

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.005

## 基于 3D 打印的备件保障系统可用度模型

王 鑫<sup>1</sup>, 彭绍雄<sup>2</sup>, 卜亚军<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对现阶段我军备件供应保障存在的问题, 将 3D 打印技术引入备件供应流程, 以实现备件不足时的供应保障。建立典型两级备件供应保障结构下的供应流程和保障系统模型, 并把可用度作为衡量系统有效性的主要指标。通过比较备件需求与两级库存量之间的不同数量关系, 计算初始模型和引入 3D 打印技术模型在不同阶段下的备件供应延迟时间, 进而计算两模型的可用度以比较模型的有效性。结果表明: 引入 3D 打印技术模型较初始模型而言具有较高的可用度, 可为后续的备件供应保障提供一种新的思路和方法。最后, 结合 3D 打印技术自身的技术特点, 分析了其应用于备件保障的局限性。

**关键词:** 供应保障; 供应延迟时间; 3D 打印; 可用度

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Availability Model of Spares Support System Based on 3D Printing

Wang Xin<sup>1</sup>, Peng Shaoxiong<sup>2</sup>, Bu Yajun<sup>1</sup>

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;*

2. *Department of Aircraft Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China*)

**Abstract:** According to the current problems of spares supply support, this paper introduces 3D printing technology to spares supply process so as to meet the needs of inadequate spares support. This paper also builds the supply process and maintenance system model under the structure of two level spares supply support, and see availability as the main indicator to weigh the efficiency of the model. In addition, divide the whole model into several processes and calculate system availability of initial model and the model of applying to the 3D printing technology during different stages by comparing the needs of the spares and two echelon inventory, then calculate the availability to compare the efficiency. Results indicate that the model of applying to the 3D printing technology with higher availability. The application of 3D printing technology provides a new way for support. At last, this paper analyzes the limitation of 3D printing technology according to its characteristic.

**Keywords:** supply support; supply delay time; 3D printing technology; availability

### 0 引言

我国航空装备现有的备件供应保障体制存在一定的不足, 库存积压或备件不足的情况时有发生。平时备件的不足会影响日常训练任务, 战时备件的缺乏将严重阻碍部队战斗力的持续生成, 而存储或携带大量备件以备不时之需则会造成大量资源的浪费<sup>[1-2]</sup>。将具有实时生产制造功能的 3D 打印设备引入备件供应保障, 就有可能无需存储或携带大量备件, 并防止因备件缺失所造成的装备失去作战能力的尴尬局面。

由于不同种类的故障部件需要的维修级别不同、维修时间不同, 其故障规律也不同, 同时其备件库存情况也有所差别; 因此, 当一个部件发生故障后, 需对其各层级维修情况、备件库存情况进行判断, 再根据具体情况具体分析<sup>[3-4]</sup>。笔者选取可用度作为衡量保障系统性能的参数, 建立初始情况和

引入 3D 打印技术下的保障系统可用度模型, 通过求解系统中装备的供应延迟时间来求解系统的使用可用度, 进而验证 3D 打印技术应用于备件供应保障的有效性, 为后续的备件供应工作提供一种新的思路和方法。

### 1 3D 打印技术与备件供应流程

#### 1.1 3D 打印技术简介

3D 打印技术又称三维打印技术, 它是一种以三维设计数字模型文件为基础, 综合运用金属、陶瓷、塑料粉末等可粘合材料, 通过 3D 打印设备, 以逐层打印的方式来制造物体的技术<sup>[5]</sup>。3D 打印技术在制造方面实现了新的突破, 使工厂无需车床、钻头、冲压机、制模机等传统工具, 直接从计算机图形数据中生成任何形状的零件和产品, 并通过 3D 打印机打印出来<sup>[6-7]</sup>; 因此它在军事领域也初露端倪, 美国的 3D 打印主要应用于军工领域。他们运用 3D 打

收稿日期: 2015-10-14; 修回日期: 2015-11-15

作者简介: 王 鑫(1992—), 男, 吉林人, 硕士, 从事系统规划与管理决策研究。

印技术制造具有复杂结构的武器装备或部件，并已  
将 3D 打印技术列入实战化部署<sup>[8]</sup>。近年来，我国  
也相继采用 3D 打印技术进行了某些装备部件的生  
产，并取得良好的效果，但还未广泛应用。

### 1.2 经典供应流程

以两级(即基层级和基地级)备件供应保障系统  
为例，其供应流程如图 1<sup>[9-10]</sup>所示。

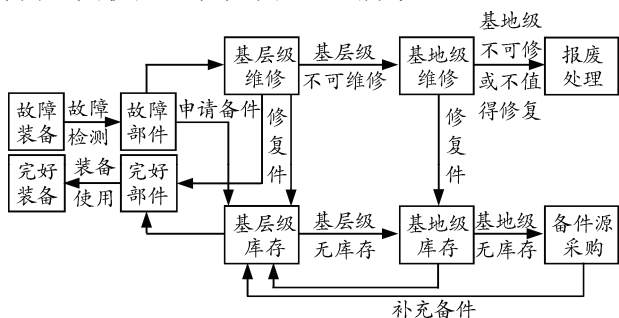


图 1 两级备件供应流程

### 1.3 引入 3D 打印技术后的备件供应流程

在基层级装备 3D 打印机，根据 3D 打印技术现  
有的技术特点，假设 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，对于  
除机械部件以外的其他部件还沿用基层级初始的修  
理方式；因此，只有机械故障部件的修理与生产方  
式也发生了相应变化，进而才导致了备件供应流  
程的变化。下面，笔者介绍引入 3D 打印技术后装  
备机械部件的备件供应流程。

当引入 3D 打印技术后，基层级和基地级就无  
需设立针对这些部件的修理部门，基地级也无需存  
有该类备件的库存，所有机械件的处理只需基层级  
和备件源即可。若某一部件发生故障，首先采用 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即可。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，实现应急保障。流程图如图 2。

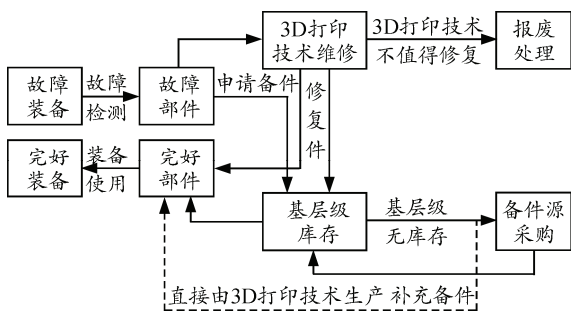


图 2 引入 3D 打印技术的两级备件供应流程

需要说明，3D 打印技术的引入是为了实现故障

装备的应急保障，它针对的是基层级本没有备件库  
存或故障件数量多于库存量时的供应保障。它的引  
入并不意味着基层级无需储存备件，不同类型的备  
件应有不同的考虑，备件供应工作需要库存、维修  
与 3D 打印技术的多重配合方能取得更好的效果。

## 2 备件供应保障可用度模型建立

### 2.1 符号说明

根据上面构建的两级备件供应流程，现建立备  
件保障模型，用下列符号表示模型中的变量和参数：  
 $i$  为第  $i$  类可更换单元， $i=1,2,\dots,n$ ； $X_i$  表示某一  
时刻对基层级备件的需求量，即发生故障的数量； $r_i$   
为基层级修理率或 3D 打印设备修复率； $r_{0,i}$  表示基  
地级的备件修理率； $s_i, s_{0,i}$  分别表示基层级和基地级  
的库存水平； $u$  为保障装备数量； $t_s$  表示平均提取  
备件时间，即从本级库存提取备件所需的平均时间；  
 $t_0$  表示平均基层级请领周转时间，即在基地级有库  
存的情况下，向基地级提出备件申请到基层级收到  
备件的平均时间； $t_b$  为基层级平均修复时间，即故  
障单元从装备卸下到完成修复的平均时间； $t_d$  为基  
地级平均修复时间，即故障单元从装备卸下到完成  
修复的平均时间； $t_c$  表示基地级平均购置时间，即  
从基地级向备件源发出购置申请到得到备件的平  
均时间； $t_e, t_f$  表示 3D 打印设备平均生产和修复  
时间。

### 2.2 模型的假设

模型假设装备只会有一个部件发生故障，且故  
障部件为同一种类型。即当某一段时间备件需求  
量为  $X_i$  时，表示该段时间内有  $X_i$  个故障装备， $X_i < u$ ，  
所有故障部件在规定时间内的一时刻同时到达；  
一旦有备件需求，即可立即判断所有需求备件的  
来源和故障部件的处理方式，需要提取两级库存、  
维修、报废以及备件购置数量等，并且两级维修工  
作、购置工作、提取库存工作是相互独立的，可以  
同时开展，互相不受影响。

### 2.3 可用度

笔者选取战备完好性来评价保障系统的性能。  
由于不同类型装备的任务需求、使用环境以及维  
修方式不同，用于衡量各装备战备完好性的参数  
也不尽相同，现阶段并没有统一的指标。比如，  
装甲装备通常以单车战斗准备时间来度量，舰船  
类装备以使用可用度来衡量，飞机通常以使用  
可用度、执行任务率以及出动架次率作为度量  
战备完好性的参数。下面具体介绍使用可用度  
的概念。

使用可用度指装备可使用时间与因备件缺乏导致无法正常使用的总时间(即平均停机时间)之和之比<sup>[11]</sup>。从飞机的角度看,它反映的是飞机的使用效能,可以具体表示为

$$A(t) = \frac{T_{MTBF}}{T_{MTBF} + T_{MTTR} + T_{MISR}} \quad (1)$$

式中:  $T_{MTBF}$  为平均故障间隔时间;  $T_{MTTR}$  为平均修复时间。二者都服从一定的规律,不同装备上的同一可更换单元具有相同的  $T_{MTBF}$  和  $T_{MTTR}$ ; 而  $T_{MISR}$  为平均供应延迟时间,它与备件库存量、备件需求量、可维修故障部件数和维修部门数等息息相关。文中定义的  $T_{MISR}$  包含两级修复以及 3D 打印设备修复时间; 因此分母无需再重复考虑  $T_{MTTR}$ , 式 (1) 可重新定义为

$$A(t) = \frac{T_{MTBF}}{T_{MTBF} + T_{MISR}} \quad (2)$$

**定义**  $T_{MISR}^{ij}$  为第  $i$  类可更换单元从第  $j$  件装备卸下到部件安装使装备恢复作战能力所经历的总时间。整个系统第  $i$  类可更换单元的使用可用度为

$$\bar{A}_i(t) = \frac{n \times T_{MTBF}}{n \times T_{MTBF} + \sum_{j=1}^n \bar{T}_{MISR}^{ij}} \quad (3)$$

同时,由于前面假设模型中只考虑一类可更换单元; 因此,整个系统的可用度也就可以归结为第  $i$  类可更换单元的使用可用度,即式 (3)。系统使用度的求解也就是  $\bar{T}_{MISR}^{ij}$  的求解。

其中  $T_{MISR}^{ij}$  可能涉及到的时间有备件提取时间  $t_s$ 、请领周转时间  $t_0$ 、备件购置时间  $t_c$ 、故障部件维修时间  $t_b$  和  $t_d$  以及 3D 打印技术生产时间  $t_e$  和修复时间  $t_f$  等。其中,  $t_s$ 、 $t_0$  是固定值,  $t_c$  根据不同类型单元而定,而维修时间和生产时间受修理部门数量和 3D 打印设备数量的影响,下面进行具体分析。

**定义**  $k$  为基层级具有的修理部门数(或配备的 3D 打印设备数量),并假设维修部门(打印设备)对同批的故障部件修理时间是相同的,可并行工作; 因此,数量为  $W_i$  的待修复或待生产部件在  $k$  个修理或生产时间为  $t_\omega$  的部门完成修复或生产的总时间为

$$t_\omega(W_i) \times (p+1)。$$

其中

$$p < \frac{W_i}{k} \leq p+1, \quad k=0,1,2,\dots, \omega \in \{b,d,e,f\}。 \quad (4)$$

计算出修复时间或生产时间之后,就可以根据上述模型计算不同情况下的  $T_{MISR}^{ij}$ 。

## 2.4 模型建立

### 1) 模型 1: 初始模型。

根据前面设定的参数和备件需求量的不同,建立具体流程图如图 3。原则为基层级有备件库存就从备件库存中提取,没有库存或库存提取完就使用修理部门维修后的完好部件。如若基层级的备件库和可维修部件仍然不能满足备件需求,就需要基地级的参与,原则同基层级; 如果基地级也不能满足备件需求,就需要向备件源采购,并将报废部件做报废处理。

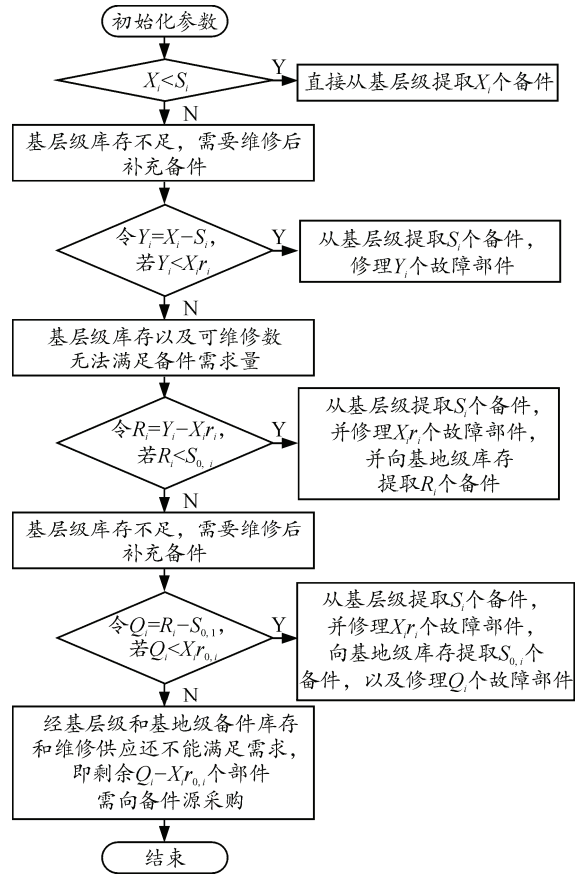


图 3 经典模型流程

### 2) 模型 2: 引入 3D 打印技术模型。

引入 3D 打印技术后的流程已在上面进行具体介绍,供应原则为基层级有备件库存就从备件库存中提取,没有库存或库存提取完就使用 3D 打印技术维修后的完好部件; 如果无法满足备件需求,就由 3D 打印技术对剩余缺乏部件进行生产,以补充备件需求,模型具体流程图如图 4。

## 3 模型求解及实例分析

### 3.1 参数设定

前面已经提到,对备件系统可用度的求解就是

对备件供应延迟时间的求解；因此下面就经典模型和引入 3D 打印技术之后的模型进行分析，并分别求出系统可用度的表达方式。

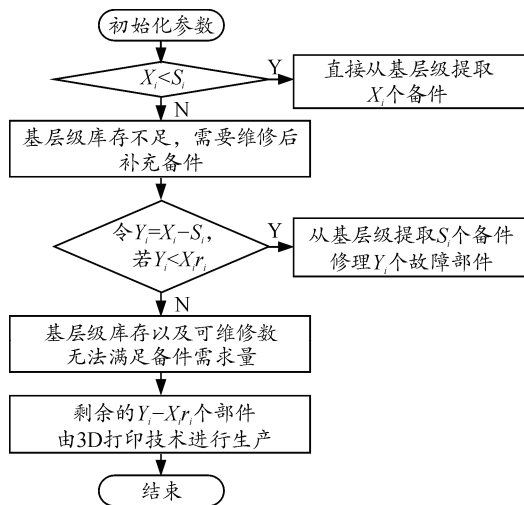


图 4 3D 打印模型流程

以某型飞机为例，假设基层级共保障该型飞机 30 架次，在某一时刻有 20 架飞机中第  $i$  类可更换

单元发生故障；同时  $s_i = s_{0,i} = 2$ ,  $r_i = r_{0,i} = 0.4$ ，基层级和基地级修理部门数分别为 2、4，引入 3D 技术模型的设备数量为 6。

### 3.2 经典模型

如图 1 所示，可以根据流程图中的判断框进而确定备件需求量  $X_i$  与各级库存量  $S_i$ ,  $S_{0,i}$  和各级维修率  $r_i$ ,  $r_{0,i}$  之间的关系，将其分为 5 种情况，并按照 A~E 排序。根据不同情况计算出供应时间如表 1 所示。表中：供应时间一列括号中的表达式为执行某项工作的部件数量。需要说明的是：提取、申请以及购置备件是可以批量进行的，不受维修部门的影响；因此  $t_s$ 、 $t_0$  以及  $t_c$  与括号中数量无关，只是为了更为清晰地看出该项工作执行部件的数量。而两级维修和 3D 打印设备的维修或生产工作却与维修部门和设备的数量有关。表中列出了备件处于不同需求下的所有装备得到备件的时间，“+”表示备件的不同来源，并不是时间的求和。另外， $Y_i$ ,  $Q_i$ ,  $R_i$ ,  $P_i$  的具体含义可以见图 1。

表 1 初始模型供应延迟时间

序号	备件需求	供应时间/h
A	$0 < X_i \leq S_i$	$t_s(X_i)$
B	$S_i < X_i \leq S_i / (1 - r_i)$	$t_s(S_i) + t_b(Y_i) \times (p + 1)$
C	$S_i / (1 - r_i) < X_i \leq (S_i + S_{0,i}) / (1 - r_i)$	$t_s(S_i) + t_b(X_i r_i) \times (p + 1) + t_0(R_i)$
D	$(S_i + S_{0,i}) / (1 - r_i) < X_i \leq (S_i + S_{0,i}) / (1 - r_i - r_{0,i})$	$t_s(S_i) + t_b(X_i r_i) \times (p + 1) + t_0(S_{0,i}) + t_d(Q_i) \times (p + 1)$
E	$X_i > (S_i + S_{0,i}) / (1 - r_i - r_{0,i})$	$t_s(S_i) + t_b(X_i r_i) \times (p + 1) + t_0(S_{0,i}) + t_d(X_i r_{0,i}) \times (p + 1) + (t_c + t_0)(P_i)$

由表 1 可以看出：A~E 这 5 种情况是呈递进的关系，随着备件需求量的不断增加，备件供应流程也变得更加复杂，需要的备件库存、维修部门、购置量也随之增加，整个流程所需的人力、物力、财力也会随之增长。下面，笔者对 E 进行具体分析，列出各备件的供应时间，即各装备得到备件并恢复使用的时间。

$$T_{MISR}^j = \begin{cases} t_s & j \in \{1, 2, \dots, S_i\} \\ (p+1)t_b & j \in \{S_i+1, S_i+2, \dots, S_i+X_i r_i\} \\ t_0 & j \in \{S_i+X_i r_i+1, \dots, S_i+X_i r_i+S_{0,i}\} \\ (p+1)t_d & j \in \{S_i+X_i r_i+S_{0,i}+1, \dots, S_i+X_i r_i+S_{0,i}+X_i r_{0,i}\} \\ t_c+t_0 & j \in \{S_i+X_i r_i+S_{0,i}+X_i r_{0,i}+1, \dots, X_i\} \end{cases} .$$

其中  $p$  与维修部件和修理部门数量有关，见式 (4)，下面对系统可用度进行求解。根据参数设定，基层级、基地级各有库存 2 个，分别可维修 6 个故障部件，报废 4 个故障部件；因此，基地级需要向备件源采购 4 个备件，将每个装备得到备件的时间列于表 2。

表 2 初始系统各备件供应时间 h

序号	时间	序号	时间
1	$t_s$	11	$t_d$
2	$t_s$	12	$t_d$
3	$t_b$	13	$t_d$
4	$t_b$	14	$t_d$
5	$2t_b$	15	$2t_d$
6	$2t_b$	16	$2t_d$
7	$3t_b$	17	$t_c+t_0$
8	$3t_b$	18	$t_c+t_0$
9	$t_0$	19	$t_c+t_0$
10	$t_0$	20	$t_c+t_0$

因此，求得系统可用度为

$$\bar{A}_i(t) = \frac{30 \times T_{MTBF}}{30 \times T_{MTBF} + 2t_s + 12t_b + 6t_0 + 8t_d + 4t_c} .$$

### 3.3 引入 3D 打印技术模型

引入 3D 打印技术后，相应的供应流程有所简化，共分为 3 种情况。与初始模型类似，将计算结果列入表 3，并求出不同备件需求下的供应时间。

表 3 3D 打印模型供应延迟时间 h

序号	备件需求	供应时间
A	$0 < X_i \leq S_i$	$t_s(X_i)$
B	$S_i < X_i \leq S_i / (1 - r_i)$	$t_s(S_i) + t_r(X_i - S_i) \times (p + 1)$
C	$S_i / (1 - r_i) < X_i$	$t_s(S_i) + t_r(X_i r_i) \times (p + 1) + t_c(R_i)$

$$T_{MTR}^j = \begin{cases} t_s & j = 1, 2, \dots, S_i \\ (p+1)t_f & j = S_i + 1, S_i + 2, \dots, S_i + X_i r_i \\ (p+1)t_e & j = S_i + X_i r_i + 1, \dots, X_i \end{cases}$$

此时，基层级有 2 个库存，3D 打印设备可维修 6 个故障部件，剩余 12 个备件需要 3D 打印设备进行生产。表 4 列出 3D 打印模型下的各装备得到备件的时间。

表 4 3D 打印系统各备件供应时间 h

序号	时间	序号	时间
1	$t_s$	11	$t_e$
2	$t_s$	12	$t_e$
3	$T_f$	13	$t_e$
4	$t_f$	14	$t_e$
5	$t_f$	15	$2t_e$
6	$2t_f$	16	$2t_e$
7	$2t_f$	17	$2t_e$
8	$2t_f$	18	$2t_e$
9	$t_e$	19	$2t_e$
10	$t_e$	20	$2t_e$

同样，求解系统可用度为

$$\bar{A}_i(t) = \frac{30 \times T_{MTBF}}{30 \times T_{MTBF} + 2t_s + 9t_f + 18t_e}$$

因此，在计算出  $\bar{T}_{MTR}^j$  的前提下，若已知该类可更换单元的  $T_{MTBF}$ ，即可求解出 2 个系统的可用度，进而区分出优劣，以验证 3D 打印技术引入的有效性。虽未赋予实际数值，但可明显发现，引入 3D 打印技术的模型供应时间少于经典模型，即可用度较高。此外，模型中为区分两级库存以及维修的工作任务，假设所有装备在同一时刻需要备件，与实际略有不符，需要在以后的研究中改进。

#### 4 3D 打印技术应用的局限性

虽然 3D 打印技术在制造业领域有其独特的优势，但是 3D 打印技术也并非无所不能，其自身的技术特点也导致了它很多的局限性，它还面临着很多的瓶颈和挑战。下面结合 3D 打印技术在备件供应保障方面的应用，从以下几个方面进行具体分析。

1) 打印材料的挑战。现阶段，材料对 3D 打印设备的从属依赖关系较高，不同类型的设备能够应用的材料有限。与此同时，成型材料多为化学聚合物，选择的局限性也较大，成型品的物理特性也不够好；因此，成型备件所需的材料还有待研发。

2) 打印产品的精度、速度有待提高。目前产品的精度还难以满足需要，选择的材料以及层与层之间的连接技术还需加强，某些对部件强度要求较高的部件还不适合由 3D 打印技术进行生产；打印产品的效率也并不适于大规模生产，它不可能替代传统的备件供应方式，它的优势在于实现应急保障。

3) 打印成本较高。现有的 3D 打印设备造价比较昂贵，难以大众化地广泛应用。虽说供应保障过程中更注重的是保障效率；但是费用也应作为衡量保障效能的因素，因此 3D 打印设备的引用对保障效能的综合影响还需进一步研究。

#### 5 结论

笔者针对现有备件供应保障的不足，将具有生产功能的 3D 打印技术引入到备件供应流程中来。考虑到随着备件需求量的不断增加，所需供应流程和供应方式也随之变得复杂化，建立基于可用度的保障系统模型，并针对不同备件需求量下的备件保障系统，计算出初始模型和引入 3D 打印技术模型的各备件供应延迟时间，进而求得两系统的使用可用度。在各时间参数已知的前提下，即可计算并比较 2 个保障系统的可用度。该模型可为后续的供应提供一种新的思路和方法，具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献：

- [1] 孟祥辉, 徐宗昌, 程连民. 基于系统动力学的备件供应保障过程分析与建模[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 2-5.
- [2] 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(2): 433-440.
- [3] 刘喜春, 王磊, 许永平, 等. 战时可修复备件供应保障优化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2595-2598.
- [4] Liu L M, Liu X M, Yao D D. Analysis and optimization of a multistage inventory queue system[J]. Management Science, 2004, 50(3): 365-380.
- [5] 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: 1-4.
- [6] 王运贇, 王宣. 三维打印技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013: 18-23.
- [7] Williams C B, Rosen D W. Manufacturing metallic parts with designed mesostructure via three-dimensional printing of metal oxide power[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007: 15-20.
- [8] 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.
- [9] 郑东良. 航空维修管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 138-142.
- [10] 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.
- [11] 任敏, 陈全庆, 沈霞, 等. 备件供应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 74-75.