

热电热泵在非设计工况条件下的性能分析

张冷, 卢豪, 刘忠兵

湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

摘要 采用直流电源模拟太阳能电池板输出不稳定电压驱动热电热泵工作, 通过实验测试研究了在连续长时间工作、电压跳跃变化和极限电压工况下, 热电热泵冷端温度 T_c 、热端温度 T_h 、冷热端温差 T_d 的变化对其制冷/制热的性能系数(COP)的影响。结果表明, 在适宜的电压范围内, 热电热泵的制冷速度快、工作性能稳定且能够长时间连续工作, 而制热效果明显优于制冷效果, 制热效率(E_h)平均高于制冷效率(E_c)约0.8; 热电热泵的最佳工作电压区间为2~4 V, 此时的冷端温度低、制冷量大、COP值在理想范围($E_c=0.87\sim 1.89$, $E_h=1.75\sim 2.75$); 随着工作电压增高, 热电热泵的冷热端温差增大, COP值减小, 当电压大于8V后, 冷热端温差大于45°C, COP值降至最小, 工作性能较差。

关键词 热电热泵; 非设计工况; 冷热端温差; 性能系数

中图分类号 K311

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.009

Analysis on Performance of the Thermoelectric Heat Pump under Off-design Conditions

ZHANG Ling, LU Hao, LIU Zhongbing

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract In the photovoltaic and thermoelectric system, the output voltage and current of the solar panels constantly changed with solar irradiance, resulting in the thermoelectric heat pump working under off-design conditions for a long time. To test the performance stability and affordability of the thermoelectric heat pump under off-design conditions, a DC power device replacing the solar panels was used to output unstable current to drive the thermoelectric heat pump. Under three different off-design conditions including continuously working, voltage jumping and limiting voltage, the mutual relation between hot side temperature T_h , cold side temperature T_c , temperature difference T_d , COP, cooling (heating) capacity and operating voltage were analysed. The results showed that the thermoelectric heat pump refrigerated fast, and it could remain stable. Its heating efficiency was about 0.8 higher than cooling efficiency which indicated that the effect of heating was obviously better than cooling. With the increasing of operating voltage, the temperature difference became greater, but the COP smaller. In addition, the best operating voltage of the thermoelectric heat pump should be between 2 V and 4 V and the effect of heat dissipation had a great influence on the cooling and heating performance of the thermoelectric heat pump.

Keywords thermoelectric heat pump; off-design conditions; temperature difference; coefficient of performance

热电热泵(热电制冷器)与传统机械式制冷相比有很多优点, 如结构简单、工作环境要求低、尺寸小、重量轻、工作中无噪声、制冷速度快、不需要制冷剂、使用寿命长且易于维护等。所以热电制冷技术得以在实验技术、医疗技术、航天技术、船舶技术等领域发挥重要作用^[1,2], 例如医疗领域的低温手术和药品保存^[3-5]。由于热电热泵制热的性能系数

(coefficient of performance, COP)较高, 可将其用于回收利用低品位能^[6], 与蒸汽压缩式热泵结合可获得更好的制热效果^[7]。研究发现, 通过热电热泵的级联^[8-10], 可提高其制冷/制热的COP值; 良好的散热效果、较低的温差和较小的热阻均有利于提高制冷/制热的COP值^[11-18]。

在普通的热电系统中, 热电热泵一般按最大制冷量和最

收稿日期: 2013-07-03; 修回日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178170)

作者简介: 张冷, 教授, 研究方向为建筑节能与热回收, 电子邮箱: zhangling@hnu.edu.cn

引用格式: 张冷, 卢豪, 刘忠兵. 热电热泵在非设计工况条件下的性能分析[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 62-66.

大制冷系数进行设计^[19,20],热电热泵常处于设计工况范围内工作。然而,在太阳能热电热泵系统(photovoltaic and thermoelectric technologies)中,由太阳能电池板发电直接驱动热电热泵工作,电池板输出的电压和电流随着太阳辐照度变化而不断变化,致使热电热泵长时间处于非设计工况下运行。本文在实验测试的基础上研究热电热泵在连续长时间工作、电压跳跃变化和极限电压工况下的性能稳定性,以为后期太阳能半导体辐射墙体空调系统的研究提供依据。

1 实验方法

1.1 实验模型及原理

实验采用直流电源模拟太阳能电池板输出不稳定电压和电流。如图1所示,通过直流电源施加一个低压直流电驱动热电热泵工作,热量从热电热泵的一端转移到另一端,从而产生一端变冷一端变热的现象。用保温材料围成散热通道与加热水箱壁面相贴,通过控制水箱中水温可保持通道内起始温度。在图1中的圆点部位(a,b,c,d,e)布置了PT100温度传感器,通过信号线连接至无纸记录仪,分别记录空气、辐射铜板、热电热泵冷端、热电热泵热端、散热通道测点的温度。实验规定:制冷模式,热电热泵靠近辐射铜板侧为冷端;反之,则为制热模式。

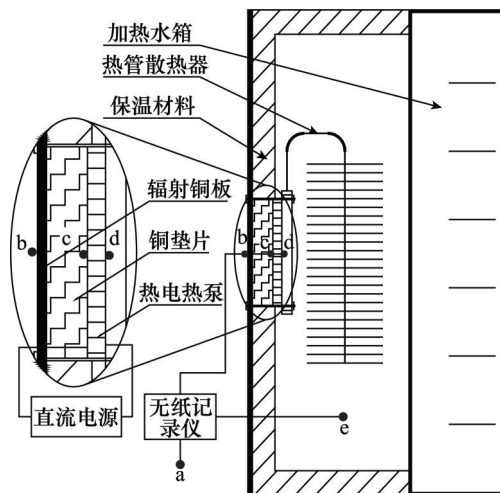


图1 实验模型原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of the model

1.2 分析指标

热电热泵工作时,热量从冷端转移到热端,冷量通过辐射铜板辐射到房间,热量由热管散热器排至大气中。

冷端产冷量为

$$Q_c = SIT_c - I^2 R/2 - K(T_h - T_c) \quad (1)$$

热端散热量为

$$Q_h = SIT_h + I^2 R/2 - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

输入功率为

$$P = SI(T_h - T_c) + I^2 R \quad (3)$$

制冷/制热的性能系数分别为

$$E_c = Q_c/P, E_h = Q_h/P \quad (4)$$

式中, S, R, K 分别是热电热泵的塞贝克系数、内阻系数和热传导系数; I 是直流电源输出的电流值; T_h, T_c 分别是热电热泵的热端温度和冷端温度。

2 结果及分析

实验分别测试了制冷/制热两种模式时,热电热泵在连续长时间工作、电压跳跃变化、电压依次增大(直至击毁器件)这3种非设计工况条件下的性能。制冷工况下,环境温度和通道温度分别维持在24℃和30℃;制热工况下,分别维持在18℃和30℃。

2.1 连续长时间工作

直流电源的输出电压稳定在4V时,热电热泵在制冷/制热两种模式下分别连续运行并测试24 h的冷热端温度和温差变化曲线如图2所示。可以看出,热电热泵冷热端温度及温差在短时间内(约15~20 min)趋于稳定,且能保持其稳定的工作性能。说明热电热泵制冷速度快,性能稳定,适应长时间连续工作。

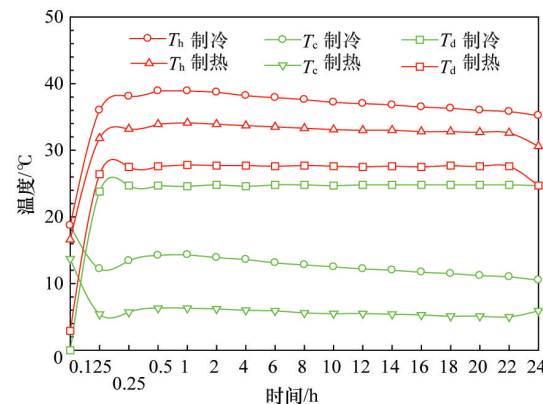


图2 冷热端温度及温差变化

Fig. 2 Variation of T_h , T_c and the temperature difference T_d

制冷模式下冷热端温度 T_c, T_h 分别高于制热工况下约6℃、4℃左右,原因主要在于制冷工况下的环境温度高于制热工况。而制冷模式下冷热端温差 $T_d(T_h - T_c)$ 却低于制热工况约3℃,因为制冷工况下热端依靠热管散热器散热,散热效果较好,冷热端温差 T_d 更低。

2.2 电压跳跃变化

电压跳跃变化工况下,冷热端温度随时间的变化曲线如图3所示,工作电压按照2、4、6、8、6、4、2 V的顺序跳跃变化,热电热泵在每组电压下工作15 min。可以看出,随着电压跳跃增大,热端温度 T_h 不断升高。因为电压越高,电流越大,产生的热量越多,导致温度越高。电压由2~4 V跳跃时,冷端温度 T_c 随着电压跳跃增大而降低;电压由4~2V跳跃时,冷端温度 T_c 随着电压跳跃减小而升高。说明2~4 V是热电热泵最合适的工作电压区间,制冷效果最好,冷端温度更低。从图3还

可以看出,相同电压下,在制冷模式工作时,冷热端温度 T_c 、 T_h 均高于制热模式。原因主要在于制冷模式工作时,环境温度高于制热模式,虽然电压跳跃增大或减小,但冷热端温度并未发生剧烈的不稳定变化,可见热电热泵的制冷工作性能较稳定。

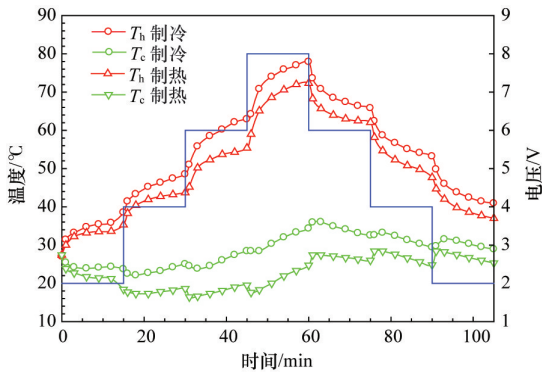


图3 电压跳跃变化下冷热端温度变化

Fig. 3 Variation of T_h , T_c under voltage jump

电压跳跃变化工况下,热电热泵冷热端温差、制冷/制热量和COP的变化曲线如图4、图5所示。可以看出,随着工作电压的对称跳跃变化,冷热端温差 T_d 呈倒V型的变化趋势,电压越大,温差越大;而COP值却呈U型变化,趋势较平缓,电压越大,COP值反而越小。此外,制热效率值 E_h 平均高于制冷效率值 E_c 约0.8,说明热电热泵制热效果要优于制冷效果。从图5可发现,电压由2~4 V 跳跃升高时,制冷效率值 E_c 逐渐降低,而制冷量 Q_c 缓慢增大;电压由4~8 V 跳跃升高时,制冷效率值 E_c 和制冷量 Q_c 同时减小。所以2~4 V 是热电热泵的最合适工作电压区间,此时的制冷效率值 E_c 和制冷量 Q_c 均较高。随着电压由2~8 V 跳跃升高,制热效率值 E_h 逐渐降低,而制热量 Q_h 逐渐增大,说明热电热泵制热效果更好,但同时要综合考虑允许最大温差、制热效率值和制热量,合理选择热电热泵的工作电压。

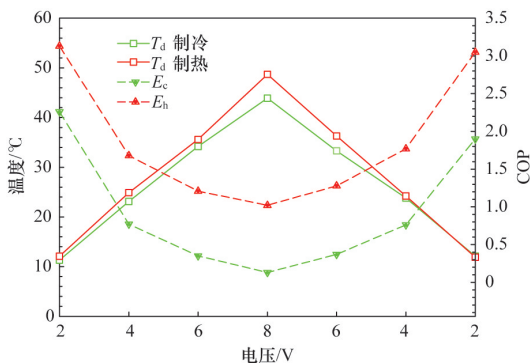


图4 电压跳跃变化时冷热端温差及COP变化

Fig. 4 Variation of the temperature difference T_d and COP under voltage jump

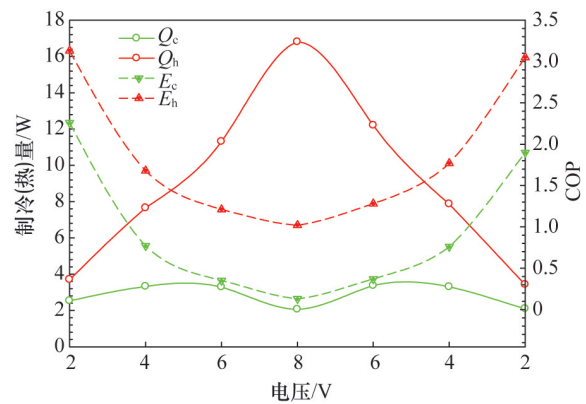


图5 电压跳跃变化时制冷/制热量及COP变化

Fig. 5 Variation of the cooling (heating) capacity and COP under voltage jump

2.3 电压依次增大(直至击毁器件)

不同电压工况下,热电热泵在每组电压下工作2 h,其冷热端温度的变化曲线如图6所示。可以看出,热端温度 T_h 随着电压依次增大而不断升高。电压小于8 V 时,制冷模式的 T_h 值高于制热模式,因为此时热电热泵冷热端温度主要受环境温度(制冷模式高于制热模式)影响。电压大于8 V 时,制热模式的 T_h 值高于制冷模式,原因在于此时电压过高,热端产热较多,而制热模式依靠铜板散热性能极差,导致大量热堆积。电压为4 V 时,冷端温度 T_c 值降至最低,可见4 V 是热电热泵的最合适工作电压,制冷效果最好。制冷模式电压超过16 V、制热模式电压超过14 V 后,热端温度 T_h 上升很快,而冷端温度 T_c 未上升至稳定,热电热泵容易被烧毁。

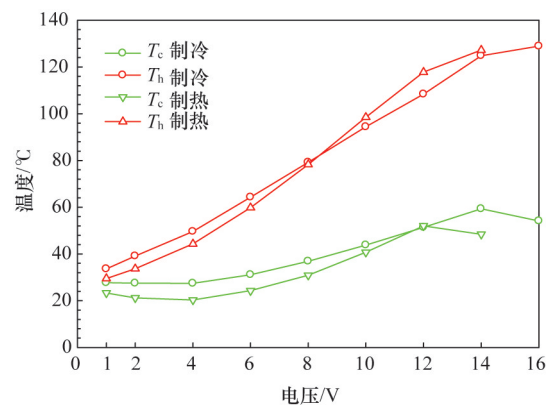


图6 不同电压时冷热端温度变化

Fig. 6 Variation of T_h , T_c under different operating voltage

不同工作电压下,热电热泵冷热端温差、制冷/制热量和COP的变化曲线如图7、图8所示。从图7可以看出,电压大于8 V 后,随着电压增大,COP值降至较低,几乎不再变化。因为冷热端温差 T_d 较高,散热效果不佳,严重影响热电热泵的工作性能。制冷系数 E_c 在高电压下小于零,因为此时电流较大,冷热端温度过高,热电热泵失去了制冷作用。

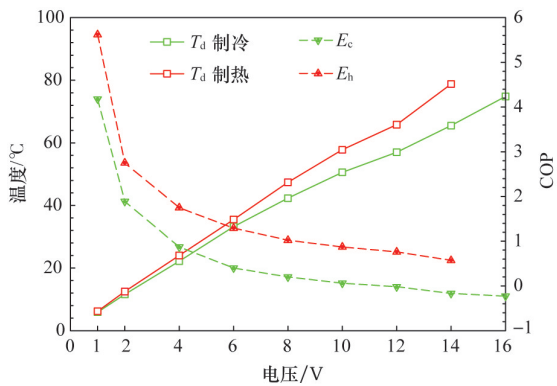


图7 不同电压时冷热端温差及COP变化

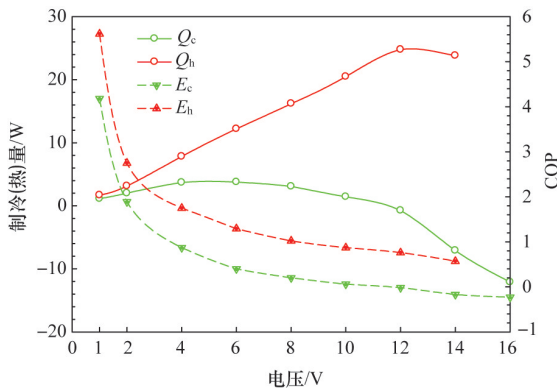
Fig. 7 Variation of the temperature difference T_d and COP under different operating voltage

图8 不同电压时制冷/制热量及COP变化

Fig. 8 Variation of the cooling(heating)capacity and COP under different operating voltage

从图8可看出,电压低于4 V时,随工作电压升高,制冷效率值 E_c 逐渐降低,而制冷量 Q_c 缓慢增大;电压高于4 V时,随工作电压升高,制冷效率值 E_c 和制冷量 Q_c 同时减小,而制热效率值 E_h 逐渐降低,制热量 Q_h 逐渐增大。所以,综合考虑允许最大温差、COP值和制冷/制热量,发现2~4 V是热电热泵的最适工作电压区间。

2.4 与标定性能参数比较

实验中使用的商业化热电热泵型号为TEC12706,出厂标定的参数分别为:最大电流 $I_{\max}=6$ A,最大温差 $\Delta T_{\max}=68^\circ\text{C}$,最大极限电压 $V_{\max}=15.4$ V,最大制冷量 $Q_{\max}=51.4$ W。

在制冷/制热模式下,热电热泵极限击毁电压为16、14 V,对应的最大温差分别为74.8、78.8 $^\circ\text{C}$,电流分别为3.3、3.0 A。比较可知,实验条件下的参数测量值与出厂标定值有一定的偏差,这主要是由于实验条件下的环境温度和冷热端温度与出厂标定的状态值不同所致。因此根据热电热泵的工作环境,有必要对其进行使用环境下的性能测试。

3 结论

1) 热电热泵制冷速度快,约15~20 min趋于稳定温度,工作性能稳定,抗干扰能力强,适应长时间连续工作。

2) 实验所用热电热泵的最佳工作电压区间为2~4 V,因为此时的冷端温度最低,制冷量、COP值也比较理想, E_c 为0.87~1.89, E_h 为1.75~2.75。

3) 热电热泵的制热效果明显优于制冷效果,制热效率值 E_h 平均高于制冷效率值 E_c 约0.8。

4) 热电热泵的工作电压值越大,冷热端温差也越大,COP反而越小。当电压大于8 V之后,冷热端温差大于45 $^\circ\text{C}$,COP值降至最低(几乎不再变化),工作性能较差。说明工作电压超过一定值后,不能再依靠提高电压值来达到更好的效果。所以,实际使用中要综合考虑允许最大温差、COP值和制冷/制热量,合理选择热电热泵的工作电压。

参考文献(References)

- [1] 戴维涵, 代彦军, 张鹏, 等. 半导体制冷元件特性参数测量及选用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 1669-1672.
Dai Weihuan, Dai Yanjun, Zhang Peng, et al. Measurement for the characteristic parameters and selection of thermoelectric cooling modules [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(10): 1669-1672.
- [2] 李维林, 刘黎明, 陈玲. 基于半导体制冷器数学模型的TEC制冷系统的效率估算[J]. 应用科技, 2003, 30(5): 20-22.
Li Weilin, Liu Fanning, Chen Ling. Mathematics-based modeling of thermoelectric cooling module calculation of thermoelectric module cooling system performance[J]. Applied Science and Technology, 2003, 30(5): 20-22.
- [3] Morizane K, Ogata T, Morino T, et al. A novel thermoelectric cooling device using Peltier modules for inducing local hypothermia of the spinal cord: The effect of local electrically controlled cooling for the treatment of spinal cord injuries in conscious rats[J]. Neuroscience Research, 2012, 72(3): 279-282.
- [4] Putra N, Sukyono W, Johansen D, et al. The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device[J]. Cryogenics, 2010, 50(11): 759-764.
- [5] Chatterjee S, Pandey K G. Thermoelectric cold-chain chests for storing / transporting vaccines in remote regions[J]. Applied Energy, 2003, 76(4): 415-433.
- [6] Hsiao Y Y, Chang W C, Chen S L. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine[J]. Energy, 2010, 35(3): 1447-1454.
- [7] Toru O, Reinhard R, Yunho H. A novel application of thermoelectric modules in an HVAC system under cold climate operation[J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(6): 1749-1758.
- [8] Yu J, Zhao H, Xie K. Analysis of optimum configuration of two-stage thermoelectric modules[J]. Cryogenics, 2007, 47(2): 89-93.
- [9] Vian J G, Astrain D. Development of a thermoelectric refrigerator with two-phase thermosyphons and capillary lift[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 1935-1940.
- [10] Chen L, Li J, Sun F, et al. Performance optimization for a two-stage thermoelectric heat-pump with internal and external irreversibilities[J].

- Applied Energy, 2008, 85(7): 641-649.
- [11] David B, Ramousse J, Luo Lingai. Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60: 125-133.
- [12] Vian J G, Aatrain D. Development of a heat exchanger for the cold side of a thermoelectric module[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(11/12): 1514-1521.
- [13] Chen L, Meng F, Sun F. Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generator-driven thermoelectric refrigerator system[J]. Cryogenics, 2012, 52(1): 58-65.
- [14] Zhang H Y. A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(6): 1187-1196.
- [15] Du C Y, Wen C D. Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54 (23/24): 4875-4884.
- [16] Chein R, Huang G. Thermoelectric cooler application in electronic cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(14): 2207-2217.
- [17] 刘忠兵, 张冷, 徐敏, 等. 厨房余热回收热泵储水式热水器的研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 650-654.
Liu Zhongbing, Zhang Ling, Xu Min, et al. Investigation on a thermoelectric heat pump storage water heater with exhaust heat recovery from kitchens[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(5): 650-654.
- [18] Min G, Rowe D M. Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators[J]. Applied Energy, 2006, 83(2): 133-152.
- [19] Huang B J, Chin C J, Duang C L. A design method of thermoelectric cooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(3): 208-218.
- [20] Dessel S V, Foubert B. Active thermal insulators: Finite elements modeling and parametric study of thermoelectric modules integrated into a double pane glazing system[J]. Energy and Buildings, 2010, 42 (7): 1156-1164.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



国家自然科学基金委员会发布2014项目指南

2014年1月14日,国家自然科学基金委员会在其官方网站发布《2014项目指南》,包括:前言、申请须知、限项申请规定、面上项目、重点项目、重大项目、重大研究计划项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目、优秀青年科学基金项目、国家杰出青年科学基金项目、创新研究群体项目、海外及港澳学者合作研究基金项目、国际(地区)合作与交流项目、联合基金项目、专项项目、国家自然科学基金申请代码、附录。

《2014项目指南》主要针对2014年度项目申请集中接收期间受理的各类型项目申请进行介绍。在前言之后,集中介绍各类型项目申请须知和限项申请规定。面上项目、重点项目、青年科学基金项目和地区科学基金项目按科学部顺序介绍项目的总体资助情况及优先资助范围。其中面上项目指南部分,科学部在介绍资助概况之外,还涉及该科学部总体资助原则与要求以及申请注意事项,然后以科学部为单位分别介绍学科发展趋势或资助范围和要求;其他项目类型进行整体介绍。各类型项目对申请人有特殊要求的,在正文中加以叙述。

不在集中接收期间受理的其他项目,将另行在自然科学基金委门户网站(<http://www.nsf.gov.cn>)发布指南,请依托单位和申请人及时关注。