

燃烧室出口热点温度系数的确定

西北工业大学 林秀荣* 丁毅生

【摘要】 提出确定燃烧室出口热点温度系数的优推公式,用于推算燃烧室出口热点温度真值,其置信度不低于 99.73%。

主题词: 燃烧室 温度系数 概率方法 优化

分类号: V231.1

1 引言

燃烧室出口的热点是指燃烧室出口截面上的局部最高温度点,该点的温度即热点温度 $T_{3\max}^*$ 。它是涡轮前温度 T_3^* 取值时应留有多大裕度的参照极限,是保证航空燃气涡轮发动机性能和可靠性的重要参数。因此,正确确定 $T_{3\max}^*$ 值是燃烧室设计与调试中的关键问题之一。

文献[1-2]采用优化技术和概率数理统计原理的方法,建立了在某一状态下燃烧室出口温度的最佳威布尔分布方程,并进而导出该状态下热点温度的推算公式: $T_{3\max}^* = K T_3^*$, 式中 K 为热点温度系数。可见,只有正确确定 K 值,才能正确确定 $T_{3\max}^*$ 值。

注意到威布尔分布和正态分布有着密切关系这一重要特性,对 K 的推算公式进行了修正,使所推算的热点温度真值,得到数理统计学上的理论证实,其置信度不低于 99.73%。

2 热点温度系数的推算公式

从文献[1]知,所得威布尔分布方程:

$$W = 1 - \exp \left\{ - \left(T/X \right)^N \right\} \quad (1)$$

当 $W \rightarrow 100\%$ 时,方程(1)无解,或 $T \rightarrow \infty$,这是无实际意义的,应予以排除。问题是 W 应取何值,方程(1)中的 T 才是真实的 $T_{3\max}^*$ 值。

注意到^[3]:当 $N \geq 3$ 时,威布尔分布和正态分布非常接近,如图 1 所示(图中 $f(x) = N x^{N-1} e^{-x^N}$, N 为形状参数)。而航空燃气涡轮发动机燃烧室出口温度分布的均匀程度,足以使式(1)中的 N 值大于 10,故利用正态分布的特性来处理上述问题是完全合理的。

正态分布的概率密度曲线,其位置和形状完全由随机变量的均值 μ 和方差 σ^2 单值地确定,只

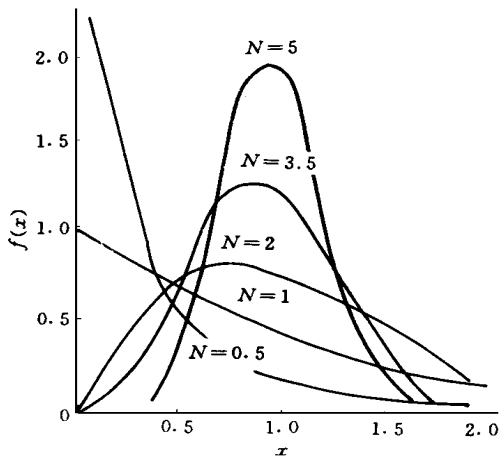


图 1 形状参数对分布密度、分布函数的形状的影响

要给出 μ 和 σ^2 , 正态分布的特性就完全表现出来。由于其应用广泛, 一般正态分布(非标准正态分布)也有了规一化的正态分布数据表 ($Q(Z)$ 函数表) 可查, 计算十分方便。

根据正态分布的 3σ 规则和热点温度的物理意义, 燃烧室出口局部最高温度点取值的最可能极限应为 $\mu + 3\sigma + (\alpha/2)$, 其累积分布的概率则为 $0.99856 (0.9973 + 1.35 \times 10^{-3})$ 。由于这里威布尔分布的形状参数 $N \geq 3$, 故凡符合威布尔分布的数据群, 同样地能符合正态分布, 因此, 有理由令: $W \approx 0.99865$ 。现取 $W = 99.87\%$, 代入式(1)中, 此时 $T = T_{3\max}^*$

即

$$99.87\% = 1 - \exp \left[- (T_{3\max}^*/X)^N \right]$$

故

$$T_{3\max}^* = (6.645)^{1/N} \cdot X, \quad X = T_3^*/\Gamma(1 + 1/N)$$
$$T_{3\max}^* = [(6.645)^{1/N}/\Gamma(1 + 1/N)] T_3^* = K T_3^*$$
$$K = (6.645)^{1/N}/\Gamma(1 + 1/N) \tag{2}$$

式中 N 的 Γ 函数 $\Gamma(N) = \int T^{N-1} \exp(-T) dT$, 其值可从 Γ 函数表中查得。

3 算 例

这里采用测温点数为 300 的某航空燃气涡轮发动机燃烧室出口温度场测量数据。将 300 个测点的温度测量值分成 50 组, 各组温度区间的中间值记作该组的代表温度, 顺序统计所有 300 个测量值中低于每一代表温度的累计出现次数, 其百分率以 P 记之。这里仅选择其中 18 组的散布情况和 W 、 P 之比较, 列于表 1 中。

表 1 算例燃烧室出口代表温度的散布

$T(^{\circ}\text{C})$	855	915	965	1005	1045	1075	1095	1115	1135
出现点数	1	1	3	2	4	3	8	5	13
$P(\%)$	0.33	1.33	4.00	7.67	13.33	20.00	24.33	27.67	36.00
$W(\%)$	1.81	3.89	7.04	10.97	16.60	22.20	26.65	31.70	37.33
$T(^{\circ}\text{C})$	1155	1205	1215	1245	1265	1305	1335	1375	1405
出现点数	10	11	11	10	5	5	4	1	1
$P(\%)$	44.33	63.33	67.00	78.33	82.00	91.00	94.00	98.67	100.00
$W(\%)$	43.49	60.43	63.91	74.00	80.15	90.06	94.99	98.50	99.54

全部 300 点测值中的最高值为 1409°C , 算术平均值为 1137.5°C , 以威布尔分布的数学期望作为 T_3^* 时, $T_3^* = 1160^{\circ}\text{C}$ 。

依照文献[1] 的优化策略, 增加了可调参数 X 、 N 的取值范围约束, 优化精度 $\epsilon = 0.000614$, 优化结果为:

则

$$N^* = 11.445, \quad X^* = 1213$$
$$K = 1.233, \quad T_{3\max}^* = 1431^{\circ}\text{C}$$

故热点温度 $T_{3\max}^* = 1431^{\circ}\text{C}$, 它比实测最高值高 22°C 。

4 结 论

(1) 本文的新贡献在于正确确立了热点温度系数 K 的计算公式(式(2)), 用它推算热点温

度真值,其置信度不低于 99.73%;而局部温度取值最高极限 $\mu + 3\sigma + (\alpha/2)$ 时所对应的概率为 99.865%。

(2) 所采用的最佳威布尔分布方程(式(1)),其形状参数 N 值,可用来判断燃烧室出口温度场的均匀程度; N 值愈大,温度场愈均匀。

(3) 所得计算 K 值的算式(式(2))与文献[1]所得的算式($K = (11.513)^{1/N} / \Gamma(1 + 1/N)$)有区别,如图2;其意义不仅是数值上的,而且是理论上的,并是得到实例证实的。

(4) 值得指出,现代航空燃气涡轮发动机燃烧室的研制水平,已足以使使用中的燃烧室的 N 值一般均大于 10,但仍小于 20 ($10 < N < 20$)。因此,本文推出的方法是在研制和生产中参考应用的。

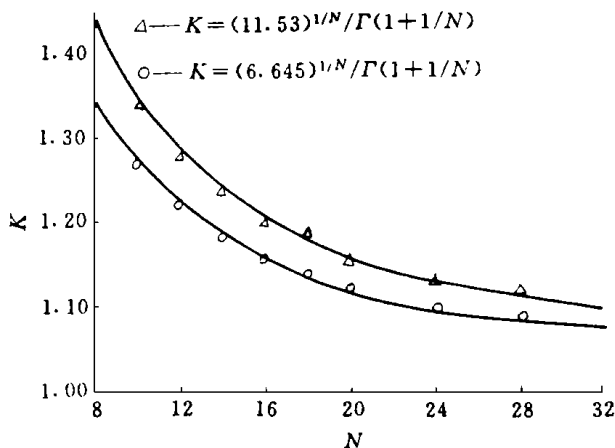


图2 两种 K 值算式的比较

参 考 文 献

- 1 丁毅生, 林秀荣. 统计推算燃烧室出口热点温度的优化方法. 航空动力学报, 1993, 8(3): 259—262
- 2 丁毅生. 优化方法在统计预估燃烧室出口热点温度中的应用. 烟台: 中国航空学会第八届燃烧与传热传质学术讨论会, CSAA: PC-92-066, 1992: 10
- 3 许海宝. 可靠性的数学基础. 北京: 中国航空学会科普与教育工作委员会, 1984: 101—104

(责任编辑 杨再荣)