

考虑使用因素的涡扇发动机排气温度换算方法

张红涛^{1,2}, 骆广琦¹, 杨武奎^{1,2}, 陈礼顺^{1,2}
(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;
2. 襄阳航泰动力机器厂, 湖北 襄阳 441002)

摘 要: 针对某型涡扇发动机厂内排气温度换算值验收合格而外场地面检查实测值偶有不合格的问题, 分析了只考虑大气温度单一因素的排气温度换算方法的缺陷。提出了一种综合考虑非标准大气和调节规律使用因素的换算方法, 建立了数学模型, 计算得到了非标准大气的修正系数和调节规律的修正系数, 并经试车试验验证。结果表明: 提出的考虑使用因素的换算方法符合发动机的实际使用条件, 所获得的修正系数与试车试验数据的相对误差小于 1.3%, 有效解决了排气温度厂内验收合格而外场地面开车不合格的问题。
关 键 词: 涡扇发动机; 排气温度; 换算方法; 使用因素; 非标准大气; 调节规律
中图分类号: V231 **文献标志码:** A

Conversion methods of turbofan-engine exhaust gas temperature
with consideration of use factors

ZHANG Hongtao^{1,2}, LUO Guangqi¹, YANG Wukui^{1,2}, CHEN Lishun^{1,2}
(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Xiangyang Hangtai Power Machinery Factory, Xiangyang Hubei 441002, China)

Abstract: For the problem about qualified acceptance conversion exhaust gas temperature value of a type of turbofan-engine in the factory but occasionally unqualified exhaust gas temperature measurement value in the offsite ground test, the defect of exhaust gas temperature conversion method only considering single factor of air temperature was analyzed. A kind of exhaust gas temperature conversion method comprehensively considering use factors including the nonstandard atmosphere and the adjust law was put forward, the mathematics model was established, and the correcting coefficient of nonstandard atmosphere and the correcting coefficient of adjust law were obtained by calculation, which were verified by test on the bench. As a result, exhaust gas temperature conversion method considering use factors met the actual conditions of the engine, the relative error between the correcting coefficient obtained and the trial test data was less than 1.3%, effectively solving the problem about qualified conversion exhaust gas temperature value in the factory but unqualified exhaust gas temperature measurement value in the offsite ground test.

Key words: turbofan-engine; exhaust gas temperature; conversion method;
use factors; nonstandard atmosphere; adjust law

收稿日期: 2017-06-22
基金项目: APTD-1402-05
作者简介: 张红涛(1975—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事航空发动机总体性能研究。

引用格式: 张红涛, 骆广琦, 杨武奎, 等. 考虑使用因素的涡扇发动机排气温度换算方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1492-1499.
ZHANG Hongtao, LUO Guangqi, YANG Wukui, et al. Conversion methods of turbofan-engine exhaust gas temperature with consideration of use factors[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1492-1499.

排气温度是航空发动机的一项关键性能指标,在发动机的设计制造和使用维护中有严格的限制要求,是实际监控工作中最常用的气动热力性能参数^[1-2]。发动机在试验和使用时,通过监控排气温度是否超过允许值,进行发动机的健康状态排查^[3],可以为发动机故障预测^[4]提供决策依据。发动机排气温度的实测值一般不能直接用来比较和验收发动机的性能,工程上的做法是将实测温度都换算到标准大气条件下得到排气温度的换算值,这样就可以比较发动机排气温度的优劣^[5-7]。

某型涡扇发动机台架试车的最大状态排气温度换算值合格,但在外场最大状态排气温度实测值超过规定的问题时有出现,导致发动机在外场无法使用而返厂。这表明台架试车的排气温度换算方法存在缺陷,不能满足发动机外场使用要求。发动机设计制造和使用中的历史经验和教训表明,因不可靠的性能换算方法可以使一台发动机的性能由不合格换算为合格。美国空军的实践是从发动机试验数据推导出修正系数且修正系数及方法需提交空军同意^[8]。

本文在分析排气温度试车台架验收标准缺陷的基础上,提出一种综合考虑非标准大气和调节规律使用因素的发动机排气温度换算方法。台架试车时按此方法进行换算后,可以保证厂内排气温度换算值合格的发动机在外场地面开车检查时实测值一定合格,解决厂内验收合格而外场地面开车不合格的问题,达到保证飞行安全和降低发动机返修率的目的。

1 某型涡扇发动机排气温度验收标准

1.1 外场验收标准

该型发动机在外场进行地面开车检查时,最大状态排气温度的验收标准为:实测涡轮后排气温度 t_5 不允许超过 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这个标准是不考虑大气条件因素的:不论在什么大气条件下, t_5 的限制值都是 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$;高于 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$,发动机禁止使用。

1.2 工厂试车台架验收标准

设计制造和大修技术文件规定的该型涡扇发动机的最大状态排气温度验收标准为:换算涡轮后排气温度 t_{5s} 不超过 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$,换算方法按式(1)计算获得。

$$t_{5s} = (t_5 + 273.15) \times \frac{288.15}{273.15 + t_h} - 273.15 \quad (1)$$

式中 t_5 是发动机台架试车时的大气条件(大气压力 p_h 、大气温度 t_h)下,用 4 支装机 K 型热电偶所测得温度的物理平均值,即 4 支热电偶的测量输出信号线并联后所输出的物理平均温度。

2 考虑大气温度单一因素的排气温度换算方法

2.1 换算原理及方法

由于地理位置和季节的不同,大气温度的变化很大。海平面高度的大气温度,最低可达 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,最高可达 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。在同样的高度下,大气压力的变化较小。发动机使用大气温度 t_h 对发动机性能影响很大。发动机台架试车经常是在非标准大气条件下进行的,在试车台上所录取的发动机性能参数实测值,如果不进行换算,一般说来是不能普遍应用的。需要把试车录取的性能换算成海平面大气条件下的性能。

换算参数反映实测参数随大气条件变化而变化的规律,而换算公式(方法)就是这种变化规律的函数表达。该型涡扇发动机设计制造和大修技术文件规定的排气温度换算是按不考虑工质变比热容的相似原理所制定的,涡轮后排气温度换算公式如式(1)所示。

2.2 存在的缺陷

式(1)没有考虑大气温度对工质比热容的影响,未考虑调节规律对发动机非设计点性能的影响,计算台架试车的排气温度性能时缺乏相应的修正。这给用换算涡轮后排气温度 t_{5s} 来评价和控制发动机的排气温度带来了极大的困难和偏差。

按这种换算方法,在工厂进行台架试车,当大气温度 t_h 为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,若发动机的排气温度实测值 t_5 为 $660.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,其换算温度 t_{5s} 为 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合台架验收标准,发动机可以交付出厂。但 t_5 已超过了发动机外场使用维护的排气温度限制值($t_5 \leq 660\text{ }^{\circ}\text{C}$);若外场大气温度在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,地面开车检查时排气温度必然不合格,发动机无法使用。在工厂进行台架试车,当大气温度 t_h 在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,程度更为严重。如 t_h 在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,发动机的排气温度实测值 t_5 为 $697.49\text{ }^{\circ}\text{C}$,已远远超出了外场使用标准,但其换算温度 t_{5s} 仍为 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样符合发动机交付出厂的要求。

这种只考虑大气温度单一因素的排气温度换算方法理论上本身就存在缺陷,直接运用到工程

实际中,必然对性能换算的结果造成极大的偏差。严重时就会使发动机的性能由不合格变为合格,或者说将本身性能不合格的发动机当作合格而交付^[9-13]。这也正是造成发动机排气温度厂内换算值验收合格而外场地面检查实测值不合格问题的根本原因。

3 考虑使用因素的排气温度换算方法

本研究综合考虑非标准大气和发动机调节规律对排气温度的影响,提出并找到一种在工程上能够被接受的排气温度换算方法,此换算方法能够真实地反映实测温度 t_5 随大气条件 (p_h, t_h) 的变化规律,符合发动机的实际使用条件,精度足够。要达到这个目的,要进行两方面的发动机使用条件影响的性能修正:一是非标准大气条件的修正,考虑大气温度对工质比热容的影响,确定修正系数;二是调节规律的修正,考虑不同的大气压力和大气温度下发动机调节规律的差异,确定修正系数。

3.1 换算方法的数学模型

将实测排气温度都换算到标准大气条件下的意义在于消除大气条件的差异对发动机排气温度的影响。也就是说当仅仅只有进气大气条件存在差异时,发动机的排气温度换算值 t_{5s} 保持不变。由于排气温度在随时间不断变化的过程中受到许多复杂非线性时变因素的影响,目前尚无法以精确的数学模型来描述其变化规律^[14]。在发动机的生产实践和使用中,能够被接受的排气温度换算方法应该满足以下两方面的要求:

1) 换算方法所反映的实测温度 t_5 随大气条件变化而变化的规律要与发动机实际使用时温度变化的总体趋势相一致,这是一个定性的概念。如大气温度 t_h 升高,实测温度 t_5 随之升高,大气温度 t_h 降低, t_5 也随之降低;大气压力 p_h 升高, t_5 降低,大气压力 p_h 降低, t_5 升高。

2) 换算方法所反映的实测温度 t_5 随大气条件变化而变化的程度要与发动机实际使用时的变化量相接近,这是一个定量的概念。所谓接近就是在工程应用上能够被接受或者说达到进行参数控制目的所需要的精度,符合和满足发动机的实际使用情况。如按换算方法所确定的变化程度是大气温度 t_h 每升高 1°C , t_5 随之升高 1.2°C ;发动机实际工作时大气温度 t_h 每升高 1°C , t_5 升高 1°C 。

按上述要求,本文建立考虑使用因素的排气温度换算方法的数学模型

$$t_{5c} = \frac{t_5}{K_t A_t} \tag{2}$$

式中 K_t, A_t 分别为非标准大气的修正系数和调节规律的修正系数。为了区别上一节中的换算方法,将换算涡轮后排气温度以 t_{5c} 表示。

3.2 修正系数的获得

3.2.1 非标准大气的修正系数 K_t

K_t 确定的依据是 GJB378-87《涡喷、涡扇发动机性能的温度修正规范》,只考虑大气温度对工质比热容的影响,不考虑大气温度对发动机几何尺寸的影响^[15]。按以下方法计算确定。

1) 输入数据

大气压力 $p_h = 101.32\text{ kPa}$; 大气温度 $t_h = -35 \sim 40^\circ\text{C}$, 计算间隔 5°C , 共 16 个取值;发动机的转速范围取最大状态 n_2 换算转速的 0.90 到 1.05, 计算间隔取 0.05, 共 4 个取值。温度和转速的计算点结合起来共计 64 个子样。

2) 计算 t_{5i} 和 t_{5st}

用发动机稳态性能计算方法(程序)计算出 $t_{5i} (i=1, 2, \dots, 64)$ 。

按不考虑变比热容的相似原理导出的式(1), 不同换算转速、大气温度为 15°C 的 $t_{5i} (i=11, 27, 43, 59)$ 即为标准大气条件下的换算排气温度 $t_{5s,i} (t_{5s,i} = t_{5i})$, 共 4 个值。 $t_{5s,i}$ 就是对应换算转速, 标准大气条件(用下标 st 表示)下的发动机性能(涡轮后排气温度)。

3) 计算 $K_{t,i}$

将同一换算转速, 其他大气条件下的排气温度 t_{5i} 与 t_{5st} 与相比, 求出每一个计算点的修正系数 $K_{t,i}$ 。

$$K_{t,i} = \frac{t_{5i}}{t_{5st}} \tag{3}$$

4) 拟合出 K_t

计算结果表明修正系数 $K_{t,i}$ 对发动机的转速变化不敏感, 因而可以看成只是温度的函数, 且线性相关性很好。 K_t 可表示成大气温度的一元一次函数, 即

$$K_t = b_0 + b(t_h - 15) \tag{4}$$

当 $t_h = 15^\circ\text{C}$ 时, K_t 为 1, 则 $b_0 = 1$ 。 b 按最小二乘法拟合, 用下式进行计算, 结果为 $b = 0.004516$ 。

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{64} K_{ti}(t_{hi} - 15) \sum_{i=1}^{64} (t_{hi} - 15)}{\sum_{i=1}^{64} (t_{hi} - 15)} \quad (5)$$

由此,得到非标准大气的修正系数 $K_t=1+0.004516(t_h-15)$ 。

3.2.2 调节规律的修正系数 A_t

在不同的大气温度 t_h 下,该型发动机在不同的调节规律下工作:在 5℃ 以下,为流量调节器调节;25℃ 以上,为转速调节器调节;5~25℃ 之间,是两种调节器交替工作,或者说是一种调节规律向另一种调节规律过渡。大气温度由 15℃ 向上增加时,向转速调节器过渡,以转速调节为主;大气温度由 15℃ 向下降低时,向流量调节器过渡,以流量调节为主。大气压力 p_h 对调节燃油供油量的程度有直接的影响,这是由燃油调节薄膜(压力敏感元件)的位移特性决定的。同时,环境温度对薄膜特性也会有影响。

通过调节规律的变化而对排气温度产生影响的主要参数是大气温度和大气压力。调节规律的修正系数 A_t 可表示为 t_h 和 p_h 的函数。

国内外已公开发表的文献中还没有调节规律对发动机性能的温度修正规范和具体修正方法。在性能修正中,美国空军的实践是从发动机试验数据中推导出修正系数。受此启发,本文采用基于支持向量机(SVR)的发动机排气温度预测分析模型^[16-18],对历史统计的试车试验数据进行回归分析,计算出修正系数 A_t 。将理论计算值 K_tA_t 与校准样机试车试验得到的修正系数值相比较,验证计算所获得的修正系数的适用性。

1) SVR 网络结构

将 t_h 和 p_h 作为发动机排气温度回归分析的输入向量,SVR 回归分析网络结构如图 1 所示。

2) 回归分析样本数据点采集和处理

选取校准样机(其最大状态的换算涡轮后排

气温度 $t_{5c}=596℃$)140 组试车试验数据,得到回归分析样本集。用前 130 个样本构成训练集,构建向量分类与回归(VCR)数学模型,对预测模型进行训练;后 10 个样本作为测试集(见表 1),对回归分析模型预测值的精度进行检验。

表 1 测试样本点
Table 1 Test of samples

编码	$t_h/℃$	p_h/kPa	$(t_5/K_t)/℃$
131	-16.0	102.60	607.09
132	-10.0	102.20	605.34
133	-2.0	102.00	621.03
134	2.1	101.50	612.62
135	8.3	100.90	623.81
136	16.4	100.19	609.43
137	19.7	99.30	595.28
138	22.2	99.86	598.01
139	25.0	99.50	588.50
140	30.0	99.10	574.93

对样本数据进行 t_5/K_t 处理的意义是剔除非标准大气条件对排气温度的影响,分析调节规律单一因素的影响。比如 140 号数据点的 t_5 (校准样机的实测排气温度)为 613.88℃, K_t 的计算结果为 1.068,则得到 $t_5/K_t=574.93℃$ 。

3) 回归预测结果分析

表 2 是测试样本集的预测值与试验值的对比。

表 2 测试样本点预测值与试验值对比
Table 2 Comparision of testing samples between the predicted values and actual values

编码	$(t_5/K_t)/℃$	t_5 预测值/℃
131	607.09	614.02
132	605.34	610.71
133	621.03	617.80
134	612.62	607.55
135	623.81	620.74
136	609.43	603.51
137	595.28	602.87
138	598.01	596.86
139	588.50	590.21
140	574.93	579.40

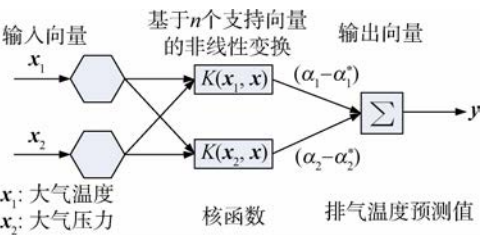


图 1 SVR 回归分析拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of regression analysis on SVR

其均方误差 E_{svr} 和决定系数 R^2_{svr} 为

$$E_{svr} = 0.0028, R^2_{svr} = 0.9654$$

测试集预测值的精度较高。

4) 计算 A_i

将 VCR 分析得到的 t_5/K_i 预测值除以校准样机的换算温度 t_{5c} , 就得到了对应大气温度、大气压力下的调节规律修正系数。

3.2.3 修正系数验证

表 3 是理论计算值与校准样机试车试验得到的修正系数值的比较情况。与校准样机的试车试验数据相比, 最大相对误差为 1.3%。说明理论计算值具有较高的精度, 能够用于发动机排气温度的修正。

在此基础上, 本文计算了 $p_h = 100.66, 101.32, 101.99, 102.66$ kPa 的各大气温度下的修正系数值(见表 4)。

表 3 校准样机试车数据验证结果

Table 3 Verify result of calibration prototype test data

序号	$t_h/^\circ\text{C}$	p_h/kPa	$K_i A_i$		相对 误差/%
			试车 试验值	理论 计算值	
1	−16.0	102.60	0.876	0.886	1.1
2	−10.0	102.20	0.901	0.909	0.6
3	−2.0	102.00	0.962	0.957	−0.5
4	2.1	101.50	1.055	1.045	−0.9
5	8.3	100.90	1.015	1.010	−0.5
6	16.4	100.19	1.029	1.019	−1.0
7	19.7	99.30	1.020	1.033	1.3
8	22.2	99.86	1.036	1.034	−0.2
9	25.0	99.50	1.032	1.035	0.3
10	30.0	99.10	1.030	1.038	0.7

表 4 排气温度换算修正系数计算结果

Table 4 Conversion correcting coefficient calculating result of exhaust gas temperature

$t_h/^\circ\text{C}$	K_i	A_i				$K_i A_i$			
		$p_h =$ 100.66 kPa	$p_h =$ 101.32 kPa	$p_h =$ 101.99 kPa	$p_h =$ 102.66 kPa	$p_h =$ 100.66 kPa	$p_h =$ 101.32 kPa	$p_h =$ 101.99 kPa	$p_h =$ 102.66 kPa
−35	0.774	1.045	1.049	1.042	1.038	0.812	0.805	0.807	0.804
−30	0.797	1.043	1.042	1.037	1.034	0.831	0.830	0.826	0.824
−25	0.819	1.039	1.039	1.034	1.030	0.851	0.851	0.847	0.844
−20	0.842	1.038	1.036	1.031	1.029	0.874	0.872	0.868	0.866
−15	0.865	1.034	1.032	1.027	1.025	0.894	0.892	0.888	0.886
−10	0.887	1.029	1.029	1.026	1.024	0.913	0.913	0.910	0.908
−5	0.910	1.028	1.027	1.023	1.021	0.935	0.934	0.931	0.929
0	0.932	1.027	1.024	1.021	1.019	0.957	0.955	0.952	0.950
5	0.955	1.023	1.022	1.019	1.017	0.977	0.976	0.973	0.971
10	0.977	1.020	1.019	1.016	1.013	0.997	0.996	0.993	0.990
15	1.000	1.016	1.015	1.013	1.011	1.016	1.015	1.013	1.011
20	1.023	1.009	1.009	1.008	1.005	1.032	1.032	1.031	1.028
25	1.045	0.990	0.990	0.990	0.990	1.035	1.035	1.035	1.035
30	1.068	0.971	0.971	0.971	0.971	1.037	1.037	1.037	1.037
35	1.090	0.954	0.954	0.954	0.954	1.040	1.040	1.040	1.040
40	1.113	0.936	0.936	0.936	0.936	1.042	1.042	1.042	1.042

4 两种换算方法的对比

4.1 计算方法的差异

只考虑大气温度单一因素的换算方法的实质是按不考虑工质变比热容的相似原理导出的换算公式(式(1))将实测涡轮后排气温度换算为标准大气条件下的性能参数。

综合考虑非标准大气和调节规律使用因素的换算方法的实质是考虑大气温度对工质比热容的影响和发动机调节规律的作用对由式(1)得到的换算排气温度进行了修正。

4.2 换算结果的差异

给定发动机的换算排气温度 t_{5s} (t_{5c}) 为 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、大气压力 p_h 为 101.32 kPa ,按式(1)和式(3)(结合表 4)分别能够得到不同大气温度下的实测涡轮后排气温度,所绘成的图线(横坐标 t_h 为大气温度,纵坐标为 t_5)见图 2。

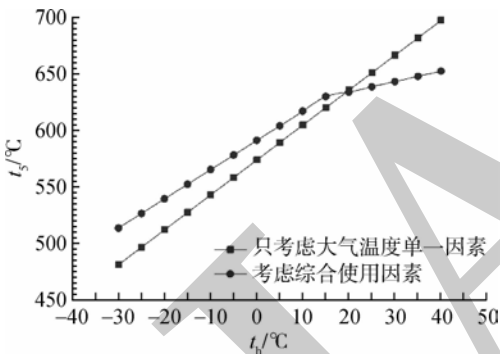


图 2 两种换算方法的曲线

Fig.2 Curves of two conversion methods

从图 2 中可以看出,相比只考虑大气温度单一因素的换算方法,考虑综合使用因素时, t_5 随大气温度升高而升高(降低而降低)的幅度要平缓一些。只考虑大气温度单一因素的换算方法,大气温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, t_5 同向变化 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在发动机的使用实践中,变化幅度没有这么大。这表明,考虑大气温度对工质比热容的影响,进行发动机性能的排气温度修正后,提高了性能换算的精度。

以大气温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为分界点,高于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,考虑综合使用因素的换算方法对应的 t_5 明显要低于考虑单一因素换算方法的 t_5 ; 低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,明显要高于考虑单一因素换算方法的 t_5 。这种变化趋势与该型发动机的调节规律相一致: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,发动机要进入转速调节器调节,大气温度升高时,维持转速恒定就要减小供油量,使排气温度随

大气温度升高的程度受到了抑制; $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,大气温度下降时,发动机逐渐由转速调节器向流量调节器过渡,流量调节器工作时,转速下降但燃油流量维持恒定,使排气温度随大气温度降低的程度同样受到了抑制。这样在发动机使用时,有利于夏天不超温超转,冬天不过于掉转而保证推力。这表明,考虑发动机调节规律的作用,引入修正系数 A_t 进行排气温度修正后,提高了性能换算方法的适用性,更加符合发动机的实际使用条件。

具体数据对比见表 5。从表 5 中可以看出,发动机若以 $t_{5s}=620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 交付,只考虑大气温度单一因素,大气温度在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, t_5 已不能保证发动机外场使用要求 ($t_5\leq 660\text{ }^{\circ}\text{C}$)。发动机若以 $t_{5c}=620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 交付,综合考虑使用因素,大气温度在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $t_5=642.94\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大气温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时、实测温度 $t_5=646.04\text{ }^{\circ}\text{C}$, 给外场使用留有裕度,能够保证外场使用中对实测温度 t_5 的要求。

表 5 两种换算方法的对比

Table 5 Comparison of two conversion methods

$t_h /$ $^{\circ}\text{C}$	$t_5 / ^{\circ}\text{C}$		差值/ $^{\circ}\text{C}$
	只考虑大气温度单一 因素控制的	综合考虑使用 因素控制的	
40	697.49	646.04	51.45
30	666.49	642.94	23.55
28	660.29	642.94	17.35
20	635.50	639.84	-4.34
15	620.00	629.30	-9.30
11	607.60	620.62	-13.02
5	589.00	605.12	-16.12
0	573.51	592.10	-18.59
-5	558.01	579.08	-21.07
-10	542.51	566.06	-23.55
-20	511.51	540.64	-29.13

4.3 换算方法的运用

按只考虑大气温度单一因素的换算方法厂内合格交付 ($t_{5s}\leq 620\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的 9 台发动机在外场因装机后排温高故障而返厂修理,发动机在工厂返修时按综合考虑使用因素的换算方法控制排气温度 ($t_{5c}\leq 620\text{ }^{\circ}\text{C}$) 后交付出厂,在外场使用一个翻修寿命未出现排温高故障。表明综合考虑使用因素的换算方法可有效解决发动机厂内换算排气温度

合格而外场地面开车检查排气温度实测值不合格的问题。

5 结 论

本文提出了一种综合考虑非标准大气和调节规律使用因素的发动机排气温度换算方法。考虑大气温度对工质比热容的影响,计算得到了非标准大气的修正系数 K_t ;采用基于 SVR 的发动机排气温度预测分析方法,计算出调节规律的修正系数 A_t 。将理论计算值与校准样机试车试验得到的修正系数值相比较,验证了计算所获得的修正系数的适用性;比较了与只考虑大气温度单一因素的换算方法的差异。得到以下主要结论:

1) 只考虑大气温度单一因素的排气温度换算方法存在缺陷,精度不够并与发动机实际使用情况存在明显差异,直接运用到工程实际中,必然对排气温度换算的结果造成极大偏差。严重时会使发动机的性能由不合格换算成合格,这也正是造成发动机厂内排气温度换算值验收合格而外场地面检查排气温度实测值不合格问题的根本原因。

2) 非标准大气条件下大气温度对工质比热容的影响和发动机调节规律的作用,这些使用因素都会对发动机的排气温度产生影响,进行排气温度换算时必须综合考虑非标准大气和调节规律对发动机性能的影响,对换算排气温度进行修正。

3) 所得到的非标准大气的修正系数和调节规律的修正系数符合发动机的实际使用条件,与厂内试车试验和外场使用维护的数据吻合性高。发动机生产实践中按此方法进行排气温度的换算后,可以保证厂内排气温度换算值合格的发动机在外场地面开车检查时排气温度实测值一定合格。

参考文献:

- [1] 陈果.用结构自适应神经网络预测航空发动机性能趋势[J].航空学报,2007,28(3):535-539.
CHEN Guo. Forecasting engine performance trend by using structure self-adaptive neural network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 535-539. (in Chinese)
- [2] 钟诗胜,李洋.基于小波过程神经网络的飞机民用航空发动机状态监视[J].航空学报,2007,28(1):68-71.
ZHONG Shisheng, LI Yang. Condition monitoring of aero-engine based on wavelet process neural networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 68-71. (in Chinese)
- [3] 史永胜,彭朋,宋云雪.基于边界值的多元混沌发动机性能预测算法[J].航空动力学报,2012,27(1):211-216.
SHI Yongsheng, PENG Peng, SONG Yunxue. Multivariable chaotic arithmetic for aero-engine performance forecasting based on boundary values[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 211-216. (in Chinese)
- [4] BANKS J, REICHARD K, CROW E, et al. How engineers can conduct cost-benefit analysis for PHM systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(3): 176-180.
- [5] 毛华军.燃气轮机排气温度监视和保护功能分析[J].华电技术,2009,31(8):11-15.
MAO Huajun. Analysis of exhaust temperature monitor and protection function for gas turbine[J]. Huadian Technology, 2009, 31(8): 11-15. (in Chinese)
- [6] 于文武,许春生.提高民航发动机起飞 EGT 裕度的措施[J].航空维修与工程,2007(3):33-35.
YU Wenwu, XU Chunsheng. Measures to increase civil aeroengines take off EGT margin[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2007(3): 33-35. (in Chinese)
- [7] 郝英.发动机起飞 EGT 裕度的估算[J].航空维修与工程,2004(2):39-40.
HAO Ying. Estimation of aero-engine takeoff EGT margin[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2004(2): 39-40. (in Chinese)
- [8] 何立明.飞机推进系统原理[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [9] LEE Y K, MAVRIS D N, VOLOVOI V V, et al. A fault diagnosis method for industrial gas turbines using Bayesian data analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4): 041602. 1-041602. 6.
- [10] LI Y G. Performance analysis based gas turbine diagnostics: a review[J]. Journal of Power and Energy, 2002, 216(5): 363-377.
- [11] HE H X, LI N, ZHENG G F, et al. Anomaly detection based on multi-detector fusion used in turbine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 20(1): 113-117.
- [12] PATRICK H P E, HA D. Exhaust gas temperature capabilities now in system 1(R) software[J]. Product Update, 2005, 25(1): 88-89.
- [13] LIU X, JEFFRIES J B, HANSON R K, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature[J]. Applied Physics: B, 2006, 82(3): 469-478.
- [14] 钟诗胜,雷达,丁钢.卷积和离散过程神经网络及其在航空发动机排气温度预测中的应用[J].航空学报,2012,33(3):438-444.
ZHONG Shisheng, LEI Da, DING Gang. Convolution sum discrete process neural network and its application in aero-engine exhaust gas temperature prediction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 438-444. (in Chinese)
- [15] 《航空发动机设计手册》总编委会.航空发动机设计手册:

第 5 册 涡喷及涡扇发动机总体[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

[16] 付为刚,李梦,尚永锋,等. 基于支持向量机的涡扇发动机 EGT 回归分析[J]. 机械设计与制造,2015(10):129-131.
FU Weigang, LI Meng, SHANG Yongfeng, et al. Regression analysis based on support vector machine for turbofan engine's exhaust gas temperature[J]. Machinery Design and Manufacture, 2015(10): 129-131. (in Chinese)

[17] 王伟影,赵宁波,唐瑞,等. 燃气轮机排气温度异常检测及诊断[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(3):337-342.
WANG Weiying, ZHAO Ningbo, TANG Rui, et al. Anom-

aly detection and diagnosis of gas turbine exhaust gas temperature[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(3): 337-342. (in Chinese)

[18] 陈娇,王永泓,翁史烈. 广义回归神经网络在燃气轮机排气温度传感器故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 92-97.
CHEN Jiao, WANG Yonghong, WENG Shilie. Application of general regression neural network in fault detection of exhaust temperature sensors on gas turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 92-97. (in Chinese)

(编辑:陈 越)