

架空输电线路 经济电流密度计算

周华敏 刘云鹏 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

架空输电线路 经济电流密度计算

周华敏 刘云鹏 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了架空输电线路经济电流密度计算的相关内容，主要分为五章，第一章介绍了架空输电线路基本知识；第二章介绍导线截面选择的相关概念；第三章介绍 IEC 电缆导线选择标准解读；第四章介绍国内外经济电流密度计算方法；第五章为架空线路经济电流密度实例计算。

本书可供从事输电线路规划设计的技术、管理人员学习参考，也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

架空输电线路经济电流密度计算 / 周华敏等编著

— 北京：中国水利水电出版社，2016.1

ISBN 978-7-5170-4077-4

I. ①架… II. ①周… III. ①架空线路—输电线路—
电流密度—计算 IV. ①TM726.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第022820号

书 名	架空输电线路经济电流密度计算
作 者	周华敏 刘云鹏 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	165mm×240mm 16开本 8.5印张 110千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	34.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

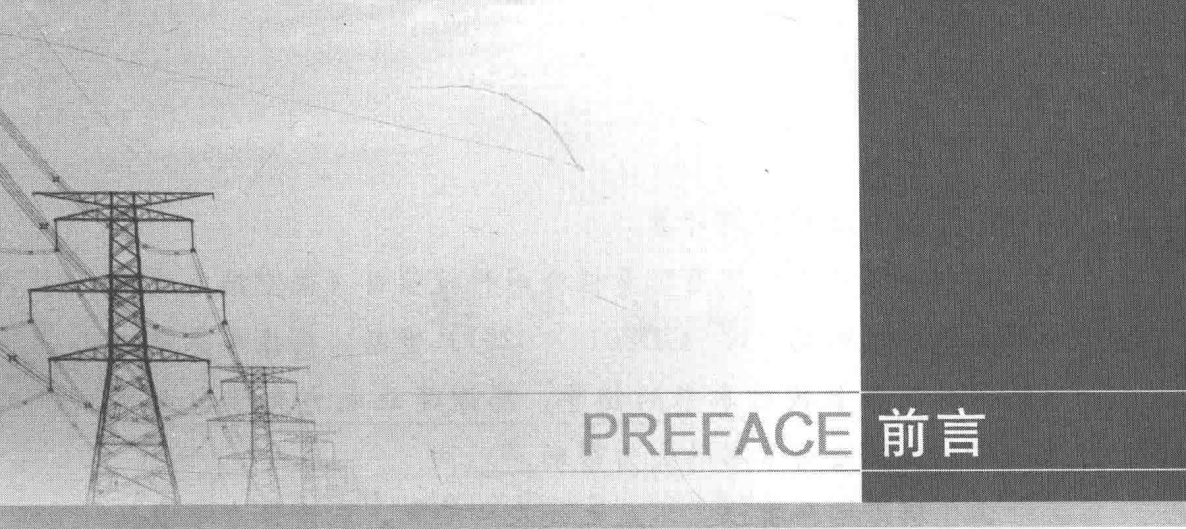
本书编委会

主 编 周华敏 刘云鹏

参 编 (按姓氏笔画排序)

刘益军 肖 微 张智青 陈邦发

陈斯翔 陈道品 耿江海 詹清华



PREFACE 前言

经济电流密度是输电线路规划设计阶段选择导线截面时的一个重要参考依据，其不仅决定着整条输电线路的总体建设费用，而且也直接影响着线路投运后的运行费用和退运后的报废价值。按照经济电流密度选择导线截面可在确保电网安全可靠的同时，提高电网资产的使用效率，实现电网资产精益化、全过程、全方位管理。

本书总结和阐述了现有书籍和资料中对经济电流密度这一概念的定义和相关概念，并对实际线路工程进行经济电流密度实例计算。

本书共五章，第一章主要介绍了架空输电线路的基本知识；第二章介绍了选择导线截面时涉及到的基本概念，包括负荷及负荷特性、电价、全寿命周期管理以及线路损耗等；第三章介绍了 IEC 287—3—2—1995 标准中对电力电缆经济截面最佳化的两种计算方法，推导出电缆导体经济电流密度公式；第四章总结国内外计算经济电流密度计算方法和我国经济电流密度标准和发展历史；第五章以实际线路工程为例，进行架空线

路经济电流密度的实例计算。

本书得到广东电网有限责任公司科技项目《架空输电线路经济电流密度研究(K-GD2014-029)》资助,感谢华东电力设计院叶鸿声教授对本书的指导,感谢华北电力大学田源博士、吉旺威博士对本书的大力帮助。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请读者予以批评指正。

编者

2015年12月

符 号 说 明

符号	说 明	单位
A	与导体尺寸有关的单位长度成本的可变部分	$\text{cu}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$
B	由式 (3-9) 定义的辅助量	—
C	与敷设条件等有关的单位长度成本的不变部分	cu/m
CT	系统总成本	cu
D	每年需求费用	$\text{cu}/(\text{W} \cdot \text{a})$
F	由式 (3-10) 定义的辅助量	cu/W
$I_{\max}$	第一年最大负载, 即最高时平均值	A
$I(t)$	作为时间函数的负载	A
l	电缆长度	m
CJ	N 年期间内焦耳损耗成本的现值	cu
N	经济计算适用的时期, 也称“经济寿命”	a
N_p	每回路相导体数目	—
N_c	传输同样型号和负载值的回路的数目	—
P	在相关电压水平上 1 瓦时的成本	$\text{cu}/(\text{W} \cdot \text{h})$
Cl	被考察电缆长度的敷设成本	cu
Cl_2	最接近较大标准导体尺寸的敷设成本	cu
Cl_1	最接近较小标准导体尺寸的敷设成本	cu
$Cl(s)$	作为截面函数的电缆的敷设成本	cu
Q	由式 (3-4) 定义的辅助量	—
R	单位长度电缆交流电阻, 包括 γ_p , γ_s , λ_1 , λ_2 效应 (在平均运行温度下被认为是恒定值, 见第 3 章第 3 节)	Ω/m
R_2	最接近较大标准导体尺寸的单位长度交流电阻	Ω/m
R_1	最接近较小标准导体尺寸的单位长度交流电阻	Ω/m

续表

符号	说 明	单位
$R(s)$	作为截面函数的单位长度导体交流电阻	Ω/m
s	电缆导体的截面	mm^2
s_{ec}	经济导体尺寸	mm^2
T	在最大焦耳损耗下的运行时间	h/a
a	I_{max} 的年增长率	%
b	P 的年增长率, 不涉及通货膨胀	%
i	计算现值用贴现率	%
r	由式 (3-5) 定义的辅助量	—
t	时间	h
y_p	邻近效应系数, 见 IEC 287-1-1	—
y_s	集肤效应系数, 见 IEC 287-1-1	—
α_{20}	20℃下导体电阻的温度校正系数	1/K
θ	最大额定导体运行温度	℃
θ_a	平均环境温度	℃
θ_m	平均导体运行温度	℃
λ_1, λ_2	护套和铠装损耗系数, 见 IEC 287-1-1	—
μ	损耗负载系数, 见 IEC 853	—
ρ_{20}	20℃下导体电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$



CONTENTS 目录

前言

符号说明

第一章	架空输电线路基本知识	1
第一节	概述	1
第二节	架空线的材料及结构分类	6
第三节	导线与地线的选择	11
第四节	绝缘子和金具	18
第五节	杆塔与基础	31
第六节	导线的排列方式与换位	40
第二章	导线截面选择的相关概念	47
第一节	负荷及负荷特性	47
第二节	现有负荷特性指标	49
第三节	电力电价	51
第四节	工程项目全寿命周期管理	52
第五节	交流送电线路电阻损耗	57
第六节	交流送电线路的电晕	59

第三章	IEC 电缆导线选择标准解读	65
第一节	概述	65
第二节	IEC 287—3—2—1995 电力电缆截面经济最佳化的基本公式	67
第三节	IEC 287—3—2—1995 标准推荐的电力电缆经济截面两种计算方法	71
第四节	电缆导体的经济电流密度	85
第五节	电力电缆经济截面选择特点	91
第四章	国内外经济电流密度计算方法	93
第一节	概述	93
第二节	现有经济电流密度计算方法简述	94
第三节	苏联的计算方法	99
第四节	欧洲国家的计算方法	102
第五节	美国经济截面计算方法	105
第六节	我国经济电流密度标准和计算方法	107
第五章	架空线路经济电流密度实例计算	119
第一节	工程概况	119
第二节	经济电流密度计算	120
参考文献		123

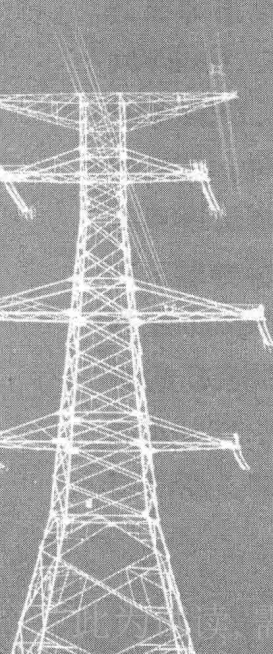
第一章 架空输电线路基本知识

第一节 概 述

一、输电线路的任务

地球上的煤、石油和江河等动力资源的分布是自然决定的，通常远离电力负荷中心。火力发电厂可以建在能源基地，也可以建在负荷中心附近，这取决于远距离输电经济还是运送燃料经济。一座 300 万 kW 的燃煤发电厂，其年耗原煤 1500 万~2000 万 t，若将其建在负荷中心附近，所耗原煤的年运量将超过一条铁路专用线的年运输量，此外负荷中心往往是人口密集区，这么多原煤燃烧会产生严重的污染。因此从技术上、经济上和环境污染等方面比较，现代化的大型火力发电厂均应建在能源基地。水力发电厂则只能建在水力资源处。这些电厂发出的电能通过输电线路向负荷中心输送。

发电厂、输电线路、升降压变电站以及配电设备和用电设备构成电力系统。为了减少系统的备用容量，错开高峰负荷，实现跨区域、跨流域调节，





增强系统的稳定性,提高抗冲击负荷的能力,在电力系统之间采用高压输电线路进行联络(联网)。电力系统联网,既提高了系统的安全性、可靠性和稳定性,又可实现经济调度,使各种能源得到充分利用。起系统联络作用的输电线路,可进行电能的双向输送,实现系统间的电能交换和调节。

因此,输电线路的任务就是输送电能,并联络各发电厂、变电站使之并列运行,实现电力系统联网。高压输电线路是电力工业的大动脉,是电力系统的重要组成部分。

二、输电线路的分类

输送电能的线路通称为电力线路。电力线路分为输电线路和配电线路。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输(送)电线路。由电力负荷中心向各个电力用户分配电能的线路称为配电线路。

输电线路按电压等级分为高压、超高压和特高压线路。35~220kV的线路为高压(HV)线路,330~750kV的线路为超高压(EHV)线路,750kV以上的线路是特高压线路。一般地说,输送电能容量越大,线路采用的电压等级就越高,相邻的电压等级通常相差2~3倍。目前我国输电线路的电压等级有35kV、(66kV)、110kV、(154kV)、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV,其中66kV、154kV新建线路不再使用。采用超高压输电,可有效地减少线损,降低线路单位造价,少占耕地,使线路走廊得到充分利用。我国第一个世界上海拔最高的“西北750kV输变电示范工程”——青海官亭至甘肃兰州东750kV输变电工程,于2005年9月26日正式投入运行。“1000kV交流特高压试验示范工程”——晋东南—南阳—荆门1000kV输电线路工程,于2006年8月19日开工建设。该工程起自晋东南1000kV变电站,经南阳



1000kV 开关站，止于荆门 1000kV 变电站，线路路径全长约 650.677km。

输电线路按架设方式分为架空线路和电缆线路。架空线路由于结构简单、施工简便、建设费用低、施工周期短、检修维护方便、技术要求较低等优点，得到广泛地使用。但是，线路设备长期露置在自然环境中，易受各种气象条件（如大风、覆冰雪、气温变化、雷击等）的侵袭，化学气体的腐蚀以及外力的破坏，出现故障的概率较高。电缆线路受外界环境因素的影响小，但需用特殊加工的电力电缆，费用高，施工及运行检修的技术要求高。目前仅用于城市居民稠密区和跨海输电等特殊情况。

输电线路按输送电流的性质分为交流线路和直流线路，最常见的是三相交流线路。与交流线路相比，在输送相同功率的情况下，直流线路需要的投资较少，主要材料消耗低，线路的走廊宽度也较小；作为两个电力系统的联络线，改变传送方向迅速方便，可以实现相间频率甚至不同频率交流系统之间的不同步联系，能降低主干线及电力系统间的短路电流。随着换流技术的不断完善和换流站造价的降低，超高压直流输电有着广泛的应用前景。1987 年 9 月我国建成了第一个 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程——葛（葛洲坝）上（上海）线。该工程全长 1051km，每极采用 4XLGJQ-300 型导线，输送容量 1200MW。云广 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程，于 2006 年 12 月 19 日开工建设，线路全长 1438km，西起云南楚雄州禄丰县，东至广州增城，额定输电容量达 5000MW。

输电线路按杆塔上的回路数目分为单回路、双回路和多回路线路。除架空地线外，单回路杆塔上仅有一回三相导线，双回路杆塔上有两回三相导线，多回路杆塔上有三回及以上的三相导线。

输电线路按相导线之间的距离分为常规型线路和紧凑型线路。



三、架空输电线路的组成

架空输电线路主要由导线、地线、绝缘子（串）、线路金具、杆塔和拉线、基础以及接地装置等部分组成，如图 1-1 所示。

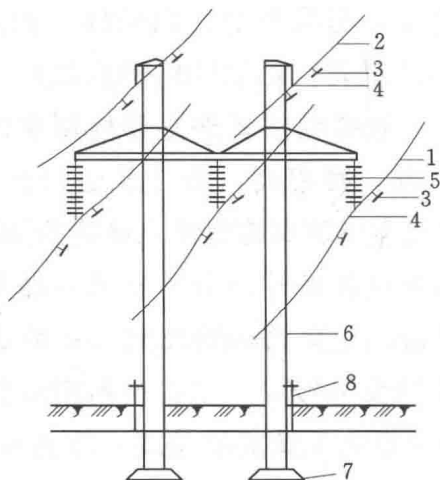


图 1-1 架空输电线路示意图

- 1—导线；2—地线；3—防振锤；
4—线夹；5—绝缘子；6—杆塔；
7—基础；8—接地装置

1. 导线

导线用以传导电流，输送电能。它通过绝缘子悬挂在杆塔上。导线常年在自然环境中运行，长期受风、冰、雪和温度变化等气象条件的影响，承受着变化拉力的作用，同时还受到空气中污物的侵蚀。因此导线除应具有良好的导电性能外，还必须有足够的机械强度和防腐性能，并要质轻价廉。

2. 地线

地线又称避雷线，是悬挂在导线上方的一根或两根金属线，



主要作用是防止雷电直击导线，同时在雷击杆塔时起分流作用，对导线起耦合和屏蔽作用，降低导线上的感应过电压。

3. 绝缘子

绝缘子用来支持或悬挂导线和地线，保证导线与杆塔间不发生闪络，保证地线与杆塔间的绝缘。绝缘子长期暴露在自然环境中，经受风雨冰霜及气温突变等恶劣气候的考验，有时还受到有害气体的污染，因此绝缘子必须具有足够的电气绝缘强度和机械强度，并应定期检修。

4. 线路金具

线路金具是输电线路所用金属部件（除杆塔螺栓外）的总称。线路金具种类繁多，用途各异，常用的有线夹、接续金具、连接金具、保护金具以及拉线金具等。线路金具通常承受较大的荷载，需要有足够的强度。与导线相连的金具还必须具有良好的电气性能。金具质量的好坏，使用和安装是否正确，对安全送电有很大的影响。在设计线路时，应尽量选择标准金具。

5. 杆塔和拉线

杆塔用来支持导线、地线及其他附件，使导线以及地线之间彼此保持一定的安全距离，并保证导线对地面、交叉跨越物或其他建筑物等具有允许的安全距离。目前常用的杆塔有钢筋混凝土电杆和铁塔两种。在线路总投资中，杆塔部分约占 40%，因此设计时应尽量做到杆塔结构简单、材料消耗量少、机械强度高、便于施工安装和维护。

拉线用来平衡杆塔的横向荷载和导线张力，减少杆塔根部的弯矩。使用拉线可减少杆塔材料的消耗量，降低线路的造价。



6. 杆塔基础

杆塔基础的作用是支承杆塔，传递杆塔所受荷载至大地。杆塔基础的型式很多，应根据所用杆塔的型式、沿线地形、工程地质、水文和施工运输等条件综合考虑确定。

7. 接地装置

接地装置的作用是导泄雷电流入地，保证线路具有一定的防雷水平。

第二节 架空线的材料及结构分类

一、常用架空线的材料

导线和地线通称架空线。架空线常采用多股绞线，其单股材料通常有铜线、铝线、铝合金线、铝包钢线、铜包钢线和钢线等。架空电力线路经常使用的多股绞线是用上述材料扭绞制成的绞线，如铜绞线、铝绞线、钢绞线、铝合金绞线、铝包钢绞线、铜包钢绞线及不同材料构成的复合绞线，如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、钢芯铝包钢绞线、钢芯铜包钢绞线及光纤复合钢铝混绞线等。常用架空线的材料包括以下几种：

(1) 铜。铜是理想的导线材料，其导电性能和机械强度均好，但价格较贵，除特殊需要外，输电线路一般不使用。

(2) 铝。铝质轻价廉，导电性能仅次于铜，但机械强度较低，仅用于两相邻杆塔间水平距离（挡距）较小的 10kV 及以下线路。此外，铝的抗腐性也较差，不易在污秽区使用。

(3) 铝合金。铝合金的导电性能与铝相近，机械强度接近铜，



价格却比铜低，并具有较好的抗腐性能，不足之处是铝合金受振动断股的现象比较严重，使其使用受到限制。随着断股问题的解决，铝合金将成为一种很有前途的导线材料。

(4) 钢。钢具有较高的机械强度，且价格较低，但导电性能差。钢材料的架空线一般作为地线使用，作为导线使用仅用于跨越江河山谷的大挡距及其他要求机械强度大的场合。为防腐蚀，钢线需要镀锌处理。

二、常用架空线的结构及型号规格

输电线路用架空线基本都由多股圆线同心绞合而成，常用的是铝绞线、镀锌铝绞线、钢芯铝绞线。各种架空线的结构如图 1-2 所示。

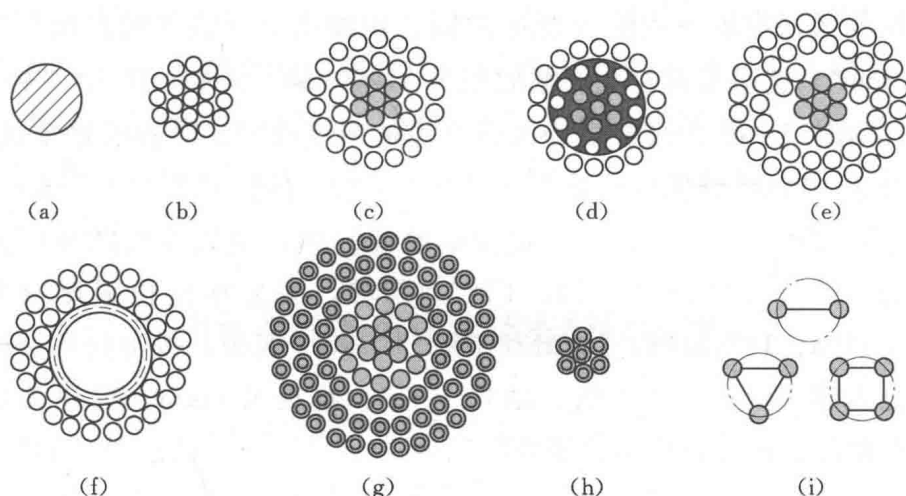


图 1-2 各种导线和地线的断面结构

- (a) 单股导线；(b) 单一金属绞线；(c) 钢芯铝绞线；(d) 防腐钢芯铝绞线；
(e) 扩径钢芯铝绞线；(f) 空心导线（腔中为蛇形管）；(g) 钢芯铝
包钢绞线；(h) 铝包钢绞线；(i) 分裂导线

现行国家标准 GB/T 1179—2008《圆线同心绞架空导线》，等