文章编号：1005-0523(2001)03-0001-05

Fuzzy 理论在轨道几何平顺性综合评定中的应用

杜 厚 智

(南昌铁路局，江西 南昌　330002)

摘要：建立了轨道几何状态综合评定的 Fuzzy 模型，给出了隶属度的计算办法[1]同时，编制了仿真软件，对部分工况进行了模拟计算分析[1]。

关　键　词：Fuzzy 理论；铁路轨道；平顺性

中图分类号：U 211.5　　**文献标识码**：A

轨道几何平顺性是线路养护的主要内容之一，如何根据轨道的实际几何状态综合评定其质量等级是摆在工务工作者面前的一个重要课题[1]对此，国内外都有研究[1][2][6][1]。本文引用 Fuzzy 理论[3]，建立了轨道几何状态综合评定 Fuzzy 模型，由于隶属度的引入，形成了评定等级的软边界，从而克服了通常硬性划分所产生的不合理性[1]同时，根据 Fuzzy 模型的计算结果，我们可以获得轨道几何平顺性的状态趋势[1]。

1　单因素评判

对轨道的几何状态，我们首先确定一个评定集，记为 $V=\{V_1,V_2,V_3\}$，其中，V_1 表示优良，V_2 表示合格，V_3 表示失格[13]再确定影响轨道几何状态的因素，本文考虑轨距、水平、高低、方向、三角坑这五个因素，记为 $U=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5\}$，其中，$U_1$ 表示轨距，U_2 表示水平，U_3 表示高低，U_4 表示方向，U_5 表示三角坑[13]而某一因素 U_i 对各评定等级 U_j 的隶属度，表示 U_i 与评定集 V 之间的模糊关系，记为 $\gamma_i=\{\gamma_{i1},\gamma_{i2},\gamma_{i3}\}$[13]参考《铁路线路维修规则》，表 1 列出了各单项因素的质量等级划分范围及评分值[13]

于是，我们可以确定某因素 U_i 对评定集 V_j 的隶属度 U_{ij}，其数值这样求得，在所统计的 N 个数据中属于 V_j 类的有 N_j 个，则

$$u_{ij}=\frac{k_jN_j}{\sum_1^3 K_jN_j} \qquad (1)$$

显然，$\sum_1^3 u_i=1$ 此模糊向量是归一化的[13]这样，我们可得到单因素评定的 5 个模糊子集：$U_i=(U_{i1},U_{i2},U_{i3})$，$i=1,2,3,4,5$[13]

表 1　轨道几何状态等级范围

等级 / 评分 / 因素	优良 $K_1=1$	合格 $K_2=100$	失格 $K_3=310$
轨距 S	$-2\leqslant S\leqslant 7$	$7<S\leqslant 8$ $-4\leqslant S<-2$	$S>8$ $S<-4$
水平 L	$\|L\|\leqslant 6$	$6<\|L\|\leqslant 9$	$\|L\|>9$
高低 h	$\|h\|\leqslant 6$	$6<\|h\|\leqslant 9$	$\|h\|>9$
方向 d	$\|d\|\leqslant 6$	$6<\|d\|\leqslant 9$	$\|d\|>9$
三角坑 δ	$\|\delta\|\leqslant 6$	$6<\|\delta\|\leqslant 8$	$\|\delta\|>8$

2　多因素综合评定

在多因素综合评定中，需要考虑各个因素对综合评定等级所起作用的大小[13]对本文来说，就是要确定轨距、水平、高低、方向、三角坑对轨道几何平顺性影响的权数[13]根据轨道各不平顺因素对车辆动力学性能的影响程度[5]，本文提出的权向量为

$$A=\{0.1,0.2,0.2,0.35,0.15\}$$

又根据上节单因素评定的 5 个模糊子集，我们得到了从 U 到 V 的模糊关系矩阵：

$$R=\begin{bmatrix}u_{11}&u_{12}&u_{13}\\u_{21}&u_{22}&u_{23}\\u_{31}&u_{32}&u_{33}\\u_{41}&u_{42}&u_{43}\\u_{51}&u_{52}&u_{53}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&r_{13}\\r_{21}&r_{22}&r_{23}\\r_{31}&r_{32}&r_{33}\\r_{41}&r_{42}&r_{43}\\r_{51}&r_{52}&r_{53}\end{bmatrix}$$

收稿日期：2000-06-18

作者简介：杜厚智(1957-)，男，安徽蚌埠人，南昌铁路局总工程师[13]

中国知网 https://www.cnki.net

元素 U_{ij} 表示从第 i 个因素着眼，评定轨道平顺性为 j 类的可能程度[13]这样，我们即可进行多因素的模糊综合评定，其运算形式写为：

$$B = A \circ R \qquad (2)$$

"O"表示用 Zadeh 算子进行合成运算[13]

这里，$B = \{b_1, b_2, b_2\}$ 是评定集上的一个模糊子集[13]其中：$b_j = \bigvee_{i=1}^{5}(a_i \wedge r_{ij})$，$j = 1, 2, 3$

Zadeh 算子意义如下：

$m \wedge n = \min(m, n)$

$m \vee n = \max(m, n)$

若 $b_{jo} = \max b_j$，$1 \leq j \leq 3$ 则该公里轨道平顺性属于 V_{jo} 级[13]

3 模拟分析程度

根据上述理论模型，本文编制了一个仿真分析程序，以便进行理论分析[13]

3.1 轨道几何状态的信真模拟

一般认为，轨道几何状态的实际检查数据服从正态分布[2][6][13]为了模拟现场的检查数据，我们首先利用计算机的 RANDOM 函数功能产生均匀分布的随机数，然后，按照下式，我们可获得均值为 μ，均方差为 σ的正态分布的随机数[4][13]

$$X = \mu + \sigma\left(\sum_{i=1}^{12} Ri - 6\right) \qquad (3)$$

由概率论知：对正态分布来说，μ和 σ是决定整个分布的两个参数[13]其曲线见图 1[13]曲线下的面积代表横坐标各变量出现的可能性，即概率[13]曲线下总面积为 100%，在 μ± σ区间(即 $C+D$) 的面积为 68.26%，在 μ± 2σ区间(即 $B+C+D+E$) 的面积为 95.45%，在 μ± 3σ区间(即 $A+B+C+D+E+F$) 的面积为 99.73%[13]

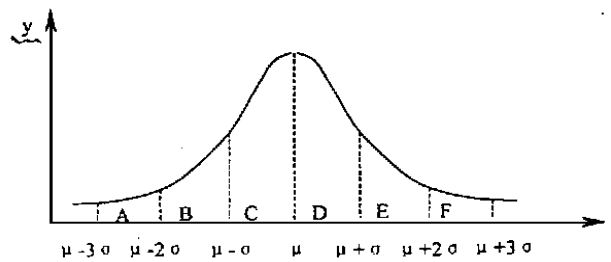

图 1 正态分布曲线

其中：X —— 正态分布随机数

μ—— 正态分布随机数均值

σ—— 正态分布随机数均方差

R —— 均匀分布随机数

于是，本文对轨距、水平、高低、方向这 4 个因素各提出两套分布参数，即理想状态 X_1 和非理想状态 X_2，具体参数值和分布区域见表 2.

表 2 轨道几何状态理论参数及分布区域

分布区域 / 概率 / 参数			68.3%		95.45%		99.735%	
		μ, σ	μ+σ	μ−σ	μ+2σ	μ−2σ	μ+3σ	μ−3σ
轨距	$s1$	2,2	4	0	6	−2	8	−4
	$s2$	2,2.5	4.5	−0.5	7	−3	9.5	−5.5
水平	$l1$	1,2	3	−1	5	−3	7	−5
	$l2$	1,3	4	−2	7	−5	10	−8
高低	$h1$	19,2	21	17	23	15	25	13
	$h2$	19,3	22	16	25	13	28	10
方向	$d1$	20,2	22	18	24	16	26	14
	$d2$	20,3	23	17	26	14	29	11

因为三角坑是水平的变化率，按现场实际做法，每 25 米检查 8 个点，每公里轨道采集 320 个数据，即每 3.125 米采集一个数据时，三角坑数据可由下式确定

$$\delta = l_{i+2} - l_i \qquad (4)$$

式中：δ—— 三角坑数据

l_i —— 第 i 号水平数据

显然，由上式确定的三角坑数据也是正态分布随机数据[13]

3.2 程序结构及功能

本程序用 BASIC 语言编写，总体结构采用模块结构法，见图 2

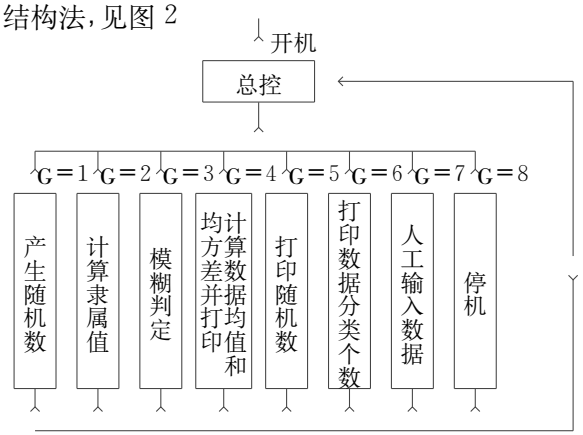

图2 程序总体结构图

各模块主要功能分述如下：

1) 模块 1，产生随机数[13]本模块利用计算机 RANDOM 函数功能，根据公式(3) 分别产生轨距、水平、高低、方向各 320 个正态分布随机数[13]然后，按公式(4) 从水平数据中计算出 318 个三角坑数据，同时，按表 1 的分类标准，统计出数据分类个数[13]

2) 模块 2，计算隶属度[13]读入表 1 的评分标准

中国知网 https://www.cnki.net

中国知网 https://www.cnki.net

表 3　仿真计算资料汇总表

组号	状态组合	理论参数				实际参数					实际状态分布					评定集
		S	L	h	d	S	L	H	d	δ	S	L	h	d	δ	
1	$s_1l_1h_1d_1$	2	1	19	20	1.97	1.02	19.11	19.90	0.01	312,8,0	318,2,0	317,3,0	320,0,0	31,7,0	0.64,0.36,0.00
		2	2	2	2	2.00	1.91	2.09	1.98	2.66						
2	$s_2l_2h_2d_2$	2	1	19	20	1.98	1.05	18.92	20.35	0.04	305,12,3	303,14,3	302,17,1	304,16,0	276,29,13	0.23,0.49,0.28
		2.5	3	3	3	2.32	3.01	2.91	2.99	4.05						
3	$s_1l_2h_2d_1$	2	1	19	20	2.07	1.02	18.98	19.83	0.02	313,6,1	302,7,1	304,15,1	320,0,0	267,32,19	0.50,0.29,0.21
		2	3	3	2	2.00	3.02	3.05	1.95	4.23						
4	$s_2l_1h_1d_2$	2	1	19	20	2.26	1.02	19.87	20.06	0.01	298,14,8	320,0,0	317,3,0	307,12,1	311,6,1	0.28,0.49,0.23
		2.5	2	2	3	2.52	1.94	1.98	2.93	2.67						
5	$s_1l_2h_1d_2$	2	1	19	20	1.91	1.07	19.03	20.01	0.01	310,10,0	307,12,1	316,4,0	308,11,1	271,31,16	0.28,0.48,0.24
		2	3	2	3	1.93	2.91	2.10	3.01	4.13						
6	$s_2l_1h_2d_1$	2	1	19	20	1.97	0.92	19.13	19.89	0.02	298,18,4	318,2,0	306,13,1	320,0,0	304,12,2	0.50,0.28,0.22
		2.5	2	3	2	2.58	1.94	3.10	2.11	2.84						
7	$s_2l_1h_2d_2$	2	1	19	20	1.89	1.16	19.04	20.06	0.01	299,16,5	318,2,0	301,16,3	312,8,0	305,9,4	0.34,0.42,0.24
		2.5	2	3	3	2.43	1.98	3.07	2.80	2.96						
8	$s_1l_2h_1d_1$	2	1	19	20	2.06	0.88	19.02	20.21	0.04	313,7,0	303,16,1	319,1,0	319,1,0	256,49,13	0.47,0.32,0.20
		2	3	2	2	1.96	2.97	1.99	2.09	4.34						
9	$s_2l_2h_2d_1$	2	1	19	20	2.05	0.75	18.99	20.06	0.03	290,22,8	302,18,0	297,17,6	319,1,0	250,44,24	0.44,0.30,0.25
		2.5	3	3	2	2.64	3.08	3.16	2.04	4.63						
10	$s_1l_1h_1d_2$	2	1	19	20	1.97	0.93	18.87	20.11	0.00	312,7,1	317,3,0	318,2,0	310,10,0	308,10,0	0.34,0.51,0.15
		2	2	2	3	1.95	2.08	1.88	3.00	3.09						

K_i(i = 1, 2, 3) , 按公式(1) 计算 U_{ij}

3) 模块 3, 模糊评定读入轨距、水平、高低、方向、三角坑对轨道几何平顺性影响的权数, 按公式(2) 进行合成运算并打印结果

4) 模块 4, 计算数据均值和均方差并打印由于实际产生的正态分布数据的参数与理论参数不可能完全一致, 为了便于对比分析, 故设计此模块, 以统计数据的实际分布参数, 其值按下式计算:

$$\mu = \frac{\sum X_i}{N} \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{N} - \mu^2}$$

式中 μ —— 产生实际数据的均值

σ —— 产生实际数据的均方差

X_i —— 计算机产生的实际数据

N —— 数据总数

5) 模块 5, 打印各项随机数据, 以供查阅

6) 模块 6, 打印数据分类情况把模块 1 统计的数据分类个数, 打印出来, 便于直观观察数据分类情况同时, 在程序调试阶段, 可对计算机结果进行人工验算

7) 模块 7, 人工输入数据对一个现场实际问题, 可把检查的数据通过人机对话方式输入计算机, 从而可以通过计算机, 对被检查的轨道几何平顺性进行评定

8) 模块 8, 停机本模块打印出理论参数后, 结束程序

4 仿真计算结果及分析

本文按不同的状态组合, 计算了 10 种情况, 计算资料及结果见表 3, 综合评定及状态趋势见表 4

表 4 综合评定表

组号	状态组合	评定集	评定结果	状态趋势
1	$s_1l_1h_1d_1$	0.64, 0.36, 0.00	优良	合格
2	$s_2l_2h_2d_2$	0.23, 0.49, 0.28	合格	失格
3	$s_1l_2h_2d_1$	0.50, 0.29, 0.21	优良	合格
4	$s_2l_1h_1d_2$	0.28, 0.49, 0.23	合格	优良
5	$s_1l_2h_1d_2$	0.28, 0.48, 0.24	合格	优良
6	$s_2l_1h_2d_1$	0.50, 0.28, 0.22	优良	合格
7	$s_2l_1h_2d_2$	0.34, 0.42, 0.24	合格	优良
8	$s_1l_2h_1d_1$	0.47, 0.32, 0.20	优良	合格
9	$s_2l_2h_2d_1$	0.44, 0.30, 0.25	优良	合格
10	$s_1l_1h_1d_2$	0.34, 0.51, 0.15	合格	优良

根据表 4, 我们可以认为, 其综合评定结果基本是符合客观实际的, 同时, 我们看出:

1) 第 1 组(理想状态组合) 和第 2 组(非理想状态组合) 的计算结果有明显的差别第 1 组评定结果为优良, 而第 2 组的结果虽然是合格, 但是状态趋势为失格

2) 第 3 组和第 4 组的对比计算结果表明, 横向不平顺(轨距、方向) 比竖向不平顺(水平、高低) 对综合评定的不利影响更大

3) 第 9 组和第 10 组的对比计算结果表明, 方向不平顺对综合评定的影响最大同时, 我们注意到, 只要方向因素是非理想状态, 所有计算结果均达不到优良

4) 第 7 组的状态组合只是把第 2 组的水平状态由非理想状态改为理想状态, 虽然, 最后的评定结果仍为合格, 但其状态趋势由失格变为优良这种细微而又重要的差别正是这种看似"模糊"实则"精确"的 Fuzzy 理论的优势所在

5 结束语

以上综合评定的过程 $B = A \circ R$ 是: 输入 A 经过变换器 R, 输出 B 其中, 权向量 A, 关系矩阵 R 和评定等级 B 的含义都十分明确而且, 在这种评定中, 能够考虑到事物客观存在的模糊性, 同时, 能获得评定对象的状态趋势因此, 与采用"非此即彼"的硬性评定方法相比, 更能做出比较符合事物本质的评定结果

本文中, 评分值 K 和权向量 A 如何确定更为理想尚可进一步探讨

参考文献:

[1] 卢祖文. 苏联铁路轨道检查和评定制度[J]. 铁道建筑. 1985, (11) , (12) .

[2] Kainen Watanabe. Shinkansen track maintenance by closed-loop control[J]. Railway Gazette International. 1982, (3) .

[3] 冯德益, 楼世博, 等. 模糊数学方法与应用[M]. 北京: 地震出版社, 1983.

[4] 钱颂迪. 运筹学基础及应用[M]. 哈尔滨. 哈尔滨工业大学, 1981.

[5] 蔡成标, 翟婉明, 等. 轨道几何不平顺安全限值的研究[J]. 铁道学报, 1995, 17(4) .

[6] 铁道部工务局. 全面质量管理经验资料汇编[R]. 1986.

中国知网 https://www.cnki.net

The Application of Fuzzy Theory to Comprehensive Evaluation of Track Geometrical Condition

DU Hou-zhi

(Nanchang Railway Administration, Nanchang 330002, China)

Abstract: This paper describe a Fuzzy model for comprehensive evaluation of track geometrical condition, study and work out a emulation software, some cases are calculated and discussed.

Key words: fuzzy theory; railway; track; regularity

[简　讯]

近一年来我校有 16 篇论文被《工程索引》(EI) 和《科学引文索引》(SCI) 收录[19].入选论文的作者是:雷晓燕、陈梦成、熊国良、徐保根、杨树军、圣小珍、揭景耀、刘红、胡林[19].

中国知网　https://www.cnki.net