卫星热控系统的动态特性建模与仿真

李运泽 魏传锋 袁领双 王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 受控对象的动态特性是卫星热控系统设计的基础,为了更加简便地进行卫星热控系统的动态特性计算,根据卫星各部分的温度变化特点及它们之间的热量传输关系,将其划分为外壳、辐射器、舱内环境、关键仪器设备以及相变蓄热装置5个集总参数热控环节,建立起各热控环节温度变化的数学模型. 应用这一模型可以十分简便地计算内部热源强度及空间外热流变化时卫星各热控环节的温度变化趋势,其计算过程较常规的卫星瞬态温度场计算简单、方便,满足了对卫星热控系统进行仿真研究和控制策略优化的迫切需要,这对发展各种主动热控制技术来说具有尤其重要的意义.

关 键 词: 仿真; 卫星; 热控系统; 动态特性; 建模

中图分类号: V 416

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0372-03

Dynamical modeling and simulation of satellite thermal control system

Li Yunze Wei Chuanfeng Yuan Lingshuang Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Modeling and simulation of controlled-object temperature changes are necessary for developing satellite thermal control system. In order to calculate the dynamical properties of satellite thermal control system more easily, the whole satellite was divided into five lumped thermal control nodes, which included satellite's outer surface, heat radiator, indoor environment, key electrical equipment and phase change device. The heat transfer relationship between different nodes and temperature change properties of each part was carefully considered during the node dividing process. Mathematical models for temperature changes of each thermal control node were built and presented. With these dynamical models above, the key temperature changes of satellite, causing by either indoor heat source disturbs or outer side space heat flux varieties, could be calculated more simply and conveniently than using the common unsteady temperature field calculating method. This satisfies the stringent demand of thermal control system's control strategy optimization and its simulation. It's especially useful in developing active thermal control systems.

Key words: simulation; satellite; thermal control system; dynamical property; modeling

发展新型的卫星热控系统控制策略与控制技术,需要全面、深入地了解热控系统的动态特性. 然而各种卫星在天上与地面的传热工况有较大差别,热真空试验设施的运行费用又十分昂贵[1],通过物理试验的方法进行卫星热控系统的动态特性研究较为不便、也不经济;应用数字仿真的方法进行卫星热控系统的动态特性研究虽然花费较少,但却需要一个简洁、准确的动态特性模型. 目前,在卫星热计算与分析中广泛使用的热网络模型不但需要确定的模型参数众多,而且是一个典型的高维刚性模型[2~4],对应仿真算法较为复杂,难于在仿真与控制实践中简便应用[5]. 卫星热控系统的动态特性研究迫切需要一种简洁、准确、便于应用的动态特性模型.

收稿日期: 2004-02-20

作者简介: 李运泽(1972-),男,河北邢台人,讲师, liyunze@ tsinghua. org. cn.

本文根据卫星热控系统的动态特性特点,通过合理的机理分析与简化建立起卫星热控系统的动态特性模型,应用这一模型可以对卫星不同热控环节的温度水平变化进行仿真研究,较为简便地满足了卫星热控系统控制策略与控制技术研究的需要.

1　卫星热控系统的动态特性模型

卫星热控系统的基本功能是:通过调节星上的热量收集、产生、转移、存储和排放过程达到控制卫星表面、舱内环境及关键目标仪器温度变化的目的,将整个卫星划分为:外壳、辐射器 2 个外部集总温度参数环节,舱内环境、所要研究的关键目标仪器 2 个具有嵌套关系的内部集总参数温度环节和 1 个相变蓄热环节. 根据能量守恒定律可得各温度环节的动态特性方程:

$$\boldsymbol{C}\begin{bmatrix}\dot{T}_{\mathrm{s}}\\ \dot{T}_{\mathrm{r}}\\ \dot{T}_{\mathrm{i}}\\ \dot{T}_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{\mathrm{s}}\\ Q_{\mathrm{r}}\\ Q_{\mathrm{i}}\\ Q_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}-\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}T_{\mathrm{s}}\\ T_{\mathrm{r}}\\ T_{\mathrm{i}}\\ T_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}-\boldsymbol{F}\begin{bmatrix}T_{\mathrm{s}}^4\\ T_{\mathrm{r}}^4\\ T_{\mathrm{i}}^4\\ T_{\mathrm{e}}^4\end{bmatrix}-\boldsymbol{H}\begin{bmatrix}T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{h}}\\ T_{\mathrm{r}}-T_{\mathrm{h}}\\ T_{\mathrm{i}}-T_{\mathrm{h}}\\ T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{h}}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,T_{s},T_{r},T_{i},T_{e} 分别为卫星外壳、辐射器、舱内环境及关键目标仪器的平均温度;$\dot{T}_{\mathrm{s}}$,$\dot{T}_{\mathrm{r}}$,$\dot{T}_{\mathrm{i}}$,$\dot{T}_{\mathrm{e}}$ 分别为其随时间的变化率;T_{h} 为相变蓄热装置的平均温度;Q_{s},Q_{r} 分别为卫星外壳和辐射器吸收的空间热辐射功率;Q_{i},Q_{e} 分别为卫星舱内环境和关键目标仪器包含的热源强度;对角阵 $\boldsymbol{C}$,$\boldsymbol{H}$ 的对角线元素分别代表各热控环节的热容量大小及其同相变蓄热装置间的热导值;$\boldsymbol{K}$ 为各热控环节间的导热作用矩阵,矩阵元素 k_{ij} 的定义式为

$$k_{ij}=\begin{cases}-\left|\dfrac{Q_{\mathrm{d},ij}}{T_i-T_j}\right| & i\neq j\\ \displaystyle\sum_{r=1}^{r<5,r\neq i}|k_{ir}| & i=j\end{cases} \tag{2}$$

式中,T_i,T_j,$Q_{\mathrm{d},ij}$ 分别为第 i,j 两个热控环节的绝对温度和它们之间的导热量;F 为各热控环节间的辐射换热作用矩阵,矩阵元素 f_{ij} 的定义式为

$$f_{ij}=\begin{cases}-\left|\dfrac{Q_{\mathrm{f},ij}}{T_i^4-T_j^4}\right| & i\neq j\\ \dfrac{Q_{\mathrm{f},i}}{T_i^4} & i=j\end{cases} \tag{3}$$

式中,$Q_{\mathrm{f},ij}$,$Q_{\mathrm{f},i}$ 分别为第 i,j 两个热控环节间的辐射换热量以及第 i 个热控环节向其自身以外辐射的总热量. 定义相变蓄热装置的相对蓄热量为

$$E_{\mathrm{hr}}=E_{\mathrm{h}}-E_{\mathrm{g0}} \tag{4}$$

式中,E_{h},E_{g0} 分别为蓄热装置的内能和蓄热装置处在相变温度而又没有开始相变时的内能,则相变蓄热装置相对蓄热量变化的动态方程为

$$\frac{\mathrm{d}E_{\mathrm{hr}}}{\mathrm{d}t}=[k_{\mathrm{ih}}\ k_{\mathrm{hr}}\ k_{\mathrm{hs}}]\begin{bmatrix}T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{i}}\\ T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{r}}\\ T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{s}}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,k_{ih},k_{hr},k_{hs},为蓄热装置与舱内环境、辐射器、外壳间的热导值(由于舱内环境与关键目标仪器具有嵌套关系,可不单独考虑关键目标仪器对相变装置的影响). 式(2)~式(5)的传热和物性参数可根据卫星的设计、遥测和热平衡试验数据计算. 与相对蓄热量对应的相变装置温度为

$$T_{\mathrm{h}}=\begin{cases}T_{\mathrm{h0}}+\dfrac{E_{\mathrm{hr}}}{M_{\mathrm{h}}c_{\mathrm{h1}}} & E_{\mathrm{hr}}\leqslant 0\\ T_{\mathrm{h0}} & 0<E_{\mathrm{hr}}\leqslant M_{\mathrm{h}}\gamma_{\mathrm{h}}\\ T_{\mathrm{h0}}+\dfrac{E_{\mathrm{hr}}-M_{\mathrm{h}}\gamma_{\mathrm{h}}}{M_{\mathrm{h}}c_{\mathrm{h2}}} & E_{\mathrm{hr}}>M_{\mathrm{h}}\gamma_{\mathrm{h}}\end{cases} \tag{6}$$

式中,T_{h0},M_{h} 分别为蓄热装置的相变温度和相变材料质量;c_{h1},c_{h2} 分别为单位质量相变材料在未发生相变前和完全相变后的比热容;γ_{h} 为单位质量相变材料的相变潜热. 由式(6)可知当相变材料的质量足够大时,也可将相变装置作为一个恒温源来处理,其温度等于相变材料的相变温度. 即

$$T_{\mathrm{h}}=T_{\mathrm{h0}} \tag{7}$$

应用式(1)~式(7)组成卫星热控系统动态特性模型,不但可以对外壳、辐射器、舱内环境等卫星热控环节的平均温度水平变化进行仿真计算,而且可以对星上关键仪器及设备的温度变化进行简便的仿真分析与计算.

2　仿真研究示例

应用本文式(1)~式(7)组成的卫星热控系统动态特性模型,可以对由外壳、辐射器、舱内环境、关键目标仪器等热控环节的各种输入变量变化进行全面的仿真研究. 这里以星载仪器内热源强度变化及使用相变材料的温度控制效果作为仿真示例进行分析说明,仿真过程中使用四阶龙格库塔算法.

仿真对象为一重量为 300 kg 小卫星,仿真开始后第10 min,其内部某关键仪器热源功率发生

-50% 的阶跃变化,此间其它各热控环节的输入保持不变,各热控环节均未采取闭环或主动热控措施,分采用相变材料与不采用相变材料两种情况进行仿真计算,图 1 ~ 图 4 中的曲线 *a* 为不采用相变装置时的仿真结果,曲线 *b* 为采用相变材料对该仪器设备进行温度控制时的仿真结果,各图中纵坐标为摄氏温度.

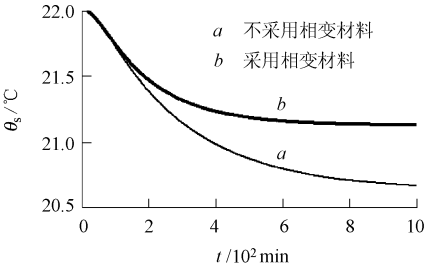

图 1 外壳平均温度变化

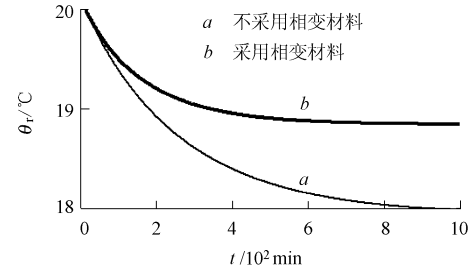

图 2 辐射器平均温度变化

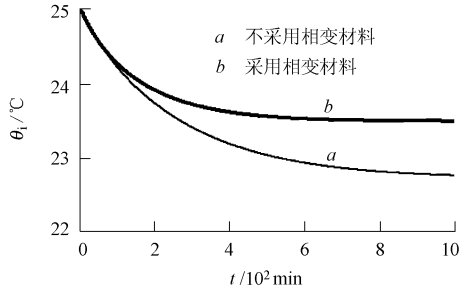

图 3 舱内环境平均温度变化

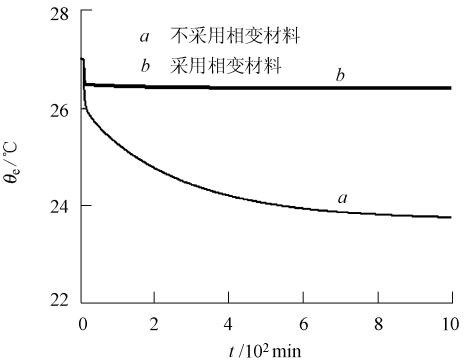

图 4 目标仪器平均温度变化

仿真结果的分析如下:

当舱内仪器热源功率发生-50% 的阶跃变化后,假定其它仪器设备的热功率未发生变化,则舱内总的热负荷功率会随该仪器的热源功率减小而有所减少,这导致卫星外壳平均温度、辐射器平均温度、舱内环境平均温度及该仪器设备的平均温度均会呈现出逐步下降的变化趋势,并在新的平衡值稳定下来,下降幅度和快慢如图 1 ~ 图 4 所示. 比较其中不含相变材料时的仿真结果(曲线 *a*)及用相变材料时的仿真结果(曲线 *b*)发现采用相变材料进行仪器温度控制后各热控环节温度变化幅度均有明显减小,过渡过程的持续时间也有相应缩短,受控对象的温度控制特性由于相变材料的引入得到了一定程度的改善.

上述仿真结果的分析表明:应用本文简化动态模型进行卫星热控系统仿真计算的结果是合理的. 上述仿真计算中设计的状态变量只有 5 个,远少于对卫星进行瞬态温度场计算所需要的计算节点数,因此可更加方便地应用于实际的仿真与控制系统.

3 结 束 语

卫星热控系统的动态特性研究对改进热控系统的控制策略与控制技术具有重要意义,而目前运用物理试验或瞬态温度场计算的方法进行卫星热控系统的动态特性研究均较为复杂、不便. 本文通过合理的机理分析与简化建立起一个简便的动态特性模型,运用这一模型可以对卫星外壳、辐射器、舱内环境、关键目标仪器的温度变化规律进行较为全面的仿真研究,为卫星热控系统的仿真、控制技术研究提供了简便的数学模型.

参考文献 (**References**)

[1] 柯受全. 卫星环境工程与模拟试验 [M]. 北京:宇航出版社, 1993. 201 ~ 230
Ke Shouquan. Satellite environmental engineering and simulating test [M]. Beijing: Astronautic Press, 1993. 201 ~ 230 (in Chinese)

[2] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社, 1991. 15 ~ 31
Min Guirong. Satellite thermal control technology[M]. Beijing: Astronautic Press, 1991. 15 ~ 31 (in Chinese)

[3] Gilmore D. Satellite thermal control handbook [M]. El Segundo, A: The Aerospace Corporation Press, 1994. 16 ~ 22

[4] Karam, Robert D. Satellite thermal control for systems engineers [M]. Reston, Va: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. 11 ~ 20

[5] 肖田元. 系统仿真导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 21 ~ 30
Xiao Tianyuan. System simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 21 ~ 30 (in Chinese)