



航空装备预防性维修费用的系统动力学分析*

System Dynamics Analysis on Preventive Maintenance Cost of Aviation Equipment

邵光兴¹ 邱嘉臣² 李振³ 刘锦^{4/1} 中国商飞上海飞机设计研究院

2 广东省机场管理集团公司 3 中交第三航务勘察设计研究院 4 中国航空工业经济技术研究院

摘 要: 分析了维修保障费用产生的因果关系; 建立存量、流量、辅助变量、常量之间的关联方程, 确定初始值; 分析模型的计算结果, 通过调整模型的参数来观察模型结果的变化以确定最优策略。着重分析了飞机的零部件故障率、预防性维修的频率等对寿命周期内装备的维修保障费用的影响, 结果表明本仿真方法具有一定的实用性。

关键词: 航空装备; 预防性维修; 维修费用; 系统动力学; 仿真

Keywords: aeronautical equipment; prevention maintenance; maintenance cost; system dynamics; simulation

0 引言

新时期航空装备的研制费和维修费非常昂贵, 美军1年的装备维修费用高达200多亿美元。自20世纪80年代以来, 美军航空装备维修费接近其研制费和采购费之和, 其装备维修费约占国防费用的14.2%^[1], 因此研究维修保障费用发生和发展变化的规律、降低和控制维修保障费用的有效途径, 是控制寿命周期费用的重要手段。

本研究是以降低费用为目标, 以航空装备预防性维修过程为主要研究对象, 应用系统动力学原理分析航空装备维修费用产生的动力学特性, 建立起描述装备维修保障过程的通用模型, 并运用计算机进行仿真分析。为装备维修保障费用的预测、分析和控制提供有效手段。

1 预防性维修及费用影响因素

1.1 飞机的预防性维修

预防性维修是为预防产品故障或故障造成的严重后果, 使其保持在规

定状态所进行的全部活动。这些活动可包括: 擦拭、润滑、调整、检查、定期拆修和定期更换等。这些活动的目的是发现并消除潜在的故障。因此从费用角度考虑, 预防性维修活动的增加必将带来预防性维修费用的增加, 而同时也会使修复性维修的费用降低, 相应的对备件存储费用及维修人员培训费用也有一定的影响。

预防性维修通常分为定期维修、视情维修、预先维修、故障检查等4种形式。

1) 定时维修。装备使用到预先规定的间隔期, 按事先安排的内容进行的维修。间隔期可以按累计工作时间、里程或其他寿命单位来确定。这种装备的故障与使用时间有明确的关系, 大部分项目能工作到预期的时间以保证定期维修的有效性。

2) 视情维修。视情维修又称预测性维修, 是对产品进行定期或连续的监测, 发现其有功能故障征兆时进行

有针对性的维修。视情维修适用于耗损故障初期有明显劣化征候的装备, 并需有适当的检测手段和标准。

3) 预先维修。预先维修是针对故障根源采取的维修措施, 包括对故障根源的监测和排除。故障根源或诱因是指机件所处的外部环境、介质以及其他产品(如液压油、润滑油等)的物理、化学性质劣化, 产生渗漏、温度变化、气蚀等各种“稳定性”问题。

4) 故障检查。检查产品是否能工作的活动称为故障检查或功能检查。故障检查是针对那些后果不明显的故障, 所以它适用于平时不使用的装备或产品的隐蔽功能故障。

1.2 费用影响因素

因为各类预防性维修活动会消耗相应的资源, 各类预防性维修活动之间可能有较大差别。因此, 要做到对预防性维修费用的精确估算, 首先需要了解具体型号的预防性维修保障活动, 这些信息在装备的维修方案中都能找到。当对新研装备应用系统动力学方法进行寿命周期维修保障费用评

* 基金项目: 航空基金(2011ZG28001)资助项目。

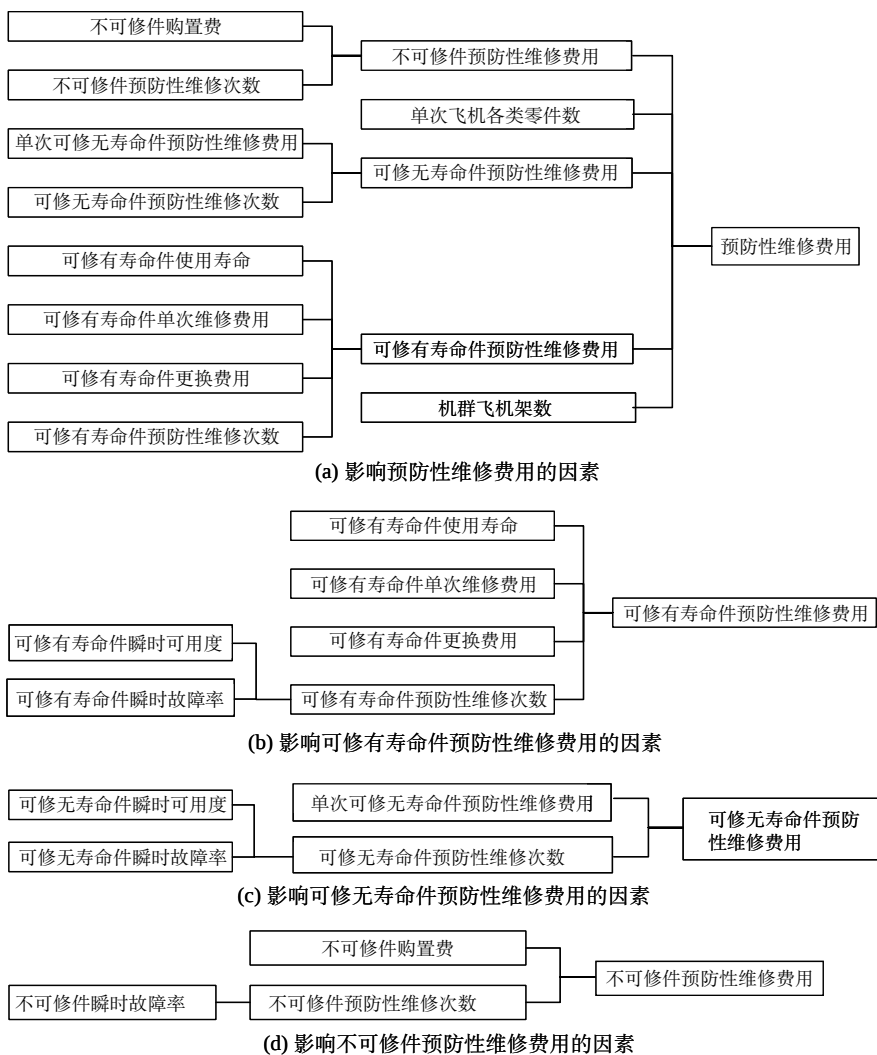


图1 预防性维修费用影响因素

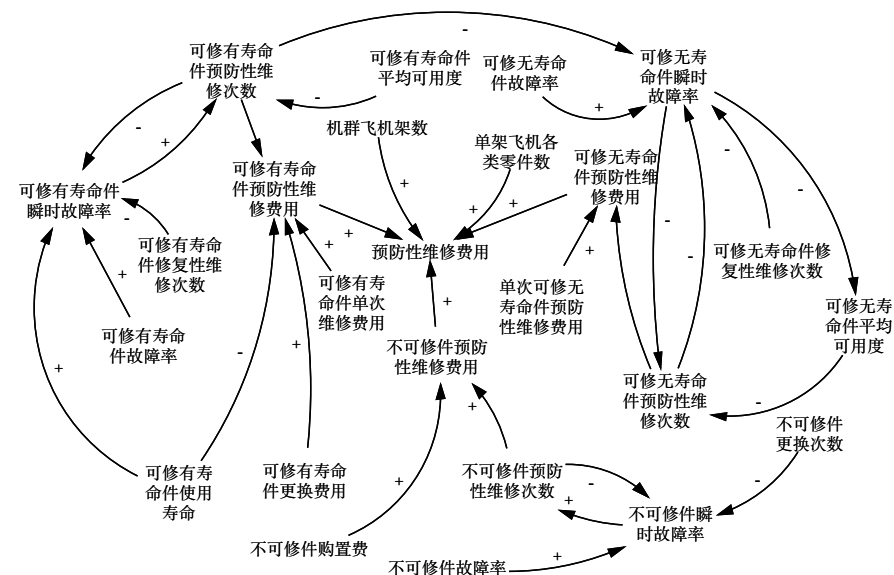


图2 预防性维修费用产生的因果关系图

估时，可参考类似装备的维修保障活动进行建模。

飞机本身的组成非常复杂，有数万个零组件。不可能对所有的组成、所有的活动都进行仿真，事实上系统动力学方法也不建议对系统所有的细节进行建模。建模者可通过与专家、维修保障工人、维修活动记录人员、财务人员等进行交流，确定几类主要的形式，只对这几类进行建模，其他产生费用的维修活动可以简化或者折算到其中，仅当有必要细分时才考虑更进一步的仿真。

图1表明了飞机预防性维修活动因果关系分析的过程。该图将飞机的部件分成不可修件、可修有寿命件、可修无寿命件等三类。三类部件都采用定时维修。定时维修的时间间隔 T 并非固定的。在装备投入使用的前期（不考虑早期故障阶段），各个部件的故障率都相对较低，飞机老化程度较轻，因此定时维修的时间间隔就长。当装备投入使用时间较长之后，飞机老化较严重，会导致飞机的故障频发，因此其预防性维修间隔期将减小。

根据图1可列出预防性维修费用由三部分组成：不可修件预防性维修费用、可修无寿命件预防性维修费用、可修有寿命件预防性维修费用。对于机群来说还需考虑机群的飞机架数。

2 预防性维修费用的因果关系分析

因果关系分析对建立准确、合理的系统动力学模型至关重要。因果回路图（CLD）是表示系统反馈结构的重要工具^[4]。

一张因果回路图包含多个变量，变量之间由标出因果关系的箭头所连接。在因果回路图中也会标出重要的

反馈回路。图1中列出的预防性维修费用影响因素的因果关系回路如图2所示。

3 预防性维修费用产生过程的存量流量分析

在社会、经济和生态系统中,存量和流量是两种最基本的变量。存量是积累,表明系统的状态并为决策和行动提供信息基础。流量则反映了存量的时间变化,流入和流出之间的差异随着时间累积而产生存量。

由于所研究的装备维修保障系统非常复杂,影响维修保障费用的因素有多种多样。因此,若要在一个图中就将维修保障系统费用产生过程的存量流量图表述清楚不是一件容易的事情,而本文采用的流率基本人树建模法能够较好地解决该问题^[5-7]。

预防性维修的因果关系图中存在着七个存量和七个流量。常量有机群飞机架数、单次可修有寿命件预防性维修费用等,另外还有多个辅助变量及其相关的函数关系表达式,具体如表1所示。

4 案例研究

本案例是以飞机作为典型装备、对其寿命周期维修保障费用进行系统动力学分析。关于该飞机的所有数据均为假设,但这个系统内的各类数据之间的关联关系是可信的。

事实上,对于一个机群来说,影响其维修保障费用的因素多种多样。因此建立一个庞大、复杂的系统动力学仿真模型需要有着丰富的经验,同时还需要对装备的维修保障过程及其费用非常熟悉,才能建立一个真正具有价值的模型。因本课题的时间、经费有限,本文仅作了相关的基础性研

表1 预防性维修费用产生过程中的存量、流量、关联方程

存量	可修有寿命件预防性维修次数、可修有寿命件预防性维修费用、可修无寿命件预防性维修次数、可修无寿命件预防性维修费用、不可修件预防性维修次数、不可修件预防性维修费用、预防性维修费用
流量	可修有寿命件预防性维修次数变化量、可修有寿命件预防性维修费用变化量、可修无寿命件预防性维修次数变化量、可修无寿命件预防性维修费用变化量、不可修件预防性维修次数变化量、不可修件预防性维修费用变化量、预防性维修费用变化量
辅助变量	可修有寿命件瞬时使用度、可修有寿命件瞬时故障率、可修有寿命件故障率、可修无寿命件瞬时可用度、可修无寿命件瞬时故障率、可修无寿命件故障率、不可修件故障率、不可修件瞬时故障率
常量	机群飞机架数、平均修复时间MTTR、可修有寿命件使用寿命、单次可修有寿命件预防性维修费用、可修有寿命件备件更换费用、单架飞机可修有寿命件个数、单次可修无寿命件预防性维修费用、不可修件可靠性临界值
水平变量 关联方程(L)	(1) 可修有寿命件预防性维修次数=INTEG(可修有寿命件预防性维修次数变化量) (2) 可修有寿命件预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量) (3) 可修无寿命件预防性维修次数=INTEG(可修有寿命件预防性维修次数变化量) (4) 可修无寿命件预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量) (5) 不可修件预防性维修次数=INTEG(不可修件预防性维修次数变化量) (6) 不可修件预防性维修费用=INTEG(不可修件预防性维修费用变化量) (7) 预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量+可修有寿命件预防性维修费用变化量+不可修件预防性维修费用变化量)
速率变量 关联方程(R)	(1) 可修有寿命件预防性维修次数变化量= f (可修有寿命件瞬时可用度,可修有寿命件瞬时故障率) (2) 可修有寿命件预防性维修费用变化量= f (可修有寿命件预防性维修次数变化量,可修有寿命件备件更换费用,单次可修有寿命件预防性维修费用,可修有寿命件使用寿命,单架飞机可修有寿命件个数,机群飞机架数) (3) 可修无寿命件预防性维修次数变化量= f (可修无寿命件瞬时可用度,可修无寿命件瞬时故障率) (4) 可修无寿命件预防性维修费用变化量= f (可修无寿命件预防性维修次数变化量,单次可修无寿命件预防性维修费用,单架飞机可修无寿命件个数,机群飞机架数) (5) 不可修件预防性维修次数变化量= f (不可修件可靠性临界值,不可修件可靠性) (6) 不可修件预防性维修费用变化量= f (不可修件预防性维修次数变化量,不可修件购置费,机群飞机架数,单架飞机不可修件个数) (7) 预防性维修费用变化量= f (可修有寿命件预防性维修费用变化量,可修无寿命件预防性维修费用变化量,不可修件预防性维修次数变化量)
辅助变量 关联方程(A)	(1) 可修有寿命件瞬时可用度= f (平均修复时间MTTR,可修有寿命件瞬时故障率) (2) 可修有寿命件瞬时故障率= f (可修有寿命件预防性维修次数,可修有寿命件修复性维修次数,可修有寿命件使用寿命,可修有寿命件故障率,Time) (3) 可修无寿命件瞬时可用度= f (平均修复时间MTTR,可修无寿命件瞬时故障率) (4) 可修无寿命件瞬时故障率= f (可修无寿命件预防性维修次数,可修无寿命件修复性维修次数,可修有寿命件故障率,Time) (5) 不可修件可靠性= f (不可修件瞬时故障率,Time) (6) 不可修件瞬时故障率= f (不可修件故障率,不可修件更换次数,不可修件预防性维修次数,Time)

究,提出一个解决该类问题的可行方法,所以采用假设的案例。

4.1 案例假设

所作的基本假设如下所示:

1) 本模型中发生的所有费用均认为是现值,没有考虑通货膨胀因素。

2) 机群有24架飞机,每架飞机服役期均为20年,每架飞机平均年飞行300小时。

3) 该机群的维修保障费用由预防性维修费用、修复性维修费用、备件存储管理费用和维修人员培训保障费



用组成。

4) 预防性维修仅考虑定时维修且时间间隔随着飞机的老化会作一定的调整;修复性维修仅包括零部件的修理和更换;备件存储管理费用仅受备件数量影响,即每个备件的存储费用是定值;每年的人员培训费用投入是固定的。

5) 假定每架飞机有10万个零件,并且仅有三类零件:可修有寿命件、可修无寿命件、不可修件。其中可修有寿命件60000个,可修无寿命件20000个,不可修件20000个。

6) 所有零件的失效率都一样。

7) 可修有寿命件、可修无寿命件、不可修件等三类的单次维修费用都是固定值,检测、维修的工具/设施费也为定值。

8) 飞机故障件现场维修率为固定值。

9) 当某个部件故障后,采用修复或更换的措施后可靠性提高,视为元部件的可靠性提高,即某个部件被更换后仍视为原部件的延续,只是其瞬时故障率降低了。

其他还有一些细节性的假设,在存量流量关联方程中直接体现,不再一一阐述。

4.2 预防性维修费用子系统流量存量关联方程

预防性维修包括定时维修、视情维修、预先维修、故障检查等,是一项非常复杂的工作。本模型在预防性维修部分仅以定时维修为例,讨论预防性维修的建模问题。

进行预防性维修及保障费用的估算,首先需要确定装备的预防性维修时间间隔。本文采用甘茂治^[8]等提出的定时维修时间间隔 T 的确定方法:

表 2 预防性维修费用产生过程的关联方程

水平变量 关联方程(L)	(1) 可修有寿命件预防性维修次数=INTEG(可修有寿命件预防性维修次数变化量) (2) 可修有寿命件预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量) (3) 可修无寿命件预防性维修次数=INTEG(可修有寿命件预防性维修次数变化量) (4) 可修无寿命件预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量) (5) 不可修件预防性维修次数=INTEG(不可修件预防性维修次数变化量) (6) 不可修件预防性维修费用=INTEG(不可修件预防性维修费用变化量) (7) 预防性维修费用=INTEG(可修有寿命件预防性维修费用变化量+可修有寿命件预防性维修费用变化量+不可修件预防性维修费用变化量)
速率变量 关联方程(R)	(1) 可修有寿命件预防性维修次数变化量=可修有寿命件瞬时故障率/2/(1-可修有寿命件瞬时可用度) (2) 可修有寿命件预防性维修费用变化量=单架飞机可修有寿命件个数×单次可修有寿命件预防性维修费用×可修有寿命件预防性维修次数变化量×机群飞机架数×可修有寿命备件更换费用/可修有寿命件使用寿命 (3) 可修无寿命件预防性维修次数变化量=可修无寿命件瞬时故障率/2/(1-可修无寿命件瞬时可用度) (4) 可修无寿命件预防性维修费用变化量=单架飞机可修无寿命件个数×单次可修无寿命件预防性维修费用×可修无寿命件预防性维修次数变化量×机群飞机架数 (5) 不可修件预防性维修次数变化量= f (不可修件可靠性临界值,不可修件可靠性) (6) 不可修件预防性维修费用变化量=不可修件购置费×不可修件预防性维修次数变化量×单架飞机不可修件个数×机群飞机架数 (7) 预防性维修费用变化量=可修有寿命件预防性维修费用变化量+可修无寿命件预防性维修费用变化量+不可修件预防性维修次数变化量
辅助变量 关联方程(A)	(1) 可修有寿命件瞬时可用度=1/可修有寿命件瞬时故障率/(平均修复时间MTTR+1/可修有寿命件瞬时故障率) (2) 可修有寿命件瞬时故障率=可修有寿命件故障率×(1+1/可修有寿命件使用寿命)×(1-可修有寿命件修复性维修次数/单架飞机可修有寿命件个数)×(1+可修有寿命件预防性维修次数/单架飞机可修有寿命件个数) (3) 可修无寿命件瞬时可用度= 1/可修无寿命件瞬时故障率/(1/可修无寿命件瞬时故障率+平均修复时间MTTR) (4) 不可修件可靠性= $\text{EXP}(-\text{不可修件瞬时故障率} \times \text{Time})$ (5) 不可修件瞬时故障率=不可修件故障率×(1-不可修件更换次数/单架飞机不可修件个数)×(1-不可修件预防性维修次数/单架飞机不可修件个数) (6) 可修无寿命件瞬时故障率=可修无寿命件故障率×(1-可修有寿命件修复性维修次数/单架飞机可修无寿命件个数)×(1+可修无寿命件预防性维修次数/单架飞机可修无寿命件个数)
常量 关联方程(C)	(1) 单次可修无寿命件预防性维修费用=900 (2) 单次可修有寿命件预防性维修费用=900 (3) 可修有寿命件使用寿命=6 (4) 不可修件使用寿命=2 (5) 不可修件可靠性临界值=0.9
初始值 关联方程(N)	(1) 可修有寿命件预防性维修次数=0 (2) 可修有寿命件预防性维修费用=0 (3) 可修无寿命件预防性维修次数=0 (4) 可修无寿命件预防性维修费用=0 (5) 不可修件预防性维修次数=0 (6) 不可修件预防性维修费用=0 (7) 预防性维修费用=0

$$\bar{A} = \frac{1}{\lambda T} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (1)$$

其中, $\bar{A}$ 为平均可用度; λ 为故障率。

在工程计算中,时间间隔 T 并不容易表示,因此对公式(1)中的 $e^{-\lambda T}$ 进

行泰勒分解,如下所示:

$$e^{-\lambda T} = 1 + \frac{-\lambda T}{1!} + \frac{(-\lambda T)^2}{2!} + \frac{(-\lambda T)^3}{3!} + \dots + \frac{(-\lambda T)^n}{n!} + \dots \quad (2)$$

通常飞机的组成部件的故障率 λ 都

极低,甚至达到 10^{-9} 数量级,而高的也不过 10^{-5} 数量级。因此当对于 λ^3 已经足够小了(时间间隔 T 通常不会很大),所以对 $e^{-\lambda T}$ 的泰勒分解式只取其前3项,在工程应用中已经能够达到足够的精度了:

$$\bar{A} \approx \frac{1}{\lambda T} \left[1 - \left(1 + \frac{-\lambda T}{1!} + \frac{(-\lambda T)^2}{2!} \right) \right] \quad (3)$$

$$T \approx \frac{2(1-\bar{A})}{\lambda} \quad (4)$$

其他各类变量的关联方程及其初始值、常量值等均在表2中列出。

4.3 仿真结果分析

以故障率对维修保障费用的影响、预防性维修频率对维修保障费用的影响为例,介绍本研究的仿真结果。

1) 故障率对维修保障费用的影响

故障率是指产品工作到某时刻尚未发生故障,在该时刻后单位时间内发生故障的概率。这是影响装备使用的关键因素之一,也是影响装备维修保障费用的关键因素之一。换句话说,之所以对装备进行维修(包括预防性维修和修复性维修)就是因为装备会发生故障。本节将会在飞机原有假定的故障率的基础上分别下调33.3%、66.7%和90%,以观察当故障

率降低时对飞机的寿命周期维修保障总费用及预防性、修复性维修费用的影响,如图3、图4所示。

当飞机的各零部件的故障率降低时,其维修保障费用在中后期(图中的10年之后)相对于较高的故障率时的装备维修保障费用明显较低,且增长缓慢。因此应尽量降低飞机的各组成零部件的故障率,提高其可靠性,以此来获得较低的飞机寿命周期维修保障费用。当然,降低飞机零部件的故障率必将提高飞机的设计和制造成本,这需要在飞机设计阶段所权衡的。本文只是研究飞机的维修保障费用部分,因此通过系统动力学模型得到的结论是尽量降低故障率、提高可靠性,以获取较低的维修保障费用。

2) 预防性维修率对维修保障费用的影响

本文通过提高预防性维修频率来观察其对飞机寿命周期中维修保障费用的影响。维修的频率分别提高10%、20%、35%、50%、100%,如图5和图6所示。由于本模型的预防性维修的频率是根据飞机的当前使用可用度和故障率来确定的,因此是一个较优的值。当预防性维修的频率提高

10%时,其每年的维修保障费用会有小幅的降低,而当预防性维修的频率提高20%及以上时,费用反而上升,尤其当维修频率提高一倍时,总的维修保障费用将会明显上升。因此飞机的预防性维修的频率并非越高越好,而是根据飞机的自身状态和作战任务要求确定一个较合理的值。

5 结论

本文通过基于假设数据的案例,着重分析了典型装备(飞机)的零部件故障率、预防性维修的频率,认为装备零部件的故障率及装备的预防性维修频率对其维修保障费用的影响较大,通过降低装备零部件的故障率、确定合理的预防性维修频率能够有效地降低装备寿命周期费用。

由于时间较短,本课题在对装备维修保障构成与要素分析及应用系统动力学方法建模上仍有一些不足。首先是本文中建立的系统动力学模型针对的是一个简化的维修保障系统,现实中诸多复杂、数量庞大的因素都被忽略掉,而正是这些被忽略的因素很可能会影响装备寿命周期内维修保障费用的关键因素,这样所建立的模

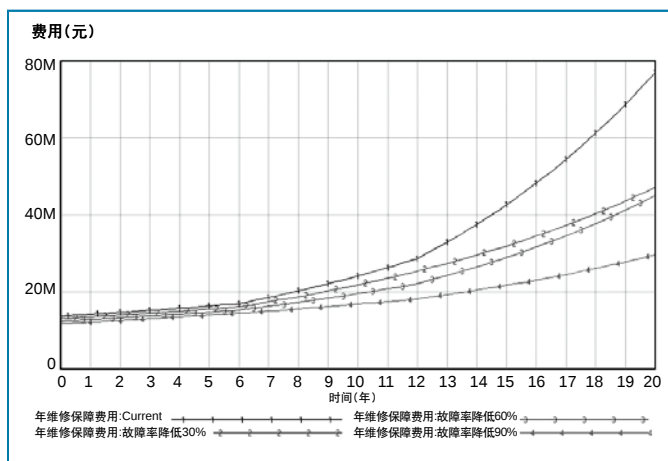


图3 故障率降低对飞机年维修保障费用的影响

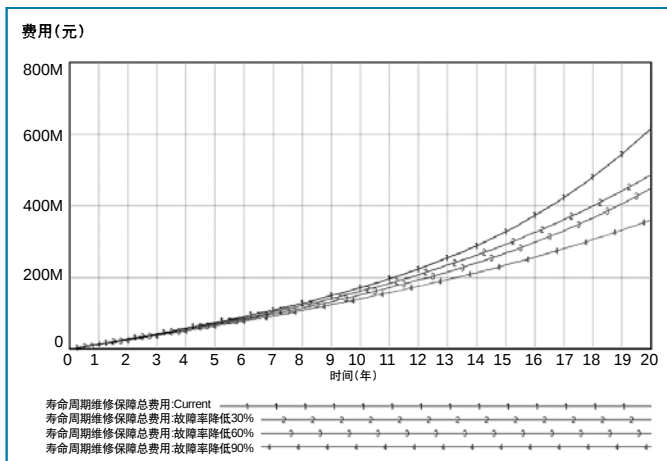


图4 故障率降低对飞机寿命周期总费用的影响

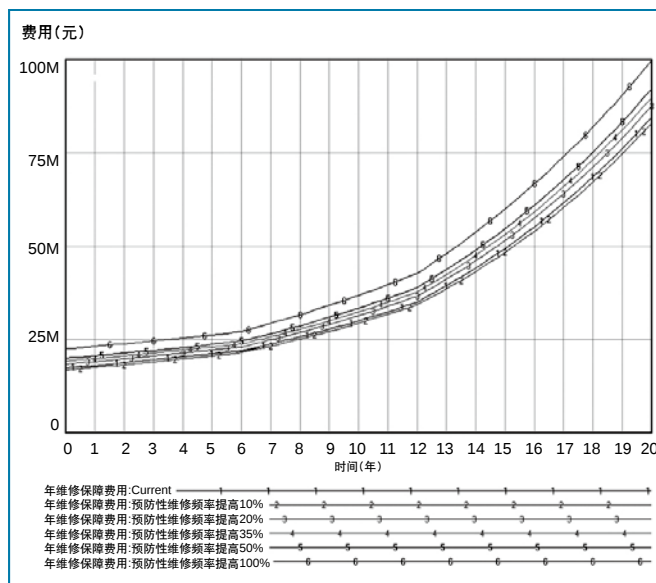


图5 预防性维修频率的变化对各项维修保障年费用的影响

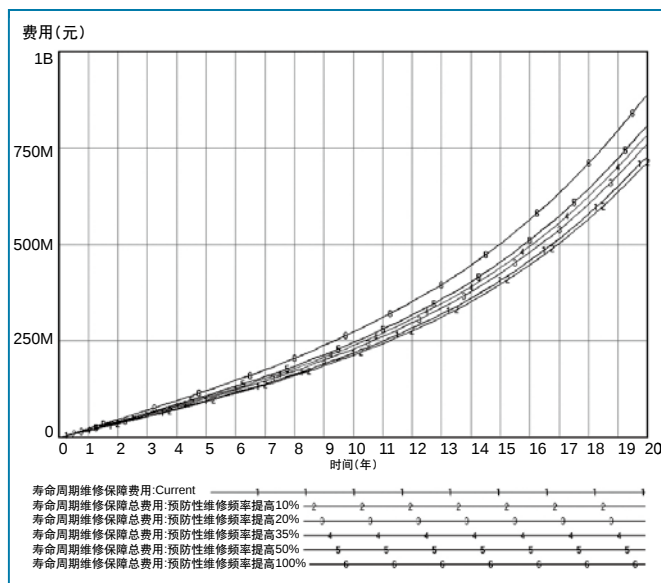


图6 预防性维修频率的变化对各项维修保障总费用的影响

型就没有参考的意义了。当然,本课题是基础性理论研究,提供的是分析该类问题的思路和方法,这也是本课题的意义所在。其次,本文所建立的模型是基于假设的数据,而对于系统动力学方法来说,初始值及相关变量的变化规律可能导致系统在仿真期间发生剧烈的变化,也即准确的初始值及相关变量的已知变化规律是非常重要的。最后需要说明的是本模型的研究对象是装备的维修保障系统,而维修保障系统又是装备全寿命周期(装备的研制与生产、使用与保障、退役处理)范围内的一个子系统,对本子系统的最优策略的决策在全系统中可能并非最优,例如,本模型认为飞机的零部件故障率越低其维修保障费用越小,所以应尽量降低其故障率,但却相应增加了飞机前期的研制与生产成本。因此利用系统动力学方法解决问题时一定要认清所要解决问题的边界。

综上所述,虽然具有部分局限性,但本文提供了一套应用系统动力

学方法解决影响因素复杂、持续时间长的装备维修保障系统费用估算的有效方法,对拓展装备寿命周期费用的评估手段提供了有益的帮助,值得进一步探讨。

AST

参考文献

- [1] 李郑琦, 陈跃良. 飞机视情维修策略及其模型研究[J]. 航空科学技术, 2011(3): 28-30.
- [2] Zhang Wenjin, Kang Rui, Guo Linhan, et al. Study on military equipment support modeling and simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2): 142-146.
- [3] Purvis C D. Estimating C-17 operating and support costs: development of a system dynamics model [R]. Air Force Institute of Technology, 2001.
- [4] Macia N F, Thaler G J. 动态系统建模与控制[M]. 李乃文, 孙江宏, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 贾仁安, 伍福明, 徐南孙. SD流

率基本入树建模法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(6):90-95.

[6] 贾仁安, 胡玲, 丁荣华, 等. 系统动力学简化流率基本入树模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(10):137-144.

[7] 胡玲, 贾仁安. 强简化流率基本入树模型及枝向量矩阵反馈环分析法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(11): 83-88.

作者简介

邵光兴, 中国商飞上海飞机设计研究院总会计师, 研究员, 从事民用飞机经济性管理与分析研究。

邱嘉臣, 广东省机场管理集团公司总会计师。

李振, 中交第三航务勘察有限公司总会计师。

刘锦, 中国航空工业经济技术研究院财务管理部部长、副研究员、博士, 从事航空武器装备、民用飞机经济可承受性分析与评价研究。