

太阳同步卫星在轨运行温度预测

魏传锋, 李运泽, 袁领双, 王 浚, 宁献文

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

[摘要] 太阳同步卫星是一种常见的卫星, 对它进行实时的温度预测具有极重要的作用。文章在分析了卫星轨道外热流和平均温度的周期分布后, 对其温度进行了实时预测。由于采用相邻的两圈预测下一圈的温度分布, 因此可以作为卫星热故障诊断的依据, 避免了误差的积累。通过飞行试验, 证明该方法具有很强的可信度。

[关键词] 太阳同步卫星; 在轨; 温度预测

[中图分类号] V474 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)02-0073-03

1 引言

所谓太阳同步轨道就是轨道的升交点赤经 Ω 的变化率等于地球公转的平均角速度 ($0.9856^\circ/\text{d}$), 使得卫星轨道平面、地球和太阳三者之间的关系基本保持不变, 有利于对地面的观测^[1]。因此, 气象卫星、地球资源卫星、照相侦察卫星等遥感类卫星多采用太阳同步轨道。

航天器在轨温度预测对于航天器实时故障诊断、指导热设计甚至航天器自主都具有重要意义^[2], 长期以来人们做了很多的努力^[3,4]。通常采用的是热网络法, 即把整个卫星划分为若干个单元, 组成热网络图, 采用集总参数的方法求解^[5]。该法不但模型参数众多, 而且有很强的刚性, 不便于求解。

笔者通过对太阳同步轨道卫星的轨道和外热流进行分析, 然后采取合理的简化, 发现可以采用相邻的两个周期的温度值预测下一个周期的温度。由于其建模简单, 因而可以非常方便地进行温度在线预测。

2 卫星在轨运行温度预测

2.1 基本假设

太阳同步轨道卫星在轨运行中, 可以认为不存在对流换热。根据能量守恒原理, 航天器各节点的内能变化等于其本身内热源、所受的外热流与它和其他节点的辐射、传导换热之和:

$$\begin{aligned} & (\alpha_{s_i} S \varphi_{1i} + \alpha_{s_i} E_r \varphi_{2i} + \epsilon_{e_i} E_e \varphi_{3i}) A_i + \\ & \sum_{j=1}^N B_{j,i} A_j \epsilon_j \sigma T_j^4 + P_i + \sum_{j=1}^N D_{j,i} (T_j - T_i) = \\ & A_i (\epsilon_{i_i} + \epsilon_{e_i}) \sigma T_i^4 + m_i c_i \frac{dT_i}{d\tau} \end{aligned} \quad (1)$$

式中等号左边第1项为节点 i 吸收的空间外热流; 第2项为节点的热辐射被节点 i 吸收的部分; 第3项为节点 i 的内热源功率; 第4项为其他节点流向节点 i 的传导热流。等号右边第1项为节点 i 向外辐射的热量; 第2项为节点 i 的内能变化率^[6]。

将整个航天器作为一个集总参数环节, 可以用平均温度 T_s 代替各节点的温度与节点 i 构成换热关系^[7]。因此节点 i 的热平衡方程式为

$$Q_i - A_i (\epsilon_{i_i} + \epsilon_{s_i}) \sigma T_i^4 + B_{s_i} A_i \epsilon_s \sigma T_s^4 -$$

[收稿日期] 2004-06-18; **修回日期** 2004-07-26

[基金项目] 航天科技集团“十五”预研课题资助项目(417010604-01)

[作者简介] 魏传锋(1976-), 男, 山东莱芜市人, 北京航空航天大学博士研究生

$$K_{is}(T_i - T_s) - M_i c_i \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中 M_i , T_i , c_i , A_i 分别为节点 i 的质量、温度、比热和表面积; Q_i 为节点 i 受到的外热流; ϵ_{ii} , ϵ_{si} 分别为节点 i 的内、外表面发射率; ϵ_s , T_s , B_{si} , K_{is} 分别为把整个航天器作为一个节点后的发射率、平均温度以及节点 i 对它的吸收因子和热传导因子; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

把式 (2) 化简后, 可以得到

$$\frac{dT_i}{dt} = K_{iq} Q_{ie} - K_{esf} T_i^4 - K_{eef} T_s^4 + K_{id}(T_i - T_s) \quad (3)$$

即节点 i 的温度变化受到整个航天器平均温度 T_s 和外热流 Q_{ie} 的影响。

2.2 对平均温度 T_s 和外热流 Q_{ie} 的简化处理

太阳同步轨道卫星在轨运行中, 只要没有进入阴影区, 都可以把加在卫星上各处的外热流 (太阳辐照、地球及大气系统的反照和红外辐射) 看成是不随时间或轨道位置而变化的^[8]。在阴影区, 太阳辐照的能量没有了, 但是, 地球的红外辐射和地球大气系统的反照依然存在, 不过此时外热流最小。而且, 由于卫星轨道平面、地球和太阳三者之间的关系基本保持不变, 太阳光与轨道平面的夹角在一年中虽有季节性的变化, 但在一天中几乎不变, 而且对于相邻的两个周期来说, 也是基本不变的。因此, 可以认为, 在相邻的周期内, 外热流是一个周期函数, 其变化周期等于轨道周期, 即

$Q(n\tau + x) = Q((n+1)\tau + x)$, $x \in (0, \tau)$, 如图 1 所示; 而卫星的平均温度也是受外热流影响的。因此, 在相邻的周期内, 也可看成是周期函数, 变化周期同样等于轨道周期, 即

$T_s(n\tau + x) = T_s((n+1)\tau + x)$, $x \in (0, \tau)$, 如图 2 所示。

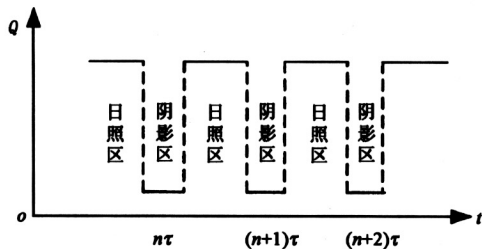


图 1 邻近周期的卫星外热流示意图

Fig.1 External heat flux in neighbor cycles

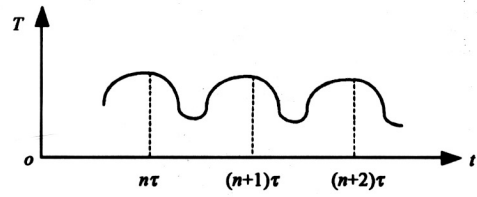


图 2 邻近周期的卫星平均温度示意图

Fig.2 Average temperature in neighbor cycles

2.3 温度预测

对于第 n 个周期的 $(n\tau + x)$ 时刻, 由式 (3) 可知

$$\begin{aligned} \frac{dT_i(n\tau + x)}{dt} = & K_{iq} Q_{ie}(n\tau + x) - \\ & K_{eef} T_i^4(n\tau + x) + K_{esf} T_s^4(n\tau + x) - \\ & K_{id}(T_i(n\tau + x) - T_x(n\tau + x)) \quad (4) \end{aligned}$$

对于第 $n+1$ 个周期的 $((n+1)\tau + x)$ 时刻, 由式 (3) 可知

$$\begin{aligned} \frac{dT_i((n+1)\tau + x)}{dt} = & K_{iq} Q_{ie}((n+1)\tau + x) - \\ & K_{eef} T_i^4((n+1)\tau + x) + K_{esf} T_s^4((n+1)\tau + x) - \\ & K_{id}(T_i((n+1)\tau + x) - T_x((n+1)\tau + x)) \quad (5) \end{aligned}$$

式 (4) 与式 (5) 相减得到

$$\begin{aligned} \frac{dT_i((n+1)\tau + x)}{dt} - \frac{dT_i(n\tau + x)}{dt} = & \\ & K_{eef}(T_i^4((n+1)\tau + x) - T_i^4(n\tau + x)) - \\ & K_{id}(T_i((n+1)\tau + x) - T_i(n\tau + x)) \quad (6) \end{aligned}$$

在已知第 n 圈和第 $n+1$ 圈的温度数据之后, 可以用最小二乘法迅速地把参数 K_{eef} 和 K_{id} 辨识出来。

用求式 (6) 的同样方法可以得到

$$\begin{aligned} \frac{dT_i((n+2)\tau + x)}{dt} - \frac{dT_i(n\tau + x)}{dt} = & \\ & K_{eef}(T_i^4((n+2)\tau + x) - T_i^4(n\tau + x)) - \\ & K_{id}(T_i((n+2)\tau + x) - T_i(n\tau + x)) \quad (7) \end{aligned}$$

只需知道第 $n+2$ 圈的初始温度值 $T_i((n+2)\tau)$, 就可以根据式 (7) 依次对本周期的温度进行预测。

3 飞行试验验证

对于某太阳同步轨道卫星, 轨道高度 798 km, 轨道倾角 98.8° , 运行于偏心率 < 0.0034 的近圆轨道。已知第 42 圈、43 圈的正 x 壁板的温度数据,

利用本文介绍的方法，对第44圈的温度进行了预测。由于该卫星过境时间较短，因此只对前10 min进行了预测，结果如图3所示。可以看出，最大误差为0.45℃，而温度变化范围为4.9℃，误差率为9.1%。由此可见，该方法是可行的。

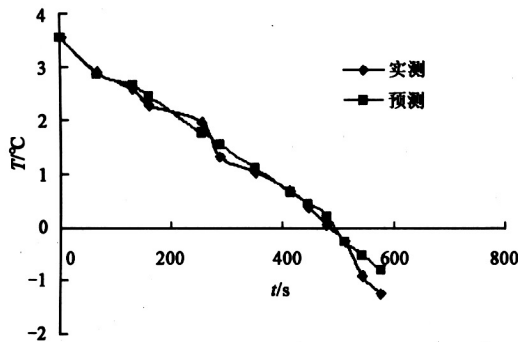


图3 第44圈正x壁板的温度实测与预测比较图

Fig.3 Real temperature and predict temperature of +x panel in the 44th cycle

4 结论

笔者在分析了太阳同步轨道卫星在轨运行的传热学模型的基础上，根据它的轨道特点对卫星的平均温度和外热流做了简化处理，认为可以作为周期函数来处理，得到在轨运行温度预测的数学模型，经过飞行试验验证，结果令人满意。

由于采用相邻的两圈预测下一圈的温度分布，

因此避免了误差的积累，具有很强的可信度，可以作为卫星热故障诊断的依据，并且为最终实现卫星自主发挥作用。

参考文献

- [1] 邓桂俊, 武克用. 太阳同步圆形轨道空间相机太阳辐射外热流的计算 [J]. 光学精密仪器, 1997, 12(6): 107~112
- [2] Glass B J. Thermal expert system (TEXSYS): systems autonomy demonstration project [R]. NASA-TM-102877-Vol. 1, A-90319-Vol. 1, NAS 1. 15: 102877-Vol. 1, 1992
- [3] 翁建华, 潘增富, 闵桂荣. 航天器热平衡试验中平衡温度的预测 [J]. 中国空间科学技术, 1997, 17(6): 1~6
- [4] 胡金刚, 潘增富, 闵桂荣. 具有周期热源变化的卫星不稳定热平衡试验方法的研究 [J]. 宇航学报 1984, 7(3):8~13
- [5] 贾阳. 航天器温度场仿真研究 [D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2003. 10~11
- [6] 闵桂荣. 卫星热控制技术 [M]. 北京: 宇航出版社, 1991. 19~22
- [7] 魏传锋, 李运泽, 王浚, 于涛. 航天器热平衡试验故障诊断的模型与方法 [J]. 宇航学报, 2004, 25(4):7~9
- [8] 刘锋, 郭秀财, 马式明. 具有周期性变化的外热流航天器瞬时温度场的预报方法 [J]. 中国空间科学技术, 1985, 5(3):44~56

Temperature Prediction for Sun Synchronous Satellite on Orbit

Wei Chuanfeng, Li Yunze, Yuan Lingshuang, Wang Jun, Ning Xianwen

(School of Aviation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

[Abstract] Temperature prediction on-line for sun synchronous satellite is very essential. In this paper, satellite's temperature is predicted on-line after the analysis to the cycles of orbital external thermal current and average temperature. Temperature distribution predicted by last two circles can be the basis on thermal fault diagnosis for satellites. Meanwhile the error accumulation can be avoided. Fly experiment data show that the method is reliable.

[Key words] sun synchronous satellite; on orbit; temperature predict