

航空发动机数字化检测系统

Aero Engine Digital Measurement System

■ 同更强 刘洁 徐易 / 中国航发西航

数字化检测是数字化制造的关键技术之一，是实现自适应、智能化制造的前提条件。数字化检测技术能提高航空发动机零部件制造、装配试车全过程质量数据的收集、传递、分析、反馈能力，提升产品质量控制能力，为故障分析定位、工艺优化、装配过程容差分配、零件优选、性能调整提供及时有效、完整准确的有源数据，促进航空发动机性能迭代提升、可靠性不断增长。

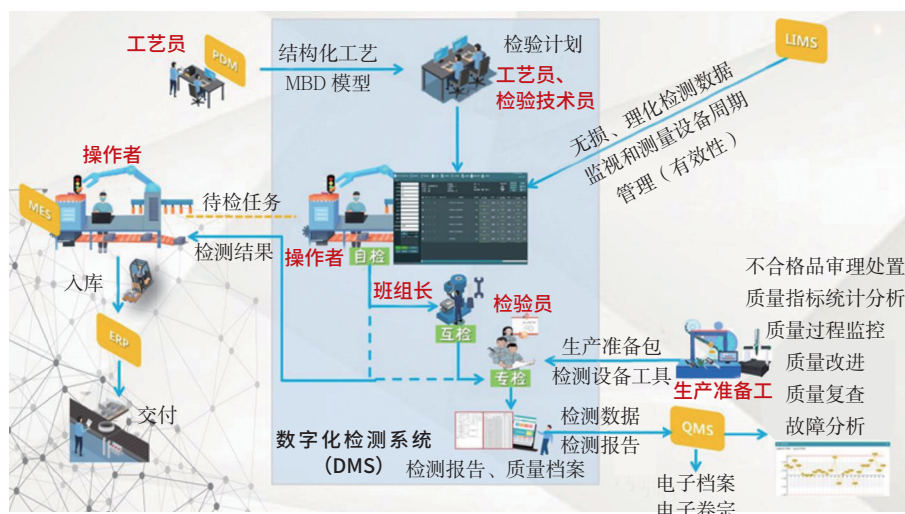
航空发动机所有零组件的生产过程须具备可追溯性，各种质量记录要求在发动机全生命周期内长久保存。当前，航空发动机生产过程的产品检验依然保持着传统的手工操作、纸质记录方式，近年来随着航空工业和信息化产业的高速发展，这种方式的缺点越发凸显，难以满足未来高性能航空发动机和智能制造的发展需求。航空发动机数字化检测系统是根据产品实际检验业务流程和产品特点，随着企业数字化转型发展战略，结合中国制造2025和两化融合等应运而生的。

传统检验模式存在的主要问题

传统检验模式是航空发动机制造过程的瓶颈环节，制约企业提质增效，主要体现在以下几个方面。

第一，手动量具、专用测具是完成检测任务的主力手段，少量先进检测设备只用于部分精密特性检测，自动化程度低。随着生产节拍的加快，检测效率低下成为制约生产流速的瓶颈环节。

第二，产品检验记录依靠手工填写、纸质传递和存档，记录的填



数字化检测应用场景

写、整理、归档工作量大，占检验人员工作量的40%~60%，严重挤占了检验人员用于控制产品质量的时间。

第三，手工填写、转抄检验记录极易出错，须下游检验员反复核对仍难以杜绝人为差错，工作质量不高。

第四，产品检验记录要求长久保存（与产品同寿），逐年累积的海量检验记录难以有效保管，成为影响产品质量可追溯性的严重问题。

第五，纸质记录查阅不便，质量复查需要耗费大量的人力和时间，海量检验数据无法有效利用，不能给产品质量控制、质量改进提供决策支撑。

数字化检测系统构建

数字化检测系统（digital measurement system）以采集发动机零组件制造过程检测数据为核心任务，是检验业务管理的信息化平台，是完善数字化车间作业管理能力、产品全生命周期质量管理能力的关键环节，是提升检验工作效率和质量的有效途径，对发动机制造过程中的生产管理、质量控制、工艺改进、设计优化均有积极促进作用。

数字化检测应用场景分析

数字化检测包括检验规划、检验任务、检验数据采集以及检测数据应用。

检验规划是产品检测的前提和技术依据，是规范检验行为，准确贯彻设计、工艺要求，实现数字化检测过程的基础。通过解析产品数据管理（PDM）系统的产品模型、设计图样和工艺文件，识别并提取检验要素，按质量体系和检验工作要求细化后形成检验规划。在编制检验规划和执行检验过程中应能够实现图形化引导，检验规划应能够绑定测量程序，随检验任务推送到测量终端。需要对检验规划进行会签、审批、发布和版本管理。

检验对象是具体的航空发动机零部件、部件及整机，即检验任务。制造执行系统（MES）是生产流程管控统一平台，检验是生产过程的一个重要环节。当需要对零部件进行检测时，MES调用数字化检测系统执行具体的检测操作，数字化检测系统通过任务信息（零件号、批次序号、数量、工序号等）调用相应的检验规划和测量程序，采集检

测数据，将检验结果反馈至MES，完成完工确认，形成作业闭环。根据工艺安排，检验任务可分为首件检验、工序检验、成品检验任务；按检验人员可分为自检、互检和专检任务；按检测设备可分为手动量具/测具检测任务和各类设备自动检测任务。数字化检测系统应能满足各类检验任务模式，按需求对检验任务进行分解。

检验结果是采集的产品检验数据，这些数据应包括自检、互检和专检的实际测量值，执行人员，检测时间以及测量器具等相关信息。在数据采集过程中，系统应能够对检验数据进行自动评价^[4]，对完整性进行校核，根据特性间的关联关系进行自动检索和计算，如计算孔轴配合、间接测量特性、工序间数据引用等。检验数据的采集方式有手工录入、数显量具、数字化检测设备、在机在线检测设备等。随着检测设备的增加和自动化水平的提升，基

于5G环境的无线数据传输应用，手动录入逐渐被自动采集方式取代；未来随着人工智能技术发展，数据采集手段还会拓展到语音识别、基于机器视觉的图像识别、人工可穿戴设备等。除了采集制造过程产品检测数据外，数字化检测系统还应接收物流管理信息系统（LMIS）产生原材料入厂复验收据、无损检测数据和理化检测数据、检测设备周期检定数据，归集形成完整的产品质量数据。

一方面，检验数据用来生成产品检验记录，按照产品的配套关系归集，形成零部件电子档案、发动机电子卷宗和电子履历，保障产品质量的可追溯性；另一方面，检测数据与PDM、MES、质量管理系统（QMS）等共享，可用于对产品质量实施统计过程控制（SPC）、监控产品实时质量状态，可以为故障追溯、质量统计、工艺和设计改进、零部件优选选配提供数据支持，也可以辅助检验基础管理、人员绩效考核



数字化检测系统总体构架

等工作。

数字化检测系统总体构架

数字化检测系统总体构架包括执行层、基础层和管理应用层。

执行层为数字化检测系统的核心，也是执行检测操作的主要业务流程，包括检验规划管理、检验任务管理、检验数据采集和检验报告管理。

基础层是支撑数字化检测业务运行的基本条件，包括系统管理、人员/印章管理、模型化引导、量具/设备管理、检验数据管理、检验文档管理、检验评价标准、知识经验积累、检验周期统计和双网数据同步等。

管理应用层是数字化检测系统与其他主要业务系统的交互和检测数据在数字化车间管理中的实际应用，包括产品技术状态纪实、生产过程完工报工、产品质量监控和质量追溯、零组件优选选配和检验绩效评价等。

数字化检测系统主要功能模块设计

通过对检验业务流程进行系统梳理，将数字化检测系统分为主流程功能、个性化业务功能和基础功能三大部分。

主流程功能以典型机械加工检验为依据，对检验要素解析及提取、检验规划编制、检验任务管理、检验数据采集、检验数据管理进行细化分解。个性化功能是在主流程功能的基础上，为满足装配检验、修理检验、特种检验等业务过程设计开发的功能模块。基础功能是为了支持各项业务功能或对业务功能拓展应用而设计开发的功能模块。

与PDM、MES、QMS等多系统

集成应用

数字化检测系统不应成为信息孤岛，必须与PDM、MES、QMS等信息系统集成应用，实现业务和数据深度融合，完成设计、生产、检测和质量控制的闭环管理，发挥检测数据的最大效能。

与PDM系统集成，将PDM作为产品设计与工艺设计中心，把工艺文件中的检验要求正确传递到检验业务流程中，并将结合主流的设计方法论，实现模型的下发、变更等一体化管理。

与MES集成，在现场执行过程中，对质量信息的输入与输出将取决于质量信息的正确传递，同时实现制造执行计划与任务规划，将检测环节作为不可或缺节点，实现无缝的集成，保证了自动化和智能化的整合。

与QMS集成，质量系统是检测数据的主要消费者，通过对检测数据的分析整合，构建各类质量指标监控体系，从而实现产品质量实时监控、质量改进、质量追溯、故障分析等业务功能。

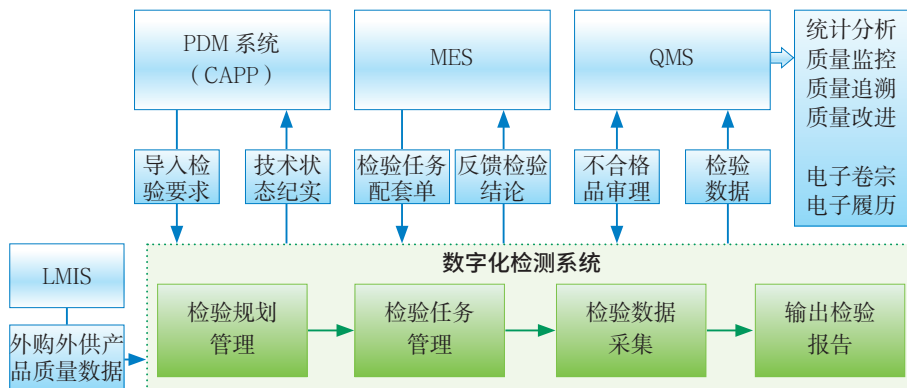
网络环境分析

在中国航发西航，网络环境分为园区网和工控网（数控机床专用

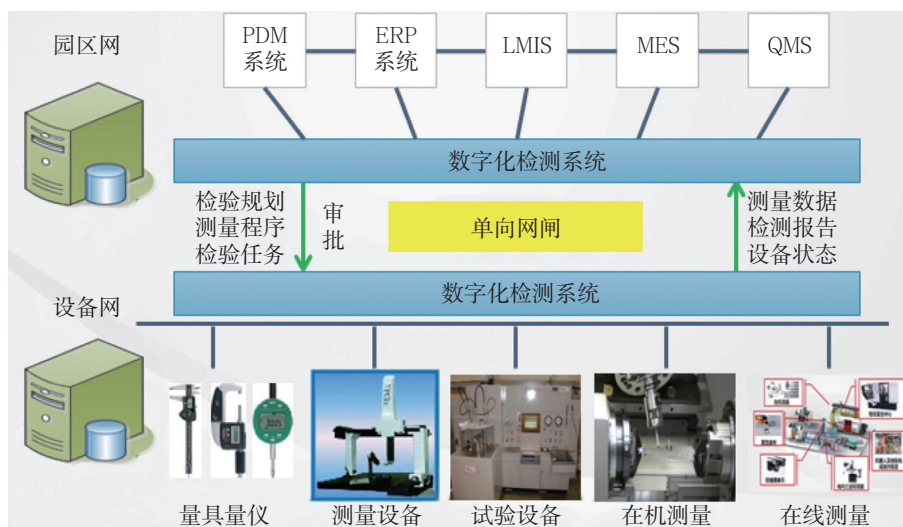
网络，又称设备网），PDM、ERP、MES、QMS等应用系统全部构建在园区网，而各类数控加工设备、检测设备均接入设备网，两个网络之间实行物理隔离。

基于实际网络运行环境和业务需求，数字化检测系统分别在园区网和设备网同时部署。在园区网，数字化检测系统实现与PDM、MES、QMS等系统集成应用，实现主要流程控制和检测数据查询、分析利用。在设备网，数字化检测系统实现量具量仪、测量设备、在机在线设备测量数据的自动采集。检验规划、测量程序及检验任务从园区网下行传输到设备网，测量数据及测量报告上行传输到园区网。园区网技术、管理人员可对产品检测数据进行查询、统计分析。

通过工控互联项目打通园区网与设备网之间的数据传输壁垒，可以实现质量数据在设备网和园区网之间数据交互，使数字化检测系统具备与MES、QMS等系统的集成条件；打通数据采集到分析利用，制造过程上下游之间的数据通道；有效促进数字化检测系统推广应用，产品检测数据完整性、安全性显著提升。



数字化检测系统与PDM、MES、QMS等系统的集成关系



基于实际网络环境的数字化检测系统分工

应用成效

中国航发西航于2015年开始进行数字化检测技术的探索和建设方案论证,2016年选择盘、轴等典型零件为应用对象开始进行试点项目建设,2017年投入应用。同期开展二期项目建设,盘、轴、叶片和部件装配生产线,2018年年底投入应用。2020年结合中国航发数字化应用“最后一公里”试点项目,在修理发动机部件和整机装配过程推广应用数字化检测系统。目前,中国航发西航正在开展三期项目建设,在原系统软硬件基础上,不断迭代优化和拓展系统功能,推进与PDM、MES等应用系统深度集成,增加检测设备接入数量,提升系统适用性、安全性、数据采集与交互共享能力。同时,快速推进数字化检测系统在生产现场推广应用,逐步覆盖主要产品制造过程。

规范检验过程、防止错检漏检

将检验工作要求贯彻到数字化检测系统软件功能中,通过技术手段规范检验过程,减少了人为因素

影响,防止错检漏检。例如,通过检验规划细化每个特征检测方法、检测工具、自检/互检/专检的角色分工、数据记录等要求,数据采集时自动对测量数据符合性进行评价、超差报警,提交完工时自动对数据完整性校验,完工后不能对数据进行修改,检测数据按定制模板生成检验记录、质量证明单、装配质量控制卡等成套档案,并在系统中存档,省去了人工填写、转抄、传递、归集整理产品质量档案的工作^[2]。

消除信息孤岛、提升检测效率

将各类检测设备接入数字化检测系统,消除了信息孤岛,对无数数据输入输出功能的检测和试验设备进行数字化改造,实现了测量程序的统一规范管理、多源异构检测数据自动采集。检验人员通过检验任务驱动测量软件、自动调用测量程序、自动采集测量数据,并对测量结果进行自动评价,将数据上传至系统数据库归集、存档^[3]。该技术在盘、轴、整体叶盘等典型零件上广泛应用,促进检测效率和设备利用

率大幅提升,盘类自动化检测比例由30%提高到80%以上,长轴类零件由全手工检测提高到100%。

质量数据统计分析和可视化

结构化的产品质量数据便于统计分析,通过数据统计分析技术应用,能够获取检验任务完成情况、产品合格率、设备利用率、检验人员工作量等支持管理决策的数据指标,能够便捷高效地统计对发动机振动、配合关系有重要影响的零组件检测数据,为发动机故障分析、零组件选配提供数据支撑。

结束语

航空发动机企业正在经历数字化转型的重大变革,产品质量数据是企业最重要的数据资产之一,数字化检测系统是产品质量数据的主要生产者,通过数字化检测系统可以便捷高效地采集、归集、整理、传递产品质量数据,是企业逐步向数字化智能制造发展的必要条件,对提高检验工作效率、预防错漏检,提升产品质量控制能力、检测设备利用率等方面有明显促进作用。 **航空动力**

(同更强,中国航发西航,高级工程师,主要从事数字化检测技术研究)

参考文献

- [1] 袁世军.数字化检测系统(DDES)应用研究[J].现代工业经济和信息化,2018(10):52-54.
- [2] 吕依儒.基于数字化技术的航空发动机检测探析[J].内燃机与配件,2020(13):152-153.
- [3] 梁勤,张浩波,王强.基于MBD的数字化检测平台集成与应用研究[J].航空精密制造技术,2014(52):42-45.