

FADEC软件质量数字化和可视化技术研究与应用

Digitization and Visualization for FADEC Software Quality

狄名轩 黄耀 朱烨 徐凯健 蔡峰 / 中国航发动控所

随着航空发动机控制技术不断发展，全权限数字式电子控制（FADEC）系统的重要性不断凸显出来。传统的FADEC软件产品研发方式无法直观呈现产品质量，以满足航空发动机不同研制阶段的使用要求。创新团队通过定义数据项将软件质量数字化，并通过每日数据的采集保证质量的可视化。

航空发动机全权限数字式电子控制（FADEC）软件主要呈现出以下几个特点：一是控制权限大，航空发动机约80%的功能由软件参与实现；二是质量问题后果不可接受，FADEC软件在机载软件中为最高安全等级（A级），发现质量问题可能会导致机毁人亡的事故；三是软件变更更多，由于发动机及控制系统的成熟度低，在软件交付后存在大量控制律调整、功能完善等变更。因此，在长达数十年的维护周期中软件会持续变更，如何保证技术状态对齐和高质量交付，是FADEC软件面临的重要挑战。针对上

述问题，创新团队研究民机软件适航审定标准（DO-178C），本地化定义软件产品的最终质量目标，结合中国航发运营管理体系（AEOS）软件研发流程体系，先将最终质量目标分解到航空发动机每一个研制阶段，形成阶段质量目标；再将阶段质量目标进一步细化到每人每天的工作中，让质量成为每天能交付、能检查、能累积的实物。

高质量目标的定义与分阶段实施

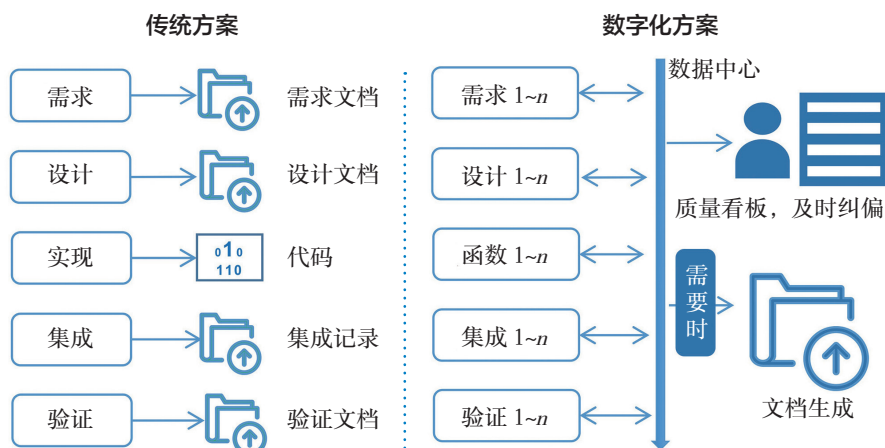
20世纪80年代早期，飞机和发动机的机载系统及设备的软件使用量迅

速增长，迫切需要一种被行业接受的指南，以满足适航的要求，美国航空无线电技术委员会（RTCA）适时推出了DO-178C标准。FADEC软件是安全关键软件，为了保证软件高质量的交付，创新团队对标DO-178C，将71个质量目标本地化，分解到需求、设计、实现和验证等不同的过程活动中。基于过程活动定义标准工作环境，形成软件研发过程中工作产品的客观数据指标和测量项。

在航空发动机研制过程中，由于软件比硬件更易修改，一般在软

过程	目标&活动													
软件策划过程	○ A-1.1	○ A-1.2	○ A-1.3	○ A-1.4	○ A-1.5	○ A-1.6	○ A-1.7							
软件开发过程	○ A-2.1	○ A-2.2	○ A-2.3	○ A-2.4	○ A-2.5	○ A-2.6	○ A-2.7							
软件需求过程输出验证	● A-3.1	● A-3.2	○ A-3.3	○ A-3.4	○ A-3.5	○ A-3.6	● A-3.7							
软件设计过程输出验证	● A-4.1	● A-4.2	○ A-4.3	○ A-4.4	○ A-4.5	○ A-4.6	● A-4.7	● A-4.8	● A-4.9	○ A-4.10	○ A-4.11	○ A-4.12	● A-4.13	
软件编码及集成过程输出验证	● A-5.1	● A-5.2	○ A-5.3	○ A-5.4	○ A-5.5	○ A-5.6	○ A-5.7	● A-5.8	● A-5.9					
集成过程输出的测试	○ A-6.1	○ A-6.2	● A-6.3	● A-6.4	○ A-6.5									
验证过程结果的验证	● A-7.1	● A-7.2	● A-7.3	● A-7.4	● A-7.5	● A-7.6	● A-7.7	● A-7.8	● A-7.9					
软件配置管理过程	○ A-8.1	○ A-8.2	○ A-8.3	○ A-8.4	○ A-8.5	○ A-8.6								
软件质量保存过程	● A-9.1	● A-9.2	● A-9.3	● A-9.4	● A-9.5									
合格审定联络过程	○ A-10.1	○ A-10.2	○ A-10.3											





基于文档传递和基于数据传递的研发模式对比

件交付后，还需要进行若干轮的变更和适配，才能满足各项指标。在此期间，软件研发人员往往面临变更时间紧和质量风险高等困境。基于发动机及FADEC系统研发特点和AEOS研发体系，控制软件的生命周期被划分为若干研制阶段，每个阶段均有具体的研发活动及其对应的交付物。同时，由于项目所处的阶段、应用场景和重要度等级各有差异，其软件产品的质量要素要求的程度也有所不同。通过确定阶梯化等级要求和质量目标，可以有效指导研发活动，确保产出有质量保证的软件产品，符合软件使用场景要求，同时能够形成质量的稳步积累，最终实现全部质量目标。

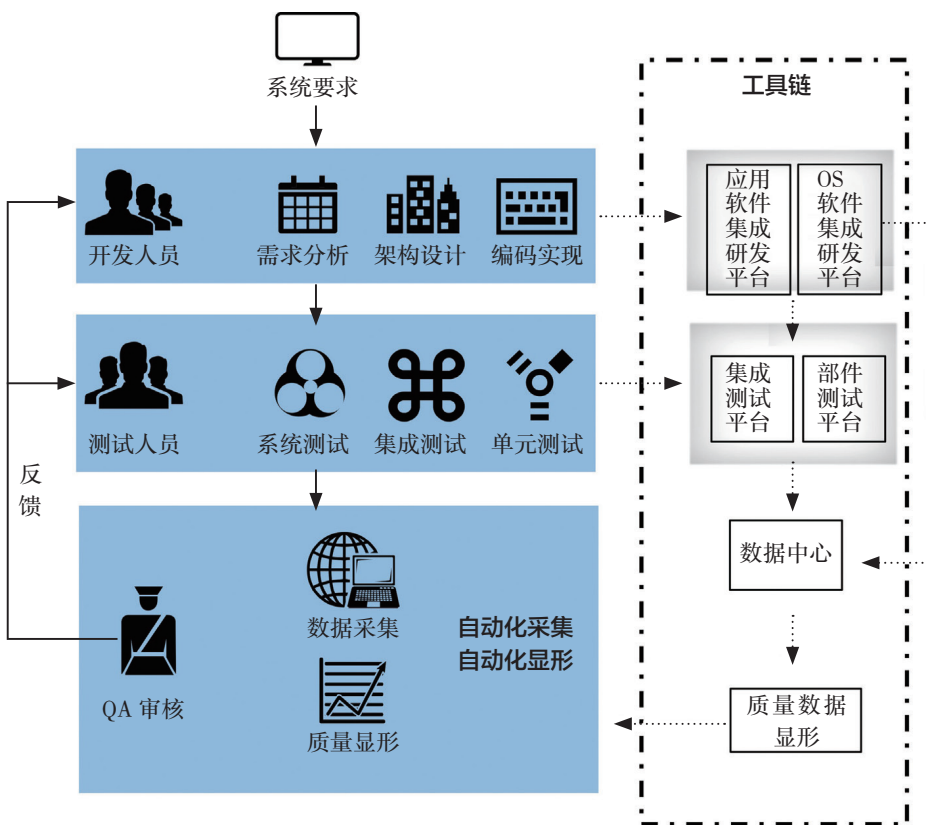
阶段目标的“一次做对”

当将最终的软件质量目标分解到不同的阶段后，就必须保证阶段质量目标的“一次做对”，才能实现最终质量目标的达成。一个研制阶段往往会持续数月甚至数年，如果在此过程中缺少有效的监控，显然难以一次达成阶段里程碑目标，因此，阶段目标的“一次做对”关键在于

研发过程中的及时质量纠偏。传统软件研发模式是基于文档的，上游研发过程传递到下游的工作产品是文档，无法在研发过程中评价质量要素是否满足，也无法及时纠偏，只能在文档评审交付时才能评价产

品质量，一旦文档质量不满足要求，必然导致产品研发过程的返工，给质量控制和研发进度带来巨大的风险，难以实现“一次做对”的目标。

针对此类问题，创新团队开展了质量数字化的研究。软件研发的生产工具是电脑，研发过程的加工对象是数据，其输入、输出的工作产物都是数字化产品，相比于机械零件加工，软件产品的质量数字化显形具有天然的生产环境优势。因此，创新团队构建基于数据的研发模式，将需求、设计、实现、集成和验证过程中的每一条数据保存到数据中心，研发过程中的每个产品的数据项和质量指标，都可以通过质量看板查看。同时，项目成套性文档也能在产品交付时按需自动生成。通过每日数据的自动采集、偏



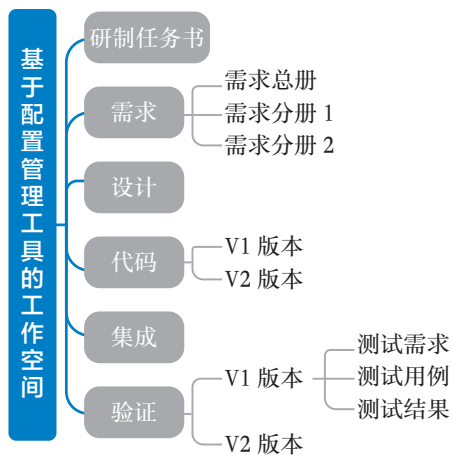
信息化工具流程支撑

离检查和质量监控看板的搭建，软件质量每天都能被看到。阶段质量目标的每日显形，有助于提前识别质量偏离并抑制风险，有效保证阶段质量目标一次达成。

信息化工具的全面支撑

为了更好地对过程质量实施预测与控制，实现定量化质量要素预测产品质量的目标，创新团队通过信息化技术，自研工具平台，构建基于数据的研发模式，打通所有研发角色之间的数据传递，对研发过程的数据项和产品的质量要素进行实时采集、计算和结果显示。通过对过程质量数据和产品质量数据的自动化采集、数字化存储，最终实现软件产品质量风险的精准化纠偏和管理，促进软件研发团队不断改进产品质量。信息化平台的构建主要包括以下3个方面。

一是建立工作产品和过程活动的数字化属性和规约。在FADEC软件长期维护过程中，建立统一的标准工作环境，规定产品的质量要素标识规范，以保证信息化工具持续采集项目数据，有效管控研发过程



研发过程中规定的标准工作环境



软件质量标签色示意

产物。首先，定义软件研发过程中所使用的标准工作环境，约束不同类别工作产品的存放位置；其次，规范流程活动，确保研发人员以相同的方式执行；最后，规范工作产品的质量属性标识，建立统一的研发规约，从而实现不同项目的同类工作产品有相同的要素和属性。本项目通过产品存储形式规约、过程活动采集项规约和产品采集项规约等方面约束产品研发过程中必须遵守的规则，给质量数字化打下结实的基础。

二是基于网络化技术的产品数据自动化集成。基于统一的存储工作空间和统一的产品质量标识，工具平台自动在后台完成工作产品的采集任务，并将这些信息分析汇总显示到统一的界面中，提供用户选择对应的工作产品和版本，形成版本基线。

三是产品质量定量化显形和阶段质量判读。针对上述规约的软件研发产品采集项和软件过程的测量项，平台收集了项目研发过程中的大量数据。服务器对周期性采集的数据进行清理、合并与整合，分门别类存储，使用量化分析算法进行计算，并将计算得到的数据通过看板实时地展示出来。通过工具平台的数据采集和统计计算，可以查询每个项目不同研发阶段的过程数据和质量状态数据，帮助项目团队有针对性地开展质量提升工作。在软件版本交付时，平台会对质量目标进行逐条判读，基于指标数据识别工作

项的偏离及可能存在的风险，拦截不满足质量要求的软件版本，保证每个交付版本质量目标的达成，确保将高质量的软件产品交付给用户。

用户可感知的质量“成色”

在实际的软件使用过程中，用户往往难以直接通过复杂的质量度量体系判断出软件质量状态，创新团队参考国际上常用的做法，根据发动机不同使用场景的质量要求，定义了5种质量标签色（橙色、黄色、蓝色、浅绿色、深绿色），每种标签色代表不同的软件质量目标。通过质量标签颜色，一方面，便于研发人员和质量保证人员通过看板及时洞察当前的质量偏差，及时采取提升质量的措施；另一方面，也能清晰、直观地将软件质量和使用约束传递给用户，有效避免软件超范围使用带来的质量风险。

结束语

创新团队以提升FADEC软件产品交付质量为研究目标，建立了基于全生命周期阶段的质量评价体系，并自研信息化平台，对研发过程中的产品数据自动采集、自动分析、自动评读，让质量成为每天能够看得见、摸得着、可感知的产物，及时纠正质量偏离，有效提升了软件产品交付的质量。

航空动力

（狄名轩，中国航发动控所，工程师，主要从事航空发动机控制软件技术研究）