

基于寿命周期费用的系统可靠性与维修性关系研究^{*}

潘洪亮¹ 徐 翌^{1,2} 唐少强¹

(1. 同济大学国家磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 副研究员)

摘 要 可靠性和维修性直接影响系统的可用性和寿命周期费用。在满足可用性的前提下, 应确保系统寿命周期费用最低。探讨了可靠性与维修性对可用性的影响; 定量分析了系统寿命周期费用与可靠性和维修性的关系, 并建立相应的数学模型; 通过综合权衡系统可用性和寿命周期费用, 确定系统的可靠性和维修性参数。以中低速磁浮列车悬浮系统为例验证了寿命周期费用模型的可行性与实用性。

关键词 磁浮列车悬浮系统; 可靠性; 维修性; 可用性; 寿命周期费用

中图分类号 U268.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.007

On the Relationship between System Reliability and Maintainability Based on Life Cycle Cost

PAN Hongliang, XU Zhao, TANG Shaoqiang

Abstract Reliability and maintainability directly affect the availability and life cycle cost of a system, the minimum life cycle cost of the system should be ensured on the premise of satisfying the availability. In this paper, the effect of reliability and maintainability on availability is discussed; the relationship between the system life cycle cost, the reliability and the maintainability is quantitatively analyzed, a corresponding mathematical model is established; with a comprehensive tradeoff of the system availability and life cycle costs, the reliability and maintainability parameters of the system are determined. The feasibility and practicability of the life cycle cost model are verified by taking the suspension system of medium and low speed maglev train for example.

Key words suspension system of maglev train; reliability; maintainability; usability; life cycle cost

First-author's address National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, 201804, Shanghai, China

系统的可靠性和维修直接影响系统的可用性和寿命周期费用。因此, 需以可用性为目标进行可靠性与维修性的综合权衡, 并获取最优寿命周期费用效能, 使系统在稳定运行前提下拥有最低的系统寿命周期费用。

1 可靠性与维修性的权衡分析

可靠性与维修性的权衡分析以可用性为目标。假设系统具有稳定可靠性 $R(t)$, 是单一总成或严格串联的^[1]。系统在 $t = 0$ 时以可使用状态开始工作, 在 t 时刻仍处于可使用状态 (即刻可以工作) 的有效度为 $A(t)$, 则由更新方程 (renewal equation), 有:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-y)n(y)dy \quad (1)$$

式中:

$R(t)$ ——系统可靠度, 以至 t 时刻为止无故障的概率表示;

$n(t)$ ——系统的更新率 (renewal rate), 即当系统进行一系列运转-故障-修理-再运转循环时, 其进入“运转”状态的比率。

则 $\int_0^t R(t-y)n(y)dy$ 是在 $y=t$ 之前该系统出现 1 次或几次故障, 但在时间 $y < t$ 终了时恢复工作而且在其后的 $(t-y)$ 期间保持良好, 从而是在 $y=t$ 时该系统正常工作的概率。

$$n(t) = h(t) + \int_0^t h(t-y)n(y)dy \quad (2)$$

式中:

$h(t)$ ——失效前时间与修复时间之和的联合概率密度函数。

若用 $g(t)$ 表示失效前时间 (即“工作”时间) 的概率密度函数, 用 $f(t)$ 表示修复时间 (即“停机”时

^{*} “十三五”国家重点研发计划先进轨道交通重点专项课题 (2016YFB1200601); 湖南省科技重大专项项目 (2015GK1001)

间)的概率密度函数,则通过 $g(t)$ 与 $f(t)$ 的卷积可得到 $h(t)$:

$$h(t) = \int_{y=0}^t g(t-y)f(y)dy \quad (3)$$

假设其系统有

$$g(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (4)$$

$$f(t) = \mu \exp(-\mu t) \quad (5)$$

式中:

λ ——故障率;

μ ——修复率。

对式(1)~(5)取拉普拉斯变换,得:

$$A(s) = R(s) + R(s)n(s) \quad (6)$$

$$n(s) = h(s) + h(s)n(s) \quad (7)$$

$$h(s) = g(s)f(s) \quad (8)$$

把式(8)代入式(7),得:

$$n(s) = g(s)f(s)/[1 - g(s)f(s)] \quad (9)$$

再将式(9)代入式(6),并用概率密度函数 $g(s)$ 来表达 $R(s)$,有:

$$R(s) = [1 - g(s)]/s \quad (10)$$

故式(6)可转变为:

$$A(s) = [1 - g(s)]/s[1 - f(s)g(s)] \quad (11)$$

因为密度函数 $g(t)$ 与 $f(t)$ 的拉普拉斯变换是:

$$\begin{cases} g(s) = \lambda/(\lambda + s) \\ f(s) = \mu/(\mu + s) \end{cases} \quad (12)$$

把式(12)代入式(11),并变换为时间定义域,得:

$$A(t) = \mu/(\lambda + \mu) + [\lambda/(\lambda + \mu)] \exp[-(\lambda + \mu)t] \quad (13)$$

也可用平均故障间隔时间(t_{MTBF})和平均维修时间(t_{MTTR})来表示:

$$A(t) = \frac{t_{MTBF}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} + \left[\frac{t_{MTTR}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} \right] \exp \left[- \left(\frac{1}{t_{MTBF}} + \frac{1}{t_{MTTR}} \right) t \right] \quad (14)$$

由式(14)可见,当 t 增加时,式(14)右边的第二项逐渐减小,有效度趋近其极限成为常数,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = A(t) = \frac{t_{MTBF}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} \quad (15)$$

通过式(15)即可进行磁浮列车悬浮系统的维修性与可靠性的综合权衡分析。

依据长沙磁浮列车现场状况,假设悬浮系统 t_{MTBF} 最小值为 400 h, t_{MTTR} 最大值为 6 h。A 依次取

0.970, 0.980, 0.990, 0.995, 0.999, 计算 t_{MTBF} 与 t_{MTTR} 的关系,并指出当 $t_{MTBF} > 400$ h, $t_{MTTR} < 6$ h 时,符合要求的 t_{MTBF} 与 t_{MTTR} 的综合权衡范围(见图1)。

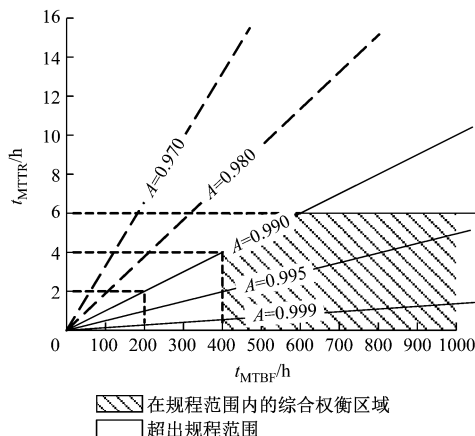


图1 可靠性与维修性权衡分析范围

2 系统寿命周期费用计算模型的建立

寿命周期费用(C_{LC})是系统在预期的寿命周期内,为其论证、研制、生产、使用与保障以及退役处理所支付的所有费用之和^[2]。 C_{LC} 涉及经济、技术、管理多方面学科的理论研究,可覆盖系统从决策论证、设计、生产试验、使用、后期维护直至报废处理的整个寿命周期产生的费用,也可针对系统寿命周期的某阶段费用进行分析研究。通过 C_{LC} 的分解、预测和评价,可实现对 C_{LC} 的优化和方案的取舍^[3]。可见, C_{LC} 是一个极其重要的经济性量化指标,为系统的设计、选择、使用及报废提供了决策依据^[4]。

系统都是以实现一定的功能为目的。影响到系统实际功能的各种因素,就是影响系统 C_{LC} 的因素。系统的实际功能由其技术性能及可用性决定。因此,影响系统技术性能及可用性的因素也就是影响系统 C_{LC} 的因素。图2为 C_{LC} 的影响因素。

在系统寿命周期分析的基础上,可以建立费用计算模型如下:

$$C_{LC} = C_0 + C_{os} + C_{dr} + C_f \quad (16)$$

式中:

C_0 ——原始投资费用,包括调研、研制及生产制造等费用;

C_{os} ——运行费用,包括能耗、人工等费用;

C_{dr} ——退役处理费;

C_f ——维修保障费用。

C_{os} 与 C_{dr} 为常数,可由经验得到。 C_0 与 C_f 可由

靠性和维修性决定。

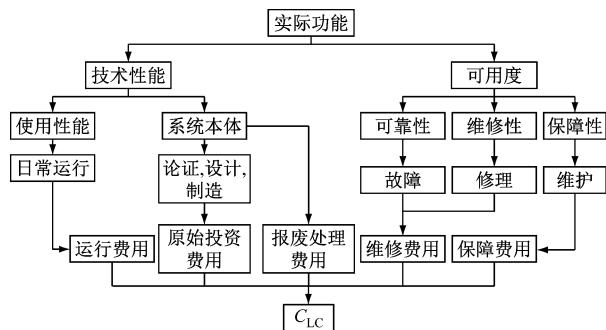


图2 C_{LC} 影响因素

2.1 原始投资费用 C_0

系统的造价 C_0 与 R 的关系可以归结为系统中各单元的造价与可靠度之间的函数关系。系统中单元 i 的造价 C_i 与可靠度 R_i 关系难以建立,其原因为:① 缺乏足够的统计数据;② 对任何单元都有效的函数关系式是不可能存在的,单元材料、型式有多种选择和组合,而 C_i 与 R_i 都同材料、型式有关,故当单元采用不同材料和型式时其 C_i 与 R_i 的关系也不会相同;③ 影响 C_i 与 R_i 关系的因素很多,除材料和型式外,还有加工质量、环境、生产力发展水平和人力物力资源等。因此,严格说来, C_i 与 R_i 的关系不是一一对应的^[5]。

为此,定义 C_i 与 R_i 的关系为: R_i 达到某一值所需的最小造价,或在 C_i 一定时把该费用充分用于提高其可靠度所达到的最大 R_i 。

有关 C_i 与 R_i 关系的公开发表文献很少见到。文献[6]指出, $C_i R_i$ 具有下列基本性质:1 个低可靠度单元的成本较低,1 个高可靠度单元的成本很高; C_i 对 R_i 的导数是 1 个单调递增函数。根据经验有:

$$C_0 = \sum C_i R_i = \sum \left(a_i \ln \left(\frac{1}{1 - R_i} \right) + b_i \right) \quad (17)$$

式中:

a_i ——待定经验参数,无量纲量;

b_i —— R 趋于 0 时的系统造价。

a_i 决定曲线的趋势, a_i 值愈小, $C(R)$ 曲线前段的坡度愈平,而后段愈陡。

对于磁浮交通系统,适用于指数分布。将 $R_i = 1 - \lambda = 1 - 1/t_{MTBF}$ 代入式(17)得:

$$C_0 = \sum (a_i \ln(t_{MTBF}) + b_i) \quad (18)$$

C_0 与 t_{MTBF} 的函数关系如图 3 所示。

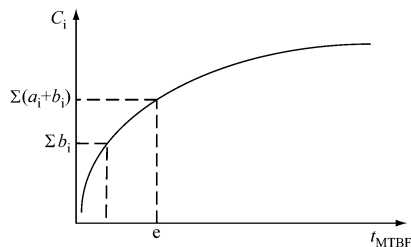


图3 C_0 与 t_{MTBF} 关系图

2.2 维修保障费用 C_f

C_f 一般占 C_{LC} 的 60% 以上,尤为重要。而保障费用是 C_f 的主要费用来源。由文献[7],有

$$C_f = C_a L_t / t_{MTBF} \quad (19)$$

式中:

L_t ——系统寿命周期;

C_a ——每次故障平均费用。而且

$$C_a = C_s(t_{MTTR} + t_r) + C_r t_{MTTR} + C_{rp} \quad (20)$$

式中:

t_{MTTR} ——平均维修时间;

C_s ——单位时间停机损失;

t_r ——维修等待时间;

C_r ——单位时间维修费用;

C_{rp} ——维修零件费用。

将式(20)代入式(19),有

$$C_f = \frac{t_{MTTR}(C_s + C_r)L_t + (C_s t_r + C_{rp})L_t}{t_{MTBF}} \quad (21)$$

结合式(16)可得:

$$C_{LC} = C_{os} + C_{dr} + \sum (a_i \ln(t_{MTBF}) + b_i) + \frac{t_{MTTR}(C_s + C_r)L_t + (C_s t_r + C_{rp})L_t}{t_{MTBF}} \quad (22)$$

为权衡 t_{MTBF} 和 t_{MTTR} 的取值,考虑到 C_{os} 、 C_{dr} 、 b_i 为常数,对取值没有影响,因此对 $C_0 + C_f$ 取最小即可得最小 C_{LC0} 且

$$C_0 + C_f = \sum a_i \ln(t_{MTBF}) + \frac{t_{MTTR}(C_s + C_r)L_t + (C_s t_r + C_{rp})L_t}{t_{MTBF}} \quad (23)$$

C_{LC} 与 t_{MTBF} 的关系如图 4 所示。

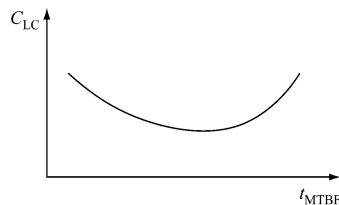


图4 C_{LC} 与 t_{MTBF} 的关系

3 算例分析

根据系统 C_{LC} 计算模型,结合可用度进行可靠性与维修性权衡分析,以中低速磁浮列车悬浮系统为例对其 C_{LC} 进行计算。

中低速磁浮列车依靠列车下部悬浮架上安装的悬浮电磁铁通电后与轨道 F 形磁极面之间产生的电磁吸力,从而实现悬浮。中低速磁浮列车的悬浮系统极为重要,关系到磁浮列车的正常运行^[8]。

根据现场情况,整理 3 组中低速磁浮列车悬浮系统相关数据如表 1 所示。

表 1 磁浮列车悬浮系统数据

a	C_s /万元	C_r /万元	t_r /h	C_{π} /万元	L_t /h
24	1.0	2.0	1.0	1.5	30 000
40	2.0	3.0	2.0	2.0	35 000
72	3.0	3.0	2.5	3.0	40 000

中低速磁浮列车悬浮系统有效度目标为 $A = 0.999, t_{MTBF} \geq 400 \text{ h}, t_{MTTR} \leq 6 \text{ h}$ 。根据式(1)~(15)得到约束条件:

$$\begin{cases} 0.999 = \frac{t_{MTBF}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} \\ t_{MTBF} \geq 400 \text{ h}, t_{MTTR} \leq 6 \text{ h} \end{cases} \quad (24)$$

取 C_{LC} 最小值为:

$$C_{LC, \min} = C_{os} + C_{dr} + \sum (a_i \ln(t_{MTBF}) + b_i) + \frac{t_{MTTR}(C_s + C_r)L_t + (C_s t_r + C_{\pi})L_t}{t_{MTBF}} \quad (25)$$

通过 Matlab 软件得到 t_{MTBF} 与 C_{LC} 的仿真计算结果如图 5~6 所示。

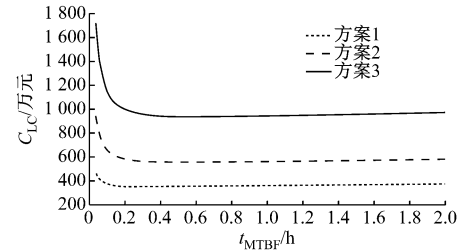


图 5 t_{MTBF} 与 C_{LC} 关系仿真结果图

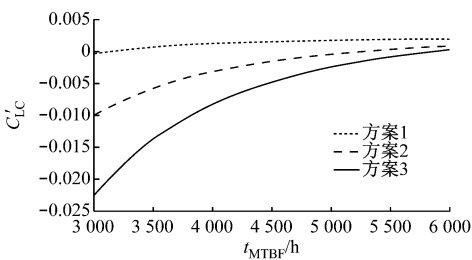


图 6 仿真结果求导处理图

通过图 5 可以看出 C_{LC} 与 t_{MTBF} 的函数关系,并对 t_{MTBF} 求导得到图 6,证明 C_{LC} 存在最小值。3 组数据计算结果如下:

第一组:当 $t_{MTBF} = 3\ 125 \text{ h}, t_{MTTR} = 3.13 \text{ h}$ 时, $C_{LC, \min} = 352.13$ 万元。

第二组:当 $t_{MTBF} = 5\ 250 \text{ h}, t_{MTTR} = 5.26 \text{ h}$ 时, $C_{LC, \min} = 597.64$ 万元。

第三组:当 $t_{MTBF} = 5\ 833 \text{ h}, t_{MTTR} = 5.84 \text{ h}$ 时, $C_{LC, \min} = 871.33$ 万元。

在悬浮系统设计阶段,以 0.999 的有效度为目标,每组悬浮系统的数据都可得到 t_{MTBF} 及 t_{MTTR} ,在保证系统稳定性的同时达到最小的 C_{LC} 。

由计算结果可以看出,先通过有效度进行维修性与可靠性的综合权衡,再通过寿命周期费用模型进行计算,可得到最小 C_{LC} 对应的维修性与可靠度关系,为系统设计提供数据支持。

4 结语

通过以可用性为目标的可靠性与维修性权衡分析,可使得系统的 C_{LC} 达到最低。首先,根据可用性对系统的可靠性和维修性之间进行综合平衡,以确保串联系统在其整个运行期间足够稳定;然后,对维修性及可靠性进行量化处理,建立系统寿命周期费用计算模型,计算出合理的可靠性与维修性,并使得系统的 C_{LC} 最小;最后,以长沙中低速磁浮列车悬浮系统为例,利用 Matlab 软件建立模型,进行仿真计算,从而获得最佳方案。

参考文献

[1] 郭少伟. 以可用度为目标的综合传动装置可靠性与维修性权衡分配方法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.

[2] 邱玮, 耿俊豹, 金家善, 等. LCC 技术研究与应用发展综述[J]. 中国设备工程, 2008 (4): 7.

[3] 莫微. 航天器研制的 LCC 理论应用探讨[J]. 价值工程, 2016, 35 (27): 16.

[4] 邓永婕, 李亚兵, 雒亿平, 等. 变电站建设项目成本控制分析[J]. 科技传播, 2011 (7): 96.

[5] 刘潮东, 梁庆卫. 基于造价和维修费用的系统可靠性指标分配方法[J]. 机械设计与制造, 2004 (5): 4.

[6] 宋保维. 鱼雷系统可靠性理论与方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 1999.

[7] 张作品. 基于可靠性维修性系统的寿命周期费用分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010.

[8] 齐然, 罗京. 中低速磁浮列车悬浮控制系统研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2016 (3): 29.

(收稿日期:2018-05-10)