人工驱动的超级电容充电型LED家用照明系统

徐国栋，邓月光，刘静，邓中山

(中国科学院理化技术研究所，北京 100190)

摘要：在对比阀控密封铅酸蓄电池、超级电容充放电性能的基础上，提出并实现了一种基于超级电容充电及LED的人工驱动型家用照明系统，该系统以超级电容为供电电源，以手摇发电机为充电电源。实验测试表明，此家用照明系统使用功率为65W的手摇发电机为27V/24F的超级电容模组充电需时约4.67分钟，而其放电可使4W(24V，0.169A)LED灯连续正常工作约24分钟。本系统具有使用寿命长、环境友好、成本低等优点，在当前能源十分紧缺的情况下可望推广成为一种重要的绿色家用电器。

1引言

近年来，随着世界工业和社会经济的高速发展，人类在能源紧缺方面面临着前所未有的严峻挑战。据预测，如果按照当前的利用水平开采世界已探明的能源，煤炭资源尚可开采100年，天然气最多可供开采50～60年，存量不足2000亿吨的石油将在100年后耗尽，而且这些能量利用过程中增加的环境污染负担也是十分巨大的。因此，研究开发替代性绿色能源具有至关重要的现实意义。在各种能量利用形式中，人体能是一种独特但却被长期忽视的能源，它同太阳能、风能一样廉价，不受气候变化影响，收集转换并不复杂且不会带来污染，既能自收自用，也能“零存整取”。人体能驱动产品的环保性体现在这些装置在其使用的生命周期内不消耗不可再生能源所提供的能量，在生命周期评价方法中人体能的利用被看作是对环境无污染的方式。当前，由于传统发电方式存在的一些天然不足，人体能量利用技术逐渐浮出水面。

围绕人体能的利用，国内外已有一些尝试。Pandian设计了一种利用孩童在操场和公共场所玩秋千、旋转木马等释放的人体能来发电，以供给灯、风扇等电器使用的能量转换系统；Starner提出了利用人体在行走和手指运动中所释放能量来给可穿戴式电脑供电的方法；Sarich发明了人体能发电系统，在特制的鞋底设置发电机，人体在行走时借助机械或气动机构驱动发电机产生电力；杨富闳提出了利用全身人力驱动机械装置发电并通过蓄电池储电的手脚并用人力发电机；Jia和Liu研制出基于人体能量驱动的液体金属切割磁力线式发电装置，通过收集躯体活动释放的能量，发电效率可达45%。但这些技术由于各自的针对性，尚不能满足家庭特别是无电力的偏远地区快速用电及照明的需求。

为实现有实际价值的人体能量利用技术，本文尝试发展一种将人体能量驱动、超级电容充电及LED照明器集于一体的家用照明系统，可确保快速低成本充电，且照明持续时间长，用能环保，不依赖电力网等。

在各种电能储存方式中，超级电容具有如下优势：1)功率密度极高，为电池的10～100倍；2)充电速度快，可采用大电流充电，能在几十秒到数分钟内完成充电过程；3)循环使用寿命长，充放电次数可达数十万次；4)效率高，充放电过程基本是可逆的；5)低温性能优越；6)控制简单；7)绿色环保；8)安全性好。而在各种灯具中，LED是一种全面兴起的固态半导体器件，相比于白炽灯、卤钨灯和荧光灯等普通光源，它有如下优势：1)发光效率高、光谱窄、光单色性好、可直接发出有色可见光；2)节能、耗电量少。在同样的照明效果下，LED耗电量仅为白炽灯的1215%，是荧光灯管的50%；3)使用寿命长、体积小、重量轻、机械强度大、耐振动和冲击；4)安全环保，无热辐射，无污染，不含汞、钠等可能危害健康的物质。

正是由于超级电容在快速充电和储能方面以及LED在照明节能和发光效能等方面的综合优势，使得它们比较适合用于家庭照明系统。本文将推进这一方面的研究。

2人工驱动超级电容及LED系统

研究中采用超级电容作为系统的储电环节，通过对低电压、大容量的超级电容单体进行串并联焊接，可组合出适用于本系统的超级电容模组。超级电容单体采用北京合众汇能科技有限公司出产的217V/120F超级电容20只，连接之后，经测试可得超级电容模组的额定电压为27V，额定电容量为24F。

图1给出的是集手摇发电机、超级电容模组及LED灯于一体的家用照明系统示意。图2为据此实现的实物图。该系统以手摇发电机提供电力，用超级电容模组充电及储电，通过DC-DC模块电源加以稳压，提供给负载LED灯恒定的电压，以维持其正常照明。

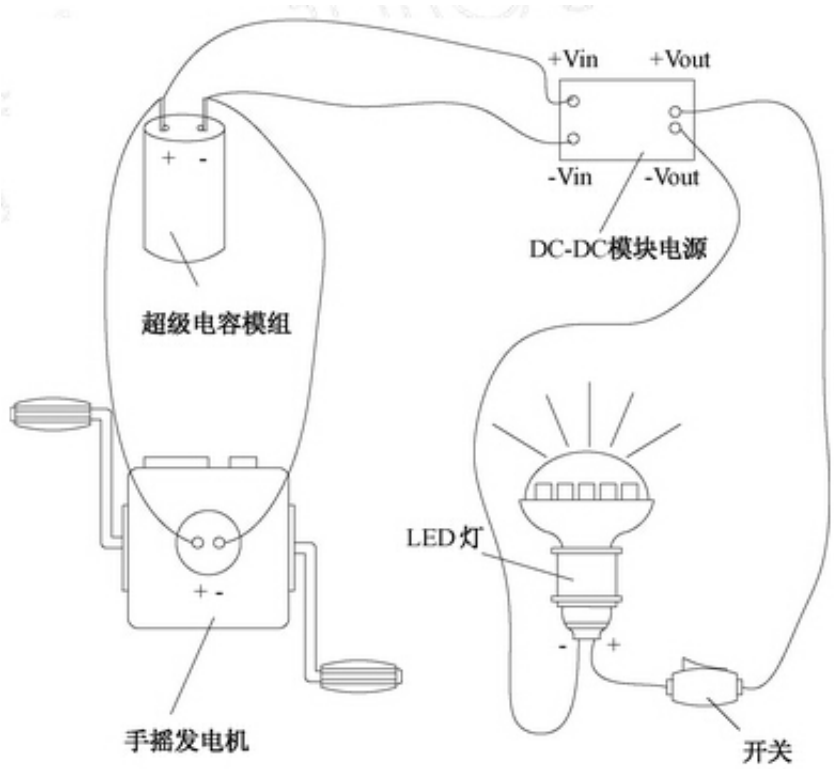

图1　基于超级电容及LED的人工驱动型家用照明系统原理图

这里，手摇发电机是一种人力发电装置，由于其具有独立电源功能且兼具环保的特点，近年来使用范围逐渐扩大，主要用于电力供应不足场所的小功率暂时供电。本文选用的发电机为重庆微电机厂制造的制式军用手摇发电机，型号BWP-413，标称输出功率65W，输出电压25V，充电输出电压30V，本机是一永磁三相交流同步发电机，经整流器整流，电容滤波以及晶体管串联稳压，获得平滑稳定的直流输出。

实验中采用的LED灯由64颗灯珠通过电路板连接并加装外壳构成，其额定电压24V，额定功率4W，亮度约为白炽灯60W亮度水平。

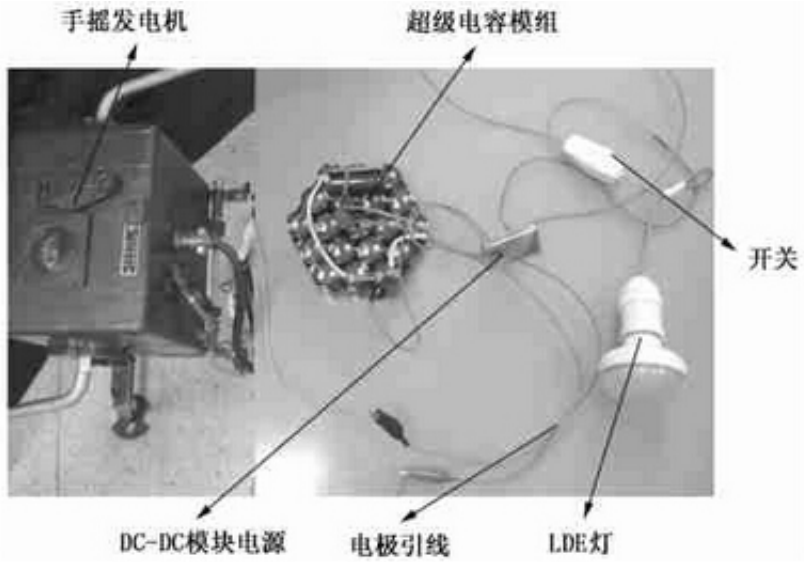

图2　人工驱动超级电容及LED家用照明系统实物

为解决超级电容放电时的电压衰落问题，设计中采用了宽范围电压输入、稳压输出的DC-DC转换技术。实验中DC-DC模块电源购自北京胜达昊天科技有限公司，型号为SD10-24S24W，输入电压9～27V，输出电压24V，最大输出电流可达0.42A。

3实验结果及讨论

研究中分别对阀控密封铅酸蓄电池和超级电容模组进行充放电实验，比较二者的理论与实际充放电时长倍数关系，借此评估超级电容在快速充电方面的优势。在较宽的工作电流范围内，LED的发光亮度与工作电流大小呈线性关系，因此本文以工作电流的大小来衡量LED的发光亮度。

用手摇发电机对蓄电池进行的充电实验表明，在充电电压为24V时，电路中的电流为1A，手摇发电机对蓄电池的充电功率为24W，其对蓄电池的理论充电时间为7h。放电实验表明，充满电的24V/7AH铅酸蓄电池可保持4W的LED灯泡正常工作30.5小时，这比理论计算时间42小时少。此现象可解释如下：由于蓄电池的电压下降而无法使LED在额定电压下工作导致蓄电池的能量未完全释放。对蓄电池手摇充电15分钟后给LED灯供电，LED正常工作44分钟，随后电路中电流无法维持，正常工作结束。蓄电池实验表明，人体运动一定时间，可以得到较此时段长3～4倍之间的正常照明时间。

对超级电容模组的充电实验表明，充电516分钟后即可将超级电容模组由0V充电至额定电压27V，电容模组两端电压由9V升到27V的时间为4.6分钟，电容模组两端电压由22V升到27V的时间仅为2.1分钟。接LED灯放电时，LED灯正常工作11分钟，期间超级电容模组两端的电压线性下降，回路中电流保持不变。

图3显示了手摇充电时模组中单体超级电容的电压变化情况，其中曲线A-J分别代表10个不同的单体电容，可以看出超级电容模组内每个单体电容的电压变化情况基本相同，单体超级电容之间的一致性比较高，可避免累积效应，不会导致充电时一些单体电容因超过尖充电压损坏，而其他单体电容电压则达不到额定电压因而充不进电的情况出现。

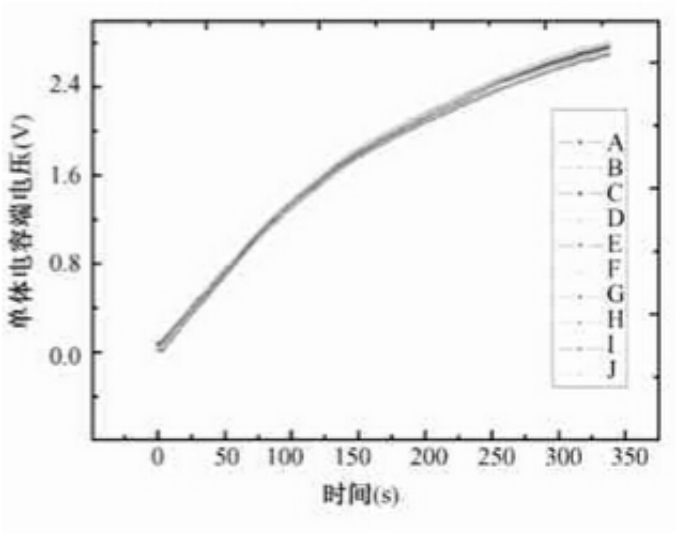

图 3　充电时各个单体电容两端电压变化测试结果

超级电容模组联合DC-DC模块电源实验表明，DC-DC模块电源的稳压效果很好，工作时输出电压稳定在24V，可保证LED灯正常工作，电流稳定，约为0.17A。实验还显示了此DC-DC模块电源在超级电容模组电压为5.65V时，其仍能将输出电压稳定在24V，这增长了超级电容模组的支持时间，使其储电能力得到了深度挖掘，可释放超级电容模组储电能力的95.6%。

如图4所示，超级电容模组电压由26.1V下降到9V用时22.3分钟，而理论上模块工作效率为100%时支持时长为29.7分钟，由此可推算出DC-DC模块电源工作效率为75.2%。超级电容模组电压由26.1V下降到5.7V用时23.9分钟，由此推算出的DC-DC模块电源工作效率为74.4%。由DC-DC模块电源输入功率与DC-DC模块电源输出功率的比值计算得到的DC-DC模块电源转换效率为76.4%，误差均小于5%。

图5中进一步测试还表明，超级电容提供给DC-DC模块电源的电流随着电容模组电压的下降而升高，以维持提供给DC-DC模块电源的输入功率基本恒定，进而保证DC-DC模块电源的输出功率稳定。

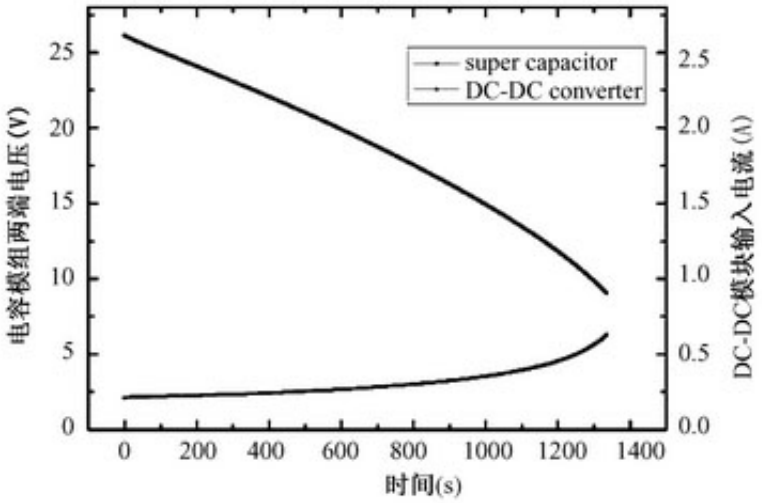

图 4　超级电容模组输入电流随其两端电压变化测试结果

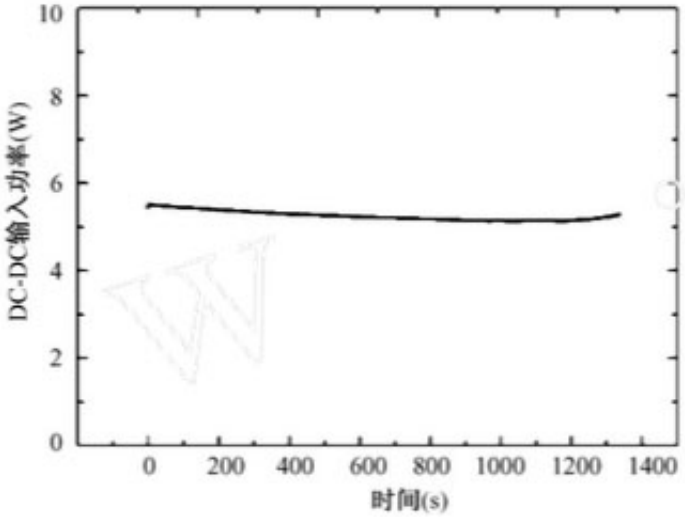

图 5　超级电容提供给 DC-DC 模块电源输入功率变化测试结果

表1显示了本文研究的几种蓄电方式的充放电时长对比情况，可见，超级电容模组与DC-DC模块电源的储放电组合及其他几种方式相比，具有明显的放电时长和充放时长倍数关系优势，既具有快速充电效果又具有充分释放电容存储能力的效果，因而本研究设计的系统采用此组合。

超级电容具有快速充放电的特性，但是由于受发电机功率的限制，使得人工充电的速度受到了限制。但相比于蓄电池来讲，超级电容的充电明显迅速得多，这在家庭照明中具有不可替代的价值。而且对超级电容充电没有对蓄电池充电的诸多要求，例如过压保护、稳压充电等，这一方面可以减少设备复杂性，同时也降低了成本。采用DC-DC模块电源后，更大程度地释放了超级电容的能量存储能力。

表 1　几种不同蓄电方式的充放电时长对比表

实验装置		充电时长 (min)	放电时长 (min)	充放时长倍数关系
蓄电池	理论	7（h）	42（h）	6
	实验 1	7（h）	30.5（h）	4.36
	实验 2	15	44	2.93
超级电容	实验	2.1	11.2	5.33
超级电容＋DC　DC	100 %	4.67	32	6.85
	75 %	4.67	23.87	5.11

另外，超级电容的充电速率与人体运动的输出功率成正比，此方面需要进一步从技术上予以改进。要提高整个系统的发电能力，挑战性的困难在于如何充分发挥人的能力和提高发电机的功率，毕竟，人体可以较长时间输出的运动功率是有限的，约为60～130W。以本方案采用的发电机65W的功率计算，每天满载工作两小时，一个月下来发电量仅为3.6度，这一情况可以通过对系统加装太阳能辅助发电装置加以改善，目前无法完全替代其他常规能源在家庭中的应用，但在现今的能源形势下，这也是非常有意义的，尤其是在偏远缺少电力输送的贫困山区以及极地等极端环境中，此系统可以给这些地区的人们带来光明，目前实现的照明效果已足以满足正常使用。

表2显示了系统成本分析的情况，整个系统的成本高低取决于超级电容模组的成本。其中超级电容模组零售与批量价格由北京合众汇能科技有限公司提供，现阶段超级电容的成本价格偏高，主要是国内的销量不足导致上下游的成本较高所致，随着超级电容产业进一步发展，市场空间不断扩大，这一组件的价格会不断下降。

表 2　系统成本分析表

超级电容模组参数		超级电容模组成本（元）		电容占整个系统价格百分比（%）		支持负载时长	
		零售	批量	零售	批量	minute	h
27V	24F	748	548	54.7	46.9	23.87	0.4
30V	70F	900	700	59.2	53	93.64	1.56
30V	125F	2400	1900	79.5	75.4	167.2	2.8
30V	300F	4800	3600	85.3	85.3	401.3	6.7

总之，超级电容与LED的同时采用，使得过去一度被忽视的人体发电技术有可能得到大范围应用，直至普及为一种家庭必备的辅助照明系统，其现实意义十分明显。

4小结

为建立超越于当前电网之外的独立型家用照明系统，本文尝试了采用人工驱动超级电容及LED来实现照明供电的方法，研究中对比了两种电存储模式彼此的优缺点，并通过实验评估了二者的充放电特性和规律，在此基础上设计并实现了基于超级电容储能的人工动力发电供LED的家用照明系统，实际使用效果较好，已显示重要实用价值。本文还对系统进行了成本分析，结果表明降低储电环节即超级电容的成本是控制整个系统成本的关键。

本系统存在的问题是采用了手摇形式的发电装置，实验过程中受试者会因此感到疲劳，甚至无法输出所需要的功率，持续长时间手摇发电常人难以坚持，这会降低本系统的适用人群。若将手摇式改成脚踏形式可能会显著改善这一问题。如能针对老人、孩子和成人的身体情况，设计出不同的功率档次，将使得此系统真正做到老少皆宜。

未来还可以设计数字化系统来显示电容剩余电量，甚至在一个人通过锻炼发电后，显示发出的电量及经济当量值，或通过发声装置报出此番锻炼后减少了多少二氧化碳和粉尘的排放量，为环境保护做出了何种贡献等，从而提高人们通过锻炼来发电的积极性。此系统若辅以太阳能发电装置，将大大提高系统的适应能力，相关技术除家庭外，还可推广到工厂、学校、小区、街道等场合，有关研究可进一步展开。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/97594.html