

## 脉冲方波驱动强化热电制冷的瞬态特性

毛佳妮<sup>1,2</sup>, 陈焕新<sup>1</sup>, 杨亚新<sup>1</sup>, 王小龙<sup>1</sup>, 张恩泉<sup>1</sup>

- (1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430073;
2. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 采用有限差分法对脉冲电压驱动下的瞬态热电效应及其动态特性过程进行了理论分析, 探索了非稳态工况下帕尔帖效应、焦耳热效应与傅里叶导热效应之间的耦合关系及其关键制约因素对制冷性能的影响规律, 进而探讨了脉冲驱动强化热电制冷性能的作用机理。分析结果得到, 在合理电压域值内采用主动控制方法, 对热电模块周期性施加数倍于稳态工况理想电压的脉冲突变电压, 有益于充分利用帕尔帖制冷效应而推迟出现以焦耳热和傅里叶热耗散形式为主的内部热积聚对热电模块冷端引起的负效应, 并能瞬态实现冷端面的制冷强化作用和最大程度实现输入电能的有效转换。该结论不仅为进一步提出脉冲驱动模式的优化控制策略提供了理论依据, 也为瞬态热电制冷效应的应用开辟了一条新思路。

**关键词:** 热电元件; 瞬态热电制冷效应; 脉冲电压; 制冷性能; 热电制冷器

**中图分类号:** TB61\*9.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1835-07

## Transient behavior of square pulsed supercooling for TE devices

Mao Jiani<sup>1,2</sup>, Chen Huanxin<sup>1</sup>, Yang Yaxin<sup>1</sup>, Wang Xiaolong<sup>1</sup>, Zhang Enquan<sup>1</sup>

- (1. School of Energy and Power Engineering, HUST, Wuhan 430074, China;
2. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Based on a numerical solution involving time-dependent imposed square voltage pulse and time-dependent thermal boundary conditions, the transient supercooling behavior was theoretically analyzed, as well as the response to the pulse operation parameters during the periods of pulse start-up, pulse-on time and pulse-off time, which was served as a theoretical basis for exploiting the coupling interaction of the thermoelectric effects (Peltier cooling effect, Joule heating effect and Fourier thermal effect) on the heat diffusion in the short time scale. The results indicate that, the transient thermoelectric supercooling effect can be enhanced by keeping on increasing the Peltier cooling effect as the additional cooling capacity for a period long enough against the earlier arrival of the excessively the Joule heating effect and Fourier heat conduction effect arriving at the cold junction, in which a transient cold spike can be produced by superimposing an additional shaped voltage pulse of the reasonable range on the original

收稿日期: 2012-11-02; 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 湖北省自然科学基金(2011CD13288); 2011 年中国科学院“低温工程学重点实验室”开放课题(CRYO201121)

作者简介: 毛佳妮(1982-), 女, 博士生, 主要从事热电制冷器件物理及其性能优化方面的研究。Email: ronald520@163.com

导师简介: 陈焕新(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事热电热泵技术方面的研究。Email: chenhuaxin@tsinghua.org.cn

steady-state optimum value. The discussions may not only facilitate to put forward the theory basis for the optimization control strategy on pulse mode, but also develop a new method of transient supercooling effect for application in TE devices.

Key words: thermoelement; transient thermoelectric supercooling effect; voltage pulse; cooling performance; thermoelectric cooler (TEC)

## 0 引言

信息技术已成为当今全球性的战略技术,以光电子和微电子为基础所支持的通信和网络技术正在深刻影响着国民经济、国防建设的各个领域。为了满足实际需要,系统封装逐渐向小型化、轻型化、高集成、高性能的多功能综合方向发展,因而如何提高热控组件内部各部件、构件、高功率密度器件的传热性能以及系统的精度和可靠性研究显得尤为重要。然而,目前针对局限空间中的关键元件实现变工况下的精确温控,传统的被动式制冷技术面临着严峻挑战,这就为兼具高效局部冷却且能精确控温的静态接触式热电制冷技术提供了发展契机<sup>[1-2]</sup>。

对于常规热电制冷系统,热电模块在直流电流驱动下运行,其热-电传输以及功-热转换均属非线性稳态过程,相关国内外研究已比较全面<sup>[3-4]</sup>。事实上,热电制冷性能主要由三大热电效应综合作用:帕尔贴效应、焦耳热效应与傅里叶导热效应。帕尔贴效应为界面效应,按作用效果可分为帕尔贴制冷效应和帕尔贴制热效应,分别同时发生在热电模块冷端和热端界面上,具有瞬态特性。其产生的帕尔贴热由载流子通过P-N型热电元件电极对彼此交替连接的电接触结点处的费米能级差决定。焦耳热效应为体效应,均匀产生于热电模块体积内,并且在向冷端的热传导过程中存在时间延迟特性,对应所产生的焦耳热由系统提供的电流决定。同时,这两种效应会伴随冷热端温差引起的傅里叶导热效应,共同决定热电模块冷端的制冷温度。为了充分利用帕尔贴效应实现热电模块冷端的瞬态降温,国内外学者开始采用脉冲电源驱动热电制冷系统,即将电源以脉冲方式输入热电制冷器数倍于稳态运行时的最优电流值,此时由于焦耳热体效应的时间延迟特性,具有瞬态特性的帕尔贴界面效应将即时发挥主导作用,即在冷端瞬态获得相比于稳态操作方式更低的制冷温度,该物理现象称为瞬态热电效

应。近年来热电制冷的这一瞬态行为(也被称作瞬态热电制冷效应)已被国内外学者广泛意识到可用于获得效果显著的制冷强化作用<sup>[5-7]</sup>。

然而,脉冲驱动热电制冷是典型非稳态非线性过程,由于脉冲驱动模式(波形、频率与幅度)、冷(热)端热沉与热电模块之间的匹配关系,并且最低瞬态制冷温度及强化制冷效应的维持时间均与热电材料的热电参数、热电元件几何参数和接触界面电阻与热阻等因素密切相关,使得瞬态热电制冷过程包含了复杂的物理特征和工作特性<sup>[8-9]</sup>。同时,为了更准确地预测实际工况下的动态热过程,对于所建数学模型的数值求解需要将边界条件定义为与时间相关且与环境参数耦合,因而对于预测控制元件的快速制冷以及在环境条件变化下的适应性调节,受到了许多非稳态工况的影响<sup>[10]</sup>。目前,在脉冲强化热电制冷领域,研究人员主要侧重于瞬态实现制冷效应的最大化,即以获得最大瞬态温差,或者最低瞬态制冷温度为目标,而忽略了在实际应用中,强化制冷效应在特征时间区域(即脉冲启动初期、过冷状态持续期间以及脉冲关闭后制冷系统温度的恢复响应过程)的温度自适应调节动态特性研究<sup>[11-12]</sup>。其中,K H Lee<sup>[13]</sup>通过实验建立了脉冲制冷效应的基本参数之间的半经验关系式,并基于此关系式通过简化的理论模型分析了不同脉冲幅度与稳态温度对脉冲制冷特征时间与温度的影响,其研究指明最佳脉冲幅度约为稳态工作电流的三倍,脉冲制冷强化效果相当于两级热电模块制冷,但对于制冷效应强化的产生机理尚未明确。R McCarty<sup>[14]</sup>采用数值方法对于微电子器件集成的热电制冷器在无冷端负荷条件下的脉冲驱动瞬态响应进行了研究,但其研究并未考虑热沉传热特性的影响。G Torzo<sup>[15]</sup>针对实际存在的接触热阻与电阻问题,利用数值方法研究了它们对脉冲制冷性能的影响,研究表明,接触热阻与电阻强烈影响可获得的最低冷端温度,其影响程度超过稳态工况下的预测情况。

文中将引入 3 个表征动态制冷特性的特征时间参数(自施加脉冲电源驱动到获得冷端最低制冷温度的响应时间  $t_{sc}$ , 瞬态强化制冷效应的持续时间  $t_{sm}$  以及脉冲驱动转换为基准稳态电压驱动后冷端温度恢复至基准态的响应时间  $t_{ss}$ ), 并结合脉冲特征参数、环境条件以及系统热物性参数等, 利用有限差分法求解非稳态控制方程, 综合分析脉冲驱动模式下热电元件的瞬态制冷特性和冷却效率 COP, 为瞬态强化热电制冷效应的系统研究和设计提供理论依据。需要指出的是, 通常在研究稳态工况时认为热电制冷器的电压输入为定压输入, 因而常使用直流稳压电源作为电源驱动, 即输入电压保持恒定。而在变工况下, 半导体冷、热端的温度差随时间变化, 其温差电动势也随之变化, 故电流在非稳态条件下是变化的。并且热电制冷系统在运行时, 当电流受到不稳定因素扰动后容易呈现持续震荡状态而难以迅速稳定。为了便于结合实验验证数值方法求解结果的合理性, 系统的电能输入均采用可控变压直流电源, 进而讨论脉冲电压驱动模式对瞬态强化热电制冷效应的影响规律。

## 1 非稳态传热模型及数值计算

### 1.1 传热模型的建立及模型假设

为了推导方便, 作出以下假设: (1) p 型和 n 型热电元件材料有相同热物性参数; (2) 只考虑沿元件长度  $x$  方向的热传递, 即为一维传热; (3) 假定初始时刻冷端(控制端)有热负载  $Q_{load}$ ; (4) 热电模块的热端(非控制端)热沉与环境之间能充分换热, 实现热端与环境温度相等; (5) 忽略汤姆逊效应对传热的影响; (6) 半导体材料的物性参数与换热器的传热能力不随温度变化。热电臂的传热模型见图 1 所示。

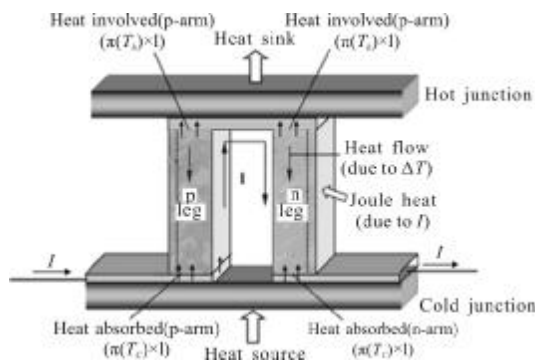


图 1 单元热电对的传热模型

Fig.1 Heat transfer schematic of a single thermoelectric module

### 1.2 非稳态热传导方程的建立

考虑到 p 型和 n 型两个单元臂传热模型的相似性, 文中仅以 p 型臂的传热模型为分析对象。瞬态热电效应下的热传导过程可以近似表达为沿长度方向的一维偏微分能量守恒方程:

$$\lambda \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{I^2}{A^2 \sigma} = \rho c_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中:  $T(x, \tau)$  为热电元件沿长度方向上的温度分布;  $I$  为电流;  $A$  为元件横截面积;  $\lambda$  为热导率;  $\sigma$  为电导率;  $\tau$  为时间步长;  $x$  为热电元件长度。

### 1.3 初始条件和边界条件的确定

为了计算方便, 认为初始时刻热电元件的温度与环境温度相同, 且将坐标原点建立在冷端, 则其相应的初始条件和边界条件确定如下:

$$T(x, 0) = T_a \quad (2)$$

$$\text{冷端: } -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{SIT(0, \tau)}{A} + Q_a \quad (3)$$

在公式(3)中, 等式右边第一项为帕尔贴效应作用在冷端界面产生的帕尔贴吸热量, 其值定义为  $Q_{pe} = -S \cdot I \cdot T(0, \tau)$  的随时间变化的参数。

$$\text{热端: } T(x=L, \tau) = T_h \quad (4)$$

考虑到非稳态工况下温差电动势的影响, 热电元件中对应的系统电流值表示如下:

$$I = (U - S\Delta T) \sigma A / L \quad (5)$$

### 1.4 数值解法

基于控制体积法, 将计算区域划分为  $(N-1)$  等分, 得到  $N$  个空间结点。对能量守恒方程(1)采用相应的差分表示式代替而建立差分方程。其中, 对时间项采用向前差分格式, 空间项采用中心差分格式<sup>[6]</sup>。整理得到:

$$T_n^{(i+1)}(x, \tau) = \left(1 - \frac{2\alpha\Delta\tau}{\Delta x^2}\right) T_n^{(i)}(x, \tau) + \frac{\alpha\Delta\tau}{\Delta x^2} \times [T_n^{(i)}(x, \tau) + T_{n-1}^{(i)}(x, \tau)] + \frac{I^2\Delta\tau}{\rho c_p A^2 \sigma} \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (6)$$

结合冷端边界条件方程(3), 整理得到:

$$T_N^{(i+1)}(x, \tau) = \left(1 - \frac{2SI\Delta\tau}{\rho c_p A \Delta x} - \frac{2\alpha\Delta\tau}{\Delta x^2}\right) T_N^{(i)}(x, \tau) + \frac{2\alpha\Delta\tau}{\Delta x^2} T_{N-1}^{(i)}(x, \tau) + \frac{2Q_a\Delta\tau}{\rho c_p A \Delta x} \quad (7)$$

式中:  $n$  为空间结点;  $x$  为  $i$  为时间节点;  $\Delta\tau$  为特征时间步长;  $\Delta x$  为特征空间步长。

## 2 方法验证

为了验证数学模型的准确性, 实验系统采用热

电冰箱为测试载体,实验系统原理图如图 2 所示。选用的热电模块型号为 TEC1-12706。测试系统的半封闭式结构为热电制冷器冷端有效隔绝了环境参数变化对热电模块冷端测试结果的干扰。同时,热电制冷器热端采用相变式双环路热管将热电制冷器热端产生的热量循环带走并以自然对流的方式释放到外界环境中。

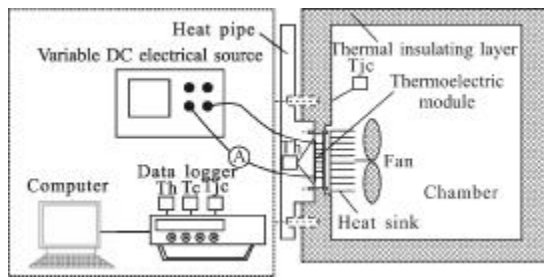


图 2 实验测试系统的原理图  
Fig.2 Schematic diagram of testing system

温度的测量采用 PT100 铂电阻温度传感器,测量精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电源为 APS3005S 直流可调稳压电源,电压调节范围 0~30 V,电流额定输出范围 0~5 A。数据采集仪采用 Keithley2700 系列数据采集系统。环境温度维持在  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了反映出制冷器冷端和热端温度对脉冲突变电压响应直到稳定的快慢程度,因此对应于每段实验测试和数值计算的阶跃电压设定时间段均不同。尽管稳态运行时冷端的最低制冷温度出现在  $U_{ss}=6\text{ V}(I_{ss}=2\text{ A})$  工况点,但结合后文将要研究的几组脉冲电压幅度确定了如图所示的阶跃电压,对比结果如图 3 所示。

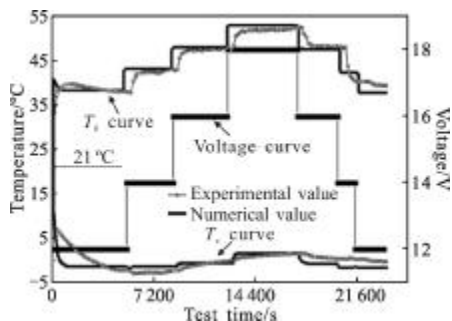


图 3 脉冲突变电压下的冷、热端温度的实测和数值结果对比  
Fig.3 Comparison of the experimental results and numerical results on the response of cold-and hot-junction temperature to the pulsed step voltage

分析得到,计算值和实测值的较大偏差主要集中在每次电压突变的起始阶段,造成偏差的原因可能为人员走动带来的测试环境干扰、测试仪器的灵敏度以及数学模型的简化等因素。但从整体趋势来看,实验值和数值计算结果吻合良好。由此可见,文中提出的数学模型是可取的,可以较为准确地为 TEC 运行过程控制、系统及其结构的优化设计与匹配提供理论依据。

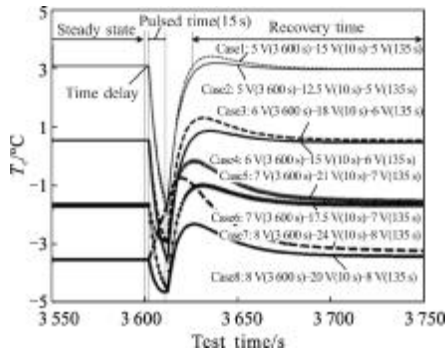
### 3 脉冲式热电制冷器的瞬态特性分析

为了反映脉冲驱动模式对瞬态热电制冷效应的影响规律及其强化作用的显著程度,此节将针对脉冲驱动的三个基本特征参数(基准稳态电压、脉冲电压幅度以及脉冲时间)来进行分析。

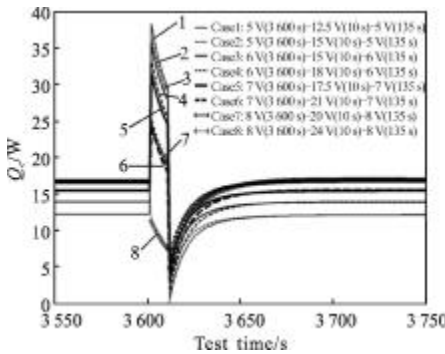
#### 3.1 基准稳态电压

众所周知,在稳态工况的研究中已经得到热电元件在不同电压下对应的冷端的稳态温度不同。因而讨论脉冲方波对瞬态热电制冷效应的强化作用就需要明确基准稳态电压对于瞬态热电制冷过程的影响规律。如图 4(a)和图 4(b)所示,设定每组研究的脉冲电压幅度分别为 2.5 倍和 3 倍,成对分析了四组(八个工况)不同基准稳态电压作用下的动态特性。很明显,基准稳态电压越高,不仅实现的瞬态强化制冷温度越低,而且到达瞬态温降过程最低点的时间  $t_{sc}$  越短,对于所需要的电能转化也越少。主要由于随着基准稳态电压的升高,基准稳态工况获得的制冷温度已足够低(基准稳态工况的制冷量也足够大),因而当脉冲电压驱动开启后,即使输入较小的电压突变值,由于焦耳热占主导的热耗散作用的时间延迟特性,具有瞬时特性的帕尔贴制冷效应会瞬间表现出显著优势从而使冷端温度骤降,因而冷却速率较快。而当脉冲驱动转换为基准稳态电压驱动后,冷端的制冷性能恢复到基准稳定工况的响应时间  $t_{ss}$  也越短。然而,如果脉冲开启前的基准稳态电压升高到一定程度,由于脉冲驱动采用的突变电压大大高于基准稳态电压,导致对应于脉冲驱动阶段的输入电压会足够大,以至于输入电能大量转化为以焦耳热为主导的耗散热量并大量积聚在热电元件内部,而且增加比例与输入电流的二次方成正比,大大影响了冷端瞬态制冷效应的强化效果,甚至会失去冷端面的制冷功能而出现温度飙升的情况,如工况 8 所示。

因此,选择合适的基准稳态电压,是实现瞬态热电制冷效应被显著强化的前提。



(a) 瞬态冷端温度的变化趋势  
(a) Effect on the cold-junction temperature



(b) 瞬态制冷量的变化趋势  
(b) Effect on the cold-junction cooling power

图 4 基准稳态电压对热电元件瞬态制冷性能的影响

Fig.4 Paired comparison of steady-state reference voltages for the corresponding cooling performance

### 3.2 脉冲幅度

如图 5 所示,在同一基准稳态电压 6 V 基础上输入 1.5~3.5 倍不同幅度的脉冲电压,热电元件的冷端会在稳态基准冷却状态的基础上瞬态出现一个额外的显著温降(即瞬态额外获得显著提高的制冷量),其影响程度与脉冲电压的幅度密切相关;同时,获得的最低强化制冷温度出现在工况 3 点(脉冲电压幅度为 2.5 倍),该结论与已有文献中提到的研究结果相符<sup>[7]</sup>。此外,当脉冲幅度大于 2.5 倍时,制冷强化作用显著降低。尤其对于工况 6 点(脉冲幅度为 4 倍时),相比帕尔贴制冷效应作用下的制冷量,热电元件内部焦耳热效应为主导的热积聚更加显著且随运行时间急剧增加,同时,还会通过元件本身材料的热传导传递到元件冷端使其温度骤然升高而失去制冷作

用,其热-电转换效率如图 6 所示。分析可知,在相同的脉冲时间下,脉冲幅度越大,元件内部产生的焦耳热为主的热量积聚越多。此时,由于元件材料本身的热惯性对冷端影响的滞后作用将会更为明显地出现在较高脉冲电压幅度工况下(脉冲幅度大于 3 倍),导致了电能输入对制冷能力的有效转换利用率的显著降低。

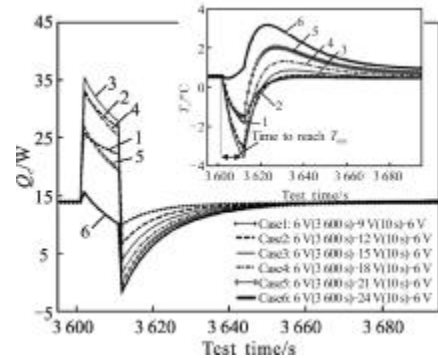


图 5 脉冲幅度对热电元件瞬态制冷性能的影响

Fig.5 Effect of pulse amplitudes on the corresponding cooling performance

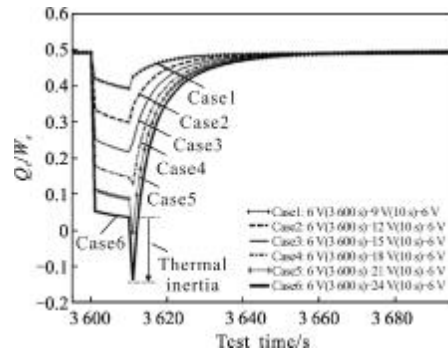


图 6 脉冲幅度对热电元件瞬态制冷效率的影响

Fig.6 Proportion of cooling power to the corresponding total electrically driven power by the different pulse amplitudes

### 3.3 脉冲时间

为了顺利实现对目标冷却控制元件的精确温控,脉冲持续时间是工作过程控制中的关键因素。因而合理选择脉冲时间可以获得效果显著的瞬态制冷强化作用。如图 7 所示,对比了七种工况所对应的不同脉冲时间下获得的冷端瞬态制冷温度,并且在工况 4 点(脉冲时间为 20 s)获得了最低瞬态制冷温度。

从整体趋势来看,不难发现输入的脉冲时间越短,越快到达其工况对应的瞬态温降过程的最低点;同时,当工况状态由脉冲突变电压驱动转换成基准稳态电压驱动之后,冷端温度会越快响应至恢复到

基准稳态工况点,但是,其相应的瞬态制冷效应的持续时间  $t_m$  也越短。综合各工况对应的瞬态制冷过程的特征时间参数,可以总结出一个近似比例关系 ( $t_s \approx 5t_c$ )。可见,上述两种特征时间参数间的比例关系不随脉冲时间而变化,而主要由热电材料本身的热物性参数决定。此比例关系对于预测过程控制中各阶段工作状态的响应时间阈值提供了理论依据。

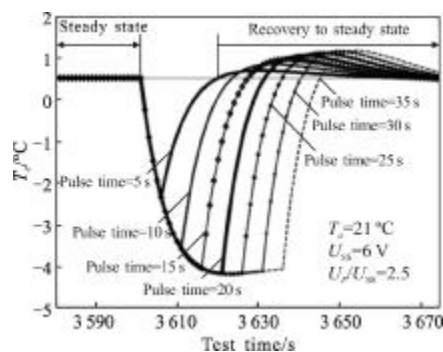


图7 脉冲时间对热电元件瞬态制冷温度的影响

Fig.7 Effect of pulse time on the corresponding cold-junction temperature

此外,当脉冲时间超过 20 s,电能输入将随时间的增加大量转化成为焦耳热为主导的热量并积聚在热电元件内部不能及时释放,使得帕尔贴效应(即时界面效应)的优势逐渐被取代,从而导致了电能转化为冷端瞬态制冷能力的有效电能转化利用率显著降低,如图 8 所示。尤其当脉冲驱动转化成基准电压驱动之后,冷端制冷温度需要更长时间恢复到基准稳态工况,不利于实现快速冷却到目标温度的精确控制。与同样是分析瞬态制冷效率的图 6 比较,可知脉冲电压幅度对瞬态制冷效率的影响程度大大超过脉

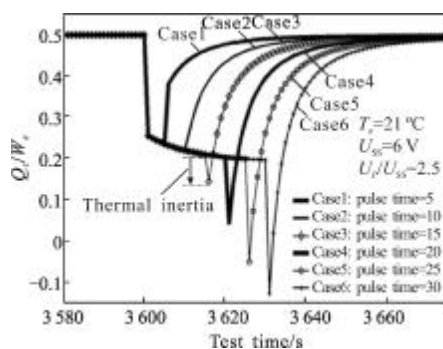


图8 脉冲时间对热电元件瞬态制冷效率的影响

Fig.8 Proportion of cooling power to the corresponding total electrically driven power by the different pulse time

冲时间对其的影响程度。因此,如果从考虑经济性出发,建议优化制冷系统的脉冲驱动时间,以实现瞬态热电制冷效应的最大强化,同时还保证了电能输入的有效利用率维持在较高水平。然而,如果从满足制冷需求出发,则采用方式相反。

## 4 结论

文中基于有限差分的数值求解方法,结合表征动态制冷过程的 3 个特征时间参数,系统分析了脉冲驱动的主要特征参数(基准稳态电压、脉冲时间和脉冲幅度)对热电元件瞬态制冷特性的影响规律,并讨论了在热电制冷效应的强化过程中瞬态热-电转换过程中的热运输机理。结果发现,采用脉冲驱动模式强化瞬态热电效应的实质在于如何不断增强帕尔贴效应来补偿热电元件内部以焦耳热和傅里叶热耗散形式的电能损耗,以及进一步推迟出现内部热积聚对热电模块冷端制冷带来的不可逆负效应,以求最大程度实现电能的有效转化。此外,文中的部分结果和已有文献相比较,二者吻合良好。因而针对实际制冷系统合理选择适宜的脉冲驱动参数,有利于瞬态热电制冷效应的显著强化,从而实现对控制元件的快速冷却。

## 参考文献:

- [1] Zhang H Y, Mui Y C, Tarin M. Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(12): 561-568.
- [2] Chen Xiaohang, Lin Bihong, Chen Jincan. The parametric optimum design of a new combined system of semiconductor thermoelectric devices [J]. *Applied Energy*, 2006, 83(6): 681-686.
- [3] Yang Mingwei, Xu Wenhai, Tang Wenyan. Modeling and analysis of thermoelectric cooler by equivalent circuit method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 281-285. (in Chinese)  
杨明伟, 许文海, 唐文彦. 热电制冷器的等效电路模拟与分析 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 281-285.
- [4] Shen Limei, Chen Huanxin, Zhang Wei. Analysis of the crucial factors affecting the performance of thermoelectric cooling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1866-1872. (in Chinese)  
申利梅, 陈焕新, 张威. 影响热电制冷性能的关键因素及

- 其分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1866-1872.
- [5] Stibans L S, Fedorovich N A. Cooling of thermoelectric cells under nonstationary conditions[J]. *Physics of the Solid State*, 1958, 3(11): 460-463.
- [6] Parrott J E. Interpretation of stationary and transient behaviour of refrigerating thermocouples[J]. *Solid State Electron*, 1960, 1(14): 135-143.
- [7] Landecker K, Findlay A W. Study of fast transient behaviour of Peltier junctions [J]. *Solid State Electron*, 1961, 2(5): 239-245.
- [8] Yang R, Chen G, Kumar A R, Snyder G J, et al. Transient cooling of thermoelectric coolers and its applications for micro-devices[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(9): 1407-1421.
- [9] Alata M, Al-Nimr M A, Naji M. Transient behavior of a thermoelectric device under hyperbolic heat conduction model [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2003, 24(5): 1753-1768.
- [10] Zhou Q, Bian Z, Shakouri A. Pulsed cooling of inhomogeneous thermoelectric materials [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(14): 4376-4381.
- [11] Yamashita O. Effect of linear temperature dependence of thermoelectric properties on energy conversion efficiency [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(11): 3163-3169.
- [12] Thonhauser T, Mahan G D. Improved supercooling in transient thermoelectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(15): 3247-3249.
- [13] Lee K H, Kim O J. Analysis on the cooling performance of the thermoelectric micro-cooler [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(4): 1982-1992.
- [14] McCarty R, Hallinan K P, Sanders B. Enhancing thermoelectric energy recovery via modulations of source temperature for cyclical heat loadings [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(6): 749-755.
- [15] Torzo G, Soletta I, Branca M. Using Peltier cells to study solid-liquid-vapour transitions and supercooling[J]. *European Journal of Physics*, 2007, 28(2): 13-27.
- [16] Cheng C, Huang S, Cheng T. A three-dimensional theoretical model for predicting transient thermal behavior of thermoelectric coolers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(13): 2001-2011.
- [17] Snyder G J, Fleurial J P, Caillat T. Super-cooling of Peltier cooler using a current pulse [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(3): 1564-1569.