

# 火箭漏电故障诊断技术研究

赵刚<sup>1,3</sup>, 黄大荣<sup>2</sup>, 黄席樾<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074;  
3. 第二炮兵装备部驻重庆地区军事代表局, 重庆 400039)

**摘要:** 基于集对分析理论和故障树的相关知识, 研究了火箭 (LV) 测试及发射过程中的一类新的漏电故障诊断技术。在火箭漏电故障原因的各种可能组合方式构造火箭漏电故障树的基础上, 引入中间状态概率的概念。基于集对分析联系数理论确立了漏电故障因素的重要度模型, 对系统底事件和顶事件的失效概率进行分析, 从而确立了火箭漏电故障诊断的新方法。该方法成功应用于火箭控制系统漏电故障诊断的工程实例表明: 该方法能及时诊断火箭系统的漏电故障原因, 采取合理的措施有效地排除故障, 具有良好的更新能力和应用前景。

**关键词:** 系统工程; 故障诊断; 故障树; 集对分析联系数; 中介概率; 重要度

**中图分类号:** TP302.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2010)07-0916-06

## Research on the Leak Current Fault Diagnostic Technology for Launch Vehicle

ZHAO Gang<sup>1,3</sup>, HUANG Da-rong<sup>2</sup>, HUANG Xi-yue<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400074, China; 2. Institute of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chongqing Agent of Second Artillery Corps, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** A new leak current fault diagnosis method of Launch Vehicle (LV) was researched by combining connection number of set pair analysis and fault tree analysis (FTA). Every kind of factors, which could make the leak current fault of LV, was analyzed in detail. Then a fault tree model of LV leak current was constructed according to every possible combination way of these factors, which can impact on LV leak current fault. An attribute significance model of factor influencing leak current fault was presented, and a leak current fault diagnostic technology of LV was established by introducing the intermediate probability and the theory of connection number of set pair analysis. An example of LV leak current fault diagnosis was given to verify the reliability and effectiveness of the model. The simulation results show that the model was easy to find the weakness of system, so it has better updating capability and applied prospect.

**Key words:** system engineering; fault diagnosis; fault tree; connection number of set pair analysis; intermediate probability; attribute significance

收稿日期: 2009-11-11

基金项目: 中国国家博士后科学基金 (20060401018); 重庆市自然科学基金 (2006BB2422); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ060414); 重庆交通大学博士启动基金 (07-01-12); 重庆交通大学研究生创新基金 (0904)

作者简介: 赵刚 (1973—), 男, 博士研究生;

黄大荣 (1978—), 男, 副教授, 博士后。E-mail: hcx1978@163.com

## 0 引言

在火箭 (LV) 测试和发射过程中, 漏电是影响 LV 正常飞行的主要故障之一, 排除故障是保证控制系统正常运行的必要前提。然而, 由于漏电故障具有引发因素多、涉及面广、定位困难、危及成败等特点, 因此, 当电路上某点发生漏电时, 与该电路相连的供电母线上的所有线路均表现为漏电, 凭经验一时无法判断发生漏电的部位。LV 系统中一个关键位置出现差错会造成极大的影响和经济损失, 甚至会出现毁灭性的结果。因此, LV 系统的漏电故障诊断问题受到了一些学者和专家的重点关注。

目前, 国内外针对 LV 系统的漏电故障诊断的研究成果见诸文献的很少。为了在这方面有所突破, 以构建复杂系统故障影响因素的重要度模型, 实现故障检测路径次序优化作为研究重点, 先后基于概率论<sup>[1]</sup>、信息熵理论<sup>[2]</sup>、图论<sup>[3]</sup>、多 Agent 理论<sup>[4-7]</sup>、灰色理论<sup>[8]</sup>建立了不同的故障诊断方法, 并在 LV 漏电故障诊断的实际工程中取得了良好的效果。然而, 越来越多的实际工程应用表明, LV 系统的漏电故障诊断具有一定的范围, 如漏电阻小于 3M 为漏电, 大于 10M 为不漏电, 处于二者之间存在一个中间状态。这个中间状态下对系统漏电有怎样的影响, 如何准确描述这种影响, 通过查阅文献和实际工程应用表明, 到目前为止并没有一种合理的方法能够解决这个问题。很显然, 目前已有的漏电故障诊断方法对于描述系统漏电现象具有一定的局限性, 其最终评判结果可能并不能符合实际要求。因此, 为了解决这个问题, 本文引入针对系统从可靠到失效存在中介过渡环节现象所提出的“中介可靠性”概念<sup>[9]</sup>, 采用集对分析 (SPA) 联系数理论, 对 LV 控制系统漏电故障树进行定量分析, 深入分析系统漏电故障原因的各种组合方式, 并从同 (漏电)、异 (不确定性)、反 (不漏电) 3 个侧面定量分析系统漏电状态, 将系统或部件常介于故障与非故障之间的状态体现出来, 并研究不同底事件对系统故障的影响程度, 客观反映系统现实情况, 从而有所侧重地对设备漏电情况进行管理和监测, 以有效提高系统运行可靠性。

## 1 集对分析理论基本概念

集对分析理论<sup>[10]</sup>是 20 世纪 80 年代提出的, 它是一种用于处理带有综合不确定性问题的数学工具, 其核心思想为: 把不确定性和确定性作为一个确

定不确定系统来进行数处理和辩证分析。目前, 该理论在不少领域得到了应用<sup>[5, 11-12]</sup>。

### 1.1 集对分析

集对分析的基本思路是从同 (同一性)、异 (差异不确定性)、反 (对立性) 3 个侧面研究该系统中各个集合在给定问题背景下的确定性联系与不确定性联系的联系、可变与转化, 并用一个能充分反映上述情况的同异反联系数去系统开展具体的研究。

### 1.2 联系数

联系数的一般形式为

$$U = A + Bi + Cj \quad (1)$$

式中:  $A, B, C$  为非负实数;  $j = -1$ , 以说明  $Cj$  与  $A$  在符号上正好相反;  $i$  在  $[-1, 1]$  区间视不同情况取值, 以说明  $B$  有向  $A$  或向  $C$  转化的可能性;  $U$  称为联系数;  $A, Bi, Cj$  分别称为联系数的同部、异部、反部。令  $N = A + B + C$ , 则  $N$  为联系范数; 令  $u = U/N$ ,  $a = A/N$ ,  $b = B/N$ ,  $c = C/N$ , 联系数就化为联系度

$$u = a + bi + cj \quad (2)$$

式中:  $a, b, c$  分别称为同一度、差异度、对立度, 这里有  $a + b + c = 1$  这一归一化约束。

### 1.3 基于集对分析联系数的系统可靠性概念

根据集对分析联系数理论, 设一故障树某事件可靠性为  $R_{SPA} = a + bi + cj$  其中:  $a$  为系统顶事件或底事件发生的概率;  $b$  表示系统顶事件或底事件介于中间状态, 即局部暂时的轻微故障的概率;  $c$  表示系统顶事件或底事件不发生的概率。  $b$  部分通过维修可转化为  $c$  的部分, 同时若系统没有及时管理和监测,  $b$  部分也可转化到  $a$  的部分。计算  $a$  值时, 可将事件的中间状态并入事件不发生状态, 再通过常用的方法求得; 计算  $c$  值时可将事件的中间状态并入事件发生状态, 再通过常用方法求得, 而  $b = 1 - a - c$ 。据此, 将联系数应用在可靠性中的运算规则定义如下。

#### 1) 2 个联系数的和

定义 1 设有联系数  $u_1 = a_1 + b_1 i + c_1 j$   $u_2 = a_2 + b_2 i + c_2 j$  则  $u_1$  与  $u_2$  的和是联系数  $u = a + bi + cj$  记作  $u = u_1 + u_2$ , 其中:  $a = a_1 + a_2 - a_1 a_2$ ;  $c = c_1 c_2$ ;  $b = 1 - a - c$

#### 2) 2 个联系数的积

定义 2 设有联系数  $u_1 = a_1 + b_1 i + c_1 j$   $u_2 = a_2 + b_2 i + c_2 j$  则  $u_1$  与  $u_2$  的积是联系数  $u = a + bi + cj$  记作  $u = u_1 u_2$ , 其中:  $a = a_1 a_2$ ;  $c = c_1 + c_2 - c_1 c_2$ ;  $b = 1 - a - c$

#### 3) 事件重要度

**定义 3** 设  $R_{SPA} = a + bi + cj$  为联系数故障树顶事件的可靠性表达式,  $R_u = a + b_i + c_j$  为联系数故障树删除底事件  $u$  后计算得到顶事件的可靠性表达式。底事件  $x_u$  的重要度定义为  $RI = |a - a| + |b - b| + |c - c|$ 。

若  $RI_u > RI_v$ , 则说明底事件  $u$  对顶事件的影响大于底事件  $v$  对顶事件的影响。因此, 要减小系统漏电的可能性, 首先应考虑改进底事件  $u$ 。

## 2 LV 漏电系统的故障树模型

### 2.1 故障树分析法

故障树分析<sup>[13]</sup> (FTA) 是用于大型复杂系统可靠性、安全性和风险评价的一种方法。它是由各种事件符号、逻辑符号、其他一些符号以及一些线条组成的一种倒立树状的逻辑因果关系图。FTA 法是以各种基本单元失效为出发点, 通过在系统中分析各故障之间的逻辑关系来寻找造成某个不希望事件 (顶事件) 的各种直接和间接原因的一种方法。其基本逻辑门及符号如图 1 所示。

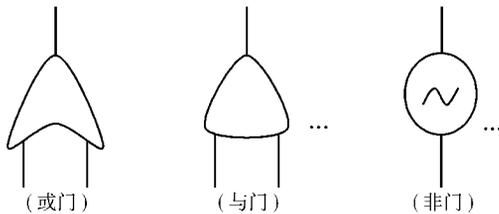


图 1 逻辑门的图形符号

Fig 1 The graphic symbol of logic gates

### 2.2 建立 LV 系统的故障树

根据 GJB 813—1990 和 GJB 450—1988 中提出的相关规则, 确立 LV 漏电故障树顶事件为 LV 系统漏电。主要的中间事件为: 控制系统漏电  $G_1$ 、电力供应漏电  $G_2$ 、遥测系统漏电  $G_3$ 、外安系统漏电  $G_4$ 、飞行控制系统漏电  $G_5$ 、测试发控系统漏电  $G_6$ 、测试系统漏电  $G_7$ 、发射控制系统漏电  $G_8$  等。那么, 对于每一个中间事件, 逐步分解得出下一级中间事件, 直至不能分解为止。鉴于 LV 系统非常庞大, 这里以控制系统为例深入探讨建立故障树, 如图 2 所示。各事件的描述如表 1~2 所示, 其中, 表 1 为系统各故障类型, 表 2 为运用控制系统故障历史数据库并结合集对分析联系数计算规则所得到的各漏电故障类型的底层部件处于正常状态、中介状态、故障状态的统计概率, 其中:  $a$  为相应部件“故障”状态发生的统计概率;  $b$  为相应部件介于中间状态, 即部件存在局部的暂时的轻微的故障的统计概率;  $c$  为相应部件“正常”状态发生的统计概率。 $b$  部分通过维修可转化为  $c$  部分, 同时系统没有经过及时管理和检测,  $b$  部分也可转换为  $a$  部分。那么, 在实际工程应用中, 既可以将系统的中介状态  $b$  部分并入正常状态计算  $a$  值, 也可将它并入故障状态计算  $c$  值, 主要取决于整体的损坏程度大小, 且  $b = 1 - a - c$ 。

## 3 基于集对分析联系数理论和故障树的 LV 系统漏电故障诊断定量分析

由于 LV 的控制系统由多个子系统模块组成,

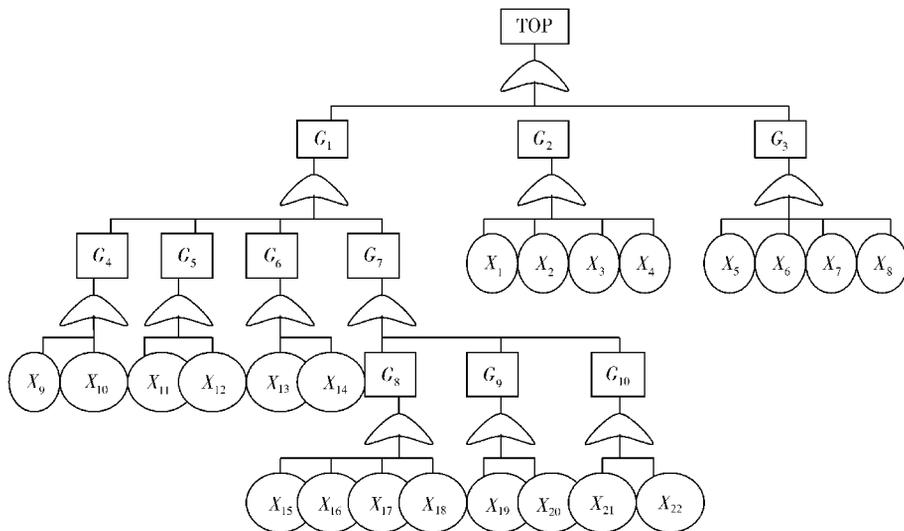


图 2 LV 漏电查找故障树

Fig 2 The lookup fault tree of leak current of LV

表 1 中间事件描述

Tab 1 The description of middle events

序号	类型	故障名称
TOP	顶事件	系统漏电
$G_1$	中间事件	控制系统漏电
$G_2$	中间事件	电力供应漏电
$G_3$	中间事件	遥测系统漏电
$G_4$	中间事件	外安系统漏电
$G_5$	中间事件	飞行控制系统漏电
$G_6$	中间事件	测试发控系统漏电
$G_7$	中间事件	测试系统漏电
$G_8$	中间事件	发射控制系统漏电

表 2 底事件描述及其可靠性数据

Tab 2 The description of bottom events and its reliability data

序号	故障名称	$a$	$b$	$c$
$X_1$	地面电源漏电	0.002	0.002	0.996
$X_2$	供电电路漏电	0.001	0.000	0.999
$X_3$	遥测传感器漏电	0.001	0.002	0.997
$X_4$	遥测发射机漏电	0.001	0.001	0.998
$X_5$	外测系统漏电	0.003	0.003	0.996
$X_6$	安全系统漏电	0.001	0.002	0.997
$X_7$	平台漏电	0.001	0.001	0.998
$X_8$	速率陀螺漏电	0.001	0.001	0.998
$X_9$	配电器漏电	0.003	0.002	0.995
$X_{10}$	伺服机构漏电	0.003	0.008	0.989
$X_{11}$	功放漏电	0.001	0.002	0.997
$X_{12}$	发控台漏电	0.007	0.002	0.991
$X_{13}$	配转机柜漏电	0.010	0.009	0.981
$X_{14}$	地面计算机网络系统漏电	0.032	0.051	0.917
$X_{15}$	采集漏电	0.008	0.009	0.983
$X_{16}$	继电器柜漏电	0.033	0.025	0.942
$X_{17}$	等效器漏电	0.008	0.007	0.985

可能发生多个系统同时存在“中介”状态的情况,则系统的不同结构特点决定了“故障”诊断预测模式的运行机理有所不同,比如:可修复系统的“故障”与“正常”、“中间状态”模式之间存在可逆变化规律,而不可修复系统的“故障”状态与其余 2 种模式之间不存在可逆变化规律。为保证这一错综复杂的各个环节和各个底层部件中介状态的准确刻画并予以诊断,减少误判率,则需要在对 LV 控制系统进行

设计的过程中,详细分析影响 LV 控制系统漏电的各种因素,构建 LV 控制系统漏电查找故障树,以期得到合理的检修策略。

在故障树模型中,依据 LV 控制系统漏电查找的故障树,需要对导致 LV 漏电故障这个顶事件的最小割集进行研究。割集中所有底事件发生了,顶事件必然发生。若将割集中任意去掉一个底事件,就不再是割集,则称之为最小割集。显然,一个故障树的最小割集不止一个,可以帮助发现系统漏电故障发生的最可能环节。故而,基于上述思想,依据上行法求得 LV 系统故障树 MCS 共 17 个,其中:一阶 MCS 有 6 个:  $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}$ ; 二阶有 5 个:  $\{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}$ ; 三阶有 6 个:  $\{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{15}\}, \{X_{16}\}, \{X_{17}\}$ 。

当底事件  $X_i$  的漏电状态用表 2 中联系数表示时,可根据定义的联系数计算规则公式得出 LV 控制系统未来发展与变化的可靠度预测模型为

$$R_{TOP} = 0.108 + 0.111i + 0.781j$$

这说明 LV 系统漏电故障发生可能程度为 0.108,系统完全可靠的程度仅在 0.781。在最坏情况下,即事件中间状态部分均转化成完全故障状态 ( $i = 1$ ) 时,  $R_{TOP} = 0.219 + 0.781j$  系统故障发生可能性达到 0.219;而当事件中介状态被排除回归正常状态时,系统可靠性程度可达到 0.892。容易看出,虽然各底事件漏电概率非常低,但由于系统结构本身的特点导致顶事件发生的概率依然较高,因此,系统结构设计需要进行补偿控制以保证系统的稳定性。

显然,从  $R_{TOP}$  的计算公式可以看出, LV 系统处于漏电和非漏电中间状态的概率较大,一旦 LV 系统漏电存在隐患,如何对系统各部位的运行状态的管理和检测就显得非常重要。为了解决不同部件同时处于“中间”状态而导致系统重构补偿控制的冲突问题,可根据定义 3 计算出系统的底层部件“中间”状态对系统整体可靠性趋势变化影响的重要度如表 3 所示。

根据计算结果容易得出:事件  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}$  对顶事件的影响权重,从而排出系统漏电权重顺序,进而有所侧重地对设备漏电情况进行管理和监测,以有效提高系统运行可靠性。

由于在以往的 LV 控制系统的漏电故障诊断技术的研究中没有考虑中介状态的可转化性,因此,系统的故障诊断及其维护机制的有效性存在一定的风险。为了验证本文基于集对分析理论所提出的考虑

表 3 各底事件对顶事件的影响权重

Tab 2 The attribute significance of bottom events influencing top events

序号	故障名称	RI
X <sub>1</sub>	地面电源漏电	0.006
X <sub>2</sub>	供电电路漏电	0.002
X <sub>3</sub>	遥测传感器漏电	0.004
X <sub>4</sub>	遥测发射机漏电	0.002
X <sub>5</sub>	外测系统漏电	0.006
X <sub>6</sub>	安全系统漏电	0.004
X <sub>7</sub>	平台漏电	0.004
X <sub>8</sub>	速率陀螺漏电	0.004
X <sub>9</sub>	配电器漏电	0.006
X <sub>10</sub>	伺服机构漏电	0.007
X <sub>11</sub>	功放漏电	0.004
X <sub>12</sub>	发控台漏电	0.014
X <sub>13</sub>	配转机柜漏电	0.020
X <sub>14</sub>	地面计算机网络系统漏电	0.054
X <sub>15</sub>	采集漏电	0.016
X <sub>16</sub>	继电器柜漏电	0.066
X <sub>17</sub>	等效器漏电	0.015

中介状态可转换特性的 LV 漏电故障诊断方法的合理性和有效性,对系统进行多次试验论证,以系统发生故障时所显示的控制信号频谱特性作为性能分析指标,对没有考虑中介状态和考虑中介状态的系统故障控制信号频谱特性进行了波形模拟,分别如图 3~4 所示。图 3 和图 4 的对比曲线表明:在没有考虑中介状态的情况下, LV 控制系统的控制信号频谱振幅范围为  $[-0.2, 1.6]$ ,有效控制宽度为 1.8;而在考虑中介状态的情况下,系统的控制信号频谱振

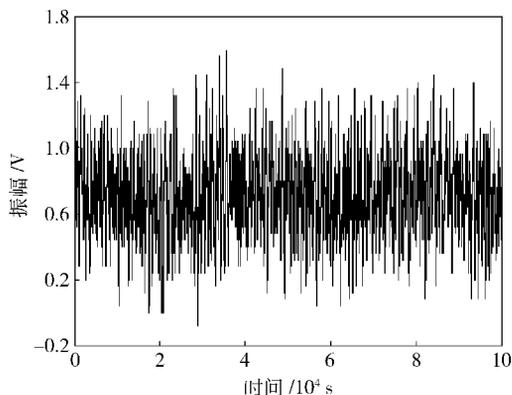


图 3 无中介状态的 LV 系统漏电故障控制信号频谱特性

Fig 3 Frequency properties curve of fault signal for LV without intermediate state

幅范围为  $[-0.6, 0.8]$ ,有效控制宽度为 1.4 说明在 LV 控制系统漏电故障诊断的控制过程中,漏电故障诊断的可控性增加了 22.2%,可极大地减少由于没有考虑中介状态可转化特性而引起的不必要维修所造成的资源损耗。这表明,在 LV 发射的过程中可将底事件的权重作为部件漏电诊断区域划分及判断的依据。

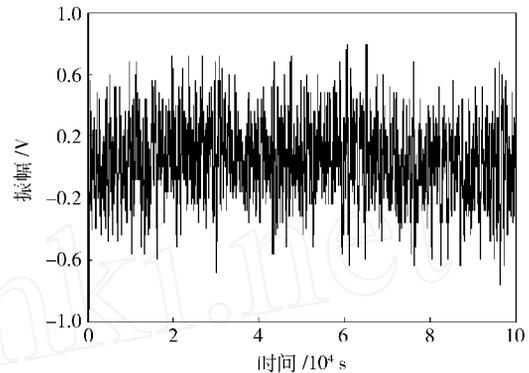


图 4 有中介状态的 LV 系统漏电故障控制信号频谱特性

Fig 4 Frequency properties curve of fault signal for LV with intermediate state

## 4 结论

在深入分析 LV 系统结构状态和漏电失效故障的基础上,建立系统故障树,针对漏电故障特点,引入事件中介概率的概念,并运用集对分析联系数理论对系统漏电现象进行了更全面的估计,发现系统结构问题所在及可靠性薄弱环节,为工程决策与设计提供更多依据。试验验证了模型的可靠性和有效性,计算方法简单,易于实现。

## 参考文献 (References)

- [1] 曾雪红,樊友平,黄席樾,等. 运载火箭控制系统漏电故障诊断问题求解 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(12): 49 - 54.  
ZENG Xue-hong, FAN You-ping, HUANG Xi-yue, et al. Leak current fault diagnosis problem-solving in launch vehicle controlling system [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(12): 49 - 54. (in Chinese)
- [2] 唐贤明,樊友平,黄席樾,等. 运载火箭控制系统漏电故障诊断平台的设计与实现 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003, 26(1): 29 - 33.  
TANG Xian-ming, FAN You-ping, HUANG Xi-yue, et al. Designing and realization of leak current fault flatroof for launch vehicle controlling system [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(1): 29 - 33. (in Chinese)

- [3] 毛万标,李尚福.基于图论模型的运载火箭漏电故障诊断方法[J].宇航学报,2006,27(Z1):507-513.  
MAO Wan-biao, LI Shang-fu Methods of electrical leakage diagnosis for launch vehicle based on graph theory model [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (Z1): 507 - 513. (in Chinese)
- [4] 樊友平,陈允平,黄席樾,等.运载火箭控制系统漏电故障诊断研究[J].宇航学报,2004,25(5):507-513.  
FAN You-ping, CHEN Yun-ping, HUANG Xi-yue, et al Research on the leak current fault diagnosis system for launch vehicle control system [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25 (5): 507 - 513. (in Chinese)
- [5] 宋军,黄大荣,许强.多 Agent集成方法在复杂系统故障预报中的应用[J].计算机科学,2006,33(10):202-204.  
SONG Jun, HUANG Da-rong, XU Qiang Application of multi-agent integration to fault prediction of complicated systems [J]. Computer Science, 2006, 33 (10): 202 - 204. (in Chinese)
- [6] 黄大荣,宋军,胡必锦.基于专家知识库属性重要度的故障诊断方法研究[J].计算机科学,2007,34(4):231-233.  
HUANG Da-rong, SONG Jun, HU Bi-jing A new method of fault diagnosis based on attribute significance of multi-field experts database [J]. Computer Science, 2007, 34 (4): 231 - 233. (in Chinese)
- [7] 黄大荣,郭安学,李云生,等.基于专家知识属性重要度的集群目标威胁评估方法[J].兵工学报,2009,30(10):1357-1362.  
HUANG Da-rong, GUO An-xue, LI Yun-sheng, et al An object-group threat assessment method based on attribute significance of multi-field expert systems [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30 (10): 1357 - 1362. (in Chinese)
- [8] 黄大荣,黄丽芬.灰色系统理论在故障预测中的应用现状及其发展趋势[J].火炮发射与控制学报,2009,(3):88-92.  
HUANG Da-rong, HUANG Li-fen Present situation and development tendency of grey system theory in fault forecast application [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2009, (3): 88 - 92. (in Chinese)
- [9] 王光远,张鹏.具有中介状态的工程系统的可靠性分析[J].土木工程学报,2001,34(3):13-17.  
WANG Guang-yuan, ZHANG Peng Reliability analysis for engineering systems with intermediate state [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34 (3): 13 - 17. (in Chinese)
- [10] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2003.  
ZHAO Ke-qin Set pair analysis and application [M]. Hangzhou: Zhejiang Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 唐钟,周小伟.大型复杂分布式控制系统可靠性及可扩充性设计[J].兵工自动化,2006,25(10):68-69.  
TANG Zhong, ZHOU Xiao-wei Design of reliability and expansion of large-scale and complicated control system [J]. Ordnance Industry Automation, 2006, 25 (10): 67 - 69. (in Chinese)
- [12] 黄大荣,黄丽芬.基于集对分析联系数故障树的BA系统可靠性分析[J].计算机应用研究,2010,27(1):111-113.  
HUANG Da-rong, HUANG Li-fen Reliability analysis of BA system based on connection number of set pair analysis and FTA [J]. Application Research of Computer, 2010, 27 (1): 111 - 113. (in Chinese)
- [13] 郭波,武小悦,张秀斌,等.系统可靠性分析[M].长沙:国防科学技术大学出版社,2002.  
GUO Bo, WU Xiao-yue, ZHANG Xiu-bin, et al Systems reliability analysis [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002. (in Chinese)