

# 风洞动力资源系统集成化保障研究

郑娟<sup>1</sup>, 罗昌俊<sup>1</sup>, 马永一<sup>1</sup>, 王小飞<sup>1</sup>, 高虎<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心计算所, 四川 绵阳 621000;

2. 陕西万禾数字科技有限公司, 西安 710100)

**摘要:** 风洞试验任务的有效遂行依赖于水、电、气等动力资源的保障; 为提高风洞动力资源系统的管理水平和维修保障效能, 以第五代 IETM 集成思想为基础, 研究提出基于 IETM/PMA 的一体化风洞动力资源综合保障方案, 并就系统实现涉及的系统功能架构设计、数据顶层规划、数据模块需求列表快速生成、综合故障诊断实现、3D 虚拟手册研发等关键技术问题进行了深入研究; 应用表明: 该系统在提供传统“交互式数字专家”功能的基础上, 初步实现了 IETM 数据与装备履历、维修信息、库管信息的联通和各项业务的联动, 能够有效提高风洞动力资源综合保障能力。

**关键词:** IETM; PMA; 装备保障; 集成化; 信息化

## Research on Integrated Support Information System of Wind Tunnel Power Resources Supply System

Zheng Juan<sup>1</sup>, Luo Changjun<sup>1</sup>, Ma Yongyi<sup>1</sup>, Wang Xiaofei<sup>1</sup>, Gao Hu<sup>2</sup>

(1. Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. Wanhe Advanced Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The effective performance of wind tunnel tests depends on the supply of power resources, e. g. electricity, water and gas. To improve the management level and maintenance support effectiveness of power resources supply system, an integrated support information system based on IETM and PMA is developed. A solution applied the integration theory of the fifth generation IETM is put forwarded. Moreover, the function architecture, the method of data planning, the method of rapid constructing IETM data module list, the technical scheme of comprehensive fault diagnosis, and the implementation strategy of 3D-virtual technology manual are discussed in detail. Now the whole system is completed and put into use. The testing and tryout show that, in addition to provide the traditional function as an “interactive digital expert”, the solution integrates the IETM data with equipment resume data, equipment maintenance data and inventory data; and greatly improves the comprehensive assurance capability of wind tunnel power resources supply system.

**Keywords:** IETM; PMA; equipment support; integration; informatization

## 0 引言

风洞是开展空气动力学研究和飞行器研制的重要基础地面设备, 其试验任务的有效遂行依赖于水、电、高压气源、中压气源、真空、氮气、氢气、氧气等多种动力资源的有力保障。风洞动力资源系统具有分布分散、结构复杂、集成度高的特点, 需要通过先进的技术手段提高人员培训、设备维修以及技术资料管理的效益和效率。为此, 引入交互式电子技术手册 IETM 技术, 遵循第五代 IETM 的集成思想, 以 IETM 系统、PMA 系统为核心, 同时与现有的风洞动力资源相关的信息系统进行集成, 形成一体化的风洞动力资源综合保障方案, 为风洞动力资源系统的使用、维修、维护、培训等保障工作提供系统、全面的技术支持。

## 1 系统总体架构

风洞动力资源综合保障系统的总体架构如图 1 所示。

本系统以 IETM 数据系统为基础, 将其作为便携式辅助维修终端 PMA 的系统服务; 同时与现有的风洞动力设备健康管理信息系统 (PHM 系统)、设备信息管理系统、仓库管理系统进行集成。

PHM 系统实现风洞动力资源系统运行状态实时监控、核心设备健康状态智能分析、故障智能报警及维修工单下发等功能。设备信息管理系统和仓库系统提供风洞动力资源系统全生命周期的动态履历、维修活动和备品备件的精确定化和规范化管理。

IETM 数据系统按照 GJB6600 标准, 采用多种多媒体手段, 将风洞动力资源系统的工程图纸、操作、维修、故障诊断规则、维修保养规范、应急预案及备品备件等信息有机组织起来, 形成一部超级“数字宝典”, 为最终用户提供一个无纸化、向导型的交互式信息化保障环境, 使用户能够准确、快速、直观地获取所需信息。同时, IETM 数据

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-17。

作者简介: 郑娟 (1977-), 女, 湖北黄冈人, 博士, 高级工程师, 主要从事总体规划与论证、信息系统研发等方向的研究。

引用格式: 郑娟, 罗昌俊, 马永一, 等. 风洞动力资源系统集成化保障研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 163-167.

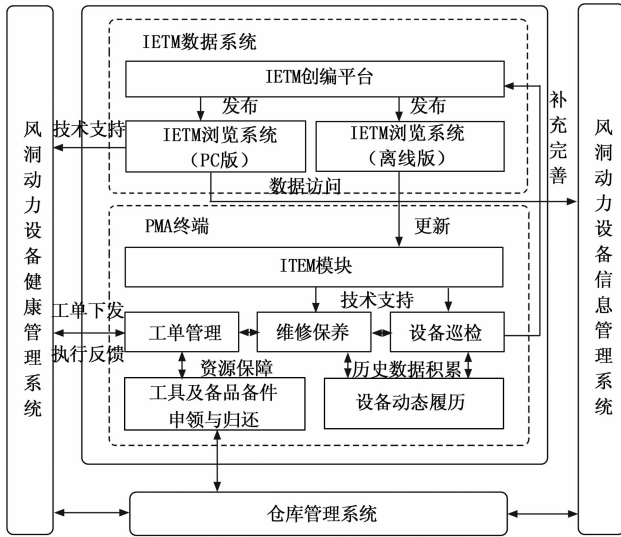


图 1 系统总体架构图

系统还作为“专家系统”，为 PHM 系统实现风洞动力设备故障诊断与确认、维修方案制定等提供技术支持；为 PMA 终端现场执行风洞动力设备维修保养、设备巡检等任务提供设备拆卸、安装、维护、维修等操作的技术支持。

PMA 手持终端为便捷高效开展风洞动力资源系统的维修保养、现场巡检等活动提供服务，主要负责维修/巡检任务的接受、维修/巡检任务的执行与记录和 IETM 技术手册的浏览查询等内容。PMA 终端不仅具有 PC 端 IETM 所有功能；还能提供岗位人员身份识别、二维码扫描、工单导入、现场巡检/维修实时记录、巡检/维修记录导出等功能，实现现场巡检、维修过程中的操作方法、故障诊断等技术支持，以及设备状态采集（支持文本、图像、视频等多种格式信息）、处理方式、处理结果实时记录等。同时，PMA 终端还与 PHM 系统、仓库管理系统、设备信息管理系统进行集成，实现维修/巡检工单下发与任务反馈、维修器材申领与归还、设备履历信息更新等任务。

## 2 分系统设计

### 2.1 IETM 数据系统

IETM 数据系统实现风洞动力资源 IETM 数据模块开发、发布、浏览等功能，如图 2 所示。

根据风洞动力资源系统日常训练、维修和保养等工作的需要，IETM 数据系统以文本显示、图文热点交互、3D 虚拟手册、问答式故障诊断、向导式设备操作/故障恢复等多种方式对高压系统、中压系统、真空系统等动力资源系统的系统组成、操作规程、工艺流程、设备维护保养规范、常见故障识别与处理、安全规程、岗位规章制度等技术信息进行组织管理；依此对 GJB660 进行了裁剪，利用陕西万禾数字科技有限公司自主研发的 IETM 创编平台完成描述类 (descript)、程序类 (procedure)、故障类 (fault)、图解零部件目录类 (ipd)、过程类 (process) 数据模块等 6 大类数据模块的制作、存储、校验、管理、解析及显示；提供

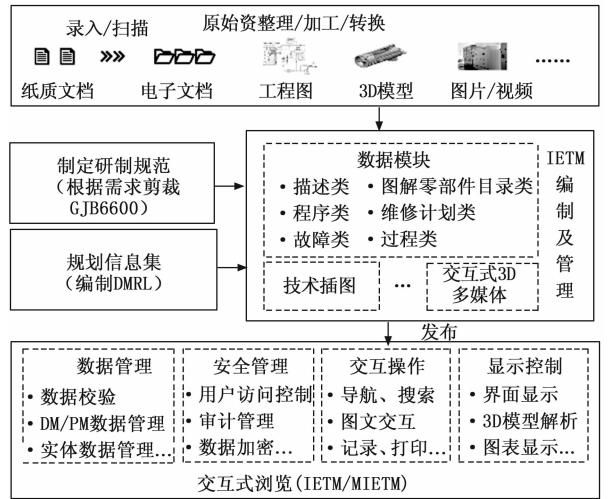


图 2 IETM 研制思路

手册、目录、查询、过滤等多种导航方式以及历史信息记录、打印等功能；提供基于功能、用户、角色、部门的多维度权限控制，并采用数据加密存储/传输等策略确保 IETM 数据的安全访问。

### 2.2 PMA 手持终端

PMA 手持终端的主要作用是作为风洞动力设备电子履历/历史维修数据/IETM 数据模块等数据的可视化客户端和故障现象/维修策略等数据的采集终端。PMA 手持终端需要实现其数据与单位内网动力资源相关业务信息系统的数据库同步。鉴于单位内部尚未建立无线网络环境，PMA 终端具有在线与离线两种运行模式。为避免 PMA 终端与现场工作机直连，本系统通过增配 OTG 网卡的方式，实现 PMA 手持终端对单位内网的接入和访问。在线运行时，PMA 访问应用服务器、数据服务器，分别从 IETM 数据系统、PHM 系统、设备信息管理系统、仓库管理系统中同步 IETM 数据、任务工单、设备技术状态与履历、维修器材与备品备件库存量等信息。离线运行时，PMA 终端实现 IETM 数据的查询与浏览、基于 IETM 的故障识别/隔离、设备拆卸/安装、部件维修/更换等活动，并将新产生的维修信息记录下来；当再次连入内网后，PMA 终端自动将新建维修信息同步到 PHM 系统、设备信息管理系统等数据库中。

## 3 关键技术

### 3.1 数据顶层规划

为了实现“一次生成，多次使用”的数据管理理念，IETM 技术采用结构化、模块化的设计思想，将所需技术信息分解为数据模块、插图和多媒体对象存储在公共源数据库中，以实现数据的可重用。数据顶层规划的任务是将风洞动力资源系统相关的技术信息合理划分成一个个数据模块，并建立数据模块的编码策略，包括设备结构分解和信息集规划两项研究工作。

#### 3.1.1 设备结构分解

设备结构分解与是 IETM 数据系统实现数据结构化的

基础。本系统采用面向对象的思想, 将高压、真空、中压等各类动力资源系统分解为若干独立的单元。在分解中, 必须合理规划数据分解粒度, 不仅要避免粒度过大带来数据模块重用性差的问题, 还要避免粒度过小导致数据量大、系统运行效率低的问题。风洞动力资源系统集成度高, 其现场维修主要采用更换零部件进行修复的模式。因此, 风洞动力资源系统的设备分解粒度以故障诊断策略中最小故障定位单元为标准, 并采用“型号—系统—分系统—分系统—部件”的五级设备结构分解模型。

### 3.1.2 信息集规划

信息集规划的主要任务是根据用户需求研究确定需要制作哪些数据模块, 提出数据模块需求清单, 并根据 GJB6600 标准编制数据模块编码规则。本系统以特定风洞动力资源系统的结构组成为主线, 根据其任务活动剖面(如组装、拆卸、测试、保养、维护、维修等)对各类技术信息进行拆分, 形成数据模块需求列表 DMRL, 确定每个数据模块描述的对象和内容, 并赋予其唯一的标识, 即数据模块编码 DMC。GJB6600 标准规定数据模块编码 DMC 由英文字母和阿拉伯数据混编而成, 长度为 17~41 位字符。本系统数据模块编码采用 17 位字符的数据结构, 如图 3 所示。

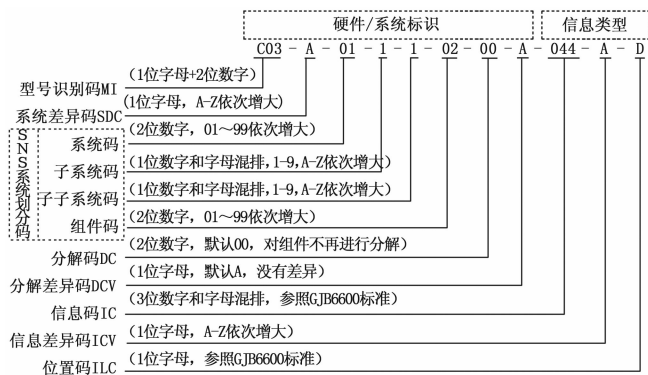


图 3 数据模块编码规则

### 3.2 DMRL 结构化构建

建立数据模块需求列表 DMRL 是 IETM 研制前期工作的一个关键环节。传统信息集规划中, 常以设备组成结构为主线, 采用“分蛋糕”的方式将现有的技术资料进行分解, 逐渐形成 DMRL。这种划分模式取决于 DMRL 规划者的经验, 存在划分标准随意、手动形成 DMRL 清单工作量大等问题。为此, 本系统提出一种结构化 DMRL 构建技术, 具体步骤如下:

1) 由于本系统采用五级设备结构分解模型, 因此采用度为 5 的无序树  $T = (D_n, R_n)$  表示特定风洞动力资源系统组成结构, 系统的每一个结构单元, 对应无序树中的一个结点。 $n$  表示  $T$  中结点的总数,  $D_n$  表示所有结点的集合,  $R_n$  表示各结点的关系集合。采用“链式存储法”对无序树  $T$  进行存储, 如图 4 所示。然后通过计算机编程, 遍历  $T$  的所有路径, 实现  $D_n$  中所有节点的硬件/系统标识码的自

动编码, 形成设备结构单元集  $E_n$ 。

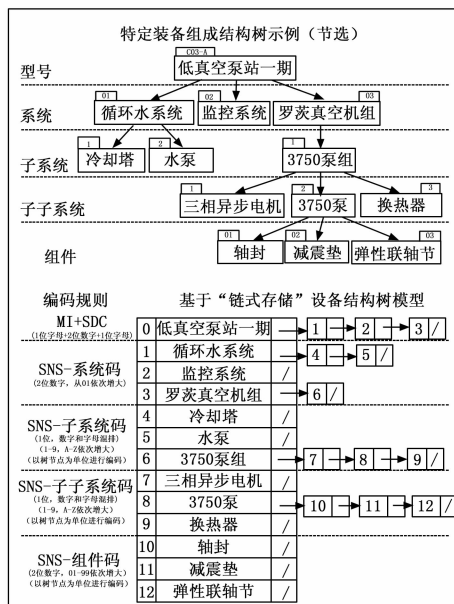


图 4 设备结构树表达示例

2) 以 GJB6600 信息码分类标准为依据, 根据用户需求裁剪确立所需的信息类别集  $I_m$ ,  $m$  是信息类别的总数。在此基础上, 对  $E_n$  和  $I_m$  进行“笛卡尔积”运算, 得到最大信息集  $A_{m \times n}$ 。

$$A_{m \times n} = E_n \times I_m = \begin{bmatrix} (e_1, l_1) & \cdots & (e_1, l_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (e_n, i_1) & \cdots & (e_n, i_m) \end{bmatrix}$$

3) 根据用户需求, 对最大信息集  $A_{m \times n}$  进行梳理, 明确是否需要建立对应的信息集, 并利用“0-1”矩阵  $B_{m \times n}$  进行表示。“0”表示“无需求”, “1”表示“有需求”, 如表 1 所示。

4) 对  $A_{m \times n}$  和  $B_{m \times n}$  进行“点乘”运算, 去除其中为“0”的元素, 即可得到数据模块需求列表 DMRL, 并编程实现数据模块的自动编码。

### 3.3 综合故障诊断

本系统将 IETM 数据系统/PMA 终端与风洞动力资源健康系统 (PHM 系统)、设备信息管理系统、仓库管理系统进行无缝链接, 呈现给维修人员一个更加多元化的设备维修解决方案。

1) 基于故障报警的故障确认。PHM 系统实时监视风洞动力资源系统传感器监测数据, 当发现状态异常后发出报警。PHM 系统将根据故障报警数据, 自主查询调用 IETM 数据系统中相关的故障诊断数据模块, 维修人员以交互的方式实现故障定位与确认。

2) 基于维修任务的工单制定。一旦明确故障设备、故障类型后, PHM 系统将创建维修工单。PHM 系统根据故障代码自动匹配 IETM 数据系统中该故障的隔离/维修程序, 并根据此故障隔离/维修程序中的“准备信息”列出维修此故障所需专用工具、耗材、备件信息、人员要求信息,

表 1 DML 规划示例

树节点结构单元	设备结构单元集 En	信息类别集 Im						
		功能描述	原理图	设备清单	……	正常操作程序	应急程序	故障描述
		044	054	056	……	131	141	410
循环水系统	C05-A-010000-00A	1	1	1	……	1	1	1
监控系统	C05-A-020000-00A	1	1	1	……	1	1	1
罗茨真空机组	C05-A-030000-00A	1	1	1	……	1	1	1
冷却塔	C05-A-011000-00A	1	1	1	……	1	1	1
水泵	C05-A-012000-00A	1	1	1	……	1	1	1
3750 泵组	C05-A-031000-00A	1	1	1	……	1	1	1
三相异步电机	C05-A-031100-00A	1	1	1	……	1	1	1
3750 泵	C05-A-031200-00A	1	1	1	……	1	1	1
换热器	C05-A-031300-00A	1	1	1	……	1	1	1
轴封	C05-A-031201-00A	1	1	0	……	0	0	1
减震垫	C05-A-031202-00A	1	1	0	……	0	0	1
弹性联轴节	C05-A-031203-00A	1	1	0	……	0	0	1

为制定维修方案提供辅助决策。同时，生成维修器材申领单向仓库管理系统提交申请。

3) 基于故障定位的维修实施。维修人员将维修任务下载到 PMA 终端，领取维修所需各类器材，现场实施维修活动。PMA 终端中离线 IETM 模块提供设备拆卸安装程序、故障维修程序、应急程序等指导故障维修等信息支持。PMA 终端提供文本输入、现场拍照/录制视频等手段，离线记录故障现象、维修过程、维修结论和实际耗材等信息。联网后，将新的维修记录上传至相关系统，完善更新其数据库，扩充其知识库。

### 3.4 3D 虚拟手册

传统 IETM 多采用文本与 2D 图形相结合的方式对信息技术进行描述。这种方式不利于用户快速获取和理解技术信息。为此，本系统应用交互式 3D 技术，利用万禾数字科技有限公司自主研发的 3D Builder 工具，直接重用风洞动力资源系统 3D-CAD 模型，将原始的 3D-CAD 模型加工、转化并轻量化后形成自定义 vab 格式的 3D 模型，嵌入 IETM 数据模块中，并为 3D 模型添加引用或热区。发布后，IETM 浏览模块利用 IETM 3D Viewer1103\_Setup、3DVIAPlayer、X-Codec-Pack 等插件对内容解析处理，使 3D 模型可以在一个单独的窗口中打开查看，直观地展示风洞动力资源系统的空间结构、安装、拆卸、设备操作、故障维修等技术信息，增强本系统设备辅助维修、人员培训等功能。

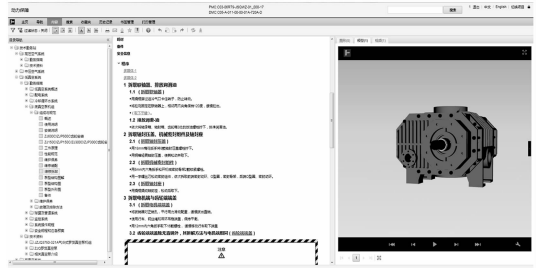
1) 3D 图解零部件目录。提供风洞动力资源系统 3D 模型的多视角展示、3D 交互式零部件目录以及零部件安装/拆卸等 3D 操作仿真，允许用户放大、缩小、平移特定的零部件，并建立特定零部件模型与零件图解、照片或维修保养数据模型 DM 等技术信息之间的双向链接功能，使零部件更加易于识别、掌握。

2) 辅助维修。以风洞动力资源系统维修活动中的故障现象、处理过程、系统响应等为仿真对象，在建立风洞动

力资源系统 3D 虚拟样机模型、维修过程模型等计算机模型，形象、逼真地展现特定故障的维修程序，同时还提供向导式的交互维修指导服务，帮助用户快速实施故障排查以及维修任务。

## 4 实验结果与分析

根据风洞动力资源综合保障系统总体方案，设计并研发了两个新系统，即基于 B/S 模式的 IETM 数据系统和基于 C/S 模 PMA 终端，如图 5 所示。新系统研发采用 Java 软件开发工具包 JDK 作为 Java 开发环境，采用 SQL SERVER 关系型数据库、Redis 非关系型数据库和 Neo4J 图形数据库作为开发环境数据库，采用可视化的 SQL SERVER 管理平台 SSMS 来操作和管理数据库，采用开源 Web 应用服务器 Apache Tomcat 作为开发环境应用服务器。PMA 终端采用 7 寸工业级电容式触摸屏定制手持式设备，支持二维码扫描及拍照、摄像功能，满足 EXib llc T6 防爆



(a) TETM 数据系统运行界面示例



(b) PMA 终端运行界面示例

图 5 系统运行界面示例

等级要求, 具有较强的防震、防水、防尘等防护措施。

系统正式上线运行前, 委托第三方评测机构在真实运行环境中, 对风洞动力资源综合保障系统进行了系统级测试以及回归测试。其中, 重点测试了 IETM 数据系统与 PMA 等其他相关信息系统的集成性; 同时还录制各业务点脚本, 使用负载生成器模拟并发用户按设定梯度逐步递增至 100 人的场景, 对系统持续产生压力, 观察各项性能指标是否异常。测试结果表明: IETM 系统在提供高压系统、中压系统、真空系统等动力资源系统交互式电子手册的基础上, 初步实现 IETM 数据与装备履历、维修信息、库管信息的联通, 完成事后故障维修“设备故障报警—故障确认—维修工单制定与下发—维修任务执行与上传”以及巡检维护“维护保养规范自动触发—巡检工单制定与下发—巡检任务执行与上传”等工作回路的数据流转; 在 100 人并发的负载下, 各关键业务点平均响应时间约为 0.067~2.444 s, 总体性能良好。

### 5 结束语

本文以风洞动力资源系统为研究对象, 初步探究 IETM 系统与外部信息系统的集成模式, 实现了 IETM 系统与 PMA 终端、健康管理系统, 仓库系统、设备信息管理系统的等外部系统的单向集成, 提供基于框架导航模式的技术资料的快速访问、基于 3D 交互模式的操作过程指导、基于故障维修历史数据的维修器材的自动申领, 以及基于人机交互模式的故障诊断与确认等功能, 有效提高风洞动力资源系统的运行保障能力, 为其他领域基于 IETM 的综合保障系统研发提供参考。



图 7 试验管理终端试验数据记录界面

### 4 结束语

本文结合运载火箭电气试验的特点, 设计了基于 IETM 的运载火箭电气试验信息管理系统。研究了系统的总体框架和网络拓扑结构, 重点介绍了系统中试验管理终端、测试数据库平台、数据服务器平台和数据通信中间件的设计, 并对设计中遇到的关键技术问题进行了分析。通过在 CZ-2C 等型号运载火箭测量系统综合试验中的测试, 验证了系统功能的有效性和稳定性, 达到了实际应用的要求。本系统在运载火箭电气试验中的应用, 采用标准电子表格式管理, 进一步规范了运载火箭电气试验的操作流程及试验记录与判读, 实现了试验数据管理的智能化, 也为多发次试

源系统的运行保障能力, 为其他领域基于 IETM 的综合保障系统研发提供参考。

### 参考文献:

- [1] 朱兴动. 武器装备交互使命电子技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 徐宗昌, 等. 装备 IETM 研制工程总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 余 容, 吴家菊, 王 峰, 等. 基于 S1000D 标准的 IETM 技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (11): 163-167.
- [4] 程跃兵, 张林梅, 陈本军. 基于 GJB6600 的武器装备 IETM 标准裁剪研究 [J]. 数字技术应用, 2016, 36 (4): 116-118.
- [5] 余 容, 陶以政, 李立清, 等. 基于集合化的装备 IETM 数据模块快速构建技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 176-179.
- [6] 顾 艺, 廖亚军, 车兵辉, 等. 基于 GJB6600 的风洞 IETM 系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (7): 57-61.
- [7] 郭德兴, 杜晓明. ETM 与 CBM 的系统集成应用 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2019, 33 (2): 105-109.
- [8] 张 雷, 常天庆, 苏奎峰, 等. 一种便携集成式伴随保障系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 152-155.
- [9] S1000D International specification for technical publications utilizing a common source database (Issue 4.1) [Z]. 2015.
- [10] Michael G P. Prognostics and health management of Electronics [M]. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008.

验数据的横向对比提供了便利。

### 参考文献:

- [1] 李 洪. 智慧火箭发展路线思考 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (1): 1-7.
- [2] 鲁 宇, 秦旭东, 魏远明, 等. 中国运载火箭技术发展 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (3): 1-8.
- [3] 彭 越, 牟 宇, 宋敬群. 中国下一代运载火箭电气系统技术发展研究 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (2): 13-24.
- [4] GJB 6600-2008. 装备交互式电子技术手册 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008.
- [5] 梁 琰, 陈海鹏, 贺 喆. 交互式电子技术手册思想及应用的思考和建议 [J]. 计算机科学与技术, 2013, 31 (1): 101-105.
- [6] 邱亚男. 交互式电子技术手册国内外标准研究与分析 [J]. 装备制造技术, 2017 (5): 53-57.
- [7] 徐宗昌. 装备 IETM 研制工程总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [8] 朱兴动. 武器装备交互式电子技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [9] 吴国东, 刘 巍, 黄 牛, 等. 交互式电子技术手册 (IETM) 规范体系分析 [J]. 船电技术, 2011, 31 (3): 6-9.
- [10] 吴成茂. 基于 TCP/IP 的航天发射场一体化试验信息系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 147-149.