

文章编号: 1000-8055(2002)02-0212-05

发动机机动飞行类综合载荷谱研究

宋迎东, 高德平

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 按照疲劳、蠕变以及热冲击损伤等效的原则, 保证实测飞行载荷谱和综合载荷谱主要循环数、各功率状态持续时间以及主要功率状态的变化顺序相同, 推导了某发动机机动飞行类综合载荷谱, 为编制该发动机的加速任务试车谱提供了依据。首先根据空测结果对机动飞行任务剖面进行分类和飞行任务段的识别, 然后统计发动机功率或转速的雨流计数循环以及各载荷状态持续的时间, 并分析次循环对发动机造成的损伤情况, 以决定取舍。将各机动飞行任务的同类任务段和同类载荷循环乘以任务混频后进行加权平均即得到机动飞行类综合载荷谱。最后根据发动机的高度—速度特性计算出发动机的工作参数谱。

关键词: 飞行任务剖面; 载荷谱; 机动飞行; 航空发动机

中图分类号: V 231.91

文献标识码: A

Aeroengine Composite Maneuver Loading Spectrum Derivation

SONG Ying-dong, GAO De-ping

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

Abstract: According to the principle of equal fatigue, creep and thermal impact damage, namely the amounts of main loading cycles, loading duration and the sequence of loading turns are equal in measured loading spectrum and composite loading spectrum, this paper derived an aeroengine's composite maneuver flight loading spectrum, which provides the basis of formulating accelerated mission test spectrum. Firstly, according to the measured data, the mission profiles are categorized and the flight mission segments are identified. Secondly, the rain-flow count loading cycles and the loading duration are obtained by statistical calculation and the damage of the partial loading cycles is analyzed. After averaging the same flight segments by multiplying mission mix rates, then the weighted mean profiles can be obtained, which represent the composite maneuver flight loading spectrum. Finally, the working loading spectra are calculated from altitude-velocity characteristic, flight altitude and flight velocity.

Key words: flight mission profile; loading spectra; maneuver flight; aeroengines

1 引言

航空发动机的实际飞行任务千变万化, 军用发动机的训练和作战飞行任务少则十几种多则可

所有的飞行任务下进行发动机的应力和寿命分析, 特别是在编制加速任务试车谱时, 往往要将所有的飞行任务剖面合成一种或者几种综合任务剖面^[1,2], 然后以此为基础开展应力、寿命以及编谱工作。本文在外场调查和空测的基础上, 对某发动机的机动飞行任务进行了分析与综合, 获得了两

收稿日期: 2001-04-24; 修订日期: 2001-07-03

作者简介: 宋迎东(1969-), 男, 安徽太湖人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 博士

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 某发动机机动飞行任务的一般特征分析及分类

2.1 机动飞行剖面的一般特征

根据某飞机的飞行训练大纲知:典型的机动飞行练习包括简单特技、复杂特技、空战等 11 种。为了推导综合任务谱,空测了这 11 种机动飞行任务的剖面,测量参数包括飞行高度、飞行速度、发动机转速、涡轮后温度以及飞行法向过载,并根据该机在部队 5 年的使用数据统计了其飞行任务混频。空测的结果表明^[3],这些飞行练习的高度、速度范围一致(飞行高度均为 2000~4000 m,飞行速度均为 400~750 km/h)。机动飞行练习的起飞和降落段与起落航线飞行类似,起飞段包括暖机、起飞地面滑跑、爬升。降落段包括返航、下滑以及着陆滑跑,反映在发动机功率状态上变化趋势相同。但到达空域后则进行与航线类完全不同的各种复杂的机动飞行动作,不同的飞行练习由不同的机动飞行动作系列组成。

2.2 飞行任务的分类

结合飞行训练大纲以及实际测量的飞行任务剖面,根据机动飞行任务段开始机动动作的不同,该发动机 11 个典型的机动飞行练习可以分为两类。一类是以大坡度盘旋动作开始,表现在发动机功率状态上为最大状态,随后功率状态在慢车和最大状态间交替变化,形成典型的慢车—最大—慢车循环。该类练习包括表中的 1~8 号。另一类为 9~11 号,它们以半滚倒转开始机动飞行,表现在功率状态上为慢车状态,随后功率状态的变化与第一类相似,即在慢车和最大状态间交替变化,形成典型的慢车—最大—慢车循环。

2.3 机动飞行任务段的识别方法

在机动飞行类实测转速或油门谱曲线中暖机、地面滑跑、爬升、达到预定空域后的巡航段、返航和下滑、着陆段可以直接区分出来,而从盘旋或半滚倒转开始的机动飞行段,其飞行动作则难以区分,必须结合其它飞行参数才能确定其具体的动作。由于所有的机动飞行动作的组合反映在发动机功率状态或转速曲线上都是慢车—最大状态的反复变化,因此,结合高度和速度曲线就可以确定机动飞行动作的起迄点。本文下面的研究中首

先确定出一个飞行练习中机动飞行任务段,然后对机动飞行任务段中的最大状态和慢车状态进行统计分析。

3 机动飞行类综合任务谱的推导

3.1 推导原则

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。根据疲劳和蠕变理论: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等油门杆位置急剧变化的过程中。由于目前尚难以准确测量或计算发动机零件在实际飞行过程中的瞬态温度场,而它对发动机零部件的寿命影响却较大,因此本研究中以保持慢车—最大—慢车循环的数量以及其中的慢车和最大状态的持续时间与外场相一致来到达瞬态温度场造成的热冲击的一致性。这样,综合谱和实际飞行任务谱之间只要保证:

- (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。
- (4) 慢车—最大—慢车循环中慢车与最大状态的保持时间与外场的统计平均值保持一致。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 4 个原则就可以由空测结果导出综合任务谱。

3.2 次循环损伤分析

该发动机的航线类飞行中,功率状态变化平缓,任务剖面中只有 0—最大—0 和慢车—最大—循环^[4]。然而,在机动飞行载荷谱中,不仅存在由于机动飞行动作引起的慢车—最大—慢车循环,而且常常有其它幅值较小的次循环。首先采用文献[5]中的计算程序,对该发动机使用任务循环进行了统计,得到机动飞行时各类转速循环的统计结果,包括 0—最大—0 循环、巡航—最大—巡航、慢车—最大—慢车循环以及其它各类循环。选取该发动机的高压压气机盘,进行次循环的低周疲劳损伤计算,计算步骤与方法为:

- (1) 对压气机盘进行各种转速次循环下的应力分析,得到工作温度下的应力循环。
- (2) 将各种状态下的应力循环转化为参考温

表 1 机动飞行练习任务段的持续时间(单位: s)

练习 序 号		混频	暖机(地 面慢车)	爬升(最 大状态)	爬升(额 定状态)	巡航	机动 飞行	返航(空 中慢车)	地面滑行 (地面慢车)	飞行 时间
第一类 机动 飞行	1	14.93	60	53	148	0	884	488	167	1800
	2	21.30	60	60	150	0	509	600	121	1500
	3	2.34	28	32	120	0	1404	216	60	1860
	4	9.80	45	45	210	90	348	492	87	1317
	5	5.26	80	132	220	212	727	480	58	1909
	6	19.70	72	69	210	399	356	364	30	1500
	7	2.75	60	45	135	285	419	511	45	1500
	8	3.90	60	60	180	220	619	501	60	1700
	平均值		61.5	62.5	176.4	143.8	564.4	480.7	91.5	1590
第二类 机 动 飞 行	9	11.80	45	60	180	0	502	638	75	1500
	10	13.48	60	60	148	282	865	500	97	2012
	11	7.40	60	75	165	120	645	240	141	1446
	平均值		54.6	63.4	163.4	143.5	684.1	491.0	99.0	1665

度(本研究选取室温为参考温度)下的等效应力循环,则参考温度下等效的应力为^[6]:

$$\sigma_{T_0} = \sigma_T \frac{\sigma_{b_{T_0}}}{\sigma_{b_T}}$$

式中: σ_{T_0} 为参考温度下的等效应力, $\sigma_{b_{T_0}}$ 为材料在参考温度下的强度极限, σ_{b_T} 为工作温度下材料的强度极限, σ_T 为工作温度下的应力。

(3) 利用该压气机盘材料的 Goodman 图, 将非脉动应力循环转化为脉动应力循环。

(4) 由脉动应力循环下光滑试样的 S-N 曲线和轮心的疲劳分散系数建立轮心危险点的 S-N 曲线。

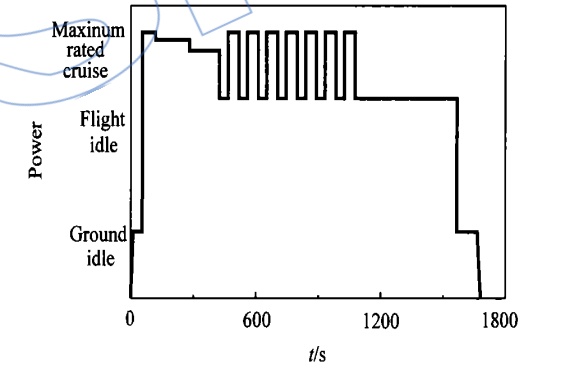
(5) 根据脉动循环下轮心的 S-N 曲线和各非脉动循环对应的脉动循环(由第(3)步得到)计算损伤。疲劳损伤分析结果表明: 与慢车—最大—慢车循环相比, 该发动机的其它次循环需要至少若 110 个以上才相当于一个慢车—最大—慢车循环, 因此次循环损伤可以忽略不计。这样在推导该发动机的综合任务谱时, 就只考虑了慢车—最大—慢车。

3.3 机动飞行综合任务谱

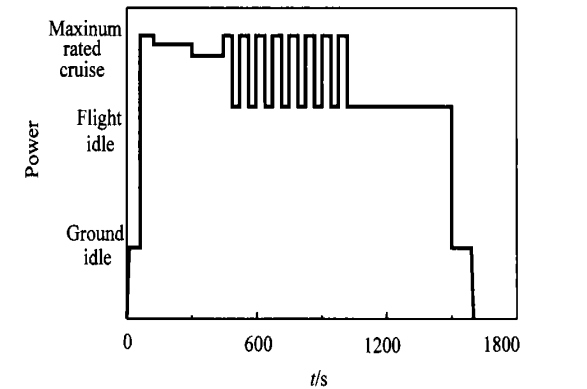
根据实际测量的飞行任务剖面统计得到第一、二类机动飞行练习各任务段的持续时间见表 1, 机动飞行任务段中最大、慢车状态的平均持续时间和平均循环次数见表 2。

由表 1 和表 2 的统计结果得出第一类机动飞

行综合任务谱如图 1(a)所示, 其总任务混频为:



(a) First composite maneuver mission profile



(b) Second composite maneuver mission profile

图 1 机动飞行综合任务谱

Fig 1 Composite maneuver mission profile

$F_{\text{机动 I}} = 79.98$, 一次起落的平均时间为:
 $\overline{T}_{\text{机动 I}} = 1581 \text{ s}$ 。第二类机动飞行综合任务谱为图
1 (b) 所示, 总的任务混频为: $F_{\text{机动 II}} = 32.68$, 一次
起落的平均时间为: $\overline{T}_{\text{机动 II}} = 1665 \text{ s}$ 。

表 2 机动飞行中慢车—最大—慢车循环特征统计			
特征 量	最大状态 平均持续 时间/s	慢车状态 平均持续 时间/s	一次飞行 中平均 循环次数
第一类机动飞行	42	34	7
第二类机动飞行	41	52	7

4 机动飞行综合任务谱对应的 发动机工作参数谱

发动机工作参数的计算采用了作者在文献
[7]提出的方法, 即通过飞机质心运动方程以及发
动机特性计算得到发动机的飞行载荷谱。根据该
发动机的高度—速度特性可以得到两类机动飞行
综合任务谱对应的转速谱如图 2 和图 3, 其中特

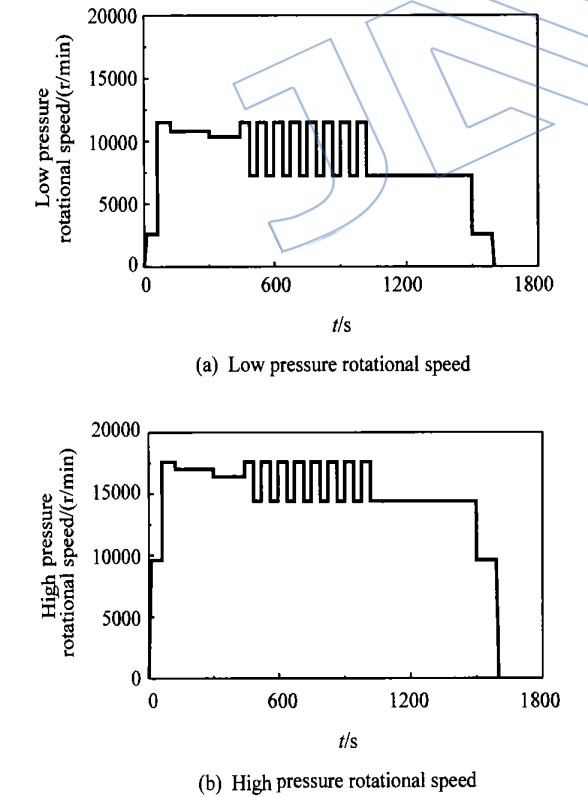


图 2 第一类机动飞行综合任务谱对应的转速谱
Fig 2 Corresponding rotational speed spectrum
of first composite maneuver mission profile

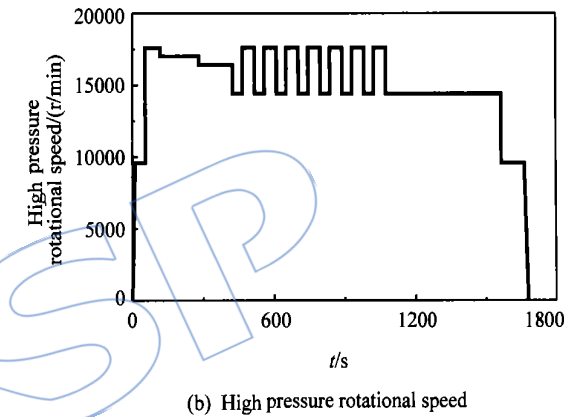
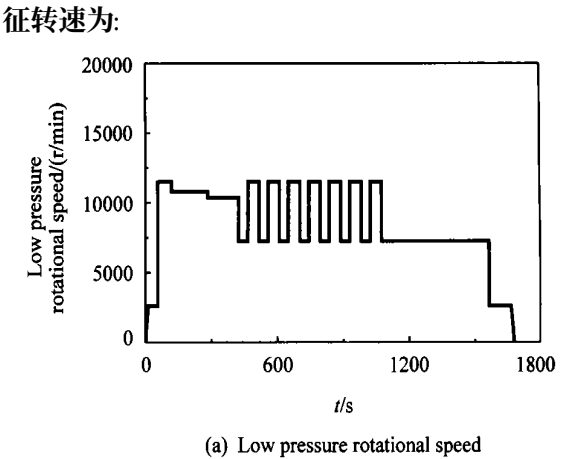


图 3 第二类机动飞行综合任务谱对应的转速谱
Fig 3 Corresponding rotational speed spectrum of
second composite maneuver mission profile

- (1) 地面慢车转速: 高压 9600 r/min, 低压 2600 r/min;
- (2) 空中慢车转速: 高压 14400 r/min, 低压 7250 r/min;
- (3) 最大转速: 高压 17600 r/min, 低压 11500 r/min;
- (4) 巡航转速: 高压 16400 r/min, 低压 10360 r/min;
- (5) 额定转速: 高压 17000 r/min, 低压 10800 r/min。

5 结 论

根据等损伤的原则, 机动飞行类综合载荷谱
推导的步骤可以归结为:

- (1) 对实测的飞行任务剖面进行分析, 根据
飞行动作的不同加以分类。
- (2) 所有机动飞行任务的起飞段和降落段均
相似, 直接乘以任务混频后取平均值作为综合任

务谱的起飞与降落段。

(3) 根据发动机功率剖面或转速剖面, 结合飞行高度与飞行速度剖面确定机动飞行任务段。

(4) 统计机动飞行段内最大—慢车—最大循环数和最大与慢车状态持续的时间。

(5) 分析次循环的损伤, 并判断其所研究的发动机是否可以忽略。

(6) 求出机动飞行任务段内慢车—最大—慢车循环的平均次数与平均持续时间作为综合任务谱的机动飞行任务段的取值。

(7) 由平均起飞段、平均机动飞行段、平均降落段构成机动飞行综合任务谱。

(8) 最后根据综合任务谱确定发动机的工作参数谱。

参考文献

[1] Troha W, Stabrylla R. Effects of Aircraft Power Usage on

Turbine Engine Relative Durability and Life[A] AIAA-80-1115, AIAA/SAE/ASME 16th Joint Propulsion Conference[C] Hartford, Connecticut, 1980

[2] 宋迎东, 高德平, 林宏镇, 等. 教练机发动机加速任务试车谱编制[J]. 航空动力学报, 1999, 15(1): 47- 50

[3] 宋迎东, 高德平. 教练机发动机加速任务试车谱编制研究[R]. 南京: 南京航空航天大学, 1998

[4] 宋迎东, 高德平. 发动机航线类综合载荷谱研究[J]. 推进技术, 2000, 21(4).

[5] 宋迎东, 尚伟钧, 高德平. 航空发动机设计任务循环预测的计算机程序设计[J]. 航空动力学报, 1996, 11(2): 189-191

[6] EGD-3 斯贝MK202 发动机应力标准[S].

[7] 宋迎东. 航空发动机飞行载荷谱预测[J]. 航空动力学报, 1997, 12(1): 89- 91

(责任编辑 王震华)