

16.901: 最优化项目

燃烧室衬垫的气膜冷却设计

期限：5月10日下午2点

1 背景知识

在燃烧室初始段内的温度是显著地高于大部分未经特殊耐热处理的材料可承受的温度的。于是，燃烧室设计的一个关键点就是找出一种冷却燃烧室衬垫壁的方法，使衬垫温度充分低于其材料的耐受极限。一种典型的使燃烧室衬垫冷却的方法是借助气膜冷却。气膜冷却是将气体事先从主流通道导入燃烧室，然后沿着衬垫表面重新放出，形成一层较冷的气体膜来保护衬垫。

在这个项目里，你要考虑衬垫气膜冷却的优化设计问题。衬垫冷却的数值模拟是基于用在 16.901 的项目二中开发的有限差分法。与此相关的模型见图 1。在本项目中，冷却气体速度 U_{cool} 和冷却膜的厚度 h 是两个设计变量，为保证设计的真实性，我们要求设计变量是有界的：

$$50\text{ m/s} \leq U_{cool} \leq 250\text{ m/s}$$

$$0.001\text{ m} \leq h \leq 0.005\text{ m}$$

所有参数值（或取值范围）在表 1 中给出：

参数	定义	值
k_g	气体传导率	0.1W/(m K)
k_w	壁传导率	26.0W/(m K)
h	冷却通道高度	0.001-0.005 m
L	冷却通道之间的轴向长度	0.3 m
U_{hot}	热流速度	100 m/sec
U_{cool}	冷流速度	50-250 m/sec
T_{hot}	热流温度	2200 K
T_{cool}	冷流温度	800 K
t_w	衬垫壁厚度	0.0015 m

表 1: 参数定义和取值

2. 任务

2.1 衬垫温度的最小化（20%）

16.901 网页上提供了本项目所用的Matlab原程序。特别, **condif.m** 是主程序(函数), 取设计矢量为其哑元, 函数的返回值是最高温度 T_{\max} . 注意, T_{\max} 假设在燃气室计算范围内出口的上表面出现。此函数可在允许的设计参数范围内用于最小化 T_{\max} 。为此, 须完成下列步骤:

1. 将设计参数化成无量纲量, 使它们都在-1 和+1 之间, 如:

$$x_1 = -1 + 2 \frac{U_{cool} - \min U_{cool}}{\max U_{cool} - \min U_{cool}} \quad x_2 = -1 + 2 \frac{h - \min h}{\max h - \min h}$$

其中 $\min U_{cool}$ 是设计参数 U_{cool} 的最小值, 其它设计参数也一样。这将有助于限定优化问题的条件, 否则设计参数的数值会有几个数量级的差异。将此变换用于 **condif.m**, 把无量纲参数代入到函数中。

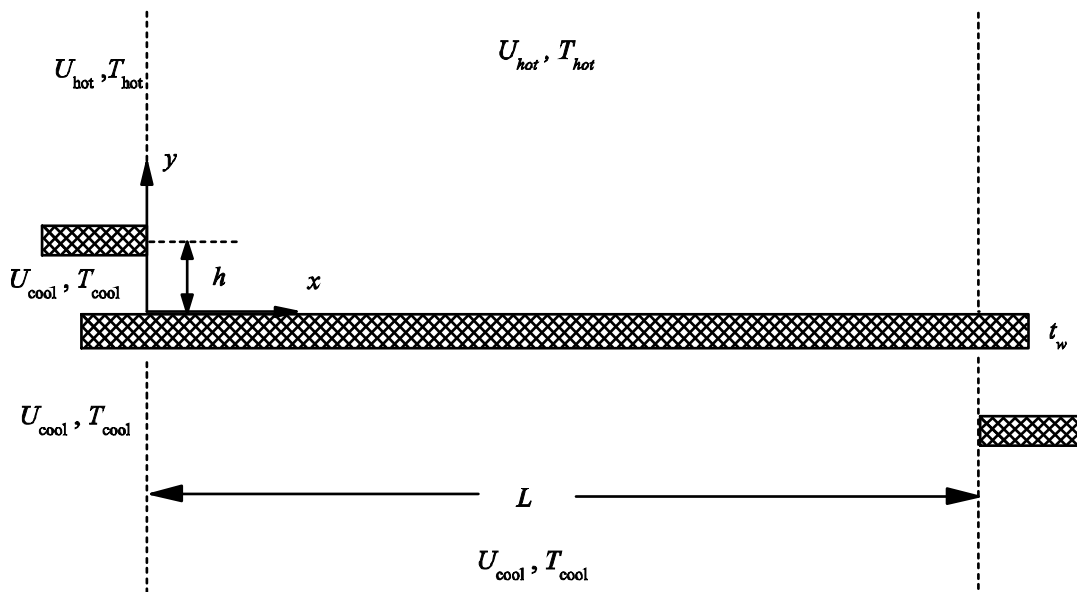


图 1: 带冷却膜的燃烧室衬垫

2. 然后, 用 Matlab 的函数优化子程序 **fmincon** 在设计空间内最小化 T_{\max} 。这项任务只须用 Matlab 通过有限差分法计算出所需的导数值。当工作正常时, 最优过程应该得出 T_{\max} 的值 $T_{\max}=1180.4K$. 用函数 **optimset** 来设置

“Display” 参数到 “iter” 并包括整个优化过程结果的历史纪录。同时还包括那些给出最小 Tmax 的设计参数的值。注意：你或许想在使用 fmincon 函数的缺省值之前设定“ToX’, ‘TolCon’ 和’TolFun’的值来结束最优化过程。这尽管不是必需的,但的确可以节省些时间。

2.2 冷却质量流的最小化（20%）

在这一部分，我们在某给定最高温度极限下将冷却膜内的质量流最小化。特别求解下列问题：

$$\min \dot{m} = U_{cool} h \quad \text{使得} \quad T_{max} = T_{lim}$$

使用与所给定的 U_{cool} 和 h 同样的设计空间区域，为此，设 $T_{lim}=1300 K$ ，再次用**fmincon**，只不过用**fmincon**最小化 \dot{m} 时，用非线性约束功能设置 T_{max} 。用下面无量纲的形式来设置温度：

$$\frac{T_{max}}{T_{lim}} - 1 = 0$$

和前面的情形一样，用有限差分求导数。包括过程的详尽描写：(a)最优化过程的输出，(b) $T_{lim}=1300 K$ 时 \dot{m} 的最小值。(c) 优化解的设计参数。

2.3 用解析方法得出的导数使冷却物质流最小化（40%）

下一步，计算目标函数的导数（即 \dot{m} ）和关于设计变量的限制方程的导数。 \dot{m} 的导数容易计算，但限制方程的导数比较困难。两者都需要修正你以前的程序来计算并将所有导数代回优化过程。（警告：别忘记用 `optimset` 来开启梯度）把下面的内容写入你的纪录：

1. 如何计算限制方程的导数的完整讨论。
2. 你修改或增加的 Matlab 源程序内容的硬拷贝。注意：这是你需要加进你自己的设计的唯一的一个程序。
3. 对限制 $T_{lim}=1300 K$ ，包括(a)优化过程历史纪录的输出，(b) \dot{m} 的最小化，和(c)最优化的设计参数。

4. 给出从 2.2 节导出的有限微分导数结果和本节的分析方法得出的导数结果之间的有关计算成本（例如运行时间）的简要讨论.

2.4 冷却物质流最小化的参数研究(20%)

用前节给出的解析导数所得的限制性最优化对 T_{lim} 施行一个从 1200K 变至 1400K 的跟踪研究. 按需要实施任意次最优化过程以证实气膜冷却不被摧毁的趋势和特点. 特别给出以下过程:

1. 画出 $\min m$ 关于 T_{lim} 的变化图.
2. 在 2 维设计空间画出设计的位置. 讨论结果, 包括对不同的 T_{lim} 哪个限制是起作用的, 尽可能地解释所观测的特点.