旋翼多维振动最优调整方法

王 康 王少萍 刘红梅

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191) (北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191)

摘 要：针对直升机旋翼系统非线性、难以建模的特点，采用径向基函数(RBF，Radial Basis Function)神经网络建立直升机旋翼动平衡调整模型.根据约束条件以直升机机身振动值作为目标函数建立适应度函数，以旋翼系统的调整参数为优化变量，进行神经网络学习和优化.利用粒子群优化(PSO，Particle Swarm Optimization)算法对适应度函数进行寻优，获得当直升机振动最小时的桨叶的调整参数.实验结果表明：PSO算法寻优效率方面高于遗传算法；RBF神经网络和PSO算法相结合可以有效地实现直升机旋翼动平衡调整.

关 键 词：旋翼；径向基函数；粒子群优化；优化

中图分类号：TP 273^{+}.23

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1303-04

Optimal adjustment method of rotor multi-dimensional vibration

Wang Kang Wang Shaoping

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

Liu Hongmei

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering characteristics of non-linear and difficult to model for the rotor system, helicopter rotor dynamic balancing adjustment models was established by radial basis function(RBF) neural network. According to the constraints, the fitness function was established by using the helicopter vibration as objective function and the optimization variables were used by the adjustment parameters of rotor. The radial basis function neural network learning and optimization were used by the helicopter vibration and the adjustment parameters of rotor. Particle swarm optimization(PSO) algorithm was used to make a global optimization to find the suitable rotor adjustments corresponding to the minimum vibrations. The experimental results indicate that the particle swarm optimization algorithm is higher than the genetic algorithm in the aspect of efficiency optimization and the radial basis function combined with the particle swarm optimization algorithm can effectively achieve the helicopter rotor dynamic balance adjustment.

Key words: rotor; radial basis function; particle swarm optimization; optimization

直升机机身的大幅度振动不仅使机组人员和乘客感到疲劳，也会使直升机大量元部件产生高度疲劳，降低武器系统性能(导弹瞄准困难).直升机振动抑制问题一直倍受关注，因此对直升机旋翼的动平衡调整研究就尤为重要[1]

当旋翼出现动不平衡以后，一般是通过调整旋翼系统的平衡片、桨叶后缘调整片和桨叶变距拉杆来达到平衡的目的，但是如何优化调整该三者，以减少直升机的振动，是目前一个较新的研究方向.

在动平衡问题上，一直采用测量振动的方法.最初一般采用传统的转子动平衡方法，将旋翼系统看成一个整体，在此基础上进行质量不平衡调整，该方法适合0.2g以上直升机，对于以低振动水平为代表的第4代直升机，该方法就不适用了.为此，国外重点发展了神经网络分析方法.典型的

收稿日期：2009-09-28

作者简介：王 康(1984－)，男，山东莱州人，博士生，wangkang14team@163.com.

代表有:欧直公司的 STEADYCOPTER,美国马里兰大学阿尔佛雷德·杰斯福旋翼机中心等[2-3].

本文采用径向基函数(RBF,Radial Basis Function)网络建立起旋翼系统调整参数与机身振动信号之间的非线性模型;采用粒子群优化(PSO,Particle Swarm Optimization)算法对适应度函数进行寻优;结合 RBF 和 PSO 实现旋翼系统动平衡调整.

1 旋翼动平衡调整系统分析

直升机的振动是通过传感器采集多个测点的振动信号,并将多个信号进行信息融合来实现的.振动传感器应安装在直升机上对不平衡振动敏感的位置,机身共安装 6 个传感器,安装在旋翼轴和主副驾驶员处,可以感知 6 个方向的振动量.测量机身振动值时考虑直升机飞行的 4 个状态:地面开车、低空悬停、低速飞行和高速飞行.另外,考虑到振动数据具有幅值和相位,为方便计算,将各方向的振动数据转化到二维笛卡尔坐标系中.由上述论述可知,通过振动传感器可以采集直升机机身在不同飞行状态下的 48 个振动值.

当旋翼出现动不平衡以后,一般是通过调整旋翼上的平衡片、桨叶后缘调整片和桨叶变距拉杆来达到减少直升机振动,保持机身平衡的目的.本文以 3 片桨叶的直升机为例,其中有 1 片桨叶是固定的,无法调整的.另外 2 片桨叶可以分别调整平衡片、桨叶后缘调整片和桨叶变距拉杆.因此,旋翼的动平衡调整可以通过 6 个调整参数来实现.旋翼动平衡调整原理如图 1 所示.

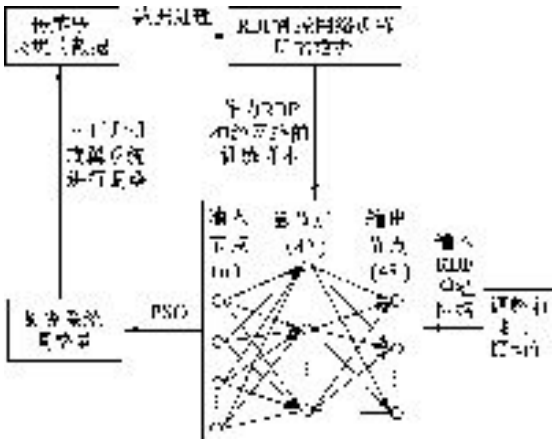

图 1 旋翼动平衡调整原理

从图 1 看出,采用 RBF 神经网络建立了旋翼系统调整参数与机身振动量之间的数学模型.根据 RBF 神经网络,输入不同的旋翼调整参数,得到机身振动值.以机身振动值为目标函数确立适应度函数,并利用 PSO 对适应度函数进行优化,得到一个最优的旋翼调整参数,以此调节相应的参数减小直升机机身的振动.

2 旋翼动平衡调整系统建模

根据上述直升机旋翼系统的分析可知,旋翼系统是通过改变 6 个调整参数使机身的 48 个振动值达到指定要求.由于直升机旋翼系统结构复杂,机身振动值受各方面耦合因素影响很大,旋翼系统的调整参数与机身振动量之间成非线性关系.采用一般线性系统建模很难准确地表征旋翼系统的调整参数与机身振动量之间的关系.

RBF 神经网络一般采用高斯函数作为基函数,使用最小二乘准则作为目标函数,使用梯度下降法来迭代调节每个节点的参数[1].RBF 神经网络具有很多优点:收敛速度很快、网络规模较小、计算量较小等等.鉴于这些特点,选取 RBF 神经网络建立旋翼系统的调整参数与机身振动量之间的模型.

整个 RBF 神经网络,输入层为 6 个节点、输出层为 48 个节点、隐节点个数为 42 个(如图 1 所示).RBF 神经网络的输入为各调整参数 α_i^j(其中 i 代表桨叶序列号 1,2;j 代表参数类型:1 为桨叶后缘调整片,2 为平衡片,3 为桨叶变距拉杆),神经网络的输出为传感器采集的 48 个振动值.

2.1 优化动量因子的神经网络数学模型

RBF 神经网络建立起旋翼系统调整参数与机身振动值之间的模型.神经网络由 3 层组成.

RBF 神经网络的输出值为

$$\hat{\theta}_i = \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H} = \sum_{i=1}^{m} w_i h_i \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{W}=[w_1, w_2, \cdots, w_n]$ 为网络的权值向量;$\boldsymbol{H}=[h_1, h_2, \cdots, h_m]$ 为径向基函数,采用高斯函数[4]:

$$h_i(\boldsymbol{x}) = \exp\left(-\frac{\| \boldsymbol{x} - c_i \|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad i=1,2,\cdots,m \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{x}$ 为 n 维输入向量;c_i 为第 i 个基函数的中心;σ_i 为第 i 个函数的宽度参数;m 为隐节点的个数.

权值调整采用梯度下降算法[5],其迭代公式为

$$\Delta\sigma_i(t) = \varepsilon(t) w_i(t-1) h_i(t-1) \cdot \frac{\| \boldsymbol{x}(t) - c_i(t-1) \|^2}{\sigma_i^3(t-1)} \tag{3}$$

$$\sigma_i(t)=\sigma_i(t-1)+\eta\Delta\sigma_i(t)+\alpha[\sigma_i(t-1)-\sigma_i(t-2)] \tag{4}$$

$$\Delta c_i(t)=\varepsilon(t)w_i(t-1)h_i(t-1)\cdot\frac{\boldsymbol{x}(t)-c_i(t-1)}{\sigma_i^2(t-1)} \tag{5}$$

$$c_i(t)=c_i(t-1)+\eta\Delta c_i(t)+\beta[c_i(t-1)-c_i(t-2)] \tag{6}$$

$$\Delta w_i(t)=\varepsilon(t)h_i(t-1) \tag{7}$$

$$w_i(t)=w_i(t-1)+\eta\Delta w_i(t)+\chi[w_i(t-1)-w_i(t-2)] \tag{8}$$

式中,η 为学习率;α,β,χ 为动量因子. α,β,χ 对神经网络训练精度影响很大. 选取 67 535 个样本点对神经网络的精度进行验证,当 α,β,χ 分别取 $10^{-1},10^{-2},10^{-3}$ 时,神经网络的误差曲线如图 2～图 4 所示. 选择不同的值时,神经网络训练的精度有所不同.



图 2　α,β,χ 取 10^{-1}

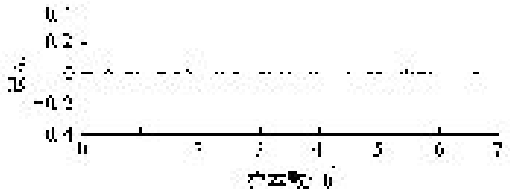

图 3　α,β,χ 取 10^{-2}



图 4　α,β,χ 取 10^{-3}

通过比较可以看出,α,β,χ 取值为 10^{-2} 时,神经网络训练误差最小.

2.2　动平衡调整目标函数的确定

动平衡调整目标函数的选取不仅要考虑机身振动值最小,还应考虑旋翼系统的调整参数不应过大,因此优化目标函数的确定要考虑以下两个因素:机身振动值和旋翼系统的调整参数.

以机身振动值最小为目标函数,以旋翼系统的调整值为优化变量,进行网络学习和优化,通过寻优获得机身振动值最小时旋翼系统调整参数. 选取目标函数为

$$F(\alpha_i^j)=\sum_{a=1}^{m}(\gamma_a^h+\Delta\gamma_a^h)^2 \tag{9}$$

式中,$F(\alpha_i^j)$ 为无约束的目标函数,即经过动平衡调整后机身的振动值;γ_a^h 为调整前的机身振动值;$\Delta\gamma_a^h$ 为神经网络的输出. 建立目标函数是为了使 $F(\alpha_i^j)$ 达到指定要求. 但实际应用中,旋翼的各调整参数都是有一定的调整范围. 因此,需要对目标函数进行约束. 调整范围为

$$-5<\alpha_i^j<+5 \tag{10}$$

根据直升机机体对振动的要求,直升机座舱和旋翼主轴的各方向振动应小于定值 K,即

$$|\Delta\gamma_a^h+\gamma_a^h|<K \tag{11}$$

式中,K=0.2.

2.3　优化问题的转换

式(9)建立了目标函数,式(11)确定了约束条件. 以下将采用 PSO 对目标函数进行寻优. 由于 PSO 不能直接处理约束条件,因此采用罚函数法[6]将约束问题转化为无约束问题. 优化目标函数为

$$P(\alpha_i^j,r)=F(\alpha_i^j)+r\sum_{k=1}^{48}[\max\{0,-g_k(\alpha_i^j)\}]^2 \tag{12}$$

根据式(11)可知,$g_k(\alpha_i^j)=0.2-F(\alpha_i^j)$,$r$ 为惩罚因子,来调节罚函数的大小,使优化解能完全满足约束条件,这里取 $r=30$. 式(12)中 $P(\alpha_i^j,r)$ 为适应度函数,利用 PSO 对适应度函数进行寻优,优化调整参数.

3　PSO 与 RBF 结合优化调整参数

RBF 神经网络建立的是旋翼系统调整参数和机身振动值之间的模型,通过改变旋翼系统的调整参数使机身的振动达到最小. 这就要求旋翼系统调整值和机身振动值之间是一一对应关系,因此必须论证 RBF 神经网络函数的单调性.

3.1　单调性论证

由式(1)、式(2)可得 $\boldsymbol{W}$ 为常值,故证明式(1)中 $\hat{\theta}_i$ 的单调性只需证明 $h_i(\boldsymbol{x})$ 的单调性. 由式(2)可得

$$\ln h_i(\boldsymbol{x})=-\frac{\|\boldsymbol{x}-c_i\|^2}{2\sigma_i^2} \tag{13}$$

对式(13)两边同时求导,可得

$$\frac{1}{h_i(\boldsymbol{x})}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}=-\frac{2\|\boldsymbol{x}-c_i\|}{2\sigma_i^2} \tag{14}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}=-\frac{2\|\boldsymbol{x}-c_i\|}{2\sigma_i^2}h_i(\boldsymbol{x})=$$

$$-\frac{2\|\boldsymbol{x}-c_i\|}{2\sigma_i^2}\exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x}-c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (15)$$

由式(15)可得$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}\leqslant 0$，故 $h_i(\boldsymbol{x})$为单调递减函数，由此可知 $\hat{\theta}_i$ 也为单调递减函数. 由 $\hat{\theta}_i$ 的单调性可知，旋翼系统调整参数和机身振动值之间一一对应.

3.2 PSO 与 RBF 结合优化

采用 RBF 神经网络建立旋翼系统调整参数与直升机机身振动信号之间的数学模型. 根据 RBF 神经网络输入的不同的旋翼系统调整参数，得到直升机机身振动值，以机身振动值为目标函数确立适应度函数，并利用 PSO 对适应度函数进行优化，得到一个最优的旋翼调整参数，以此调节相应的参数减小直升机机身的振动. 通过 1 到 2 次飞行调整，使直升机机身振动为最小，完成旋翼系统的动平衡调整. 图 5 为旋翼系统调整参数的寻优流程.

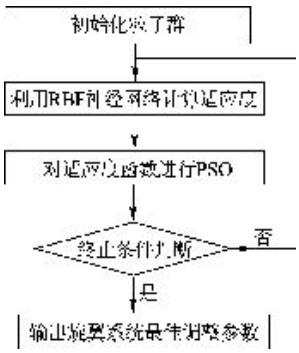

图 5 PSO 寻优流程图

4 实例分析

4.1 旋翼动平衡调整前后机身振动值比较

采用 RBF 与 PSO 相结合的旋翼动平衡调整算法对直升机机身振动值进行优化，其调整前后机身振动值对比如图 6 所示.

根据旋翼动平衡调整的要求，调整后机身振动值应小于 0.2，从图 6 中可看出经过动平衡调整，振动水平大大地降低了，机身振动值都在 0.1 以下，达到了调整要求. 其中图 6 中横坐标为 4 个飞行状态下 6 个传感器测得的机身振动数据.

要得到图 6 中的机身振动值，需对直升机旋翼做出相应调整，旋翼调整参数如表 1 所示.

表 1 获得机身最小振动的旋翼调整参数

桨叶	平衡片/g	桨叶变距拉杆/棱面	桨叶后缘调整片/(°)
1	−25	0.36	0
2	12	0.12	0.38
3	0	0	0

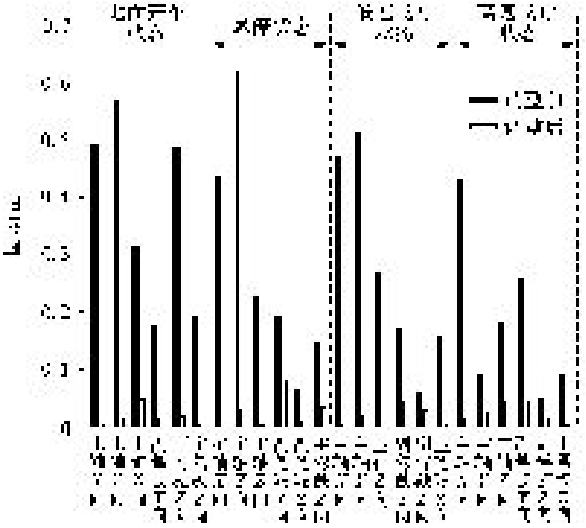

图 6 PSO 调整前后振动值对比

4.2 PSO 与遗传算法比较

为了说明 PSO 的优越性，分别采用遗传算法和 PSO 对目标函数进行优化.

遗传算法和粒子群的种群规模均选择为 150 个，最大迭代次数选取 $n=500$ 次. 其寻优过程如图 7 所示，可以看出，采用遗传算法，目标函数寻优到第 430 代，才找到全局最优点. 而图 8 中的 PSO 120 次就能寻找到全局最优点. 通过比较可以看出，PSO 的寻优效率高于遗传算法.

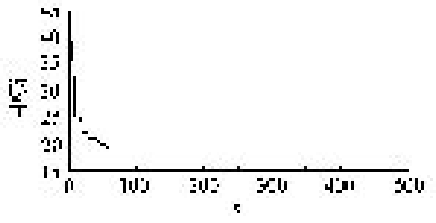

图 7 PSO 寻优过程

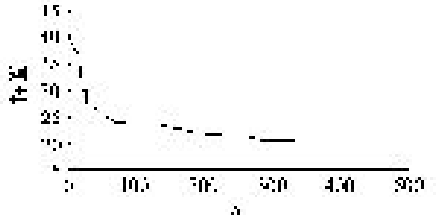

图 8 遗传算法寻优过程

这是因为：①粒子具有记忆的特性，通过学习使其下一代从前辈继承更多信息[7]；②遗传算法全局搜索能力很强，而局部搜索能力相对较弱；③PSO 没有遗传、交叉等操作，其计算的复杂度要比遗传算法要低.

从迭代次数来看，PSO 比遗传算法具有很多优越性. 因此，选取 PSO 与 RBF 神经网络相结合来实现直升机旋翼动平衡调整.

(下转第 1334 页)

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)