

美国加速任务试车技术在军用航空发动机上的应用

Application of American Accelerated Mission Test Technology in Military Aero-engine

刘振岗¹ 周凯¹ 邹刚¹ 叶广宁²

1 海军航空工程学院青岛校区 2 海军驻西安地区航空军事代表室

摘要: 加速任务试车 (AMT) 是目前国外研究军用航空发动机耐久性的标准试验, 是发动机寿命管理的重要方法。本文以美国F404-GE-402发动机、F110-GE-100发动机为例, 介绍了AMT技术在发动机设计验证、部件改进、寿命管理、维修计划等方面的具体做法, 对有效提高我国发动机型号研制的风险管理与控制能力和实现发动机的高可靠性具有重要的研究与借鉴价值。

Abstract: As a standard test, the accelerated mission test (AMT) is currently used for the research of military aero-engine durability abroad. It is an important method of engine life management. Based on the development of F404-GE-402 engine and F110-GE-100 engine in American, this paper introduces the specific practices of AMT technology in the engine design verification, component improvement, life management, maintenance plan and other aspects, which has important research and reference values for effectively improving risk management and control ability of our engine model development and achieving high reliability.

关键词: 军用航空发动机; 加速任务试车; 可靠性

Keywords: military aero-engine; accelerated mission test; reliability

0 引言

长久以来,国内外发动机研制均采用1:1模拟任务持久试车的方法,而对型号的验收批准则采用标准的150h持久试车^[1]。实践证明,该方法不能真实反映发动机实际用法,因而无法提前暴露因正常使用而产生的大量损伤和故障,对使用中故障的预判、寿命的控制、飞行安全的保障存在滞后性^[2];航空发动机定型后批量装备部队,一旦某个重大故障(问题)出现,将导致发动机大面积停飞,会造成无可估量的损失。同时,试车程序资源代价巨大,且针对性不强,对型号的批准和寿命的预估借鉴意义有限。

为避免上述的问题,国外技术先进

的国家相继在军用航空发动机的研制上采用加速任务试车(AMT)技术。其核心就是一种耐久性试车技术,能使发动机的外场使用与工厂台架试车之间建立某种良好的关系,通过对故障模式损伤的加速,在外场使用出现一系列严重问题之前,在工厂试车台上可靠地暴露发动机故障,从而实现提前暴露问题、改进结构、验证更改、评估寿命、指导维修等期望。更为重要的是,由于试车进程的缩短,试验能在短时间(一年或数年)内获得相当于外场发动机十年甚至几十年使用“老化”所产生的故障模式、发展趋势和极限数据。这些宝贵的数据可以在发动机大量正式采购之前或者是发动机服

役的早期用于设计改进(包括材料)、工艺改进和寿命预估,提高型号研制的进程效率和经费效率,控制研制风险^[3]。

美国通用电气(GE)公司在研制F404-GE-402发动机和F110-GE-100发动机时,根据研制大纲和“发动机型号衍生计划”的要求,采用AMT技术对在研发发动机进行加速任务试车,取得了良好的效果。

1 F404-GE-402发动机的AMT

F404-GE-402发动机是双转子低涵道比涡轮风扇发动机,用于F/A-18飞机。其在设计思想上以高可靠性为优先追求的目标,并在发动机研制大纲中增加了进行AMT的明确要求。在该型

发动机完成飞行前的合格试验之后,就开始了AMT试车。

由于在研制初期,精确的飞行任务及其任务混频(在整个寿命期内发动机执行各种任务占总任务的比例)是得不到的。在这种情况下,利用发动机型号规范中推荐的设计工作循环和研制任务书中规定的飞行任务可确定初始的AMT循环。随着试飞实践的不断增长,结合对飞行人员、地勤人员的调查以及对部队飞机使用计划、发动机利用率的了解,反复修正并验证AMT循环,使之日趋完善,最终设计出的F404-GE-402发动机AMT循环如图1所示。

这是一个时长为36min的综合循环,包括一个低循环疲劳循环和九个完整的热循环,加速系数(也称苛刻性系数)为3.3:1,涵盖了F/A-18飞机的攻击、战斗机护航、舰上起降、空中转场等

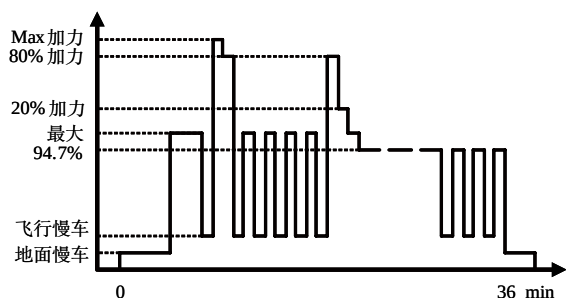


图1 F404-GE-402发动机的AMT循环

表1 F404-GE-402发动机的AMT与实际使用任务的比较

小时或循环次数	加速任务试车	实际使用任务	说明
总工作时间(h)	1200	4000	按每年飞250h推算,相当于在外场使用16年
加力时间(h)	111	112	加力考核状况完全一致
中间功率状态以上时间(h)	319	178	中间功率状态以上时间超出近一倍,苛刻度增加,损伤加速
95%以上时间(h)	633	614	大工况考核状况完全一致
0—100%—0(次数)	2000	2000	低循环疲劳考核状况完全一致
慢车—中间功率状态—慢车(次数)	12000	4208	中间功率状态以上时间超出近三倍,苛刻度增加,损伤加速
全部热态循环(次数)	15000	6208	热负荷考核超出一倍以上,苛刻度增加,损伤加速
主要热态循环总数(次数)	20000	19642	大工况热负荷考核状况完全一致
油门杆角度移动(次/h)	43	105	实际使用中有些油门杆角度移动对发动机使用无损伤

典型任务。表1列出了F404-GE-402发动机的AMT与实际使用任务的比较,可以看出,AMT技术在准确反映外场服役使用和实现发动机加速“老化”之间实现了完美的平衡。

在F404-GE-402发动机全尺寸研制过程中,采用5台发动机进行了累计3000h以上的各种加速任务试车,通过期间的监控检查和不间断试车,得出的损伤模式与外场用于领先飞行的12台发动机出现的损伤模式高度吻合。这些试验提高了部件改进的针对性,为贯彻设计更改赢得了时间,从而为该发动机实现高可靠性奠定了坚实的基础。

2 F110-GE-100发动机的AMT

F110-GE-100加力涡轮风扇发动机是由GE公司按美国空军制定的“发动机型号衍生计划”,在F101发动机基础上衍生研制的一种战斗机发动机。该发动机在研制计划一开始就着眼于耐久性、适用性和性能三者之间的平衡。

F110-GE-100发动机的AMT是在F101

发动机AMT二次改进的基础上,根据美国空军新给定的战斗机任务混频而重新设计的。美国空军新给定的F101发动机任务混频见表2。

F110-GE-100发动机的AMT循环包括6种独立的油门杆循环(见图2至图7),分别是:三种典型的战斗机作战任务——空中格斗、空对地攻击和低空高速突防;二种典型的地面循环,对应于发动机的地面检查调整;一个周期为32h的台阶型高循环疲劳试车,可以使发动机各部件在工作转速范围内出现的所有频谱上经受考验。为了保证有足够的循环使潜在的损坏形式暴露出来,在每个递增的转速上要停留足够长的时间。

F110-GE-100发动机的整个AMT试车是在变化的进气空气温度条件下进行的,循环总数的1/3在环境温度下运转,1/3在90°F下进行,另外1/3在110°F下进行。低空高速突防循环是在GE公司的高空冲压试验室进行,进口加压到24.56psi,加温到143°F。为了模拟飞行中的使用条件,在试车时从发动机提取功率并引气。

在这项AMT试车计划中,所选用的—台F110-GE-100发动机历经约一年半的时间成功地达到了最大累积循环数,总共完成了5004个TAC循环。TAC循环又叫战术空军司令部循环^[4],它反映大多数发动机部件的平均苛刻性,其定义为:

$$TAC = LCF + (FTC - LCF)/4 \quad (1)$$

式中:LCF——低循环疲劳循环,即停车—最大不加力状态—停车;

FTC——全热循环,即慢车—最大

表2 F101发动机任务混频

任务	使用占比(%)	出击架次	续航时间(min)
空对地	45	409	132
空中格斗	44.2	431	123
功能检查	2.8	60	56
试车台试车	8.0	95	98.9
总计	100	900	

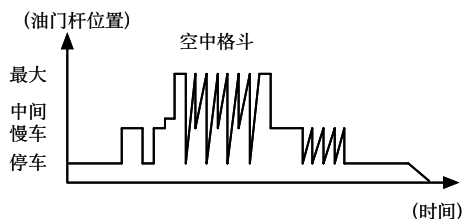


图2 237个31min循环

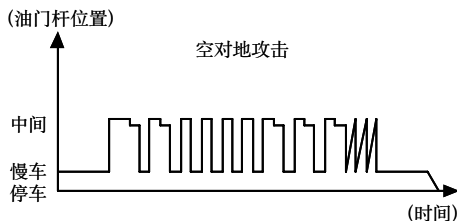


图3 217个38min的循环

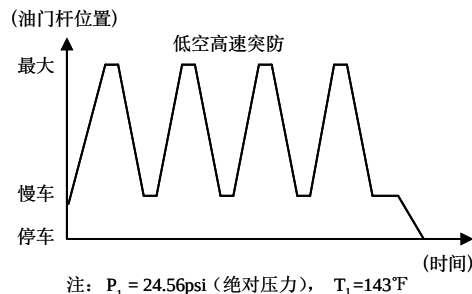


图4 43个17.5min的循环

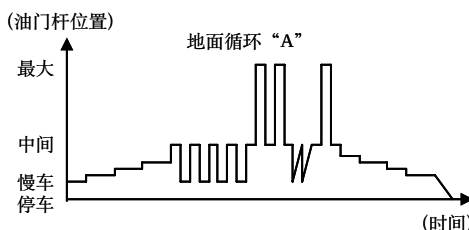


图5 29个71min的循环

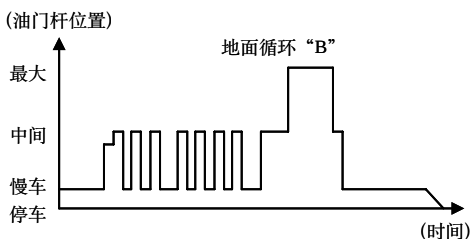


图6 16个53min的循环

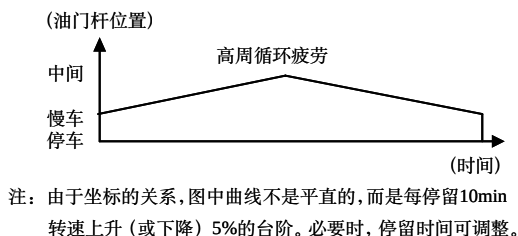


图7 32h一个周期的循环

不加力状态—慢车。

按战斗机现行的平均用法, 每发动机飞行小时近似为2个TAC循环, 这5004个TAC循环相当于战斗机外场服役10年以上。在AMT试车程序中, 这台发动机进行过两次计划中正常的分解检查; 完成试车后, 又进行了一次分解检查, 以进行工程测量和接受相关批准部门的确认。试车的主要参数见表3。

在整个5004个TAC循环试车期间, 发动机没有更换任何热端关键零件, 只有喷管的次级封严片和鱼鳞片损坏进行了更换, 到试车结束时, 机件的状况良好, 全部涡轮部件仍然可用。由于燃烧室、涡轮、加力燃烧室和喷管体现了良好的可靠性和低故障率, 意味着发动机返厂率很低, 也意味着维护工作量大为降低, 进而使得维护费用接近于军方给定

表3 发动机试车的主要参数

工作状态	第一次分解	第二次分解	第三次分解	总计
AMT循环(次数)	543	458	249	1250
LCF循环(次数)	565	488	436	1489
FTC循环(次数)	6497	5936	3118	15551
最大推力状态时间(h)	127.25	117.65	168.82	413.72
总运转时间(h)	430.55	340.68	374.82	1119.05
持久试车时间(h)	353.88	282.85	138.00	774.73
加力工作时间(h)	27.22	20.98	73.30	121.50
加力循环(次数)	2157	1950	709	4816
起动(次数)	579	509	470	1558
TAC循环(次数)	2048	1850	1106	5004

的指标水平。同时, 通过以上数据, 再借助于发动机部件预计的可靠性增长曲线, 可以得到(或验证)合理的维修计划和寿命管理目标。

3 结束语

AMT技术是一种能够实现对在研发动机进行充分、有效考核的工具和手段, 可显著增强发动机型号研制的风险管理与控制能力, 同时能够提升部队管装、用装的预见性和针对性, 具有良好的军事作用和经济效益。结合我国航空工业的发展现状和现行的军品科研管理体制, 在总结国内院所、工厂开展加速任务试车探索经验的基础上, 统筹安排, 开展AMT技术的规划、攻关和发展十分必要。

AST

参考文献

- [1] 于宏军, 朱瑾等. 航空发动机加速任务试车标准研究[J]. 航空标准化与质量, 2012, (4): 7-9.
- [2] 叶广宁. 航空发动机加速任务试车[J]. 航空科学技术, 1998, (4): 22-24.
- [3] 程卫华, 雷友锋等. 航空发动机加速任务试车方法初步研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, (1): 7-10.
- [4] 陈益林. 航空发动机试车工艺[M]. 第一版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 211-212.

作者简介

刘振岗, 硕士, 副教授, 主要从事航空装备的教学与科研工作。