

# 超级能源网络

Grant, P. M.1

(W2AGZ Technologies, San Jose, CA 95120 USA )

**摘要:** 如何提供充足、清洁和价格合理的能源, 来满足整个社会人口的不断增长和人们对高质量生活水平的渴望, 是我们这一代人和我们的后继者在整个 21 世纪所面临的主要的挑战。我们将“清洁”定义为燃料不仅在交通运输或发电时达到污染物零排放, 而且还尽可能是生态入侵性最小的方式。我们提出了迎接这个挑战的设想, 一种包含核能、氢和超导技术的超级能源网络。

**关键词:** 核能; 氢; 超导性

## 1 引言: 问题

根据美国能源部(DOE)2004 年国际能源展望, 世界能源消耗预计会从现在每年 400quads 上升到 2025 年的每年 600quads 以上, 增长超过 50%。并且, 据预测本世纪中叶人口会增长到 100 亿, 全球工业化速度会大大超过美国。由于全世界都想达到美国的生活水平, IEO 预测了 2004 年的能源消费水平, 工业化国家会达到每年 215quads, 新兴的国家是每年 185quads, 将来分别每年都会超过 270 到 330 quads。如何提供和构建世界能源经济和基础设施, 可能是人类文明在新世纪初所面临的主要的长期挑战。主要的挑战是在环境影响最小、生态入侵性最小方式下实现上述目标。

社会因素中首要的不确定性是, 地球上剩余矿物燃料的可开采储量。尽管对观测到的全球温度升高和相应增加的二氧化碳排放量(现在的排放量是每年 6000MMTCE, 在 2025 年会达到每年 10000MMTCE)之间可能的联系存在争议, 但是都同意至少存在物理上可能的联系, 在今后的 10 年内可能会产生一个国际性的“无悔”政策, 即在交通运输和热能及电能生产中严格限制或者消除矿物燃料的使用。这个趋势最主要的预兆是全世界都致力于发展新技术, 用氢代替碳氢化合物作为陆地交通运输的燃料。我们已经讨论过仅仅是生产足够的氢来代替现在美国汽车和卡车使用的石油, 通过电解水或者水、甲烷热分解所需要的额外电能是现有美国发电容量的两倍。由于采用矿物燃料直接或者间接生产氢气会产生大量的二氧化碳, 而生物能、风能和太阳能需要占用大量的土地, 因此结论是只有核能才适于实现氢能经济。

## 2 超级电网: 解决方案

特定的条件下, 氢和电力被认为是“可以相互替代的”。很多情况下两者都能互相替代或者可以互相转化——氢可以作为潜在的能源以及电力生产原动力。然而, 最现实的是两者都提供, 让使用者来决定到底采用哪一种。图 1 所示为城市应用情形, 核电厂集中生产氢和电力, 屋顶的太阳能电池和燃烧生物燃料作为补充, 通过“超级电缆”将整个社区连接起来, 通过氢冷却超导线路传送低温氢或者电力。

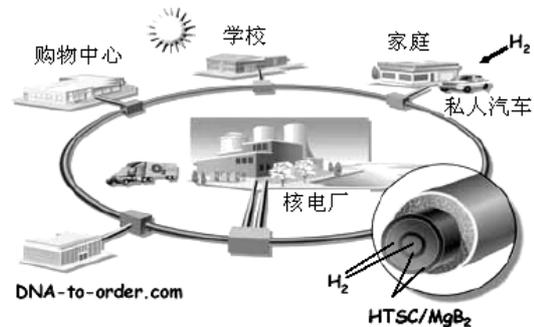


图 1 通过核电厂和屋顶的太阳能并且利用超导环网连接起来, 能源结构完全由电和氢组成的一个城市社区的原理图  
这种基于城市社区的概念可以随之扩充为“大陆能源超级网络”, 一个使用上述超级电缆在全国范围内将核电厂连接起来的网络。这个概念在一次探索工程可行性的研讨会上进行了研讨, 包括系统稳定性, 可靠性和物理上的安全性, 其结论是尽管规模及投资很大, 但原理上这个方案能够用现有或不久的将来可用的技术来实现。

## 3 核电站: 超级网络的核心

由于禁止排放碳化合物或自然能源的耗尽, 上面我们假设, 已经证明以矿物燃料的持续燃烧作为交通工具和发电厂的主要能源是不能接受的。另外, 我们的社会要求它的能源结构要对生态和环境有最小的入侵性, 能够保留尽可能多的生物栖息环境, 所以结论是只有核能才可以满足上述的两个目标。

几个简单的例子就能够充分表明, 为什么不得不将可再生能源的大量利用排除在基本能源之外。

据估计,只是用电解氢代替目前美国每天的汽油消费,全国就需要生产出额外的 400GW 不间断可用的电力。为了满足此需求,需要建设 500 个 800MW 的火电厂或者 20 个 20GW 的三峡水电站。

根据两种常用可再生能源可以预见的效率,风力发电需要占用 130,000 平方公里的土地(大体上相当于纽约州的面积),光电太阳能需要 20,000 平方公里的土地或者说整个丹麦的面积,这是假设利用率为 100% 估计的。每一种现有可再生能源技术的利用率平均很少超过 25%,所以需要的土地量是上面的 4 倍。

生物能也不会好到哪里。在美国由生物能供应 400GW 电力,需要相当于内华达州(美国第七大州)面积的土地用于农业生产,而且还需要更多的能量来生产所必须的肥料。处理 400GW 火电厂的二氧化碳排放,需要大量的地下或者海底存储空间,会带来环境影响的不确定性。

由于矿物燃料和可再生能源环境在生态方面的问题,只有核裂变能量才是适当的考虑,即使现在它的应用前景也是黯淡的。需要建设 400 个 1GW 的轻水反应堆或者 50 个与东京 Kashiwazaki Kariwa 大小一样的 8GW 核聚变电厂。然而 Kashiwazaki Kariwa 的能量密度达到了令人吃惊的 1800 瓦特/平方米,包括所有的附加设施、临时“废料”存储和附近荒地的面积,而风能和太阳能即使在最高容量的情况下才是 10—100 瓦特/平方米。因此生产 400GW 电力的核电站原则上需要和旧金山市一样大的地方。由于出现高温氦气冷却反应堆技术,使其不致熔毁,将来大部分核能发电机可以安全、方便的放到地下。

#### 4 超级电缆: 超级网络的主干

在 1911 年发现直流电流通过超导线路没有损耗的超导特性后不久,提出了超导应用于输电和配电电缆。然而,早期的超导体主要是自然金属,其超导性在通过一般电流或者有磁场时就会消失。此外,为了保持其超导性还需要大量的液态氮,这也是一个主要的障碍。直到二战后,发现了像 NiTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 等“硬”超导合金,能够维持正常输送电流,可以使用这些材料生产距离长的线路,另外液化氮装置的效率也有了提高。可以认真考虑通过超导体来传送电力了。

1976 年,IBM 的 Richard Garwin 和 Juri Matisoo 发表了一篇论文,提出了建设传输容量为 100GW,

长度为 1000 公里的直流超导输电线路,此线路利用最近研究的 Nb<sub>3</sub>Sn II 型化合物,利用温度为 4.2K 的液体氮来对整条线路进行冷却。当时考虑利用远方核能电厂或者水电来满足国家正在增长的大部分电力需求,依靠使用超导电缆,在接近零损耗情况下的大功率输送变得具有经济性。大体上,这些想法提出了超级网络很多方面的概念。19 世纪 70 年代和 80 年代早期,出现了直流和交流超导可行性的研究,在纽约 Brookhaven 和奥地利的 Graz 建设了两条具有里程碑意义的交流超导电缆并试验成功,后者在实际系统中还运行了几年。这一阶段至少发表了两篇报告,研究了电力传输中超导电缆和氢的联合使用。Bartlit, Edeskuty 和 Hammel 考虑使用液态氮冷却,液态氮作为热屏蔽罩的低温超导线路输送电力,氢最终在国家航空和宇宙航行局用做火箭的燃料。1975 年斯坦福大学和 NIST 联合提出了一个报告,测试了使用温度为 14K “冰泥状氢”作为冷却剂,Nb<sub>3</sub>Ge 作为电缆,过渡温度接近 20K 的超导体,然而,一直没有注意使用氢本身作为能量介质。

随着 1986 年高温超导体的发现,19 世纪 90 年代初期出现了可实际应用的线路。Schoenung、Hassenzahl 和 Grant 利用新材料重现了 Garwin 和 Matisoo 的工作,得出一个结论,超过 200 公里时,利用液态氮冷却的 HTSC 直流“电力线路”与常规高压直流输电线路或者天然气管道相比具有经济上的竞争性。世界范围内,虽然现在规划或已经试验了很多原型 HTSC 超导电缆,所有交流系统应用的目标都是 66KV 以上的输电和配电电压等级,我们还要强调,运用超导的主要优势在于超导可以在相对低的电压下,输送很大的直流电流。只有在电流不变的情况下,超导体才具有理想的导电性,否则,由于发热产生的滞后损失所需的额外冷却容量要超过电缆冷却所需的容量。此外,使用低电压将减少绝缘压力、提高电缆的可靠性,延长电缆的使用寿命。

#### 5 氢与电能输送之间的平衡

超级电缆最重要的设计事项可能包括氢和电能输送的绝对和相对值。在整个“氢能经济”中,这样的问题还需要从社会和经济方面解决,很多答案都依赖于氢的运输和最终的使用。将来到底是用作热能、运输工具燃料或者能量存储方式,还是三者的混合,混合的比例又是多少?作为最初方案讨

论的目的,我们将采用“最大的社会透明度”或者对现在能源用户“最小的干扰”的原则。说就是,我们只是将氢假设为家庭能量的介质,能够完全代替当前碳氢化合物的消费(天然气、液化石油气或者民用燃料油),同时家庭电力需求保持或多或少的一致。氢的传输可以假定为是独立分布式的。典型的加利福尼亚家庭(像作者)消费的电力和热能每年都换算成天然气形式。假设在任一给定时间的最高负荷是 5KW,我们设定一个超级电缆通过超导体可以传送 1000 MW 电力,通过流动的氢可以传送 1000 MWt,为一个有 200,000 家庭的社区服务(尽管设备的设计容量要大于当地实际容量,例如单相电流为 200 安培的线路可以带 50KW 的功率,实际上假定只有很少一部分用户在任何时间都有最大的能量需求,以此确定输电和发电容量。

图 2 是一个基本超级电缆的物理特性略图和横截面图。注意每条“电缆”传输一半的氢能量。

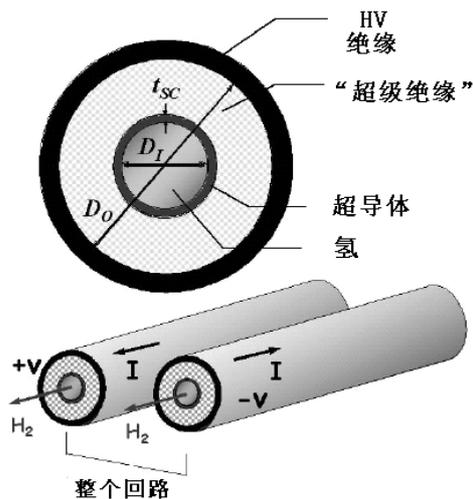


图 2 超级电缆双极回路的一极横截面示意图  
(按照大概的比例)

通过工程和热性能计算表明,对于标称直径为  $D_I = 15 \text{ cm}$  (内管液态氢流速大约为  $3.5 \text{ m/s}$ ) 和  $D_O = 20 \text{ cm}$  的超级电缆,使用现有商业化的高温超导材料可以容易做到所需的传输容量。

## 6 在超级电缆中用氢存储电能

最后,这些超级电缆中的氢不仅作为冷却剂和能量输送介质,而且还有可能作为电能存储的媒介,这是很有趣的。例如,假设在图 2 所示的回路中,液态氢通过双极循环,而不是只是在一个极单向流动,只有很少的一部分流出做传递用,大部分将来都用于转化成电能(这个设定意味着需要在回

路的合适距离上放置 LH2 “缓冲罐”,来确保达到提供不间断冷却的目的)。表 1 对比了可能的超级电缆能量存储回路和美国现有的两大抽水蓄能电站和压缩空气储能装置。

表 1 超级电缆潜在的储能容量和传统系统的对比

设备	容量 (GWh)
Raccoon Mountain (TVA)	32
阿拉巴马州 CAES	20
DI = 15 cm 超级电缆回路	33

400 公里长的超级电缆回路存储的能量相当于田纳西流域管理局 (TVA) Raccoon 山脉上的水库——美国最大的抽水蓄能电站,所储存的能量。也确定了可逆燃料电池的转换效率。当然,并不是所有容量都可以直接利用,为保持足够制冷效果,必须在上述“再制冷增压器”10~20 公里处安装备用供给装置。全国范围内发展超级电缆,利用液态氢来存储电能,可以促进长期努力的电力商业化的实现,因而会给电力市场带来革命。

## 7 归纳和结论

社会工业化程度的不断提高使能源需求不断增长,本文提出了满足这一需求的技术和社会的设想。我们持这种观念,当前技术上的可行性不能依赖对将来的预计和不能预知的新材料的发现。尽管如此,还需要致力于大量工程问题,例如,如何缓解双极电缆之间很大的磁场力,它由 100KA 电流在其周围产生的磁场造成。同轴设计是不是会更好一点?故障情况下我们如何应对高电压和减小故障电流?需要哪一种电力电子设备来保持尽可能低的波纹系数和在恒定电流下控制负荷的改变。还存在大量的能量使用变量,都具有实在的社会和经济决定性,比如电力和以前提到的氢之间的分配,以及与配送和使用氢有关的安全问题。

最后,围绕超级电缆我们还有目前最重要的问题需要讨论。就可持续性而言,依赖于选择循环和回收技术,作为超级网络的核心先进核能可以有 300~800 年的储量。为了实现这些技术,世界需要面临将核材料转化为大规模毁灭性武器的可能。必须建立世界性的法律和机构,来控制强制放射性元素用于和平目的,通过回收和扩大再生产,以及最终的处理,来阻止无赖国家的武器计划。只有这样,才有可能实现原子能之父的预见和渴望,一个“原子和平”的世界,产生一个不依赖于地理上矿物燃料存贮是否丰富的清洁能源。这可能就是超级

网络留给下一代最宝贵的遗产。

## 感谢

## 附录：术语

1quad 相当于  $10^{15}$ Btu (英国的热量单位) 或者  $3 \times 10^{11}$  千瓦小时, 一般来说 1quad 相当于足够整个纽约市每年所用的能源。MMTCE 表示百万吨的二氧化碳, HTSC 表示“高温超导体”, 这些材料可以在 30K 温度以上进行能量传输。单词“hard”或者“type II”为实际超导体的相应描述。

作者感谢那些几年以来在电力科学研究院支持、鼓励和给自己带来灵感的同事们, 特别要感谢这个学科的奠基人 Chauncey Starr, 他是能源科学和技术导师, 是公共政策的主要决定者。