全自动半导体制冷系统对汽车密闭空间的温度控制应用研究

赵建江

（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

摘要：汽车密闭空间的过高温度带来的驾驶不适和安全隐患不容忽略。太阳能发电为能源在汽车等移动载体上的应用目前已成为研究热点，但其主要作为移动冰箱或通风系统使用，能否直接用于驱动半导体制冷系统来实现车载空调功能存在较多争论。通过在模拟密闭空间上设计安装基于太阳能电池的半导体制冷和空气对流系统，考察其制冷效果。研究发现增大对流量、设计对流方向（侧向）能有效增强半导体制冷效果。在一定条件下将实验中的模拟车厢温度降低13 ℃，对解决汽车密闭空间的制冷问题具有重要意义。

关键词：半导体制冷系统；太阳能；汽车密闭空间

Application study of the temperature control in the confined space of the automobile via the fully-automatic semiconductor refrigeration

ZHAO Jianjiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The potential danger and discomfort of the over-high temperature in the confined space of the automobile is more and more regardful. The semiconductor refrigeration system driven by the solar energy is green and energy-saving, which can provide a promising solution for the refrigeration problem. The study find that increasing flow rate and designing the flow direction (side direction) can enhance the refrigeration effect effectively in a confined space. As a result, the temperature in the simulated carriage in this work is lowered by 13 degrees centigrade, which is significant to solve the danger of over-high temperature in a confined space.

Key words: semiconductor refrigeration system; solar enery; antomobile confined space

0 引言

工业革命以来，不断上升的能源需求与日益严重的环境危机，使得寻找清洁、环保的能源迫在眉睫[1]。同时，科技和经济的快步发展，使得汽车的保有量不断增加[2]。近年来，由于人们忽视汽车密闭空间过高温度的危害，造成的事故（如小至刚进入车内时人体的不适，大到车内宠物、婴儿的死亡）已经引起了社会对汽车密闭空间温度控制的高度关注[3]。如何能够在车内电源切断的情况下控制车内密闭空间的温

国家自然科学基金项目（51507076）；江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(KTHY-040)；江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目（XTCX201706）

度具有重要的现实意义。目前主要有车内外空气强制交换和电制冷两种解决方案。

通过电制冷来降低车内密闭空间的温度是最直接、最有效的方式。目前，常用的制冷方式为压缩式制冷[4]，需要大量的制冷剂和运动部件参与，而液态的制冷液容易泄漏，并且大量的运动部件使得机械体系相对不太稳定，造成机械故障[5]。半导体制冷在全固态制冷领域具有特殊地位，其体积小、无噪声、无运动部件和无替换部件的优点使得在密闭的汽车空间进行温度控制时安全性高，舒适感强[6]。半导体制冷主要是利用热电材料串联成热电臂，并组装成器件。热电器件两端通以电流时，热电材料中载流子的漂移与晶格相互作用，同时进行热量的传递，使得器件一端放热，一端吸热，这种现象称为“珀尔帖尔效应”[7-8]，如图1所示。热电材料的制冷效果主要由材料的热电优值zT衡量，材料的zT与温度有关[9-10]，目前室温附近（25～50 ℃）热电性能最好的商业化材料为碲化铋基合金[11-12]。

半导体制冷片的驱动电源一般为12 V的直流电源。现实场景中，汽车密闭空间（同时传统车用空调不再开启）多因人离车而去造成，切断了整个车体的电源。此时如果采用蓄电池，具有体积大、负载重、持续时间短和无法解决长时间持续制冷的问题。考虑到汽车密闭空间温度过高主要是由较强的太阳辐射造成，采用柔性太阳能电池板覆盖汽车顶部作为驱动电源，既可以阻挡阳光辐射造成的升温，又能利用光伏效应产生电能驱动制冷。文献[13]综述了半导体制冷在汽车上的应用，并指出太阳能技术和半导体制冷技术相结合在汽车上的应用前景；文献[14]初步研究了太阳能电池驱动半导体制冷器件的可能性，并研究了风速对制冷效果的影响，增强近20倍风速使温度进一步降低2 ℃。

但是，对于太阳能驱动的半导体制冷系统是否能够充分实现汽车密闭空间有效降温依然存在争论，有限的车顶空间和常规太阳能电池板较低的光电转换效率使得太阳能电池板提供的电源功率小于200 W/m^2，总功率一般不会超过500 W，且必须在阳光充足的条件下才能实现，普通天气条件下电源功率会显著下降。因此简单地配置太阳能板电池加半导体制冷系统并不能实现全天候条件下长时间的有效车内空间降温。而单纯使用车内外换气系统虽然能源消耗少，但降温效果并不理想。

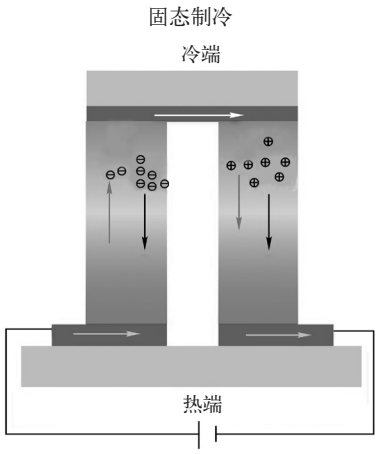


图1 “珀尔帖效应”示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Peltier effect

1 实验

基于以上背景，设计了新颖的车载制冷系统，主要思路是采用半导体制冷加空气对流的双重降温模式。在有限的太阳能直流电源驱动下，直流风扇可实现车内外空气的流通，大幅降低车内空间的温度，功率消耗小，见效快。但此方法只能使车内空间温度下降到与室外相近的程度。进一步的降温则依赖半导体制冷片实现。这样的设计兼顾了低功耗和好的制冷效果两方面。由于汽车的密闭空间温度范围与碲化铋基合金的最优热电性能温区相符，实验中直接采用商业化的碲化铋基制冷片。降温装置采用半柔性太阳能电池板驱动的半导体制冷片加直流风扇。通过对空气强制流通和半导体制冷的不同参数组合，对密闭空间的降温效果进行了系统的实验研究，来考察这一设计的合理性和有效性。

全自动太阳能驱动半导体制冷系统的工作电路主要由半柔性太阳能电池板、稳压开关电源、智能温控通断仪和半导体制冷系统组成，如图2所示。其中，半导体制冷系统主要由半导体制冷片、散热风扇和散热片组成。稳压开关电源可以将太阳能电池板的输出电压20 V稳定地转换成半导体制冷系统最大效率制冷所需要的12 V直流电压。智能温控通断仪可以设置在环境温度较低时（如冬天室外温度0 ℃）自动切断该系统地电源，避免车内不必要的制冷。为了更方便地进行实验，采用不锈钢外壳、内部铺满隔热的玻璃纤维的废弃手套箱模拟车身，手套箱的体积为570 mm×580 mm×880 mm。实际工作系统如图3所示，具体元件的价格如表1所示。

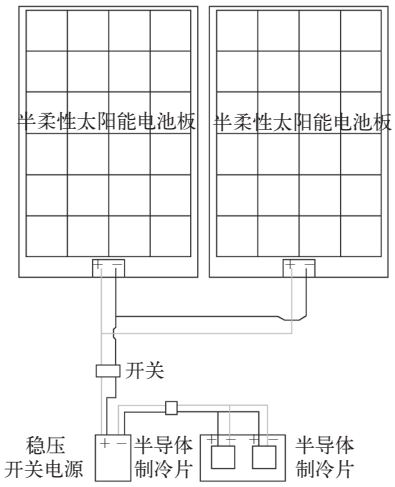


图2　全自动太阳能驱动半导体制冷系统的工作原理

Fig. 2 Working principle diagram of fully-automatically solar-energy driven refrigeration via semiconductor

图3　全自动太阳能驱动半导体制冷系统的实物

Fig. 3 Actual photos of fully-automatically solar-energy driven refrigeration via semiconductor

表1　全自动太阳能驱动半导体制冷系统的元件规格和价格

Tab. 1 Regulation and price of the various components of the fully-automatically solar-energy driven refrigeration via semiconductor

	单价 / 元	型号
半柔性太阳能电池板	458	1 020 mm×660 mm
开关电源 DC 9 ～ 18 转 DC 12	128	SD － 100A － 12
测温仪	34.5	TM － 902C
通风扇 DC12V	35	12308
智能温控仪	35	XH － W3001
电压表	45	DC 6.5 － 100 V/20 A
半导体制冷系统	92	两组制冷片

全自动太阳能驱动半导体制冷系统工作原理如下：引起汽车密闭空间温度骤升的较强的太阳光直射到柔性太阳能电池板上，稳定输出的直流20 V电压经过稳压开关电源转化成12 V直流电压输入半导体制冷系统。半导体制冷系统置于手套箱内，改变外置风扇的位置、数量和开闭手套箱阀门来改变手套箱内空气的对流量，并探究其对制冷效果的影响。实验中，为了避免天气情况对实验的影响，前期实验用220 V交流电源转12 V直流电源作为驱动电源。光照条件良好时，采用柔性太阳能电池板作为驱动电源。

2　结果与讨论

光照充足时，室外温度和模拟车厢内温度相差很大。从2017年10月9日的室外和箱内的温度数据可以看出，光照条件不同，室外和箱内的温度差异不同，室外温度最高39 ℃时，箱内温度已经达到49 ℃，如图4所示。在全年光照较强的时间段（如6月、7月），模拟车厢内温度在白天的大部分时间内都高于39 ℃，如图5所示，人体将产生严重不适，并带来安全隐患。

为了确定最佳的制冷效果，在制冷系统设置完毕并进行制冷时，设计了以下的操作，如表2所示。

图6表明，仅开启制冷片时，温度即可快速下降。由12:40的54 ℃，半小时内下降至45 ℃。

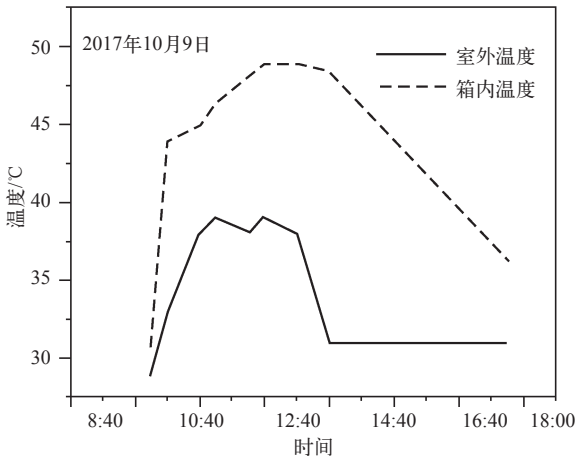


图4　2017年10月9日室外和箱内温度对比

Fig. 4 Temperature inside the glove box and in the outside on 9th Oct. 2017

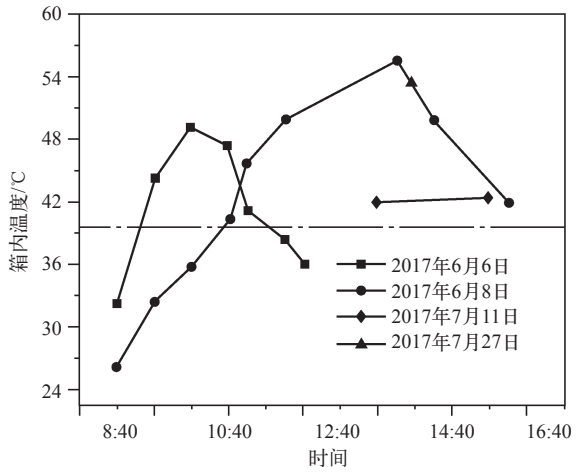


图5　不同日期和时间的箱内温度

Fig. 5 Temperature inside the glove box in Jun. and Jul. 2017

表2　动作代码和对应的具体动作实施

Tab. 2 Operation codes and the corresponding specific operations

动作代码	动作实施
动作 1	只开启制冷片
动作 2	开启制冷片和侧面风扇
动作 3	打开手套箱阀门增大对流量
动作 4	关闭手套箱阀门减小对流量
动作 5	开启制冷片正面风扇（第二个风扇）
动作 6	开启电源
动作 7	关闭电源
动作 8	多带动一组制冷片

后续缓慢下降的可能是室外气温下降，光照强度也下降，使箱内室温产生了热传导；也可能是制冷系统边际效应的体现。

如图6所示，2017年9月14日下午1点开始，光照强度逐渐增强，室外温度80 min内从31 ℃一直持续上升到41 ℃。开启制冷系统后，模拟车厢内的温度基本可以维持在34 ℃，较室外温度最多下降了7 ℃。在前15 min，箱内温度随室外温度的上升而上升，主要是因为室外温度的传导和箱内温度由于光照强度的增加占主导作用；20 min开启制冷片后，箱内温度从35 ℃下降至33 ℃，再开启侧面风扇增强对流后，温度继续下降至32 ℃；关闭制冷电源后，箱内温度攀升至36 ℃，再开启制冷片和侧面风扇，温度迅速下降并稳定在34 ℃；而后到15:30左右，温度一直稳定在35 ℃，主要是由于制冷效果的作用，也有部分受外部光强减弱的影响。室外和箱内的温差较大处，分别在约42 min和78 min后下降5 ℃和7 ℃，都是在执行了动作后，即开启制冷片后再开启侧面风扇，表明侧面对流有助于制冷。

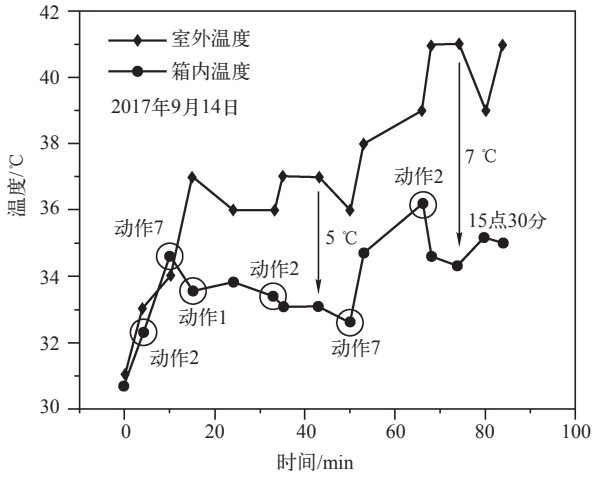


图6　2017年9月14日温度随制冷系统的工作的变化

Fig. 6 Temperature variation on 14th Sep. 2017 during the operation of the refrigeration system

如图7所示，2017年9月26日上午9:43开始，光照强度逐渐增强，室外温度90 min内由35 ℃一直持续上升到41 ℃，之后室外温度略有下降。开始时制冷片一直处于工作状态，维持在35 ℃，随后打开手套箱阀门，增大对流量时，温度20 min后下降至33 ℃；之后，关闭手套箱阀门，减小对流量，温度10 min后上升至

37 ℃，再打开阀门；5 min后又下降了3 ℃，证明增大对流量对降温效果十分明显；随后关闭制冷电源，温度迅速攀升至43 ℃，远高于此时的室外温度38 ℃；然而继续开启侧面风扇制冷后，温度3 min内迅速下降7 ℃；随后，再打开制冷片正面的风扇，此时两个风扇强制对流的效果与只有侧面风扇工作的效果一样，25 min过去并没有使温度进一步下降，说明正面对流的制冷效果较差；再次关闭制冷系统，温度再次迅速上升至42 ℃；继续开启制冷片，并再次开启正面、侧面两个风扇强制对流，温度下降6 ℃。总之，正面对流没有加强制冷效果，增加对流量对制冷的增强效果明显。

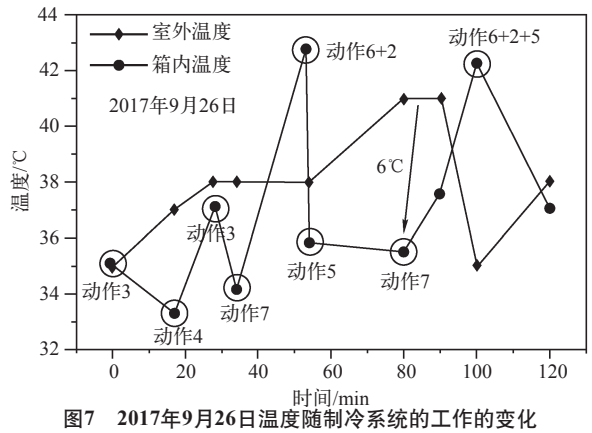


图7 2017年9月26日温度随制冷系统的工作的变化

Fig.7 Temperature variation on 26th Sep. 2017 during the operation of the refrigeration system

如图8所示，2017年10月10日上午9:40开始，光照强度逐渐增强，到10:40室外温度上升至40 ℃。而后，天气转变为多云天气，气温慢慢下降至36 ℃。模拟车厢的温度至12:00一直维持在48 ℃。这次实验采用的是太阳能电池板驱动制冷系统。当开启一组制冷片并开启侧面风扇时，箱内温度由48 ℃下降至45 ℃；打开手套箱阀门增大对流量，箱内温度迅速下降了9 ℃；再开启另一组制冷片，箱内温度2 min内又下降了2 ℃。这一系列的操作使得太阳能电池板驱动的制冷系统将模拟车厢的温度下降了13 ℃，使模拟车厢温度低于36 ℃。太阳能驱动的制冷实验同样验证了上述220 V交流电驱动的制冷实验结论，增大对流量对增强制冷效果具有很重要的作用。

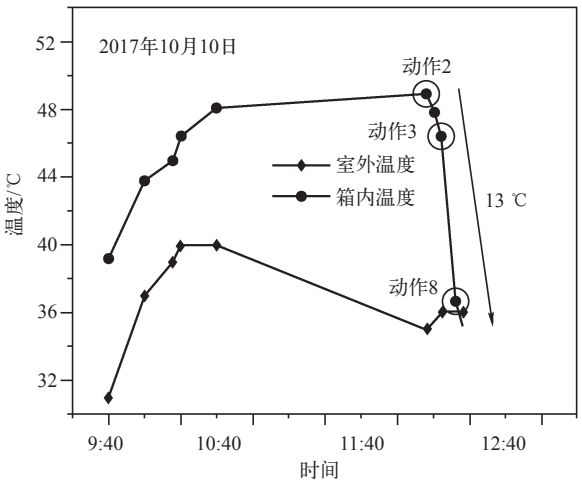


图8 2017年10月10日温度随制冷系统的工作的变化

Fig. 8 Temperature variation on 10th Oct. 2017 during the operation of the refrigeration system

3 结束语

全自动太阳能驱动半导体制冷系统对消除高温天气下汽车密闭空间温度过高带来的安全隐患具有一定的潜力和可行性。太阳能驱动和220 V交流电驱动制冷的实验结果一致表明：增大对流量对增强制冷效果很重要，并且对对流方向也存在影响，正面对流并不能增强制冷效果，而侧面对流可以。同时达到实际要求时，实验结果表明，全自动太阳能驱动半导体制冷系统可以将车厢内的温度降低13℃。值得注意的是，模拟化的实验结果在实际的汽车密闭空间降温的体现主要考虑如何在实际的场景中增大对流量，如何调整对流方向等问题。

参考文献

[1] 齐力．环境能源政策创新过程研究——基于荷兰可持续能源政策创新的探讨[J]．生态经济(学术版)，2010(2)：131-133.

[2] 马艳丽，高月娥．我国未来汽车保有量情景预测研究[J]．公路交通科技，2007，24(1)：121-125.

[3] 王国华．高温时节谨防客车自燃[J]．城市与减灾，2012(4)：44-45.

（下转第 66 页）

[16] 马永其，郑平，韩轩，等．安装运行中电缆终端绝缘界面压力的测试分析[J]．高电压技术，2011 37(2)：347-352．
[17] WANG X，WANG C C，WU K，et al．An improved optimal design scheme for high voltage cable accessories[J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2014，21(1)：5-15．
[18] 柳松，彭嘉康，王霞，等．高压电缆附件界面压力的影响因素分析[J]．绝缘材料，2013，46(6)：86-89．

作者简介

梁 振

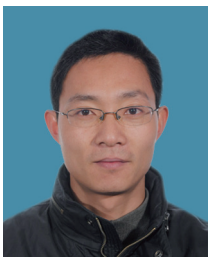
梁振（1994－），男，硕士研究生，主要研究方向为电气设备与绝缘设计和诊断技术。

(收稿日期：2018－12－22)EA

(上接第 59 页)

[4] 施军锞，祁影霞．太阳能技术在汽车空调上的应用［J］．低温与超导，2012，40(8)：64-68．
[5] 李兴浩．建立家电节能惠民政策长效机制[N]．消费日报，2010-03-16(A02)．
[6] 宣向春，王维扬．半导体制冷器的进展[J]．半导体技术，1999(1)：14-18．
[7] 马秋花，赵昆渝，李智东，等．热电材料综述[J]．电工材料，2004(1)：43-47．
[8] 徐桂英，葛昌纯．热电材料的研究和发展方向[J]．材料导报，2000，14(11)：38-41．
[9] 刘宏，王继扬．半导体热电材料研究进展[J]．功能材料，2000，31(2)：116-118．
[10] 于军，徐桂英．热电材料发展动态[J]．材料导报，2005，19(3)：28-31．
[11] 蒋俊，李亚丽，许高杰，等．制备工艺对P型碲化铋基合金热电性能的影响[J]．物理学报，2007，56(5)：2858-2862．
[12] 李小亚，陈炎，郝峰，等．碲化铋基热电半导体晶体研究[J]．中国材料进展，2017(4)：16-20．
[13] 吕松．太阳能半导体制冷技术在汽车上的应用[J]．汽车零部件，2013 (6)：80-82．
[14] 张运真，王飞．太阳能半导体制冷器在小型汽车上的应用实验研究[J]．制冷与空调，2015 (4)：456-459．

作者简介



赵建江

赵建江（1982－）男，本科，工程师，主要研究方向为新能源、电气工程等。

(收稿日期：2018－04－19)EA