

基于 Markov 过程的柴油机监控系统可靠性评估

欧 健, 李艾华*, 徐 斌, 郑丰收
(第二炮兵工程学院 五系, 陕西 西安 710025)

摘要:为评估柴油机监控系统的可靠性,提出了基于马尔科夫过程的柴油机监控系统可靠性评估方法。总结出了系统的功能结构框图,通过引入 Markov 过程描述系统状态从而建立了系统可靠性模型。通过不同方式获得了部件故障率参数。利用 Matlab 数值计算分析了部件故障率和维修率变化对系统可靠度及可用度的影响,得出对系统可靠性有较大影响的部件。研究表明,部件故障率与修复率的比值对系统可用度的影响较大。

关键词:监控系统; Markov 过程; 可靠度; 可用度; 数据收集

中图分类号: TM762; TP202^{·1}; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)11-1319-05

Reliability assessment for diesel engine monitoring system based on Markov process

OU Jian, LI Ai-hua, XV Bin, ZHENG Feng-shou
(5th Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To assess reliability of the diesel engine monitoring system, reliability assessment method for diesel engine monitoring system based on Markov process was proposed. The system's function structure was extracted, and system reliability model was established by taking Markov process to describe system state. Component failure rate parameter was collected by different ways. The influence of component failure rate and repair rate changes on system reliability and availability was analyzed with Matlab numerical evaluation, then component that influenced system reliability much was obtained. The results show that ratio of failure rate to repair rate impacts on system availability is drawn.

Key words: monitoring system; Markov process; reliability; availability; data collection

0 引 言

柴油机监控系统作为柴油发电机组控制系统的子系统,是实现阵地电站自动化的控制设备,随着电站自动化程度的不断提高,控制系统也更加复杂^[1],作为保障作战装备,其可靠性能否满足实际要求成为必须解决的问题。文献[2]在评估末敏弹系统的可靠性时,考虑为串联系统,将求出的各部件可靠度相乘以得到系统可靠度,这种方法不适合复杂系统结构的可靠性评估。马尔可夫过程以其在随机过程中具有分析动态问题的优势被广泛应用于设备可靠性评价中^[3-5],

关于控制系统可靠性分析,文献[6]利用元器件记数法得出整个控制系统故障率,然后建立马尔可夫过程以分析整个系统的可用度,但该方法不能分析系统薄弱环节,也不能得出影响系统可靠性的因素。

笔者以阵地某型号发电机组的柴油机监控系统为对象,根据其原理总结了系统的功能结构框图,并引入 Markov 过程对该系统的可靠性进行了分析,得到了可靠性相关指标,在此基础上分析系统薄弱环节和故障参数对系统可靠性的影响,并给出了使用过程中的相关建议以使设备更好地发挥其保障作战效能。

收稿日期: 2011-05-19

作者简介: 欧 健(1986-),男,四川富顺人,主要从事机电设备故障诊断与系统可靠性分析方面的研究. E-mail: ourxiang@163.com

通信联系人: 李艾华,男,教授,博士生导师. E-mail: l863@163.com

1 监控系统结构及系统建模分析

柴油机监控系统主要实现柴油机的启动、运行和停机控制以及实现柴油机的运行保护,根据其工作方式及信号传递过程,可得出监控系统的功能结构框图,如图 1 所示。

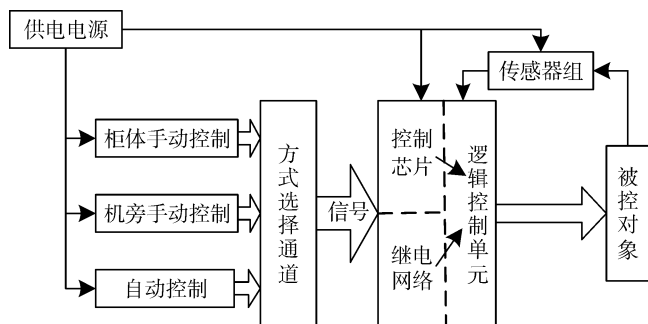


图 1 监控系统功能结构

图 1 中供电电源负责向各模块提供电源,柜体手动控制、机旁手动控制和自动控制是 3 种不同的操作方式,任一方式发生故障时,可通过另一种方式实现控制,方式选择通道实现信号通道的选择,逻辑控制单元由两部分构成:控制芯片和继电器网络,主要完成控制信号的产生,监测信号收集处理,传感器组主要获取被控对象的状态信息,当被控对象发生异常时,由逻辑控制单元发出控制信号使得被控对象安全停机。

建立柴油机监控系统的可靠性模型需考虑以下 3 点:①该系统为可维修系统,其可用性不仅与元件自身故障有关,同时与维修活动有关;②所建立模型需能反映出单个部件的可靠性参数对系统可靠性的影响;③模型要能考虑该系统的正常工作状态与故障状态均存在多种情况,这是由于该系统存在冗余结构,可通过 3 种方式实施对被控对象的控制。除此之外,传感器组发生故障时,监控系统会立即停止工作,这是独立于系统故障和正常以外的状态。

基于以上考虑,笔者引入 Markov 过程来对系统进行可靠性分析,它适合多状态系统的可靠性分析^[7],其显著特点是要求各部件的故障分布为常指数分布^[8],而组成监控系统的各元件均为电子元件,可以认为其故障分布满足马氏过程的基本条件。

2 Markov 模型的建立

2.1 基本假设

假设如下:

(1) 部件 i 在任意时刻 t 时所处的状态有 4 种,分别为工作、待用、故障维修和故障等待维修,部件编号 i 的规定如表 1 所示^[9];

表 1 部件编号

编号	部件	编号	部件
1	供电电源	4	自动控制器件
2	柜体手动器件	5	逻辑控制单元
3	机旁手动器件	6	传感器组

(2) 系统各单元的寿命和维修时间均服从指数分布,即故障率 λ_i 和维修率 μ_i 为常数;

(3) 在时间区间 $(t, t+\Delta t)$ 内,未发生故障的单元 i 发生故障的概率为 $\lambda_i \Delta t + O(\Delta t)$,尚未修复的单元 j 被修复的概率为 $\mu_j \Delta t + O(\Delta t)$,方式选择通道绝对可靠;

(4) 不考虑处于待用状态的元件发生故障,只考虑因部件故障或修复所造成的系统状态变化;

(5) 3 种操作方式不存在优先使用权,当某种操作方式失效时,可供选择的使用方式被选择的概率相同;

(6) 自动控制方式存在优先维修权。

2.2 求取系统的可能状态

根据部件所处状态,可将系统的状态分为 4 大类:

(1) 无故障工作状态:此时各部件正常工作,它包括了 3 种状态,即:

状态 1(2,3): 部件 2(3,4)工作,3、4(2,4,2,3)待机;

(2) 系统降级工作状态:主要是指当柜体手动、机旁自动和自动这 3 种工作方式中有 1 种或 2 种发生故障时,系统仍能正常工作;它包括了 10 种状态:

状态 4(5): 部件 2 处于维修状态,3(4)工作,4(3)处于待机状态;

状态 6(7): 部件 3 处于维修状态,2(4)工作,4(2)处于待机状态;

状态 8(9): 部件 4 处于维修状态,2(3)工作,3(2)处于待机状态;

状态 10(11): 部件 2(3)处于维修状态,3(2)故障等待维修,4 工作;

状态 12(13): 部件 4 处于维修状态,2(3)故障等待维修,3(2)工作;

(3) 停止工作状态:当传感器组发生故障时,监控系统采集不了被控对象的状态参数,逻辑控制单元使被控对象停止工作;它包括 1 种状态,状态 14: 部件 6 故障维修;

(4) 故障状态:当部件发生故障时,监控系统停止工作;它包括 3 种状态:

状态 15: 部件 1 故障维修;

状态 16: 部件 2、3、4 同时故障维修;

状态 17: 部件 5 故障维修。

2.3 系统可靠性建模

根据假设可得系统所处状态可用马尔科夫过程描述。令 $S(t)$ 表示系统在 t 时刻所处的状态, 则 $S(t) = 1, \dots, 17$, $P_i(t)$ 为时刻 t 系统处于状态 i 的概率; $P_i^{(0)}$ 为系统初始处于状态 i 的概率由 2.1 节中假设 5 可知 $P_i^{(0)} = 1/3$, $i=1, 2, 3$, 其余为 0; $P_{ij}(t)$ 表示在时间 t 内, 系统从状态 i 转移到状态 j 的概率。

2.3.1 Markov 转移速率矩阵

其公式如下:

$$q_{i,j} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{i,j}(\Delta t) - \delta_{ij}}{\Delta t} \quad (1)$$

首先计算 $q_{1,1}$, 由随机理论可知 $\delta_{11} = 1$, 且:

$$\begin{aligned} p_{1,1}(\Delta t) = \\ P\{S(t) = 1, \text{ 且 } \Delta t \text{ 内未发生故障}\} = \\ \prod_{i=1}^2 [1 - \lambda_i \Delta t - O(\Delta t)] \times \prod_{i=5}^6 [1 - \lambda_i \Delta t - O(\Delta t)] \quad (2) \end{aligned}$$

联立以上两式可得:

$$q_{1,1} = -\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_5 - \lambda_6 \quad (3)$$

最终可得到系统速率转移矩阵, 限于篇幅, 这里给出部分值, 如表 2 所示 (其中 $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_5 + \lambda_6$)。

表 2 系统状态速率转移矩阵

项目	值
q_{1j}	$q_{11} = -\lambda_1 - \Lambda$, $q_{14} = q_{15} = \lambda_2 / 2$,
q_{4j}	$q_{42} = \mu_2$, $q_{44} = -\mu_2 - \lambda_3 - \Lambda$, $q_{4,10} = \lambda_3$
$q_{16,j}$	$q_{16,9} = q_{16,10} = \mu_4 / 2$, $q_{16,16} = -\mu_4 - \Lambda$
	$q_{i,14} = \lambda_6$, $q_{i,15} = \lambda_1$, $q_{i,17} = \lambda_5$, $i = 1, \dots, 13, 16$
$q_{14,j}$	$q_{14,1} = q_{14,2} = q_{14,3} = \mu_6 / 3$, $q_{14,14} = -\mu_6$

2.3.2 系统可靠性和可用度分析

由全概率公式可得:

$$P_j(t) = \sum_{i=1}^N p_i^{(0)} \times P_{ij}(t) \quad (4)$$

联立柯尔莫哥洛夫向前 (Kolmogorov) 方程:

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_{k=1}^N p_{ik}(t) \times q_{kj} \quad (5)$$

可得:

$$\frac{dP_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^N p_k(t) q_{kj} \quad (6)$$

2.3.2.1 系统可靠性分析

系统可靠度是指从初始时刻到时刻 t 系统一直处于工作状态的概率, 因此, 它可看作是无修复情况下系统处于能工作状态的概率。模型中令维修率为零, 系统可靠度可表示为^[10]:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{13} p_i(t) \quad (7)$$

2.3.2.2 系统稳态可用性分析

稳态可用性是指 $t \rightarrow \infty$ 时系统可用度 $A(t)$ 的极限。此时可认为系统各状态概率已不发生变化, 令 $dP_j(t)/dt = 0$, 则:

$$\mathbf{Q} \times \vec{P} = 0 \quad (8)$$

式中: $\mathbf{Q}$ —速率矩阵, $\vec{P}$ —稳态概率列向量。

易知 $|\mathbf{Q}| = 0$, 去掉一方程, 补充 $\sum_{i=1}^n P_i = 1$, 得到具有唯一解方程组:

$$\begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & q_{1,n} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \cdots & q_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n-1,1} & q_{n-1,2} & \cdots & q_{n-1,n} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

系统稳态可用度为 $A = \sum_{i=1}^{13} P_i$ 。

3 柴油机自动监控系统的可靠性分析

3.1 参数的获取

柴油机监控系统各部件参数的来源有 3 部分: ①电子元件的故障率, 笔者采用《中华人民共和国国家军用标准》电子设备可靠性预计手册中的元器件计数法, 计算各单元的故障率; ②逻辑控制元件故障率的获取, 本研究所涉及的逻辑控制器件均为西门子公司所产的器件, 其故障率由西门子公司提供^[11]; ③电源和传感器组的失效率由厂家调研获取。

(1) 供电电源的可靠性预计。依据销售公司提供的信息, 德尔福 6-QW-100HD 电池的 MTBF 为 6 年, 由此可计算出元件的失效率 $\lambda_1 = 19.0258 (10^{-6}/h)$ 。传感器 MTBF 为 6 年, 由此可计算出元件的失效率 19.0258, 数量 6 个, 可得传感器组的失效率为 $\lambda_1 = 114.155 (10^{-6}/h)$ 。

(2) 柜体手动器件的可靠性预计, 元件故障率由文献[12]可得, 机旁手动器件与柜体手动器件相同, 如表 3 所示。

表 3 柜体手动器件

名称	数量	$\lambda / (10^{-6} h^{-1})$
按钮式开关	1	0.578
拨动式开关	2	0.625

环境分类选择为 G_M, 质量等级为 B1,

$$\lambda_2 = \sum_i N_i \times \lambda_{Gi} \pi_{Qk} = 1.0968 (10^{-6} / h)$$

(3) 自动控制器件,如表 4 所示。

表 4 自动控制器件

名称	型号	数量	$\lambda/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$
CPU	CPU315-2DIP	1	1.614 6
DI	SM321; DI16×DC24V	2	1.084 1
DO	SM322; DO16×DC24V/0.5A	2	1.080 0

$$\lambda_4 = \sum_i N_i \times \lambda_i = 5.942 \ 8 (10^{-6} \text{ h}^{-1})$$

(4) 逻辑控制单元,如表 5 所示。

表 5 逻辑控制单元

名称	模块型号	数量	$\lambda/(10^{-6} \text{ h}^{-1})$
LOGO!	LOGO! DM8 12/24RCO	1	0.546 2
拓展模块	LOGO! DM8 12/24 R	1	1.123 6
继电器		5	3.171

继电器环境分类选择为 G_{M1} , 质量等级为 B1,

$$\lambda_5 = \sum_i N_i \times \lambda_{Gi} \pi_{Qk} + \lambda_{LOGO!} = 9.787 (10^{-6} \text{ h}^{-1})$$

(5) 本研究假定维修均能在 24 小时内能够完成, 取 $\mu_1 = 1/24 (\text{h}^{-1})$ 。

3.2 系统可靠性与可用性分析

3.2.1 系统可靠性分析

本研究取 $\mu_1 = 0$, 解方程式 (6), 利用式 (7) 可得系统的可靠度。取部件 1 和部件 6 共 3 个用于计算的故障率分别为 $0.5\lambda_1, \lambda_1, 1.5\lambda_1$, 由 Matlab 编程求解以观察个别部件故障率变化对系统可靠度的影响, 其结果如图 2 所示。

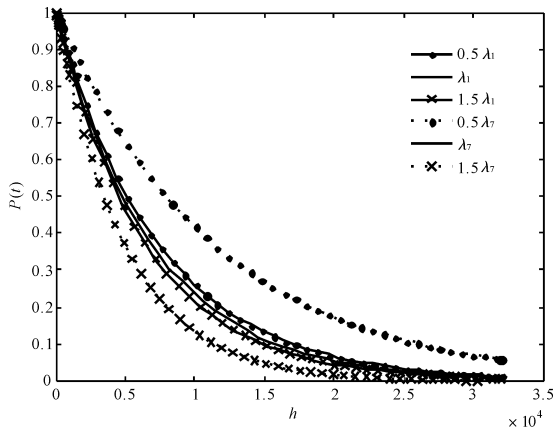


图 2 部件故障率变化对系统可靠度的影响

由图可知, 部件故障率增大会使系统可靠性减小, 且故障率大的部件将会对系统可靠性影响更大, 在平时的使用维护时, 对故障率大的部件应予以更多重视。

3.2.2 系统可用度分析

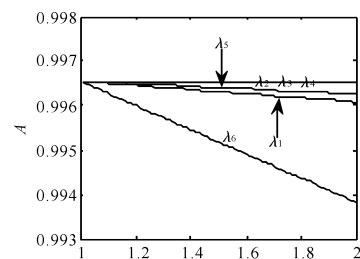
由 Matlab 编程求解方程式 (9) 得到系统可用度 $A = 99.627 \ 5\%$, 处于安全停机状态的概率 $P = P\{S(\infty) = 14\} = 0.27\%$ 。处于故障不可用状态的概率 $P \approx 0$ 。

由上述结果可知, 该型号系统的在任何时候处于可用状态的概率极高, 能够满足保障部队作战要求。

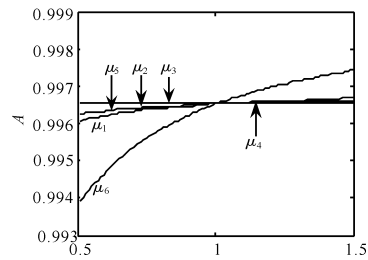
3.3 元件故障率和维修率对系统稳态可用度的影响

3.3.1 故障率和维修率分别变化对稳态可用度的影响

本研究分析各元件故障率在 $\lambda_i \sim 2\lambda_i$ 间变化时系统稳态可用度的变化情况, 其结果如图 3(a) 所示。由图可知, 当故障率在 $\lambda_i \sim 2\lambda_i$ 变化时, 部件 6、1 和 5 的故障率增大对系统稳态可用度影响依次减小, 但 3 类部件的故障率增大均会使系统稳态可用度的减小, 而部件 2~4 的故障率在 $\lambda_i \sim 2\lambda_i$ 变化时对系统的稳态可用度变化几乎不发生影响, 这是由于部件 2、3 和 4 构成一冷储备环节。



(a) $1\lambda \sim 2\lambda$



(b) $0.5\mu \sim 1.5\mu$

图 3 部件故障率和维修率分别变化对可用度的影响

元件维修率变化对系统稳态可用度的影响如图 3(b) 所示, 分析时取元件故障率变化范围为 $0.5\mu_i \sim 1.5\mu_i$, 这是由于受现实条件的影响, 维修率可能出现增大或减小的情况。由图可见, 部件 6、5 和 1 的维修率变化对系统的稳态可用度变化影响较大, 这是因为它们的故障率变化对系统可用度影响较大, 而提高它们的维修率相当于降低了其故障率。

综上所述, 故障率和维修率发生改变对系统稳态可用度影响由强至弱的元件为 6、1、5。它们为系统的薄弱环节, 当对系统进行维护时, 要首先对其进行维护。

3.3.2 故障率和维修率同时变化对稳态可用度的影响

由 3.3.1 节的分析可得, 当 $\lambda_i \uparrow$, 同时 $\mu_i \downarrow$, 稳态可用度 $A \downarrow$; 当 $\lambda_i \downarrow$, 同时 $\mu_i \uparrow$, $A \uparrow$ 。下面讨论 λ 和 μ 同时变化的其它情况时, 系统稳态可用度的变化情况如图 4 所示:

- (1) $\lambda_i \uparrow, \mu_i \uparrow$, 且 $\lambda_i / \mu_i \downarrow$, 其结果如图 4(a) 所示;
- (2) $\lambda_i \uparrow, \mu_i \uparrow$, 且 $\lambda_i / \mu_i \uparrow$, 其结果如图 4(b) 所示;

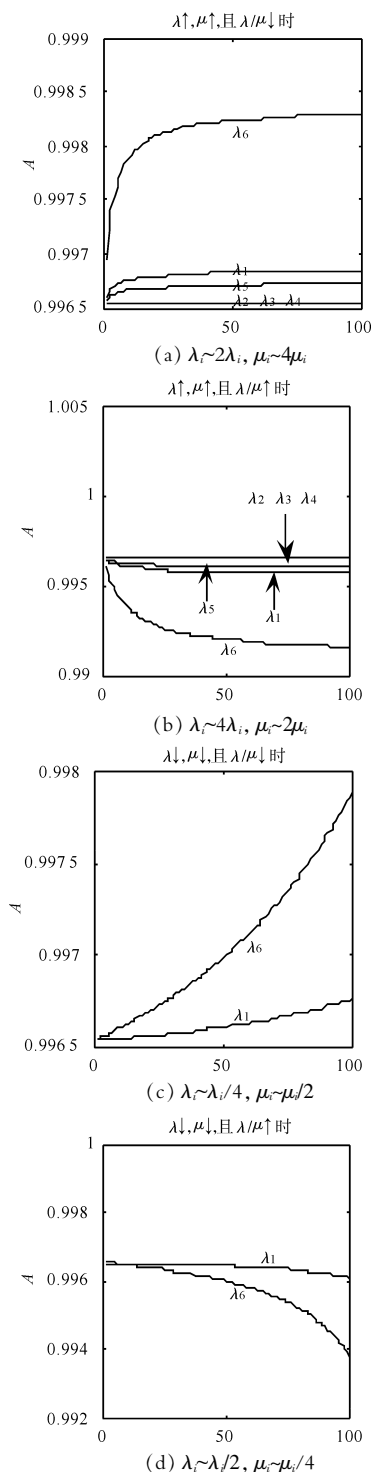


图 4 部件故障率与维修率同时变化对可用度的影响

(3) $\lambda_i \downarrow, \mu_i \downarrow$, 且 $\lambda_i/\mu_i \downarrow$, 其结果如图 4(c) 所示; 需说明的是, 由于部件 2~5 都是依据公司给出的理想数据计算所得出的故障率, 故此处不考虑其故障率减小的情况。而当 λ_i 不变且 $\mu_i \downarrow$ 时, 稳态可用度的变化情况前已经讨论。

(4) $\lambda_i \downarrow, \mu_i \downarrow$, 且 $\lambda_i/\mu_i \uparrow$, 其结果如图 4(d) 所示。

由图可得, λ_i/μ_i 对系统稳态可用度的影响较大, 且它们呈反相关。故防止系统稳态可用度下降的有效措施必是能使 λ_i/μ_i 不变或降低的措施, 而单一改变元件故障率或维修率的做法不一定能防止系统稳态可用度下降。

4 结束语

笔者利用马尔可夫过程对柴油机监控系统的可靠性进行了分析, 总结了系统的功能结构框图, 运用 Markov 过程描述系统的状态。借助 Matlab 求解系统可靠性模型的数学方程, 分析了元件故障率及维修率对柴油机自动监控系统可靠性及可用度的影响, 并对用户提供了使用过程中的建议。

参考文献(References):

- [1] 徐 斌, 张瑞祥. 阵地电站及其自动化装置[M]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2009.
- [2] 唐 克, 杜 涛, 王存威. 末敏弹系统可靠性研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(9): 85-86.
- [3] 廖瑞金, 肖中男, 巩 晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.
- [4] 王贤林, 张 华. 基于马尔柯夫过程的机电设备有效性模型[J]. 机电工程, 2008, 25(6): 5-7.
- [5] ANDERSON P M, CHINTALURI G M, MAGBUHAT S M, et al. An improved reliability model for redundant protective systems—Markov models [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997, 12(2): 573-578.
- [6] 曾少斌, 林开芬, 江小霞. 基于马尔可夫过程的舵机控制系统可靠性分析[J]. 船海工程, 2009, 38(4): 59-62.
- [7] BROWN R E, GUPTA S, CHRISTIE R D, et al. Distribution system reliability assessment using hierarchical Markov modeling [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1996, 11(4): 1929-1934.
- [8] ROSS S M. Introduction to Probability Models [M]. 9th ed. Salt Lake: Academic Press, 2007.
- [9] BIERBAUM R L, BROWN T D, KERSCHEN T J. Model-based reliability analysis [J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2002, 51(2): 133-140.
- [10] 杨 敏. 小型柴油机曲轴生产线新工艺设计及应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2009(2): 22-23.
- [11] 西门子中国公司. SIMATIC 产品的平均无故障工作时间[EB/OL]. [2011-04-19]. <http://support.automation.siemens.com/CN/view/zh/16818490>.
- [12] 中国人民解放军总装备部. GJB/Z 299C-2006 电子设备可靠性预计手册[S]. 中国人民解放军总装备部, 2006.

[编辑: 张 翔]