

民航视情维修决策优化模型发展

张海军, 左洪福, 梁剑, 戎翔

(南京航空航天大学民航学院, 南京 210016)

[摘要] 目前视情维修是民航业采用的主要维修方式, 可以使维修的有效性、经济性大幅度提高。维修决策优化模型对民航维修成本的降低和利润的提升具有显著的指导作用; 归纳了视情维修的时间延迟模型、冲击模型、比例危险模型、马尔可夫决策模型等优化模型的建模方法; 分析了该类模型在应用中存在的不足, 并展望了其发展前景。

[关键词] 视情维修; 优化模型; 决策; 成本

[中图分类号] V328.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)11-0017-04

1 引言

随着飞机系统复杂度的提高及对其高安全性、高可靠性的要求, 企业不得不投入大量的资金用于系统的维修。美国杜邦公司认为, 企业最可控制的费用是维修费用^[1]。国内航空公司的维修成本约占总成本的20%以上, 而其利润仅占总成本的5%~10%。当总收入一定时, 维修成本的减少对总成本的降低和利润的提升具有举足轻重的作用。

民航维修随着维修理论的发展经历了故障后维修、定时维修、视情维修等维修方式。故障后维修仅适用于对可靠性、安全性要求不高的系统; 定时维修和视情维修属于预防性维修的范畴, 广泛应用于航空维修。相对于定时预防性维修而言, 视情维修针对性强, 既能充分利用机件的工作寿命, 又能有效地预防偶然故障, 使维修的有效性、经济性大为提高, 已成为目前民航公司的主要维修方式。

过去的数十年里, 许多学者建立了大量的维修优化模型。笔者详细分析了视情维修优化模型, 并提出了视情维修优化模型研究的发展方向。

2 视情维修优化模型介绍

已有维修优化模型(包括定时维修和视情维修)的决策变量主要有部件的剩余寿命、更换/修理阈值和检查间隔期。该类模型的目标函数分为两类。其中单一目标包括停机时间的期望值最小; 单位时间内维修费用的期望值最小; 系统的可用度期望值最大; 可修复件的可靠性与安全性指标要求最高等。组合目标通常是费用和可靠性要求的组合, 包括: 在满足系统可靠性要求的基础上使系统的维修费用率最小; 在满足系统维修费用率最小的情况下使系统的可靠性要求最大化。

按照建模思想和所用数学工具的不同, 维修模型可分为四类。

2.1 时间延迟模型(delay time model)

时间延迟模型是把设备的寿命周期分为缺陷形成阶段和故障发生阶段。建立时间延迟模型的核心是确定缺陷概率密度函数和故障概率密度函数。

A.H. Christer 和 W. Wang 首次提出了时间延迟模型的概念和建模方法, 以视情维修的检查阈值和检查频率作为决策变量建立了维修优化模

[收稿日期] 2004-12-03; **修回日期** 2005-03-31

[作者简介] 张海军(1969-), 男, 河南洛阳市人, 南京航空航天大学博士研究生, 主要从事维修与可靠性工程的研究; 左洪福(1959-), 男, 湖南茶陵县人, 南京航空航天大学教授, 博士生导师, 主要从事航空发动机故障诊断、维修工程研究

型^[2,3]。P. A. Scarf 等对延迟模型从理论上加以完善, 并做了大量的个例分析^[4~6]。K. Yang 等则把应用于药效学、经济和社会科学的随机系数增长模型 (random coefficient growth model) 引入设备的维修决策中^[7], 用于表示设备的劣化过程。W. Wang 运用随机系数增长模型建立了确定维修间隔和警告阈值的优化模型^[8]。F. P. A. Coolen 等扩展了时间延迟模型的应用, 提出设备出现故障存在竞争风险 (competing risk) 问题, 对这种情况下所建模型的参数做了敏感性分析^[9]; 并引入非参数预测推理方法 (nonparametric predictive inference method) 讨论竞争风险与维修决策优化问题^[9,10]。

2.2 冲击模型 (shock model)

冲击模型就是用于解决系统因随机出现的冲击而造成随机损伤的情况^[11]。

H. M. Taylor 等在考虑故障率、冲击量、冲击间隔、费用以及检查时间等各种约束的情况下, 对冲击模型做了深入的研究^[12~16]。G. Gottlieb 等突破了两次维修更换期间系统故障率非降的假设, 认为系统在两次受冲击间隔期内可以实施部分维修, 并给出了该情况下优化模型的建立和寻优方法^[17]。这种方法与实际更加相符, 但同时使得模型趋于复杂化。

2.3 比例危险模型 (proportional hazards model)

R. L. Prentice 等运用比例危险模型研究了生物医药领域存在的问题并给出了解决方案^[18]。D. Kumar 等在工程背景下的维修决策方面进行了相应的应用研究^[19~21]。在此模型的基础上, J. D. Kalbfleisch 等提出了加速寿命模型 (accelerated life model)^[22], H. E. Ascher 等提出了比例强度模型 (proportional intensities model)^[23], 这两种模型较之比例危险模型与系统的实际状态的演化更相匹配。

2.4 马尔可夫决策模型 (Markov decision model)

追根溯源, 马尔可夫决策过程 (Markov decision processes, MDP) 可归根到文献^[24]中的序贯分析 (sequential analysis) 和统计决策函数 (statistical decision function)。考虑视情维修通常是离散时间的, 仅讨论离散时间马尔可夫决策过程。

R. Howard 研究了折扣准则和平均准则及值迭代法和策略迭代法等^[25], 奠定了 MDP 作为一个独立研究学科的理论基础。R. Howard 和 W. S. Jewell 将其推广到半马尔可夫过程^[26,27]。Y. Jia 和

W. Wang 等假定视情维修的检查间隔期是固定的, 用马尔可夫理论建立了状态信息与剩余寿命的关系分布^[28,29]。A. Grall 等突破了检查间隔期固定的假定^[30,31], 运用再生和半再生过程以及嵌入马尔可夫链描述系统的劣化过程, 以单位时间的维修费用最少为目标函数确定了优化的序贯检查间隔和检查警告阈值。

3 视情维修优化模型的不足

1) 设备劣化过程本身具有随机特性, 在建模中常用到对随机过程的知识, 使得习惯了确定性数学知识的机械工程师反而不容易理解, 导致建立的模型难以接受和推广。

2) 在工程实际中有很多好的方法, 但是缺乏理论模型的定量解释; 一些学者提出了好的维修思想或优化方法, 但是有些模型过分追求数学形式上的完美而不是着力于解决实际问题, 因而难以在企业中得到验证和推广。

3) 维修包容的范围过于宽泛, 很难有统一的模型对维修的优化问题做出解释和提供决策依据。

4) 投入与产出的博弈: 建立优化模型的目的是为了节约成本, 若建模费用和获取数据的成本超出运用模型产出的效益, 企业就不会积极采用。另外, 维修带来的隐形收益通常归结于其他活动的收益, 比如由于维修活动的实施延长了设备的运营时间, 但其收益却归到了运营而不是维修。

5) 随着维修思想的发展, 维修方式经历了从事后维修到基于状态的视情维修等多种维修方式, 某种维修方式下建立的优化模型不能简单地复制到其他维修方式下使用, 而移植成本又较高, 有些甚至需要重新建立优化模型。

4 视情维修优化模型的发展前景

4.1 多部件系统维修优化模型研究

D. Rommert 等认为已有模型在实际中难以得到广泛应用的原因之一, 是建模时对实际情况做了过多的简化^[32]。将一个系统划分为若干个子系统, 把每个子系统视作单部件, 采用已有的单部件优化方法对维修策略做出决策。但事实上各子系统之间存在千丝万缕的联系, 一个子系统的失效, 往往会导致另外一个子系统也须做相应的维修工作。因此对于类似航空发动机等复杂系统维修的优化建模问题, 应该优先考虑建立多部件维修优化模型。

4.2 不完全维修优化模型的研究

在已有的维修优化模型中，往往假定检查和修理是完全的 (perfect)；存在缺陷时经过检查一定能够被发现；设备经修理后处于“修复如新”状态。这些假定方便了建模，但是与设备的实际运行情况存在较大差异。为了使模型更好地与实际情况相符合，使优化模型得到更准确的结果，就必须考虑检查和修理都是不完全的 (imperfect)，缺陷只是以一定的概率被发现或“修复如新”。当然，采用不完全维修时要引入更多的变量描述系统的劣化过程和维修策略，需要更多的维修数据。

4.3 维修决策支持系统的开发

决策支持系统是综合大量数据有机组合众多模型，经过人机交互、辅助决策者实现科学管理的计算机应用系统。其结构框图如图 1 所示，建模流程图如图 2 所示。

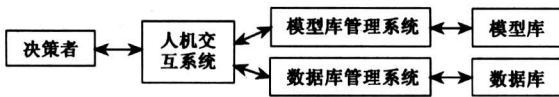


图 1 决策支持系统结构

Fig.1 Structure of decision support system

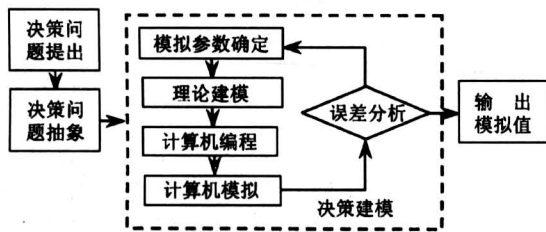


图 2 决策支持系统流程图

Fig.2 Flow chart of decision support system

决策支持系统需要不断地适应变化着的实际决策环境，这种随实际情况变化的特点正成为其发展的动力源泉。

维修决策支持系统 (MDSS) 可以解决很多学者在研究过程中碰到的两个问题：a. 维修数据的收集和分析；b. 优化模型的参数估计和决策变量的寻优，同时它还提供了良好的用户界面，使得现场工程师的维修决策更方便，这有助于维修优化模型的使用和推广。

5 结语

综述了基于视情维修的维修优化模型，对主要

的建模方法做了分析和归纳；分析了现有模型不能广泛应用的原因，认为只有理论与实践相结合才能开发出适用的优化模型；指出由维修决策支持系统建立的维修优化模型更加符合系统劣化过程，是视情维修优化模型研究的发展方向。

参考文献

[1] 费雷斯特·帕德,王秩信.可靠性维修基本原理——工业管理的未来[J]. 莽克论译.设备管理与维修, 1994,(2):33~35

[2] Christer A H, Waller W M. Delay time model of industrial inspection maintenance problems [J]. J Opl Res Soc, 1984, 35: 401~406

[3] Christer A H, Wang W. A Model of condition monitoring of a production plant [J]. J Prod Res , 1992, 30(9): 2199~2211

[4] Scarf P A. On the application of mathematical models in maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 99(3): 493~506

[5] Baker R D, Scarf P A, Wang W. A delay-time model for repairable machinery: maximum likelihood estimation of optimum inspection intervals [J]. Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, 1997,8(1): 83~92

[6] Christer A H, Wang W. A simple Conditon monitoring model for a direct monitoring process [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 82 (2): 258~269

[7] Yang K, Jeang A. Statistical surface roughness checking procedure based on a cutting tool wear model [J]. Journal of Manufacturing System, 1994,13(1): 1~8

[8] Wang W. A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance [J]. J Prod Res, 2000,38(6): 1425~1436

[9] Coolen F P A, Dekker R. Analysis of a 2-phase model for optimization of condition monitoring intervals [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995,44(3): 505~511

[10] Coolen F P A, Pcoolen-Schrijner, Yan K J. Noparametric predictive inference in eliability [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 78 (2): 185~193

[11] Barbera F, Schneider H, Kelle P. A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals [J]. Journal of the Operational Research Society, 1996,47: 1037~1045

- [12] Taylor H M. Optimal replacement under additive damage and other failure models [J]. *Naval Research Logistics*, 1975, 22: 1~18
- [13] Feldman R M. Optimal replacement with semi-markov shock models using discounted costs [J]. *Maths Opns Res*, 1977, (2): 78~90
- [14] Nummelin E. A general failure model: optimal replacement with state dependent replacement and failure costs [J]. *Math Opns Res*, 1980, (5): 381~387
- [15] Aven T, Gaarder S. Optimal replacement in a shock model: discrete time [J]. *J App Prob*, 1987, 24: 281~287
- [16] Gottlieb G. Optimal replacement for shock models with general failure rate [J]. *Opns Res*, 1982, 30: 82~92
- [17] Gottlieb G, Levikson B. Optimal replacement for self-repairing shock model with general failure rate [J]. *J App Prob*, 1984, 21: 108~119
- [18] Prentice R L, Kalbfleisch J D. Hazard rate models with covariates [J]. *Biometrics*, 1979, 35: 25~39
- [19] Kumar D, Westberg U. Maintenance scheduling under age replacement policy using proportional hazards modelling and totao-time-on-test plotting [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 99: 507~515
- [20] Love C E, Guo R. Using proportional hazard modelling in plant maintenance [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 1991, (7): 7~17
- [21] Makis V, Jardine A K S. Optimal replacement in the proportional hazards model [J]. *INFOR*, 1991, 30: 172~183
- [22] Kalbfleisch J D, Prentice R L. *The Statistical analysis of failure time data* [M], ed. Wiley, New York, 1980
- [23] Ascher H E, Kobbacy K A H. Modelling preventive maintenance for deteriorating repairable systems [J]. *Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 1995, (6): 85~100
- [24] Wald A. *Statistical Decision Fuctions* [M], second edition, Chelsea, New York, 1971
- [25] Howard R. *Dynamic Programming and Markove Decision Process* [M], Cambridge: MIT Press, 1960
- [26] Howard R. *Semi-markovian decision processes* [A]. *Proceedings 34th Session International Statistics* [C]. Ottawa, Canada. 1963
- [27] Jewell W S. *Markov-renewas programming 1: formulation, finite-return models. 2: infinite return models, examples* [J]. *Opns Res*, 1963, (11): 938~971
- [28] Jia Y, Wang W. A development of a condition based maintenance model and its prototype software [A]. *The 5th International Conference on Reliability* [C]. Maintainability and Safety. 2001. Dalian
- [29] Wang W, Christer A H. Toward a general condition based maintenance model for a stochastic system [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51: 145~155
- [30] Grall A, Dieulle L, Berenguer C, et al. Contiuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2002, 51(2): 141~150
- [31] Dieulle L, Berenguer C, Grall A, et al. Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 150(2): 451~461
- [32] Rommert D, et al. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1996, 51(3): 229~240

Application and Development of Civil Aviation Condition Based Maintenance Decision Optimal Model

Zhang Haijun, Zuo Hongfu, Liang Jian, Rong Xiang

(*Civil Aviation College of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

[**Abstract**] At present the main maintenance's manner in the civil aviation field is condition based maintenance which may improve enormously maintenance's efficiency and econmy. Maintenance optimal model concentrates the essence of condition based maintenance and plays an important role in reducing maintenance cost and raising profit of civil aviation corporation. The paper induced the establishing method of several models, such as Delay Time Model and Shock model, Proportional Hazards Model and Markov decision Model, and analyzed these models' shortcoming in application and prospected their development.

[**Key words**] condition based maintenance; maintenance optimal model; decision; cost