

序

以盐差能和太阳能为输入能源的离子渗透发电技术是一种清洁高效可持续的能源转化方式，是改善我国能源结构和实现“双碳”目标的重要途径。近年来我国不断加大在离子渗透发电领域的研发投入，并批准建设了多个盐差能电站示范项目，但是离子渗透发电技术的基础研究仍面临热质传输理论不完善与性能调控方法单一的科学瓶颈，其商业化推广应用也受到输出性能、运行稳定性、系统集成性与经济可行性方面的制约。

离子渗透发电的工作原理涉及纳米多孔膜内浓度场、温度场、压力场和电势场等物理场作用下的热质传输过程，受到膜纳米通道、盐溶液和环境因素的耦合影响，深刻理解离子渗透发电的过程机理是设计高性能离子渗透发电系统的重要基础。西安交通大学热流科学与工程系长期在微纳尺度传热传质领域开展研究工作，其间主持了国家自然科学基金委员会的多个项目，并取得了积极的成果。特别是屈治国教授主持了国家杰出青年科学基金项目“多孔介质热质传输”，带领项目研究团队在这一方面取得了丰富的研究成果。

屈治国教授团队基于已有的研究基础，完成了《离子渗透发电热质传输基础与性能调控》一书的撰写工作。该书内容符合国家“双碳”目标的发展需求，顺应离子渗透发电技术推广应用这一发展趋势。该书的特点是理论性和综合性强，首先介绍了选择性离子传输现象与离子渗透发电技术的相关原理，其次从微观层面阐述纳米通道固液界面的离子结构与动力学行为，特别介绍了离子渗透发电过程涉及的多物理场模型与性能评价关联式，进而从工程热物理学视角出发阐述离子渗透发电性能的主动与被动调控方法。该书是屈治国教授及其团队近年来研究成果的总结和凝练，不仅包括原子尺度模拟、多物理场仿真、实验系统搭建等大量工作，还包括在微观机理、高精度模型和系统集成方面的前瞻性思考。该书旨在提出底层指导新理论、实现性能计算公式新开发性能调控新方法、设计工程应用新范例，这些都是当前学术界和工业界十分关

心的问题。该书的出版将有助于推动离子渗透发电技术在基础研究、器件开发与系统优化层面的深入发展，为推动我国能源电力绿色低碳转型与高质量发展提供有益支撑。

本人欣闻该书由科学出版社出版，乐为之序。

西安交通大学教授

中国科学院院士



2025年6月14日

前 言

离子渗透发电是一项利用盐差能直接发电的新兴技术，具有效率高、环境友好、装置轻便、无运动部件和无噪声等优点，是实现低品位可再生能源高效利用与满足国家重大能源需求的重要途径。离子渗透发电技术的核心工作原理是纳米多孔膜内热质传输过程，涉及受限空间和复杂因素影响下的离子-电子相互作用和选择性离子传输行为。探究离子渗透发电系统内部的多尺度多物理场热质传输基础理论，开发输出性能的通用评价方法，进一步发展适用于不同场景的性能调控方法以实现系统高效稳定运行，是目前基础研究和工程应用中共同面临的科学挑战和技术瓶颈。

在笔者主持的国家杰出青年科学基金(No.52025065)资助下，研究团队在离子渗透发电热质传输基础与性能调控领域的研究工作取得了显著进展。这些研究成果深入揭示了离子渗透发电过程的微观界面离子-电子作用、双电层结构、离子热迁移和选择性输运等热质传输现象，开发了多物理场多因素模型与高精度通用性能计算公式，发展了主、被动结合的性能调控方法，在学术界受到了广泛认可。作者将多年来的研究成果、经验和实例进行总结形成本书，旨在给对离子渗透发电热质传输理论与应用感兴趣的读者提供参考。

本书第1章为绪论，着重介绍盐差能利用的重大需求及离子渗透发电的关键问题与技术挑战；第2章为离子渗透发电的基本概念，介绍其工作原理、典型特性、影响因素及纳米多孔膜性能表征与系统集成；第3章从底层机理出发阐述纳米通道固液界面的离子结构与动力学行为，介绍界面双电层理论与双电层理论；第4章从纳米尺度视角探讨纳米通道表面特性调控下的离子传输现象；第5章为离子渗透发电多物理场模型与仿真方法，为探讨多因素影响下的输出性能提供重要工具；第6章为离子渗透发电量纲统一与关联式建立，介绍输出性能计算的通用关联式；第7章围绕纳米通道理化性质探讨发电性能的被动调控思路；第8章从工程热物理视角提出太阳能界面光热、相变蓄热与非对称光热等主动调控手段，并介绍多源互补的性能强化方法，为离子渗透发电系统的高效稳定运行提供了新途径。

本书得以在科学出版社出版，深感荣幸。感谢西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室师生、作者研究团队与学界同仁在本书撰写过程中给予的大力支持与帮助，也特别感谢陶文铨院士和何雅玲院士对作者研究工作的悉心指导。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

屈治国

2025年2月12日

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	盐差能利用的重大需求	1
1.2	盐差能发电技术	1
1.2.1	压力延迟渗透技术	3
1.2.2	传统离子交换膜与反电渗析技术	4
1.2.3	仿生离子选择膜与离子渗透发电技术	6
1.3	离子渗透发电的关键问题与技术挑战	10
1.3.1	关键问题	10
1.3.2	技术挑战	11
	参考文献	12
第 2 章	离子渗透发电的基本概念	13
2.1	离子渗透发电装置的工作原理	13
2.1.1	离子渗透发电装置的基本结构	13
2.1.2	离子传输的驱动力	15
2.2	离子渗透发电的典型特性	18
2.2.1	表面电荷来源	18
2.2.2	界面双电层	20
2.2.3	吉布斯-唐南效应与离子选择性	24
2.2.4	纳米通道表面电导特性	30
2.2.5	离子整流效应	34
2.2.6	流体扩散-渗透效应	36
2.3	离子渗透发电过程的影响因素	37
2.3.1	离子渗透发电的竞争与匹配机制	37
2.3.2	纳米通道特性的影响	38
2.3.3	溶液特性的影响	39
2.4	纳米多孔膜的性能表征与离子渗透发电技术的系统集成	41
2.4.1	一维纳米膜与二维纳米膜	42
2.4.2	三维纳米多孔膜	43

2.4.3	材料表征与性能测试	44
2.4.4	纳米膜的并联集成	47
2.4.5	离子渗透发电技术的系统集成	48
	参考文献	51
第3章	固液界面的离子结构与动力学行为	54
3.1	研究方法	54
3.1.1	密度泛函理论	54
3.1.2	第一性原理分子动力学模拟	56
3.2	水溶液离子的界面效应	57
3.2.1	界面理化现象	57
3.2.2	界面电子转移	61
3.2.3	界面效应及其环境依赖性	62
3.2.4	界面离子各向异性扩散	69
3.3	水溶液离子的界面绑绳理论	71
3.3.1	多组分海水离子渗透发电实验	71
3.3.2	界面绑绳理论及其三要素	77
3.3.3	理论的第一性原理验证	78
3.3.4	理论指导提升离子渗透发电性能	84
3.4	离子液体的界面双电层理论	86
3.4.1	离子液体与水溶液离子体系的差异	86
3.4.2	离子液体双电层理论的探索思路	90
3.4.3	离子形貌与离子-离子相互作用	95
3.4.4	离子-壁面相互作用	103
3.4.5	温度与界面电场效应	108
3.4.6	离子液体双电层理论的内涵与应用	118
3.5	展望	120
	参考文献	122
第4章	纳米通道表面特性调控的离子传输	123
4.1	研究方法	123
4.1.1	经典分子动力学原理	123
4.1.2	纳米通道离子传输的分子动力学模拟	126
4.2	纳米通道外表面电荷调控的离子传输	127
4.2.1	纳米通道外表面电荷设计原理	127
4.2.2	离子浓度分布规律	130
4.2.3	水分子分布与传输特性	134
4.2.4	离子传输特性	142

4.3 纳米通道内表面结构调控的离子传输	145
4.3.1 纳米通道内表面结构设计原理	145
4.3.2 离子浓度与电势分布规律	147
4.3.3 水分子与离子传输特性	150
4.4 展望	153
参考文献	154
第5章 离子渗透发电多物理场模型与仿真方法	156
5.1 离子渗透发电的连续性模型	156
5.1.1 模型计算域选取	156
5.1.2 控制方程	159
5.1.3 边界条件	163
5.1.4 求解方法	167
5.1.5 性能指标	167
5.2 酸碱度-温度耦合调控渗透发电模型	169
5.2.1 考虑酸碱度-温度影响的表面反应模型	169
5.2.2 表面电荷密度	179
5.2.3 双电层强度	183
5.2.4 渗透发电性能	187
5.2.5 水流动与离子对流对性能的影响	189
5.3 考虑离子体积效应的全因素渗透发电模型	195
5.3.1 全因素渗透发电模型的构建思路	195
5.3.2 渗透发电几何模型和数学描述	201
5.3.3 全因素模型与经典模型的物理场对比	204
5.3.4 全因素模型与经典模型的物性对比	207
5.3.5 全因素模型与经典模型的发电性能对比	209
5.3.6 实用的全因素简化模型	211
5.4 全因素模型中溶液特性的影响	212
5.4.1 离子种类的影响	212
5.4.2 离子浓度的影响	216
5.5 展望	219
参考文献	220
第6章 离子渗透发电量纲统一与关联式建立	222
6.1 离子渗透发电关联式研究方法思路	222
6.1.1 相似原理与量纲分析方法	222
6.1.2 参数敏感性分析方法	223
6.1.3 数据驱动的深度学习的方法	225

6.1.4	关联式的建立思路	226
6.2	离子渗透发电的相似现象	227
6.2.1	离子渗透发电的量纲分析与相似现象仿真	229
6.2.2	离子热电能量转换的量纲分析与相似现象仿真	236
6.2.3	热调控离子渗透发电的量纲分析	242
6.3	离子能量转换过程的参数敏感性分析	245
6.3.1	离子渗透发电的参数敏感性	245
6.3.2	离子热电能量转换的参数敏感性	249
6.4	热调控离子渗透发电关联式	252
6.4.1	原始数据集的获取与实例	252
6.4.2	第一步数据扩充方法	256
6.4.3	第二步数据扩充方法	259
6.4.4	无量纲关联式	263
6.5	展望	270
	参考文献	271
第 7 章	离子渗透发电的被动调控方法	273
7.1	纳米通道表面粗糙结构调控方法	273
7.1.1	表面粗糙结构设计原理	273
7.1.2	渗透发电性能的浓度比分区	282
7.1.3	表面粗糙结构位置的影响	285
7.1.4	表面粗糙结构高度的影响	287
7.1.5	表面粗糙结构宽度与间距的影响	290
7.1.6	表面粗糙结构的最优设计	293
7.2	纳米多孔膜分段孔隙率调控方法	296
7.2.1	分段孔隙率设计原理	296
7.2.2	直通通道渗透发电性能分析	298
7.2.3	分段通道渗透发电性能分析	300
7.2.4	分段孔隙率与功率密度的关联式	306
7.3	纳米通道表面官能团分布调控方法	308
7.3.1	官能团非均匀分布调控原理	308
7.3.2	离子传输性能	312
7.3.3	渗透发电性能	314
7.3.4	考虑温度影响的调控方法	316
7.3.5	考虑 pH 影响的调控方法	318
7.4	纳米颗粒-氧化石墨烯复合膜调控方法	319
7.4.1	复合膜设计原理	320

7.4.2	复合膜结构表征	322
7.4.3	离子电导与离子传输特性	325
7.4.4	渗透发电性能测试与机理分析	327
7.4.5	浓度梯度与酸碱度的影响	331
7.5	展望	335
	参考文献	335
第 8 章	离子渗透发电的主动调控方法	337
8.1	界面光热效应调控方法	337
8.1.1	系统结构设计与工作原理	337
8.1.2	传热过程分析	339
8.1.3	渗透发电性能	342
8.2	相变蓄热集成调控方法	346
8.2.1	系统结构设计与工作原理	346
8.2.2	蓄热过程的温度特性	351
8.2.3	蓄热过程的发电特性	354
8.2.4	系统运行稳定性	360
8.3	非对称光热调控方法	361
8.3.1	系统结构设计与加热模式	362
8.3.2	温度响应特性	364
8.3.3	渗透发电性能	364
8.4	离子渗透发电与蒸发集水双功能系统	371
8.4.1	系统结构设计与工作原理	371
8.4.2	蒸发集水性能	375
8.4.3	渗透发电性能及其调控机理	377
8.4.4	系统运行稳定性	381
8.5	离子渗透发电性能的动态响应特性	382
8.5.1	传统恒压源等效电路模型	383
8.5.2	电容-电容/电阻等效电路模型	384
8.5.3	基于等效电路模型的性能预测	393
8.6	展望	395
	参考文献	396

第1章 绪 论

1.1 盐差能利用的重大需求

能源是现今人类社会赖以生存发展的重要物质基础。2024年8月国务院新闻办公室发布《中国的能源转型》白皮书，强调要推动主体能源从化石能源向非化石能源更替，这是破解资源环境约束、实现碳达峰碳中和目标的迫切需要。因此，开发可再生能源发电技术并促进能源电力低碳转型，是满足全球能源需求和实现我国碳达峰碳中和目标的重要途径。

自然界的水循环过程蕴藏着丰富的能量，太阳热辐射使得水体水分蒸发并形成高盐度的盐湖卤水(含盐度高于3.5%)，蒸发的水分以降水形式再次抵达地面并形成低盐度的河水(含盐度为0.01%~0.3%)，各支流河水不断纳入土壤中的盐离子与矿物质，最终汇合注入海洋并形成较高盐度的海水(平均含盐度为3.5%)。因此，盐湖与河流及河流与海洋交汇处的水体盐度存在显著差异，将不同盐度的水体进行混合可以释放出巨大的吉布斯自由能，即盐差能(salinity gradient energy, SGE)。盐差能广泛分布于内陆盐湖、河流入海口和近海岛屿等水源体系，具有绿色清洁、可持续和稳定性高等优点。据统计，地球上所有河流汇入海洋产生的盐差能总量约为 $30 \times 10^{12} \text{W}$ ，其中可能被利用的有 $2.6 \times 10^{12} \text{W}$ ，我国沿海地区与内陆盐湖的可利用盐差能达到 $1.1 \times 10^{11} \text{W}^{[1]}$ 。此外，人类生活与工业生产排放的高盐废水、生活污水、工业废酸和废碱溶液等也蕴含着大量盐差能，对其进行有效捕获可以为盐差能利用开辟新的应用空间，并减轻工业废水排放对生态环境的影响。图1-1是盐差能利用领域的公开出版物发表数量变化。自2010年以来，该领域在基础理论、实验研究和工业示范方面均取得显著进展，体现了盐差能利用的重大需求与广阔前景。

1.2 盐差能发电技术

利用盐差能发电技术将自然界储量巨大的盐差能转换为电能，是改善我国能源结构和构建能源供给新体系的重要途径。盐差能的本质是盐度不同的两种溶液混合时释放的吉布斯自由能，图1-2为盐差能利用的基本原理。

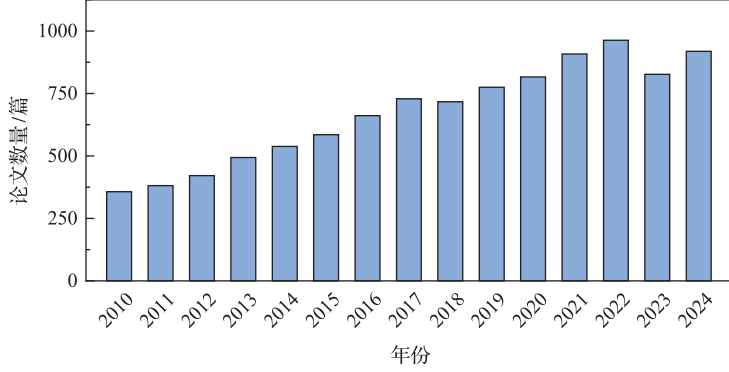


图 1-1 盐差能利用领域的公开出版物发表数量变化

来自 Web of Science, 检索日期为 2025 年 1 月 20 日, 检索关键词为 salinity gradient energy, osmotic energy

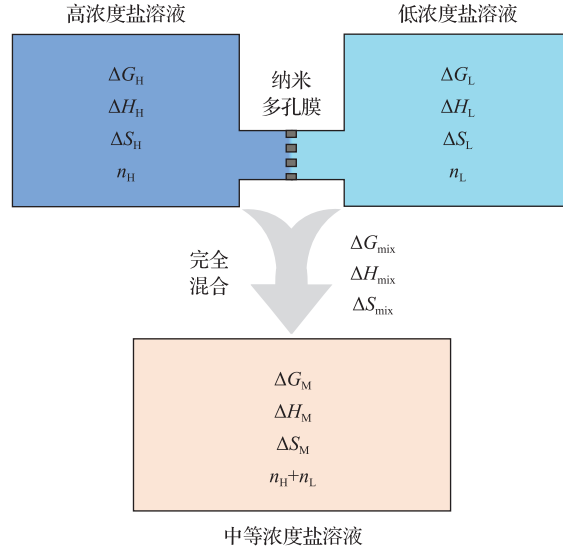


图 1-2 盐差能利用的基本原理

当高浓度盐溶液与低浓度盐溶液以热力学可逆方式完全混合时, 高浓度侧的离子将通过纳米多孔膜到达低浓度侧, 最终形成中等浓度盐溶液。在此过程中, 对应的混合吉布斯自由能 ΔG_{mix} 可以定义为

$$\begin{aligned}
 \Delta G_{\text{mix}} &= \Delta G_{\text{M}} - \Delta G_{\text{H}} + \Delta G_{\text{L}} \\
 &= (n_{\text{H}} + n_{\text{L}})(\Delta H_{\text{M}} - T\Delta S_{\text{M}}) - n_{\text{H}}(\Delta H_{\text{H}} - T\Delta S_{\text{H}}) - n_{\text{L}}(\Delta H_{\text{L}} - T\Delta S_{\text{L}}) \\
 &= (n_{\text{H}} + n_{\text{L}})\Delta H_{\text{M}} - n_{\text{H}}\Delta H_{\text{H}} - n_{\text{L}}\Delta H_{\text{L}} - T[(n_{\text{H}} + n_{\text{L}})\Delta S_{\text{M}} - n_{\text{H}}\Delta S_{\text{H}} - n_{\text{L}}\Delta S_{\text{L}}]
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中, ΔG 、 ΔH 、 ΔS 、 n 和 T 分别为吉布斯自由能(J)、每摩尔物质的焓变(J/mol)、

每摩尔物质的熵变[J/(mol·K)]、物质的量(mol)和温度(K);下标 mix 为混合过程;下标 H 和 L 分别为混合前的高浓度溶液与低浓度溶液;下标 M 为混合后的中等浓度溶液。其中, ΔS 的定义为

$$\Delta S = -R_g \sum_i x_i \ln x_i \quad (1-2)$$

式中, R_g 为通用气体常数, J/(mol·K); x_i 为组分 i 的摩尔分数。针对海水与河水混合的情形, 组分 i 主要包含 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和水分子。

根据吉布斯自由能的定义, ΔG_{mix} 又可以表示为

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (1-3)$$

式中, ΔH_{mix} 和 ΔS_{mix} 分别为混合过程的焓变(J)和熵变(J/K)。对于理想状态下的稀溶液, ΔH_{mix} 为零, 此时 ΔG_{mix} 可以表示为

$$\Delta G_{\text{mix}} = -T\Delta S_{\text{mix}} = -T[(n_H + n_L)\Delta S_M - n_H\Delta S_H - n_L\Delta S_L] \quad (1-4)$$

将摩尔熵 ΔS 的定义代入式(1-4)可得

$$\frac{\Delta G_{\text{mix}}}{R_g T} = (n_H + n_L) \left(\sum_i x_i \ln x_i \right)_M - n_H \left(\sum_i x_i \ln x_i \right)_H - n_L \left(\sum_i x_i \ln x_i \right)_L \quad (1-5)$$

ΔG_{mix} 表示能够从盐差能中获得的理论最大能量。以河流入海口为例, 单位体积河水与海水混合可以产生能量 0.44~0.76kW·h, 并且随着海水与河水盐度差的增大而增加。然而热力学第二定律表明, 实际的溶液混合过程存在不可逆能量损失, 因此从盐差能中可获得的能量将少于理论值。

盐差能发电技术的研究始于 20 世纪 50 年代, 英国科学家帕特尔(Pattle)于 1954 年首次发现河流与海水汇合时将产生巨大能量^[2], 以色列科学家勒布(Loeb)于 1975 年首次使用选择性渗透膜验证了盐差能发电技术的可行性^[3]。随着近年来膜制备技术的快速发展, 世界各国针对盐差能发电领域的探索持续深入, 挪威、荷兰、意大利和西班牙等国均已建成盐差能发电设施并投入运营。

1.2.1 压力延迟渗透技术

目前应用广泛的盐差能发电技术包括压力延迟渗透 (pressure-retarded osmosis, PRO) 技术与反电渗析 (reverse electrodialysis, RED) 技术。随着能源科学、膜科学与纳米制造等领域的飞速发展, 以仿生离子选择膜为基础的渗透发电技术正在成为盐差能发电的前沿方式之一。

压力延迟渗透技术是一种将盐差能分步转换为电能的途径。图 1-3 为压力延迟渗透技术的工作原理。将高浓度盐溶液以流量 Q_H 通入高浓度腔室, 低浓度盐

溶液以流量 Q_L 通入低浓度腔室，两个腔室之间的半渗透膜仅允许水分子通过。渗透压差驱动水分子以流量 Q_p 由低浓度腔室渗透进入高浓度腔室，同时阻断盐离子的跨膜传输，从而将盐差能转换为势能。随着水分子渗透过程的持续进行，高浓度腔室溶液体积或流量不断增加，进而驱动水轮机发电并将势能转换为电能。水分子渗透和水轮机发电过程需要足够高的盐度差来持续驱动，因此压力延迟渗透技术通常适用于高盐度差场景的发电需求，如高浓度内陆盐湖与低浓度淡水之间形成的高盐度差。

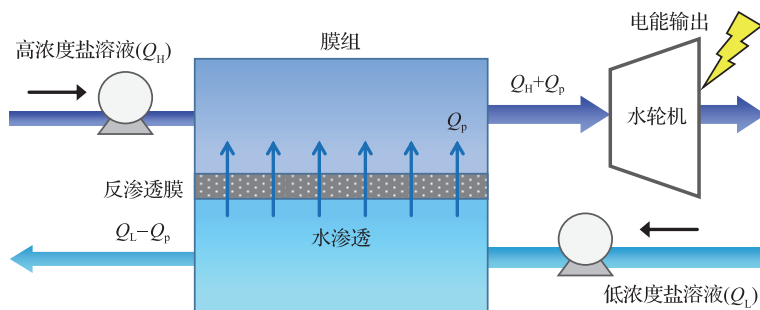


图 1-3 压力延迟渗透技术的工作原理

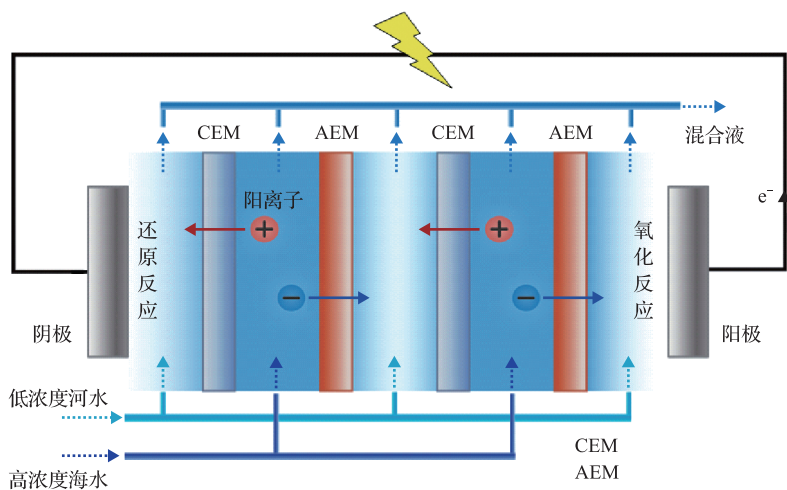
压力延迟渗透技术是由以色列科学家 Loeb 于 1975 年首次提出，并由此建造了世界首台盐差能发电实验装置。我国于 1985 年研制出首台实验室级的干涸盐湖盐差能发电装置，使用 14m^2 的半透膜可以推动水轮机组发电 $0.9\sim 1.2\text{W}$ 。挪威国家电力公司于 1997 年成立盐差能发电技术研发部门，其建成的全球第一座基于压力延迟渗透技术的发电厂于 2009 年投入运行，平均发电功率密度低于 $1.0\text{W}/\text{m}^2$ 。荷兰特温特大学纳米研究所于 2014 年建成盐差能试验电厂，每小时可以处理 22 万 L 的海水和淡水，发电功率密度为 $1.3\text{W}/\text{m}^2$ 。经过几十年的发展，压力延迟渗透技术的发电功率密度已提高到 $3.0\text{W}/\text{m}^2$ ，并且已经较大范围地投入到商业化运营中。

尽管压力延迟渗透技术的研发已取得重要发展，其规模化应用仍受制于较低的能量转换效率与高昂的系统运行成本。水的势能在二次转换为电能的过程中会产生额外的能量损失。水源中有机物和微生物的吸附和生长会造成膜污染，无机矿物质沉淀易于形成膜结垢，水渗透压过大易使膜变形；浓度极化现象则会降低半渗透膜两侧的渗透压差。这些不利因素会降低水分子的渗透性和水轮机的输出功率，缩短膜的使用寿命。因此，在压力延迟渗透发电系统运行过程中，需要对水源进行精细预处理，但这一环节会导致技术成本增加，经济可行性不足。

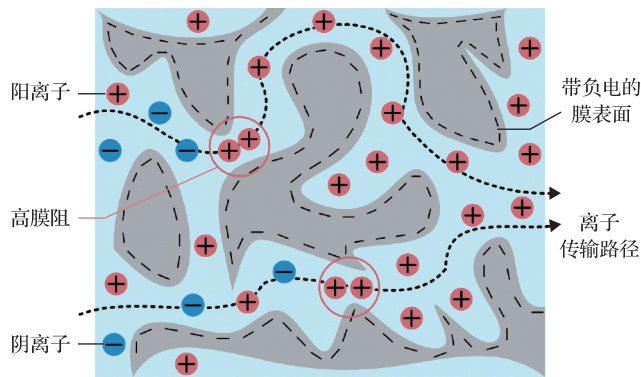
1.2.2 传统离子交换膜与反电渗析技术

以离子交换膜为基础的反电渗析技术是将盐差能直接转换为电能的重要途径

径。图 1-4(a) 为反电渗析装置的工作原理。以江河入海口的盐差能发电场景为例，具有选择透过性的阳离子交换膜(cation exchange membrane, CEM)和阴离子交换膜(anion exchange membrane, AEM)在反电渗析装置中交替布置，高浓度海水与低浓度河水分别通入高浓度腔室与低浓度腔室，膜两侧溶液的盐度差驱动阳离子与阴离子跨膜定向传输，从而产生净离子通量和跨膜电势差。在电极氧化还原反应的配合下，电子通过外部电路从阳极转移到阴极，实现从盐差能到电能的直接转换。相比于压力延迟渗透技术，反电渗析技术更适用于江河入海口处等低盐度差场景的发电。



(a) 反电渗析装置的工作原理



(b) 传统阳离子交换膜内的离子传输

图 1-4 反电渗析技术的基本原理

离子交换膜是反电渗析装置的核心部件，它通常由聚合物主链、带电基团和解离离子三部分构成。传统离子交换膜材料包括全氟磺酸树脂、聚苯乙烯磺酸树

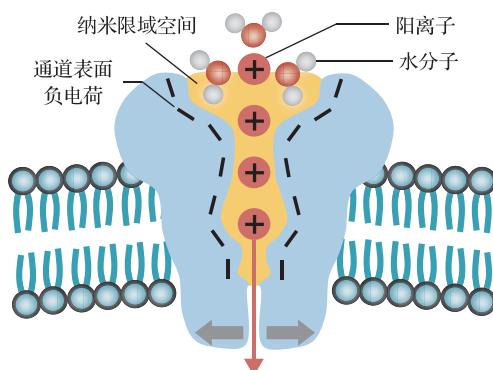
脂、聚乙烯膜、生物基离子交换膜等。根据带电基团的类型,这些膜材料又可以分为阳离子交换膜(含有磺酸盐、磷酸盐或羧基等酸性基团)与阴离子交换膜(含有季胺等碱性基团)。膜内离子传输特性与表面带电性质和孔隙结构密切相关。图 1-4(b)以阳离子交换膜为例解释了膜内离子的传输现象。在带负电的膜表面的静电作用下,阳离子被允许跨膜传输而阴离子则被阻断,从而实现离子的选择透过性。传统离子交换膜本质上是具有丰富孔隙结构的多孔介质,膜内离子传输路径迂曲复杂,因而普遍存在传质性能差和膜阻高的不足,限制了反电渗析发电装置的输出性能。

1.2.3 仿生离子选择膜与离子渗透发电技术

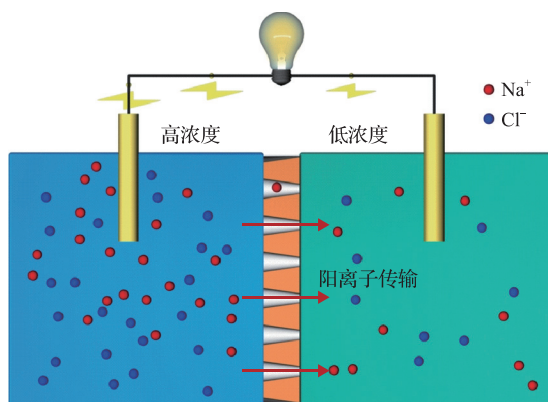
从大自然获取灵感并用于仿生膜材料设计,可以显著提高盐差能发电技术的输出性能。自然界的离子传输现象普遍存在于树纤维、多孔岩缝和生物细胞膜等纳米通道。树木利用整齐排列的纤维素纳米纤维,实现离子定向传输以输送养分;细胞膜通道利用其尺寸限制、非对称结构和表面理化修饰等特征进行离子定向传输,从而在视网膜、神经元和肌肉中发挥关键作用。图 1-5(a)为细胞膜通道内的离子传输行为。在受限通道内,表面带电官能团对离子具备特异性识别能力,允许特定离子进入通道并排斥其他离子,因而具有优异的离子选择性。此外,通道的纳米级长度有利于离子的快速传输,通道的非均质构型与门控机制则可以实现离子单向导通。因此,细胞膜通道内的离子传输过程具有独特的选择性、渗透性和整流特性,生命体内神经元细胞可以利用这些特性来接收和传递电信号。例如,电鳗鱼可以调节细胞内外钾离子和钠离子的浓度差,并在神经信号控制下引发离子单向流动通过细胞膜,从而瞬间产生 600V 的电压和 1A 的电流,并用于捕捉猎物^[4]。

根据电鳗鱼发电的启示,各种仿生离子选择膜已被设计用于模仿自然界独特的离子行为,并由此开发了离子渗透发电技术,极大提高了盐差能发电的功率性能。图 1-5(b)为离子渗透发电装置的工作原理。在离子选择膜两侧溶液盐度差的驱动下,阳离子被选择进入带电膜通道并进行定向传输,阴离子则被阻断,由此产生净离子通量。电极通过氧化还原反应将跨膜离子流转换为外电路电流,从而实现盐差能发电。因此,离子渗透发电技术的工作原理类似于反电渗析技术,但使用的膜材料性质具有显著区别。

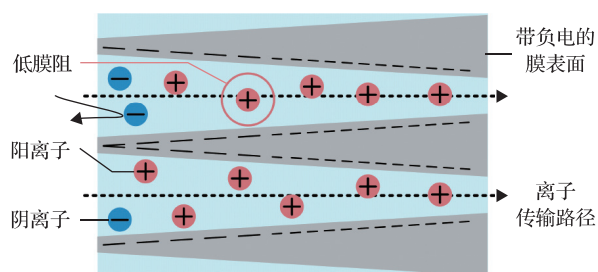
图 1-5(c)为仿生离子选择膜内的离子传输行为。相比于反电渗析装置中迂曲复杂的离子交换膜通道,仿生离子选择膜通道整齐排列,因而具有更高的离子渗透性。仿生离子选择膜具有纳米量级的通道高度和显著的双电层重叠效应,允许抗衡离子传输并阻断助离子传输,从而实现超高的离子选择性。膜通道的几何



(a) 细胞膜通道内的离子传输行为



(b) 离子渗透发电装置的工作原理



(c) 仿生离子选择膜内的离子传输行为

图 1-5 离子渗透发电技术的基本原理

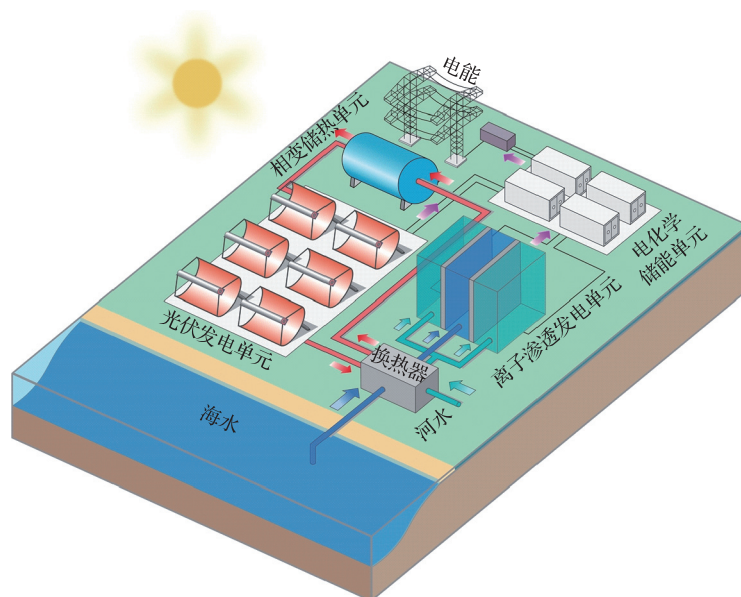
构型与电荷分布还可以进行非对称设计,从而复现细胞膜通道内离子单向导通的整流特性。此外,类似于反电渗析装置的膜堆布置,阳离子选择膜可以与阴离子选择膜组成交替重复的膜对,从而构建堆栈结构并进一步提高盐差能发电的输出电压。

除设计和改进离子选择膜外,离子渗透发电技术还可以对盐差能与太阳能进行协同利用以进一步提高发电性能。太阳能是自然界广泛分布的一种清洁能源,利用界面或体相光热效应加热渗透发电装置中的盐溶液,可以显著提升离子传输性能,从而提升盐差能发电的输出功率。受纬度、地形和气候条件的影响,我国的陆地太阳能资源总体丰富但区域差异显著。青藏高原海拔高且空气稀薄,是我国太阳能资源最丰富的地区。西北地区降水少且日照时间较长,太阳能资源比较丰富。东北地区、长江中下游及四川盆地的太阳能资源则依次减少。我国盐湖资源的形成主要受干旱、半干旱气候的控制^[5]。青藏高原盐湖区位于中国地势第一阶梯,盐湖规模最大并且成分复杂,既有盛产钾、镁的普通盐湖,也有硼、锂、铯等含量丰富的特种盐湖。西北盐湖区位于中国地势的第二阶梯,此区域以普通盐湖为主并且有数个大规模的钾镁盐湖。东北盐湖区与东部分散盐湖区盐湖规模较小,且均为普通盐湖。因此,我国盐湖和太阳能资源的分布具有高度一致性,在青藏高原与西北地区均储量丰富。除陆地区域以外,我国的近海岛屿和江河入海口等区域也蕴藏着丰富的盐差能和太阳能资源。这些有利条件表明,盐差能与太阳能的协同利用技术具有广阔的前景。

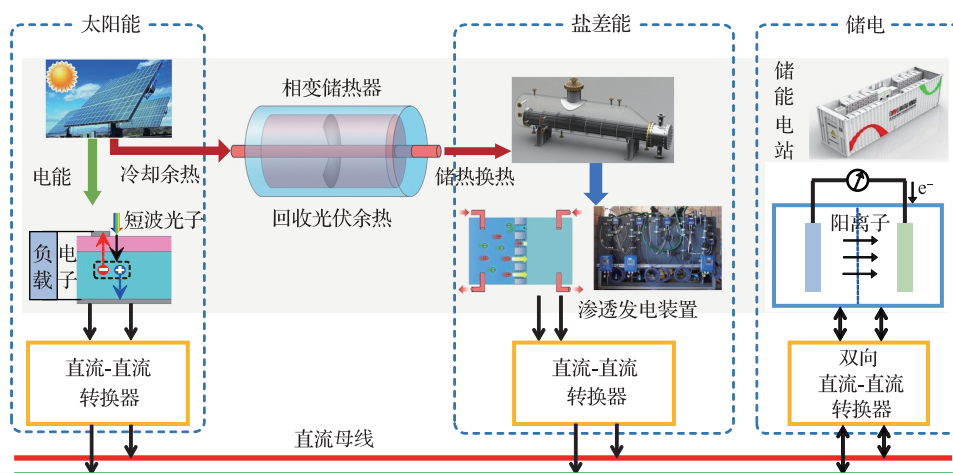
图 1-6(a)为太阳能-盐差能综合能源系统的工作原理。此系统将离子渗透发电单元、光伏发电单元、电化学储能单元与相变储热单元等多个单元组建形成综合能源系统,可以实现盐差能与太阳能耦合互补利用以及电能的稳定输出。以江河入海口的应用场景为例,当太阳能充足时,短波太阳光在光伏发电单元用于发电,长波太阳光则用于加热光伏发电单元内的载热工质。收集的热量在换热器内加热河水与海水溶液,剩余热量储存于相变储热单元。被加热的溶液在离子渗透发电单元内用于实现高性能的盐差能发电,产生的电能储存于电化学储能单元,并最终输送至电网和用电端。当太阳能不足时,相变储热单元内的热量被释放用于加热海水与河水,继续提升离子渗透发电单元的输出性能。

图 1-6(b)展示了系统内的能量流与物质流路径。太阳能和盐差能分别进入光伏发电单元与离子渗透发电单元,载热工质在光伏发电单元、相变储热单元与离子渗透发电单元之间循环流动并传递热量,来自光伏发电单元与离子渗透发电单元的电能输送至电化学储能单元并输出至用电端。

太阳能-盐差能综合能源系统可以实现“一石三鸟”的效果。对太阳能进行宽光谱梯级利用,可以提高光伏发电单元的输出性能;利用载热工质回收光伏余热既可以避免光伏电池局部高温,又能够对离子渗透发电单元进行辅助热调控,从而同时提高光伏发电效率和盐差能发电功率密度;借助连续供给的盐差能与相变储热控温技术,可以克服单一光伏发电的间歇性与单一渗透发电的波动性缺点,从而实现稳定持续的发电。



(a) 系统的工作原理



(b) 系统内的能量流与物质流路径

图 1-6 太阳能-盐差能综合能源系统

总之，离子渗透发电技术是以仿生离子选择膜为基础，具有不受天气条件限制、能量转换效率高、无碳排放和无运动部件等优点，适用于各种小型便携式装置与大型能源系统，可以为沿海岛屿和高原干旱地区提供稳定的电能，是改善我国能源结构的重要途径。离子渗透发电技术还能够与其他技术相结合，在海水淡化、离子筛分和离子传感等领域具有巨大的应用潜力。

1.3 离子渗透发电的关键问题与技术挑战

1.3.1 关键问题

盐差能和太阳能的利用是实现碳达峰碳中和的重要途径，离子渗透发电是实现盐差能和太阳能高效利用的关键技术。渗透发电的物理本质是双电层效应主导下的离子选择性定向传输，这个过程受到离子选择膜纳米通道、盐溶液、环境条件等多种因素的耦合影响。当前离子渗透发电技术的基础研究仍存在以下三个方面的不足，制约了离子渗透发电性能的进一步提升。

第一，纳米通道界面效应与离子迁移束缚机制有待明晰。水溶液离子通常被水分子包围并以水合状态存在，离子与周围介质的相互作用、通道表面形貌和电荷特征、外部条件刺激等因素将共同发挥作用，从而产生显著的界面效应并改变离子传输行为。因此，跨纳米通道的离子传输行为存在复杂的竞争和匹配机制。从原子尺度视角来看，影响离子跨纳米通道传输性能的机理包括通道入口的空间位阻、介电效应和静电作用，以及通道内部的摩擦效应和黏性效应。当纳米通道的结构和电荷特征与离子载能子本征性质匹配时，这些机理之间还存在着重要的关联关系。

具体而言，当离子从体相溶液进入纳米通道受限空间时，将不可避免地遇到巨大阻力，从而引起位阻效应。与此同时，纳米通道受限空间也将重整或脱除离子水合壳，从而导致离子部分去水合和能量消耗，这种介电效应体现了离子水合环境变化引起的非均匀介电行为。因此，只要提高纳米通道的分辨精度，就能利用空间位阻和介电效应来辨别不同尺寸和不同溶剂化能力的离子。此外，抗衡离子与通道表面电性相反，静电吸引作用可部分补偿离子脱水导致的耗能，从而促进抗衡离子以较低能垒进入通道。相反，通道表面对助离子的静电排斥作用则产生巨大能垒以阻断其传输，从而在抗衡离子与助离子之间形成选择性。当部分脱水的离子进入通道后，摩擦和黏性效应将占据主导地位。其中，摩擦效应来自离子与相邻离子、水分子、通道表面等周围介质的原子尺度随机碰撞，黏性效应则表示水合离子与通道表面之间的氢键网络、静电吸引、化学键等理化作用，这些相互作用将产生化学亲和性并阻碍通道内的离子传输。因此，有必要澄清纳米通道内微观相互作用与离子动力学性能之间的内在关联，并完善纳米限域离子输运理论，从而指导离子选择膜的设计与运行工况的改进，最终提升离子渗透发电性能。

第二，离子渗透发电的统一物理认知和性能计算通用公式有待建立。离子渗透发电通过纳米通道内的离子选择性定向传输来产生净离子通量，此过程涉及浓度场、电场、温度场和速度场之间的耦合作用。在离子传输现象的宏观认知层面，