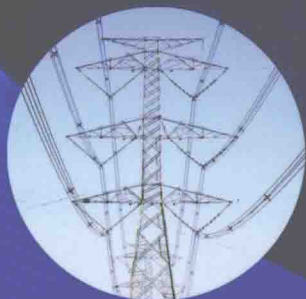


架空输电线路 经济电流密度研究

詹清华 陈邦发 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

架空输电线路 经济电流密度研究

詹清华 陈邦发 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,主要分为七章,第一章介绍输电线路经济电流密度确定的背景及意义;第二章介绍全寿命周期相关概念;第三章研究输电线路全寿命周期成本建模及敏感性分析;第四章介绍基于LCC理论的经济电流密度确定;第五章为基于LCC的经济电流密度算例分析;第六章研究输电线路经济电流密度辅助决策系统的开发;第七章为对本书研究内容的总结。

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(CIP)数据

架空输电线路经济电流密度研究 / 詹清华等编著

. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-5170-4120-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第030546号

书 名	架空输电线路经济电流密度研究
作 者	詹清华 陈邦发 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 8.25印张 108千字
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

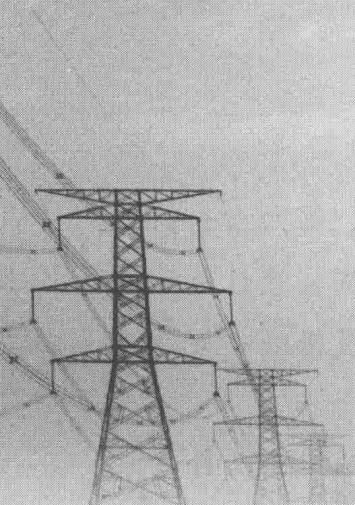
本书编委会

主 编 詹清华 陈邦发

参 编 (按姓氏笔画排序)

刘云鹏 李恒真 肖 微 张 鸣

欧晓妹 周华敏 耿江海 黄 静



PREFACE 前言

导线经济电流密度的确定是一个技术经济问题，与国家在不同国民经济发展阶段的经济政策和生产水平有着密切的关系。经过近四十年改革开放的发展，我国国民经济和人民生活水平快速提升，国内外技术、经济等因素也发生了显著的变化，几十年前制定的经济电流密度标准已经不能很好地适用当前的实际经济情况。深入研究电流密度的合理取值，优选导线截面，可以实现线路工程资源占用和长期能源消耗间的平衡，有利于输电系统的节能降耗，对构建“资源节约型、环境友好型”电网起到积极的推动作用。

本书结合现有经济电流密度的计算方法和全寿命周期成本理论，对经济电流密度的计算方法进行修正和改进，设计架空输电线路经济电流密度辅助决策系统，为设计人员提供完善、便利的工作平台。

本书共七章。第一章介绍输电线路经济电流密度确定的背景及意义，总结了国内外的研究现状和发展历史；第二章介绍了全寿命周期成本理论和资产分析评价的计算方法；第三章研

究输电线路全寿命周期成本建模及敏感性分析；第四章和第五章研究基于全寿命周期成本的输电线路经济电流密度计算方法和实际算例；第六章研究输电线路经济电流密度辅助决策系统的开发。

本书得到广东电网有限责任公司佛山供电局科技项目《架空输电线路经济电流密度研究（K-GD2014-029）》资助，感谢广东电网有限责任公司科技部、设备部，佛山供电局财务部、输电管理所对本书相关工作的大力支持和帮助。

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



CONTENTS 目录

前言

第一章 概述	1
第一节 背景及意义	1
第二节 国内外研究现状	3
第三节 本书主要内容	10
第二章 全寿命周期	13
第一节 资产全寿命周期成本简介	13
第二节 研究内容及关键设计原则	14
第三节 成本计算方法设计原则及思路	17
第四节 资产分析评价成本计算方法	19
第五节 项目分析评价成本计算方法	33
第三章 输电线路全寿命周期成本建模及敏感性分析	41
第一节 全寿命周期成本理论	41
第二节 资金的时间价值	44
第三节 输电线路全寿命周期成本建模	47

第四节	模型敏感性分析	53
第五节	算例分析	56
第六节	输电线路 LCC 管控策略	63
第七节	本章小结	64
第四章	基于 LCC 理论的经济电流密度确定	65
第一节	LCC 理论在经济电流密度中的应用	65
第二节	经济电流密度公式推导	66
第三节	模型参数灵敏度分析	85
第四节	本章小结	89
第五章	基于 LCC 的经济电流密度算例分析	91
第一节	算例工况	91
第二节	LCC 成本计算	93
第三节	本章小结	103
第六章	输电线路经济电流密度辅助决策系统	105
第一节	开发平台	105
第二节	系统简介及逻辑架构	107
第三节	系统安装与配置	109
第四节	辅助决策系统功能操作演示	113
第五节	系统功能特点与优势	116
第六节	本章小结	117
第七章	结论	119
参考文献		121

第一章 概述

第一节 背景及意义

输电线路作为电力系统的主干部分，其合理的规划和设计对电网经济效益和社会效益有着至关重要的作用。传统的输电线路管理方式以节约初始投资为主，缺乏对长期效益的考虑，不能满足新时期电网的管理要求。对输电线路全寿命周期成本建模，不仅可以实现输电线路在电网规划阶段的技术评价，避免输电线路的投资浪费，在输电线路投运后，运行维护、故障检修等环节也可以通过决策来优化输电线路全寿命周期成本，对提高经济效益和社会效益有一定参考意义。

综合考虑各个时期的导线材料、最大负荷利用小时数、线路长度和电价等因素，比较得出合理的电流密度，采用这一密度进行设计可使线路投资损耗、运行等综合费用最小。这时的电流密度即经济电流密度，导线的截面称为经济截面。

1956 年我国电力工业部颁布了第一个经济电流密度规定^[1]。20 世纪 80 年代，水利电力部根据我



国的技术经济政策和建设、生产运行实践经验,结合当时的实际情况,在1987年颁布的SDJ 14—1986《导体和电器选择设计技术规定》中对1956版经济电流密度进行了修订^[2]。2005年,中国电力企业联合会组织专家制定了电力行业标准DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》,取代原有1986年标准^[3]。

我国目前颁布的经济电流密度值选择标准只反映了负荷性质($T_{\max}$)这个变量,而更重要的与不同时期密切相关的导线价格和电能单价等动态参数无法得到体现,只能算是静态模式下的推荐值。影响导线经济电流密度的因素很多,如抵偿年限、导线种类、负荷性质、材料价格和电能单价等,尤其是现在线路的材料价格、电能单价等较当时已发生了几倍甚至几十倍的变化。因此,现行的静态模式下的经济电流密度的经济性受到合理与否的怀疑^[4-6],值得做进一步的探索和研究。目前经济电流密度的计算,只考虑了线路初始投资和线路运行损耗之间的平衡,没有考虑到不同的截面的输电线路在运行过程中,对检修成本、定期维护成本以及退役初值成本的影响。从全寿命周期角度考虑,通过目前经济电流密度确定的导线并不一定是最经济的。为此,需要对导体经济截面和经济电流密度进行再研究,得出符合当前我国经济发展形势和企业经营状况的经济电流密度推荐值,既能显著提高公司拟经营效益,也符合当前的节能减排的经济发展趋势,具有十分重要的经济效益和社会效益。

全寿命周期(Life Cycle Cost, LCC)理论是对线路全寿命周期实行全过程统一管理。目的是为了最大限度降低工程成本,提高使用效益,并最终实现全寿命成本最低的目标。全寿命周期成本管理和可持续性结合起来,是绿色能源的发展方向,在计算成本时考虑了环境的影响^[7]。通过全寿命周期理论来确定经济电流密度,用此经济电流密度进行导线选型,在保证企业的经济效益的



同时,使社会效益最大。

经济电流密度对导线选型至关重要,基于全寿命周期确定的经济电流密度,在考虑线路的经济性的同时还兼顾其社会效益。因此,从全局出发对输电线路建立全寿命周期模型,确定符合当前电网发展的经济电流密度,对降低线路运行成本、减少材料损耗等实际问题有着十分重要的现实意义。

第二节 国内外研究现状

一、全寿命周期理论研究现状

20 世纪初,全寿命周期理论出现在瑞典的铁路交通系统^[8]。20 世纪 60 年代中期,美国军方首次创立了军备系统的 LCC 概念,继美国军方运用之后,LCC 方法逐步走向成熟化和国际化^[9]。

欧洲和北美洲国家对于 LCC 技术运用较为成熟,到目前为止,LCC 技术不仅仅局限于军备的管理上,也逐步向电力系统推广。该技术在电力系统中的应用具有先进性和前瞻性,已有研究人员将 LCC 技术应用在输配电线路和核电站中。美国首先将 LCC 应用于核电站中,由于核电站的建设将可靠性作为先决条件,因此在满足核电站可靠性要求的基础上对其进行 LCC 管理,具有重要的意义。LCC 技术进一步推向了发电机、变压器、低压输配电等系统中,并取得了一定的研究成果。

我国于 1987 年开始研究 LCC 理论,并逐步应用在国防建设、能源工程、航空航天以及民用工程等领域。已有学者利用 LCC 理论,参考了军舰的自然寿命后,计算出在役舰船的经济寿命,并对军舰的最佳服役时限提出了建议。另外,国家“863”项目“天地往返运输系统”中,研究人员开发了基于 LCC 技术的决策系统,



对几个备用方案做出测评,并对可以多次使用的运载器进行了 LCC 建模和测评,以选出最优的运载器方案。随着越来越多学者的关注和深入研究,LCC 技术已经逐步应用到我国的纺织、医药、钢铁、船舶、矿山、铁路等各行业和领域之中^[10-11]。LCC 技术在电力设备中也有一定的应用,主要涉及设备选型、采购、运行检修策略、更新改造、寿命评估等方面。

综上所述,将全寿命周期成本理论推广应用到电力系统中,避免了短视的行为,对于提高电网资产管理效率,获取长远经济效益具有重要的意义。目前的 LCC 理论应用多集中在变压器、断路器、输电线路等电力设备管理中,如何不仅仅局限于设备级 LCC 研究,而着眼于变电站级、甚至是整个系统级是近年来的研究难点。

二、全寿命周期成本建模研究现状

全寿命周期成本的概念最早出现在上半个世纪 60 年代中期的美国国防部^[12],并主要使用在军事领域的重要军用器材的采购过程中,以减少武器装备的全寿命周期成本^[13-14]。美国最先将全寿命周期成本管理理论和方法应用于核电站管理,并逐步把该技术推向了发电机、大型变压器、励磁机、低压输配电系统、仪用空气系统的管理^[15]。

资产全寿命周期管理(Life Cycle Asset Management, LCAM)起源于全寿命周期成本管理,是 LCC 管理理念的发展和丰富^[16]。全寿命周期管理是通过一定的组织形式,采取相应的措施与方法,对项目所有工作和系统的运行过程进行计划、协调、监督、控制和总结评价,以满足项目功能和使用要求,符合可持续发展、提高投资效益的目的。自 2005 年以来,LCC 管理理念被不同程度地应用到电力行业工程项目中,但对于输电线路工程建设,因其自身的特点和局限性,有待将这



—先进的管理方法进一步推广。

全寿命周期成本估算程序包括资产设备的获取、持有和报废处理的整个寿命周期内相关的定义和评估。具体实施过程包括 8 个步骤^[18]。文献 [7] 从全寿命成本管理的角度,分析了现阶段输电线路设计、建设、运行模式,提出了一些建议和看法,对全寿命成本原理应用于电网工程建设具有一定的参考价值。文献 [19] 详细介绍了全寿命周期费用的基本概念,并通过 ±500kV 蔡白线绝缘设计方案的全寿命周期费用优化决策的应用实例,指出了全寿命周期在输电线路建设过程中具有广泛的应用前景。文中用 LCC 决策对输电线路不同材质绝缘子特性和维护费用进行比较分析,综合考虑全寿命周期内各种因素及全过程,从而获得费用效能最优方案,为全寿命周期管理理论优化提供了思路和方法。文献 [20] 在架空线选型中应用 LCC 理论,由此大大节约了线路的初始投资,从而降低了线路寿命期内的总成本。

根据 IEC 60300—3—3^[21],全寿命周期成本可以划分为概念和定义、设计发展、制造、安装、运行和维护、退役 6 个部分。在很多情况下,可以将不同的部分合并成 3 部分,即初次投资、运行维护成本、回收成本。文献 [22] 在 IEC 60300—3—3 的基础上,对一个 110kV 架空输电线路进行了全寿命周期成本分析。全寿命周期成本方法可以有效地进行线路选型和设备比较。

文献 [23] 提出了一套交流输电线路全寿命周期成本的估算公式,利用已有工程数据进行估算,并对估算进行分析。文中将线路成本划分为一次投入成本、运行损耗成本、运行维护成本以及退役成本。对于运行维护成本,根据大量统计分析给出了预估公式。对 500kV 的高压线路工程进行了估算,分析的误差在 10% 以内。该模型过于简略,精确度不高。

文献 [24] 中提到线路 LCC 由一次投资成本 (IC)、运行成本 (OC)、故障引起的中断供电损失成本 (FC)、工期变化引起的时



间成本 (TC)、报废成本 (DC) 5 部分组成。文献对输电线路主要部件进行了分析计算, 说明了输电线路 LCC 计算步骤, 在设计中考虑了各个因素对输电线路全寿命周期的影响。在缺乏部分数据的情况下, 输电线路 LCC 可以容许不考虑共同拥有费用。文献 [25] 采用该模型进行了导线选型的研究, 并对全寿命周期成本中的元素进行了敏感性分析, 得出了上网电价及电阻损耗、电晕损耗对输电线路全寿命周期成本影响极大的结论, 这与经济电流密度的关键影响因素一致。对运行成本的费用, 可以考虑采用参数法进行估算, 文献给出了估算公式。文献提出了中断供电成本的计算模型、线路损耗成本计算式。报废成本的计算以历史数据为参考。

文献 [26] 提出了输电线路全寿命周期总成本和各主要部件的成本预测模型, 对一般地区输电线路系统及主要部件的设计使用年限、寿命匹配原则给出建议。

文献 [27] 对一次投资成本引入宏观经济参数修正, 对运行损耗成本主要计算导线及地线损耗, 对运行维护成本提出了估算公式, 利用产电比法对故障损失成本进行计算, 并提出退役成本的估算公式。给出了特高压直流输电线路导线选择的目标函数。

文献 [28] 从寿命周期、成本类型和业务活动三个维度分析了架空输电线路全寿命周期成本估算模型, 对河北省电力公司近年主设备全寿命周期成本管理情况进行了实证分析。该模型针对 110kV 线路, 对于 500kV 的线路, 部分成本模型需要重新建立。

综上所述, LCC 理论在电网中的应用具有广阔的前景, 但目前存在全寿命期模型混杂、数据积累不足等一系列问题, 有必要进行深入的研究。

三、国内经济电流密度选择发展史

我国在经济电流密度的采用方面, 大致可分为三个阶段:



1. 第一阶段，新中国成立初期（即 1949—1955 年）

第一阶段主要参考苏联 20 世纪 50 年代初推荐的经济电流密度，如表 1-1 所示。

表 1-1 苏联经济电流密度 单位：A/mm²

导线材料	最大负荷利用小时数/h		
	<3000	3000~5000	>5000
裸铜线	2.5	1.75	1.25
裸铝、钢芯铝线	1.5	1.0	0.75

该经济电流密度是根据最小年运行费用法求得的，即年运行费用包括电能损耗（导线发热损耗和电晕损耗）费、折旧费和维护管理费（所占比重较小，通常可忽略）。除维护管理费外，其他都随导线截面的大小而变化。取使得年运行费用为最小的导线截面作为经济截面，对应的电流密度为经济电流密度，如图 1-1 所示。

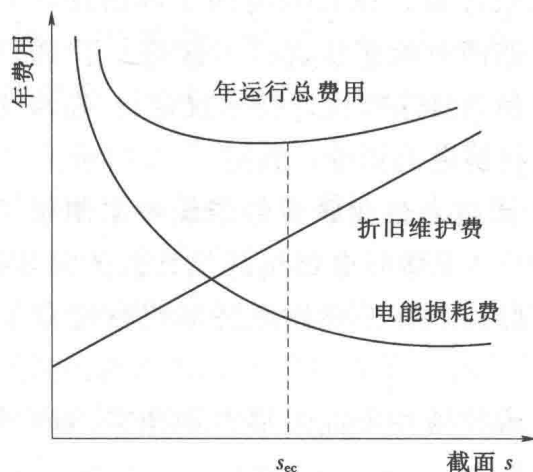


图 1-1 经济电流密度曲线



2. 第二阶段（1956 年至 20 世纪 80 年代中期）

1956 年，我国电力工业部颁布的经济电流密度如表 1 - 2 所示。

表 1 - 2 1956 年的经济电流密度 单位：A/mm²

导线材料	最大负荷利用小时数/h		
	<3000	3000~5000	>5000
铝线	1.65	1.15	0.9
铜线	3.0	2.25	1.75

这是我国颁布的第一个经济电流密度规定。编制该经济电流密度时，考虑到我国国情，在适当节省建设投资和有色金属消耗的情况下，仍采用最小年运行费用法计算得出。该经济电流密度表格至今仍在使用。

3. 第三阶段（20 世纪 80 年代中期至今）

20 世纪 80 年代，水利电力部根据我国的技术经济政策和建设、生产运行实践经验，结合当时的实际情况，并尽可能吸收国外先进技术，对经济电流密度进行了修订。于 1987 年颁布了 SDJ 14—1986《导体和电器选择设计技术规定》。在该文件中公布了修订后曲线形式的经济电流密度，如图 1 - 2 所示。

2005 年，中国电力企业联合会组织专家制定了电力行业标准 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》，取代原有的 SDJ 14—1986，但其中有关导体经济电流密度章节内容未作较大改动。

综上所述，从我国在不同发展时期所采用的导线经济电流密度来分析，可以看出：

（1）我国已经颁布的经济电流密度选择标准只反映了最大负

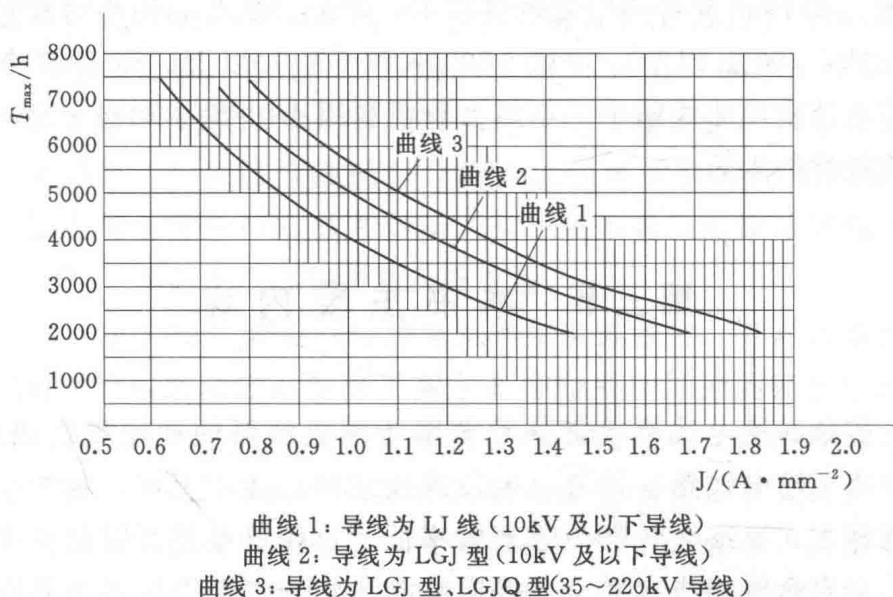


图 1-2 经济电流密度

荷利用小时数这个变量，而更重要的与不同时期密切相关的影响因素，如抵偿年限、导线种类、负荷性质、材料价格和电能单价等无法得到体现，模型参数有待完善。

(2) 从不同阶段所采用的经济电流密度来分析，在采用同样材料的导线、同样的年最大负荷利用小时情况下，其发展趋势是经济电流密度值在不断递增。例如，同样采用钢芯铝绞线，年最大负荷利用小时都为 4000h (3000~5000h)，其经济电流密度，1956 年为 $1.15\text{A}/\text{mm}^2$ ，而 1987 年为 $1.28\text{A}/\text{mm}^2$ ，增加了 $0.13\text{A}/\text{mm}^2$ 。又由于当前电价和金属材料价格发生了改变，还要对已颁布的导线经济电流密度进行必要的修改。

(3) 我国经济电流密度在不断修改、完善，更加周密、实用。1956 年颁布的经济电流密度表中只有裸铝、钢芯铝线，而在 1987 年颁布的经济电流密度曲线图中，就进一步分为：导线为 LJ 型，10kV 及以下的电力线路；导线为 LGJ 型，10kV 及以下的电力线路；导线为 LGJ 型、LGJQ 型，35~220kV 电力线路。分得较为