基于BP神经网络的纳卫星轨道温度预测

张旭东 李运泽

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100191)

摘 要:为了实现纳卫星在轨温度的预测,在对纳卫星热系统动态特性模型分析的基础上,建立BP神经网络预测模型实现纳卫星在轨温度的预测.通过分析纳卫星热系统动态特性模型,得到用于BP神经网络预测模型的输入、输出变量以及训练神经网络所需的数据样本.BP神经网络预测模型分别以纳卫星外壳、辐射器、舱内仪器的热流及温度值为神经网络输入、输出,预测纳卫星10 s后的轨道温度.经验证,神经网络预测模型预测结果与纳卫星实际轨道温度吻合较好,表明神经网络预测模型是快捷有效的.

关 键 词:纳卫星;BP神经网络;温度预测

中图分类号:V 416

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2008)12-1423-05

Temperature prediction for nano satellite on orbit based on BP neural network

Zhang Xudong Li Yunze

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

Abstract: In order to realize the temperature prediction for nano satellite on orbit, a basic thermal environment model of nano satellite was established and analyzed. A BP neural network was used to predict the temperature of nano satellite based on it. After the analysis of the thermal environment model, the thermal flow of satellite's crust, radiater and equipments in cabin was got and used as the inputs of the BP neural network, their temperatures were used as the outputs and data sample of BP neural network was got and used to train BP neural network. The BP neural network which was trained is the temperature prediction model of nano satellite and used to predict the temperature of the satellite on orbit after 10 s. Results fit the actual temperature of nano satellite on orbit well, and show that the temperature prediction model of neural network can predict the temperature of nano satellite accurately and rapidly.

Key words: nano satellite; BP neural networks; temperature prediction

纳卫星是一种质量在10 kg以下的全新概念的卫星[1],具有生存能力强、制造与发射费用便宜的显著优点,是现代卫星技术发展的一大重要方向.目前已广泛应用于通信、对地测量、行星探测等多个领域[2],其自主热管理也越发显得重要.纳卫星在轨飞行温度的预测对实现其自主热管理尤为重要,近年来成为国内外研究的热点.人工神经网络具有高度非线性映射、自组织结构和不需预先建模等优点[3],为方便、快捷、准确地计算和预测纳卫星轨道温度分布提供了可能.

1 卫星热系统动态特性模型分析

目前国内外航天器热计算普遍采用节点网络法(也称集总参数法).该方法原理简单、适应性强,得到了广泛应用.根据文献[4-5]的研究,将整个纳卫星系统分为外壳、辐射器与舱内仪器3

收稿日期:2007-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50506003)

作者简介:张旭东(1983-),男,山东烟台人,硕士生,zhangxudong1983@gmail.com.

个集总参数单元体.用这3个单元体温度的变化来反映卫星外部热场、内部热场的变化情况.

假设纳卫星各单元体表面温度均匀,并处于周期稳定交变过程.在宇宙环境中,辐射传热是卫星舱内仪器与外壳的主要传热方式,辐射器与舱内仪器之间依靠热传导的方式传递热量.根据能量守恒定律,流进单元体的热量与单元体自身发热量之和应等于流出单元体的热量与单元体内能变化之和,建立热系统动态模型模拟纳卫星内外热流随时间变化对其各单元体温度的影响规律,各单元体的动态特性热平衡方程[5]如下:

$$C_{\mathrm{i}} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}\tau} = Q_{\mathrm{i}} - F_{\mathrm{s}}\sigma\varepsilon_{\mathrm{eq1}}(T_{\mathrm{i}}^4 - T_{\mathrm{s}}^4) - K_{\mathrm{ir}}F_{\mathrm{r}}(T_{\mathrm{i}} - T_{\mathrm{r}}) \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{s}} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}\tau} = Q_{\mathrm{s}} + F_{\mathrm{s}}\sigma\varepsilon_{\mathrm{eq1}}(T_{\mathrm{i}}^4 - T_{\mathrm{s}}^4) - F_{\mathrm{s}}\sigma\varepsilon_{\mathrm{eq2}}T_{\mathrm{s}}^4 \tag{2}$$

$$C_{\mathrm{r}} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}\tau} = Q_{\mathrm{r}} + K_{\mathrm{ir}}F_{\mathrm{r}}(T_{\mathrm{i}} - T_{\mathrm{r}}) - F_{\mathrm{r}}\sigma\varepsilon_{\mathrm{eq3}}T_{\mathrm{r}}^4 \tag{3}$$

式中,下标i,s,r分别表示纳卫星舱内仪器、外壳以及辐射器;C为热容量;T_{i},T_{s},T_{r}为纳卫星动态温度;Q_{i},Q_{s},Q_{r}分别为纳卫星内热源、外壳所吸收的空间外热流、辐射器所吸收的空间外热流;F为表面积;σ为斯忒藩-波尔兹曼常数;$\varepsilon_{\mathrm{eq1}}$,$\varepsilon_{\mathrm{eq2}}$,$\varepsilon_{\mathrm{eq3}}$分别为卫星舱内仪器与外壳内壁多层隔热材料、外壳外表面涂层材料以及辐射器外表面涂层材料的当量辐射率;K_{ir}为仪器与辐射器之间的导热系数;τ为时间.

纳卫星热系统动态特性模型由于无法迅速响应纳卫星系统参数、飞行轨道及姿态等一系列因素的变化而受到制约.神经网络预测模型凭借其自学习功能,可以通过不断修正网络节点间的权重适应上述因素的变化.模型中以T_{i},T_{s},T_{r}为预测对象,Q_{i},Q_{s},Q_{r}为模型激励.通过对纳卫星飞行轨道及模式的研究[4-5],计算纳卫星外壳与辐射器所接受的空间外热流.以此为基础,激励整个模型得到纳卫星动态温度特性.纳卫星外壳所接受的外热流主要来自于太阳辐射热流、地球反照热流和地球红外3部分[4].辐射器由于安装在卫星的背阳面,只受地球辐射与地球反照的影响.另外,还需考虑地球阴影区对纳卫星外热流的影响.

2 BP神经网络模型

2.1 BP神经网络的结构

BP神经网络是一种多层感知机网络[6],网络的学习采用误差反向传播算法.BP神经网络由输入层、隐含层、输出层组成,各层之间存在连接权值,连接权值的大小反映了各神经元之间的连接强度.如图1所示.

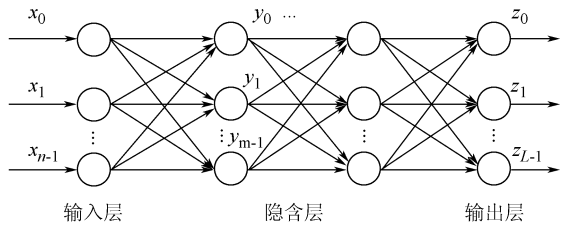


图1 神经网络结构图

神经网络训练过程即是确定各神经元之间权重的过程,图1中有N个输入节点和L个输出节点,激活函数采用Sigmoid函数[6],为

$$f(u) = \frac{1}{1+\mathrm{e}^{-u}} \tag{4}$$

多层计算和输出按下式计算:

$$Y_j = f\left(\sum_{i=0}^{N-1} W_{ij}X_i - \theta_j\right) \qquad j = 0,1,\cdots,M-1 \tag{5}$$

$$Z_k = f\left(\sum_{j=0}^{M-1} W_{jk}Y_i - \theta_k\right) \qquad k = 0,1,\cdots,L-1 \tag{6}$$

式中,X_i为输入层第i个节点的输出值;Y_j为中间层第j个节点的输出;Z_k为输出层中第k个节点的输出;W_{ij}为输入层第i个节点到中间层第j个节点的权系数;W_{jk}为中间层第j个节点到输出层第k个节点的权系数;θ_j为中间层第j个节点的内部阈值;θ_k为输出层第k个节点的内部阈值.

BP神经网络的自学习过程是一个反复迭代的过程[3],算法如下:

1)给网络赋一组小的随机初始权值,其值在0~1之间,并使其互不相等;

2)将输入数据规一化,使其在0~1之间,并确定期望输出信号(d_0,d_1,…,d_{L-1});

3)逐层计算神经网络的实际输出值:

$$f\left(\sum_{i=0}^{N} W_{ij}X_i\right) \rightarrow Y_j \qquad j = 0,1,\cdots,M-1$$

$$f\left(\sum_{j=0}^{N} W_{jk}Y_j\right) \rightarrow Z_k \qquad k = 0,1,\cdots,L-1$$

4)从输出层开始,反向调整权值,其调整公式如下:

$$W_{jk} + \eta\delta_k Y_i \rightarrow W_{jk} \qquad W_{ij} + \eta\delta_j X_i \rightarrow W_{ij}$$

式中,δ为反传误差;$\delta_k = (d_k - Z_k)Z_k(1-Z_k)$;$\delta_j = Y_j(1-Y_j)\cdot\sum_{k=0}^{L-1}\delta_k W_{jk}$.

5) 计算总的误差 E,若 $E\leqslant\varepsilon$,学习停止,否则转到第 3)步重新计算. 其中,ε 为网络性能目标误差.

在神经网络中,kolmogorov 三层神经网络映射存在定理在理论上证明了任意一个连续函数都能与一个三层 BP 网络建立映射关系[6],即存在一个输入层有 n 个神经元,隐层有 $2n+1$ 个神经元,输出层有 m 个神经元的三层神经网络,由此可以确定 BP 神经网络的层数与隐含层神经元的个数.

2.2　纳卫星神经网络温度预测模型

纳卫星热系统是一个以纳卫星外壳、辐射器热流为输入,舱内仪器、辐射器、外壳温度为输出,各部分之间存在相互耦合的非线性系统. 利用纳卫星热系统的动态输入、输出不断训练、完善神经网络温度预测模型,直至达到满意的误差精度,具体做法如图 2 所示.

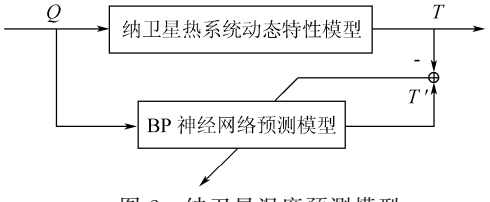


图 2　纳卫星温度预测模型

用 $T(t+1)$表示下 10 s 时刻单元体的温度:

$$T(t+1)=f(Q(t),Q(t-1),Q(t-2),Q(t-3),Q(t-4)) \tag{7}$$

式中,$Q(t)$,$Q(t-1)$,$Q(t-2)$,$Q(t-3)$,$Q(t-4)$为前 5 个时间单位时刻单元体所受到的空间外热流值. 由此可得到纳卫星外壳、辐射器的预测函数. 由于纳卫星各部分之间存在着相互耦合,因此将整个卫星系统作为研究对象,神经网络为 10 输入,3 输出,21 个隐含层节点的系统,见图 3.

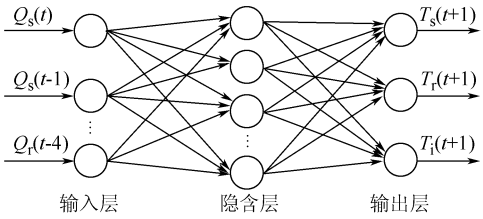


图 3　纳卫星温度预测模型神经网络结构图

给定 N 个样本(Q_s,Q_r,T_s,T_r,T_i),每个训练样本网络训练误差[3]为

$$E_k=\frac{1}{2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{n_j}(T_{ij}-\bar{T}_{lj})^2 \tag{8}$$

式中 $\bar{T}_{lj}$ 为实际输出值. 总误差为

$$E=\frac{1}{2N}\sum_{k=1}^{N}E_k \tag{9}$$

反向传播误差,不断修正网络权初值,直至总误差达到网络性能目标误差. 权值修正公式如下:

$$\omega_{ij}(n_0+1)=\omega_{ij}(n_0)-\eta\frac{\partial E_k}{\partial\omega_{ij}} \tag{10}$$

式中,n_0为迭代次数;η 为学习率.

目前,BP 神经网络常用的训练算法包括:标准 BP 算法,附加动量法,自调整学习率与添加动量项相结合的方法,L-M 算法. 其中,L-M 算法在避免陷入局部极小值、收敛快速性以及网络泛化能力上明显优于其它算法,而得到广泛应用[7].

3　仿真及结果分析

3.1　仿真算例

以文献[5]提到的太阳同步轨道纳卫星为例,卫星采用长方体结构(18 cm×18 cm×22 cm),底面作为纳卫星辐射器,在轨飞行过程中始终处于背阳面,其余 5 个表面作为纳卫星外壳. 外壳表面太阳吸收率与半球发射率之比为 0.75/0.87. 辐射器表面太阳吸收率与半球发射率之比为 0.1/0.8. 纳卫星轨道高度为 700 km,轨道周期为 98.6 min,舱内仪器热功率为 12 W.

根据文献[4－5,8]的研究,在考虑太阳辐射,地球红外辐射,地球反照辐射功率的作用以及太阳、地球、卫星之间相对位置和遮挡关系后,纳卫星外壳与辐射面所接受的空间外热流如图 4、图 5 所示.

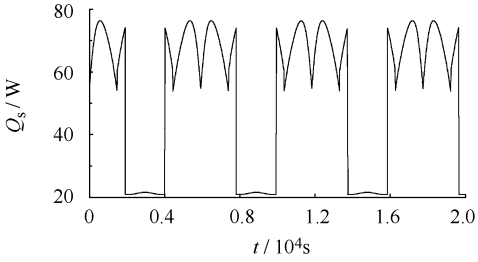


图 4　纳卫星外壳所受空间外热流

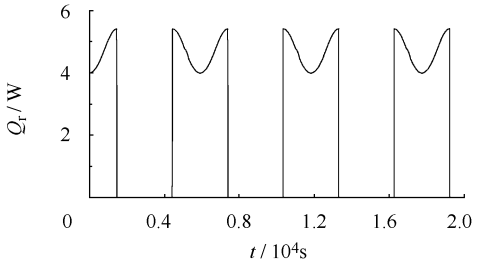


图 5　纳卫星辐射器所受空间外热流

由图 4 和图 5 可知,纳卫星外壳所受到的空间外热流呈现出日晒区与阴影区热流交替的变化

规律.这是因为纳卫星飞行过程中,太阳、地球、卫星三者相对位置周期性变化.此外,外热流还会随着太阳光线与外壳各表面辐射角的变化,呈现出周期性波动.辐射器所受到的外热流功率相对较低,变化规律也相对简单.主要是由于辐射器在整个轨道飞行过程中始终处于卫星背阳面,只受到地球红外辐射与反照辐射的影响.

在得到纳卫星各部分热流之后,运用4阶龙格库塔数值计算方法,进一步求解纳卫星热系统动态模型,得到纳卫星在轨飞行过程中各部分实时温度,如图6～图8所示.

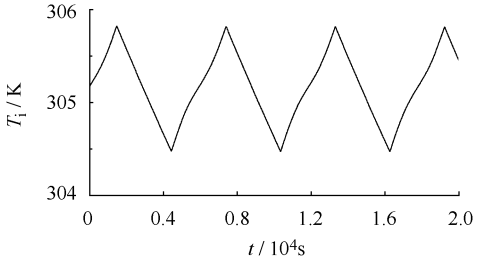


图6 纳卫星舱内温度在轨变化曲线

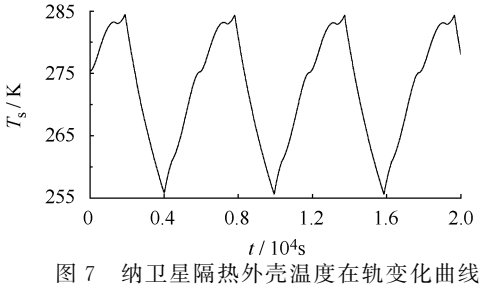


图7 纳卫星隔热外壳温度在轨变化曲线

根据数值计算的结果,随机选取500组,经归一化处理后,作为神经网络的训练样本,选用Matlab神经网络工具箱中的Newff函数来初始化网络[7],所训练的模型参数如下:训练步数为10 000;网络性能目标误差为0.000 01;学习率为0.05;动量常数为0.9;最后按照此参数调用优化L-M算法来训练所建立的网络,训练过程达到设定参数时,自动停止训练.

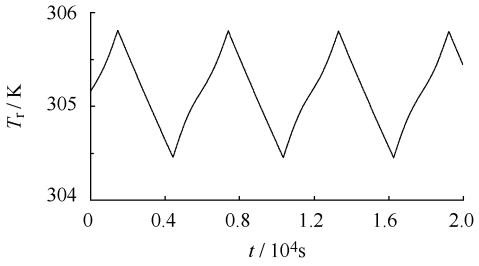


图8 纳卫星辐射器温度在轨变化曲线

3.2 预测结果及分析

对给定的训练样本进行训练学习后,对于指定时刻的纳卫星各部分温度值,可以根据之前5个时间单元的热流值得到,即可预测1个时间单元后的纳卫星各部分温度值.在数值计算结果中随机选取50组测试样本,利用完成训练的神经网络预测模型连续进行10次温度预测,通过神经网络预测值与测试样本输出(理论值)的对比与分析,验证神经网络模型的准确性与可靠性.限于篇幅的问题,仅以纳卫星外壳温度的预测结果为例,结果如表1所示.

由以上测试样本的结果可知,神经网络的连续10次预测结果中最大相对误差为5.6%,从而证明基于BP神经网络对纳卫星温度的预测是可靠且有效的.经分析,预测误差主要来自于神经网络训练样本不足造成的神经网络训练不充分.此外,在多次预测过程中,还应对预测数据进行合理取舍,尽量减少因个别误差对最终预测结果的影响.

表1 纳卫星在轨飞行过程中外壳预测温度及误差项 K

测试节点理论值	神经网络预测输出										标准方差	最大相对误差/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
257.227	256.992	257.010	257.036	257.007	257.005	257.017	257.001	256.995	256.997	257.036	0.016	−0.091
268.480	268.376	268.362	268.359	268.344	268.557	267.756	268.352	269.762	268.382	268.338	0.502	0.477
274.867	274.785	274.783	274.787	274.858	274.781	274.795	274.785	274.828	274.710	274.780	0.038	−0.057
281.389	281.356	281.318	281.322	281.333	281.346	281.309	281.324	285.329	281.339	281.357	1.263	1.400
283.055	283.045	282.987	282.998	283.006	283.006	283.023	283.007	283.033	283.010	283.017	0.017	−0.024
281.746	282.591	277.007	277.057	282.272	282.950	284.679	274.823	274.119	282.251	280.831	3.757	−2.707
275.474	275.576	276.219	275.600	275.284	275.442	290.933	285.130	273.182	276.090	278.316	5.512	5.612
256.478	256.490	256.483	256.531	256.399	256.353	256.645	256.477	256.438	256.495	256.591	0.086	0.065

4 结束语

本文通过对纳卫星热系统动态模型的分析,利用数值计算方法得到纳卫星在轨飞行实时温度,并基于BP神经网络建立纳卫星在轨温度的预测模型.

通过理论分析与最后结果验证,证实了神经网络纳卫星在轨温度预测模型的可行性.由于神经网络的自学习功能,纳卫星温度预测模型会随

着纳卫星在轨运行数据的增多而不断提高预测精度,这对于纳卫星在轨温度的研究具有一定的参考价值.

参考文献(References)

[1] Rossoni P, Panetta P V. Developments in nano-satellite structural subsystem design at NASA-GSFC[R]. SSC-99-V-3,1999

[2] 朱毅麟.微型航天器的公用平台和关键技术[J].中国空间科学技,1997,33(6):25－31
Zhu Yilin. Utility platform and critical technologies for miniature spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology, 1997,33(6): 25－31(in Chinese)

[3] 邓建国,罗隆福.基于 BP 神经网络的大型水轮发电机定子铁心的温度预测[J].湖南大学学报,2002(1):72－75
Deng Jianguo, Luo Longfu. BP neural network method for temperature rise prediction of large hydrogenerator [J]. Journal of Hunan University, 2002(1):72－75 (in Chinese)

[4] 闵桂荣,郭舜.航天器热控制[M]. 北京:科学出版社,1998:420－428
Min Guirong, Guo Shun. Aerocraft thermal control[M]. Beijing: Science Press, 1998:420－428(in Chinese)

[5] 李运泽,宁献文,王晓明,等.纳卫星热系统的在轨动态特性分析与建模[J].空间科学学报,2007,27(3):233－238
Li Yunze, Ning Xianwen, Wang Xiaoming, et al. Analysis and modeling for the in-orbit dynamics of nano-satellite's thermal system[J]. Chin J Space Science, 2007, 27(3):233－238(in Chinese)

[6] Satish Kumar. 神经网络[M]. 北京:清华大学出版社,2006:120－125
Satish Kumar. Neural network[M]. Beijing: Tshinghua University Press,2006:120－125(in Chinese)

[7] 许东,吴铮.基于 MATLAB 6.X 的系统分析与设计——神经网络[M].陕西:西安电子科技大学出版社,2003:159－163
Xu Dong, Wu Zheng. System analysis and design based on MATLAB 6.X—neural network[M]. Shanxi: XiDian University Press, 2003: 159－163(in Chinese)

[8] 肖业伦.航空航天器运动的建模——飞行动力学的理论基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003:233－240
Xiao Yelun. Aerocraft movement modeling—theoretical basis of flight dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2003:233－240(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)

(上接第 1414 页)

参考文献(References)

[1] Turaga D S, Chen T. Estimation and mode decision for spatially correlated motion sequences[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(10): 1098－1107

[2] Dong H Y, Zhang Q S. Fast inter coding mode selection algorithm for H. 264[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 119－224

[3] JVT-J033 Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG (ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q. 6), Fast mode decision for H. 264[S]

[4] Lee W, Jung Y, Lee S, et al. High speed intra prediction scheme for H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1577－1582

[5] Choi I, Lee J, Jeon B. Fast coding mode selection with rate-distortion optimization for MPEG-4 part-10 AVC/H. 264 [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(12): 1557－1561

[6] Tseng C H, Wang H M, Yang J F. Enhanced intra-4x4 mode decision for H. 264/AVC coders[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(8): 1027－1032

[7] 孟庆磊,姚春莲,宋建斌,等.一种面向 H. 264/AVC 的快速帧内预测选择算法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(2):119－223
Meng Qinglei, Yao Chunlian, Song Jianbin, et al. Fast selective algorithm of intra prediction for H. 264 /AVC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 119－223 (in Chinese)

[8] Kim C S, Li Q, Kuo C C J. Fast intra-prediction model selection for H. 264 codec[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5241: 99－110

[9] Richardson Iain E G. H. 264 and MPEG-4 video compression: video coding for next generation multimedia[M]. England: John Wiley& Sons Ltd, 2003: 177－184

[10] ITU-T | ISO/IEC, ITU-T Recommendation H. 264: Advanced video coding for generic audiovisual services[S]

[11] Zan J W, Ahmad M O, Swamy M N S. Comparison of wavelets for multiresolution motion estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(3): 439－446

(责任编辑:娄　嘉)