

基于规则库的变压器故障监测专家系统

李 锋 夏 立

(东华大学计算机科学与技术学院 上海 201620)

摘 要 针对变压器在线监测中缺乏状态方程的问题,设计了一种基于规则库的变压器故障实时监测的专家系统。首先以规则形式对专家知识进行编码。其次为了提高系统运行速度,方便规则的存储和管理,采用转化方案对规则进行了规范化处理,将规则以统一的形式存储在知识库中。最后提出了一种自动消除冗余规则的算法,得到所需的最小规则库。实验表明,该设计很好地模拟了人类专家对变压器故障的推理过程。

关键词 变压器故障监测,专家系统,知识库,模糊规则,冗余规则

中图法分类号 TP182 文献标识码 A

Transformer Fault Monitoring Expert System Based on Rule Base

LI Feng XIA Li

(School of Computer Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract To deal with the lack of state equation on transformer on-line monitoring, we designed a kind of rule-based expert system for transformer fault real-time monitoring. First of all, the expert knowledge is coded in the form of rules. Secondly, in order to accelerate the system running speed and make storage and management of the rules convenient, we used normalized processing scheme of the rules to make the rules in the form of unified stored in knowledge base. In the end, this paper put forward a kind of algorithm, which can automatically eliminate redundant rules and get minimum rule base. Experiments show that the design is good to simulate the human expert reasoning process of transformer faults.

Keywords Transformer fault monitoring, Expert system, Knowledge base, Fuzzy rule, Redundant rule

变压器能否可靠稳定地运行一直是广大学者研究的重点。为了实现对变压器的运行状态的监测,很多文献提出了相应的方法^[1-3]。文献[2]通过对变压器油中溶解气体的分析,提出以 Borda 规则为基础的诊断方法。在如何构建变压器故障诊断专家系统方面,许多学者提出了有意义的思路^[4-8]。文献[9]针对故障原因和征兆之间存在的复杂非线性关系,利用 RIMER(基于证据推理算法的置信规则库推理方法)对故障原因进行故障判断。

为了使规则能以表格的形式存储于关系数据库中,同时也为了加快规则匹配的速度,需要将规则转化为统一的规范形式,即要求每条规则的形式一致,且规则条件和结论数量一致^[10-12]。文献[10]为了提高模糊系统分析结论的可理解性,提出了基于模糊系统推理图的新的范例;以此为基础,完成对专家系统的规则库的构建。

另外,由于专家系统是开放式系统,允许不同专家随时录入规则,其结果必然会产生冗余规则^[13-15]。文献[13]介绍了冗余规则的概念并总结了 3 种主要类型,最后论证了减少冗余规则对知识库的存储空间和推理时间都有优化作用。文献[15]提出利用现有规则知识库进行合并生成一个新的规则知识库,并提出对生成的新规则知识库进行知识冗余、环路和冲

突的检测算法。但当知识库中的规则是模糊规则时,此算法不具有适用性。为了解决上述问题,本文提出了一种自动消除模糊规则库中冗余规则的算法。在构建专家系统的过程中,难点在于知识库的建立和维护,而其中主要涉及规则的规范化和冗余规则的消除,因此本文重点论述了规则的规范化和冗余规则的自动消除。

1 基于规则的专家系统概述

针对变压器故障诊断的专家经验一般以断言的形式来表述,其与规则的结构——关联已知知识和待推测信息,是一致的。因此,本文采用基于规则的专家系统。

基于规则的专家系统由 3 部分组成:规则库,工作存储器,推理机。规则库是存放专家领域知识的部分,以一套规则建立人的长期存储器模型;工作存储器是建立人的短期存储器模型,存放问题事实和由规则激发而推出的新的事实;推理机是专家系统的知识处理器,它将内存中的事实与知识库中的事实规则进行匹配,从而得出问题的结论。

规则的一般表示形式为:IF 条件 THEN 结论。一般来说,条件和结论可由 AND 和 OR 连接的多个语句组成。在基于规则的专家系统中,如何建立和维护规则库对于专家系统的构建至关重要^[16,17]。

本文受上海市自然科学基金项目(16ZR1401100)资助。

李 锋 博士,教授,主要研究方向为嵌入式技术、软件开发,E-mail:lifeng@dhu.edu.cn;夏 立 硕士生,主要研究方向为.NET 开发,E-mail:357403365@qq.com。

2 规则库的建立

2.1 模糊规则

在规则库的建立过程中,首先需要考虑如何将专家提出的行业经验转化为规则的问题。一般规则的形式为:IF P THEN Q 。这里 P 为条件, Q 为结论。而模糊规则可以解释为使用模糊命题取代了 P 和 Q ,也即条件与结论是否为真并不确定^[18,19]。这里,引入可信度的概念来代表条件 P 和结论 Q 成立的可能性。

模糊规则的可信度计算公式如下:对于条件由 or 语句连接的规则 r :

$$\text{IF } P_1 \text{ or } P_2 \text{ or} \dots \text{ or } P_n \text{ THEN } Q$$

其中, P_i 的可信度为 $F(P_i)$,则结论 Q 的可信度:

$$F(Q) = \bigcup_{j=1}^m (F(P_j)) \quad (1)$$

此处 $\bigcup_{j=1}^m$ 为求最大值操作。

对于条件由 and 语句连接的规则 r :

$$\text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } \dots \text{ and } P_n \text{ THEN } Q$$

其中, P_i 的可信度为 $F(P_i)$,则结论 Q 的可信度:

$$F(Q) = \bigcap_{j=1}^n F(P_j) \quad (2)$$

此处 $\bigcap_{j=1}^n$ 为求最小值操作。

对于不同条件推出同一结论的规则:

$$r_1: \text{IF } P_1 \text{ THEN } Q$$

$$r_2: \text{IF } P_2 \text{ THEN } Q$$

...

$$r_n: \text{IF } P_n \text{ THEN } Q$$

结论 Q 的可信度为:

$$F(Q) = \bigcup_{j=1}^n (F(P_j)) \quad (3)$$

2.2 规则的规范形式转化

专家的行业经验一般没有固定的格式,如果对其不加处理就将规则录入规则库中,会造成如下问题:首先,规则的形式不同,不便于将规则以表的形式存储在数据库中。其次,在将已有规则与用户输入的条件进行匹配的过程中,会降低匹配的效率和影响专家系统的处理速度。因此需要将不同形式的规则转化为已设定的规范形式。这样,就要求对录入的规则进行格式转换,转换过程分为两部分。

2.2.1 规则形式的统一

首先,将规则转换为条件是由 AND 连接的子句,且结论是唯一的形式。下文分 3 种情况说明如何转化。

(1) 条件中有 or 语句

$$\text{规则 } r: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } (P_3 \text{ or } P_4 \dots \text{ or } P_n) \text{ THEN } Q$$

可以转化为如下 n 条规则:

$$\text{规则 } r_1: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q$$

$$\text{规则 } r_2: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_4 \text{ THEN } Q$$

...

$$\text{规则 } r_n: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_n \text{ THEN } Q$$

此处,若规则 r 的可信度为 1,则规则 r_1 到 r_n 的可信度均为 1。

(2) 结论中有 or 语句

$$\text{规则 } r: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_1 \text{ or } Q_2 \dots \text{ or } Q_n$$

可以转化为如下 n 条规则:

$$\text{规则 } r_1: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_1$$

$$\text{规则 } r_2: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_2$$

...

$$\text{规则 } r_n: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_n$$

此处,若规则 r 的可信度为 1,规则 r_1 到规则 r_n 的可信度均为 $1/n$ 。

(3) 结论中有 and 语句

$$\text{规则 } r: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3$$

$$\text{THEN } Q_1 \text{ and } Q_2 \dots \text{ and } Q_n$$

可以转化为如下 n 条规则:

$$\text{规则 } r_1: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_1$$

$$\text{规则 } r_2: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_2$$

...

$$\text{规则 } r_n: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_n$$

此处,若规则 r 的可信度为 1,则规则 r_1 到 r_n 的可信度均为 1。

2.2.2 每条规则条件和结论数量的统一

规则中条件和结论数量的统一便于采用关系数据库中的关系表来存储规则,这里选择以由 and 连接的条件的数目不超过 3 个,结论数量为 1 作为规则的条件和结论个数统一的要求。因此,当规则的条件中只有 and 语句连接,但格式与规范形式不同时,需要做如下转化:

规则 $r: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ and } P_4 \text{ THEN } Q$ 可以转化为如下两条规则:

$$\text{规则 } r_1: \text{IF } P_1 \text{ and } P_2 \text{ and } P_3 \text{ THEN } Q_{temp}$$

$$\text{规则 } r_2: \text{IF } Q_{temp} \text{ and } P_4 \text{ and } P_5 \text{ THEN } Q \quad (\text{注: } P_5 \text{ 为永真条件})$$

这里,规则 r, r_1, r_2 的可信度均为 1。

经过上面两步转化,可以将所有的规则均转化为要求的规范规则形式,然后存储在规则库中。

3 规则库的维护

3.1 冗余规则

由于专家系统是开放式系统,允许不同专家随时录入规则,因此会在规则库中产生冗余规则。为了定义冗余规则,引入如下定理。

(1) 传递律

如果有规则 $rule1: \text{IF } P_1 \text{ THEN } P_2$ 和规则 $rule2: \text{IF } P_2 \text{ THEN } P_3$,则能推出规则 $rule3: \text{IF } P_1 \text{ THEN } P_3$ 。

(2) 特殊先决条件律

如果有规则 $rule1: \text{IF } P_1 \text{ THEN } P_2$ 并且 $P_1' \in P_1$,则能推出规则 $rule2: \text{IF } P_1' \text{ THEN } P_2$ 。这里 $P_1' \in P_1$ 指: P_1' 是 P_1 的抽象类(即 P_1' 成立一定可以推出 P_1 成立)。

(3) 抽象结论律

如果有规则 $rule1: \text{IF } P_1 \text{ THEN } P_2$ 并且 $P_2 \in P_2'$,则能推出规则 $rule2: \text{IF } P_1 \text{ THEN } P_2'$ 。

下边给出一个子句的结论集的定义:

F 是一个规则库,基于 F 规则库的一个子句 P (P 是条件)的结论集定义为: $(P_F) + = \{P'\}$ (在规则库 F 中,规则 $r: \text{IF } P \text{ THEN } P'$ 可以由定理 2 推导出来)。

根据上述的定理和定义,给出冗余规则的定义如下。

对于规则库 F 中的规则 $r: IF O THEN O'$, 设规则库 $G = F - \{r\}$, 如果 $O' \in (O_G)^+$, 则 r 是 F 中的一条冗余规则。当一个规则库中的所有冗余规则被除去之后, 所得到的新的规则库即为最小规则库。初始规则库记为 F , 其最小规则库记为 F_m 。在修订规则库 F 的过程中, 要始终保证规则库 F 与 F_m 等价, 即 $F \equiv F_m$ 。判断两个规则库等价的依据为:

(1) 规则库 F 的相关集 $F^+ = \{G | G \text{ 中的每一条规则都可以根据第 2 个定理由规则库 } F \text{ 中的规则推导出来}\}$ 。

(2) 如果两个规则库的相关集有: $F^+ = G^+$, 则 F 与 G 等价, 即 $F \equiv G$ 。当一个规则库 F 同时满足如下 3 个条件时, 此规则库 F 即为最小规则库。

a) 在 F 规则库中, 没有一条规则 r :

$IF P THEN Q$, 满足 $Q \in (P_G)^+$, 其中 $G = F - \{r\}$, 并且 $G \equiv F$ 。

b) 在规则库 F 中, 没有一条规则 r :

$IF P THEN Q$, 满足 $P \in P_1$, 记 $G = (F - \{r: IF P THEN Q\}) \cup \{r: IF P_1 THEN Q\}$, 并且 $G \equiv F$ 。

c) 在规则库 F 中, 没有一条规则 r :

$IF P THEN Q$, 满足 $Q_1 \in Q$, 记 $G = (F - \{r: IF P THEN Q\}) \cup \{r: IF P THEN Q_1\}$, 并且 $G \equiv F$ 。

3.2 冗余规则的消除

为了自动将规则库中的冗余规则删除, 从而得到最小规则库, 可以按照下文所提出的算法进行处理。

设有一规则库 F , P 是规则库 F 中一规则的条件。计算 $(P_F)^+$ 的算法如下。

输入: P, F

输出: $(P_F)^+$

步骤:

1. 令 $P(0) = P, I = 0$;

2. $B = \emptyset$;

3. 对 $P(I)$ 中的每一个元素 P , 做如下操作:

4. Begin

5. $B' = \{A | (X)(Y)((IF X THEN Y)F) \text{ and } (P' \in X) \text{ and } (Y \in A)\}$

6. $B = B \cup B'$

7. end

8. $P(I+1) = B \cup P(I)$

9. if $P(I+1) \subsetneq P(I)$, then $I = I + 1$, go to 步骤 2;

10. else $P(I)$ 就是 $(P_F)^+$

11. end

在求出 F 规则库中的 P 的结论集 $(P_F)^+$ 后, 就可以进行判断: 在规则库 F 中, 规则 $r: IF O THEN O'$ 是否为冗余规则。

步骤:

步骤 1—步骤 7 与求 $(P_F)^+$ 的相同。

8. $P(I+1) = B \cup P(I)$, if $Q \in P(I+1)$, 则 r 是 F 中的冗余规则, end

9. if $P(I+1) \subsetneq P(I)$, $I = I + 1$, go to 步骤 2;

10. r 不是 F 中的冗余规则。

11. end

通过上述两个算法, 可以判断出一条规则是否为冗余规则, 在消去所有冗余规则后就得到所要求的最小规则库。每录入一条新的规则后系统能自动消除规则库中的所有冗余规则。

4 案例

本文设计的专家系统分为行业专家和变压器监测人员两种模式。

利用此专家系统, 专家将自己的行业经验以规则的形式录入系统的规则库中, 并可以对规则库进行修改。当变压器监测人员需要得到变压器故障诊断结论时, 只需要输入变压器故障先兆(即规则中的条件), 系统会根据规则库中的规则自动匹配与故障先兆符合的结论。

向规则库中录入一条新的规则时, 系统会先将录入的规则转化为规范的表达形式, 然后判断加入此规则后规则库中是否会产生冗余规则, 若有冗余规则, 则将其删去。

当专家录入如下规则时(单位均为 $\mu\text{L/L}$):

$r_1: IF C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8 \text{ AND } CH_4 \text{ 含量} = 2.5 \text{ AND } (C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.01, 0.09] \text{ OR } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.1, 0.13] \text{ OR } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.15, 0.19]) \text{ THEN 变压器局部放电}$

此结论的可信度为 1。

经过系统自动对规则进行的拆分处理, 规则 r_1 将被拆解成如下 3 条规则存储在规则库中。

$r_2: IF C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8 \text{ AND } CH_4 \text{ 含量} = 2.5 \text{ AND } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.01, 0.09]$

THEN 变压器局部放电

$r_3: IF C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8 \text{ AND } CH_4 \text{ 含量} = 2.5 \text{ AND } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.1, 0.13]$

THEN 变压器局部放电

$r_4: IF C_2H_6 \text{ 含量} = 0.8 \text{ AND } CH_4 \text{ 含量} = 2.5 \text{ AND } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.15, 0.19]$

THEN 变压器局部放电

上述 3 条规则的可信度均为 1。此时, 若规则库中已存在如下两条规则:

$r_5: IF \text{ 变压器局部放电 AND 永真条件 AND 永真条件 THEN 热故障 } t < 300^\circ\text{C}$

$r_6: IF C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8 \text{ AND } CH_4 \text{ 含量} = 2.5 \text{ AND } C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.01, 0.09] \text{ THEN 热故障 } t < 300^\circ\text{C}$

上述两条规则的可信度为 1。经过系统自动消除冗余规则, 规则 r_4 和 r_5 被判断为冗余规则, 被删除。则此时录入的规则经过拆解和自动消除冗余后将以表 1 所列的形式存储在规则库中。

表 1 规则库中规则表(单位: $\mu\text{L/L}$)

	条件 1	条件 2	条件 3	结论	可信度
规则 1	$C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8$	$CH_4 \text{ 含量} = 2.5$	$C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.1, 0.13]$	变压器局部放电	1
规则 2	$C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8$	$CH_4 \text{ 含量} = 2.5$	$C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.15, 0.19]$	变压器局部放电	1
规则 3	$C_2H_4 \text{ 含量} = 0.8$	$CH_4 \text{ 含量} = 2.5$	$C_2H_6 \text{ 含量} \in [0.01, 0.09]$	热故障 $t < 300^\circ\text{C}$	1

结束语 本文从工程实践的角度设计了一套实时监测变压器故障的基于规则的专家系统。通过将专家的行业经验录入专家系统的规则库, 进而将用户输入的变压器油溶解气体的条件与规则库中的规则进行一一比较, 最终找出与之匹配的结论。该专家系统具有如下创新性: 1) 专家经验以规则形式存储在关系型数据库中, 方便专家的录入和修改。2) 系统能够自动删除规则库中的冗余规则, 大大提高了所得结论的准确性。

实验证明, 本专家系统利用规则规范化转化方法可以有效解决规则库的建立问题, 提出的自动消除冗余规则算法能够较好地处理规则库的维护问题。

参考文献

- [1] Kim Y M, Lee S J, Seo H D, et al. Development of dissolved gas analysis(DGA) expert system using new diagnostic algorithm for oil-immersed transformers[C]// 2012 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). IEEE, 2012:365-369
- [2] Zhang G, Jiang G L, Xie Z X. Techniques of on-line monitoring and diagnosis for transformer[C]// 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). IEEE, 2011:512-516
- [3] 裘碧恒. 电力变压器故障诊断方法应用[J]. 通讯世界, 2015(15):137-138
- [4] 李赢, 舒乃秋. 基于模糊聚类和完全二叉树支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4):64-70
- [5] 郎荣玲, 路辉, 张景新. 一种故障诊断知识获取系统[P]CN, CN 101877075 B, 2013
- [6] Gegov A, Arabikhan F, Sanders D. Rule base simplification in fuzzy systems by aggregation of inconsistent rules[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 28(3):1331-1343
- [7] 张亚红, 李凡长. 基于 DFL 的动态模糊专家系统设计[J]. 计算机科学, 2002, 29(z2):163-165
- [8] 赵志远, 朱智强, 孙磊, 等. 虚拟化环境中基于神经网络专家系统的 Rootkit 检测方法研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(8):175-179
- [9] 张伟, 石菡蒲, 胡昌华, 等. 基于置信规则库专家系统的发动机故障诊断[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1):11-15
- [10] Pancho D P, Alonso J M, Cordon O, et al. FINGRAMS: Visual Representations of Fuzzy Rule-Based Inference for Expert Analysis of Comprehensibility[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(6):1133-1149
- [11] Samantaray S R. A systematic fuzzy rule based approach for fault classification in transmission lines[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(2):928-938
- [12] Mandal M, Mukhopadhyay A, Maulik U. Fuzzy rule-based classifier for microarray gene expression data by using a multiobjective PSO-based approach[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2013:1-7
- [13] Zhang Y, Deng A. Redundancy rules reduction in rule-based knowledge bases[C]// International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2015
- [14] 刘璐, 高强, 刘衍珩, 等. 基于冗余实例对消除算法的实例选择[J]. 计算机工程, 2014, 40(1):177-180
- [15] 贾秀芳, 宋良图, 王儒敬, 等. 规则库的合并以及冗余、环路和冲突的检测[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(1):249-253
- [16] 杨广, 梁晶晶. 基于决策技术和粗糙集理论的诊断知识库构建研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2014, 23(3):41-48
- [17] Pranevicius H, Kraujalis T, Budnikas G, et al. Fuzzy Rule Base Generation Using Discretization of Membership Functions and Neural Network[J]. Communications in Computer & Information Science, 2014, 465:160-171
- [18] Zhang Y, Deng A. Redundancy rules reduction in rule-based knowledge bases[C]// International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2015
- [19] Song X D, Shao W, Qiu Z Z, et al. Study on Fuzzy Inference Method for Fault Diagnosis Expert System[J]. Advanced Materials Research, 2013, 658:639-642
- [20] Angelov P, Zhou Xiao-wei, Klawonn F. Evolving Fuzzy Rule-based Classifiers[C]// IEEE Symposium on Computational Intelligence in Image and Signal Processing, 2007 (CIISP 2007). IEEE, 2007:220-225

(上接第 556 页)

12月,我国PPI已连续46个月负增长,这说明工业存在严重产能过剩、长期维持高库存及工业经济不景气的现状,总体上看,工业经济结构调整下行的力量大于重塑上升的力量,工业生产指数呈下滑态势。

结束语 本文将 ARIMA 理论与神经网络理论结合,构建了 ARIMA 神经网络模型,开展了工业生产指数仿真研究。实践表明,ARIMA 神经网络模型能够对工业生产指数全样本进行仿真且仿真效果较好,是一种有效的仿真方法。对经 X11 季节调整的工业生产指数仿真结果表明,2016 年上半年,我国工业生产指数呈下滑趋势,与宏观经济的发展形势较为吻合,研究结果可为国家研判宏观经济形势提供参考。

参考文献

- [1] 李春林,王会岩. 基于干预 ARIMA 模型的中国工业生产指数预测[J]. 统计与管理, 2011(1):73-74
- [2] 王蔚杰. 基于 ARIMA 模型对经济发展的预测—以工业生产指数为例[J]. 中国外资, 2012(269):188-189
- [3] 贺京同,潘凝,张建勋,卢桂章. 基于模糊神经网络的宏观经济预警研究[J]. 预测, 2012, 19(4):42-45
- [4] Khashei M, Bijari M, Ardali G A R. Improvement of auto-regressive integrated moving average models using fuzzy logic and artificial neural networks[J]. Neurocomputing, 2009, 5(72):956-967
- [5] Andre Luis S M, Francisco de A T de C, Teresa B L. Forecasting models for interval-valued time series[J]. Neurocomputing, 2008, 71(3):3344-3352
- [6] George E P B, Gwilym M J. Time Series Analysis Forecasting and Control[M]. Hoden-DayInc, 1976:12-33
- [7] Beveridge S, Qickle C. A Comparison of Box-Jenkins and Objective Methods for Determining the Order of a Non-seasonal AR-MA model[J]. Journal of Forecasting, 1994, 13(5):419-434
- [8] McCulloch W, Pitts W. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity[J]. Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5(4):115-133
- [9] Rumelhart D E, McClelland J L, et al. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1987
- [10] Lefschke S. Stability of nonlinear control system[M]. New York: Academic press, 1965:15-28
- [11] Lyapunov A M. The general problem of stability of motions [D]. Moscow, Fizmatiz, 1950
- [12] Lasalle J, Lesfchtg S. Stability by Lyapunovs direct method with applications[M]. New York: Academic Press, 1961