【电子与信息科学 / Electronics and Information Science】

基于 Modelica 的 RAT 作动机构仿真及设计参数优化

黄 艳, 蔡 景, 代定强

南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 211106

摘 要: 作动机构是保证冲压空气涡轮(ram air turbine, RAT)系统正常启动和工作的关键,为提高 RAT 系统作动机构的可靠性,提出一种基于多领域统一建模语言 Modelica 的 RAT 作动机构仿真建模及设计参数优化方法。基于实际使用案例建立故障树,明确导致作动机构主要故障模式的组件;采用 Modelica 语言对 RAT 作动机构进行仿真建模,对比实际使用情况,验证模型正确性,模型误差约为 3.78%;针对相关组件的设计参数对作动机构展开时间和末端速度的敏感性分析,得出主要影响参数;为避免液压油压力过大造成泄漏,在满足作动机构展开时间及末端展开速度约束的前提下,以确定液压油峰值压力最小时的设计参数为目标,仿真得到最优参数设计值。研究成果可为中国 RAT 正向设计提供参考。

关键词: 民用飞机; 冲压空气涡轮; Modelica; 作动机构; 建模仿真; 设计参数优化

中图分类号: V262

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.04419

Modelica-based simulation and optimization of design parameters of RAT actuator

HUANG Yan, CAI Jing, and DAI Dingqiang

College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, P. R. China

Abstract: The actuator is the key to ensure the normal startup and operation of the ram air turbine (RAT) system. In order to improve the reliability of the actuator of the RAT system, we propose a RAT actuator simulation modeling and design parameter optimization method based on the multi domain unified modeling language Modelica. Firstly, a fault tree is established to identify the components that cause the main failure modes of the actuator based on the actual cases of the RAT. Secondly, the model of RAT actuator is built by using Modelica language. The correctness of the model is verified by comparing with the actual use, with the error of about 3.78%. Finally, in order to avoid oil leakage caused by excessive hydraulic oil pressure, under the premise of meeting the constraints of the actuator deployment time and the end deployment speed, the optimal design parameters are determined by simulation when the peak pressure of the hydraulic oil is minimized. The research results can provide reference for the forward design of RAT in China and have good engineering application value.

Key words: civil aircraft; ram air turbine (RAT); Modelica; actuator; modeling simulation; design parameter optimization

Received: 2020-07-04; **Accepted:** 2020-11-25; **Online (CNKI):** 2021-05-17

Foundation: Fundamental Research Foundation for the Central Universities of China (NP2019408)

Corresponding author: Professor CAI Jing. E-mail: caijing@nuaa.edu.cn

Citation: HUANG Yan, CAI Jing, DAI Dingqiang. Modelica-based simulation and optimization of design parameters of RAT actuator [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(4): 419-426. (in Chinese)

安全性是飞机运行的基本要求,而冲压空气涡轮(ram air turbine, RAT)系统作为最后一道屏障,在飞机发动机和辅助动力装置都失效的情况下为飞机关键部位提供能源^[1-6],确保飞机发生故障时仍能被操作,避免事故发生,保障生命和财产安全.民航局规章 CCAR-25.671(d)条规定,飞机的设计要保证在所有发动机都失效情况下仍可操纵^[7].RAT 系统现已在民用飞机上普遍安装,国外对 RAT 系统的研究较早,技术较为成熟,其中, Dowty^[8]和 Hamilton Sundstrand 公司^[9]的研究具有一定代表性;中国的 RAT 系统大多参考国外设计进行改进,如王永鑫等^[10]研究 RAT 装置在民用涡桨飞机造型中应考虑的因素;周连骏等^[11]根据收放装置的工作原理,运用 LMS Virtual. Lab Motion 构造刚柔耦合的多体动力学模型,并运用 AMESim 构造作动机构液压模型,将两种模型关联从而实现联合仿真;夏天翔等^[12]对 RAT 系统建立多学科模型,仿真其不同工况和设计参数下的动态特性,并结合风洞试验验证模型准确性. RAT 系统已由原来传统的电或液的形式向电液混合式发展^[12],常用的仿真工具主要用于单一领域的仿真建模,并不适用于 RAT 系统这一典型机电液综合系统的多领域统一物理建模,同时目前国内尚缺乏对实现 RAT 展开任务的核心部件(即作动机构)的相关研究^[13].

为改进目前仿真工具单一建模及作动机构方面的不足,本研究选用面向对象的适用于多领域建模的 Modelica 语言对作动机构进行仿真研究^[14],通过实际情况得出故障模式,建立故障树,并确定影响 RAT 作动机构性能的主要组件.对影响作动机构展开时间和液压油压力的因素进行敏感性分析,并结合 Mworks 和 Matlab 从设计方面提出改善措施以控制故障发生.

1 RAT 作动机构故障分析

由于使用环境和贮存时间等因素影响, RAT 作动机构的可靠性可能发生退化,从而产生各类故障.进行根原因分析能确定影响机构性能的主要组件,以便从设计方面进行改进,减少故障产生的可能.

民用飞机常用的桨叶式 RAT 作动机构一般处于收回状态,作动机构展开弹簧处于压缩状态且被装置锁定,当收到释放信号后,锁定装置解除,展开弹簧伸长,推出作动机构.收放作动机构的结构如图 1,按照执行功能的不同可将其分为锁定装置

图 1 RAT 作动机构结构

Fig. 1 (Color online) Structure of RAT actuator

和执行装置两个子系统.

锁定装置主要由锁定弹簧、平动连杆机构、卡环、钢珠及电磁锁等组成,其包括收起状态的上位锁和伸出状态的下位锁,利用两个卡锁环与活塞上的斜面与凹槽配合以实现锁定和解锁功能.

执行装置主要由展开弹簧、活塞和载荷连接杆组成,通过弹簧力带动整个执行机构产生一定位移,使 RAT 装置的迎风部分被推出机舱外.弹簧力由两个劲度系数不同的大小弹簧组成,通过这两个弹簧共同作用克服与其他机构的静态摩擦力,确保作动机构的顺利启动.

RAT 作动机构通常具有 3 种展开行程故障模式:① 锁定装置无法解锁展开;② 执行装置展开过快;③ 执行装置展开过慢.针对不同的故障模式,根原因分析能有效识别故障并分析故障原因,便于从根本上提出针对问题本质的解决方案^[15].常用的分析方法有事件树分析法^[16]、事件因果关系图表法^[17]、屏障分析法^[18]、树状图法^[19]、5-whys 分析法^[20]、基元事件分析法^[21]及原因图法^[22]等.由于故障树分析法全面直观,因此,本研究采用故障树建立作动机构故障模式与其组件之间的关系.

对每一类故障模式分别建立故障树,以执行装置展开慢故障为例,其故障树如图 2.其中,GT 表示门,即与门或非门等;EV 表示底事件;FR 表示失效率.对于执行装置展开慢的故障,根原因有密封圈太紧造成的摩擦力过大、杂物卡阻、弹簧储存期间变性、大弹簧提前退出作用、阻尼孔被阻塞及液压油变性等.

同样对另外两种故障模式建立故障树,结果认为,对于执行装置展开过快的故障,根原因有密封圈失效造成泄漏、阻尼孔磨损变形及液压油变性等;对于锁定装置无法解锁展开的故障,根原因有组件或基体关键表面的磨损或生产装配误差、杂物

图 2 执行装置展开慢故障分析

Fig. 2 Slow deployment failure analysis of the actuating system

卡阻、电磁锁失效及液压油变性等。

通过作动机构的故障分析可以看出, 作动机构的各类故障模式主要涉及作动弹簧、阻尼孔、密封件以及作动机构结构体本身等因素。密封件的使用一般根据相关标准选取, 缺乏改进空间; 作动机构结构本体与飞机其他部分联系紧密, 不宜调整其结构尺寸。因此, 确定作动弹簧和阻尼孔作为可改进的对象, 通过优化作动弹簧和阻尼孔参数, 实现作动机构性能的改进。

2 基于 Modelica 的作动机构建模

作动机构的建模包括底层组件建模、整体模型搭建及模型精度验证 3 个步骤。

2.1 底层组件模型建立

作动机构的底层组件包括风载荷、液压阻尼、弹簧、杆系及机体, 其建模可通过利用物理方程组编写模型代码实现, 部分简单组件可直接使用标准模型库中的模型。执行装置在展开过程中主要涉及 3 个力, 分别为展开弹簧的弹力、风载荷及液压阻尼^[23]。其中, 展开弹簧的弹力可以根据作动机构的设计数据直接进行参数设置; 风载荷源于作用在涡轮上的气流, 可直接使用以往的实测数据进行加载; 液压阻尼可通过数学方程及作动机构的设计数据计算得出。锁定装置解锁过程涉及的力包括电磁锁的拉力和解锁弹簧的弹力, 均按照设计数据取值并设置模型参数。

2.1.1 风载荷建模

使用 Matlab 工具箱将传感器测量的离散点拟合为 4 阶多项式函数形式。根据实测数据, 得出气动载荷 L_a 与作动机构位移 d 的对应关系, 如表 1。利用 Matlab 将表 1 数据进行 4 阶多项式拟合, 得到气动载荷曲线如图 3。拟合函数为

$$L_a = -5.14 \times 10^{-5} d^4 + 0.016 d^3 - 0.6 d^2 - 88.2 d + 4\,966 \quad (1)$$

表 1 L_a 与 d 的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between L_a and d

d/mm	L_a/N	d/mm	L_a/N
0	5 000	81.4	380
3.6	4 650	104.0	1 750
9.0	4 100	124.8	4 150
12.7	3 750	139.3	6 200
18.1	3 250	140.2	6 350
38.0	1 550	148.3	7 550
52.5	700	151.5	8 000
59.7	400

图 3 拟合后气动载荷曲线

Fig. 3 Aerodynamic load curve after fitting

2.1.2 液压阻尼建模

液压阻尼表现为展开过程的阻力, 来源于作动机构展开过程的回油阻力。阻尼孔结构与作动机构的展开速度有关, 将阻尼孔简化为薄壁小孔, 结合薄壁小孔流量公式与活塞的运动学公式, 可得

$$q = C_d A \sqrt{2 \Delta p / \rho} \quad (2)$$

$$Q = V A_{pi} \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = a \quad (4)$$

$$F_w + F_s - F_o = ma \quad (5)$$

$$F_o = p A_{pi} \quad (6)$$

其中, q 为每个阻尼孔的流量; C_d 为阻尼系数; A 为阻尼孔面积; ρ 为液压油密度; Δp 为缸内两端压强差; Q 为作动机构高压腔总流量; V 为活塞速度; A_{pi} 为活塞面积; a 为活塞加速度; m 为作动机构质量; F_w 、 F_s 和 F_0 分别为风载荷、弹簧载荷和阻尼力. 液压油离开作动机构腔体后即进入油箱, 则腔体外压强为 0, Δp 即为腔内的实际压强 p .

2.1.3 其他组件模型搭建

对于工作原理简单的组件, 如弹簧和连杆等, 可以直接利用 Mworks 中已有标准模型库组件进行搭建连接, 如使用 Modelica. Mechanics. MultiBody. Forces. Spring 组件模拟展开小弹簧, 设置其劲度系数 $c = 21\,500\text{ N/m}$ 、原始长度 $S = 0.3\text{ m}$.

2.2 作动机构整体模型搭建

利用底层组件搭建作动机构的物理结构并添加相应控制律代码, 同时使用自定义连接器在不同子系统之间进行功能信号的传递, 实现作动机构整体模型的搭建, 如图 4 和图 5, 主要建模参数按照实际设计参数取值, 如表 2.

1 为弹簧安装固支点; 2 为展开弹簧; 3 为弹簧控制器;
4 为连接器; 5 为活塞质点; 6 为力组件

图 4 执行装置模型

Fig. 4 (Color online) Model of actuating system

表 2 作动机构实际设计参数

Table 2 Actual design parameters of actuator

参数名	参数值
阻尼孔数量和分布	6(3 层 $\times$ 2 个)
阻尼孔半径/mm	1
展开弹簧劲度系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	21 500
作动机构运动行程/mm	150
解锁拉杆拉力/N	150
解锁行程/mm	1.2
液压油密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	860

1 为锁定弹簧; 2 为传动杆系; 3 为电磁拉杆

图 5 锁定装置模型

Fig. 5 (Color online) Model of lock system

2.3 模型验证

调研知本研究 RAT 型号的作动机构合理展开范围为 $0.6 \sim 1.5\text{ s}$. 以表 1 实测状况为工况, 表 2 数据作为 Modelica 模型初始设计参数, 将已建立的作动机构仿真模型结果曲线与某型 RAT 装置作动机构的实际结果曲线进行对比分析, 以确定仿真模型的正确性, 如图 6.

图 6 仿真和实测的展开位移-时间曲线

Fig. 6 Deployment displacement-time curve of simulation and actual measurement

锁定装置解锁成功后, 执行装置在作动弹簧力下展开, 直至到达目标位移 (150 mm). 某型 RAT 作动机构实物试验得出的展开时间为 1.32 s , 仿真得出的展开时间为 1.37 s (解锁时间约为 0.04 s), 与试验的误差为 3.78% . 由图 6 可知, 仿真得到的位移-时间曲线与试验测得的曲线较为吻合, 证明本研究建立模型的精度较高^[10]. 误差主要来自内

外缸密封之间的摩擦力以及风载荷与实际载荷之间的误差。

3 作动机构设计优化及分析

根据作动机构故障分析结果对作动机构的设计参数进行优化,可从根源上减少故障发生。

3.1 设计优化方法

当作动机构展开时的末端速度 v_{end} 过大时,会导致较大的冲击力以及刚性碰撞,致使释放 RAT 装置时的安全性和可靠性受到威胁,因此,需要控制 v_{end} 。实际试验表明, $v_{\text{end}} \leq 0.1 \text{ m/s}$ 时的冲击力在可接受范围内。同时由于液压油的压力太大会导致液压油泄露以及造成更多的功耗损失,因此,液压油的峰值压强 p_{max} 要尽可能小。针对这一问题,提出一种作动机构优化设计方法,为

$$\begin{aligned} \min & p_{\text{max}}(M) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} 0.6 \leq t \leq 1.5 \\ v_{\text{end}} \leq 0.1 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, M 表示确定作动机构结构的相关参数集合; $p_{\text{max}}(M)$ 表示由参数集合 M 确定的作动机构在展开过程中的峰值液压(单位: Pa); t 为作动机构展开时间(单位: s)。

3.2 模型参数敏感性分析

基于作动机构的 Modelica 模型对作动弹簧和阻尼孔的相关参数进行敏感性分析。使用控制变量法,在保持其他参数不变的情况下,通过仿真逐一分析作动大弹簧劲度系数、作动小弹簧劲度系数、阻尼孔布局间隔及阻尼孔半径对作动机构展开时间和末端运行速度的影响程度,结果如图 7 和图 8。

由图 7 和图 8 可见,阻尼孔半径和小弹簧劲度

图7 展开时间对各参数的敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of deployment time to various parameters

图8 末端速度对各参数的敏感性分析

Fig.8 Sensitivity analysis of end speed to various parameters

系数对作动机构展开时间和末端速度具有一定影响;大弹簧劲度系数和阻尼孔布局间隔变化造成的影响微小,这是由于大弹簧的作用行程短,对展开过程影响不大;阻尼孔分布位置已接近作动机构行程末端,能造成的影响有限。事实上,当阻尼孔半径减少约5%就会直接造成作动机构展开太慢的故障,如图9。

图9 阻尼孔半径和小弹簧劲度系数对作动机构故障的影响

Fig.9 Influence of damping hole radius and spring stiffness coefficient on actuator failure

因此,以下将作动小弹簧的劲度系数 c 和阻尼孔径 r 为对象进行优化,即 $M = \{c, r\}$ 。

3.3 基于展开时间约束的设计优化分析

在 Mworks 模型中调整小弹簧的劲度系数及阻尼孔半径,确定符合作动机构展开时间相对应的弹簧劲度系数范围和阻尼孔半径范围,对展开时间进行仿真计算,结果如图 10。

研究结果表明,当小弹簧的劲度系数为 21 000 ~ 22 900 N/m、阻尼孔半径为 0.96 ~ 1.50 mm 时,作动机构展开时间在规定范围 0.6 ~ 1.5 s 内。由图 10 可见,弹簧劲度系数越大,阻尼孔半径越小,则作

图 10 作动机构合理展开时间对应的弹簧劲度系数和
阻尼孔半径范围

Fig. 10 Spring stiffness coefficient and
damping hole radius range corresponding to
the reasonable deployment time of the actuator

动机构展开时间越长。由工程实践可知, 弹簧劲度系数越大时对应的弹簧展开力越小, 阻尼孔半径越大时对应的阻尼力越小, 从而使作动机构能更快展开。

3.4 基于展开末端速度约束的设计优化分析

分析作动机构展开末端速度和展开时间之间的关系, 结果如图 11。可见, 随着展开时间增大, 末端速度逐渐降低, 利用 Matlab 软件得出拟合方程为

$$v_{\text{end}} = 0.106 \, 2t^2 - 0.325 \, 8t + 0.317 \, 2 \quad (8)$$

当末端速度为 0.1 m/s 时, 对应时间为 0.979 3 s。当作动机构展开时间为 0.979 3 ~ 1.500 0 s 时, 对应末端速度符合要求。这个时间段对应的弹簧劲度系数与阻尼孔半径如图 12。

图 11 末端速度与展开时间的关系

Fig. 11 Relationship between end speed and
deployment time

图 12 作动机构合理展开时间及末端速度对应的
弹簧劲度系数和阻尼孔半径范围

Fig. 12 Spring stiffness coefficient and
damping hole radius range corresponding to
the reasonable deployment time and
end speed of the actuator

当弹簧劲度系数为 21 000 ~ 22 900 N/m、阻尼孔半径为 0.96 ~ 1.18 mm 时, 作动机构展开时间和末端速度均符合要求。

3.5 优化目标值确定

对满足约束条件的各不同弹簧劲度系数和阻尼孔半径设计参数下的液压油峰值压力进行统计, 部分数据如表 3。当阻尼孔半径为 0.97 mm, 弹簧劲度系数为 21 000 N/m 时, 对应液压油峰值压力值最小。因此, 选取该情况下的阻尼孔半径和弹簧劲度系数作为最优设计值。

表 3 不同阻尼孔半径和弹簧劲度系数下的压力值
Table 3 Pressure values under different damping hole
radii and spring stiffness coefficients

$c/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	r/mm			
	0.96	0.97	...	1.50
21 000	4 952 400	4 950 880	...	4 962 470
21 100	4 957 100	4 955 690	...	4 967 270
21 200	4 961 800	4 960 500	...	4 972 090
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22 800	5 037 320	5 037 410	...	5 048 450
22 900	5 042 120	5 042 230	...	5 053 080

结 语

为优化 RAT 系统作动机构的关键设计参数, 基于实际使用案例建立故障树, 分析导致作动机构主要故障模式的组件. 在此基础上, 采用 Modelica 语言对 RAT 作动机构进行仿真建模, 对其主要故障形成机理和各设计参数的定量影响程度进行分析. ① 通过故障树分析, 确定影响作动机构展开时间的主要组件分别为展开小弹簧以及阻尼孔; ② 建立基于 Modelica 的作动机构模型, 通过与实测相比, 精度误差仅为 3.78%; ③ 利用敏感性分析, 确定影响作动机构展开的主要组件设计参数为小弹簧劲度系数和阻尼孔半径, 并基于作动机构的 Modelica 模型, 研究作动机构的设计参数优化方法, 该方法同样可用于其他 RAT 型号的参数设计优化, 为 RAT 作动机构的正向设计提供重要基础.

基金项目: 中央高校基本科研业务专项基金资助项目 (NP2019408)
作者简介: 黄 艳 (1996—), 南京航空航天大学硕士研究生. 研究方向: 适航技术与管理、产品安全与仿真. E-mail: hy08861@126.com

引 文: 黄 艳, 蔡 景, 代定强. 基于 Modelica 的 RAT 作动机构仿真及设计参数优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(4): 419-426.

参考文献 / References:

- [1] KOEMER M. Recent developments in aircraft emergency power [C]// The 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). Las Vegas, USA: IEEE, 2015: 12-19.
- [2] MANWELL J F, MCGOWAN J G, ROGERS A L. Wind energy explained: theory, design and application [M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] WANG Jian. Research on several similarity criteria of ram air turbine operating under high-low altitude [C]// CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems. Beijing: IEEE, 2016: 88-92.
- [4] 李 平, 翟笑天. 冲压空气涡轮地面定期检查方法研究[J]. 航空维修与工程, 2015(8): 52-54.
 LI Ping, ZHAI Xiaotian. Research on ground scheduled inspection method for RAT [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(8): 52-54. (in Chinese)
- [5] BANNON D G, SEIDEL W E. Ram air turbine speed sensing ball detent over-speed prevention mechanism: 11148040 [P]. 2005-06-08.
- [6] SWEARINGEN P, MARKS S J. Automatic ram air turbine deployment: 13052797 [P]. 2011-03-21.
- [7] 中国民航局. 运输类飞机适航标准 CCAR-25-R4. 671 (d) [S].
 Civil Aviation Administration of PRC. Airworthiness standards for transport aircraft CCAR-25-R4. 671 (d) [S]. (in Chinese).
- [8] CHILMAN J A, WALL R J. Ram-air turbines: 3635584 [P]. 1972-01-18.
- [9] 周秀博. 冲压空气涡轮的气动设计与数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
 ZHOU Xiubo. Blade design and numerical simulation of ram air turbine [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 王永鑫, 崔 宇. 冲压空气涡轮在民用涡桨飞机中的应用[J]. 航空制造技术, 2014(14): 86-88.
 WANG Yongxin, CUI Yu. Application of ram air turbine in civil turbo-prop aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(14): 86-88. (in Chinese)
- [11] 周连骏, 卢岳良, 杜 鑫, 等. 冲压空气涡轮展开过程联合仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 124-128.
 ZHOU Lianjun, LU Yueliang, DU Xin, et al. Joint simulation of deployment process for ram air turbine [J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 124-128. (in Chinese)
- [12] 夏天翔, 卢岳良, 柯 兵. 飞机冲压空气涡轮系统的动态特性分析[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 309-319.
 XIA Tianxiang, LU Yueliang, KE Bing. Analysis of dynamic behavior of aircraft ram air turbine system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 309-319. (in Chinese)
- [13] TORELLA G, PALMESANO G. The development of a virtual test bed for gas turbine engines [C]// The 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, USA: AIAA, 2013: 2003-2651.
- [14] BAUER R P, STEVENS C G. Load shedding circuit for ram air turbine: 13232199 [P]. 2011-09-14.
- [15] 朱明清. 基于 Modelica 的液体火箭推进系统故障仿真及系统实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
 ZHU Mingqing. Fault simulation and software development of liquid rocket propulsion system based on Modelica [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 高立刚, 吕群贤. 设备失效根本原因分析技术和方法及其在广东核电的应用[J]. 核科学与工程, 2004(2): 105-111.

- GAO Ligang, LÜ Qunxian. The methodology of root cause analysis for equipment failure and its application at Guangdong nuclear power stations [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2004(2): 105-111. (in Chinese)
- [17] 李光辉, 秦建华, 蒋芳明, 等. 浅析事件树分析法在装载机液力传动系统故障分析中的应用 [J]. 河北农机, 2019(12): 32-33.
- LI Guanghui, QIN Jianhua, JIANG Fangming, et al. Analysis on the application of event tree analysis in fault analysis of loader hydraulic transmission system [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2019(12): 32-33. (in Chinese)
- [18] 邢广华, 鲍 晗, 左洪福. 运输类飞机持续适航事件根本原因分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(6): 842-847.
- XING Guanghua, BAO Han, ZUO Hongfu. RCA for continued airworthiness events of transport category airplane [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(6): 842-847. (in Chinese)
- [19] 吴彦农, 焦 峰, 马国强, 等. 应用屏障分析法对某电厂取水口堵塞事件进行根本原因分析 [J]. 核科学与工程, 2019, 39(4): 601-605.
- WU Yannong, JIAO Feng, MA Guoqiang, et al. Application of barrier analysis method to analyze the cause of blockage in intake of a nuclear power plant [J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, 39(4): 601-605. (in Chinese)
- [20] 吕 航. 城市隧道邻近建筑物的安全评价 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- LÜ Hang. Security assessment of buildings closed to the urban tunnels [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [21] 徐炜辰. 根本原因分析的研究——常用根本原因分析工具和方法的比较 [J]. 项目管理技术, 2015, 13(5): 61-64.
- XU Weichen. Research on root cause analysis: comparison of common root cause analysis tools and methods [J]. Project Management Technology, 2015, 13(5): 61-64. (in Chinese)
- [22] 卜晓敏. 航空人为因素事故/事件分析模型研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
- BU Xiaomin. Research on human factor analysis model of accident/incident [D]. Tianjin: China Civil Aviation University, 2008. (in Chinese)
- [23] 李 妍, 韩莎莎, 黄明才. 地铁列车接触器故障的鱼骨图法分析及应对措施 [J]. 现代城市轨道交通, 2010(3): 42-44.
- LI Yan, HAN Shasha, HUANG Mingcai. Fishbone diagram analysis and countermeasures of metro train contactor failure [J]. Modern Urban Transit, 2010(3): 42-44. (in Chinese)
- [24] 李 玲, 李洪伟, 李旭东. 某型飞机作动筒常见故障分析及维护 [J]. 新技术新工艺, 2014(5): 122-124.
- LI Ling, LI Hongwei, LI Xudong. Common fault analysis and maintenance of hydraulic actuating cylinder of a kind of aircraft [J]. New Technology & New Process, 2014(5): 122-124. (in Chinese)

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】