

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.009

基于分形理论的装备维修质量指标影响度分析

石文华¹, 陈春良¹, 郑洋², 汤珏¹

(1. 装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 92514 部队, 山东 烟台 264007)

摘要: 针对以往 AHP 方法的主观性大等不足, 从分形的视角出发运用最小二乘回归研究了维修质量的各个因素指标的影响度, 建立了基于分形理论的装备维修质量指标影响度分析模型。构建维修质量影响因素指标体系, 并在对采集样本数据进行标准化处理的基础上求得了各个考察阶段的维修质量分形维; 然后运用最小二乘法求解了分形维与各个因素之间的回归方程, 并画出 Pareto 图加以明确。

关键词: 维修质量; 指标体系; 分形维; 最小二乘法; 帕累托图

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Analysis of Index Influence of Equipment Maintenance Quality Based on Fractal Theory

Shi Wenhua¹, Chen Chunliang¹, Zheng Yang², Tang Jue¹

(1. Dept. of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;
2. No. 92514 Unit of PLA, Yantai 264007, China)

Abstract: For the deficiency of great subjectivity in traditional AHP method, the least squares regression method is used to analyze factor index influence degree of maintenance quality from the fractal angle, and establish the analysis model of index influence about equipment maintenance quality based on fractal theory. Establish influence factor index system of maintenance quality. And the maintenance quality fractal dimensions of every review stage are acquired based on the standardized data afterward. Then the regression equation is educed with the least squares method. At last, the Pareto picture is drawn.

Key words: maintenance quality; index system; fractal dimension; least squares method; Pareto picture

0 引言

维修质量的影响因素很多, 各个因素的影响度分析对寻找关键影响因素并改进维修质量至关重要^[1]。胡剑芬站在现代质量管理的角度详细分析了维修质量的涵义、特征, 并构建了 SMIE 指标体系^[2]; 马红晖分析了战区直属修理机构装备维修质量管理中遇到的问题和各个质量影响要素, 构建了修理机构维修质量评估指标体系^[3]; 刘颖、方志强用 AHP 法确定了维修质量指标参数的影响权重, 也即影响度^[1], 但主观性比较强; 分形理论是近 30 年中产生的一个新兴理论, 是非线性理论中的一个活跃分支^[4]。分形理论以其独特的视角揭示了自然界和人类社会各种复杂现象中的规律性、层次性和标度不变性^[5]。石强、方勇深入研究了分形理论在信息处理中的应用^[6]; 杨懿、武昌用分形理论评估了维修机构效能经验证具有很好的实用性^[7]。笔者针对已有研究中主观性大等不足, 建立了基于分形理论的装备维修质量指标影响分析模型, 从实际考察样本出发, 更加客观地分析各质量指标的影响。

1 维修质量指标体系构建

根据对装备维修质量影响因素的分析, 通过对众多的指标进行分析权衡, 装备的维修质量影响因素指标可以分为 5 大类: 反映装备总体性能的指标、反映装备维修成本的指标、反映装备维修过程的指标、反映装备修后可靠性的指标和反映装备修后配套性的指标^[8], 每一类又包含有若干个基本指标, 构成了维修质量指标的层次结构体系, 如表 1 所示。

表 1 装备维修质量的指标层次结构

第一层	第二层	第三层
装备维修质量 Q	修复装备总体性能	功能恢复率 I_1
	维修成本	维修费用 I_2
	维修过程	装配精度合格率 I_3
		维修完成工时 I_4
		修理工艺完好率 I_5
	修后可靠性	修后试验故障率 I_6
		返修率 I_7
	修后配套性	附件、工具齐全率 I_8
		维修资料齐全率 I_9

表 1 的指标体系由若干评估指标组成, 具有层次性、多维性和不规则性。为此, 应用分形方法可

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2012-02-15

作者简介: 石文华(1983—), 男, 河北人, 博士, 从事质量管理研究。

从多维角度较准确、客观地描述出维修质量的高低。

2 模型构建

2.1 模型框架

分形方法用分形维数刻画了图形占领空间规模和整体复杂性的量度, 反映维修质量的多维参数指标所具有的不规则性, 从本质上属于这类问题, 分形在对它的处理上有明显的优势。计算分形维数 D 的目的在于多维综合评估维修质量, 因为 D 反映了各指标点在空间的分布状况。

基于上面分析, 笔者先求出各个时期的维修质量的分形维数, 作为维修质量的量度; 再运用最小二乘法求出各个因素样本记录值与对应分形维之间的回归方程, 各个回归系数表示了各个因素指标对分形维的影响度, 也即对维修质量的影响程度, 根据这些系数画出 Pareto 图, 模型框架如图 1 所示。

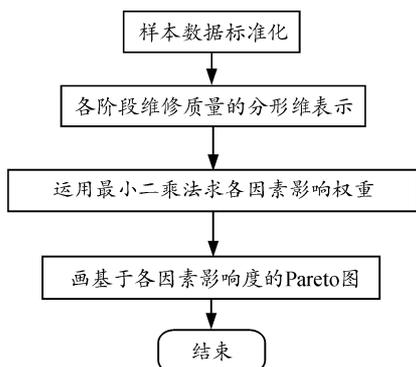


图 1 模型框架

2.2 分形理论

维修质量影响因素指标体系中的 N 个底层子指标标准化数据 $\{y_{ij}\}_{j=1}^N, i \in [1, k]$ 可视为 N 维空间中各个坐标上的点, 所有这些点构成 N 维欧氏空间 E^N 中的一个子集 J_N , 定义各点 y_{ij} 到原点的距离为欧氏距离 d_{ij} 。

考虑以原点为球心, 以 r 为半径的球, 令

$$R = \max \{ |y_{ij}|, (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, N) \}$$

任意给定一个半径 $r > 0$, 则 E^N 中 $d_{ij} < r$ 的 $M(r)$ 个点都位于球内。

显然 $\lim_{x \rightarrow R} M(r) = N, \lim_{x \rightarrow 0} M(r) = 0$ 。当 r 位于某一适当空间时, $M(r)$ 随着 r 的变化呈现幂函数形式, 即 $M(r) \propto r^D$, 此时子集 J_N 具有分形的特性, 分形维数为

$$D = \frac{\ln M(r)}{\ln(r)} \quad (1)$$

若维修质量较好, 则有较多的指标点分布在 N 维空间中离原点较远的地方, 即离球心相对较远; 反之, 维修质量较差, 则有较少的指标点分布在 N 维空间中离原点较远的地方, 即离球心相对较近。也就是说 $\forall r > 0$, 在指定的适当区域中维修质量较好的 $M(r)$ 在总体分布中总是小于质量较差的 $M(r)'$, 则所考察的 k 个不同阶段的指标 $\ln M(r) - \ln(r)$ 曲线逐渐上升最终逼近于 $(\ln(r), \ln M(r))$, 所以较好质量的维修反映的斜率总是大于较差质量的维修, 即分形维数 $D > D'$ 。直观上看, 如果底层各子指标数值离原点越远, 说明维修质量越好, 可以说分形维数 D 从本质上反映了维修质量的高低。

2.3 最小二乘法

评估维修质量的 9 个指标 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9$ 的影响权重分别记为

$$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$$

维修质量用分形维表示, 与各因素之间的回归关系记为

$$D_i = [I_{1i} \ I_{2i} \ I_{3i} \ I_{4i} \ I_{5i} \ I_{6i} \ I_{7i} \ I_{8i} \ I_{9i}] \times [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9]^T$$

需要说明的是, 文中只研究影响关系的线性部分。把各个考察阶段的因素指标记录值作为样本组成矩阵 I , 影响权重记为向量 A , 各个阶段的分形维组成的向量记为 D , 则

$$D = IA \quad (2)$$

依据矩阵理论知识^[9], I 为行满秩时, A 最小二乘解为

$$A = I^T (II^T)^{-1} D \quad (3)$$

I 为列满秩时, A 最小二乘解为

$$A = (I^T I)^{-1} I^T D \quad (4)$$

向量 A 归一化, 它的各个元素就是最小线性回归拟合误差情况下的各因素影响度。

3 实证分析

3.1 样本收集与标准化

根据某维修单位近 3 年的维修记录, 维修状况基本符合研究假设的 4 个条件, 反映维修质量的各个指标在各个季度的记录值如表 2 所示。

表 2 各个指标在每个考察阶段的记录值

年份	季度	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
2008	1	0.85	4.3	0.91	204	0.95	0.020 0	0.000 4	0.99	0.94
	2	0.93	5.0	0.94	194	0.97	0.040 0	0.005 0	0.98	0.93
	3	0.92	4.9	0.97	187	0.99	0.010 0	0.040 0	1.00	0.89
	4	0.87	3.9	0.89	190	0.98	0.020 0	0.010 0	1.00	0.90
2009	1	0.89	4.0	0.96	209	0.95	0.006 0	0.030 0	1.00	0.88
	2	0.79	4.5	0.89	221	0.94	0.002 0	0.000 6	0.97	0.87
	3	0.94	4.6	0.87	222	0.93	0.040 0	0.020 0	0.98	0.97
	4	0.95	3.8	0.89	209	0.92	0.030 0	0.030 0	0.96	0.94
2010	1	0.95	5.2	0.96	190	0.96	0.050 0	0.002 1	0.95	0.93
	2	0.91	5.4	0.92	199	0.97	0.070 0	0.040 0	0.98	0.91
	3	0.86	5.2	0.89	195	0.95	0.000 2	0.050 0	0.97	0.90
	4	0.83	4.9	0.96	210	0.93	0.060 0	0.040 0	0.99	1.00

首先, I_1, I_3, I_5, I_8, I_9 为收益型指标, 越大越好; I_2, I_4, I_6, I_7 为成本型指标, 越小越好。把成本型指标统一取倒数转换成收益型指标。再对这些所有的收益型指标数据用式 (5) 进行标准化处理。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (5)$$

式中: x_{ij} 是原始数据, \bar{x}_j 是未标准化的第 j 个指标数据的平均值; S_j 是未标准化的第 j 个指标数据的标准差。

3.2 维修质量的分形维表示

对这 12 个考察阶段的各个质量指标作双对数图 $\ln M(r) - \ln(r)$, 并在适当区间用线性回归拟合^[10-11]。

回归方程为

$$\ln M(r) = \theta + D \ln r \quad (6)$$

式 (6) 中, θ 为参数, D 为分形维^[11]。

文中只给出 2008 年 4 个季度的双对数图, 如图 2~图 5。

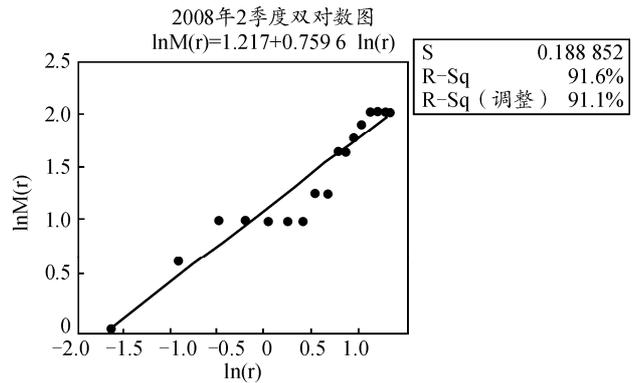


图 3 2008 年 2 季度记录值双对数图

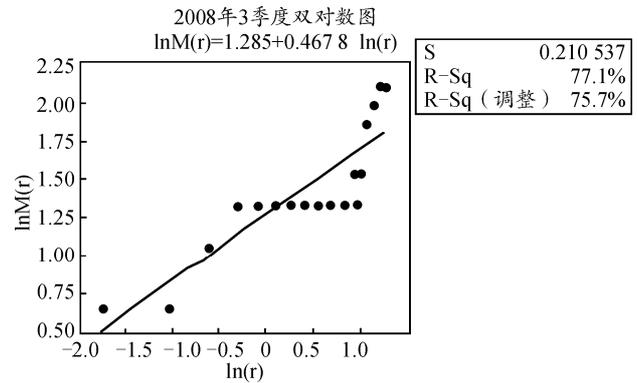


图 4 2008 年 3 季度记录值双对数图

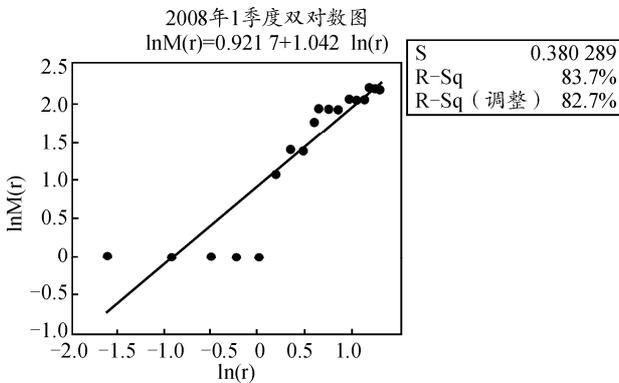


图 2 2008 年 1 季度记录值双对数图

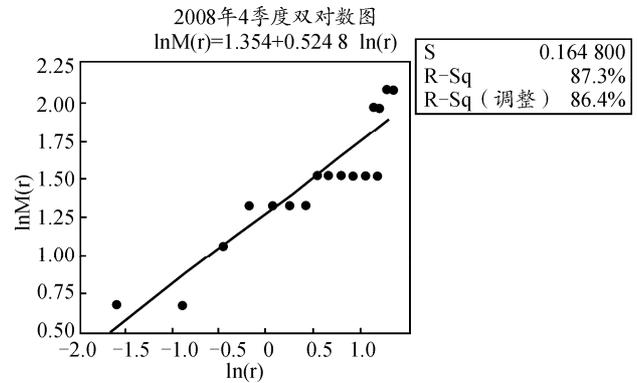


图 5 2008 年 4 季度记录值双对数图

各个阶段维修质量评估分形维值列为表3。

表3 各季度维修质量的分形维表示

年份	季度	分形维值
2008	1	1.042 0
	2	0.759 6
	3	0.467 8
	4	0.524 8
2009	1	0.540 2
	2	0.450 9
	3	0.309 4
	4	0.393 8

$$A=[0.0448 \ 0.0615 \ 0.0663 \ -0.0016 \ 0.0938 \ 0.1571 \ 0.1847 \ 0.0351 \ 0.1059]^T \quad (7)$$

进行归一化得 $A'=[0.0597 \ 0.0819 \ 0.0883 \ 0.0021 \ 0.1249 \ 0.2092 \ 0.2460 \ 0.0468 \ 0.1410]^T$

I_4 的影响度是负的, 表明在考察期间, 维修工时并不是越小越好, 而是与其他因素互相牵制。对求得各因素指标影响权重进行归一化, 画出维修质量影响因素 Pareto 图, I_4 的影响度在画图过程中取绝对值, 如图6所示。

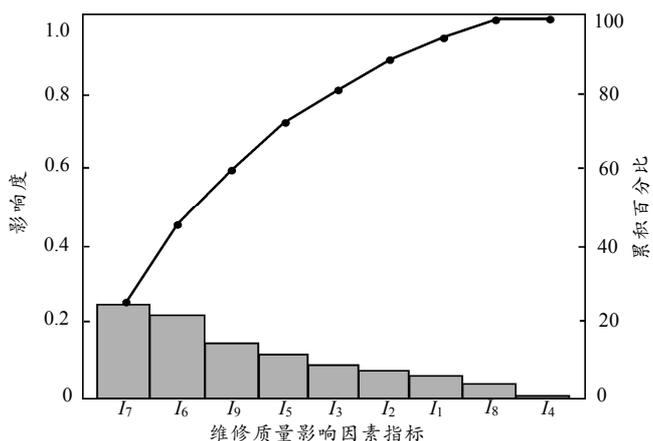


图6 维修质量影响因素指标影响度 Pareto 图

由图6可以看出, I_7, I_6, I_9 是对维修质量影响最大的指标, I_4 的影响度最小。

4 结论

文献[1]用 AHP 法确定了维修质量指标参数的影响权重, 也即影响度, 带有很强的主观性。而笔者则提出完全基于客观数据的分析方法不带有主观性, 与前者所得出的结果基本一致, 实现了从主观到客观的质的飞跃, 且能分析出各个因素的变

续表

年份	季度	分形维值
2010	1	0.491 6
	2	0.476 9
	3	0.721 2
	4	0.527 9

3.3 因素指标影响度

把标准化处理的数据代入 $D=IA$, 文中共有 12 个样本, 9 个指标, 则 I 为列满秩, $A=(I^T I)^{-1} I^T D$ 经过矩阵运算, 求得

化对维修质量是增强还是削弱, 为解决维修质量指标影响度分析提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 刘颖, 方志强, 曹玉坤. 装备维修质量的层次分析评估法[C]. 装备保障科学与技术文集, 北京: 陈春良, 王玉泉, 2004, 9: 310-313.
- [2] 胡剑芬. 维修服务测量及质量成本研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [3] 马红晖. 战区直属装甲修理机构装备维修质量管理研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2008.
- [4] Xie H, Sun H, Ju Y. Study On generation of rock surface by using fractal interpolation[J]. International Journal of Solid and Structure, 2001, 38(4): 5765-5787.
- [5] 李水根, 吴纪桃. 分形与小波[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 45-67.
- [6] 石强, 方勇. 分形在信息处理中的应用[J]. 通信技术, 2009, 5(2): 176-178.
- [7] 杨懿, 武昌, 齐胜利. 基于分形思想的维修保障系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2007, 9(9): 71-72.
- [8] 曹玉坤, 方志强, 刘颖. 武器装备维修质量评估参数研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(11): 21-23.
- [9] 黄有度. 矩阵论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 230-238.
- [10] 刘鹏. 分形在自然景观仿真研究中的进展与展望[J]. 工程地质计算机应用, 2007, 3(5):17-20.
- [11] 张成虎, 吴发灿, 赵龙. 分形理论在经济学中的应用[J]. 统计与决策, 2009, 4(1): 65-69.