

## 基于云模型的磁浮道岔使用寿命状态评估\*

胡昌桂<sup>1</sup> 杨安玉<sup>1</sup> 虞 翊<sup>2</sup> 楚彭子<sup>2,3</sup> 董丹阳<sup>2,4</sup> 林 辉<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 4. 同济大学电子与信息工程学院, 201804,

上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 磁浮道岔是磁浮交通的转线设备。针对磁浮道岔全寿命周期管理中使用寿命状态评估问题,阐述了磁浮道岔的一般特性,建立了影响因素指标体系以及评估模型,提出了基于云模型的磁浮道岔使用寿命状态评估方法。结合算例分析,验证了该方法的适用性,并给出针对性的维护建议。研究结果可为磁浮线路的全寿命周期管理工作提供参考。

**关键词** 磁浮道岔; 使用寿命; 云模型; 正态云

**中图分类号** U283.2; U237

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.05.048

## Lifespan Evaluation of Maglev Turnout Based on Cloud Model

HU Changgui, YANG Anyu, YU Yi, CHU Pengzi, DONG Danyang, LIN Hui

**Abstract** The maglev turnout is the rotating equipment of maglev lines. Targeting the lifespan status evaluation of maglev turnouts in lifecycle management, the general characteristics of maglev turnouts are explained, and the index system of influencing factors and the evaluation model are established, and the lifespan evaluation method of maglev turnouts based on cloud model is proposed. Combined with the analysis of a case, the applicability of the method is verified and some specific suggestions on maintenance are given. Results can provide reference for the life cycle management of maglev lines.

**Key words** maglev turnout; lifespan; cloud model; normal cloud

**First-author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

磁浮线路是保证磁浮列车能够离开地面一定高度、快速运行的支撑与导向系统<sup>[1]</sup>。与轮轨交通类似,磁浮线路分叉处需要设置道岔。作为磁浮交

通的转线设备,道岔设备的维保关系着列车运行与运营的可靠性与安全性。随着使用时间与使用频次的累积,道岔设备的老化程度会日益明显,表现为故障次数增多、稳定性变差。对道岔设备健康状态以及使用寿命状态的分析与维护有助于保持良好的工作状态。

使用寿命是指设备从投入使用开始至设备退出使用为止的时间<sup>[2-4]</sup>,其状态通常分为“优”“良”“中”和“差”。健康状态是指设备的可用情况,通常分为“故障”“亚健康”与“健康”<sup>[5]</sup>。两者之间存在差异,体现在健康状态着眼于分析对象的故障情况,使用寿命状态则更倾向于研究对象的全寿命周期管理<sup>[4-5]</sup>。在以往使用寿命状态的相关研究中,文献[2-4]讨论了信号系统的安全评估方法,提出了信号设备使用寿命的概念,研究了影响使用寿命状态——物理寿命、经济寿命和技术寿命三方面的因素,并讨论了信号设备使用寿命计算案例,阐述了信号设备使用寿命评估系统的概念。文献[6]同样分析了轨道交通信号设备寿命评价模型。

磁浮交通在国内外的应用还较少,以往磁浮道岔设备的使用、养护以及报废过程相关研究中的模型与方法均以轮轨交通为例,尚缺乏科学依据。考虑到使用寿命状态的内涵在不同制式中应具有统一性,本研究以磁浮交通道岔设备为研究对象,进一步拓展其应用领域。同时,使用寿命状态属于一种定性概念,如何定量描述还有待研究。本研究引入了一种定性定量信息转换的不确定性模型——云模型<sup>[7-8]</sup>作为状态评估工具,来实现磁浮道岔使用寿命状态的评估。

\* 中国工程院院地合作项目(2018-GD-3);国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200602-02);上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205803);上海市磁浮与轨道交通协同创新中心基金资助项目(20132223)

# 1 评估指标体系

## 1.1 磁浮道岔特性

不同于轮轨交通利用车轮与轨道的摩擦力产生前进动力,磁浮交通利用车辆与轨旁之间的磁力作用实现列车的悬浮、导向与驱动,且车辆驱动设备置于地面,线路结构相对复杂。磁浮交通的道岔属于磁浮交通的转线设备,是一根连续可弹性弯曲的钢梁<sup>[1]</sup>。磁浮道岔结构与控制系统不同于轮轨交通,其跨度更大(可达几十米),造价更高。磁浮道岔转辙时由液压或电动机械驱动整个钢梁协调移动,且移动时间较长,能耗相对更大。如上海磁浮示范线道岔移动一次的时间约为 28 s<sup>[1]</sup>。轮轨交通道岔造价则相对更低,结构相对简单。在转辙时,仅需尖轨和心轨的移动,基本轨保持不动,且转辙时间较短。

磁浮道岔设备需要承受各种车辆运行荷载的反复作用,其设计必须符合故障-安全原则,以保证车辆平稳与安全的通行。道岔由信号系统控制,考虑到控制电路故障的可能性,应具备手动驱动的能力。由于其在线路中的重要性,需要在设计、施工与维护时考虑基础的坚实性、接口的稳定性,以及材料与涂料的防尘、防水、防紫外线危害和抗腐蚀的能力。

## 1.2 影响因素分析

磁浮道岔是磁浮线路的关键节点,也是必要的节点。其在车辆的运行与线路的运营中扮演着十分重要的角色。在以往轮轨交通道岔的使用寿命状态分析中,李章杨等<sup>[2]</sup>从经济寿命、物理寿命和技术寿命三个角度建立了评价准则,涉及年消耗成本、维护成本、运行成本、技术更新、系统接口、运行工况、运营状态与维护管理等多种因素。使用寿命影响因素在不同对象间具有一定的通用性。例如,金捷等<sup>[6]</sup>同样从经济寿命、物理寿命和技术寿命三个角度建立了信号系统轨道电路设备的使用寿命评价模型,并精简了相应的影响因素,突出了关键因素。基于此,本文同样从经济寿命、物理寿命和技术寿命出发,建立了如图 1 所示的指标体系,涉及经济状态、使用状态、运行状态和技术状态 4 个维度指标。其中,使用状态和运行状态可以理解为物理寿命状态。这些维度指标包括平均转辙能耗、平均维护费用、已使用年限、每月转辙次数、每月过车次数、平均无故障时间、平均故障恢复时间、系统制式

相对情况和系统技术相对情况 9 个子维度指标。这些指标中涉及定量指标和定性指标。对于定性指标,可综合专家与技术人员意见予以计分。对于定量指标,可在充足样本数据的基础上,划定不同状态的数值区间,进而可计算相应指标的状态。实际中,如果难以确认相应的状态区间,也可将其定性化描述,以反映其状态水平。

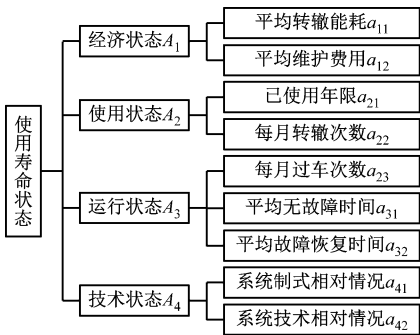


图 1 磁浮道岔使用寿命评估指标体系

评估使用寿命状态时,对于指标权重,应在平衡各因素的基础上突出关键因素<sup>[6]</sup>。对此,可根据经验赋权,如采用层次分析法或主观赋权,也可采用定量赋权方式,如主成分分析法或熵权法等。本文结合文献[2,6]以及层次分析法得到的维度指标权重向量为(0.170,0.404,0.321,0.106),子维度指标权重向量分别为(0.333,0.667)、(0.500,0.250,0.250)、(0.667,0.333)和(0.429,0.571),所得层次总排序权重为(0.057,0.114,0.202,0.101,0.101,0.214,0.107,0.045,0.060)。

# 2 评估的云模型

## 2.1 云理论概述

云模型于 1995 年由李德毅院士提出,是一种经典的定性定量转化的、面向语言概念上的随机性与模糊性的不确定性转换模型。具体地,云由期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  这三个数字特征统计量构成。基于正态分布和模糊数学的正态云发生器是常用的云模型实现算法<sup>[7-10]</sup>。正态云发生器包括正向云发生器和逆向发生器,用于实现定性概念与定量概念之间的相互转换,如图 2 所示。

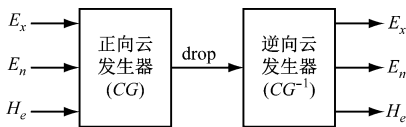


图 2 正态云发生器

正向正态云发生器的输入为云滴数量  $n$ , 以及期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$ , 输出为  $n$  个云滴  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 以及其隶属度  $u_i$ , 即  $\text{drop}(x_i, u_i)$ 。实现步骤如下: 首先, 获取正态随机数  $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$ ; 其次, 获取正态随机数  $x = N(E_x, E_n'^2)$ ; 再者, 获取隶属度  $u = \exp[-(x - E_x)^2 / (2E_n'^2)]$ , 进而形成具有一个具有隶属度为  $u$  的云滴。重复以上步骤, 直至获取  $n$  个云滴。而逆向正态云发生器的输入为  $m$  个样本数据及其均值  $E$  与方差  $S^2$ , 输出为反映样本定性概念的数字特征, 即期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$ 。其中,  $E_x$  取  $E$ ,  $E_n$  取  $\sqrt{\pi/2} \left( \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| / n \right)$ ,  $H_e$  取  $\sqrt{|S^2 - E_n^2|}$ 。

云模型借助相似度来反映两个云的接近程度。若是以状态评估为目标, 则两者越接近的云, 两者的状态等级越接近。若有  $n$  个对照云  $(E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})$  和基准云  $(E_{x_0}, E_{n_0}, H_{e_0})$ , 根据正向正态云发生器, 则两者相似度的计算步骤如下: 首先, 依据对照云特征获取正态随机数  $E'_{n_1} \sim N(E_{n_1}, H_{e_1}^2)$ ; 其次, 获取正态随机数  $x_i = N(E_{x_1}, E_{n_1}'^2)$ ; 再者, 获取隶属度  $u'_i = \exp[-(x_i - E_{x_0})^2 / (2E_{n_0}^2)]$ 。重复以上步骤, 直至得到  $n$  个隶属度数值, 其平均值即为相似度。

此外, 云的四则运算与常规的数学运算有所不同。若要根据子维度指标的数字特征来求取维度指标的数字特征, 需要涉及综合云的计算。综合云的获取涉及不同因素的云数字特征及其权重的组合。假设某维度指标由 3 个子维度指标构成, 则可按照如下公式计算其数字特征:

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x_1} E_{n_1} w_1 + E_{x_2} E_{n_2} w_2 + E_{x_3} E_{n_3} w_3}{E_{n_1} w_1 + E_{n_2} w_2 + E_{n_3} w_3} \\ E_n = E_{n_1} w_1 + E_{n_2} w_2 + E_{n_3} w_3 \\ H_e = \frac{H_{e_1} E_{n_1} w_1 + H_{e_2} E_{n_2} w_2 + H_{e_3} E_{n_3} w_3}{E_{n_1} w_1 + E_{n_2} w_2 + E_{n_3} w_3} \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 基于云理论的评估模型

参考文献[2,6], 将各个影响因素的相应状态映射为“优”“良”“中”和“差”。由于云模型需要已知定性概念论域的范围, 因此, 需要设置状态的定量区间。区间划分的方法较多, 本文统一将指标评语的模糊区间设置为“优”[0,1], “良”[1,2], “中”[2,3], “差”[3,4]。其中, “优”代表设备或影响因

素处于很好的状态, 仅需日常巡检来开展维护; “良”代表设备或影响因素处于较好的状态, 有一定的隐藏风险, 需要结合“预防修”来开展维护; “中”表示设备或影响因素处于差强人意的状态, 维护压力较大; “差”则表示设备或影响因素处于难以接受的状态, 需要进行相应的更新。基于此, 可根据这些区间与如下公式求得基准云的数字特征(见表1):

$$\begin{cases} E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e = \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$C_{\max}$  与  $C_{\min}$ ——相应指标评语的双边约束, 即定量区间的边界;

$\lambda$ ——代表指标变量的模糊程度的某一小于 1 的常数,  $\lambda$  越大, 云滴的离散程度越大, 鉴于状态本身具有的模糊性, 本文暂取值 0.1。

表 1 基准云的数字特征

状态项	数字特征
优	(0.5, 0.167, 0.1)
良	(1.5, 0.167, 0.1)
中	(2.5, 0.167, 0.1)
差	(3.5, 0.167, 0.1)

基于基准云的数字特征, 结合正向云发生器(水滴数量  $n$  取 1 000), 分别得到了不同水平的使用寿命状态基准云图。由图 3 可知, 各状态等级的分布具有一定模糊性质, 即云模型在随机和离散的层面上量化了定性概念。

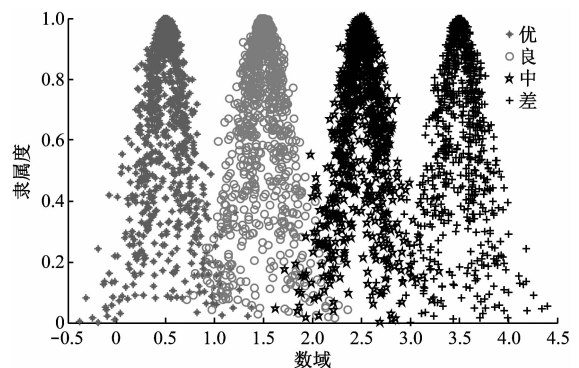


图 3 道岔使用寿命状态基准云图

依据所获得的基准云数字特征,结合实际子维度指标的状态数据,可采用逆向云发生器得到其数字特征(即对照云),进而可计算不同子维度指标与不同基准云的相似度向量。进一步,可结合式(1)来计算维度指标或整体情况的云数字特征,以及相应的相似度向量。

3 算例分析

以采用了 10 分制打分法的某磁浮道岔影响因素评估数据为例,来分析上述方法的可行性。首先,采用 $4(x_i/10)$ 的方式将所有数据归一化至数域空间 $[1,4]$ ,进而结合权重向量来开展评估计算。对于一个影响因素而言,分数越高,即代表着该因素对于磁浮道岔使用寿命的负面影响越大。借助逆向云发生器、评估数据及其均值和方差产生了不同因素的云数字特征,如表 2 所示。

同时,根据式(2)得到各维度以及整体的云数

表 2 磁浮道岔影响因素统计量及云数字特征

因素指标	均值	方差	数字特征
平均转辙能耗	0.613	0.256	(0.613,0.204,0.193)
平均维护费用	0.773	0.428	(0.773,0.267,0.223)
已使用年限	0.987	0.639	(0.987,0.487,0.265)
每月转辙次数	0.907	0.384	(0.907,0.293,0.253)
每月过车次数	0.640	0.295	(0.640,0.229,0.212)
平均无故障时间	0.773	0.384	(0.773,0.267,0.223)
平均故障恢复时间	1.040	0.638	(1.040,0.497,0.285)
系统制式相对情况	0.533	0.195	(0.533,0.159,0.155)
系统技术相对情况	0.560	0.203	(0.560,0.172,0.167)

字特征,即经济状态为(0.729 2,0.246 2,0.214 6),使用状态为(0.917 9,0.374 0,0.254 7),运行状态为(0.901 6,0.343 7,0.252 6),技术状态为(0.549 1,0.166 4,0.161 8),整体为(0.867 4,0.320 9,0.243 6),相应的云图如图 4 和图 5 所示。

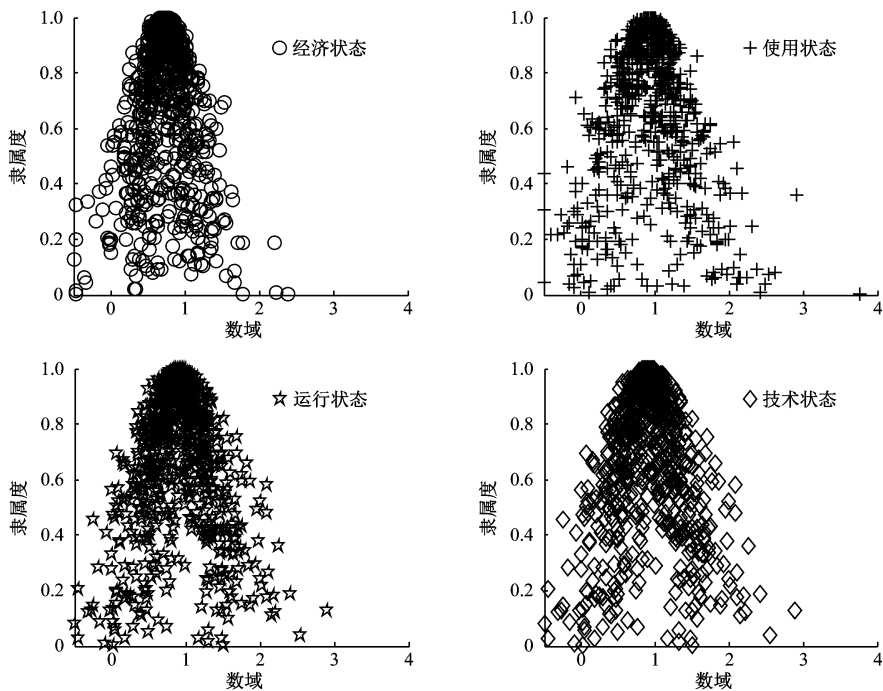


图 4 各维度状态云图

进一步地,根据 2.1 节中的相似度计算方法,分别计算了不同影响因素(子维度)、维度以及整体状态的云数字特征与不同状态基准云的相似度,如表 3 所示。根据表 3 可知,研究对象使用寿命状态影响因素中,仅平均故障恢复时间处于良的状态,其他影响因素均处于理想的状态。同时,维度状态与整体状态均为优。

基于上述结果可知,算例对象整体处于理想的使用寿命状态,可进一步加强日常巡检维护,来保持该状态。同时,平均故障恢复时间的理想程度存在提升空间,可加大维护人才与备品备件投入,推行在线诊断与健康状态预测,提高故障维护的效率,进一步改善该道岔的运行状态。

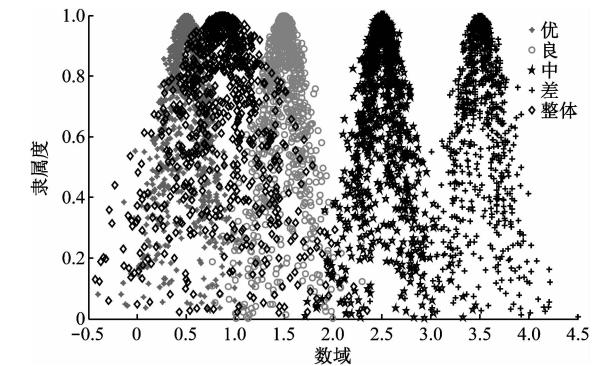


图5 整体状态云图

表3 相似度计算结果

整体/维度/子维度	优	良	中	差
整体状态	0.498	0.164	0.000	0.000
经济状态	0.618	0.019	0.000	0.000
使用状态	0.518	0.314	0.003	0.000
运行状态	0.485	0.250	0.001	0.000
技术状态	0.944	0.000	0.000	0.000
平均转辙能耗	0.829	0.001	0.000	0.000
平均维护费用	0.566	0.044	0.000	0.000
已使用年限	0.579	0.553	0.031	0.000
每月转辙次数	0.378	0.160	0.000	0.000
每月过车次数	0.793	0.006	0.000	0.000
平均无故障时间	0.580	0.040	0.000	0.000
平均故障恢复时间	0.527	0.603	0.041	0.001
系统制式相对情况	0.961	0.000	0.000	0.000
系统技术相对情况	0.924	0.000	0.000	0.000

4 结语

磁浮道岔是磁浮线路中十分关键的环节,应具

有良好的可靠性、可用性、可维护性和安全性。在该过程中,分析道岔系统或其子系统所处的全寿命周期状态,可以提出相应的维护策略,也能为其小修、中修以及大修提供参考信息。通过指标体系与评估模型的建立,以及算例的分析,体现了云模型在定性语言描述和定量数值间不确定转换的优越性。

参考文献

[1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003:102.

[2] 李章杨,陆国政,虞翊,等. 高铁信号关键设备使用寿命评估方法[J]. 铁道通信信号,2017(10):1.

[3] 姜西,虞翊,阿力玛斯·伊力夏提,等. 城市轨道交通信号设备综合寿命评价系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2019(1):100.

[4] 虞翊. 城市轨道交通运营设备的寿命与安全评价方法[J]. 城市轨道交通研究,2014(2):16.

[5] 钟志旺,陈建译,唐涛,等. 基于SVDD的道岔故障检测和健康评估方法[J]. 西南交通大学学报,2018(4):842.

[6] 金捷,洪海珠,张雅. 基于模糊层次分析法的轨道交通信号设备寿命评价模型[J]. 城市轨道交通研究,2020(1):59.

[7] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995(6):15.

[8] 陈贵林. 一种定性定量信息转换的不确定性模型:云模型[J]. 计算机应用研究,2010(6):2006.

[9] 付保明,王健,张宁,等. 基于云模型的城市轨道交通短时客流预测[J]. 城市轨道交通研究,2018(4):61.

[10] 豆飞,潘晓军,秦勇,等. 基于云模型的城市轨道交通车站客流控制触发判别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016(6):1318.

(收稿日期:2020-11-20)

(上接第221页)

[9] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[10] 徐荣年. 工程结构裂缝控制:步入“王铁梦法”及诠释[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[11] 韩锡云,许洵嘉,李华,等. 苏州滨湖新城地下空间早龄期侧墙结构混凝土变形开裂研究[J]. 江苏建筑,2016(5):100.

[12] CERVERA M, OLIVER J, PRATO T. Thermo-chemo-mechani-

cal model for concrete (I): hydration and aging[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(9):1018.

[13] LI H, LIU J, WANG Y, et al. Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete base on the multi-field coupling mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2015, 88:84.

(收稿日期:2019-05-13)