

统计推算燃烧室 出口热点温度的优化方法

西北工业大学 丁毅生** 林秀荣

【摘要】 根据统计学原理, 采用优化方法, 对燃烧室在某一状态下出口截面温度的多点测量值进行数据处理, 确定其最佳的威布尔分布方程, 并进而导出该状态下出口热点温度的推算公式。结果表明, 燃烧室出口截面上最大概率的最高温度值总是高于多点测量中测到的最高值。因此, 通常把后者视同真实最高值(热点温度)是不恰当的。认识这一事实具有理论上和实践上的重要意义。

关键词: 燃烧室 出口温度 统计 优化

1 前言

随着燃烧室出口平均温度 T_3^* 的提高, 航空发动机的工作可靠性与寿命受到影响, 特别是与 T_3^* 值相关的燃烧室出口热点温度 T_{3max}^* 值也随之提高, 威胁就更大。实际上, 热点温度 T_{3max}^* 的大小和位置在一定范围内具有随机性, 因此在出口截面数目有限的点上进行测量, 总是存在着遗漏真正峰值的概率; 此外, 燃烧过程的复杂性, 以及喷嘴、火焰筒等结构参数的影响等, 又给理论计算带来许多困难。因此, 人们难以获得 T_{3max}^* 的真实值, 以致影响对燃烧室出口温度分布质量的控制, 而这一控制却正是燃烧室设计和调试工作中的关键问题之一。

为了兼顾航空发动机的性能和可靠性, 在一些大型涡轮发动机设计中, 常给燃烧室出口平均温度留有较大的裕度。这种留有较大裕度的设计思想, 对于确保发动机的可靠性和应变能力方面, 是具有特殊重要意义的^[1]。人们在寻求有实际价值的半经验半理论方法研究燃烧室出口温度分布问题的同时, 注意到燃烧室出口温度测量值具有按统计规律分布的特征, 并从工程需要出发, 可认为出口温度分布近似服从于某一种理论分布, 如已有应用的正态分布、对数正态分布、威布尔(Weibull)分布, 以及局部应用罗辛—拉姆勒(Rosin-Rammler)分布等^[2~4]。用这些分布函数导出的推算公式已在一定程度上被工程实际数据证实是可用的^[5]。但是, 严格说, 无论哪种理论分布都不能完全反映实际的燃烧室出口温度分布。

本文根据统计学原理, 利用文献[4]引用的燃烧室出口温度的多点测量值, 采用优化方法, 确定威布尔方程中的待定可调参数, 使实验分布与理论分布达到最佳近似状态, 进而导出确定热点温度 T_{3max}^* 的推算公式。

2 求热点温度 T_{3max}^* 的方法原理

设已知燃烧室出口截面温度的多点测量值, 认为其中出现测量值低于某一温度 T 的累积

测点数的百分率(概率)可用威布尔分布函数形式表示为

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

式中, W 为测量值低于某一温度 T 的测点数占总测点数的百分率; X 、 N 为可调参数; 此处 X 为特征温度; N 为形状参数, 其值对分布函数的形状有决定性影响, 数值愈大表示温度分布愈均匀, 是一非常重要的参数。

通常, N 和 X 可用下列两式进行估计^[6]

$$\sigma/E = \left[\Gamma(1 + 2/N) - \Gamma^2(1 + 1/N) \right]^{1/2} / \Gamma(1 + 1/N) \quad (2)$$

$$X = E / \Gamma(1 + 1/N) \quad (3)$$

式中, E 为式(1)分布的数学期望, 此处代表燃烧室出口平均温度 T_3^* ; σ 为式(1)分布的均方根误差

$$\sigma = X \left[\Gamma(1 + 2/N) - \Gamma^2(1 + 1/N) \right]^{1/2} \quad (4)$$

又 N 的 Γ 函数 $\Gamma(N) = \int_0^\infty T^{N-1} \exp(-T) dT$, 其值可从 Γ 函数表中查到。

由式(2)知 N 仅与 σ/E 有关, 根据 σ/E 值可从威布尔分布用表中查出对应的 N 值, 再由 N 查 $\Gamma(N)$; 类似地, 由式(3)可求 X 值。

本文采用优化方法确定可调参数 N 、 X 的最佳值, 来代替上述的估计法(这是一项重要的改进), 这样, 相应的燃烧室出口温度分布可用式(1)的威布尔方程描述。显然, 当 $W \rightarrow 100\%$ 时的温度代表着最高温度, 即热点温度 T_{3max}^* 。

但必须指出, 用式(1)表示温度分布, 存在着出现无限大热点温度的可能性, 即当 $W = 100\%$ 时, $T \rightarrow \infty$, 这是无实际意义的。现取 $W = 99.999\%$ 代替 100% 代入式(1), 得到

$$T_{3max}^* = (11.513)^{1/N} X \quad (5)$$

引用式(3), 从而得到

$$T_{3max}^* = T_3^* \left[(11.513)^{1/N} / \Gamma(1 + 1/N) \right] = K T_3^* \quad (6)$$

式中

$$K = (11.513)^{1/N} / \Gamma(1 + 1/N) \quad (7)$$

命名 K 为热点温度系数。注意到 K 只是 N 的函数, 它们的变化关系如图1所示, 随着 N 值的增大, K 随 N 的变化也趋于平缓。

3 优化策略

根据规定的威布尔分布方程(1), 其中有 N 和 X 两个待定系数, 为使模型值与试验值的偏差平方和足够小, 必须对 N 和 X 进行优选。

假定有 n 个测量点: (T_1, P_1) 、 (T_2, P_2) 、 $\cdots$ 、 (T_n, P_n) , 其中 T_i 为温度测量值, 对应的 P_i 为测量值低于 T_i 的测量点点数占测量点总数的百分率。这组测值的威布尔分布方程可表示为

$$W_i(N, X) = 1 - \exp \left\{ - (T_i/X)^N \right\} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

则优化数学模型(数学规划表达式)为:

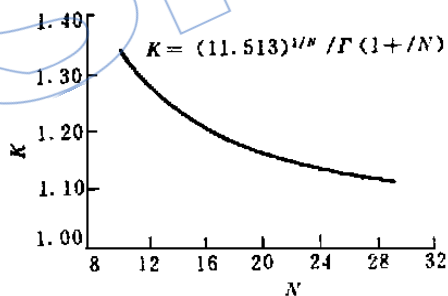


图1 K 随威布尔分布方程 N 的变化关系

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n [\Psi_i(N, X) - P_i]^2 & i = 1, 2, \cdots, n \\ S. T. \quad N > 0 \quad ; \quad X > 0 \end{cases} \quad (8)$$

本文采用一种极简单有效的优化策略^[7]。先对 N 和 X 分别给出各自的初始值以及各自的计算步长 h_1 和 h_2 。按 $N = N + h_1$ 进行目标函数值的计算,直至连续 3 点 $(N_1, y_1), (N_2, y_2), (N_3, y_3)$ 的目标函数值呈现(大—小—大)的变化规律时,即利用此 3 点拟合一条抛物线,其最小值点就献出一个好的 N ; 同样,对 X 按 $X = X + h_2$ 计算到出现连续 3 点 $(X_1, y_1), (X_2, y_2), (X_3, y_3)$ 的目标函数值呈现(大—小—大)的变化规律时,过此 3 点拟合的抛物线的最小值点就献出一个好的 X 。只有能满足精度 ϵ 要求的 N 、 X 才是最优的 N 、 X , 记为 N^* 、 X^* 。

将所得出的最优值 N^* 和 X^* 用于式 (6) 和 (7), 即可获得最大概率的最高温度(热点温度) T_{3max}^* 。

4 算 例

本算例采用文献[4]引用的燃烧室 A 出口温度的 240 个测量数据, 并承用文献[4]的处理方法, 将 240 个测点的温度测量值以 15℃ 间隔分成 20 个组。现以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 240 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。具体散布情况见表 1。

表 1 算例燃烧室出口代表温度的散布

$T(^{\circ}\text{C})$	928	943	958	973	988	1003	1018	1033	1048	1063
出现点数	3	4	16	12	15	22	20	19	23	18
$P(\%)$	1.250	2.917	9.584	14.584	20.834	30.001	38.334	46.251	55.834	63.334

$T(^{\circ}\text{C})$	1078	1093	1108	1123	1138	1153	1168	1183	1198	1213
出现点数	13	18	5	15	7	9	8	7	5	1
$P(\%)$	68.751	76.251	78.338	84.584	87.501	91.251	94.584	97.501	99.584	100.000

以上 240 点测值中的最高值为 1219℃, 算术平均值为 $T_3^* = 1055^{\circ}\text{C}$ 。

根据本文采用的优化策略, 设定分布方程的优化精度 $\epsilon = 0.05$, 所得优化结果为:

$$N^* = 17.61 \quad , \quad X^* = 1070$$

$$\sum_{i=1}^n [\Psi_i(N, X) - P_i]^2 = 0.0406 < \epsilon$$
$$= 0.05$$

所得的拟合威布尔分布曲线见图 2, 图中也绘出了实测数据的分布曲线。

利用所得 N^* 和 X^* 的数值, 通过式 (6) 和式 (7), 即可得出最可能出现的热

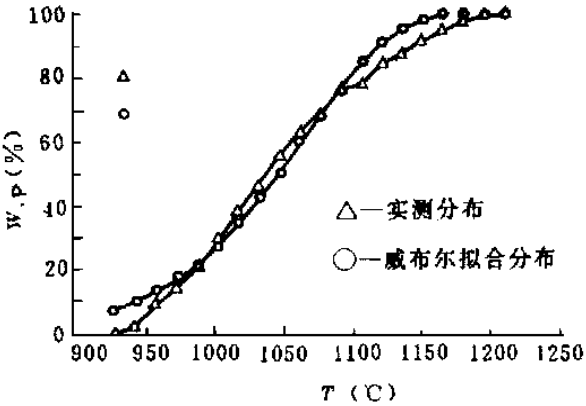


图 2 出口温度的威布尔分布拟合曲线

点温度

$$T_{3max}^* = K T_3^* = 1.1840 \times 1055 = 1249^\circ\text{C}$$

它比实测最高值高 30°C 。

5 讨论和结论

(1) 本文采用优化方法寻求最佳的分布函数, 使与实测分布达到最佳近似状态(近似程度取决于设定的精度要求), 进而导出确定热点温度的推算公式。这种基于统计理论和优化方法的处理原则是可靠的, 所得推算公式的精度和可信度较先前的结果也是更高的。

(2) 可以求出燃烧室出口截面上并未测到的、但却是实际上最可能存在的最高温度值(即最大概率的最高温度值), 它通常总是高于多点测量中实际测到的最高值。因此, 把后者当作真实最高值(热点温度)的通常做法只是一种工程上的近似, 它并不总是恰当的。

(3) 本文的创新贡献在于根据统计学原理, 采用优化方法, 对燃烧室出口截面温度的多点测量结果进行威布尔分布函数的优化拟合, 得到两个可调参数 N 和 X 的数值, 并据以导出最大概率的最高温度值 $T_{3max}^* = K T_3^*$ (式(6)), 这里 K 值由式(7)求出。

(4) 由图 1 可见, 随着 N 值增大, K 值的变化趋于平缓, 因此可以推断, 对于某一燃烧室在一定工作状态下得出的 K 值, 至少可允许有条件地通用于它的其他工作状态, 以推算出这些不同状态下最大概率的 T_{3max}^* :

$$T_{3max}^{*'} = K T_3^{*'}$$

显然, 此处的 $T_3^{*'}$ 与先前得出 K 值的 T_3^* 是不相同的。

必须指出, 推广进行这种推算的前提是: 燃烧室是同一个, 进口状态参数相近, N 值较大。显然, N 值愈大, K 值变化愈趋平缓, 这一推广的可靠性愈大。值得指出的是, 实际航空燃烧室的 N 值均较大(本例为 $N = 17.61$)。

(5) 本文的研究所得结论具有相当广泛的普遍意义, 它能适用于其参数亦属随机分布并能用威布尔分布方程描述的其他场合。

参 考 文 献

- 1 宋兆泓, 洪其麟主编. 发动机可靠性工程研究. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1988: 88
- 2 Cox Jr G B, Tiller A R, Le Tourneau J J, et al. Pattern Factor Improvement in the F-100 Primary Combustion System. ASME Paper 81-GT-25
- 3 Dryburgh D C. A Statistical Method for the Analysis of Rig Traverse Measurements on Annular Combustion Chambers. In Jamison R R (ed), Proceeding of Second International Symposium on Air Breathing Engines, Sheffield, 1974
- 4 彭拾义. 燃烧室出口热点的研究. 株洲, 南华动力, 1990, 1: 61- 67
- 5 金如山. 航空燃气轮机燃烧室. 北京: 宇航出版社, 1988: 411- 416
- 6 刘智敏. 误差与数据处理. 北京: 原子能出版社, 1981: 142- 154
- 7 郭丙然. 最优化技术在电厂热力工程中的应用. 北京: 水力电力出版社, 1986: 245- 250

(责任编辑 杨再荣)

AN OPTIMIZATION METHOD FOR STATISTICAL ASCERTAINMENT OF THE MOST PROBABLE PEAK TEMPERATURE AT COMBUSTOR EXIT

Ding Yisheng and Lin Xiurong

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

With a limited number of exit temperature measurements of a gas turbine combustion chamber, it is most unlikely to take a measurement just at the correct position of the real hot-spot. On the other hand, numerical prediction of the hot-spot temperature so far is impracticable. In this paper, on the basis of principles of statistical analysis, a very simple and effective two-dimensional optimization method is employed to process the multi-measured temperature data taken at an annular combustion chamber exit under a specified operating condition. As expected, an optimum fitting Weibull equation is obtained, which can meet the preset accuracy requirement of evaluation by applying least square method, and then a calculation formula is derived, which can be used to ascertain the most probable exit peak temperature value with confidence. A numerical example shows that the most probable exit peak temperature (namely the real hot-spot temperature) is higher to a certain extent than the maximum value measured. Some other potential applications of this method are also mentioned very briefly.

A NUMERICAL STUDY OF PARTICLE DISPERSION IN MIXING LAYER WITH RANDOM VORTEX METHOD

Xu Chenggang, Yan Chuanjun, Wan Hongji

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

Quasi-two-dimensional large scale vortex structure has a dominant effect on development of plane mixing layer. Crowe used Stuart's Vortices to simulate particle dispersion in free shear flows. The results of his simulation show that the experimental observations indicating particle dispersion rates greater than the fluid dispersion rates in free shear layer could be attributed to the effect of large scale vortex structure on particle dispersion. It is the incapability of Stuart's vortices of simulating development and merging process of these large scale vortex structure, that compromises the generality of his results. In this paper, we studied the particle dispersion in the mixing layer by using the random vortex method to simulate the creation, development and merging processes and the same results as Crowe's are obtained but in a more general sense.

MEASUREMENT AND PREDICTION OF INTERNAL 2-D TURBULENT BOUNDARY LAYER SEPARATION

Yin Junfei

(Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT

An incompressible turbulent boundary layer separation in a two-dimensional diffuser was surveyed using laser doppler velocimeter, and its time-averaged velocities and turbulence quantities were obtained. The time averaged velocity profiles were compared with several empirical relationships. Prediction was made by using a quasi-simultaneous viscous/inviscid interaction model and was compared with the experiment. The prediction with two empirical relationships of shape factor $H_1 = H_1(H)$ was compared. The prediction is in agreement with the experiment before the strong reversing flow.