

# 对航空发动机试车标准 性能表的分析和修订意见<sup>\*</sup>

高尧林

(南京师范大学动力工程学院, 南京, 210042)

[摘要] 以涡喷六发动机试车《标准性能表》为例, 分析其存在的不足之处, 提出进一步完善的意见和方法, 所采用的方法也可用于其它数据表格的处理。

[关键词] 喷气发动机; WP6 发动机; 性能标准; 标准设计; 数据分析

[中图分类号] V235.11; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)04-0014-04

推力和燃油消耗率是表征航空发动机工作性能的两项重要指标。在涡喷六发动机的台架试车中, 多年来一直把现行《标准性能表》所列各工作状态下的推力、推力允差值和燃油消耗率的标准值作为衡量发动机推力和燃油消耗率两项指标是否合格的标准。我们在使用中发现, 现行《标准性能表》所列出的推力、燃油消耗率的数值存在明显的不合理现象, 有必要对其进行研究、讨论, 并加以修订。

## 1 现行《标准性能表》存在的不合理现象

涡轮喷气发动机的性能是随大气条件的变化而变化的, 即便是同一台发动机, 在不同的大气条件下测得的性能也不尽相同。不同发动机的试车又不可能在完全相同的大气条件下进行, 然而相同型号的发动机又必须采用相同的性能衡量标准, 因此只能借助于相似理论, 把不同大气条件下测得的不同发动机的试车性能参数换算为标准状态下的性能数据, 然后再进行比较和判别。所谓标准状态是指大气压力为 101.325kPa, 大气温度为 15 的标准大气条件。

在工厂实际使用中, 就是将试车中测得的发动机性能换算为标准状态下的性能数值, 再与标准发动机在标准状态下的转速特性曲线(也即标准性能曲线)进行比较, 以确定该发动机的性能是否合格。为了便于使用, 已经把标准性能曲线编制成表格形式, 这就是《标准性能表》。

《标准性能表》的横向座标为试车时的大气温度( $-14 \sim 40$ , 间隔为 1), 纵向座标为试车发动机的测量转速( $11\,100 \sim 11\,200$  r/min, 间隔为 10 r/min), 表中所列数据为按试车时的大气温度、测量转速计算出的换算转速值在标准性能曲线上查得的推力、推力允差和燃油消耗率的标准值。发动机试车时, 记录下大气温度、大气压力和测量推力、燃油消耗时间, 先进行湿度修正, 再换算成标准性能值, 然后把计算结果与按试车时的大气温度和测量转速在标准性能表上查得的推力、燃油消耗率的标准值进行比较, 并据此作出发动机性能合格与否的结论。

发动机要在额定、最大、加力三个状态下试车, 每个状态下要比较推力、推力允差、燃油消耗率三个参数。在《标准性能表》上每一温度座标下包含 11 个转速状态, 每个转速对应一个换

\* 收稿日期: 2001-03-05

作者简介: 高尧林, 1944-, 硕士, 南京师范大学动力工程学院高级工程师, 主要从事动力机械工程和计算机应用方面的教学和研究。

算转速,如果还原为标准性能曲线,每个状态下的每个性能参数应该包含  $11 \times 55$  个性能数据点.从理论上说,这 605 个性能点所对应的换算转速范围可能会相互重叠,但是重叠区域的性能值应该相同,所有数据点都应该落在同一条曲线上.然而实际情况并非如此.当我们把《标准性能表》还原为标准性能曲线时,还原后的表列数据的对应点在坐标图上错落分布,形成一个带状区域.这说明标准性能值是在一个带状区域内波动的,而带状区域的宽度就是标准性能值的波动范围,也就是说在《标准性能表》中,换算转速相同的两种大气条件下读出的标准性能值可能是不同的.这是《标准性能表》的读表误差,也是《标准性能表》的编制误差.带状区域的宽度越大,表格的编制误差就越大.以额定状态下换算转速从  $10\ 600\ \text{r/min}$  到  $10\ 850\ \text{r/min}$  之间的表列推力值为例(见图 1),带状区域的最大宽度为  $170\ \text{N}$ ,与该转速范围所对应的推力允差值  $372.8 \sim 392.4\ \text{N}$  相比较,这个数值就相当可观了.其它状态下的推力、燃油消耗率的标准值也有类似现象存在,只是程度略有差别而已.

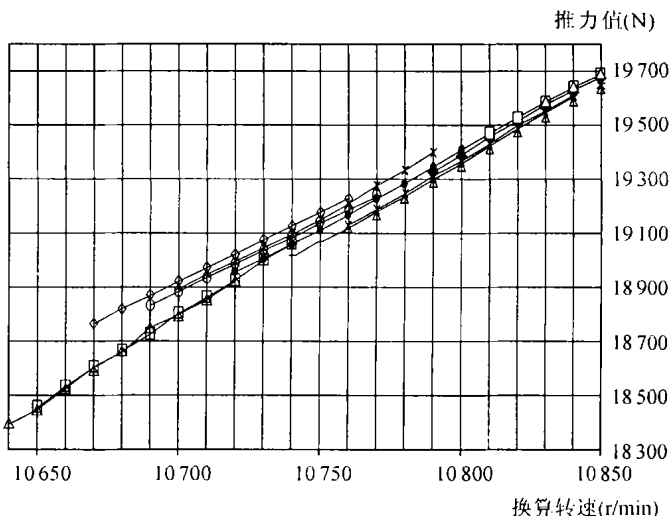


图 1 按表列数据计算的额定状态标准推力值

## 2 《标准性能表》分析处理的方法和步骤

在进行《标准性能表》的分析处理时,首先要将表列数据还原为列表曲线,然后对曲线进行平滑处理,最后按平滑后的曲线编制出新的《标准性能表》.具体步骤为:

### 2.1 把表列数据还原为列表曲线

首先把每个温度座标所对应的 11 个测量转速下的表列标准性能值看成是对某一段标准性能曲线进行多次判读所得到的一组数据.表上一共列出了 55 个温度座标,可以得到 55 组数据所组成的 55 段曲线,这些曲线段的横坐标(换算转速值)相互重叠.为了建立各组数据间的比较基础,再以  $10\ \text{r/min}$  的倍数作为换算转速的节点,对这 55 组数据进行拉格朗日插值,得到换算转速从  $10\ 640\ \text{r/min}$  开始到  $11\ 810\ \text{r/min}$  为止的,间隔  $10\ \text{r/min}$  的 118 个数据组,最大的数据组包含 6 个数据.每组数据的数值变化范围,就是该换算转速下标准性能值的波动范围.

### 2.2 求各组数据的代表值

对这 118 个数据组的每组数据求平均值,并将此平均值作为各换算转速节点处的代表值.这样处理客观上起到了限制修订后表列数据值相对于原表列数据值的变动幅度,另外,也符合“把每个温度座标所对应的 11 个测量转速下的表列标准性能值看成是对某一段标准性能曲线进行多次判读所得到的一组数据”的假设,因为用平均值来代表同一数据的重复判读值在概率统计意义上是比较合理的.

求平均值之前,我们对每组数据进行了异常数据处理,剔除弥散度特别大的数据.由于每

组数据的数据量不大,采用 Grubbs 标准进行异常数据处理,具体方法为:

- (1) 求出数据组的算术平均值  $\bar{R}$  和均方差值  $\hat{\sigma}$ ;
- (2) 由数据组中包含数据的个数  $n$  和信度  $\alpha$  查表确定数据  $g_0(n, \alpha)$ ;
- (3) 决定最大偏离数据的取舍:  
令残差  $v_i = R_i - \bar{R}$ , 当  $|v_i|_{\max} > g_0(n, \alpha) \cdot \hat{\sigma}$  时, 剔除该数据  $R_i$ , 每次只能剔除一个;
- (4) 重复上述过程, 直到满足  $|v_i|_{\max} \leq g_0(n, \alpha) \cdot \hat{\sigma}$ .

在实际计算中我们发现按《标准性能表》算出的相同温度座标下的同组数据在各自所在的换算转速节点数据组中拥有相似的分布区位, 如果其中有一个数据在换算转速节点数据组中呈偏大的态势, 那么该温度组中的其他数据在其所在的对应换算转速节点数据组中也呈偏大的态势, 反之亦然. 因此一旦出现异常数据, 往往以成组形式出现, 出现异常数据时只剔除该数据是不够的, 往往还需要剔除该数据所在温度组的全部数据, 这样做对于减少由各组代表值构成的列表曲线的波动是有利的.

### 2.3 对代表值构成的列表曲线进行平滑处理

把这 118 个代表值所在的座标点连接起来, 就构成还原后的标准性能曲线. 准确地说, 这不能算是曲线, 只是一条折线. 为了消除组成该曲线的代表值数据组中所包含的“噪音”, 必须进行光滑平滑处理.

我们采用五点三次平滑公式进行处理, 其公式形如:

$$\begin{bmatrix} Y_i \\ Y_{i+1} \\ Y_{i+2} \\ Y_{i+3} \\ Y_{i+4} \end{bmatrix} = \frac{1}{70} \begin{bmatrix} 69 & 4 & -6 & 4 & -1 \\ 4 & 54 & 24 & -16 & 4 \\ -6 & 24 & 34 & 24 & -6 \\ 4 & -16 & 24 & 54 & 4 \\ -1 & 4 & -6 & 4 & 69 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_i \\ Y_{i+1} \\ Y_{i+2} \\ Y_{i+3} \\ Y_{i+4} \end{bmatrix}$$

式中  $Y_i, Y_{i+1}, Y_{i+2}, Y_{i+3}, Y_{i+4}$  表示经平滑处理后的改进值.

### 2.4 按平滑处理后的列表点曲线编制新的《标准性能表》

按照表列试车大气温度和测量转速值求出相应的换算转速值, 并以该换算转速值作为节点在平滑处理后的性能列表点曲线上插值求出相应的标准性能值, 用所求出的标准性能值编制新的《标准性能表》.

## 3 讨论和建议

采用上述分析处理步骤, 我们编制了相应的计算机程序, 进行了计算. 下面就计算结果作几点讨论.

### 3.1 现行《标准性能表》所列的标准性能值确实存在不合理现象

计算结果表明, 同一个换算转速对应着好几个标准性能值, 而且这些标准性能值彼此之间的差异往往还相当大. 表 1、表 2 列出换算转速相同的同组标准推力值极差值和标准燃油消耗率值极差值, 也即最大差异值点的分布情况. 显然, 现行《标准性能表》的编制误差是相当大的, 这不仅体现在极差值的大小上, 也体现在极差值的个数上.

### 3.2 建议对现行《标准性能表》进行修订

通过上述讨论, 我们已经知道现行《标准性能表》存在相当大的编制误差. 以加力状态为例, 同一换算转速下标准推力的极差最大可以达到 232 N, 那么两台性能值接近合格标准的发

表 1 标准推力极差点分布情况 (极差单位: N)

| 状态 | < 30 | < 50 | < 100 | < 150 | < 200 | < 250 | 最大极差 |
|----|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 额定 | 29 处 | 40 处 | 38 处  | 9 处   | 2 处   | -     | 175  |
| 最大 | 30 处 | 18 处 | 62 处  | 4 处   | 2 处   | 2 处   | 223  |
| 加力 | 28 处 | 10 处 | 53 处  | 21 处  | -     | 6 处   | 232  |

表 2 标准燃油消耗率极差点分布情况 (极差单位:  $\times 0.001 \text{ kg/N} \cdot \text{h}$ )

| 状态 | < 5  | < 10 | < 20 | < 30 | < 40 | > 40 | 最大极差 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 额定 | 58 处 | 41 处 | 14 处 | 4 处  | 1 处  | -    | 36   |
| 最大 | 39 处 | 68 处 | 9 处  | 2 处  | -    | -    | 22   |
| 加力 | 61 处 | 36 处 | 6 处  | 7 处  | 7 处  | 1 处  | 41   |

动机在换算转速相同而大气温度不同的两次试车中, 一台原本合格的发动机就有可能由于查表得到的推力标准值偏高而不能通过试车, 而另一台推力原本不合格的发动机却会由于查表得到的推力标准值偏低而被误判为合格的发动机, 这样就很难保证出厂发动机的质量. 因此, 我们认为有必要对现行《标准性能表》进行修订. 而且, 现行《标准性能表》所采用的计量单位制仍然是工程单位制, 完全可以结合计量单位制的更替, 采用本文提出的分析意见, 对现行《标准性能表》进行修订.

以上对现行《标准性能表》进行了分析、讨论, 并作出了尝试性的修订. 修订后的《标准性能表》在数据组成上更趋合理, 原有的数据不规则现象基本消除, 为《标准性能表》的计算机处理、发动机试车数据处理以及发动机试车数据计算机自动采集、自动处理系统的建立提供方便.

本文采用的表格数据分析处理方法可以用于其它已有表格的分析和处理.

[ 参考文献 ]

[ 1 ] 刘智敏. 误差与数据处理[ M ]. 北京: 原子能出版社, 1983. 161 ~ 163  
[ 2 ] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 304 ~ 306

The Analysis and Revision Proposal of  
Test Performance standard Table of Aerojet Engine  
Gao Yaolin

( College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

**Abstract:** The inadequacy of “The standard Test Performance Table of WP6 Jet Engine ” was analyzed. Methods was suggested to modify the table. The procedures proposed may also be used for other existing tables’ analysis and processing.

**Key words:** jet engine, WP6 engine, performance standard, standard design, data analysis

[ 责任编辑: 严海琳 ]