

风能太阳能供水技术国际动态 与前沿调查研究

牧科所 王世锋, 曹亮, 朱俊峰, 李亮

1 调研背景

1.1 调研需求

能源是发展生产与提高人类生活水平的重要物质基础, 能源利用技术的每一次重大突破, 都会引起生产力的巨大发展。随着国民经济的日益发展, 人们对能源的需求也不断增长, 近年来平均以 5% 的速度递增。解决能源危机的办法: 一是降低能源消耗, 提高燃烧效率; 二是开发新能源, 积极利用可再生能源。在各类可供利用的可再生能源中, 风能、太阳能是一种可再生、无污染、取之不尽、用之不竭的能源, 被人们称为“绿色能源”。风能、太阳能具有广阔的发展前景。所以, 目前世界上许多国家都把开发风能、太阳能列为重要能源发展战略, 财政上予以大力支持, 还制定了相关的法律和法规扶持风能太阳能的开发和利用。风力提水技术、太阳能提水技术, 由于具有清洁、无污染、可再生的优点, 而越来越受到世人瞩目。

风能太阳能供水技术, 是一种先进、适用的新型供水技术, 近年来在我国农牧区水利建设中得到了快速的发展和广泛的应用, 特别是在地域辽阔、居住分散、电网架设不便的边远地区, 基本上靠风能太阳能实现供水。同时风能太阳能供水技术对因地制宜兴办小微水利, 疏通电网末端水利的“毛细血管”, 提高边远地区水利化程度起着重要的作用。再者风力提水、太阳能提水人畜供水工程是我国水利建设的一项重要内容, 特别是在占国土面积一半以上的西北和广大的牧区, 人畜供水事业的发展, 直接关系到该地区的经济发展和人民生活水平的提高, 也是加快我国建设社会主义新农村的战略步伐。目前这些地区仍有 2400 万人, 15890 万头牲畜饮水问题十分困难。我国有关部门对此十分重视, 并加大了人畜供水的建设力度。就我国长远能源战略而言, 农村太阳能、风能将成为我国清洁能源的主力军, 将是今后我国农村安全饮水、灌溉、节能减排、低碳生活首选能源, 具有广阔的发展前景。

保障和改善民生是中国发展水利的根本目标, 风能太阳能供水在我国农牧水利建设中已扮演着举足轻重的角色。目前风能太阳能供水利用方面有: 在因动力不足不能保证灌溉, 制约着农业

的发展的地区利用风能太阳能提水发展灌溉农业变“旱田”为“水浇地”，提高粮食产量；牧区畜牧业生产的稳定发展和草场生态的保护，依赖于风能、太阳能灌溉人工草场的发展；北方丘陵山区以集雨或其他微小水源为主的节水灌溉，也是利用风能太阳能为动力提水灌溉；发展荒漠绿洲农业水土资源条件的开发建设地必需有灌溉作保证，同样以风能太阳能灌溉为主。

通过本次调研，查阅国外最新技术动态，针对目前我国风能太阳能供水技术存在的问题，提炼一些研究课题，为下一步新能源供水学科研究指明方向，为我国边远农牧区水利事业做技术支撑。

1.2 调研材料的主要来源

本次调研材料主要查阅美国工程索引、科学引文索引、外文期刊（CCC）等外文数据库；国内中文核心期刊《太阳能学报》、《可再生能源》、《中国农村水利水电》；中国可再生能源网站、网络上一些专家的观点；承担单位过去做过该方面的大量研究和推广工作；深入内蒙古、新疆风能太阳能应用地区实地考察、走访，得到确切数据。

2 研究进展与展望

2.1 学科发展动向

2.1.1 风能太阳能供水发展现状

（1）风能供水发展现状

小型风力机械（供水）已经有几十年的历史，是一项成熟的技术。最早流行于 20 世纪初的小农场、小牧场中，大多数用于风力机械提水。在美国大规模农村电气化项目启动前，许多农场安装了风力发电机组为自己供电提水。但是小型风能设备的普及率在美国经济衰退期间和二战后大规模农村电气化项目启动后有所萎缩。最近几年，由于相当一部分人搬到农村没有电网的地区居住，以及其它激励政策的陆续出台，小型风力发电（供水）产业再次普及起来。

小型风力发电（提水）产业在持续地发展，最成功的是用于分散家庭的小型风力发电机组，功率往往仅几百瓦。最大的市场是我国和蒙古的户用系统，也包括一些较大容量的风能太阳能互补系统，风力发电机组的单机容量为 1-50kW。

小型风力发电机组的生产和研发主要集中在北美、欧洲和亚洲，而应用几乎遍及全世界。处于小型风力发电市场领导位置的生产企业有 Southwest Windpower (SWWP)公司（美国），Proven 公司(英国)，Northern Power 公司（美国），Energrity 公司（加拿大）和 Bergey Windpower 公司

(美国)。

在美国和欧洲，大约四分之三或者更多的小型风力机组是农村使用的，并且这一比例正在不断上升，单机功率较大，一般至少在 5kW 以上。而在我国和其他发展中国家，大部分是 50W-300W 的独立户用系统。从 2008 到 2013 年,我国生产了大约 24 万台小型风力发电机，其中大部分规格为 200W-1000W。我国无疑是一个小型风力发电机组的生产和应用大国。^[1]

据小 2014 年风机世界报告所知：小型风力机世界市场持续增长：截至 2013 年底，世界小型风力发电机组累计安装至少 806 万台。与上年 730 万台相比增长 10%。大部分的增长发生在三个国家：中国，美国和英国，这一情况清楚地表明，世界小风力机市场仍在起步阶段。世界小型风力发电机组累计装机台数见图 2-1。

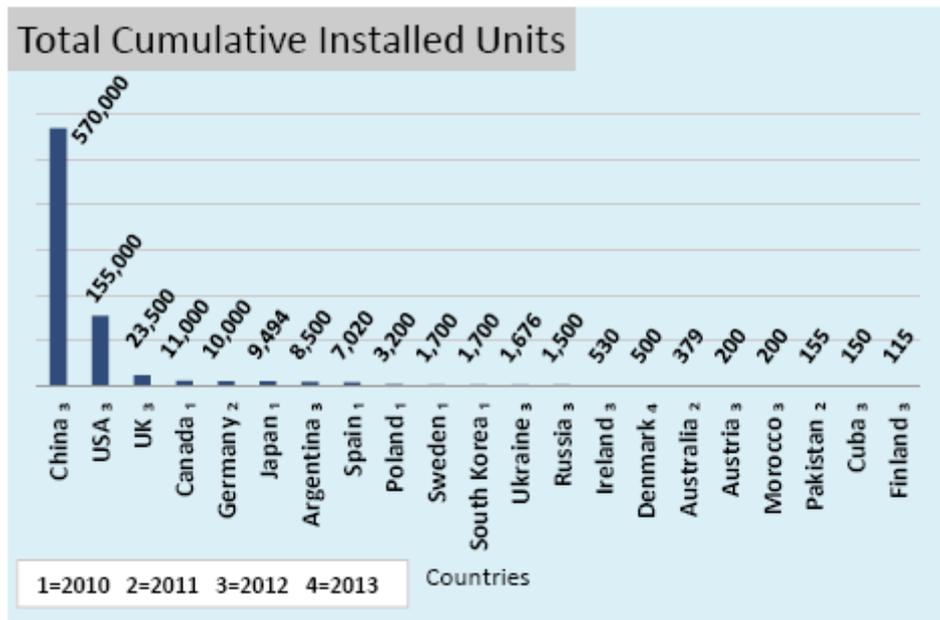


图 2-1 世界小型风力发电机组累计装机台数图

中国仍然是目前小风机装机最大的市场，2013 年增长 70 万台，到 2013 年底累计安装共 570 万。第二大市场美国总安装 155 万台，明显落后于中国，但在一些中小风电市场如英国，加拿大，德国，日本和阿根廷装机总数在 7000 到 23 500 台。

中国对全球产能占 39%，美国为 31%，英国为 9.4%。这三个主要市场，中国、美国和英国一共安装 89MW。世界小型风力发电机组累计装机容量见图 2-2。

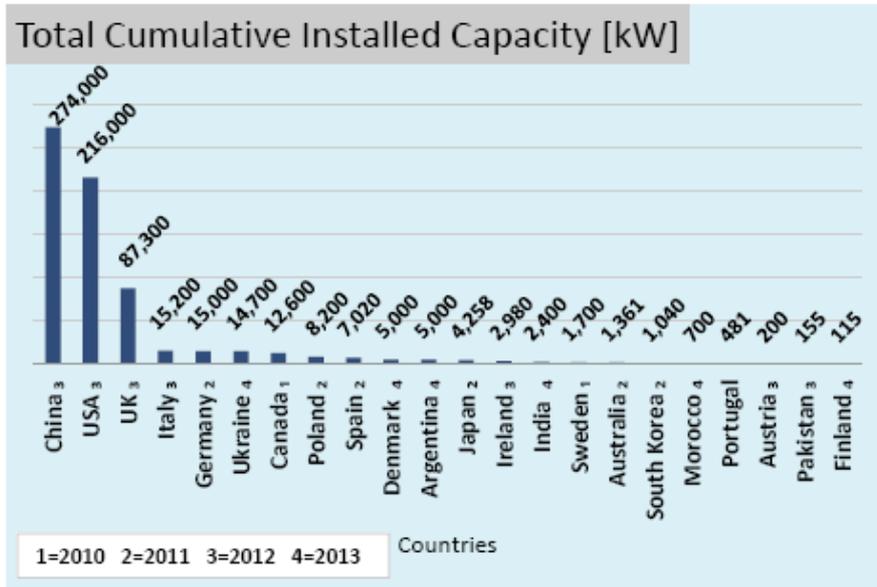


图 2-2 世界小型风力发电机组累计装机容量图

小风电行业最近的趋势已经表明新的装机容量在过去的几年每年 19 - 35% 的速度增长。到 2015 年，达到 190MW。在这段时间内，各个国家和国际社会将小风机能够建立更严格和结构化的标准和政策规范市场的投资和支持。基于保守的假设，市场随后从 2015 到 2020 看一个稳定的复合增长率为 20%。行业预计每年将达到约 480MW 的新安装容量，到 2020 年达到累计装机容量接近 3000MW。^[2]小型风力发电机组累计装机容量预测见图 2-3。

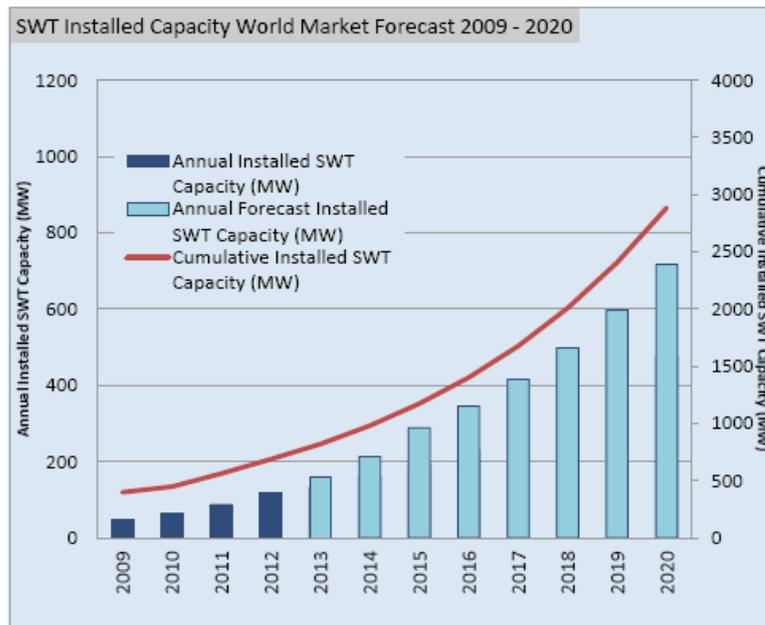


图 2-3 小型风力发电机组累计装机容量预测图

（2）太阳能（供水）发展现状

据著名信息分析公司 Dataquest 的统计资料显示,目前全世界共有 136 个国家投入普及应用太阳能电池的热潮中,其中太阳能的应用包括大型并网电站和解决边远农村地区家庭的生产生活用电两个方面。国外光伏产品五分之二用于提水,太阳能提水技术比较先进,如有美国所的 ARCISOLAR 公司,德国的西门子公司,其产品性能先进、自动化程度高、工作可靠。国外较先进的光伏潜水泵生产厂家有美国的 JACUZZA 公司和丹麦的 GRUADFOS 公司,他们推出了适用于 4 寸、5 寸、6 寸井径的泵,使光伏水泵在达到最高效率的情况下最大限度地利用了径向尺寸。在生产中应用较为先进且光伏供水普及率大于 40%的国家有以色列、印度、荷兰、德国、意大利等。

目前,许多国家正在制订中长期太阳能开发计划,准备在 21 世纪大规模开发太阳能,美国能源部推出的是国家光伏计划,日本推出的是阳光计划。日本也正在实施太阳能“7 万套工程计划”,日本准备普及的太阳能住宅发电系统,主要是装设在住宅屋顶上的太阳能电池发电设备,家庭用剩余的电量还可以卖给电力公司。一个标准家庭可安装一部发电 3000 瓦的系统。欧洲则将研究开发太阳能电池列入著名的“尤里卡”高科技计划,推出了“10 万套工程计划”。这些以普及应用光电池为主要内容的“太阳能工程”计划是目前推动太阳能光电池产业大发展的重要动力之一。^[3]

九十年代以后,随着我国光伏产业初步形成和成本下降,应用领域开始向工业领域和农村电气化应用发展,市场稳步扩大,并列入国家和地方政府计划,2002 年,国家有关部委启动了“西部省区无电乡通电计划”,通过太阳能和发电解决西部七省区无电乡的用电问题,这一项目的启动大大刺激了太阳能发电产业。西藏“阳光计划”、“光明工程”、“西藏阿里光伏计划”等大规模推广农村户用光伏电源系统。

我国家用光伏电源在青海、内蒙古、新疆、甘肃、宁夏、西藏以及辽宁、吉林、河北、海南、四川等地广泛应用,尤其在边远地区,太阳能家庭用电与远距离架设电网在经济上显示出巨大的优势。从 1995 年开始应用在边远地区户用独立光伏系统约 15 万套。进入 21 世纪,“送电到乡”工程,国家投资 20 亿元,安装 20MW 光伏系统,解决我国 800 个无电乡镇的生产生活用电问题,推动了我国离网光伏供电供水市场的快速、大幅度增长。^[4]

光伏提水这项可以和农业水利建设相结合的新技术开始蓬勃发展,诸如农业水利领域的:光伏水利、光伏农业等方向逐渐开展起来。十八大工作报告明确提出了农业建设和水利建设的重要性,因此,光伏提水技术在 2013 年瞬间起势,成为农建水利项目的重要技术手段。

2.1.2 国内外风能太阳能供水新动向和值得关注点

(1) 美国

无论在数量和质量上,美国的小型风力发电企业和产品都是世界领先的。美国小型风力发电机的主要制造厂商有博力风能公司(Bergey Windpower Co.)和西南风能公司(Southwest Windpower),产品规格为400W-10kW。其他制造商还有 Entegrity 公司(50kW)和 Northern Power 公司(100kW)等。市场主要分布在小企业,学校以及建设离网型的风柴互补系统。其中 Entegrity 公司的产品主要安装在美国和加拿大。美国的小型风力发电机市场主要分布在家庭、农场、小企业、工厂、公共或私有设施和学校等,在美国,一半左右的小型风力发电机组是独立离网型运行的(最大为1kW)大多数美国生产的小型风力发电机组都是上风型的,在超强风速下都会自动折尾,有自我保护功能,如美国 BergeyWindpower Co.的风力发电机组。也有下风型的风力发电机组,如美国 NorthernPower 的 Skystream。^[1]

最新动态:

美国一些偏远地区风能提水已有100多年的历史,而使用太阳能提水技术也有半个世纪了,美国农业部农业研究服务在最新的研究中指出,单一的风能、太阳能供水的可靠性没有混合动力系统可靠性高,在该研究中指出通过混合系统使用可改善风能或太阳能的独立运行不稳定的缺点,其中关键技术在于从风力机和太阳能光伏阵列达到合理的容量匹配,在风能太阳能结合之前把风力机输出的交流变成直流输出,同时把风能和太阳能装机比例优化配置使电压之间的不匹配干扰降到最低,以及额外增加一个降压/升压转换器的控制器。他们的实验证明使相对恒定的电压(只有3%的波动)时候,风能和太阳能装机比例为最佳。风能太阳能互补供水控制系统见图2-4。

风光互补供水系统采用单螺旋泵,单螺旋泵应用在扬程低的提水泵站,单螺旋泵由于结构和工作特性,与活塞泵、离心泵相比有以下优点:流量均匀压力稳定,低转速时更为明显;流量与泵的转速成正比具有良好的变量调节性;体积小重量轻、噪声低、结构简单、维修方便。

这种混合系统在最大需求的用水月比风力提水系统和光伏发电系统单独系统的抽水量提高28%以上。^[5]

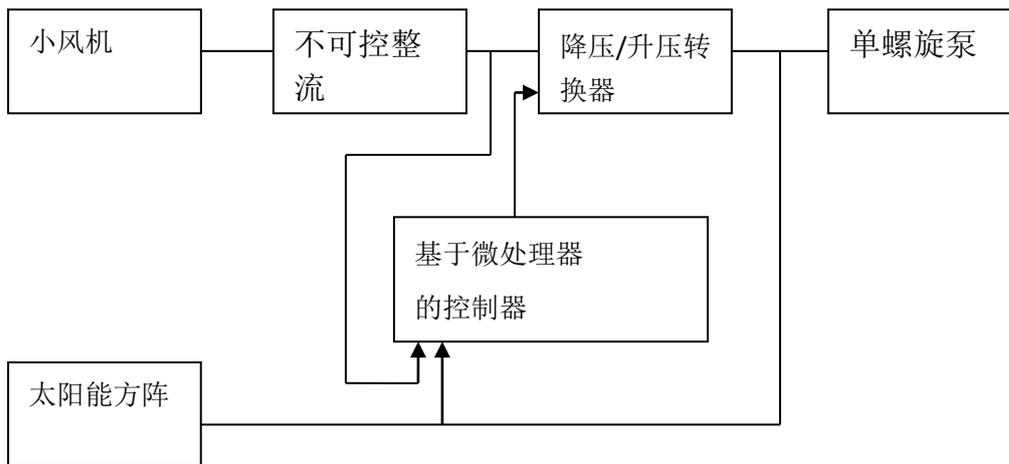


图 2-4 风能太阳能互补供水控制系统图

效能:

叶片: 效率从约 32% 提高到 45%。

发电机: 效率从 65-80% 提高到 90-92%。

逆变器: 逆变器改进的余地比较少, 因为逆变器在太阳能光伏产业的几十年使用中, 不断改进提高效率, 基本都已经超过 90% 的效率。

设计:

提高扫掠面积以获得更多的能源, 同时减少设计载荷。这也包括新型复合材料的使用和模具的重新设计。

减少系统的零件数量。

强调制造技术。

降低整体的材料使用, 计算每单位发电量的重量。

尽量减少运动部件的使用。

淘汰机械拉索系统。

提高在低风条件下运行性能。

其他:

保证性能标准, 认证和第三方测试。

采用先进的塔杆材料和设计, 以减少安装时间和成本。

开发技术和工具, 可以更准确地测定风机的功率。

(2) 英国

在小型发电技术中，英国只在微型和小型风力发电领域处于领先的地位。

英国的碳信托研究 (The Carbon Trust Study)指出，潜在的小型风力发电能提供每年 1.5 百万 kWh (Terawatt Hours²¹,TWH) 的电力(占英国电力总消耗的 0.4%),可减少 60 万吨的 CO₂ 排放量。这是基于 10%的家庭安装了小型风力发电机组，其成本价和传统电网的价格持平。

英国从整体上来说，大部分电力和碳减排来自于农村安装的小型风力发电机组。不考虑成本的话,农村安装风力发电机组发电大约是城市的 4 倍。这是由于农村的风速通常情况下都较好，经济上发展小风电的动力更大。

在英国有 10%的家庭安装了小型风力发电机，其成本价和传统电网的价格持平。2005 年至今，英国安装了 10000 多台小型风力发电机组，大约相当于 20MW 的装机容量。在数量上（安装台数）微型风力发电机组（<10kW）占了近五分之四，小型机组(10-50kW)仅占了五分之一，但就装机容量而言，小型风力发电机组占了总装机容量的 60%。

(3) 印度

印度政府借鉴了欧洲许多国家利用风能的经验，为促进风力发电项目，宣布了一揽子特殊的财政优惠政策。主要通过非常规能源部和印度可再生能源开发署在全国实施可再生能源技术的开发与推广工作。这两个部门不仅提供技术方面，还提供财政方面的支持。印度政府将可再生能源的开发利用作为可持续发展战略的一个重要组成部分。目前正准备实施新的激励性政策和措施，用来进一步推动风能的开发利用。在这些政策的引领下，印度的小风电产业也得到了发展，成为在亚洲仅次于我国的小型风力发电主要应用国家。印度尼西亚在爪哇岛安装了 49kW 的离网型小型风力发电机，在 Yogyakarta 安装了 42kW 的小型风力发电机，功率从 0.1kW 到 15kW 不等。

印度新能源及可再生能源部已经发布 JNNSM 第二阶段任务相关政策，在第二阶段，印度政府计划增加 10GW 的太阳能安装量，在第二阶段将建成 2 万个农村社区的太阳能离网项目，包括 100 万个太阳能照明系统、2.5 万个太阳能水泵等。

印度农村太阳能供水和卫生方面的应用研究（最新动态）：

印度受砷影响的农村地区的饮用水供应方法。有一个新颖的实现是独立的电力供应，利用太阳能水处理系统处理后的水质符合人的饮用水标准。该系统的目的是为整个村庄供应安全可靠的饮用水，整个太阳能水处理系统的成本在 20418 美元左右。

该项目技术主要是用太阳能膜蒸馏法。以太阳能为驱动力，利用高分子疏水性微孔膜提供较大的传质表面来实现水溶液气化和传质的分离过程。用太阳能光伏发电驱动膜蒸馏系统中的冷、热工质循环泵，利用太阳能热水器加热工质，从而改变了以往循环泵的驱动和加热工质的能源；

在膜蒸馏的冷端采用太阳能喷射式制冷，使冷却水保持一定温度，与热端形成一定的温差，从而实现太阳能膜蒸馏过程。

含砷的水严重影响农村人的身体健康。该方法利用太阳能提供了一个简单和容易的生产饮用水和污水处理，

该方法不要求任何电力，利用可再生能源。它不产生经营成本。实验结果表明，处理后的水质符合人饮用水标准，设计的估计表明，该系统总成本实现了约 20418 美元。这是大约降低 10 倍的输水成本。

在调查的过程中，发现家庭成员特别是妇女需携带装水工具从一个距离 600 米远的地方运水，增加了他们的工作，一天运水 3 次，一天花费的总时间大约是 2 小时。太阳还可以安装在每个房子的屋顶，因此节省了妇女劳动和时间。^[6]

(4) 菲律宾

菲律宾是东南亚地区在推广小型风力发电方面是最积极的。在已安装的许多风力发电机组中，一部分用于无电人口，如安装在菲律宾北部的一台 10kW 的风力发电机组可为 25 户人家供电供水。在 Batangas 省有一个 25kW 的风能独立系统，为 6 种不同的负载供电，并且可以按负载的重要性的发电情况对负载进行调度。一部分小型风力发电机组已被用于移动通信领域以替代柴油发电。

(最新动态):

在菲律宾以社区为基础的小型风力发电机可再生的能源系统,菲律宾政府支持在边远地区采用小型风力发电机来满足社区的供电、供水系统来替代昂贵的柴油发电系统。

菲律宾风能供水系统的关键技术: 额定功率 1 千瓦的风力机采用低转速、定制的轴向磁通永磁发电机。没有变速箱，这避免了变速箱和相关的维修、效率低和噪声问题。3.6 米直径的玻璃纤维叶片固定在轮毂盘，形成转子，反过来又连接到车辆的轴承安装在底盘。机械鼓刹机构保护在超过额定风速时转子上的叶片。简单的设计使机组具有坚固性，易于安装和维护。标准小风机塔架是一个相互关联的钢柱，20m 长的拉索，在塔底座铰链避免维修时采用拔杆和电缆绞车。

风力供水案例中社区有 141 栋房子，人口约 700，他们依托农业和渔民生计。社区供应饮用水的井深 35m。人力运水距离约 1.3km。每一个男人和男孩每天 4 或 5 次拉家用饮用水。因此，采用小型风力为动力的管道输水是最适合为这个地区提供饮用水。^[7]

(5) 加拿大

在加拿大，小型风能系统是指功率较小的、不并入电网的单机风能利用系统。小型风力发电

机被分成如下三类：

微型风力发电机组：300W-1kW；

小型风力发电机组：>1kW-30kW；

中型风力发电机组：>30kW-300kW。

小型风力发电市场在加拿大是比较年轻的。通过界定它的市场地位和分析潜在的应用，可以看到在过去的五年中小型风能利用在加拿大有稳定的增长。目前小型风力发电机组的生产商正在改进他们的产品来满足本国、北美和国际市场的需求，如农场、家庭、公共服务、商店和小企业、旅馆、度假村、农村和太平洋或者加勒比海孤立海岛。

加拿大小型风力发电的市场大致情况如下：

- _ 已安装的小型风力发电机组：约 2,500 台，90%是微型风力发电机组；
- _ 装机容量：大约在 1.8 MW-4.5 MW 之间；
- _ 年销售量：约 600-800 台；
- _ 年生产能力：7.5 MW；
- _ 小型风力发电机组生产商：6 个；
- _ 加拿大零售和代理商：130 个。

在 6 家风力发电机制造商中，其中 5 家主要生产 20—50kW 范围内的风力发电机组。由于全球只有 12 家风力发电机制造商生产单机功率大于 20kW 的风力发电机组，所以加拿大的生产商在全球市场中占有优势地位。另外 130 个零售和代理商，遍布安大略湖、魁北克、亚伯达和不列颠哥伦比亚，推动这一产业的发展。^[1]

(6) 阿尔及利亚

阿尔及利亚 80%干旱地区，利用太阳能提供很好的解决方案解决农田灌溉和饮水问题。太阳能水泵系统是由异步电动机耦合离心泵载荷。太阳能电池通过逆变器，中间不需要蓄电池的简单的光伏发电系统，更可靠；维修费比有电池系统更便宜。

最新动态 (关键技术)：光伏发电系统由自我引导的异步电动机驱动离心负荷。整个系统由太阳能电池通过逆变器驱动。没有太阳能蓄电池抽水系统相比有电池组的更简单，更可靠，维修保养费用更低。使用离心泵需要初步研究重要的泵的参数曲线。在总水头一定的情况下，通过控制流量，何时泵能达到最佳效率同时能将水提至预期高度。此外，还和泵的尺寸、种类、转速有关。根据弯曲的流量图，Q—H 关系图描述了水头的变化。根据相关领域的一些前瞻性研究，我们注意到一些研究人员使用相似定律来确定水流在不同转速的情况下的运行(他们认为电泵总是

在最佳工况点运行), 例如: 对于一个给定的转速, 如果辐射减少了, 那表明流速的降低, 系统的工况点由泵的 Q—H 特征曲线的交叉点确定, 水头是固定的, 泵并不运行在最佳。因此, 在一个新的转速, 流速总是低于最佳工况点对应的流速, 即, 不管太阳能辐射值和温度怎么变化, 系统的效率值都会上升。太阳能泵流量、扬程、转速运行曲线见图 2-5。因此, 评价和改进抽水系统对电泵的选择是必要的。[8]

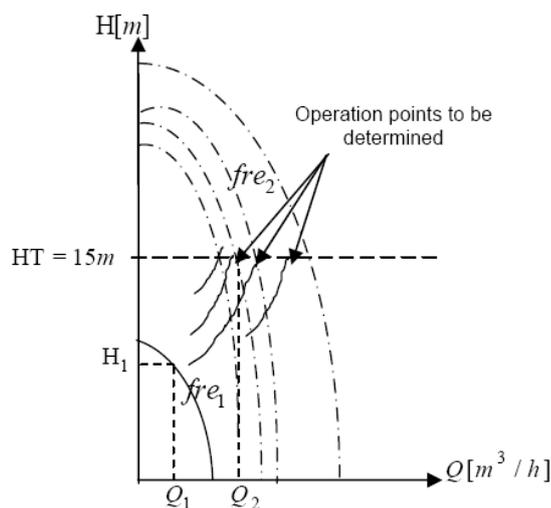


图 2-5 太阳能泵流量、扬程、转速运行曲线

(7) 克罗地亚

克罗地亚利用太阳能来给城市供水。文章中介绍了太阳能供水系统一个 8970 人口城镇供水的案例。从节能, 经济、可靠性角度分析了光伏发电是一种很有前途的可持续能源为城市供水系统解决方案。

最新动态(关键技术): 从整个光伏供水系统的太阳能辐射、水塔的容积、供水时间(天数)、每天供水量、每年的供水量进行优化配置, 确定泵站的最佳容量, 使系统最经济、最可靠。

系统设计时考虑的参数如下:

收集在规划期需水计算所有必要的的数据, 总的需水量和确定日常用水模式;

收集气候和其他必要的资料设计光伏系统;

选择天系统水量平衡, 即数量, 平衡(设计)阶段, $TB=1, 2, 3, 4$ 和 5 天;

选择供水最关键的时期来决定太阳能电池容量

根据每天供水时间来确定光伏发电容量

根据每天、每年最大供水量来确定光伏提水泵站的最大容量。[9]

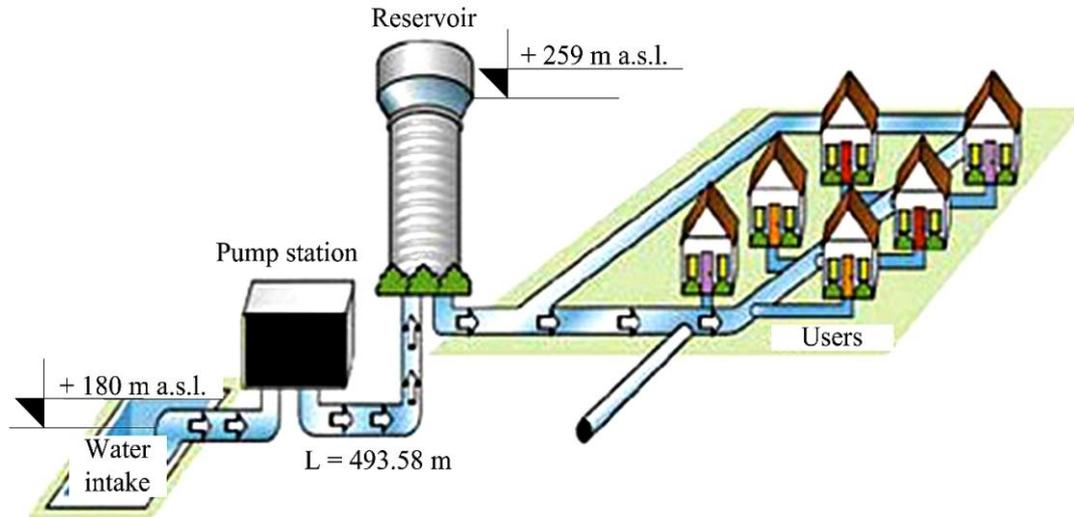


图 2-6 太阳能城镇供水示意图

(8) 欧洲

近年来，风力发电在欧洲得到迅速发展。到 2013 年欧洲拥有 118GW 风力发电装机容量。欧洲立法要求到 2020 年，总的能源消耗的 20% 来自于可再生能源。

欧盟定义功率小于 100kW 的风力发电机组为小型风力发电机组。小型风力发电产业的实施战略项目已经得到了欧盟委员会的支持，以便改善信息渠道和市场来支持小型风力发电。

欧盟认为和其他类似的可再生能源技术比较，小型风力发电产业的发展并没有达到预期的效果。然而欧洲风能协会（EWEA）认为小型风力发电机组有很大的潜力。

小型风力发电供水应用的潜力很大，很多欧洲人士觉得小型风力发电供水非常有吸引力。同时，欧盟的许多成员国正积极寻求在发展中国家推广互补系统的成功方法，并在现有柴油发电的局域网中配置高渗透率的风力发电。

(9) 南非

估计有一个亿的人没有足够的清洁饮用水。在没有电网的地区，太阳能供水的价值非常大，在一定的条件下，光伏泵水比柴油供水更便宜和可靠。在大多数国家的饮用水提供作为该政府的基础设施建设任务，尤其是在农村地区。

最新动态(关键技术)：太阳能提水系统通过在不同的光照条件下，电池板的电压变化量，管道压力也将因流量变化而变化，管道有一个内置的压力传感器变送器来将物理信号与系统转化为可测量的电量数据记录仪。该系统由光伏水泵子系统，传感器（传感器），数据记录仪连接到 PC 和收发器远程监控。系统安装后，通过远程监测电压、电流、辐射度、流量、压力和水位等参数来控制整个系统的运行。^[13]

(10) 非洲东部

在高贫困水平的非洲东部，特别是在农村地区，采用风力提水解决人畜饮水和灌溉问题。采用风力机械提水技术。风力泵的关键特性：该风机的基本组成部分包括转子、尾翼、塔架、泵杆、传输系统、水源（泵和井）。大多数风力泵连接到储水箱。

风力机械提水机组最常用的在东非地区，风力泵系列直径 6 到 8 英尺，因为这样的设计概念更简单，低成本的设计，适合小农户提取地下 20m 深一定量的水满足人和家畜的需要。

(11) 中国

在国内，离网型风力机（供水）得到迅速发展，我国共有小型风力发电机组生产企业 102 家，其中，从事离网型风力发电机组开发、研制、生产的单位共 74 家（主要风力发电机组生产厂 36 家），配套企业 28 家，大专院校科研院所 10 家。

主要生产厂家有：扬州神州风力发电机组有限公司、湖南中科恒源能源科技股份有限公司、广州红鹰能源科技有限公司、宁波风神风电科技有限公司、北京远东博力风能设备有限公司、内蒙呼市博洋可再生能源公司、青岛风王风力发电机组有限公司、江苏南通紫琅风力发电机组制造有限公司、山东宁津华亚工业有限公司、青岛安华新源风电设备有限公司、南京东龙电子电器科技中心、包头市天龙永磁电机厂、宁夏风霸机电有限公司、上海致远绿色能源有限公司、浙江华鹰风电设备有限公司、浙江瑞安市海力特风力发电机组厂、上海跃风新能源科技有限公司等。

主要科研单位有：沈阳工大风能所、中国科学院电工研究所、汕头大学能源研究所、华北电力大学可再生能源学院、合肥阳光、山东昌邑富奥风能研究所、江苏南通紫琅职业技术学院、水利部牧区水利科学研究所、河南鹤壁市科技创新研究院、中国农机院呼和浩特分院能源研究所等。年生产能力超过 3 万台。主要产品品种有 100W、150W、200W、300W、500W、600W、1kW、2kW、5kW、10kW 风力发电机组等。产品主要以尾翼调速或不调速为主，极个别产品采用了离心式变桨装置，近年来我国市场上新兴的离心式变桨距离网型风力机靠转速对风力机变桨装置进行驱动。

风能是目前除水电外从技术、经济和资源情况等角度看都是最有利用价值的可再生能源，而风力提水又是风能的主要利用方式。在农业生产灌溉，人畜饮水，生态建设，水产养殖，制盐等领域具有广泛的使用前景。目前国内风能太阳能供水主要应用在边远农牧区，包括内蒙古、新疆、西藏、青海、四川等地。风力提水业的发展水平也直接反映了我国新能源利用的水平。目前我国的常用风力提水机，按其使用技术指标可分为：低扬程大流量型，高扬程小流量型。低扬程大流

量型机组一般是低速风轮或中速风轮与螺旋泵或钢管链式水车配套形成的一类提水机组,它可以提取河水、海水等地表水,这类机组一般扬程小于 3m。高扬程小流量风力提水机组,由低速多叶片风力机与单活塞式水泵相匹配形成的风力提水机组。这类风力机提水机的流量一般小于 4m³/h。低扬程大流量的风力提水机,因扬程太低,其使用范围受到了限制,而高扬程小流量的机型因流量太小,仅能满足人畜饮水,且传统的机型一般为机械传动,结构复杂,出流不稳定,致使设备成本高、性能差效率低、故障率高。风力发电提水目前全部采用昂贵复杂的变流及控制技术,使发电提水系统可靠性差,造价高。

虽然我国的小型风力发电产业起步较早,和国际上的差距不是很大。但是在某些方面仍存在问题,如产品普遍存在功率小、风能利用率低、输出特性差、功率过载及可控性差、控制不稳定,脉动大等问题,使得机组和用电设备容易损坏,严重影响到使用者的利益;同时我国风力发电提水机叶片、风轮、发电机和控制器的设计水平也有待提高。塔架、地基的制作水平需要改进。产品外观和包装需要美化和完善。此外,企业的研发能力弱,设备的检测和认证程序缺乏,产品的质量差异很大。

光伏提水技术装置,轻巧方便,机动灵活,适用范围广、经济性好。不但是边远无电地区供水的重要手段,也是其它地区和领域的一种理想供水方式。光伏提水系统可用于村庄、牧场、家庭的人畜供水,也可以同节水灌溉相结合进行农田和人工草场的灌溉。

目前国内有生产光伏提水的生产企业 70 余家,在我国运行的光伏提水机组大约有 10000 台(套),近年来每年正在以 30%~50%左右的速度递增。光伏提水对解决人畜供水和农牧业灌溉问题起到了较大的作用。由于光伏提水工程还是一项新技术,因在光伏提水技术工程建设过程中可执行的标准少,工程建设的随意性大,使光伏提水系统利用率低、效益差,光伏提水工程建设中还存在设计方法不正确、系统配置不合理、工程建设不规范等原因造成光伏提水系统利用率低,系统功能不能全部发挥等问题。太阳能光伏提水还处于刚刚起步阶段,只有光伏电池、逆变器、常规水泵通过简单的组合,系统效率小于 15%,可靠度小于 50%。而真正专门研发的专用光伏提水系统尚未开展示范和推广。^[11]

2.2 专家观点

(1) 英国中央兰开夏大学的刘雄伟教授:英国有 20 多家小风机生产企业,英国小风电装机年增长 20%,预计到 2020 年将装机 60 万台,到 2050 年将装机 400 万台。英国占全球需求的 20%。英国可再生能源战略的目标是,到 2020 年,实现 2%的电力供应来自小型电力(50kW 以下)。

欧洲小风电市场主要集中在 50kW-100kW 机型,其次是 5kW-20kW 机型。农村地区的农户

将是主要的市场，在欧洲仅次于英国的市场是西班牙和意大利。在欧洲市场销售的小风机企业主要来自美国、日本、加拿大、英国、德国和中国。

(2)《国家能源局/REEEP 中国小型风能产业路线图和政策建议》研究课题组长、北京远东博力风能设备有限公司总经理都志杰：国内虽然曾经颁布了一些小风机的标准，但是相对滞后，还没有像英国风能协会和美国风能协会那样的标准，没有检测机制和认证计划，惠及小风电的政策匮乏。

(3)北京领世咨询有限责任公司首席执行官郑家鑫介绍了北美小风机市场的概况和有关认证政策。为了规范美国小风电行业的发展，促进激励政策的有效落实，美国成立了“小型风力发电机认证委员会（SWCC）”，专门负责小风机的认证工作。

(4)富科风电的郝振全总工程师介绍了永磁风力发电机的进展。微型永磁风力发电机（1kw以下）的型号主要包括：100w、150W、200W、300W、500W、600W；小型永磁风力发电机的型号主要包括：1kw、2kw、3kw、5kw、7.5kw；中小永磁型风力发电机的型号主要包括：10kw、20kw、30kw、50kw、80kw、100kw、150kw、250kw。永磁电机的发展趋势是：额定转速越来越低（直驱技术），发电效率越来越高，性价比越来越好。

(5)华北电力大学风电研究中心副主任田德教授分析了国内小风电行业面临的技术问题。国内叶片没有可应用的创新翼型，没有定型的质量可靠的发电机，不能提供优质品牌的风机控制器和变流器，无配套零部件供应商，产品无法规模生产。

(6)浙江华鹰风电设备有限公司总经理徐学根介绍了被动变桨控制技术在小型风力发电机组中的应用。徐学根认为，国内现有的风力发电机组技术，由于是定桨距设计，偏航限速控制，存在问题突出表现在低风速下启动困难，高风速下限速困难，且无有效停车机构。如果能把定桨距改为变桨距，把偏航限速、卸荷限速这种“从后控制”方式改为控制风轮转速“从头控制”方式，将彻底解决这些存在的问题。变桨距风力发电机组将逐步取代定桨距机型，成为国内中小型风力发电机组的主导力量。^[15]

(7)采用户用光伏发电系统解决偏远地区无电村和无电户的供电问题，重点地区是西藏、青海、内蒙古、新疆、宁夏、甘肃、云南等省、自治区。目前已建设太阳能光伏发电约 10 万 kW，解决约 100 万户偏远地区农牧民生活用电问题。到 2020 年将达到 30 万 kW。

(8)电力系统国家重点实验室深圳研究室副主任、清华大学教授、天源新能源总工程师徐政表示，光伏扬水系统可根据日照强度的变化实时调节输出频率，实现最大功率点跟踪，最大限度地利用太阳能资源。为满足不同环境需求，应研制出光伏扬水系列单机、多机多款系统。优化

设计是在满足扬程和流量要求的前提下，尽可能减少太阳能电池组件的使用量。在大力推动新能源产业及其科技应用的同时，切实从源头上降低新能源成本。

(9) 水利部、财政部颁布的各项报告，都指出将明确重视和对待东北四省的农田水利建设，这也是国内近年来比较浩大的农业水利建设工程。相继而来的，将是全国的农建和水利项目的新高潮。光伏与水利相结合的新领域（光伏水利和光伏农业领域）将是未来 10 至 20 年发展的重点。

2.3 阶段调研展望

2.3.1 风力发电（供水）解决的关键技术

根据调研数据及国内外技术发展趋势，风力发电（提水）解决的关键技术应从以下几个方面发展。

(1) 提高零部件效率

叶片：气动外型的研究，继续提高叶片的设计水平，由单一翼型向复合异型转变，使叶片受力更加合理，使用寿命更长，效率从目前的 30% 提高到 40%；在叶片成型前更加注重的风洞试验，不断完善气动性能；传统风力提水机采用木质叶片，容易受潮变形，为减少设计载荷，应采用新型复合材料和模具的重新设计，最新设计软件的应用与开发；

发电机：提高发电机效率从目前的 70% 提高到 90%，设计上采用大气隙，大磁化厚度的方法来既保证起动力矩，又保证发电效率，在制造工艺上采用整体环状永磁铁，进行分级冲磁，代替一般由多块矽钢进行粘接的方法，提高电机运行的可靠性，并降低制造成本；

逆变器：研发高可靠性、低成本、高速率、小尺寸、低功耗、在极端电压和温度范围内运行稳定逆变器，提高逆变器的效率，效率由目前的 90% 提高到 98%。

(2) 提高整机的稳定性和效率

目前需要对小型风力发电机研究一种装配风压式全程变桨距调速机构的风力机，变桨机构的传动比例、精度能够达到标准水平，且传动机构灵活小巧，防腐、适应温度能力强，从而达到运行安全可靠，制造成本低的特点。通过变桨距机构的作用，加强对风力机的控制，使风力机能够适应各种风速的变化：在初始风速易于起动；在设计风速与初始风速之间能够获得较高的风能利用系数；当大于设计风速时，能够起到限速作用，保证风力机平稳运行。另外，大风时的调速功能还能极大地改善风力机的整体受力情况，有利于风力发电机的整体设计。

(3) 提高风能供水的系统效率

风轮、发电机及负载（水泵）的匹配技术。现有系统一般采用发电机输出直接对蓄电池进行

充电,并没有对风力机转换环节进行控制,使得风能利用系数比较低,为实现风力发电系统最大功率输出的目的,需要研究负载调节风轮与发电机运行时最大功率跟踪的匹配技术。风力发电系统的两个主要部件风轮和发电机之间的匹配效果直接影响着风能的利用率,也影响着整个系统的运行性能、效率和年提水量。因此,风电系统的高效率是风力发电(供水)技术的研究重点。

(4) 风力供水模式的研究

根据我国不同地区气候、水源、地形、用水形式(人畜饮水、灌溉),提出不同的风力供水模式。

人畜供水模式:

在东季最低气温不低于零摄氏度的地区采用无防冻功能的风力提水供水模式,一般风力机选用功率为 1-5kw、日提水量在 5-50m³、额定扬程为 10-80m、额定流量为 1-5m³/h 的提水系统。其工作原理为:风力提水机全天候工作,将水源源不断的泵入蓄水池中,蓄水池的底端一般高于用水终端的最不利点约 2m(装车供水栓除外),使水依靠势能产生静压而自动化供水。无防冻风力提水系统见示意图 2-7。

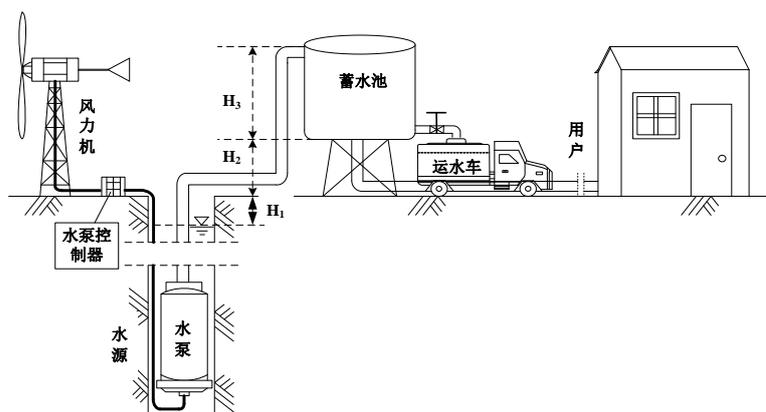


图 2-7 无防冻风力提水系统示意图

设有防冻设施的提水模式,与无防冻设施的模式相比,蓄水池放在地下,适用于在北方寒冷地区进行防冻保温。由于蓄水池在地下,无法实现利用高位水的势能实现自动供水。在系统中增设了蓄电池驱动的终端供水泵。其示意图见图 2-8。

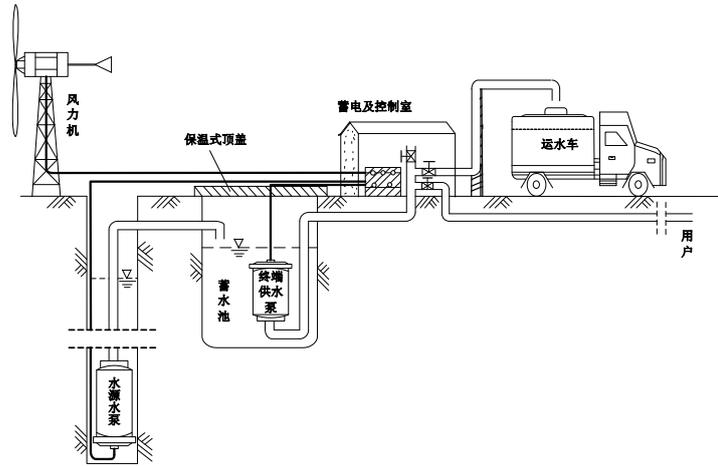


图 2-8 设防冻风力提水系统示意图

该模式地下蓄水池一般深为 3m。蓄水量为供水对象的日用水量、地下蓄水池为封闭式蓄水，水池的顶部一般高于地面 0.2-0.3m（防止车辆碾压），并在顶部覆盖有保温材料和吸热材料，以便进一步提高冬季的防冻效果。其工作原理是：风力机全天候工作，一般其输出功率的 80%用于从井中将水提入地下蓄水池中，约 20%用于蓄电池的充电，当需要供水时，蓄电池驱动供水泵给用水设施供水。一般蓄水池深 3m，井深 20-80m，池深与井深的比值为蓄电池负载与风力机负载的比值。为实现快速装车供水终端供水，泵一般采用短时间大功率模式工作。

风力提水灌溉供水模式

畦灌模式：

该模式原理为风力机将水泵入灌溉调节池，在调节池的底部设有出水口，通过输水管线将水引到田中。一般调节池的容积为风力提水机额定流量的 3-5 倍。如图 2-9 所示。

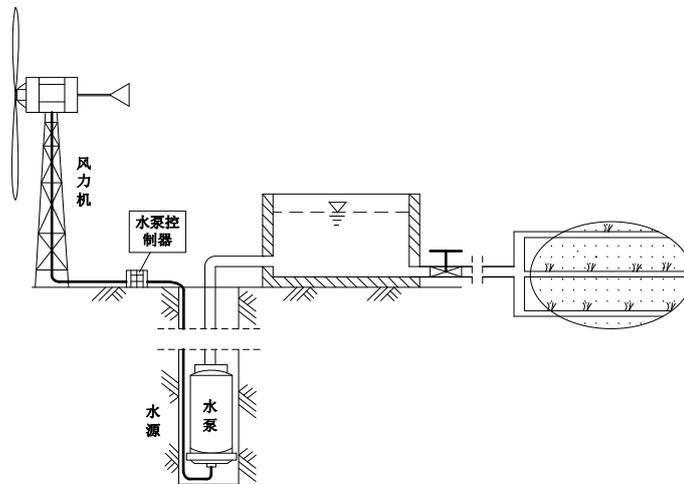


图 2-9 风力提水系统畦灌模式示意图

重力灌溉模式：

风力提水机将水提入一定高度的蓄水池中(蓄水池的出水口与灌水器的入水口应符合灌水器的要求)。水在重力作用下通过主干管路输送到灌水器中实现灌溉任务。一般蓄水池的高度为5-10m，容积为额定流量的2-3倍。如图2-10所示。

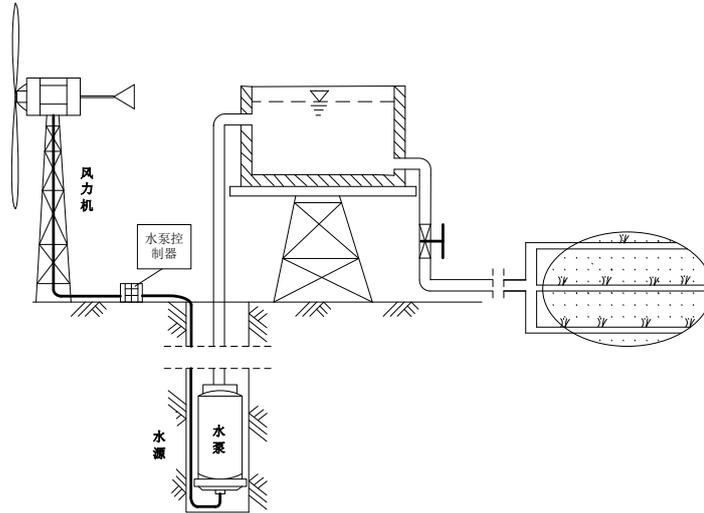


图 2-10 风力提水系统重力灌溉模式示意图

全自动化灌溉模式：

其工作原理为风力机提水与现代化节水灌溉设备相结合，在组成的系统中，在支管与干管衔接处加入专用控制器。控制器的功能是在压力达到规定值时，开关打开，使干管和支管联通实现灌溉。在灌溉时控制器打开的个数与当时风速、流量、压力参数相关。打开控制器的序号、个数自动配置，使得能够在24小时内各控制器的出口总流量相等。如图2-11所示。

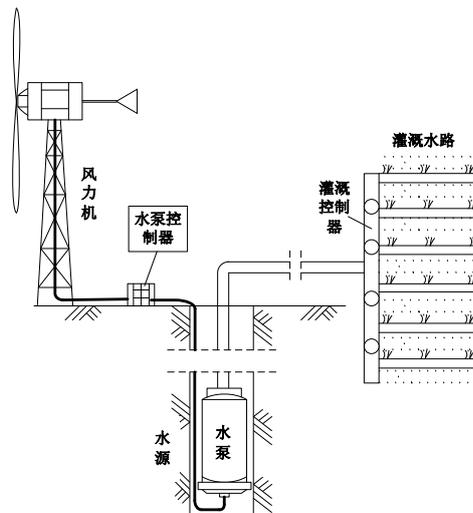


图 2-11 风力提水系统全自动化灌溉模式模式示

2.3.2 太阳能供水解决的关键技术

根据调研数据及国内外技术发展趋势，太阳能供水解决的关键技术应从以下几个方面发展。

(1) 开发光伏泵与光伏网阵的最大功率跟踪，提高跟踪精度，使光伏网阵输出的功率全部转化为有效的提水功率。

(2) 提水微电子技术在原系统上应用，提高光伏泵水系统的自动化程度和保持能力，实现系统的软起动，自动关机，自动切入。

(3) 太阳能供水水泵设计关键技术

变转速、宽高效区太阳能专用水泵的开发。开发可在变转速下工作的专用水泵(2200—3000r/min)，每天工作6—8小时。系统效率高于30%、可靠性大于95%。

研发宽高效区的专用多级离心泵，从目前只有一点与水泵相匹配到变成一个区域相匹配；要使太阳能水泵性能达到最佳效率同时能将水提至预期高度，设计时就要考虑泵的尺寸、种类、转速。对于一个给定的转速，如果辐射减少了，那表明流速的降低，系统的工况点由泵的Q—H特征曲线的交叉点确定，水头是固定的，泵并不运行在最佳工况。因此，在一个新的转速下，不管太阳能辐射值和温度怎么变化，系统的效率值都会上升。

(4) 太阳能村镇供水系统优化设计

从整个光伏供水系统的太阳能辐射、水塔的容积、供水时间(天数)、每天供水量、每年的供水量进行优化配置，确定泵站的最佳容量，使系统最经济、最可靠。利用可再生能源，它不产生经营成本，规模较大的村镇供水会比远距离输水大约降低10倍的输水成本。

系统设计时考虑的参数如下：收集在规划期需水计算所有必要的的数据，总的需水量和确定日常用水模式；收集气候和其他必要的资料设计光伏系统；选择天系统水量平衡，即数量；选择供水最关键的时期来决定太阳能电池容量；根据每天供水时间来确定光伏发电容量；根据每天、每年最大供水量来确定光伏提水泵站的最大容量。

(5) 与太阳能相适应的管灌、微喷、滴灌节水灌溉技术研究。由于太阳能辐射量随着时间在变化，在日有效工作时间内振幅很大，将该种动力与常规的微喷灌溉设备直接集成难以开展正常的灌溉工作，为此，在设备集成时开展如下研究：应用于微喷的高压、高效多通道智能配水器的研究；太阳能专用变流量恒射程喷灌机的研究；太阳能泵水与微观成套全自动化控制技术的研

(6) 利用太阳能进行水处理

大部分牧区水质较差，人畜供水问题未能很好解决，应用牧区丰富的太阳能、结合中小型水

处理设备，以太阳能为驱动力，利用高分子疏水性微孔膜提供较大的传质表面来实现水溶液气化和传质的分离净化水质，以解决牧户的人畜饮水问题，提高牧民的生活质量。

2.3.3 风光互补供水解决的关键技术

风/光互补发电供水系统主要包括：风力发电机、太阳能光伏阵列、风力发电机控制器、太阳能光伏控制器、逆变器、蓄电池组、水泵等。以中小型风力发电机组为主的风光互补发电系统是最合理的独立供水系统，在很多供水领域已具备和常规能源竞争的条件。单一的风能、太阳能供水的可靠性没有互补系统可靠性高，互补系统可改善风能或太阳能的独立运行不稳定的缺点，其中关键技术把风能和太阳能装机比例优化配置使电压之间的不匹配干扰降到最低，互补供水系统比单一系统会大大增加提水量。

2.3.4 发展风能太阳能供水业的前景

(1) 在我国许多区域由于能源短缺和架设电网难以实现等原因，成了限制灌溉面积扩大的一个重要因素。25% 的耕地得不到灌溉，从而严重制约着我国农业的发展。利用我国丰富的风能太阳能资源，广泛利用风力提水、太阳能提水灌溉，连片开发，形成小农户大农业的局面，是我国中低产田改造的一条重要捷径。

(2) 在中低产田的改良中，涝、渍盐碱地占有较大的比重，这些土地的改良措施主要是排水。这些地区绝大部分为风能太阳能可利用区，有相当部分处在丰富区或较丰富区。如采用风能太阳能排水，可减少土石方工程量和电网架设，降低工程造价和运转费用。

(3) 在畜牧业生产中，开展灌溉人工草场和高产饲草料地是克服草原畜牧业的脆弱性、抵御自然灾害的发生，促进畜牧业稳产、高产的根本途径。世界上一些畜牧业发达国家，都把饲草料种植业作为草原畜牧业经济的坚强后盾，人工种草面积大都在 9.5% 以上，最高可达 37.2%，美国和俄罗斯均为 10% 左右，而我国仅为 1.3% 左右，我国牧区面积大，人口稀少，常规能源供应受到各种条件制约，满足不了畜牧业生产发展的需要。经调查分析表明：我国大部牧区风能太阳能资源和地下水资源的时空分布都非常适合于开展风能太阳能提水灌溉。同时对节约能源和环境保护更具有深远意义。

(4) 风能太阳能提水治沙种草：采用风能太阳能提水技术，有效地促进沙区生态环境的建设。该技术与燃料相比，有节能环保的优势，与电力提水相比，具有投资小，机动性灵活性强，覆盖面广的特点。

(5) 牧场供水风能太阳能水处理应用

大部分牧区水质较差，人畜供水问题未能很好解决，应用牧区丰富的风能、太阳能，结合中小型水处理设备，进行水质处理，以解决牧户的人畜饮水问题，提高牧民的生活质量。同时可应用新技术进行牧区牲畜供水自动化示范，提高牧区供水数量与供水质量。

2.4 研究方向和建议

根据调研数据及国内外技术发展趋势，建议我院风能太阳能供水学科下一步从以下方向做深入研究：

(1) 提高零部件效率，叶片：使风能效率从目前的 30% 提高到 40% ；发电机：提高发电机效率从目前的 70% 提高到 90% ；逆变器：效率由目前的 90% 提高到 98%。

(2) 提高整机的稳定性和效率，通过叶片变桨结构的应用，提高在不同风速下提水机的效率，同时，当整机风速大于设计风速时，能够起到限速作用，保证风力机平稳运行。

(3) 开发了可在变转速下工作的专用水泵（2200—3000r/min），系统效率高于 30%、可靠性大于 95%。

(4) 根据我国不同地区气候、水源、地形、用水形式（人畜饮水、灌溉），应研究不同的风能太阳能供水模式，包括人畜供水模式和灌溉供水模式。

(5) 与风能太阳能相适应的管灌、微喷、滴灌节水灌溉技术研究。

(6) 风能太阳能供水系统优化设计，从整个供水系统的太阳能辐射、风能资源、水塔的容积、供水时间（天数）、每天供水量、每年的供水量进行优化配置，确定泵站的最佳容量，使系统最经济、最可靠。

(7) 风能和太阳能装机比例优化配置使电压之间的不匹配干扰降到最低的研究。

(8) 我国目前风能太阳能供水广泛的运用在边远缺水地区以解决人畜饮水，都是一家一户独立运行。根据调研了解到，国外风能太阳能供水能够实现村镇集中供水。我国下一步应开展风能太阳能供水由独户运行向村镇集中供水领域的研究。

参考文献

[1] 2010 年世界和我国小型风力发电产业现状、市场和趋势与我国小型风力发电产业发展路线图和政策建议研究. 国家能源局/可再生能源及能源效率伙伴关系计划(REEEP) 项目

[2] Stefan Gs änger, Jean Pitteloud.Small Wind World Report2014[R].world wind energy Association.

[3] 全球太阳能电池产业现状 <http://www.solarbe.com/Library/show.php?itemid=234>

- [4] 2010年4月国内外太阳能利用技术调研报告.北京维绿建筑节能有限公司
- [5] Brian D. Vick, Byron A. Neal. Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems [J]. B.D. Vick, B.A. Neal / Solar Energy 86 (2012) 1197–1207.
- [6] Shivakshi Jasrotia a, Arun Kansal b, V.V.N. Kishore a. Application of solar energy for water supply and sanitation in Arsenic affected rural areas: a study for Kaudikasa village, India. Journal of Cleaner Production 60 (2013) 102-106
- [7] Ilyas Omar, Selbourne Makhlo. Energy Alternatives for Water Pumping in Rural Areas - Using a Case Study Approach. Journal for Engineering, Design and Technology Volume 1 Number 1 2003 pp1-14
- [8] Mohammed YAICHI 1, Mohammed-Karim FELLAH. LAJD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 8/2013
- [9] Bojan Đurin, Jure Margeta. Analysis of the Possible Use of Solar Photovoltaic Energy in Urban Water Supply Systems. Water 2014, 6, 1546-1561
- [10] Andrew Corbyn. Small wind-turbine community-based renewable energy systems in the Philippines. WIND ENGINEERING VOLUME 31, NO. 5, 2007 PP 353–361
- [11] 我国风能利用现状, http://www.newenergy.org.cn/html/2006-7/2006714_10939.html
- [12] M. Mañana. Small Wind Energy Systems. State of the Art and New Challenges. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11) Environment and Power Quality (EA4EPQ) Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011
- [13] Shafiqur Rehman, Ahmet Z. Sahin. Wind power utilization for water pumping using small wind turbines in Saudi Arabia: A techno-economical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 4470–4478
- [14] Ilyas Omar, Selbourne Makhlo. Energy Alternatives for Water Pumping in Rural Areas - Using a Case Study Approach. Journal for Engineering, Design and Technology Volume 1 Number 1 2013 pp1-14
- [15] 2011 小型风力发电机国际论坛. 2011年2月24日—25日 北京航空航天大学.
- [16] Moreira, D.F.; Ramos, H.M. Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study. J.

Energy 2013, 2013, 1–9.

[17] Bakelli, Y.; Hadj, A.A.; Azoui, B. Optimal sizing of photovoltaic pumping system with watertank storage using LPSP concept. *Sol. Energy* 2011, 85, 288–294.

[18] Margeta, J.; Glasnović, Z. Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant. *Renew. Energy* 2011, 36, 2268–2277.

[19] SolarServer—PVX spot market price index solar PV modules. Available online:

<http://www.solarserver.com/service/pvx-spot-market-price-index-solar-pv-modules.html> (accessed on 8 January 2014).

[20] District of Columbia Water and Sewer Authority—About Drinking Water Quality in Washington, DC, USA. Available online: http://www.dcwater.com/drinking_water/about.cfm (accessed on 10 December 2013).

[21] Z. Ma, “A sensorless control method for maximum power point tracking of wind turbine generators,” in *Proc. 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl., EPE’11*, Birmingham, U.K., Aug. 20–Sep. 1 2011, pp. 1–10.

[22] J. S. Thongam, P. Bouchard, R. Beguane, A. F. Okou, and A. F. Merabet, “Control of variable speed wind energy conversion system using a wind speed sensorless optimum speed MPPT control method,” in *Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. So., IECON’11*, Melbourne, Australia, Nov. 7–10, 2011, pp. 855–860.

[23] B. Wilamowski and D. Irwin, *The Industrial Electronics Handbook Power Electron. and Motor Drives*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011.

[24] O. Carranza, E. Figures, G. Carcera, R. Ortega, and D. Velasco, “Low power wind generation system based on variable speed permanent magnet synchronous generators,” in *Proc. 2011 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., ISIE’11*, Gdansk, Poland, Jun. 27–30, 2011, pp. 1063–1068.

[25] R. Li and D. Xu, “Parallel operation of full power converters in permanent-magnet direct-drive wind power generation system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1619–1629, Apr. 2013.

[26] J. M. Espí and J. Castelló, “Wind turbine generation system with optimized DC-link design and control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 919–929, Mar. 2013.

- [27] G. Wang, R. Yang, and D. Xu, "DSP-based control of sensorless IPMSM drives for wide-speed-range operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 720–727, Feb. 2013.
- [28] M. P. Kazmierkowski, M. Jasinski, and G. Wrona, "DSP-based control of grid-connected power converters operating under grid distortions," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, no. 2, pp. 204–211, May 2011.
- [29] T. Atalik, M. Deniz, E. Koc, C. Gercek, B. Gultekin, M. Ermis, and I. Cadirc, "Multi-DSP and -FPGA based fully-digital control system for cascaded multilevel converters used in FACTS," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 8, no. 3, pp. 511–527, Aug. 2012.
- [30] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, "A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, p. 39-36, 2011.
- [31] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1122–1132, Mar. 2013.