

基于粒子群算法的电梯系统选择性维修模型^①

陈兆芳, 张岐山

(福州大学 经济与管理学院, 福州 350116)

摘 要: 针对电梯维修过程中存在的维修不足与维修过剩问题, 提出利用有限的维修资源对电梯系统进行维修, 使得电梯维修后的可靠度达到最高. 在此基础上, 给出了选择性维修模型的假设条件, 以可靠度为目标函数, 建立了一种非线性、离散的约束规划, 采用改进粒子群算法对电梯系统中各个元件的维修程度进行迭代寻优, 包括粒子的表示、适应度函数、更新公式、算法流程等. 最后, 通过对具体实例进行求解, 分析表明该模型与算法可以有效地优化维修决策方案, 提高电梯系统运行的可靠度, 同时为决策者制定决策提供指导.

关键词: 电梯系统; 维修决策; 粒子群算法

Selective Maintenance Decision of Elevator System Based on Particle Swarm Optimization

CHEN Zhao-Fang, ZHANG Qi-Shan

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to solve the problem of deficiency and excess repair maintenance in the process of elevator system, a resource constrained maintenance of elevator system with the highest reliability is studied. Firstly it expounds the model assumption and create the reliability as the objection function. A discrete and nonlinear constrained programming model is established. Then, it gives a simulation based PSO to solve the problem, and it includes particle representation, fitness function, update methods and algorithm process. Finally, there is an example to show tthat the model and algorithm can effectively optimize the maintenace decision scheme and improve the reliability. It can also provides guidance for decision makers.

Key words: elevator system; maintenance decision; particle swarm optimization

传统管理模式下的电梯设备维修大多是依赖“定期维保和检查过程中发现安全隐患”和“发现故障事后维修”, 缺乏合理的维修规划, 可能造成非计划停机次数大幅增加, 干扰到使用单位、人群的生产生活; 而投入维修成本的盲目性, 既可能导致维修不足, 造成不必要事故损失和累积增长的维修代价, 也可能导致维修过剩, 造成设备有效利用时间的减少和人财物等维修资源的浪费^[1,2]. 优化电梯系统的维修决策, 改变传统电梯维修模式的落后状况, 已成为电梯数量高速增长和维修资源相对窘迫的背景下日益急迫的公共安全问題. 目前国内外对于复杂机电产品维修决策的研究较多, Tanwar^[1]综述了采用 Kijima 模型中的役龄回退因子进行非完好维修的基本维修模型; 朱海平^[3]

提出了在生产批量约束下的串并联系统选择性维修方法, 这些方法都是以二态系统作为研究对象, 即不仅是元件, 其组成的系统也仅存在正常工作或者完全失效这两种状态, 不足以体现复杂系统在工程实际中展现出来的多状态特征. 目前多状态系统可靠性研究取得了一定的进展^[4], 常用的研究方法有: 解析法、蒙特卡罗仿真方法以及发生函数(UGF)方法, 由于采用解析法求有时无法求出其精确结果, 只能用一些简化的方法进行估算; 而蒙特卡罗方法计算所需时间较长, 且只能给出近似的估计结果; 因此本文发生函数方法以多项式的形式来描述系统、元件的多工作状态和状态概率, 并通过函数复合运算求解系统、元件的可靠性指标, 被广泛应用于电子、电力系统和机械系统的

① 收稿时间:2014-12-16;收到修改稿时间:2015-03-09

可靠性分析.

本文采用发生函数来描述系统与元件的状态, 以电梯系统可靠性为目标, 在有限的资源约束下, 结合粒子群算法, 实现电梯系统维修决策模型的更优策略.

1 假设与分析

本文研究的电梯系统维修模型建立在以下两条基本前提下:

1) 假设组成系统的 n 个元件之间相互独立, 其中任意元件 $i(1 \leq i \leq n)$ 的性能 G_i 都有两种不同的状态, 各元件的状态值及对应状态概率可以用集合 $g_i = \{g_{(i,1)}, g_{(i,2)}\}$ 和 $p_i = \{p_{(i,1)}, p_{(i,2)}\}$ 来分别表示, 则以发生函数描述各元件性能分布为:

$$u_i(z) = \sum_{j=1}^2 p_{ij_i} z^{g_{ij_i}}, j=1, \dots, n \quad (1)$$

根据假设系统各元件之间相互独立, 则元件组合的状态概率等于对应各元件的状态概率的乘积, 因此系统性能值可以用发生函数描述为:

$$\begin{aligned} U(z) &= \Omega_{\Phi}(U_1(z), \dots, U_n(z)) \\ &= \sum_{j_1=1}^2 \dots \sum_{j_M=1}^2 \left(\prod_{i=1}^M p_{(i,j_i)} \cdot z^{\Phi(g_{(1,j_1)}, \dots, g_{(M,j_M)})} \right) \quad (2) \\ &= \sum_{j=1}^{K_s} p_{sj} \cdot z^{g_{sj}} \end{aligned}$$

式(2)中 Ω_{Φ} 是与由性能结构函数 Φ 确定的复合运算符, 表示将生成函数的各项相乘后产生的指数运算, 其运算规则由 Φ 函数确定. Φ 函数的形式多样, 本文采用了流量传输系统的运算规则, 即元件组合由两个串联的元件构成时,

$$\Phi(G_1(t), G_2(t)) = \min\{G_1(t), G_2(t)\} \quad (3)$$

若元件组合由两个元件并联成, 则

$$\Phi(G_1(t), G_2(t)) = G_1(t) + G_2(t) \quad (4)$$

由此确定的式(2)生成函数就建立起了系统性能与各元件性能之间的联系.

2) 假设元件 i 的失效时间服从威布尔(Weibull)分布, 该元件在时刻 t 的生存概率表示为:

$$R_i(t) = P(T > t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}\right] \quad (5)$$

式(5)中, η_i 和 β_i 是元件 i 服从的威布尔分布的尺度参数和形状参数.

2 维修决策建模

下面以系统可靠度为目标, 维修费用为约束建立维修策略优化模型, 从而确定针对各个元件的维修策略.

2.1 系统可靠度

系统可靠度定义为系统性能与任务性能需求水平的关系, 若系统在任务开始时的性能不小于该任务的性能需求水平, 则认为系统可靠度能够满足任务顺利完成.

元件 i 在 t 时刻的生存概率为 $r_i(t)$, 则其状态性能可以表示为:

$$\begin{aligned} u_i(z, t) &= \sum_{j=1}^2 p_{(i,j)}(t) \cdot z^{g_{(i,j)}} \quad (6) \\ &= (1 - r_i(t))z^{g_{(i,1)}} + r_i(t)z^{g_{(i,2)}} \end{aligned}$$

元件的失效分布服从威布尔分布, 则将式(5)代入式(6)中, 那么整个系统在维修后的状态分布为:

$$\begin{aligned} U(z, t) &= \Omega_{\Phi}(U_1(z, t), \dots, U_n(z, t)) \\ &= \sum_{j_1=1}^2 \dots \sum_{j_M=1}^2 \left(\prod_{i=1}^M p_{(i,j_i)}(t) \cdot z^{\Phi(g_{(1,j_1)}, \dots, g_{(M,j_M)})} \right) \quad (7) \\ &= \sum_{j=1}^{K_s} p_{sj}(t) \cdot z^{g_{sj}} \end{aligned}$$

假设系统任务的性能需求水平是 w , 则系统顺利完成任务的概率表示为:

$$R(t, w) = \sum_{i=1}^{K_s} p_{si}(t) \cdot 1(F(g_{si}, w) \geq 0) \quad (8)$$

式(8)中, $F(g_{si}, w) = g_{si} - w$. $1(\cdot)$ 代表指示函数, 即 $1(\text{TURE}), 1(\text{FALSE})$.

2.2 有效役龄

本文采用 Kijima II 模型来描述役龄, 元件 i 每次经过维修虚拟役龄回退比例 θ , 元件经过非完好维修后的虚拟役龄定义为:

$$A_i(k) = (1 - \theta)A_i(k - 1) \quad (9)$$

失效元件 i 的役龄回退因子 θ 可表示为:

$$\theta_i = \left(\frac{c_i}{c_i^{r_m}}\right)^{\frac{1}{m_i^{r_m}}} \quad (10)$$

$$c_i = i \cdot c_i^{r_m} / N \quad (11)$$

m_i^{pm} 是描述修复性费用与役龄回退因子之间函数关系的特征常数;

未失效元件 i 的役龄回退因子 θ 可表示为:

$$\theta_i = \left(\frac{c_i}{c_i^{pm}} \right)^{\frac{1}{m_i^{pm}}} \quad (12)$$

$$c_i = \frac{i \cdot c_i^{pm}}{N} \quad (13)$$

m_i^{pm} 是描述预防性维修费用与役龄回退因子之间函数关系的特征常数.

2.3 维修决策模型的建立

系统共有 n 个元件, 对于元件 i 而言, 用 S_i 表示元件在本次维修前的状态, 则

$$S_i = \begin{cases} 1, & \text{元件正常;} \\ 0, & \text{元件故障} \end{cases}$$

对元件 i 采取的维修措施有两种, 分别用 PM_i 和 RM_i 来表示:

$$RM_i = \begin{cases} 1, & \text{对元件}i\text{进行修复性维修} \\ 0, & \text{不对元件}i\text{进行修复性维修} \end{cases}$$

$$PM_i = \begin{cases} 1, & \text{对元件}i\text{进行预防性维修} \\ 0, & \text{不对元件}i\text{进行预防性维修} \end{cases}$$

系统的预防性维修费用如式(14)所示, 系统的修复性维修费用如式(15)所示, 系统的总费用由预防性维修费用和修复性维修费用构成, 如式(16)所示.

$$C_{PM} = \sum_{i=1}^n [(c_i^0 + c_i) \cdot S_i \cdot PM_i] \quad (14)$$

$$C_{RM} = \sum_{i=1}^n [(c_i^0 + c_i) \cdot (1 - S_i) \cdot RM_i] \quad (15)$$

$$C = C_{PM} + C_{RM} \quad (16)$$

选择性维修决策模型可表示为:

$$\max R(t, W) = \sum_{j=1}^{K_s} P_{sj}(t) | (F(g_{sj}, w_i) \geq 0) \quad (17)$$

s.t.

$$c \leq c_0 \quad (18)$$

$$PM_i + RM_i \leq 1 \quad (19)$$

$$RM_i + S_i \leq 1 \quad (20)$$

$$PM_i - S_i \leq 0 \quad (21)$$

$$A_i(k) = (1 - \theta) A_i(k - 1) \quad (22)$$

目标(17)表示最大化系统的可靠度; 约束(18)表示总的维修费用小于预算的费用; 约束(19)(20)(21)限定了修复性维修和预防性维修分别只能适用于失效元件和未失效元件; 式(22)表示采用 Kijima II 模型确定维

修后的元件的有效役龄.

3 假设与分析

在考虑了电梯系统的多状态特征, 并引入非完好维修效果后, 该维修决策变成了一个含离散变量的复杂非线性问题, 在有限时间内几乎不可能用传统的枚举式寻优算法求解该类问题. 粒子群算法^[5-8]是模拟鸟类的觅食行为特征, 通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优的群体智能算法, 与其他进化算法相比, 粒子群算法具有操作简单、易实现和收敛速度快等特点. 因此本文采用粒子群算法进行研究, 并在离散粒子群算法的基础上, 设计了电梯系统选择性维修决策模型.

3.1 算法整体设计

为了计算系统的可靠度, 需要计算出分配给各个元件的维修费用等级. 因此, 维修决策的目标是: 计算出系统的可靠度, 如果费用满足约束条件, 则元件的维修等级是可行的, 否则, 给予目标函数极大的惩罚值. 则系统维修决策问题采用粒子群算法可以描述为: 假设在一个 D 维空间内, 有 N_p 个粒子组成一个种群, 代表维修决策问题的维修方案; $N = \{N_1, N_2, \dots, N_M\}$, N_i 代表元件 i 的维修效果等级, 并且 $0 \leq N_i \leq 5$, 算法通过迭代寻找最优解, 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个极值来更新自己, 经过有限次迭代后最终收敛于全局的最好位置. 在第 t 次迭代时, 各粒子的位置表示为: $X_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iD}(t))$, $x_{id} \in \{0, 1, \dots, 5\}$; 每个位置与一个跟电梯系统维修决策模型有关的适应度函数值 $F_i(t)$ 对应; 每个粒子运动的速度也是一个 D 维的向量, $V_i(t) = (v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iD}(t))$, 其中 $v_{iD} \in [V_{\min}, V_{\max}]$; 对于单个粒子 i , $P_i(t) = (p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{iD}(t))$ 表示其在运动历史中适应值最好的位置, 对于整个种群, $P_g(t) = (p_{g1}(t), p_{g2}(t), \dots, p_{gD}(t))$ 表示其经历的适应值最好的位置, 在找到这两个最优值时, 粒子根据如下的公式来更新自己的速度和位置:

$$v_{iD}(t+1) = w \cdot v_{iD}(t) + c_1 \cdot \eta_1 \cdot (p_{iD}(t) - x_{iD}(t)) + c_2 \cdot \eta_2 \cdot (p_{gD}(t) - x_{iD}(t)) \quad (23)$$

$$x_{iD}(t+1) = x_{iD}(t) + v_{iD}(t+1) \quad (24)$$

由于较大的惯性因子有利于跳出局部最优点, 便于全局搜索, 而较小的惯性因子则有利于当前的搜索区域进行精确局部搜索, 以利于算法收敛, 因此针对

PSO 算法容易早熟以及算法后期易在全局最优解附近产生振荡现象, 本文采用线性变化的权重, 让惯性权重从最大值 w_{max} 线性减小到最小值 w_{min} , w 随算法迭代次数的变化公式为:

$$w = w_{max} - \frac{t * (w_{max} - w_{min})}{t_{max}} \quad (25)$$

其中 w_{max} 、 w_{min} 分别表示 w 的最大值和最小值, t 代表当前迭代步数, t_{max} 表示最大迭代步数, 取 $w_{max} = 0.9$, $w_{min} = 0.4$.

3.2 算法参数设置

粒子种群规模为 100 个, 在粒子群算法中, 粒子初始位置在 [0,5] 范围内随机产生, 初始速度在 [1,5] 间随机产生, 学习因子 $c_1 = 2$, $c_2 = 2$, 惯性权重由公式 (25) 得到.

3.3 算法流程

粒子群算法的选择性维修决策流程如下:

1) 初始化粒子种群: 给定粒子群位置 X , 速度 V , 种群规模, 学习因子 c_1 、 c_2 , 惯性权重 w , 最大迭代次数 M 以及目标函数个数, 有效役龄、维修费用, 根据式 (10)、(12) 给出维修效果的函数关系;

2) 计算元件的发生函数以及惯性权重值: 用各元件所分配的维修费用替换种群个体 (式 (11)、(13)), 并根据维修费用与役龄回退因子的函数关系 (式 (9)、(10)、(12)) 来计算元件的发生函数 (式 (6)); 根据式 (25) 计算惯性权重值;

3) 计算系统的发生函数, 根据发生函数的复合运算得到系统的发生函数 (式 (7));

4) 终止条件判断: 若迭代次数小于 M , 则转 2),

否则转 5);

5) 输出最优维修决策.

4 实例

某型号电梯的曳引系统结构如图 1 所示. 由于电动机、曳引机和制动器是电梯曳引系统的主要子系统, 其中, 制动器是由两套机械系统构成, 钢丝绳 3 根, 图 1 是曳引系统示意图, 图 2 按其照功能给出了该电梯曳引系统的可靠性框图, 各元件以串-并联方式构成.

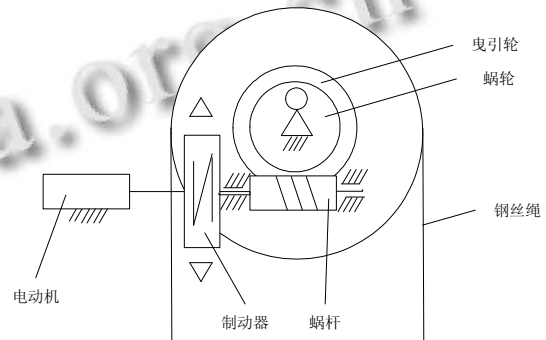


图 1 曳引系统示意图

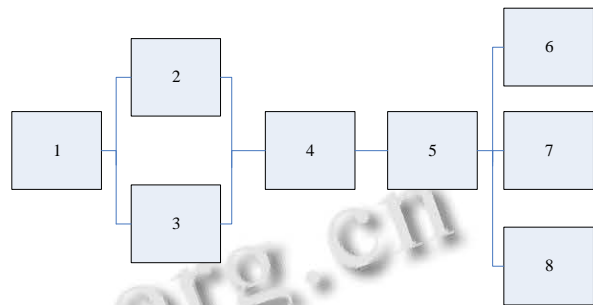


图 2 曳引系统可靠性框图

表 1 各元件参数 (费用: 10^3 , 役龄: 年)

部件	$g(i,2)$ (%)	η_i	β_i	m_i^{pm}	c_i^{pm}	m_i^{rm}	c_i^{rm}	c^0	A_i	S_i
1	100	1.8	1.9	2.5	15	3.0	21	0.40	12	1
2	50	2.0	1.5	2.2	1.5	3.2	2.5	0.20	12	1
3	50	2.0	1.5	2.2	1.5	3.2	2.5	0.20	12	0
4	100	2.4	1.8	2.4	1.3	3.2	2.3	0.20	12	1
5	100	1.8	1.8	2.3	3.0	4.0	3.7	0.30	12	1
6	33	2.2	1.2	2.2	2.8	3.0	3.0	0.30	12	0
7	33	2.2	1.2	2.2	2.8	3.0	3.0	0.30	12	0
8	33	2.2	1.2	2.2	2.8	3.0	3.0	0.30	12	1

该系统由 8 个部件构成, 1 代表电动机, 2、3 代表两台独立的制动器, 4 代表蜗轮蜗杆, 5 代表曳引轮, 6、

7、8 代表三根独立的钢丝绳. 每个部件视为失效相互独立的二状态性能元件, 各部件的威布尔寿命分布参

数、维修费用等参数列于表 1 中, 在有限的费用下, 则需采取选择性维修将该费用分配到部分元件的维修中, 以保证系统在经过维修后可靠度达到最大.

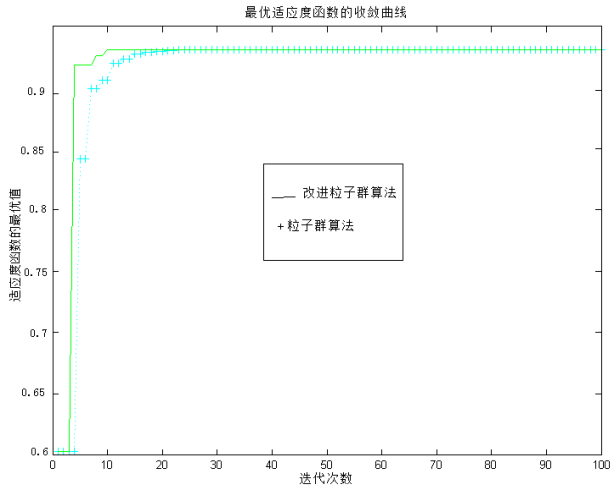


图 3 PSO 算法的收敛过程

图 3 显示了 PSO 算法的收敛过程, 从图中可以看出改进的粒子群算法收敛速度较传统的粒子群算法快.

表 2 选择性维修策略(费用: 10^3)

元件	维修措施	维修费用	维修后状态
1	预防维修	9.4	正常
2	预防维修	1.1	正常
3	修复维修	2.2	正常
4	预防维修	1.5	正常
5	预防维修	3.3	正常
6	修复维修	3.3	正常
7	修复维修	2.7	正常
8	预防维修	2.54	正常

C=26.04

由表 2 可知, 在非完好维修的情况下, 元件经过维修之后, 系统都恢复到正常工作状态, 维修费用为

26040 元, 如果采用完好维修模型, 则需要总的维修费用为 44300 元. 因此, 采用非完好维修模型, 在保证系统可靠度的同时大大降低了维修费用.

5 结语

本文以电梯系统的可靠度为目标, 构建了有限费用下的系统选择性维修决策模型, 根据模型的特点, 设计了粒子群求解算法, 在保证设备安全可靠运行的同时, 可以根据需要找到维修费用和系统可靠度最佳结合的维修策略. 本文提出的优化模型综合考虑了部件本身的特性, 能够很好的辅助电梯设备维修作业计划的制定.

参考文献

- 1 Tanwar M, Rai RN, Bolia N. Imperfect repair modeling using Kijima type generalized renewal process. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 124: 24–31.
- 2 王小林,程志君,郭波,等.基于冲击模型劣化系统的不完全维修决策.系统工程理论与实践,2011,31(12):2380–2386.
- 3 朱海平,郭磊,刘繁茂,等.生产批量约束下的串并联系统选择性维修方法.计算机集成制造系统,2011,17(2): 419–424.
- 4 高鹏,谢里阳.基于改进发生函数方法的多状态系统可靠性分析.航空学报,2010(5):934–939.
- 5 郭文忠,陈国龙.一种求解多目标最小生成树问题的有效离散粒子群优化算法.模式识别与人工智能,2009,(4): 597–604.
- 6 郭文忠,陈国龙,等.求解 VLSI 电路划分问题的混合粒子群优化算法.软件学报,2011,22(5): 833–842.
- 7 郭昆,张岐山.基于改进粒子群优化算法的逆向物流选址与路径问题研究.福州大学学报(自然科学版),2010(5): 673–680.
- 8 刘耀武,聂风华,苏强,等.具有时间约束的电梯节能调度算法.系统工程理论与实践,2013,33(9):2339–234.