

模糊故障树分析法在航空发动机滑油渗漏分析中的应用

陈农田¹, 马婷², 王杰³, 杨文锋¹

(1. 中国民航飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307; 2. 中国民航飞行学院 计算机学院, 四川 广汉 618307;

3. 北京航空航天大学 热能与动力工程学院, 北京 100191)

摘要: 为准确查找航空发动机滑油渗漏原因, 研究模糊故障树理论在飞机故障诊断方面的应用; 以 CFM56-7B 发动机滑油系统为研究对象, 将故障树理论应用于滑油系统渗漏故障诊断中, 采用下行法求解最小割集得到故障诱因最小事件; 根据滑油故障发生概率具有模糊和不确定性特点, 结合 Delphi 专家调查采用模糊数学理论进行定量分析, 确定故障诱因事件风险重要度排序; 从 CFM56-7B 滑油渗漏故障原因重要度排序可知, 故障诱因依次为后收油池供油口盖封严损坏 (x_1)、后收油池滑油回油管接头处裂纹 (x_2)、发动机使用 MJO291 滑油后导致密封材料损坏 (x_3) 等, 维修时应注意; 维修单位故障记录验证了方法的有效性, 可为准确和快速诊断和排除滑油渗漏故障提供参考。

关键词: 航空发动机; 滑油渗漏; 模糊故障树; 滑油监测; 故障诊断

Aviation Engine Oil Leakage Fault Analysis Based on Fuzzy Fault Tree Theory

Chen Nongtian¹, Ma Ting², Wang Jie³, Yang Wenfeng¹

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to find out the aviation engine oil leakage reasons, research the fuzzy Fault Tree Analysis (FTA) theory application in fault diagnosis. CFM56-7B engine oil system is taken as the research object, the fault tree analysis theory is adopted to oil leakage fault diagnosis, downlink method is put forward to solve the minimal cut sets and obtained fault incentives minimum event. Considering the fuzzy and uncertain characteristics of oil failure, fuzzy mathematical theory combined with Delphi expert survey is used for quantitative analysis to determine the fault cause event risk degree. From the CFM56-7B oil leaking causes sort importance, the close sump oil filler cap damage (x_1), the close sump oil return pipe joints crack (x_2), seal material damage after use MJO291 oil (x_3), etc lead to engine oil leakage, which should pay more attention. The maintenance unit fault records verify the validity of the methods, which provide a reference for accurate and rapid diagnosis and exclude oil leakage fault.

Keywords: aviation engine; oil leakage; fuzzy fault tree analysis; oil monitoring; fault diagnosis

0 引言

航空发动机的滑油系统主要起润滑、冷却、清洁以及防腐作用, 滑油的热量可作为防冰系统的热源^[1]。航空燃气涡轮发动机转子在高转速下工作, 滑油系统可靠安全是发动机正常运行的基础, 准确诊断和及时排除发动机滑油系统故障, 对保证飞行安全具有重要意义。在航空发动机滑油渗漏故障诊断研究方面, 文献 [2] 运用小波神经网络对发动机滑油故障进行分析。文献 [3] 通过实施基于动态逻辑门和模块化思想的动态故障树分析方法实施航空发动机滑油故障诊断。文献 [4] 通过在线系统电源设计来实施发动机滑油系统故障状态监控。由于航空发动机滑油系统结构复杂, 层次性、模块性强, 故障诊断信息繁多, 故障诱因具有随机性、模糊性及不确定性, 许多诊断分析方法在适用上有局限性。故障树分析法 (Fault Tree

Analysis, FTA) 作为分析复杂系统可靠性和安全性的有效工具, 在航空电子、机械化工、安全管理等领域中成熟应用^[5-8]。针对航空发动机滑油渗漏故障诱因特性, 较适合运用模糊数学理论与故障树相结合方式进行滑油系统故障诊断分析, 本文拟将模糊故障树理论引入滑油渗漏故障分析, 定量评估故障诱因风险程度, 为有效实施滑油系统故障诊断提供理论基础。

1 发动机滑油渗漏故障树的建立

1.1 CFM56-7B 滑油系统工作原理

CFM56-7B 发动机是 CFM 发动机公司上世纪 90 年代后期开发并投入使用的发动机, 在控制方式上采用全权限数字电子控制技术, 具备较强故障探测能力。CFM56-7B 发动机的滑油系统包括 3 个分系统: 储存系统, 分配系统, 指示系统, 其工作原理流程如图 1 所示^[9]。

1.2 发动机滑油渗漏故障树建立

故障树分析理论实际上是对系统的深入分析, 分析人员需清楚故障潜在因素影响程度、关联度及与故障之间的逻辑关系^[10-11]。根据故障树分析理论, 发动机滑油渗漏故障树建立步骤如下:

收稿日期:2015-12-18; 修回日期:2016-01-15。

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金项目(U1233202); 中国民航飞行学院自然基金面上项目(J2015-18)。

作者简介:陈农田(1984-), 男, 湖北咸宁人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事航空适航维修与安全, 航空人因工程方向的研究。

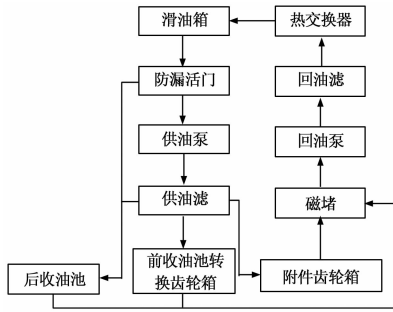


图 1 滑油系统组成工作原理

1) 收集分析滑油故障诊断资料。确定滑油系统组成因素, 分析故障要素诱发影响程度及边界条件。

2) 确定顶事件。根据故障机理和系统失效模式, 需要对滑油系统渗漏故障进行分析, 确定顶事件, 顶事件选取为: CFM56-7B 滑油渗漏故障。

3) 确定中间事件。作为顶事件下一级的中间事件就是诱发顶事件的全部直接原因或者原因组合。诱发 CFM56-7B 滑油渗漏故障中间事件包括后收油池的非正常渗漏故障、附件齿轮箱的失效渗漏故障、发动机其他附件故障导致滑油渗漏故障等模块, 其中附件齿轮箱的失效渗漏故障还包括附件齿轮箱内渗漏等子模块。

4) 确定底事件。作为中间事件的直接原因或原因组合下一级事件, 直至无法再分析的最底层的事件即为底事件。CFM56-7B 滑油渗漏故障底事件包括后收油池供油口盖封损坏造成的滑油渗漏; 附件齿轮箱碳封失效以及附件齿轮箱“O”型密封圈失效等。

5) 故障树化简。明确顶事件、中间事件以及底事件的与或关系, 根据实际设定必要合理假设条件, 得到主要逻辑关系等效的简化 CFM56-7B 滑油渗漏故障树分析图 (见图 2)。

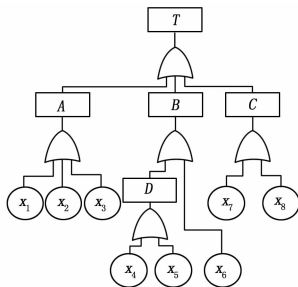


图 2 CFM56-7B 滑油渗漏分析故障树

- A: 后收油池的非正常渗漏;
- B: 附件齿轮箱的失效渗漏;
- C: 发动机上其他附件故障导致渗漏;
- D: 附件齿轮箱内的滑油渗漏;
- X₁: 后收油池供油口盖封损坏导致渗漏;
- X₂: 后收油池滑油回油管接头处裂纹导致渗漏;
- X₃: 挤压油膜供油管接头处连接螺帽设计不当导致渗漏;
- X₄: 附件齿轮箱碳封失效;
- X₅: 附件齿轮箱“O”型密封圈失效;
- X₆: 附件本身故障导致渗漏;
- X₇: 起动机故障导致渗漏;
- X₈: 发动机使用 MJO291 滑油后导致密封材料损坏导致

渗漏。

1.3 滑油渗漏故障树的最小割集

根据滑油渗漏故障树图 2 所示, 由于该故障树均为或门, 采用最小下行法求出滑油渗漏故障树的全部最小割集: 最小割集为: {x₁}, {x₂}, {x₃}, {x₄}, {x₅}, {x₆}, {x₇}, {x₈}。任意一个最小割集事件发生, 都会导致滑油渗漏故障。

2 基于模糊理论的滑油渗漏诱因风险分析

2.1 模糊理论

论域 U 上的一个模糊集 A 定义一个隶属函数: $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1], x \in U$, 其把 U 中的元素映射到 $[0, 1]$ 中的实数, 记为 $A = \int_{x \in U} \mu_A(x) / x$, 其中 $\mu_A(x)$ 是隶属度函数, 表示论域 U 中的元素 x 隶属于模糊集 A 的程度。

模糊数是用来处理不精确信息, 在模糊故障树分析中, 基本事件发生的概率用模糊数描述, 即称为概率模糊数, 其论域 U 为 $[0, 1]$ 。本文概率模糊数均用梯形模糊数 \vec{q} 表示, 其隶属度函数的表达为:

$$\mu_{\vec{q}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

简记为: $\vec{q}_1 = (a, b, c, d) (0 \leq a < b < c < d)$ 。

2.2 基本事件发生概率模糊数的确定

2.2.1 评估团专家的权值

由于在滑油渗漏分析中, 获得大量的数据统计不现实, 本文采用专家调查 Delphi 法来确定基本事件发生的概率值。由于每位专家对赋值的重要程度存在差异, 根据专家的具体情况, 将评估专家重要程度分为 5 个等级, 并分别给出等级分值, 然后将每位专家总的权值 $WS_i (i = 1, 2, 3, \dots, n; n$ 表示评审专家数), 进行归一化处理后得到实际权值 $W_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 即:

$$W_i = \frac{WS_i}{\sum_{i=1}^n WS_i} \quad (2)$$

2.2.2 基本事件发生的概率模糊数

专家评估故障树中基本事件发生概率的大小语言值集合为 {很小、小、较小、中等、较大、大、很大}, 记作: {VS, S, FS, M, FL, L, VL}, 其隶属度函数分别为:

$$f_{VS} = \begin{cases} 1 & (0 \leq x < 0.1) \\ \frac{(0.2-x)}{0.1} & (0.1 \leq x \leq 0.2) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_S = \begin{cases} \frac{(x-0.1)}{0.1} & (0.1 \leq x < 0.2) \\ \frac{(0.3-x)}{0.1} & (0.2 \leq x \leq 0.3) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{FS} = \begin{cases} \frac{(x-0.2)}{0.1} & (0.2 \leq x < 0.3) \\ 1 & (0.3 \leq x \leq 0.4) \\ \frac{(0.5-x)}{0.1} & (0.4 \leq x < 0.5) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_M = \begin{cases} \frac{(x-0.4)}{0.1} & (0.4 \leq x < 0.5) \\ \frac{(0.6-x)}{0.1} & (0.5 \leq x < 0.6) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{FL} = \begin{cases} \frac{(x-0.5)}{0.1} & (0.5 \leq x < 0.6) \\ 1 & (0.6 \leq x \leq 0.7) \\ \frac{(0.8-x)}{0.1} & (0.7 \leq x < 0.8) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (7)$$

$$f_L = \begin{cases} \frac{(x-0.7)}{0.1} & (0.7 \leq x < 0.8) \\ \frac{(0.9-x)}{0.1} & (0.8 \leq x < 0.9) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{VL} = \begin{cases} \frac{(x-0.8)}{0.1} & (0.8 \leq x < 0.9) \\ 1 & (0.9 \leq x < 1.0) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (9)$$

对于某事件发生的概率， n 位专家评估的语言值，可以采用加权组合得到该事件评估的语言值模糊数，表示为：

$$f_Z(x) = \left(\sum_{i=1}^m \omega_{VS_i} \cdot f_{VS}(x) \wedge \sum_{i=1}^s \omega_{S_i} \cdot f_S(x) \wedge \sum_{i=1}^t \omega_{FS_i} \cdot f_{FS}(x) \wedge \sum_{i=1}^u \omega_{M_i} \cdot f_M(x) \wedge \sum_{i=1}^v \omega_{FL_i} \cdot f_{FL}(x) \wedge \sum_{i=1}^q \omega_{L_i} \cdot f_L(x) \wedge \sum_{i=1}^p \omega_{VL_i} \cdot f_{VL}(x) \right) \quad (10)$$

式中， m, s, t, u, v, q, p 分别表示评估的语言值为“很小”、“小”、“较小”、“中等”、“较大”、“大”、“很大”的专家数，且 $m+s+t+u+v+q+p=n$ ； $\omega_{VS_i}, \omega_{S_i}, \omega_{FS_i}, \omega_{M_i}, \omega_{FL_i}, \omega_{L_i}, \omega_{VL_i}$ 分别表示评估值为“很小”、“小”、“较小”、“中等”、“较大”、“大”、“很大”的专家权重值； $f_Z(x)$ 表示加权组合后得到总的评估语言值所对应的模糊数 Z 的隶属度函数，可根据模糊理论中的 α 截集理论求解^[12]。

2.2.3 归一化处理

基本事件发生的概率不确定时，经专家评估团评估得到其发生的概率模糊数。为便于故障树分析，需均化为梯形模糊数。

对于精确概率值 p ，将其转化为梯形模糊数 $\vec{q} = (p, p, p, p)$ ；对于三角模糊数 $\vec{q} = (a, b, d)$ ，亦可将其转化为梯形模糊数 $\vec{q} = (a, b, b, d)$ ，即实施归一化处理。

3 算例分析

3.1 专家对基本事件发生概率估值

邀请 10 名经验丰富的发动机故障诊断与分析技术人员、管理人员和机务专家按“很小 (VS)”、“小 (S)”、“较小 (FS)”、“中等 (M)”、“较大 (FL)”、“大 (L)”、“很大 (VL)”分别对基本事件发生概率进行评估。其调查结果如表 1 所示。

3.2 模糊隶属函数建立

利用模糊集理论，将专家评估的语言值加权组合为模糊数，由于专家自然语言的判断信息带有模糊性，选用模糊集合的截集 α 对其进行处理。根据专家的权值，结合隶属函数可得

表 1 专家对基本事件发生概率评估

专家	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
1	S	M	FS	FS	S	M	FL	M
2	M	FS	S	S	FS	FS	M	FS
3	FL	S	M	FS	FS	VS	FS	FS
4	FS	FL	FS	S	M	M	S	M
5	M	M	S	S	S	S	FL	FL
6	FL	FL	M	FS	FS	FS	FS	FS
7	FS	M	FL	M	M	FS	L	L
8	M	FS	M	S	FS	S	M	FL
9	S	S	FS	M	S	FS	M	S
10	M	M	S	FS	S	VS	FS	M

评估专家的不同自然语言所代表的隶属函数的 α 截集分别为：

$$S_\alpha = [s_1, s_2], FS_\alpha = [f_1, f_2], M_\alpha = [m_1, m_2], FL_\alpha = [h_1, h_2], L_\alpha = [l_1, l_2]$$

其中： $s_1, s_2, f_1, f_2, m_1, m_2, h_1, h_2, l_1, l_2$ 分别为隶属度函数的 α 截集的上下限。

则对于 $f_S(x)$ ，令 $\alpha = \frac{(x-0.1)}{0.1}$ ，则有 $s_1 = 0.1\alpha + 0.1$ ，

$s_2 = 0.3 - 0.1\alpha$ ，同样得到， $f_1 = 0.1\alpha + 0.2, f_2 = 0.5 - 0.1\alpha$ ； $m_1 = 0.1\alpha + 0.4, m_2 = 0.6 - 0.1\alpha$ ； $h_1 = 0.1\alpha + 0.5, h_2 = 0.8 - 0.1\alpha$ ； $l_1 = 0.1\alpha + 0.7, l_2 = 0.9 - 0.1\alpha$ 。结合专家权值式 (2)，根据式 (3) 一式 (9)，结合表 1 概率评估，对于基本事件 x_1 ：

$$f_Z(x) = \max[(\omega_1 + \omega_9) \cdot f_S(x) \wedge (\omega_4 + \omega_7) \cdot f_{FS}(x) \wedge (\omega_2 + \omega_5 + \omega_8 + \omega_{10}) \cdot f_M(x) \wedge (\omega_3 + \omega_6) \cdot f_{FL}(x)] = [(0.1\alpha + 0.3155), (0.5552 - 0.1\alpha)]$$

其隶属度函数为：

$$f_Z(x) = \begin{cases} \frac{(x-0.3155)}{0.1} & (0.3155 \leq x < 0.4155) \\ 1 & (0.4155 \leq x < 0.4552) \\ \frac{(0.5552-x)}{0.1} & (0.4552 \leq x < 0.5552) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

简记为 0.3155, 0.4155, 0.4552, 0.5552 即为基本事件 x_1 发生的概率模糊数。同理得到基本事件 $x_i (i=2, 3, 4 \dots 8)$ 隶属函数及概率模糊数。

3.3 基本事件概率模糊数及重要度分析

将基本事件的概率模糊数归一化处理，滑油渗漏故障树中基本事件重要度计算结果见表 2 所示。

表 2 CFM56-7B 滑油渗漏故障树基本事件概率模糊数及重要度

基本事件编号	概率模糊数				模糊重要度	重要度排序
X1	0.316	0.416	0.455	0.555	0.049	1
X2	0.330	0.430	0.469	0.569	0.047	2
X3	0.253	0.353	0.394	0.494	0.034	4
X4	0.205	0.305	0.341	0.441	0.006	6
X5	0.205	0.305	0.341	0.441	0.006	6
X6	0.180	0.262	0.324	0.424	0.016	5
X7	0.372	0.472	0.519	0.619	0.004	7
X8	0.372	0.472	0.519	0.619	0.042	3

从 CFM56-7B 滑油渗漏故障原因重要度排序可知, 后收油池供油口盖封严损坏导致渗漏 (x_1)、后收油池滑油回油管接头处裂纹导致渗漏 (x_2)、发动机使用 MJO291 滑油后导致密封材料损坏导致渗漏 (x_8) 对 CFM56-7B 发动机的滑油渗漏有很大的影响, 在故障原因诊断中应首先考虑, 并积极采取预防措施。其次, 挤压油膜供油管接头处连接螺帽设计不当导致渗漏 (x_3)、附件本身故障导致渗漏 (x_6) 对于发动机滑油渗漏也有一定的影响。此外, 附件齿轮箱碳封失效 (x_4)、附件齿轮箱“O”型密封圈失效 (x_5)、起动机故障导致渗漏 (x_7) 也会产生一定的滑油渗漏, 维修时也应注意。

3.4 验证分析

参考国内某航空发动机维修企业 2010—2015 年 CFM56-7B 滑油系统故障维修记录, 诱发滑油系统渗漏的故障原因依次为后收油池供油口盖封严损坏、后收油池滑油回油管接头以及附件齿轮箱“O”型密封圈失效等, 表明基于模糊故障树分析结论跟实际情况基本吻合。

4 结语

本文基于 CFM56-7B 滑油系统结构特点和渗漏故障机理, 将故障树理论与模糊理论相结合应用于滑油渗漏故障诊断分析, 通过分析滑油渗漏故障因素和逻辑关系建立滑油渗漏故障树, 运用下行法查找故障树最低事件。根据滑油故障发生具有模糊和不确定性特点, 结合 Delphi 专家调查采用模糊数学理论进行定量分析, 确定故障诱因风险重要排序, 并结合维修单位滑油渗漏故障维修统计验证了方法的可行性与准确性。将模糊故障树理论应用于 CFM56-7B 滑油渗漏故障诊断取得了预期效果, 结论为准确查找滑油故障原因和及时排除故障提供

依据。

参考文献:

- [1] 张金, 宗兆科. 发动机滑油消耗率监控的精益管理 [J]. 航空维修与工程, 2015 (1): 98-100.
- [2] 王东, 杨军锋, 焦准. 基于小波网络航空发动机滑油系统故障诊断方法研究 [J]. 仪表技术, 2008 (11): 10-12.
- [3] 孙杨慧, 杨坤, 侯乃先, 等. 航空发动机滑油系统动态故障分析 [J]. 科技导报, 2015, 33 (5): 72-77.
- [4] 郝魁红, 李斌. 飞机发动机滑油在线监测系统电流源设计 [J]. 电子设计工程, 2014, 22 (5): 102-104.
- [5] 武庄, 石柱, 何新贵. 基于模糊集合论的故障树分析方法及其应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22 (9): 72-75.
- [6] 金亮亮. 基于故障树的航空器故障诊断专家系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 刘博宁, 张鹏, 张建业, 等. 软件可靠度的模糊故障树评定方法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (10): 3783-3786.
- [8] 张扯拉, 周奎, 谌容, 等. 故障树分析在城市燃气管网安全评价中的应用 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (18): 4-6.
- [9] 夏存江. CFM56-7B 发动机滑油渗漏分析 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21 (1): 54-57, 50.
- [10] 谢永成, 黄捷音, 李光升, 等. 故障树分析法在装甲车辆电源系统故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 22 (11): 3627-3629.
- [11] 占雪梅, 控位珍, 马涛. 模糊故障树在列车运行时故障开门的应用 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (3): 1059-1063.
- [12] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003: 23-29.

(上接第 51 页)

4 结论

所设计开发的安全壳缺陷检测系统以负压吸附式爬墙机器人为平台基础, 结合网络与通讯, 模式识别, 图像处理和数据库技术等, 可以快速检测出安全壳表面存在的缺陷信息, 并将缺陷信息进行测量计算和存储管理。通过多次试验可知该系统对缺陷检出率可达 95% 以上, 同时该系统可使用且不限于核电站安全壳的各种不同的平整物体表面, 如桥梁柱体、平整大坝基建、城墙等人工不易达到的建筑物表面, 对待检测表面实现无损检测。所设计开发的该系统已经成功应用于国内多座核电站的安全壳缺陷检测, 在目前世界上核电站安全壳缺陷无损自动检测方面尚属首例。该系统可通过稍做修改应用于其他行业中, 对任何物体表面进行缺陷或标识检测。目前在使用过程中该系统也存在一定不足, 如摄像机对光线过于敏感, 在强光照等干扰环境中检测率会降低, 误报率增加等, 当墙面或地面弧度过大时无法吸附, 有障碍的平面无法检测, 不同检测环境下图像处理算法阈值等要稍做调整等等, 在以后的工作和设计中可针对这些问题进一步修改和完善。

参考文献:

- [1] 夏祖训, 王明弹, 黄小林, 等. 百万千瓦级核电厂安全壳结构设计试验研究 [J]. 核动力工程, 2002 (S1).

- [2] 孙造占, 刘素娟, 林松涛, 等. 预应力安全壳强度监测方法探讨 [J]. 核科学与工程, 2002 (02).
- [3] 江邦治. 反应堆安全壳的局部泄漏率试验 [J]. 核动力工程, 1991 (04).
- [4] 周文权, 曲小朋, 孟凡彬. 核电站安全壳整体密封性试验方法 [J]. 核动力工程, 1997 (02).
- [5] 潘沛霖, 韩秀琴, 赵言正, 等. 日本磁吸附爬壁机器人的研究现状 [J]. 机器人, 1994, 6 (6).
- [6] 黄文攀, 戴永雄, 范茂飞, 等. 爬墙机器人研究与制作 [J]. 淮海工学院学报 (自然科学版), 2010 (2).
- [7] 刘淑霞, 王炎, 徐殿国, 等. 爬壁机器人技术的应用 [J]. 机器人, 1999, 21 (2).
- [8] 肖立, 佟仕忠, 丁启敏, 等. 爬壁机器人的现状与发展 [J]. 自动化博览, 2005 (1): 85-88.
- [9] Xu D J, Gao X S, Wu X B, et al. Critical suction characteristic analyses of a wall climbing robot [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007, 16 (2).
- [10] 曹申, 罗意平. 基于图像处理的手持软板缺陷自动检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (4).
- [11] 熊建平. 基于计算机视觉的墙地砖表面缺陷检测 [J]. 电子测量技术, 2015, 38 (5).
- [12] 李新科, 高潮, 郭永彩, 等. 利用改进的 SIFT 算法检测桥梁拉索表面缺陷 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40 (1).