

中國民航大學

碩士學位論文



基于可靠性分析的航材采购模型研究

研究生姓名： 李崇明

导师姓名： 余芬 教授

2016 年 5 月 4

分类号： V267 密 级： 公开

UDC： 629.7 学 号： 1301041

中国民航大学

硕 士 学 位 论 文

基于可靠性分析的航材采购模型研究

研究生姓名： 李崇明

导师姓名： 余芬 教授

申请学位类别： 工学硕士

学科专业名称： 航空宇航科学与技术

所在院系： 航空工程学院

论文答辩日期： 2016 年 5 月 4 日

2016 年 5 月 4 日

Research for the Model of Aircraft Spare Parts Procurement Based on Reliability Analysis

A Dissertation Submitted to
Civil Aviation University of China
For the Academic Degree of Master of Science

BY
Li Chong-ming

Supervised by
Prof. Yu Fen

College of Aeronautical Engineering
Civil Aviation University of China

May 2016

中国民航大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国民航大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：李崇明 日期：2016年5月4日

中国民航大学学位论文使用授权声明

中国民航大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权中国民航大学研究生部办理。

研究生签名：李崇明 导师签名： 日期：2016年5月4日

摘要

飞机是个庞大而又复杂的系统，为了保障飞机安全、可靠和准点运行，航空公司需要投入大量的人力物力对飞机进行维修和维护。而航材作为飞机维修的重要生产资料，是保障航空器飞行安全的重要物质基础。能否及时有效的为飞机维修提供备件是航材采购的重要目的。但是因为历史原因，我国的航材管理处资金占有率较高、周转速度较慢、飞机停场时间（AOG）订货较多和人员计划较复杂的处境。所以能否对航材进行科学有效的管理对航空公司运营来说是至关重要。

本文从不同角度研究了航材的分类和航材库存指标的选取。并分析了传统的库存管理方法和存储策略及其对航材采购的影响。通过可靠性分析，建立了时寿件和可修件的采购模型。首先，以航材保障率为评价指标和约束条件，对时寿件备件数量和采购时间进行建模和求解；其次，通过分析可修件的维修过程及状态，建立了在完全维修条件下周转件的最优采购数量及最佳采购时间模型，并通过计算机进行仿真模拟；最后，通过运用准更新过程来近似描述修理件的不完全维修过程。以维修经济性为目标函数构建函数，并求得其最优更换次数，进而最终求得该部件在使用过程中的最优采购数量及最佳采购时间。本文为航空公司的航材库存管理的研究提供一定的理论基础和应用价值。

关键词：航材采购；可靠性分析；时寿件；可修件；航材保障率

Abstract

Aircraft is a large and complex system, in order to guarantee the safety of flight operations, reliable and punctual operation. The airline requires a lot of manpower and resources to carry out repair and maintenance of the aircraft. The important means of production of aircraft spare parts when aircraft need to be maintain, is an important material for protection the safety of aircraft. It is an important issue to purchase the aviation material which provide the spare parts for the aircraft maintenance timely and effective. However, for historical reasons, China's management of aircraft spare part is often at a higher share capital, turnover is slow, time aircraft on the ground (AOG) orders too more and large plans to the situation. The management of aircraft spare parts which need scientific and effective is critical to airlines.

This article introduced the classification of spare parts and the selected aviation material inventory from the different perspective, it also introduced the traditional inventory management methods and storage policies which their impact on aviation material procurement. It not only analyzes the influence of different inventory strategies and purchases time on the aircraft spare part procurement, but also it introduces the life limited spare parts and repairable spare parts of inventory management though reliability analysis. First, it uses the methods of reliability analysis to analyze the demand of aircraft spare part which takes the economy of ratio of spare parts supporting as constraints to solve the number of life limited spare parts. Secondly, it also established the optimal number of procurement and purchasing best turnaround time model which based on the simulation of state of repairable material in full service condition and by computer simulation. Finally, through the use of quasi-renewal process to approximate the repair process is not imperfect repaired spare parts. To repair the economy as the objective function through its optimal value, and ultimately get the optimal number of replacement to get the optimal amount of purchase and the best time to purchase. I hope this can provide some reference value to the airline aviation material inventory management.

Keywords: Aircraft spare parts procurement; Reliability analysis; Life limited spare parts ;Repairable spare part; Ratio of spare parts supporting

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的和意义.....	4
1.3 国内外研究现状.....	4
1.4 本文工作.....	8
第二章 航材采购策略及库存管理.....	10
2.1 航材特征及分类.....	10
2.2 库存管理方法及策略.....	13
2.2.1 库存理论及管理方法.....	14
2.2.2 库存策略.....	16
2.2.3 航材管理指标及意义.....	17
第三章 可靠性理论在时寿件航材中的应用.....	19
3.1 可靠性理论基础.....	19
3.2 常见分布及其统计方法.....	20
3.2.1 分布原理.....	20
3.2.2 统计回归方法.....	22
3.3 安全库存下的备件数模型.....	25
3.4 应用实例.....	26
3.5 本章小结.....	28
第四章 可靠性理论在可修件航材中的应用.....	30
4.1 可修件概述.....	30
4.2 周转件最优数量及时间模型.....	32
4.2.1 建模理论.....	33
4.2.2 模型建立.....	34

4.2.3 周转件模型仿真及分析.....	36
4.3 修理件最优数量及时间模型.....	38
4.3.1 不完全维条件下可用度分析.....	38
4.3.2 修理件最佳维修次数模型.....	41
4.3.3 修理件采购模型建立.....	43
4.3.4 修理件模型分析与仿真.....	45
4.3.5 修理件模型结果分析.....	49
4.4 本章小结.....	49
第五章 总结与展望.....	50
参考文献.....	52
致谢.....	56
作者简介.....	57

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着祖国改革开放的不断深入，中国的经济建设不断蓬勃发展，交通运输业成为了连接祖国东西南北的纽带，为我们国家的经济发展做出了重要贡献。民航运输业以其快捷、便利和舒适等特点为人们熟知，而这也使得民航运输快速发展。到 2014 年末飞机数量已达到 2145 架，累计里程数 410 万公里，运送旅客数量为 3.9 亿人次，完成货邮运输量 594.1 万吨^[1]。每年运输的人数在我国交通运输业中仅次于公路与铁路，成为第三大运力方式，为人们的出行和物资的交换带来便利。从运输总量上看，我国已经成为仅次于美国第二大的航空市场。而且随着我们国家经济水平的不断提高，工业和第三产业的不断发展以及居民收入的不断增长，将会使得越来越多的人在面临出行时会选择航空运输作为他们的出行方式。从图 1.1 可以看出近五年来，民航运输每年运送的旅客数量逐年增加，每年平均增幅在 11.2% 左右，而每年货运运输量增长在 12.1% 左右。虽然民航运输业在我国经济发展中占有这么重要的地位，但是我国航空公司的利润率仅为 3%-5%^[2]。这么低的利润率在很大程度上也限制了航空业的发展，很多民间资本往往会对这种投资资金较大，回报收益较低的行业望而却步。而大型国有资金也因为收益低，使得公司发展缓慢。

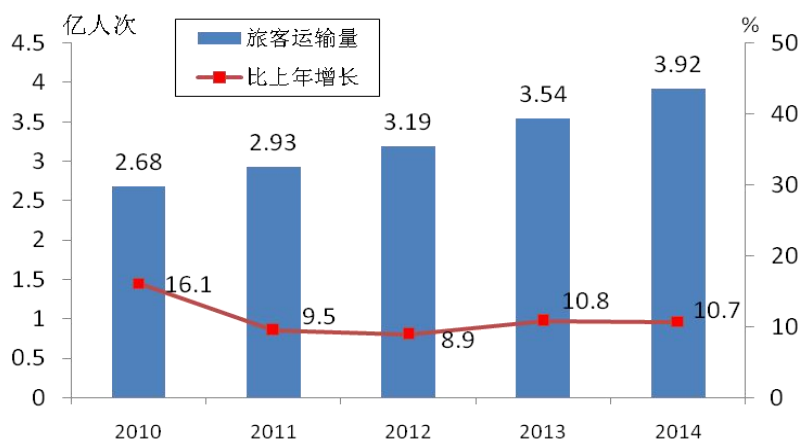


图1.1 2010-2014年民航旅客运输量

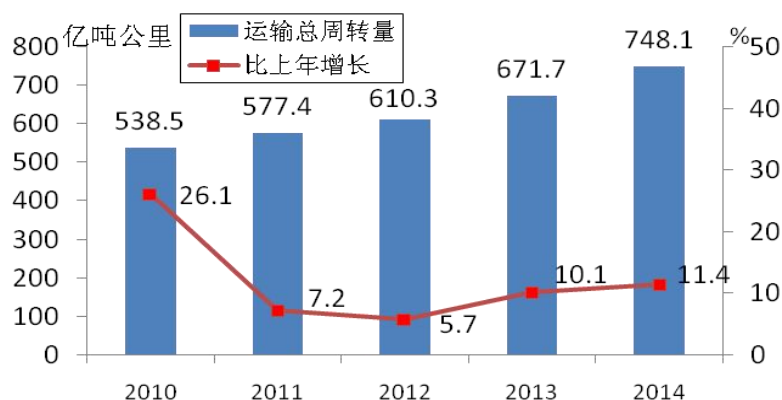


图1.2 2010-2014年民航运输总周转量

从总体上看，航空公司的成本主要包括：航油、航材、机场起降费、销售、财务费用及其他费用^[3]。据统计，在航空运输成本中，航材成本约为 15%-20%，其所占比例仅次于航油，位于第二位。但是因为航油成本是不可控的，航空公司航线一旦确定，其飞行里程就几乎是确定的，那么这部分成本只会受国际航油价格的影响，而航油价格往往不是航空公司所能掌控的。同时机场起降费也几乎是固定的。所以唯一可以减少航空公司运营成本的方式就是控制航材的储量。以南航为例，2009 年底公司的资产总额大约为 90 亿人民币，而航材的库存就达到了 18 亿多元，机会占流动资金的 20%。而当年仅航材支出这一项就接近 5 亿元^[4]。

随着航空市场的不断发展，国内航空公司机队的数量也有了明显的提高。以 2009 年底为例，当时国内机队数量为 1399 架，但是到了 2013 年底达到 2152 架，平均每年增长 11.37%。美国波音公司预测，到 2029 年，中国民航的机队规模将扩大到 5180 架。如此庞大规模的机队数量会为我国交通运输业注入新的血液。但是航空业却是一个微利行业，所以即使规模增大，其收益率还是很难增加，而且随着高铁的不断开通，使得人们在面临出行选择时也更多样化，使得短距离航程航空运输失去了方便、快捷的优势，这也限制了航空业的高速发展。

但是于国外航空公司相比，国内航空公司如果要保证与其相同的航材保障率，需要花费的数额为 3.1 倍左右^[5-6]。例如：美联航每年平均每架飞机的库存资金不到 200 万美元，而国内航空要想达到与其一样的指标，需要花费超过 600 万美元。表 1.1 为国内外航空公司的成本比较。

表 1.1 国内外航空公司成本构成的比较

	燃油	起降	飞机折旧	维修	航材备件保障	管理、服务
国内	21.3%	16.3%	15.2%	13.1%	9.6%	24.5%
国外	17.8%	18.9%	12.7%	9.6%	6.8%	34.2%

从中可以看出国内关于航材的管理还是存在着资源的浪费。如果能够合理管理，一定能使航空公司收益进一步提高。航材几乎占用了航空公司 75% 的库存资产和 25% 的流动资金^[7]。所以对航空公司来说，控制成本比较好的方式就是节约航材成本。这样即可以减少航空公司成本，又可以增加航空公司资金周转利用率，更利于企业发展和公司经营。但是目前我国航空公司航材管理存在一些问题^[6,8-10]：

(1)分析及校验的方法有待提高。目前我国航空公司所制定的航材采购计划，往往是依靠经验或者通过人工经验估算的方法，以半年或一年为一个周期，根据以往订购的数量进行简单的、经验式的估算，并简单的得出下个采购周期的数量。这种依靠人的主观经验对航材库存数量进行分析，虽然起到一定的作用，但往往会造成其与真实情况的偏差，不够精确。所以应该使用科学的，合理的方法进行分析和校验。

(2)安全与效益的取舍问题。正是因为航空公司通过运营飞机来获得较高的收益，所以航空公司必须要保障飞机的安全。这样才可以避免因为飞机出现意外情况而造成更大的损失。正是因为航空公司这种寻求稳定运营的思想，往往会造成航空公司库存增加，库存成本居高不下。面对这种问题航空公司应该改变管理策略，建立良好的考核体系来衡量库存指标，从而有效的评估库存水平。达到飞机安全飞行和航空公司获得较高收益之间的平衡。

(3)库存成本的上升。自从加入 WTO 后，外国航空公司逐步进入中国市场，这使得中国国内航空公司的竞争变得激烈，为了整合资源，民航局决定将原来航空公司并入国资委统一管理，合并成立了 3 家骨干航空公司，这样虽然增加了各个航空公司的竞争力和地区影响力，但也使航空公司的机队变得复杂，飞机型号和备件种类相对较多。增加了航空公司库存管理的难度，使得库存成本上升。

(4)专业人员的培养。国内航空公司航材管理人员大多由从非航空专业或行政人员从事，他们中的大多数没有一线维修经验和相应的技能培养。这就使得很多航材部门只能从一线维修人员所填写的缺件件号来进行采购。这样做一旦有延误，就会造成航材积压和资金的浪费。作为航材管理人员，应该提高自身的专业能力，并且具有一定的计算机、

财务和法律的相关知识。这样可以为航空公司在航材索赔、采购折扣航材、飞机索赔和发动机索赔等方面提供专业意见。

1.2 研究目的和意义

航材管理的主要问题是航材种类偏多，需求比例往往又较小而且航材的需求通常分布的随机性比较强。其实航材管理问题归根结底就是需求预测问题。但是航材的种类很多，如果对不同种类的航材进行统一而量化的管理同时选取合理的指标评价，那么即可以保障库存安全又能使备件的储备积压减小，从而使航空公司效益达到最大。而航材利用率、库存资金占有率、库存资金周转率及平均周转时间等指标却只能从某一方面反映航材管理的好坏，并不能综合评价库存管理水平。一个好的库存管理要求航材能够供应及时、充足并且能够满足飞机的安全保障需求，同时又能很好的满足航材经济性指标。

但是因为飞机是一个很复杂的系统工程，为了保障其飞行安全通常需要很多的航材储备，而且航材的价值一般都比较昂贵，过多的储备航材虽然能很好的保障飞机的安全性能，却会占用大量航空公司的库存资金和流动资金。因为只有航材和后勤能够快速响应，飞机才能得到安全保障，这样才能使飞机不会因为航材短缺或者航材供应不及时而造成航班延误或者停场，也有效避免了对航空公司经济及信誉造成更大的损失。这样可以看出一个科学的，系统的和合理的科学预测方法不仅能使航材储存满足飞机飞行要求，而且也会减少库存的积压，使得航空公司节省成本，最终获得较高的资金收益率。但是因为航材种类很多，按不同特性分类也不同，所以很难对不同种类的航材同一化管理。那么分类管理就是必然趋势，这样使得不同分类下的不同管理可以用来综合衡量航空公司库存的好坏。

1.3 国内外研究现状

航材的需求预测好坏往往决定了库存管理水平的优劣，而一个好的需求预测模型往往能决定需求预测的好坏，甚至会关系到备件的采购，供应及其对航空公司经济效益的影响。正是航材预测模型如此重要，所以国内外好多专家学者及企业人士对这一问题展开深入的研究。从二十世纪 50 年代起，很多学者就把眼光投入到军机战斗装备的保障

对飞机战斗性能和经济性的影响。经过长达半个多世纪的努力,国内外研究人员对这一问题有了一定的理论基础并且提出了多个备件模型,有一定的科研价值和工程作用。

1)国外发展现状

(1)基于经济订货量法的需求预测模型

1960 年以前,国外的专家学者普遍的使用 ERQ(Economic Repair Quantity)模型和 EOQ(Economic Order Quantity)模型来确定备件数的库存水平。通过分析一段时期中为定常的备件需求率来分析其可用度,并在不考虑维修经济性的前提下将其当成一个整体来满足一定可用度的前提。并对备件的需求进行科学的预测。但是 ERQ 模型和 EOQ 模型却因为没有考虑备件的整体性同时又缺乏考虑部件的维修经济性,所以在 1996,学者 Van Oudheusden 和 Cobbaert 改进了 EOQ 模型,对部件的报废风险进行了评估^[11]。

(2)以可用度为中心的备件需求预测

20 世纪 80 年代,有些学者和研究人员对 BSSM(the Battle group Sparing Simulation Model)、ACIM(Availability Centered Inventory Model)和 Tiger 模型进行了研究。提出了面向对象的可以通过计算机进行仿真的 BSSM 模型、对离散事件进行分析的 Tiger 模型和基于排队论理论和马尔科夫过程的多层次固态的 ACIM 模型^[12]。因为 BSSM 模型对于串联及并联系统有一定的应用价值,但是无法分析经济性对整个系统的使用可用度的影响。而 ACIM 模型却仅仅对于消耗件的预测有效,对于可修件的需求预测却没有作用。因为这个模型认为部件发生失效服从的是马尔科夫随机过程,这样使得系统的运行过程可以看作一个连续的和不断运作的一个过程,但是实际情况却往往不是这样。并且这一模型只能用于串联系统而对并联系统无效。同时该模型只能在系统稳定运转的前提下使用,一旦系统发生特殊情况不连续时该模型就会失效。Tiger 模型通过蒙特卡罗的方法可以得到系统中的一些参数,但是正是运用了蒙特卡罗的方法需要进行反复的验证,从而导致结果不单一。但是这三个模型都运用可靠性的概念对备件数进行预测,并且考虑到科学合理的预测往往需要考虑系统的逻辑结构、使用的费用情况及系统的使用可用度这些影响因素。

(3)可维修备件的维修模型

1968 年,Allen 和 D'esopo 根据系统所使用的费用及部件在使用时因为不能及时满足飞机的飞行需求而发生损失的金额期望值。并且分别使用两个独立的泊松过程对一定

周期内的不同时间点下的可修件及不可修件进行计算,根据库存安全水平及补充订货量得到备件在一定时期内的短缺数量^[13]。顺序预防性维修策略(Sequential Preventive Maintenance Policy) Lin et al 提出了不同失效模式下的可修备件维修模型,假定部件失效服从威布尔分布,以最小化的平均成本为目标,获得最佳的预防维修次数及时间间隔。Ben-Daya and Alghamdi 假设部件失效服从威布尔分布,并且在不完全维修的情况下,建立了故障强度随维修次数不断减少的下降因子,最后以维修成本为优化目标函数,最终求得设备在有限维修周期内进行不完全维修的最优维修次数 N^* 和最优维修间隔 h_R 。

(4)PEFM模型

2001年Chris H.Friend和Adel A.Ghobbar两位学者根据其他13种能够有效的预测航材备件需求的模型基础上,考虑了一定的预测误差,并且对这一误差根据以往的结果进行优化,最终提出了PEFM(Predictive error forecasting model)模型^[14,15]。

(5)采用贝叶斯方法的备件需求预测模型

二十世纪八十年代末至九十年代初,Kaplan、Sherbrooke和Hil等人通过贝叶斯方法对航材备件数量进行预测并应用与现实中,起到了一定的效果^[16,17]。Kostas、Platon Aronis等人于2002年提出了作为一个整体应用于确定客户的最终备件服务需求^[18]。当备件发生故障产生新数据的情况下,为了获取更精确的备件预测,将能很好的处理数据更新的贝叶斯方法应用于此最终提出了可以控制库存的CM(Current Method)方法。

(6)采用人工智能的备件需求预测模型

1990年代初,Bylinsky, Laura Ignizio在备件需求预测中引入人工智能系统,并且获得令人满意的结果^[19]。

Amin-Naseri等人使用了阿拉克石化公司2001到2006年之中67个月的30种备件观测数据,并通过这些数据中的55个月的备件需求数据对神经网络进行训练,利用剩余的12个月的数据来验证神经网络的训练结果^[20]。并利用MASE、A-MAPE和PB三种评价指标对RNN递归神经网络、GRNN广义回归神经网络、MLP多层感知网络、SBA方法和Croston方法的结果进行比较,最终得出RNN递归神经网络优于其他4种方法。此外Nasiri-Pour等人利用神经网络和传统的递归方法的预测方法并结合了多层感知器的大量需求,通过相同的数据,评估,混合方法的验证对比其它方法的准确性和拟议未来预测备件需求可

能混合方法和神经网络的并行发展^[21]。Regattieri等人使用的意大利航空公司的空中客车A320机队的备件数据,该数据包括1998到2004年间3000多个不同部件。这些数据明显呈现出5种不同的块状水平,在这些不同特性的表征下挑出20种有代表性的部件进行分析并且逐一验证^[22]。

(7)航材管理的应用

Mabini^[23]分析了多级多航材的库存体系,考虑航材需求为连续的前提下,以航材库存成本和飞机延误成本最小化为优化目标,优化菲律宾航空运输企业的库存持有水平。Fritzsche^[24]针对高价值航材,考虑了故障的动态性和维修免费期的问题,使用(s-1, s)库存策略,建立了单个航材的库存策略优化模型。Sun^[25]针对航线维护替换航材,基于多级METRI模型,提出了多级库存体系下的库存优化模型。Lee^[26]针对意大利空军的航材保障,建立了库存的分布模型,使保障率提升到99%。Heijden^[27]通过连续(s-1, s)补货方式,在生产资料备件中综合考虑了库存控制和时间的节约。Basten^[28]采用连续(s-1, s)理论,考虑修复水平和服务备件库存联合优化对航材库存管理进行优化。而Topan^[29]则采用(Q, R)理论,提出一种最小化系统库存成本的精确算法对航材需求进行预测。

2)国内发展现状

因为在航材管理这一方面,我国起步较晚。在20世纪80年代以后我国研究人员和学者才开始对航材保障这一问题进行研究。结合我国的基本国情和本国民航业发展的特点,对这一问题进行了描述,并提出了一些模型及求解算法。并可以根据这些研究成果为航空公司制定初步的航材采购计划。同时近些年来国内的各大科研机构及航空院校在备件需求预测模型上进行了大量工作。例如:

20世纪90年代,北京航空航天大学根据现实的需求对备件预测提出的“备件计划管理程序方法”,这个方法根据备件的维修性、保障性及可靠性等自身特点,对不同备件的管理方式进行了分析,并且为备件数的需求预测模型提供了一定的理论基础^[30]。

2001年,空军工程大学航空机械系的尚柏林等人根据飞机备件供应保障体系中其供应规律成“乙”字形的规律,对这一规律进行了面向对象的仿真。分析了备件在使用时不同因素对备件保障的影响^[31]。

2002年中国民航学院的赵淑舫等人通过运用数理统计的概念并且考虑到现代维修

方式,对飞机的备件数量进行预测^[32]。通过不同部件发生故障时的失效率以及对不同形式的故障方式进行研究,建立了较为可靠使用的需求预测模型,为航材的备件数的确定提供了解决方案。

2007年陈凤腾等人根据不同故障率曲线,引入非齐次泊松分布概念。根据不同的故障曲线,求得不同的备件模型。并通过实际数据进行验证,预测备件需求量和备件剩余使用寿命,具有一定的使用价值^[33]。

我国学者张永莉总结了航材需求预测的方法^[34],其中由于航材的需求量变化不是很大,通常在预测这样的航材需求时可以选择时间序列法^[35,36]及回归分析法^[37-38]。虽然时间序列法及回归分析法可以有效地进行航材消耗的预测,但是其预测的精度在很大程度上受到历史数据的影响。当历史数据变化时,无法满足预测精度。而马应欣等人根据经典的航材库存ABC分类方法结合了AHP和模糊方法对航材进行了分类^[39]。根据航材部门实际需要进行分类,通过ABC分类运用层次分析法对航材进行针对有效的管理。但是因为航材类别很多,对航材运用简单的分类不能满足其使用要求。张作刚等人则通过主成分分析的聚类分析及灰色聚类分析对航材进行分类^[40,41]。在缺少航材数据信息的情况下,运用灰色聚类分析方法,构建了航材的分类指标体系。根据分类指标的重要度不同,采用模糊一致性矩阵来确定指标的权重,建立航材分类模型。

1.4 本文工作

本文围绕飞机可靠性和可用度的概念,将航材按类别分为消耗件、周转件和可修件分别进行分析。以航材保障率和可用度为约束条件,并通过数理及概率统计、运筹学和高等数学的知识对航材备件的采购进行分析。对不同类别的航材需求进行分类预测,并建立和运用不同航材类别采购模型,分别对其进行分析和运算。希望能对航空公司进行航材采购起到一定的指导意义。

第一章:介绍了本文的研究背景和研究意义和目的以及国内外研究人员对航材采购这一问题的研究成果。

第二章:介绍了可靠度和失效率的概念,并且介绍了它们的来源和评价方法以及它们之间的关系。同时还介绍了库存理论一些简单概念及其在航材管理中的应用。

第三章：通过介绍消耗件的失效方式及统计方法，分析了消耗件失效的历史数据，对这一数据进行拟合，确定了消耗件失效函数形式及各参数大小，并以航材保障率为约束，分析了一定保障率条件下航材备件数的大小。

第四章：运用运筹学及排队论的知识，分析了可修件的分类，提出了周转件及修理件在失效过程和维修过程都服从指数分布情况下，且在一定航材保障率条件下，提出了最优采购数量和最优采购时间模型，并通过数理分析进行验证。

第五章：总结及展望。

第二章 航材采购策略及库存管理

航材是保障飞机安全飞行的重要物质基础,飞机的安全飞行离不开航材合理及时的供应,所以储备和运输航材对航空公司来说至关重要。但是过多的采购会使得库存成本上升,资金积压,这样看来合理的管控航材的存储对航空公司的合理运营十分重要。本章研究了航材概念及其几种分类方法,同时还分析了库存管理的理论和方法 and 航材管理的指标选取。最终确定了以航材保障率为基础的航材库存管理策略。

2.1 航材特征及分类

航材是航空器材的简称,是指民用航空器的各种零部件、动力装置、仪表器械等,如发动机整机、涡轮组件、可调节导向叶片 IGV(Inlet Guide Vane)、高度表、地平仪等。根据中国民用航空规章 CCAR21 部《民用航空产品和零部件合格审定规定》定义,民用航空产品一般是指民用航空器^[41]。使用在飞机上的部件从设计、制造、维护及测试等过程开始到结束必须满足当地民航局相关的适航条款和适航要求。

虽然飞机是个复杂系统,是由很多的零件及部件组装而成的。航空公司为了保证航空运输的正常运行,必须储备一定数量的航材备件。一旦发生航材的缺乏,就会影响航空公司的正常运营,给航空公司带来巨大的经济损失。但是,这些航材因为自身的不同特点又可以划分为多种类别:

1)航材根据备件的维修性可以分为消耗件和可修件。

(1)消耗件往往也可称作不可修件,是指在飞机的使用过程中,一旦发生失效其无法修复的航空材料和飞机材料,这种类型的航材在发出后就被视为消耗掉了。消耗件的库存管理通常存在以下几个特点:

a.单价低、总价高

消耗件的价格虽然无法和成千上万美元的可修件航材中的周转件相比,但是消耗件的单价却可能比一般的民用商品价格要高,例如一个普通的螺母,其在民用商品中的价格可能就是几元钱人民币,但是当这个螺母在飞机上使用时,却因为它的加工精度及制造难度单价变为几美元,前后两者价格可能相差数倍。但是因为飞机是个庞大的系统,

它所需要的消耗件数量很多，这就使得航空公司在大批采购航材时，消耗件这一种类的库存总量变得很多，那么其价值也会明显提高。一般来说，但从消耗件角度考虑，一个大中型的航空公司仅在这一项的花费就可能为上亿甚至上十亿美元。

b.资金周转率低

消耗件虽然在航空公司库中所占的总价值没有可修件高，但是却常常因为很多放行所必备的备件都是消耗件。正因为如此必须要保证其在库存中的数量，但这也会使得库存管理成本上升，使得航空公司的资金周转率降低。

c.航材供应商或 FAA(Federal Aviation Administration)文件中规定航材不可修

对于一些简单的零件或者部件，它们的失效往往可能是到了其规定的寿命周期，也有可能是在使用的过程中发生了损伤或者破裂。所以这种类型的航材发生失效往往是不可修复的。

(2)可修件

可修件是技术上可修的航材,在飞机使用的过程中,当其发生失效的情况下可以修复的部件，对其进一步分类可为以下两种：

a.修理件

修理件可以看作单个零件或由很多零件组装而成的部件，这些部件在不断的使用过程中往往会在发生失效后可以有限次数的修理，而反复使用。正是因为这种部件进行多次修理后无法再使用，可以认为报废后为不可修。而且当此零件在管理、运输、维修等的费用超过更换一个新零件新的部件（包括采购成本，原材料价格等）的采购成本，即修复是不经济的。在一般情况下，当航材的修复经济性是修理费用大于等于替换成本的 70%时，航材的维修经济性就明显不合理，这时该航材可以看作消耗件。对于修理件通常需要进行无序号管理。

b.周转件

周转件是指飞机在使用时当其一个零件或者部件发生故障，对其进行修复后部件能够回到其初始的使用状态。因此周转件在失效后其维修次数可以是无限的，一般会对这样寿命较长的部件实行有序号的跟踪管理。实际上周转件的使用次数及使用寿命可以是无限的，或者至少也和该部件所在的飞机寿命一样长。

2)航材按 MEL 维修间隔分类法

MEL(Minimum Equipment List)是由航空器营运商制定的,经过其使用时所在国家的适航机构批准的重要技术性文件。其制定通常需要有飞机制造企业所在国家的民航当局、适航机构规定在该类型的飞行器上那些部件是可以携带不工作的部件放行的,并对这些设备的最低放行要求数量及保留故障放行的限制条件做出了原则性的要求。MEL的维修时间间隔分类的方法是由FAA、CAAC批准的,它清楚的表明飞机的零部件在安装后在运行时发生故障需要修复的时间。下表为B737NG的MEL维修间隔分类,它将航材分为A、B、C、D、E五类。

表 2.1 航材 MEL 修理间隔分类法

类别	定义
A 类	A 类航材一定要按 MEL 中规定的时间修复
B 类	B 类航材一定要按 MEL 中规定 72 小时(不包括故障当天)内完成修复工作
C 类	C 类航材一定要按 MEL 中规定 240 小时(不包括故障当天)内完成修复工作
D 类	D 类航材一定要按 MEL 中规定 240 小时(不包括故障当天)内完成修复工作
E 类	E 类航材一定要按 MEL 中规定 240 小时(不包括故障当天)内完成修复工作

制定 MEL 清单的不提是允许一段时间内飞机在这些清单里的设备或构件一旦发生失效的情况下能够在运行一段时间,直到在规定的时间内将失效部件修复为止。这将减少飞机在地面的停场时间,同时也能减少飞机的航班延误,提高飞机的运营能力和使用效率,增加航空公司的经济效益。MEL 清单中只包括民航当局所规定的民航运行规章或是适航条款下的一些对飞机放行时可以保留一段时间并且带故障飞行的部件设备。但是不涵盖一些对飞机适航要求有显著影响的基本设备,如发动机、起落架、机翼、方向舵、襟翼等。

3)航材按订货优先级分类法

以航材在飞机上的重要程度及其维修的时间间隔等因素作为参考,航材商根据航空公司对不同种类的部件订货需求,在一定的时间内予以发货响应。表 2.2 是航材根据订货优先级进行的分类及不同类别航材的响应时间。

表 2.2 航材订货优先级分类法

类别	供应商响应时间
飞机停场件 AOG	立刻反馈
紧急件 Critical	4 小时之内
加快件 Expedite	24 小时之内
普通件 Normal	约定时间

4)按出口民用航空产品分类

根据中国民航适航规章 CCAR21.322 规定，出口的民用航空产品一般分为 I、II、III 三类。由于我国民航所使用的航材大多需要从外国进口，所以航材的采购应该考虑出口国当地民航局颁发的适航证或适航批准标签。

表 2.3 出口民用航空产品分类法

类别	定义	证书
I 类	已具有型号合格证或型号设计批准书的完整的航空器、航空发动机、螺旋桨	出口适航证
II 类	其破损会危及 I 类民用航空产品安全的主要部件，如机翼、机身、起落架、动力传动装置、操纵面等，以及按照民航总局颁布的技术标准规定生产的民用航空器上的材料、零部件和机载设备。	适航批准标签
III 类	I、II 类民用航空产品以外的包括按照局方可以接受的技术标准制造的标准件在内的民用航空产品。	适航批准标签

其中，II 类产品应该标有能够分辨出其自身属性的制造商、零部件号以及序列号等。所以可以看出：I 类民用航空产品基本对应飞机、发动机，II 类民用航空产品基本对应航材可修件，III 类民用航空产品基本对应航材消耗件。

2.2 库存管理方法及策略

库存是一个组织中存储的其使用的任何物品或资源。库存在狭义上可以看作是一个仓库用来存储暂时使用不上的物品和资源。对于航空来说，库存就是用来存储航空公司暂时不用或者闲置的零件或部件。而广义上，库存又是一个大的容器，可以存储那些现在暂时使用不上，但是却会在一段时间后使用的资源和设备。对航空公司来说，它往往包括潜在的能为航空公司提供设备的单位，例如：航空公司本身的库存、远在海外或者近在咫尺的供应商及制造企业、甚至那些能够通过串借为其提供部件的其他航空公司

也都可以看作航空公司的库存。

航材库存管理的好坏，直接影响到公司经营成本和飞机的飞行安全。所以对航材的管理既要考虑到飞机的飞行安全，同时又要改善航空公司的企业经营状况。而飞机的安全运营则需要更多的对飞机进行维护和提供充足的备件保障，这样虽然会使得飞机的飞行安全得到了保障，但是却因此造成了资金的积压，对航空公司资源有效合理的配置是种浪费。所以如何处理好航材库存量对飞机安全保障的影响，使得航空公司收益和飞机安全达到合理平衡通常是航材储备的关键问题。

2.2.1 库存理论及管理方法

合理的库存管理方法就是监管和控制库存水平，通过合理的采购备件和及时补充航材，使得库存数量满足库存需求。为了满足库存需求，需要合理的储存一定量的备件数。而这一数量往往是用不同方法确定的：有的备件需求是间断的，例如汽车制造企业往往会在一定时间内提供一定量的钢板给冲压车间，而这一需求往往是根据公司的生产计划和生产周期确定的。而有的需求是均匀连续的，例如企业的总装车间，往往在生产线上生产的零部件，其单位时间的需求数量是一定的。有些库存需求却是确定的，例如航空公司进行C检时，飞机所需的航材数量往往都是确定的。而有的确是随机的，因为飞机是个比较庞大的系统工程，飞机的部件又有很多组件组成，而且飞机在执行飞行任务时，需要在不同地点起降，这也就导致了飞机在执行飞行任务中其对航材的需求是不固定的，有一定的随机性和分布特点。虽然如此，但是现在有很多成熟有效的库存管理办法，其中常见的为：

1)ABC 分类法(Activity Based Classification)

对物料的分类方法，比较长见的就是 ABC 分类法，又称帕累托分析法，也是经济活动中一种基本分类方法和认识手段。这种分析方法是根据物料种类和物料占有的库存成本的特征，将物料分为重点和一般，从而有效的对资源区别的进行管理，抓住物料分类的主要矛盾，从而有效的将物料进行分类。所以在很多领域及行业中有着良好的应用。而在航空备件管理领域中，则是将航材所需要的金额和数量做成详细的表，并对其进行分类。对飞机飞行安全影响比较大或本身价值比较大的几种航材列为 A 类。对 A 类航

材在采购, 储存等方面进行重点监控。而对占用金额比较少的航材而且其数量占多数的可以分为 C 类。对 C 类产品一般采用比较灵巧便捷的控制手段。处在 A 类和 C 类中间状态的物料分为 B 类, 对 B 类物料的采取一般监控。

ABC 分类法的原则是: 对于 A 类备件实施重点监控, 使这类备件做到少积压, 尽量控制备件数量, 从而控制成本。而对 B 类备件尽量控制其库存量, 加大采购数量, 延长备件的订购周期。对 C 类备件应该加大安全库存量, 进一步增加其采购数量和采购时间。

ABC 分类法虽然可以使得备件管理得到合理监控, 使得公司库存成本有所下降, 有效的提高了资金周转, 但是对于航空公司来说, 其主要通过运营飞机获得收益, 但是因为飞机是个比较庞大的系统工程, 其所需的航材总量偏高, 库存总量又极其庞大, 例如: A300、A310 和 A320 这三种型号的飞机, 其库存总量约为 2 万多件, 所以使用 ABC 分类法对航材库存实施管理有一定的难度。

2)VED 分类 (Vital, Essential, Desirable)

VED 分类法是指按照航材使用时, 其对飞机运行的重要程度来对航材库存进行分类, 其中: V 表示至关重要(vital), E 表示重要 (essential), D 表示必要(desirable)。

(1)V 类件可以定义为当飞机发生故障时, 飞机在需要航材时如果库存中的备件不能及时供应, 会使得飞机停运, 造成重大损失;

(2)E 类件可以定义为当飞机发生故障时, 飞机在需要航材时如果库存中的备件不能及时供应, 也会使得飞机停运, 造成一定的损失;

(3)D 类件可以定义为如果飞机发生故障, 但是库存中航材未能及时供应就会对飞机正常运营产生影响。因此, V 类航材较大安全库存; E 类和 D 类航材适量安全库存。

3)重要性分类

考虑航材对飞机放行的影响, 航材的重要性可以按照下面三种分类:

(1)go 件可以定义为飞机在发生故障时如果缺少该类航材的情况下, 飞机依然能够放行。

(2)go if 件是指一旦飞机发生故障时, 如果没有此类航材但是通过紧急措施, 飞机依然能够放行。

(3)no go 件定义为当飞机发生故障时库存中没有此类航材, 飞机就不能放行。因此,

对于 go 件类型的航材其安全库存可以稍微有所减少；if go 件类型的航材其安全库存可以适度增加；而对于 no go 件类型的航材就应该较多的存储，加大此种航材的安全库存。

2.2.2 库存策略

解决航空公司的库存管理问题，就是解决航空公司如何订货及何时订货的问题。因此在合适的时间订购合理的数量对库存费用大小起着至关重要的影响。而一个合理的库存决策往往需要根据航空公司飞机的运营规律，对航材的需求做出科学合理的预测，这样采购后的航材才能使库存变为一个缓冲，能够保障航空公司合理的生产运营，同时也会合理压缩库存资源，对航空公司的运营起到重要作用。而随着库存策略的逐步成熟和管理工作的科学化，库存策略一般有：

1) (Q, R)策略

(Q, R)策略是定量不定期的采购模型，每次当订货点小于事前订货点 R 时，采购的数量就为订货批次 Q ，即认为发生缺货时，备件的需求率是不随时间变化而改变的。这个库存策略适用于那些占用资金较大或者备件需求率较高的重要物品，而且该物品还便于采购，进行库存盘点时也要便于检查。

2) (R, S)策略

(R, S)策略是不定量不定期的采购模型，当库存中的备件小于事前订货点 R 时，采购的数量为希望库存 S 与实际库存之差，即认为备件的需求率是可变的。这个库存策略适用于占据资金较多，而且备件的需求往往是随机的、变化的。

3) (t, S)策略

(t, S)策略是定期不定量的采购模型，当到事前盘点周期 t 时，对库存备件进行盘点，盘点后进行采购，采购的数量为希望库存 S 与实际库存之差。这个策略用于一般的物资采购，而备件的供货渠道往往较少，并且需要定期盘点。

4) (t, R, S)策略

(t, R, S)策略是定期不定量的采购模型，当到事前盘点周期 t 时，需要对库存备件进行盘点，如果盘点后的结果并非需要订货，那么根据事前订货点 R 和实际库存数量对比决定是否订货，当盘点后的库存下降到 R 指下时，采购的数量为希望库存 S 与实际库

存之差。这策略适用于介于一般和重点之间的物资，但是易于盘点的。

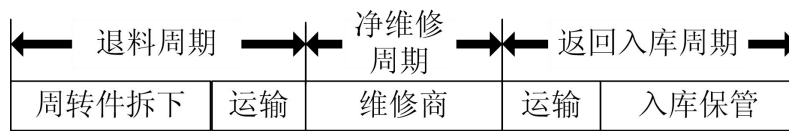
2.2.3 航材管理指标及意义

航材库存管理的很重要的一部分就是航材管理指标的选取，不同的指标对航材库存的侧重点及关注的主要矛盾不一样，本章选取了平均周转时间及航材保障率做重点介绍。

1) 平均周转时间

消耗件的周转周期是指当部件从失效开始一直到航材能够供应上飞机需求的这段时间。但是对于可修件来说，其周转过程往往需要考虑部件从飞机上的拆装，同时也要考虑部件在修理时的整个送修周期，而这一过程可以称为周转时间(TAT— Turn Around Time)。

图2.1 航空可修件周转过程



退料周期是指当部件发生故障时，其从飞机上拆卸到维修单位接收到航材为止的这段时间。主要包括了：可修件拆卸后的故障确认、部件维护信息、内厂或外场送修认定、发送等。

净维修周期是指从维修单位接收到航材到使用方及维修单位之间确认交货时间。若是维修单位在外国，那么还应该计算部件到海关的时间。

返回入库周期是指在使用单位确认交货后到该航材重新入库的这段时间。包括了运送到使用方的运输时间以及办理相关手续需要的时间，对于海外送修的部件还应该算上在海关报关的时间。

对于可修件来说，航材送修的周期就是指退料周期、净维修周期及返回入库周期三者所需要的时间之和。而一般某种航材的送修周期往往会对其库存数量有一定影响，而且送修周期也是会发生变化的，所以为了方便管理，取送修周期的平均值作为该航材的周转时间，也可以称作平均周转时间。

2) 航材保障率

航材保障率是飞机因为缺少备件停场前，航材保障次数和航材领取次数之比^[42]，即单位时间内维修工作对航材需求有多少可以满足。由于我国没有建立航材共享平台，而航空公司需要自己建立航材库存对自己的航班进行后勤保障，一般会通过航材保障率的大小来衡量飞机的安全保障程度和库存比例。当航材保障率比较大的时候，说明航空公司航班得到很好的保障，但是也可能会引起库存中航材的积压，但当航空保障率大到一定程度的时候，其库存成本也会急剧上升；而当航材保障率比较小的时候，说明航空公司的飞机可能安全无法得到保障。所以合理的控制航材保障率的大小，对航空公司的经营收益和飞行安全都有一定的衡量作用。

表 2.4 周转件的保障率分配

周转件类型	保障率 a
部件发生故障，飞机不能保留故障放行	98%
部件发生故障，飞机可以在保留故障 1 个日历天放行	95%
部件发生故障，飞机可以在保留故障 3 个日历天放行	92%
部件发生故障，飞机可以在保留故障 10 个日历天放行	88%
部件发生故障，飞机可以在保留故障 120 个日历天放行	80%
部件发生故障，与客舱服务有关飞机能放行	85%
部件发生故障，与客舱服务无关飞机能放行	78%

航材保障率对航材备件的多少有着重要的影响，一般的航空公司会把航材保障率控制在 85—95%。当其大于 92% 的时候，航材的管理及存储成本会急剧的上升，所以航空公司应该控制航材保障率来保障飞行安全及经济性。

因为航空公司的库存数量会随着飞机的运营时间的增加而减少，所以及时合理的补充库存量对航空公司的库存管理至关重要。因为现代飞机大多以空客和波音机型为主，而这些飞机的供应商往往在世界各地，所以航空公司的备件采购往往需要一定的订购提前量，这样才能使航空公司的库存备件满足库存需求。而库存的安全使用时间往往有和航材库存数量和航材的使用情况有关，所以合理的分析库存需求的变化对航材采购时间的确定至关重要。

第三章 可靠性理论在时寿件航材中的应用

可靠性是用来衡量系统能否按照设计要求完成其规定功能的能力。其数值大小可以用可靠度来衡量,通过概率来描述产品或系统的工作状态。对于一个系统的可靠性描述往往需要对其数据特性进行分析,根据数据呈现的规律符合何种特征分布,得到其失效函数,最终可以得到该系统的工作特性。本章研究了可靠性理论及其基本概念、三种常见分布的特性及其回归统计原理,最后选择了安全库存下时寿件的备件的数量模型并通过实例进行分析。

3.1 可靠性理论基础

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力^[43]。可靠度是可靠性的概率表示。通常用 $R(t)$ 表示,一般部件的可靠度越大其使用性能就越优越,能完成规定功能的概率就越高。

设 T 为产品在规定条件下的寿命,产品的可靠度函数 $R(t)$, 表示事件“ $T > t$ ”的概率。

$$R(t) = P(T > t) \quad 0 < t < \infty \quad (3.1)$$

而失效分布函数 $F(t)$ 的概率 $P(T \leq t)$, 那么其数学表达式为:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad 0 < t < \infty \quad (3.2)$$

故障率又称失效率,航材的失效率通常用 $\lambda(t)$ 表示,其含义是部件在时间 t 内任意单位时刻内发生失效的概率为:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.3)$$

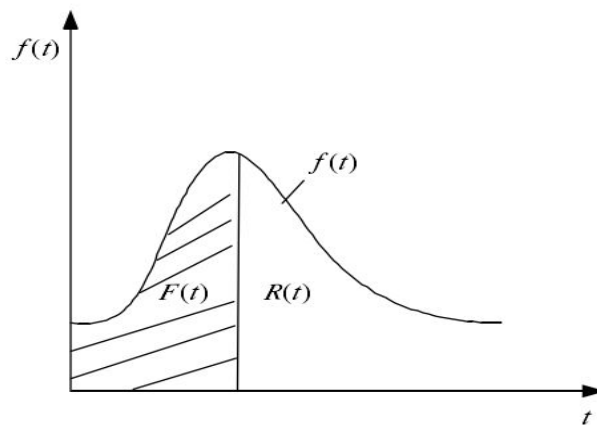


图 3.1 可靠度与失效率的关系

平均修复时间MTTR(Mean time to repair, MTTR)是指从对故障件开始维修到修复完成,成为适航的可备件之间的这段时间^[44]。MTTR是衡量周转件维修性的一个指标,随机变量恢复时间得期望值,产品的性能往往能决定了这一时间的长短。航材部门通常用平均修复时间衡量维修厂商的维修能力。MTTR越短,表明维修厂商的维修能力越好。

平均故障间隔时间MTBF(Mean Time Between Failure),是衡量周转件故障率的一个指标^[45]。它反映了产品的时间质量,是体现产品在规定时间内保持功能的一种能力。平均故障间隔时间是指当周转件发生故障后经过修理或者采用瞬时更换备件方法更换后仍能正常工作,其在这两次相邻的故障间的平均工作时间。

3.2 常见分布及其统计方法

在用于计算统计时寿件的备件数时,往往会用到数理统计的知识。因为部件的失效往往是和备件本身的性能有关,会服从某种分布。最常用的分布为泊松分布,指数分布和威布尔分布。

3.2.1 分布原理

1)泊松分布

泊松分布为二项分布的特例,适用于描述单位时间(或空间)内随机事件发生的次数。正是因为泊松分布适合描述离散的随机的过程,而消耗件的损耗和需求也可以看作一个随机过程,所以对泊松分布进行讨论和介绍。

泊松分布的概率函数为：

$$P(X=k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k=0,1,\dots \quad (3.4)$$

泊松分布的参数为 λ ，用来描述随机时间的平均发生率。其均值 $E(X)$ 和方差 $D(X)$ 分别为：

$$E(X) = \lambda, D(X) = \lambda \quad (3.5)$$

(1)泊松分布是一种描述随机事件发生的概率分布。只有当事件发生的次数足够大的时候，才能更好的用泊松分布表述。

(2)仅有一个参数 λ ，且方差与均值相同。

(3)当泊松分布的参数 $\lambda \geq 20$ 时，可以用正态分布近似表达。

2)指数分布

指数分布不但在电子元器件方面得到普遍使用,而且在系统和整机方面也得到了使用。可靠性工程和排队论的丰富实践又使人们加深了对指数分布性质的认识。指数分布具有无记忆性，即工作时间经过 t_0 后，仍然和新的产品一样，再使用一段时间不会影响它的使用性能。或者可以表示为 $P(T > t_1)$ 与经历的 t_0 大小无关。

指数分布定义：如果随机变量 X 服从指数分布的密度函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad \lambda > 0. \quad (3.6)$$

则称 X 服从参数为 λ 的指数分布，记为 $X \sim \text{Exp}(\lambda)$ ，且有失效率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (3.7)$$

指数分布的均值 $E(X)$ 和方差 $D(X)$ 分别为：

$$E(X) = 1/\lambda, D(X) = 1/\lambda^2 \quad (3.8)$$

3)威布尔分布

威布尔分布之所以被广泛的应用在工程实践中，是因为零件或者部件的失效通常是由其最薄弱环节出错引起的，而其正是根据最薄弱环节模型设计得到的，所以能够很好的反

映工程中的这一特性，并且故障率是递增的，也能很好的满足失效原理。所以,将它作为材料或零件的寿命分布模型或给定寿命下的疲劳强度模型是合适的^[46]。

若随机变量 T 服从威布尔分布，则其累计分布为：

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3.9)$$

其中： β —形状参数

η —尺寸参数

γ —位置参数

累积失效概率函数为：

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - \exp\left(-\lambda(t-\gamma)^\beta\right) \quad (3.10)$$

威布尔分布的均值 $E(X)$ 和方差 $D(X)$ 分别为：

$$E(X) = \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + \gamma, D(X) = \lambda^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - E(X)^2 \quad (3.11)$$

3.2.2 统计回归方法

对于不同的时寿件，可能满足不同的数据分布。各种分布都有各自分布的特点，所以统计分布的方法各不相同，本节介绍不同分布的线性回归统计方法，即回归模型。回归模型是使用独立变量 x 及随之变化的关系变量 y 的模型。这种简单的模型就是变量 y 随着一个独立变量 x 变化。它指出关系变量 y 是独立变量 x 的线性函数。也就是说，线性回归给出了最符合 (x, y) 位置的直线。线性回归的目标是：1、核对独立变量和变量之间是否具有线性关系；2、根据数据点绘出最符合的直线；3、估计常量“a”和“b”，使 $y=ax+b$ 。

1) 指数分布的线性回归方法

为了使数据符合指数分布，我们使用这样一种途径：转换 $(t_i, F(t_i))$ ，当绘图时使它成为一条直线。 t_i 是指观察到的故障时间， $F(t_i)$ 是累积分布函数估计。指数分布的累积分

布如下：

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (3.12)$$

那么，对上式两边取自然对数，可以得到：

$$\ln \left[\frac{1}{1-F(t)} \right] = \lambda t \quad (3.13)$$

式(3.13)是一个线性函数。因此，对于一个指数分布，点 $\left(t, \ln \left[\frac{1}{1-F(t)} \right] \right)$ 会画出一条直线。如果 t_1, t_2, \dots, t_n 是观察到的故障时间，那么为了使这些数据符合指数分布，我们使：

$$\begin{aligned} x_i &= t_i \\ y_i &= \ln \left[\frac{1}{1-F(t_i)} \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

如果存在一条直线 $y = a + bx$ ，那么这条直线的估计值为：

$$na + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.15)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.16)$$

在上式中替换 (x_i, y_i) 得到：

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.17)$$

对于指数分布， $b = \frac{1}{\lambda}$ 。

2) 威布尔分布的线性回归方法

威布尔分布的概率密度函数如下：

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (3.18)$$

如果单纯的用一元线性回归方法，那么必须假设式中 $\gamma=0$ ，但是如果 $\gamma \neq 0$ 的话，一元线性回归就无法运用最小二乘法，因为此时无法将威布尔失效分布函数转换为简单的

线性方程^[47]。

那么将上式进行转换，对两边取对数可得：

$$\begin{cases} \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(x-\gamma) - \ln x_0 \\ \ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)^{1/\beta} = \frac{x}{\eta} - \frac{\gamma}{\eta} \end{cases} \quad (3.19)$$

可以看出上式(3.19)线性无关，可以将方程等价为： $y_k = A_k x_k + B_k$

$$\text{当 } k=1 \text{ 时, } y_1 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right), A_1 = \beta, x_1 = \ln(x-\gamma), B_1 = -\ln x_0$$

$$\text{当 } k=2 \text{ 时, } y_1 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right)^{1/\beta}, A_2 = \frac{1}{\eta}, x_2 = t, B_2 = \frac{\gamma}{\eta}$$

对上面两个线性方程(3.19)分别用最小二乘法可知：

$$\begin{cases} \hat{\beta} = f_1(\hat{\gamma}) \\ \hat{\gamma} = f_2(\hat{\beta}) \\ \hat{x}_0 = f_3(\hat{\beta}, \hat{\gamma}) \end{cases} \quad (3.20)$$

由于联立的 (3.20) 式为超越方程组, 因此只能按给定求解精度用迭代的方法求得 \ln 与下的近似估计值^[48]。

3) 正态分布的线性回归方法

正态分布的累积分布为：

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-u}{\sigma}\right) = \phi(z) \quad (3.21)$$

则 z 可以表示为线性方程：

$$z = \Phi^{-1}[F(t)] = \frac{t_i - u}{\sigma} = \frac{t_i}{\sigma} - \frac{u}{\sigma} \quad (3.22)$$

令 $x_i = t_i$, $y_i = z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)]$, z 的值可以从标准正态分布表查出。我们也可以用

多项式近似法来表示 z_i 。

$$x_i = t_i$$

(3.23)

$$P = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{[1-F(t_i)]^2} \right]} \quad (3.24)$$

$$y_i = P - \frac{C_0 + C_1 P + C_2 P^2}{1 + d_1 P + d_2 P^2 + d_3 P^3} \quad (3.25)$$

其中： $C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.01038, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$

。那么 μ 和 σ 的估计值为：

$$\mu = -\frac{a}{b} \quad (3.26)$$

$$\sigma = \frac{1}{b} \quad (3.27)$$

3.3 安全库存下的备件数模型

指数分布，正态分布和威布尔分布主要是用于简单的可靠性理论，本节模型是基于一定航材保障率基础来估计算机器所需备件数量，根据安全库存理论，在一定航材保障率为前提，适用于一定库存大小，需要保障飞机运行安全的情况下同时满足一定的经济性要求^[49]。

当某部件的使用时间分布为 x_1, x_2, \dots, x_n 。在周期 T 的情况下，航材的可靠度 P 为：

$$\lim P \left\{ \sum_{i=1}^n x_i > T \right\} = \gamma \quad (3.28)$$

其中 P 为航材可靠度， γ 为航材保障率， T 为确定的使用周期， n 为统计失效时间个数。

对 $\sum_{i=1}^n x_i > T$ ，那么在备件数 n 足够大的情况下，可以将其分布用正态分布表示，如此通过大数中心极限定理，所有备件应满足：

$$\lim P \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n x_i - nE[x]}{\sqrt{nVar[x]}} > \frac{T - nE[x]}{\sqrt{nVar[x]}} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{T - nE[x]}{\sqrt{nVar[x]}}}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy = \gamma \quad (3.29)$$

$$\text{令: } \frac{T - nE[x]}{\sqrt{nVar[x]}} = -d$$

根据正态分布性质, 使得: $d = \phi^{-1}(\gamma)$

表 3.1 不同航材保障率下 d 值的大小

参数	不同航材取值				
γ	0.99	0.95	0.90	0.75	0.5
d	2.33	1.64	1.28	0.67	0.00

则由上式(3.29)求得备件数 n 为:

$$n = \left[\frac{d * CV}{2} + \sqrt{\frac{d * CV}{2} + \frac{T}{E[x]}} \right]^2 \quad (3.30)$$

其中变形系数 CV 对于正态分布来说为:

$$CV = \frac{\sqrt{Var[x]}}{E[x]} = \frac{\sqrt{D}}{E} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.31)$$

对于三参数的威布尔分布变形系数 CV 为:

$$CV = \frac{\sqrt{D}}{E} = \frac{\eta^2 \sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}}{\gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)} \quad (3.32)$$

3.4 应用实例

假设: 根据统计, 飞机上的某时寿件的使用寿命为 (单位: 飞行小时): 350, 380, 400, 430, 450, 470, 480, 500, 520, 540, 550, 570, 600, 610, 630, 650, 670, 730, 770, 840。

对该数据进行线性拟合, 数据需要进行如下处理: 把实验数据或者测得的数据从小到大排列, 得到顺序的统计量。计为: $x_1, x_2 \dots x_n$ 。利用上面得到的统计量, 估计总体的可靠度 $R(x_i)$ 。 $R(x_i) = 1 - i / (n + 1)$ $i = (1, 2 \dots n)$ 或者 $R(x_i) = 1 - (i + 3) / (n + 4)$ $i = (1, 2 \dots n)$ 。其中 $R(x) = 1 - F(x)$ 。(n 为统计数据个数)

对上述数据进行处理后得到如表 3.2 所示, 其为该部件的失效函数及可靠度结果。

表 3.2 失效函数及可靠度结果

序号 i	故障数据	$\hat{F}(t_i)$	$\hat{R}(t_i) = 1 - (i+3)/(n+4)$
1	350	0.8333	0.1667
2	380	0.7917	0.2083
3	400	0.7500	0.2500
4	430	0.7083	0.2917
5	450	0.6667	0.3333
6	470	0.6250	0.3750
7	480	0.5833	0.4167
8	500	0.5417	0.4583
9	520	0.5000	0.5000
10	540	0.4583	0.5417
11	550	0.4167	0.5833
12	570	0.3750	0.6250
13	600	0.3333	0.6667
14	610	0.2917	0.7083
15	630	0.2500	0.7500
16	650	0.2083	0.7917
17	670	0.1667	0.8333
18	730	0.1250	0.8750
19	770	0.0833	0.9167
20	840	0.0417	0.9583

根据表 3.3 所示结果，通过 matlab 作图可以得到其失效函数曲线图 3.3 和可靠度函数曲线图 3.4。

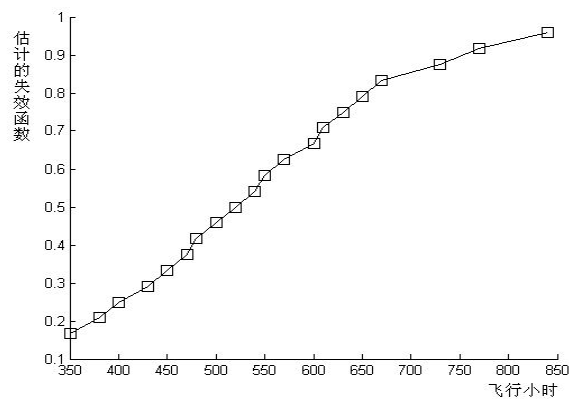


图 3.3 该时寿件的失效函数

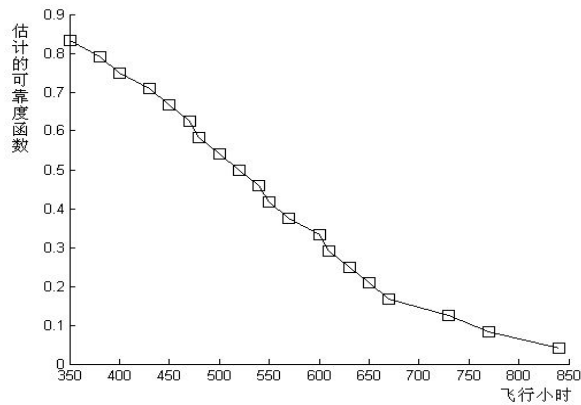


图 3.4 该时寿件的可靠度函数

将对数据处理的结果进行拟合，得到了关于泊松分布、指数分布和威布尔分布参数的统计，得到这三种分布的参数，并通过 K-S 检验对这三种分布是否满足数据所呈现的特征进行检验，并得到分析数值，进行对比，判断这组数据近似满足的分布。结果表 3.3 所示：

表 3.3 数据统计分析及 K-S 检验		
分布统计	分布参数	K-S 检验值
正态分布	$\mu = 514.2, \sigma = 59.2$	0.3265
指数分布	$\lambda = 510.4$	0.4963
威布尔分布	$\eta = 289.8, \beta = 2.04, \gamma = 304.2$	0.0819

由上表可知：三种分布中三参数的威布尔分布的 K-S 检验值最小，并且小于检验的 D 值。所以可以看出上述数据更符合威布尔分布。其分布函数为：

$$F(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{x-304.2}{289.8}\right)^{2.04}\right]$$

(3.33)

将威布尔分布的各个参数带入式(3.30)中。可以求得在飞行小时 $T=10000$ 时，不同航材保障率下此种备件的备件数。如表 3.4 所示：

表 3.4 飞行小时 $T=10000$ 时，不同航材保障率 y 下某航材备件数								
算例	形状参数	尺度参数	位置参数	$y=0.99$	$y=0.95$	$y=0.90$	$y=0.75$	$y=0.50$
威布尔分布	2.04	289.8	304.2	20	19	19	19	18

3.5 本章小结

通过时寿件的性质可以看出，因为其库存管理的方法应该是对一些较重要，较值钱

的备件进行失效数据的合理统计，建立合理的分析和较完善的矫正策略。对一些较重要，但是本身价值比较少的备件可以在库存量上有所宽裕，因为一旦发生缺件那么对公司运营和飞机的安全都会受到一定的影响。并且本章运用数理统计和线性回归的方法分析了某部件的失效分布，并通过式（3.30）可以计算出一定航材保障率下的备件数。可以为航空公司计算时寿件备件数提供一定的参考。

第四章 可靠性理论在可修件航材中的应用

可修件是航材库存的重要组成部分，相比消耗件来说可修件所占的比例较小，但是其所占的库存资金较多，所以对于可修件库存的管理比消耗件的管理更为重要。本章根据可修件的分类提出了周转件和修理件的最佳采购数量及采购时间模型，并分别通过数值运算对两种模型进行仿真，得到运算结果。

4.1 可修件概述

可修件，是指经过维护、修理或大修以后可以重复使用的航材^[51]。可修件通常占库存比例很大，所以可修件的管理关系到航空公司的合理资金周转。一方面，可修件对航空公司的安全飞行至关重要，飞机的安全运营往往离不开可修件（如：飞机发动机，飞机自动驾驶仪，气象雷达等）。可修件在整个航材储备系统中，每个可修件都有单独的序号，其在生产循环中都被跟踪、记录历史状态。另一方面，可修件价格一般比较昂贵，占据了航空公司很大的库存资金，如果可修件积压过多，会影响公司的资金周转及运营情况。表 4.1 和表 4.2 为某航空公司可修件的使用情况。

表 4.1 可修件价格采购表

件号	名称	采购价格（元）
755SUE2-4	COMPUTER	3220679.50
8063-215	MAIN ENGIN CONTROL	2000066.42
4082260-939	COMPUTER	1795158.20
168925-05-01	COMPUTER-FIL MANANG	1727517.98
735511A	CONATANT SPEED DR UNIT	1527705.67
4051600-914	COMPUTER-FIL CONTROL	1303823.25
4051601-938	PANEL ASSY	1278877.38
066-5000-2220	TCASII COMPUTER	1172093.50
4051600-913	FLIGHT CONT COMPUTER	1166309.83
312EDP2-2	WEATHER RADAR TRANSCEI	1075669.74

表 4.2 某航空公司可修件库存资金使用率

时间	入库	实际消耗	使用率
2014.4	13832618.16	10895498.6	78.77%
2014.3	30125254.36	12005285.6	39.85%
2014.2	15151481.9	18434228.42	121.67%
2014.1	36051238.08	10728605.16	29.76%
2013.12	26811564.1	8068438.18	30.09%
2013.11	30203236.26	16521318.98	54.70%
2013.10	13580144.86	4395157.88	32.36%
2013.9	28162233.28	11286429.02	40.08%
2013.8	7311326.3	6030168.8	82.48%
2013.7	17126123.6	10977650.36	64.10%
2013.6	11256432.6	9847072.5	87.48%
2013.5	13017752.62	2684035.52	20.62%
2013.4	11643734.46	8713387.54	74.83%
均值	19559472.35	10045175.12	51.36%

对于航空公司来说可修件的合理管理往往需要科学的需求预测,因为只有根据可修件的使用情况,合理预测其采购数量和采购时间才能有效的缓解航空公司资金的使用情况,从而更充分有效的运用资源使公司不断壮大。表 4.3 为航材可修件按寿命分布使用范围。

表 4.3 航材可修件按寿命分布使用范围表

分布类型	适用范围
指数分布	具有恒定故障率的部件;在耗损故障前正常使用的复杂部件或有随机高应力导致故障的部件;在一段规定的使用期内出现的故障为弱耗损型的部件也可视为指数分布
正态分布	轮胎磨损、变压器、灯泡、电动绕组绝缘、半导体器件、硅晶体管、直升机旋翼叶片、飞机机构、金属疲劳等
威布尔分布	滚动轴承、继电器、开关、短路器、某些电容器、电子管、磁控管、电位机、陀螺、电动机、航空发电机、蓄电池、机械液压恒速传动装置、液压泵、空气涡轮发动机、齿轮、活门、材料疲劳等。

而可修件可以根据维修方式和程度的不同,分为周转件与修理件。周转件是指故障后进行修复使其恢复适航性的部件。周转件虽然占库存总量的数量较少,但是往往价值却比较高,而且对飞机的飞行安全和飞机利用率有着较大的影响。修理件是指单个零件或一个由可拆换零件组成的组件,这些零件可以进行少数几次或有限次数的修理。基于经济情况考虑。大多数情况下将备件分为可修件,是因为如果一个产品出现故障时可修复,

而且修复的价格远远大于购买价格，那么就将这个备件归为修理件。

而维修是指为了使无效单元维持在可靠且安全满意的运动状态，如果单元发生故障或失效，则将其恢复到可靠及安全满意的运动状态^[52]。因此对于部件来说，对其进行维修的关键就是要把部件维持在一定的可靠度使其能够正常工作。根据部件维修后恢复的程度可以分为以下几类：

1)完全维修：维修后可以使恢复到初始状态，即“修复如新”。部件进行修理时，修复后部件的寿命分布和故障强度恢复到初始状态，部件使用状况如同新的一样，这样的维修方式可以看作完全维修。发动机的大修可以看作完全维修。

2)最小维修：维修使的部件的状态恢复到和损坏状态一样的情况时就做最小维修，经过最小维修后，系统的状态“修复如旧”。

3)不完全维修：部件经过维修后部件的状态有所改善，但是部件的初始状态有一定差距，这种介于“修复如旧”和“修复如新”之间的状态，即最小维修和完全维修之间的状态叫做不完全维修。

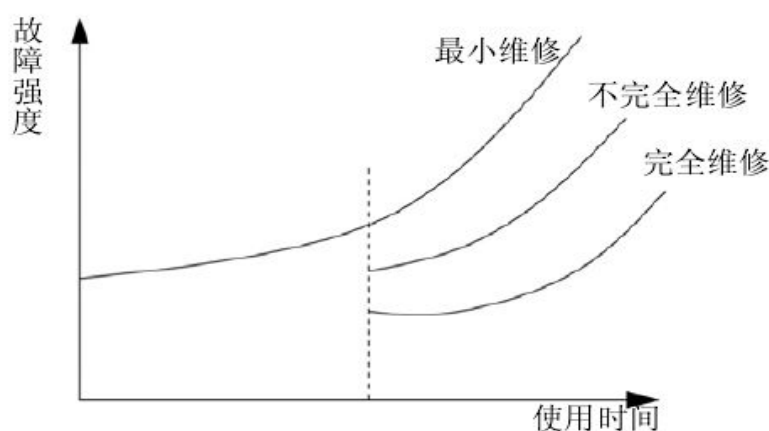


图 4.1 维修程度及故障强度关系

4.2 周转件最优数量及时间模型

周转件在航材储备项数上虽只占 20%，但在库存资金上却占到了 80%左右^[53]。所以对周转件的订货数量和订货周期的研究对航空公司节约成本有着重要意义。由于周转件一般采购时费用比较昂贵，过早采购会占用资金成本，产生仓库管理费用等，太迟则会影响航材保障率，进而影响航空公司安全运营。但现在很多研究都偏向采购数量的研究，

而对最优采购时间研究较少。本节对基于指数型寿命件及维修过程服从指数分布的完全可修过程进行研究，通过指数型可修备件最优订购数量和最优订购时间的研究，建立了基于一定保障度下的完全可修备件的最优采购数量和采购时间模型。希望可以为航空公司备件采购提供一定的指导意义。

4.2.1 建模理论

对于服从指数分布的周转件维修过程可以看作一个马尔科夫系统。这一过程如图 4.2 所示：当系统中的使用状态比维修后能够恢复到使用的次数多的情况（即： $\lambda t_j - \mu t_{j+1} = 1$ ）时，库存系统发生缺件。利用这个关系可以推导出系统首次出现备件短缺的时间 T_N 的大小^[54]。

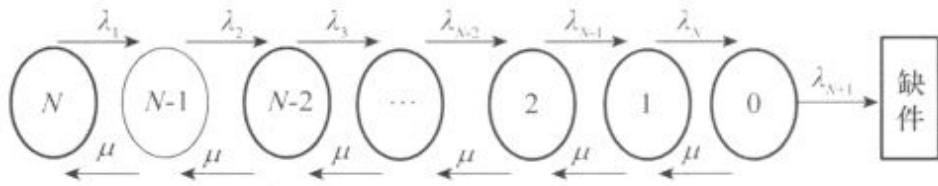


图 4.2 马尔科夫系统原理图

因为系统发生故障转移的时间 $t_j = 1/\lambda_j$ ，又因为发生故障的时间比飞机维修的时间多一次，即 $\lambda t_j - \mu t_{j+1} = 1$ ，那么可以得到：

$$t_j = \frac{1}{\lambda_j} + \frac{\mu}{\lambda_j} t_{j+1} = t_{N+1} + \frac{\mu}{\lambda_{j+1}} t_{j+1} \quad (4.1)$$

其中：

λ_j —部件第 j 次使用时寿命服从指数分布的参数；

λ —部件失效服从指数分布的参数，即每次失效的平均值 $\lambda N = \sum_{j=1}^N \lambda_j$ ；

μ —部件维修时间服从指数分布的参数；

t_j —部件第 j 次发生系统转移的时间；

N — 为系统的库存数量;

令 $\lambda N = \sum_{j=1}^N \lambda_j$, $\eta = \frac{\mu}{\lambda} (\frac{\mu}{\lambda} > 1)$, 那么可以得到 t_1 与 t_{N+1} 的关系为:

$$t_1 = \left\{ 1 + \frac{\mu}{\lambda} + \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^N \right\} t_{N+1} = \frac{\eta^{N+1} - 1}{\eta - 1} t_{N+1} \quad (4.2)$$

则由上式可推导出可修件备件数为 N 的情况下首次出现缺件的时间 T_N 为:

$$T_N = \sum_{j=1}^{N+1} t_j = \frac{1}{\lambda(\eta-1)} \left(\frac{\eta^{N+2} - 1}{\eta - 1} - N - 2 \right) \quad (4.3)$$

因为使用寿命和维修时间都服从指数分布, 那么部件在 T 时间下的可靠度 P 为:

$$P = e^{-\frac{T}{T_N}} \quad (4.4)$$

4.2.2 模型建立

为方便模型的建立, 假设: 修理件的维修时间和使用寿命服从指数分布, 部件价格在使用中不发生改变, 货源充足, 到货时间忽略不计; 且维修部件的维修方式满足完全可修备件 (如图 4.3 所示), 即满足部件进行维修时, 每次维修后, 部件的性能与初始一样, 即“修复如新”。

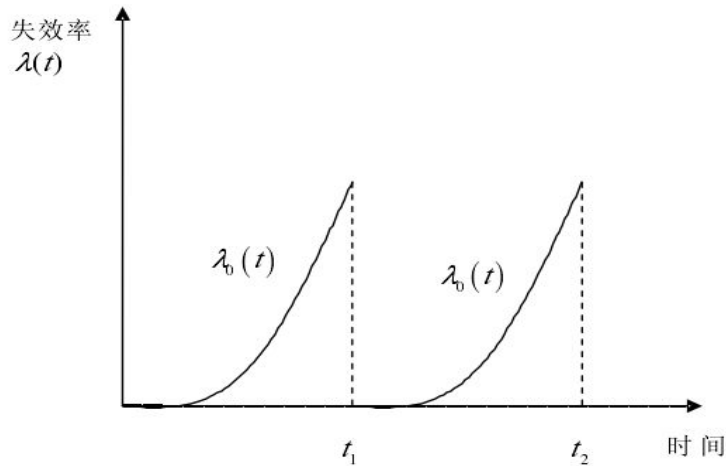


图 4.3 完全维修条件下的航材失效率

对于飞机的某可修部件, 设其部件的订购时间为 T^* , 在 $(0, T^*]$ 时间内, 其未订货之

前，库存量为 S 的情况下，设其部件保障率为 P_s ；在 $(T^*, T]$ 时间内，其订货量为 Q 的情况下，设其部件保障率为 P_Q ；那么，由式(4.4)可知在库存量为 S 的情况下部件可靠度 P_s 为：

$$P_s = e^{-\frac{T_1}{T_s}} \quad (4.5)$$

其中： T_s 为系统首次缺件的时间，将备件数 S 带入式(4.3)可以得到：

$$T_s = \frac{1}{\lambda(\eta-1)} \left(\frac{\eta^{S+2}-1}{\eta-1} - S - 2 \right) \quad (4.6)$$

在订货周期 T^* 后， $T_2 \subseteq (T^*, T]$ 库存量为 S ，订货量为 Q 。那么，由式(4.4)可知订货的部件可靠度 P_Q 为：

$$P_Q = e^{-\frac{T_2-T^*}{T_Q}} \quad (4.7)$$

其中， T_Q 为系统首次缺件的时间，将系统采购备件数量为 Q 后，备件总数变为 $S+Q$ 带入式(4.3)可以得：

$$T_Q = \frac{1}{\lambda(n-1)} \left(\frac{\eta^{Q+S+2}-1}{\eta-1} - Q - S - 2 \right) \quad (4.8)$$

那么由式(4.5)和(4.7)可以得到部件在 T 时间下不发生缺件的可靠度 P 为：

$$P = P_s * P_Q \quad (4.9)$$

从航空公司的经营性角度考虑，对航材进行采购时需要使得航材保障率达到一定的数值，即航材保障率必须大于 p 。从而使部件可靠度 $P = P_s * P_Q$ ，使得可靠度达到规定要求，进而满足部件的航材保障率，使得采购时间可以延缓，从而使得库存积压减少，资金周转率增加。

因此以 T^* 最大为目标函数，将航材采购数量 Q 迭代进入下式，并以规定的航材保障率为约束，则最优订购时间的求解模型如下：

$$\begin{aligned}
& \max \quad T^* \\
& \min \quad N^* \quad N=1,2,3,\dots \\
& s.t \quad P = P_S * P_Q \geq p
\end{aligned} \tag{4.10}$$

其中：

P —在时间周期 T 内的部件可靠度；

T_{\max}^* —为备件的最佳订购时间；

N_{\min}^* —最小的采购数量；

p —规定的航材保障率，那么 $1-p$ 为缺货风险；

航材的保障率 p 不一定要过高，一般为稳定在 90%-92% 之间，为了达到航材保障率实际在 97%-98% 左右，以确保飞机正常运营，余下的 6%-8% 左右的非正常航材发付率可通过其他方式来解决，如通过 AOG 订货、AOG 抢修、借件、串件、及航空公司之间的协作和互助来保证^[55]。

4.2.3 周转件模型仿真及分析

设某部件的使用时间服从 $\lambda = 0.0075$ 的指数分布，维修时间服从 $\mu = 0.0135$ 的指数分布（即： $\eta = 1.8$ ）；在 $T=5000$ 小时，备件存储 $S = 5$ 的情况下，取航材保障率 $p = 92\%$ 。将上面各个参数带入模型(4.10)，并通过 matlab 程序进行仿真得到图 4.4 和图 4.5。

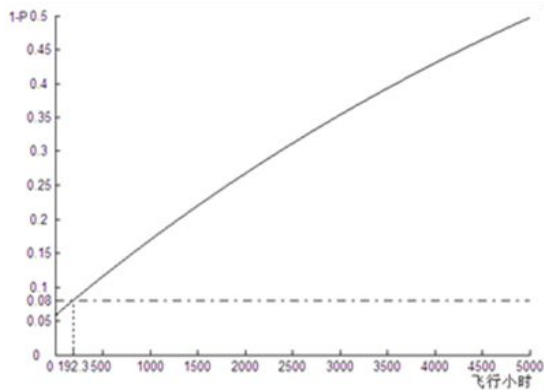


图 4.4 订货时间 T^* 对保障率的影响

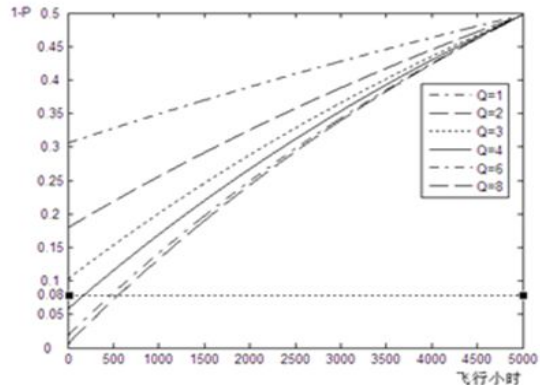


图 4.5 采购数量 Q 对订购时间影响

图 4.4 反映该部件订货时间对部件保障率的影响，当初始库存量 $S = 5$ ，备件的采购

数量 $Q=4$ ，航材保障率 $p=92\%$ 时，求解的备件最优订购时间为 192.3 飞行小时。

图 4.5 反映该部件备件采购数量对订购时间影响。对于库存量 $S=5$ ，分别取备件数 $Q=1、2、3、4、6、8$ ；最优订购时间分别为： $T^*=0、0、0、192.3、488.2、571$ 。

通过具体实例，分别在 $T=5000$ 小时，备件存储 $S=5$ ，航材保障率 $p=92\%$ 的情况下，对模型(4.10)分别取 $\lambda=0.0025$ 、 $\lambda=0.0050$ 和 $\lambda=0.0075$ ， $\eta=1.40、1.60、1.80、2.00、2.20$ 下进行仿真。表 4.4，表 4.5 和表 4.6 分别反映不同数值下最小订购数量和最优订货时间的大小。

表 4.4 方案 1 ($\lambda=0.0025, p=92\%$) 部件参数 $\eta=\mu/\lambda$ 对仿真结果的影响

部件参数 η	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
最小订购数量 (单位: 件)	9	4	2	1	—
最优订货时间 (单位: 小时)	66.7	90.6	540.9	3059.6	—

表 4.5 方案 2 ($\lambda=0.0050, p=92\%$) 部件参数 $\eta=\mu/\lambda$ 对仿真结果的影响

部件参数 η	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
最小订购数量 (单位: 件)	11	6	3	2	1
最优订货时间 (单位: 小时)	32.4	121.8	149.7	1059.1	3200.1

表 4.6 方案 3 ($\lambda=0.0075, p=92\%$) 部件参数 $\eta=\mu/\lambda$ 对仿真结果的影响

部件参数 η	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
最小订购数量 (单位: 件)	12	7	4	2	1
最优订货时间 (单位: 小时)	17.9	91.2	192.3	182.5	791.4

1)通过图 4.4，可以看出对于可修周转件，随着飞行小时的增加，航材的缺货风险在逐渐增加，并威胁着飞机的安全运营。所以备件订购时间的准确预测，即有利于缩短库存成本和航空公司资源浪费，也能减少飞机的安全隐患。图 4.5 反映了不同订购数量下，飞行小时的增加对航材缺货风险的影响，航材订购数量太少如 $Q=1, 2, 3$ 时，库存量满足不了航材保障率的最低要求，而订购数量过多如 $Q=6, 8$ 时，又会产生多余库存，造成资金的极大浪费。

2)对表 4.4、表 4.5 和表 4.6 中不同参数进行仿真，通过模型(4.10)对部件最小采购数量和最优采购时间进行求解，可以看出随着部件使用寿命参数 λ 的增长，备件数量逐渐

增加；而部件维修时间参数 μ 的增长，备件数减小。

4.3 修理件最优数量及时间模型

因为对于修理件来说，每次发生故障时，修理件都会进行不完全维修，这样会使得修理件的性能逐渐减退，维修成本逐渐升高。最终使得部件进行维修的成本大于更换成本，使维修变得没有意义。所以对于修理件的管理，最佳维修次数的确定对航材库存管理至关重要。本节结合可用度概念，并且考虑修理件维修最佳经济性因素来确定部件的最佳维修次数。并且根据部件的最佳维修次数，求得部件的最佳订货周期及最佳订货时间。这样有利于航空公司对修理件的管控。

4.3.1 不完全维修条件下可用度分析

可用度用来度量可靠性、维修性和后勤保障对于系统运行有效性的综合影响。当产品按照规定的方式运行、维护和保障时，在任一随机时刻或时期处于可工作的可能性。可用性可以看做是可靠性、维修性和保障性诸因素的函数。

系统的可用性能是系统诸多性能的总和，是可以反映出系统维修保障能力的参数。本模型假设在不完全维修的情况下，系统可用度的求解及

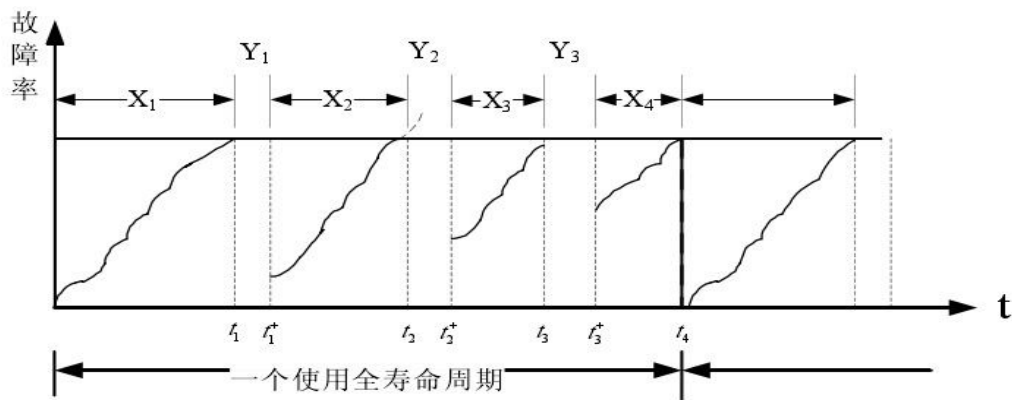


图 4.6 部件系统状态变化图

对于一个单部件系统，其工作的实际情况往往是不不断劣化的过程，即其使用寿命不断减小，而其维修时间不断增长。由于系统每次在使用和维修过程中都会导致系统无法修复和上次一样的状态。所以部件越往后，其使用的时间越短，维修的时间会越长，最后处在无限的修理中而不能恢复使用。

这样的过程刚好符合准更新过程，模型假设：

- 1) 部件运营时是全新的，寿命周期从 0 开始。
- 2) 部件的使用和维修时，发生故障都进行不完全维修，每次拆换件时间忽略不计。
- 3) 部件达到一定维修次数时，部件更换，即部件使用周期结束。

当部件开始使用的时候，意味着它使用周期的开始。从部件使用开始进行不完全维修，当维修次数越来越多时，飞机的维修性能和使用性能也急剧下降。直至此部件维修后经济性较差时，这个时候进行更换。

因此，当部件进行不完全维修的时候，其使用时间不断减少，维修时间和维修成本将不断上升，当部件进行 $m-1$ 次维修的时候，即部件发生第 m 次故障时，飞机的维修性能降到最低，即使再进行修复此部件也不能修复到一个令人可以接受的程度。所以本模型是基于经济性和可用度考虑，对不完全可修部件的最优维修次数问题进行求解，力图达到经济性最优的模型。

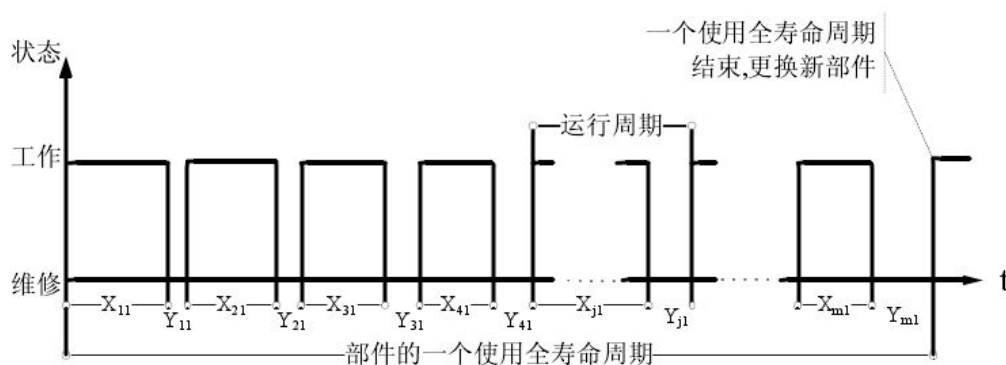


图 4.7 部件全寿命周期图

因为部件进行不完全维修，部件每进行一次维修，部件的使用性能将会以 α 的速率下降，部件的维修难度将会以 β 的速率上升。这将导致部件的使用时间不断减少，而部件的维修时间不断增加。

在一个部件的一个使用周期下，部件分为 m 个使用阶段，即每个阶段都分为使用时间和维修时间。

j 表示一个部件使用周期第 j 个阶段， $1 \leq j \leq m$ 。

X_j 表示部件在使用周期第 j 个阶段下，使用时间的大小。

Y_j 表示部件在使用周期第 j 个阶段下，维修时间的大小

μ_j 表示使用时间 X_j 的数学期望。

λ_j 表示维修时间 Y_j 的数学期望。

μ 表示每个周期内使用时间的均值。

λ 表示每个周期内维修时间的均值。

α 表示部件使用时间的递减因子， $0 < \alpha < 1$ 。

β 表示部件维修时间的递增因子， $\beta > 1$ 。

在准更新过程中， α 表示部件使用时间的递减因子，而 β 表示部件维修时间的递增因子。则有：

$$\begin{cases} \mu_{j+1} = \alpha \mu_j \\ \lambda_{j+1} = \beta \lambda_j \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j}{m} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_m}{m} \\ &= \frac{\mu_1 + \alpha \mu_1 + \alpha^2 \mu_1 + \dots + \alpha^{m-1} \mu_1}{m} \\ &= \frac{\mu_1 (1 - \alpha^m)}{(1 - \alpha)m} \end{aligned} \quad (4.12)$$

同理，可以求得维修时间的总和为：

$$\lambda = \frac{\lambda_1 (1 - \beta^m)}{(1 - \beta)m} \quad (4.13)$$

通过数学方法，根据准更新过程可以得到系统的可用度：

$$A_{av} = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} \right]^{-1} \quad (4.14)$$

那么，将部件不完全维修周期中使用时间总和 μ 和维修时间总和 λ 带入上式，可以不完全维修下系统的可用度为：

$$A_{av} = \left[1 + \frac{\lambda_1 (1 - \beta^m) \cdot (1 - \alpha)}{\mu_1 (1 - \alpha^m) \cdot (1 - \beta)} \right]^{-1} \quad (4.15)$$

其中， m 表示系统的不完全维修情况下需要的备件数， $m-1$ 表示系统的维修次数。

4.3.2 修理件最佳维修次数模型

对于一个修理件，在不能“修复如新”的情况下，对此种部件进行的维修是不完全维修，即随着部件的维修次数增加，使用寿命逐步降低，维修时间和维修难度逐渐加大。这样，一定会使维修的经济性下降，在某时刻会使得部件的维修成本大于更换成本。本模型主要讨论在最优维修经济性下的更换策略。

当系统发生故障时，对系统进行不完全维修，在系统发生 N 次维修后，该部件的维修经济性超过了部件的使用成本，那么在发生故障后，可以考虑更换此部件。假设：

1)从部件使用周期开始是全新部件，每次发生故障时，对部件进行不完全维修，部件不能“修复如新”，当部件的维修性能下降超过飞机的换件的经济性时，对部件进行更换。

2)当部件发生故障时，对部件立即进行修理，等待时间不计。

3)部件单位时间维修费用为 C_r ，单位时间的经济效益为 C_w ，对部件进行一次更换的费用为 C 。

当部件进行运行不完全维修时，因为部件不能修复到和上一次使用一样的状态。所以，部件的使用经济性会越来越差，直到有一天部件将处在无限的修复中。但是在这之前，一定会存在一个状态，即飞机的维修成本大于部件的更换成本，这一状态就是飞机的最优更换状态。本模型就是在这个问题基础上进行求解的。

系统长期运行的期望效益等于工作产生的效益与维修花费成本之间的差值。设 $R(N)$ 为部件在使用周期内的运营的单位效益期望值，即效益率：

$$R(N) = \frac{\text{运营周期内效益}}{t}$$

从而可以得出，部件长期运营的期望值为：

$$R(N) = \frac{C_w E\left(\sum_{j=1}^N X_j\right) - C_r E\left(\sum_{j=1}^{N-1} Y_j\right) - C}{E\left(\sum_{j=1}^N X_j\right) + E\left(\sum_{j=1}^{N-1} Y_j\right)} = \frac{C_w \sum_{j=1}^N \mu_j - C_r \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j - C}{\sum_{j=1}^N \mu_j + \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j} \quad (4.16)$$

那么最优更换时间 N^* 就是当部件运营的期望值 $R(N)$ 最大时，部件的进行最优更换的次数，即经济性最优更换时机。

$$\text{Max}\{N^*\} = \text{Max} \left\{ \frac{C_w \sum_{j=1}^N \mu_j - C_r \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j - C}{\sum_{j=1}^N \mu_j + \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j} \right\} \quad (4.17)$$

$$s.t \quad A_{av} \leq A_s$$

利用差值分析法求得最优更换次数 N^* ，对其寻找最大值，令：

$$R(N+1) - R(N) = \frac{C(\mu_{N+1} + \lambda_N) - h_N(C_w + C_r)}{\Delta N} \quad (4.18)$$

$$\text{其中, } h_N = \sum_{j=1}^N \mu_j \sum_{j=1}^N \lambda_j - \sum_{j=1}^{N+1} \mu_j \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j; \quad \Delta N = \left(\sum_{j=1}^{N+1} \mu_j + \sum_{j=1}^N \lambda_j \right) \left(\sum_{j=1}^N \mu_j + \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j \right).$$

由更新过程可知： $h_N = a^{N-1} \beta^{N-2} \mu_1 \lambda_1 (\beta - \alpha)$ 则：

$$f_N = \frac{\mu_{N+1} + \lambda_N}{h_N} = \frac{\alpha^N \mu_1 + \beta^{N-1} \lambda_1}{\alpha^{N-1} \beta^{N-2} \mu_1 \lambda_1 (\beta - \alpha)} \quad (4.19)$$

那么整理得到：

$$R(N+1) - R(N) = \frac{h_N}{\Delta N} (f_N \cdot C - (C_w + C_r)) \quad (4.20)$$

所以，当 $\frac{h_N}{\Delta N} (f_N \cdot C - (C_w + C_r)) \geq 0$ 时，式(4.20)中 $R(N+1) \geq R(N)$ 。

从式(4.20)中可以看出，要求得最优更换次数 N^* ，只要令运营的期望值

$$R(N+1) \geq R(N) \text{ 成立, 即 } f_N \leq \frac{C_w + C_r}{C}.$$

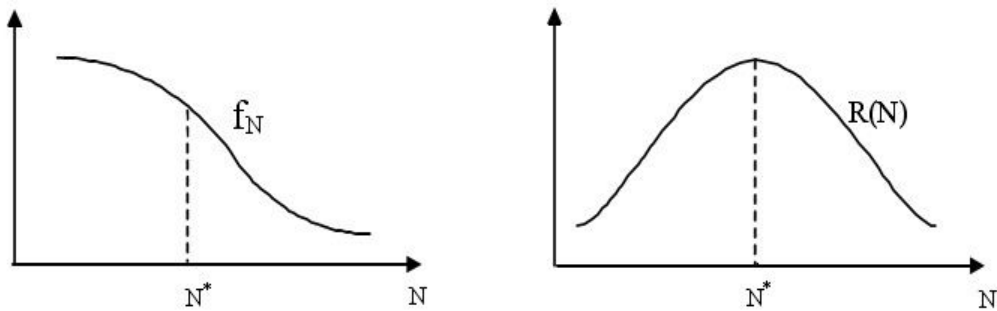


图 4.8 期望效益率函数关系图

对于一个不完全可修模型，因为在对部件进行不完全维修的过程中，部件的使用性能逐渐，部件的维护难度却不断增加，所以，部件一定会在某时刻发生维修的经济性不如替换的经济性。由上面所述的不完全维修条件下最优更换次数的求解方法，可以求得最优更换次数。

现有的可修复备件模型是由马尔科夫随机动态系统推导出的^[19]。假设某部件的失效率服从指数分布，参数为 λ 。部件的维修服从指数分布，参数为 μ 。对于单一备件，备件的最优更换次数为 $m+1$ ，备件进行了 m 次更换。

4.3.3 修理件采购模型建立

假设：修理件的维修时间和使用寿命服从指数分布，部件价格在使用中不发生改变，货源充足，到货时间忽略不计；飞机进行更换时，每次优先更换使用次数相同的部件，直至用完后更换使用次数增加的部件。

对于修理件，每次进行不完全维修后，部件的维修性能和使用性能都逐渐减弱，达到一定程度后，部件最终会无法满足维修性要求。那么根据部件的维修经济性由式(4.14)可以求出部件的最佳维修次数 N^* ，并且当部件的维修次数达到 N^* 时，部件报废，应该考虑对部件重新进行采购。假设该部件所有的备件数为 N_i ，使用时间的递减因子为 α 和部件维修时间的递增因子为 β ，并令 $\eta = \frac{\alpha\mu}{\beta\lambda}$ 带入式(4.3)中，可以得到首次缺件的时间为：

$$T_{N_i} = \sum_{j=1}^{N+1} t_j = \frac{1}{a^{i-1}\lambda(\eta^{i-1}-1)} \left(\frac{\eta^{(i-1)(N+2)}-1}{\eta^{i-1}-1} - N - 2 \right) \quad (4.21)$$

部件进行第 i 次维修和第 j 次更换时，部件首次缺件的时间为 $T_{(S_i+Q_{i-1})_j}$ ，即：

$$T_{(S_i+Q_{i-1})_j} = T_{S_i} + T_{Q_{i-1}} \quad (4.22)$$

其中：

T_{S_i} 为第 i 次维修时，备件数量为 S 时，部件首次缺件时间。

$T_{Q_{i-1}}$ 为第 $i-1$ 次维修时，备件采购数量为 Q 时，部件首次缺件时间。

求得部件进行第 i 次维修和第 j 次更换时缺件时间 $T_{(S_i+Q_{i-1})_j}$ ，并且如果这一时间能够

满足部件的采购周期 T ，即： $T_{(S_i+Q_{i-1})_j} \geq T$ ，那么部件不进行采购。如果部件进行不完全维修的缺件时间 $T_{(S_i+Q_{i-1})_j}$ 不能满足部件的采购周期 T ，即： $T_{(S_i+Q_{i-1})_j} < T$ ，那么部件进行采购，采购的数量可以根据要求的航材保障率 p 求得。

在航材没有进行采购时，在现存部件为 S 的情况下，部件的最佳采购时间为 T^* ，飞机在飞行时间 $T_1 \subseteq (0, T^*]$ ，求得部件进行第 i 次维修的可靠度 P_{S_i} 为：

$$P_{S_i} = e^{-\frac{T_1}{T_{S_i}}} \quad (4.23)$$

而当部件进行采购数量为 Q 时，部件在最佳采购时间 T^* 后进行采购。飞机在飞行时间 $T_2 \subseteq (T^*, T]$ ，求得部件进行第 i 次维修和第 j 次更换的可靠度 $P_{(S_i+Q_{i-1})_j}$ 为：

$$P_{(S_i+Q_{i-1})_j} = e^{-\frac{T_2}{T_{(S_i+Q_{i-1})_j}}} \quad (4.24)$$

当部件的维修次数 i 和部件的最佳维修次数 N^* 相同时，部件进行报废，那么 $S_i = 0$ ， $T_{S_i} = 0$ ， $S_i = Q_{i-1}$ 。如果备件的首次缺件时间 T_{S_i} ，当备件数量为 S_i 的情况下，部件的可靠度 P_{S_i} 能满足航空备件航材保障率 p 的最小要求，如果并且求得采购数量 Q 。则最优订货模型为：

$$\begin{aligned} \max \quad & T^* \\ \min \quad & Q \quad Q=1,2,3\dots \\ s.t \quad & p = P_{S_i} * P_{(S_i+Q_{i-1})_j} \geq p \end{aligned} \quad (4.25)$$

由上述关系整理得到修理件备件数的计算的步骤为：

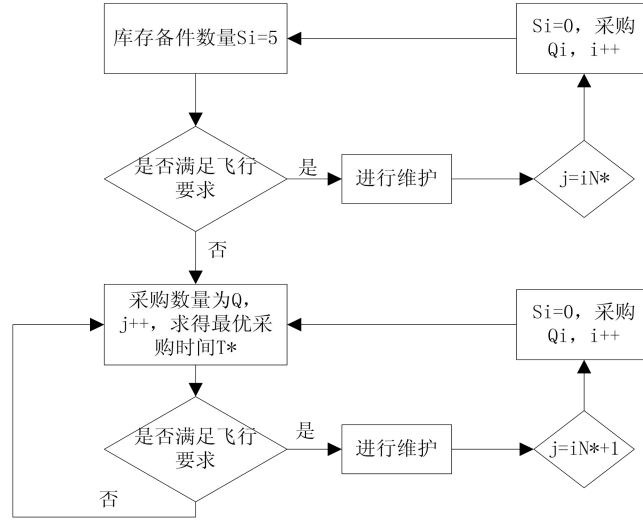


图 4.9 修理件备件数计算流程图

4.3.4 修理件模型分析与仿真

对于航材修理件，某部件的失效率服从指数分布，参数 $\lambda = 0.0075$ ；部件维修的时间分布也服从指数分布，参数 $u = 0.0135$ ；部件使用时间的递减因子 $\alpha = 0.95$ ，部件维修时间的递增因子 $\beta = 1.05$ 。该部件单位时间进行维修费用为 $C_r = 100$ ，单位时间产生的经济效益为 $C_w = 200$ ，对部件进行一次更换的费用为 $C = 8000$ 。

当该航空部件进行使用时，对部件进行不完全维修，部件的使用性能是随着递减因子逐渐递减，失效率变大。而维修时间却是随着递增因子逐渐增加的。通过对该部件维修过程的分析，运用准更新过程，带入式(4.15)进行数据迭代。

$$A_{av} = \left[1 + \frac{\lambda_1 (1 - \beta^m) \cdot (1 - a)}{\mu_1 (1 - a^m) \cdot (1 - \beta)} \right]^{-1}$$

可以得到维修次数与可用度的关系如表 4.7 所示。

通过部件的可用度数据，可以看出：随着部件的不断使用，因为性能的衰退，部件的可用度逐渐减小。将数据通过 matlab 整理成曲线，可以求得该部件使用次数与可用度的关系为图 4.10 所示。

表 4.7 部件维修次数与可用度关系

维修次数	可用度	维修次数	可用度	维修次数	可用度	维修次数	可用度
1	0.973	14	0.949	27	0.907	40	0.837
2	0.971	15	0.947	28	0.903	41	0.831
3	0.970	16	0.944	29	0.899	42	0.824
4	0.968	17	0.941	30	0.894	43	0.816
5	0.967	18	0.939	31	0.889	44	0.809
6	0.965	19	0.936	32	0.884	45	0.801
7	0.964	20	0.933	33	0.879	46	0.793
8	0.962	21	0.930	34	0.874	47	0.785
9	0.960	22	0.926	35	0.868	48	0.777
10	0.958	23	0.923	36	0.863	49	0.768
11	0.956	24	0.919	37	0.857	50	0.759
12	0.954	25	0.915	38	0.850		
13	0.952	26	0.911	39	0.844		

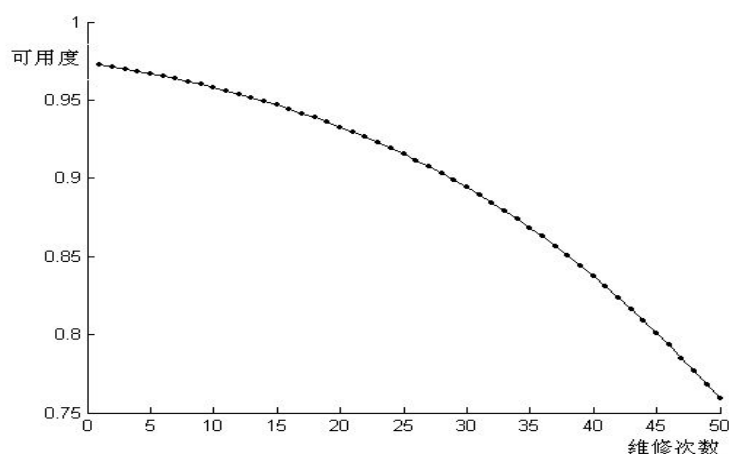


图 4.10 不完全维修时维修次数与可用度的关系

根据上文对部件维修次数与维修经济性的分析，部件进行维修时单位时间的维修费用为 $C_r=100$ ，单位时间的经济效益为 $C_w=200$ ，对部件进行一次更换的费用为 $C=8000$ 。那么可以求得：

$$\frac{C_w + C_r}{C} = \frac{200 + 100}{8000} = 0.0375$$

由式(4.20)可知：该部件的维修次数 N^* 与 f_N 的关系为：

$$\text{当 } N^* = 5 \text{ 时, } f_N = 0.0385 > \frac{C_w + C_r}{C}$$

$$\text{当 } N^* = 6 \text{ 时, } f_N = 0.0368 < \frac{C_w + C_r}{C}$$

通过对维修次数 N^* 与维修经济性的分析可以得到：对于该型部件，其使用寿命和维修都服从指数分布，且部件的分布参数逐渐递减的情况下。通过计算求得该部件的最优维修次数 $N^* = 5$ 时维修经济性最佳。这时该部件可用度 $A_s = 0.9669$ ，能够满足部件的可用度要求。

通过对该部件维修过程的分析，可以看出当部件在不断使用的过程中，部件的使用寿命不断减少，维修时间不断增加，最终到达一定的使用次数后，部件无法继续使用，部件报废。这样会影响部件的库存数量和采购时间。通过对分析，假设：该部件在飞行采购周期为 $T = 5000$ ，部件的初始备件数 $S = 5$ 。通过对维修经济性的分析，部件的最佳维修次数 $N^* = 5$ 时，部件的维修经济性最佳。

根据图 4.9 的求解步骤可以求得：部件在刚开始使用时，备件的库存 $S = 5$ 的情况下不能满足备件的保障率要求，需要对该部件进行补充。通过式(4.25)可以求出该部件需要在 192.3 飞行小时对该部件进行采购，其中采购数量 $Q = 4$ 。这样才能保障部件在飞行小时 $T = 5000$ 的情况下，航材保障率 $p \geq 92\%$ 。

飞机在采购完成后，将库存中的部件使用完的时间为 $(S + Q) \frac{1}{\lambda} = 1200$ 飞行小时，这时部件的使用性能逐渐衰退，部件的使用寿命参数 λ 衰退至 0.00831。这时该部件的失效率能够满足飞机的飞行要求。以此类推，当飞机第五次性能衰退的部件在飞机上使用，即 $i = 5$ 时，该部件的失效参数为 $\lambda = 0.0097$ 。由式(4.25)分析可知，该部件在第二个部件使用完时，即 $S_5 = 7$ 时，部件需要对航材进行补充才能满足飞机的飞行要求，采购数量为 $Q_1 = 1$ ，最佳采购时间 $T^* = 309.5h$ ，如图 4.11 所示。当部件进行第五次更换后，部件的失效参数为 $\lambda = 0.0097$ ，备件数 $S_5 = 7$ ；但是却不能满足航材保障率需求，需要对该部件进行采购。图 4.11 分别为采购数量为 $Q = 1, 2, 3, 4, 6, 8$ 时，部件最佳采购时间 T^* 与航材保障率的关系。从图中可以看出当采购数量 $Q_1 = 1$ 时，能够满足航材保障率要求。

而由于余下的部件将不断报废,需要飞机每隔 103.2 飞行小时进行对库存中的备件进行补充,补充数量为 1,即 $Q_1 = Q_1 + 1$ 。

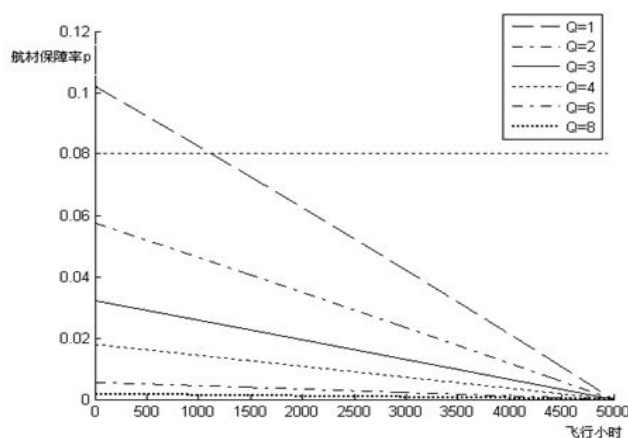


图 4.11 部件第 5 次维修后不同采购数量 Q 与航材保障率 p 的关系

那么对于该库存中的备件,在进行了如上的使用过程后,对该库存中的部件进行第 1 次更换后,备件数目 $S_6 = 7$,那么根据式(4.25),可以得到部件需要采购 $Q_1 = 1$,并求得最佳采购时间 $T^* = 254.2h$,如图 4.12 所示。当库存中的备件全部报废后,新的备件的数量为 $S_6 = 7$,部件的失效参数为 $\lambda = 0.0075$ 。通过式(4.25)计算得到当采购数量发生改变为 $Q=1,2,3,4,6,8$ 时,部件的部件最佳采购时间 T^* 与航材保障率的关系如图 4.12 所示。从图中可以看出当采购数量 $Q=2$,最佳采购时间 $T^* = 254.2h$ 时,能满足航材保障率要求。

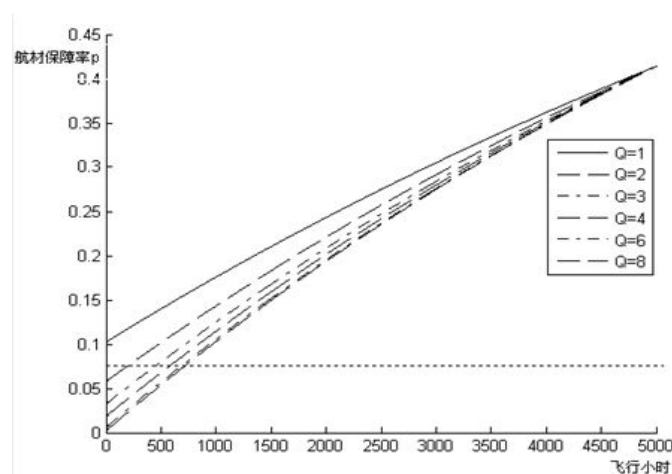


图 4.12 第一次更换后采购数量 Q 对航材保障率 p 的影响

4.3.5 修理件模型结果分析

通过对某型修理件航材的分析及仿真,可以看出:对于修理件航材,因为每次对该部件进行维修时,部件的性能都会衰退,即部件的使用时间会增加而维修时间会变长,这样会使得部件在某时刻维修经济性减弱必须对该部件进行更换。通过上面的仿真分析,当该部件进行使用时,部件的使用性能逐渐衰退,可用度下降。通过对该部件的维修经济性的分析与计算,运用上文(4.20)对该航材维修次数进行确定。可以根据进行计算得到该修理件在进行维修及使用时的最佳维修次数。进而可以得到部件在一定初始库存和使用时间的条件下,其每次使用是否能够满足飞机最低航材保障率,如果能满足需要那么继续使用,如果不能满足需要,根据式(4.25)确立部件在使用过程确立航材备件与航材保障率的关系,确定在一定条件下的备件最佳采购时间及采购数量。如果维修次数到达最佳经济维修次数,那么对使用过的航材进行报废,对部件进行从新计算。根据备件数量是否能满足飞机的航材保障率来确定部件是否需要更新备件数量。

4.4 本章小结

本章根据可修件划分的不同种类,在周转件和修理件进行不同的维修方式后,周转件的使用性能与其初始性能相同,而修理件却因为使用性能的逐渐衰退,当其维修经济性下降到一定程度时,对其进行报废。根据周转件和修理件的不同特性,本章分别对其建立了最优采购数量及时间模型,并分别通过数值仿真,确立了两种不同种类的可修件在一定订货周期条件下的采购数量及采购时间的求解方法。

第五章 总结与展望

近年来我国航空运输业蓬勃发展，为我国经济发展做出了巨大贡献。航空业不仅要维持自身的发展而且还要提供一定的公共服务。但是随着我国改革的不断深入和高铁不断的建设，人们可选择的运输方式也越发多种多样。而航空运输占据的市场份额确实相对来说比较低并且航空业的利润往往也是极低的。所以如何控制成本和增加收益对航空公司来说是至关重要的。而航材费用通常占据了比较大的成本，这样看来合理的控制和科学的预测航材需求对航材成本的降低有着重要影响。

本文介绍了我国航空业的发展现状和航空公司成本的组成，对于航空公司这样的微利企业，要想提高企业竞争力，除了好的营销手段还要从公司的运营成本控制着手。从国外航空公司的成本可以看出航材成本这方面国内航空公司还是有很大的压缩空间的。而航材成本的大小又往往取决于航材需求的预测。所以本文分别针对不同类型的航材进行了不同方面的预测。

对于航空消耗件，因为一般是多为一次消耗的零件或组件，且价格比较低廉，本文对这种航材的采购不做论述。主要论述了：通过分析时寿件不同的分布情况下的部件失效函数，确定其失效函数类型及参数，通过计算一定水平的航材保障率来确定航材备件数目的多少；对于航空周转件，通过分析其失效率和维修时间都服从指数分布的马尔科夫维修过程，建立了周转件的采购时间和采购数量模型，并且对其进行了仿真；对于航空修理件，通过准更新过程来描述不完全维修的过程，并以维修总费用为目标函数，求得了部件的经济最佳更换次数，对其数值进行优化，最终求得最优采购数量及最佳采购时间。

本文可能的创新之处：(1)根据可修件的划分，将可修件分为周转件和修理件。确立了航空周转件的采购时间和采购数量模型，并且做到在模型假设前提下，求得在一定航材保障率情况下的部件采购时间和采购数量。(2)通过分析部件的不完全维修过程，对修理件的时间弱化进行分析假设，以准更新过程为基础对部件维修进行分析，提出了修理件采购模型，并通过仿真得到在经济最优情况下的更换次数，最终求得采购数量及采购时间。

但是由于本人时间和精力有限，文章篇幅和自己已有的资料限制。很多很有益处的

模型没有进行深入研究，例如：周转件失效服从威布尔分布的采购数量研究或者周转件考虑送修时间和返修时间的研究，亦或是可修件利用虚拟因子的方法来虚拟维修过程，以航空公司总收益为目标函数，并最终确立了其采购数量和采购时间。

参考文献

- [1] 统计年鉴. 中华人民共和国国家统计局. 2014.
- [2] 何鼎顺. 航材的需求预测及库存优化研究[D]. 厦门:厦门大学, 2011.
- [3] 侯甲凯. 我国航材管理现状及发展趋势研究[J]. 现代商贸工业, 2013(14):91-93.
- [4] 吴亮德. 航材管理现状及我国的对策[J]. 科技经济市场, 2011(03):83-86.
- [5] 何爱云. 浅谈美联航航材库存管理[J]. 民航经济与技术, 2000 (11):11-14.
- [6] 王琨. 航材的采购与库存管理[D]. 南京:南京航空航天大学硕士论文, 2002.
- [7] 施鼎豪,韦国锋,谭克坚. 试析航空公司航材管理的经济效益[J]. 中国民航学院学报, 1999,17(02):45-50.
- [8] Lin D, Zuo M. J, Yam R.C.M. Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes [J]. Naval research Logistics, 2001, vol.48, pp.172-183.
- [9] Ben-Daya M, Alghamdi A S. On an imperfect preventive maintenance model [J]. In International Journal of Quality & Reliability Management, 2000, 17(6):661-670.
- [10] S. G Allen,D. A. D'espo. An ordering policy for repairable stock items[J]. Operations Research, 1968,16(3)-482-489.
- [11] 梭伦. 库存管理胜经[M]. 北京:中国纺织出版社, 2001.
- [12] 刘奇英,刘建庸. 马尔可夫决策过程引论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000.
- [13] S.G Allen,D,A,D'esopo, An ordering policy for repairable stock items [J]. Operations Research, 1968,16(3)-482-489.
- [14] Adel A Ghobbar,Chds H.Friend. The material requirements planning system for maintenance and inventory control:a note[J]. Elsevier Science,Journal of Air Transport Management, 2004(10):217-221.
- [15] Adel A Ghobar,Chris H Friend. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model[J]. Pergamon,Computers& Operations Research, 2003(30):2097-2114.
- [16] Thomas Mazzuchi,Refik Soyer. A bayesian perspective on some replacement Strategies

- t[J]. Elsevier Science, Reliability Engineering and System Safety, 1996(51):295-303.
- [17] Shey-Huei Sheu, Ruey Huei Yeh, Yuh-Bin Lin, et al. A bayesian perspective on age replacement with minimal repair[J]. Elsevier Science, Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65:55-54.
- [18] Kostas-Platon Aronis, Ioulia Magou, Rommert Dekker, et al. Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study[J]. Elsevier Science, European Journal of Operational Research. 2004(154):730-739.
- [19] Ruhul Sarker, Amanul Haque. Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation[J]. Elsevier Science, Applied Mathematical Modelling. 2004(24):751-760.
- [20] Amin-Naseri M R, Tabar B Rostami. Neural network approach to lumpy demand forecasting for spare parts in process industries [J]. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, 2008:1378-1342.
- [21] Nasiri Pour A, Rostam Tabar B, Rahimzadehaa. A hybrid neural network and traditional approach for forecasting lumpy demand[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 30:384-390.
- [22] Regattieri A, Gamberi M, Gamberini R, Manzini R. Managing lumpy demand for aircraft spare parts[J]. Journal of Air Transport Management, 2005.11:426-431.
- [23] Mabini M C, Christer A H. Controlling multi-indenture repairable inventories of multiple aircraft parts[J]. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(12):1297.
- [24] Fritzsche R. Cost adjustment for single item pooling models using a dynamic failure rate: A calculation for the aircraft industry[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(6):1065-1079.
- [25] Sun L, Zuo H, Liu W, et al. LRU Multi-echelon Inventory Optimal Model for Aircraft Parts Based on VARI_ METRIC Model. (English)[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics / Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao, 2013, 45(4):532.
- [26] Costantino F, Gravio G D, Tronci M. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints[J]. Reliability

- Engineering & System Safety,2013,119:95-101.
- [27] Heijden M C,Alvarez E M,Schutten J M J.Inventory reduction in spare part networks by selective throughput time reduction[J].International Journal of Production Economics,2013,147(2):509-517.
- [28] Basten R J I,Heijden M C,Schutten J M J.Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks[J].European Journal of Operational Research,2012,222(3):474-483.
- [29] Topan E,Bayidir Z P,Tan T.An exact solution procedure for multi-item two-echelon spare parts inventory control problem with batch ordering in the central warehouse[J].Operations Research Letters,2010,38(5):454-461.
- [30] 吕川,赵宇,张坚.飞机备件需求量的确定方法[J].北京航空航天大学学报,1995,21(04):130-135.
- [31] 尚柏林,张恒喜,刘晓东.飞机后续备件供应保障系统面向对象仿真[J].系统工程与电子技术,2001,23(7):38-40.
- [32] 赵淑舫,宁宣熙,吴桐水.航材需求预测模型研究[J].中国民航学院学报,2002(3):20-23.
- [33] 陈凤腾,左洪福,王华伟等.基于非齐次泊松过程的航空备件需求研究和应用[J].系统工程与电子技术,2007.9,1585-1588.
- [34] 张永莉,梁京.航材需求预测方法研究综述及启示[J].中国民航大报,2014,(1):92-96.
- [35] 左山,鲁晶晶,田磊等.简单移动平均预测法在航材保障中的应用[J].科技信息(学术研究),2008,(30):87-88.
- [36] 郭峰,刘臣宇,李卫灵.基于指数平滑法的航材消耗定额预测研究[J].计算机与现代化,2012,(9):163-165.
- [37] 刘臣宇,郭凤琴,王庆斌.应用线性回归方法预测航材的订货数量[J].科技信息(科学教研),2007,(17):659-660.
- [38] 刘臣宇,郭峰,王庆斌.线性回归在航材订货预测中的应用[J].价值工程,2010,29(31):315-316.
- [39] 马应欣,张作刚.基于 AHP 和模糊方法的库存航材 ABC 分类模型[J].物流技术,2008,(2):130-133.

- [40] 张作刚,胡新涛,刘望. 主成分聚类分析在航材分类中的应用[J]. 兵工自动化, 2012,(11):25-28.
- [41] 张作刚,崔国伟,秦瑞清. 灰色聚类分析在航材分类中的运用[J]. 四川兵工学报, 2013,(9):56-59.
- [42] 袁中华. 航空公司航材库存管理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [43] 陈建华. 我国航空公司航材周转件计划与库存管理研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.
- [44] 黄俊. 基于可靠性的民机备件支援及其软件系统[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- [45] 赵淑舫. 基于维修理论基础上的航材需求预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [46] 樊庆和. 航材后续备件优化保障模型研究[J]. 科学技术与工程, 2007,7(12):2763-2766.
- [47] 阮旻智,李庆民,黄傲林. (R,Q)库存策略下消耗件的协同订购方案优化[J]. 北京理工大学学报, 2013,(07):680-685.
- [48] 陈乐心. 汽车零部件可靠性评估的小样本方法[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [49] 严晓东,马翔,郑荣跃等. 三参数威布尔分布参数估计方法比较[J]. 宁波大学学报(理工版). 2005.18(3):301-305.
- [50] 庄渭峰. 用微机实现威布尔参数的双线性回归最小二乘估计[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1999, 5:2-7.
- [51] 于洋. 浅析二项分布、泊松分布和正态分布之间的关系[J]. 企业科技与发展, 2008(20).
- [52] 杨志秀. 可修复系统不完全预防性维修策略研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013.
- [53] 常玉,同姗姗. 航材管理发展方向研究[J]. 航空制造技术, 2012,09:87-89.
- [54] 刘天华,张志华,梁胜杰,王睿. 威布尔型可修备件需求量的解析算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2012,34(5):966-973.
- [55] 余芬,刘立文,张伟钢,李昆. 民机不可修备件最优订购时间研究[J]. 制造业自动化, 2014(17):32-35.

致谢

时光飞逝，随着课题工作接近尾声，近三年的研究生生涯即将结束，感谢母校给了我一次深造学习的机会，我学习到了更深层次的知识，也学习到了更好的学习方法。在这一求学过程中，我有幸得到了老师、同学、朋友和家人们的帮助，衷心地感谢他们。

感谢我的导师余芬教授这三年来对我悉心的教育和细心的指导。余老师人品端正，学识渊博，学术严谨，这将是我一生的学习榜样，也是我学习一生所无法望其项背的尊尊楷模。在此向恩师致以崇高的敬意和衷心的感谢。

感谢张老师能在百忙之中给我不断的指导我的论文、学习和工作，在此表示由衷的谢意。同时感谢我的同学、室友一直帮我在最后检查论文，帮我指出了并解决了不少由于自己粗心所引起的问题。

同时要感谢家人这些年对我的支持和信任，谢谢他们。

最后，感谢各位专家、教授在百忙中审阅本文，在此致以深深的敬礼和诚挚的谢意！

李崇明

2016年5月4日

作者简介

1、基本情况

李崇明，男，1990 年 3 月出生，黑龙江省鸡西人。

2、学习经历

2013.9~2016.5：中国民航大学，航空工程学院 航空器制造与维修专业，硕士研究生；

2009.9~2013.6：中国矿业大学，机械工程及自动化学院 机械设计，本科。

3、攻读硕士学位期间学习情况

研究生期间共完成 35.5 学分，全国大学英语六级考试 453 分；

研究方向：航空维修优化，已完成学术论文 1 篇，以第二作者完成（导师为第一作者）。

4、在学校期间研究成果

[1] 余芬,李崇明，张伟刚. 航材可修备件最优订购时间研究[J]. 机械工程与自动化,2016(已录用,待发表).