

硅橡胶绝热材料烧蚀传热数据库 插值计算软件说明书



编 写：_____

校 对：_____

目录

一、软件介绍.....	1
二、操作指南.....	2
2.1 导入数据库.....	2
2.2 烧蚀结果计算.....	5
三、功能介绍.....	8
四、插值计算原理	8
4.1 插值计算方法.....	8
4.2 插值计算流程.....	12

一、软件介绍

固体火箭冲压发动机由进气道、燃气发生器、补燃室和喷管等部件组成，工作过程中冲压空气经进气道进入补燃室与燃气发生器产生的富燃燃气掺混反应释放能量，反应产物再通过喷管膨胀做功产生推力。补燃室作为燃料能量释放的主要场所，一方面处于设计空燃比下的富氧环境，另一方面承受着富燃燃气和空气反应产生的高温，如此恶劣的热环境为其热防护工作带来了严峻挑战，美国的大力神IV火箭在 1993 年发射升空后发生爆炸就是由发动机后封头被烧穿导致的，热防护问题也成了掣肘固冲发动机发展的重要问题之一。由于其自身工作特点的限制，固冲发动机主要采用被动热防护方法，绝热材料自身的理化性能及抗烧蚀性能是决定被动热防护效果的关键因素。硅橡胶绝热材料是以硅橡胶为基体，混合上短切纤维、硫化剂、二氧化硅以及其它耐高温填料压制而成的，它在继承了硅橡胶基体优良理化性能的同时具备更好的耐热与抗烧蚀性能，因此在固冲发动机热防护系统中备受青睐。

绝热材料的抗烧蚀性能是决定被动热防护效果的核心因素，是评价发动机热防护结构的重要指标，同样是发动机被动热防护结构设计的关键参数。对其烧蚀过程进行分析并建立烧蚀求解模型具有重要意义。

硅橡胶绝热材料烧蚀传热数据库插值计算软件针对固冲发动机中硅橡胶绝热层过载条件下的烧蚀预估结果建立，依据烧蚀模型计算获得典型工况内硅橡胶绝热层烧蚀量预估结果，通过插值方法求解范围内其他工况下的硅橡胶绝热层烧蚀率，相比烧蚀模型的求解其计算速度更快，效率更高，可在短时间求解多个工况。插值计算软件涵盖了飞行状态参数、热力载荷参数、烧蚀预估参数在内的十八个变量，考虑因素众多，插值方法多样，可以为固冲发动机环境大过载条件下硅橡胶绝热层的烧蚀预估及绝热层设计提供依据。

二、操作指南

2.1 导入数据库

软件初始界面如图 1 所示：



图 1 软件初始界面

软件初始界面左上角标注了软件名称：烧蚀数据库插值计算软件，右上角为最小化、最大化、退出按键。

下方任务栏包含“主页”、“数据库表格”和“帮助”，其中“主页”用于执行数据库导入、飞行状态与热力载荷参数输入和输出烧蚀计算结果等操作；“数据库表格”用于查看主页中导入的插值节点数据；可在“帮助”中查看软件操作指南。

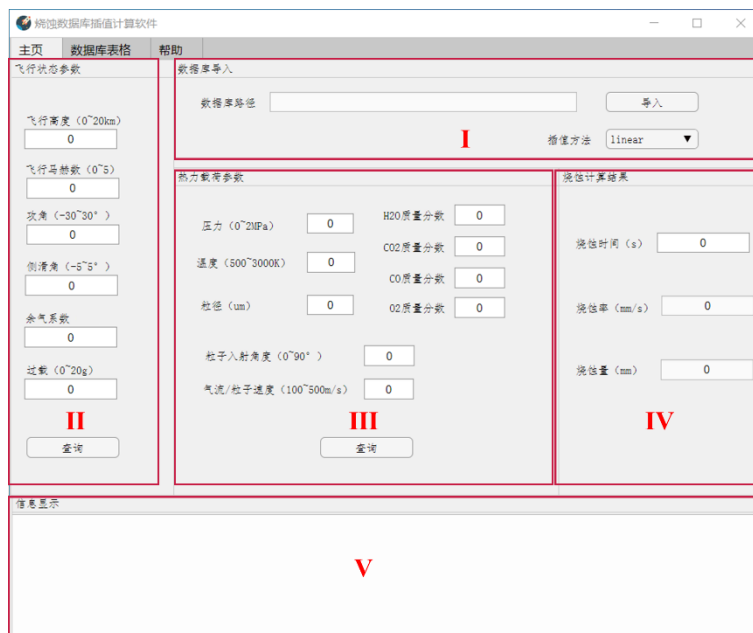


图 2 主页功能区域划分

主页中包含“数据库导入”、“飞行状态参数”、“热力载荷参数”、“烧蚀计算结果”和“信息显示”五个功能区域。“数据库导入”区域用于导入插值节点数据库并选择插值方法；“飞行状态参数”区域用于输入飞行高度、飞行马赫数等飞行状态参数；“热力载荷参数”区域可输入压力、温度等热力载荷参数；在“烧蚀计算结果”区域中输入烧蚀时间，查看烧蚀速率和烧蚀量的计算结果；“信息显示”区域记录了软件的操作过程。

点击 I 区“数据库导入”中的“导入”按键，找到过载烧蚀数据库所在路径，打开过载烧蚀数据库，将其导入到软件中。数据库导入界面如下图所示(注：导入数据库中的参数名称与参数顺序要与数据库模板一致)。

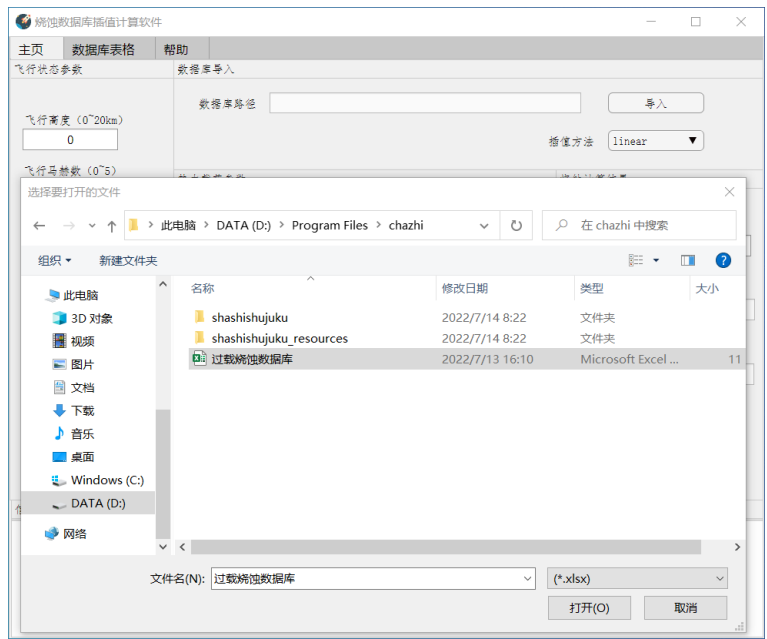


图 3 数据库导入界面

序号	高度km	马赫数	攻角°	侧滑角°	余气系数	过载g	压力MPa	温度K	气流/粒子速度m/s
1	1	1	1	1	0	1	0	500	10
2	2	2	2	2	0.5000	2	0.2000	600	15
3	3	3	3	3	1.0000	3	0.4000	700	20
4	4	4	4	4	1.5000	4	0.6000	800	25
5	5	5	5	5	2.0000	5	0.8000	900	30
6	6	6	6	6	2.5000	6	1.0000	1000	35
7	7	7	7	7	3.0000	7	1.2000	1100	40
8	8	8	8	8	3.5000	8	1.4000	1200	45
9	9	9	9	9	4.0000	9	1.6000	1300	50
10	10	10	10	10	4.5000	10	1.8000	1400	55
11	11	11	11	11	5.0000	11	2.0000	1500	60
12	12	12	12	12	5.5000	12	2.2000	1600	65
13	13	13	13	13	6.0000	13	2.4000	1700	70
14	14	14	14	14	6.5000	14	2.6000	1800	75
15	15	15	15	15	7.0000	15	2.8000	1900	80
16	16	16	16	16	7.5000	16	3.0000	2000	85
17	17	17	17	17	8.0000	17	3.2000	2100	90
18	18	18	18	18	8.5000	18	3.4000	2200	95
19	19	19	19	19	9.0000	19	3.6000	2300	100
20	20	20	20	20	9.5000	20	3.8000	2400	105

图 4 数据库表格页面

导入软件的插值节点数据可在“数据库表格”页面中查看，如上图所示。

2.2 烧蚀结果计算



图 5 插值方法选择

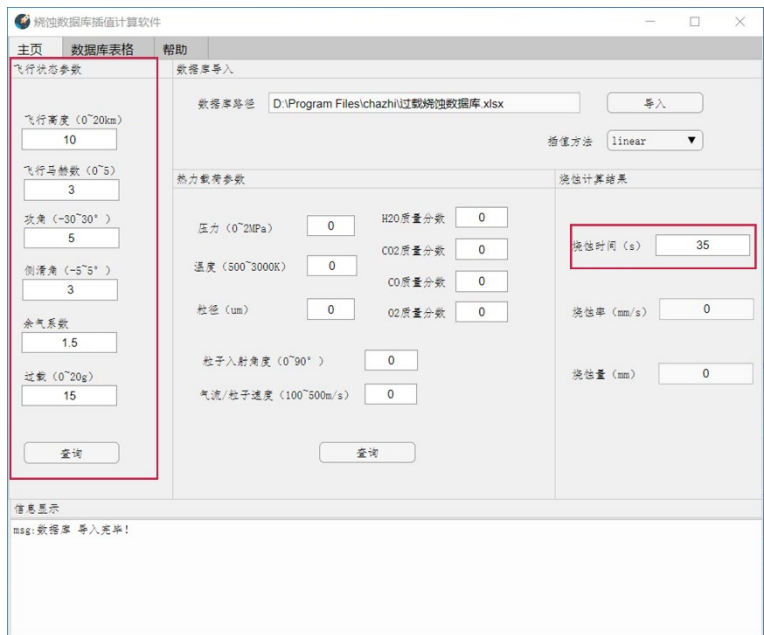


图 6 飞行状态参数输入

软件内置了线性插值(Linear)、最近邻插值(Nearest)和三次 Hermite 插值(Pchip)方法，通过插值方法处的下拉框选择，如图 5 所示。

之后在界面左侧“飞行状态参数”区域输入所需计算工况的飞行

状态参数，不同的参数有不同的取值范围，如下表所示：

表 1 飞行状态参数取值范围

飞行状态参数	取值范围
飞行高度(km)	0~20
飞行马赫数	0~5
攻角(°)	-30~30
侧滑角(°)	-5~5
余气系数	结合实际工况
过载(g)	0~20

在输入飞行状态参数的同时，可在“烧蚀计算结果”区域中输入所需计算的烧蚀时间，如图 6 所示。之后，点击“飞行状态参数”区域中的查询按钮，即可插值计算热力载荷参数，并在程序内部，由热力载荷插值结果，再一次插值计算，得到最终的烧蚀速率和烧蚀量的插值计算结果，演示工况的计算结果如下图所示：



图 7 插值计算结果显示

若所需计算工况的热力载荷参数已知，也可直接通过热力载荷参

数直接插值计算烧蚀速率与烧蚀量。热力载荷参数的输入同样需要在表 2 的范围之内。

表 2 热力载荷参数取值范围

热力载荷参数	取值范围
压力(MPa)	0~2
温度(K)	500~3000
粒径(μm)	结合实际工况
粒子入射角度(°)	0~90
气流/粒子速度(m/s)	100~500
H ₂ O 质量分数	结合实际工况
CO ₂ 质量分数	结合实际工况
CO 质量分数	结合实际工况
O ₂ 质量分数	结合实际工况



图 8 插值计算结果显示

在“热力载荷参数”区域输入热力载荷参数数值并在“烧蚀计算结果”区域输入烧蚀时间后，点击查询按键，即可插值计算出烧蚀速率和烧蚀量的结果，如图 8 所示。

三、功能介绍

本软件的主要功能为：基于烧蚀数据库，实现给定工况下硅橡胶复合材料烧蚀速率和烧蚀量的快速插值计算。可以由飞行高度、飞行马赫数等飞行状态参数插值计算热力载荷参数和烧蚀率，也可以直接通过压力、温度等热力载荷参数插值计算烧蚀率。

本软件可有效缩短硅橡胶复合材料烧蚀速率计算时间，并满足精度要求，操作方便快捷，简单可靠，计算结果可直接从界面上读出，提高了烧蚀计算效率。

四、插值计算原理

4.1 插值计算方法

函数插值的定义为：

已知函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上 $n + 1$ 个互异节点 $\{x_i\}_{i=0}^n$ 处的函数值 $\{y_i\}_{i=0}^n$ ，若函数集合 Φ 中函数 $\phi(x)$ 满足条件

$$\phi(x_i) = y_i \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n),$$

则称 $\phi(x)$ 为 $f(x)$ 在 Φ 中关于节点 $\{x_i\}_{i=0}^n$ 的一个插值函数，并称 $f(x)$ 为被插值函数， $[a, b]$ 为插值区间， $\{x_i\}_{i=0}^n$ 为插值节点。

1. 线性插值(Linear)

设在区间 $[a, b]$ 上有 $n+1$ 个点 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ ，它们将区间分成了 n 个小区间。若已知函数 $f(x)$ 在每个点上的函数值分别为 $y_i = f(x_i) (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ ，在每个小区间 $[x_{i-1}, x_i] (i = 1, 2, \dots, n)$ 上作

线性插值，最终得到一个分段线性函数 $g_1(x)$ 。在每个小区间上， $g_1(x)$ 是线性函数，在整个区间 $[a,b]$ 上， $g_1(x)$ 连续且经过所有点 $\{(x_i, y_i)\}_{i=0}^n$ 。

$g_1(x)$ 在区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的具体表达式为

$$g_1(x) = \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} y_{i-1} + \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} y_i$$

依据构造 Lagrange 插值的思路，也可通过构造基函数的方法来构造 $g_1(x)$ ，若点 x_i 处的基函数 $\varphi_i(x)$ 满足以下条件：

(1) 在每个小区间上都是线性函数；

$$(2) \quad \varphi_i(x_k) = \begin{cases} 0, & k \neq i, \\ 1, & k = i \end{cases} \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

则 $g_1(x)$ 可以表示成上述基函数与函数值的线性组合，即：

$$g_1(x) = \sum_{j=0}^n y_j \varphi_j(x).$$

2. 最近邻插值(Nearest)

最邻近插值(nearest)是计算最简单的插值方法。在该算法中，每一个输出值都是该点最近的原始数据样本值，这种插值方法又称点位移算法。最邻近内插通过像素的复制可以实现影像的放大，通过抽取可实现影像缩小。但最邻近内插容易产生影像的块状效应。此外，该方法的偏移误差最大可达到 0.5 个像素。

假设源图像 A 的尺寸为 $m \times n$ ，经过最邻近插值计算处理后的图像 B 的尺寸为 $a \times b$ ，由此可以得到缩放倍数：

$$K = \frac{a}{m} = \frac{b}{n}$$

现取图像 B 中的一点 (x_0, y_0) ，可以知道对应应在图像 A 中的理论

计算位置为：

$$\left(\frac{x_0 \times m}{a}, \frac{y_0 \times n}{b} \right)$$

而上式得出来的在 A 中的理论位置数值显然可能为小数，这代表该点在 A 中无实际对应点，此时对其四舍五入，即是把 A 图像中距离该理论点最近的一个的点当作它，即为最近邻插值。

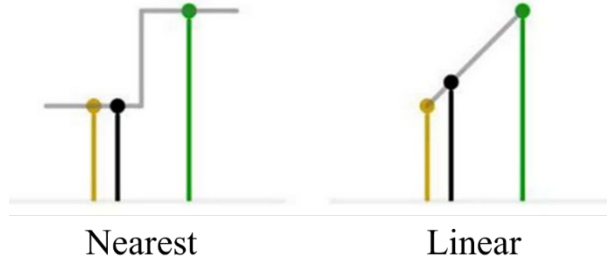


图 9 最近邻插值与线性插值对比

3. 三次 Hermite 插值(Pchip)

三次 Hermite 插值多项式为：

$$H_3(x) = \left[\left(1 + 2 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) y_0 + (x - x_0) y_0' \right] \left(\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right)^2 + \left[\left(1 + 2 \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right) y_1 + (x - x_1) y_1' \right] \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^2$$

其中： x_0, x_1 为待插值点的相邻的两个点的位置； y_0, y_1 为对应于自变量 x_0, x_1 的两个因变量； y_0', y_1' 是对应的导数。 x_0, x_1, y_0, y_1 是已知信息， y_0', y_1' 需要根据已知信息进行估算。

MATLAB 中的 pchip.m.文件中的 pchipslopes 函数提供了一种估算对应点导数的方法，其分别对内点、外点采用不同的方式估计。

根据 MATLAB 中 pchip.m.文件中的描述，对于内点(指除了边界点 x_0, x_n 之外的其他点)处的导数估算有如下规则：

- 1) 如果第 k 个节点附近的差商 δ_{k-1} 和 δ_k 符号相反,或者其中一个为0,则该点的一阶导数 $d_k = 0$ 。
- 2) 如果第 k 个节点附近的差商 δ_{k-1} 和 δ_k 符号相同,则该点的一阶导数 d_k 等于左右两个差商的加权平均。

$$\text{设 } h_k = x_{k+1} - x_k, \quad h_{k+1} = x_{k+2} - x_{k+1}$$

则差商为:

$$\delta_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k}, \quad \delta_{k+1} = \frac{y_{k+2} - y_{k+1}}{h_{k+1}}$$

$$\text{令 } h s_k = h_k + h_{k+1}, \quad w1_k = \frac{h_k + h s_k}{3 \cdot h s_k}, \quad w2_k = \frac{h_{k+1} + h s_k}{3 \cdot h s_k}, \quad \delta \max_k =$$

$\max(\delta_k, \delta_{k+1}), \quad \delta \min_k = \min(\delta_k, \delta_{k+1}),$ 则:

$$\begin{aligned} d_{k+1} &= \frac{\delta \min_k}{w1_k \frac{\delta_k}{\delta \max_k} + w2_k \frac{\delta_{k+1}}{\delta \max_k}} \\ &= \frac{3\delta_k \delta_{k+1} (h_k + h_{k+1})}{(h_k + 2h_{k+1})\delta_{k+1} + (2h_k + h_{k+1})\delta_k} \\ k &= 1, 2, 3, \dots, n-2 \end{aligned}$$

对于边界点 x_0, x_n 的导数, 有:

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{(2h_0 + h_1)\delta_0 - h_0\delta_1}{h_0 + h_1} \\ d_n &= \frac{(2h_{n-1} + h_{n-2})\delta_{n-1} - h_{n-1}\delta_{n-2}}{h_{n-2} + h_{n-1}} \end{aligned}$$

4.2 插值计算流程

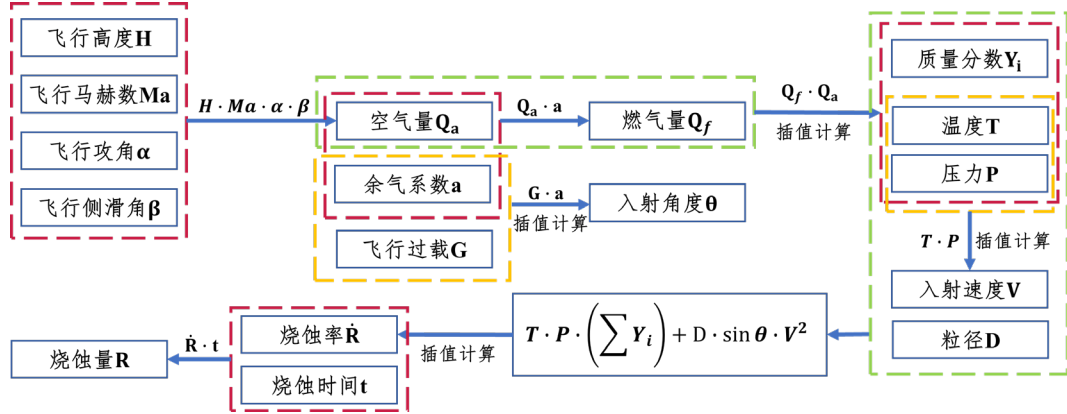


图 10 插值计算流程图

整个插值计算流程如图 10 所示，首先由飞行高度 H 、飞行马赫数 Ma 、飞行攻角 α 和飞行侧滑角 β 的数值相乘，得到表征空气量的参数 Q_a ；利用余气系数 a 与飞行过载 G 相乘的结果作为自变量，插值计算入射角度 θ ；将 Q_a 和余气系数 a 相乘，得到表征燃气量的参数 Q_f ；利用 Q_a 与 Q_f 相乘的结果作为自变量，插值计算温度 T 、压力 P 和组分的质量分数；将温度 T 和压力 P 的乘积作为自变量，插值计算燃气与粒子的入射速度 V ，粒子的直径 D 直接输入得到；将 Y_i 、 T 、 P 、 V 和 D 按图 10 所示公式运算，将其结果作为插值自变量，插值计算烧蚀速率，将烧蚀速率乘以时间，得到最终的烧蚀量结果。