

# 计算机硬件设备的运维决策和评估数学模型分析

翟永 刘津 陈杰 刘磊 邢绪超 杜江

(国家基础地理信息中心 北京 100830)

**摘要** 结合计算机硬件设备运维的实际情况,基于设备/子系统可靠度和可用性理论,按照运维资金效益最优化的原则,分析了设备/子系统的资产残值、业务重要度和不可靠度等运维重要度变量的测算方法。在此基础上,研究并构建了计算机硬件设备/子系统运维重要度评估数学模型,并据此提出了运维决策算法。最后,采用计算机设备/子系统可靠度理论及基于马尔可夫链的可用性分析,结合实例提出了运维效益的评估量化方法,这对计算机设备运维效益的量化考核有一定的启发作用。

**关键词** 可靠度,可用性,设备资产残值,业务重要度,运维重要度评估,运维决策,效益评估

**中图分类号** TP301 **文献标识码** A

## Analysis on Mathematical Models of Maintenance Decision and Efficiency Evaluation of Computer Hardware

ZHAI Yong LIU Jin CHEN Jie LIU Lei XING Xu-chao DU Jiang

(National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China)

**Abstract** Combing the actual conditions of computer hardware maintenance and on the basis of the reliability and availability theory of equipment/subsystem, a calculation method of maintenance importance variables which include equipment / subsystem asset salvage value, importance of business and unreliability was analyzed in accordance with the principle of maintenance funding efficiency optimization. Based on this, the mathematical model for evaluating the maintenance requirement of equipment/subsystem was researched and constructed, and then the maintenance decision algorithm was put forward. Finally, combining the instances, the paper proposed the method of maintenance efficiency evaluation by using reliability theory of computer equipment/subsystem and the availability analysis based on Markov chain, providing certain inspiration for quantitative assessment of computer hardware maintenance.

**Keywords** Reliability, Availability, Asset salvage value, Importance of business, Evaluation of maintenance importance, Maintenance decision, Efficiency evaluation

21 世纪,人类社会信息化的步伐不断加快,计算机硬件设备(以下简称“计算机设备”)已经被深入应用到人类社会的各方面。计算机设备作为应用系统运行和数据处理与存储的物理载体,其运维情况关系到人们生活和经济活动的正常开展。对于承担着大量计算机设备运维职责的数据中心用户而言,如何合理使用并不充裕的运维经费,保持并提升更多、更重要的计算机设备的可靠性<sup>[1]</sup>和可用性<sup>[2]</sup>,有效保护设备投资,保障业务的正常开展,是需要考虑并解决的重要问题。

本文从使用计算机设备的用户的角度,结合运维资金不足的问题,基于设备/子系统可靠度和可用性理论,研究计算机设备运维决策数学模型的构建与应用,并采用量化方法来分析和评估计算机设备的运维效益。

本文提及的计算机设备主要指服务器、存储备份、网络和输入输出等硬件设备。

## 1 运维决策和效益评估的理论依据

计算机设备运维的主要目的是保持并提升计算机设备的

可靠性和可用性<sup>[3]</sup>。可靠性是指计算机设备在规定的条件下和时间内完成指定功能的能力,可使用概率来度量<sup>[1,4]</sup>;可用性指在规定的时间内计算机设备正常启动和运行的概率(设为  $A(t)$ ,  $t$  为使用时间)<sup>[5]</sup>。

从用户角度而言,计算机设备的运维主要包括设备巡检与日常检查、故障诊断与备品备件备机替换、硬件微码升级等工作。运维管理工作主要包括设备运维的重要度评估、决策和效益评估等。本文在运维重要度评估和决策过程中主要使用计算机设备可靠度理论,在运维效益评估中将可靠度和可用性一并考虑。

本文主要对正常运行期内的计算机设备进行运维决策和效益评估数学模型分析。

### 1.1 设备可靠度

对于计算机设备的可靠性,业界主要使用平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)、平均故障修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)、失效率( $\lambda$ )、可靠度( $R(t)$ )、不可靠度( $F(t)$ )和失效分布函数( $f(t)$ )等来度量<sup>[7-9]</sup>。其中,可

翟永(1969—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为计算机网络、服务器和数据库系统设计、集成及运维;刘津(1989—),女,硕士,工程师,主要研究方向为数据库和地理信息系统设计与运维, E-mail: liujin@ngcc.cn(通信作者);陈杰(1980—),男,高级工程师,主要研究方向为计算机网络和 Windows 主机系统集成与运维;刘磊(1981—),男,高级工程师,主要研究方向为数据存储备份、主机等系统设计、集成及运维;邢绪超(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为计算机和网络运行维护;杜江(1964—),男,高级工程师,主要研究方向为 UPS 和机房精密空调运行维护。

靠度  $R(t) = 1 - F(t) = \frac{N - n(t)}{N}$ ,  $N$  为设备总数,  $n(t)$  为  $t$  时刻已失效的设备数<sup>[10-11]</sup>;  $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F(t)'$ ,  $F(t) = \int_0^t f(t) dt$ 。

当计算机设备在正常使用期内时故障具有偶发、非累积的特征(保证为互不干涉的随机现象), 可靠度遵循指数分布<sup>[12]</sup>,  $R(t) = \exp(-\lambda t)$ ,  $t$  为使用时间,  $\lambda$  存在可度量的固定值, 为  $MTBF$  的倒数, 即  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ 。

以某知名品牌的某型主流 PC 服务器为例, 根据厂商提供的资料,  $MTBF = 79600 \text{ h}$ ,  $\lambda = \frac{1}{79600}$ , 计算得到的第 1 年至第 6 年的可靠度如表 1 所列。

运行年度	可靠度
第 1 年	$R(t) = \exp(-\frac{8760}{79600}) \approx 0.90$
第 2 年	$R(t) = \exp(-\frac{17520}{79600}) \approx 0.80$
第 3 年	$R(t) = \exp(-\frac{26280}{79600}) \approx 0.72$
第 4 年	$R(t) = \exp(-\frac{35040}{79600}) \approx 0.64$
第 5 年	$R(t) = \exp(-\frac{43800}{79600}) \approx 0.58$
第 6 年	$R(t) = \exp(-\frac{52560}{79600}) \approx 0.52$

计算机设备投入运行使用的前三年是计算机设备厂商的保修期, 第 4 年进入用户运维期, 此时该型服务器的可靠度已经接近 0.6, 需要进行有效的运维保障。实践证明, 计算机设备的可靠度能够帮助用户及时确定运维对象和运维时间点。

实施运维工作后, 日常运维工作如巡检、日常检查等能够维持设备可靠度; 设备硬件微码升级、备品备件替换则能够提升设备的可靠度。

因此, 可靠度指标可以作为计算机设备运维需求和效益评估的重要依据。

### 1.2 设备可用性

本文将每台计算机设备视为一个黑盒来整体进行可用性分析<sup>[13]</sup>。计算机设备的使用过程主要包括运行状态和故障状态, 在两个状态的相互转移过程中一个状态仅与前一个时刻的状态有关, 而与该时刻之前的状态无关(无后效性)<sup>[14]</sup>。从这个基本意义上分析, 计算机设备的运行状态关系符合马尔可夫过程应用的基本条件。马尔可夫过程动态行为的主要特征是将来状态的概率分布只依赖于现在状态, 与到达现在状态的过程无关<sup>[15]</sup>。针对计算机设备的可用性, 本文主要利用时间离散的马尔可夫过程(以下简称马尔可夫链)<sup>[15]</sup>进行分析。

计算机设备在  $0-t$  时间段内的状态包括:

(1) 计算机设备的运行和故障两种状态。令运行状态到故障状态的转移概率为  $\lambda$ (失效率), 故障状态到运行状态的转移概率为  $\mu$ (修复率)。

(2) 计算机设备保持运行状态或保持故障状态, 概率分别为  $1-\lambda, 1-\mu$ 。

计算机设备状态转移示意图如图 1 所示。



图 1 计算机设备状态转移示意图

只有开展计算机设备的运维工作, 维修工作才能落到实处, 修复率才有实际的意义。业界定义  $\mu = \frac{1}{MTTR}$ ,  $MTTR$  可从厂商获取。但在实际运维中, 计算机设备的  $MTTR$  值往往高于厂商标定值, 因此需要用户统计设备的实际维修数据来确定, 即  $MTTR = \frac{\text{维修时间之和}^{[6]}}{\text{维修次数}}$ 。本文将设备故障诊断、停机、备件物流和维修等的时间均计入  $MTTR$ 。

设状态 0 为运行状态, 状态 1 为故障状态。在  $0-t$  时间段, 设在  $t$  时刻计算机处于状态 0 的概率为  $P_0(t)$ , 设备可用性为  $A(t)$ , 则  $A(t) = P_0(t)$ 。对于同一台计算机设备, 设在  $t$  时刻计算机处于状态 1 的概率为  $P_1(t)$ , 则  $P_1(t) = 1 - P_0(t)$ 。在此基础上, 考察  $\Delta t$  时间段后计算机的状态:  $P_{00}(\Delta t)$  表示  $\Delta t$  时间段后计算机保持状态 0 的概率,  $P_{10}(\Delta t)$  表示  $\Delta t$  时间段后计算机从状态 1 转移到状态 0 的概率。在初始条件下, 令  $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0$ 。

由 Chapman-Kolmogorov 方程<sup>[16]</sup>可得:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)P_{00}(\Delta t) + P_1(t)P_{10}(\Delta t) = (1 - \lambda\Delta t)P_0(t) + \mu\Delta tP_1(t) \quad (1)$$

整理式(1), 可得:

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = \mu P_1(t) - \lambda P_0(t)$$

由于  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = P_0'(t)$ , 则  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 有:

$$P_0'(t) = \mu P_1(t) - \lambda P_0(t) \quad (2)$$

将  $P_1(t) = 1 - P_0(t)$  代入式(2), 得:

$$P_0'(t) = -(\mu + \lambda)P_0(t) + \mu \quad (3)$$

求解式(3)的微分方程并将  $P_0(0) = 1$  代入, 得:

$$A(t) = P_0(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp\{-(\mu + \lambda)t\} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (4)$$

其中,  $A(t)$  即为计算机设备的可用性数值, 可用于运维效益的评估。可用性是计算机设备运维效益评估的重要依据。

## 2 设备运维决策

### 2.1 设备运维重要度评估数学模型

为实现运维资金效益的最优化配置以及科学合理地使用有限的运维经费, 需要对计算机设备运维重要度进行量化分析, 为运维决策提供科学合理的量化依据, 减少主观因素的影响。

多年的计算机设备的运维经验表明, 决策者在确定某台计算机设备是否应获得运维保障时, 在主要考虑设备不可靠度(是否常出故障)的基础上, 还需要考虑设备所承载的业务重要度和设备资产残值, 常常将三者结合起来进行统筹分析。因此, 本文基于设备可靠度理论和实际经验来构造运维重要度评估函数  $M(x)$ 。运维需求与运维重要度评估数值成正比, 用户可以依据运维重要度数值进行运维决策。

构造运维重要度评估函数  $M(x)$ :

$$M(x) = M(F(t), B, C)$$

(1)  $F(t)$  为不可靠度, 将其分为单台设备与子系统两类进行分析和计算。对于独立运行且故障情况下对其他设备功能影响较小的设备, 采用单台设备运维重要度评估方法; 对于独立运行并与其他设备耦合度较高、在故障情况下对其他设备功能产生明显影响的设备, 将其与关联设备进行归并, 采用子系统运维重要度评估方法。不可靠度  $F(t)$  的取值范围为

$[0, 1]$ 。  $F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ ,  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ ,  $MTBF$  可从设备厂商获取。

(2)  $B$  为设备承载的业务重要度。其取值主要依赖以下两个方面:

1) 承载的软件重要度, 可划分为高、中、低 3 个层次, 打分取值分别为 3、2、1。高为关键业务或实施中的重大项目, 如核心数据库应用系统、对外业务服务网站软件系统, 其一旦出现故障停机, 将严重影响业务, 并很可能影响到外部用户; 中为日常业务或中小项目中的应用系统, 主要对内部用户产生影响; 低为其他类, 如测试类业务。

2) 管理的数据重要度, 可划分为高、中、低 3 个层次, 打分取值分别为 3、2、1。高为核心数据, 再生性差, 获取成本高, 一旦损失将严重影响外部用户的需求; 中为日常业务数据, 再生性较差, 获取成本较高; 低为其他类, 主要为业务辅助数据, 如设备日志数据、行政办公数据等。

业务重要度的取值范围为  $[2, 6]$ 。

(3)  $C$  为设备资产残值。使用计算机设备成本和使用年限等数据进行计算, 即  $C = C_0(1 - u/U)$ , 其中  $C_0$  为设备合同价格,  $u$  为已使用年限,  $U$  为规定使用年限(指国家有关固定资产管理规定或行业惯例设定的年限, 如服务器设备的使用寿命为 6 年、磁带库可达 10 年)。计算机设备种类繁多, 成本残值可能从数万元到数百万元不等。由于  $F(t)$  的取值为  $[0, 1]$ ,  $B$  的取值为  $[2, 6]$ , 如果  $C$  的取值较大, 则运维决策会出现主要取决于设备资产残值的情况, 这与运维决策实际相悖。因此, 在不影响设备资产残值变量性质的前提下, 对设备资产残值(以万元为单位)取以  $e$  为底的对数, 则  $C = \ln(C_0(1 - u/U))$ 。

综上所述, 运维重要度评估函数  $M(x)$  为:

$$M(x) = F(t) \times B \times C \\ = (1 - \exp(-\lambda t)) \times B \times \ln(C_0(1 - u/U))$$

## 2.2 运维重要度计算

### 2.2.1 单台设备的运维重要度计算

按照  $M(x)$  的定义来计算过保设备的运维重要度, 作为设备运维决策的依据。下面以服务器为例进行计算说明。

(1) 设备不可靠度的计算。该 PC 服务器  $MTBF = 79600$  h,  $\lambda = \frac{1}{79600}$ ; 投入使用期为第 4 年,  $t = 365 \times 24 \times 4 = 35040$  h,

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t) = 1 - \exp(-\frac{35040}{79600}) \approx 0.36。$$

(2) 设备承载的业务重要度的计算。该 PC 服务器承担广域网数据传输业务, 承载的软件重要度为中(2), 管理的数据重要度为中(2),  $B = 4$ 。

(3) 设备资产残值的计算。该 PC 服务器合同价为 7.98966 万元, 规定使用寿命为 6 年, 运行到第 4 年的设备资产残值为:

$$C = \ln(C_0(1 - u/U)) \\ = \ln(7.98966 \times (1 - 4/6)) \\ \approx 0.98$$

则

$$M(x) = F(t) \times B \times C \\ \approx 0.36 \times 4 \times 0.98 \\ \approx 1.4112$$

### 2.2.2 子系统运维重要度的计算

如果设备之间存在紧耦合关系, 如 SAN(存储区域网)、

服务器集群, 那么需要将多台设备看作一个整体作为子系统进行评估计算。其中, 不可靠度  $F(t)$  根据子系统设备间的串联、并联等模式进行归并计算; 业务重要度  $B$  根据子系统整体相关的软件重要度和数据重要度进行综合评价, 按照子系统整体的业务重要度进行计算, 不对子系统中各组成设备的业务重要度进行累加; 设备资产残值  $C$  将子系统的全部设备资产残值进行累加计算。



图2 存储区域网示意图

### (1) 存储区域网

该存储区域网由 1 台服务器、1 台光纤交换机和 1 台磁盘阵列组成, 为串联系统。

#### 1) 存储区域网的不可靠度计算

令  $R_{SERVER}(t)$  为服务器可靠度,  $R_{SW}(t)$  为光纤交换机可靠度,  $R_{DA}(t)$  为磁盘阵列可靠度。

$$F_{SYS}(t) = 1 - R_{SYS}(t) \\ = 1 - R_{SERVER}(t) \times R_{SW}(t) \times R_{DA}(t)$$

#### 2) 存储区域网的业务重要度计算

$B_{SYS}$  根据存储区域网相关的软件重要度和数据重要度进行整体评价。

#### 3) 存储区域网的资产残值计算

$$C_{SYS} = C_{SERVER} + C_{SW} + C_{DA}$$

具体计算示例如下:

#### 1) 存储区域网的不可靠度计算

设服务器  $MTBF = 79600$  h, 使用期已到第 4 年; 光纤交换机  $MTBF = 255754$  h, 使用期已到第 6 年; 磁盘阵列  $MTBF = 68965$  h, 使用期已到第 4 年。

$$R_{SERVER}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{35040}{79600}) \approx 0.64$$

$$R_{SW}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{52560}{255754}) \approx 0.81$$

$$R_{DA}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{35040}{68965}) \approx 0.60$$

$$F_{SYS}(t) = 1 - R_{SYS}(t) \\ = 1 - R_{SERVER}(t) \times R_{SW}(t) \times R_{DA}(t)$$

$$\approx 1 - 0.64 \times 0.81 \times 0.60$$

$$\approx 0.69$$

#### 2) 存储区域网的业务重要度计算

该存储区域网主要承担存储资源共享的职责, 用于存储管理核心数据成果。

$$B_{SYS} = \text{子系统软件重要度}(2) + \text{子系统数据重要度}(3) = 5$$

#### 3) 存储区域网的资产残值计算

设服务器、光纤交换机和磁盘阵列的规定使用年限分别为 6 年、8 年、8 年, 购买合同价分别为 7.98966 万元、20.11 万元、55.24 万元。

$$C_{SYS} = C_{SERVER} + C_{SW} + C_{DA} \\ = \ln(C_{SERVER-0}(1 - u_{SERVER}/U_{SERVER})) + \ln(C_{SW-0}(1 - u_{SW}/U_{SW})) + \ln(C_{DA-0}(1 - u_{DA}/U_{DA})) \\ = \ln(7.98966 \times (1 - 4/6)) + \ln(20.11 \times (1 - 6/8)) + \ln(55.24 \times (1 - 4/8))$$

$$\approx 0.9795 + 2.7135 + 3.3185$$

$$= 7.0115$$

$$\begin{aligned}
 M_{SYS}(x) &= F_{SYS}(t)B_{SYS}C_{SYS} \\
 &\approx 0.69 \times 5 \times 7.0115 \\
 &\approx 24.19
 \end{aligned}$$

(2) 服务器集群

设服务器集群中两台服务器的配置、安装和使用时间相同,它们构成并联系统。

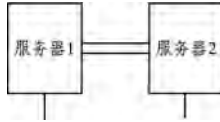


图 3 服务器集群示意图

1) 服务器集群的不可靠度计算

令  $R_{SERVER1}(t)$  和  $R_{SERVER2}(t)$  分别为服务器 1 和服务器 2 的可靠度。

$$\begin{aligned}
 F_{SYS}(t) &= 1 - R_{SYS}(t) \\
 &= 1 - [1 - (1 - R_{SERVER1}(t))(1 - R_{SERVER2}(t))] \\
 &= (1 - R_{SERVER1}(t))(1 - R_{SERVER2}(t))
 \end{aligned}$$

2) 服务器集群的业务重要度计算

$B_{sys}$  根据服务器集群相关的软件重要度和数据重要度进行整体评价。

3) 服务器集群的资产残值计算

$$C_{SYS} = C_{SERVER1} + C_{SERVER2}$$

具体计算示例如下:

1) 服务器集群的不可靠度计算

设服务器 1 和服务器 2 的 MTBF 均为 79600h,使用期均已到第 4 年。

$$R_{SERVER1}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{35040}{79600}) \approx 0.64$$

$$R_{SERVER2}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{35040}{79600}) \approx 0.64$$

$$\begin{aligned}
 F_{SYS}(t) &= (1 - R_{SERVER1}(t)) \times (1 - R_{SERVER2}(t)) \\
 &\approx (1 - 0.64) \times (1 - 0.64) = 0.1296
 \end{aligned}$$

2) 服务器集群的业务重要度计算

服务器集群承担关系型数据库管理和存储结构化数据成果的负责。

$$B_{SYS} = \text{子系统软件重要度}(3) + \text{子系统数据重要度}(3) = 6$$

3) 服务器集群的资产残值计算

设服务器的规定使用年限为 6 年,购买合同价均为 7.98966 万元。

$$\begin{aligned}
 C_{SYS} &= C_{SERVER1} + C_{SERVER2} \\
 &= \ln(C_{SERVER1-0}(1 - u_{SERVER1}/U_{SERVER1})) + \\
 &\quad \ln(C_{SERVER2-0}(1 - u_{SERVER2}/U_{SERVER2})) \\
 &= \ln(7.98966 \times (1 - 4/6)) + \ln(7.98966 \times (1 - 4/6)) \\
 &\approx 0.9795 + 0.9795 \\
 &= 1.959
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{SYS}(x) &= F_{SYS}(t)B_{SYS}C_{SYS} \\
 &\approx 0.1296 \times 6 \times 1.959 \\
 &\approx 1.52
 \end{aligned}$$

2.3 运维决策分析

通过对笔者所在数据中心的计算机设备运维重要度评估函数的计算,得出运维重要度评估数值和对应的设备数量之间的关系,如图 4 所示。

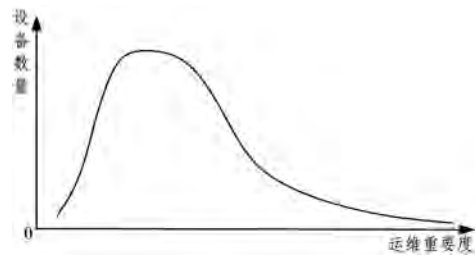


图 4 运维重要度评估数据分布示意图

设用户共有  $n$  台计算机设备/子系统过保,  $n$  台设备/子系统构成集合  $E, E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}; e_i$  对应的运维价格为  $q_i, Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ,在该年度  $n$  台设备/子系统需要的运维总经费为  $\sum_{i=1}^n q_i; e_i$  对应的运维重要度评估数值为  $m_i, M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 。

设在该年度用户的运维总投资为  $P$ ,如果  $P < \sum_{i=1}^n q_i$ ,则本文讨论的问题可描述如下:

从  $n$  台设备/子系统中选取  $j$  台设备/子系统进行运维,需求解下列方程组:

$$\begin{cases}
 P - \sum_{i=1}^j q_i = \text{Min}, & q_i > 0, P > 0, 1 \leq j \leq n & (5)
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \sum_{i=1}^j m_i = \text{Max}, & i > 0, 1 \leq j \leq n & (6)
 \end{cases}$$

考虑到计算机设备运维市场竞争的充分性以及运维价格的弹性,不失一般性,本文将  $\text{Min}(P - \sum_{i=1}^j q_i)$  设为 0。

本文采用“降序横推法”进行运维决策分析,即从图 4 右侧的运维重要度评估数值最大的设备/子系统开始进行选择,减去该设备/子系统的运维价格后,如果运维资金有剩余,则继续选择运维重要度次大的设备/子系统;依此循环,按照运维重要度评估数值的降序进行选择,直至  $P - \sum_{i=1}^j q_i = 0$ 。算法描述如算法 1 所示。

算法 1 降序横推法

输入:运维总投资  $P$ 、设备/子系统集合  $E$ 、设备/子系统运维价格集合  $Q$ 、运维重要度评估集合  $M$

输出:运维决策集合  $D$

1. 对  $n$  台/子系统过保的计算机设备的运维重要度评估数值进行降序排序,构成集合  $M'$ ;
2. 按照  $M'$  中的元素顺序对设备运维价格集合  $Q$  进行排序,构成集合  $Q'$ ;
3.  $i=1; j=1$ ;
4. FOR{
5. 从集合  $M'$  中选择运维重要度评估数值  $m_j'$ ;
6. 从集合  $Q'$  中选择  $m_j'$  对应的运维价格  $q_j'$ ;
7. IF( $P - \sum_{i=1}^j q_i' > 0$ )
8.  $j++$ ;
9. ELSE
10. EXIT
11. ENDIF
12. 将  $m_j'$  对应的  $e_j'$  写入运维决策集合  $D$ ;
13. }

该算法的时间复杂度为  $O(n \log_2 n)$  (主要受制于排序算法的时间复杂度)。

需要说明的是,在上述运维决策过程中可能需要进行子

系统的拆分。为保障运维的总投资使用不超限额,在本算法中,用户可能需要将子系统拆分并补充计算其中包含设备的运维重要度,在这些设备范围内再按照本算法进行计算以继续开展运维决策。这可能导致子系统中仅有部分设备被选择进行运维。

### 3 运维效益评估

依据运维重要度评估数据完成运维决策后,用户和运维服务厂商开始签署运维合同,开展运维工作。年度运维工作结束后,如何较为准确地评估运维效益(不主要采用定性的效益指标)是运维工作面临的另一个普遍问题。量化的运维效益的评估思路如下。

#### 3.1 可靠度效益评估

(1)日常运维工作如巡检、日常检查等是维持设备可靠度的方法,其特点是设备失效率不变,可靠度未提升。

(2)设备硬件微码升级能够降低失效率,并提升设备可靠度。

(3)设备备件替换通过提升该部件的可靠度来提升设备整机的可靠度,备机替换则能够直接提升设备整机的可靠度。在实际运维中,用户与设备运维厂商进行博弈;出于成本考虑,备品备件备机可靠度一般与原机相同。

首先分析备机替换的效益评估问题。本文假设替换成功率为100%。设原机的失效率为 $\lambda_1$ ,可靠度为 $R_1(t)$ ;备机的失效率为 $\lambda_2$ ,可靠度为 $R_2(t)$ 。令 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 。在设备的正常使用周期内,备机替换有以下两种可能:

- 1)原机正常运行,整个运维年度内无需替换;
- 2)原机因故障而进行替换。设原机运行时长为 $t_1$ 后出现故障,备机替换原机,备机运行时长为 $t_2$ ,两台设备运行总时长为 $t$ 。

上述替换过程使得设备的整体可靠度发生变化,设变化后的可靠度为 $R_{\text{SYS}}(t)$ :

$$\begin{aligned} R_{\text{SYS}}(t) &= P[(t_1 > t) \cup (t_1 \leq t \cap (t_2 > (t - t_1)))] \\ &= P(t_1 > t) + P(t_1 \leq t \cap (t_2 > (t - t_1))) \\ &= R_1(t) + \int_0^t f(t_1) R_2(t - t_1) dt_1 \\ &= \exp(-\lambda t) + \int_0^t \lambda \exp(-\lambda t_1) \exp(-\lambda(t - t_1)) \\ &\quad dt_1 \\ &= [\exp(-\lambda t)](1 + \lambda t) \end{aligned}$$

替换后,设备可靠度的提升倍数为 $(1 + \lambda t)$ 。以上文提到的PC服务器为例,假设备机与其相同,运维期为设备运行第4年,则故障替换后可靠度变更为: $[\exp(-\frac{35040}{79600})](1 + \frac{35040}{79600}) \approx 0.9274$ ,它比原机可靠度提高了1.44倍。如果该设备为子系统的一部分,则子系统的可靠度也相应发生变化,求解方法见本文2.1节的有关内容。

备件替换情况与上文相似,不再赘述。

#### 3.2 可用性效益评估

运维工作保障了设备可用性,这是运维效益的直接体现。

(1)单台设备的可用性效益计算

以上文提到的PC服务器为例, $MTBF = 79600 \text{ h}$ , $\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{79600} = 0.000013$ ;  $MTTR = 4.5 \text{ h}$ , $\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{4.5} = 0.222222$ 。

该设备已运行4年。由式(4)得:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp\{- (\mu + \lambda)t\} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \\ &= \frac{0.000013}{0.000013 + 0.222222} \exp\{- (0.222222 + \\ &\quad 0.000013) \times 8760 \times 4\} + \frac{0.222222}{0.222222 + 0.000013} \\ &\approx 0.000058 \times \exp(-7787.11) + \frac{0.222222}{0.222222 + 0.000013} \\ &\approx \frac{0.222222}{0.222222 + 0.000013} \\ &\approx 0.999942 \end{aligned}$$

通过对式(4)的分析可知,对于超过保修期(如3年)的计算机设备, $t$ 值不小于26280( $365 \times 24 \times 3$ ),式(4)中的 $\exp\{- (\mu + \lambda)t\} \rightarrow 0$ , $A(t)$ 趋于稳定,即:

$$\begin{aligned} A(t) &\approx \frac{\mu}{\mu + \lambda} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{MTBF} + \frac{1}{MTTR}} \\ &= \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \end{aligned} \quad (7)$$

此时,可以认为设备运行进入了稳定状态,只有在此状态下式(7)才能成立。式(7)说明,如果运维工作未落实,则设备/子系统的 $MTTR$ 将会被放大, $MTBF$ 相应减小, $A(t)$ 同步减小,严重时可能导致设备闲置或提前报废。

(2)子系统的可用性效益计算

这里将子系统作为一个虚拟设备并从整体上进行分析,则引入子系统 $MTBF_{\text{SYS}}$ 进行可用性计算。

由可靠度定义 $R(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{t}{MTBF})$ 可得:

$$R_{\text{SYS}}(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-\frac{t}{MTBF_{\text{SYS}}})$$

$$MTBF_{\text{SYS}} = \frac{-t}{\ln(R_{\text{SYS}}(t))}$$

子系统 $MTTR_{\text{SYS}}$ 为子系统内的设备的平均故障维修时间之和, $MTTR_{\text{SYS}} = \sum_{i=1}^n MTTR_i$ , $n$ 为子系统内的设备总台数。

由式(7)可知,子系统的可用性为:

$$\begin{aligned} A_{\text{SYS}}(t) &\approx \frac{MTBF_{\text{SYS}}}{MTBF_{\text{SYS}} + MTTR_{\text{SYS}}} \\ &= \frac{-t}{\ln(R_{\text{SYS}}(t))} \\ &= \frac{-t}{\ln(R_{\text{SYS}}(t)) + \sum_{i=1}^n MTTR_i} \\ &= \frac{t}{t - \ln(R_{\text{SYS}}(t)) + \sum_{i=1}^n MTTR_i} \end{aligned}$$

由上可知,在子系统可靠度 $R_{\text{SYS}}(t)$ 一定的前提下,运维工作的主要手段就是要尽量减少子系统的平均维修时间 $MTTR_{\text{SYS}}$ ,其取值越低,可用性越高,运维工作的效益越好。

**结束语** 为实现运维资金效益最优,本文在计算机设备及子系统可靠度计算的基础上,结合设备资金残值、业务重要度指标,构建了设备运维重要度评估数学模型,并据此提出了运维决策算法。在此基础上,采用计算机设备/子系统可靠度及基于马尔可夫链的可用性分析,结合实例提出了运维效益评估量化计算方法,这对计算机设备运维质量的量化和考核

(下转第579页)

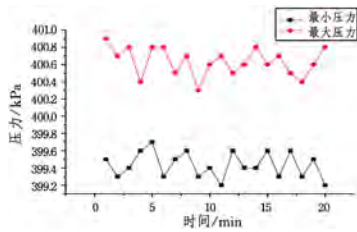


图10 压力变化曲线

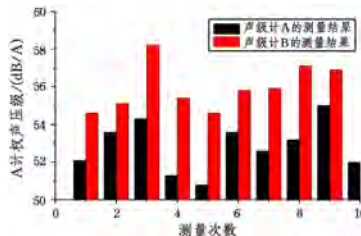


图11 实验结果

由上述测试结果图中可以看出:在压力控制方面,压力设定值为400 kPa,压力的波动的最大值为400.9 kPa,最小值为399.2 kPa,即 $400 \pm 0.9$  kPa,压力的波动范围为 $\pm 0.3\%$ ,低于标准规定值 $\pm 0.5\%$ ;在温度控制方面,设定温度值为 $21^\circ\text{C}$ ,系统将温度一直控制在 $21^\circ\text{C}$ 左右,满足标准要求;上述喷油器在设定的实验环境下进行噪声测量,A计权下的最大声压级和平均声压级均小于标准中的70 db(A),满足标准对汽油机喷油器噪声值的要求。

**结束语** 本文依据国家标准中对汽车噪声性能检测的要求,设计了一套专用的汽车喷油器噪声测量系统。本系统在硬件开发方面设计了能提供稳定温度和压力的喷油介质、驱动喷油器正常工作的驱动电路以及自动测量喷油器工作噪声的单元等;在软件开发方面设计了一套专用于喷油器噪声测量的上位机系统。实验表明:本系统能够快速、准确、便捷地测量汽车喷油器噪声,极大地完善了汽车和发动机噪声控制技术。

(上接第572页)

有一定的启发作用。该方法已在笔者所在数据中心得到了应用,增强了计算机设备运维工作的科学性和规范性。

### 参考文献

[1] 卢明银,徐人平,李乃梁,等.系统可靠性[M].北京:机械工业出版社,2008.

[2] 王海鹏,周兴社,张涛,等.面向用户的普适计算系统可用性度量模型[J].计算机科学,2006,33(11):89-93.

[3] 刘慧敏.以ITIL为基础的IT服务管理应用研究[J].计算机技术与发展,2012,22(5):195-197.

[4] PECHT M,KAPUR K C,KANG R,et al. Foundations of Reliability Engineering[M]. China:Publishing House of Electronics Industry,2011.

[5] 刘昊.计算机可用性建模与评估工具的设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[6] TRIVEDI K S. Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications, Second Edition[M]. Publishing House of Electronics Industry,2015.

[7] XIE M,POH K L,DAI Y S. Computing System Reliability: Models and Analysis[M]. Springer Publishing Company, Incorporated,2014.

### 参考文献

[1] 杨金才,杨金榜,丁艳萍,等.发动机喷油噪声控制方法的研究[J].汽车工程,2011,33(10):898-901.

[2] ANDRIANOV D I,MANZIE C,BREAR M J. Spark ignition engine control strategies for minimizing cold start fuel consumption under cumulative tailpipe emissions constraints[J]. Control Engineering Practice,2013,21(8):1007-1019.

[3] ROBERTS A,BROOKS R,SHIPWAY P. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions[J]. Energy Conversion and Management, 2014,82:327-350.

[4] 刘瑞骏,郝志勇,郑旭,等.自适应广义S变换汽油机怠速振动分析[J].浙江大学学报,2016,50(3):43-50.

[5] PAYRI R,GARCIA J M,SALVADOR F J, et al. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics[J]. Fuel, 2004, 84(5):551-561.

[6] 孙宜权,王滨,张英堂,等.基于自适应平方因子的柴油机喷油故障诊断研究[J].兵工学报,2013,34(5):30-34.

[7] 褚志刚,蔡鹏飞,蒋忠翰,等.基于声阵列技术的柴油机噪声源识别[J].农业工程学报,2014,30(2):23-30.

[8] 罗福强,周群,薛福英,等.农用柴油机喷油器各孔喷油规律验证及流动特性模拟[J].农业工程学报,2016,32(2):58-63.

[9] 仇滔,冯祥,雷艳,等.出口压力对柴油喷油器流量特性影响的实验研究[J].兵工学报,2015,36(5):33-36.

[10] HATTOR H,NARUMIYA K. Analysis of initial breakup mechanism of diesel spray injected into high-pressure ambience[C]// SAE 2014 World Congress & Exhibition. 2004.

[11] 刘凯敏,杨靖,朱继明,等.涡轮增压直喷汽油机变速器噪声的试验研究[J].汽车工程,2016,38(4):33-38.

[12] 李梅林,谢惠民.车用发动机噪声测试研究[J].湖南大学学报,2004,31(3):28-31.

[13] 刘帅,王忠,王林,等.柴油机表面辐射噪声源识别与降噪研究[J].汽车工程,2016,38(9):33-38.

[14] 王谦,孙伟,何志霞,等.基于超高速摄影分析柴油机近场喷雾锥角变化特性[J].农业工程学报,2016,32(15):47-53.

[8] BEAUDRY M D. Performance-Related Reliability Measures for Computing Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006,C-27(6):540-547.

[9] SCHNEIDEWIND N. Quantitative Methods to Ensure the Reliability, Maintainability, and Availability of Computer Hardware and Software[M]// Systems and Software Engineering with Applications. John Wiley & Sons, Inc. 2011:1-43.

[10] EUSGELD I,FECHNER B,SALFNER F, et al. Hardware Reliability[M]// Dependability Metrics. Springer Berlin Heidelberg, 2008:59-103.

[11] LOPEZ L D,BOUGAEV A A,GROSS K C, et al. Method and system for the assessment of computer system reliability using quantitative cumulative stress metrics: US, US20130138419[P]. 2013.

[12] 张志华.可靠性理论及工程应用[M].北京:科学出版社,2012.

[13] 冯懿.复杂计算机系统可用性评测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[14] 王宁,孙树栋,李淑敏,等.基于DD-HSMM的设备运行状态识别与故障预测方法[J].计算机集成制造系统,2012,18(8):1861-1868.

[15] 刘克.实用马尔可夫决策过程[M].北京:清华大学出版社,2004.

[16] 陆大钧.随机过程及其应用[M].北京:清华大学出版社,1986.