

文章编号: 1005-0329(2010)07-0068-05

# 半导体制冷器制冷性能的综合影响因素探讨及其优化设计分析

毛佳妮, 申丽梅, 李爱博, 汤魁

(华中科技大学, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 对于半导体制冷器优化研究的目的在于使其制冷性能最优化。本文通过对半导体制冷器的结构尺寸及热电材料相关物性参数进行了较系统的研究, 推荐出了最佳理论设计值。同时, 采用数值分析与解析求解相结合的方法, 综合讨论了在稳态条件下, 优值系数、最优结构尺寸、冷热媒温度、电流、介质端面对流换热强度等参数变化对热电制冷器制冷性能的改善影响, 以及各性能参数之间的相互制约关系。结论对于实际热电制冷系统的优化设计以及系统性能的提高提供了理论依据。

**关键词:** 半导体制冷器; 优化设计; G因子; 对流换热强度

**中图分类号:** TB66      **文献标识码:** A      **doi** 10.3969/j.issn.1005-0329.2010.07.016

## Combined Influence of Thermoelectric Refrigerating Performance and Optimization of Thermoelectric Cooler

MAO Jiani, SHEN Limei, LI Aibo, TANG Kui

(Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The objective for the optimization research is to optimize the total refrigerating performance of the semiconductor-cooling device. This paper systematically expounds the internal structure of the cooling device and interrelated parameters of thermoelectric material and obtains the optimal theoretical values for the design. Combined numerical simulation with analytical method, the complex influence for refrigerating performance improvement was discussed involving the merit figure, optimal physical dimension, temperature of cold/heat medium, electric current, intensity of interfacial convection heat transfer, as well as the complementary effects. The results suggest that it is of great importance to offer the theoretical basis to practical optimal design and performance improvement on cooling device.

**Key words:** thermoelectric cooler; optimal design; G-factor; intensity of convection heat transfer

“制冷百家” 微信公众号

汇聚制冷界、暖通界百余名专家学者倾力打造的平台, 物性查询、论文分享, 定时推送最新技术

## 1 引言

热电制冷也被称作半导体制冷或温差电制冷, 是一项建立在帕尔贴效应基础上的人工制冷技术。近年来, 在车载冰箱、酒柜冰箱、饮水机、恒温冷藏箱中得到广泛应用, 尤其在某些特殊场合(航空航天设备、医疗精密器械、微电子散热), 发挥着其它制冷方式无法替代的作用。

目前, 国内外研究重点主要针对制冷器本身热电材料特性的优化, 然而针对热电制冷器内部结构的综合影响因素分析鲜有研究。主要的结构

影响因素包括: 热电臂几何尺寸; 接触效应(器件焊接面上的接触热阻以及 P-N 结电臂导流条上导流电阻); 实际热电模块冷端与制冷空腔之间以及热电模块热端与散热器之间热耦合层上的寄生温差等等<sup>[1]</sup>。此外, 针对热电制冷器制冷性能参数的计算公式, 均在冷端和热端温度已知的条件下推导得到。就实际情况而言, 热端或冷端的介质温度容易测得, 但是制冷器冷端和热端的温度还取决于与环境介质的换热情况和工作电流, 即常在变工况下工作, 随之制冷性能参数的计算变得十分复杂。所以按设计计算得到的制冷性能

收稿日期: 2009-10-28 修稿日期: 2010-06-18

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

评价值,可能与实际制冷系统出入较大。

## 2 几何尺寸对制冷性能的影响

### 2.1 半导体制冷器面积及厚度对制冷性能的影响

现假设热电制冷单元工作的冷、热端温差、热电材料以及运行工况的电流值已确定,用  $G = S/L$  表示器件电偶元件的“横截面积/长度”因数,作为对热电单元的尺寸评价因子。热电制冷单元的制冷量  $Q_c$  为<sup>[2]</sup>:

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - k(T_h - T_c) \quad (1)$$

制冷系数  $\epsilon$  为<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon = \frac{\alpha T_c - k \Delta T - \frac{1}{2} I R}{I R + \alpha \Delta T} \quad (2)$$

式中  $T_h$ ——热端温度, °C

$T_c$ ——冷端温度, °C

$\alpha$ ——热电偶的塞贝克系数, V/K

$I$ ——工作电流, A

$R$ ——热电偶单元的总电阻,令  $R = \frac{L}{S}(\rho_n + \rho_p)$ ,  $\Omega$

$k$ ——单元电偶元件沿臂长方向单位长度的总热导  $k = \frac{S}{L}(\lambda_n + \lambda_p)$ , W/(K·m)

$\pi$ ——帕尔贴系数

得到:

$$Q_c = \pi I - \frac{I^2(\rho_n + \rho_p)}{2G} - G(\lambda_n + \lambda_p) \Delta T \quad (3)$$

当  $G = I \frac{\rho_n + \rho_p}{2(\lambda_n + \lambda_p) \Delta T}$  时,最大制冷量为:

$$Q_{c,max} = \pi I - I^2(\rho_n + \rho_p) / (2(\lambda_n + \lambda_p) \Delta T) \quad (4)$$

由此可见,当运行环境和热电材料确定后,存在一个最优  $G$  值,使半导体制冷器的制冷量达到最大。同时,由式 (3) 得到,器件单位面积的制冷量仅由制冷器的元件长度决定,而且如果按比例同时缩小制冷器面积与热电臂长度,不仅能维持制冷量不降低,还有利于制冷器微型化的发展<sup>[2]</sup>。

为了更直观地反应  $G$  因子对热电模块制冷性能的影响,现采用 CFD 数值分析方法。物理模型选用型号为 TEC112704 的热电模块,元件对数

$n$  为 127 对,外型尺寸为 (40mm×40mm×3.9mm),最大允许制冷量为 38W。初始条件设置:拟定工作电流  $I$  为 3.5A,冷、热端温度均为环境温度 300K。考虑到便于模型内部网格的细化,同时减少不必要的网格数,采用非连续网格划分,将模型与计算域 (100mm×100mm×60mm) 分离开,总网格数约为 47 万,模型假设为:

(1) 热电对的两臂具有相等的热导率,电阻率,以及大小相等符号相反的温差电动势率。两臂的横截面和臂长也分别相等;

(2) 热电臂的导热只考虑沿臂长方向,忽略侧向的热传导以及热损失;

(3) 忽略汤姆逊效应的影响。

如图 1 所示,当  $G$  因子取值在 0.06~0.15 这个区间时,制冷器冷端温度变化的梯度较大,冷端温度会显著降低,能较理想的满足制冷需求。冷热端温差变化梯度也较大,可以满足较大温差的需求。而当  $G$  因子取值为 0.15 后,冷端温度将趋于一个相对稳定的值。

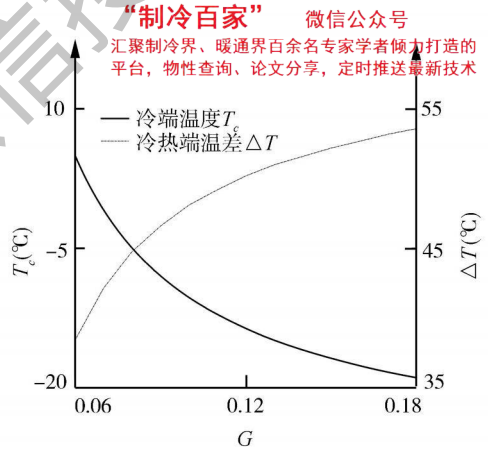


图 1 冷热端温差和冷端温度随  $G$  因子的变化

如图 2 所示,制冷系数和制冷量均随着  $G$  因子的增大,先增大后减少,即对于特定的制冷器,存在着一个最佳的  $G$  因子范围。推荐如果以最大制冷系数为基准的设计工况时,最佳  $G$  值为 0.1;以最大制冷量为基准的设计工况时,最佳  $G$  值为 0.07。

针对目前小型制冷系统的生产多以考虑制造及运行成本的经济性为主,代入优化得到的最佳  $G$  值 (0.1) 作为数值模拟的基础参数,用以分析可以满足最大制冷系数设计工况下的实际运行性能。如图 3 所示,冷热端温差会随着电流的增大而增大,并在小电流工况时,温差与电流近似成线

性关系,其线性化程度将随着温度梯度的下降而减弱。同时,冷端温度随着电流增大而不断降低,随后变化逐渐趋于平缓,直到电流为 4.1A时,达到最低。

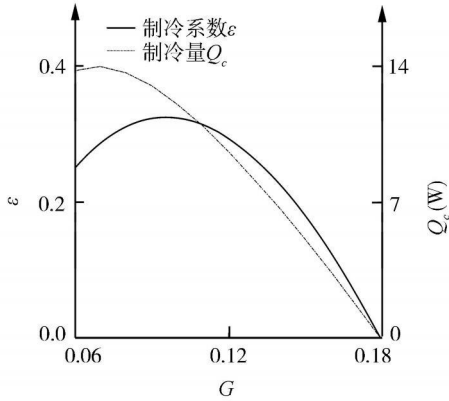


图 2 制冷系数和制冷量随 G 因子的变化

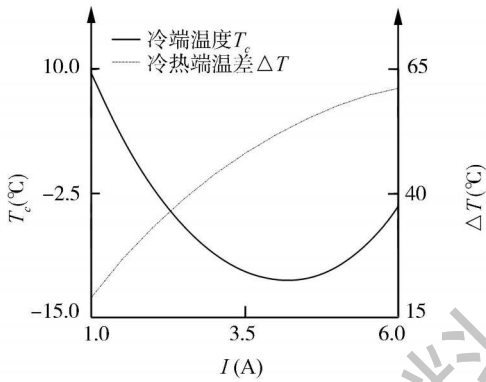


图 3 冷热端温度随电流的变化 (G = 0.1)

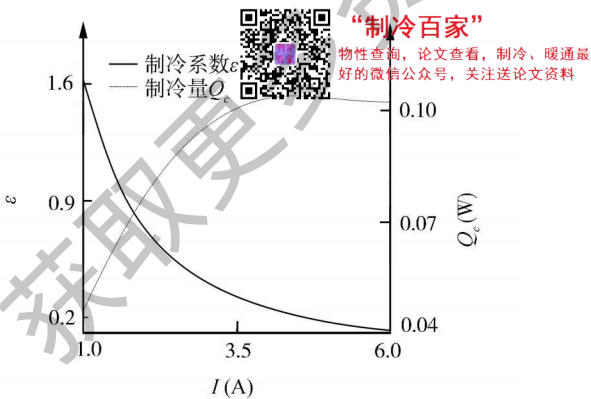


图 4 制冷系数和制冷量随电流的变化 (G = 0.1)

如图 4 所示,当电流增大到 3.5A 时,半导体制冷器达到理论最佳制冷系数工况 (0.325),且对应的单元制冷量 (0.1W) 也接近最大单元制冷量的工况点,此理论值为预测到的该类系统运行的最佳工况点。而当电流为 4.1A 时,对应的制

冷系数只有 0.21,可以理解为制冷器转化冷量的效率较低,因此也验证了当冷端温度达到最低时其制冷系数并未达到最大值。对于较小的温差即可满足供冷需求的小型半导体制冷系统,推荐电偶元件单元以最佳结构尺寸比例 G 因子 (0.1) 设计。

### 2.2 热电臂长度对半导体制冷器制冷性能的影响

在热电制冷器表面积尺寸及电偶臂对数都确定的情况下,为了实现较大的能量密度,通常在保证一定功率前提下,希望热电制冷器体积越小越好。这并不意味着说电偶元件长度可以无限减小,因为其长度的优化设计还受到导热温差、接触层热阻以及接触层电阻因素的约束限制,其接触效应对半导体制冷器的制冷性能的影响将随着热电模块形状尺寸的微小化变得越来越显著<sup>[3]</sup>。对于半导体制冷器的尺寸优化设计,针对电偶元件臂长的设计显得尤为重要。

当制冷器处于稳态时,为了更接近实际情况,传热模型加入了汤姆逊效应的考虑,目的使计算结果更接近实际工况。假设热电臂的导热只沿电偶元件臂长方向传热,侧壁作绝热处理,按第一类边界条件作一维稳态传热过程分析。简化后得到其热传导方程为<sup>[4]</sup>:

$$Kl \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \tau I \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{R}{L} I^2 = 0 \quad (0 \leq x \leq L) \quad (5)$$

边界条件为:

$$Q_c = \alpha_c I T_c + \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_c A' (T_c - T_c)$$

$$Q_h = \alpha_h I T_h + \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_h A' (T_h - T_h)$$

$$T(0) = T_c, T(L) = T_h$$

式中  $T_c$ ——冷端介质温度, K

$T_h$ ——热端介质温度, K

$A$ ——热电臂的横截面积

$A'$ ——热电模块端面横截面积

现按第一类边界条件处理,假设冷端温度  $T_c = 270K$  热端温度  $T_h = 300K$  热电臂  $L = 6mm$ ,  $\alpha = 400 \mu V/K$  如图 5 所示,在工作电流较小时,汤姆逊效应的影响不太显著,计算时可忽略不计。但当工作电流较大时,影响程度显著增大;同时,如果考虑汤姆逊效应,会使计算结果更符合实际工况,也更容易揭示在某些极限工况下的热电特性。

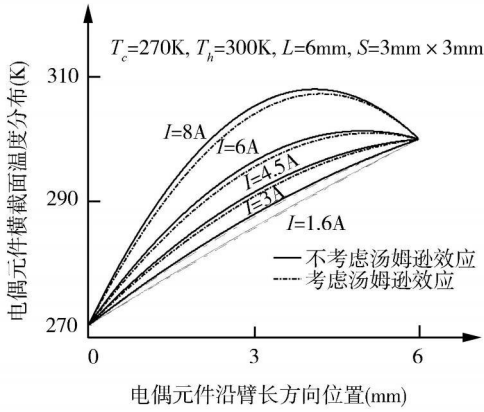


图 5 汤姆逊效应对于电偶元件内部温度场的影响趋势

为进一步了解不同电偶臂长度的各电偶元件截面温度分布, 现以较大的工作电流  $I=6.0A$  为例参与计算。同时, 半导体元件采用等截面电偶臂, 且取  $S_a = S_b = 2.2mm \times 2.2mm$ , 热电臂长  $L_a = L_b = 3mm \sim 6mm$  作对比分析。此外,  $\lambda = 14.98 \times 10^{-3} mW / (cm \cdot K)$ ,  $\rho = 1.17 \times 10^{-2} (\Omega \cdot cm)^{-1}$ 。

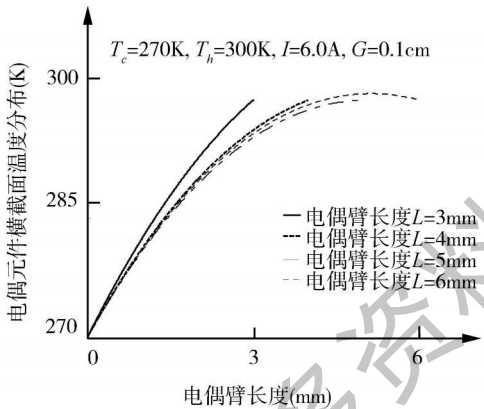


图 6 不同电偶臂长度截面温度分布比较

如图 6 所示, 在相同的工作电流下, 电偶臂长度的设计对于内部温度的分布有很大影响。当电偶臂长度大于 5mm 时, 随着两端温差的增大, 在接近高温端边界的附近会出现一个截面温度的峰值, 其截面温度超过了高温端的已知边界温度, 可以解释为当工作电流较大时, 内部产生的大量焦耳热由于电偶臂较长而不能及时通过电偶元件的热端传导至外界, 会在内部某位置出现一个温度极值。

如图 7 所示, 当电偶元件冷热端温差偏小时, 热电臂内部容易在临近高温端边界的位置出现一个高于已知热端温度的温度峰值。同时, 当冷热端温差过大时, 电偶元件沿臂长方向的温度梯度较大, 则消耗在克服温差电动势的功耗增大。兼顾两

者的弊端, 为了避免焦耳热在内部集聚不易散失同时考虑效率问题, 建议对于小型半导体制冷系统冷热端温差的设计最好处于 20K~30K 之间。

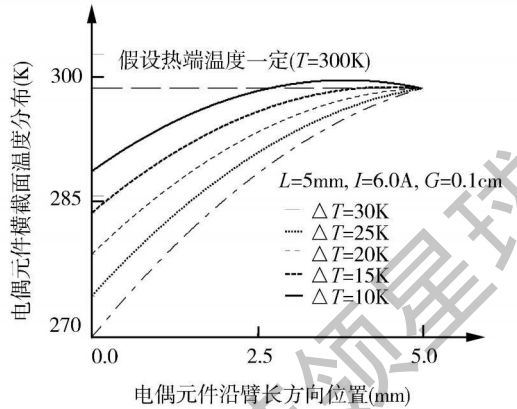


图 7 冷热端不同温差影响下的电偶元件截面温度分布

### 3 实际热电制冷系统热电转换过程的综合影响分析

#### 3.1 无量纲制冷性能参数评价

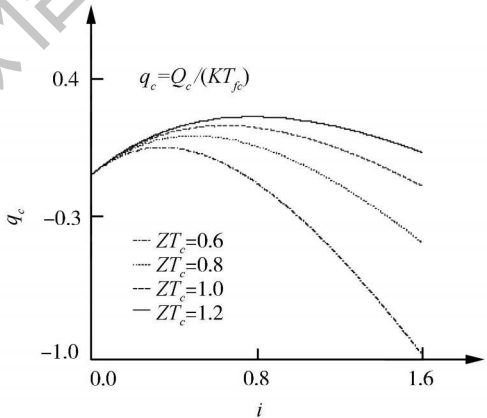


图 8 无量纲制冷率与无量纲电流的关系

实际运行的热电制冷系统性能同时受多种因素制约, 不仅有电流、冷端介质温度、热端介质温度等工况条件, 还包括内阻热耗散、内部热传导、介质环境的换热强度等不可逆因素。

如图 8 所示, 对于制冷率而言, 最佳电流随着无量纲优值  $ZT_c$  的提高而显著提高。同时, 无量纲优值  $ZT_c$  越大, 制冷系统的许可电流工作区域越大。

如图 9 所示, 对于制冷系数而言, 无量纲优值  $ZT_c$  的提高对于最佳工况对应下的最佳输入电流影响较小。由此, 对于以保证制冷系数为前提的小型热电制冷系统, 如果从提高热电材料优值系

数入手并不是最佳途径,经济性较差。而对于以满足获得最大制冷量的较大型热电制冷系统,提高材料的优值系数则有利于获得用于满足不同工况下制冷需求的较大允许电流工作区间。

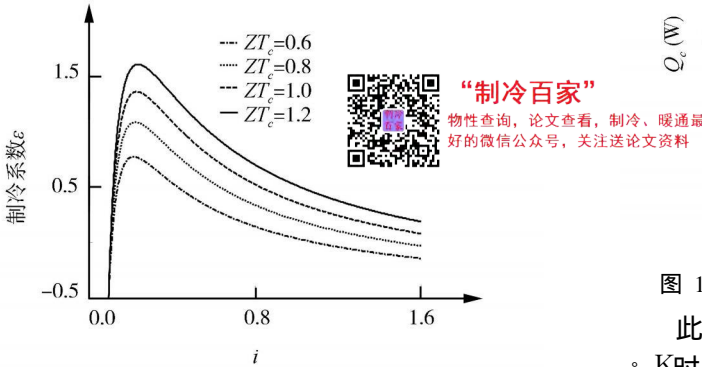


图 9 制冷系数与无量纲电流的关系 ( $i = \alpha I / K$ )

### 3.2 介质端面对流换热强度对制冷性能的影响

对于冰箱腔体中内嵌的半导体制冷器,该问题属于封闭小空间内的强制对流换热情况<sup>[5,6]</sup>。所以,对于在设计工况下,通常假设半导体制冷器冷热端温差一定的说法与实际情况出入较大,还必须考虑铝制散冷翅片导热过程中,温度分布不均影响下的冰箱内空气的换热和流动。为了便于比较,仍然以型号为 TEQ12704 的热电模块为研究对象。拟定计算工况为:制冷器热端对流换热系数  $h_1 = 2200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,冷端对流换热系数  $h_2 = 1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,冷、热端介质环境温度分别为 293K 和 277K。

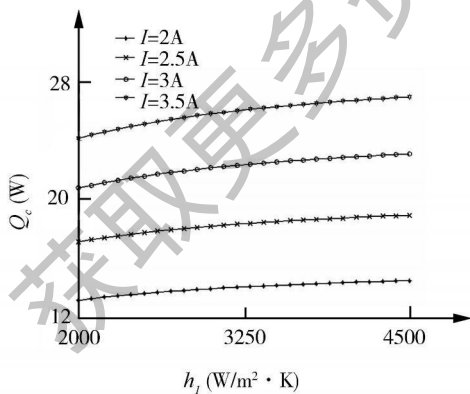


图 10 制冷量  $Q_c$  随热端对流换热系数  $h_1$  的变化

如图 10、11 所示,当系统运行在较低工作电流 (2A) 区域时,增强冷端散冷强度 ( $h_2$ ) 对提高系统制冷性能的经济性较高;当系统稳定运行在最佳工况区域 (3.5A) 附近时,提高热端散热强度 ( $h_1$ ) 对进一步提高系统制冷性能的优势更突出。

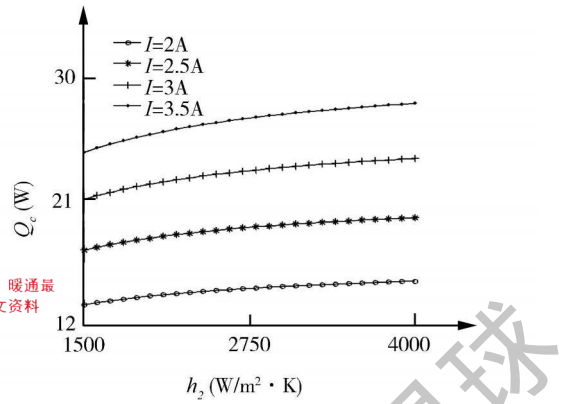


图 11 制冷量  $Q_c$  随冷端对流换热系数  $h_2$  的变化

此外,当冷端对流换热系数  $h_2$  大于  $2500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  时,制冷量  $Q_c$  增大的趋势逐渐平缓,此时继续增大  $h_2$  对制冷性能提高的显著性和技术成本的经济性降低;同理,当热端对流换热系数  $h_1$  大于  $4000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  时,制冷量  $Q_c$  增大的趋势变缓。这说明,在热电制冷系统的实际运行中,当热电模块被选定后,其最大制冷量即被确定,因此端面换热系统的合理优化设计可以避免不必要的浪费。

### 4 结论

(1) 在工作条件和材料确定后,制冷量只取决于 G 因子,并且存在一个最佳“面积/长度”的比值,使得半导体制冷器的制冷量达到最佳值,且推荐 G 因子取值在  $0.06 \text{ cm} \sim 0.15 \text{ cm}$  区间时制冷器的制冷效果显著;

(2) 综合考虑导热温差和导流接触热阻因素的限制,推荐热电臂长度在  $2 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$  范围内选择,冷热端的设计温差最好处于  $20 \text{ K} \sim 30 \text{ K}$  之间,以达到较高的制冷效率和理想的导热效果;

(3) 当系统运行在较低工作电流区域时,增强冷端散冷强度对提高系统制冷性能的经济性较高。当系统稳定运行在最佳工况区域附近时,从增强热端散热强度出发,对进一步提高系统制冷性能的优势更突出。

### 参考文献

[1] Jun Luo, Ling Chen, Fengni Sun, et al. Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 3197-3206.

(下转第 19 页)

## 5 结论

通过将压缩机阀腔等效为“管—容—管”单元模型,对现有气流脉动模拟模型进行了改进,并进行了试验验证。利用改进模型计算的气柱固有频率与实测值的最大误差由原来的 13.5%降至 1.08%,压缩机出口处压力脉动幅值的计算最大误差由原来的 106.99%降至 5.65%,而且从波形上,与实测波形变化趋势吻合程度明显改善。

## 参考文献

- [1] Edward N H. 气体压力波动问题南方气体协会的研究及其成果 [J]. 邵定山,译. Oil and Gas Journal 1958 56(19): 115—122
- [2] A. 维将金. 活塞式压缩机的脉动与振动 [M]. 沈阳: 沈阳气体压缩机研究所出版社, 1975
- [3] 酒井敏之, 佐伯庄吾, 三桥邦宏. 关于往复式压缩机管道系统脉动的研究 [J]. 勒明聪,译. Bulletin of JSME 1973 16(91): 54—68
- [4] 山田荣, 野田桂一郎. 配管系压力脉动的计算 [J]. 流体力学, 1980 10(10): 53—60
- [5] 野田桂一郎, 山田荣. 关于压缩机管路压力脉动计算机程序的编制 [J]. 压缩机技术, 1980 35—40
- [6] Benson R S, Ucer A S. Some recent research in gas dynamic modeling of multiple stage reciprocating compressor systems [J]. Purdue Compressor Technology Conference 1972
- [7] MacLaren J F T. Advances in numerical methods to solve the equations governing unsteady gas flow in reciprocating compressor systems [J]. Purdue Compressor Technology Conference 1976 235—244
- [8] 党锡淇, 陈守五. 活塞式压缩机气流脉动与管道振动 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1984
- [9] Dang X Q, Liu W M, Zhang T S. Efficient numerical analysis for dynamic stability of pipes conveying fluids [J]. Pressure Vessel Technology 1989 111(4): 300—306
- [10] 阎祥安, 张承谱, 沈嘉琦. 周期性脉动流体的管路输送系统压力分布求解 [J]. 机械工程学报, 2001 37(3): 38—40
- [11] 何成连, 王正伟, 邱华. 水轮机尾水管内部压力脉动试验研究 [J]. 机械工程学报, 2002 38(11): 62—65
- [12] 李志博. 活塞压缩机管道系统气流脉动数值模拟及实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2003
- [13] Jerry E F, Rajender S. An acoustic transfer matrix model for compressor and condenser interaction [J]. Purdue Compressor Technology Conference 1990 362—369
- [14] Ren T R, Sun S Y. Influence of valve on gas pulsation of reciprocating compressor [J]. Purdue Compressor Technology Conference 1988 402—406
- [15] Rogers L E, Eng P. Coupling the effects of reciprocating compressor valve dynamics with piping acoustic response [J]. Purdue Compressor Technology Conference 1992 187—297
- [16] 刁安娜. 孔板对压缩机管路气流脉动影响的理论与试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2008
- [17] 王正林, 龚纯, 何倩. 精通 MATLAB 科学计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007

作者简介: 王中振 (1987-) 男, 硕士研究生, 主要从事往复式压缩机气流脉动衰减的研究。通讯地址: 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号西安交通大学能源与动力工程学院 1546 信箱。

(上接第 72 页)

- [2] 钟广学. 半导体致冷器件及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [3] 李茂德, 卢希红. 热电制冷过程中散热强度对制冷参数的影响分析 [J]. 同济大学学报, 2002 30 811—813
- [4] Mei-Jiau Huang. The influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric cooler [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005 48 413—418
- [5] M Mamou, P Vasseur. Analytical and numerical study of double diffusive convection in a vertical enclosure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1996 32 115—125
- [6] H Sofrata. Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators [J]. Energy Conversion and Management 1996 3 269—280

作者简介: 毛佳妮 (1982-) 女, 博士研究生, 通讯地址: 430074 湖北武汉市华中科技大学能源学院。