

热网络法概论

康 芹, 李世武, 郭建利

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 对应用于温度场分析的热网络方法进行了系统的介绍。介绍了热网络法的原理及其应用领域, 总结了该方法在卫星、航空航天、建筑、油田等更多领域的应用成果, 对基于热网络法的软件 SINDA/FLUINT 也进行了详细介绍。

关键词: 热网络; 温度场; 热阻热容; SINDA/FLUINT

中图分类号: TK121

文献标识码: A

文章编号: 1002-1639(2006)05-0015-03

The Thermal Network Method Outline

KANG Qin, LI Shi-wu, Guo Jian-li

(Dynamical and Energy Source College of Northwest Industry University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The thermal network method which uses in the temperature field analysis is introduced in details thoroughly, based on the fundamentals and applications of the thermal network, the paper concludes the results in the satellites, aerospace, architecture, oil field and so on. Meanwhile, the soft ware SINDA/FLUINT of thermal network method is also detailed.

Key words: thermal network; temperature field; thermal resistance and thermal capacitance; SINDA/FLUINT

从卫星、各类发动机到电子行业的集成芯片, 现在急于解决的问题之一是其散热问题。很多科研工作者提出了发散冷却、气膜冷却等行之有效的冷却方式, 但更多复杂散热问题的解决是以各种情况传热问题的分析为基础的。对传热问题的分析历史上最早采用的数值方法是有限差分法, 对简单几何形状中的流动与换热问题是一种最容易实现的数值方法, 但其主要缺点是对复杂区域的适应性较差, 也提出了有限元法、有限容积法等各种数值计算方法, 其中热阻热容法^[1] (热网络法) 是一种热电比拟的分析方法。其借用电学上的 KCL、KVL 定律易于得出各种复杂传热问题的热平衡方程式, 然后利用计算机求解方程, 得出复杂结构中各点的温度及其变化率。现在, 热网络法已经应用于航空、航天、建筑、油田、电子器件及医学等多个领域。热网络法将应用到更多具体的领域、行业来更好地分析、解决传热及结构分析等更多问题。

1 热网络法原理

把研究对象细分成单元节点, 节点之间有热量传递, 无论是以何种方式换热, 节点之间都用热阻代替, 这就形成热网络。各个节点均看成是具有集总参数的单元, 对每个单元或回路利用 KCL、KVL 建立热平衡方程。引入热阻 $R_{j,n}$ 及热容 $C_n = \rho_n c_n V_n$ (单元 n 的热容) 的概念, 以温度为待求量可列出热平衡方程。

收稿日期: 2006-06-26; 修回日期: 2006-07-07

作者简介: 康 芹 (1978-), 女, 硕士研究生, 研究方向为飞行器部件的热分析及热控制, 传热的数值模拟研究。

$$\sum_j \frac{f(T_j^i) - f(T_n^i)}{R_{j,n}} + q_n V_n = c_n \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $f(T)$ 是 T 的函数, 对于导热热阻和对流换热热阻, $f(T) = T$, 对于辐射换热热阻 $f(T) = f(T)^4$

以图 1 所示的单元体 n 为例。

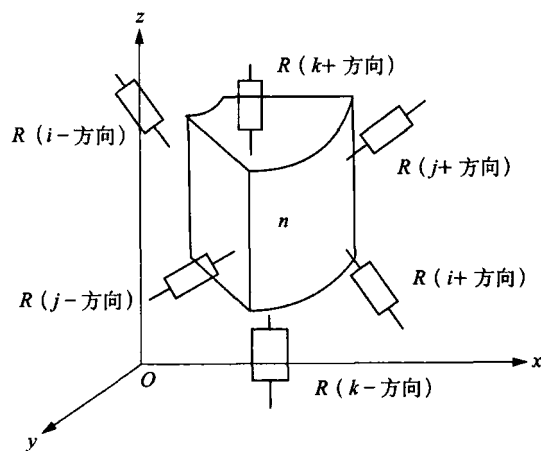


图 1 热阻热容算式单元体剖分图^[2]

对单元 n 而言, 其周围有 6 个单元体, 由能量守恒可得 6 个单元体向单元体 n 传递的热量应与其温度升高所吸收的热量相等。在圆柱坐标系下某时刻从 3 个方向流入单元体的总热量为

$$\frac{T_{k+}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{k+}} + \frac{T_{k-}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{k-}} + \frac{T_{i+}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{i+}} + \frac{T_{i-}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{i-}} + \frac{T_{j+}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{j+}} + \frac{T_{j-}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{j-}} = \sum \frac{T_{k+}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{k+}} + \frac{T_{k-}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{k-}} \quad (2)$$

从*i*时刻到*i*+1 时刻，单元体所吸收的能量为

$$\rho_n c_n \Delta V_n \frac{T_n^{(i+1)} - T_n^{(i)}}{\Delta t}$$

$$\text{则 } \sum \frac{T_{e\pm}^{(i)} - T_n^{(i)}}{R_{jn}} + \Delta V_n Q = \rho_n c_n \Delta V_n \frac{T_n^{(i+1)} - T_n^{(i)}}{\Delta t} \quad e = i, j, k \quad (3)$$

式中：*Q*为单元体的内热源，*W*； ΔV_n 为单元体的体积； $R_{j,n}$ 为热阻，可能是导热热阻也可能是对流换热热阻，要视单元体*n*和周围单元体间的传热方式而定。*q_n*，*V_n*， ρ_n ，*c_n*分别为单元体*n*的单位体积内热源的发热率、体积、密度、比热容； Δt 为*i*时刻到*i*+1 时刻的时间间隔。

2 应用实例概述

陈志刚将热网络法用于电机三维温度场的计算。计算了一台 4 极 5.5 kW 的三相浸油式电机的温度分布情况。根据该类电机的具体结构，由理论分析，认为电机温度分布沿圆周方向即关于轴向中心横截面对称，这样可以取电机体的一半作为求解区域，并把空间问题简化为平面问题。在*r-z*平面上，按照制造材料的不同，把电机沿径向分成若干块，并沿轴向分成若干段，为了便于求取各等效相关面面积，可构造一与原始结构图规则交织的对偶结构图。

电机的原始结构图及对偶结构图如图 2 示。

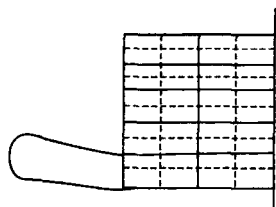


图 2 电机的剖分（实线）对偶（虚线）结构图

计算出所有等效热阻和等效热源之后即可得其热网络图，如图 3。

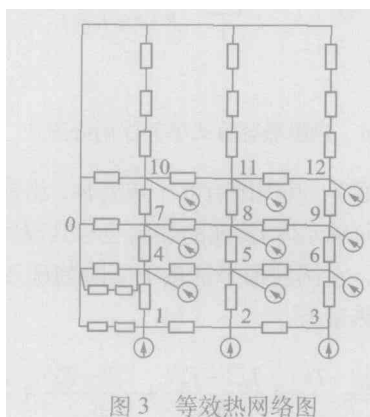


图 3 等效热网络图

运用 KCL，KVL 对热网络图列相对应的方程组，并借助计算机进行计算，图 4 为油流量为 400m³/s，室温

28.45℃，油温 52.29℃ 工况条件下电机的温度线分布。

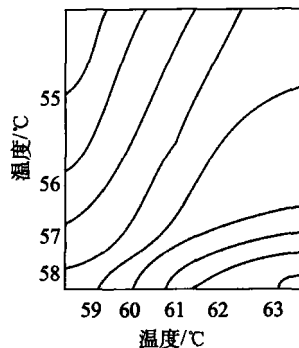


图 4 某工况的电机等温线分布

李键等人将热网络法应用于航空发动机轴承腔温度场的计算^[3]。用热网络法建立了轴承腔的热平衡方程组，并采用拟牛顿法求解了该方程组。获得了 10 种不同工况下的温度场计算结果，与测试结果基本吻合。

首先将轴承腔进行温度节点的划分。在稳态传热时，流入任一节点的热流等于流出该节点的热流。在任一时刻任一节点的净热流率为

$$q_i = q_{Gi} + \sum_{j=1}^n q_{ci,j} + q_{vi,j} + q_{ri,j} \quad (4)$$

式中： q_{Gi} 为分配到*i*节点的内部生成热； $q_{ci,j}$ ， $q_{vi,j}$ 和 $q_{ri,j}$ 分别为*i*节点到*j*节点的传导热流率、对流换热热流率、辐射热流率；*n*为有换热关系的节点总数。则轴承腔系统的热平衡方程式组为

$$q_j = q(t_1, t_2, \dots, t_m) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

求解这一方程组即可求出轴承腔的温度场 t_j ($j = 1, 2, \dots, m$)。

轴承腔分析模型热节点布置如图 5 所示（所考虑元素为轴对称）。节点 1-22 分别表示的是轴承腔筒体内壁、轴承座各表面、涡轮轴中心孔等某发动机后轴承腔各个部分以及不同位置的空气和滑油。各节点之间的热传递关系可用图 6 所示的热网络图来表示。

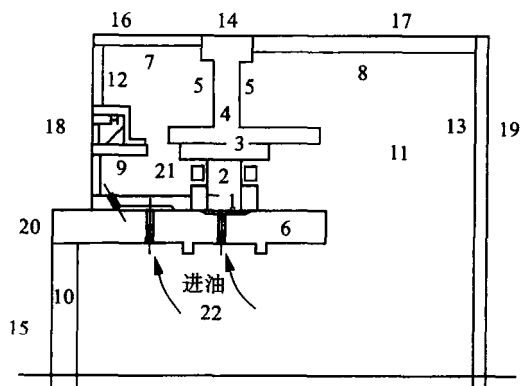


图 5 某型发动机后轴承腔的结构

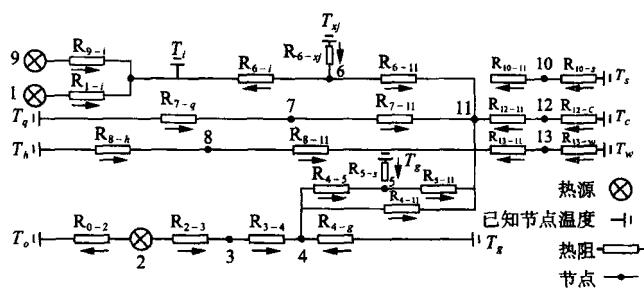


图 6 轴承腔的热网络图

根据上述热网络图和所建立的模型，建立如下的热平衡方程组

用拟牛顿法求解上式组成的热平衡方程组。即可得温度场的求解结果。

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \frac{1}{2}Q_i - \alpha_i A_i (T_1 - T_i) = 0 \\
 q_2 &= \frac{1}{2}Q_e - \frac{2\pi k_1 B_e}{\ln(D/D_e)} (T_2 - T_3) - \alpha_e A_e (T_2 - T_0) = 0 \\
 q_3 &= \frac{2\pi k_1 B_e}{\ln(D/D_e)} (T_2 - T_3) - \frac{2\pi k_2 B_e}{\ln(D_i/D)} (T_3 - T_4) = 0 \\
 q_4 &= \frac{2\pi k_2 B_e}{\ln(D_i/D)} (T_3 - T_4) + \frac{2\pi k_3 l_1}{\ln(D_2/D_1)} (T_g - T_4) - \\
 &\quad \frac{\pi k_2 (D_2^2 - D_1^2)}{l_1} \left(\frac{T_g + T_4}{2} - T_5 \right) - \alpha_{11} A_{11} (T_4 - T_{11}) = 0 \\
 q_5 &= \frac{\pi k_2 (D_2^2 - D_1^2)}{2l_1} \left(\frac{T_g + T_4}{2} - T_5 \right) - \alpha'_{11} A_{11} (T_5 - T_{11}) = 0 \\
 q_6 &= \alpha_2 A'_3 (T_{zj} - T_6) - \alpha'_2 A_3 (T_6 - T_i) - \alpha'_{11} A_4 (T_6 - T_{11}) \\
 &= 0 \\
 q_7 &= U_7 A_7 (T_q - T_7) - \alpha_{11} A_7 (T_7 - T_{11}) = 0 \\
 q_8 &= U_8 A_8 (T_h - T_{11}) - \alpha_{11} A_8 (T_8 - T_{11}) = 0 \\
 q_9 &= 0.98 Q_{rub} - \alpha_9 A_9 (T_9 - T_i) = 0 \\
 q_{10} &= \alpha_{10} A_{10} (T_s - T_{10}) - \alpha_{11} A_{10} (T_{10} - T_{11}) = 0 \\
 q_{11} &= U_{12} A_{16} (T_c - T_{11}) - \alpha_{11} A_{16} (T_{12} - T_{11}) = 0 \\
 q_{12} &= U_{13} A_{17} (T_w - T_{11}) - \alpha_{11} A_{17} (T_{13} - T_{11}) = 0 \\
 q_{13} &= Q_{bfr} + Q_{rub} + Q_{air} + \frac{2\pi k_3 l_1}{\ln(D_2/D_1)} (T_g - T_4) + 2\alpha'_{11} A_2 \times \\
 &\quad (T_5 - T_{11}) + \alpha_2 A'_3 (T_{zj} - T_6) + U_7 A_7 (T_q - T_{11}) + U_8 A_8 (T_h - T_{11}) + \\
 &\quad \alpha_{10} A_{10} (T_s - T_{10}) + U_{12} A_{16} (T_c - T_{11}) + U_{13} A_{17} (T_w - T_{11}) - \\
 &\quad (10^{-3}/60) c_{p13} \rho_{13} L_{oi} (T_e - T_i) = 0
 \end{aligned}$$

式中： k_1 、 k_2 和 k_3 分别表示轴承外圈、轴承座和轴承结构部件的导热系数； U_7 、 U_8 、 U_{12} 、 U_{13} 分别为密封安装边筒体、轴承腔筒体、密封跑道侧壁和后盖平壁的总传热系数； $A_i \sim A_{17}$ 为对流换热面积； α_i 、 α_e 、 α_9 分别为润滑油与内圈滚道表面、与外圈滚道表面和与石墨跑道的对流换热系数， $\alpha_9 = 2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； α_{11} 为轴承腔内油气混合物与轴承腔壁的换热系数，其值为 $600\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

α'_{11} 为油气混合物与轴承腔内其它面的换热系数，其值为 $250\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； ρ_{13} 为润滑油在进口和出口平均温度下的密度； c_{p13} 为润滑油在进口和出口平均温度下的比热容； $Q_i = 0.35 Q_{bfr}$ ， $Q_e = 0.30 Q_{bfr}$ 。

Francisco Alhama 和 Antonio Campo 将热网络法应用于卫星^[4]的温度场分析；曲海潮等人研究了电缆及电热杆油井温度场分布，提出利用简便、易行的热阻热容算式取代传统使用的有限差分法来离散建立的数学模型，综合考虑了热传导、对流换热、热辐射等传热方式，并根据现场实际情况将导热系数、液体密度、比热容等热物性参数当作变量处理，结合油田矿场 1 口油井事例，模拟出了油井的温度分布，模拟结果和现场实测结果比较吻合；张永红^[5]等利用热网络分析法得到行星齿轮传动系统的稳态温度分布，为行星齿轮系统的瞬态热分析奠定了基础；吴昌林^[6]等人建立了汽车变速箱的使用稳态热网络模型，综合考虑了可能影响变速箱温升的各种工况，对汽车变速箱的稳态温升作了较为准确的预测；刘志全^[7]等人以某直升机齿轮传动系统为研究对象用热网络法建立了该系统的热平衡方程组，建立了热阻、功率损失、对流换热的计算模型；王文魁^[8]等人用热网络法等几种方法相结合建立分析模型，考察了空调室外机散热对建筑物表面的温度场和辐射出射度场的影响；张信荣^[9]等人利用网络分析原理系统地研究了由气、液流体回路所构成流动和热网络的质量组成特性。

3 基于热网络法的软件介绍

美国 Network Analysis, Inc 公司的产品 SINDA/G 软件于 1996 年进入中国，该软件来源于美国航天工业，共有 39 年的研发历史，已成功地应用于我国载人航天工程和多颗卫星、载荷的热设计。该软件用于温度场和热控制计算，是基于有限差分数值方法设计开发的专业热分析软件，包括大量计算求解器、库函数和开放式用户开发环境，已成功解决了航天、汽车和电子学领域中的最复杂的技术难题。该软件可以提供实时图形显示模型的运行状况，包括 CPU 运行时间、收敛性和时间步长，以及任何用户希望实时监控的变量如温度、热流等，其计算速度是常规算法的 1000 倍以上。与其他热分析软件相比，它的计算速度更快，数值稳定性更高，精度更高。

1986 年，流体模块——FLUINT 首次发行，极大地拓展了这个程序的功能。在此过程中 SINDA/FLUINT 受到了普遍欢迎，成功地取代了许多其它 SINDA 版本和 SINDA 类型的计算程序从最初的满足航天器和运载火箭日益变化的热模拟需求，到现在 SINDA/FLUINT 已经将应用领域拓展到其它行业，包括核能、飞行器、电子封装、HVAC（加热、通风、空调系统）、石油化工和汽车，并且进入其它的专业和子系统，如推进和环境控制。SINDA/FLUINT 的主要功能是以电路类比、集总参数的形式

工业炉内钢坯温度及表面热流重建模型研究

江瑞宝¹, 周怀春¹, 程 强¹, 黄志锋¹, 白春雷², 苏 毅², 张茂杰², 施 涛²

(1. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武钢热轧厂, 湖北 武汉 430083)

摘要: 在已测得钢坯内部几点从进炉到出炉随时间变化的温度曲线的情况下(例如黑匣子测温), 根据传热导热原理以及正则化技术, 建立了重建钢坯表面热流分布的数学模型, 并且进一步重建钢坯内部温度的三维分布。该模型通过可行性验证, 可望提供各火嘴燃料量和风量优化调整指导信息, 确保工业炉安全和经济运行。

关键词: 工业炉; 正则化; 钢坯表面热流; 温度重建; 优化调整

中图分类号: TF062

文献标识码: A

文章编号: 1002-1639(2006)05-0018-03

Study on Model for Rebuilding the Temperature and the Surface Heat Flux of the Billet Steel in an Industrial Furnace

JIANG Rui-bao¹, ZHOU Huai-chun¹, CHENG Qiang¹, HUANG Zhi-feng¹, BAI Chun-lei², SU Yi², ZHANG Mao-jie², SHI Tao²

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hot-Strip Factory of Wuhan Iron and Steel Corporation, Wuhan 430083, China)

Abstract: This paper described an mathematical model for rebuilding the surface heat flux of the billet steel in an industrial furnace, according to the heat transfer and conduct theory and the technique of regularization, in the case of having obtained some temperature curves, that changed follow the time between the billet steel being put in and pulled out of the furnace changed, of some inner points of the billet steel, and then rebuilding the distribution of the three-dimensional temperature of the billet steel. This model passed the validity check. It can be used to offer the guiding information of the fuel rate of the fire nozzles and input air optimization adjustment, to make sure the security and the economical efficiency of the industrial furnace during the running time.

Key words: industrial furnace; regularization; steel billet surface heat flux; temperature rebuilding; optimizing regulation

由于测量技术的限制, 工业炉内加热钢坯的热力过程, 包括钢坯表面热流密度分布、钢坯表面及内部温度

收稿日期: 2006-07-17

作者简介: 江瑞宝(1980-), 男, 广西人, 研究生, 主要研究方向为工业炉炉内热力过程;

周怀春(1965-), 男, 湖北人, 博士生导师, 主要研究火焰温度可视化检测原理和技术。

分布, 都难以测量。部分学者也进行了数学仿真, 建立了一些模型^[1, 2], 但都是在很多理想的假设条件下建立起来的, 比如对称加热, 忽略某一方向上的变化等。而最为可靠和直接的测量方法就是采用著名的“黑匣子”温度测试实验, 通过将热电偶埋进钢坯内部随钢坯一起运动的方法, 可以对炉内加热过程进行实际温度测试, 但该实验耗资巨大, 而且只能测得有限几个点的温度随时间

设计和分析热/流体系统。只要给出正确的输入, SINDA既能求解有限差分公式也能求解有限元公式, 因此将之称为“等式求解器”。

4 结 语

随着电子计算机的发展与应用, 热分析的各种方法也逐渐地走向成熟, 并开发出更多的更成熟的热分析软件进行热分析。事实证明热网络法是一种适应性很强的热分析方法, 其在航天领域的重要作用是不可抹杀的, 对其精度不高的缺点, 科研工作者提出了热网络试验修正算法和热网络综合辐射系数修正法来减少热网络模型与实际情况之间的偏差。基于热网络法开发的软件 SINDA/FLUINT 已经应用于航天器、运载火箭、核能、电子封装、飞行器等多个领域。

参考文献:

- [1] 屈金祥. 航天器系统热分析综述[J]. 红外, 2004(10): 20-27.
- [2] 曲海潮, 张士诚, 檀朝东. 热阻热容算式在电缆、电热杆

油井温度场模拟研究中的应用[J]. 石油采钻工艺, 1998, (2): 55-59.

- [3] 李 键, 刘志全, 袁培益. 航空发动机轴承腔温度场计算与测试[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 58-60.
- [4] FRANCISCO ALHAMA, ANTONIO CAMPO, Network Simulation of the Rapid Temperature Changes in the Composite Nozzle Wall of an Experimental Rocket Engine During a Ground Firing Test[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, (23): 37-47.
- [5] 张永红, 苏 华, 刘志权, 等. 行星齿轮传动系统的稳态热分析[J]. 航空学报, 2000, 21(5): 431-433.
- [6] 吴昌林, 余联庆, 方晓初. 汽车变速箱的热网络分析[J], 华中理工大学学报, 1998, (4): 63-66.
- [7] 刘志全, 沈允文, 陈国定, 等. 某直升机齿轮传动系统的稳态热分析[J]. 中国机械工程, 1999, (6): 607-610.
- [8] 王文魁, 谢 鸣, 阮立明. 空调室外机散热对建筑物红外特征的影响[J]. 节能技术, 2005, (3): 244-246.
- [9] 张信荣, 任建勋, 梁新刚, 等. 载人航天器环控生保系统热网络质量的优化[J]. 清华大学学报, 2000, (4): 47-50.