



国际电气工程先进技术译丛

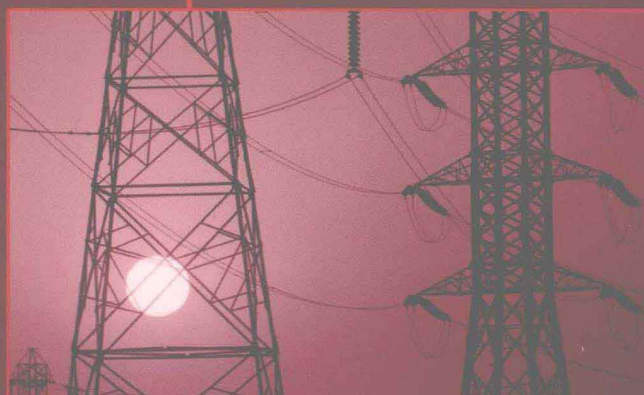
超高压 交流输电工程 (原书第3版)

**Extra High Voltage
AC Transmission
Engineering
(3rd edition)**

(加) Rakosh Das Begamudre 著
丛伟 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

超高压交流输电工程

(原书第3版)

Extra High Voltage AC
Transmission Engineering (3rd edition)

(加) Rakosh Das Begamudre 著
丛 伟 译



机械工业出版社

本书对超高压交流输电相关的基本原理和工程应用进行了系统全面的阐述, 内容主要包括输电线路导体的选择、线路参数的计算、电压梯度、电晕产生机理、电晕损耗及影响(可听噪声、无线电干扰)、高压线路静电场和磁场、行波和驻波的基本理论、雷击和雷击保护、过电压问题、绝缘问题、超高压测试及实验设备等, 此外还涉及了超高压线路设计、超高压电缆输电等一些工程实际应用问题。本书包含了大量的工程实例, 注重基本理论与工程实例的结合, 适合于从事超高压交流输电科研、规划、设计、运行的工程师以及高等学校电气工程及其自动化专业的学生和教师阅读。

Extra High Voltage AC Transmission Engineering, 3rd edition by Rakosh Das Begamudre Copyright © 2006, 1990, 1986 by New Age International (P) Ltd. Publishers. Published in arrangement with New Age International (P) Ltd. Publishers, New Delhi, India. www.newagepublishers.com.

本书中文简体字版由 New Age International Publishers 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有, 侵权必究。

本书版权登记号: 图字 01-2007-3985 号

图书在版编目(CIP)数据

超高压交流输电工程: 原书第3版/(加) 博格穆德(Begamudre, R. D.) 著; 丛伟译. —北京: 机械工业出版社, 2008.7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Extra High Voltage AC Transmission Engineering (3rd edition)

ISBN 978-7-111-24446-2

I. 超... II. ①博... ②丛... III. 超高压—交流—输电—电力工程 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094722 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 付承桂 版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京瑞德印刷有限公司印刷(胜利装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·32.5 印张·631 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-24446-2

定价: 78.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379178

封面无防伪标均为盗版

译者序

经济的发展对电力的需求量越来越大，不仅要求有充足的电力供应，还要保证供电质量和供电可靠性，这些都给电网提出了很高的要求。为了满足越来越大的电力需求，建设超高压输电系统是有效的解决途径之一。通过提高电压等级的方法，不仅能够提高电力传输能力，还能降低线损、节约输电走廊、强化电网结构。但与此同时也带来其它一些问题，例如高电压的绝缘问题、过电压问题、电磁场问题、干扰问题、设备制造问题等等，这些都是在超高压、特高压系统中需要开展深入研究的关键问题。

我国的超高压系统主要有 500kV 和 750kV 两个电压等级，目前正在建设 1000kV 特高压系统。经过多年的建设和发展，我国目前已经初步形成了具有一定规模的超高压系统，大大改善了电网的结构，提高了电能的输送能力，在经济建设和社会发展过程中发挥了重要作用。超高压输电工程是一项复杂、巨大、技术难度较高的综合性工程，涉及多方面的知识，本书从工程设计角度出发，通过大量的工程实例对超高压系统设计、运行所涉及的基本理论和方法进行了广泛、详细的介绍，尤其介绍了美国、欧洲、日本等发达国家的超高压系统设计思路和参数的计算选取，具有很高的参考价值。

原书中一些明显的笔误或印刷错误，改正以后并未加以说明。原书的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。原书使用了部分英制单位，与国际单位的换算关系列出如下。

与长度相关的单位：

$$1 \text{ 英里 (mile)} = 1.6093 \text{ 千米 (km)}$$

$$1 \text{ 英尺 (ft)} = 0.3048 \text{ 米 (m)}$$

$$1 \text{ 英寸 (in)} = 2.5400 \text{ 厘米 (cm)}$$

$$1 \text{ 密耳 (mil)} = \frac{1}{1000} \text{ 英寸} = 2.5400 \times 10^{-3} \text{ 厘米 (cm)}$$

N

与导线截面积相关的单位：

1 圆密耳 (cmil) = 直径为 1 密耳的圆面积 = $5.0671 \times 10^{-6} \text{cm}^2$

1 千圆密耳 (kcmil) = $5.0671 \times 10^{-3} \text{cm}^2$

本书在翻译和校对过程中，得到了山东大学电气工程学院潘贞存教授、李庆民教授的关心和帮助，博士研究生马琳琳和硕士研究生曾煜晓、杨姗姗等也做了大量的工作，在此一并表示感谢！

由于译者水平有限，书中难免存在错误和遗漏，恳请专家、读者不吝指正。

译者

2008 年 3 月于济南

原 书 序 言

很荣幸能为 Rakosh Das Begamudre 的《超高压交流输电工程》这本书做序。作者是位于印度坎普尔的印度科技研究院电气工程系的访问教授。超高压领域是一个发展迅速的、动态的领域，很大程度上要取决于像我们这样发展中国家的工业发展。在高年级的本科生和研究生中已经开始了该学科的课程，研究院也通过“质量提高工程”为其它学术机构的教师、印度的从业工程师们组织了一个短期的培训班。

在印度、日本、美国、加拿大等国家拥有将近 35 年的教学、设计、研究和开发工作背景，这些都使 Begamudre 博士是完成本书写作的最佳人选之一，可以为年轻工程师们提供诸多经验。作者曾经在一些很著名的研究机构供职，例如加拿大的国家研究委员会、Bangalore 的中央电力研究院和其它机构，他在超高压输电领域内的出版物数量众多且延伸各不相同。坎普尔的印度科技研究院授予他访问教授资格，我也很高兴地介绍这本书给各位读者，该书不仅是对本领域内技术文献的有价值补充，还是印度所出版教材的优秀代表。

S. Sampath
印度科技研究院院长
坎普尔

原书第3版前言

由于本书第2版的出版时间过去了将近10年，因此作者认为有必要进行一些修订。近几年在超高压输电工程的基本理论和原理方面并没有发生明显的改变，但在输电电压等级、电缆的应用、电力传输能力以及设备和线路的造价方面发生了很大的变化。

这里依然需要指出两个问题：（1）现在静止无功补偿装置的广泛应用会给电力系统注入谐波，这给控制和通信系统带来了影响；（2）输电线路走廊周围产生的磁场会给人体健康带来影响。其中第一个问题是比较前沿的课题，因此在本书的前几版中没有涉及，此外本版还补充了来自一些毕业论文和学术论文的观点。第二个问题从流行病学的观点来看是非常重要的，这样在本书的第7章中增加了新的内容：超高压线路磁场的影响。

在本书的第1版出版时，位于纽约的IEEE认为应该增加一类期刊，称为“IEEE Transactions on Power Delivery”。在本书的最后，详细列出了各种参考文献，包括了输电工程实际中的一些重要技术文章。

在此我要感谢新时代国际出版（New Age International Publishers）有限公司的出版编辑V. R. Damodaran先生一直以来的鼓励，他为本书第3版的修订出版做了大量的工作。

R. D. Begamudre
加拿大不列颠哥伦比亚省
温哥华

原书第1版前言

超高压 (EHV) 交流输电被认为是在 1952 年随着第一条 380 ~ 400kV 线路在瑞典投入运行而提出的。从那时以后, 世界上的工业化国家开始陆续采用该电压等级甚至更高的电压等级。很快人们发现, 如此高的电压等级对环境带来的影响需要引起注意, 因为在导体表面出现了很高的表面电压梯度, 于是工频就会给电视频率带来干扰。这样线路周围的静电场、电晕影响、损耗、可听噪声、载波干扰、无线电干扰和电视干扰等问题就成为影响线路导体设计、线路高度、将干扰场保持在限制值以内的相间距离确定的因素。线路的充电电流非常高, 以至于仅在负荷端使用同步调相机对发送端和接受端的电压进行控制是不可能的。这样在空负荷条件下使用并联补偿电抗器进行电压控制、在有载条件下使用投切电容器进行电压控制就很有必要。使用串联电容器提高输电能力会带来一些自身问题, 例如电流密度的增加、导体温度的升高、短路电流的增大和次同步谐振问题的出现等。所有这些仍然都属于稳态问题。

然而, 超高压系统电压等级的提高遇到的最严重问题是开关操作过程中产生的过电压, 一般称之为操作 (浪涌) 过电压。很快人们发现长气隙对正极性操作浪涌表现出很微弱的特性。此时绝缘的配合必须基于操作冲击水平 (SIL) 考虑, 而不能仅仅考虑雷电冲击水平。

有时需要建立一些室外研究模型来研究超高压线路和特高压线路的高电压所带来的影响, 以便使线路设计有更科学的依据, 尽管所有问题在本质上是统计特性的, 需要进行长期的观测。结合现场数据一起对不同问题进行分析以及使用数字计算机进行计算, 可以极大地提高超高压线路设计的水平。目前对于大部分基本机理问题已经确立了牢固的地位, 尽管仍然存在一系列的问题等待解决。

作者最初在为大学生和研究生授课时, 发现难以找到一本合适的高压交流输电教材。现存的关于高电压工程的教材主要集中在一些固体、液体、气体和真空绝缘的击穿现象上, 此外还有一些高电压实验和测量技术的内容。另一方面, 参考书籍都是高度专业的, 涉及的都是以前提到的户外方案的结果。本书作为超高压交流输电方面的参考教材, 它的出版能够较好地弥补这些差距。本书的素材取自坎普尔的印度科技研究院高年级大学生和研究生的课程教材、大学教师和现场工程师的短期培训教材, 在此过程中, 还有其它一些大学和科研机构也提供了很多资料。所用资料中的一部分还包括了作者自己在过去的 25 年时间内, 在一些著名研究和开发机构所取得的研究成果, 例如加拿大的国家研究委员会、印度类

似的组织以及大学和科研院所。但是没有任何一个人或机构可以解决所有的问题，因此这些年来，作者通过参考一些科技期刊和文献不断积累知识，并在本书中有所体现。我们希望本书对于工程师和致力于探索的科学家在进行超高压输电线路的开发、设计、决策时能够有所帮助。

本书在筹备过程中得到了很多组织及个人的帮助。首先，我要深深地感谢三位值得尊敬的老师——Banaras Hindu 大学的 Manoranjan 校长、日本东京大学教授 Shigenori Hayashi 博士以及美国宾夕法尼亚 Bethlehem 的 Lehigh 大学的 Loyal Vivian Bewley 院长，他们给我在高电压领域的研究带来很深的影响。感谢坎普尔印度科技研究院院长授予我访问教授的资格，感谢电气工程系的领导 S. S. Prabhu 博士一直以来给予我的帮助和鼓励。感谢印度科技研究院“质量提高工程（QIP）”的协作，感谢 A. Ghosh 博士在准备手稿过程中所付出的劳动。感谢完成排版和校对工作的人员。特别感谢发行经理 H. S. Poplai 先生，感谢 Wiley Eastern 出版公司的合作以及对我延期准备手稿的宽容。最后要感谢我的同事们，包括研究生和教授们，作者在坎普尔印度科技研究院期间，他们对于本书的出版准备工作给予了极大的帮助。

Rakosh Das Begamudre
印度科技研究院电气工程系
印度坎普尔，U. P.，208 016

目 录

译者序

原书序言

原书第3版前言

原书第1版前言

第1章 超高压交流输电介绍 1

1.1 超高压交流输电的任务 1

1.2 能源及其发展简介 1

1.3 本书主旨介绍 4

复习题 7

第2章 输电线路趋势及基础知识 8

2.1 标准输电电压 8

2.2 线路参数的平均值 10

2.3 电力传输能力及线损 11

2.4 大型联合电力系统及线路数量实例 13

2.5 输电线路和设备的成本 15

2.6 线路的机械特性 17

复习题 21

第3章 线路及接地参数的计算 22

3.1 导体电阻 22

3.2 导体温度升高及载流能力 26

3.3 分裂导线特性 28

3.4 超高压输电线路的电感 31

3.5 线路电容计算 38

3.6 序电感及序电容 41

3.7 线路的传播模式参数 44

3.8 接地回路的电阻和电感 51

复习题 58

第 4 章 导体的电压梯度	61
4.1 静电学	61
4.2 球隙场	63
4.3 线电荷电场及其特性	68
4.4 多导体线路的电荷-电位关系	72
4.5 导体表面电压梯度	77
4.6 导体实例及实际线路的最大表面电压梯度	87
4.7 梯度因数及其应用	88
4.8 分裂导线子导体上的电压梯度分布	90
4.9 用于电晕实验的圆柱笼设计	92
复习题	106
第 4 章附录 铁塔上存在地线的情况下导体上的电压梯度	107
第 5 章 电晕效应 I : 功率损耗和可听噪声	113
5.1 I^2R 损耗和电晕损耗	113
5.2 电晕损耗公式	114
5.3 电荷-电压 (q - V) 关系图和电晕损耗	118
5.4 电晕损耗导致的行波衰减	123
5.5 可听噪声的产生及特性	125
5.6 对可听噪声的限制	126
5.7 可听噪声的测量和仪表	127
5.8 可听噪声公式和在设计中的应用	132
5.9 单相和三相可听噪声水平之间的关系	135
5.10 白天-夜晚等效噪声水平	137
5.11 来自超高压线路上的可听噪声水平实例	138
复习题	139
第 6 章 电晕效应 II : 无线电干扰	140
6.1 电晕脉冲的产生及特性	140
6.2 脉冲序列和滤波响应特性	143
6.3 无线电干扰场的限制	146
6.4 线路无线电干扰场的频谱	149
6.5 无线电干扰剖面图和传播模式	150
6.6 CIGRE 公式	153

6.7 无线电干扰激励函数	158
6.8 无线电干扰、无线电感应电压和激励函数的测量	165
6.9 激励函数的测量	168
6.10 滤波器设计	169
6.11 电视干扰	171
复习题	174
第7章 超高压线路的静电场和磁场	176
7.1 电冲击和门槛电流	176
7.2 长物体的电容	177
7.3 交流输电线路静电场的计算	178
7.4 高静电场对人类、动物和植物的影响	187
7.5 静电场的测量和仪表	189
7.6 不带电双回线路上的静电感应	190
7.7 绝缘地线上的感应电压	193
7.8 磁场效应	194
7.9 三相线路的磁场	195
7.10 六相线路的磁场	204
7.11 工频磁场对人体健康的影响	205
复习题	208
第8章 行波和驻波理论	210
8.1 工频下的行波和驻波	210
8.2 一般情况下的差分公式和解	213
8.3 驻波和自然频率	219
8.4 末端开路线路：双指数响应	222
8.5 末端开路线路：正弦激励响应	224
8.6 在带有残余电荷电压的情况下对线路充电	224
8.7 电晕损耗和有效并联电导	226
8.8 傅里叶变换方法	228
8.9 行波的反射和折射	230
8.10 串并联集中参数和分布参数线路的暂态响应	233
8.11 超高压线路的行波保护原理	235
复习题	238

第 9 章 雷击和雷击保护	239
9.1 线路的雷电冲击	239
9.2 雷击的机制	240
9.3 雷击保护问题的一般原理	243
9.4 铁塔接地电阻	246
9.5 绝缘子闪络和耐受电压	248
9.6 雷击电流产生的可能性	248
9.7 避雷器及其保护特性	249
9.8 动态电压升高和避雷器额定参数	253
9.9 避雷器的工作特性	255
9.10 基于雷击的绝缘配合	258
复习题	262
第 10 章 超高压系统开关操作过电压	264
10.1 过电压的产生和种类	264
10.2 短路电流和断路器	264
10.3 恢复电压和断路器	267
10.4 切断低感应电流导致的过电压	269
10.5 切断容性电流	270
10.6 铁磁谐振过电压	271
10.7 操作过电压计算——单相等效电路	272
10.8 电源给分布参数线路供电	278
10.9 单相系统的一般表达式	281
10.10 三相系统的一般公式	285
10.11 一般情况下的傅里叶反变换	290
10.12 减少超高压系统操作过电压	292
10.13 操作过电压实验研究和计算结果	295
复习题	298
第 11 章 长气隙绝缘特征	300
11.1 用于超高压系统的电极结构类型	300
11.2 长气隙的击穿特性	301
11.3 短气隙和长气隙的击穿机理	304
11.4 非均衡电场下长气隙的击穿模型	307

11.5	正操作过电压闪络——饱和问题	310
11.6	长气隙的 CFO 和耐受电压——统计步骤	313
11.7	长气隙的 CFO 电压——Paris 理论	319
	复习题	321
第 12 章	工频电压控制和过电压	322
12.1	工频下存在的问题	322
12.2	通用常数	322
12.3	无负荷电压条件和充电电流	325
12.4	功率圆图及其使用	327
12.5	使用同步调相机的电压控制	332
12.6	补偿元件的级联——并联和串联补偿	334
12.7	在串联电容补偿线路中的次同步谐振	341
12.8	静止无功补偿系统（静止 VAR）	349
12.9	多相输电	359
	复习题	361
第 13 章	超高压测试和实验室设备	362
13.1	标准规范	362
13.2	测试用的标准波形	364
13.3	双指数波形的特性	366
13.4	α 、 β 、 E 的计算步骤	369
13.5	波形形成电路：理论和原理	371
13.6	带电感的脉冲发生器	376
13.7	变压器测试开关涌流的产生	379
13.8	脉冲电压发生器的实际电路	381
13.9	脉冲发生器的能量	384
13.10	脉冲电流的产生	387
13.11	交流测试高电压的产生	391
13.12	直流高电压的产生	395
13.13	高电压的测量	397
13.14	超高压实验室的总体布置	406
	复习题	409

第 14 章 基于稳态限制和暂态过电压的超高压线路设计	411
14.1 介绍	411
14.2 在稳态下的设计因素	412
14.3 设计实例：稳态限制	415
14.4 设计实例 I：400kV，200km，1000MW	416
14.5 设计实例 II：400kV，400km，1000MW，并联补偿	421
14.6 设计实例 III：400kV，800km，500MW/回， 50% 串联电容器补偿，线路两端由并联电抗器补偿	422
14.7 设计实例 IV：750kV，500km，2000MW，只有并联电抗器补偿	423
14.8 基于暂态过电压的线路绝缘设计	424
复习题	430
第 15 章 超高压电缆输电	431
15.1 超高压电缆输电概述	431
15.2 超高压电缆的电气特性和电气强度	438
15.3 电缆绝缘材料的特性	447
15.4 固体绝缘的击穿和耐受电气强度——统计步骤	454
15.5 电缆绝缘的设计基础	462
15.6 电缆设计的其它例子	467
15.7 电缆特性的测试	471
15.8 电缆系统的浪涌性能	475
15.9 气体绝缘的超高压线路	480
复习题	481
复习题答案	484
参考文献	490

第 1 章 超高压交流输电介绍

1.1 超高压交流输电的任务

世界上的工业国家对能源的需求很大，其中对电能的需求占据了大部分。此外，还有其它形式的能源，例如工业和交通所必需的石油，家庭使用和工业消耗的天然气，这些能源的消耗也占据了较为可观的比例。电能不是唯一的能源形式，但却是能源的重要组成部分。迄今距离法拉第发明发电机仅仅 150 年左右的时间，距离爱迪生建立第一个直流电站的时间仅仅 120 年左右的时间，但在这短短的时间内，世界已经消耗了其绝大部分天然能源，并且开始寻找除了水和热之外的其它能源，以满足日益增长的能源消耗需求，因为当前能源的消耗速度已经超过了新能源的发现速度。该趋势在短时期内暂时不会得到缓解，因此为了给子孙后代留下足够的能源，任何国家和社会都应该降低能源消耗的增长速度。第二次世界大战后，所有国家都获得了独立，工业开始迅猛发展，尤其是北美、欧洲诸国、前苏联和日本。因此，这些国家的发展对能源需求极大。水力发电厂和燃煤电厂或燃油电厂由于种种原因通常位于远离负荷中心的地方，这就需要将产生的大量电能进行长距离传输，且要求有很高的输电电压。自 20 世纪 50 年代以来，直流输电技术的快速发展为超高压、超长距离输电提供了重要的补充作用。交、直流输电各有不同的作用，为了决定哪种方式对国家经济的发展更为有利，必须进行详细的评估。本书仅讨论与超高压交流输电相关的一些问题。

1.2 能源及其发展简介

每一个对输电感兴趣的工程师必须要关心能源问题。工业和国内发展所需求的电能可以分为两大类：1) 需要传输的电能；2) 本地可用的电能。需要传输的电能主要是水电和传统的火电，但本地产生和可用的电能数量众多。很多国家包括印度，已经开始研究和发展本地电能，安排专用款项开始为期多年的加快本地电能发展计划。这也称作“可替代电能”。下面列出了 12 种电能形式，当然还有其它的一些形式。

本地可用的电能：

- (1) 位于城市内负荷中心处的传统火电；

- (2) 小型水力发电厂；
- (3) 核能电厂：裂变和聚变；
- (4) 风能；
- (5) 海洋能：(a) 潮汐能，(b) 波浪能，(c) 海洋温差能；
- (6) 太阳能；
- (7) 太阳电池或者光伏电池；
- (8) 地热；
- (9) 磁流体发电机或流体力学发电机；
- (10) 煤气和液化气；
- (11) 氢能；
- (12) 生物能：(a) 森林，(b) 植物，(c) 动物垃圾。

此外，还可以加上细菌能源，细菌能够分解树木和其它植物产生甲烷。水葫芦这种植物是能够产生甲烷气体的珍贵资源，该植物广泛生长于印度的水塘和湖泊中。后面章节中有对于这些能源的简单介绍及其从地理角度而言的一些限制。

1. 水能源：在南亚次大陆已知的潜在水电为 50000MW (50GW)，其中 10GW 位于尼泊尔和不丹，其它位于印度境内。在这些容量中，几乎 30% 或 12GW 位于雅鲁藏布江峡谷的东北部。想要开发这些电能，必须架设 1000 ~ 1500km 的输电线路，很明显这些输电线路应该是超高压直流或交流输电线路。印度的水电可以分为 (a) 高水头的 (占整个容量的 26%)，(b) 中等水头的 (占 47%)，(c) 低水头的 (占 7%，不到 30m 高)，(d) 沿着河流流动的 (占 20%)。这样，小型水电站和河面水电站 (可能使用灯泡贯流式水轮机) 在为山区负荷供电方面有着广阔的前景。

2. 煤：在印度有五大种类的煤，分别为：泥煤 (4500 Btu/lb[⊖])，褐煤 (6500 Btu/lb)，次烟煤 (7000 ~ 12000 Btu/lb)，烟煤 (14000 Btu/lb) 和无烟煤 (15500 Btu/lb)。其中只有不结焦的次烟煤适合用作发电燃煤。印度中心煤矿次烟煤的估计储量为 500 亿 t，其中 50% 的储量可以用于发电。如果按照在现有开采量的基础上每年递增 5% 来计算，该煤矿的寿命只有 140 年左右。因此，不能长久依赖煤炭资源，必须加快发展核电来代替传统的火电。

3. 石油和天然气：目前，所有的石油都用于了交通而没有用于发电。位于东北地区的油田拥有巨大的天然气储量，但仅仅安装了很少量的燃气轮机为油田提供电力。

4. 煤炭液化和汽化：印度的煤炭中灰烬的含量约为 45%，因此一个常规火电厂的效率很少能够超过 25% ~ 30%。此外，由于煤炭中 45% 的灰烬含量、运

⊖ 1000Btu/lb = 555.5kcal/kg = 2325.8kJ/kg。