

设备可靠性评测仿真系统^①

罗晓川¹, 袁海文¹, 马 钊²

¹(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

²(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘 要: 设备可靠性评测仿真系统是为了智能管理仓库内设备和提高设备整体可靠性. 针对仓库内设备可靠性评测, 先进行设备模型化, 提取有效因素对设备分类汇总, 以建设备聚类模型和设备管理学习模型, 并与基于可靠度的设备维护模型相结合, 完整实现对设备调度和维护的决策, 并制定有效的维护计划. 本系统创建的结构对设备可靠性评测和设备管理具有一定研究意义.

关键词: 可靠性; 设备管理; 聚类; 机械学习

Simulation System of Equipment Reliability Evaluation

LUO Xiao-Chuan¹, YUAN Hai-Wen¹, MA Zhao²

¹(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

²(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The simulation system of equipment reliability evaluation is to the intelligent management of equipment in warehouse and improving overall equipment reliability. Aimed at the equipment reliability evaluation, equipment of warehouse can be modeled. The purpose of it is extracting effective factors to classify equipment and building two models that are the clustering model and the management model. These two models can be combined with the maintenance model, which is based on the equipment reliability evaluation, in order to realize the decisions of the equipment scheduling and maintenance. It can intelligently develop the schedule of equipment's using and maintenance. The structure of this system has certain significance for the study of the equipment reliability evaluation and management at the warehouse.

Key words: reliability; equipment management; clustering; machine learning

仓库内设备可靠性评测是基于设备模型和可靠度模型建立的, 需要与设备管理系统相融合. 管理涉及到对设备和仓库二者的操作. 仓库管理^[1,2]包含大量流程化、模块化处理以提高仓库管理的效率, 设备管理和维护^[3-7]是基于设备可靠度评测和经济性进行的. 如何良好地融合设备与仓库二者的管理模型, 即把设备可靠度评测引入到设备管理体系中, 对实际应用中的库存设备管理具有很大的意义.

现阶段对于设备可靠度评测与管理研究是从经济层面出发, 如文献[3]中量化处理方法, 完全依赖于评估指标体系; 从流程化层面出发, 如文献[4]中引入

Agent 技术, 实现一种可重构、动态管理的系统. 从维护层面出发, 主要根据对设备可靠度进行评估. 对于仓库管理的研究主要包含硬件层面的流程化管理及软件层面的数据库处理. 但缺乏二者融合的结构化设计, 此为本文研究的切入点.

本系统从设备分析出发, 采用双层结构, 即设备类别与具体设备. 把仓库管理中对设备的调用情况作为管理模型的学习样本, 建立学习模型. 依据可靠度、维护成本等因素, 对设备可靠性评测, 建立维护模型, 并与管理模型集成以对设备维护进行决策. 从而做到设备可靠性评测与管理的融合.

① 基金项目:国家自然科学基金(61273165);国家电网"千人计划"专项

收稿时间:2014-08-13;收到修改稿时间:2014-09-23

1 设备模型建立

设备模型包括三个部分: 设备聚类模型、设备管理学习模型和设备维护模型. 其中设备维护模型依赖设备可靠性评测进行建立.

针对模型对象——设备进行分析. 每个设备具有唯一的系列号, 还包含名称、型号、生产地、价格、附件等属性, 这称为设备内在因素, 表示为 X_1, X_2, \dots, X_m , 构成列矩阵 X . 还包含存储位置、使用记录、设备状态、总使用时间、总维修次数等, 这称为设备与仓库管理相关因素, 表示为 Y_1, Y_2, \dots, Y_m , 构成列矩阵 Y . X 中的元素与 Y 中的元素是互不相关的. Y 中元素值依时间或其他条件而变化, 但 X 中元素值是恒定不变的. 故 X, Y 作为不同模型的输入量.

1.1 设备聚类模型

设备可根据功能、制造商、生产地、存储地等因素进行聚类. 依据设备内在因素矩阵 X 进行聚类. 聚类方法^[8]包括朴素贝叶斯(NB)分类、KNN、支持向量机(SVM)等, 它们在分类速度和分类精度上不同, 并依赖于聚类对象. 设备聚类是为设备管理学习模型服务, 主要是按设备功能聚类, 假设共有 l 个分类 $\{C_1, C_2, \dots, C_l\}$. 训练样本为所有设备名称集合 A , 记为 $\{A_1, A_2, A_3, \dots\}$.

为了提取类别特征, 需要对 A 中的元素进行分词处理. 分词技术^[9,10]属于自然语言处理技术. 中文分词是把中文序列切分为一个个单独词, 是文本挖掘的基础, 以达到电脑自动识别语句含义的目的. 分词算法分为三类: 机械分词方法、基于理解和基于统计的分词方法. 现有的中文开源分词系统有 ICTCLAS 汉语分词系统^[11], 它基于层叠隐马模型, 具有很高的准确度、多种编程接口和多线程调用能力. 本系统采用其进行分词操作.

针对分类和提取出的词集合进行特征提取, 降低计算空间维度, 加快聚类速度. 本系统采用信息增益法^[12]进行特征提取.

当有新的设备添加进仓库中, 需要根据训练样例进行分类, 使用朴素贝叶斯方法^[13,14], 并只考虑与新样本有相同特征项的分类, 此算法假定特征项出现的概率与其出现位置相独立. 具体分类算法如下:

步骤 1: 按照关系表中特征项的顺序对新设备样本进行分词, 提取出新样本的特征项集合 S , 并获取与特征项相关的类集合 C .

步骤 2: 计算 $P(C_j)$

$$P(C_j) = \text{num}(C_j) / \text{num}(C), C_j \in C \quad (1)$$

其中 $\text{num}(C)$ 表示在训练样本中类集合 C 的总数, $\text{num}(C_j)$ 表示在训练样本中属于类 C_j 的总数.

步骤 3: 计算 $P(s_i | C_j)$

$$P(s_i | C_j) = [\text{num}(C_j, s_i) + 1] / [\text{num}(C_j) + v] \quad (2)$$

其中 $\text{num}(C_j, s_i)$ 表示有词 s_i 的文本属于 C_j 类的数量; v 为类集合 C 中包含的不同特征项个数.

步骤 4: 分类判断, 如下式:

$$c = \arg \max_{C_j \in C} P(C_j) \prod_{s_i \in S} P(s_i | C_j) \quad (3)$$

若步骤 1 中特征项集合 S 为空, 即新样本中无法寻找到特征项, 需建立新的分类, 并提取特征项, 这需在相关人员指导下进行.

1.2 设备管理学习模型

设备管理学习模型是根据设备详细使用情况, 对设备与仓库管理相关因素概率化处理, 学习设备调用、使用周期、冗余使用等因素, 以对设备使用进行决策建议, 便于快速出库, 并为设备维护提供支持性服务.

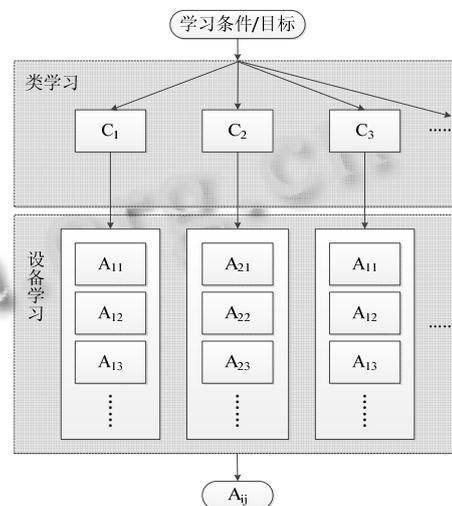


图 1 设备管理学习模型结构

本模型采用双层贝叶斯概念学习模型. 如图 1, 上层为类的概念学习, 下层为该分类内设备的概念学习. 具体执行流程为: 根据学习条件或目标, 筛选设备与仓库管理相关因素并进行概率化处理, 取各项最优值作为上层参数. 通过上层模型的贝叶斯概念学习, 得出最优类. 然后根据对应的下层模型, 进行具体设备的学习, 输出学习结果 A_{ij} .

上层参数的获取是根据设备与仓库管理相关因素矩阵 Y , 自下往上的计算. Y 根据出库使用情况而改变. 在模型学习时, 需要根据学习条件, 对相关因素进行初步筛选和转换, 输出记为 Y' , 此 Y' 的输入为时间 t 和学习条件集合 $\{P_1, P_2, P_3, \dots\}$.

已知学习条件为 $\{P_1=p_1, P_2=p_2, P_3=p_3, \dots\}$, 其中 p_1, p_2, p_3 等为已知值. 例如出库操作者、出库位置、借用人、使用时间等. 为了获取设备管理学习模型中上层参数, 其流程如图 2.

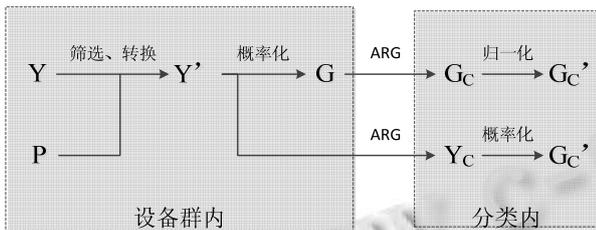


图 2 分类内因素计算流程

针对不同的设备与仓库管理相关因素, 可采用两种方法获得分类内相关因素概率 G_c' , 如图 2 所示. 第一种方法是在设备群内进行相关因素概率化, 即从 Y' 到 G , 然后选择 G 中最优值, 即概率最大值作为该分类的相关因素值初值, 针对分类集合 C 对 G_c 进行归一化处理, 得到该分类的相关因素值 G_c' . 第二种方法是不在设备群内进行概率化处理, 而是选取 Y' 的最优值作为该分类的相关因素值初值 Y_c , 然后在整个分类集合中进行概率化, 得到该分类的相关因素值 G_c' . 第二种方法的计算量小于第一种, 因为缺少归一化步骤. 此外, 第二种的概率化集合总数为分类数, 而第一种为设备数. 总之, 由于某些特殊相关因素需要选择第一种方法, 其他均使用第二种.

设备与仓库管理相关因素寻优及概率化有以下两种方法:

1) 累计频次法

在分类 C_i 中, 根据学习条件 P' , 累计某一相关因素 $Y_m (P = P')$ 的个数, 记为 $n_{C_i Y_m}$, 以此作为寻优处理后的 Y_{C_i} . 概率化处理如式 4, 其避免 $n_{C_i Y_m}$ 为零时概率值为零, 从而影响对该类的学习.

$$G_{C_i}' = \frac{n_{C_i Y_m} + 1}{\sum_{k=1}^{num(C)} n_{C_k Y_m} + num(C)} \quad (4)$$

2) 函数转换法

在分类 C_i 中, 某一相关因素表示为 Y , 学习条件为 $Y=Y_p$. 对分类 C_i 中每个设备 A_{ij} 的相关因素 $Y_{A_{ij}}$ 和 Y_p 进行数学转换, 为了得出分类 C_i 的相关因素 Y 集合对 Y_p 的密集程度. 用高斯函数表示密集程度与转换结果的关系, 如下式:

$$p(Y) = \exp \left[-\frac{(Y - Y_p)^2}{k} \right] \quad (5)$$

当 $Y=Y_p$ 时, $p(Y)=1$. 式中 k 表示函数从 Y_p 向两侧的下降速度, 可以通过经验公式或学习算法得出 k , 本系统根据 Y 集合关于 Y_p 的整体偏差和最小偏差值共同判断, 采用模糊数学方法获取 k .

之后概率化处理, 只要对 Y_c 集合进行归一化处理, 即可获得 G_c' . 具体使用该方法的相关因素有: 设备出库记录中的使用日期, 此时 Y_p 为当前时间; 设备所在地, 此时 Y_p 为出库位置等等.

设备和分类概率化处理, 进行贝叶斯概念学习, 如式(6)、(7). 此方法便于计算, 可根据需求改变假设空间.

$$c_i = \arg \max_{C_j \in C} P(C_j) \prod_{G_k \in G_c'} P(G_k | C_j) \quad (6)$$

$$A_{ij} = \arg \max_{A_{ij} \in C_i} \prod_{Y_k \in Y'} P(Y_k | A_{ij}) \quad (7)$$

由于对仓库设备进行出库、入库、报修等操作, 本系统学习模型的特点为样本库具有变化性. 贝叶斯学习模型因计算简便而能很好处理这一点, 双层模型也只需更新变化设备所对应分类的因素值. 此方法要求严格规划数据库中信息流动, 以达到高效率运行.

1.3 设备维护模型

设备维护模型是根据设备出库、入库时间和状态等条件建立设备可靠性模型, 通过设备管理学习模型决策设备维护优先级、更换等处理措施.

设备的可靠性^[15,16]是在其使用寿命周期内, 无故障地执行预期功能的能力, 在数学上表现为可靠度函数、故障率函数、平均寿命等. 设备的故障率是指在某时间间隔开始时正常工作的样本数与此时间间隔内出现故障的样本数的比率, 如图 3 所示的浴盆曲线. 浴盆曲线分为早期故障期、有用寿命期和耗损期三段. 可靠性分析主要针对有用寿命期和耗损期.

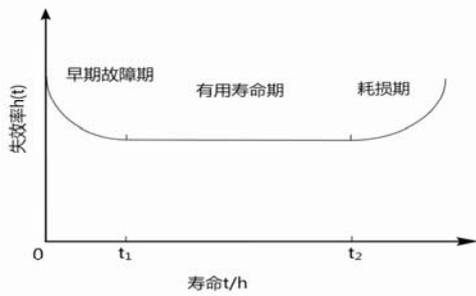


图 3 设备故障率曲线

故障率 $h(t)$ 与故障概率密度函数 $f(t)$ 、可靠度 $R(t)$ 有关, 如下式:

$$h(t) = f(t) / R(t) \quad (8)$$

同时可靠度可表示为:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (9)$$

预期寿命可表示为:

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (10)$$

常用于建立故障率概率分布 $f(t)$ 的模型包括二项分布、泊松分布、威布尔分布、指数分布、正态分布等. 故障率分布函数可依据经验公式(生产商提供)得出, 或通过试验数据获得分布规律及参数. 本系统中的设备包括两种状态: 仓库外和仓库内. 所以需要根据这两种状态建立不同的故障率概率分布模型, 并假设设备在仓库外为一直运行. 因本系统中设备多为电子设备, 采用威布尔分布作为仓库外时模型, 而在仓库内时可靠性主要表现设备老化程度. 通过定期检验仓库内设备获得故障率, 再通过蒙特卡洛方法建立模型, 现没有相关经验分布可直接使用.

威布尔分布 $W(t)$ 如下式:

$$W(t) = \beta \eta^{-\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (11)$$

其中 β 为形状参数, η 为尺度参数, γ 为位置参数.

设备的故障率表现为多段函数, 包括仓库外 $W(t)$ 和仓库内 $I(t)$ 交替出现, 如下:

$$f(t) = \begin{cases} I(t), t \in [0, t_1) \\ R(t_1)W_{\gamma=t_1}(t), t \in [t_1, t_2) \\ R(t_2)I(t - t_2), t \in [t_2, t_3) \\ R(t_3)W_{\gamma=t_3}(t), t \in [t_3, t_4) \\ \vdots \end{cases} \quad (12)$$

通过式 9、12 可求解单一设备在 t 时刻的可靠度, 这是判别设备是否需要维修的依据. 通过式 10 可求解

单一设备的预期寿命, 这是设备管理学习模型中设备属性之一.

针对同类别多设备的联合可靠度, 可视它们互为冗余设备, 并且概率分布上相互独立, 如式 13 所示. 这是为了评估整个分类的可靠性, 以做出是否需要维修、购置新设备等判断.

$$R_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{num(C)} [1 - R_{A_i}(t)] \quad (13)$$

其中 $R_{A_i}(t)$ 表示类 C 中设备 A_i 的可靠度.

通过上述原理分析, 本系统设备维护模型结构如图 4 所示.

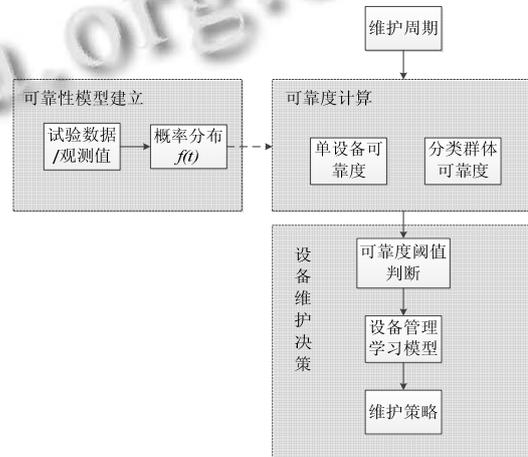


图 4 设备维护模型结构

设备维护根据维护周期进行, 包括三部分: 可靠性模型建立、可靠度计算和设备维护决策. 可靠性模型根据试验数据或是实际使用的观测值建立, 确定概率分布的参数. 使用可靠性模型对设备进行单一可靠度和分类整体可靠度计算, 然后根据可靠度阈值筛选设备, 生成学习模型的样本群. 采用设备管理学习模型, 决策设备维护的顺序、是否需要购置新设备等.

2 系统集成

2.1 设备管理系统整体结构

设备管理系统结构包括四个部分, 分别为服务器、上层管理级、底层调度级和设备录入, 如图 5 所示. 服务器存储设备信息, 并依模型进行设备管理. 服务器连接互联网, 使上层管理级和底层调度级的计算机可访问服务器上的信息. 上层管理级监控整个仓库内设备的调度与维修状况, 并对底层调度级下达指令. 底层调度级位于仓库内, 进行设备入库、设备出

库、设备维修等操作。扫描设备有三种方式，为人工输入设备序列号、扫描设备条形码和 RFID 技术^[17,18]。

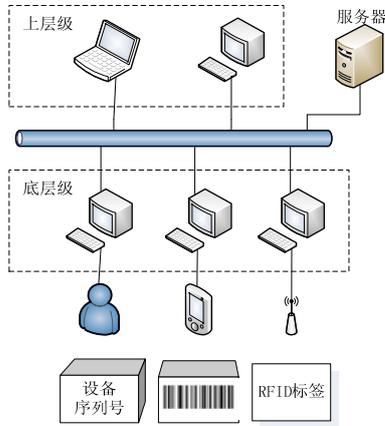


图5 设备管理系统结构

2.2 设备管理信息流动

本系统基于数据库技术开发，需要根据操作规划信息流动，以保证系统正常运行和提高效率。如图6所示，设备管理操作共有5种，分别为：加入新设备、设备出库、设备入库、周期性维修和设备维修完毕/报废。在数据库中完成数据信息存储，包含5个表，并进行设备管理，包括出库决策和维修决策。整个信息流动为面向对象操作，更新设备信息条目，用于设备管理学习器，指导对象操作。

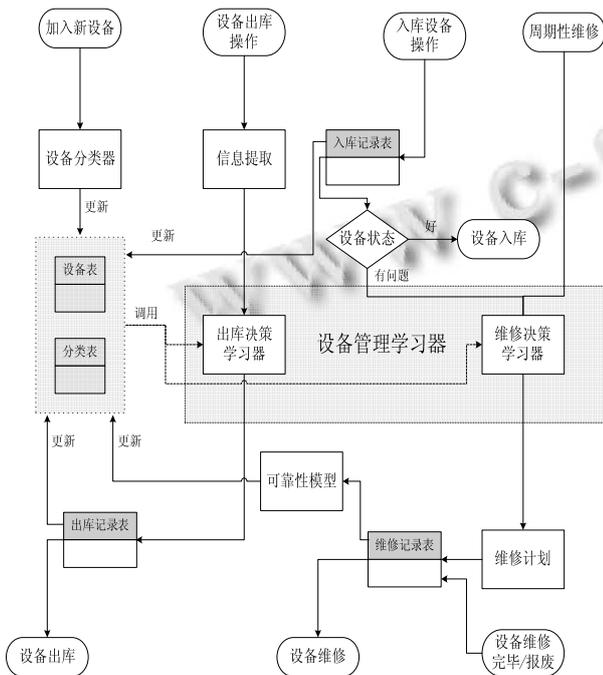


图6 设备管理信息流动

3 系统仿真与应用

3.1 设备可靠性仿真

针对本系统中的设备维护模型进行仿真，检验其可行性。假设有三类设备(A、B、C)，每类设备中有5个同功能设备。A类和B类设备每年按周期进行调用，A类一年4次，B类一年2次，每次1到2个月。C类为随机调用设备，每年1次，不定期。三类设备具有相同的故障率函数，仓库外为威尔布分布($\beta=2.5, \eta=5$)，仓库内可靠度分布为直线(斜率为-0.0036)。学习样本为程序随机生成两年内的设备调用情况。按月计算设备调用情况和可靠度，预测后5年设备可靠度变化，如表1所示。

表1 设备可靠度变化

使用时间(年)		2	3	4	5	6	7
A类	最大值	0.898	0.85	0.803	0.757	0.72	0.681
	最小值	0.886	0.839	0.792	0.753	0.712	0.673
	联合可靠度	1	1	1	0.999	0.998	0.996
B类	最大值	0.91	0.862	0.818	0.776	0.737	0.7
	最小值	0.898	0.851	0.812	0.769	0.731	0.693
	联合可靠度	1	1	1	0.999	0.999	0.997
C类	最大值	0.91	0.87	0.827	0.784	0.746	0.708
	最小值	0.898	0.86	0.818	0.776	0.734	0.693
	联合可靠度	1	1	1	0.999	0.999	0.998

如表1，A类的可靠度小于B类、C类，这与假设中A类使用率高于B类、C类相符合。并且每类设备的可靠度最大值与最小值相接近，使该类的联合可靠度较大，提升了该类的整体可靠性，因为本仿真的设备使用策略完全依据设备可靠度。设备管理学习器能准确预测出A、B类使用情况，偶尔会受到C类的影响，原因为本仿真只针对使用情况这单一因素学习，并且训练样本较少(时间为2年)。总之，本设备维护模型具有可行性。

3.2 设备管理系统应用

本系统采用 Microsoft Visual Studio 开发面向对象的应用程序，用于设备管理者和操作者使用。数据库采用 Microsoft SQL Server。设备管理学习器通过 SQL 语言实现，于服务器完成操作后通过网络反馈给使用者。本系统应用程序的主界面如图7所示，包含设备数据显示、设备操作(出库、入库、维修等)、报表输出等。本系统融合了设备管理学习模型和维护模型，根据早期对数据样本的学习，可较好地预测设备调用情况和制定设备维护计划。



图 7 设备管理系统软件界面

4 结语

本系统根据设备可靠性评测进行仿真，验证设备可靠性模型的可行性，并融入到设备管理模型中，建立完整系统。本系统面向仓库内存储的设备，通过对样本设备属性及其使用、维护情况学习，以建立聚类、管理和维护模型，做到对设备调用进行决策建议和制定设备维护计划。本系统采用模块化实现，规范信息流动，便于不同级别用户使用。

随着数据库中数据量增大，设备条目和使用情况复杂，设备管理模型需要进一步改进，以处理更加庞大的计算量及提高决策准确性。同时如何准确建立不同设备位于仓库内的可靠性模型也需要进一步研究。

参考文献

- 1 孙红,任杰.全新理念的仓库管理模型设计.仪器仪表学报,2006,27(Z3):2542-2543.
- 2 王鸽.基于 Agent 的数据仓库技术[硕士学位论文].青岛:山东科技大学,2004.
- 3 刘坚,于德介,李德刚,胡克诚.一种设备维护与管理的量化评估新方法.系统工程理论与实践,2004,24(5):72-77.

- 4 路世忠,王太勇,王双利,李瑞欣,王正英,王国峰,熊越东.基于多 Agent 的流程企业动态设备管理业务系统.计算机集成制造系统,2005,11(1):121-126.
- 5 陈洪根.设备维护改进实施决策模型.系统工程理论与实践,2011,31(5):954-960.
- 6 周晓军,奚立峰,李杰.一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型.上海交通大学学报,2005,39(12):2044-2047.
- 7 Toshio N. Optimum preventive maintenance policies for repairable systems. IEEE Trans. on Reliability, 1977, R-26(3):168-173.
- 8 孙吉贵,刘杰,赵连宇.聚类算法研究.软件学报,2008,19(1):48-61.
- 9 何莘,王琬莹.自然语言检索中的中文分词技术研究进展及应用.情报科学,2008,26(5):787-791.
- 10 苏金树,张博锋,徐昕.基于机器学习的文本分类技术研究进展.软件学报,2006,17(9):1848-1859.
- 11 刘群,张华平,俞鸿魁,程学旗.基于层叠隐马模型的汉语词法分析.计算机研究与发展,2004,41(8):1421-1429.
- 12 李荣陆,王建会,陈晓云,陶晓鹏,胡运发.使用最大熵模型进行中文文本分类.计算机研究与发展,2005,42(1):94-101.
- 13 Tom M. Mitchell. 机器学习.北京:机器工业出版社,2012.
- 14 黄智刚,陈晓方,柳重堪.贝叶斯估计理论在小样本批次设备检测中的应用.电子学报,2006,34(12A):2530-2532.
- 15 Elsayed A. 可靠性工程.第 2 版.北京:电子工业出版社,2013.
- 16 Pecht MG, Kapur KC. 可靠性工程基础.北京:电子工业出版社,2011.
- 17 黄玉兰.物联网射频识别(RFID)技术与应用.北京:人民邮电出版社,2013.
- 18 许毅,陈建军. RFID 原理与应用.北京:清华大学出版社,2013.