑。

在实际线路设计中的线路参数选择工作中，三相导线中心距离、导线型号、分裂根数、分裂间距这4个参数互相关联，不能孤立确定。参数选择的控制性条件有两个：一方面，紧凑型线路与常规线路在技术经济方面进行比较时，应当立足于两者具有相同的每相导线铝的总截面这个基础；另一方面，控制导线产生的电晕是重要的必备条件。在控制导线的电晕方面，必须保证导线表面的电场强度低于导线表面的电晕起始电场强度。

减小相间距离可使自然功率提高，但会使导线表面场强加大，同时带电作业和风偏及导线舞动的允许安全距离限制了相间距离的进一步减小。增大分裂间距可以提高自然功率，但是将加大导线表面场强。增加分裂导线根数可以提高自然功率，但是要保证每相导线铝的总截面与常规线路导线铝的总截面大致相等。

综合上述研究结果，对于紧凑型输电线路，在其他线路结构参数相同的条件下，各种因素对于提高线路自然功率的技术性和经济性的效果如下：

(1) 增加分裂导线直径。能够增大线路的自然功率，但效果不是很显著；会同时降低导线表面利用系数及导线单位截面自然功率，相应降低线路的投资效益比，即线路的经济性。

(2) 增加导线的分裂根数。将显著增大线路的自然功率；同时会降低导线表面利用系数及导线单位截面自然功率，相应降低线路的投资效益比，即线路的经济性。

(3) 增加导线的分裂间距。能够有效增大线路的自然功率；通过提高线路导线表面利用系数来提高线路的自然功率，从经济性的角度来看，是一种非常理想的措施。

(4) 减小导线的相间距离。能够增大线路的自然功率，效果较为显著；通过提高线路导线表面利用系数来提高线路的自然功率，从经济性的角度来看，是一种比较理想的措施。

(5) 减小导线的对地距离。能够增大线路的自然功率，但效果非常微弱；通过提高线路导线表面利用系数来提高线路的自然功率，从经济性的角度来看，是一种合理的措施；但是由于该措施对于提高线路自然功率的效果非常微弱，因此经济性方面的实用价值并不大。

### 五、分裂导线的布置方式和数目

由前面的分析可知，紧凑型线路提升自然功率的方法的核心在于选择适当的导线分裂数和导线截面以及分裂导线的合理布置。布置方式、数目和截面的确定直接影响到导线的表面场强、线路走廊、自然功率、无线电干扰强度和地面场强等诸多方面。但在初选方案时，可以先计算在一定的布置方式、数目和截面下导线的表面场强和线路的自然功率，并与常规线路作比较，这两项指标合适后再用其他指标校验。

#### (一) 分裂导线的布置方式

在子导线增加的情况下，若要提高场强的利用系数，则需将各相子导线排列成不同的形状，如平面形、正多边形、抛物线形或局部椭圆形，而且相邻子导线的间距并非完全相同，才能改善电场分布，这就需要对导线进行优化设计。500kV 线路六分裂子导线的一种不对称布置形式如图 1-1 所示，这种布置考虑到子导线的组合排列，使每根子导线表面的场强接近允许场强，波阻抗大大降低，从而使自然功率增幅非常显著。根据计算可知，不对称布置方式下输送功率比常规线路高出 50%~70%。

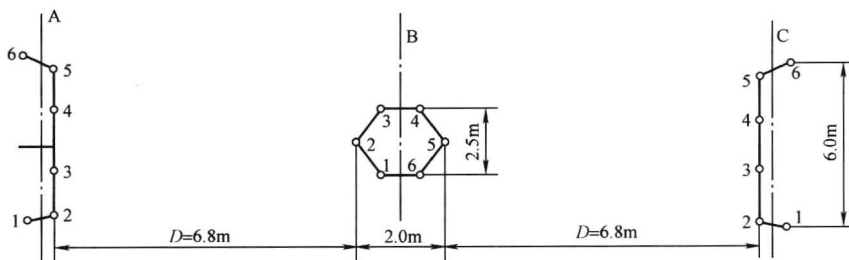


图 1-1 500kV 线路六分裂子导线的一种不对称布置形式

高自然功率紧凑型线路导线的不同布置方案如图 1-2 所示。图 1-2 (a) 所示为垂直平面型，任意的分裂导线数均布置在垂直平面内；图 1-2 (b) 所示为水平平面型；图 1-2 (c) 所示为任意倾斜平面型；图 1-2 (d) 所示为对称抛物线型，分裂导线沿着链形线布置；图 1-2 (e) 所示为不对称抛物线型；图 1-2 (f) 所示为同轴型，分裂导线布置在同轴圆柱体的表面上；图 1-2 (g) 所示为双重同轴型，将一相的分裂导线平分为两部分，均匀放在两个平行圆柱体的表面上，其他两相的导线则放在另两个同轴圆柱体的表面上，并且分

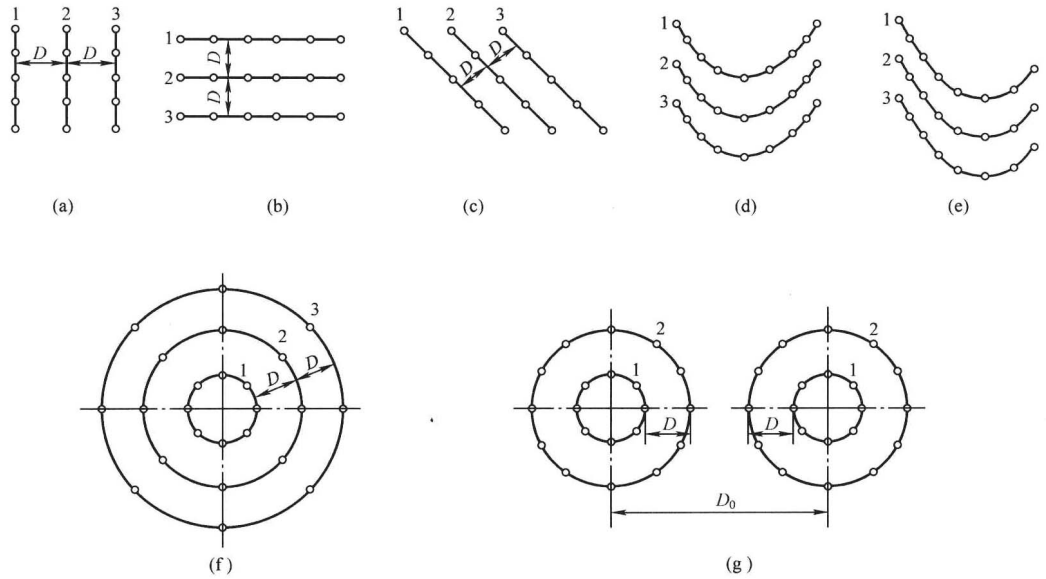


图 1-2 高自然功率紧凑型线路导线的不同布置方案  
 (a) 垂直平面型; (b) 水平平面型; (c) 任意倾斜平面型; (d) 对称抛物线型;  
 (e) 不对称抛物线型; (f) 同轴型; (g) 双重同轴型

别将第一相的导体包围起来。在这些布置方案中，除导线的排列形式不同外，相邻子导线的间距也并非完全相同，这样才能较好地改善场强分布。因此，高功率紧凑型线路中子导线设计成不规则的结构也就容易理解了。但高功率紧凑型线路具有不对称性，在实际的应用中，金具设计制造、施工工具及线路施工等方面都存在困难，因此目前尚未得到广泛应用。已建成的紧凑型线路以一般紧凑型线路为主，分裂导线多数采用对称布置。这种布置与高功率线路的不对称布置相比虽然影响了导线表面

利用系数，但在约束条件下进行优化，仍可使自然功率较常规线路有较大提高。对于一般紧凑型线路而言，其导线结构相比常规线路并未有重大改变，只是导线增加了相分裂子导线根数，分裂子导线为正多边形排列。三相导线间一般呈倒三角形排列，用 V 型绝缘子串限制导线的摇摆幅度，缩小相间距离。这种倒三角的排列方式，可以大幅降低线下工频电场、磁场的幅值和范围。另有部分线路三相导线的排列方式为直线型，两种导线的布置方式如图 1-3 所示。

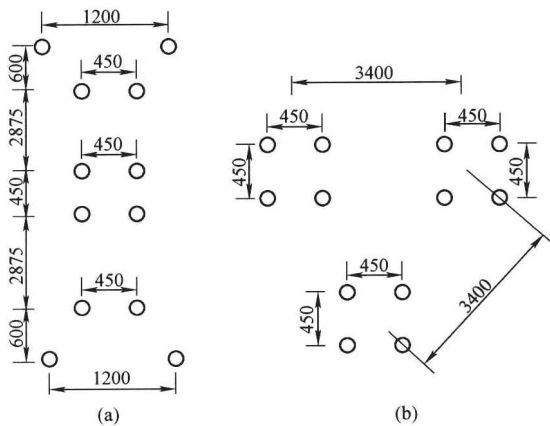


图 1-3 导线的两种排列方式  
 (a) 垂直排列; (b) 倒三角排列

## (二) 分裂导线数目和截面的影响

目前，紧凑型线路选用的分裂导线主要有四分裂导线、五分裂导线、六分裂导线、七分裂导线等，每种分裂导线结构都具有其各自的特性。下面以 500kV 线路的一种布置方式为

例介绍各种分裂数目下导线的性能（自然功率和场强已经过计算）。

### 1. 四分裂导线

常规 500kV 线路一般采用 LGJ—300×4 导线，相间距离取 12m，如图 1-4 所示。自然功率为 997MW，经济传输容量为 1173MVA，两者基本一致。从导线表面利用情况看，子导线表面的最大场强达到允许场强的 74% 以上（如图 1-4 中数字所示，数值为标么值），且各子导线都得到比较充分的利用，表明这种结构是合理的。将上述结构的相间距离减至 7.0m（苏联 500kV 紧凑型线路所采用的相间距离），然后进行与图 1-1 所示导线结构相似的优化排列（后同），使每根子导线表面的场强都接近允许场强，如图 1-5 所示。如选用型号为 LGJ—400 的导线，则线路的自然功率可提高到 1434MW，经济传输容量为 1564MVA。如果换成截面更大的导线，如 LGJ—500 的导线，那么经济传输容量上升到 1955MVA，而这种结构的紧凑型线路的自然功率很难达到这个数值。所以，就采用四分裂导线的紧凑型线路而言，1434MW 左右的自然功率是比较适宜的，宜选用的导线截面为 400mm<sup>2</sup>。

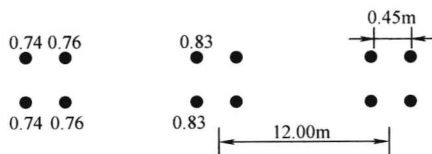


图 1-4 常规四分裂结构线路的场强分布

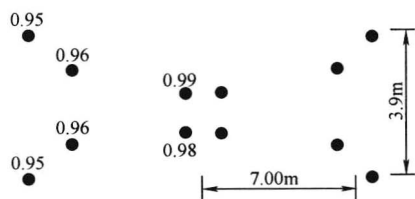


图 1-5 紧凑型线路四分裂结构的场强分布

### 2. 五分裂导线

若采用 LGJ—300 导线，五分裂结构的紧凑型线路的经济传输容量为 1466MVA。按照前述原则进行子导线的优化排列，最后得到图 1-6 所示的线路场强分布。

从计算结果看，子导线表面的场强都达到允许值的 80% 以上，自然功率为 1426MW，和经济传输容量也可以很好地吻合。比较图 1-5 和图 1-6 就会发现，虽然其自然功率很接近，但采用五分裂导线时边相的结构尺寸仅为 2.2m，而图 1-5 中相应的尺寸为 3.9m。五分裂结构的分裂数虽然较多，但其结构尺寸却较四分裂结构更合理一些。当导线截面扩大到 400mm<sup>2</sup> 时，线路的自然功率可达到 1856MW，其场强分布如图 1-7 所示。然而此时中相

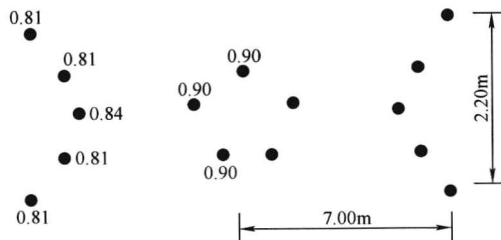


图 1-6 紧凑型线路五分裂结构  
(导线截面 300mm<sup>2</sup>) 的场强分布

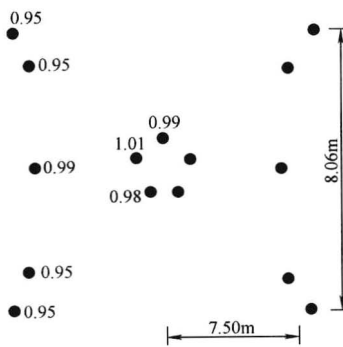


图 1-7 紧凑型线路五分裂结构  
(导线截面 400mm<sup>2</sup>) 的场强分布



已有两根子导线表面的最大场强超过允许值。不仅如此，整个边相的纵向尺寸高达 8.1m，中相的分裂间距增大到 1.2m，空间利用率明显劣化。

以上这些事实说明，LGJ—400 的导线对于五分裂紧凑型线路而言过粗，选择截面为  $300\text{mm}^2$  的导线比较适合。五分裂结构的紧凑型线路的自然功率取 1426MW。

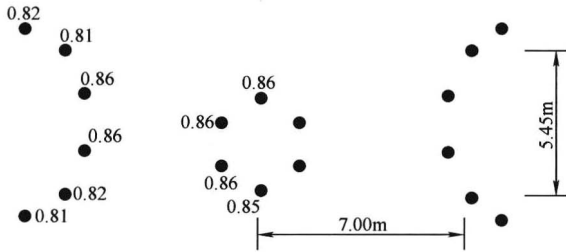


图 1-8 紧凑型线路六分裂结构 (导线截面  $300\text{mm}^2$ ) 的场强分布

### 3. 六分裂导线

从传输大电流方面讲，六分裂结构应采用截面不小于  $300\text{mm}^2$  的导线为宜，此时经济传输容量为 1760MVA。若选择 LGJ—300 的导线进行优化排列，自然功率为 1719MW，子导线表面的场强都达到 82% 以上，如图 1-8 所示。

从优化排列的过程中可以看到，六分裂结构的自然功率很容易接近经济传输容量的数值。此处中相的分裂间距为 0.5m，和常规线路很接近。如果需要可将分裂间距继续扩大，自然功率和场强都可进一步提高。所以，采用六分裂结构时导线可以得到很充分的利用。另外，三相导线还可按三角形布置，如图 1-9 所示。相间距离取 9.0m，此时三相结构相近，平均分裂间距为 0.75m，线路自然功率达到 1685MW。这种结构和常规线路相近，不需相间间隔棒，实现起来较容易。我国 500kV 的一般紧凑型线路常采用这种结构。

### 4. 七分裂导线

在不同的分裂数下按图 1-1 进行类似的优化排列时，可发现紧凑型线路中分裂数和线路自然功率的关系，如图 1-10 所示。当分裂数超过七时，尽管进行了优化排列，自然功率的上升还是一定程度上呈现出饱和趋势。所以，虽然在理论上紧凑型线路的分裂数和自然功率呈线性关系，可尽可能取得很大，但实际上由于结构尺寸、绝缘距离等诸多因素限制，分裂数的选取还是受到一定限制，一般不超过七。

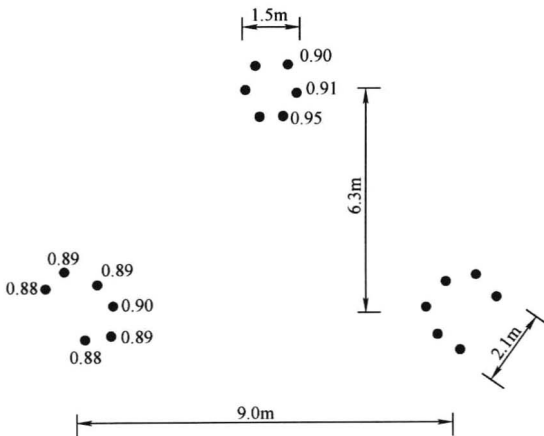


图 1-9 紧凑型线路六分裂结构三角形布置的场强分布

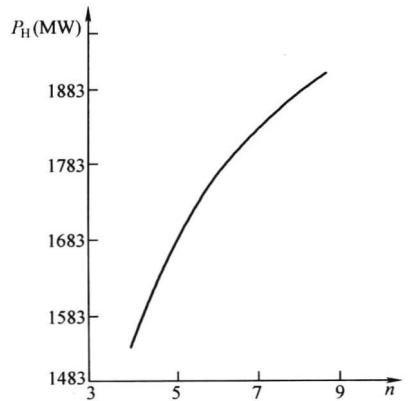


图 1-10 分裂数和自然功率的关系

当采用 LGJ—300×7 导线时线路的经济传输容量是 2051MVA。按照上述的标准计