

单台份航空发动机 IETM 研究

Research on Single Aircraft Engine IETM

西北工业大学机电学院 张 蕊 杨海成 孙惠斌

[摘要] 为解决航空发动机装配、服役信息流脱节问题,提出面向单台份航空发动机 IETM (交互式电子技术手册)应用模型。在此基础上,通过研究统一的数据源模型,将发动机设计说明、装配质量数据、维修记录等集成一体。在 S1000D 数据模块的基础上,设计描述单台份发动机技术状态的数据模块,重点研究数据模型向数据模块的转换,提出特定物料节点某时间段的维修装配信息查询算法,实现发动机内外场数据信息的闭环管理。最后,以发动机某物料节点为例,对上述方法进行验证。

关键词: 单台份航空发动机 交互式电子技术手册 S1000D 数据模块*

[ABSTRACT] In order to solve the disconnect problem of the information flow between aero engine assembly and service, the research proposes the aircraft engine IETM application model. Based on this model, a unified data source model is proposed, which intergrates the descripton of the engine design, assembly quality data and maintenance records. The article designs the Data Module (DM) which describes the state of the data of a single engine technology based on S1000D. To achieve data closed loop management, we focus on the conversion of the data resource modle to DM. Finally, an instance proves that the method above is effective.

Keywords: Single aircraft engine IETM S1000D Data module(DM)

航空发动机是飞机的重要组成部分,其装配质量及维修服务决定着发动机的服役寿命。然而,现有的航空发动机制造数据存储于厂内数据库,维修服役数据则在外场产生并存储,这使得发动机厂内、厂外数据彼此孤立、脱节,造成厂内对零部件维修状态追溯困难及外场服役人员只能凭借经验进行维修的问题,从而带来人力资源的浪费,降低维修效率及水平。

针对这一问题,国内外相关研究人员进行了大量深

入的研究,王旭等提出闭环 PLM (closed-loop product lifecycle management) 的概念^[1];梁伟杰等以某型火炮显示系统为例,提出了基于产品生命周期管理的交互式电子技术手册创建流程、系统总体框架^[2];Jun H B 利用 RDF 技术研究产品生命周期元模型建模的方法,定义了 RDF 数据模型以及描述和管理元模型的机制^[3]。这些研究虽然涉及复杂产品数据集成方法的各个方面,但如何使这些信息基于统一的平台形成有效的闭环控制管理,这方面的技术成果还很少。

交互式电子技术手册(IETM)可发布在光盘或者便携式计算机上,携带方便,易采集现场数据。更重要的是,IETM 的数据模块思想符合 CALS 提出的“一次创建,多次使用”的理念。基于 IETM 的平台研究航空发动机技术数据的闭环控制系统,有如下优势:(1)装配、服役、维修、维护信息采用统一的数据源模型,可以极大地方便数据的共享;(2)IETM 具备外场采集数据的能力,能够实现外场数据的及时反馈,形成“闭环”控制;(3)IETM 方便携带厂内的装配、设计信息以指导维修、维护过程,从而提高维修效率及维修水平,降低维修费用;(4)S1000D 4.1 是研究实现数据反馈及追溯的工具 LDM (Learning Data Module),为在 IETM 平台上实现数据闭环管理提供基础。

本文主要研究单台份航空发动机 IETM 的数据组织模式,提出面向单台份航空发动机 IETM 的闭环应用模型。在此基础上,研究统一的数据源模型及描述单台份航空发动机物料、装配、维修数据的数据模块,提出基于数据模型的搜索算法以及数据模型向数据模块转化的关系,以实现数据模型与数据模块的相互转换。

1 单台份航空发动机 IETM 的应用模式

单台份航空发动机 IETM 采用双向的应用模式,即发动机厂内的数据发布至光盘或者辅助设备,为外场维修提供指导;同时,外场数据通过辅助设备采集,并被携带回厂内,以更新数据存储模型。该模式通过对发动机生命周期信息的闭环管理,能实现过程、资源的协调管理。

发动机设计阶段,设计部门存储发动机的结构

* 国家科技支撑计划 2012BAF10B09。

BOM,并在物料 BOM 节点上添加各物料节点属性值,如某零部件的功能属性、描述属性等,同时制定发动机维修、维护、大修计划。

发动机装配阶段,装配人员按照设计部门的结构 BOM 进行安装、检验、试验,产生的质量、检验数据存储于装配 BOM 中。

发动机飞行、维修阶段,依据其飞行情况及维修状态记录发动机外场的飞行历史、维修状态。

发动机各阶段产生的技术数据在厂内通过 BOM 结构及各 BOM 的逻辑关系组织,存储于单台份航空发动机的 IETM 统一数据模型中,且主要采用 SQL 关系型数据库。外场服役产生的维修、装配或使用数据则通过便携式辅助设备采集,采集的数据以数据模块的形式存在。外场服役时,数据模型中的数据通过定义算法实现数据模型向数据模块的转换,外场的的数据则运用文献[4]的方法实现数据模块向数据模型的转换,从而实现厂内外数据的有效集成。

2 单台份 IETM 统一的数据源模型

2.1 航空发动机数据信息

由于航空发动机结构复杂,业务流程众多,因此形成的业务数据繁琐、逻辑关系复杂,并被分成静态信息和动态数据信息 2 类。静态信息指在发动机概念设计、方案设计和工程设计阶段产生、且不随发动机各项业务活动发生变化的数据,主要包括发动机的工作原理、维修计划、零部件功能数据、发动机检测标准等;动态信息指在发动机生命周期的各项活动中产生并发生变化的数据,主要包括发动机飞行历史数据、装配质量数据,产品结构配置、维修维护数据,物料节点信息。动态信息数据繁琐,变化多样,其逻辑关系为:单次维修过程对应指定零部件,但一个零部件对应若干装配检测表单(如检验表、故检表等),同时一张表单对应若干零部件(如有些表单中的表单项涉及多个部件);一台发动机对应若干次飞行历史,每次飞行历史仅针对单台份发动机;一次维修过程对应若干装配检测表单,同时每张检验表单对应若干零部件的维修。

2.2 单台份航空发动机 IETM 统一的数据模型

单台份航空发动机 IETM 的管理模型根据其管理对象可以抽象为一个六元组 $Q=\{H, M, C, Pv, R, T\}$ 。式中, T 表示单台发动机 T 时刻的技术数据模型, H 为单次飞行记录 h 的集合,且 $h=\{ID_{hi}, t, v, r, te, e, p\}$,其中 ID_{hi} 为该次飞行记录的唯一标识, t 为发动机飞行时间, v 为发动机飞行速度, r 为发动机工作转速, te 为发动机工作时燃气涡轮出口温度, e 为飞行环境, p 为飞行操作人员。当 $r \notin [r_{\min}, r_{\max}]$ 时(r_{\min} 、 r_{\max} 为发动机规定转速

的最小及最大值),发动机需进行检测维修,并且 r 和 te 均必须小于或等于其临界值 r_{\max} 和 te_{\max} ,同时累计飞行时间 $\sum_{i=1}^n t_i \leq T_{\text{规定}}$ (t_i 为每次飞行时间)。

M 为实例物料节点 m 的集合,且有 $m_i=\{ID_{m_i}, a_1, a_2, a_3, \dots, a_N\}$, N 为自然数。式中 m 是一个实例物料,可以为产品、部件、组件或者零件; ID_{m_i} 是实例物料的唯一标识,用于计算机唯一存储和识别; a_i 为任意物料节点的节点属性,可根据实际情况灵活实例化,比如物料批次、生产厂家、寿命、关键尺寸等。

装配质量数据集合 $C=\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_l\}$, l 为自然数。 $c_i=\{ID_{c_i}, pc_i, pc_2, \dots, pc_n\}$, n 为自然数,且 $c_i \subset C$ 。由装配检测信息的特点可知,任意检测信息均对应唯一的物料信息节点, ID_{c_i} 为检测信息的唯一标识, c_i 为检测信息的节点属性,且属性可实例化为装配检验节点、发动机试车节点等。当 c_i 为装配检验节点时, $pc_i=\{ID_{pc_i}, cc_{pc_i}, cs_{pc_i}, cf_{pc_i}\}$,其中 ID_{pc_i} 唯一标识该检测属性, cc_{pc_i} 为检测内容, cs_{pc_i} 为该检测项的标准值, cf_{pc_i} 为该检测项的实际检测值。当 c_i 为发动机试车节点时, $pc_i=\{ID_{pc_i}, ot, wt, op, r, u, i\}$,其中 ID_{pc_i} 同样唯一标识发动机试车节点属性, ot 为油温, wt 为水温, op 为油压, r 为转速, u 、 i 分别为启动电流和电压。

操作序列集合 $Pv=\{pvw_1, \dots, pvw_m, pvn_1, \dots, pvn_n\}$, $m, n \in N$, pvw_i 为维修操作的子项, pvn_i 为串换件操作的子项。 $pvw_i=(mpvw_i, pvw_i, ID, In_i, Out_i, t_i)$, $i \in N$,其中, $mpvw_i$ 为该操作的物料节点, ID 唯一标识该维修属性, In_i 为输入数据, Out_i 为输出数据, t_i 为此次操作时间; $In_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$, $Out_i=(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik})$, a_{ik} 为故障类型、维修设备、维修人员、维修计划、维修工具等, b_{ik} 为维修后零部件寿命、维修状态、性能参数等。串换件操作 $pvn_i=(mpnw_i, pnw_i, wh, ypn, hpn, hps, pe)$,其中 $mpnw_i$ 为串换件的目标零件, wh 为该次换件的原因, ypn 为换下零件的编号, hpn 为换上零件的编号, hps 为换上零件的来源, pe 为执行该次操作的人员。

关系集合 R 为所有关系的总称,包括物料关系 M_r , 装配质量数据关系 C_r , 飞行历史关系 H_r , 物料-装配质量数据关系 MC_r , 飞行历史-该台发动机关系 MH_r 等。其中, $M_r=\{m_r|m_r=(m_i, m_j, \text{type}), m_i, m_j \in M, \text{type} \in [-1, 1]\}$,若 m_i 为 m_j 的父节点,则 $\text{type}=1$,反之 $\text{type}=-1$;关系集合 C_r 、 H_r 的定义类似 M_r ;物料-装配质量数据关系 MC_r 与飞行历史-该台发动机关系 MH_r 定义类似,其中 $MC_r=\{mc_r|mc_r=(m_i, c_j), m_i \in M, c_j \in C\}$,且 m_i 、 c_j 存在对应关系, $MH_r=\{mh_r|mh_r=(m_o, h_i), m_o$ 为发动机节点, $h \in H, i \in N\}$ 。其各项之间的关系可用图 1 表示。

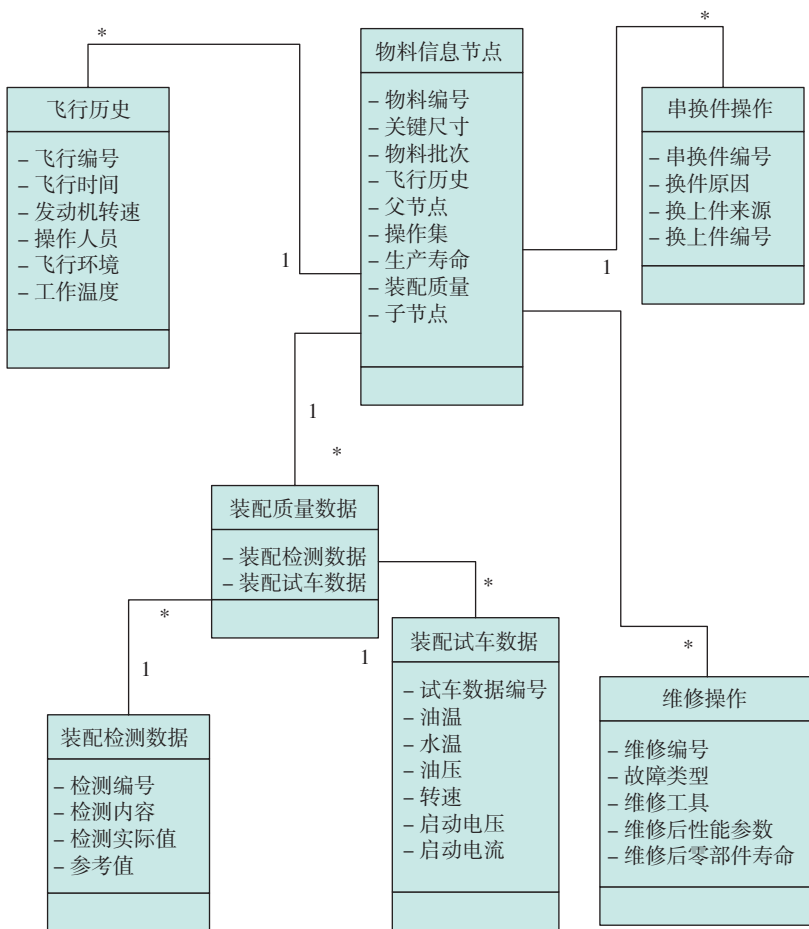


图1 航空发动机数据模型
Fig.1 Aircraft engine data model

3 单台份 IETM 数据模块与数据模型的映射

3.1 单台份 IETM 数据模块

数据模块是单台份航空发动机 IETM 系统的基础。一个数据模块可以独立地描述一条完整的信息。为实现航空发动机数据的闭环管理,建立数据模块之间的必然联系,本文在 S1000D 基础上提出描述单台份航空发动机技术状态的数据模块,并在原有标识状态段和内容段的基础上添加数据模块关系段,其关系段主要有参考关系、引用关系、对象关系。参考关系指执行某数据模块时,需翻阅其他的数据模块,如进行维修时,要参考装配检测信息、试车信息;引用关系指执行某数据模块必须以执行另一数据模块为前提;对象关系为某数据模块引起物料信息节点的改变,即物料信息数据模块为该数据模块的对象。单台份航空发动机数据模块有 4 类:物料信息数据模块、维修操作模块、装配质量数据模块和飞行历史数据模块。数据模块均以 XML 文档的形式存在,且与 XML 文档树存在一一对应关系,数据模块中的属性与 XML 文档数据节点实例化时存在一对多

关系。物料信息数据模块与物料 XML 文档树结构如图 2 所示。

3.2 单台份航空发动机 IETM 数据发布及信息反馈

单台份航空发动机的信息数据在厂内以数据模型的形式进行存储,而外场服役时便携式辅助设备存储的是数据模块,并可采集外场维修服役信息,维修人员返厂时,可将这些数据模块携带的维修信息以数据模型定义的存储方式存入中心数据库,这就需建立数据模型和数据模块的相互关系,实现数据模型向数据模块的转换以及数据模块向数据模型的转换。本节针对单台份 IETM 数据的发布提出查询指定时间段特定物料节点维修操作信息的算法,实现数据模型向数据模块的转换;同时,数据模块均以 XML 文档树的形式存储。文献 [4] 建立独立于任何模式的 XML 文档数据,采用遍历 XML 文档树的方法实现从数据模块向数据模型的转换,最终实现数据循环闭环控制。

定义: 假设 $m_1 \in M, m_2 \in M$, 若 $mID_1=mID_2$, 且 m_1 的父节点 $ParentID_{m_1}$ 与 m_2 的父节点 $ParentID_{m_2}$ 相等, 那么物料 m_1 与物料 m_2 是同一种物料, 记为 $m_1=m_2$, 否则 $m_1 \neq m_2$ 。

设给定的物料节点及其属性为 $m_x = (mID_x, a_{1x}, a_{2x}, \dots, a_{nx})$, 给定查询时间段为 $[T_{sx}, T_{ex}]$, 具体算法如下:

(1) 读取时间节点 T_i , 若 $T_i \subset [T_{sx}, T_{ex}]$, 构造临时表 $PBomTempory$ 存储操作序列, 并将其执行步骤 (2); 若 $T_i \not\subset [T_{sx}, T_{ex}]$, 返回步骤 (1), 继续查询。

(2) 构造存放物料节点的临时表 $MBomTempory$, 将 M_i 的顶级物料节点 m_o 存入临时表, 判断 m_o 与给定节点 m_x 是否为同一物料节点, 若 $m_o = m_x$, 则停止遍历, 建立物料信息数据模块, 执行步骤 (3); 若 $m_o \neq m_x$, 跳到步骤 (4)。

(3) 读取 $PBomTempory$ 中的第一节点, 将 $mpvw_i$ 节点与物料节点 m_x 比对, 若为同一物料节点, 则保留该节点, 建立维修信息数据模块, 并人工辅助添加标志和状态段。关系段的关系名称为对象关系, 关联数据模块 1 为步骤 (2) 建立的物料信息数据模块, 关联数据模块 2 为建立的维修操作数据模块, 内容段同样按照维修操作数据模块定义的 XML 模式建立, 跳到步骤 (5); 如与 m_x

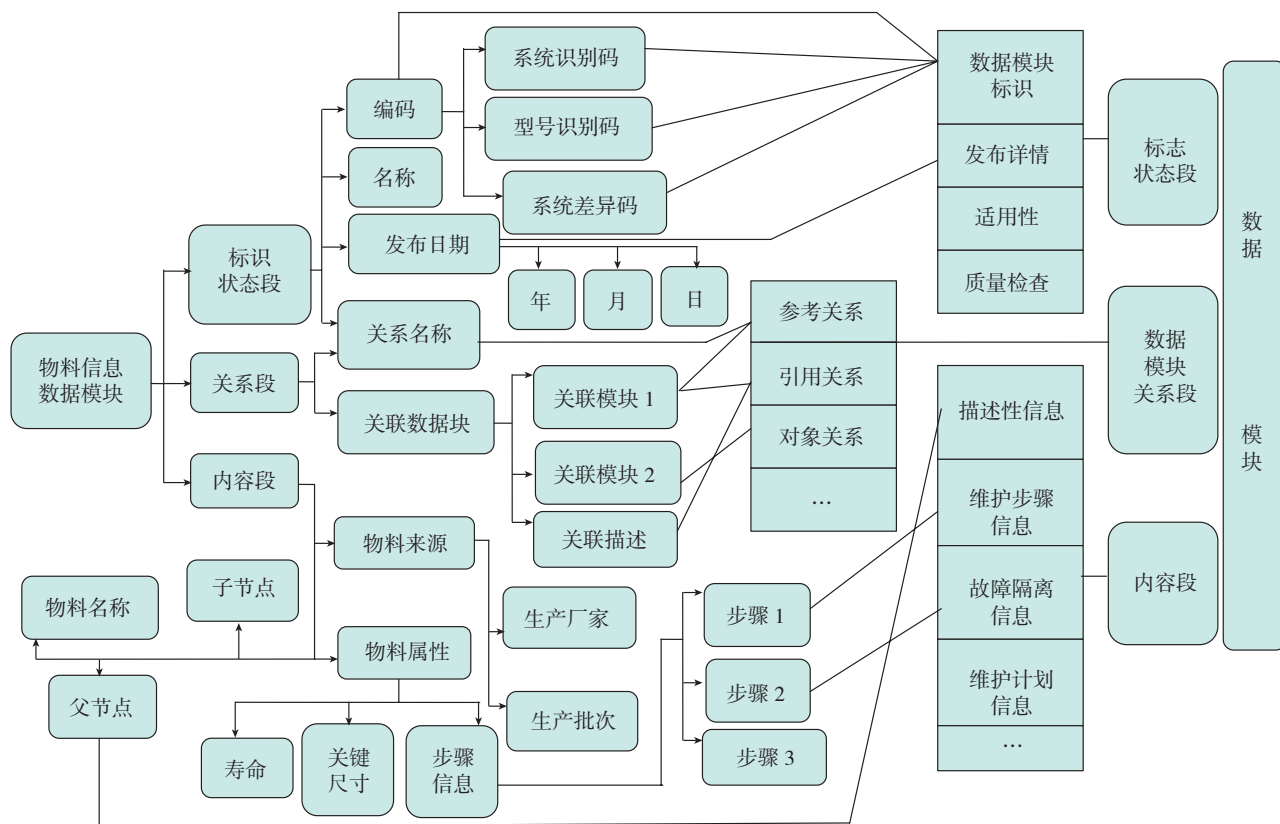


图2 数据模块结构及XML文档树

Fig.2 Data module structure and XML document tree

不为同一物料节点,则删除该节点,跳到步骤(5);

(4)将步骤(2)中物料节点的下一级物料节点倒序存入临时表 $MBomTemporary$,当临时表的记录大于零时,取出物料信息节点 $m_i (i \in N)$,记录其 mID 以及 $ParentID$,并与给定节点 m_x 比对,若为同一种物料,则停止遍历,执行步骤(3);若 $m_i \neq m_x$,则以 m_i 为根节点,继续步骤(4)。

(5)读取 $PBomTemporary$ 中的下一节点,重复执行步骤(3),直至 $PBomTemporary$ 记录中为零,并执行步骤(6)。

(6)读取下一时间点,重复执行以上步骤,直至 $[T_{sx}, T_{ex}]$ 时间段的全部时间点记录为止。

4 实例研究

下面为某台航空发动机 T_i 时刻的数据模型,

$$Q_i = \{H_i, M_i, C_i, P_{V_i}, R_i, T_i\},$$

其中, $M_i = \{m_1, m_2, m_3, m_5, m_7, m_8, m_9\}$, 且 $type(m_1, m_2)=1$, $type(m_1, m_3)=1$, $type(m_2, m_5)=1$, $type(m_2, m_7)=1$, $type(m_3, m_9)=1$, $type(m_3, m_8)=1$, 零件 m_3 的物料节点为 $m_3 = \{71-01-23, 1, XX \cdots 3year, 0.2, 2011.10\}$, 操作序列集合为 $P_{V_i} = \{pvw_1, pvw_2, pvw_3, \cdots,$

$pvc_1, pvc_3\}$, 其中以物料节点 m_1 为对象的操作序列为 $pvw_1 = \{m_1, 71-03-06, \cdots, In_1, Out_1, t_i\}$, 以物料节点 m_3 为对象的操作序列为 pvw_2, pvw_3 , 分别表示 $pvw_2 = \{m_3, 71-02-23, \cdots, In_2, Out_2, t_i\}$, $pvw_3 = \{m_3, 71-02-23, \cdots, In_3, Out_3, t_i\}$, $type(pvw_2, pvw_3)=1$, $In_2 = (m_3 \text{ 工作不正常, 工具 A, 工具 B, 维修人员 A, 场地 B})$, $Out_2 = (m_3 \text{ 被卸下})$, $In_3 = (m_3 \text{ 无节点 } m_3, \text{ 工具 1, 工具 2, 维修人员 A, 场地 B})$, $Out_3 = (m_3 \text{ 正常工作})$ 。发布时,关于物料节点 m_3 的数据模块有物料信息数据模块 1、维修信息模块 2 和 3,其中 1 与 2 和 3 为对象关系,2 和 3 为参考关系。外场服务时,按照维修计划在 T_i 时刻对物料节点 m_3 进行去污、清洗、调整,这些信息均存储在维修数据模块 4 和 5 中,并在返厂时通过采用文献[4]遍历数据模块 XML 文档树的方法被存入数据库中,使数据模型得到更新。 m_3 物料节点在 T_i 时刻数据模型的操作序列即增加为 $P_{V_i} = \{pvw_1, pvw_2, pvw_3, pvw_4, pvw_5, \cdots, pvc_1, pvc_3\}$, 其中 $pvw_4 = \{m_3, 71-02-23-02, \cdots, In_4, Out_4, t_i\}$, $pvw_5 = \{m_3, 71-02-23-07, \cdots, In_5, Out_5, t_i\}$, $In_4 = (污垢, 清洗剂, 小李, \cdots)$, Out_4 为空, $In_5 = (m_3, 扳手, 固定器, 调整角度, 小李, \cdots)$, Out_5 为零部件 m_3 正常工作。

(下转第 92 页)

由上式可知,把直升机地面联合试验中被测部件的时域振动速度信号取有效值就可获得其振动速度总量,再按正弦信号的有效值和半峰值的关系转换,可以把振动速度总量转换成最大单幅峰值振动速度总量。此外,试验中需要对被测对象的多个频段的最大单幅峰值振动速度总量进行监测,因此,振动速度信号的时域数据在转换之前,应当进行滤波,如图7所示。

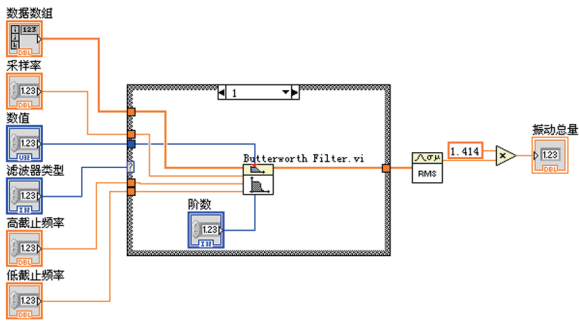


图7 最大单幅峰值振动速度总量计算

Fig.7 Total vibration calculation of single speed peak

3 系统功能验证

振动监测系统在直升机地面联合试验之前进行了功能验证的调试,给 EMX-4250 的全部通道加上标准振动源信号,通过客户端的虚拟仪器逐一检查振动信号,所有通道均可以正确监测到标准信号,系统功能得以初步验证。进入试验阶段后,系统可以正确地监测试验被测振动信号,如图 8、9 所示,证实了系统功能的有效性。

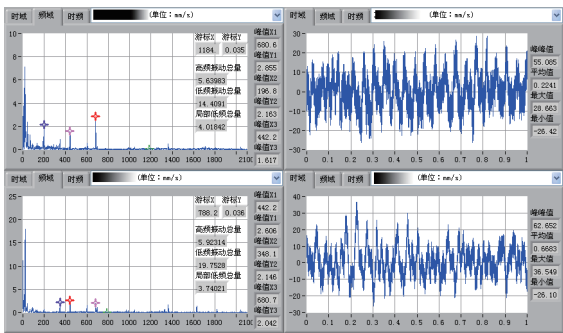


图8 在线试验数据的客户端监视界面(局部)

Fig.8 Online data monitor client interface (partial)

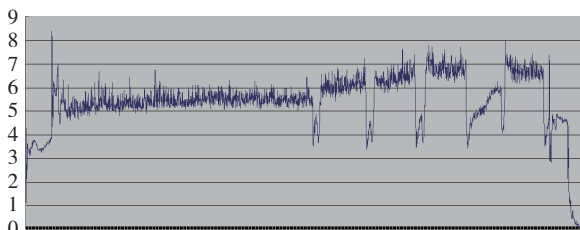


图9 客户端记录的最大单幅峰值振动速度总量数据

Fig.9 Single speed peak total vibration data saved by client

4 结束语

通过振动监测系统在直升机地面联合试验中的应用,进一步说明系统可以满足试验的振动信号监测需求;基于 PXIe 总线的测试设备和 Explab 软件组成了高性能高性价比的数据采集系统;UDP 网络协议提供了多个客户端同时监视试验被测参数的模式;LabVIEW 虚拟仪器通过软件替代传统仪器完成了数据分析处理、结果显示等工作。本系统较于商业化振动采集系统,不但降低了开发成本,还具有实时监测参数多、振动监测方式多样化等多方面的优势,本系统的开发模式对今后的试验台振动测试系统设计都具有可参照性。

参考文献

- [1] 尹春望,童国荣.直升机振动水平控制技术途径探讨.直升机技术,2009(4): 28-32.
- [2] 陈树学,刘莹.LabVIEW 宝典.北京:电子工业出版社,2011.
- [3] 李德葆,陆秋海.工程振动试验分析.北京:清华大学出版社,2004.

(责编 深蓝)

(上接第 87 页)

5 结论

单台份航空发动机 IETM 数据量庞大,为实现生命周期的闭环管理,本文重点针对动态信息建立单台份 IETM 的数据模型,在 S1000D 标准描述的数据模块的基础上扩充数据模块关系段,建立独立于任何数据模块的 XML 文档和关系数据库映射,从而实现 IETM 开发中所有数据模块与数据模型的转换关系,并讨论查询指定时间段给定物料信息节点维修信息的搜索算法。对于整个 IETM 系统,数据模型的建立以及独立于模式的映射关系尤为重要。

参考文献

- [1] 王旭,李文川.制造业新理念——闭环产品生命周期管理.中国机械工程,2010,21(14):1687-1693.
- [2] 梁伟杰,杜晓明.面向产品生命周期管理的交互式电子技术手册建模.计算机集成制造系统,2008,14(11):2268-2276.
- [3] Jun H B. Product life-cycle metadata modeling and its application with RDF//IEEE transactions on knowledge and data engineering,2007,19(12):1680-1693.
- [4] 姜莉莉,彭和平.XML 文档和关系数据库在 IETM 开发中的应用.微计算机信息,2009,25(10):28-30.
- [5] ASD S1000D:International specification for technical publications utilizing a common source database Issue 4.0 [S].
- [6] 钟诗胜,付旭云.面向航空公司的发动机维修数据管理模型.计算机集成制造系统,2010,16(15):1096-1102.

(责编 谷雨)