

基于3D打印与SPN的飞机备件供应流程建模

王 栋,冯佳晨,王 鑫,邹 强,韩 维

(海军航空工程学院 飞行器工程系,山东 烟台 264001)

摘要:将3D打印技术引入飞机备件供应保障,对其可行性进行分析,构建备件供应流程;由于供应过程中各阶段时间的不确定性,在引入3D打印技术前后均采用随机Petri网(Stochastic Petri Net, SPN)建立模型,并采用关联矩阵与状态方程法对模型的有效性进行分析;经分析,建立的模型是合理的。

关键词:飞机备件;供应流程;3D打印;SPN;建模

本文引用格式:王栋,冯佳晨,王鑫,等.基于3D打印与SPN的飞机备件供应流程建模[J].兵器装备工程学报,2017(2):149-154.

Citation format:WANG Dong, FENG Jia-chen, WANG Xin, et al. Modeling for Aircraft Based on 3D Printing Technology and SPN[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(2):149-154.

中图分类号:TJ85;N945.16

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)02-0149-06

Modeling for Aircraft Based on 3D Printing Technology and SPN

WANG Dong, FENG Jia-chen, WANG Xin, ZOU Qiang, HAN Wei

(Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: We introduced 3D printing technology to supply support, and analyzed its feasibility and built spare parts supply process. Because of the time uncertainty in different stage during supply process, stochastic petri net (SPN) was used to establish the process model both before and after the 3D printing was applied and analyzed the model effectiveness with correlation matrix and state equation method.

Key words: spare parts; supply process; 3D printing; stochastic petri net (SPN); modeling

备件供应保障是装备保障的重要组成部分,直接影响着装备的使用可用度、备件保障度、任务成功性以及全寿命周期费用^[1-3]。备件供应工作与装备可靠性、各级维修能力、库存管理等多种复杂因素息息相关,如何对备件供应流程进行建模显得尤为重要。作为一种新型的快速制造技术,3D打印技术以其制造周期短、成本低、产品可靠性高等优势在各个领域广泛应用^[4-6]。本文以飞机备件供应保障为例,将3D打印技术引入备件供应保障中,并通过SPN对备件供应流程这个离散过程进行分析并建立相应模型。由于3D打印自身技术特点的局限性,本文所涉及的备件均为机械部件。

1 3D打印技术与SPN简介

1.1 3D打印技术

3D打印技术又称为三维打印技术,是一种新型的增材制造技术。它摒弃了原始减材制造法中的加工机床以及刀具、模具,利用三维CAD模型在计算机控制的快速成型机上直接成型出复杂的结构零件,解决了传统工艺加工难甚至无法加工的问题,大大缩短了生产周期。对于结构较为复杂的产品,它具有更大的优势^[7-8]。

收稿日期:2016-09-10;修回日期:2016-10-12

基金项目:国家社会科学基金军事学项目(14GJ003-153)

作者简介:王栋(1986—),男,硕士,讲师,主要从事系统决策与分析、装备系统工程研究。

3D 打印技术在军事领域的应用主要集中在武器装备受损部件的维修和复杂结构件的生产上^[9]。我国也已多次在武器装备上应用 3D 打印技术进行某些部件的生产及维修,取得很好的效果。

在日常装备保障过程中,某些可靠性高的部件很少发生故障,甚至不发生故障,而某些可靠性低的部件虽然储备大量备件,有时也会出现备件不足的情况,此时如果再去向上级申请备件,就会出现断货风险,进而严重影响战备完好率,对于飞机而言,也就大大降低了飞机出动率。

3D 打印技术可以实现产品、零部件的实时生产,因此面对现阶段备件供应保障经常出现或今后可能出现的一系列问题,利用 3D 打印技术在生产制造与维修上的优势,将 3D 打印技术引入备件供应进行建模分析。

1.2 SPN

Petri 网^[10-11]是一种可以准确描述离散时间动态系统的转移函数,其结构描述为一个三元有向图,即 $N = (P, T, F)$ 。其中 P 代表库所, T 代表变迁, F 则表示流关系。

SPN 是在赋时 Petri 网概念的基础上提出来的,主要针对时间变量所呈现的随机特性。比如维修系统中维修作业时间的不确定性以及交通系统中航空器在固定滑道段上的时间受多因素的干扰等。

SPN 定义为六元组:

$$SPN = (PN, \lambda) = (P, T, Pre, Post, m_0, \lambda)$$

其中, PN 为基本形式的 Petri 网, λ 则表示变迁上的激发生率。

一个 Petri 网模型建立后,需要对其可达性、有界性、安全性等基本性质进行定性分析。定性分析又称为有效性分析,可对备件供应流程的 Petri 网模型是否正确进行分析,消除异常结构,保证其与现实中的供应流程相对应,不存在冲突、死锁等现象^[12]。

关联矩阵与状态方程法利用线性代数的原理对 Petri 网进行定性分析。每一个 Petri 网都可以表示为一个关联矩阵 $C_{(m \times n)}$, 其中, m, n 分别表示库所和变迁的数量。若非负整数向量 $X_{(n \times 1)}$ 满足 $C^T X = 0$, 则称 X 是 Petri 网的一个 S_- 不变量; 若非负整数向量 $Y_{(m \times 1)}$ 满足 $CY = 0$, 则称 Y 是 Petri 网的一个 T_- 不变量。利用 S_- 不变量可以进行死锁分析和错误检测等, 利用 T_- 不变量可以研究循环周期性^[13]。

2 SPN 可行性分析

我国航空装备现有的备件供应保障体制存在不足,即通常是以任务为中心,进行备件需求的预测。因此,经常出现库存积压或者备件不足。对于库存积压,是对备件资源本身以及存储空间的浪费,增加了不必要的保障费用。若出现备件不足,对平时的战备完好率以及战时的部队战斗力的持续都会带来严重的影响。

对于基层级没有备件库存并且故障部件不可修理时,现阶段的做法是向上级申领备件并送上级维修。如果上级有备件,带来的仅是短时期的断货以及战备完好率的下降;但是如果上级没有备件库存,需要从备件源采购,或者该种备件生产线已经停止、该备件必须从国外引进,那么部队就面临着更大的困难,即长时间的断货。这种长时间的断货必然会带来更大的风险。

Petri 网可以描述复杂系统的动态行为,对系统中常见的同步、并发、分布、冲突以及资源共享等现象也能够进行很好的描述^[12]。而备件供应保障系统是一个典型的离散事件系统,在装备使用与维修保障过程中存在诸多的同步、冲突等现象。随机 Petri 网更是针对各项活动时间的不确定性而产生的,将 SPN 中的库所、变迁等概念与备件供应过程中的活动、状态等相对应,可以直观的描述备件供应保障涉及的各种活动。因此,采用该方法进行建模是可行的。对照表如表 1 所示。

表 1 Petri 网与备件供应过程对照

Petri 网	备件供应保障过程
库所	装备、部件、资源状态
变迁	故障部件维修任务、活动的执行与实施
弧	制度、规则、作业顺序
容量	时间、库存等资源限制
托肯	资源

3 飞机备件供应流程

以两级(即基层级和基地级)备件供应保障系统为例,构建备件供应流程^[14-15]。其供应流程如图 1 所示。

假设在基层级装备 3D 打印机,3D 打印机可以实现所有机械部件的维修以及生产,同时认为 3D 打印生产出来的零部件的各种性能与采购的零部件相一致。因此,机械故障部件的修理与生产方式也发生了相应变化,进而也导致了备件供应流程的变化,下面介绍引入 3D 打印技术后飞机机械部件的备件供应流程。

当引入 3D 打印技术后,若某一部件发生故障,首先将其送到基层级进行维修,此时需要判断是采用原始修理方式还是采用 3D 打印技术进行维修。当基层级有备件库存时,直接调用库存并装备使用。3D 打印技术仅在基层级没有故障部件的库存时才可能发挥重要作用,显现出优势。当基层级没有库存时,可直接采用 3D 打印技术实现故障部件的生产,无需向上级申请备件。因此其备件供应流程如图 2 所示。

4 备件供应流程模型

利用随机 Petri 网原理对上述两级备件供应流程进行建

模,如图3所示。各库所以以及变迁的含义列于表2。

在基层级引入3D打印技术后,两级备件供应流程发生相应变化,与之相对应的备件供应保障模型如图4所示。

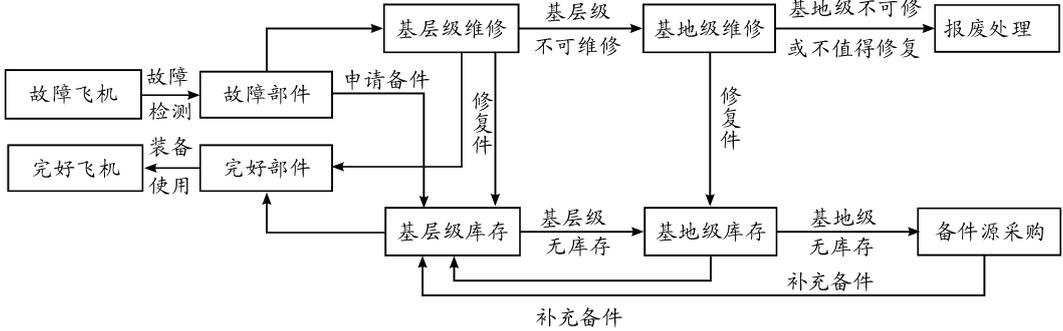


图1 两级备件供应流程

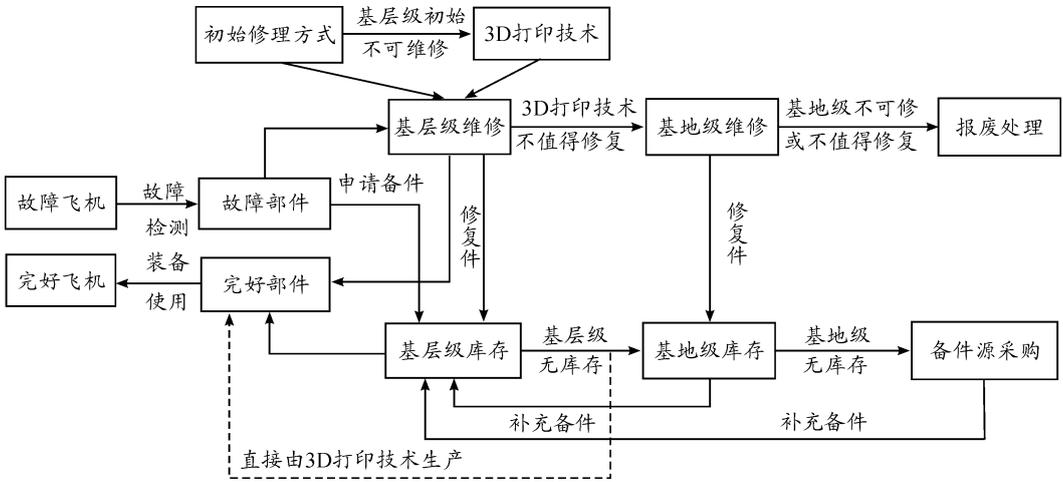


图2 引入3D打印技术的两级备件供应流程

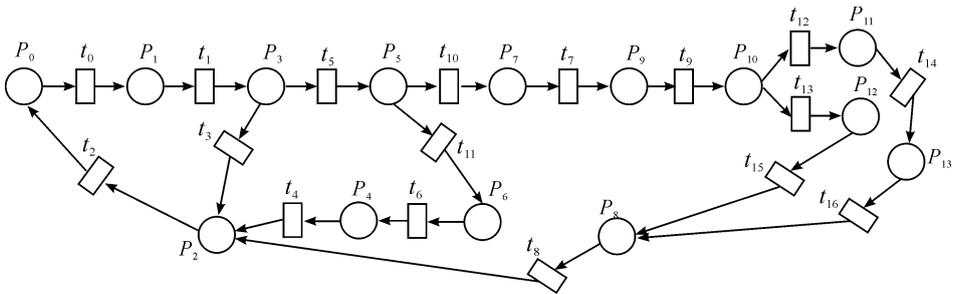


图3 两级备件供应保障模型

表2 库所、变迁的含义

库所	含义	变迁	含义
P_0	飞机	t_0	飞机发生故障
P_1	故障飞机	t_1	对飞机进行检测
P_2	基层级库存	t_2	完好部件装备使用
P_3	故障部件	t_3	申请备件
P_4	经基层级修复的故障部件	t_4	修复部件存入本级库存
P_5	经基层级检测的故障部件	t_5	故障部件送基层级进行维修
P_6	确定由基层级进行维修的故障部件	t_6	基层级对故障部件进行维修
P_7	确定由基地级进行维修的故障部件	t_7	将故障部件送至基地级进行维修
P_8	基地级库存	t_8	基地级库存将备件发给基层级库存
P_9	接受来自基层级的故障部件	t_9	基地级进行故障检测
P_{10}	经基地级检测的故障部件	t_{10}	经检测基层级不可维修
P_{11}	基地级不可修或不值得修复的报废件	t_{11}	经检测基层级可以维修
P_{12}	经基地级进行修复的故障部件	t_{12}	经检测该部件需要报废
P_{13}	备件源	t_{13}	经检测基地级可维修
		t_{14}	报废处理,并向备件源采购备件
		t_{15}	基地级修复部件送至库存
		t_{16}	备件源补充备件

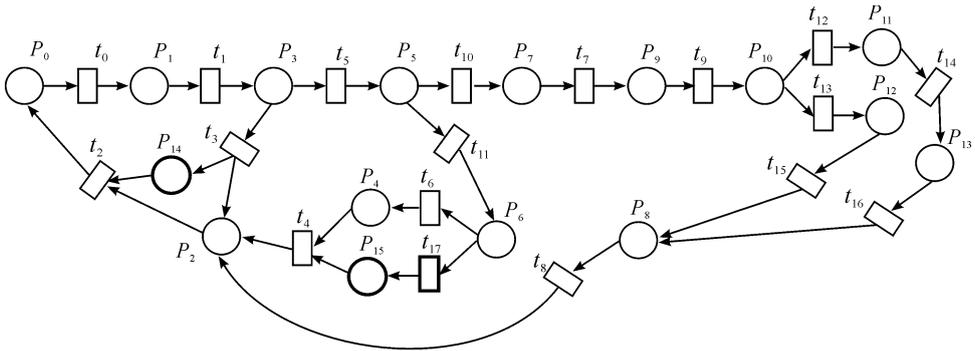


图4 引入3D打印技术的备件供应保障模型

图中加粗部分表示引入3D打印技术后新增加的库所和变迁,下面将新增库所和变迁的含义列于表3中。

表3 增加库所变迁含义

库所	含义	变迁	含义
P_{14}	基层级无备件库存,由3D打印技术直接生产的部件	t_{17}	采用3D打印技术对故障部件进行维修
P_{15}	经3D打印技术修复的故障部件		

与此同时,引入3D打印技术后某些库所和变迁的含义将发生相应的变化,将变化的库所和变迁的含义列于表4中。

表4 更改库所、变迁含义

库所、变迁	初始含义	现在含义
P_4	经基层级修复的故障部件	经基层级初始修理方式修复的故障部件
t_6	基层级对故障部件进行维修	采用初始修理方式对故障部件进行维修

5 模型的有效性分析

5.1 模型的求解

本文利用 $T_$ 不变量对上述两个模型进行有效性分析。

根据 Petri 网相关知识,首先对图 3 的随机 Petri 网模型建立关联矩阵如下:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

求得 4 个解向量,解向量中分量为 1 表示该变迁被触发,分量为 0 表示该变迁不被触发。因此可将解向量转化为另一种形式,即

$$\begin{aligned} X_1^T &= (t_0, t_1, t_2, t_3) \\ X_2^T &= (t_0, t_1, t_2, t_4, t_5, t_6, t_{11}) \\ X_3^T &= (t_0, t_1, t_2, t_5, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{12}, t_{14}, t_{16}) \\ X_4^T &= (t_0, t_1, t_2, t_5, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{13}, t_{15}) \end{aligned}$$

这 4 个解向量分别代表流程中的 4 种情况,将它们实际含义列于表 5。

表 5 解向量意义描述

序号	意义
1	部件故障后,直接申请备件;基层级有备件库存,直接装备使用
2	基层级进行故障部件的修复,修复后存入本级库存或直接装备使用
3	经两级维修判断故障件为报废件,进行报废处理,同时根据库存情况提供备件
4	基地级进行故障部件的修复存入本级库存,同时根据库存情况提供备件

同理,对于图 4 的备件供应模型采用同样的方法进行求解,求得 $T_$ 不变量为,

$$\begin{aligned} X_1^T &= (1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \\ X_2^T &= (1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0) \\ X_3^T &= (1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0) \end{aligned}$$

由 $CX=0$,求解 X 即得到该 Petri 网模型的 $T_$ 不变量为

$$\begin{aligned} X_1^T &= (1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \\ X_2^T &= (1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0) \\ X_3^T &= (1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0) \\ X_4^T &= (1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,1,0,1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_4^T &= (1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,1,0,0) \\ X_5^T &= (1,1,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1) \end{aligned}$$

由于 3D 打印技术的引用,库所与变迁增加,也导致了相应的解向量增多以及解向量含义的变化,用表 6 进行表示。

表 6 引入 3D 打印技术解向量意义描述

序号	意义
1	部件故障后,直接申请备件;基层级有备件库存,直接装备使用,或者基层级没有备件库存,直接采用 3D 打印技术进行故障部件的生产
2	基层级采用初始修复方式进行故障部件的修复,修复后存入本级库存或直接装备使用
3	基层级采用 3D 打印技术进行故障部件的修复,修复后存入本级库存或直接装备使用
4	经两级维修判断故障件为报废件,进行报废处理,同时根据库存情况提供备件
5	基地级进行故障部件的修复存入本级库存,同时根据库存情况提供备件

5.2 模型分析

通过关联矩阵以及 $T_$ 不变量的求解可以发现,模型中所有变迁都有各自的输入和输出库所,这表明所有的维修与供应任务的实现都具有一定的条件,并非凭空产生。模型中的变迁大多以顺序结构建立,虽然存在少数以冲突结构建立的变迁,但都是为了判断两级是否可对故障部件进行维修及其各自的修理方式,不存在不被执行的任务。

6 结论

将3D打印技术引入飞机的备件供应保障,分别构建引入3D打印技术前后的备件供应流程,并以此建立相应的随机Petri网模型,最后采用关联矩阵与状态方程法对模型的有效性进行分析。从分析结果看,模型是合理的,为飞机备件供应保障提供了一种新的思路与方法。

参考文献:

- [1] 任敏,陈全庆,沈霞,等. 备件供应学[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [2] NECHVAL N, PURGAILIS M, CIKSTE K, et al. Prediction Model Selection and Spare Parts Ordering Policy for Efficient Support of Maintenance and Repair of Equipment[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6148(1): 321-328.
- [3] DOMBROWSKI U, WECKENBORG S. Determination of the Spare Parts Demand for Maintenance, Repair and Overhaul Service Providers [J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2013, 414(1): 433-440.
- [4] WILLIAMS B, ROSEN W. Manufacturing Metallic Parts with Designed Mesostructure via Three-Dimensional Printing of Metal Oxide Power [M]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [5] CHANDRASEKARAN M, LIM K, LEE W. Effect of Process Parameter on Properties of Titanium Alloy Fabricated Using Three-Dimensional Printing [J]. SIMTech Technical Reports, 2007, 8(1): 1-4.
- [6] 中国机械工程学会. 3D打印:打印未来[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2013.
- [7] FRANK G. 3D Printing: The New Industrial Revolution [J]. Business Horizons, 2012, 55(2): 155-162.
- [8] 王运赣, 王宣. 三维打印技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- [9] 郭朝邦, 胡丽荣, 胡冬冬, 等. 3D打印技术及其军事应用发展动态[J]. 战术导弹技术, 2013(6): 1-4.
- [10] 汤新民, 朱新平. PETRI网原理及其在民航交通运输工程中的应用[M]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
- [11] BILLINGTON JONATHAN, GALLASCH GUY. On Parametric Steady State Analysis of a Generalized Stochastic Petri Net with a Fork-Join Subnet [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6709(1): 268-287.
- [12] 艾厚文. 基于随机Petri网的铁路应急预案流程化研究 [D]. 北京交通大学, 2008.
- [13] 林闯. 随机Petri网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 郑东良. 航空维修管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [15] 杨宜林, 王德功, 常硕. 基于SPN的军用飞机备件供应保障建模[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 106-111.
- [16] 王鑫, 彭绍雄, 亚军. 基于3D打印的备件保障系统可用度模型[J]. 兵工自动化, 2016(2): 17-21.
- [17] 张帅, 滕克难, 肖飞, 等. 基于Vari-Metric的舰载机可修复件库存配置模型[J]. 火力与指挥控制, 2015(9): 156-161.
- [18] 赵培仲, 魏华凯, 戴京涛, 等. 飞机战伤抢修的备件需求研究[J]. 四川兵工学报, 2015(8): 12-14.

(责任编辑 唐定国)