移动电子设备相变热控单元热性能的数值仿真

吴 斌 邢玉明

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用相变材料(PCM, Phase Change Material)的热控制单元(TCU, Thermal Control Unit)可以很好地实现对可移动电子设备的热控制, 避免设备过热而引起的热故障. 建立了分析 TCU 热性能的二维数学模型, 并进行了数值计算. 结果表明: 加肋和填充泡沫-PCM 复合材料的设计方案可以显著提高 TCU 热性能, 能很好地满足电子元件的工作要求. 此外, 还对加肋和填充泡沫-PCM 提高 TCU 性能的效果进行了比较, 结果表明: 填充泡沫-PCM 复合材料的方案更具优势. 所得结论对移动电子设备 TCU 的设计和优化有一定的指导作用.

关 键 词: 相变材料; 热控制单元; 热性能; 肋; 泡沫-PCM 复合材料

中图分类号: TK 512^{+}. 4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010) 11-1330-05

Numerical investigation of phase change thermal control unit for portable electronic devices

Wu Bin Xing Yuming

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The thermal control unit(TCU) using phase change material(PCM) can well perform thermal control for portable electronic devices, and avoid it overheating. Two-dimensional mathematical model of TCU was presented, and numerical simulation was conducted to analyze its thermal performance. The results show that adding fins and filling with foam-PCM composite material can significantly improve thermal performance of TCU and satisfy the need of electronics working condition. Further, effectiveness of TCU by the two kinds of design was compared, and the design of filling with foam-PCM was superior to another one. The conclusion provides guidelines for portable electronic devices TCU design and optimization.

Key words: phase change material; thermal control unit; thermal performance; fins; foam-PCM composite material

温度对电子设备的性能有极大的影响, 美国空军调查结果表明超过 55% 的电子设备故障是由温度因素引起的, 因此, 电子设备的热控制显得极为重要[1]. 热控制手段分为被动和主动两种: 被动式热控制多采用空气自然对流方式对电子元件进行冷却散热, 散热效果差, 主要用于低功率电子设备; 主动式热控制采用风扇等驱动冷却介质与电子元件发生强迫对流换热, 冷却效果好, 但风扇等附加动力设备需额外耗能且存在噪音, 主要用于大功率电子设备. 可移动电子设备如笔记本电脑、可穿式电子设备等, 因其轻质、紧凑和密封要求, 主动式热控制方案的采用会额外增加电力需求、体积和重量, 因此, 采取自然对流冷却方法更具优势, 但传统的直接自然对流冷却无法满足要求, 基于这些考虑提出了采用相变热控制单元(TCU, Thermal Control Unit)的解决手段.

相变 TCU 由相变材料(PCM, Phase Change Material)和导热强化器(TCE, Thermal Conductivity Enhancer)构成, 当工作中的电子设备温度达到 PCM 熔点时, PCM 熔化, 在 PCM 熔化阶段电子设

收稿日期: 2009-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876004)

作者简介: 吴 斌(1983-), 男, 江西永丰人, 博士生, wb-buaa@126.com.

备温度几乎保持不变, PCM 的高潜热使少量的 PCM 就可吸收大量的热, 而 PCM 与外界空气发生自然对流散热, 以保证充分的吸热能力, 这样电子设备就可在相对较长的时间内以低于限制要求的温度正常工作. 常用的有机 PCM 导热系数较小, 需强化其导热效果, 为此在储存 PCM 的 TCU 中放置 TCE, 主要采取肋片强化形式, 此外, 还可采用金属蜂窝或泡沫相变复合材料[2-6].

本文以文献[3]中的笔记本电脑处理器芯片 TCU 为研究对象, 分别采用直肋 TCE 和铝泡沫-PCM 复合材料对芯片温度影响进行数值研究.

1　数学模型

图 1为 TCU 结构示意图, 该 TCU 包括热源(芯片)段、PCM 和 TCE(或泡沫-PCM 复合材料)段以及环氧树脂(外壳)段 3部分. 芯片热源为体积均分热源, 芯片工作时, 将产生的热量传递给 PCM, PCM 段外侧表面与外界空气发生对流换热, 热源与环氧树脂层两侧端面、热源下端面及环氧树脂上端面绝热. 各部分能量方程分别为

热源:

$$C_{\mathrm{H}}\frac{\partial T_{\mathrm{H}}}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{H}}\nabla T_{\mathrm{H}})+Q \tag{1}$$

PCM:

$$C_{\mathrm{P}}\frac{\partial T_{\mathrm{P}}}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{P}}\nabla T_{\mathrm{P}}) \tag{2}$$

TCE:

$$C_{\mathrm{F}}\frac{\partial T_{\mathrm{F}}}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{F}}\nabla T_{\mathrm{F}}) \tag{3}$$

当采用泡沫-PCM 复合材料时, 有:

$$C_{\mathrm{mix}}\frac{\partial T_{\mathrm{P}}}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{mix}}\nabla T_{\mathrm{P}}) \tag{4}$$

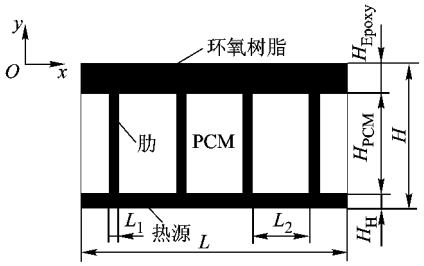

图 1　*TCU*结构示意图

泡沫-PCM 复合材料的有效导热系数 k_{mix}的计算式可参考文献[6]得出:

$$k_{\mathrm{mix}}=\left\{\left[k_{\mathrm{P}}+\pi\left(\sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}}-\frac{1-\varepsilon}{3\pi}\right)\cdot(k_{\mathrm{S}}-k_{\mathrm{P}})\right]\left[k_{\mathrm{P}}+\frac{1-\varepsilon}{3}(k_{\mathrm{S}}-k_{\mathrm{P}})\right]\right\}\Big\backslash$$

$$\left\{k_{\mathrm{P}}+\left[\frac{4}{3}\sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}}(1-\varepsilon)+\pi\sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}}-(1-\varepsilon)\right](k_{\mathrm{S}}-k_{\mathrm{P}})\right\} \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{mix}}=(1-\varepsilon)C_{\mathrm{PCM}}+\varepsilon C_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

环氧树脂:

$$C_{\mathrm{Epoxy}}\frac{\partial T_{\mathrm{Epoxy}}}{\partial t}=\nabla\cdot(k_{\mathrm{Epoxy}}\nabla T_{\mathrm{Epoxy}}) \tag{7}$$

式中, $C=\rho c$ 为物质的热容, ρ为密度, c 为比热容; T 为温度; t为时间; k 为导热系数; Q 为热源散热量; ε为泡沫孔隙率; 下标 H, P, F, mix, s和 Epoxy分别表示热源、PCM、肋、泡沫-PCM 复合材料、泡沫骨架和环氧树脂.

对 PCM 控制方程采用有效热容法进行处理求解, 即式(2)中的 C_{p}[7]可表示为

$$C_{\mathrm{P}}(T)=\begin{cases}C_{\mathrm{P}} & T\leqslant T_{\mathrm{m}}\\ C_{\mathrm{P}}+\dfrac{\rho_{\mathrm{P}}\Delta H_{\mathrm{m}}}{\Delta T} & T_{\mathrm{m}}<T<T_{\mathrm{m}}+\Delta T\\ C_{\mathrm{P}} & T\geqslant T_{\mathrm{m}}+\Delta T\end{cases} \tag{8}$$

式中, ΔH_{m}为 PCM 相变潜热; ΔT 为假定的发生相变的小温差.

初始条件:

$$T_{\mathrm{H}}=T_{\mathrm{P}}=T_{\mathrm{Epoxy}}=T_{\mathrm{a}} \tag{9}$$

边界条件:

$$\frac{\partial T_{\mathrm{H}}}{\partial y}(x,\ y=0)=0 \tag{10a}$$

$$\frac{\partial T_{\mathrm{H}}}{\partial x}(x=0,\ y)=\frac{\partial T_{\mathrm{Epoxy}}}{\partial x}(x=0,\ y)=0 \tag{10b}$$

$$\frac{\partial T_{\mathrm{H}}}{\partial y}(x=L,\ y)=\frac{\partial T_{\mathrm{Epoxy}}}{\partial y}(x=L,\ y)=0 \tag{10c}$$

$$\frac{\partial T_{\mathrm{Epoxy}}}{\partial y}(x,\ y=H)=0 \tag{10d}$$

$$h(T_{\mathrm{P}}-T_{\mathrm{a}})=k_{\mathrm{P/mix}}\frac{\partial T_{\mathrm{P}}}{\partial x}(x=0,\ y) \tag{10e}$$

$$h(T_{\mathrm{P}}-T_{\mathrm{a}})=k_{\mathrm{P/mix}}\frac{\partial T_{\mathrm{P}}}{\partial x}(x=L,\ y) \tag{10f}$$

式中, T_{a}为外界环境温度; h 为空气对流换热系数; L 为 TCU 长度; H 为 TCU 高度.

2　数值解法和算法

将 3部分求解区域各自划分网格, 将图 1所示纵向添加 4片直肋的 TCU 二维物理模型划分为 28(横向)×26(纵向)个网格, 其中热源区域、PCM 区域和环氧树脂区域纵向分别划分 3, 20和 3个网格, 横向各肋段区域均划分 2个网格, 为保证计算

精度,时间步长取 1 s,时间和空间步长再细化后对计算结果影响不大.将控制微分方程在以网格节点为中心的控制体积内用有限体积法进行数值离散,采用全隐格式;用交替方向的隐式格式与三对角矩阵解法相结合的方法来求解方程.在离散方程时,控制体积界面上的物性参数取两个相邻节点物性参数的调和平均值.在每个时间步内对各控制方程进行耦合迭代求解,直至结果收敛.

3 结果及分析

本文对图 1所示的 TCU 进行研究和分析,考虑到该移动电子设备(笔记本电脑)的使用条件,选择石蜡类有机物二十烷作为 PCM,二十烷具有潜热大、无毒、稳定、无腐蚀性等优点,且熔点低于设备芯片的容许温度;铝具有导热系数和热容大、密度小的特点,适合移动电子设备轻质的特点,在此作为 TCE(直肋)和泡沫骨架材料. TCU 各部分材料的热物性参数[8]如表 1所列,几何参数如下[3]: H_H = 0.001 5 m, H_{PCM} = 0.01 m, H_{Epoxy} = 0.003 m,肋宽 L_1 = 0.001 m, L = 0.026 5 m,计算采用的 TCU 初始温度和环境温度都为 20℃.

表 1 材料热物性参数

参数	二十烷	环氧树脂	铝
ρ/(kg·m^{-3})	780	980	2 707
c/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	2.2	1.92	0.96
k/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.27	0.46	179.96
ΔH_m/(kJ·kg^{-1})	241		
T_m/(℃)	36.8		

3.1 加肋对热源的影响

对肋化 TCU 热性能的研究基本可基于含肋量(肋体积分数)和热源功率这两方面的影响因素进行分析研究,图 2所示为恒定热源功率条件下,肋片体积分数对热源温度的影响,其中体积分数 4.25%, 8.5%, 12.75%和 17%分别对应的是 1~4片直肋.为更好地分析加肋对 TCU 热性能的影响,对纯 PCM 时热源温度进行了计算分析:初始阶段, PCM 还未开始熔化,吸收的热量以显热形式储存,此阶段热源温度迅速上升直至 PCM 开始熔化; PCM 开始熔化至完全熔化期间,由于 PCM 潜热大,此时 PCM 的有效热容相当于增加了 100多倍,热源释热量被 PCM 以显热和潜热形式储存,但 PCM 的弱导热性使得 PCM 过热而导致热源温度以低于之前的速度继续攀升,直至达到恒定温度.加肋可强化 PCM 导热,使 PCM 内热流分布更为均匀,热源温度接近于 PCM 熔点且基本不变,直到 PCM 完全熔化后,热源温度才开始持续上升直至恒定温度,且由于 PCM 过热得到抑制与外界空气对流换热量增加,因此,恒定温度相比纯 PCM 时显著下降.由图可见,加肋后,热源温度有显著降低,且肋片体积分数越大(肋片越多),热源温度越低,说明肋片的加入使 PCM 熔化更为均匀, PCM 的过热得到很好地抑制;此外,可以发现,肋片数量的增加可进一步降低热源温度,但降低的幅度越来越小.

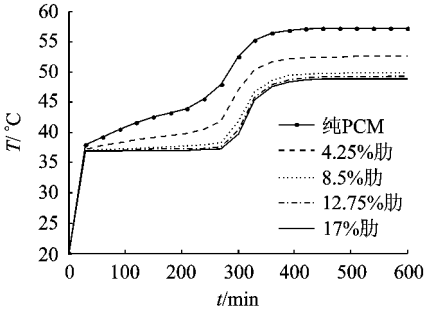

图 2 恒定功率热源时,肋片体积分数对热源温度的影响

实际中,移动电子设备很少处于全负荷运行状态,一般为周期性负荷运行.电子元件温度周期性大幅度变化,最高温度和平均波动温度较大都会加速电子元件的老化,缩短其使用寿命,因此,在周期性热源功率下,上述参数是衡量 TCU 设计的重要标准.图 3为热源功率周期性(10W/5W)变化时,肋体积分数对热源温度的影响,此时热源功率按 10W/15 min和 5W/30 min的频率交替出现.由图可见,在初始阶段, PCM 逐渐熔化,热源的平均温度逐渐升高,温度振幅逐渐变大,直至稳定.加肋后,由于肋片有效地强化了 PCM 导热,热流分布更为均匀, PCM 过热被抑制,与外界环境对流换热量增加.因此,热源的平均温度较纯 PCM 时明显降低,且在 PCM 完全熔化之前,热源温度始终维持在 PCM 熔点附近,变化幅度较小,直到 PCM 完全熔化时,热源温度才开始大幅振荡.此外,还可以发现,当肋体积分数大于 8.5%时,热源温度变化趋势趋于一致,肋片增加的同时降低了 PCM 含量,也就减少了 PCM 的有效吸热量,因此, 10%的肋片体积分数可视为最佳设计.

PCM 完全熔化时间是 TCU 设计的一个主要参数,而热源功率大小直接影响 PCM 的熔化时间,因此,对热源功率影响 TCU 热性能的分析可避免元件出现故障.图 4所示为肋体积分数为 10%时,恒定热源功率对热源温度的影响.由图可见, PCM 熔化时间随着热源功率增加而缩短,大功率热源使 PCM 过热的可能性变大,从而导致 TCU 热控功能的下降,元件出现故障的几率变大; TCU 可很好地控制小功率热源温度.图 5所示

为肋体积分数为 10% 时, 周期性热源功率对热源温度的影响, 此时热源功率按 15 m in 的频率交替. 由图可见, 加肋后由于 PCM 过热被抑制, 热源最高温度和平均波动温度较纯 PCM 时明显降低; 在 PCM 完全熔化之前, 热源温度始终维持在 PCM 熔点附近, 且变化幅度较小, 直到 PCM 完全熔化时, 热源温度才开始大幅振荡. 此外, 还可看到, 随着热源功率的增加, 稳定状态下热源平均温度升高, 振幅也随之加大, 元件正常工作时间缩短.

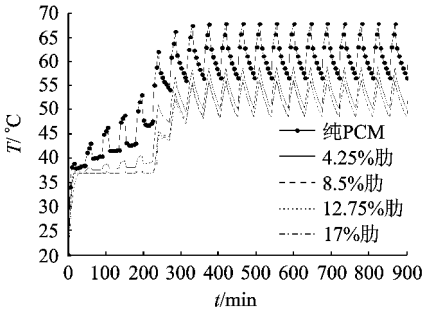

图 3　周期性功率热源时, 肋体积分数对热源温度的影响

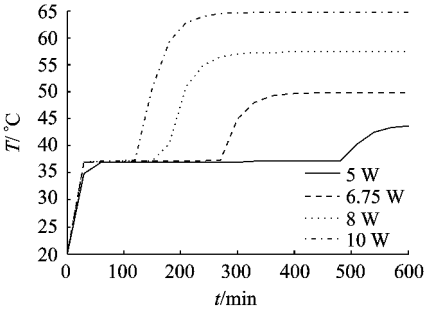

图 4　恒定热源功率对热源温度的影响

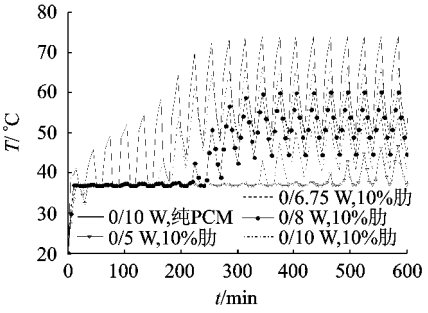

图 5　周期循环热源功率对热源温度的影响

3. 2　填充泡沫-PCM 对热源的影响

加肋虽然可使 PCM 内热流分布更加均匀, 但其对 PCM 导热的强化只是在肋片附近更为显著, 离肋片越远, 效果越差, 而泡沫-PCM 复合材料因高导热骨架与 PCM 很好地结合, PCM 整体导热得到很好地强化, 热流分布极为均匀, 因此, 采用泡沫-PCM 复合材料的 TCU 热性能会更好. 图 6 为恒定功率热源时, 泡沫孔隙率对热源温度的影响. 由图可见, 泡沫-PCM 相比纯 PCM 能更好地冷却热源, 由于孔隙率越小即泡沫骨架含量越大, 越能提高泡沫复合材料的有效导热性能, 因此, 热源温度就越低, 但随着孔隙率的减小, 热源温度降低的幅度也越来越小, 这是因为孔隙率的减小增加了骨架的含量, 降低了 PCM 的含量, PCM 吸热量减少. 图 7所示为周期性功率热源时, 泡沫孔隙率对热源温度的影响. 与前述加肋类似, 泡沫复合材料的填充使 PCM 过热被抑制, 热源最高温度明显降低. 此外, 还可以发现, 当孔隙率小于 0. 95 时, 热源温度降低幅度已经很小. 因此, 在此采用孔隙率 0. 95的泡沫-PCM 复合材料可视为最优设计.

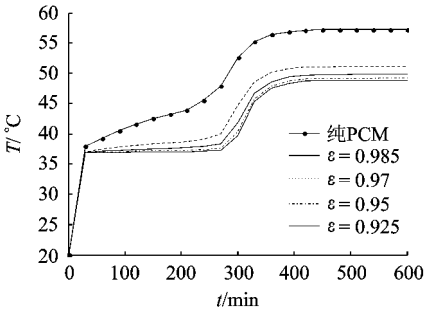

图 6　恒定功率热源时, 泡沫孔隙率对热源温度的影响

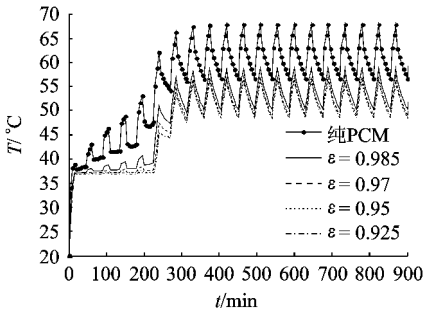

图 7　周期性功率热源时, 泡沫孔隙率对热源温度的影响

为进一步考察加肋和填充泡沫复合材料对 TCU 热性能强化程度, 如图 8所示, 对两种最优设计方案下热源温度进行了比较, 其中肋体积分数为 10%, 泡沫孔隙率为 0. 95, 采用恒定功率 (7. 5W)热源和周期性功率 (10W /5W)热源. 由图可见, 这两种最优设计方案所取得的冷却效果基本相同, 恒定功率和周期性功率时, 加肋条件下的热源温度分别比填充泡沫时高 0. 44 和 0. 28 ℃. 但由于铝 (肋和泡沫骨架材料)的密度约为 PCM 的 3. 5倍, 因此, 采用肋体积分数 10% 的

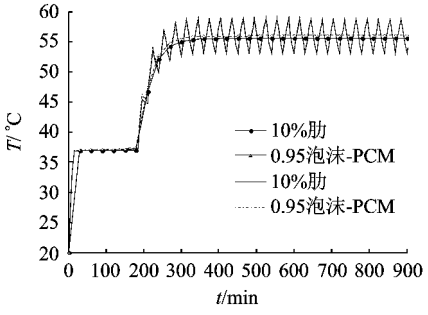

图 8　肋和泡沫-PCM 对热源温度影响的比较

TCU总质量比孔隙率0.95的泡沫-PCM设计方案增加了10%,从轻质方面来看,填充泡沫-PCM的TCU更具优势.

4 结 论

1) 加肋和填充泡沫-PCM复合材料的设计方案都能有效地提高TCU的热性能,且填充物含量越大效果越好,但效果差别变小,因此,存在最优的设计以满足电子元件工作要求和轻质要求;

2) 热源功率大小也会影响TCU热性能,大功率热源容易使TCU性能恶化;

3) 较小孔隙率的泡沫-PCM就能获得较大含量加肋TCU热控效果,这意味着填充泡沫-PCM在轻质方面较加肋更具优势,而轻质TCU设计是移动电子设备的重要要求,因此,在条件容许时,尽量选择填充泡沫-PCM复合材料的TCU设计.

参考文献 (References)

[1] Yeh L T. Review of heat transfer technologies in electronic equipment[J]. Journal of Electronic Packaging, 1996, 117(4): 333-339

[2] Kandasamy R, Wang X Q, Mujumdar A S. Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks [J]. J Applied Thermal Engineering, 2008, 28(8/9): 1047-1057

[3] Alawadhi E M. Thermal analyses of a PCM thermal control unit for portable electronic devices: experiment and numerical studies [D]. Pittsburgh: Mechanical Engineering Department, Carnegie Mellon University, 2001

[4] Nayak K C, Saha S K, Srinivasan K, et al. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2006, 49(11): 1833-1844

[5] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 318-345

[6] Lafdi K, Mesalhy O, Elgafy A. Graphite foams infiltrated with phase change materials as alternative materials for space and terrestrial thermal energy storage applications[J]. Carbon, 2008, 46(1): 159-168

[7] Khan M A, Rohatgi P K. Numerical solution to a moving boundary problem in a composite medium[J]. Numerical Heat Transfer Part A: Applications: an International Journal of Computation and Methodology, 1994, 25(2): 209-221

[8] Belen Z, Jose M M, Luisa F C, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 23(3): 251-283

(编 辑:李 晶)

(上接第1306页)

5 结 论

根据旋翼模型的非线性特点,采用RBF神经网络建立旋翼动平衡调整的模型,确定适应度函数,并采用PSO对适应度函数进行寻优,确定了获得最小振动值时旋翼系统调整参数.实验数据和分析结果表明:①根据PSO与RBF相结合的方式来优化旋翼系统调整参数,可以大大地减小机身振动值;②调整效率高,RBF神经网络与PSO相结合能够在较少飞行调整下完成旋翼动平衡调整;③PSO寻优效率方面高于遗传算法.

参考文献 (References)

[1] 薛伟松,邢士喜,郑牧,等.直升机旋翼锥体及动平衡设备校验系统的研究[J].测控技术,2006,25(3):4-7
Xue Weisong, Xing Shixi, Zheng Mu, et al. Research on checkout system for track-height and dynamic balance equipment of helicopter[J]. Testing and Control Technology, 2006, 25(3): 4-7 (in Chinese)

[2] Ventres Sam, Hayden Richard E. Rotor tuning using vibration data only[C]//American Helicopter Society 56th Forum. Alexandria: American Helicopter Society, 2000: 623-629

[3] Wang Shengda, Danai Kourosh, Wilson Mark. Adaptive method of helicopter track and balance[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 127(6): 275-282

[4] 袁海文,吕弘,袁海斌.基于RBF神经网络的控制电器元件故障诊断[J].北京航空航天大学学报,2006,32(5):544-547
Yuan Haiwen, Lü Hong, Yuan Haibin. Fault diagnosis of control electric component based on RBF neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 544-547 (in Chinese)

[5] Liu Hongmei, Wang Shaoping, Ouyang Pingchao. Fault diagnosis in a hydraulic position servo system using RBF neural network [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(4): 346-353

[6] 李炳宇,萧蕴诗,江镭.PSO算法在工程优化问题中的应用[J].计算机工程与应用,2004(18):74-76
Li Bingyu, Xiao Yunshi, Jiang Lei. Application of particle swarm optimization in engineering optimization problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2004(18): 74-76 (in Chinese)

[7] 乔维德.基于改进粒子群算法神经网络的电力电子电路故障诊断[J].电气传动自动化,2008,30(5):29-31
Qiao Weide. Fault diagnosis of power electronic circuits based on improved PSO algorithm neural network[J]. Electric Drive Automation, 2008, 30(5): 29-31 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)