

维修、更换和可靠性

〔英〕 A.K.S 贾尔丁 著

蓝文谨 译

李 敏 校



机械工业出版社

本书介绍各种决策方法, 通过建立和解数学模型, 将优化概念应用于有关设备的维修、更换和可靠性等问题。首先介绍了改进有关维修决策问题的数学模型的表达方式, 以及解数学模型所依据的基本原理, 然后介绍了为阅读本书需熟悉的基本概念。最后介绍有关设备维修、更换和可靠性的主要决策范围。对所需探讨的问题在本书每一章内均进行了详细叙述, 内容丰富全面。

本书可供攻读生产管理、运筹学以及质量和可靠性工程等学科的研究生阅读, 也可供具有实际工作经验后接受学科培训的工程师以及对设备维修决策感兴趣的其他人员、大专院校管理工程专业的师生参考。

Maintenance, Replacement, and Reliability

A. K. S. JARDINE

Pitman Publishing

1 9 7 3

* * *

维修、更换和可靠性

[英] A. K. S. 贾尔丁 著

蓝文谨 译

李 敏 校

*

机械工业出版社出版 (北京市阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 · 印张 7³/₈ · 字数 158 千字

1985年10月重庆第一版 · 1985年10月重庆第一次印刷

印数 0.001—5.100 · 定价 1.80 元

*

统一书号: 15033 · 5836

目 录

序言

第一章 绪论	1
1.1 综 述	1
1.2 定量处理	3
1.3 某些维修问题	11
1.4 维修管理和数学模型	12
第二章 统计学基础知识	15
2.1 导 言	15
2.2 相对的频率直方图	15
2.3 概率密度函数	16
2.4 积分分布函数	19
2.5 可靠性函数	20
2.6 故障率	22
2.7 维修性	25
2.8 参考内容	26
第三章 现值	27
3.1 导 言	27
3.2 现值公式	27
3.3 确定适当的利率	31
3.4 例：一次性决策	31
3.5 参考内容	32
第四章 更换和更新决策	34
4.1 导 言	34
4.2 设备的运行费用随使用时间而增长时的最优更换时间： 方法 I	37

4.3 设备的运行费用随使用时间而增长时的最优更新时间; 方法 I	45
4.4 设备的运行费用随使用时间而增长时的最优更换方针; 有限时间范围	47
4.5 两台机器中一台为备用, 当机器的运行费用随使用时间 而增长时的最优更换方针	59
4.6 设备的最优更新周期: 使折算后的收益为最大	69
4.7 设备的最优更新间隔期: 使总费用最低	76
4.8 考虑技术改进情况下的最优设备更新方针: 有限规划 期	79
4.9 考虑技术改进的设备最优更新方针: 无限规划期	83
4.10 会发生故障的设备的最优预防性更换间隔期	87
4.11 会发生故障的设备的最优预防性更换的役龄	96
4.12 在考虑完成预防性更换和故障后更换所需时间的情况下, 会发生故障的设备的最优预防性更换的役龄	101
4.13 会发生故障的设备的最优预防性更换间隔期或役龄: 为 了使停机时间最少	104
4.14 成组更换: 会发生故障的机件成组更换的最优间隔期; 路灯的更换问题	109
4.15 其它的更换模型	112
第五章 检查决策	115
5.1 导言	115
5.2 最优检查频率: 使效益最大	115
5.3 最优检查频率: 使停机时间最短	121
5.4 使应急情况下使用的设备的可利用率达到最大的最优检 查间隔期	123
5.5 对一些只能通过检查才能确定其状态的设备的最优检查 进度计划: 使总费用最少	126
第六章 检修和修理决策	132

6.1 导言	132
6.2 会发生故障的设备的最优检修/修理/更换的维修方针: 有限期内的	133
6.3 会发生故障的设备的最优检修/修理/更换的维修方针: 无限期内的	142
6.4 设备的最优检修费用限额	147
第七章 组织机构的决策	154
7.1 导言	154
7.2 排队论的预备知识	155
7.3 满足浮动工作量的车间设备的最优数量	159
7.4 修理作业组的最优能力	164
7.5 为满足浮动工作量而将两类相似的设备(如中/大型车 床)作最优配合	168
7.6 一个修理作业组分管的机器的最优数: 机器的相互影响 问题	182
7.7 考虑可以利用外包时, 满足浮动工作量所需的维修作业 力量的最优规模	186
第八章 可靠性决策	191
8.1 导言	191
8.2 某些基本的概率因素	192
8.3 串并联系统的最优设计方案: 在预算有限的情况下使可 靠性最大	196
8.4 串并联系统的最优设计方案: 在安全和预算标准受限制 的情况下使可靠性最大	199
8.5 多余度/设计力量的最优组合, 以使至少可达到规定的 可靠性程度的总费用最少	203
8.6 机件多余度的优化度: 使运行和停机的总费用最少	205
8.7 机件可修理的设备的最优的在用并联多余度水平	207
第九章 进度计划和顺序编排决策	210

9.1 导言.....	210
9.2 进度计划决策.....	210
9.3 顺序编排决策.....	211
9.4 由两台机器加工的工件的最优顺序编排规划.....	213
9.5 由三个维修作业组进行检修机器的最优顺序.....	217
参考资料.....	221

第一章 绪 论

1.1 综 述

本书的目的，是向那些在设备维修的总体范围内参与决策的有关人员，介绍某些对改进设备维修职能完成情况有用的定量方法。书中探讨的各项具体问题包括工业设备的维修、更换和可靠性等方面的决策。我们也考虑了同维修所需设施有关的决策，如所需的人员和设备等。

按照传统的做法，要求工业部门的维修工程师解决维修问题时，毋需追求达到最优状态。例如，许多预防维修计划在实施时，只对计划作很少的（如果有的话）定量处理。因此，谁都不能很肯定地说什么是最优的检查频率，或者究竟应该检查什么，其结果，往往使这些计划在“费用过高”的借口下被削减。显然，在检查频率和因此而得到的效益（例如，由于各种微小故障在造成重大经济损失的停机之前，即能通过检查发现，而可减少停机）之间需要某些形式的平衡。通过本书，我们将对各种维修问题的领域加以探讨，同时指出所应考虑的矛盾，并说明如何运用定量方法进行分析，以便取得最优的、或接近最优的解决方法。为此，我们将涉及能使维修决策优化的各种必要方法，使优化可以被称之为是一种尝试，即让决策者控制下的各种变量取可能的最优值，以这种方式来解决决策中的矛盾。只要一用到“最优”这个词，就必须说明它指的是什么，因此，“最优”在维修方面的各种可能的定义，将在本章的1.2节中阐述。

本书的第二和第三章，简要介绍了在我们能着手确定最

优的维修措施之前，所必须了解的某些基本概念。由于在维修领域中存在着很多的不确定性（例如，设备发生故障时间的不确定性），因此，需要有统计学和概率方面的知识。在第二章内介绍了有关的统计学知识。第三章介绍了现值的概念。当论及主要设备的更新决策时，我们要考虑到这样的事实，即以后所要花费或者收到的一笔钱，它的现在的价值要比这笔钱为少。现值的概念便是适用于这一事实的。

本书的主要篇幅是阐述如何建立各种适用于不同问题的数学模型。数学模型的作用是能很快地评估算出各种可供选择的维修决策的结果，以便确定出有关某项目标的最优决策。所述问题的范围如下：

1) 更换 第四章的内容包括：为运行费用随使用期而增加的设备确定更换间隔期，当两台设备装置在一起，其中一台作为备机时的更换规律；设备的更新周期；易发生故障的设备的更换间隔期。

2) 检查 第五章的内容包括：确定连续使用的成套设备的检查频率；只在紧急情况下使用的设备的检查间隔期；其状态只能通过检查来确定的设备的检查次数。

3) 检修和修理 第六章探讨了对易发生停机的设备所采取的最优检修/修理/更换决策。

4) 组织结构 第七章的内容包括：有关决定维修车间最优设备组成方案的问题；修理作业组的最优规模和人员组成；利用转包的可能性。

5) 可靠性 第八章探讨了在设备设计中采用多余原则来满足可靠性要求的问题。

6) 进度计划和程序的安排 由于计划评审技术、临界路线法等技术已逐步普及，并且论述这些技术的使用的论文

也很多,故第九章只对网络技术的应用作了简要介绍,以有助于计划的编排。本章集中讨论了确定程序编排的方法,并特别着重于使用机器进行的各项例行维修工作的程序编排规则的确定。

为了不使建立模型所用的数学不必要地复杂化,采用了各种在实际上并非总是能接受的假设。这些假设叙述得很清楚,但应记住,实际上需要建立的会是更加现实的模型。通过对建立“简单”模型的方法的研究,希望读者能将这些模型加以发展,使之适合于自己的具体问题。

1.2 定量处理

使用任何一门定量学科的主要目的,如企业管理、运筹学和系统分析等,都是为了通过更有效地运用各项已知的事实扩大所掌握的实际情况的比重,和尽量减少主观判断的成份来帮助管理部门进行决策。

在维修决策的领域中,常常只能得到很少一点确切的实际情况。虽然为了获得这些情况,实际上会有很严重的困难,但是为了制定最优的维修措施,这些信息是绝对必要的。在维修方面所作的一些定量研究(见贾尔丁[23]的关于几份案例研究的报告)的效益之一,是使实际情况变成为有用的资料,如各种设备的故障停机分布形式等。

许多措施之所以被实施,是因为维修经理“确信”它们应该完成。决定采取这些措施时,很少为之而进行客观的分析。希望本书对于减少维修决策中主观判断的成份能有所助益。

我们参考了皇家空军运筹学小组在第二次世界大战期间写成的一篇文章(见克劳瑟和魏丁敦的著作[14]),作为维

修方面的一个早期的定量决策的例子，它着重于目标选择这一重要方面。

具体问题如下：海岸司令部的飞机要求其可服役率为75%，并以此作为衡量维修效能的尺度。可服役率是指地面上随时可用的飞机，加上正在飞行的飞机的数量与飞机总数的比。虽然75%的可服役率已被认为是较高的要求，但海岸司令部却要求飞机有更多的飞行时间。海岸司令部的运筹学部门被指定来研究这一问题。

这个部门对一架飞机的一个作业循环进行了研究，发现飞机通常处于下列三种可能情况之一：

飞行 F

维修 M

可以飞行 A

作为维修效能考核标准的可服役率 S 可写成

$$S = \frac{F + A}{F + A + M}$$

式中 F 、 A 和 M 是飞机在飞行、处于可飞行状态及维修所用的平均时间。

对问题进一步研究之后，发现每飞行一小时需要维修二小时。运用这一信息就可确定，当可服役率为75%时，一架飞机只有12.5%的时间用在飞行上，而25%的时间则是用在维修上，其余62.5%的时间处于可飞行状态。但是，如果把可服役率降低到33⅓%时，那末，飞机用于飞行的时间便是33⅓%，而66⅔%的时间则用在维修上，此时，处于可飞行状态的时间为0%。

就这样，只是把可服役率定为33⅓%，就使飞行小时能有大幅度的增加。很清楚，在海岸司令部的飞机当时所处的

作战环境下，所制定的维修目标——即高的可服役率——是错误的。但是对于其他的环境，比如说，飞机只被用来应付紧急情况，那末，定得很高的可服役率目标就会是非常合适的。

以上分析的结果说明，在任何可能的时候，飞机应处在飞行状态下。可是，同研究适当的维修目标之前的原来完成的飞行时间相比，飞行时间增加了一倍以上。

1.2.1 确定目标

在维修中运用定量技术的开始步骤之一是确定研究的目标。当目标一旦确定之后，无论目标是什么，最大的单位时间收益，最少的单位时间停机时间，在预算限额内达到最大的可靠性等——就可建立一个供评价用的数学模型，从而使管理部门确定系统的最优运行方法以达到预定的目标。

在上面提到的计划飞行——计划维修这项研究中，海岸司令部的维修目标起初是要达到75%的可服役率，但通过研究已经明确这是一个错误的目标，他们所应争取达到的目标是33%的可服役率。

在计划飞行——计划维修这项研究中，还指出了高的可服役率，或许适合于只在紧急情况下动用的飞机。这强调指出了这样一点：系统运行所要达到的目标会随着条件的变化而改变。就维修措施这个方面来说，在生产兴旺发达的情况下和生产不景气的情况下，所用的设备维修方法可以是大不相同的。

在第四章至第九章中，以适当方式建立了各类维修问题的模型，使各种适合于实现“收益最大”、“总维修费用最低”等目标的维修措施能被识别。但是必须强调，当确定最优的维修措施时，一定要考虑到已定的相应目标。例如，如

果整个部门所要实现的方针是获得最大利润，那末对维修部门来说，推行一项使设备停机时间最短的方针就不能满足要求。这两种方针实际上可能是相同的，但也不一定如此。这一点将在第5.3节中通过例题加以说明。

1.2.2 模型

用科学方法进行管理决策的主要工具之一，是建立一个供评价用的模型，它通常是数学模型，利用它可以对各种可供选择的决策作出评价。任何模型都只不过是所研究的系统的再现。将定量技术运用于管理问题时，所用模型的形式常常是一个符号模型，其中，系统的各项关系是用符号来表示的，而系统的性质则用数学式加以描述。

为了说明这种模型的建立方法，我们来研究一个维修库存问题。这个问题虽然已经简化，但却能说明使用模型的两个重要方面，即如何建立所研究问题的模型和模型的求解。

一个库存问题

仓库管理员希望了解，每当一种备件的库存量接近于零时应该提出的订货件数是多少。这一系统如图1.1所示。

这个问题的矛盾在于，当任何时候增加了订货量时，即意味着他的订货费将要减少，以后他就必须少发订货单，但库存费将会增加。这些矛盾的特点在图1.2上表示出来。

仓库管理员需要确定能使总费用成为最低的订货数量。总费用可按图1.2所示的方法定出，并用来解决这一问题。

然而，通过建立数学模型的办法，解这个问题时可以简便得多。以下各项参数是可以确定的：

- D 年度总需要量
- Q 订货数量
- C 每份订单的订货费

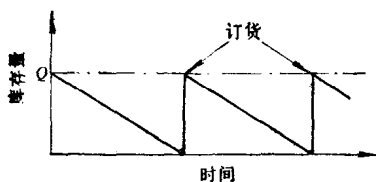


图 1.1

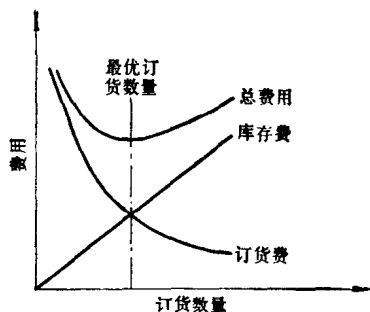


图 1.2

C_h 每年每种备件的库存费

每年订货及库存的总费用 = 每年的订货费
+ 每年的库存费

现在

$$\begin{aligned} \text{订货费/年} &= \text{每年提出的订单数} \\ &\quad \times \text{每份订单的订货费} \\ &= \frac{D}{Q} C_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{库存费/年} &= \text{每年库存备件的平均数 (假定} \\ &\quad \text{库存量按线性减少)} \\ &\quad \times \text{每件的库存费} \\ &= \frac{Q}{2} C_h \end{aligned}$$

因此, 用 $C(Q)$ 来表示的作为订货数量函数的每年总费用为

$$C(Q) = \frac{D}{Q} C_o + \frac{Q}{2} C_h \quad (1.1)$$

等式 (1.1) 是将订货数量 Q 用总费用 $C(Q)$ 联系起来的问题的数学模型。

仓库管理员需要得到使总费用成为最低的订货件数，也就是应使等式 (1.1) 的右半部分为最小。求解的方法是将等式对 Q 微分，并使结果等于零，其形式如下

$$\frac{dC(Q)}{dQ} = -\frac{D}{Q^2} C_o + \frac{C_h}{2} = 0$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{D}{Q^2} C_o &= \frac{C_h}{2} \\ Q &= \sqrt{\frac{2DC_o}{C_h}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

由于 D, C_o 及 C_h 值为已知，将它们代入等式 (1.2) 中便可得出 Q 的最优值。我们必须严格核定由等式 (1.2) 所得的 Q 值是最小值而不是最大值。有兴趣的读者可以进行核定，其方法为取 $C(Q)$ 的二阶导数，并注意其结果为正值。事实上，订货数量也就是那个使年度的库存费和订货费成为相等时的订货数量。

例 设 $D=1000$ 件， $C_o=5$ 英镑， $C_h=0.25$ 英镑

$$Q = \sqrt{\frac{2 \times 1000 \times 5}{0.25}} = 200 \text{ 件}$$

因此，每当库存量接近于零时，仓库保管员应订货 200 件，以使每年的库存及订货的总费用最低。

需要指出的是，在提出的库存模型中作各种各样的假设，它们在实践中不一定是切合实际的。例如，没有考虑到数量折算的可能性；从提出订货到收到货物之间的可能提前期；需要量可能不符合线性关系的实际情况；需要量可能了解得不确切的事实。上述模型的目的，只是为了说明为一个具体问题建立模型和求解的方法。论述库存管理的文章是很多的，在这些文章中，这些限制条件中已有许多被取消，例如（可参阅哈德雷和怀丁[19]或托马斯[46]等的著作），对维修仓库的库存管理问题有兴趣的读者可参阅各种标准著作。

在提出上述的库存管理问题同时，还常常必须对不常用到的，而且使用间隔期不规则的，周转慢的备件问题作出决策。一般来说，这些备件的购置和库存费用都是较高的，因此，问题是要决定是否储存这类备件，如果需要的话该储存多少。例如，刘易斯[27]的论文就对这些问题作了分析。

1.2.3 从模型中找答案

在上一节的库存问题中，提出了数学模型的两种解法，一种是解析法，一种是数值法。

以上演算的解是对解析法的说明，其中并未考虑一组特定的控制变量值（需订货的库存量），我们直接处理的是由等式（1.2）得出的解。

在数值法中，要将按控制变量的不同值求出的各个解予以评价，以便得出最优结果，这就是尝试法。图1.2的图解结果，相当于把 Q 的不同值代入模型（等式1.1）中去并绘出总费用曲线，将它用来确定 Q 的最优值。

总的来说，解析法要比数值法优越，但是由于问题的复杂性，在很多情况下这种方法是不能采用，或实际上无法采

用的。本书中所讨论的多数维修问题，其数学模型是用数值法来解的。这些方法主要包括图解法，但也使用反复比较法和模拟法。

图解法的主要优点之一，多半在于能使管理部门清楚地看出，执行一项与通过解模型所确定的最优方针不符的方针时所产生的结果。而且，还可以将各种不同维修方针的效果都绘在一张图上，这样，就能表示出各种方针的相对效应。为了说明这一点，第四章内包括了两种不同更换措施的分析，即：

(a) 按固定的间隔更换设备（零部件）；

(b) 根据设备的使用情况进行更换（零部件）。

凭直觉会感到措施（b）更好些，因为它所依据的是设备的使用情况（这样可以防止接近全新的设备，在安装后不久发生一次故障后，即进行更换作业，而采取措施（a）时就是这样做的）。

在有的情况下，对同一设备可以采取这两种不同的维修方针，如第四章内所做的那样，可以分别建立模型，并为每一种方针确定最优的措施。当使用图解法时，可以如图1.3所示把每种方针的维修费用绘成曲线，这样，维修管理人员如实地看到这些可供选择的方针对总费用的影响。很可能的情况是，从收集数据的观点来看，一种方针比另一种方针的工作量少得多，然而他们具有几乎相同的最低总费用。这种情况在图1.3上表示出，从中可以看出，措施（a）和（b）的最低总费用大体上是相同的。

当然，对于不同的费用、停机分布、故障和预防更换次数等而言，最低总费用和更换间隔期会因不同的更换方针而有很大的差异。问题在于，用图形表示各种解常常能帮助管理人员确定他所希望采取的方针。而且，同那种列出了好几

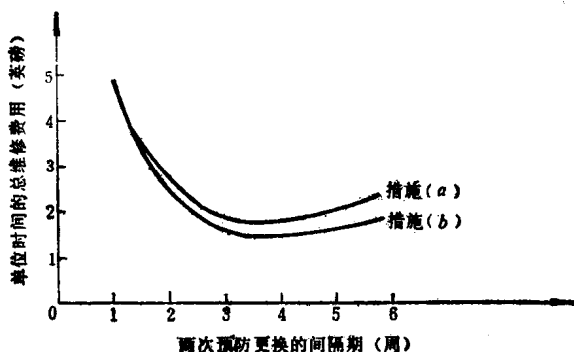


图 1.3

页看起来挺吓人的数学运算之后作出的“×方针最好”的说明相比，这种表示解的方法常常是更容易被人接受的。

有关绘制曲线图的有利之点，将在第四章的4.2.4节中，谈到其运行费用，随使用时间而增加的设备的最优更换间隔期的确定问题时，作进一步论述。

由于尝试法（例如使用绘图的方法）是很费时间的，因此，我们设法将数值法收缩为用循序试探法求解。这样的数值法被称为迭代法，而所有的线性规划法都是迭代法的例子。动态规划是这种方法之一，它将被用来分析第四章和第六章中的某些问题。

数值法的最引人注目的发展之一是由电子计算机进行模拟，关于这一点，将在第七章的关于车间所设置机器的最优数量问题中加以说明。

1.3 某些维修问题

维修的某些职能是控制设备的状态。在与此有关的某些