

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.013

## 面向维修数据采集与质量保证的维修领域本体建模

杨明耀, 钱彦岭, 杜凯

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073)

**摘要:** 为解决当前装备维修领域数据采集存在的问题, 提出一种本体驱动的维修数据采集与质量保证方法。采用本体技术, 在分析装备维修数据的基础上, 构建 2 层维修本体-领域本体和应用本体, 给出本体构建的方法及应用本体设计维修数据条目的实际案例, 并以 VE 分配为例进行分析验证。结果表明: 该方法能更好地满足维修领域的特点, 为相关研究提供借鉴。

**关键词:** 维修; 数据采集; 本体建模

**中图分类号:** TJ07 **文献标志码:** A

## Ontology Modeling of Maintenance Domain Oriented to Data Collection and Quality Assurance

Yang Mingyao, Qian Yanling, Du Kai

(Laboratory of Science & Technology on Integrated Logistics Support, College of Mechatronic Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aiming at the practical difficulties and prominent problems in maintenance data collection, this paper introduced ontology to maintenance domain. Based on the analysis of maintenance data, it originally modeled two-level maintenance ontology, domain ontology and application ontology. According to the result, a new method is proposed to solve the data entry setting and quality assurance. Finally the paper gave an example to verify the feasibility and validity of the method. Results show that this method can satisfy maintenance domain more accurately, and thus provides a good reference for relating researches.

**Keywords:** maintenance; data collection; ontology modeling

### 0 前言

采集装备的维修数据对于指导维修过程、分析评估装备维修能力和管理水平、提取装备运行和维修规律具有重要意义<sup>[1]</sup>。但实际采集到的维修数据, 往往存在内容设置与填写术语不统一、数据缺损或冗余等现象<sup>[2]</sup>。为利用这些数据, 往往需要花费大量的人力物力进行数据清洗和转换<sup>[3]</sup>。尽管目前提出了不少数据清洗的方法<sup>[4]</sup>, 但总体来说仍然是在既成事实基础上的一种补救性措施。如何提高维修数据的采集质量, 是一个亟待解决的问题。

研究发现, 影响维修数据采集质量的一个重要原因是维修数据本身的概念、涵义、结构、条目缺乏统一规范和定义, 从而造成了所采集到的数据存在大量的异构。对于这个问题, 目前在维修领域还没有研究者提出明确的解决方法。

对于数据的异构问题, 当前的研究主要集中在信息科学领域<sup>[5-7]</sup>。本体被广泛用于实现信息的交换、共享和互操作, 为某个领域提供共享的知识<sup>[8]</sup>, 从而使异构数据在语义层次上实现信息集成<sup>[9]</sup>。受此启发, 笔者将本体理论引入到维修领域, 以解决

维修数据采集质量问题。

### 1 维修数据采集与本体

#### 1.1 数据采集的本质

维修数据采集是维修工作的重要组成部分, 它贯穿于维修工作的全过程。典型的维修数据记录如表 1 所示。

通过表 1 可看到, 维修数据是由形如“数量=1、工序名称=‘确定故障部位’”等数据条目构成的集合, 可称之为数据集。显然, 要采集维修数据、保证数据采集质量, 必须定义好相应的数据条目。

考察表 1, 可以发现数据条目的设置存在以下规律:

1) 维修数据采集条目的设置不是凭空产生的, 而是来源于人们头脑中已经建立起来的某种概念。如采集“流量控制器工作频数”数据, 正是由于维修人员头脑中已经具备了“频数”的概念, 才可能去采集记录, 否则, 就会直接忽略该数据。

2) 维修数据条目的设置具有目的性, 每个数据条目一定是有用的, 或者是跟维修人员执行的某种

收稿日期: 2014-07-13; 修回日期: 2014-09-07

作者简介: 杨明耀(1989—), 男, 云南人, 在读硕士, 从事军队装备综合保障信息化研究。

任务相关。如前述流量控制器工作频数这个数据条目，如果是执行流量控制器运行工况监控或维修后试车，则需要采集，如果是停机维修，则不需要记录该数据。

3) 数据条目之间具备语义相关性。如“流量控制器工作频数”，如果不加限定词“流量控制器工作”，则采集到的数据就不完整，数据就会产生歧义或者模糊。如果数据条目的语义相关性完备，数据

之间就可以相互关联验证，从而将有用数据提取出来，既不遗漏也不重复。

4) 维修数据条目的设置应在数据集的完备性和易用性之间取得平衡。以故障记录为例，从完备性角度讲，应尽可能将设备所有可能发生的故障罗列出来，供数据记录人员选择填写；但从易用性角度讲，罗列数据过多，就不易记录和后续查找，降低工作效率。

表 1 典型维修数据记录

项目名称	项目件号	组件名称	组件件号	维修工作	工作编号	工作频数	维修级别	说明事项					
控制器汇总板	A101-153	流量控制器	A101-153	更换有故障线路板	03	0.002	中继级						
维修作业 工序号	工序 名称	维修 时间	操作人员		总工时	日历 时间	维修设备		备件及消耗品		技术文件		
			数量	等级			名称	编号	名称	件号	数量	名称	编号
0010	确定故障部位	0.05	1	4	0.05	0.05	测试器	1622-5	线路板接线座螺钉	A101-153-8 A101-8	1	检测表	Z-102
.....													

基于上述发现，笔者将维修数据集的设置转化为数据集到概念集的映射覆盖问题，如图 1 所示。

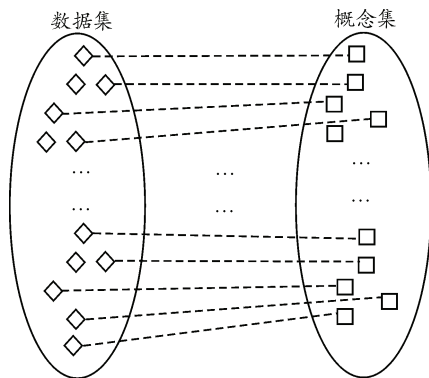


图 1 数据集与概念集的关系

首先，笔者根据装备的维修要求，构造本领域内共享、规范和形式化描述的概念，即本体<sup>[10]</sup>。显然，数据集中的每个数据条目是概念集中某一概念的实例。数据集与概念集之间的映射关系由维修任务决定，并通过考虑数据集的完备性和易用性进行优化选择。数据条目的语义关系由概念之间的语义相关性决定，通过概念之间的语义相关性来对数据的完整性进行检验和填补。基于图 1 的映射关系，笔者可以在建立完备概念集的基础上，对数据条目按照某种任务要求进行筛选。在保证数据完备的基础上，尽可能减少数据条目的数量。同时，基于本体知识共享和重用的能力，确保数据条目之间的语义相关性和条目术语填写的一致性，从而提高维修数据采集的质量。

### 1.2 本体与维修本体

本体是共享概念模型的形式化规范说明，主要

由概念集、概念的属性集、概念的关系集、案例集和公理等要素构成<sup>[11]</sup>，良好的层次划分对本体构造来说至关重要。如果本体没有层次划分，则本体有可能沦为“词典加分类树”。针对维修领域的特点，结合表 1 所涉及的数据内容，笔者将维修本体划分为 3 个层次，如图 2 所示。

第 1 个层次：反映维修领域所共有的概念，如部件、维修作业程序等，笔者称之为领域知识。这些知识不会因装备的差异而有所不同，是人们在装备维修保障的长期实践中形成的共识性观念，是稳定的领域知识。

第 2 个层次：反映某个专业或某型装备维修保障共识性的一些概念，比如控制器汇总板、更换故障线路板的作业程序和典型故障模式等，笔者称之为应用知识。这些知识，既是对维修领域知识的继承，又带有明显的专业或应用场景特征。

第 3 个层次：数据记录，如每次维修对应的部件号、消耗的维修工时等。维修数据是领域维修知识或应用维修知识在实际维修过程中的具体反映，是知识的实例化、条目化和具体化，也就是维修数据采集所面临的直接对象。

维修数据的采集属于领域信息集成的范畴，但由于维修领域有其复杂性和特殊性，又与一般的领域信息集成有所差别。用本体的观点来分析维修数据，可以让维修数据显得简洁明了。

经过前面对数据采集本质的刻画、对维修数据的描述和特点分析可以发现，将本体理论用于指导维修数据采集有其独特的优势。显然，良好的本体构造是后续数据集设置及质量保证的基础。

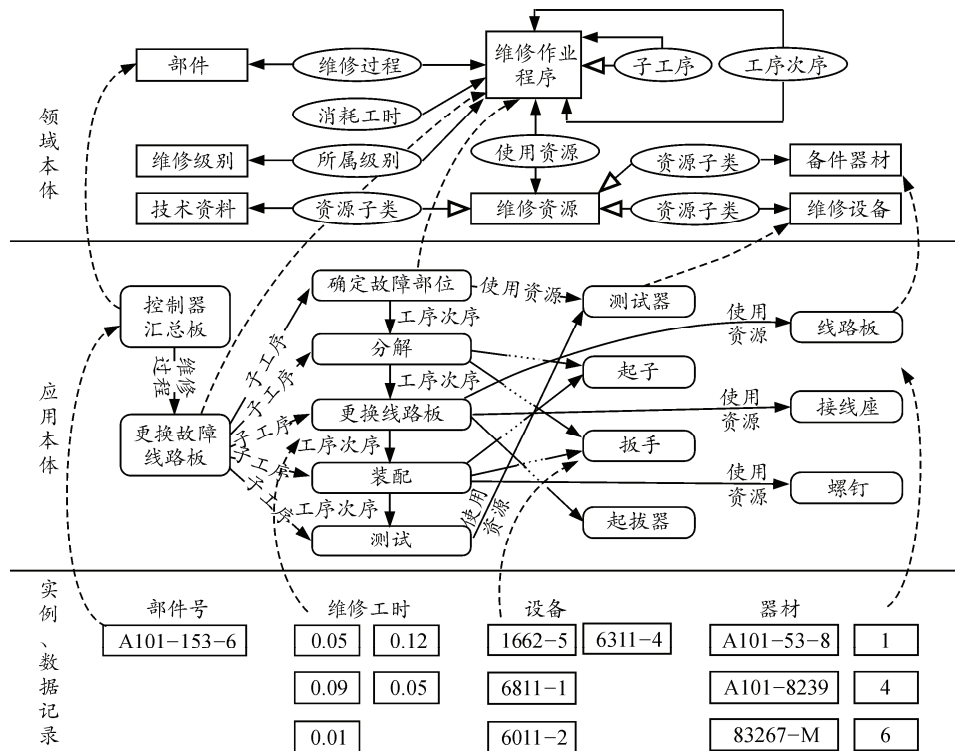


图 2 维修记录概念层次

## 2 维修领域本体与应用本体的构造

对于不同的领域，本体的构建方法不尽相同，目前尚没有一套完善的标准来规范本体模型的构建<sup>[10]</sup>。当下比较明确的只有一些构造的准则，其中最为公认的是 Gruber 等人提出的本体构建 5 条准则，即本体构建要遵循明确性和客观性、完整性、一致性、最大单调可扩展性以及最少约束性<sup>[8,11]</sup>。

参看当前本体构建的实例，笔者发现当前各个领域本体的构建所采取的骨架法、评估法和 IDEF5 法等基本上都是自上而下，将整个领域构建成一个大的本体，以覆盖所涉及的全部内容<sup>[12]</sup>。这种方法可以很好地适用于医学等领域，如斯坦福大学采用七步法<sup>[13]</sup>成功构建了医学领域本体。但这与维修领域的特点不相符合。因为维修领域涉及的范围非常宽泛，跨越多个学科，而且装备复杂、型号多样、维修任务不确定。如果采取传统的方式构建本体，必然会造成构造效率低下、通用性差等结果。

为了满足装备维修领域的特点，结合 1.2 节对维修数据本体的分析，笔者构建了 2 层维修本体，分别为领域本体和应用本体。其中领域本体与具体装备无关，是装备维修领域共有的概念，应用本体是根据装备的构造和维修过程构建的本体，与数据采集的条目集合直接对应。这样一来，针对具体的装备和维修任务，应用本体的绝大多数具体条目就

可以从领域本体继承而来。

### 2.1 维修领域本体的构造

构造领域本体的关键在于标志领域概念和概念之间的关联关系，产生无二义性的自然语言定义，并指定标志这些概念和关联的术语。为了力求概念体系的完整性，对于概念的选择和确定应以权威的辞海或叙词表为基础。

领域本体的构造在很大程度上是对所构造领域的知识的综合整理，所以信息域的组成和来源分析直接决定了领域本体构造的质量，也是领域本体构建的关键环节。

MIMOSA 开放系统体系结构构建了 1 个通用概念模型<sup>[14]</sup>，用来交换不同维修信息，共包含 4 个基本信息域，如图 3 所示。

#### 1) 装备构型信息域。

装备是将各维修信息系统关联起来的核心数据实体，而其他信息都是直接或间接地附着在装备数据实体之上。因此，首先需要明确描述装备自身的各种属性信息，包括装备型号、装备编号(代码)和装备功能/物理分解结构等。

在装备分解结构描述过程中，所有与维修保障工作相关的系统、子系统、组件和零件都应当列出。列出的信息包括分解单元名称、分解单元类型、信息编码/零部件号、数量和分解关系等。如果某个零

部件存在多个备选项，每个备选项都应当列出；如果某个型号零部件有具体序列号，则当前零部件的序列号也应当给出。

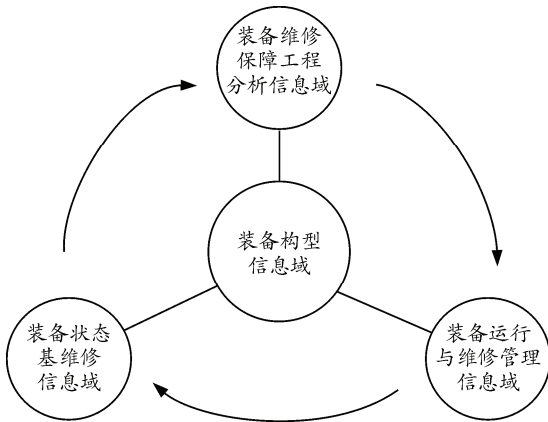


图 3 装备维修保障信息涵盖的技术领域

2) 装备维修保障工程分析信息域。

装备维修保障工程分析信息域是指装备设计阶段的各种维修保障工程分析信息，包括 FMECA(故障模式、影响与关键度分析)信息、FTA(故障树分析)信息、RCM(以可靠性为中心的维修分析)信息和 MTA(维修任务分析)信息等。

FEMCA 对分解结构中的每个组件，给出功能描述及编码、故障模式及编码、故障原因及编码、故障影响分析、故障检测方法及处理措施、故障严重等级分类等信息；FTA 对装备各种常见的顶故障事件，给出故障原因分析；故障现象和故障原因的编码与 FMECA 分析中的编码一致；RCM 给出每一部件每一种故障模式所对应的维修工作编码及其维修级别、维修间隔期等说明信息；MTA 给出每一维修工作的具体说明信息，包括维修工作类型、维修间隔、维修级别、备件要求和人员要求等。

3) 装备状态基维修信息域。

装备状态基维修信息域包括状态监控点(测点)的描述信息、状态监控运行数据(温度、压力、转速、流量等)、故障诊断/预测数据和健康评估数据等方面的信息。

4) 装备运行与维修管理信息域。

装备运行与维修管理信息域包括装备维修请求、维修计划、维修资源、维修工单、故障与维修记录以及使用记录等方面的信息。参照上述定义，考虑维修信息的基本来源，借助 Protégé 软件，笔者构造得到维修领域本体如图 4 所示。

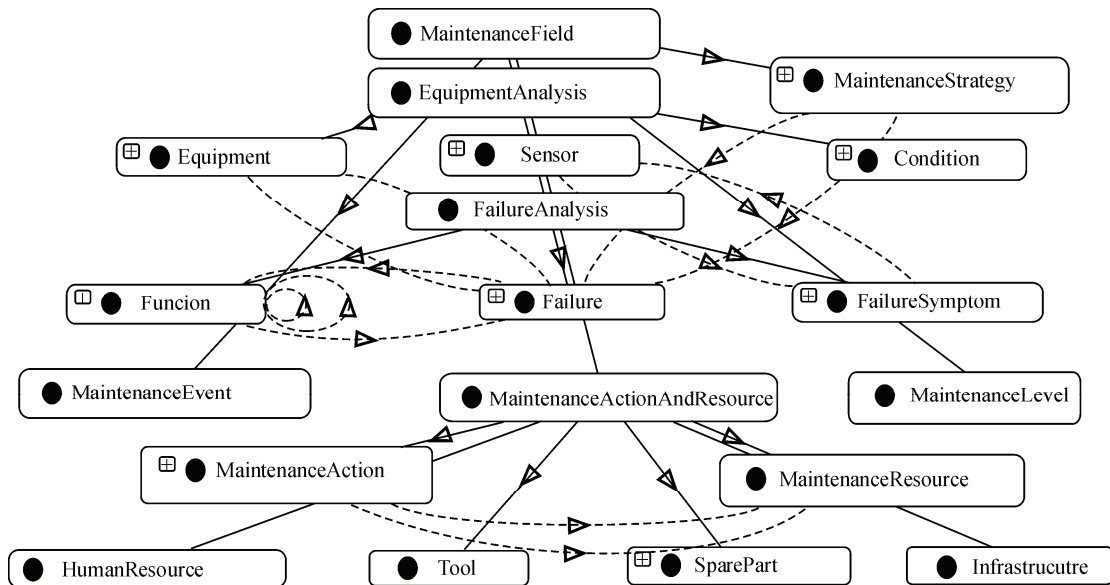


图 4 维修领域本体模型构造结果截图

图 4 中，每个矩形就是 1 个节点，代表维修领域内的某个类，如 Sensor、Condition 等；节点之间的连线表示类之间的关系，如 Failure 到 Funcion 是 influences 的关系，Funcion 到 Failure 是 influencedBy 的关系；每个类都定义了自己的属性，如 FailureSymptom 包含了 Place、StarTime 和 OverTime 等属性；大部分类有自己的子类，如

MaintenanceStrategy 包含 Inspection、Corrective 和 Replacement 等子类。整个领域本体覆盖了维修领域所共有的、与具体装备和具体维修任务无关的全部概念。

2.2 维修应用本体构造

维修应用本体反映某个专业或某型装备维修保障共识性的一些概念，该本体在维修领域本体的框

架内，同时依附于具体的装备和维修对象。

笔者可以采用维修工程分析的方法来构建维修应用本体。具体构建过程如图 5 所示。

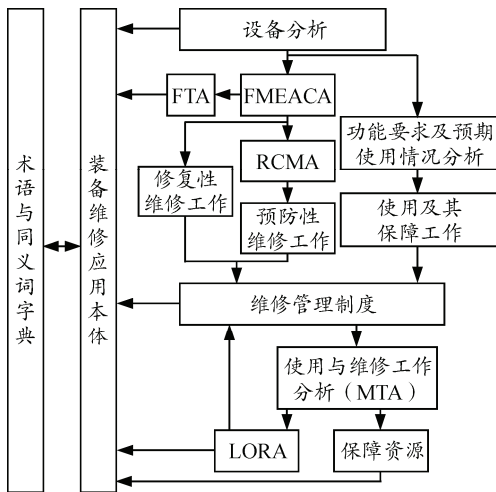


图 5 维修应用本体的构造流程

主要包括以下过程：

1) 设备分析。设备分析的目的在于确定装备对象的基本构型，确定装备关键件、关键技术状态参数及其监控方法等本体知识一般按照装备对象的物理结构自上而下进行，一般从系统级开始，逐级分解到能够进行故障定位、更换关键件，进行修复或调整的层次为止。设备分析可以参照装备自身的构

造进行，但并不需要分解到最低层次，只需分解到可更换件或标准件。

2) 故障分析。故障分析的目的在于获取装备的故障知识，包括 2 个基本过程：① 功能分析。明确装备各子系统、零部件完成的功能及功能间的因果关系，可结合设备分析过程自上而下进行。功能知识是设备自身特性所决定的知识，是静态的，一般不需要采集。但功能知识是沟通其他知识尤其是故障知识的桥梁，在构造应用本体时必须加以考虑。② 故障分析。用于获取装备可能发生的故障知识，包括故障现象和故障影响等。故障分析一般在功能分析完成后进行，可采用 FMEA 分析方法。

3) 修复性工作及 RCM 分析。目的在于确定装备的维修策略及装备运行后所遵循的维修制度等知识，以对故障采取合适的修复或预防措施。可遵循 RCM 分析的基本流程进行。

4) 维修工作分析。维修工作分析的目的在于获取与各项修复性维修工作、预防性维修工作及相使用保障工作的基本步骤、所需各项维修资源等知识。可参照 MTA 分析的基本流程进行。

5) 维修级别分析。维修级别分析用于确定各项维修的工作场合，可根据装备维修的深度和范围划分以及实际运行管理情况确定，这与维修制度划分的基层级维修、中继级维修和基地级维修不尽相同。

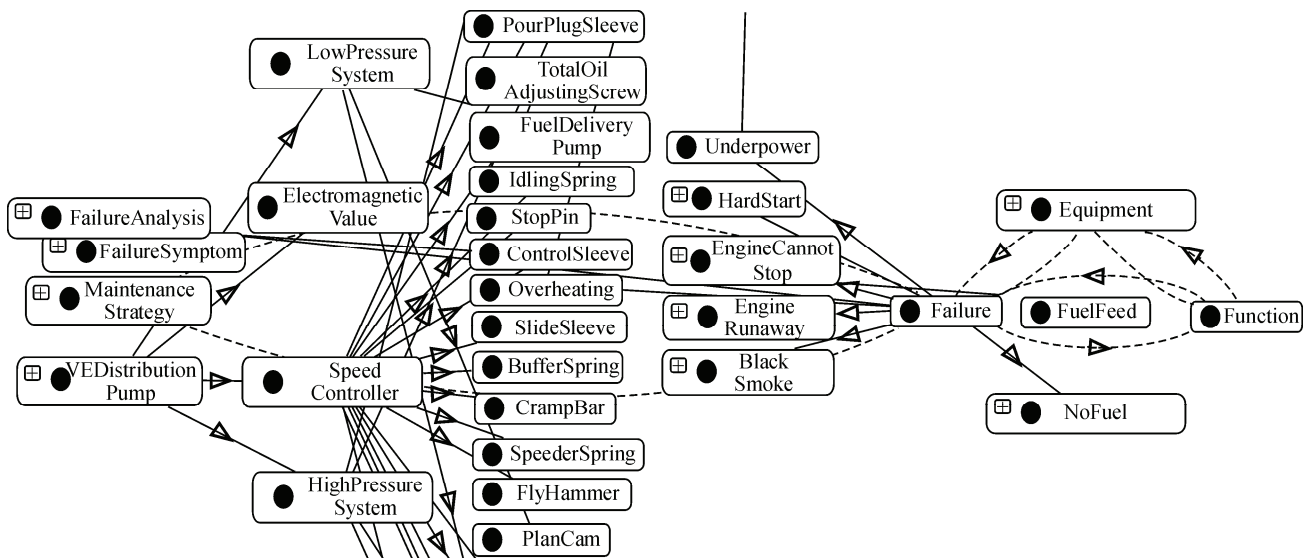


图 6 本体构造结果截图

6) 维修任务管理分析。用于获取装备实际运行期间维修任务规划等知识。

7) 本体知识融合。获取装备维修应用本体知识，需要不同人员参与，由于大家工作习惯不尽一致，在构造本体时所用术语可能存在差异，为此，

需构造同义词字典，对本体知识进行融合。

结合前述分析，笔者以 VE 分配泵的维修数据采集为例，构造得到应用本体如图 6 所示。

与领域本体不同的是，应用本体直接与具体的装备和维修任务相对应。图 6 中，装备功能、零件

名称和故障现象等都是直接和 VE 分配泵相对应的，每个具体类(数据条目)的属性和相互关系大部分从领域本体继承而来，既保证了是本体的语义完整性，又充分体现了本体对知识的共享和重用能力。

### 3 基于本体的维修数据条目设置

以 2.2 节中构建应用本体所使用的 VE 分配泵为例，下面将给出如何实现本体驱动的维修数据采集条目设置。在实际维修过程中，维修数据的采集主要有 2 种形式：1) 基于任务的，例如，计划性维修中的整体检查；2) 基于故障现象的，例如，针对“VE 分配泵不供油”这个故障而展开的数据采集。其中，第 2 种情况最为普遍。表 2 是 VE 分配泵最常见的故障现象及其可能的原因。

表 2 VE 分配泵故障现象及原因对照

序号	故障现象	故障原因
1	油泵不供油 (NoFuel)	球头销松动或卡死 预行程太大或太小 头部塞密封带损坏而泄露 电磁阀脏、卡死、损坏 操纵手柄与操纵轴位置装错
2	柴油机启动困难 (HardStart)	油泵启动油量不符合要求 回油螺钉和进油螺钉装反 电磁阀失效 电池电压不足 头部塞密封带损坏而泄露 出油阀型号不正确 调速器滑套或启动杆不灵活
3	柴油机功率不足 (UnderPower)	电磁阀工作不良 电池压力不足 回油螺栓和进油螺栓装反 增压补偿器皮膜破裂 增压补偿器进气管路漏气 油泵供油不足 内腔压力不足
4	温度太高 (OverHeating)	回油螺栓堵塞 回油螺栓和进油螺栓装反
5	柴油机冒黑烟 (BlackSmoke)	回油螺栓和进油螺栓装反 油泵供油量太大 平面凸轮磨损 滚轮磨损 柱塞弹簧折断
6	柴油机飞车 (EngineRunaway)	调速杠杆卡死 控制套不灵活
7	柴油机不能停车 (EngineCannotStop)	电磁阀损坏、阀芯卡死 停油手柄卡死或调整不正确 调速杠杆卡死 控制套不灵活

由表 2 可见，故障现象和故障原因并不是一一对应的，同一故障现象对应多个故障原因，同一故障原因也可对应多个故障现象。例如，“电磁阀失效”这个故障原因可以导致“油泵不供油”、“柴油机启动困难”、“柴油机功率不足”、“柴油机不能停车”等故障现象。在本体构造之前，这些数据间的关系模糊不清，要想得到一个完整的、良好的数据集必

须依赖于完备的领域知识和丰富的修理经验。当前工作人员在实际的修理过程中所使用的数据采集模式主要是逐条采集，条目之间没有主次之分，而且没有考虑条目的完备性，所采数据繁杂且质量低下。

在 2.1 节和 2.2 节中，笔者建立了领域本体和应用本体，理清了与 VE 分配泵维修相关的全部概念、属性及其关系。换言之，即是将与 VE 分配泵维修相关的全部数据条目明确地表示了出来。根据 1.1 节的结论，数据采集的本质是实现数据集和概念集之间的映射覆盖，其核心是数据集的设置。

首先，基于任务对概念节点评分。图 6 构造的维修应用本体可以看作是一个有向图，某个维修任务总会跟某个概念节点发生联系，以 VE 分配泵的每个故障现象为依据，对所有对应的节点进行评分和拓扑传递累加，而后得到每个节点的最终分值。这个评分值的高低将作为数据采集先后顺序和条目取舍的直接依据。这一步的展开至关重要，需要领域专家的参与，也直接体现了本体对知识的积累。

其次，考虑故障原因之间的关系。主要针对并发故障展开，例如“油泵不供油”这个故障现象和其他 6 个故障现象是互斥的关系(disjoint)，所以可以单独生成一个数据集，但是“油温太高”和“冒黑烟”是兄弟关系(sibling)，都可能由“回油螺栓和进油螺栓装反”这个原因导致，需要考虑其并发的可能，设置并发原因数据集。

最后，根据所建立的本体，以语义的完整性为依据完善数据集。例如，“油泵不供油”这个故障现象，作为“故障现象”，其属性包含故障发生的起始时间、持续时间和故障装备编号等；要对这个现象进行检查和维修，则涉及人员、工具和策略，人员的属性里面又包含技能水平和具体的名字等。

经过上面 3 步，基于“油泵不供油”这个故障现象，将得到个性化的数据集，如表 3 所示。

表 3 基于“油泵不供油”生成的数据集

序号	数据条目
1	维修人员姓名(包含了技术等级等)
2	发生故障的 VE 分配泵(编号)
3	故障发生的时间
4	开始维修的时间
5	维修策略
6	用到的工具(编号)
7	电磁阀是否损坏
8	头部塞密封带是否泄露
9	预行程是否正常
10	球头销是否松动或卡死
11	操纵手柄与操纵轴的位置是否装错
12	用到的备件编号(由维修策略选定)
13	结束维修的时间

经领域专家确认，这个数据集可以完整地覆盖“油泵不供油”这个故障现象及其维修所涉及的全部数据。

7 个单独故障现象对应 7 个数据集，加上并发可能的 4 个，总共设置 11 个数据集模板。所有这些数据集模板覆盖了涉及 VE 分配泵维修的全部数据。在数据采集过程中，采集人员只需要确定故障现象，即可根据相应的模板进行数据采集。随着本体的全面构建和维修的深入，维修数据的采集也就越完善。

#### 4 结论

笔者针对当前维修领域数据采集存在的突出问题，将维修数据的采集问题转换为数据集到概念集的映射覆盖问题。在充分分析其特点的基础上，采用本体技术，将维修领域本体构建成领域本体和应用本体，详细介绍了构建过程。并以此为依据，提出了数据条目设置与个性化数据集生成的算法。最后以 VE 分配泵为例，说明将本体技术用于指导维修数据的采集是切实可行的。

笔者将本体的构建分成领域本体和应用本体，有别于传统的本体构建模式，能更好地满足维修领域的特点，可为相关的研究提供借鉴。将 Protégé 和数据库相关联，充分考虑本体和数据采集程序的结合是后续研究的重点。

#### 参考文献：

[1] Henry Canaday, 孙立. 维修数据的云应用[J]. 航空维修与工程, 2012(6): 32-33.

\*\*\*\*\*  
(上接第 48 页)

#### 5 结论

缓冲架座弹簧缓冲器能够明显的减小射击时传递给枪架的后坐力，进而减轻枪架质量，适合应用于轻型遥控武器站的设计。同时缓冲器会对机枪的射频产生影响，在三连发射击时会减小每两发间的射频，同时使每两发间的射频互不相同。在后续的研究中可以考虑缓冲器缓冲簧参数变化对射频和后坐力的影响，以及多连发射击时射频的变化，找出缓冲器对射频和后坐力影响的定量关系。

#### 参考文献：

[1] 申正宾. 自动武器架座射击[M]. 北京：国防工业出版社, 1988: 204-238.

- [2] 田仲, 李鸿飞, 罗强一. 数据质量问题研究[J]. 军队信息化建设, 2011(3): 15-16.
- [3] 叶鸥, 张璟, 李军怀. 中文数据清洗研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14): 121-129.
- [4] 王曰芬, 章成志, 张蓓蓓, 等. 数据清洗研究综述[J]. 现代图书情报技术, 2007(12): 50-56.
- [5] 邓志鸿, 唐世渭, 张铭, 等. Ontology 研究综述[J]. 北京大学学报, 2002, 38(9): 728-730.
- [6] 刘萍, 胡月红. 领域本体学习方法和技术研究综述[J]. 现代图书情报技术, 2012(1): 19-26.
- [7] 甘键侯, 姜跃, 夏幼明. 本体方法及其应用[M]. 北京：科学出版社, 2011: 5-6.
- [8] Gruber TR. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications[J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199-220.
- [9] Kashyap V. Design and Creation of Ontologies for Environmental Information Retrieval[C]. In: Proc. of the Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management, 1999. <http://sern.ucalgary.ca/KSI/KAW/KAW99/papers/Kashyap1/kashyap.pdf>.
- [10] 冯志勇, 李文杰, 李晓红. 本体论工程及其应用[M]. 北京：清华大学出版社, 2007: 2-4.
- [11] Gruber TR. Towards Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing[J]. International Journal of Human Computer Studies. 1995, 43(5): 907-928.
- [12] 许楚奎. 基于本体的设备维护知识表示与检索研究[D]. 长沙：湖南大学, 2009: 13-17.
- [13] Natalya F Noy, Deborah L. McGuinness. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology[OL]. <http://protege.stanford.edu/publications/ontology-development/ontology101.Pdf>. 2002.
- [14] Chris Staller. Condition Based Maintenance [OL]. <http://www.mimosa.org/q=resources/whitepapers/mamufacturing>. 2014.
- \*\*\*\*\*
- [2] 陈明, 马吉胜, 贾长治, 等. 基于 ADAMS 的某型通用机枪动力学建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 2046-2048.
- [3] 殷英. 某机枪动力学特性仿真[D]. 南京：南京理工大学, 2007.
- [4] 姚养无. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京：兵器工业出版社, 2000: 114-168.
- [5] 尚利民, 宫鹏涵, 康小勇, 等. 基于 ADAMS 某自动步枪虚拟样机建模及仿真分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 19-20.
- [6] 赵彦峻, 路宇飞, 齐玉辉, 等. 单兵自动武器建模与仿真分析[J]. 南京理工大学学报：自然科学版, 2009, 33(6): 774-778.
- [7] 贾智宏, 葛藤, 周克栋. 基于 ADAMS 的自动武器虚拟样机研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 648-650.