

Influence of Substrate and Salinity on Electricity Production by Deep-Sea Strain *Shewanella* sp. DS1

Biao WANG¹, Xinhua CHEN², Fangcheng Xu^{3*}, Wei WANG², Xiaojin XIONG¹

¹College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

²Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Email: fxcxu@xmu.edu.cn

Abstract: The influences of substrate, concentration and salinity on electricity production in MFCs were investigated. Deep-sea exoelectrogenic bacterium *Shewanella* sp. DS1 could not utilize acetate and glucose, but could utilize lactate as substrate for current production. The optimal concentration of lactate was 5 mmol/L with a maximum voltage 200 mV, relevant power density 16.87 mW/m² and coulombic efficiency (CE) 37.4%. With higher lactate concentration (i.e., 20 mmol/L), CE was reduced by 56.7% while the maximum voltage not affected. Salinity tests showed that DS1 could produce current in a wide salinity range (1-7% NaCl). Power density and CE firstly increased with the NaCl concentration, and then decreased with it. A maximum voltage of 202 mV and a relevant power density of 17.21 mW/m² were achieved at optimal NaCl concentration (3%). It seemed that DS1 has higher power and CE yields under high NaCl concentration is probably because DS1 is an exoelectrogenic bacterium isolated from deep-sea sediment. DS1 has potential application in high salinity wastewater treatment, such as dye wastewater, with some green bio-electricity reclaimed.

Keywords: Deep-sea exoelectrogen; *Shewanella*; Microbial fuel cell; Coulombic efficiency

碳源和盐度对深海产电菌 *Shewanella* sp. DS1 产电能力影响

王彪¹, 陈新华², 徐方成^{3*}, 王蔚², 熊小京¹

¹厦门大学海洋与环境学院, 厦门, 中国, 361005

²国家海洋局第三研究所, 厦门, 中国, 361005

³厦门大学化学化工学院, 厦门, 中国, 361005

Email: fxcxu@xmu.edu.cn

摘要: 以深海产电菌 *Shewanella* sp. DS1 为实验对象, 研究不同碳源种类、浓度和盐度时产电特性。DS1 不能利用乙酸与葡萄糖产电, 但能利用乳酸产电。不同乳酸浓度的产电测试结果表明, 乳酸碳源最佳浓度为 5 mmol/L, 电压最高 200 mV, 功率 16.87 mW/m², 库仑效率 (CE) 达到 37.4%; 当碳源浓度太高时 (20 mmol/L), 基本不会影响最高电压, 但 CE 降低 56.7%。DS1 可在 1-7% NaCl 范围内产电, 产电功率和 CE 先随着 NaCl 升高而升高, 然后下降。最佳盐度为 3% NaCl, 此时产电电压 202 mV, 最大功率密度 17.21 mW/m²。DS1 能在高盐度下产电与该菌来自深海有关, 有望用于高盐度废水 (如染料废水) 的生物处理和产电。

关键字: 深海产电菌; 希瓦氏菌; 微生物燃料电池; 库仑效率

前言

目前人类面临的两大挑战是能源短缺与废物处理, 微生物燃料电池 (Microbial Fuel Cells, MFC) 能

国家海洋局海洋生物遗传重点实验室开放研究基金资助项目, 项目编号: HY200904

将两者较好地结合起来。MFC 是一种特殊的燃料电池, 它以微生物为催化剂, 以废弃生物质、有机废水等有机物作为燃料, 通过生物氧化产生电能^[1]。将 MFC 应用于有机废物处理领域, 既处理了废物, 又能回收保存在有机物中的部分能量, 降低处理成本, 实现污

染治理与资源化的双重效果。据统计^[2], 2009年我国排放COD 1272.8万吨, 完全能量化利用, 1年可产生 1.08×10^{10} kWh, 目前这些能量流向: 26.4%排入环境, 25%进入剩余污泥产生沼气, 48.6%被微生物氧化, 如果采用MFC处理这些废物, 可产生一部分可再生能源, 同时可减少搅拌、曝气所消耗的动力, 产能和节能的能量可达到 1.6×10^{10} kWh, 相当于全国0.4%的总发电量。

产电微生物是 MFC 关键技术之一。目前国外已经筛选得到一些产电微生物, 这些微生物主要属于变性菌纲 (*Proteobacteria*) 的 β 、 γ 、 δ 几个亚纲的化能异养细菌^[3], 其中以 δ 亚纲的地杆菌属 (*Geobacter*) 和 β 亚纲的希瓦氏菌属 (*Shewanella*) 的产电菌比较多, 而且这些产电菌大部分从陆源获得^[4]。海洋环境以高盐、高压、低温和贫营养为特征, 海洋微生物长期适应复杂的海洋环境而生存, 因此来自海洋产电微生物有可能具备特异的生长与产电特性。

我国学者在 MFC 的反应器构建^[5]、MFC 的微生物驯化启动^[6]以及 MFC 在染料脱色^[7]等方面开展了一些研究工作, 但在产电菌的选育方面研究报道还不多, 特别是来自深海的产电菌未见报道。我们以深海 3026 m 海底底泥为菌种来源, 分离获得一株产电菌 *Shewanella* sp. DS1^[8], 本文着重研究深海产电菌 DS1 的产电功率、库仑效率与碳源(燃料)、盐浓度的关系。

1. 材料与方法

1.1 实验装置和过程

本研究采用双室型 MFC, 阴极室和阳极室为 400 mL 的试剂瓶, PTFE 瓶盖旋紧密封。靠近瓶底的侧面各有一带凸缘的侧管(长约为 3 cm, 内径 2 cm), 两接管凸缘之间安放一片质子交换膜 (Nafion117, DuPont), 用不锈钢平行夹夹紧, 整个 MFC 形成 H 型。瓶盖上开有几个小孔, 用丁基合成橡胶作为垫片密封, 通过插针取样。两电极室装液均为 350 mL, 电极采用未抛光粗面高纯石墨 (HF-6, 上海弘枫石墨制品有限公司), 尺寸 60 mm \times 30 mm \times 7 mm, 钛导线接出电极。电极使用前用 1 mol/L NaOH 浸泡 1 h 去除电极表面吸附的生物膜, 1 mol/L HCl 浸泡 1 h 去除表面吸附的离子, 无菌水浸泡待用。PEM 膜直径 3 cm (7.06 cm²), 使用前依次用 H₂O₂(30%)、超纯水、0.5 mol/L H₂SO₄ 与超纯水各煮沸 1 h, 存放于无菌水中。

Shewanella sp. DS1 先活化培养至对数末期, 冷冻离心 3 min (7000 r/min), 产电基础培养基淋洗重悬两

次后, 接种到阳极室, 控制初始 OD₆₀₀ 于 0.3 左右。阳极室接种前通 N₂ (99.999%) 除氧, 接种后仍持续通气, 阴极通空气, N₂ 和空气经微孔滤膜 (0.22 μ m, Midisart 2000) 除菌, 磁力(R05, IKA, 德国)搅拌促进溶液混合。

产电基础培养基 M6 (1 L): KCl 0.745 g, NaH₂PO₄ 0.35 g, Na₂HPO₄ 0.44 g, MgSO₄ 0.188 g, NH₄Cl 1 g, Wolfe 微量元素溶液 10 mL, 初始 pH 7。厌氧活化培养基 (1 L): M6、Lactate 10 mmol/L、Fumarate 20 mmol/L、3% NaCl, pH 7.0。30 $^{\circ}$ C、130 r/min 厌氧瓶厌氧培养。培养基经高纯 N₂(99.999%) 去除溶解氧后用厌氧瓶分装灭菌。测量其它碳源的产电能力时, 产电培养基中的乳酸换成其它碳源。

1.2 测量仪器与分析方法

菌体浓度用紫外可见分光光度计 (UV-2000; Unico, United States) 测量, 波长 600 nm。伏安测量采用多通道万用数字电表 (2000; Keithley, United States), 数据通过采集卡汇总到电脑, 采集速度 30 min/次, 不间断运行。

电功率密度 (mW/m²), $P=U^2/RA$, U (V) 是外电阻两端电压, R (Ω) 为外阻, A (cm²) 为阳极有效表面积。库仑效率 CE, $CE\% = C_p/C_{th} \times 100\%$, C_p (C) 为全过程产电中实际产生的电量, C_{th} (C) 是所加碳源理论可以传递的总电量^[9]。

MFC 内阻测量采用极化曲线方式测量^[10], 待 MFC 产电稳定后, 对 MFC 进行稳态放电实验测量。

2. 结果与讨论

2.1 不同碳源产电

DS1 利用不同碳源 (乙酸、乳酸、葡萄糖均为 10 mmol/L) 产电的曲线如图 1 所示。选择这三种碳源的主要原因是葡萄糖、乙酸和乳酸都是 MFC 中常用的碳源。为使实验结果具有可比性, 阳极室的离子强度、pH 值基本保持一致。

由图 1 可知, DS1 能利用乳酸产电, 不能利用葡萄糖与乙酸产电。以乳酸为碳源时, MFC 产电电压最高达 200 mV, 库仑效率为 30.8%, 产电功率为 16.87 mW/m², 说明 DS1 对所利用的碳源具有选择性, 其中乳酸是其较为理想的碳源, 这与文献的研究结果一致^[11,12], 以下实验均采用乳酸为碳源。

2.2 不同浓度碳源产电

调节产电培养基 pH 值为 7, 碳源为乳酸, 按浓度

5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L 分别测试 MFC 产电，测定不同初始碳源浓度下的产电曲线，计算不同浓度碳源情况下的库仑效率。

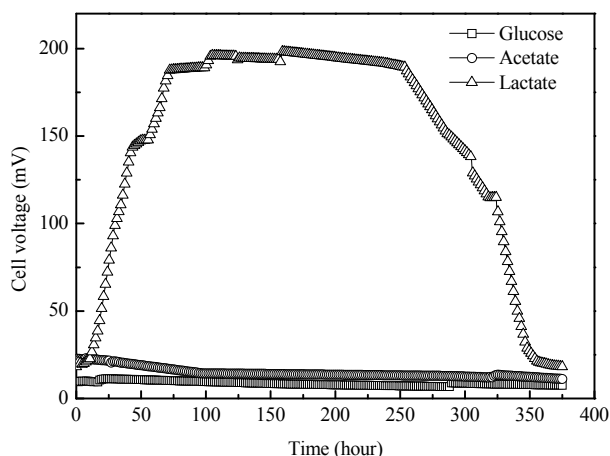


Figure 1. Effect of carbon sources on electricity generation by strain DS1.

图 1. 碳源对 DS1 菌产电的影响.

由图 2 可知，碳源浓度的增加，对产电的最高电压无影响，不同浓度条件下，电压均稳定在 200 mV 左右；但碳源浓度对 MFC 的启动时间有明显影响，分别为 25 h、34 h、40 h；随着碳源浓度增加，产电稳定时间也相应延长，分别为 58 h、98 h、219 h；但微生物对碳源利用率不同，经计算得到库仑效率分别为 37.4%、22.5%、16.2%。

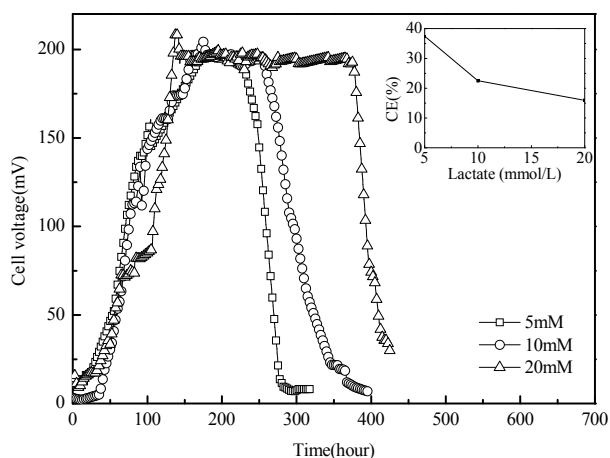


Figure 2. Electricity generation by DS1 using lactate as carbon source at various concentrations.

图 2. DS1 不同乳酸浓度下的碳源产电特性.

大约经过 50 h 稳定期后，MFC 开始产生电压，不同碳源浓度达到电压最高平台的时间不同，最高电

压稳定持续时间与碳源浓度相关。不同浓度碳源产电的稳定电压相同，说明 DS1 在利用乳酸产电时，主要靠吸附在阳极上的微生物数量决定的。当碳源浓度高时，有利于阳极室中的微生物生长，部分碳源不用于产电而是用于生长，造成用于产电的碳源减少，因此 CE 降低。

2.3 不同 NaCl% 盐度产电实验

深海菌 DS1 能在 1-7% 盐度条件下生长，此特性为 MFC 处理高盐度有机废水提供了可能。调节产电基础液 pH，C/N 值不变，以 10 mmol/L 乳酸作为唯一电子供体，设定不同 NaCl 浓度（1-7%）产电，研究不同盐度时，DS1 菌的产电特性，见图 3。

由图 3 知盐度为 3%、5%NaCl 时，稳定电压为 200 mV 左右，盐度为 1%和 7%时，电压为 172 mV 和 143 mV，说明盐度在 3-5%时，有利于 DS1 获得较高产电功率。对产电曲线进行积分，得到 1%、3%、5% 和 7%NaCl 的功率密度分别为 12.47、17.21、16.03 和 8.62 mW/m²。

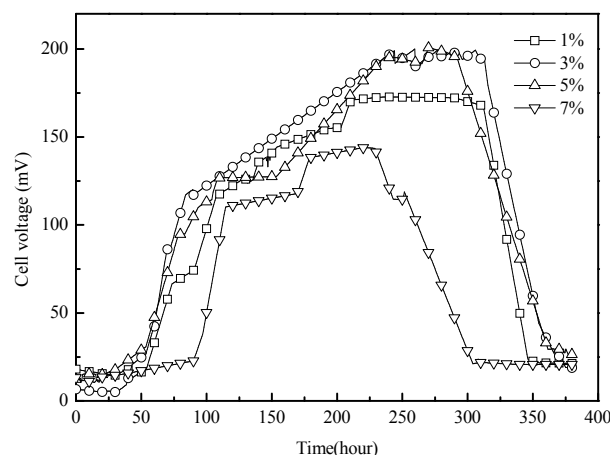


Figure 3. Electricity generation by strain DS1 using different salt concentration in MFCs.

图 3. 不同 NaCl% 条件下 DS1 菌产电.

根据文献报道^[13]，盐度构成会内阻的主要因素，通过对 DS1 的产电装置内阻测量，测得不同盐度时 MFC 内阻及 CE，见图 4。当盐度处于 1-5%NaCl 时，内阻分别为 953 Ω 、518 Ω 、744 Ω ，当盐度达 7%NaCl 时，MFC 的内阻升高为 1300 Ω 。说明适当提高离子浓度，能减小 MFC 的内阻，有利于提高质子传递速度，但离子浓度太高，会抑制产电菌的代谢活性。从实验结果看，在 NaCl 浓度为 3%时，产电功率和库仑

效率都达到最大值, 这可能与 DS1 来自深海有关。

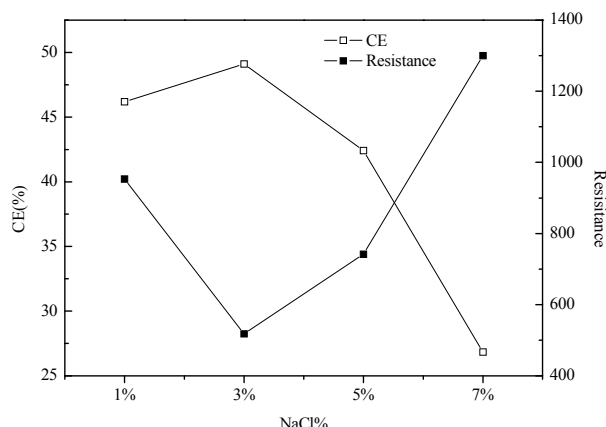


Figure 4. Effect of NaCl% on total internal resistance and CE.
图 4. 盐度对 MFC 总内阻与 CE 的影响。

3. 结论

深海产电菌 *Shewanella* sp. DS1 不能利用葡萄糖与乙酸产电, 但可利用乳酸 MFC 产电。碳源浓度对产电功率影响不大, 但是对库仑效率有显著影响。优化的乳酸浓度为 5 mmol/L, 此时最高电压可达 200 mV, 产电功率 16.87 mW/m², 库仑效率 37.4%; 但当碳源浓度太高 (20 mmol/L) 库仑效率降低 56.7%。

与非深海的产电菌相比, DS1 菌株在高 NaCl 浓度下产电, 电压随着 NaCl% 增大而升高, 而后降低。最佳盐度为 3% NaCl, 产电电压 202 mV, 最大功率密度 17.21 mW/m²。

References (参考文献)

[1] Logan BE, Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells, *Nature Reviews Microbiology*, 2009, 7(5), P 375-381.
[2] State Environmental Protection Administration, *State of the*

Environment, 2009 (Ch).

国家环境保护总局, 中国环境状况公报, 2009.

[3] Logan BE, Regan, Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells, *Trends Microbiol*, 2006, 14(12), P 512-8.
[4] Venkateswaran K, Polyphasic taxonomy of the genus *Shewanella* and description of *Shewanella oneidensis* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 1999, 49(2), P 705-724.
[5] Huang Xia, Liang Peng, Progress in Research of Mediator-less Microbial Fuel Cells, *China Water & Wastewater* 2007, 23(004), P 1-6 (Ch).
黄霞, 梁鹏, 无介体微生物燃料电池的研究进展, 中国给水排水, 2007, 23(004), P 1-6.
[6] Feng Yali, Lian jin, Progress in Research for Non-mediator Microbial Fuel Cell, *Nonferrous Metals*, 2005, 57(002), P 47-50 (Ch).
冯雅丽, 连静, 无介体微生物燃料电池研究进展, 有色金属, 2005, 57(002), P 47-50.
[7] Xu Meiyang, Sun Guoping, The Decolorizing Characterization of *Shewanella decolorationis* S12^T, *Microbiology china*, 2005, 32(1), P 5-9 (Ch).
许玫英, 孙国萍, 脱色希瓦氏菌 (*Shewanella decolorationis*) S12^T 的脱色特性, 微生物学通报, 2005, 32(1), P 5-9.
[8] Wei D, Zhang X, Current Production by a Deep-Sea Strain *Shewanella* sp. DS1, *Current Microbiology*, 2007, 55(6), P 497-500.
[9] Chaudhuri SK, Lovley, Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells, *Nature Biotechnology*, 2003, 21(10), P 1229-1232.
[10] Manohar AK, The use of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in the evaluation of the electrochemical properties of a microbial fuel cell, *Bioelectrochemistry*, 2008, 72(2), P 149-154.
[11] Kim HJ, A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*, *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, 30(2), P 145-152.
[12] Park D, J Zeikus, Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, 59(1), P 58-61.
[13] Huang J, B Sun, X Zhang, Electricity generation at high ionic strength in microbial fuel cell by a newly isolated *Shewanella marisflavi* EP1, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, P 1-9.

Low-Carbon Economy and Development on Biomass Energy in China

Bokai FANG¹, Qingcheng WANG²

¹Shanghai Institute of Technology— Thermal Energy and Power Engineering, ShangHai, The People's Republic of China, 200011

²Shanghai Institute of Technology— Thermal Energy and Power Engineering, ShangHai, The People's Republic of China

Email:sombersun5@yahoo.cn, wangqc@sit.edu.cn

Abstract: In today under the pressure of global warming, with low power consumption, low emission, low pollution-based "low-carbon economy", has become the main important issues. At present, China is still developing in the stage of high energy consumption; low-carbon economy is the best choice to promote economic development and protect the environment. However, it is the best way of low-carbon economy development to exploit and apply renewable energy. Biomass is a clean low-carbon energy sources, it plays an important role in the process of energy conservation and emission reduction and low-carbon economy transition. The status and development on biomass energy is issued by low-carbon economy in the paper.

Keywords: low-carbon economy; energy conservation and emission reduction; biomass

我国的低碳经济与生物质能的发展

方博恺¹, 王清成²

¹上海应用技术学院 热能与动力工程专业, 上海市, 中华人民共和国, 200011

²上海应用技术学院 热能与动力工程专业, 上海市, 中华人民共和国

Email:sombersun5@yahoo.cn, wangqc@sit.edu.cn

摘要:在如今全球气候变暖的压力下, 以低能耗、低排放、低污染为基础的“低碳经济”, 已成为全球所关注的主要问题。目前我国还处于高能耗阶段, 倡导低碳经济是发展经济与保护环境的最佳选择。然而开发与推广应用可再生能源是我国发展低碳经济的最优途径。生物质能是一种清洁的低碳能源, 合理利用生物质能, 在我国大力推动节能减排以及向低碳经济转型的过程中起到了重要的作用。现以实现低碳经济为切入点, 对生物质能的概况及发展现状作进一步的介绍。

关键词: 低碳经济; 节能减排; 生物质能

1 引言

随着全球石油、煤炭等传统能源逐步走向枯竭, 以及过度消耗化石燃料所导致的全球变暖问题, 引起了全世界的广泛关注。全球变暖不仅对社会经济造成损失, 还给全球生态环境带来了严重的破坏, 甚至威胁到人类的生存。因此在经济发展的同时, 降低经济增长所带来的二氧化碳排放量已成为主要目标, 就在这样一个大力控制碳排放量的背景下, “低碳经济”这一新的概念便孕育而生。^[1]

低碳经济是一种以低能耗、低排放、低污染为特点, 用于应对气候变化、保障能源安全以及促进经济社会可持续发展为目的的新发展模式。其实质就是提高能源利用效率和创建清洁能源结构, 在维持经济增

长的同时控制温室气体的排放量。

我国煤富油贫气少的资源状况, 决定了以煤为主要能耗的能源格局在短时期内还无法改变, 因此我国必须考虑到新能源产业的发展政策。为了建立低碳经济从中长期发展来看, 大力开发无污染的清洁能源无疑是我国实现低碳经济的关键。^[2]

生物质能是一种太阳能以化学能形式蕴藏在生物质中的能量形式, 它直接或间接地来自于植物的光合作用而形成的有机物质, 作为一种既可储存又可运输的无污染的清洁能源, 若能充分利用生物质能, 对减少化石能源消耗、减缓全球气候变暖和降低碳排放量有着重要的意义。

2. 我国的低碳经济

目前我国仍处于“高能耗经济”阶段, 是典型的

方博恺, 22岁, 男, 学生; 王清成, 38岁, 男, 副教授, 博士, 研究方向: 工业节能、生物质利用和大气污染控

高碳经济。但是随着“低碳经济”问世以来，便引起了我国政府和学术界的高度关注。这样一种清洁、高效的经济发展模式将全球经济发展模式从化石燃料为特征的工业文明转向生态经济文明，同时也为我国的发展方式与创新理念提供了转变的机遇。

我国在发展低碳经济时其实拥有很多的有利条件。首先，我国拥有丰富的可再生能源资源。清洁能源在我国有着良好的发展前景，特别是水电、风能、太阳能、氢能和生物质能源方面。其次，政府的大力倡导，为我国发展低碳经济提供了有力的政策保障。

但是我国在发展低碳经济的过程中还是要面临很多挑战，其最根本的因素就是我国经济高速发展所产生的减排压力，其次是以煤炭为主的能源结构也阻碍着我国碳排放量的减少，最后就是国内各界在如何发展低碳经济时还存在着认识上的模糊。^[3]我国低碳经济的发展之路还很漫长，不但需要保持节能减排与经济增长之间的发展关系，同时还要改善目前的能耗模式并维护好社会的稳定。

3 我国的生物质能

3.1 生物质的资源量

世界上生物质资源不仅数量庞大，而且种类繁多，形态多样。其包括所有的陆生、水生植物，人类和动物的排泄物以及工业有机废物等。据估计，地球上蕴藏的生物质达 18000 亿吨，而植物每年经太阳的光合作用生成的生物质总量约为 1440 亿~1800 亿吨，其中，海洋年生产 500 亿吨生物质。生物质能源的年生产量超过全世界总能源需求量，大约相当于现在世界能源消费总和的 10 倍。据估计，到 21 世纪中叶，采用新技术生产的各种生物质代替燃料将占全球总能耗的 40% 以上。我国生物质资源较为(农、牧、林业废弃物和下脚料)丰富，可开发为能源的生物质资源到 2010 年也可达 3 亿吨，随着农林业的发展，特别是碳薪林的推广，生物质资源将越来越多。^[4]

3.2 生物质能的资源潜力

我国生物质资源主要有农作物秸秆、能源作物、畜禽粪便和农产品加工业副产品等。农作物秸秆年产量近 8 亿吨，薪柴年产量(包括木材砍伐的废弃物)为 2 亿吨左右，畜禽粪便 20 多亿吨，如加以充分利用，再加上在不适于种粮棉油的边际性土地种植薯类(特别是木薯)、甜高粱等能源作物，专家估计年替代相当于近 1 亿吨原油的潜能。

目前，中国生物质资源可转换为能源的潜力约为 5 亿吨标准煤，随着今后造林面积的扩大和经济社会的发展，生物质资源转换为能源的潜力还可以翻一倍。^[5]由此可见生物质能在我国未来的节能和低碳经济中占有重要的地位。

3.3 生物质能的发展现状

近年来随着国家对生物质资源的开发和利用的重视，现已出台了一系列配套政策和规章制度，以及推出了 20 多项沼气、秸秆综合利用、燃料乙醇等国家和行业标准，在生物质能利用领域取得了一些高水平的技术成果。

然而从总体上看，虽然生物质能的发展潜力很大，但是我国生物质开发利用还处在初级阶段，技术水平与发达国家相比仍有一定的差距。在我国特殊的经济环境下，还存在一些制约因素，阻碍着生物质能的发展、推广和应用。同时在现行能源价格的限制下，生物质能源产品也缺乏一定的市场竞争能力。

不过随着《可再生能源中长期发展规划》的颁布，生物质能也被定为可再生能源中的重点发展对象，国家也采取了一系列的相关政策与措施，这样就有望突破目前生物质能产业发展中所遇到的阻碍，给生物质能带来新一轮的发展。而且，国家还将加大财政投入和优惠政策，例如：采取强制性市场份额、资金支持和税收优惠、积极支持技术进步与产业发展等，这些方案都不断地促进着生物质能等可再生能源的开发与利用。^[6]

4 生物质能的低碳概念

生物质是一种典型的低碳燃料。从能源利用对大气环境造成的影响来看，就能明显的发现，生物质能所具有的两大基本特点：一是燃烧时获得单位能量时产生少量的温室气体；二是在生物质能的全生命过程中，从植物的种植到最终被焚烧来讲，生物质能的温室气体“投入量”与“生产量”都是相对平衡的，即是所谓的“碳中性”能源。

4.1 生物质的碳循环

从能源结构来分析，目前含碳元素的化石能源是能源消耗的主体。这种碳元素是在地底下经历了长期的化学与物理作用而固定下来的。在燃烧此类矿物燃料时，会使已固定的碳流动化，并以二氧化碳的形式释放到大气环境中，这就是所谓的温室效应。

然而可再生能源中的碳元素，即生物质能中碳元素的形成就不需要那么长的周期，生物质是植物通过光合作用形成的。生物质在生长过程需要吸收 CO_2 ，在转换利用时又将 CO_2 重新释放到大气环境中，而燃料中的部分碳元素又会通过植物的光合作用被固定下来，从而构成了 CO_2 的不断循环，假如光合作用所消耗的 CO_2 量和燃烧反应时所产生的 CO_2 量能相互平衡，即碳元素在循环过程中不增加也不减少，只是碳元素的存在形式发生了变化，那么理论上就可以实现一个 CO_2 零排放的碳循环。^[7]

4.2 生物质的低碳性

生物质能燃料，特别是乙醇和沼气，其热效率高，而且在使用中空气污染物和悬浮颗粒的排放量很低。如燃料生物乙醇的 CO_2 排放量只有汽油的 1/8，而生物柴油只有柴油的 1/2。以火力发电为例，再与几种主要燃料的 CO_2 排放系数(每获得 $4.18 \times 10^6 \text{ kJ}$ 的能量所排放的 CO_2 量)相比，煤炭为 360.8g，柴油为 294.9g，天然气为 210.4g，薪柴为 446.6g。若使用生物质能的话，对节能减排和推行低碳经济有着积极的作用。^[8]

5. 应用生物质能实现低碳经济

首先应从我国的基本国情来考虑，结合生物质能自身的特点来制定生物质能产业发展的规划及目标。占我国人口 2/3、地域面积为 80% 的广大农村既是生物质能资源的生产源头也是生物质能的发展渠道，农林业作为我国生物质能产业的基础，应与生物质能的产业发展统筹规划，并以农村和城市周边的能源消费市场作为发展目标。

上述内容在我国生物质能发展的初期都是符合我国国情的。远期则应从小规模、分散型的能源需求结构向大规模，结合型发展，通过有效地经营模式，将生物质能等再生能源来代替化石能源，向低碳经济发展，实现能源结构的转型。

其次应加强人才能力的建设、加大科研投入，搞好试验示范。生物质产业是跨学科、跨部门、跨行业的产业，许多技术的发展还处于初期阶段。所以必须要加强人才和技术能力的发展，高度重视我国可再生能源的人才培养和产业体系的建设。

生物质能利用技术种类很多，技术的成熟程度也不一样，所以于对新技术应加大研发力度，加快生物质能利用技术的进度与产业化发展。而对于比较成熟的技术，要选择有发展意义与潜力的技术进行试点和

示范，实现技术产业化和完善产业体系。

最后应通过宣传，提高人们对生物质能的认识。生物质能的开发利用涉及到能源、农业、林业等多个领域及技术，是一项复杂的系统工程。不少国家都从保护生态环境出发，大力发展生物质能，并将其视为国家的发展战略，特别是进入后石油时代以来，更是重视生物质能的利用。所以，我国也必须提高认识，理清思路，将发展生物质能视为保护生态环境的重要举措，同时也要从国家经济和社会发展的战略意义来考虑，综合利用生物质能调整能源结构、保障能源安全。

生物质作为一项新型产业，对大多数人而言显得较为陌生，所以应通过媒体向社会各界宣传发展生物质能的意义，结合先进典型的成功经验，形成全社会的关注，营造出良好的社会氛围，对保护社会环境、实现可持续发展、走向低碳经济有着重要的意义。^[7-8]

6. 结语

低碳经济的发展之路任重道远，在坚持实现可持续发展的同时，也要肩负起发展经济和保护环境的双重重任。若石油煤炭代表着过去的高碳经济，那么生物质能源则代表着低碳经济下新能源的未来。在实现“跨越式发展”的过程中，生物质能至少让我们看到一种可能性，包括开发使用生物质能等可再生能源在内的各种措施都为节能减排做出了一份贡献。所以要想从高碳经济转为低碳经济，我们必须加快发展生物质能脚步。

致 谢

在此感谢本项目(项目名称: 链条锅炉燃烧优化节能环保技术研究; 编号: KJ2010-02)所提供的帮助与支持。

References (参考文献)

- [1]. Zheng Yonghong, Liang Xing, China's development strategy and the proposed low-carbon economy, *environment and economy*, 2009,71, P23-26.
郑永红, 梁星, 我国发展低碳经济的对策和建议, *环境经济*, 2009, 71, P23-26.
- [2]. Chu Juhua, what a low carbon economy, *the knowledge corridor*, 2009,12, P16.
初菊花, 何谓低碳经济, *知识长廊*, 2009, 12, P16.
- [3]. Yuan Nanyou, the connotation of a low carbon economy, *Urban Environment and Urban Ecology*, 2010,23 (1), P43-46.
袁男优, 低碳经济的概念内涵, *城市环境与城市生态*, 2010, 23(1), P43-46.
- [4]. Zhang Jianan, Liu Dehua, Biomass energy utilization technology, Chemical Industry Press, 2009, P1.

- 张建安, 刘德华, 生物质能源利用技术, 化学工业出版社, 2009, P1.
- [5]. China's biomass resources into energy potential of up to 10 million tons of coal, *China Securities Journal*, 2007.
中国生物质资源转换为能源的潜力可达 10 亿吨标准煤, 中国证券报, 2007.
- [6]. Shi Yudong, Birth of a new era of low-carbon energy industry, enormous opportunities, *Financial Economics*, 2009,12. P15-16
时豫东, 低碳时代催生新能源产业巨大商机, 金融经济, 2009, 12.P15-16
- [7]. Lin Lin., From low-carbon economy perspective of the biomass energy industry, *Open Review*, 2009,5 (146), P20-25.
林琳, 从低碳经济角度审视中国生物质能产业的发展, 开放导报, 2009, 5 (146), P20-25.
- [8]. Chen Xu, Biomass energy and energy saving and low-carbon economy, *Ecological agriculture in China*, 2009,17 (2), P375-378.
程序, 生物质能与节能减排及低碳经济, 中国生态农业学报, 2009, 17 (2), P375-378.
- [9]. Fang Tiantian, Forestry great opportunity to promote a low carbon economy, *China Green Times*, 2009,2, P1-2
房田甜, 倡导低碳经济 林业机会巨大, 中国绿色时报, 2009, 2, P1-2
- [10]. You Se, low-carbon economy will drive a large upgrade China's industrial structure, *Resource Economics*, 2009, P32.
优瑟, 低碳经济将推动我国产业结构大提升, 资源导刊, 2009, P32.
- [11]. Dong Hao, A brief analysis on development of low-carbon economy in China, *Experts point of view*, 2009, P36-40
董浩, 浅析低碳经济在中国的发展, 专家视点, 2009, P36-40
- [12]. Zeng Zhaopan, Development and application of renewable energy development to promote low-carbon economy, *Xiamen Science and Technology*, 2009,5, P15-16.
曾昭磐, 开发与推广应用可再生能源发展低碳经济, 厦门科技, 2009, 5, P15-16.
- [13]. Yang Haixia , Low-carbon technologies is not the more expensive the better, *Investment in China*, 2010,2, P65.
杨海霞, 低碳技术并非越昂贵越好, 中国投资, 2010, 2, P65.
- [14]. Hu Qishan, Low-carbon agriculture long way to go, *Hunan Agriculture*, 2010,2, P4.
胡启山, 低碳农业任重道远, 湖南农业, 2010, 2, P4.
- [15]. Feng Zhijun, The implementation of low-carbon economy To promote green development, *Science Sinica*, 2009,1 (28), P1-3.
冯之浚, 推行低碳经济 促进绿色发展, 科学学研院, 2009, 1 (28), P1-3.

Application Potentiality of Heat Pipe Technology in Hydroelectric Power Engineering

Hanzhong Tao¹, Shijie Sun²

¹School of Energy, Nanjing University of Technology, Nanjing, P. R. China 210009

²College of water resource & hydropower, Sichuan University, Chengdu, P. R. China. 624401

Email: Taohanzhong@gmail.com, ssjxlq@163.com

Abstract: Two aspects are introduced for the application potentiality of heat pipe technology in hydroelectric power engineering: cooling of hydroturbine-generating and foundation reinforcing of the hydroelectric power engineering in cold areas. The conclusions are drawn as following: for the cooling of hydroturbine-generating, there are much application occasion for the heat pipe technology whatever patterns, such as air-cooling with secondary circuit, embedded in the stator windings and rotor compounded with rotation heat pipes; the two phase closed thermosyphon with the characteristics of unidirectional heat transfer will play a great part in foundation reinforcing of the hydroelectric power engineering in cold areas. Based on the introduction in detail the basic working principles and feature of the various relative heat pipes, the feasibility and advantage are put forward in corresponding aspects in order to open up the application of heat pipe technology in hydroelectric power engineering.

Keywords: heat pipe; hydroelectric power; cooling; foundation reinforcing

热管技术在水力发电工程中应用的潜力

陶汉中¹, 孙诗杰²

¹南京工业大学 能源学院, 江苏 南京, 中国 210009

²四川大学 水电学院, 四川 成都, 中国 624401

Email: Taohanzhong@gmail.com, ssjxlq@163.com

摘要: 本文介绍了热管技术在水力发电工程中可能得到应用的两个领域: 水轮发电机组的冷却和寒区水电工程的基础加固。通过分析得到以下结论: 对于水轮机组的冷却, 无论是采用空冷二次回路形式、直接定子嵌入形式还是转子的直接冷却, 热管技术均有一定的发挥空间; 两相闭式热虹吸管以其独特的热二极性也将在寒区水电工程基础加固中发挥作用。本文在介绍相关形式工作原理和特点的基础上, 阐述其在相应领域应用的可能性及优势, 为热管技术在水力发电领域应用的开拓提供思路。

关键词: 热管; 水力发电; 冷却; 基础加固

1. 引言

热管是一种利用密闭空间内两次简单相变进行热量传递的高效传热元件^[1]。自 1964 年热管被发明以来^[2, 3], 已广泛应用于航空航天^[4]、过程工业^[5]、微电子^[6]及新能源开发^[7]等众多领域。在水力发电中的应用前景十分广阔。

本文分别介绍热管技术在水轮发电机组的冷却和寒区水电工程的基础加固中应用的可行性。其中水轮发电机组的冷却分为三个方向: 采用分离式热管技术移出空冷机组的内部热量; 采用振荡热管直接嵌入发电机组的定子, 将其中的热量直接从线圈中拔出; 采用旋转热管技术, 将转轴的热量传导到外部空间。各个部分的阐述, 首先介绍相关热管形式的工作原理

和特点, 而后阐述该形式热管在相应领域应用的可能性及优势。

2. 分离式热管及其在空冷机组冷却中的应用

2.1. 分离式热管的结构

分离式热管的结构如图 1 所示^[8], 其蒸发段和冷凝段是分开的, 通过蒸汽上升管和液体下降管连通起来, 形成一个自然循环的回路。工作时, 在热管内加入一定的工作介质, 工作介质汇集在蒸发段, 蒸发段受热后, 工作介质蒸发, 产生的蒸汽通过蒸汽上升管到达冷凝段, 释放潜热。凝结后的工作介质在重力的作用下, 经液体下降管回到蒸发段。如此循环, 不

断将热量从一端带到另一端。分离式热管的冷凝段必须高于蒸发段，液相工作介质才能顺利地回流。

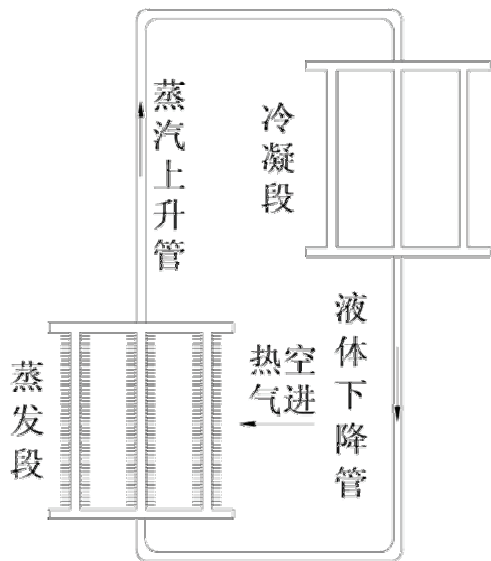


Figure 1 Work principle of separate heat pipe
图 1 分离式热管工作原理

分离式热管组成的换热器，除具有热管的一般特点以外，最大的优势在于该形式热管的蒸发段和冷凝段处于分离状态，可以实现较远距离的传热。这一特点在过程工业中已有所应用，并取得了良好的效果，如煤气预热空气^[9, 10]和硫酸工业^[11, 12]，冷热侧之间最长间距达到了 100m 以上。

2.2 分离式热管在空冷机组冷却中应用的可行性

空冷（属于气冷的一种，气体冷却介质包括空气和氢气等，这里仅讨论空气冷却形式）是发电机应用最早也是最广泛的一种冷却方式，已经有近百年的历史，目前大型发电设备，特别是水轮发电机常采用这种冷却方式^[13]。空气循环冷却一般是通过循环空气将发电机组中的热量带出，这部分热空气再由换热装置将温度降低，循环回用。这种换热装置目前比较常见的形式是翅片管换热器，冷却循环水直接在翅片管内流动，与外部热空气进行换热^[14]。

分离式热管换热器的蒸发段管束代替目前的翅片管换热器，利用蒸发段内部工作介质的相变将热量带出，转移至热管的冷凝段。分离式热管的冷凝段外部与冷却水直接接触，散出热量^[15]。与原来的循环冷却水与翅片管换热器的组合相比，分离式热管换热器具有如下优点：

- a) 由管内换热转变为管外换热，有效地减少甚至避免了堵塞的发生。
- b) 由主动循环转变为被动循环，较少了循环动力，提高了系统可靠性。

3. 振荡热管及其在定子冷却中的应用

3.1. 振荡热管的结构

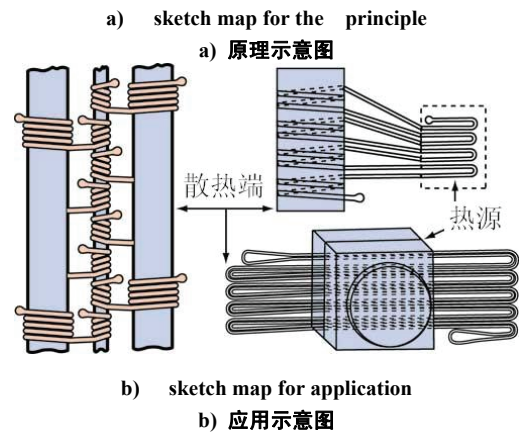
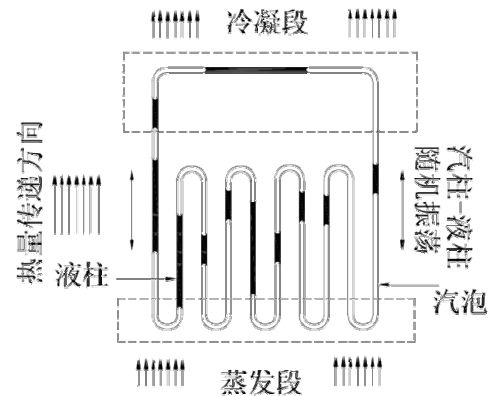


Figure 2 Work principle of oscillation heat pipe
图 2 振荡热管的结构

振荡热管（也称脉动热管）是由一根内径为毛细作用力范围内大小的细长管组成。内部处于气液两相状态，部分充入工作介质，该形式热管充液量高于其他形式热管。振荡热管的设计思路可以参考专利^[16-18]。振荡热管基本结构如图 2 所示。其中图 a 为原理示意图，b 为振荡热管的应用实例。一般情况下，振荡热管内部工作介质在表面张力作用下，形成一段汽柱一段液柱的结构，当毛细管的一端受热，形成蒸发段，引起该区域液相向汽相转变，汽泡内的压力升高，气泡被拉长，在气压的作用下，液柱和汽柱向低温区运

动，到达冷凝段。在冷凝段，蒸汽压力降低，汽相凝结，在随机运动的惯性力作用下，回到蒸发段。在热的流动和汽柱液相的运动相互作用下，热量不断以显热和潜热的形式向冷凝段输送。一般认为回路形式热管要比开式振荡热管的传热性能更加优异。

与其它形式热管相比，振荡热管具有以下特点：无论蒸发段和冷凝段，都可以实现数次折返且受到重力影响比较小，可以在结构形式上更加方便灵活。

3.2. 振荡热管在定子冷却中应用的可行性

发电机组中，定子的冷却目前有两种方式：一种是水冷，一种是蒸发冷却。所谓的水冷却是指在空心的定子线棒内充满液体冷却介质水，通过冷却水的循环，将发电机定子绕组的热量带走。水冷方式与空冷方式相比有明显的优势，如降低绕组温升、有效减小绕组线棒温差、发电机定子绕组温度分布均匀，从而可延长绝缘寿命。但由于水垢、水力钻孔等因素产生漏水造成的短路和漏电危险，使得水冷机组的运行可靠性较空冷低。科学院电工所从1958年开始研究电机的蒸发冷却技术，目前在研制的各个方面均处于世界领先水平，解决了大型发电机空冷线棒热变形问题。

振荡热管电机定子的绕组，内部工作介质在电机生热的驱动下，自发的产生随机热振荡，无须外界驱动力，将热量传递到电机外部。由于振荡热管在制作过程中，有抽真空操作，所以内部处于简单的汽液两相^[19]。内部工作介质发生汽化相变的温度可由外界冷却条件调节，而无需过多考虑工作介质本身在标准大气压下的相变温度，因而给工作介质的选择提供了更大的空间。另外，由于振荡热管内部含有少量的工作介质，且不与外界相连通，水质可以得到保证。与水冷和蒸发冷却形式相比，振荡热管有如下特点：

- a) 工作介质选择的范围更宽；
- b) 被动循环，封闭系统，可靠性更高

4. 旋转热管及其在转子冷却中的应用

4.1. 旋转热管的结构

旋转热管大体分为两种：一种为旋转轴与自身对称轴重合，另一种为不重合的形式。本文涉及的为第一种结构形式。工作原理如图3所示。与传统热管一样也分为三个区域，即蒸发段、绝热段和冷凝段^[20]，热管的蒸发段和冷凝段均在旋转轴上。一般情况下，旋转热管为两相闭式热虹吸管形式。液相工作介质依靠离心力回到蒸发段，因此旋转热管内部腔体往往需

要有一定的斜度以利于液体回流。与传统热管的区别在于，热管内壁面在绕对称轴旋转过程中会产生沿壁面指向蒸发段的一个离心力的分量，在这个力的作用下，液体回到蒸发段。

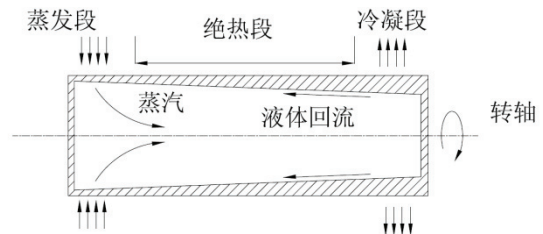


Figure 3 Work principle of rotation heat pipe
图3 旋转热管结构

目前对于旋转热管的研究已经比较充分^[21]，对不同工作角度^[22, 23]和不同的转速^[24]下的性能均有比较充分的了解。从应用角度，在很多旋转机械领域，特别在电机的转轴和高速加工的钻头方面，均有成功的应用^[25]。

4.2. 旋转热管在转子冷却中应用的可行性

对于发电机组转子的冷却，目前的报道不多^[26]，而成功的案例则更少。随着电机容量的增大，转子冷却技术也必然受到越来越多的重视。轴和轴承的冷却一般采用空冷，导轴承和推力轴承构成的复合轴承采用自然通风的空气冷却。随着电机功率的增加，必然采用强制风冷。

旋转热管可以有效地将转轴的热量带出，并且在高速旋转过程中，将热量通过空气或水散出。旋转热管在工作过程中，同样具有热管的基本特性-等温性。也就是说，旋转热管轴在运行过程中，始终保持轴向良好的等温性，并将温度控制在与冷却环境较为接近的范围内。因此，旋转热管应用于水轮发电机组主轴冷却有如下优点：

- a) 使主轴在近于等温的状态下工作，减小或消除了温差应力；
- b) 降低主轴温度，减轻冷却系统负担，为进一步增容提供可能。

5. 两相闭式热虹吸管及其在寒区水电工程基础加固中的应用

5.1. 两相闭式热虹吸管的结构

两相闭式热虹吸管(Two-Phase Closed Thermosy-

phon) 又称重力热管, 简称热虹吸管, 其结构及工作原理如图 4 所示。与普通热管一样, 利用工质的蒸发和冷凝来传递热量, 且工质不需要外加动力而自行循环。但与普通热管所不同的是该形式热管管内没有吸液芯, 冷凝液从冷凝段返回到蒸发段不是靠吸液芯所产生的毛细力, 而是靠冷凝液自身的重力, 因此热虹吸管的工作具有一定的方向性, 蒸发段必须置于冷凝段的下方, 这样才能使冷凝液靠自身重力得以返回到蒸发段^[27]。

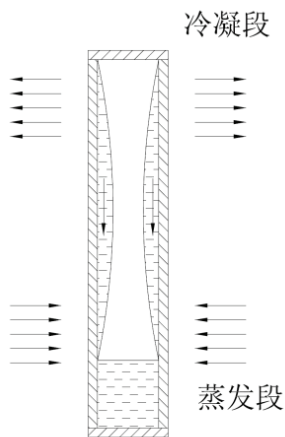


Figure 4 Work principle of two phase closed thermosyphon

图 4 两相闭式热虹吸管结构

两相闭式热虹吸管是热管中结构最简单的一种形式, 其生产制造已经比较成熟, 在市场上得到了大量的应用。与其它形式热管相比, 特点是具有单向导热性, 即热量只能从下方向上方传递, 而不能向相反方向传递。

5.2 两相闭式热虹吸管在寒区水电工程基础加固中应用的可行性

目前热管已知最大的商业合同是 McDonnell Douglas 公司与 Alyeska 管线服务公司签订了超过 10 万支用于阿拉斯加输油管线基础加固的合同, 合同额超过 1300 万美元, 该合同已完成。目前青藏铁路路基加固项目尚未完成, 预计热管用量应不少于阿拉斯加工程^[28]。

热管在寒区基础加固的原理是将热管的一部分插入地下作为蒸发段, 上部露在环境中, 作为冷凝段。冬天, 环境温度低于冻土层温度, 地下的热量加热热虹吸管, 使其内部的工作介质汽化, 在蒸汽压的作用下管内蒸汽向上部一冷凝段流动; 在冷凝段, 由于温

度比较低, 蒸汽遇冷凝结, 凝结液在重力的作用下回到蒸发段。如此循环往复, 不断工作, 将地下的热量带走, 使土层冻结更加坚固。夏天, 环境温度比较高, 由于热管内部没有吸液芯, 工作介质不能从下面流到冷凝段, 所以此时的热量只能依靠管壁的热传导, 微量传入地下。正是由于热虹吸管的这个特点, 采用热管技术, 使地下的永冻层变厚, 并加固了冻土的强度^[29]。

6 结论

本文简要介绍了热管技术在水力发电工程中应用的两个主要领域: 水轮发电机组的冷却和寒区水电工程的基础加固的技术可行性, 得到以下结论

A. 对于水轮机组的空气循环冷却, 分离式热管应用于二次循环回路中, 可以使原来的管内换热转变为管外换热, 有效地减少甚至避免了堵塞的发生; 由主动循环转变为被动循环, 减少了循环动力, 提高了系统可靠性。

B. 对于水轮机组定子的直接嵌入冷却形式, 采用振荡热管技术, 具有更宽范的工作介质选择空间; 且被动循环, 封闭系统, 可靠性更高。

C. 对于水轮机组转子的冷却, 直接采用旋转热管可以使主轴在近于等温的状态下工作, 减小或消除了温差应力; 降低主轴温度, 减轻冷却系统负担, 为进一步增容提供可能。

D. 对于寒区工程基础加固, 两相闭式热虹吸管以其独特的热二极性, 已经发挥出巨大的功效, 在寒区水电工程基础加固中同样将发挥更大作用。

致 谢

南京工业大学青年教师创新基金; 江苏省高校自然科学基金基础研究项目, 编号“08KJB560001”; 南京工业大学 教育教学改革 研究课题 2009-2010。

References (参考文献)

- [1] Hanzhong, TAO. Investigation on Heat Transfer Performance of Miniature Axial Grooved Heat Pipe [D]. Nanjing University of Technology Doctor Dissertation. 2007
陶汉中. 小型轴向槽道热管传热性能的研究[D]. 南京工业大学 博士学位论文. 2007
- [2] Grover G M, Cotter T P, Erickson G F. Structure of Very High Thermal Conductance [J]. J Appl. Phys, 1964, 35(6): 1990-1991.
- [3] Grover G M. Evaporation-Condensation Heat Transfer Device[P]. U.S.A: 3229759, 1966.1.18.
- [4] Peterson G P. An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications (Thermal Management of Microelectronic and Electronic System Series) [M]. Wiley-Interscience, 1994.
- [5] Hong Zhang, Jun Zhuang Research, development and industrial application of heat pipe technology in China[J]. Applied Ther-

- mal Engineering 23 (2003) 1067–1083
- [6] Yu-Wei Chang, Chiao-Hung Cheng, Jung-Chang Wang, Sih-Li Chen. Heat pipe for cooling of electronic equipment[J]. Energy Conversion and Management 49 (2008) 3398–3404
- [7] A Walker F. Mahjouri R. Stiteler Evacuated-Tube Heat-Pipe. Solar Collectors Applied to the Recirculation Loop in a Federal Building[R]. National Renewable Energy Laboratory NREL/CP-710-36149 June 2004
- [8] Zhuang Jun, Zhang Hong. Heat pipe technology and its engineering applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.6
庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [9] Li Jianian. Design and operation of separate heat pipe for the blast furnace No.3 in Meishan[J]. Ironmaking. 1998, No.1: 29-30
李嘉年 梅山 3 号高炉分离式热管换热器的设计及运行[J]. 钢铁 1998 年第 1 期 29-30
- [10] Zhao Anfu. The selecting of methods for combustion air of hot blast stove and preheat of gas[J]. Ironmaking. 1987, No.4: 28-33
赵福安. 热风炉助燃空气和煤气预热方法的选用[J]. 钢铁 1987 年第 4 期, 28-33
- [11] Ma Fei, He Fangjie. Heat Pipe Technology in Waste Heat Utilization in Sulfuric Acid industry [J]. Chemical technology and economics. 1997, No.4: 35-38
马飞, 何方杰. 热管技术在硫酸工业余热利用中的应用[J]. 化工技术经济. 1997 年第 4 期 35-38
- [12] He Fangjie, Ma Fei. Heat Pipe Technology in Waste Heat Utilization in Sulfuric Acid industry [J]. Sulfuric Acid industry. 1999. No 1: 40-42
何方杰, 马飞. 热管技术在硫酸工业废热回收中的应用[J]. 硫酸工业. 1999 年 01 期 40-42.
- [13] Ni Tianjun. Major cooling methods and features of large generator [J]. Dongfang electric review. 2006.3, 20(1): 31-37
倪天军. 大型发电机主要冷却方式及特点. 东方电气评论, 2006 年 3 月第 20 卷第 1 期 31-37
- [14] LIU Gong-zhi, FU Yuan-chu. Fully Air Cooled Huge Hydro-generator[J]. Large Electromechanical technology. 2007, No. 5: 1-8
刘公直, 付元初. 全空冷巨型水轮发电机[J]. 大电机技术, 2007 年 05 期 1-8
- [15] Sun Jing, Sun Shijie. Automatic cycle cooling device for hydro-turbine-generating [P]. Chinese Patent No. 200610021198.7, 2006.6.19
孙景, 孙诗杰. 水电站机组自动循环冷却装置专利[P]. 中国专利申请号: 200610021198.7, 2006.6.19
- [16] Akachi H. structure of a heat pipe. US Patent No. 4921041, 1990
- [17] Akachi H. structure of micro-heat pipe. US Patent No. 5219020, 1993
- [18] Akachi H. L-type heat sink. US Patent No. 5490558, 1996
- [19] SU Lei, ZHANG Hong. Theoretical model and analysis of loop pulsating heat pipe. JOURNAL OF NANJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (Natural Science Edition) 2009.9. 31(5): 68-73
苏磊, 张红. 回路脉动热管稳定运行理论模型的建立与分析. 南京工业大学学报(自然科学版) 2009 年 9 月第 31 卷第 5 期 68-73
- [20] Amir Faghri Heat pipe science and technology Taylor & Francis in Washington, DC 1995
- [21] Todd A. Jankowski. Numerical and Experimental Investigations of a Rotating Heat Pipe. The University of New Mexico Doctor DISSERTATION May, 2007
- [22] E. Song, D. Ewing, C.Y. Ching. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 4721–4731
- [23] N. Waowaewa, P. Terdtoon, S. Maezawa, P. Kamonpet, W. Klongpanich. Correlation to predict heat transfer characteristics of a radially rotating heat pipe at vertical position Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1019–1032
- [24] E. Song, D. Ewing, C.Y. Ching Fluid flow and heat transfer model for high-speed rotating heat pipes International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4393–4401
- [25] David Reay, Peter Kew. Heat pipes (5th ed). London: Elsevier Press. 2006
- [26] Li Yuzhen. Cooling of the axial of hydro-generator by rotation heat pipe[J]. Foreign large Electromechanical. 1990, No. 1: 11-17
李玉珍. 利用旋转热管冷却水轮发电机轴承[J]. 国外大电机. 1990 年第 1 期 11-17
- [27] Tao Hanzhong, Zhang Hong, Zhuang Jun. Heat-transfer analysis for condensing film flow inside an inclined thermosyphon[J]. Acta Energetica Solaris Sinica. 2008, 29(7): 804-812
陶汉中, 张红, 庄骏. 倾斜状态下热虹吸管凝段流动传热研究[J]. 太阳能学报 2008 年 7 期
- [28] Hong Zhang, Hanzhong Tao, Hongxin Guo, “Research on Application of Heat Pipe Technology in Subgrade Works in the Permafrost of Qinghai-Tibet Railway”, Proceeding of 6th International Permafrost Conference, 2004
- [29] Tao Hanzhong, Zhang Hong, Zhuang Jun, Zhang Luxin. Analysis and calculation of reinforced structural foundation in frozen areas with thermosyphon. CHINESE JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING
陶汉中; 张红; 庄骏; 张鲁新. 低温热虹吸管群加固寒区建筑地基的分析计算. 岩土工程学报 2005 年 08 期

Study on Design Methods and Safety Level of Steel Penstocks Codes for Hydropower Stations

Bin Xu, Jianguo Hou

School of Civil Engineering, Wuhan University, WHU, Wuhan, 430072, China

Email: 534170574@qq.com, xuxuhappy@126.com

Abstract: This paper selected several representative penstocks codes of hydropower stations and pressure Vessel Standards in China and foreign countries; analyzed and compared their different design methods and corresponding safety levels. What are described can be taken as reference by the code revision of steel penstocks for hydropower stations in China.

Keywords: hydropower station ;steel penstocks; code; design method; safety levels

国内外水电站压力钢管设计规范的设计方法及安全度水平的比较研究

徐 彬, 侯建国

武汉大学土木建筑工程学院, 武汉, 中国, 430072

邮箱: 534170574@qq.com, xuxuhappy@126.com

摘 要: 为了借鉴国外水电站压力钢管设计规范的先进经验, 为我国水电站压力钢管设计规范修订时选择合适的安全度水平, 本文对国内外水电站压力钢管设计规范的设计方法和安全度水平进行了分析与比较, 有关分析结论可供我国水电站压力钢管设计规范修订时参考。

关键词: 水电站; 压力钢管; 规范; 设计方法; 安全度水平

1 引言

我国现行电力行业标准 DL/T 5141-2001《水电站压力钢管设计规范》^[1]自 2002 年 5 月颁布实施以来, 它对保证我国水电站压力钢管设计质量、推动技术发展, 发挥了重要的指导作用。但在使用过程中, 也提出不少的问题, 如个别管型的分项系数取值、钢材设计标准值的取值等均存在一定的不合理性; 国内外同类规范陆续在近几年有了新版本或修订版, 各版本修订的内容较多, 值得借鉴的内容不少; 新的钢材国家标准中的钢材物理力学性能指标均有较大的变化和修改; 国内外科研单位和高校近年来在该研究领域也取得了一系列新的研究成果。因此, 为了适应我国水电建设事业发展的需要, 同时也为了国内外同类规范相协调, 有必要结合近 7 年工程实践的认识和科研成果, 对水电站压力钢管设计规范安全度设置水平进行系统的研究, 为水电站压力钢管设计规范在此方面的修订提供依据。

为了给水电站压力钢管规范修订稿规定恰当的安

全度设置水平, 根据目前已收集到的有关资料, 本文选择了国内外几本有代表性的相关规范^[1-13], 将 DL/T 5141-2001《水电站压力钢管设计规范》的相当安全系数与国内外其他相关规范的相当安全系数进行了较为全面的分析和比较。在综合分析国内外水电站压力钢管设计规范的安全度设置水平和分项系数取值方案的基础上, 提出了规范修订稿安全度设置水平的修订建议, 供规范修订组选用和参考。

2 水电站压力钢管设计方法概述

2.1 容许应力设计法

在容许应力设计法中, 按照所采用的失效准则的不同, 又可分为两种: 一种是按规则进行设计, 通常称为“常规设计”(Design by rule); 另一种是按分析进行设计, 通常称为“分析设计”(Design by analysis)。

传统的容许应力设计法, 一般均属于常规设计, 它是基于弹性失效准则, 对结构中的应力采用不分应力性质的统一强度条件予以控制, 一般采用第一强度

理论,也有采用第四强度理论的。按分析进行设计的容许应力设计法,亦称应力分类法,其主要原理是按导致结构破坏的危险性程度对弹性名义应力进行分类,并按“等安全裕度”准则对各类应力分别给出不同的容许应力。

2.2 分项系数极限状态设计法

分项系数极限状态设计法是基于可靠度理论的近似概率设计方法。经过国内外许多学者数十年来的研究和讨论,目前国际上比较统一的认识是,用结构的失效概率(或与之相对应的可靠指标)来度量结构的可靠性,能够比较确切地反映问题的本质,这种结构设计方法,就称为“概率设计法”,当前国际上已公认它比过去的各种定值设计法有很大改进^[14]。概率极限状态设计法中的各种分项系数是为满足目标可靠指标的要求而采用的计算系数。

3 安全系数的计算方法

由于各国水电站压力钢管规范采用的设计方法不尽相同,故安全系数的计算方法也不相同。现针对各国的设计方法,将安全系数的计算方法分为三类。为叙述方便起见,本文将相应于基本容许应力且取焊缝系数 $\varphi=1.0$ 的安全系数称为综合安全系数;将各种管型在不同设计状况及荷载组合情况和不同应力类型下的安全系数称为相当安全系数。

3.1 常规容许应力设计法的综合安全系数

水电站压力钢管按常规方法进行设计时,其设计表达式一般为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq \varphi[\sigma] \\ [\sigma] &= \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 f_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为计算应力; $[\sigma]$ 为允许应力; γ_1 为管型基本容许应力系数; γ_2 为管段部位调整系数; γ_3 为材料强度调整系数; f_k 为材料强度计算值; φ 为焊缝系数。

由式(1)可得常规容许应力设计法的综合安全系数的计算公式为:

$$K = \frac{1}{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \varphi} \quad (2)$$

3.2 分析容许应力设计法的综合安全系数

水电站压力钢管按分析容许设计方法时,根据应

力的性质和导致结构失效的危险性程度的不同,一般将应力分为一次总体膜应力 P_m 、一次局部膜应力 P_L 、一次弯曲应力 P_b 和二次应力 Q ,并且规定:

$$\left. \begin{aligned} P_m &\leq K_1 S \\ P_L, P_b (P_L + P_b) &\leq K_2 S \\ P_L + P_b + Q &\leq K_3 S \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: S 为基本容许应力, K_1 、 K_2 和 K_3 即为综合安全系数,与基本安全系数和容许应力提高系数等有关系。

3.3 分项系数设计方法的相当安全系数

对于承载能力极限状态,水电站压力钢管分项系数设计表达式为:

$$\sigma \leq \sigma_R \quad (4)$$

$$\sigma = S(\gamma_G \cdot G_k, \gamma_Q \cdot Q_k, a_k) \quad (5)$$

$$\sigma_R = \frac{1}{\gamma_R} f_s \quad (6)$$

式中: σ_R 为抗力值; γ_0 为结构重要性系数, γ_G 、 γ_Q 为永久作用与可变作用分项系数; G_k 、 Q_k 为永久作用与可变作用标准值; ψ 为设计状况系数; γ_R 为抗力分项系数。

根据设计表达式(4)~式(6),当仅考虑永久作用+可变作用的简单组合情况时,经简单的推演可得出相当安全系数的计算公式如下:

$$K = \frac{\gamma_R (\gamma_G + \gamma_Q \rho_h)}{1 + \rho_h} \quad (7)$$

式中: ρ_h 为永久作用与可变作用的比值。

4 国内外水电站压力钢管设计规范的安全系数计算结果

为了便于比较,现采用本文第2节所列举的安全系数的计算方法,将各国压力钢管设计规范的综合安全系数及相当安全系数分别列于表1中,同时还列出了各国压力容器设计规范和钢管道规范的基本安全系数,以资借鉴和比较。其中, K_y 为相应于屈服强度的安全系数, K_u 为相应于抗拉强度的安全系数。

5 国内外水电站压力钢管的设计方法及安全度水平比较

4.1 设计方法的比较

关于水电站压力钢管设计规范的设计方法,根据已搜集到的各规范,结合表1,可得出如下结论:

Table 1. Safety factors of codes at home and broad
表 1. 各国压力钢管和压力容器规范抗内压设计基本安全系数的比较

国别	规范类别	规范名称或代号	σ_y / σ_u	K_y	K_u	备注	
中国	A	DL/T 5141-2001 ^[1]	0.67	1.83	2.73	明管	
			0.75	1.47	2.00	埋管	
			0.75	1.86	2.20~1.86	背管	
		0.70	1.82	2.56	明管		
		0.70	1.49	2.13	埋管		
	B	SL 281-2003 ^[2]	0.70	2.00	—	背管	
			0.53	1.60	3.00		
		GB 150-1998 ^[15]	*JB 4732-1995 ^[16]	0.58	1.50	2.60	
			GB/T 20801-2006 ^[17]	0.50	1.50	3.00	
日本	A	*闸门钢管技术标准 ^[3]	0.77	1.80	2.35	一般钢材	
	B	*JIS B 8267-2008 ^[18]	0.43	1.5	3.5		
前苏联	A	M y 34-747-76 ^[8]	0.70	1.87~2.11	2.47~2.84	I级明管	
		П-780-83 ^[9]	0.77	1.43	1.61~1.43	I级背管	
美国	A	USBR 标准(1970) ^[5]	0.50	1.50	3.00	明管	
		*ASCE 指南(1993) ^[4]	0.67	1.00	1.50	埋管	
		*ASME VIII-2-2007 ^[6]	0.50	1.50	3.00	明管、埋管	
	C	*ASME B31.3 ^[19]	0.63	1.50	2.40		
			0.50	1.50	3.00		
欧盟	B	EN 13445-2002 ^[7]	0.63	1.43	2.29		
法国	B	CODAP-1987 ^[10]	0.63	1.50(1.91)	2.40(3.00)	括号内数据用于只作一般检验的钢材	
英国	B	*BS 5500-1997 ^[20]	0.64	1.50	2.35		
德国	B	AD-Merkblätter-1995 ^[11]	—	1.50	—		

注：1. 规范类别 A 为压力钢管设计规范，B 为压力容器设计规范；C 为压力管道设计规范；
2. 表中带*者为采用按分析进行设计的容许应力设计法的规范；
3. 表列安全系数系按焊缝系数 $\varphi=1.0$ 导出。

(1) 各国水电站压力钢管设计规范的设计方法，除前苏联规范采用的是分项系数极限状态设计法，以及我国的 DL/T 5141-2001 采用的是以概率理论为基础的极限状态设计法以外，其余规范则均是采用的容许应力设计法。在采用容许应力设计法的规范中，除日本规范和美国 ASCE 指南是采用的按分析进行设计的容许应力设计法以外，其余规范则都是采用的传统的按规则进行设计的容许应力设计法。

(2) DL/T 5141-2001 和前苏联的压力钢管设计规

范，均规定应根据压力钢管的重要性程度和失事后果确定压力钢管的结构安全级别及相应的结构重要性系数。DL/T 5141-2001 将压力钢管的结构安全级别分为 I、II 两级；前苏联规范将压力钢管的结构安全级别分为 I~III 级或 I~IV 级；日本、美国等国家的压力钢管规范则不分安全级别。从结构可靠性理论及概率的观点来看，针对结构的重要性程度和失事后果来划分和选择结构的安全级别及相应的结构重要性系数，显然更为经济合理一些；但美、日规范应用上更为方便

一些。

(3) DL/T 5141-2001 和前苏联的钢管规范考虑了 3 种设计状况和 2 种荷载组合情况, 通过设计状况系数来反映不同设计状况下对安全度水平的不同要求; 美、日规范则是通过提高容许应力的方法来反映不同设计状况及应力类型对安全度水平的不同要求。

4.2 安全度水平的比较

由表 1 所列结果可以看出:

(1) 相应于屈服强度而言, 我国 DL/T 5141-2001 中明管的基本安全系数与 SL 281-2003、日本及前苏联钢管规范的基本安全系数十分接近, 但与其它国家的钢管规范及压力容器规范相比, 基本安全系数则明显偏高; 埋管的基本安全系数比日本规范埋管的基本安全系数要小, 但比 USBR 标准的基本安全系数大, 与国内外其他压力钢管规范和压力容器规范的基本安全系数则相近; DL/T 5141-2001 中背管的安全系数与前苏联 П-780-83 中的背管的安全系数相比则明显偏高, 但比 SL 281-2003 规范的基本安全数小。

(2) 相应于抗拉强度而言, 我国 DL/T 5141-2001 中明管的基本安全系数与 SD 144-85、前苏联 My 34-747-76 等钢管规范的基本安全系数相近, 与 ASCE 指南等钢管规范及中国 GB 150-1998、美国 ASME 等压力容器规范的基本安全系数相比, 则偏低较多, 但与 SL 281-2003、日本等钢管规范及中国 JB 4732-1995、美国、欧盟、英国、法国等国的压力容器规范比较则偏高; DL/T 5141-2001 中埋管的基本安全系数与 SL 281-2003 等钢管规范的基本安全系数相近, 比美国 USBR 标准中埋管的安全系数大, 但与国外其它钢管规范及压力容器规范相比, 则偏低一些; DL/T 5141-2001 与 SL 281-2003 相比, 背管的安全系数则偏低, 但与前苏联的 My 34-747-76 相比, 背管的安全系数则明显偏高。

综上, 我国钢管规范中明管和背管相应于屈服强度及抗拉强度的安全系数均还有潜力可挖; 埋管相应于抗拉强度的安全系数则偏低。

6 结论

(1) 通过 DL/T 5141-2001 规范与国内外其他压力钢管及相关规范设计方法和安全度设置水平的比较研究, 初步摸清了 DL/T 5141-2001 规范的总体安全度水平, 获得了我国 DL/T 5141-2001 规范与国内外其他

相关规范安全度设置水平差异的定量数据, 可供规范修订时参考。

(2) 从总体上来看, 我国钢管规范 DL/T 5141-2001 的安全度水平与国外多数国家的钢管规范及压力容器规范的安全度水平是相近的, 因而可以认为我国钢管规范 DL/T 5141-2001 的安全度水平是基本合适的, 而明管的抗拉强度、主厂房内明管的安全度水平明显偏高, 背管在安全度方面亦还有潜力可挖。因此, 规范修订时可将明管抗拉强度的安全度水平、主厂房内明管和背管的安全度水平宜作适当降低, 埋管相应于抗拉强度的安全系数适当提高, 其余管型则宜基本维持在 DL/T 5141-2001 的安全度水平上。

References (参考文献)

- [1] DL/T 5141-2001 Design Code for Steel Penstocks of Hydropower Stations[S]. China Power Press, 2001.
DL/T 5141-2001 《水电站压力钢管设计规范》[S]. 北京: 中国电力出版社.
- [2] SL 281-2003 Design Code for Steel Penstocks of Hydropower Stations[S]. China Water Press, 2003.
SL 281-2003 《水电站压力钢管设计规范》[S]. 北京: 中国水利出版社, 2003
- [3] Hydraulic Gate and Penstocks Association, Technical Standards for Gates and Penstocks (5th revision)[s], Tokyo, Japan, 2007 (in Japanese).
- [4] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 79, Steel Penstocks[S]. American Society of Civil Engineers, New York, 1993.
- [5] Arthur Harold G. and Walker John J., New Design Criteria for USBR Penstocks[J]. Journal of the Power Division, ASCE, Vol.96, No. PO1, January, 1970, p129-143
- [6] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, VIII-2. Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels[S], 2007
- [7] EN 13445-2002 《Unfired pressure vessel》[S],2002
- [8] Committee of Science and Technology of Ministry of Energy and Power, My 34 747-76 Hydraulic Structures Design Code for Exposed Penstocks of Hydraulic Structures[M], Moscow Power Press, Moscow, 1977(in Russian)
- [9] Hydraulic Structure Design and Research Institute, 1984, P-780-83 Hydraulic Structures Design Aids for Steel Lined Reinforced Concrete Penstocks[R], Moscow,1984(in Russian)
- [10] CODAP-1987, The Manufacture of Unfired Pressure Vessels[S],1987(in France)
- [11] AD-Merkblatt-1995 The Manufacture of Unfired Pressure Vessels[S],1995(in German)
- [12] Gordon J.L., Design Criteria for Exposed Hydro Penstocks[J]. Canada Journal of Civil Engineering, Vol.5, March, 1978, pp 340-351
- [13] David Nash. Differences between EN13445 and other International Standards. CEN Conference-Pressure Equipment in Europe Brussels [M], 2002.
- [14] ISO/DIS 2394:1996, General principles on reliability for structures[S], 1996
- [15] GB 150-1998 Steel Pressure Vessels[S]. Beijing :China Standard Press, 1998(in Chinese).
GB 150-1998 《钢制压力容器》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998
- [16] JB 4732-95 Steel Pressure Vessel Standard of Design by Analy-

- sis[S]. Beijing :China Standard Press, 1995(in Chinese).
JB 4732-95《钢制压力容器分析设计标准》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [17] GB/T20801-2006 Pressure Piping Code-Industrial Piping[S]. Beijing :China Standard Press,1998(in Chinese).
GB/T20801-2006《压力工业管道规范》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] JIS B8267-2008 Construction of pressure vessel[S]. Tokyo, Japan, 2007 (in Japanese).
- [19] Charles Becht IV. Process Piping: The Complete Guide to ASME B31.3[M]. ASME, 2004.
- [20] BS 5500, 1997, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels[S].British Standard Institute, 1997.

Numerical Simulation on Ventilation and Cooling of Hydro-Generator

Zhang qunfeng¹, Yan Jinli², Wang Min², Chen Zhixiang²

¹ School of Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

² Zhejiang Fuchunjiang Hydropower Equipment Co. Ltd., Hangzhou, China

Email: zhangqunfeng@263.net

Abstract: The flow of dual radial ventilation system without fan for a hydro-generator was simulated with parallel computing CFD code. The MRF(multiple implicit rotating frame) method and porous media model were used, averaged 3D N-S equations and RNG k- ϵ equations were solved. The flow characteristic of different parts was analyzed and the circulating flow flux was obtained. The air flow circulating flow flux was set as inlet boundary condition on the flow channel combined by the rotor frame, magnetic yoke, pole and stator. The conjugate heat transfer was simulated on the flow channel. The result shows that the heat transfer coefficient on the windward side of the pole is larger than the heat transfer coefficient on the leeward side and the temperature on the windward side is lower than the temperature on the leeward side.

Keywords: hydro-generator; ventilation; numerical simulation; conjugate heat transfer

水轮发电机通风冷却的数值模拟研究

张群峰¹ 严锦丽² 王铭² 陈志祥²

¹ 北京交通大学土建学院, 北京, 中国, 100044

² 浙江富春江水电设备股份有限公司, 杭州, 中国, 311504

Email: zhangqunfeng@263.net

摘要: 本文利用并行计算方法, 采用多重参考坐标系方法、多孔介质模型方法并求解三维平均N-S方程和RNG k- ϵ 方程, 对某一大型水轮发电机的双路径向无风扇通风系统进行了流场数值模拟, 分析了通风系统中各通风部件的流动特性, 得到了通风系统的循环风量。以该循环风量为边界条件, 结合能量方程, 对转子支架、磁轭、磁极和定子组成的内流道进行了流固耦合换热计算, 计算表明磁极的迎风侧的换热系数高于背风侧的换热系数, 而迎风侧的温度低于背风侧的温度。

关键词: 水轮发电机; 通风; 数值模拟; 耦合换热

1 引言

进行水轮发电机的通风系统设计时, 应在满足发电机散热需要的前提下, 力争以最小的冷却风量及最低的通风损耗达到最佳的冷却效果。由于通风系统结构的复杂性和计算量大等原因, 目前大多是网络矩阵法为基础进行通风系统的整体计算以及仅对部件的三维流场进行计算^[1-3], 而通风系统的整体三维流场计算进行的很少。本文利用并行计算方法对某一大型水轮发电机的双路径向无风扇通风系统进行了三维数值模拟, 分析了通风系统中各部件的流动特性和通风系统的循环风量。并以此计算为基础, 进行了转子支架、磁轭、磁极和定子组成的内流道的通风散热计算。计算结果为水轮机通风

系统的优化设计提供有效的依据, 同时本文中所采用整体通风计算和内流道流固耦合换热计算相结合, 不仅解决了整体流固耦合换热计算量巨大的问题, 也弥补了局部流道流固耦合换热计算不准确的问题。

2 数值方法

2.1 控制方程

本文所研究的发电机通风系统属于双路径向无风扇通风系统, 冷却空气由转子支架、磁轭、磁极旋转产生的风扇作用进入转子支架入口, 流经磁轭风沟、磁极极间、气隙、定子径向风沟, 冷却气体携带发电机损耗热经定子铁心背部汇集到冷却器与冷却水热交

换热去热量后，重新分上、下两路流经定子线圈端部进入转子支架，构成封闭自循环通风系统。其内部空气流场由连续方程、N-S方程和能量方程控制。方程的封闭采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[4]。该模型的湍流动能方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon \quad (1)$$

湍流耗散率方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + [C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}] \frac{\varepsilon}{k} \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中， k 为湍流动能， ε 为湍流耗散率， μ 为分子

粘性系数， μ_t 为湍流粘性系数， $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ， $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ ， $S = (2s_{ij}s_{ij})^{1/2}$ ， $s_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ 其它经验参数为： $C_\mu = 0.085$ ， $\sigma_k = 0.719$ ， $\sigma_\varepsilon = 0.719$ ， $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ ， $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ ， $\eta_0 = 4.38$ ， $\beta = 0.0012$ 。

用有限体积法在同位网格中对控制方程进行离散化，空间离散格式为2阶迎风格式。用SIMPLE方法求解离散方程，SIMPLE基本思想是引入校正量的概念，通过连续性方程找出压力校正量与速度校正量的关系即压力校正常方程，进而求解^[5]。

2.2 Multiple Reference Frame (MRF) 方法

采用多参考坐标系(Multiple Reference Frame, MRF)法^[6]来模拟转动部分(转子支架、磁轭和磁极)的流动，MRF法作为一种定常的近似求解方法，以简便适用的特点在工程中被广泛应，MRF的基本思想是转动区域的网格在计算时保持静止，在转动坐标系中增加离心力和哥氏力进行定常计算，其计算结果可以看成是转动部分和静止部分在某一时刻的流动状态。

对于水轮发电机来说，由于定子周向密集均匀分布，MRF因忽略时间项而产生带来的误差已经很小，采用MRF的计算精度足够满足工程设计的要求。

2.3 多空介质模型

空气冷却器是水轮发电机的重要组成部分。在进行发电机的整机通风性能计算时，通常不对空气冷却器的内部流场进行计算，而是用多空介质模型来代替真实的空气冷却器。

多空介质模型实质是在动量方程的源项中添加附加的动量损失项，动量损失项包括两部分：粘性损失项和内部损失项，其计算公式为：

$$\frac{\Delta p}{L} = (\alpha|u| + \beta) \cdot u \quad (3)$$

式中 Δp 为压降， L 为多孔介质厚度， u 为来流速度， α 为阻尼系数，表示内部阻力， β 为阻尼系数，表示粘性阻力。通过对空气冷却器的流量-压损试验得到流量-压损对应关系的3-5个数据点，然后利用最小二乘法进行曲线拟合，得到阻尼系数。

3. 网格生成和边界条件

3.1 网格生成

对于整体通风计算，由于有52个磁极，根据几何的周期性，计算区域定为原几何模型的1/4。根据各个部件的工作状态和流动特性以及几何的拓扑结构，大致分成转子支架、磁轭和磁极、定子、定子基座、上下风道等几部分进行网格划分，为了保证各个部分之间网格的均匀过渡，在各部分的交接面上进行网格的局部加密。总体网格数目约为24,100,000。对于内流道的计算，根据磁极和定子的几何周期性，选取1/52，同时考虑到上下近似对称，为了节省网格，计算区域只选取1/52的一半。该区域内流体和固体部分均生成网格，总网格数位18,200,000。

3.2 边界条件

对于整体通风计算，因为计算区域是封闭的，因此只须在周期面上设置周期性边界条件。其它各处默认为壁面。电机转动速度为115.3RPM。计算时采用工质是40°的空气，并且不考虑空气的压缩性。对于内流道流固耦合换热计算，根据整体计算得到的流量折算到内流道上，作为内流道的入口条件，在内流道的出口设置自由出流条件，各发热部件通过能量源项的形式给出发热功率。

4. 结果分析

4.1 通风性能分析

图 1 为柱坐标下等角度截面上的速度矢量图，速度分布体现了电机内的空气流动的路线，转子支架、磁轭和磁极转动时，气流从转子支架上、下通风口吸入，并在离心力作用下产生径向的相对速度。气流从空冷器流出后因受外壁的阻挡，气流分别进入上部通风回路和下部通风回路。为了保持转子支架下方设备的清洁性，转子支架上通风口面积大于下通风口，使得流经下通风回路的流量小于上通风回路的流量，两者流量之比位 1：4。

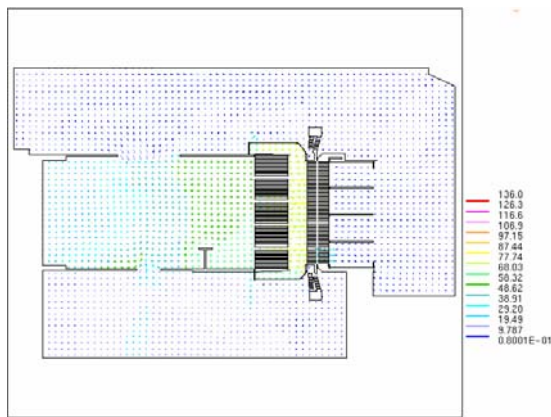


Figure1. Velocity vector of a section
图 1. 速度矢量图

图 2 为空冷器出口附近的速度分布，由于在空冷器下部存在定子支墩，一定程度上阻碍了下通风回路的气流，增加了下通风回路的流动阻力，因此在满足结构强度的前提下，应避免定子支墩安装在空冷器正下方，可安装在气流从空冷器流出后因受外壁的阻挡而形成的回流区内。

图 3 为磁轭、磁极通风槽内的相对速度矢量图(站在转子支架中心观察流动)，在磁轭和磁极通风槽内存在明显的迎风侧和背风侧，迎风侧内相对速度大于背风侧的相对速度。图 4 为磁极和定子入口附近的总压分布图，气流进入定子通风槽后总压迅速降低，定子通风槽是通风回路中主要的压力损失部件，发生在定子通风槽处的主要损失包括：通风槽入口局部损失、通风槽中的摩擦损失和出口局部损失。而通风槽入口局部损失占主导地位。这是由于在转动区域中的气流主要为周向速度，而定子通风槽中为径向速度，磁极和定子间的间隙很小，从而产生很大的局部损失。

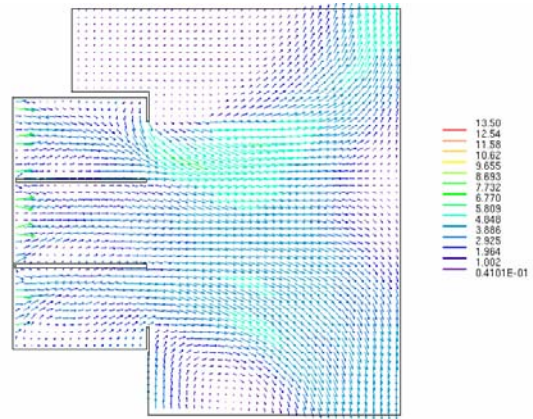


Figure2. Velocity vector around air cooler
图 2. 空冷器出口附近的速度分布

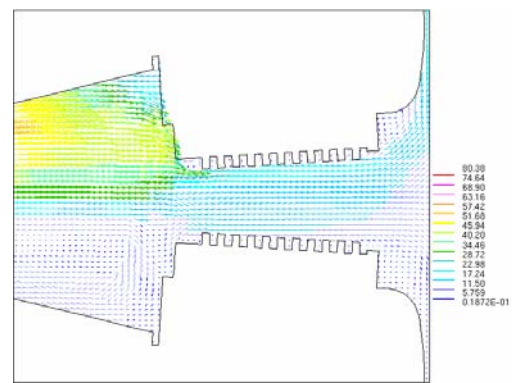


Figure3. Relative velocity vector of around yoke and pole
图 3. 磁轭、磁极通风槽内的相对速度矢量图

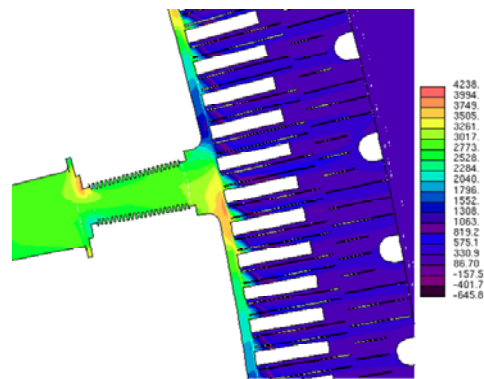


Figure4. Total pressure distribution
图 4. 总压分布图

4.2 内流道固体的温度分布

水轮发电机转子内的热源损耗主要是励磁绕组铜耗，以及分布在转子磁极表面中的附加损耗，根据相应的计算公式，得出转子磁极励磁绕组铜耗以及磁极

表面附加损耗,这些损耗以体积热源的方式加到转子各部分的固体上,并考虑了磁极极身绝缘与线圈之间的绝缘及间隙的影响。图5为截取一段磁极固体表面的换热系数分布,由图可知,迎风侧的换热系数高于背风侧的换热系数,与此相对应,迎风侧的表面温度高于背风侧的表面温度,图6显示最大可达9.5°。

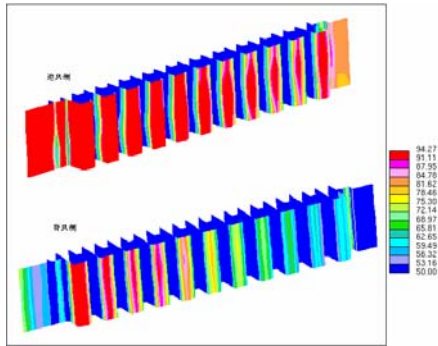


Figure5. heat transfer coefficients on the windward side and leeward side.

图5. 迎风侧和背风侧的换热系数.

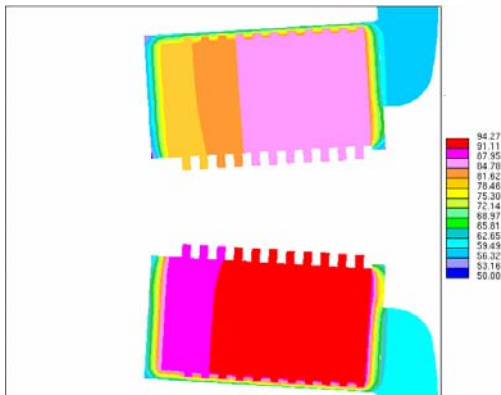


Figure6. Temperature distribution of pole.

图6. 磁极固体侧温度分布.

5. 结论

通过合理布置计算域网格的疏密度和合理选择计算参数,得到合理的计算结果并得出以下结论:

1 为了减少下通风回路的流动阻力,应避免定子支墩安装在空冷器正下方,可安装在气流从空冷器流出后因受外壁的阻挡而形成的回流区内。

3 整个通风流道内的主要风损耗来自于定子通风槽入口处的流动损失。

2 在磁轭和磁极通风槽内存在明显的迎风侧和背风侧,迎风侧内相对速度大于背风侧的相对速度,迎风侧的换热系数高于背风侧的换热系数,与此相对应,迎风侧的表面温度高于背风侧的表面温度。

References (参考文献)

- [1] Qin Guangyu, An Zhihua, "Computation and study of ventilation and temperature rise for a type of bulb tubular hydro generator", Large electric machine and hydraulic turbine, 2008, No.2:7-9.
- [2] Li Junqing, HU Jiwei, "3D fluid field calculation and analysis in stator radial ventilation ducts of turbo generators", Large electric machine and hydraulic turbine, 2010.No.1:19-22.
- [3] Xu Xu, XU Hong LI Tao JI ShaSha, "Ventilation and stator temperature field in a vertical hydro power generator", Journal of engineering thermophysics, 2009 30(10):1717-1719.
- [4] Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD. Third Edition.[M].California:DCW Industries,Inc.2006.
- [5] Wang, Fujun, Computational Fluid Dynamics [M]. Tsinghua University Press, 2004.
- [6] DEGLON DA, MEYER C J. CFD modeling of stirred tanks: numerical considerations[J]. Minerals Eng, 2006, 19(10),P1059-1068.

A novel MPPT method based on simple mathematical PV model and load information for off-grid applications

Zhongyi He^{1,2}

¹*School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, China*

²*Lighting Systems and Applications, Philips Research Asia – Shanghai, China*

Email: johnnie.he@philips.com

Abstract: To simplify the implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) for off-grid solar applications, a novel control method via load parameters is proposed. The study is based on a simple and effective PV mathematical model in which the parameters are taken from photovoltaic (PV) module datasheet. The monotonic relationship between PV output voltage and duty cycle of power switch in solar chargers with the form of Buck and single-ended primary inductance converter (SEPIC) is revealed and made it feasible to implement MPPT control by combining battery charging power and power switch duty cycle variations. The disturbance step of duty cycle in perturb and observe (P&O) MPPT algorithm is determined according to the relationship between battery charging power and duty cycle. The dynamic response of the proposed MPPT method is improved by periodic state reset for MPPT control while only small disturbance step of duty cycle is required. Simulation and experiment results are provided to evaluate the feasibility and validity of the proposed control.

Keywords: Photovoltaic (PV); maximum power point (MPP); maximum power point tracking (MPPT); perturb and observe (P&O)

1 Introduction

Solar energy plays an important role in the utilization of renewable energy sources due to its merits of cleanness, safety, silence, and infinity^[1]. Photovoltaic (PV) generation has found its applications in both on-grid and off-grid systems. In on-grid applications, solar energy is transformed by PV panels into electricity and delivered to utility grid directly without the need of storing the electrical energy into energy storage devices such as batteries as is the case of off-grid applications. Maximum power point tracking (MPPT) is an essential part for on-grid applications because the power level is quite large and the output power of PV arrays is subject to solar irradiation and temperature. MPPT control is also required in more and more off-grid applications such as solar home system and rural electrification with the continuously increasing power scale.

Many MPPT methods varying in complexity, sensors required, convergence speed, cost, range of effectiveness, implementation hardware, popularity, and in other respects have been developed and implemented^[2-5]. The perturb and observe (P&O) MPPT algorithm is mostly used due to its ease of implementation^[6-9].

In conventional P&O schemes, the output voltage and

current signals of PV panel should be sensed to calculate its output power which is used to control the operating point of PV panel to be the maximum power point (MPP). The MPPT controller's output voltage and current are monitored anyway in the majority of off-grid solar applications with battery backup. By decreasing the sensing and processing burden of the MPPT controller, the advantage of simple circuitry and low cost will be obtained.

The MPPT control method based on load parameters in [11-13] have proved the feasibility of the P&O MPPT implementation via load parameters. However, the optimization of transient MPPT behavior has not been covered by these literatures.

A novel MPPT method based on load parameters for off-grid solar applications is proposed. By using a simple and effective mathematical model of PV module determined by datasheet parameters, the MPPT implementation for both Buck and single-ended primary inductance converter (SEPIC) solar chargers in continuous current mode (CCM) are analyzed. Methods to improve dynamic performance of Buck charger are also proposed with the verification of experimental results.

2 Modeling of photovoltaic module

In the conventional model of PV module as is shown in Figure 1^[8], the output characteristic shown in (1) is determined by the expression of equivalent parameters of PV module which are difficult to be measured.

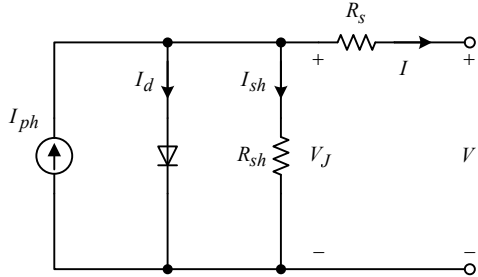


Figure 1. Equivalent circuit of PV module

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

where I and V are output current and voltage of PV module respectively, I_{ph} is photovoltaic current, I_0 is reverse saturation current of PV module at no irradiance, q is unit electric charge, A is diode performance coefficient, k is Boltzmann constant, T is absolute temperature, R_s is equivalent serial resistor, and R_{sh} is shunt resistor.

A simple model of PV module is proposed in [10] in which the parameters are available from the datasheet of PV module. The effects on PV output characteristics by both solar irradiance and temperature are included in this mathematical model by introducing solar radiation and temperature coefficients of PV output current and output voltage, as can be seen from (2) to (4).

$$I = \frac{SI_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000} \times \frac{1 - e^{\frac{1}{b} \times \frac{V}{V_{oc}}}}{1 - e^{\frac{-1}{b}}} \quad (2)$$

$$V_{oc} = \left(1 + \frac{V_{oc_max} - V_{oc_min}}{V_{oc_max}} \times \frac{S - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \right) \times [1 + K_{tc_v} (T - 25)] \times V_{oc_max} \quad (3)$$

$$P = \frac{SVI_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000} \times \frac{1 - e^{\frac{1}{b} \times \frac{V}{V_{oc}}}}{1 - e^{\frac{-1}{b}}} \quad (4)$$

where S is solar radiation, S_{max} and S_{min} are high and low solar radiation listed in the datasheet respectively, I_{sc} is short circuit current under standard test condition (STC),

K_{tc_i} is temperature coefficient of I_{sc} , V_{oc_max} and V_{oc_min} are high and low open circuit voltage listed in the datasheet respectively, K_{tc_v} is temperature coefficient of V_{oc} , P is output power of PV module, and b is model fit parameter.

A simpler method to determine the fit parameter b than that of the author proposed in [10] is to find the solution for (5) which can be realized by MATLAB easily.

$$\frac{V_{MPP}}{bV_{oc_max}} + \ln \left(\frac{V_{MPP}}{bV_{oc_max}} + 1 \right) = \frac{1}{b} \quad (5)$$

where V_{MPP} is the MPP voltage under STC. The fit parameter b is determined by the MPP voltage and open circuit voltage under STC.

3 MPPT implementation employing load parameters

The output current and voltage of PV module should be sensed and calculated to obtain the PV output power to maximize it in conventional MPPT algorithm. In practical off-grid solar applications, the control objective is to maximize the power/energy flow delivered to the load, e.g. energy storage. From this point of view, it is reasonable to choose load power instead of PV power as control parameter based on the fact that the power loss of the charger converter is quite small. There is no need to sense output current and voltage of PV module to implement MPPT control with the benefit of reduced circuitry and cost.

As two typical topologies of charger, Buck and SEPIC converters are to be studied in the following sections based on the PV mathematical model shown in (2) to (5). SEPIC converter has the merits of non-inverting polarity, easy-to-drive switch, and low input current pulsating for high precise MPPT that makes its integral characteristics suitable for the low power PV charger system^[14-16].

By neglecting power loss of the charger stage, the battery charging power can be expressed by

$$P = \frac{S \frac{V_{bat}}{M} I_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000} \times \frac{1 - e^{\frac{1}{b} \times \frac{V_{bat}}{M V_{oc}}}}{1 - e^{\frac{-1}{b}}} \quad (6)$$

where V_{bat} is battery voltage, M is the transform ratio of

the charger converter, and P is the battery charging power calculated by battery voltage and charging current, and these two signals are anyway required and sensed by the charger controller. The relationships between M and duty cycle D of power switch in CCM Buck and CCM SEPIC charger are shown in (7) and (8), respectively.

$$M = D \tag{7}$$

$$M = \frac{D}{1-D} \tag{8}$$

The monotonicity between M and D (and also V and D) in (7) and (8) facilitates the MPPT implementation via battery voltage based on the fact that V_{bat} changes slightly during the control intervals. The rising/falling slope shape discrimination of P/V characteristic curve is obtained indirectly by combining battery charging power and duty cycle variations, as is shown in Figure 2, where the region of $M > 1$ is only applicable for SEPIC charger. If P increases while M (D) decreases in Figure 2, the operating point of PV module locates in the rising slope of P/V curve definitely and P is approaching the MPP. Therefore the M (D) should be also decreased in the next control step.

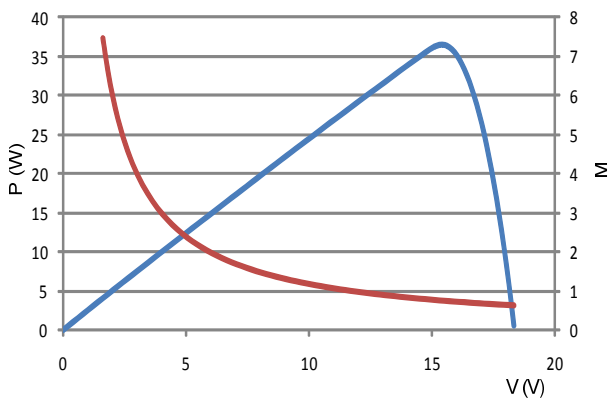


Figure 2. Disturbance judgment by charging power and duty cycle

According to (6) to (8), the plots of P vs. D could be obtained easily with other parameters already known. However, the information of dP vs. dD is more useful to implement MPPT control especially P&O algorithm because it determines the disturbance step of duty cycle D .

For Buck-based solar charger, the relationship between dP and dD is shown in (9).

$$\frac{dP}{dD} = \frac{SI_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000 \left(1 - e^{-\frac{1}{b}}\right)} \times \frac{V_{bat}}{D^2} \times \left[\left(1 + \frac{1}{b} \times \frac{V_{bat}}{DV_{o_c}}\right) e^{\frac{1}{b} \times \frac{V_{bat}}{DV_{o_c}} - \frac{1}{b}} - 1 \right] \tag{9}$$

By substituting V_{bat}/D with V ,

$$\frac{dP}{dD} = \frac{SI_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000 \left(1 - e^{-\frac{1}{b}}\right)} \times \frac{V_{bat}}{D^2} \times \left[\left(1 + \frac{1}{b} \times \frac{V}{V_{o_c}}\right) e^{\frac{1}{b} \times \frac{V}{V_{o_c}} - \frac{1}{b}} - 1 \right] \tag{10}$$

For SEPIC-based solar charger, the relationship between dP and dD is shown in (11).

$$\frac{dP}{dD} = \frac{SI_{sc} [1 + K_{tc_i} (T - 25)]}{1000 \left(1 - e^{-\frac{1}{b}}\right)} \times \frac{V_{bat}}{D^2} \times \left\{ \left[1 + \frac{1}{b} \times \frac{(1-D)V_{bat}}{DV_{o_c}}\right] e^{\frac{1}{b} \times \frac{(1-D)V_{bat}}{DV_{o_c}} - \frac{1}{b}} - 1 \right\} \tag{11}$$

By substituting $V_{bat}(1 - D)/D$ with V , (11) will be the same as (10). It seems that the selecting criterion for duty cycle disturbance step in Buck charger and SEPIC charger is identical. Suppose there are two solar chargers with the same parameters including M except for the topologies, then

$$\left. \frac{dP}{dD} \right|_{Buck} < \left. \frac{dP}{dD} \right|_{SEPIC} \tag{12}$$

because the duty cycle in Buck converter is larger than that of SEPIC converter.

From (12), the solar charger with SEPIC topology has faster response than the Buck charger under identical disturbance step of duty cycle. On the other hand, to design the SEPIC charger and Buck charger with the same dynamic response, the former will demonstrate smaller duty cycle oscillation near the MPP than the latter.

4 Dynamic performance improvement

In the solar charger with CCM, the slope shape dis-

crimination of P/V curve is realized with the method in Figure 2. Further study should be made for the solar charger with discontinuous current mode (DCM) to verify the validity of the proposed MPPT control via battery parameters.

For the Buck converter in DCM, when the power switch is on,

$$I_{Lmax} = \frac{V - V_{bat}}{L} \times DT_s = \frac{D(V - V_{bat})}{Lf_s} \quad (13)$$

where I_{Lmax} is the maximum inductor current, L is the inductance of filter inductor, T_s and f_s are switching period and frequency of Buck converter, respectively.

When the power switch is off,

$$I_{Lmax} = \frac{V_{bat}}{L} \times D'T_s = \frac{D'V_{bat}}{Lf_s} \quad (14)$$

where $D'T_s$ is diode current duration time in DCM.

The average battery charging power P_{chg} is given by

$$P_{chg} = V_{bat} I_{bat} = \frac{D^2 V (V - V_{bat})}{2Lf_s} \quad (15)$$

where I_{bat} is the average battery charging current.

The relationship between battery charging power P and PV output voltage V in (15) can be expressed as a parabola, which is meaningful within the range from V_{bat} to $V_{o.c}$. The intersection of the parabola and P/V curve shown in Figure 3 determines the operating point in DCM. The P/V characteristic curve is derived from Suntech off-grid solar panel STP010-12/Kb with 200 W/m² and 25 °C condition by using the simple model described in Section 2. There is also a monotonic relationship between V and D according to Figure 3 because the PV output voltage corresponding to the intersection decreases with the increasing of duty cycle.

By substituting D in (15) with the value of V_{bat}/V , the critical charging power P_{cri} to ensure continuous inductor current is shown in (16). The operating point in DCM is determined by the intersection of (16) and P/V curve, as is shown in Figure 4.

$$P_{cri} = \frac{V_{bat}^2 (V - V_{bat})}{2Lf_s V} \quad (16)$$

According to the P/V characteristic curve near $V_{o.c}$, the asymptote is close to a straight line with the cross-

over point of $V_{o.c}$. This will make it possible to obtain the solution of the operating point in critical continuous current mode. The asymptote is given in (17).

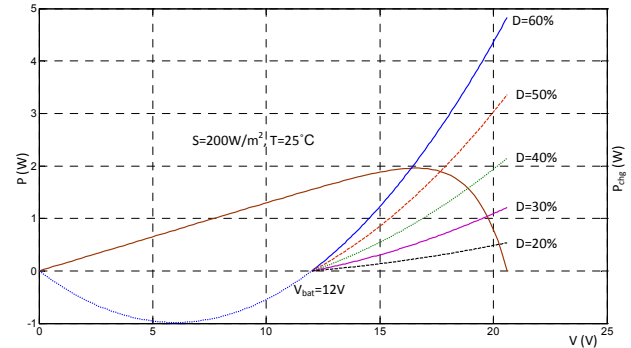


Figure 3. PV module operating point in DCM

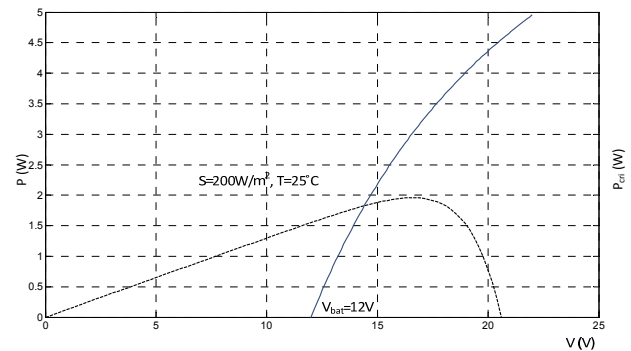


Figure 4. PV module operating point in critical continuous mode

$$P = -\frac{1}{b} \times \frac{SI_{sc} [1 + K_{ct-i} (T - 25)]}{1000 \left(1 - e^{-\frac{1}{b}}\right)} \times (V - V_{o.c}) \quad (17)$$

By combining (16) and (17), the relationship between PV output power and duty cycle in DCM can be determined by Figure 5, where the PV model is almost the same as that of Figure 3 except for five radiation levels of 200 W/m², 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m², and 1000 W/m². P will change at least 0.05 W when D varies only 0.01 under very low solar irradiance conditions.

To avoid PV output power failing to follow irradiance increase promptly and track the true maximum power point, periodic state reset for MPPT control is proposed, as is shown in Figure 6. Conventional P&O

method could get confused and track in wrong direction during rapidly changing irradiance if the duty cycle disturbance steps are not large enough. This happens when the change in solar irradiance between two MPPT sampling instances causes larger power change than that caused by the duty cycle modification of the MPPT^[9]. In this case, the algorithm is unable to decide whether the change in power is caused by its own duty cycle disturbance or by the change in irradiance. By resetting MPPT state periodically, the correct disturbance direction is guaranteed. Each time the MPPT control state is reset, the duty cycle modification ΔD_0 is added to the previous

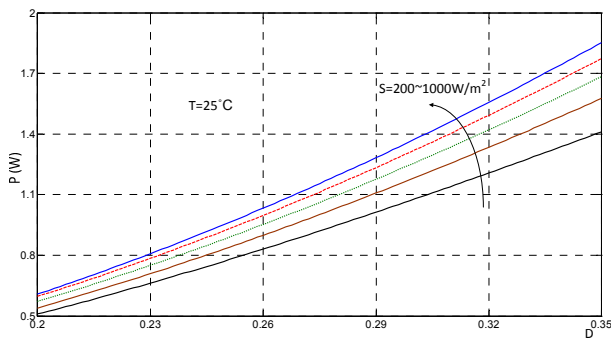


Figure 5. Relationship between PV output power and duty cycle

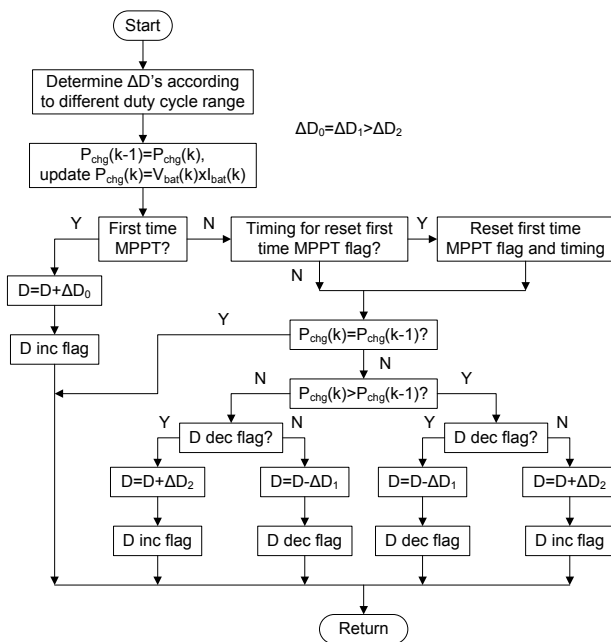


Figure 6. Control flow of proposed P&O method

duty cycle without the judgment of the PV output power difference between current control cycle and previous control cycle. This eliminates the possibly wrong estimation of the successive PV power values. The value of ΔD_0 is set to be equal to ΔD_1 to avoid excessive power fluctuation.

5 Simulation and experiment results and analysis

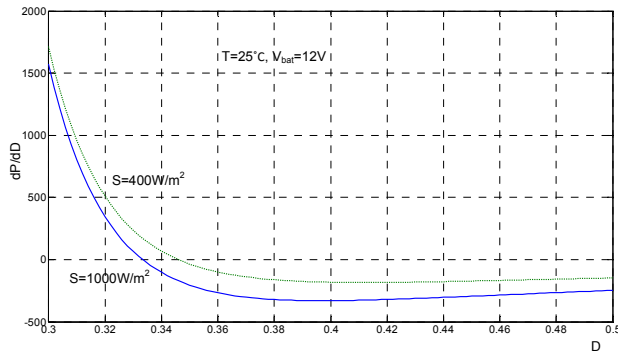
In the simulation models, the STP180S-24/Ad PV panel from Suntech with the optimum operating voltage of 36 V under STC powers a 12 V battery through Buck and SEPIC chargers. The duty cycle values for power switches in Buck and SEPIC chargers are 0.333 and 0.25, respectively.

Figure 7 shows the relationships between dP/dD and D under the solar irradiance of 1000 W/m^2 and 400 W/m^2 for both chargers, in which the PV output voltage ranges from 24 V to 40 V, battery voltage is 12 V, and temperature is $25 \text{ }^\circ\text{C}$. The simulation results obtained by MATLAB coincide with the theoretical analysis in Section 3.

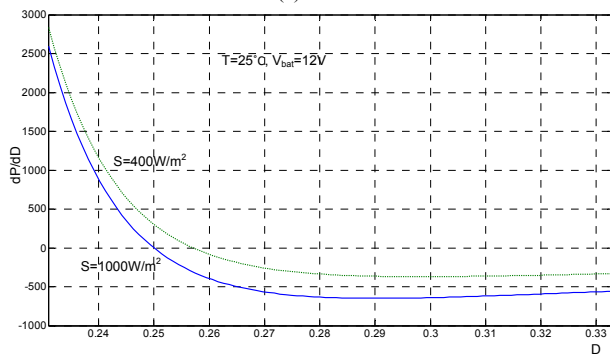
The Buck-based solar charger with 12 V lead acid battery load is tested with real sunlight powering Suntech STP010-12/Kb PV panel. Comparative experiments with varying irradiance are done under the conditions of both enabling and disabling MPPT state reset control. The varying irradiance is realized by adjusting the dip angle of PV panel gradually which is controlled by the height of small lifting table. The experimental results are shown in Figure 8 (a) and (b), respectively. The PV output power step variation in Figure 8 (a) is smoothed by periodic MPPT reset control, and the mean value of PV output voltage in Figure 8 (a) is steadier than that of Figure 8 (b), showing the effect of the MPPT reset control.

The experimental results with artificial sunlight which comes from bathroom heater ($4 \times 275 \text{ W}$ incandescent lamps) are also provided in Figure 9, where V_{DC} is the supply voltage to the bathroom heater and controls the irradiance to the PV panel. The voltage values between 120 V and 200 V correspond to radiation variation processes between low and high level. The PV output power tracks the locus of irradiance well with rapid

speed, verifying the validity of the proposed control.



(a) Buck

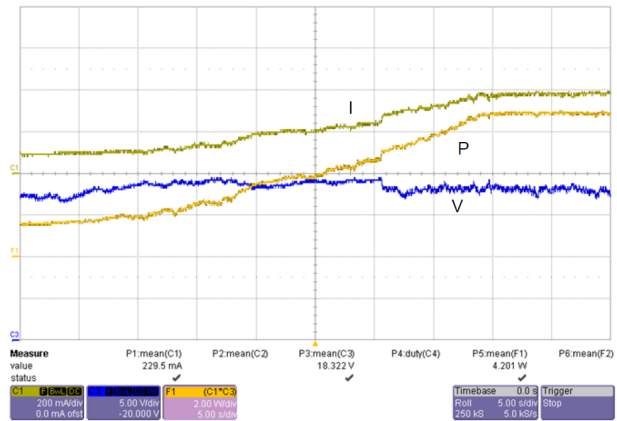


(b) SEPIC

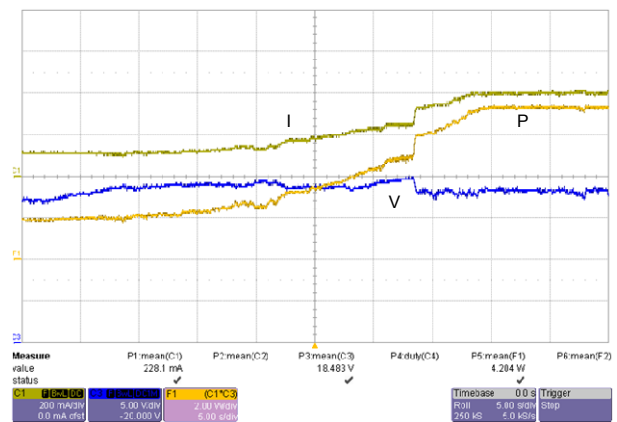
Figure 7. Varying ratio of PV output power to duty cycle in CCM

6 Conclusion

A novel MPPT method for off-grid solar applications is proposed and implemented via load parameters. Based on a simple and effective PV mathematical model in which the parameters are taken from PV module data-sheet, the P&O MPPT control is realized by combining battery charging power and duty cycle variations in both CCM Buck and CCM SEPIC chargers. The differentiation relationships between battery charging power and duty cycle of power switches reveal the superior dynamic performance of the SEPIC-based solar controller than that of Buck-based one. For DCM Buck charger, the relationship between PV output voltage and duty cycle is also monotonic which is similar to the situation of CCM Buck charger. Periodic state reset for MPPT control is proposed to improve dynamic response to rapidly changing irradiance by only using small disturbance step of duty cycle. The feasibility and validity of the proposed control are verified by simulation and experiment results.



(a) With MPPT reset



(b) Without MPPT reset

Figure 8. Dynamic response under varying sunlight irradiance

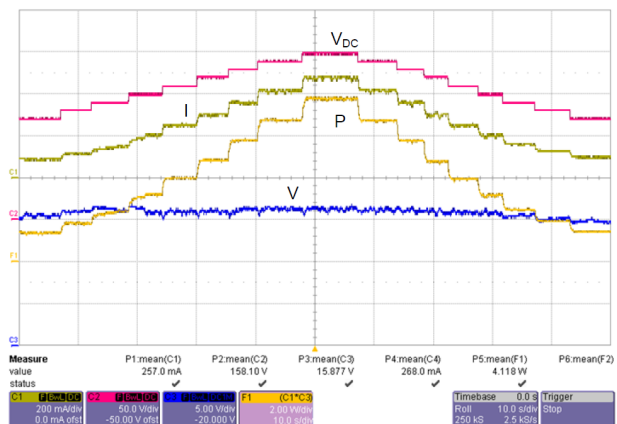


Figure 9. Dynamic response under varying artificial sunlight

7 Acknowledgment

The author would like to thank Dr. Yongqin Zeng of Philips Research Asia Shanghai and Prof. Junmin Pan of Shanghai Jiaotong University for their help in this study.

References

- [1] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Kang Yong, A variable step size INC MPPT method for PV systems[J], *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2008, 55 (7): 2622-2628.
- [2] Trishan Esum, and Patrick L. Chapman, Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J], *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2007, 22 (2): 439-449.
- [3] R. Faranda, S. Leva, and V. Maueri, MPPT techniques for PV systems: energetic and cost comparison[C], in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008: 1-6.
- [4] Roberto Faranda, and Sonia Leva, Energy comparison of MPPT techniques for PV systems[J], *WSEAS Trans. Power Systems*, 2008, 3 (6): 446-455.
- [5] M. Berrera, A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, Experimental test of seven widely-adopted MPPT algorithm[C], in *Proc. IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009: 1-6.
- [6] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J], *IEEE Trans. Power Electronics*, 2005, 20 (4): 963-973.
- [7] Weidong Xiao, William G. Dunford, Patrick R. Palmer, and Antoine Capel, Application of centered differentiation and steepest descent to maximum power point tracking[J], *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2007, 54 (5): 2539-2549.
- [8] Nobuyoshi Mutoh, Masahiro Ohno, and Takayoshi Inoue, A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems[J], *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2006, 53 (4): 1055-1065.
- [9] Dezso Sera, Remus Teodorescu, Jochen Hantschel, and Michael Knoll, Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions[J], *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2008, 55 (7): 2629-2637.
- [10] Ulrich Böke, A simple model of photovoltaic module electric characteristics[C], in *Proc. 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007)*, 2007.
- [11] D. Shmilovitz, On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters[J], *IEE Proc. Electric Power Applications*, 2005, 152 (2): 239-248.
- [12] D. Shmilovitz, Photovoltaic maximum power point tracking employing load parameters[C], in *Proc. IEEE ISIE*, 2005: 1037-1042.
- [13] Cheng Fu, Ming Chen, Yuliang Shen, and Shijie Yu, A control method of maximum power point based on output parameters[J], *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22 (2): 148-152 (Ch).
傅诚, 陈鸣, 沈玉樑, 余世杰, 基于输出参数的光伏电池最大功率点控制[J], *电工技术学报*, 2007, 22 (2): 148-152.
- [14] S.J. Chiang, Hsin-Jang Shieh, and Ming-Chieh Chen, Modeling and control of PV charger system with SEPIC converter[J], *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2009, 56 (11): 4344-4353.
- [15] Mummadi Veerachary, Power tracking for nonlinear PV sources with coupled inductor SEPIC converter[J], *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41 (3): 1019-1028.
- [16] R.B. Darla, Development of maximum power point tracker for PV panels using SEPIC converter[C], in *Proc. IEEE INTELEC*, 2007: 650-655.

Study on Assessment of Life Cycle Exergy Analysis of PV Power System and Solar Thermal Power System

Yongkui Yue¹, Zeliang Yang¹, Zhonghua Tian^{1,2}

¹School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China

²Guangdong Province Energy Conservation & Supervision Centre, Guangzhou, 510031, China

Email: ykyue@hotmail.com

Abstract: Method of LECA(Life Cycle Exergy Assessment) and indices set up in this study have been applied to two different solar power generation system (PV, thermal), results show that payback rate of these two solar energy system were close to 4.8, proved them a potential low carbon emission energy substitute from the view of sustainable energy utilization. Furthermore, sensitivity analysis of life cycle exergy pay back rate of PV power system has been studied to illumination condition and PV efficiency, and constraint condition of PV system in Guangdong Province was obtained under current technical condition.

Keywords: Life Cycle Exergy Analysis, PV and Solar Thermal Power System, Carbon abatement

太阳能发电系统生命周期焓评价研究

岳永魁¹, 杨泽亮¹, 田中华^{1,2}

¹华南理工大学电力学院, 广东广州, 中国, 510641

²广东省节能监察中心, 广东广州, 中国, 510031

摘要: 本文采用生命周期焓分析方法和指标体系对可再生能源系统(太阳能光伏发电(PV)、太阳能热力发电系统)进行研究, 结果表明: 两种系统的生命周期焓偿还率都约为 4.8, 温室气体排放系数分别为 45 g-CO₂/kWh 和 84 g-CO₂/kWh, 从能源利用和可持续发展角度来说, 均为具有良好发展前景的替代能源系统; 针对广东省实际情况, 从能源利用和生命周期能量补偿的角度, 建立了 PV 系统适用性数学模型, 通过生命周期焓偿还率的灵敏度分析, 得出了目前条件下广东省推广 PV 的边界条件。

关键词: 生命周期焓分析; PV; 太阳能热发电系统; 碳减排

1 引言

近年来, 太阳能发电技术和产业发展很快, 已从解决边远地区的用电和特殊用电逐步转向并网和与建筑结合供电的方向发展, 太阳能热发电技术已实现商业化运作, 并且发展迅速。因而对太阳能发电系统从能源利用、碳排放及适用性方面进行全生命周期的焓分析评价, 为其进一步推广和应用是很有必要的^[1,2]。

2 太阳能发电系统(PV)及研究边界设定

2.1 研究方法及范围

国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(G20000263)和广东省科技计划项目(2006B70103019)。

The National Basic Research Program (973 Program) (G20000263) & Guangdong Province Science and Technology Plan Project. (2006B70103019)

有关生命周期焓分析理论、方法和指标体系见于有关文献^[1]。由于太阳能发电为可再生能源, 研究中不考虑太阳能直接焓投入的贡献。生命周期焓评价主要考察太阳能发电系统建设—运行—退役序列的各环节以及与之相关的原材料生产和设备制造安装过程的能源消耗和温室气体排放, 包括: 1、太阳能发电系统所用的主要原材料生产和设备制造过程及建设过程中的能源消耗和温室气体排放; 2、太阳能发电系统运行维护过程的不可再生能源消耗和温室气体排放; 3、系统退役过程的能源消耗和温室气体排放。

2.2 研究对象

以广东为研究背景, 选取与建筑物集成的屋顶并网型光伏发电(PV)系统为研究对象, 采用非晶硅薄膜技术的 Uni-solar PV 模块, 最大的直流电输出功率

为 $8\text{kW}^{[3,4]}$ ，光伏电池发电板转化为直流电的效率为 5.7% （ η 效率为 6.11% ）。光伏电池面板面积为 160m^2 ，分三组。每组太阳能发电板通过一个逆变器，将直流电转换为交流电并与电网相连。

根据研究目的确定研究边界为：系统的电力供应；重点考察 PV 电源系统的能源利用和温室气体排放，凡与电力供应无关或对能源消耗和温室气体的排放可以忽略的分支，将不做考查。

3 太阳能光伏发电系统生命周期 η 分析

PV 发电系统生命周期 η 分析框架模型如图 1。

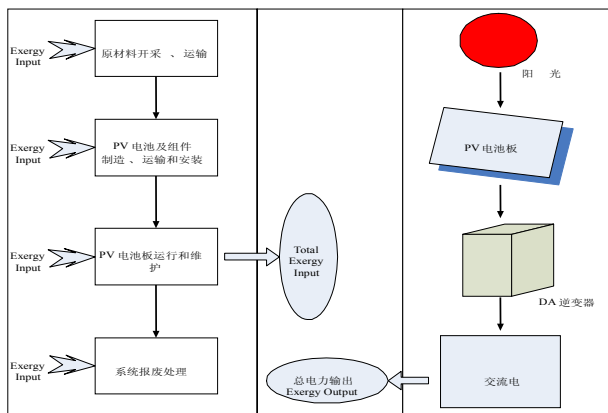


图 1 并网型光伏发电系统生命周期 η 分析框架模型

Fig.1 Framework model of LCEA for a Grid-tied PV System

3.1 系统生命周期总产出 η 分析

表 1 PV 发电系统基本参数
Table 1 Operation parameters of PV system

最大产生直流电功率	8kW
生命周期	30 年
太阳能 η 效率(%)	6.11
系统产生的直流电量(GJ)	1,350
模块老化的损失率	年输出电量的 8%
模块老化的损失量	100
其它系统的损失	55
DC/AC 的损失率	可产生电量的 20%
DC/AC 转化损失(GJ)	200
生命周期内产生交流量(GJ)	995

广东年均光照时间 $1800\text{-}2100$ 小时^[5]，平均光照强度 $4.18\text{-}5.65\text{ GJ/a m}^2$ ，取平均值 4.93 GJ/a m^2 ，PV 电池生命周期为 30 年，由此得出太阳能 PV 系统生命周期内总产出电量为 1350GJ 。还要考虑系统的损失，1、DC/AC 变换和上网线损约占总电量的 20% ；2、模块

老化造成的损失按年均输出电量的 8% 计。可以得到生命周期内系统总输出电（ η ）量约 995GJ 。考虑其它诸多因素的影响，PV 发电系统生命周期内 995GJ 的电量输出已经是最好的预测结果。

3.2 系统生命周期 η 分析清单

该光伏发电系统包括 123 块独立模块，累计约 160m^2 的电池表面积，还包括如控制器、逆变器和大电网连接电缆线等，通过能源链的 η 分析方法可以得到这些设备及原材料的原料获取和处理、原料运输、模块生产制造及运输、装配及最后运输、最终安装等一系列过程^[6-8]的能源投入及碳排放清单，见表 2。

表 2 光伏系统生命周期 η 分析清单
Table 2 Inventory of LCEA for PV System

生命周期阶段	η 投入量 GJ	温室气体排放(t-CO ₂)
建设过程	189.3	11.44
运行维护过程	11	0.776
退役及拆除	4.3	0.297
间接投入总计	204.7	12.508
生命周期产出 η 总计	994	

4 太阳能热力发电系统生命周期 η 分析

4.1 研究对象简介

太阳能热发电是通过聚集太阳辐射能加热工作介质产生蒸汽，驱动汽轮进行发电的技术。主要由集热系统，蓄热系统、控制系统、热能动力发电系统组成。

本文以美国太阳 1 号太阳能热力发电站为基本研究模型。电站的建设参数：电站安装 1818 个定日镜，每个定日镜面积 40 平方米，玻璃镜厚度为 5mm ，占地总面积为 71084 平方米；电站最大功率为 10MW ，年发电时间为 2000 小时，年发电量为 20GWh ，电站建设周期为 4 年，使用寿命 30 年，气轮机功率 10MWh ，总重量 150 吨，电站采用外径 89mm ，壁厚 4.5mm 不锈钢管道总长 $270\text{km}^{[9]}$ 。太阳能热力发电系统的生命周期 η 分析结构框架模型如图 2 所示。

4.2 系统生命周期 η 分析清单

太阳能热力电站发电功率 10MW ，生命周期为 30 年，年运行时数 2000 小时，发电效率 20.6% ，自用电率 5% ，则该太阳能热力发电系统在生命周期内总输出电量为 570GWh ，净输出产品 η $2,052,000\text{GJ}$ 。根据 LCEA 分析模型和相关数据^[1,8,9]，得到分析清单见表 3。

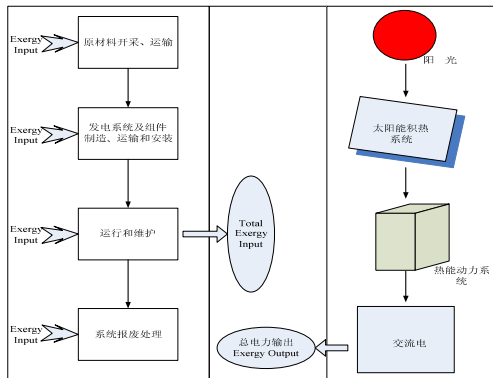


图2 太阳能热力发电系统生命周期分析框架模型
Fig.2 The framework model of LCEA for a solar thermal plant

表3 太阳能热力发电系统生命周期总投入分析清单
Table 3 LCEA Inventory of A Solar thermal plant

生命周期阶段	总能耗 (GJ)	温室气体排放 (t)
建设过程	358260.754	39877.07824
运行过程	53739.11	5981.562
退役过程	17913.04	1993.854
生命周期内总计	429912.904	47852.49389
产品总量	2052000	

5 结果与讨论

5.1 生命周期分析比较

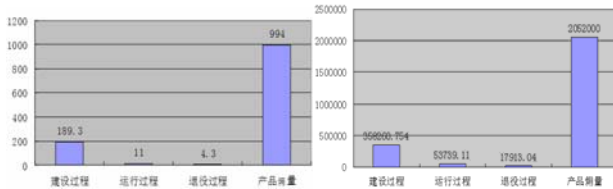


图3 太阳能光伏和热力发电系统生命周期分析
Fig.3 LCEA analysis for the roof-PV and solar thermal system

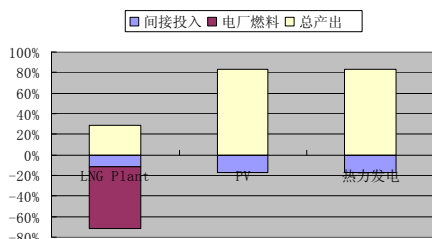


图4 PV和热力发电系统生命周期分析
Fig. 4 LCEA of different energy systems

从图3, 4知, 太阳能发电系统生命周期投入主要集中在太阳能发电系统的建设阶段, 其它阶段的投入都较小。与常规能源系统 LNGCC (天然气联合循环) 相比^[1], 后者则主要集中于燃料的燃烧过程。

5.2 生命周期补偿率比较

由于可再生能源系统的生命周期补偿率等于系统的生命周期效率。从图4,5可见, 光伏发电系统与热力发电系统其生命周期补偿率均为4.8左右, 系统投入与产出率较为接近, 从能源利用角度来讲, 是可持续的能源系统。但与风电的生命周期补偿率23和核电的16相比^[1], 太阳能发电的生命周期补偿率显然要低得多。这也是当前与核电和风电发展较快的趋势是相吻合。而 LNG 联合循环发电系统的生命周期补偿率仅为2.45, 主要原因在于设备制造过程中能源消耗高和 LNG 能源链较长有直接关系。

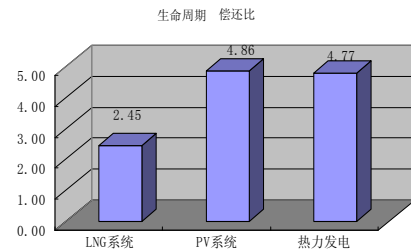


图5 PV和热力发电系统生命周期补偿率对比
Fig.5 Exergy payback ratio of different Energy systems

5.3 生命周期温室气体排放系数对比

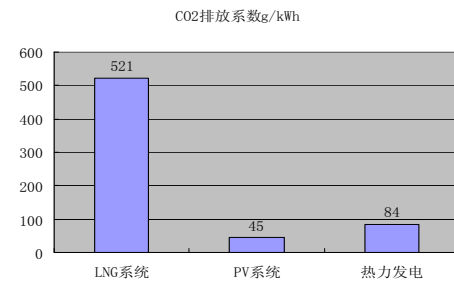


图6 能源系统碳排放系数对比
Fig. 6 Comparison of GHG emission for different energy system

从生命周期碳排放来看, 太阳能热力发电生命周期温室气体排放系数为84 g/kWh, PV系统为45 g/kWh, 与 LNGCC 系统的温室气体排放系数521 g/kWh相比, 要小得多, 差了一个数量级。但与风电的温室气体排放系数11g/kWh, 核电的13.7g/kWh相比, 太阳能系统还是要高一些。这与光电转换效率较低和制造工艺复杂、能耗高有密切关系。随着技术进步和光电转换效率的增加, 光伏发电系统的温室气体

排放系数会大幅降低，将成为非常有前景的能源替代技术。太阳能热力发电系统较 PV 系统的排放系数高的主要原因在于：太阳能热力发电系统大量使用了钢铁、水泥和玻璃等高能耗原材料。

5.4 PV 系统适用性数学模型及应用

针对环境问题以及国际温室气体减排日益严重的压力，世界各国都在制定并实施一系列宏大的可再生能源计划和工程。但由于缺乏客观的可再生能源系统适用性评价体系，从而使可再生能源的优越性无法体现，抑制了可再生能源技术的发展。

根据生命周期**酬**偿还率的定义及内涵，当能源系统生命周期内所产生的**酬**大于总投入**酬**，才可称为可持续的能源系统。据此，对太阳能光伏发电系统为例，探索系统适用的边界条件。根据 PV 模块的特性^[3]，写出**酬**产出方程：

$$Ex_{pr} = Ex_{gen} - Ex_{loss} = (1-\gamma)Ex_{gen} = (1-\gamma)\theta tAF_{sol} \quad (1)$$

Ex_{pr} 代表系统净输出**酬**（电量）； Ex_{gen} 代表系统生产的总电量； Ex_{loss} 代表系统**酬**损失； A_t 代表电池板的面积； F_{sol} 代表光照强度； γ 代表平均年老化率； θ 代表光电转化效率； t 代表光照时间。上式可变形为：

$$Ex_{gen} = \theta tAF_{sol} \quad \text{或} \quad Ex_{loss} = \gamma Ex_{gen} \quad (2)$$

根据定义，可写出生命周期**酬**偿还率表达式：

$$R_{payback} = \frac{\sum Ex_{pr}}{\sum Ex_{indir}} = \frac{(1-\gamma)\theta tAF_{sol}}{\sum Ex_{indir}} \quad (3)$$

式中 Ex_{indir} 为系统的间接**酬**投入。根据上式即可得 PV 电池适用性的数学模型如下：

$$F_{sol} = \frac{\sum Ex_{indir}}{(1-\gamma)\theta A t} \quad \text{或} \quad t = \frac{\sum Ex_{indir}}{(1-\gamma)\theta A F_{sol}} \quad \text{或} \quad F_{sol} t = \sum Ex_{indir} / [(1-\gamma)\theta A] \quad (4)$$

设定 $R_{payback}$ 等于 1 为可再生能源适用的边界条件。将有关条件代入，可计算出广东省的光伏发电系统适用性区域及边界条件。

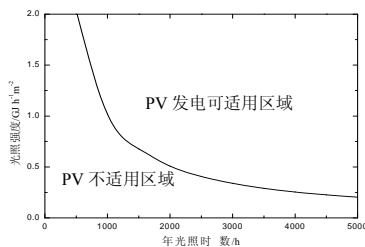


图 7 PV 系统年光照平均时数与光照强度的关系

Fig. 7 The relationship between sunlight time and insolation rate

在现有技术条件下，光伏电池可适用区域的光照强度与光照时间关系如图 7 所示。对于广东省来说大部分地区光照强度都大于图中所给边界，从系统的生命周期**酬**偿还角度来分析，广东省大部分地区利用 PV 系统是完全可行的，而且随着技术进步，光电转换效率将不断提高，减排的效果将更为显著。以上评价方法的原理也可用于风能、潮汐能等可再生能源的分析评价与应用范围的分析。需要说明的是：生命周期**酬**偿还率评价指标，是基于最基本的热力学原理，从能源系统热力学的完善性角度对能源系统进行的分析和研究，是其它研究的基础所在。在实际应用和评价中还要综合考虑其它技术、经济甚至政治等因素的影响。

6 结论

一、两种太阳能（PV、热力）发电系统的生命周期**酬**偿还率都约为 4.8，碳排放系数分别为 45 和 85g/kWh，从能源利用和可持续发展来说，都是有良好发展前景的低碳能源系统，但还大力提高转换效率。

二、所建立的 PV 电池系统的适用范围数学模型，从能源有效利用和科学用能的角度探讨了目前技术条件下广东应用 PV 系统的边界条件。该方法亦可用于风能、潮汐能等可再生能源的分析评价与范围界定。

三、提出的能源系统能源利用和温室气体排放的比较模型，直观地反映了各能源系统的可持续性和温室气体排放量的大小，对以碳减排为目的的能源结构调整可提供参考和依据。

References (参考文献)

- [1] Yue Yongkui. Study on the Strategy of Carbon Abatement and Assessment for Energy System Based on the Life Cycle Exergy Analysis[D]. South China University of Technology, Guangzhou, China, 2005.
岳永魁. 基于生命周期**酬**分析的能源系统评价及碳减排策略研究[D]. 广州, 华南理工大学博士学位论文, 2005 年.
- [2] Meng Hao, Chen Yingjian. Problem and countermeasure of Solar energy utilization in China[J]. Forum on Science and Technology in China, 2009,(5):96-101(in Chinese).
孟浩, 陈颖健. 我国太阳能利用技术现状及其对策[J]. 中国科技论坛, 2009,(5):96-101.
- [3] Parl J. M.. Life cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate policy analysis Ph.D. dissertation of University of Wisconsin-Madison, July 11,2002
- [4] National renewable energy laboratory. Building-Integrated PV. http://www.nrel.gov/pv/building_integrated_pv.html
- [5] Statistics Bureau of Guangdong Province, Guangdong Statistical Year Book 2009[M], China Statistics Press, Beijing, China, 2009. 广东省统计局. 广东省统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2009.
- [6] Unisolar Corporation (2001). <http://ovonic.com/unisolar.html>.
- [7] Frankl, P. Simplified life cycle analysis of PV systems in building: Present situation and future trends, Progress in PV[J], Research and applications, 1998,6:137-146.
- [8] Ma Zhonghai. Study on GHG emission of some main energy

- resources in China [D].China Institute of Atomic Energy, 2002.
马忠海 中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D] 中国原子能科学研究院博士学位论文 2002 年
- [9] Zhou Yeping, Ma Xiaoqian. LCA of Solar Thermal Power System[J], Renewable Energy, 2004,114(2):12-15(in Chinese).
邹冶平 马晓茜 太阳能热力发电的生命周期分析[J] 可再生能源 2004,114(2):12-15

A Research on Nanometer-crystal TiO₂ Film of the NPC Solar Cell

Chen Hong, Huang Ling, Yao Jianlei, An Qinyou

HuBei University Of Technology, HuBei wuhan 430068

Email: chenhong11271@vip.sina.com, huangl717@163.com

Abstract: It was intruded in the paper how nanometer-crystal TiO₂ film be made on ITO glass both by sol-gel method and powder-coating method. Analysis and discussion by the above two kinds of nanometer TiO₂ film which is composed of NPC solar cell. It is analyzed and discussed the properties of the NPC solar cells made of the TiO₂ nanometer-crystal films. All above shown that the properties of TiO₂ solar cell made by sol-gel and powder-coating method is better than that which made by the others. At the same time the NPC solar cell was assembled with these TiO₂ films, which were treated by physical chemistry methods. Photoelectric performances of the cells were tested. It was found that: photons absorption of the films were enhanced by appropriate superficial treatments, which can quicken the electron transimission and restrain the quantum conjunction, photoelectric properties were improved.

Key words: TiO₂ films; sol-gel method; powder-coating method; photoelectric properties

NPC 太阳能电池 TiO₂ 薄膜的研制

陈洪¹, 黄玲², 姚建磊³, 安琴友⁴

湖北工业大学机械工程学院, 湖北省 武汉市 430068

Email: chenhong11271@vip.sina.com, huangl717@163.com

摘要: 本文介绍了采用粉末涂敷法、溶胶凝胶法在导电玻璃上制备纳米TiO₂薄膜。分析并讨论由以上两种方法制得的纳米TiO₂薄膜所组成的NPC电池的性能, 发现由两种方法结合(粉末涂敷法+溶胶凝胶法)制得的TiO₂薄膜组装成太阳能电池的性能优于其他两种方法。同时采用物理化学方法对TiO₂薄膜进行表面修饰, 组装成电池后测试其光电性能。实验结果表明, 适当的表面修饰可以提高TiO₂薄膜的光吸收, 加快薄膜中电子传导并降低电荷复合, 有效改善了光电性能。

关键词: TiO₂薄膜; 溶胶-凝胶法; 涂覆法; 光电性能

1 引言

近年来, 一种新型的基于光电化学过程的染料敏化纳米薄膜太阳能电池(NPC)因其具有较高光电转换效率以及低成本等优异特性而引起材料研究领域的广泛重视^[1]。在太阳能电池中, 要求TiO₂具有纳米结构, 尽量得到大的比表面积, 也要求TiO₂薄膜与导电玻璃能够牢固结合。近年来, 利用溶胶凝胶法制备TiO₂多孔薄膜的工艺得到了广泛的应用^[6-8]。在这种太阳能电池中, 纳米TiO₂多孔薄膜是染料敏化纳米薄膜太阳能电池的主要结构之一, 对电池的光电性能有强烈影响。纳米TiO₂多孔薄膜的性能除了取决于用来制备薄膜的

胶体特性(主要包括颗粒大小、组成、颗粒形状)外, 不同的烧结工艺和表面活性剂的加入而导致薄膜微结构的变化也会对薄膜的性能带来很大的影响, 例如薄膜中的孔径分布、孔隙及薄膜中纳米颗粒之间的紧密程度等^[2]。另外, 纳米结构TiO₂薄膜有巨大的表面积, 可以吸附大量单分子层染料分子, 提高了太阳光的收集效率; 然而, 纳米TiO₂将从染料分子注入的电子传输到电极的过程中, 其巨大的表面积也增加了电极表面的正负电荷复合(湮灭)几率, 从而降低NPC电池的光电转换效率^[3]。因此, 采用适当的物理化学修饰技术来改善纳米TiO₂电极的光电特性是必不可少的。

2 TiO₂ 薄膜的制备方法

2.1 溶胶-凝胶法

将 7mL 的钛酸丁酯溶于 200mL 无水乙醇中，搅拌 30min 后加入 NHO₃ 调节 PH 值为 3.5，加入少量去离子水，继续搅拌 2h，制得 TiO₂ 溶胶，将此溶胶陈化 96 小时得到 TiO₂ 凝胶。

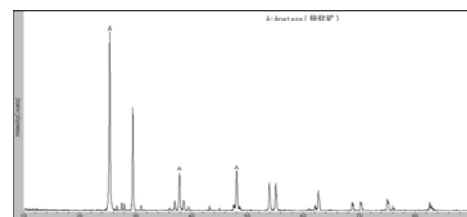
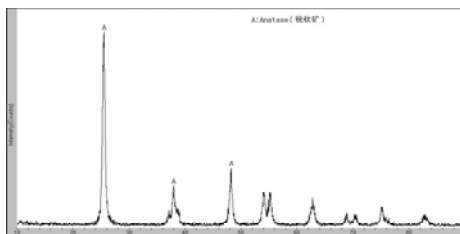
将陈化得到的凝胶 100℃ 烘干，然后在电炉中烧掉有机物并 450℃ 热处理 2h，得到 TiO₂ 粉末。以洗净的自制导电玻璃(由蒸发热分解法制备)为基体，利用浸渍提拉法在玻璃片表面拉膜，提拉速度 5cm / min，湿膜在烘箱中于 80℃ 下烘干，然后置于电炉中在 450℃ 下焙烧 60min。将制得的 TiO₂ 粉末进行 X-ray 衍射(XRD)如图 2.1 所示。

2.2 涂覆法制备纳米 TiO₂ 薄膜

将纳米 TiO₂ 粉体(硬脂酸法粉、溶胶法粉)放入碾钵中加入适量去离子水碾成糊状并均匀涂抹在自制导电玻璃(由溶胶-凝胶法制备)上，将涂好的膜在 100℃ 下干燥 10min，然后放入电炉中 450℃ 热处理 30min，此薄膜简称涂覆法膜。

2.3 溶胶-凝胶法与涂覆法相结合制备纳米 TiO₂ 薄膜

将分析纯非纳米锐钛矿型TiO₂粉末，以15%（溶胶中TiO₂的质量分数）掺入量掺入涂覆法制得的TiO₂溶胶中调匀，用玻璃棒涂覆在溶胶法膜上。自然干燥10min，50℃下处理15min，450℃下处理30min，冷至室温。此薄膜简称粉溶法膜。将纯非纳米锐钛矿型TiO₂粉末进行X-ray衍射如图2.2所示。



由图2-1可知此样品粉末为锐钛矿型TiO₂粉末，根据XRD半高宽法，根据Scherrer公式求得样品的平均粒径为8.9nm。图2-2可以看出该TiO₂粉末为锐钛矿型。

2.4不同膜所组成光电化学电池的光电性能

分别以溶胶法膜、涂覆法膜、粉溶法膜为光电极，以0.5mol/L的KI甘油溶液为电解质，以石墨为对电极，所组成光电化学太阳能电池的基本结构如图2.3所示。

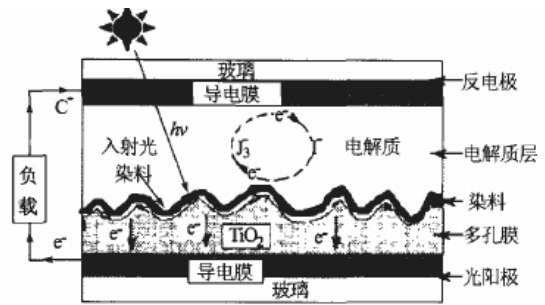


图2.3实验NPC太阳能电池

以广东雪莱特光电科技股份有限公司生产的U型15W黑光灯为光源,波长为365nm,受光面积为1.98cm²,用数字万用表测量短路电流I_{SC}; 开路电压U_{OC}; 测试结果如表2.4:

表2.4不同膜所组成光电化学电池的光电性能（未敏化）

所用光电极	短路电流I _{SC}	开路电压U _{OC}
溶胶法膜光电极	8μA	174mV
	9μA	184mV
涂覆法膜光电极	17μA	200mV(硬脂酸法粉)
	10μA	210mV(溶胶法粉)
粉溶法膜光电极	14μA	300mV

表2.4中的数据表明,粉溶法制得TiO₂薄膜的性能明显优于其他两种方法。溶胶凝胶法得到的纳米晶体结构的TiO₂薄膜的晶粒接触比较致密，空隙度很小，能够吸收光能的TiO₂晶粒的比表面积较小，从而影响其性能。但此时TiO₂纳米晶粒和导电玻璃之间的接触面积比较大，结合比较牢固，不易脱落。涂覆法在烧结前的薄膜就是由TiO₂的颗粒组成，粒子之间有空隙，比表面积大，因此其性能比较好。但由于其薄膜有较大的空隙，使电解质容易渗透，与导电玻璃接触，引起电池内部短路；另外TiO₂薄膜与导电玻璃之间结合不牢固，容易脱落。溶胶凝胶法和粉末涂覆

法相结合制备TiO₂薄膜时,利用凝胶作为粘结剂,在TiO₂粉末颗粒表面裹敷了一层凝胶,经烧结后,改善了TiO₂粉末颗粒之间的结合,使TiO₂颗粒之间的电子传输更为容易,明显改善其性能。

3 TiO₂ 薄膜表面修饰

3.1 金属氧化物掺杂

3.1.1 复合氧化物铁酸锌掺杂

铁酸锌(ZnFe₂O₄)具有尖晶石结构,禁带宽度1.9eV,具有对可见光敏感、不发生化学或光化学腐蚀等特性,是一种有重要潜在应用价值的太阳能转换材料。参考资料^[4],本实验将40mL 1mol/L的Fe(NO₃)₃溶液和10mL 2mol/L的Zn(NO₃)₂溶液充分混合,再以金属总物质量:柠檬酸物质量=1:1.5,向混合溶液中加入柠檬酸络合剂,使形成配合物溶胶,控制pH=4~5,于80℃水浴加热蒸干水份,促使配合物聚合生成粘稠状的凝胶,继续于120℃烘干水份得到干凝胶,充分研磨后,于电炉中500℃焙烧2h,得到浅棕红色铁酸锌纳米粉体。

称取等物质量 ZnFe₂O₄ 粉末和 TiO₂ 放入研钵中,然后边研磨边加入适量 PH=3 的柠檬酸去离子水。研磨 60min 后加入 2 滴 OP 乳化剂(能减小润湿角),继续研磨 20min 使粉末分散均匀。研磨时,应避免产生气泡。待成均匀胶体溶液时滴在导电玻璃上,并用玻璃棒涂膜。将膜 80℃ 烘干,然后放入电炉内在 450℃ 下保温 30min,随炉冷却到 100℃ 取出自然冷却至室温。

3.1.2 氧化锌掺杂

在单一的宽禁带半导体材料中,ZnO 的紫外光的光电性能最好,TiO₂ 次之。实验中采用柠檬酸盐凝胶自燃烧法制备 ZnO 粉,在 40mL 1mol/L 的 Zn(NO₃)₂ 溶液中,加入金属总物质的量:柠檬酸物质的量=1:1.5,以氨水调 pH=4~5,于 80℃ 水浴加热蒸干水份,促使配合物聚合生成粘稠状的凝胶,继续于 120℃ 烘干水份得到干凝胶,充分研磨后,于电炉中 500℃ 焙烧 2h,得白色 ZnO 粉体。称取等物质量 ZnO 粉和 TiO₂ 放入研钵中,采用和 3.1.1 相同的方法制备氧化锌掺杂 TiO₂ 薄膜,并用天然染料敏化。

3.2 表面包覆半导体化合物

3.2.1 表面电沉积硫化镉

CdS 是一种 II-VI 族半导体化合物,由于是直接带隙材料,具有吸收系数高等优点,被广泛用作薄膜太阳能电池材料。对比资料^[5],本实验中以 0.1mol/L 的柠檬酸锌加 0.02mol/L 的硫代硫酸钠去离子水溶液作电沉

积液,用柠檬酸调 PH=3,用两电极法,FTO 导电玻璃负载 TiO₂ 薄膜为负极,石墨作对电极,恒电流 2mA/cm² 常温下电沉积 20 分钟,用去离子水冲洗,除去电沉积液,然后烘干。

3.2.2 表面包覆氧化镁

在磁力搅拌状态下缓慢滴加 2mol/L 的碳酸钠溶液 25 mL 到 2mol/L 的氯化镁溶液 50mL 中,所得到的浆料用抽滤方法除去溶液,用去离子水洗除杂质,将沉淀物涂于天然染料敏化后的 TiO₂ 薄膜表面,然后烘干。

3.3 硬脂酸表面修饰

硬脂酸作为一种有机酸,易溶于四氯化碳(CCl₄)。实验称取适量的硬脂酸,加入到四氯化碳中,搅拌至其溶解,将溶液涂于天然染料敏化后的 TiO₂ 薄膜表面,然后烘干。

4 结果及讨论

将以上修饰后的 TiO₂ 薄膜组装成太阳能电池,石墨作对电极,KI/I₂ 丙烯碳酸酯溶液作为电解质。光源采用金相显微镜低倍冷光源(150W 卤素灯滤去紫外及红外部分),照度 90000lux,辐射功率 349.58 w/m²。测试其光电性能如表 4.1 所示。

通过在 TiO₂ 中掺杂其他半导体化合物制备复合半导体薄膜成为重要的修饰方法,复合薄膜的形成能够改变 TiO₂ 膜中的电子分布,抑制载流子在传导中复合,提高电子的传输效率。但是从表 4.1 中的数据可以看出,实验中通过掺杂铁酸锌和氧化锌并没有取得预想的效果,其开路电压、短路电流均低于单一的 TiO₂ 薄膜。铁酸锌禁带宽度 1.9eV,可以被太阳光中的可见部分激发,产生的电子可注入 TiO₂ 的导带,扩大激发波长范围,提高太阳能利用率。但是实验中铁酸锌掺杂过量,导致光生电子和空穴的俘获中心之间的平均距离缩短,从而使电子-空穴对重新复合的几率增大,并且引起铁酸锌粒子在 TiO₂ 的表面富集,减小了 TiO₂ 的比表面积。氧化锌和 TiO₂ 均为宽禁带半导体材料,导带电位相差很小,染料的光激发电子都能够注入到其导带上去,但电子在 ZnO 中有较大的迁移率,有望减小电子在薄膜中的传输时间,通过 ZnO 包覆 TiO₂ 部分表面,注入到导带的电子被陷阱或表面态俘获的数量变小,结果更多的注入电子成为自由电子,提高电子传输效率。但实验发现 ZnO 掺杂后可能减小了 TiO₂ 的比表面积,阻碍了 TiO₂ 对染料的吸收,导致 NPC 电池性能下降。

表面包覆是纳米 TiO₂ 电极表面修饰另一个重要方

法。CdS具有较高光吸收系数，其薄膜的光学带隙为2.45eV，实验中在TiO₂纳米晶体薄膜表面电沉积CdS，以提高光电性能。表4.1中的数据表明，电沉积CdS后，对比单一的染料敏化TiO₂薄膜电极，填充因子有明显提高，说明光生电子在传输过程中复合减少。但由于CdS化学性质不稳定，为解决其易受光腐蚀以及液态电解质腐蚀，可寻找多元化合物或使用固体电解质。表面包覆MgO后，开路电压和填充因子均有提高，短路电流下降。由于其较高的禁带宽度(7.77eV)，抑制了表面光生电子向电解质中转移，从而提高了电池的光电性能。

表 4.1 DSSC 光电性能测试结果

光电极	开路电压 Voc(mV)	短路电流 Isc(μA)	填充因子 FF(%)
铁酸锌 (ZnFe ₂ O ₄)/ TiO ₂	222	7.5	—
氧化锌 (ZnO)/ TiO ₂	360	20	—
硫化镉 (CdS)/ TiO ₂	150	115	39.42
氧化镁 (MgO)/ TiO ₂	594	220	36.94
硬脂酸修饰 TiO ₂	521	250	32.55
TiO ₂	463	330	30.66

实验中采用的天然染料主要成分为花青苷，在酸性环境中活性和稳定性最好，并且更容易与TiO₂薄膜结合。硬脂酸作为一种有机弱酸，溶于四氯化碳后涂于TiO₂薄膜表面，四氯化碳迅速挥发，是硬脂酸包覆在敏化后的TiO₂薄膜表面。表4.1数据表明，硬脂酸修

饰后，电池的光电性能有所提高，归因于酸性条件下提高了染料的活性。

5 结论

5.1 用粉溶法制得的 TiO₂ 薄膜组装的太阳能电池，其短路电流 I_{SC},开路电压 U_{OC} 远远高于用溶胶-凝胶法、粉末涂覆法制得的 NPC 电池，并且具有比表面积大，不易脱落的特点。

5.2 由于电子转移总是发生在表面，为了抑制电子空穴复合，提高光电转换效率，TiO₂ 薄膜的表面修饰必不可少；采用合适的表面修饰方法来抑制电极表面的电荷复合，加快电子在 TiO₂ 薄膜中的传导，是提高 DSC 光电转换效率和实用化的关键之一。

References (参考文献)

- [1] Brain O'Regan, Michael Gratzel. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ film[J]. *Letters of Nature*, 1991, 737~740.
- [2] Hu Lin-Hua, Dai Song-Yuan, Wang Kong-Jia. Influence of microstructure of nanoporous TiO₂ films on the performance of dye-sensitized solar cells[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(4): 1914~1918.
- [3] Kong Fan-tai, Dai Shong-yuan. Progress on the Study of Dye-sensitized Solar Cells[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(11): 1409~1424.
- [4] Shi Xiaobo, Li Chungeng, Wang Dexian. Preparation and Catalytic Activity of Zinc Ferrite Ultrafine Particle[J]. *Chemical World*, 2002, 9: 451~453.
- [5] Ge Yanhui, Shi Weimin, Wei Guangpu, Xu Jing, Qiu Yong-hua. Preparation and Characterization of Electrodeposited CdS Thin Films[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(4): 867~870.
- [6] Anderson C, Anen J B. *Phys Chem. B*, 1997, 10: 2611.
- [7] Negishi N, Iyoda T; esishi N, Iyoda T, Hashimoto K, Fujishima A. *Chem Lett*, 1995: 841.
- [7] Chao Ya'an (曹亚安), Xie Tengfeng (谢腾峰), Zhang Xintong (张听彤), *Acta Chimica (物理化学学报)* 1999, 15: 600.