

航空发动机交付模式及标准分析

Aero Engine Delivery Mode and Its Standard Analysis

肖金彪 张晓爽 单晓明 / 中国航发动研所

航空发动机的交付是航空发动机由生产转向使用的重要环节，是涉及多专业的系统工程，难点繁杂，需多个专业的技术、技能人员通力合作，交付模式及其标准的优化和制订在其中发挥了至关重要的作用。

根 据国军标（GJB）241A—2010和242A—2018的要求，在航空发动机出厂交付用户前，需开展交付验收试车，以向用户证明交付的航空发动机产品满足相应的验收要求。航空发动机的具体交付验收要求一般通过航空发动机的出厂验收要求进行规定，按要求的最少装试次数不同，航空发动机交付模式一般分为“两装两试”和“一装一试”。

相关标准分析

目前国际上通用的航空发动机交付模式标准要求主要集中在航空发动机通用规范方面，具体以美国军用标准JSGS-87231A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范》和JSSG-2007《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》系列为主。

在JSGS-87231A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范》中，未出现与发动机检验交付试车直接相关的内容，仅在“4.10.2.2 质量符合性检查”中要求使用部门可对试验件和试验设备进行检查，包括实物和资料检查，未对检查细节提出要求。

在JSSG-2007《航空涡喷涡

扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》中，对应的章节主要为“附录B 批生产发动机验收试验手册”，并在“B.4.13.5 试车程序”中规定“验收试车应该由下述规定的初始运转和最终运转组成”。同时，在“B.4.13.5.1.1 初始运转后检查”中，要求“初始运转完成后，实施抽样分解计划时，选择计划要分解的发动机……倘若出现某一零件有缺陷，则用批准的零件更换。并且按使用部门的判断意见，应进行适当时间的惩罚性运转”（对惩罚性运转，国内一般使用附加运转进行表述）。另外，在“B.4.13.5.2 最终运转”中，要求“已按B.4.13.5.1.1 分解和检查的发动机，应进行最终运转”。

根据上述要求，发动机检验交付试车主要包括初始运转、惩罚性运转和最终运转，且通过抽样计划，对抽中的发动机进行“两装两试”，其余发动机进行“一装一试”。在JSSG-2007A和JSSG-2007B中，上述要求（尤其是检验交付试车的具体程序）基本未发生变化。

我国航空发动机交付模式要求相关的标准主要为GJB 241A—2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》和GJB 242A—2018《航

空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》，分别规定了涡喷涡扇发动机和涡轴涡桨发动机的交付验收试车要求，具体章节为“4.4.4 A组检验”，且GJB 241A—2010和GJB 242A—2018对此要求差异较小。

在GJB 241A—2010和GJB 242A—2018中，A组检验要求的试车程序主要包括初步运转（工厂试车）和最终运转（检验试车），并在初步运转后进行分解检查，视情（根据分解检查过程中发现的缺陷等问题以及进行的零组件更换）进行附加运转，附加运转后再次分解检查，最后进行最终运转。在具体的运转程序（试车谱）方面，初步运转和最终运转要求相同，附加运转根据需要决定，最长的附加运转可完全重复初步运转。

在GJB 241—1987和GJB 242—1987的“4.7 验收试车”中，相较GJB 241A—2010和GJB 242A—2018，多出了“4.7.7 抽样计划”要求，即如实行抽样计划，对抽选的发动机进行初始运转和最终运转，其余发动机仅进行最终运转。同时，在GJB 241—1987和GJB 242—1987对应的使用指南GJB/Z 216—2004《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用

规范使用指南》和GJB/Z 225—2005《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范使用指南》中，对实行抽样计划的前提条件要求为：发动机设计技术成熟，生产质量稳定，整机性能有确实的保证；发动机生产的批量要很大；原材料生产、装配、成附件供应、试验各环节有良好的质量保证体系。

根据上述标准内容，可以看出在美国军用标准中，从JSSG-2007开始即要求通过抽样计划进行“一装一试”；在我国的标准规范中，GJB 241A—2010和GJB 242A—2018要求进行“两装两试”，GJB 241—1987和GJB 242—1987要求按抽样计划进行“一装一试”，且在对应的使用指南中给出了进行“一装一试”的前提条件。

交付模式现状

目前国际上航空发动机的交付模式以“一装一试”为主，如法国赛峰集团的阿赫耶（Arriel）系列、阿蒂丹（Ardiden）3C/涡轴16发动机和美国F100、F110、F119涡扇发动机，以及加拿大的PT6发动机等。但也有发动机采用“两装两试”交付模式，如俄罗斯的AL-31F系列涡扇发动机、D-30系列涡扇发动机、117S涡扇发动机和TV7-117V涡轴发动机等。同时，美国的T700发动机在型号规范中要求“每台交付的T700-GE-701A发动机应进行验收试车，它由程序A或程序B中规定的试验组成。开始，按合同中质量规划所规定的，一定数量的发动机应按程序A试验验收，直至批准使用程序B为止”。其中，程序A为“两装两试”交付模式，程序B为“一装一试”交付模式。国内航

空发动机的交付模式目前以“两装两试”为主，但也有部分型号采用“一装一试”，如对法合作的涡轴16发动机等。

交付模式对比

按GJB 241和GJB 242中的验收试车要求，加上发动机初步运转前的发动机装配，在不考虑按需的附加运转及其分解检查的情况下，在初步运转和最终运转时均需开展一次装

配和一次试车，整个验收试车程序需开展2次装配和2次试车（不包括按需的附加运转及其分解检查和装配），一般称为“两装两试”交付模式，具体流程如图1所示。

在“两装两试”交付模式的基础上，除了按需的附加运转以外，仅进行初步运转（JSSG-2007B和T700型号规范要求）或最终运转（GJB 241—1987和GJB 242—1987要求），并在完成试车运转后不进行发动机分解，仅进行整机原位检查，即在不包括按需的附加运转及其分解检查和装配的情况下，仅需进行1次发动机装配和1次试车，一般称为“一装一试”交付模式，具体流程如图2所示。

对比两种交付模式，主要差别在于第一次发动机运转后，不再进

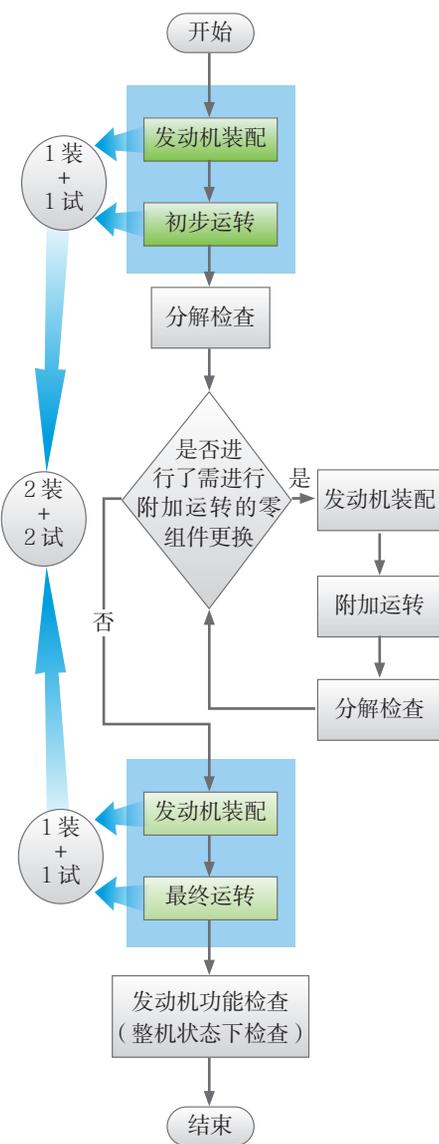


图1 “两装两试” 交付模式

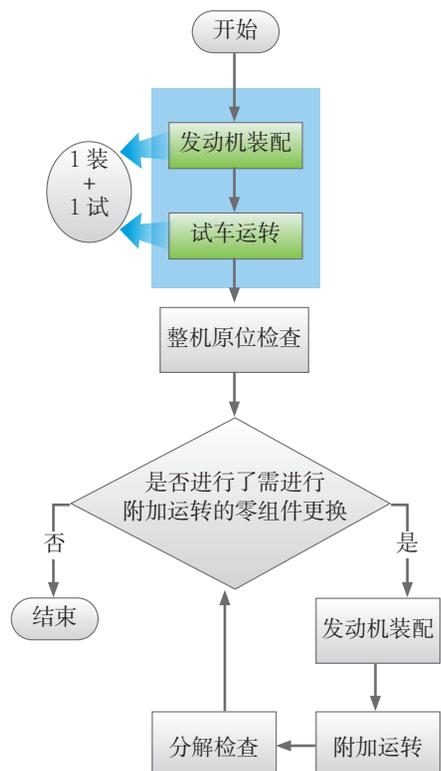


图2 “一装一试” 交付模式

行分解检查，而是仅进行整机原位检查。同时，由于“一装一试”仅进行一次发动机试车运转（不包括附加运转），不需区分初步运转和最终运转，且根据已有标准要求和工作经验，“一装一试”下的发动机试车运转（不是附加运转）可能是初步运转程序或最终运转程序或两者结合优化的运转程序，因此在图2的“一装一试”交付模式中将附加运转以外的发动机运转称为试车运转。

通过上述两种交付模式的对比，可以发现“一装一试”相较“两装两试”可以缩短交付周期，提高交付效率，降低生产成本，同时避免了发动机再次分解和装配过程中可能发生的零件磕碰、划伤、薄壁件变形、零组件复位和配合不达标、轴承拉伤、齿轮啮合等质量问题和不利影响。“两装两试”相较“一装一试”可以通过初步运转后的分解检查发现更多问题，并尽量避免将其带到外场，进而更加有效地保证交付质量。

交付模式优化和转变

优化和转变思路

根据对“两装两试”和“一装一试”交付模式对比分析，两者的主要差异在于首次装配试车（初步运转）后是否需进行分解检查。

在发动机质量尚不稳定（或尚未通过足够的发动机台份样本量证明发动机质量稳定性）时，通过“两装两试”交付模式中的分解检查可以尽可能多地发现发动机内部零组件早期问题（由于验收试车的运转时数限制，仅能发现发动机使用早期问题，且由于检查方法限制等因素，不能确保早期问题100%地发

现），进而提高交付发动机的质量水平。但随着发动机质量稳定性的不断提高和发动机检查方法的不断优化，通过验收试车中初步运转后分解检查发现问题不断减少（直至发现的问题不会影响后续外场使用）或均可通过整机原位检查进行发现（如在整机原位检查时发现存在缺陷的零组件，且需通过发动机分解才能具体定位或替换时，仍需进行相应的发动机分解），此时再进行初步运转后的分解检查及其后的最终运转则不会得到相应的收益，反而会有可能由于发动机分解导致缺陷零组件的增多，此时宜转变为“一装一试”交付模式，以降低发动机交付成本，提高发动机交付效率。

同时，在采用“两装两试”交付模式时，如发现通过初步运转后分解某部件/单元体的检查未发现问题或发现的问题均可通过整机原位检查进行发现，则可优化发动机分解检查程度；或对某一检查项目，一直未发现问题，则可取消该检查项目或改为抽样检查，进而优化已有交付模式。

同时，为更好地识别和分析上述交付模式优化和转变时的相关问题，考虑到上述分解检查发现的问题是在发动机初步运转（根据实际情况还需加上相应的附加运转）后通过分解检查发现的，为此同步收集发动机外场早期（具体时间主要参考发动机验收试车允许的最长运转时数）使用时发现的问题，并参考上述分解检查时发现的问题进行分析，以更充分地分析交付模式优化和转变时的相关问题。

问题分析

在完成初始数据（包括初步运

转后分解检查发现的问题和外场早期使用发现的问题）的收集后，需对问题项开展进一步筛查分析，排除下述问题项：一是与交付模式优化和转变无关的问题项，即两种交付模式均可发现或均不能发现的问题项；二是可通过整机状态下检查发现的问题项，包括通过对现行的交付验收试验要求进行修改，增加整机状态时的检查项目或采用新的检查工具和检查技术后能发现的问题项，必要时可开展相应的验证；三是已通过问题攻关或发动机质量提升解决的问题项，必要时可开展相应的验证；四是仅由于初步运转后的分解导致的问题项，即如不进行初步运转后的分解检查，则不会发生的问题项。

排除上述问题项后，对影响交付模式优化和转变的问题项进行分析评估，具体可从问题项的发生概率和后果严酷度等方面进行，并综合发现的问题项，评估各单元体/部件和发动机整机的交付模式优化和转变风险。

根据上述分析评定结果提出交付模式优化和转变方案。同时，为进一步证明交付模式优化和转变的可行性，可通过抽样的形式进行交付模式的逐步过渡。上述问题分析流程如图3所示。

前提条件分析

综合上述分析，结合GJB/Z216—2004和GJB/Z 225—2005中实行抽样计划的前提条件要求，在进行交付模式优化和转变分析时，需收集发动机初步运转后分解检查发现的问题和外场早期使用发现的问题（问题数量和发动机台份数应有一定的数量，以保证问题发生概率分析的

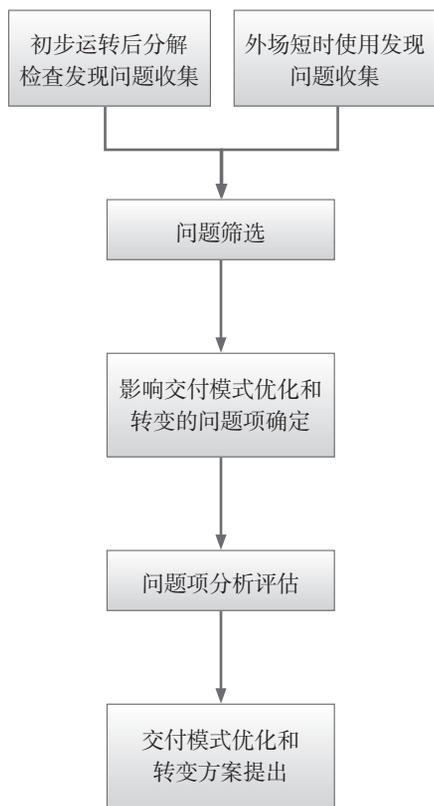


图3 问题分析流程

准确性), 且需保证发动机设计成熟和交付质量具有一定的稳定性(如设计成熟度不足或交付质量不稳定, 则不具备分析问题发生概率的前提条件)。因此, 交付模式转变一般在状态鉴定审查后的小批量试生产产品交付一定的数量之后开展, 对改型发动机或引进生产、合作研制等有相应技术基础的发动机, 在分析确认发动机交付质量不受发动机改型的较大影响的前提下, 也可将改型的上述发动机问题数据作为改型后的发动机问题数据一并开展分析, 即在改型发动机的科研阶段或小批量试生产产品开始交付时即开展交付模式研究工作。

在进行发动机交付模式优化和转变分析时, 交付质量稳定性和一定批量的交付是前提, 且抽样比例

确定后, 也需根据交付质量变化进行相应的更新, 为此在进行交付模式优化和转变分析时, 宜按不同时间段进行分阶段分析和评定, 以体现和研究交付质量随产品交付时间的变化。

基于抽样的交付模式优化和转变分析

在通过上述前提条件分析和问题分析评估确定航空发动机具备交付模式优化和转变的条件后, 为进一步降低交付模式优化和转变后可能带来的风险, 参考国内外标准中的相关抽样要求, 可通过抽样进一步证明交付模式优化和转变能力。即通过抽样计划选择一部分发动机执行原有的交付模式, 另外一部分发动机执行优化和转变后的交付模式, 通过监控两种交付模式下的发动机交付验收试车过程中相关数据以及外场短时使用数据和长时间使用表现, 证明发动机进行交付模式优化和转变的能力。

同时还可根据上述监控数据, 不断调整抽样比例, 最终逐步过渡到100%比例的“一装一试”交付模式。

结束语

通过收集、梳理和分析影响交付装试模式优化和转变的问题项, 对可开展交付模式转变的型号, 可以通过交付模式的转变实现基于抽样的发动机“一装一试”交付, 进而缩短交付周期, 提高交付效率, 降低生产成本; 对尚不能进行交付模式转变的型号, 可以通过上述问题项的梳理分析, 为型号后续的质量提升改进提供方向, 同时还可以通过完善检测项目和发动机分解程度,

进而优化交付验收试车程序。因此, 建议对已具备交付模式优化和转变前提条件的型号, 开展交付模式优化和转变研究; 对尚不具备交付模式优化和转变前提条件的型号, 开展发动机分解检查步骤和检查项目要求研究, 并提前和用户方协调, 为后续交付模式优化和转变的顺利开展奠定基础。

航空动力

(肖金彪, 中国航发研研所, 高级工程师, 主要从事航空发动机试验与测试研究)

参考文献

- [1] 中国人民解放军总装备部. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241A—2010[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010.
- [2] 中国人民解放军总装备部. 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范: GJB 242A—2018[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2018.
- [3] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241—1987[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会军标出版发行部, 1987.
- [4] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范: GJB 242—1987[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会军标出版发行部, 1987.
- [5] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范使用指南: GJB/Z 216—2004[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会军标出版发行部, 2004.
- [6] 国防科学技术工业委员会. GJB 242—1987 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范使用指南: GJB/Z 225—2005[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会军标出版发行部, 2006.