

文章编号 1004-924X(2018)05-1140-08

组合式压电驱动芯片水冷系统

陈 松,王淑云*,谢心怡,张忠华,蒋永华,程光明

(浙江师范大学 精密机械研究所,浙江 金华 321004)

摘要:为了提高压电驱动芯片水冷系统的适用性、可维护性以及冷却效率,本文提出一种组合式压电驱动芯片水冷系统。首先,测试和分析了芯片水冷系统中组合式泵单元在 220 V_{pp} 方波驱动下不同组合方式(串/并联)、泵工作数量以及相对位置时的输出性能,接着,基于组合式泵单元的试验结果进行芯片水冷系统的水冷效果研究。实验结果表明:串联组合双泵工作时,双泵位于串联组合首尾位置(AD)时性能较优,在 30 Hz 时获得最大输出压力(25 kPa);串联组合四泵工作时,分别在 35 Hz 和 55 Hz 获得了最大压力(23.5 kPa)和最大流量(13.5 mL/min);并联组合双泵工作时,双泵都位于组合首位(AC)时性能较差;并联组合四泵工作时,分别在 50 Hz 和 60 Hz 获得最大输出流量(22 mL/min)和最大输出压力(12.6 kPa);通过串并联以及泵工作数量的切换获得了芯片水冷系统的冷却效果,不同的组合方式以及泵工作数量可以获得不同的冷却效果。获得了组合式压电驱动芯片水冷系统的驱动参数,为计算机芯片有效散热提供一条新途径。

关键词:压电泵;水冷系统;计算机芯片

中图分类号:TH38 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1140

Practical research on computer chip water cooling system with combined piezoelectric pump unit

CHEN Song, WANG Shu-yun*, XIE Xin-yi, ZHANG Zhong-hua,
JIANG Yong-hua, CHENG Guang-ming

(*Institute of Precision Machinery and Instrument,
Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jutwxy@163.com*

Abstract: In order to improve the applicability, maintainability and the cooling efficiency of piezoelectric computer chip water cooling system, a computer chip water cooling system driven by combined piezoelectric pump was proposed. Initially, the output performance of the combined pump units in piezoelectric water-cooling system with different combinations (series/parallel), pump quantity and the relative position were tested and analyzed under 220 V_{pp} square wave. Subsequently, a research on water cooling efficiency of piezoelectric water-cooling system was conducted, based on the experimental results of combined pump units. The experimental results indicated that as the double pump units working in series combination, the performance of the working units located at the first and tail position (AD) was optimal with maximum output pressure (25 kPa) at a frequency of 30 Hz. When four pump units were working in series combination, the maximum pressure (23.5 kPa)

收稿日期:2017-08-09;修订日期:2017-10-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51577173);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY16F010003)

and maximum flow (13.5 mL/min) were obtained at 35 Hz and 55 Hz, respectively. While double pump units were working in parallel combination, the performance of the double-working pumps which were located at the first (AC) position was relatively poor; When four pump units were working in parallel combination, the maximum output flow (22 mL/min) and maximum output pressure (12.6 kPa) were obtained at 50Hz and 60Hz, respectively, through switching of series/parallel and the pump quantity. It was found that different combinations and pump quantities could acquire different cooling efficiency. The driving parameters of the combined piezoelectric cooling system are obtained, which provide a novel approach for the effective cooling of computer chips.

Key words: piezoelectric pump; water cooling system; computer chip

1 引言

近年来,随着 CPU 芯片的集成度和性能不断提高,芯片冷却在计算机设计开发中占有重要的地位^[1-3]。Liu 等人^[1]提出一种结合热电冷却器和温差环流冷却系统的 CPU 芯片冷却装置,在冷却装置作用下,CPU 样机的等效功率为 84 W 时,其外表最大温度为 70 °C。Putra 等人^[2]通过集成一种珊瑚状生物材料作为 CPU 冷却系统的热管材料以提高其冷却效果,相较于传统铜材料,其冷却后温度大约低 38.6%。水冷系统是芯片冷却散热的重要方式,其中压电泵因其具有结构简单、集成度高、功耗低以及无电磁干扰等优点,在芯片水冷系统中具有广泛的应用潜力^[4-7]。日本 NEC 公司开发了一种压电泵驱动的专用水冷装置,并成功应用于超薄的个人笔记本电脑的芯片冷却。曾平等^[5]人设计了四腔串并联压电泵用于计算机芯片水冷系统,在额定电压 120 V,额定频率 130 Hz 情况下空载流量 540 mL/min。彭太江等人^[6]设计了串联双腔压电泵驱动水冷系统,该系统具有优良的冷却效果,系统冷却平衡温度比风冷低 10 °C,比热管冷却系统低 6 °C。目前水冷系统中,压电泵主要采用的是一体式多腔体泵,其结构紧凑且整体性好,但是由于其一体化设计,使得制作工艺复杂且维护性和可更换性差,且无法在不同扬程/流量需求的场合中使用,适应性差。

本文提出一种以单振子有阀压电泵作为独立单元进行组合的组合式压电驱动芯片水冷系统,由于该系统以单振子有阀压电泵作为独立单元,在制作、维护和更换中具有更大的优势,同时通过

加装对应的控制转换单元可实现压电泵不同的串并联组合以适应不同的扬程/流量需要,所以本文提出的组合式压电驱动水冷系统具有实际的工程使用需求。在压电驱动水冷系统中,由于压电泵为脉动输出,泵单元中泵的驱动电压/频率、工作数量、相对位置、组合方式(串/并联)都将对系统输出性能产生影响。根据水冷系统的实际工作环境变化,适时有效的改变泵单元的输出性能,将提高水冷系统的适用性以及节能性。考虑到应用于水冷系统时的体积限制问题,设计制作的单泵体积小,并选择较合适的组合单泵数量,使其在实际应用安装时处理相对一体式多腔体压电泵更加灵活轻便。本文采用 4 个压电泵组合进行实验,获得串/并联组合下泵工作数量与相对位置时系统的工作性能,从而得到系统工作驱动参数,为实际压电水冷系统在实际过程中提供相关驱动数据参考。

2 结构及工作原理

图 1 和图 2 分别为单振子有阀压电泵的结构原理简图和试验样机,压电泵主要由泵体,泵盖,压电振子、单向阀组成。其中泵体材料为 PET,单向阀结构为悬臂梁阀结构。压电振子、泵体与单向阀组成一个密闭腔体,压电泵在交变电压的驱动下,压电振子上下往复振动,结合单向阀周期性的有序开启和关闭形成吸程与排程。吸程时,压电振子向上振动,泵腔容积增大,入口阀打开,出口阀关闭,流体流入泵腔;排程时,压电振子向下振动,泵腔容积减小,入口阀关闭,出口阀打开,流体排出泵腔,如此循环从而实现流体的单向流动^[8-10]。

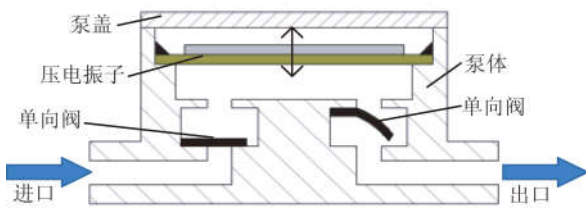


图 1 单振子有阀压电泵结构原理简图

Fig. 1 Structure principle of piezoelectric pump



图 2 单振子有阀压电泵试验样机

Fig. 2 Prototype of piezoelectric pump

图 3 为组合式压电水冷系统的系统构成,主要由吸热单元、组合式泵单元以及散热器组成。其中组合式泵单元由 4 个压电泵组成,通过控制组合方式(串/并联)、泵工作数量、相对位置获得不同的冷却液流量及扬程,以适应不同的水冷场合,从而提高水冷系统的节能效果和适用性。吸热单元由吸热器、模拟芯片、发热块以及热电偶组成,为了获得更好的传热效果,在实际组装中发热块、模拟芯片以及吸热器通过导热胶进行粘结,热电偶插入模拟芯片内部进行温度监测。图 4 为吸热单元的实际组装图。

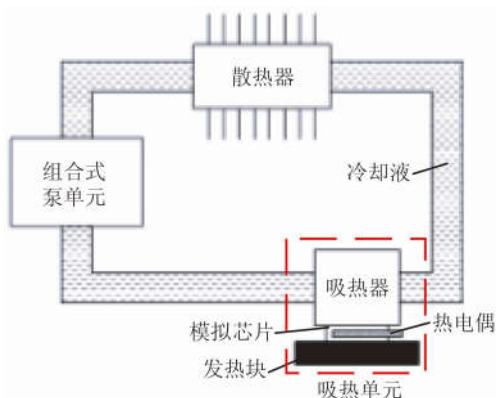


图 3 组合式压电水冷系统的系统构成

Fig. 3 System composition of combined-piezoelectric cooling system

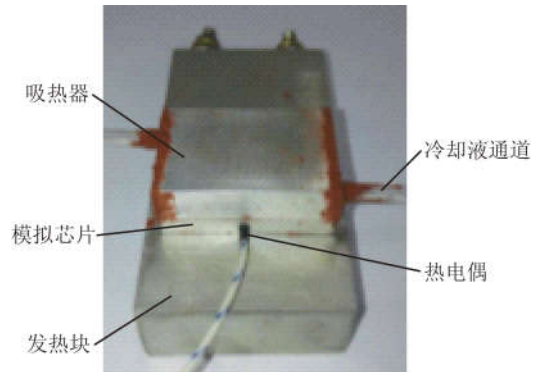


图 4 吸热单元实际组装图

Fig. 4 Actual assembly diagram of heat absorption unit

3 理论分析

为了简化分析,视芯片与吸热器、吸热器与冷却液之间的传热为大平板导热,平板的导热量为^[11]:

$$\varphi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A, \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, A 为传热平板面积, Δt 为传热平板两侧的温度差, δ 为传热平板厚度。从式(1)可知,为了提高芯片的散热效果,应从导热系数、导热面积以及导热板厚度入手,其中导热系数主要与吸热器材料相关,本文吸热器采用的是铝合金材料,导热率为 $160 \sim 170 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,导热硅胶将吸热器与芯片连接,导热板厚度和面积分别为 1 mm 和 12 cm^2 ,即在吸热器结构、材料以及冷却液固定的情况下,导热量将由温差 Δt 决定。本次测试中,采用了管片式散热器,由于散热器中冷却液流速较稳定,散热圆管内外壁会在一定时间内达到稳定,依据圆筒导热的第一边界条件理论,散热器中圆筒壁的导热量为^[11]:

$$\varphi' = 2\pi\lambda l \frac{\Delta t'}{\ln(d_2/d_1)}, \quad (2)$$

式中: l 为散热器圆管的长度, $\Delta t'$ 为圆管内外壁温度差, d_1, d_2 分别为圆管内径和外径。从式(2)可知,散热器的散热导热量与圆管长度 l 以及散热圆管壁厚相关,同时为了加大散热器的导热系数,散热器会通过加设栅片的方式加大散热管与空气的接触面积。结合式(1)和(2),在吸热器和散热器结构、芯片发热功率以及外界环境条件确定的条件下,当 $\varphi = \varphi'$ 时,水冷系统将吸热和散热达到一个平衡,此时芯片将趋于稳定,冷却液温度将一

定,即 $\Delta t'$ 一定,此时,即便泵单元驱动冷却液流量不断增加,芯片温度仍无法下降,即存在一个临界流量。在临界流量下工作,系统的能量转换效率高。

泵单元为串联组合时,根据单振子有阀压电泵的结构和工作原理,假定各泵单独工作时输出压力相同为 P_0 ,则 n 个泵组合时,泵单元的输出压力为:

$$P_s = nP_0, \quad (3)$$

串联组合时泵单元的流量为^[12]:

$$Q_s = \eta_f Q_0 \sqrt{n}, \quad (4)$$

其中: $\eta_f = f_s / f_0$, f_s 和 f_0 分别为串联组合泵单元和单泵的最佳工作频率, Q_0 为单泵单独工作时的输出流量。由式(3)和式(4)可知,通过对泵单元的串联组合可以获得较大的流体压力输出,且与泵的工作数量正相关,而泵单元的最佳工作频率 f_s 与单泵的最佳工作频率 f_0 也将对系统的输出流量产生影响。并联组合时,泵单元的输出流量和输出压力分别为^[13]:

$$P_p = P_r, \quad (5)$$

$$Q_p = nQ_r, \quad (6)$$

其中 P_r 与 Q_r 分别为并联各分路的输出压力和流量。本文并联组合采用的是两两串并联组合,如图 5 所示,两条分路分别由两泵串联组成,所以,结合式(3)~(6)可知,泵单元通过并联组合,可以获得较大的流量输出,且系统的最佳工作频率也将对输出流量产生影响。所以在组合式压电水冷系统中,可以通过改变泵单元中压电泵的驱动参数、工作数量以及组合方式提高能量使用效率,获得临界流量,以此达到系统效率最大化,提高系统的能量转换效率和适用性。

4 试验设计

为探究在不同工作方式下组合式压电水冷系统的输出性能特点。试验以单振子有阀压电泵作为独立单元进行组合式泵单元的性能测试。表 1 为压电泵的相关试验参数。为了使组合式泵单元中每个压电泵性能一致,每个零部件的生产以及泵整体组装都是在同一次操作中完成,在一批次压电泵中进行性能实验,最终选取 4 个性能较为接近的压电泵,选择 4 个泵不仅能够体现泵单元的串/并联效果,同时其在水冷系统中安装体积及

输出性能具有较普遍与通用的意义,在压电泵串/并联输出性能的理论 and 试验基础上,如连接方式相同时,增加泵的数量是在四个泵性能基础上的量化增加。

表 1 单振子有阀压电泵的结构参数
Tab. 1 Parameters of piezoelectric pump

类型	参数
泵外形尺寸/mm	$\varnothing 24 \times 5$
泵体材料	PET
压电振子基板外径/mm	$\varnothing 20$
压电振子基板厚度/mm	0.2
单向阀材料	PET
单向阀厚度/ μm	20
单向阀类型	悬臂梁阀
驱动类型/V _{pp}	220, 方波
泵腔高度/mm	0.15
功率/mW	35

实验中,组合式泵单元 4 个泵的代号分别为 A,B,C 和 D,图 5 为本文泵单元采用的两种组合方式,分别为串联以及并联组合,这两种组合在实际使用中具有一定的代表性,能获得较为均衡的输出流量以及压力。本文将对两种组合方式进行输出性能试验,以获得不同组合方式、泵工作数量以及相对位置时输出性能特点,为实际使用提供驱动参数参考,最后与散热器组合,测试水冷系统在不同的驱动参数/组合方式下的输出性能。

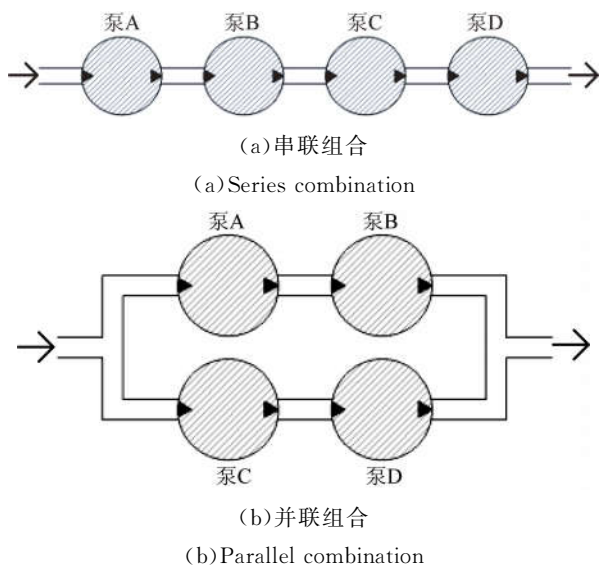


图 5 组合式泵单元的串/并联组合

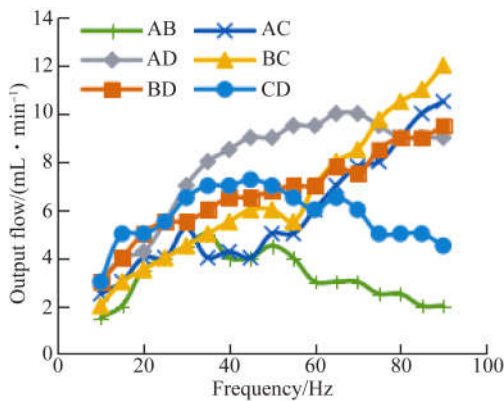
Fig. 5 Series/parallel combinations of combined pumps

5 试验分析

首先对泵单元在不同组合方式(串/并联)、泵工作数量以及相对位置下进行实验,测试泵单元的输出性能,最后通过组合式压电水冷系统实验,获得不同驱动方式下驱动效果。

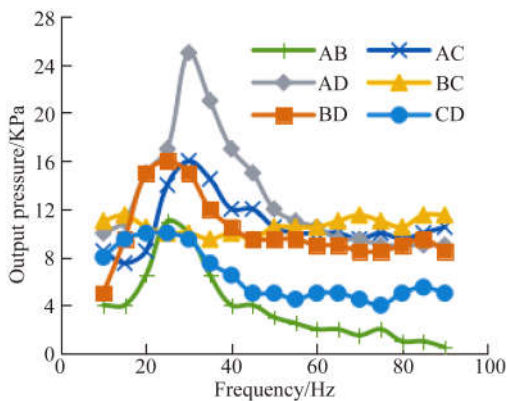
5.1 串联组合试验

图 6 为串联组合双泵工作,在不同频率下泵单元的输出性能。从图 6 中可知,其输出压力较单泵工作时有明显的提升,前后泵(AD)组合工作能获得较好的输出性能,在 30 Hz 时输出压力达到 25 kPa,而 AB 组合工作时,性能受到了很大的削弱。所以在串联组合双泵驱动时,驱动位于两端的 A 和 D 能获得较好的输出性能。



(a)不同频率下输出流量

(a)Output flow rates at different frequencies



(b)不同频率下输出压力

(b)Output pressure at different frequencies

图 6 串联组合双泵工作性能

Fig. 6 Output performance of double-work pump in series combination

图 7 为组合式泵单元采用四泵驱动时,不同频率下,泵单元的输出性能。从图中可知:泵单元在 55 Hz 驱动时,输出流量达到最大(13.5 mL/min);在 35 Hz 驱动时,输出压力达到最大(23.5 kPa)。

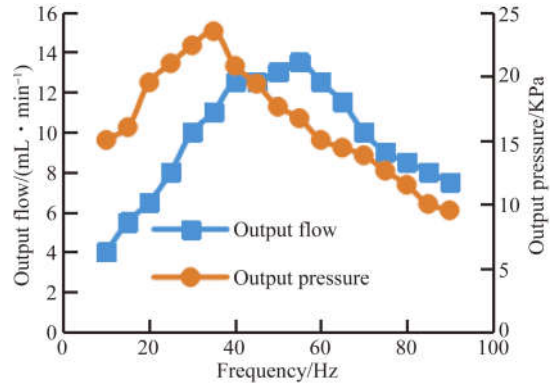
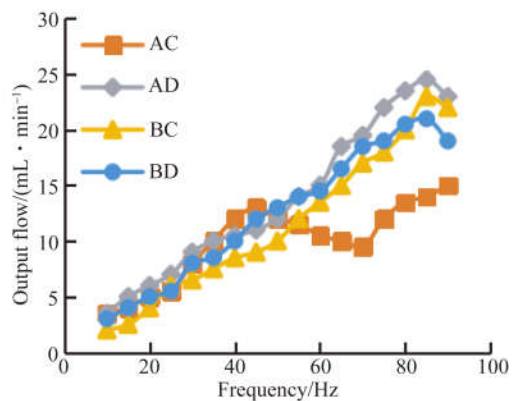


图 7 串联组合四泵工作输出性能

Fig. 7 Output performance of the quadruple-work pump in series combination

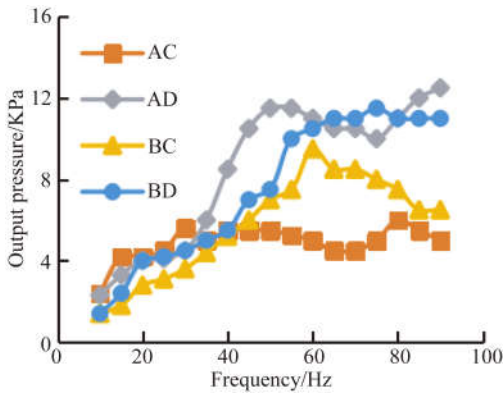
5.2 并联组合试验

在并联组合中,采用了图 5 的组合方式,在这种方式下,为了体现泵单元的并联效果,未对 AB 以及 CD 组合进行双泵工作实验。图 8 为组合式泵单元采用双泵并联驱动时,不同频率下,泵单元的输出性能。从图 8 中可以发现,BD/AD/BC 3 组双泵组合展现出的输出性能差异不大,而 AC 在 40 Hz 以后出现了较大的波动,且整体性能偏弱。双泵并联工作时,输出流量整体高于泵单元串联,AD 在 85 Hz 时,输出流量达到 24.5 mL/min,而输出压力整体低于串联组合,AD 在 55 Hz 时,输出压力最大,仅为 11.5 kPa。



(a)不同频率下输出流量

(a)Output flow rates at different frequencies



(b)不同频率下输出压力

(b)Output pressure at different frequencies

图 8 并联组合双泵工作输出性能

Fig.8 Output performance of the double-work pump in parallel combination

图 9 为组合式泵单元采用四泵并联驱动时,不同频率下,泵单元的输出性能。从图 9 中可知,ABCD 四泵并联组合时,在 50 Hz 时输出流量最大(22 mL/min),在 60 Hz 时,输出压力最大(12.6 kPa)。

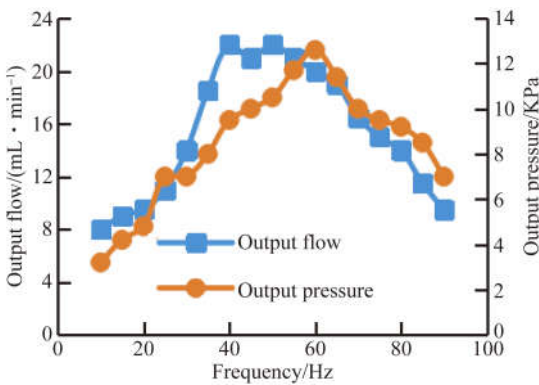


图 9 并联组合四泵工作输出性能

Fig.9 Output performance of the quadruple-work pump in parallel combination

5.3 压电水冷系统节能试验

图 10 为没有水冷系统参与时不同驱动功率下模拟芯片的温度上升曲线,从图中可知,芯片温度随着时间的增长,逐步上升,18 W 驱动下上升速度明显快于 11.5 W,其中 18 W 在 40 min 加热后,温度达到 102.7 °C,11.5 W 在 40 min 加热后温度达到 82.8 °C。

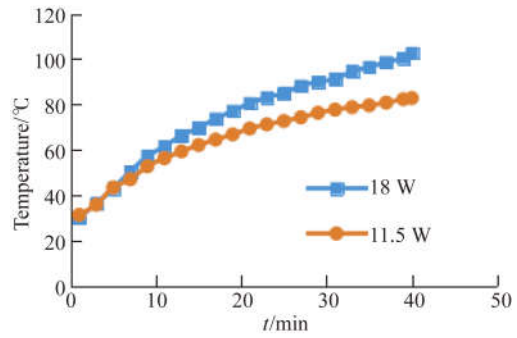


图 10 模拟芯片在没有水冷系统参与下的温度曲线
Fig.10 Temperature curve of analog chip without the water cooling system

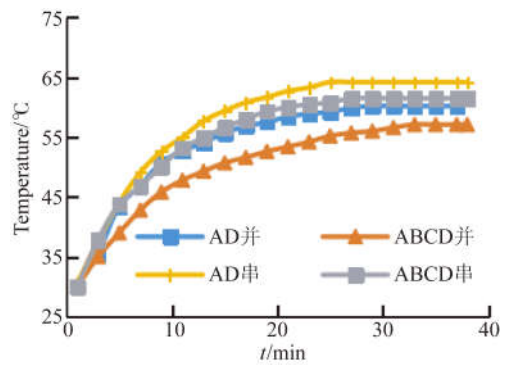


图 11 在 18 W 驱动下,不同组合的温度曲线
Fig.11 Different temperature curves with different combinations under 18 W

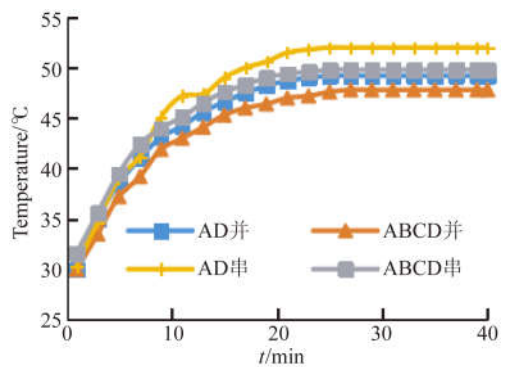


图 12 在 11.5 W 驱动下,不同组合的温度曲线
Fig.12 Different temperature curves with different combinations under 11.5 W

基于串/并联组合试验结果,分别选用四组不同串/并联中的较优组合进行压电水冷系统节能试验。图 11 和 12 为压电水冷系统参与后,不同加热功率下芯片的温度变化曲线。从图 11、12 中可知,在 18 W 和 11.5 W 加热功率下:ABCD 并联组合冷却效果最好,芯片在分别在 33 min 和

23 min 时达到平衡温度 57.1 °C 和 47.8 °C; AD 串联组合最差, 芯片分别在 25 min 和 24 min 时达到平衡温度 64.2 °C 和 52 °C; 同时可以发现通过串并联切换, 并联 AD 双泵工作冷却效果等同于甚至优于串联 ABCD 四泵工作, 能获得很好的节能效果。

6 结 论

本文提出了一种组合式压电驱动计算机芯片水冷系统, 以单振子有阀压电泵作为独立单元进行组合, 通过对组合式泵单元的驱动电压/频率、组合方式、泵工作数量以及相对位置的切换, 可实现冷却系统的不同扬程/流量的需要, 实验结果表

明: (1) 串联组合可以获得较大的输出压力, 以满足大扬程的需要, 串联 4 泵工作时 35 Hz 输出压力达到 23.5 kPa, 输出流量为 11 mL/min。 (2) 并联组合可以获得较大的输出流量, 以满足大流量的需要, 并联 4 泵工作时, 在 50 Hz 获得最大流量 (22 mL/min), 输出流量为 10.5 mL/min。 (3) 通过泵工作数量以及相对位置对系统输出性能影响大, 其中串联组合双泵工作时, 首尾泵组合 (AD) 工作性能较优, 而并联组合双泵工作时, 双首泵组合 (AC) 性能较差。 (4) 通过对压电水冷系统的组合转换, 可以获得不同的芯片冷却效果, 其中并联双泵 AD 驱动可以达到甚至超过于串联 ABCD 驱动的冷却效果, 可以获得很好的节能效果。

参考文献:

- [1] LIU D, ZHAO F Y, YANG H X, *et al.*. Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system [J]. *Energy*, 2015, 83:29-36.
- [2] PUTRA N, SEPTIADI W N. Improvement of heat pipe performance through integration of a coral bio-material wick structure into the heat pipe of a CPU cooling system [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2017, 53(4):1163-1174.
- [3] AL-RASHED M H, DZIDO G, KORPYS M, *et al.*. Investigation on the CPU nanofluid cooling [J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 63:159-165.
- [4] 陈松, 刘勇, 阚君武, 等. 微型压电泵中腔高对气泡滞留的影响规律 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3):672-679.
CHEN S, LIU Y, KAN J W, *et al.*. Influence of pump-chamber height on bubble retention in piezoelectric micro-pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3):672-679. (in Chinese)
- [5] 曾平, 程光明, 刘九龙, 等. 压电泵为动力源的计算机芯片水冷系统研究 [J]. *压电与声光*, 2006, 28(4):403-406.
ZENG P, CHENG G M, LIU J L, *et al.*. Practical research on water cooling system with computer chip driven by PZT pump [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, 28(4):403-406. (in Chinese)
- [6] 彭太江, 杨志刚, 阚君武. 压电泵在 CPU 芯片液体冷却系统中的应用研究 [J]. *制冷学报*, 2009, 30(3):30-34.
PENG T J, YANG ZH G, KAN J W. Investigation on piezo-pump used in water-cooling-system for computer CPU chip [J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(3):30-34. (in Chinese)
- [7] ZHANG ZH H, KAN J W, WANG S Y, *et al.*. Effects of driving mode on the performance of multiple-chamber piezoelectric pumps with multiple actuators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(5):954-963.
- [8] 赵天, 杨志刚, 刘建芳, 等. 利用压电微泵驱动和脉动混合可控合成金纳米粒子 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):904-910.
ZHAO T, YANG ZH G, LIU J F, *et al.*. Controlled synthesis of gold nanoparticles based on PZT micropump and pulsating mixing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):904-910. (in Chinese)
- [9] 曾平, 李立安, 胥锋, 等. 无阀压电泵的流固耦合仿真及试验验证 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1):112-118.
ZENG P, LI L A, XU F, *et al.*. Structural-fluid coupling simulation and experimental verification on valveless piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):112-118. (in Chinese)
- [10] MA Y T, WANG C, YAN X T, *et al.*. Note: A valve-type piezoelectric reciprocating pump with secondary resonant vibrator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1):016104.
- [11] 章熙民, 朱彤, 安青松, 等. 传热学 [M]. 6 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
ZHANG X M, ZHU T, AN Q S, *et al.*. *Heat Transfer* [M]. 6th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

- [12] 王淑云, 阚君武, 沈黄桥, 等. 五腔串联压电泵的设计制作与试验 [J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(5):406-411.
WANG SH Y, KAN J W, SHENG H Q, *et al.*. Design, fabrication and test of serial-connection 5-chamber piezoelectric pump [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(5): 406-411. (in Chinese)
- [13] 彭太江, 杨志刚, 程光明, 等. 双腔体压电泵的设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5):1078-1085.
PENG T J, YANG ZH G, CHENG G M, *et al.*. Design of double-chamber piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1078-1085. (in Chinese)

作者简介:



陈 松(1988—),男,江西丰城人,讲师,博士,2011年于浙江师范大学获学士学位,2016年于吉林大学获博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。E-mail: chensong@zjnu.edu.cn

通讯作者:



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年和2008年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位,主要从事能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面研究。E-mail: jutwsy@163.com