



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

Principle and Device of the Ocean Wave Energy Conversion Generation



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

海洋波浪能 综合利用

——发电原理与装置

阎耀保 编著

上海科学技术出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



海洋波浪能综合利用—— 发电原理与装置

Principle and Device of the Ocean
Wave Energy Conversion Generation

闫耀保 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

海洋波浪能综合利用:发电原理与装置/閻耀保编著.

—上海:上海科学技术出版社,2013.1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1527-4

I. ①海… II. ①閻… III. ①海洋动力资源—波浪能—海浪发电—电气设备 IV. ①TM612

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 262684 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

浙江新华印刷技术有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 20.25 插页: 4

字数: 450 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1527-4/TK·5

定价: 78.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书结合作者多年来在国内外的研究成果以及日本、欧美等国家和地区的海洋波浪能发电实例,系统论述和总结了海洋波浪能综合利用的基本理论和应用技术,同时介绍了其发电原理与装置,以及研究进展和海洋试验案例。内容主要包括:能源及其利用规则,海洋波浪性质与能量转换方式,固定摆式和浮力摆式波浪能发电原理与装置,振荡水柱式波浪发电原理与装置,越浪式、鸭式、筏式、点吸收式以及磁流体波浪发电原理与装置,小型海洋发电站与波浪能转换器前沿技术等。书中附有国外海洋波浪能发电起源、专利与应用实例。本书力图内容翔实,图文并茂,深入浅出,侧重系统性、前沿性,基础理论和工程实践紧密结合。

本书适合海洋能及其重大装备研究、开发、制造和管理的科技人员阅读,也可供机械、舰船、能源、海洋等专业的师生参考。

《新能源出版工程》

学术顾问 (以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翱 徐洪杰

殷承良 闫耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元

前 言

世界各国都在研究能源对策和国家能源战略。能量作为物质的重要属性,是一切物质运动的动力。能源是地球的宝贵财富。能源可分为三类:第一类能源来自地球以外的天体,主要是来自太阳辐射的能量,如水能、风能、雷电能和海洋能中的海水热能、海流能、波浪能。第二类能源是来自地球内部的能量,主要有地热能和核燃料,如火山喷发和地震是地球内部能量的一种释放。第三类能源是由于地球和其他天体相互作用而产生的能量,如潮汐能,主要是由于地球和月亮以及太阳之间引力作用而引起的。地球表面积 5.1 亿 km^2 ,其中陆地面积 1.4 亿 km^2 ,占总面积的 29%,海洋面积 3.61 亿 km^2 ,占总面积的 71%。据估计,海洋能源约占世界能源总量的 70%以上。世界各国已将海洋列为重点争夺的资源。海洋能是一种重要的可再生能源。部分风能以波浪运动的形式存储在海洋中。海洋波浪运动的能量密度非常高,在海洋中传播广泛,正因为如此,即使远离海洋数千里远的地方也能利用波浪的能量。在这漫长的行程中,波浪逐渐稳定,在合适的区域可以高效地再生海洋能源并产生电能。

自 1912 年德国建设首座潮汐发电站以来,欧洲各国、美国、日本都相继建设海洋能发电站。我国海洋能利用装备的建设相对落后。针对我国海洋能开发和重大装备研制过程中海洋波浪能发电基础理论和应用技术极其缺乏的现状,结合作者多年来在国内外的研究成果以及国外海洋波浪能发电事例,本书较系统地归纳和总结了海洋波浪能发电的共性基础理论和应用技术。全书共分为 11 章。第 1 章能源及其利用规则,着重介绍能源分类和利用概要,读者可以了解历史、发展过程及需要解决的前沿技术。第 2 章海洋波浪的性质与波浪能转换方式,涉及波浪能转换的基本数学模型和波浪能转换器件基本要求。第 3 章摆式波浪能发电原理与装置,重点阐述悬挂摆式波浪能量转换器动力学模型、典型发电装置、转换器结构与优化设计理论。第 4 章浮力摆式波浪能发电原理与装置,阐述浮力摆式波浪能发电关键技术、数学模型及设计技术,详细介绍英国牡蛎(Oyster)、英国 WRASPA、芬兰 WaveRoller、澳大利亚悉尼 BioWAVE、挪威 Langlee 等浮力摆式波浪能发电装置应用实例及专利介绍。第 5 章振荡水柱式波浪发电原理与装置,阐述基

本结构与工作原理、日本巨鲸号(Mighty Whale)振荡水柱数学模型和试验技术以及电站应用实例。第6、7章分别介绍越浪式和鸭式波浪能发电原理与装置,包括基本结构和数学模型、发电装置实例和国内外专利。第8章筏式海洋波浪能发电原理与装置,包括科克雷尔波浪筏数学模型、丹麦 Dixa Wave 和英国海蛇(Pelamis)筏式波浪能转换装置、英国麦凯布波浪泵(McCabe Wave Pump)以及国内外专利及其应用。第9、10章介绍点吸收式和磁流体波浪能发电原理与装置。第11章介绍小型海洋发电站与波浪能量转换器前沿技术,包括浮动摆式波浪能量转换器、海上沉降浮标和海上俯仰浮标、小型海洋发电站、海水脱盐纯净水制造技术、海洋热能转换系统、深海海水循环泵送系统、摆式波浪能量转换器液体静压传动装置、摆式波浪能发电装置例、海洋波浪能和风能比较。本书旨在对接中国国家能源战略计划,为我国海洋能和重大装备的研究、设计、制造、试验和管理的专业技术人员提供有益的前沿性理论和实践材料,为探索海洋能综合装备的技术途径或解决方案起到一定的促进作用。

本书由同济大学閻耀保教授根据多年来在国内外的实践经验和研究成果进行系统地归纳、编写而成,也包括作者与日本 Tomiji Watabe 教授共同著作内容。同济大学閻耀保教授研究室2011级硕士研究生王康景、张晓祺、李红娟、贾萍等进行国外资料收集与整理工作。本书部分内容已在同济大学博士生、硕士生教学中连续使用。在出版过程中得到了上海科学技术出版社的大力支持和帮助。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

作者

目 录

第 1 章 能源及其利用规则 / 1

1.1 能源 / 1

1.1.1 能源分类 / 1

1.1.2 能源利用 / 3

1.1.3 水能 / 3

1.1.4 新能源 / 4

1.2 海洋能及其利用概要 / 14

1.2.1 概要 / 14

1.2.2 潮汐发电 / 17

1.2.3 波浪发电 / 21

1.2.4 温差发电 / 24

1.2.5 盐差能发电 / 26

1.2.6 中国海洋能量利用 / 27

1.3 海洋能利用规则 / 31

参考文献 / 32

第 2 章 海洋波浪的性质与波浪能量转换方式 / 34

2.1 概述 / 34

2.2 海洋波浪的性质 / 35

2.3 波浪能量转换的基本数学模型 / 37

2.4 波浪能量转换方式 / 40

2.5 海洋波浪能量转换器件基本要求 / 41

2.5.1 环境友好型能量转换器件 / 41

2.5.2 能量转换成本 / 41

2.5.3 传统能量转换器件 / 42

2.6 水压传动技术 / 43

2.6.1 海水的性质 / 43

2.6.2 水压传动 / 45

2.6.3 海水液压系统 / 47

参考文献 / 49

第3章 摆式波浪能发电原理与装置 / 51

3.1 概述 / 51

3.2 摆式波浪能发电装置结构与工作原理 / 52

3.2.1 组成部分 / 52

3.2.2 液压转换过程 / 52

3.2.3 转换效率 / 54

3.2.4 典型悬挂摆式波浪能发电装置 / 54

3.3 悬挂摆式波浪能量转换器动力学 / 55

3.3.1 左腔为水室的摆式波浪能量转换器 / 56

3.3.2 右腔为水室的摆式波浪能量转换器 / 59

3.3.3 固定摆式波浪能量转换器 / 64

3.4 悬挂摆式海洋波浪发电装置典型模型 / 68

3.4.1 摆式波浪能量转换器的线性模型 / 69

3.4.2 摆式波浪能量转换器非线性模型 / 74

3.4.3 传统摆式波浪能量转换器的改进 / 80

3.4.4 海水液压泵和摆动马达 / 83

3.5 悬挂摆式波浪能量转换器结构与优化设计理论 / 89

3.5.1 悬挂摆式波浪能量转换器结构 / 89

3.5.2 海洋现场测试技术及系统耐久性 / 91

3.5.3 悬挂摆式波浪能量转换器总体设计 / 98

3.5.4 主要部件设计 / 99

3.5.5 液压传动系统与元件设计 / 104

3.5.6 系统优化设计方法 / 106

3.5.7 海洋波浪能量密度 / 110

参考文献 / 111

第4章 浮力摆式波浪能发电原理与装置 / 113

4.1 概述 / 113

4.2 浮力摆式波浪能发电装置结构与工作原理 / 114

4.2.1 浮力摆式波浪能发电装置构成 / 115

4.2.2 浮力摆式波浪能发电关键技术 / 119

4.2.3 浮力摆数学模型及翼型设计 / 121

4.3 浮力摆式波浪能发电装置应用实例 / 126

- 4.3.1 英国牡蛎(Oyster)浮力摆式波浪能量转换装置 / 126
 - 4.3.2 英国 WRASPA 波浪发电装置 / 127
 - 4.3.3 芬兰 WaveRoller 近岸波浪发电装置 / 129
 - 4.3.4 澳大利亚悉尼 BioWAVE 波浪发电装置 / 131
 - 4.3.5 挪威 Langlee 漂浮式双摆板波浪发电装置 / 132
 - 4.4 摆式海洋波浪能发电技术国内外专利 / 133
 - 4.4.1 波浪发电蓄能稳压恒频方法及其装置 / 133
 - 4.4.2 单摆式波浪能发电系统 / 134
 - 4.4.3 经典摆式波浪能发电装置及原理 / 135
 - 4.4.4 海上浮体式高效波浪能转换装置 / 135
 - 4.4.5 牡蛎(Oyster)浮力摆式波浪能量转换装置 / 136
- 参考文献 / 137

第 5 章 振荡水柱式波浪发电原理与装置 / 139

- 5.1 概述 / 139
 - 5.2 振荡水柱式波浪发电装置基本结构与工作原理 / 140
 - 5.3 振荡水柱数学模型 / 142
 - 5.3.1 空气室模型 / 143
 - 5.3.2 Mighty Whale 型能量转换器频率响应 / 145
 - 5.3.3 Mighty Whale 型能量转换器数值计算 / 146
 - 5.3.4 浮动型振荡水柱式波浪能量转换器特点 / 148
 - 5.4 振荡水柱式波浪能量转换器试验技术 / 150
 - 5.4.1 试验模型 / 150
 - 5.4.2 数值分析 / 151
 - 5.5 振荡水柱式电站应用实例 / 154
 - 5.5.1 国内振荡水柱式波浪发电事例 / 154
 - 5.5.2 国外振荡水柱式波浪发电事例 / 157
 - 5.6 振荡水柱式波浪发电装置关键技术 / 163
- 参考文献 / 164

第 6 章 越浪式波浪发电原理与装置 / 165

- 6.1 概述 / 165
- 6.2 越浪波浪能发电装置基本结构和数学模型 / 167
 - 6.2.1 越浪波浪能简介 / 167
 - 6.2.2 基本结构 / 168
 - 6.2.3 数学模型 / 169

- 6.3 越浪式波浪发电装置实例 / 171
 - 6.3.1 几种越浪式波浪发电装置 / 171
 - 6.3.2 越浪量的影响因素及计算式 / 173
 - 6.3.3 国内外专利 / 175

参考文献 / 177

第7章 鸭式波浪能发电原理与装置 / 178

- 7.1 概述 / 178
- 7.2 鸭式波浪能发电装置工作原理 / 180
- 7.3 数学模型 / 181
- 7.4 工程应用及其事例 / 183
 - 7.4.1 漂浮式鸭式波浪发电装置 / 183
 - 7.4.2 半漂浮式鸭式海水淡化装置 / 185
 - 7.4.3 鸭式波浪发电装置浮态变化的转角测量 / 186
 - 7.4.4 不同规则波作用下的鸭式装置 / 187
- 7.5 鸭式波浪能发电装置国内外专利 / 189
 - 7.5.1 海洋波浪鸭式超导磁流体发电系统 / 189
 - 7.5.2 一种强容错、高效漂浮式点头鸭波浪能装置 / 190
 - 7.5.3 带反馈控制的鸭式波浪能发电装置 / 191
 - 7.5.4 带密封陀螺仪的鸭式波浪能发电装置 / 191

参考文献 / 193

第8章 筏式海洋波浪能发电原理与装置 / 195

- 8.1 概述 / 195
- 8.2 数学模型 / 197
 - 8.2.1 海洋波浪能量 / 197
 - 8.2.2 科克雷尔波浪筏数学模型 / 198
 - 8.2.3 波浪筏优化设计 / 201
- 8.3 典型筏式波浪能转换器件 / 204
 - 8.3.1 丹麦 Dexa Wave 型筏式波浪能转换器 / 204
 - 8.3.2 英国海蛇(Pelamis)筏式波浪能转换装置 / 210
 - 8.3.3 英国麦凯布波浪泵(McCabe Wave Pump) / 217
- 8.4 国内外专利及其应用 / 221
 - 8.4.1 组合式抗风浪平稳型海洋平台 / 221
 - 8.4.2 美国鸭式和海蛇式相结合的波浪能发电装置 / 221
 - 8.4.3 美国海底固定充气筏式波浪能转换器 / 222

8.4.4 大万山岛波浪能独立电力系统 / 222

参考文献 / 224

第 9 章 点吸收式波浪能发电原理与装置 / 225

9.1 概述 / 225

9.2 点吸收式波浪能发电装置工作原理 / 227

9.3 数学模型 / 231

9.3.1 浮子受力 / 232

9.3.2 浮子平均输出功率 / 236

9.3.3 浮子宽度内波浪输入功率 / 237

9.3.4 浮子捕获宽度比 / 238

9.3.5 总转换效率 / 238

9.4 点吸收式波浪能发电装置应用技术 / 239

9.5 点吸收式波浪能发电装置国内外专利概述 / 240

9.5.1 国内专利 / 240

9.5.2 国外专利 / 243

参考文献 / 252

第 10 章 磁流体波浪能发电原理与装置 / 254

10.1 概述 / 254

10.2 磁流体波浪能发电原理 / 255

10.2.1 筏式磁流体波浪能发电原理 / 255

10.2.2 点头鸭式磁流体发电原理 / 257

10.2.3 点吸收式磁流体发电原理 / 257

10.3 磁流体波浪发电装置数学模型 / 259

10.4 磁流体波浪发电的国内外专利 / 265

10.4.1 国内专利 / 265

10.4.2 国外专利 / 269

参考文献 / 271

第 11 章 小型海洋发电站与波浪能量转换器前沿技术 / 272

11.1 浮动摆式波浪能量转换器 / 272

11.2 海上沉降浮标和海上俯仰浮标 / 274

11.3 小型海洋发电站 / 277

11.4 具有摆式波浪能量转换器的海水脱盐纯净水制造技术 / 279

11.5 具有摆式波浪能量转换器的海洋热能转换系统 / 284

- 11.6 基于摆式波浪能量转换器的深海海水循环泵送系统 / 288
- 11.7 摆式波浪能量转换器液体静压传动装置 / 290
 - 11.7.1 漂浮式摆动波浪能发电装置 / 291
 - 11.7.2 250 kW 摆式波浪能发电装置 / 291
 - 11.7.3 旋转式叶片泵 / 291
 - 11.7.4 柱塞式液压马达 / 292
 - 11.7.5 控制阀门 / 292
 - 11.7.6 其他零件 / 293
- 11.8 海上漂浮式悬挂摆波浪能发电装置例 / 293
- 11.9 中国大管岛摆式波浪能发电装置例 / 296
- 11.10 海洋波浪能和风能比较 / 299
 - 11.10.1 风能 / 299
 - 11.10.2 海洋波浪能 / 299
 - 11.10.3 风力发电成本 / 303
 - 11.10.4 波浪能发电电量 / 303
- 参考文献 / 305

第 1 章

能源及其利用规则

1.1 能源

物质、能量和信息是构成客观世界的三大要素。人类社会的发展史就是这三大要素不断发展变革的历史。能量作为物质的重要属性,是一切物质运动的动力。能量的来源称为“能源”,能源是地球的宝贵财富。从人类社会的发展角度看,能量或拥有能量的能源是保证人类社会向前发展的根本动力。人类最早利用火作为能源,我国古代燧人氏的钻木取火标志着人类社会步入了一个新的文明史。在此之后的漫长人类历史上,从钻木取火到原子能的利用,一种种新的能源被开发和利用,一次次能源革新促进了人类社会生产力的新发展。能源的发展成了社会生产力发展的重要标志。

据统计,按现在的世界能源消耗水平,预计再过 140 年,所有能源就会全部用光^[1-2]。石油、天然气将在 30~50 年内被消耗殆尽。面对能源短缺的压力,世界各国都十分重视能源的合理有效开发利用及能源的研究。一方面,核能、海洋能、氢能等一系列新型能源正被广泛地开发利用;另一方面,人们广泛重视节能和一种良性的可持续的能源利用方式。

1.1.1 能源分类

能量作为物质的重要属性,是一切物质运动的动力。从钻木取火的原始社会到发达高效的现代社会,人类没有一刻离开过能源。从科学意义上讲,凡是能够提供某种形式能量的物质或物质的运动,统称为能源,例如阳光、风、流水、潮汐、木材、煤炭、石油等,它们或能直接产生能量,或可在一定条件下转化为能量。这些都是大自然赋予人类的宝贵能源,并分别以光能、热能、电能、机械能等形式存在。

地球的能源种类丰富,形态各异,大致可从从以下几个方面进行分类:

① 按能源取得的方式划分,可分为一次能源和二次能源。

一次能源是指在自然界中现存的能源,也就是从自然界直接取得,不改变其基本形态的能源。如煤炭、石油、天然气、水力、核燃料、太阳能、生物质能、海洋能、风能、地热能等。

二次能源是一次能源经过加工,转换成另一种形态的能源或能源产品。例如电力、蒸汽、煤气、沼气、焦炭及各种石油品等。一次能源无论经过转换几次所得到的另一种能源,都称作二次能源。如燃烧煤的热电厂,煤炭燃烧时先将水变成蒸汽能,蒸汽再去推动汽轮机变成机械能,汽轮机带动发电机转换成电能,其转换了三次,但不能称为三次能源,仍把它称为二次能源。这两类能源是以有没有经过人为加工转为形态相区别的,因此,一次能源又称天然能源,二次能源又称人工能源。

② 按能源是否能够再生,可分成再生能源和不可再生能源。

“再生”是再生产和再出现的意思。再生能源就是能够循环使用,不断得到补充的一次能源,如水能、太阳能、风能、海洋能、地热能等。从资源角度来说,它们是取之不尽,用之不竭的,是解决人类未来能源的重要源泉,但由于技术水平的限制,目前的利用率还不高。

不可再生能源,是指经过开发使用之后不能重复再生的自然能源,又称不可更新能源或消耗性能源。如煤炭、石油、天然气、油页岩、核燃料等,这些能源埋藏于地壳中,一旦被人类开发取用之后,其储量会逐渐减少,无法再生。当前,不可再生能源在世界能源生产和消费中占有极大的比重。

③ 根据能源的利用状况和地位,可分为常规能源和新能源。

常规能源是指开发利用的技术条件比较成熟并已被广泛使用的能源。如煤炭、石油、天然气、薪柴等。这些能源在现今世界能源结构中占绝大比重。

目前尚未被大规模利用,正在积极研究,有待推广的能源称为新能源。如太阳能、海洋能、地热能、核聚变能等。

以核裂变能为例,20世纪50年代初,一些发达国家开始把它用来生产电力和动力使用时,被认为是一种新能源;今天,不少国家已把核裂变能列入常规能源;但在我国等多数发展中国家又尚属新能源。

④ 从能源的形成和来源分类,可把能源分成三类:第一类是能量来自地球以外的天体,其中绝大部分是直接或间接来自太阳的能源;第二类是能量来自地球内部的能源;第三类是能量来自地球与其他天体的相互作用所产生的能源。

第一类能源主要是指来自太阳的能量,这一能源除直接的太阳辐射之外,还包括许许多多的能源。如煤炭、石油、天然气、油页岩等可燃矿产,是古代生物沉积在地下经过物理化学作用演变而成的,实际上也是间接来自太阳辐射能。水能、风能、雷电能和海洋能中的海水热能、海流能、波浪能从某种意义上讲也都是太阳辐射能转化的结果;绿色植物提供的生物质能也是太阳光下光合作用的结果。可以这么说,在自然界中,绝大多数能源所蕴藏的能量都来自太阳。此外,此类能源还包括宇宙射线、流星或其他星际物质带进地球的能量,但这些能量与太阳辐射能相比微不足道,至少在近阶段很难应用于实际。

第二类能源是来自地球内部的能量,主要有地热能和核燃料。它们是能源的重要组成部分。火山喷发和地震也是地球内部能量的一种释放,但在现阶段它只会给人类带来灾难,而难以用来为人类服务。

第三类能源是由于地球和其他天体相互作用而产生的能量,如潮汐能。它主要是由于地球和月亮以及太阳之间引力作用而引起的。

1.1.2 能源利用

在人类发展史上,已经历了四个利用能源的阶段:柴草时期、煤炭时期、石油时期和多元化新能源时期。其中,18 世纪中期随着蒸汽机的普遍使用,煤炭逐步代替柴草,称为第一次能源变革。1860 年,煤炭在世界能源总消费量中所占的比例只有 24%,到 20 世纪初已增加到 94%,人类进入了以煤为主要能源的煤炭时期。20 世纪 50 年代,汽车、飞机及石油化学工业剧增,石油和天然气的消费量超过了煤炭,这就是第二次能源变革。现在,世界上的常规能源——煤炭、石油、天然气将逐渐枯竭和告急,人类开始并被迫深入进行核能、太阳能、海洋能、生物质能等的多元化能源开发与可持续性利用,以实现第三次能源变革,人类进入多元化新能源时期。

图 1-1 所示为能源的多元化利用框图^[2]。任何一种能源的转换和传递过程中,能量绝不会凭空产生,也不会凭空消失,它只能从一种形式转化为另一种形式,或者从一个物体传递到另一个物体。

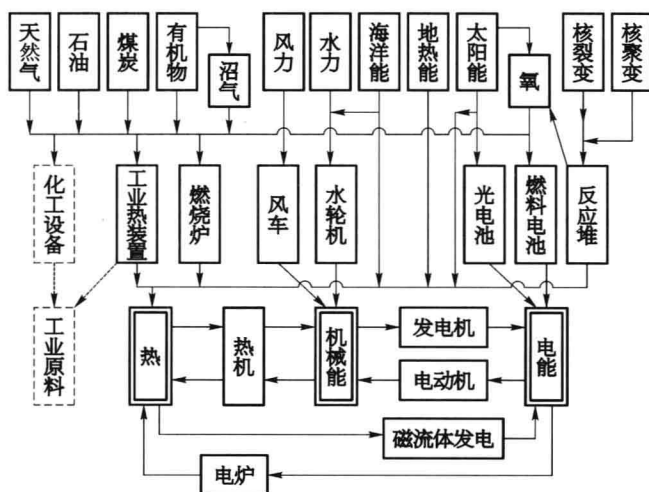


图 1-1 能源的多元化利用框图

1.1.3 水能

据统计,地球上水能资源总蕴藏量约为 50 亿 kW,相应年发电量 44.3 万亿 kW·h;但是,技术上可能开发的水电装机容量为 22.6 亿 kW,年发电量 19.4 万亿 kW·h。世界上的水能资源,各大洲也是不平衡的,按目前可能开发的资源估算,以亚洲最多,约占世界的 36%,其次是非洲、拉丁美洲和北美洲,以大洋洲最少,仅占世界的 2%。中国、俄罗斯、美国、加拿大、巴西和刚果(金),合计占世界水能资源的半数以上。其中,我国是世界上水能资源最多的国家。