

基于异常粒度及三支决策理论的城市轨道交通道岔整治智能决策系统

文 豪^{1,2} 杨 斌²

(1. 武汉铁路职业技术学院铁道通信与信号学院, 430205, 武汉; 2. 武汉地铁运营有限公司, 武汉, 430019//第一作者, 工程师)

摘 要 提出异常粒度定义, 用于定量评估道岔机械状况。基于异常粒度搭建道岔整治三支决策框架, 建立了智能决策系统设计方案及开发实例。基于武汉地铁某实际运营道岔连续 2 次工电联合检查及测量数据、微机监测相关数据进行仿真试验。仿真试验结果表明: 该系统界面友好、操作简单、决策速度快、决策结果高效可靠。

关键词 城市轨道交通; 道岔整治智能决策; 异常粒度; 三支决策

中图分类号 U213.6⁺8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.027

Intelligent Decision System for Urban Rail Transit Switch Repairing Based on Abnormal Granularity and Three-way Decision Theory

WEN Hao, YANG Bin

Abstract The definition of abnormal granularity is put forward to evaluate the mechanical state of switch quantitatively, and the framework of three-way decision for switch repairing is established based on abnormal granularity. Design scheme and development example of intelligent decision system are formulated. Based on the 2 continuous mechanical-electrical joint examination and measured data, relevant data of computer monitoring of certain operating switch in Wuhan Metro, simulation experiment is carried out. Results show that the system demonstrates friendly interface, simple operation, fast decision-making, efficient and reliable decision-making outcome.

Key words urban rail transit; intelligent decision-making for switch repairing; abnormal granularity; three-way decision

First-author's address Institute of Railway Communication and Signal, Wuhan Railway Vocational College of Technology, 430205, Wuhan, China

道岔工电联合整治(简称“道岔整治”)是解决道岔机械病害的常见手段, 目前广泛应用于各铁路及城市轨道交通项目。关于现场道岔整治技术的论述现已较丰富^[1-2], 但鲜有涉及道岔整治计划决

策方面的研究。

城市轨道交通折返线的道岔不只数量多而集中, 而且每天至少动作上百次。高使用率使得道岔容易出现不同程度的机械损伤, 造成安全隐患甚至诱发故障。城市轨道交通发展迅速, 但维护技术力量仍相对薄弱, 难以高效兼顾所有道岔整治工作。因此, 由过度整治或整治不及时导致的机械故障屡见不鲜。对此, 科学制定道岔整治决策, 制定有针对性的道岔整治计划就尤为重要, 应尽量在人力、物力有限的前提下提高道岔整治效率, 降低故障率。

目前, 主要基于人工评估的道岔机械状况来制定道岔整治计划, 积累了很多经验、取得了一系列成果, 也发现了一些问题: ①当道岔数、判断条件或实际问题较多时, 人工评估的效率较低; ②如以达标与否来对不同量纲的指标直接定性判断, 则容易陷入过度整治坏圈; ③对于测量数值的指标, 仅分析当前结果, 很少分析与对比该指标的变化趋势, 难以发现潜在问题。

受道岔故障智能诊断技术^[3]及转辙机状态智能预测技术等^[4]新技术启发, 本文提出基于专家系统^[5]及软计算等智能信息技术, 将计算机优势和人工经验相结合, 建立城市轨道交通道岔整治智能决策系统, 以缓解上述问题。

1 道岔整治智能决策框架

1.1 道岔机械状况异常粒度

道岔机械状况评估是制定整治决策的最基本依据, 通常对部位检查数据、现场感官判断及计算机监测数据等项目进行综合分析。这些项目既有测量数值, 又有逻辑判断, 而且存在不同测量指标的量纲也不同的问题。本文基于研究多层次结构信息处理的粒计算^[6]概念, 结合实践经验, 定义异常粒度, 以定量评估道岔机械状况。异常粒度定义过程包括粒化分层、计算隶属度及合成异常粒度。

1.1.1 粒化分层

将“道岔机械状况评估”这一宽泛、模糊的命题粒化为若干问题粒层,以便从不同层次角度评估机械状况异常程度。这一步骤简化了命题形式,强化了命题内容。

1.1.2 计算隶属度

设每一粒层都包括若干判定条件,基于判定条件,计算 1 个归一化数值来表征粒层异常程度。这里采用模糊集作为粒计算实现方式。设有限论域 U 的模糊集记为 A ,构造隶属函数 $u_A(\cdot)$ 来计算 U 内每个元素 x 隶属 A 的程度 $u_A(x)$,记为隶属度,并有:

$$u_A:U\rightarrow[0,1] \tag{1}$$

隶属度越接近 1,表示越符合 A 的描述。

1.1.3 合成异常粒度

将各问题粒层隶属度按一定规则合成的综合隶属度定义为异常粒度。合成规则和隶属函数在功能及形式上等价。

实际应用中,各粒层往往需进一步划分为若干子粒层才能进行全面的评估。当粒层数为 m 时,先将第 i 粒层所含子粒层隶属度合成为第 i 粒层的异常粒度 g_i ,再通过加权综合得到综合异常粒度 G 为:

$$G=[q_1,q_2,\cdots,q_m][g_1,g_2,\cdots,g_m]^T \tag{2}$$

式中:

- m ——划分粒层数;
- q_1,q_2,\cdots,q_m ——各粒层异常粒度权值且满足 $q_1+q_2+\cdots+q_m=1$ 。

g_i 与 G 均在 $[0,1]$ 内,其值越大,说明异常程度越高。通过 G 不仅可定量评估道岔机械状况,还可进行不同道岔状况的对比分析。

1.2 基于三支决策理论的道岔整治决策

三支决策是一种基于实际人类认知的决策模式,其将决策过程划分为接收、拒绝及延迟等 3 支^[7]。在道岔整治中,道岔的状况评估及对应整治决策相应分为 3 支。

d_1 ——接收决策。道岔不可使用,存在影响行车安全的机械病害,需单锁道岔并立即安排整治,直至其可恢复使用。

d_2 ——拒绝决策。道岔状态良好,不存在机械隐患或当前隐患容忍程度很高,暂不需整治,保持观测道岔状况变化趋势即可。

d_3 ——延迟决策道岔可使用,但存在影响道岔动作的机械隐患,需根据隐患容忍程度值和排序综合制定倒排计划,进行预防性整治。

通常设定阈值 T_1 、 T_2 ,作为判断决策的分支的依据。

1.3 基于异常粒度的道岔整治三支决策框架

为实现道岔整治智能决策,首先,将决策命题粒化为具体几个问题层及其若干子粒层;然后,确定条件隶属函数、合成规则及相关权值等参数,并计算异常粒度;最后,比较 G 和设定阈值(T_1 及 T_2)来匹配各支决策。

以城市轨道交通折返岔区为单位,对岔区道岔建立基于异常粒度的道岔整治三支决策框架(如图 1 所示),以实现道岔整治智能决策。

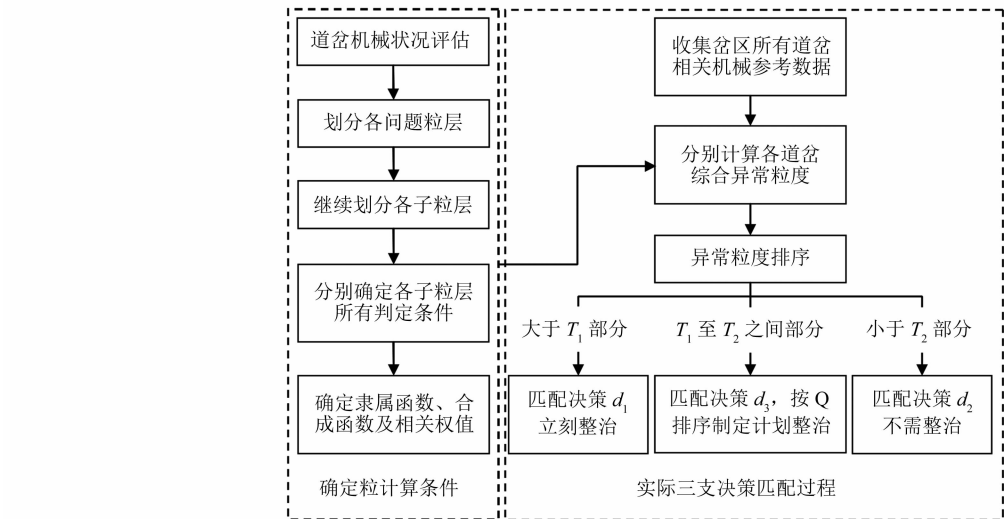


图 1 基于异常粒度的道岔整治三支决策框架

Fig. 1 Three-way decision framework for switch repairing based on abnormal granularity

• 137 •

对于图 1 中的延迟决策分支,需根据异常粒度值和排序来进一步确定最终的道岔整治计划。

2 道岔整治智能决策系统设计方案

以武汉地铁双机牵引道岔为背景,基于道岔整治智能决策理论框架,设计满足实际应用需求的道岔整治智能决策系统(以下简为“决策系统”)。决策系统的本质等效于专家系统,参经常规专家系统,决策系统拓扑结构如图 2 所示。

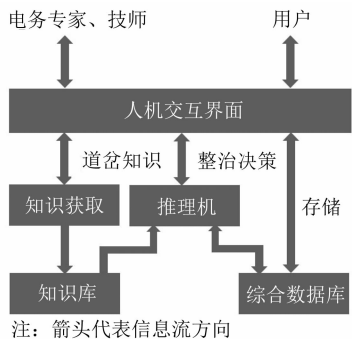


图 2 决策系统结构
Fig. 2 Stucture of decision system

由图 2 可见,决策系统由人机交互界面、综合数据库、知识获取规则、知识库、推理机等 5 部分组成。其中,知识获取、知识库及推理机为设计核心部分,

而人机交互界面及综合数据库由设计核心部分扩展而来。

2.1 知识获取规则

知识获取即从“专家”处学习知识的过程,是建立、扩充和修改知识库的根据。决策系统的知识学习主要内容有:道岔机械状况评估指标的选取规则、判断机械状况异常的方式与参考标准、评估及整治优先级策略等。获取知识的主要方式如下:

- 1) 参考相关行业及企业标准。对于道岔工电联合检查测量项目,参考相关标准规定。
- 2) 现场实践经验总结。对于非数据测量项目,往往需根据人工经验进行感官评价。
- 3) 采用统计分析及机器学习等应用数学方法。该方式主要用于获取权值及临界值等客观参考数据。

2.2 知识库建立

知识库用于决策系统存放获取的知识,是决策系统核心组成中最重要部分,采用知识产生式规则。决策系统知识库中主要包括粒化规则、条件集、隶属函数、合成规则及相关权值等内容。

2.2.1 粒化规则和条件集

参考道岔工电联调经验和标准,确定粒化规则和条件集,见表 1。

表 1 命题粒化规则和对对应条件集
Tab. 1 Propositional granulation rules and corresponding condition sets

命题	问题粒层	子粒层	条件集
道岔机械状况 综合评估	第 1 粒层:影响行车安全问题	无	{在道岔压力试验中,第一牵引点有 4 mm 锁闭;尖轨尖端与基本轨有 2 mm 以上暴露}
	第 2 粒层:人工感官评价问题	①道岔各阶段动作不顺畅	{道岔功率曲线存在异常波动;电动操作或手摇道岔时有解锁、转换或锁闭阻力异常}
		②存在视觉、听觉上的异常	{滑床板存在异常磨痕;尖轨及基本轨可见线性不良;锁钩无旷动量}
	第 3 粒层:结合部位静态机械参数测量问题	①尖轨、基本轨密贴测量值	{密贴超标率;密贴变化率}
		②滑床板空吊测量值及数量	{吊板数超标率;吊板数变化率}
		③牵引点动程测量值	{动程超标率;动程变化率}
		④转辙机方正测量值	{方正超标率;方正变化率}
		⑤电务杆件方正测量值	{方正超标率;方正变化率}
		⑥各项铁间隙测量值	{顶铁间隙超标率;顶铁间隙变化率}

在表 1 中,第 1 粒层与第 2 粒层均为“是与否”的逻辑值,而第 3 粒层则以测量数值为主。对于测量数值,需进一步计算“超标率”和劣化侧的“变化率”,以进行定量评估。

设超标的项目本次检查测量数值为 l 、上一次检查测量数值为 l_0 ,用 b_{\max} 及 b_{\min} 分别表示该项目参数参考标准值上限和下限,那么超标率 E 可统一按式(3)进行计算。

$$E = \begin{cases} \min\left\{\frac{l - b_{\max}}{b_{\max} - b_{\min}}, 1\right\} & \text{if } l > b_{\max} \\ \min\left\{\frac{b_{\min} - l}{b_{\max} - b_{\min}}, 1\right\} & \text{else if } l < b_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

若项目(如尖轨密贴等)需要测量多个点位参数,则先计算每点位超标率再用层次分析法^[7]加权。

劣化侧的变化率 C 则可由式(4)计算:

$$C = \min \left\{ \frac{|l - l_0|}{b_{\max} - b_{\min}}, 1 \right\} \tag{4}$$

2.2.2 隶属函数、合成规则及相关权值

第 1 粒层没有子粒层,其隶属函数即为合成规则。其 2 个条件均为逻辑判断条件,其判断值为 0 或 1,且任意 1 个条件成立时道岔均不可投入使用。因此,对 2 个条件进行逻辑判断后取并集,便可得到异常粒度。第 1 粒层隶属函数为:

$$f_1(\cdot) = L(H_{1,1}) \cup L(H_{1,2}) \tag{5}$$

式中:

$H_{1,1}, H_{1,2}$ ——分别为第 1 粒层的第 1、2 个判断条件;

$L(H)$ ——基于判断条件 H 的逻辑判断。

第 2 粒层有 2 个子粒层。子粒层的条件均为逻辑判断,故其隶属函数形式与 f_1 相同。此外,由于 2 个子粒层的重要程度相同,因此,需将 2 个子粒层隶属度等权值合成,即:

$$f_2(\cdot) = (f_{2,1}(\cdot) + f_{2,2}(\cdot)) / 2$$
$$f_{2,i} = L(H_{2,i,1}) \cup \cdots \cup L(H_{2,i,j}) \cup \cdots \cup L(H_{2,i,m})$$

式中:

f_2 ——第 2 粒层隶属函数;

$f_{2,1}, f_{2,2}$ ——分别为第 2 粒层第 1、2 个子粒层的隶属函数;

$H_{2,i,j}$ ——第 2 粒层第 i 个子粒层的第 j 个条件值。

第 3 粒层子粒层较多,其条件为属于 $[0, 1]$ 内的具体数值。为加强较大值的影响程度,本文将条件中两个值的均方根值作为隶属度。第 3 粒层隶属函数 $f_3(\cdot)$ 为:

$$f_3(\cdot) = \sqrt{((H_{3,i,1})^2 + (H_{3,i,2})^2) / 2} \tag{6}$$

式中:

$H_{3,i,1}, H_{3,i,2}$ ——分别为第 3 粒层第 i 个子粒层的第 1、2 个条件值。

之后,对各子粒层隶属度进行加权合成。由于各子粒层间能互相影响,只要任一子粒层出现较大隐患就会影响道岔正常使用。因此,采用权值自适应分配机制:利用 1 个单调增函数生成 6 个函数值,并归一化处理得到 6 个权值;为增强大隶属度子粒层对整体评价的影响程度,先将权值与隶属度分别按大小排序,再按序将权值依次分配给相应隶属度。本文采用 2 为底的指数函数生成权值,自变量取 $[0, 5]$ 的整数。

对于第 1、2、3 粒层异常粒度的权值 $q_1、q_2、q_3$,应满足如下条件:①按问题影响程度,有 $q_1 > q_2 > q_3$;②3 个粒层的异常粒度可区分,即有 $q_1 \geq (q_2 + q_3)$ 且 $q_2 \geq 2q_3$ 。据此将 $q_1、q_2、q_3$ 分别设为 0.50、0.34、0.16。

2.3 推理机实现

决策系统采用“计算+判断”的形式建立正向推理机模式。推理机采用基于异常粒度的道岔整治三支决策框架进行推理。

如第 1 粒层任意 1 个条件成立,则说明道岔存在影响行车安全的病害,不可使用。

1) 由于第 1 粒层 $q_1 = 0.5$,故 T_1 取 0.50。如 $G > T_1$,则匹配决策 d_1 。

2) 通过历史数据分析和专家评估相结合的方式,取 T_2 为 0.03。如 $G < T_2$,则说明道岔个别静态测量指标存在很微小超标或变化情况,暂时不需要整治,匹配决策 d_2 。

3) 如 $T_2 \leq G \leq T_1$,则匹配延迟决策 d_3 。

本文根据 $q_2、q_3$ 及实际情况,将延迟决策 d_3 细化为 3 个异常级别细化预防性整治决策,如表 2 所示。

表 2 延迟决策的细化整治决策

Tab. 2 Delay decision refinement

细化决策	G	机械状况评级	决策内容
d_3 -Ⅲ	$0.34 \sim < 0.50$	异常Ⅲ级	扳动状态差,应当天安整治
d_3 -Ⅱ	$0.17 \sim < 0.34$	异常Ⅱ级	扳动状态较差,应 3 天内安排整治
d_3 -Ⅰ	$0.03 \sim < 0.17$	异常Ⅰ级	按异常度排序制定整治倒排计划

3 道岔整治智能决策系统实现

3.1 开发样例

决策系统实质为数值分析系统。本文基于 MATLAB 软件开发武汉地铁道岔整治智能决策系统(测试版),并通过 GUI(图形用户界面)来实现人机交互功能。

1) 数据输入内容与形式。根据目前道岔联调工作现状,数据输入内容主要为岔区所有道岔连续 2 次工电联合检查及测量数据、微机监测相关数据等,并以电子表格形式录入系统。

2) 需实现的基本功能:①分析岔区所有道岔机械状况进行综合培训,并输出整治决策;②可选择切换并分项显示单个道岔异常粒度。

武汉站岔区交叉渡线道岔系统人机交互界面样例如图 3 所示。



图3 系统人机交互界面样例

Fig. 3 Example of system human-computer interaction interface

3.2 仿真试验及分析

仿真试验选取武汉站折返线4组道岔某月中旬连续2次工电联合检查及其他有关数据形成电子表格录入系统。

相应的整体分析结果见表3。决策系统的计算总耗时为0.11 s,可见效率远高于同等工作量的人工处理。

表3 仿真试验结果
Tab.3 Case simulation results

道岔	整体分析结果		
	G	排序	决策
4#定位	0	7	d ₂
4#反位	0.104	2	d ₃ -I
6#定位	0.011	4	d ₂
6#反位	0.084	3	d ₃ -I
8#定位	0.007	5	d ₂
8#反位	0.287	1	d ₃ -II
10#定位	0	7	d ₂
10#反位	0.005	6	d ₂

表3中8#反位道岔的G值最高。其机械状况按表2应为异常二级。对该道岔进一步分析:在第2问题粒层中,满足道岔动作不顺畅条件;在第3问题粒层中,滑床板吊板异常粒度为0.098,权值最高,且对道岔动作有影响。因此,整治决策及其支持信息为:需在3 d内整治;首要考虑滑床板空吊问题引起的动作不顺畅。当及时对滑床板高度进行调整后,道岔动作恢复平稳,有效消除了安全隐患。由

此可见,高决策系统的决策结果高效可靠。

4 结语

本文针对城市轨道交通道岔机械状况评估及整治计划决策所面临的问题,引入粒计算及三支决策理论等人工智能前沿知识,建立基于异常粒度的道岔整治三支决策体系。以武汉地铁为背景设计开发的道岔整治智能决策系统界面友好、操作简单,能将实践经验和不同量纲的客观数据综合在一起,实现了高效可靠的定量评估及决策,可避免全人工分析带来的局限性,有助于对接未来的深度智能化运维系统。

参考文献

[1] 格日乐. 工电联合整治提速道岔病害的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
Gerile. Track maintenance and signal department combination process to improvement quality of speed-up switch [D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2016.
[2] 鹿俊强. 地铁终点折返道岔发生病害的原因及对策[J]. 都市轨道交通,2010(6):27.
LU Junqiang. Reasons for the faults of the metro terminal turn-back turnouts and coutermeasures[J]. Urban Rapid Rail Transit,2010(6):27.
[3] 赵林海,陆桥. 基于灰关联的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报,2014(2):69.
ZHAO Linhai, LU Qiao. Method of turnout fault diagnosis based on grey correlation analysis[J]. Journal of the China Railway Society,2014(2):69.

(下转第145页)