

发动机航线类综合载荷谱研究^{*}

宋迎东, 高德平

(南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

摘 要: 在空测和外场使用统计的基础上, 根据综合任务谱和实际的飞行任务谱对发动机造成的疲劳和蠕变以及热冲击损伤一致的原则, 在推导过程中保证两种谱的载荷循环数相同、各功率状态持续的时间相同以及主要的功率状态的变化顺序相同, 将某发动机 5 种航线类飞行任务和地面功能检查试车任务进行综合, 得到航线类综合任务谱。然后根据发动机的高度-速度特性和飞行高度与速度计算出该发动机的航线类转速谱。综合任务谱和相应的转速谱的获得为推导加速任务试车谱奠定了基础。

关键词: 航空发动机; 飞行任务剖面; 载荷谱; 统计分析

中图分类号: V235.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)04-0054-03

Turbine engine composite route flight loading spectrum derivation

SONG Ying-dong, GAO De-ping

(Dept. Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the principle of equal damage of flight mission spectrum and corresponding composite spectrum to an engine due to fatigue, creep and thermal impact, compounding 5 flight mission profiles and a functional check profile, composite route flight mission profiles are obtained. Rotating speed spectrum are calculated from altitude-velocity characteristic, flight altitude and flight velocity. From the composite mission spectrum and the related rotating speed spectrum, the accelerated mission test spectrum can be derived.

Key words: Aircraft engine; Flight mission profile; Load spectrum; Statistical analysis

1 引 言

航空发动机的实际飞行任务千变万化, 必须对其进行分析与综合, 得出综合任务谱, 然后以此为基础进行构件的应力分析、寿命研究以及加速任务试车谱的编制。国外在进行歼击机和歼击教练机发动机的综合任务分析时, 基本上只考虑机动飞行或空战, 如美国 F16 飞机上的 F110 发动机的空中格斗综合任务和空对地攻击综合任务, 没有航线类综合谱^[1], 这是与它的实际使用情况有关的。根据某发动机的飞行训练特点, 在使用中简单的起落航线类占有较大的比例, 且飞行高度和速度范围与机动飞行有较大的差别, 从而导致发动机使用载荷的不同。为了精确地考虑实际飞行对发动机所造成的损伤,

必需用航线类和机动飞行类两种综合谱代表外场使用。本文在外场调查和空测的基础上, 对某发动机的起落航线飞行任务进行了分析与综合, 获得了两类综合任务谱, 并推导了相应的发动机转速谱, 为发动机的寿命研究和加速任务试车谱的编制提供了依据。

2 某发动机航线类飞行功率使用的一般形式

根据某发动机的飞行训练大纲得知: 在飞行训练中起落航线类飞行包括: 起落航线飞行、起落航线接地复飞、暗舱仪表“直线”进入着陆带飞、暗舱仪表“大航线”进入着陆带飞、单机已知航线无线电航行带飞等 5 种飞行任务。这些飞行练习的高度、速度范围基本一致 (均为 0 m~ 500 m, 0 km/h

^{*} 收稿日期: 1999-08-19; 修订日期: 1999-11-01。获奖情况: 本课题获航空工业总公司 1999 年科技进步三等奖。

作者简介: 宋迎东 (1969—), 男, 副教授, 博士后, 主要从事机械强度与振动研究。

~ 500 km/h), 具有基本相同的飞行动作, 包括暖机、起飞地面滑跑段、爬升段、加减速段、巡航段、返航段、下滑段以及着陆段, 反映在发动机功率状态上变化趋势相同, 如图 1 所示。



Fig. 1 General type of power rating in route flight mission

该发动机的地面功能检查试车谱包括一个 0-M-0 循环、一个慢车-最大-慢车循环, 其谱的形式与起落航线相似, 因此也纳入该类飞行之中。

3 航线类综合任务谱的推导

综合任务谱和实际的飞行任务谱对发动机造成的低周疲劳、蠕变以及热冲击损伤应当一致。根据疲劳、蠕变理论: 当两个载荷谱包括相同的循环数时其对构件造成的低周疲劳损伤基本相等, 各级载荷保持时间相等时, 蠕变损伤相等。在实际飞行过程中, 发动机构件承受的热冲击主要产生在功率状

态从慢车到最大或最大到慢车等功率状态急剧变化的过程中。因此综合谱和实际飞行载荷谱之间只要保证: (1) 载荷循环数相同; (2) 各功率状态持续的时间相同; (3) 各主要的功率状态的变化顺序相同, 就能保证二者对发动机造成的低周疲劳、蠕变以及热冲击损伤应当一致。基于这三个原则就可以由空测结果导出综合任务谱。综合任务谱实质上就是考虑任务混频后的平均谱, 在综合任务谱中各任务段的持续时间等于所有该类飞行练习中相同任务段的平均值。

根据实测载荷谱, 各功率状态的统计结果见表 1。表 1 的最后一行为各任务段的平均持续时间, 如综合任务谱中巡航任务段的持续时间为

$$\begin{aligned} & \frac{100 \times 20.44 + 400 \times 45.98 + 910 \times 30.00}{20.44 + 45.98 + 30.00 + 8.20 + 9.00 + 25.00} + \\ & \frac{244 \times 8.20 + 2400 \times 9.00 + 42 \times 25.00}{20.44 + 45.98 + 30.00 + 8.20 + 9.00 + 25.00} \\ & = 522(s) \end{aligned}$$

表 2 为航线类任务中慢车-最大-慢车循环的统计结果。2 号飞行练习包括由飞机接地复飞形成的 3 次慢车-最大-慢车循环, 该循环中慢车和最大状态的时间分别为 50 s 和 52 s。地面功能检查试车任务也包括一次慢车-最大-慢车循环, 其中慢车和最大状态的时间均为 36 s。考虑综合任务谱和实测任务谱中各功率的持续时间应相等的原则, 可以得到综合任务谱所包含的慢车-最大-慢车循环中慢车状态和最大状态的持续时间均为 36 s。

Table 1 Duration of each segment of composite route flight mission s

No.	Mission mixture	Ground operation	Climb with maximum power	Climb with rated power	Cruise	Sliding	Landing run
1	20.44	20	35	35	100	60	50
2	45.98	20	35	140	400	240	50
3	30.00	57	51	173	910	189	84
4	8.20	44	62	40	244	80	90
5	9.00	80	42	138	2400	260	80
Ground test	25.00	60	60	120	42	132	174
Average		60	45	122	522	175	84

Table 2 Statistical results of idle-maximum-idle cycle for route flight mission

Mission No.	1	2	3	4	5	Ground test	Total (mission mixture considered)
Number of cycle	0	3	0	0	0	1	163

由统计可以得出航线类飞行的总任务混频为:
 $F_{\text{航线}} = 138.62$, 一次起落平均飞行时间为: $T_{\text{航线}} = 1\,085\text{ s}$ 。

根据航线类飞行剖面中包括 163 个慢车-最大-慢车循环, 它们主要是由 5-2 号的接地复飞以及地面试车功能检查试车引起的, 为了模拟它对发动机造成的损伤, 在停车之前加入 1~2 个慢车-最大-慢车循环, 该循环中最大状态、慢车状态时间均为 36 s, 如图 2a 图 2b 所示。

为了确定两种综合任务谱的次数, 令含一个慢车-最大-慢车循环的综合谱的次数为 x 次, 含两个慢车-最大-慢车循环的综合谱的次数为 y 次, 则

$$\begin{cases} x + y = 138.63 \\ x + 2y = 163 \end{cases}$$

解得: $x = 115$, $y = 24$ 。

图 2a 的次数为 115 次, 运行总时间为 1 071 s。图 2b 的次数为 24 次, 运行总时间为 1 154 s。这样就可以保证综合任务谱和原谱的损伤相同。

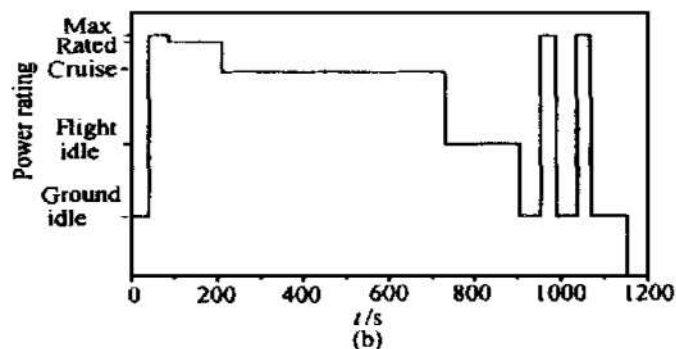
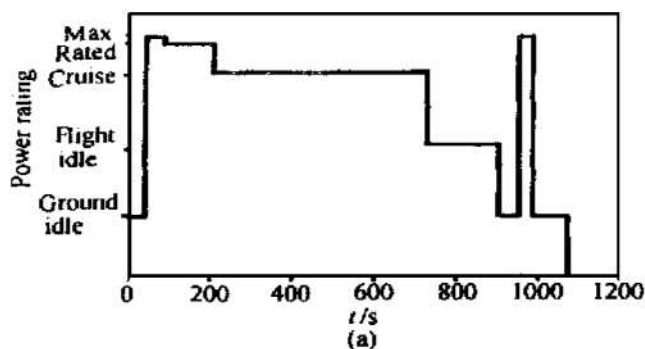


Fig. 2 Route flight mission spectrum

(a) One idle-maximum idle cycle

(b) Two idle-maximum idle cycles

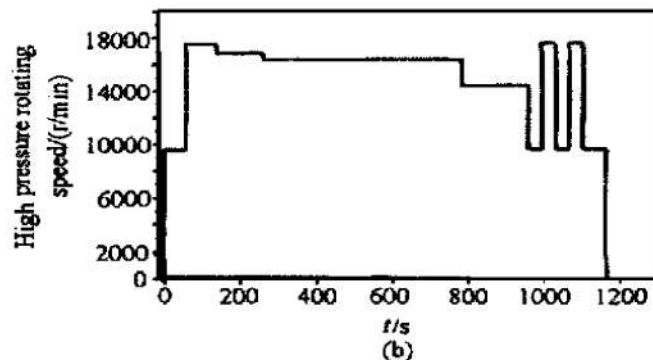
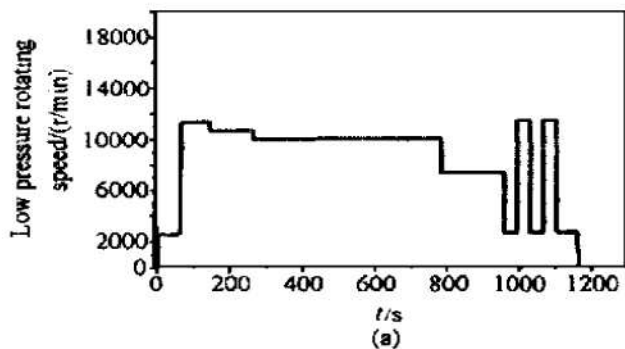


Fig. 3 Low pressure rotating speed spectrum

(a) At low pressure

(b) At high pressure

4 综合任务谱对应的转速谱

根据发动机的高度-速度特性以及飞行训练大纲中规定的飞行高度和飞行速度可以计算得到图 2 所示的航线类综合任务谱对应的高压转子转速谱和低压转子转速谱^[2], 如图 3 和图 4 所示。其中

(1) 地面慢车转速: 高压 9 600 r/min, 低压 2 600 r/min;

(2) 空中慢车转速: 高压 14 400 r/min, 低压 7 250 r/min;

(3) 最大转速: 高压 17 600 r/min, 低压 11 350 r/min;

(4) 额定转速: 高压 16 900 r/min, 低压 10 640 r/min;

(5) 巡航转速: 高压 16 400 r/min, 低压 100 00 r/min。

利用上述转速谱就可以进行构件的应力分析、寿命计算以及编制加速任务试车谱^[3,4]。

在以后的研究应当提高实验测量精度, 做长时蠕变实验以确定塑性影响, 建立统一的粘弹塑性本构方程。

参 考 文 献

- [1] 彭 威, 任均国, 周建平. 复合推进剂线粘弹本构方程的细观力学分析 (iv) 球形颗粒增强效应分析 [J]. 推进技术, 1999, 20 (6) .
- [2] 彭 威, 任均国, 周建平. 复合推进剂线粘弹本构方程的细观力学分析 (iii) 非球形颗粒增强效应分析 [J]. 推进技术, 2000, 21 (1) .
- [3] Schapery R A. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials [J]. Polymer Engng & Sci, 1969, 9: 295~ 310.
- [4] Swanson S R, Christenson L W. A constitutive formulation for high elongation propellants [J]. J Spacecraft, 1980, 20: 559~ 566.
- [5] Sankaran G V, Jana M K. Thermoviscoelastic analysis of axisymmetric solid propellant grains [R]. AIAA 75-1343.
- [6] Lai J, Bakker A. 3-D Schapery representation for non linear viscoelasticity and finite element implementation [J]. Computational Mechanics, 1996, 18: 182~ 191.
- [7] Lou Y C, Schapery R A. Viscoelastic characterization of a nonlinear fiber-reinforced plastic [J]. J Comp Mater, 1971 (5): 208~ 234.
- [8] 蔡良武. 含裂纹复合材料条件下损伤扩展的计算机模拟 [D]. 北京: 中国科学院, 1988.
- [9] 裴鹿成. 计算机随机模拟 [M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1988.
- [10] Tuttle M E, Brinson H F. Prediction of the long-term creep compliance of general composite laminates [J]. Experimental Mechanics, 1986 (1): 89~ 102.

(责任编辑: 龚士杰)

(上接第 56 页)

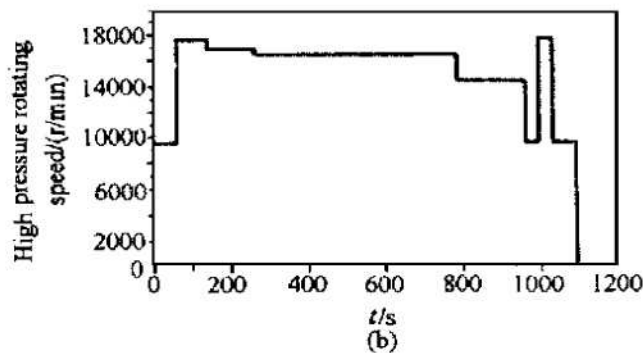
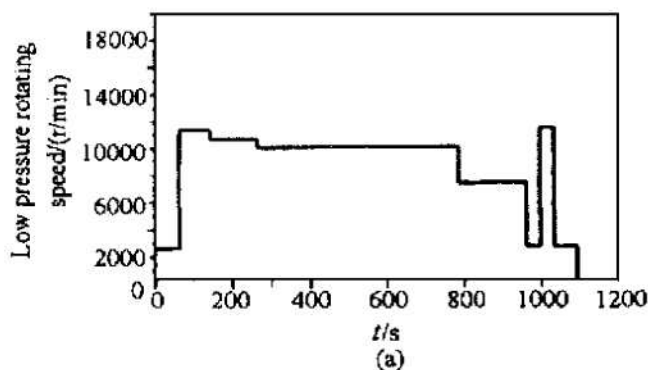


Fig. 4 Rotating speed spectrum containing one idle-maximum idle cycle

(a) Low pressure rotating speed spectra

(b) High pressure rotating speed spectra

5 结 论

发动机飞行综合载荷谱是其应力分析和寿命研究的基础。本文详细阐述了某型发动机航线类综合载荷谱的推导方法。将该发动机 5 种飞行练习和地面功能检查试车任务进行综合, 在保证原始谱和综合谱循环数相同、各功率状态持续的时间相同以及主要的功率状态的变化顺序相同的原则下, 得到航线类综合任务谱。然后根据发动机的高度-速度特性和飞行高度与速度计算出该发动机的航线类转速谱。

参 考 文 献

- [1] Troha W, Stabrylla R. Effects of aircraft power usage on turbine engine relative durability and life [R]. AIAA 80-1115.
- [2] 宋迎东. 发动机飞行载荷谱的预测 [J]. 航空动力学报, 1997, 13 (1) .
- [3] 宋迎东, 高德平. 教练机发动机加速任务试车谱编制 [J]. 航空动力学报, 1999, 14 (1) .
- [4] 宋迎东. 教练机发动机设计载荷谱推导方法 [J]. 推进技术, 1997, 18 (6) .

(责任编辑: 龚士杰)