

文章编号: 1000-8055(2010)09-2036-05

涡轴发动机性能参数的等效换算

黄开明¹, 黄金泉², 任 丹¹, 杨 芳¹, 张 鑫¹

(1. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 涡轴发动机采用自由涡轮物理转速为常数的调节规律不能保证发动机在工作条件变化时的完全相似, 论证了传统相似换算公式在涡轴发动机上存在过大误差. 利用某型涡轴发动机数学模型开展仿真研究, 提出了涡轴发动机试验性能参数的等效换算方法. 在某型发动机上的初步应用表明采用该方法可以有效减小功率和耗油率的换算误差, 从而为制定涡轴发动机的试验性能修正标准和出厂验收考核规范奠定了基础.

关 键 词: 涡轴发动机; 自由涡轮; 参数换算; 等效转换; 性能修正

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Performance parameter equivalent correction of turbo shaft engine

HUANG Kai ming¹, HUANG Jin quan², REN Dan¹,

YANG Fang¹, ZHANG Xin¹

(1. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The turbo shaft engine with free turbine can't guarantee similar rule perfectly. For the purpose of engine parameter correction, the traditional resemble correction formula with too much tolerance was discussed. And, a more scientific method called equivalent conversion of turbo shaft engine parameters correction based on simulation was brought forward. Finally, an example was presented. The results show that, this new method can be used to reduce the tolerance of the performance parameter correction, laying a foundation for formulating the turbo shaft engine test performance modification standard and acceptance specification.

Key words: turbo shaft engine; free turbine; parameter correction; equivalent conversion; performance modification

发动机试验需要解决不同环境条件下发动机试验参数的换算问题. 特别对于新研制发动机的调试需要科学准确的参数换算公式以对试验数据进行等效对比, 为技术改进措施的评估提供依据, 参数换算对发动机的出厂验收也是十分重要的. 从公开的文献看, 国内外对参数的换算研究主要

集中在涡喷与涡扇发动机上^[1-4], 对涡轴发动机台架参数的换算鲜有涉及.

目前国内涡轴发动机试验参数的换算通常采用相似准则确定的换算公式, 然而运用这种方法在理论上不近合理, 因为对带自由涡轮的涡轴发动机而言, 自由涡轮并不总是处于相似状态, 因此

收稿日期: 2009 08 16; 修订日期: 2009 11 21

作者简介: 黄开明(1970-), 男, 湖南沅江人, 研究员, 博士, 主要从事航空涡轴发动机总体性能与调节规律研究.

对涡轴发动机的功率等参数按照传统的换算公式进行处理是不正确的. 实际上, 国外涡轴发动机很少直接采用传统的参数换算公式进行试验性能的换算, 例如从国外引进的 Arriel 系列发动机就没有采用传统的换算公式进行试验性能换算, 而是针对不同型号规定了不同的换算公式. 但是, 建立涡轴发动机性能参数的评估准则又是十分必要的, 因为在涡轴发动机研制过程中需要对设计、修改措施的效果进行评估就必须有准确的参数评估公式, 以将不同环境条件下的试验性能统一到相同的标准下进行对比分析, 对批量生产的发动机采用参数换算公式可以大大简化试车验收程序.

本文在试验和仿真研究基础上提出了自由涡轮式涡轴发动机性能参数换算的等效相似转换方法, 算例表明能够有效减少涡轴发动机采用传统换算时的误差.

1 传统的参数换算

传统的换算公式是相似换算, 即基于几何相似和工作状态相似条件, 并假定工质的比热容为常数、与外界不存在热交换、忽略雷诺数的影响以及燃烧物理化学过程的影响得到的. 设压力和温度换算因子 $\delta = p_1/101.325$ 和 $\theta = t_1/288.15$, 传统的相似准则换算公式可表示为^[5-7]

$$n_c = \frac{n}{\sqrt{\theta}} \tag{1}$$

$$t_c = \frac{t}{\theta} \tag{2}$$

$$W_{ac} = \frac{W_a \sqrt{\theta}}{\delta} \tag{3}$$

$$W_{fc} = \frac{W_f}{\delta \sqrt{\theta}} \tag{4}$$

$$P_c = \frac{P}{\delta \sqrt{\theta}} \tag{5}$$

由式(4)和(5)可以得到涡轴发动机的耗油率换算公式

$$s_{fc} = \frac{W_{fc}}{P_c} = \frac{W_f}{P} = s_f \tag{6}$$

式中 n 为转速, t 为温度, W_a 为空气流量, W_f 为燃油流量, P 为功率, 下标 c 指换算值.

上面的功率换算公式是从涡轮部件或定轴式单转子涡桨发动机在工作状态相似条件下推导出来的.

相似换算公式在涡喷、涡扇发动机上得到了广泛应用, 为了提高换算的准确性, 不断有学者对其进行了各种修正, 其中主要有湿度、温度、燃油

热值和雷诺数修正^[8-10]; 我国也制定了涡喷、涡扇发动机台架试车换算中针对湿度、温度和燃油热值的修正方法^[11].

2 传统相似换算的误差

自由涡轮式涡轴发动机并不自动满足相似准则^[5-6], 因为自由涡轮式涡轴发动机采用了自由涡轮物理转速为常数的调节规律, 并不能够保证任何状态下自由涡轮工作状态均相似, 也就不能保证整台发动机工作状态的相似.

从相似原则出发, 为保证涡轴发动机全台工作状态相似, 则必须满足自由涡轮状态相似的条件, 然而, 这些条件难以完全满足. 这里将自由涡轮转速相似参数 $n_p/\sqrt{t_{45}} = \text{const}$ 作为其等效的相似条件, 这样台架条件下涡轴发动机的相似准则有两个: 燃气涡轮转速相似参数 $n_g/\sqrt{t_1}$ 和自由涡轮转速相似参数 $n_p/\sqrt{t_{45}}$. 在满足这两个条件下就可以按照相似换算的方法进行换算.

为了分析涡轴发动机采用传统换算公式的误差以及自由涡轮换算转速不变情况下的换算误差, 利用建立的发动机模型^[12-13]进行仿真计算. 对某型发动机分别保持自由涡轮转速 $n_p = 100\%$ 和自由涡轮换算转速 $n_{pc} = 100\%$ 在不同环境温度下的性能进行了计算, 表 1 给出了热天与标准天在燃气发生器换算转速 1.0 状态下的对比, 表中的换算值是按照传统的相似公式进行计算的.

表 1 某涡轴发动机计算值及传统换算值 ($n_g = 1.0$)

Table 1 Calculation and traditional correction parameters of a turbo shaft engine ($n_g = 1.0$)

	$t_1/^\circ\text{C}$	P	W_f	P_c	W_{fc}	s_{fc}
$n_p = 1.0$	15	1	1	1	1	1
$n_p = 1.0$	55	1.056	1.094	0.989	1.025	1.036
$n_{pc} = 1.0$	55	1.076	1.10	1.008	1.031	1.023

表 1 中, 以自由涡轮物理转速不变的调节规律和传统换算方法计算得到的换算功率换算误差为-1.1%、耗油率换算误差为 3.6%. 如果不进行修正, 发动机试验中冬天容易达标而夏天往往不达标就很正常了. 在保持自由涡轮换算转速不变情况下的功率换算误差为 0.8%、耗油率换算误差为 2.3%. 显然, 热天采用自由涡轮换算转速为常数的调节规律进行试验时功率和耗油率更容

易满足要求.

分析热天采用 $n_p = 1.0$ 和 $n_{pc} = 1.0$ 的计算结果, 后者功率相对增加了 1.9%、燃油流量相对增加了 0.55%、耗油率相对减小了 1.25%, 这些差异大体可以代表涡轴发动机在自由涡轮不相似情况下试车造成的非相似误差.

涡轴发动机的试验结果也表明采用传统换算确实存在较大的误差. 图 1 是某发动机两次典型环境下的试验值换算结果, 功率换算误差达到了 1.8% 左右, 耗油率误差最大达到 2%.

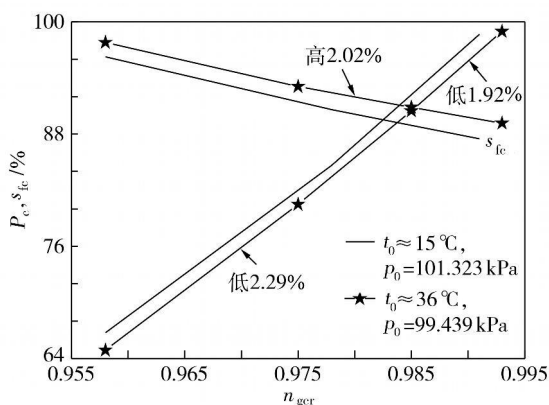


图 1 某涡轴发动机试验性能换算误差

Fig. 1 Test performance traditional correction tolerance of a turboshaft engine

3 等效相似换算

任何换算均是为了使发动机在任何环境下试验获得的性能具有可比性, 亦即换算后的性能是等效性的. 通常将发动机性能参数换算到海平面、标准大气条件下进行对比. 涡轴发动机必须满足前面提到的相似两个条件. 由于实际台架试验时自由涡轮的物理转速保持不变, 必须将其“等效”到自由涡轮换算转速相等的条件上来, 我们称之为“等效相似换算”.

等效相似换算就是按照“等效转换系数”将常规台架试验性能转化成等自由涡轮换算转速调节规律下的性能, 然后再按照传统的相似换算公式进行换算. 因此, 等效相似换算的关键是确定“等效转换系数”.

等效转换系数的确定, 最精确的方法是在不同环境下开展两种调节规律的对比性能试验, 从而确定转换的比例系数, 但台架试验难以覆盖包线范围内的全部环境温度, 而高空模拟试验又太昂贵, 因此完全依靠试验是不现实的. 本文采用发

动机仿真计算得出某发动机的等效比例系数.

为简化问题, 不考虑大气湿度影响. 地面台架试验时雷诺数均在自模区内, 不需要考虑雷诺数影响; 发动机在研制期间或出厂验收试车时主要在有限的区域进行地面试车, 大气压力变化很小, 计算结果表明大气压力变化 10% 造成的功率和燃油流量等效转换系数变化在 0.02% 以内, 因此这里等效转换中暂不考虑大气压力的因素. 计算“等效转换系数”的主要步骤如下:

- 1) 对固定的 n_{gc} 状态, 按照 $n_p = 1.0$ 恒定的调节规律, 计算出不同进气温度 t_1 下对应性能;
- 2) 相同 n_{gc} 下, 按照 $n_{pc} = 1.0$ 的调节规律, 计算对应 t_1 下的性能;
- 3) 上面两种情况下对应参数之比就是“等效转换系数 K ”;
- 4) 选取一系列的 n_{gc} , 按照上述方法进行计算, 可以得到一个“等效转换系数”表;
- 5) 在实际试验中根据等效转换系数表插值得到需要的转换系数, 然后进行换算.

从前面计算的结果(表 1) 可以知道, 涡轴发动机等效转换中功率和耗油率的变化比较明显. 因此, 下面以某发动机的功率和耗油率参数为例进行等效转换, 这两个参数也是评定发动机性能的主要指标.

利用发动机模型计算不同环境温度下燃气发生器换算转速从 0.94~1.0 状态的等效转换系数. 表 2 给出了部分环境温度下的系数, 图 2 给出了曲线. 可以得出, 自由涡轮工作状态不相似导致的最大换算误差功率为 2.74%, 耗油率为 1.75%.

利用计算的等效转换系数对图 1 中的功率和油耗进行了等效相似转换, 结果见图 3, 与图 1 中对点比较, 转换后的功率换算误差相对减小了 26.2% 与 47.9%, 油耗换算误差相对减小了 20%.

因此, 采用等效相似转换能够有效地缩小涡轴发动机采用传统换算公式换算所产生的误差; 虽然这里运用数学模型计算得到的等效转换系数的精度有待开展专项试验验证, 但初步的应用表明了“等效相似转换”方法是解决涡轴发动机参数换算问题的一条有效途径.

值得说明的是, 等效相似转换的本质是消除自由涡轮工作状态不相似导致的换算误差, 而不是消除所有的换算误差. 由图 3 可知, 等效相似换算后仍然存在较大的换算误差, 其量级与已知涡扇发动机未经修正的换算误差是相当的, 可以参

表 2 某发动机等效转换系数
Table 2 Equivalent conversion coefficient

$t_1 / ^\circ\text{C}$	n_{gc}	K_p	K_{sfc}	n_{gc}	K_p	K_{sfc}
- 5	1. 0	0. 99128	1. 004 99	0. 98	0. 992 53	1. 00406
15		1	1		1	1
35		1. 009 4	0. 993 35		1. 008 01	0. 99545
55		1. 01867	0. 987 64		1. 017 49	0. 98962
- 5	0. 96	0. 99326	1. 002 91	0. 94	0. 995 49	1. 00122
15		1. 00015	0. 999 89		1. 000 03	0. 99998
35		1. 00615	0. 996 61		1. 004 43	0. 99886
55		1. 01314	0. 993		1. 009 19	0. 9973

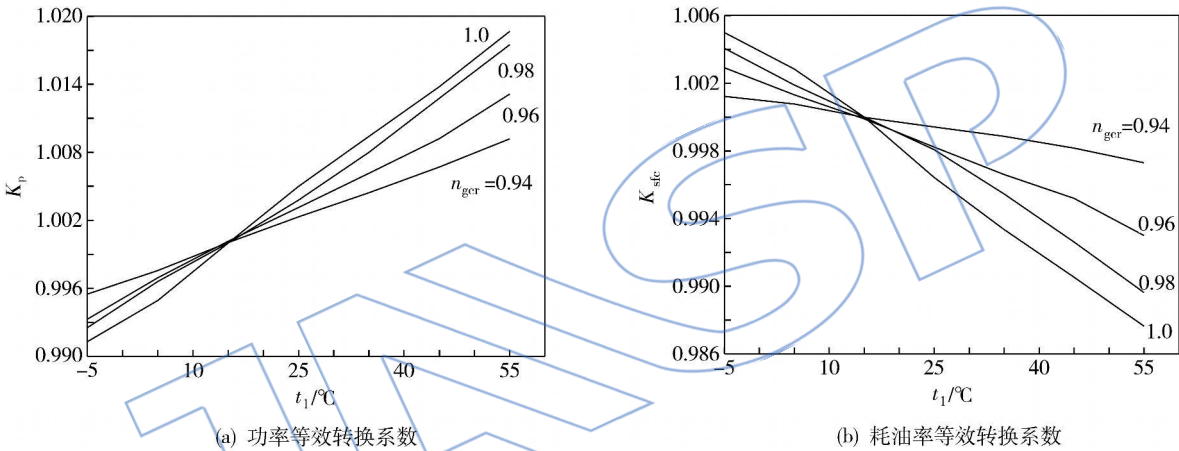


图 2 某涡轴发动机等效转换系数
Fig. 2 Equivalent conversion coefficient of a turboshaft engine

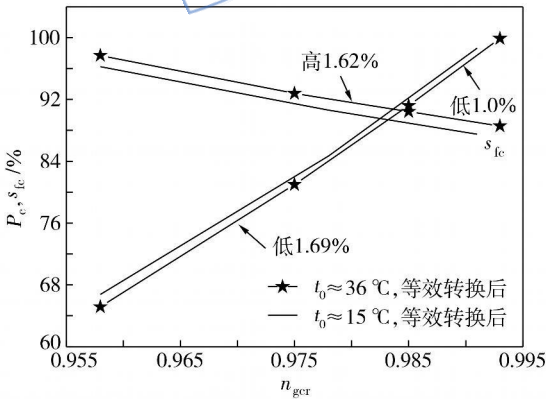


图 3 某发动机试验等效转换后的换算误差
Fig. 3 Test performance equivalent conversion tolerance of a turboshaft engine

4 结 论

- 1) 涡轴发动机在实际试验与使用中采用了自由涡轮物理转速为参数的控制规律, 不满足整台发动机均相似的条件, 采用传统的换算公式进行试验性能的换算其精度难以满足工程需求.
- 2) 仿真结果表明, 采用“等效相似转换”的修正方法能够在一定程度上减小涡轴发动机自由涡轮工作状态不相似导致的功率和耗油率换算误差, 从而提高试验参数的换算精度.
- 3) “等效相似转换”法, 为进一步完善涡轴发动机的参数换算和制定发动机试验性能修正标准提供了可具操作的思路.

参考文献:

[1] Krampf F M . A practical guide for gas turbine performance

照涡喷、涡扇发动机试车性能修正方法进行修正^[1].

- field and test data analysis[R]. ASME 92-GT-427, 1992.
- [2] Kyritsis V E, Pilidis P. An analytical approach for gas turbine parameter corrections[J]. Proceedings of the ASME, Turbo. Expo., 2008, 1: 103-111.
- [3] Casoni A, Colitto N, Elliott J, et al. Corrected parameter control for two shaft gas turbines[J]. Proceedings of the ASME, Turbo. Expo., 2004, 2: 741-748.
- [4] Arar M I. Gas turbine corrected parameter control humidity correction sensors evaluation and selection[R]. American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo. Expo. (Publication) IGTI, 2002, 2A: 243-254.
- [5] 涅恰耶夫. 航空动力装置控制规律与特性[M]. 单凤桐, 程振海, 译. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 廉小纯, 吴虎. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [7] 西北工业大学、南京航空学院、北京航空学院三院校编. 航空燃气涡轮发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [8] Volponi A J. Gas turbine parameter corrections[R]. ASME 98-GT-947, 1998.
- [9] Kurzke J. Model based gas turbine parameter corrections[R]. ASME GT2003-38234, 2003.
- [10] Mathioudakis K. Gas turbine test parameters corrections including operation with water injection[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1004, 126(2): 334-341.
- [11] 刘大响. 试车环境对发动机性能的影响及修正方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [12] 黄开明, 周剑波, 刘杰, 等. 涡轴发动机起动过程的一种气动热力学实时模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 703-707.
- HUANG Kaiming, ZHOU Jianbo, LIU Jie, et al. Thermodynamic model of turboshaft engine starting process[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 703-707. (in Chinese)
- [13] 黄开明, 黄金泉, 郭腊梅. 涡轴发动机全状态实时气动热力学数值模拟[J]. 航空发动机, 2006, 32(2): 46-49.
- HUANG Kaiming, HUANG Jinquan, GUO Lamei. Total state real time aerothermodynamics model for turboshaft engine[J]. Journal of Aeroengine, 2006, 32(2): 46-49. (in Chinese)