

Study and Realization of the Prototype for the Large Aircraft's PHM

WANG Jian¹, ZHU En^{1,2}, LV Zhi¹, YAO Qi¹, HUANG Qiang¹, ZHANG Guigang¹

(1. Institute of Automation, CAS, Beijing 100190; 2. Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: This paper deals with the demand of the start-up and implementation of domestic commercial Large Aircraft plan, gives a thorough research on the prototype of the Large Aircraft's Prognostics and Health Management (PHM) system, proposes a prototype architecture of the Large Aircraft's PHM system based on air-ground integration management and detailed design solution on software and hardware, predicts the technical problem of the design and development of the Large Aircraft's PHM, and proposes the general principle of the implementation.

Key words: Large aircraft; prognostics and health management system; prototype system; air-ground integration management; System architecture

大飞机预测与健康管理原型系统的研究与实现

王健¹, 朱恩^{1,2}, 吕鹭¹, 姚琦¹, 黄强¹, 张桂刚¹

(中国科学院自动化研究所, 北京, 100190)

(东南大学, 江苏南京, 211102)

摘要: 针对国内商用大飞机项目启动和实施的迫切需要, 对大飞机预测与健康管理系统的原型系统进行了研究, 给出了基于空地一体化管理的飞机预测与健康管理系统的原型系统结构及其软硬件的设计方案, 讨论了未来大飞机预测与健康管理系统设计和研制方面可能遇到的主要技术问题, 并提出了一般的实施原则。

关键词: 大飞机; 预测与健康管理; 原型系统; 空地一体化管理; 系统结构

中图分类号: TP277

文献标志码: A

文章编号:

目前, 国外已将飞机预测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 系统成功地应用在 Boeing777/787 和 Airbus380 等机型上^[1,2,3,4,5], 取得了显著的综合效益。对于国内来说, 飞机预测与健康管理系统(以下简称“健康管理系统”)是个新兴事物, 随着国内商用大飞机项目的启动和实施, 飞机健康管理体系的研制已成为一个紧迫任务, 特别是在国内没有设计先例和国外技术垄断的前提下, 迫切需要研制一套大飞机健康管理体系的原型系统。原型系统的开发, 不但可及时地为大飞机设计和制造提出新要求, 同时也能从大飞机的研制过程中获取预测与健康管理原型系统所需的关键信息, 两者是相辅相成的。

1 系统总体结构

按照空地一体化管理的设想, 健康管理系统涉及到飞机的各个方面, 组织架构上应将飞机健康管理系统分成两大部分: 机载健康管理系统和地面健康管理系统。

飞机健康管理系统基本组成及整体结构如图 1 所示, 机载健康管理系统实施机上的故障诊断及其管理功能。地面健康管理系统分为三个分系统: 空管分系统、维修分系统以及原厂分系统。空管分系统负责管制空域内的飞机的健康管理, 为空中交通管制服务; 维修分系统为飞机在地面维修服务; 原厂分系统为飞机维修维护的总支持方, 并为技术升级创造条件等。而机载健康管理系统与地面健

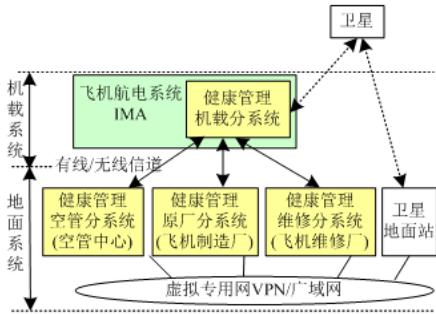


图 1 飞机健康管理系统基本组成及整体结构

康管理系统的各个分系统之间采用无线/有线混合方式进行通讯。借鉴国外商用飞机制造公司成熟的案例和国际目前通行的做法^[6,7,8], 将飞机健康管理的任务进行逻辑分层, 见图 2, 各逻辑层的主要任务如下。

- (1) 信号处理层: 获取和处理飞机内部的状态数据。
 - (2) 状态监测层: 监测飞机内部及外部环境的状况。
 - (3) 健康评估层: 诊断飞机健康状态, 负责故障隔离、余度管理和资源再分配。
 - (4) 预测层: 预测部件和子系统的剩余使用寿命。
 - (5) 决策支持层: 对故障进行分析推理, 根据维修资源, 给出维修建议。
 - (6) 表示层: 实现健康管理系统与维修方的人机交互。
- 系统的实现强调高可靠性和实时性, 系统在具体设计时采用分层化和模块化方法, 软硬件设计尽可能采用分布式和网络化的结构并将可测性设计纳入到具体工程中, 在系统各个模块之间的接口方面, 尽量采用国际成熟的技术标准, 逐步形成自己的标准化体系并加以开放, 为系统进一步升级铺平道路, 大胆采用国内外最新的技术和商用成熟产品, 提高产品性价比。

2 机载健康管理方案研制方案

机载健康管理的基本任务是: 接收飞机各分系统发来的状态和故障信息, 通过综合分析确定故障源并发出警信息, 保存故障历史信息, 通过人机接口在地面对飞机各个子系统进行测试, 在飞行途中下传故障信息, 在地面上下载信息并实施数据备份。

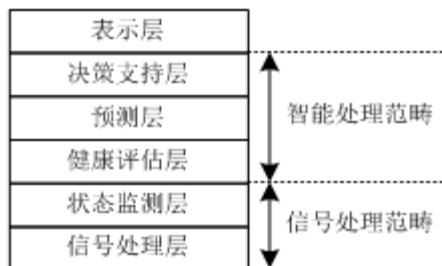


图 2 飞机健康管理系统的逻辑划分

2.1 硬件系统研制方案

目前, 航空电子系统朝着 IMA^[9] (综合模块化航空电子) 的方向发展, IMA 系统一般形式是基于嵌入式计算机系统的、分布式交换网络的、余度备份式的综合电子信息管理系统。A380 的各个子系统的控制单元 LRU/LRM 以及各种处理计算机通过 9 个交换机, 接到一个全双工的、余度的局域网上 (AFDX 航空以太网), Boeing787 的 IMA 系统结构与 A380 类似, 我国未来大飞机 IMA 系统也会采用类似结构。机载健康管理系隶属于 IMA 系统, 也要针对 IMA 系统的要求进行设计。

如图 3 所示机载健康管理系统的硬件系统基本结构。系统采用负载分担分布处理方式, 飞机各个分系统的故障数据源通过 IMA 系统输入到健康管理系统, 各个分系统之间采用高速链路进行通讯。整个硬件系统采取双机热备份方式工作, 每台健康管理计算机均可访问两个数据库的信息。健康管理系统实时接收从各个飞机分系统 LRU/LRM 传来的状态和故障数据信息, 处理后的数据交给数据库管理计算机来进行保管, 通信方式有局网和卫星等。

健康管理系中健康管理计算机和数据库管理计算机都是嵌入式系统, 它们具有如下的特性:

- (1) 模块化, 易于集成, 支持软件的 ARINC653 标准;
- (2) 支持高速网络通讯, 如 ARINC664/AFDX 以太网等;
- (3) 支持嵌入式实时操作系统和嵌入式实时数据库系统;
- (4) 支持余度管理, 易于进行计算机系统切换;
- (5) 高可靠性要求, 平均无故障时间要高于一般系统;

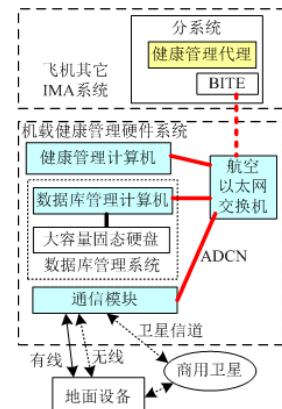


图 3 机载健康管理系统的硬件系统基本结构

(6) 能够通过环境测试：温度、湿度、振动、电磁冲击、老化、电源波动等。

图 4 分别给出了健康管理计算机和数据库管理计算机的硬件基本结构。在图 4 健康管理计算机的硬件基本结构中，CPU 采用 RISC CPU，总线采用 PCI 总线（未来可选择的总线技术还有很多，可支持芯片与芯片之间 10Gb/s 串行通信方式），高速交换式以太网 ARINC664/AFDX 模块用于实现基于交换机和以太网的数据交换，物理连接上采用 100Mb/s 速率和双绞铜缆连接方式（未来可将速率提高到 1~10Gb/s，并采用光纤介质）。目前，Boeing777/787 和 A380 都使用了 ARINC664/AFDX 总线技术^[19]。航空以太网交换机需要专门设计，它应具有如下特性：支持 ARINC664/AFDX 以太网标准、有较大地用于交换的内存 RAM 容量、有多个 ARINC664/AFDX 以太网 I/O 接口、无阻塞交换、支持 ARINC653 软件标准、支持嵌入式实时操作系统。为了维护和诊断的需要，飞机和地面需要交换大量的数据，因此机-地间需要具有高速数据通讯能力。在机场内，飞机可通过高速无线局域网（IEEE802.16m 等）^[20]或有线局域网（IEEE802.3ae 等）^[21]与地面进行高速数据交换；在飞行途中，可通过卫星通讯链路和租用商用卫星来实现与地面的数据交换。

2.2 软件系统研制方案

在图 3 中有 4 个嵌入式计算机系统，健康管理计算机的软件系统基本结构如图 5 所示。

2.2.1 健康管理软件

按照健康管理六层模型^[10,11,12]，并针对机载的特点，在机载系统中主要选取信号处理层、状态监测层和表示层 3 层。

(1) 信号处理层软件的设计

信号处理层的主要任务是获得和处理飞机各个分系统的状态和故障数据，飞机各个分系统控制模块 LRU/LRM

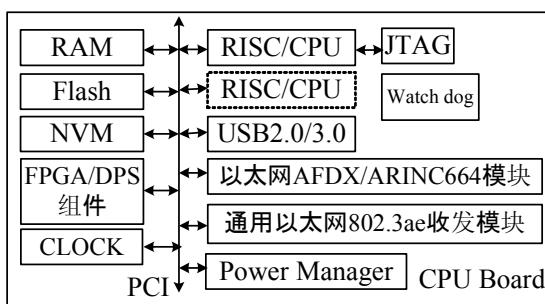


图 4 健康管理计算机的硬件基本结构

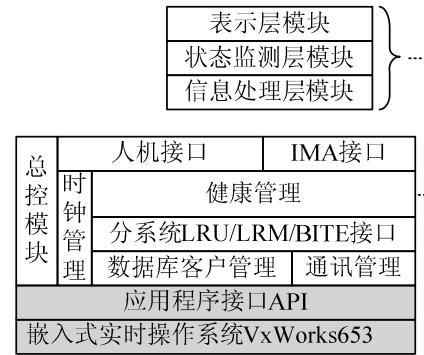


图 5 健康管理计算机的软件系统基本结构

和健康管理系统协作来承担这一任务，具体分工如图 6 所示。

各分系统控制单元 LRU/LRM 内设置的测试模块（BITE）提供状态和故障数据，健康管理系统收集各个 BITE 单元提供的数据，完成整个飞机的健康管理。在分系统控制模块 LRU/LRM 设计中，要解决信号的获取和处理两大问题，与健康管理直接相关的是信号获取问题，通过设计的传感器系统来解决各种物理信号的获取问题，分系统控制模块有一个重要的任务就是故障检测，要检测传感器和作动器的故障，飞机各分系统模块内要设有机内测试功能 BIT 和相应的处理模块 BITE，BITE 模块要通过接口将故障上报给中心计算机和健康管理计算机。健康管理系统的设计方对分系统控制模块要按标准提出故障管理的统一要求，这个标准目前可以参考 ARINC604，ARINC604 规定 BITE 设计的基本原则和建议，分系统控制模块研制方和健康管理研制方要协调制定出双方之间的接口。

飞机有 3 大分系统：机体、发动机和机载设备，机载设备又分若干子系统，如飞控系统、液压系统、导航系统等等，每个系统都有专用的控制处理单元或模块（LRU/LRM），分系统出现的故障绝大多数能通过 LRU/LRM 来了解，因此 LRU/LRM 是健康管理系统主要的数据来源。

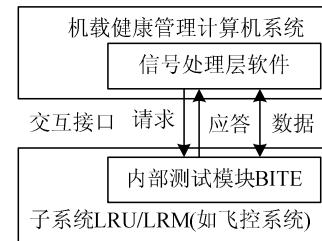


图 6 机载健康管理系统的信号处理层与飞机各个 IMA 分系统的接口

IMA 设计方案从总体角度，要制定分系统控制模块 BITE 单元与健康管理进行数据交换的接口，分硬件接口与软件接口两类，在 IMA 环境下，统一通过 ARINC664/AFDX 网来交换数据。由于健康管理与分系统之间是一对多的关系，与 IMA 网的星型结构正好相对应，在软件接口方面：要设计和规定数据格式、纠错编解码方式、应答握手方式、软件设计要遵守 ARINC653 规范。信息处理层与各分系统 LRU/LRM/BITE 都有唯一识别地址（如 MAC/IP 地址），LRU/LRM/BITE 也是嵌入式系统，每个 BITE 负责与健康管理信息处理层交换本系统相关数据。信息处理层定期遍历各分系统 BITE 单元，获取需要的信息，并将其存放在数据库中，原则上，信息处理层对数据不做过多处理。

（2）状态监测层软件设计

在信息处理层处理的结果基础上，状态检测层软件将获得的状态数据与数据库中模型规定的参考数据进行比较，得出各个分系统是否有故障的结论，并将结论告知上层，状态检测层对数据的处理也是较简单的，它的工作重点是如何高效地实时地管好数据库的大量数据的操作问题：如何将数据进行保存，如何根据数据库中的故障模型找出系统故障等等，并将故障上报给表示层进行告警。

（3）表示层软件设计

在故障处理系统内部，每一种故障都与一个故障代码相对应，故障处理软件处理的是故障代码，这样可提高处理速度并节省存储空间，但将故障汇报给人时，必须将故障代码字翻译成直观易读的形式，表示层就是实现翻译工作的一种软件，它是人与健康管理进行交互的接口。

2.2.2 数据库客户管理软件

主要管理健康管理计算机与数据库计算机之间的数据交互问题，健康管理计算机在进行海量数据的存取时，并不是直接访问海量存储器，而是按关系数据库存取要求，发出存取请求，数据库计算机根据请求对数据库进行操作。

2.2.3 余度管理软件

计算机本身也会出故障，因此双机系统要实时地检测两台计算机是否正常工作，实施主从切换，将故障机及时切成从机。

2.2.4 人机接口软件

这是开发者与系统管理者的工作接口。

2.2.5 通讯管理软件

主要管理计算机之间的数据通讯问题，按航空以太网 ARINC664/AFDX 通讯的格式进行管理，如设置地址、打包/拆包，碰撞管理、差错控制、缓存、定时等等。

2.2.6 数据库服务器管理软件

主要管理数据库计算机与健康管理计算机之间的数据交互问题，它的作用见图 7 的说明。数据库管理计算机的数据库服务器管理软件获得数据存取请求，利用 SQL 程序，通知数据库管理软件 DBMS 对数据进行操作，对数据库进行数据的写入或读出操作。数据库服务器管理软件的研制，关键是要解决飞机各种性能数据的数据结构设计问题，如何将各种时间关联的、连续信号、离散信号等数据存放在关系数据库中，同时要达到实时处理要求，确实是个挑战。

3 地面健康管理系统研制方案

地面健康管理系统是一个分布式处理系统，其计算资源丰富，可以比机载系统更完善，功能更强。地面健康管理系统的一般形式是基于工作站的，基于异构网（广域网和局域网混合的）的、余度备份式的，基于数据库技术的分布式综合电子信息系统。

地面健康管理系统可根据需要分布在不同的应用场合：如机场、维修厂和原制造厂等。健康管理系统按双机热备份方式接到异构广域网上，可用商用工作站来做处理机，可靠性很高；另外，对实时性也要有很高要求，因为地面系统要同时处理多架飞机的健康管理信息，可采用大型数据库系统开发健康管理系统。地面健康管理系统利用无线或有线信道，可实时地与空中和地面多架飞机交换数据。

地面健康管理系统任务是：复杂故障诊断，接收各个飞机由空中或地面发回的状态和故障信息，对复杂故障进行详细处理，包括实时故障诊断、维修支持（便于地面维修人员进行故障定位和提供维修建议）、健康预测（便于空管系统合理调配飞行计划）和技术升级（利用积累的飞机故障历史数据，为飞机技术升级提供宝贵资料）。

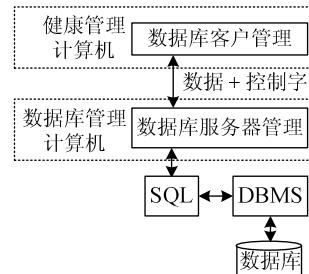


图 7 存储管理服务器的作用

3.1 硬件系统研制方案

地面健康管理系统的硬件系统基本结构如图 8 所示。硬件系统采用负载分担分布处理方式，有利于提高处理速度，降低系统复杂性。地面健康管理获得飞机的故障数据源有 4 条途径：通过商用卫星的数据链、通过无线局域网/城域网下载数据、通过有线方式从地面飞机下载数据以及通过地面广域网获得其它区域有关飞机的历史记录。整个硬件系统采取双机热备份方式工作，计算机一般不需要特别研制，直接采用商用设备即可。

3.2 软件系统研制方案

地面健康管理计算机的软件系统基本结构如图 9 所示，其主要模块包括健康管理软件、通讯管理软件、数据库客户管理软件、余度管理软件、网络管理软件、系统间故障数据交换接口、数据备份与恢复、人机接口、数据库服务器管理软件以及 Web 服务器软件。

与机载健康管理相互补充，重点进行健康评估层、预测层、决策支持层和表示层^[13~17]等 4 层的算法及其软件的设计问题。其中，表示层与机载系统类似，这里不再赘述。

(1) 健康评估层软件设计

主要解决对故障的综合判断问题，要根据不同的故障组合，正确判断出故障的真正原因。飞机系统的故障有单点故障、多点故障、间歇故障、随机故障、因果故障，慢变故障、突发故障、随机共振故障等等，飞机故障建模是世界性难题。飞机是巨型机电系统，即使按可测性要求设计，它的故障组合也是天文数字，如何排除虚警，找出真正的故障，是一个艰巨任务。目前，根据文献报道，有两种方法在实际系统中得到了应用，一种是基于逻辑方程的故障综合诊断方法，在 Boeing747-400 中得到了应用，另一种是基于统计模型的故障综合诊断方法，在 Boeing777 中

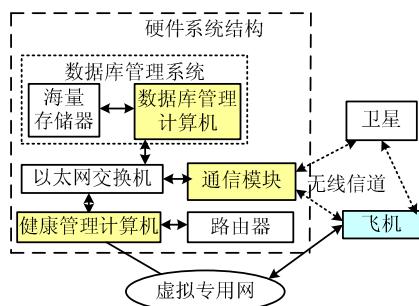


图 8 飞机地面健康管理硬件系统基本结构

得到了应用，这两类方法都是由波音公司和霍尼韦尔公司共同开发的。基于统计模型的故障诊断方法克服基于逻辑

方程的故障综合诊断方法的缺点，这两类方法都是综合采用了多种诊断方法：统计信号处理、人工智能和数据库技术。我国大飞机项目缺乏大量的飞机故障统计数据，要创造条件不断积累这些宝贵的故障数据。在研制健康评估层的过程中，无论是基于逻辑方程模型的诊断方法，还是基于统计的诊断方法，都必须解决在飞机环境下实时、高可靠性处理的要求。因此在数据库开发上，不能采用常规数据库的开发方法，而实时海量数据库的开发需要解决许多新难题，如实时性与计算资源的矛盾等。从理论上讲，一个系统存在的故障分可测与不可测两种，故障诊断不可能达到 100% 的覆盖率。

(2) 预测层软件设计

预测层软件主要解决飞机及零部件的剩余寿命问题。在飞机出厂时，规定了零部件的使用寿命等。预测层要管理两个数据库子库，一个子库记录零配件的特性数据，另一个数据库子库记录零配件的实际使用时间，如果出现零件更换，要及时更新元件的实际使用时间，预测层软件定期检查零配件的剩余使用寿命，当某剩余使用寿命达到额定阈值时，提出告警信息，通知维修和更换。对于新研飞机来说，零件使用寿命没有统计资料，而在使用过程中，零件往往会提前更换或报废，因此，零件的使用寿命统计往往不准确，统计规律不易掌握，这就给建立预测模型带来很大困难。

4 研制环境建立

如图 10 所示飞机预测与健康管理系统的研制环境的基本组成与结构，这个研制环境模拟了未来飞机预测与健康管理系统的实际应用场景，具备设计和验证功能，且这个环境即使在目标设备研制完成后还是可用的，可为机载设备不断升级服务。

要建立一个研制环境并逐步加以完善，研制环境将配备硬件测试设备、软件开发工具、环境模拟设备等，其中环境模拟设备用来模拟飞机的实际环境，如温度、电磁噪声、振动等等。

5 结束语

飞机预测与健康管理不仅能够减少大飞机的各类意外风险，有利于大飞机的故障预知、规避和解决，而且能增强商用大飞机的市场核心竞争力，提高航空公司的综合效益。本文是在国内商用飞机（包括军机）在没有设计先例和国外技术垄断的前提下，对大飞机健康管理体系的原型系统进行了研究，给出了原型系统相应的系统总体结构和软硬件的设计方案。原型系统的开发，不但可及时地为大飞机设计和制造提出新要求，同时也能从大飞机的研

制过程中获取预测与健康管理原型系统所需的关键信息，两者是相辅相成的。

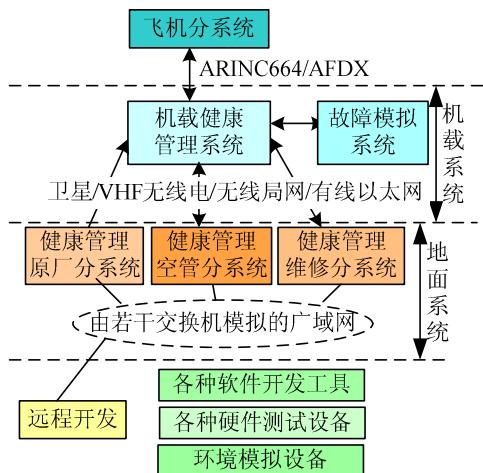


图 10 健康管理系统研制环境的基本组成与结构

参考文献

- [1] Michael Whalen. Technologies for IMA Systems[M]. Rockwell Collins, October 28, 2008.
- [2] Jean-Bernard. A380 Integrated Modular Avionics-The history, objects and challenges of the deployment of IMA on A380, Airbus
- [3] <http://ti.arc.nasa.gov/>
- [4] http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/Airplane_Health_Management.pdf
- [5] <http://www.airbus.com/innovation/proven-concepts/in-fleet-support/airman/>
- [6] VACHTSEVANOS G, LEWIS F, ROEMER M, et al. Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems[M]. John Wiley & Sons, Inc, 2006:284-354.
- [7] HESS A, FILA L. The joint strike fighter(JSF) PHM Concept: Potential impact on aging aircraft problems[C]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2002, 6: 3021-3026.
- [8] KEITH M J, RAYMOND R B. Diagnostics to Prognostics- A product availability technology evolution[C]. The 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS 2007), Orlando, FL, USA, 2007:113-118.
- [9] Jean-Bernard, A380 Integrated Modular Avionics-The history, objectives and challenges of the deployment of IMA on A380,Airbus,2008
- [10] ANDREW K S, LIN D, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20: 1483-1510.
- [11] MICHAEL G P. Prognostics and health management of electronics[M]. John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2008:3-20.
- [12] LUO J, BIXBY A, Pattipat I K, et al. An interacting multiple model approach to model-based prognostics[C]. Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Washington, DC, USA, 2003(1), 189-194.
- [13] SHEPPARD J W, KAUFMAN M A, WILMERING T. J. IEEE standards for prognostics and health management[C]. Proceedings of IEEE AUTOTESTCON 2008, Salt Lake City, Utah, USA, 2008:97-103.
- [14] IEEE Std 1232-2002. IEEE Standard for Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments(AI-ESTATE)[S]. Piscataway, New Jersey: IEEE Standards Association Press, 2002.
- [15] IEEE P1636. Draft IEEE Trial Use Standard for Software Interface for Maintenance Information Collection and Analysis(SIMICA), D1.6[S]. Piscataway, New Jersey: IEEE Standards Association Press, 2008.
- [16] IEEE Std 1636.1-2007. IEEE Trial Use Standard for Software Interface for Maintenance Information Collection and Analysis(SIMICA): Exchanging Test Results and Session Information via the eXtensible Markup Language(XML)[S]. Piscataway, New Jersey: IEEE Standards Association Press, 2007.
- [17] ISO 10303-239: 2005. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 239: Application Protocol: Product Life Cycle Support[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- [18] David M. Kroenke, David J. Auer, Database Processing-Fundamentals, Design, and Implementation[M], Edition 11, PEARSON EDUCATION ASIA. Inc, 2010
- [19] <http://www.arinc.com>
- [20] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.16m-2011.html>
- [21] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ae-2002.htm>