



中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

南方电网科学研究院有限责任公司

专著出版资金资助项目



高海拔特高压直流输电工程

电磁环境

主 编 饶 宏

副主编 李锐海 曾 嵘 刘 磊

GAOHAIBA TEGAOYA
ZHILIU SHUDIANGONGCHENG DIANCHIHUANJING



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

高海拔特高压直流输电工程 电磁环境

主 编 饶 宏

副主编 李锐海 曾 嵘 刘 磊



内 容 简 介

本书是在南方电网科学研究院多年来对高海拔直流工程电磁环境试验和研究的基础上总结编写的,介绍了特高压工程技术(昆明)国家工程实验室在高海拔直流电磁环境技术领域的研究成果,反映了电力行业在高海拔直流电磁环境研究上的新技术和新发展,工程性、适用性强。

本书内容共分为7章:概述;高海拔直流工程电磁环境形成机理和分析方法;电磁环境参数测试方法;高海拔直流输电线路电磁环境特性、预测及海拔修正;高海拔直流金具电磁环境特性和起晕场强预测;换流站电磁环境特性;高海拔直流输电工程电磁环境抑制措施。

本书可供从事直流输电电磁环境研究专业的科研试验、线路和变电站/换流站规划设计、施工建设和运行管理的技术人员学习使用,也可供高等院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高海拔特高压直流输电工程电磁环境/饶宏主编. —北京:
中国电力出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-5123-7937-4

I. ①高… II. ①饶… III. ①高纬度地区-特高压输电-直流
输电-电力工程-电磁环境-研究 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第140974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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年11月第一版 2015年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10印张 173千字

印刷 0000—1500册 定价 50.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

《高海拔特高压直流输电工程电磁环境》

编 写 人 员

主 编 饶 宏

副主编 李锐海 曾 嵘 刘 磊

参 编 余占清 李 敏 赵志斌

张 波 王国利 罗 兵



序



能源是人类生存和社会发展的基础。我国能源资源主要分布在西部和北部，能源需求主要分布在东部和中部。这种能源资源与需求的逆向分布，决定了我国能源资源必须在全国范围内优化配置。高压直流输电是一种先进的远距离、大容量输电技术，在我国能源资源的优化配置中发挥着越来越大的作用。

高压直流输电主要采用正极性和负极性架空线路输送。考虑到输电线路建设的经济性，运行时允许线路导线表面存在一定程度的电晕放电。高压直流输电线路的这种电晕放电，会产生合成电场、离子流密度、无线电干扰和可听噪声等，需要采取有效的控制措施将电磁环境参数控制在国家标准规定的限值之内。

目前，国内外高压直流输电线路的电晕放电及其电磁环境的研究成果主要是在低海拔环境下研究取得的。高海拔环境下的研究成果基本空白。

中国南方电网有限责任公司承担着西部电力外送广东的重任，有大量的高压直流输电线路经过云南、贵州等高海拔地区。2009年，中国南方电网有限责任公司在云南昆明2100m海拔点建成了“特高压工程技术（昆明）国家工程实验室”。5年来，南方电网科学研究院依托该实验室，联合国内研究团队，全面开展了高海拔环境下特高压直流输电线路电晕放电及其电磁环境的研究，包括“直流试验线段、户外试验场建设相关技术支撑研究”、“高海拔±800kV HVDC电晕特性及其电磁环境影响研究”、“特高压直流线路电磁干扰抑制措施试验研究”、“高海拔地区±800kV特高压直流输电线路金机电晕特性及优化设计研究”、“南方电网变电站、换流站电磁环境普测及标准修订”等。研究成果已成功应用于云南—广州、楚雄—穗东等特高压直流输电工程。

为了及时总结“特高压工程技术（昆明）国家工程实验室”及云南—广州特高压直流输电示范工程取得的研究成果，推动特高压直流输电技术的进步，使研究成果更广泛地应用于特高压直流输电工程，南方电网科学研究院组织编写了本书。

本书紧密围绕我国一些高压直流输电工程所特有的高海拔环境，论述了正极性和负极性导线表面的电晕放电及其产生的合成电场、离子流密度、无线电干扰和可听噪声等的机理与分析方法，以及高海拔影响因素。针对高海拔环境提出了电磁环境参数

的测试方法和标准，获得了特高压直流输电线路和换流站的电磁环境特性，并给出了预测方法、海拔修正方法及治理技术与防护措施。

本书体系完备，重点突出，数据翔实，特色鲜明，方便实用。

本书的出版发行，为从事高海拔环境下高压直流输电工程的电磁环境研究、设计、建设、运行等方面的技术和管理人员，提供了一本有价值的专业参考书。

崔 翔

华北电力大学教授

2015年1月30日

前言

高压直流输电技术相比于交流输电技术更适合于跨区域、远距离及大容量输送电能，是解决我国能源和负荷逆向分布的首选方案。线路电晕放电现象在不同海拔地区有显著差异。其主要原因在于高海拔地区大气压强较低，空气较为稀薄，电子的自由行程较大。在同样电场力的加速下，将积累更大的动能，从而使放电更易发生，一旦发生也更强烈。因此，高海拔地区特高压直流输电系统的电磁环境问题较低海拔地区更为严重。

从 20 世纪 70 年代开始，美国、加拿大等国都进行了特高压直流输电的研究，开展了系统性电磁环境测试，获得了丰富的研究成果，我国也开展了大量的相关研究。但由于受到试验条件和应用需求的限制，国内外特高压直流电磁环境研究均在接近海平面的低海拔地区进行。以往高海拔直流输电电磁环境参数以低海拔数据简单外推获得，且无法考虑风速、湿度等气象参数影响，这种简单外推的预测公式未经实测数据检验，工程应用会造成电磁环境参数超标或经济性差的问题。

为解决高海拔直流输电线路的电磁环境问题，国家发展和改革委员会依托中国南方电网有限责任公司于 2008 年建成了“特高压工程技术（昆明）国家工程实验室”。该实验室在昆明 2100m 的高海拔能源集中开发和输送地区，配置了±1200kV/500mA 双极直流电压发生器及直流试验线段、±1600kV/50mA 直流电压发生器等高参数特高压试验设备，具备了高海拔特高压直流输电工程电磁环境的研究能力。

南方电网科学研究院有限责任公司与清华大学、华北电力大学利用其较强的试验资源条件，详细开展了特高压直流线路和换流站电晕、电磁环境特性及其抑制措施的研究，部分研究成果已成功应用于工程设计。

为了实现高海拔特高压直流工程电磁环境技术研究成果的转化，在更广范围内推广应用，南方电网科学研究院有限责任公司总结分析研究成果，组织编写了本书，期望能够对本行业的技术进步起到推动作用。

本书内容共分为概述，高海拔直流工程电磁环境形成机理和分析方法，电磁环境参数测试方法，高海拔直流输电线路电磁环境特性、预测与海拔修正，高海拔直流金

具电磁环境特性与起晕场强预测，换流站电磁环境特性和高海拔直流输电工程电磁环境抑制措施 7 章。其中，第 1 章由饶宏、李锐海负责编写，第 2 章由曾嵘、张波负责编写，第 3 章由刘磊、赵志斌和王国利负责编写，第 4 章由刘磊、李敏和王国利负责编写，第 5 章由余占清和李敏负责编写，第 6 章由刘磊、余占清负责编写，第 7 章由刘磊、余占清和赵志斌负责编写。

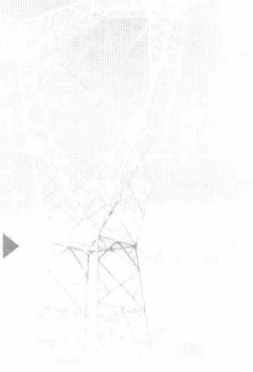
本书可供从事直流输电电磁环境研究专业的科研试验、线路和变电站/换流站规划设计、施工建设和运行管理的技术人员学习使用，也可供高等院校教职工和学生学习参考。

在编写本书的过程中，得到中国南方电网有限责任公司、南方电网科学研究院有限责任公司、清华大学、华北电力大学等单位的大力支持。中国电力科学研究院武汉分院张建功、南方电网超高压输电公司肖遥审阅了本书初稿，提出评审修改意见，在此深表感谢。

由于编者水平和经验有限，书中难免存在不足或疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 5 月



序
前言

第 1 章 概述	1
1.1 直流输电工程电磁环境概况	2
1.2 电磁环境参数限值发展历史	5
第 2 章 高海拔直流工程电磁环境形成机理和分析方法	15
2.1 直流电晕	16
2.2 离子流场与地面场强	19
2.3 无线电干扰	25
2.4 可听噪声	28
2.5 换流站电磁环境的产生机理	31
第 3 章 电磁环境参数测试方法	43
3.1 高海拔直流线路电磁环境测试方法	44
3.2 高海拔直流金具电晕测试方法	49
3.3 换流站电磁环境相关测量方法	57
第 4 章 高海拔直流输电线路电磁环境特性、预测与海拔修正	67
4.1 高海拔直流输电线路电磁环境特性	68
4.2 高海拔直流线路电磁环境预测	84
4.3 电磁环境海拔修正	89
第 5 章 高海拔直流金具电磁环境特性与起晕场强预测	91
5.1 高海拔直流金具电磁环境特性	92
5.2 高海拔直流金具起晕场强预测	99
第 6 章 换流站电磁环境特性	107
6.1 特高压换流站电磁环境参数分布	108

6.2 不同电压等级换流站对比分析	110
第7章 高海拔直流输电工程电磁环境抑制措施	119
7.1 直流输电线路下方加装屏蔽线	120
7.2 直流线路下方加装金属网	128
7.3 典型直流金具的优化	135
7.4 换流站电磁环境抑制措施	139
参考文献	147

第 1 章

概 述

1.1 直流输电工程电磁环境概况

高压直流 (High Voltage Direct Current, HVDC) 输电技术相比于交流输电技术更适合于跨区域、远距离及大容量输送电能,是解决我国能源和负荷逆向分布的首选方案。2005年,我国开始建设±800kV特高压直流 (Ultra High Voltage Direct Current, UHVDC) 输电工程。2009年,云南至广东特高压直流输电工程首次实现带功率运行。之后先后有多个特高压直流输电工程建成投运,包括金沙江上游向家坝—上海的特高压直流输电工程、锦屏—苏南特高压直流输电工程等。特高压直流输电工程对进一步降低输电工程建设成本及网损具有较大的工程价值。

特高压直流输电线路运行时会发生电晕放电。电晕放电一方面造成电能损耗,增加输电成本;另一方面,影响导线周边电磁环境 (Electro-Magnetic Environment, EME),进一步干扰人们的正常生活或影响人体健康。随着经济的不断发展和民众环境意识的增强,电磁环境问题愈加引人关注,相关方面的投诉总量日益增多。因此,直流输电线路电晕及其电磁环境已成为特高压直流系统设计和运行的主要制约因素。

我国地势西高东低,电能由西部送往东部过程中,输电线路不可避免地将经过不同海拔地区。线路电晕放电现象在不同海拔地区有显著差异。其主要原因在于高海拔地区大气压强较低,空气较为稀薄,电子的自由行程较大,在同样电场力的加速下,将积累更大的动能,从而使放电更易发生,一旦发生也更强烈。因此,高海拔地区特高压直流输电系统的电磁环境问题较低海拔地区更为严重。

深入开展高海拔特高压直流输电线路电磁环境参数特性、预测方法和抑制措施研究,对揭示高海拔电晕放电机理、减小环境影响、提高特高压直流输电工程设计水平、推动我国能源远距离输送意义重大。

1.1.1 国外研究现状

高压直流输电线路的电磁环境研究涉及电磁环境参数的测试、影响因素研究、仿真分析及导线表面电晕放电的机理研究等诸多方面。20世纪初,基本放电模型的建立及进一步发展形成了电晕放电机理研究的初期阶段,这一时期提出了著名的 Peek 公式。20世纪前半叶,Trichel、Hermstein 及 Loeb 等人完成了电晕放电的基本物理模型,系统研究并总结了正、负电晕理论。



从 20 世纪 70 年代开始,美国、加拿大、前苏联和日本等国均建立了相应的试验基地,搭建试验线段研究电磁环境参数的测量方法、外部规律并尝试建立预测公式,来指导实际高压直流工程线路设计。目前所知的大部分测试工程是在这一时期进行的。进入 21 世纪后,日本、南非等国家仍进行了为数不多的系统性测试,以期为本国高压直流输电系统提供参考,但鲜有突破性成果提出。

1963 年,美国在俄勒冈州达拉斯搭建了首条高压直流试验线路,用于 $\pm 400\text{kV}$ 的高压直流输电线路电磁环境研究。从 1971 年至 1975 年,依托该实验线段又进行了 $\pm 400\sim\pm 600\text{kV}$ 输电线路的电磁环境研究。1966 年,德国搭建了 $\pm 400\text{kV}$ 的试验线段。之后具有影响力的测试工程为加拿大魁北克水电局研究所(Hydro-Québec's Research Institute, IREQ)的 $\pm 600\sim\pm 1200\text{kV}$ 试验线段研究,标称电压为 $\pm 800\text{kV}$ 。瑞典 Anneberg 实验室的研究为其第一条高压直流输电线路建设提供了主要参考。日本的试验线段研究开始于 Shiobara。

美国邦纳维尔电力局(Bonneville Power Administration, BPA)和美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)联合于 1971~1975 年在海拔 152m 的俄勒冈州达拉斯对 $\pm 400\sim\pm 600\text{kV}$ 直流输电线路的电磁环境进行了研究。测试对象为可听噪声 AN、无线电干扰场强 RI、电视干扰及电晕损耗 CL。其试验线段工况包括 1、2 两种分裂数,457mm 一种分裂间距,46、61mm 两种导线直径及 7.9、10.5、11.2、13.2、18.3、19.8m 可调极间距。同时监测了主要气象参数。导线表面电位梯度为 $20.6\sim 29.9\text{kV/cm}$ 。

EPRI 于 1993 年发布了其自 1977 年至 1988 年以来在马萨诸塞州雷诺克斯的高压输电研究中心(High Voltage Transmission Research Center, HVTRC)对 $\pm 400\sim\pm 600\text{kV}$ 的高压直流试验线段进行电磁环境测试的报告。其试验线段共有两条,设计电压为 1500kV ,长度分别为 520m 和 160m,520m 线段极间距可在 $19\sim 43\text{m}$ 调节。

IREQ 和 EPRI 联合于 1979~1982 年开展了 $\pm 600\sim\pm 1200\text{kV}$ 直流输电线路电晕特性测试。测试地点位于海平面附近的 IREQ 高压实验基地内。其测试内容主要包括可听噪声、无线电干扰及电晕损耗,同时测量了电视干扰及臭氧浓度,地面合成电场及地面离子流密度测试数据较少。

日本中央电力研究院(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)于 1982~1987 年在海平面附近的 Shiobara 进行了 $\pm 350\sim\pm 1000\text{kV}$ 的高压直流试验线段的电磁环境测试。试验线段为两回垂直分布的双极线路,包括了

2、4、6 三种分裂数，单根导线直径均为 3.84cm。水平方向极间距可调，垂直方向两回导线最小对地高度可调，两回导线之间距离为 11.2m。

德国 FGH 公司于 1966 年在曼海姆 (Maanheim-Rheinau) 的高压试验基地内进行了双极高压直流试验线段的电磁环境测试，测试线段全长 1000m，共 3 个档距。测试导线为 $2 \times 39.3\text{mm}$ ，分裂间距为 40cm，平均高度为 13m。

1.1.2 我国面临的问题

21 世纪初我国开始特高压建设时，高海拔特高压直流输电线路的电磁环境研究仍存在如下问题：

(1) 从 20 世纪 70 年代开始，美国、加拿大等国都进行了特高压直流输电的研究，开展了系统性电磁环境测试，获得了丰富的研究成果，我国也开展了大量的相关研究。但由于受到试验条件和应用需求的限制，国内外特高压直流电磁环境研究均在接近海平面的低海拔地区进行。

(2) 以往高海拔直流输电电磁环境参数以低海拔数据简单外推获得，且无法考虑风速、湿度等气象参数影响，这种简单外推的预测公式未经实测数据检验，工程应用会造成电磁环境参数超标或经济性差的问题。

(3) 电晕起始场强是线路金具电磁环境设计的关键参数，目前广泛采用 20 世纪 20 年代提出的二维曲率 Peek 公式，只适用于小尺度和圆柱状导体。特高压直流输电线路金具优化设计急需大尺度和三维导体的电晕起始场强科学判据。

(4) 直流输电线路下方地面场强由于离子流存在而显著增强，是线路电磁环境设计的主要控制参数，尚无有效抑制手段，仅从导线结构参数优化入手，改善余地小，工程投资大。交流输电线路地面场强抑制虽有研究，但由于无离子流存在，形成机理差异显著，成果无法应用于直流输电工程。

国家电网公司特高压直流试验基地位于北京市，内有长 1080m 的双回 $\pm 1200\text{kV}$ 的直流试验线段，海拔低于 200m。西藏高海拔试验基地位于西藏自治区拉萨市当雄县羊八井镇，海拔 4300m，2008 年正式建成投运，其中直流试验线段全长 500m，主要针对超高压直流输电线路开展研究。

为解决高海拔直流输电线路的电磁环境问题，国家发展和改革委员会依托中国南方电网有限责任公司于 2008 年建成了“特高压工程技术（昆明）国家工程实验室”。该实验室在昆明 2100m 的高海拔能源集中开发和输送地区，配置了 $\pm 1200\text{kV}/500\text{mA}$ 双极直流电压发生器及直流试验线段、 $\pm 1600\text{kV}/50\text{mA}$ 直流

电压发生器等高参数特高压试验设备，具备了高海拔特高压直流输电工程电磁环境的研究能力。

1.2 电磁环境参数限值发展历史

输电线路的电磁环境问题早在 20 世纪中期逐渐被科研人员认识并日益重视，并形成了各参数的限值标准，本书总结了无线电干扰、可听噪声、合成电场与离子流密度各参量限值标准的发展历史，以供参考。

1.2.1 输电线路无线电干扰限值发展历史

无线电干扰的研究起源于无线电广播。在 20 世纪 20 年代，各国都开展了广播业务。例如，美国西屋电气公司（Westinghouse Electric Corporation）工程师 Frank Conrad 建立的私营广播电台于 1920 年取得营业执照；1922 年，英国不列颠广播公司（BBC）成立；1922 年，法国在埃菲尔铁塔上的电台正式播音；第一个苏维埃广播电台也是在 1922 年建立的。由于无线电广播的接收质量经常受到环境噪声的干扰，工程刊物上陆续发表一些文章开始进行这方面的研究，但在当时并未形成国际联合组织来系统地开展这方面的工作。

随着无线电通信和电报通信的广泛使用，人们开始意识到电磁干扰问题的重要性并认识到迫切需要成立一个国际联合组织来管理无线电频谱。1933 年，国际电工委员会在巴黎召开的一次会议上，建议成立国际无线电干扰特别委员会（International Special Committee on Radio Interference, CISPR），以应对当时正大量出现的电磁干扰问题。随后，CISPR 陆续出版了相关的技术刊物，这些刊物的内容涵盖测量技术、测试技术、发射和抗扰度的建议限值。除 CISPR 之外，还有其他研究机构对无线电干扰的限值进行了研究。

1.2.1.1 加拿大

加拿大在输电线路无线电干扰限值方面的研究开展较早。1948 年，加拿大标准协会（Canadian Standards Association, CSA）就提出了交流输电线路及变电站无线电干扰限值标准，并在 1975 年给出了此标准的修订版本——第二版。该标准中的限值如表 1-1 所示。检验无线电干扰是否满足限值的测试条件：好天气情况下，在输电线路边相导线投影外 15m 处（或者变电站围墙外 15m 处）进行测量，测量值不超过表中限值。

表 1-1 加拿大无线电干扰场强限值标准

电压等级 (kV)	无线电干扰场强 (dB μ V/m)	电压等级 (kV)	无线电干扰场强 (dB μ V/m)
<70	40	300~400	53
70~200	46	400~600	57
200~300	50	600~765	60

1.2.1.2 苏联

苏联也很早就开展了无线电干扰限值方面的研究。在 1954 年提出 0.15MHz~300MHz 输电线路及变电站的无线电干扰限值，并在 1972 年获得批准。不同频率下，输电线路和变电站的无线电干扰限值如图 1-1 所示。关于输电线路和变电站无线电干扰测点位置的规定分别如表 1-2 和表 1-3 所示。该标准中还给出了测试条件：当频率为 0.15MHz~30MHz 时测量磁场，当频率为 30MHz~300MHz 时测量电场，每个地方至少测 6 次，同时标准中还给出了评估测量结果是否满足测量标准的统计方法。

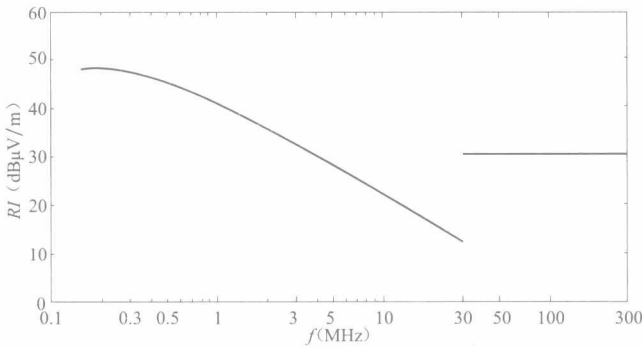


图 1-1 不同频率下苏联输电线路及变电站无线电干扰限值

表 1-2 苏联限值标准中对输电线路无线电干扰测点位置的规定

电压等级 (kV)		测点距边相导线投影距离 (m)
0.15MHz~30MHz	30MHz~300MHz	
≤35	≤220	10
110~220	330~500	50
≥330	≥750	100

表 1-3 苏联限值标准中对变电站无线电干扰测点位置的规定

电压等级 (kV)	测点距变电站围墙距离及避开进出线的最小距离 (m)
≤35	10
110~220	50
≥330	100

1.2.1.3 瑞士

1966年,瑞士发行了一个涵盖电气设备与装置无线电干扰的标准,高压输电线路产生的无线电干扰也包含于其中。标准中指出,在干燥天气下,10℃时,边相导线投影外20m处的0.5MHz测量值需要满足:①对于电压等级小于100kV的输电线路,不超过34dB;②对于电压等级大于100kV的输电线路,不超过46dB。

1.2.1.4 意大利

1968年,意大利国家电力公司(ENEL)的研究人员对输电线路的无线电干扰设计进行了讨论,认为制定限值时,应该把线路所经过地区的人口密度这一重要因素考虑进来。

1.2.1.5 波兰

1969年,波兰发行的无线电干扰限值标准(该标准涵盖了大量的电气设备,不仅限于输电线路)中指出,对于输电线路而言,在输电线路处于额定运行状态时,湿度不超过80%、温度不低于5℃、边相导线投影外20m处的0.5MHz±10kHz频率处无线电干扰值不超过750 μ V/m(相当于57.5dB)。

1.2.1.6 电气和电子工程师协会

电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)于1971年出版了《高压输电线路无线电干扰设计导则》,导则内容涵盖导线、金具、附件及变电站连接至输电线路的元件对输电线路无线电干扰的影响。该导则建议好天气下边相导线外30m处的无线电干扰值应不大于40dB。

1975年,IEEE的电晕与无线电干扰分委会在其第三小组(该小组负责线路设计与分析)内部成立了特别小组,旨在为制定输电线路和变电站的无线电干扰限值构建技术基础。这个特别小组的工作成果在1980年发表,他们通过对实际运行线路及变电站的测量和现有文献测量数据的搜集,提出限值制定建议,并且对各国现有的限值标准进行了归纳。

1.2.1.7 国际大电网会议

国际大电网会议(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)于1974年出版了一个综合性导则,用于处理电力系统中电晕产生的干扰问题。关于限值方面,该导则指出,无线电干扰限值的制定将不仅仅是技术层面的问题,它更大程度上取决于当地的经济状况和人口密度,应根据线路经过地区的经济状况及人口密度来制定限值。一方面,无线电干扰的产生与导线截面积有较大关系,而导线截面积的大小与输电工程的经济性密切相关,如果限值制定得过于严格,