

模糊层次分析法在高速磁浮列车磁悬浮系统综合评估中的应用

翟明达, 刘 信, 李晓龙*, 龙志强

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为全面科学地评估高速磁浮列车悬浮系统性能,基于模糊层次分析法设计了悬浮系统综合评估方法。针对悬浮系统运行规律和能力特点,提出了表征悬浮系统性能的评价指标体系;采用模糊层次分析法确定高速磁浮列车悬浮系统性能指标的权重,利用指数标度法和梯形分布法建立了悬浮系统多层模糊综合评估模型;开发了高速磁浮列车悬浮系统性能综合评估系统,并利用时速600 km高速磁浮样车在上海1.5 km高速磁浮试验线开展动态运行测试。结果表明基于模糊层次分析的悬浮系统综合评估方法能够对悬浮系统性能做出综合评估,实现了评估结果的可量化与可视化。

关键词:高速磁浮列车;悬浮系统;综合评估;模糊层次分析

中图分类号:TP273 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)03-222-10



论文
拓展

Application of fuzzy analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of suspension system in high-speed maglev train

ZHAI Mingda, LIU Xin, LI Xiaolong*, LONG Zhiqiang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to comprehensively and scientifically evaluate the performance of suspension system in high-speed maglev train, a comprehensive evaluation method was designed based on fuzzy analytic hierarchy process. According to the operation law and capability characteristics of suspension system, an evaluation index system was proposed to characterize the performance of suspension system. The fuzzy analytic hierarchy process was used to determine the weight of the performance index of the suspension system, and a multi-layer fuzzy comprehensive evaluation model of the suspension system was established based on exponential scaling method and trapezoidal distribution method. A comprehensive performance evaluation system of suspension system based on operation data was developed, and the dynamic operation test was carried out on the Shanghai 1.5 km test line by using a 600 km/h high-speed maglev train. Results show that the comprehensive evaluation method of suspension system based on fuzzy analytic hierarchy process can comprehensively evaluate the performance of suspension system and realize the quantification and visualization of the evaluation results.

Keywords: high-speed maglev train; suspension system; comprehensive evaluation; fuzzy analytic hierarchy process

高速磁浮技术是引发轨道交通产业变革的前瞻性、颠覆性技术,是世界科技争夺制高点,德国、日本、美国等国家均开展了相关技术研究,不断争夺和刷新速度纪录^[1-3]。我国从“十五”开始支持高速磁浮技术发展,历经四个五年计划的科研攻关,实现了高速磁浮技术的国产化和自主创新。2021年7月20日,具有我国自主知识产权的时速600 km高速磁浮列车在青岛正式下线,标

志着我国已掌握了常导电磁型高速磁浮的核心关键技术,已经具备自主化与产业化能力^[4]。悬浮系统是时速600 km高速磁浮列车的“轮子”,列车利用悬浮系统产生的方向向上的电磁力来支撑列车车体,从而使列车无接触地悬浮于轨道上方。因此,悬浮系统性能是影响高速磁浮列车安全平稳运行的关键^[5-6]。目前工程中主要采用基于预设阈值的性能评估方法,通过判断悬浮间隙是否

收稿日期:2024-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52402457,52332011);国家重点研发计划资助项目(2023YFB4302102)

第一作者:翟明达(1990—)男,内蒙古通辽人,助理研究员,博士,E-mail:zhaimingda13@nudt.edu.cn

*通信作者:李晓龙(1979—),男,甘肃兰州人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:13787786254@163.com

引用格式:翟明达,刘信,李晓龙,等.模糊层次分析法在高速磁浮列车磁悬浮系统综合评估中的应用[J].国防科技大学学报,2025,47(3):222-231.

Citation:ZHAI M D, LIU X, LI X L, et al. Application of fuzzy analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of suspension system in high-speed maglev train[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(3): 222-231.

超出预设阈值直接对悬浮系统性能做出评估。但是,该方法评估标准过于粗糙,只能对悬浮系统性能进行定性评估,无法量化。为实现磁浮列车悬浮系统性能的量化评估,倪菲等^[7]基于云理论以及磁浮列车的运行数据,研究了数据驱动下的控制回路性能评估方法,利用多变量控制系统特征实现了评估性能的可视化;Xu等^[8]提出了一种用于稳定性监测的实时性能指标,并将监测到的稳定性结果进行性能分级;陈琛等^[9-10]分析了随机不平顺下磁浮车辆的动力学特性,通过定义不同悬浮力条件下柔性轨道的振动固有频率和模态矩阵,提出了一种磁浮车辆垂向悬浮稳定性分析方法。上述方法虽然很好地解决了悬浮系统性能的量化评估问题,但是未形成全面完整的评估指标体系与评估标准,不能给出明确的性能评估等级,无法指导现场调试和后期维护,并且尚未实现工程应用。

模糊层次分析法能够综合考虑影响悬浮系统性能的关键因素,量化评估过程中的各种模糊信息,并合理给出表征悬浮系统性能的结果等级,全面、科学地评估悬浮系统性能。因此,针对悬浮系统运行规律和能力特点,本文提出了表征悬浮系统性能的评价指标,形成了全面完整的评估指标体系;采用指数标度法和梯形分布法建立了悬浮系统多层模糊综合评估模型,基于模糊层次分析法设计了悬浮系统综合评估方法;利用运行数据开发了高速磁浮列车悬浮系统性能综合评估系统,并利用时速 600 km 高速磁浮样车在上海 1.5 km 试验线开展了动态运行测试验证。

1 悬浮系统组成和工作原理

悬浮系统是高速磁浮列车的“轮子”,不同于传统轮轨列车依靠车轮支撑车体,高速磁浮列车通过悬浮系统来支撑整个车体。悬浮电磁铁通电后可以产生可控电磁场,悬浮电磁铁与轨道上的长定子铁芯相互吸引,方向垂直向上的电磁吸力将整个车体向上吸起从而使列车悬浮于轨道之上^[11-12]。悬浮电磁铁与轨道之间的最终悬浮间隙被控制在 10 ~ 12 mm。

高速磁浮列车悬浮系统由悬浮电磁铁、悬浮控制器以及悬浮传感器构成。悬浮传感器安装在悬浮电磁铁上,主要用于检测悬浮电磁铁与长定子轨道的间隙以及悬浮电磁铁的垂向加速度^[13-14]。悬浮控制器利用悬浮传感器的量测信息,通过内置的悬浮控制算法计算得到控制输出量,并驱动悬浮电磁铁产生悬浮力使列车稳定悬

浮。悬浮电磁铁是悬浮系统的执行机构,在控制电压的作用下产生动作,从而保证悬浮电磁铁始终工作在给定间隙^[15-17]。高速磁浮列车悬浮系统控制框图如图 1 所示。

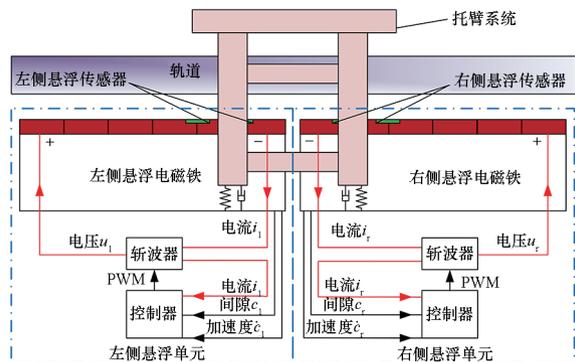


图 1 高速磁浮列车悬浮系统控制框图

Fig. 1 Control block diagram of suspension system of high-speed maglev train

2 悬浮系统的性能指标与性能评估

悬浮系统结构复杂,呈现非线性及强动态耦合特性,是一个多输入多输出、时变的不稳定系统。同时,悬浮系统运行过程中又面临轨道不平顺、线路参数时变、网络传输时延等多源复合扰动,电-磁-热-应力-流体等多场耦合效应复杂多变。悬浮系统为了能够快速跟踪线路轨道变化,始终处于动态调整状态。因此,为了保障和实现高速磁浮列车安全平稳地运行,悬浮系统必须具备良好的动态性能。具体为:

1) 具备快速跟踪线路轨道变化,保证悬浮电磁铁始终工作在给定间隙附近的能力。

2) 具备有效抑制轨道不平顺、线路参数时变、网络传输时延等多源复合扰动的不利影响,保证悬浮系统在多源复合扰动下能够快速恢复到稳定状态的能力。

3) 具备减缓悬浮电磁铁的垂向振动加速度,保证悬浮系统运行总体平稳的能力。

综上所述,为了对悬浮系统性能做出全面、科学、准确的评价,全面掌握和反映悬浮系统的运行状态,必须针对悬浮系统以上三方面能力做出综合评估,提出适合高速磁浮列车悬浮系统的评价指标体系,利用不同维度的性能指标来表征悬浮系统性能的好坏,并作为评价悬浮系统性能优劣的依据。

2.1 确定性指标

确定性指标是用来表征悬浮系统跟踪线路轨道变化,保证悬浮电磁铁工作在给定间隙能力大

小的指标。脉冲响应曲线指标和误差积分指标可以作为评价悬浮系统跟踪能力和控制精度好坏的指标^[18]。脉冲响应曲线能够直观地反映出悬浮系统跟踪参考输入能力的好坏,而误差积分指标通过计算悬浮系统期望输出与实际输出之间误差的积分来反映系统稳态时的控制精度。

脉冲响应曲线指标主要包含峰值时间以及衰减速率。脉冲响应曲线的峰值时间越小,衰减速率越快,说明悬浮系统的跟踪能力越强。误差积分指标主要有绝对误差积分(integral of absolute error, IAE)、平方误差积分(integral of squared error, ISE)、时间乘绝对误差积分(integral of time multiplied by absolute error, ITAE)、时间乘平方误差积分(integral of time multiplied by squared error, ITSE)。误差积分指标值越小,说明悬浮系统的控制精度越高。

因此,通过绘制脉冲响应曲线获得峰值时间和衰减速率,利用误差积分准则计算得到误差积分指标,能够实现对悬浮系统的跟踪能力和控制精度的评估。

2.2 随机性指标

随机性指标是用来表征悬浮系统抑制轨道不平顺、线路参数时变、网络传输时延等多源复合扰动不利影响,保证悬浮系统在多源复合扰动下快速恢复到稳定状态能力大小的指标。最小方差指标可以作为评价悬浮系统抵抗外界干扰能力的指标^[19]。

根据 Harris 对最小方差指标的定义,悬浮系统的最小方差指标如式(1)所示。

$$\eta_{\text{Harris}} = \frac{\sigma_{\text{MV}}^2}{\sigma_y^2} \tag{1}$$

式中: σ_{MV}^2 为最小方差控制器输出误差的方差,可以通过计算最小方差不变项来获得; σ_y^2 为实际悬浮控制器输出误差的方差。

由于 σ_y^2 大于 σ_{MV}^2 ,因此 η_{Harris} 的取值范围在 0 到 1 之间, η_{Harris} 越接近 1,悬浮系统的随机性指标越好,抵抗外界干扰的能力越强; η_{Harris} 越接近 0,悬浮系统的随机性指标越差,抵抗外界干扰的能力越弱。

为获得悬浮系统的最小方差指标,利用悬浮系统的输出数据建立自回归移动平均模型,采用长除法将其转化为无限阶的滑动平均模型(moving average model, MA),如式(2)所示。

$$y_t = (f_0 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{d-1} q^{-d+1} + f_d q^{-d} + \dots) a_t \tag{2}$$

式中, y_t 为悬浮系统输出, f_i 为常数项, a_t 为平均值为零的白噪声。式(2)左右两边分别乘以 $a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-d+1}$,分别取其数学期望,即可得到式(3)。

$$\begin{cases} \gamma_{ya}(0) = E[y_t a_t] = f_0 \sigma_a^2 \\ \gamma_{ya}(1) = E[y_t a_{t-1}] = f_1 \sigma_a^2 \\ \vdots \\ \gamma_{ya}(d-1) = E[y_t a_{t-d+1}] = f_{d-1} \sigma_a^2 \end{cases} \tag{3}$$

其中, σ_a^2 为白噪声序列 a_t 的方差, $\gamma_{ya}(i)$ 为 y_t 与 a_{t-i} 的协方差。因此,输出方差不变项如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \delta_{\text{MV}}^2 &= (f_0^2 + f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_{d-1}^2) \delta_a^2 \\ &= \left[\left(\frac{\gamma_{ya}(0)}{\delta_a^2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{ya}(1)}{\delta_a^2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\gamma_{ya}(d-1)}{\delta_a^2} \right)^2 \right] \delta_a^2 \\ &= \frac{[\gamma_{ya}^2(0) + \gamma_{ya}^2(1) + \dots + \gamma_{ya}^2(d-1)]}{\delta_a^2} \end{aligned} \tag{4}$$

综上,悬浮系统的最小方差指标表达式如式(5)所示,利用输入输出数据可以计算得到悬浮系统的最小方差指标。

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{MV}}^2}{\sigma_y^2} = \frac{[\gamma_{ya}^2(0) + \gamma_{ya}^2(1) + \dots + \gamma_{ya}^2(d-1)]}{\delta_a^2 \sigma_y^2} \tag{5}$$

2.3 平稳性指标

平稳性指标是用来表征悬浮系统减缓悬浮电磁铁振动加速度,保证悬浮系统运行总体平稳能力大小的指标。振动加速度的欧式距离指标可以作为评价悬浮系统平稳性的指标^[20]。

平稳性主要取决于悬浮电磁铁的振动加速度,振动加速度值越小,且振动加速度的变化率越小,振动加速度的欧式距离越小,悬浮系统的平稳性越高。

因此,通过对悬浮电磁铁的振动加速度进行特征提取,构造多维特征分布空间,对其特征进行标准化处理,根据超球体分布特点,获取振动加速度的欧式距离,可实现对悬浮系统平稳性的评估。

悬浮电磁铁振动加速度的数据特征主要有标准偏差、均方根、平均值、极差、方差,为了使针对平稳性的评估结果更可靠、准确,需要对上述特征进行标准化处理。但是,在标准化之前,有必要先明确特征分布,只有特征满足正态分布时,才能对其进行标准化。如果特征值不满足正态分布,利用 Box-Cox 将特征值的非正态分布转换为正态分布。特征数据全部转换为满足正态分布的数据后,利用 z-score 标准化方法进行标准化处理,如式(6)所示。

$$X'_k = \frac{X_k - \bar{X}_k}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_k - \bar{X}_k)^2}} \quad (6)$$

式中, X'_k 为第 k 个特征值标准化后的值, X_k 为第 k 个特征值, \bar{X}_k 为第 k 个特征平均值。

标准化后的数据特征分布在超球体中, 根据超球体分布特点, 采用到球心的欧式距离作为振动加速度的欧式距离(距离), 如式(7)所示。

$$\tau = \frac{\sum_{i=k}^N X_j^2}{N} \quad (7)$$

3 悬浮系统的性能指标与性能评估

影响高速磁浮列车悬浮系统性能的因素较多且相互耦合, 导致性能评估结果比较模糊。为了对悬浮系统性能做出全面、科学准确的评价, 全面掌握和反映悬浮系统的运行状态, 本文采用模糊层次分析法确定高速磁浮列车悬浮系统性能指标的权重, 基于指数标度法和梯形分布法建立悬浮系统多层模糊综合评估模型, 通过计算各指标的隶属度, 依据模糊理论最大隶属度法则确定高速磁浮列车悬浮系统性能等级。基于模糊层次分析法的综合评估流程图如图2所示。

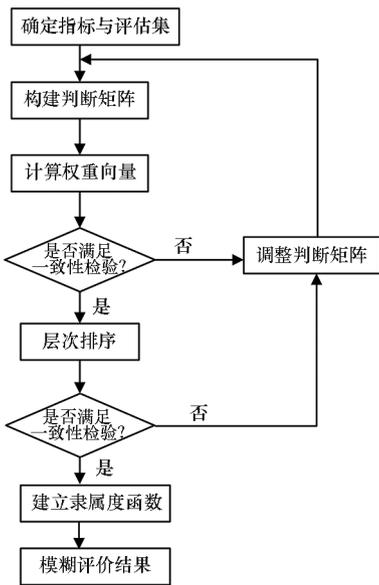


图2 基于模糊层次分析法的综合评估流程图

Fig. 2 Flow chart of comprehensive evaluation based on fuzzy analytic hierarchy process

3.1 确定评估指标与评估集

基于上文提出的高速磁浮列车悬浮系统评价指标体系, 根据层次分析法建立悬浮系统性能评估二层结构^[21-23]。其中, 第一层因素集为:

$$U = [U_1 \quad U_2 \quad U_3]$$

= [随机性指标 确定性指标 平稳性指标]

第二层因素集为:

$$U_1 = [u_{11}] = [\text{最小方差指标}]$$

$$U_2 = [u_{21} \quad u_{22} \quad u_{23} \quad u_{24} \quad u_{25} \quad u_{26}]$$

= [峰值时间 衰减速率 IAE ISE ITAE ITSE]

$$U_3 = [u_{31}] = [\text{振动加速度 } \tau \text{ 距离}]$$

评估集为 $B = \{\text{优秀, 良好, 一般, 差}\}$ 。

3.2 构建判断矩阵

根据 $u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}, u_{26}$ 对于 U_2 重要性的排序, 利用指数标度法确定指标权重^[24-26], 构建判断矩阵 R_2 , 即

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 9^{-1/9} & 9^{-3/9} & 9^{1/9} & 9^{-4/9} & 9^{-2/9} \\ 9^{1/9} & 1 & 9^{-2/9} & 9^{2/9} & 9^{-3/9} & 9^{-1/9} \\ 9^{3/9} & 9^{2/9} & 1 & 9^{4/9} & 9^{-1/9} & 9^{1/9} \\ 9^{-1/9} & 9^{-2/9} & 9^{-4/9} & 1 & 9^{-5/9} & 9^{-3/9} \\ 9^{4/9} & 9^{3/9} & 9^{1/9} & 9^{5/9} & 1 & 9^{3/9} \\ 9^{2/9} & 9^{1/9} & 9^{-1/9} & 9^{3/9} & 9^{-3/9} & 1 \end{bmatrix}$$

由于确定性指标表征悬浮系统的跟踪能力和控制精度, 随机性指标表征悬浮系统抵抗外界干扰的能力, 平稳性指标表征悬浮系统的平稳性。因此, 综合考虑 U_1, U_2, U_3 对 U 的重要性, 判断矩阵 R_1 为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 9^{-1/9} & 9^{3/9} \\ 9^{1/9} & 1 & 9^{5/9} \\ 9^{-3/9} & 9^{-5/9} & 1 \end{bmatrix}$$

将矩阵 R_1 进行归一化处理:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 9^{-1/9} & 9^{3/9} \\ 9^{1/9} & 1 & 9^{5/9} \\ 9^{-3/9} & 9^{-5/9} & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{每一行元素乘积}} \begin{bmatrix} 9^{2/9} \\ 9^{6/9} \\ 9^{-8/9} \end{bmatrix}$$

$$\xrightarrow{\text{三次方根}} \begin{bmatrix} 9^{2/27} \\ 9^{6/27} \\ 9^{-8/27} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{归一化处理}} \begin{bmatrix} 0.3536 \\ 0.4897 \\ 0.1567 \end{bmatrix}$$

通过求取 R_1 矩阵的最大特征值, 完成判断矩阵 R_1 的一致性检验, 确保构建的判断矩阵不存在逻辑问题。 U_1, U_2, U_3 对 U 的权重为:

$$\omega_1 = [0.3536 \quad 0.4897 \quad 0.1567]^T$$

矩阵 R_2 按照矩阵 R_1 方式进行归一化处理:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 9^{-1/9} & 9^{-3/9} & 9^{1/9} & 9^{-4/9} & 9^{-2/9} \\ 9^{1/9} & 1 & 9^{-2/9} & 9^{2/9} & 9^{-3/9} & 9^{-1/9} \\ 9^{3/9} & 9^{2/9} & 1 & 9^{4/9} & 9^{-1/9} & 9^{1/9} \\ 9^{-1/9} & 9^{-2/9} & 9^{-4/9} & 1 & 9^{-5/9} & 9^{-3/9} \\ 9^{4/9} & 9^{3/9} & 9^{1/9} & 9^{5/9} & 1 & 9^{3/9} \\ 9^{2/9} & 9^{1/9} & 9^{-1/9} & 9^{3/9} & 9^{-3/9} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\xrightarrow{\text{归一化处理}} \begin{bmatrix} 0.1056 \\ 0.1348 \\ 0.2196 \\ 0.0827 \\ 0.2920 \\ 0.1652 \end{bmatrix}$$

通过求取 R_2 矩阵的最大特征值,完成判断矩阵 R_2 的一致性检验, u_{21} 、 u_{22} 、 u_{23} 、 u_{24} 、 u_{25} 、 u_{26} 对 U_2 的权重为:

$$\omega_2 = [0.1056 \quad 0.1348 \quad 0.2196 \quad 0.0827 \quad 0.2920 \quad 0.1652]^T$$

3.3 建立隶属度函数

隶属度函数的建立是模糊综合评估法中至关重要的一步。确定隶属度函数的常用方法有:模糊分布法、德尔菲法、专家评分法等^[27-30]。通过对悬浮系统性能指标的分析,隶属度函数的类型属于极小型。因此选择模糊分布法,并选择梯形分布来建立高速磁浮列车悬浮系统性能评估的隶属度函数,具有计算简便、分布合理的优点。

梯形分布隶属度函数示意如图 3 所示, x 轴表示需要评判的参数值, y 轴表示参数值的隶属度,隶属度在 0 到 1 之间。

悬浮系统性能“优秀”的隶属度函数如下所示:

$$y = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (8)$$

悬浮系统性能“良好”“一般”的隶属度函数如下所示:

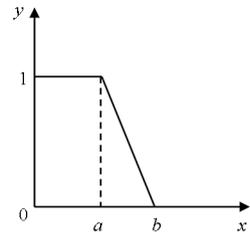
$$y = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (9)$$

悬浮系统性能“差”的隶属度函数如下所示:

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (10)$$

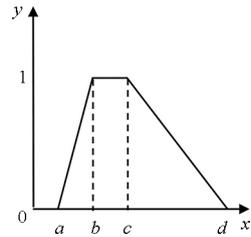
其中: y 为隶属度值, x 为各项指标值, a 、 b 、 c 、 d 为各评估指标的参考点。

为了确定各评估指标的参考点,首先,通过分析悬浮系统可用数据集,特别是与模糊评价相关



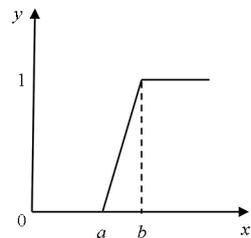
(a) “优秀”的隶属度函数

(a) Membership function of “excellent”



(b) “良好”和“一般”的隶属度函数

(b) Membership function of “good” and “average”



(c) “差”的隶属度函数

(c) Membership function of “difference”

图 3 梯形分布隶属度函数示意图

Fig.3 Schematic diagram of membership function of trapezoidal distribution

的悬浮间隙、加速度数据,观察数据的分布和特征,根据数据的范围和分布来选择拐点横坐标和斜率值。其次,结合项目组在磁浮列车悬浮系统设计、研制与调试的经验,以及磁浮运营线积累形成的专家经验,对得到参数组合进行调整和修正,最终得到如表 1 所示的各评估指标的参考点设置。

4 悬浮系统运行过程数据采集与处理

为实现基于模糊层次分析的悬浮系统综合评估,需要利用悬浮系统的输入输出数据。对于高速磁浮列车悬浮系统而言,通过车载数据采集和存储系统能够实时获取悬浮间隙、加速度、速度以及电流等运行过程数据。但是,获取的运行数据质量普遍不高,存在离群点污染严重等诸多问题,需要对数据做相应的处理,使数据满足时序分析要求。

表1 隶属度函数的参考点
Tab.1 Reference point of membership function

隶属函数	优秀	良好	一般	差
最小方差指标	$a = 0.15$ $b = 0.2$	$a = 0.15$	$a = 0.25$	$a = 0.35$ $b = 0.4$
		$b = 0.2$	$b = 0.3$	
		$c = 0.15$	$c = 0.35$	
		$d = 0.3$	$d = 0.4$	
峰值时间	$a = 1.5$ $b = 2$	$a = 1.5$	$a = 2.5$	$a = 3.5$ $b = 4$
		$b = 2$	$b = 3$	
		$c = 2.5$	$c = 3.5$	
		$d = 3$	$d = 4$	
衰减速率	$a = 0.05$ $b = 0.1$	$a = 0.05$	$a = 0.15$	$a = 0.25$ $b = 0.3$
		$b = 0.1$	$b = 0.2$	
		$c = 0.15$	$c = 0.25$	
		$d = 0.2$	$d = 0.3$	
IAE	$a = 0.5$ $b = 0.6$	$a = 0.5$	$a = 0.65$	$a = 0.8$ $b = 0.9$
		$b = 0.6$	$b = 0.7$	
		$c = 0.65$	$c = 0.75$	
		$d = 0.7$	$d = 0.8$	
ISE	$a = 0.0005$ $b = 0.0008$	$a = 0.0005$	$a = 0.0009$	$a = 0.0013$ $b = 0.0016$
		$b = 0.0008$	$b = 0.0012$	
		$c = 0.0009$	$c = 0.0013$	
		$d = 0.0012$	$d = 0.0016$	
ITAE	$a = 200$ $b = 500$	$a = 200$	$a = 600$	$a = 1000$ $b = 1300$
		$b = 500$	$b = 900$	
		$c = 600$	$c = 1000$	
		$d = 900$	$d = 1300$	
ITSE	$a = 0.3$ $b = 0.8$	$a = 0.8$	$a = 0.9$	$a = 1.5$ $b = 2$
		$b = 0.9$	$b = 1.4$	
		$c = 1.4$	$c = 1.5$	
		$d = 1.5$	$d = 2$	
振动加速度的 τ 距离	$a = 0.5$ $b = 1$	$a = 0.5$	$a = 1.5$	$a = 2.5$ $b = 3$
		$b = 1$	$b = 2$	
		$c = 1.5$	$c = 2.5$	
		$d = 2$	$d = 3$	

4.1 数据采集

一节完整的时速 600 km 高速磁浮样车在上海同济大学嘉定校区 1.5 km 高速磁浮试验线进行动态运行测试。悬浮间隙、加速度、速度以及电流等运行过程数据可以通过周立功 CAN USB-2E-U 采集卡发送到车载数据存储系统。

4.2 数据处理

采集的悬浮系统运行数据存在质量不高,离群点污染严重等诸多问题,因此,进行时间序列建

模之前,需要针对数据进行预处理,具体包括异常值处理、平滑处理、中心化处理等。

1) 异常值处理。高速磁浮线路轨道为应对温升、沉降,相邻轨道梁间留有宽度约为 86 mm 的空隙。当悬浮传感器进入接缝区域,采集到的数据为输出最大饱和值 20 mm。由于其不是真实测量值,悬浮控制系统内部也会将其作为异常值进行剔除,使用上个周期的悬浮间隙测量值来进行控制算法计算。如图 4 所示,对于分布在特定区域或限定范围之外的离群点数据,需要剔除异

常值。本文采用拉依达准则判断量测数据是否含有粗大误差,并用量测数据的平均值替代离群点数据。如图 5 所示,悬浮间隙数据经异常值处理后,原始悬浮间隙数据中出现的“尖刺”现象得以消除。

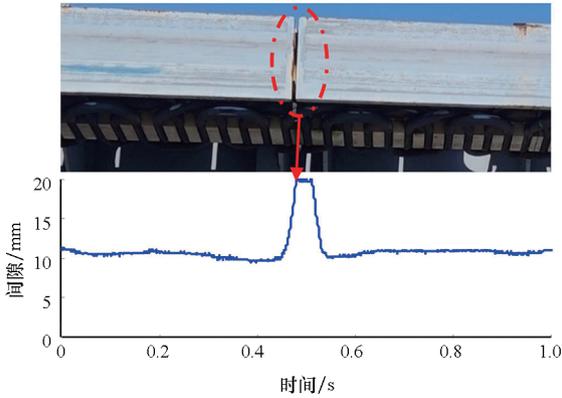


图 4 磁浮轨道接缝图

Fig. 4 Maglev track joint diagram

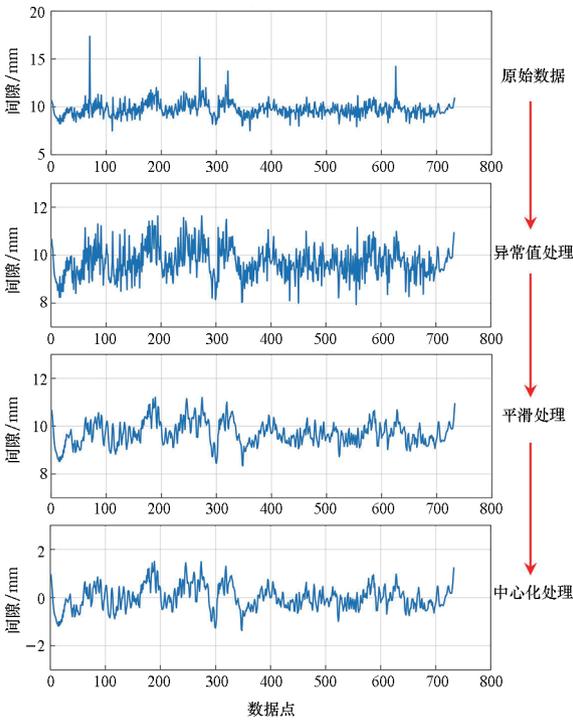


图 5 悬浮间隙的数据处理效果图

Fig. 5 Data processing effect diagram of suspension gap

2) 平滑处理。采集到的初始运行数据包含一定的噪声,直接影响拟合模型的准确性,采用移动平均法来对运行数据序列进行平滑处理,能够消除噪声的不利影响,也能减少瞬时随机波动的影响,从而更好地显示运行数据的规律特性。

3) 中心化处理。当运行数据平均值不为零时,建立的时间序列模型为非中心化模型,需要进

行中心化处理。通过对非中心化模型做一个简单的位移就可以转化为中心化模型。中心化模型将少一个参数且运算更方便。中心化运算不会影响序列值之间的相关关系,如图 6 所示,悬浮间隙数据经中心化处理后,其平均值由 9.5 变为 0,并保持了原有变化规律。

5 悬浮系统性能的模糊综合评估

为实现评估结果的可量化与可视化,本文利用采集的悬浮间隙、加速度等实际运行数据,开发高速磁浮列车悬浮系统性能评估系统。该评估系统基于确定性指标、随机性指标以及平稳性指标,采用模糊层次分析法对悬浮系统性能进行综合评估,能够直接给出高速磁浮列车悬浮系统的性能指标与性能等级,非常便于指导现场调试和后期维护。高速磁浮列车悬浮系统模糊综合评估流程图如图 6 所示。

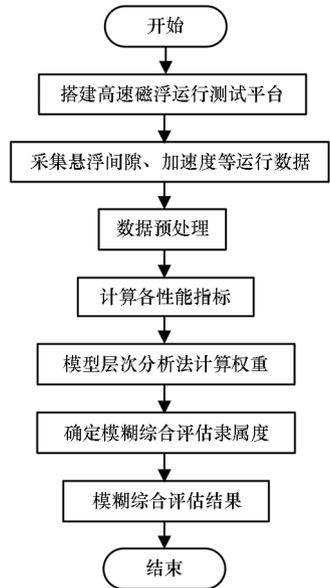


图 6 高速磁浮列车悬浮系统模糊综合评估流程图

Fig. 6 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation of suspension system of high-speed maglev train

采集时速 600 km 高速磁浮样车在上海同济大学嘉定校区 1.5 km 高速磁浮试验线在 0 ~ 60 km/h 速度区间全线路运行时的悬浮间隙、加速度数据,通过对运行数据进行处理和分析,基于运行数据计算得到高速磁浮列车悬浮系统全线路运行时的确定性指标、随机性指标以及平稳性指标,具体为:

$$U_1 = [0.839 \ 5]$$

$$U_2 = [4 \ 0.900 \ 4 \ 0.507 \ 4 \ 0.000 \ 645 \ 394.8 \ 0.557]^T$$

$$U_3 = [0.983 \ 4]$$

随机性、确定性和平稳性的评判矩阵分别为:

$$A_1 = [0.789\ 2\ 0.210\ 8\ 0\ 0]$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.007\ 7 & 0.992\ 3 & 0 & 0 \\ 0.926\ 0 & 0.074 & 0 & 0 \\ 0.516\ 2 & 0.483\ 8 & 0 & 0 \\ 0.350\ 5 & 0.649\ 5 & 0 & 0 \\ 0.485\ 9 & 0.514\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = [0.033\ 2\ 0.966\ 8\ 0\ 0]$$

对第二层进行模糊综合评判,即 $B_2 = \omega_2 \times A_2$,可得 B_2 为:

$$B_2 = [0.429\ 7\ 0.464\ 6\ 0\ 0.105\ 6]$$

再对第一层进行模糊综合评判,已知权重为 ω_1 ,且总评判矩阵为 $B = [A_1\ B_2\ A_3]^T$,最终的模糊综合评估结果 B 为:

$$B = [0.494\ 7\ 0.453\ 6\ 0\ 0.051\ 7]$$

根据最大隶属度原则,高速磁浮列车悬浮系统全线路运行时的性能评估结果为“优秀”,并且“优秀”的隶属度为 0.494 7。

基于相关 APP Designer 设计并开发的高速磁浮列车悬浮系统性能评估系统如图 7 所示,实现了评估结果的可量化与可视化。

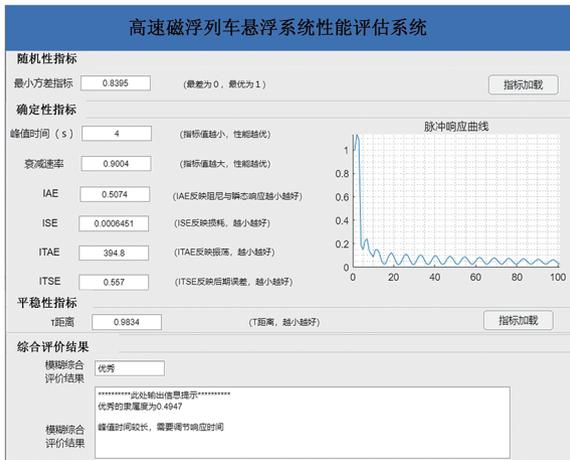


图 7 全线路的评估结果

Fig. 7 Evaluation results of the whole line

6 结论

本文设计的基于模糊层次分析的高速磁浮列车悬浮系统综合评估方法能够综合考虑影响悬浮系统性能的关键因素,量化评估过程中的各种模糊信息,并合理给出表征悬浮系统性能的结果等级,全面、科学地评估悬浮系统性能。通过在高速磁浮试验线进行动态运行测试,基于本方法得到的性能评估结果能够有效反映悬浮系统性能和运行状态,验证了方法的有效性。

1) 针对悬浮系统运行规律和能力特点,提出

了适合高速磁浮列车悬浮系统的评价指标体系,采用确定性指标、随机性指标以及平稳性指标来表征悬浮系统性能的好坏,并作为评价悬浮系统性能优劣的依据。

2) 采用模糊层次分析法确定了高速磁浮列车悬浮系统性能指标的权重,基于指数标度法和梯形分布法建立了悬浮系统多层模糊综合评估模型,通过计算各指标的隶属度,依据模糊理论最大隶属度法则确定了高速磁浮列车悬浮系统性能等级。

3) 通过采集和处理悬浮间隙、加速度等运行数据,开发了基于数据驱动的高速磁浮列车悬浮系统性能综合评估系统,并利用时速 600 km 高速磁浮样车在上海 1.5 km 试验线开展动态运行测试,验证了方法的有效性和可行性。

参考文献 (References)

- [1] 丁叁叁. 时速 600 公里高速磁浮交通系统[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
DING S S. 600 km/h high-speed maglev transportation system[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2022. (in Chinese)
- [2] LIU Z G, LONG Z Q, LI X L. Maglev trains: key underlying technologies[M]. New York: Springer, 2015.
- [3] 胡叙洪, 伍卫凡. 磁浮交通技术与发展[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021.
HU X H, WU W F. Maglev transportation technology and development[M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2021. (in Chinese)
- [4] 梁建英. 中国高速磁浮交通系统发展现状与展望[J]. 科学, 2022, 74(5): 31-36, 2, 69.
LIANG J Y. Development status and future prospects of the high-speed maglev transportation system in China [J]. Science, 2022, 74(5): 31-36, 2, 69. (in Chinese)
- [5] 王之中, 皮大伟, 刘全民, 等. 国家自然科学基金委员会交通与运载工程学科 2022 年度管理工作综述与展望[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 1-7.
WANG Z Z, PI D W, LIU Q M, et al. Management summary and prospect of transportation and vehicle engineering discipline of NSFC in 2022 [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 1-7. (in Chinese)
- [6] 国家自然科学基金委员会. 2022 年度国家自然科学基金项目指南[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
National Natural Science Foundation of China. National Natural Science Fund guide to programs 2022 [M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [7] 倪菲, 王凡鑫, 徐俊起, 等. 基于云理论的电磁悬浮系统控制回路性能评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1660-1670.

- NI F, WANG F X, XU J Q, et al. Performance evaluation of control loop for electromagnetic levitation systems based on cloud theory [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(12): 1660 – 1670. (in Chinese)
- [8] XU Y S, LONG Z Q, ZHAO Z G, et al. Real-time stability performance monitoring and evaluation of maglev trains' levitation system: a data-driven approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 1912 – 1923.
- [9] 陈琛, 徐俊起, 荣立军, 等. 轨道随机不平顺下磁浮车辆非线性动力学特性[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(4): 115 – 124.
- CHEN C, XU J Q, RONG L J, et al. Nonlinear dynamics characteristics of maglev vehicle under track random irregularities [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(4): 115 – 124. (in Chinese)
- [10] 徐俊起, 林国斌, 陈琛, 等. 负载扰动下磁浮车辆多点悬浮建模与控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 1353 – 1363.
- XU J Q, LIN G B, CHEN C, et al. Modeling and control of multi-point levitation of maglev vehicle under loading disturbance [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1353 – 1363. (in Chinese)
- [11] 杨杰, 陈昱圻, 王盼盼. 基于改进粒子群算法的列车速度跟踪自抗扰控制器设计[J]. *铁道学报*, 2021, 43(7): 40 – 46.
- YANG J, CHEN Y Q, WANG P P. Design of active disturbance rejection controller for train speed tracking based on improved particle swarm optimization [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(7): 40 – 46. (in Chinese)
- [12] 翟明达, 李晓龙, 龙志强, 等. 基于 Youla 参数化的高速磁浮列车悬浮系统控制与优化设计[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 341 – 350.
- ZHAI M D, LI X L, LONG Z Q, et al. Control and optimization design of magnetic levitation system of high-speed maglev train based on youla parameterization [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51(3): 341 – 350. (in Chinese)
- [13] HE Y X, WU J, ZHENG Y J, et al. Track defect detection for high-speed maglev trains via deep learning [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3506008.
- [14] 罗茹丹, 吴峻, 张云洲. 高速磁浮轨道长定子铁心片间短路故障的研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(4): 853 – 860.
- LUO R D, WU J, ZHANG Y Z. Research on short circuit fault between long stator core pieces of high-speed maglev track [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(4): 853 – 860. (in Chinese)
- [15] 孙友刚, 徐俊起, 贺祯宇, 等. 基于误差交叉耦合的多电磁铁悬浮系统滑模协同控制[J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(3): 558 – 565.
- SUN Y G, XU J Q, HE Z Y, et al. Sliding mode cooperative control of multi-electromagnet suspension system based on error cross coupling [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(3): 558 – 565. (in Chinese)
- [16] SUN Y G, XU J Q, LIN G B, et al. RBF neural network-based supervisor control for maglev vehicles on an elastic track with network time delay [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(1): 509 – 519.
- [17] SUN Y G, XU J Q, WU H, et al. Deep learning based semi-supervised control for vertical security of maglev vehicle with guaranteed bounded airgap [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(7): 4431 – 4442.
- [18] 丁菁芳. 磁浮列车悬浮控制系统性能评价方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- DING J F. Research on performance evaluation method of levitation control system for maglev train [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 辛悦爽. 控制系统的最小方差性能评价方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- XIN Y Y. Research on minimum variance performance assessment method of control system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020. (in Chinese)
- [20] WANG P, LONG Z Q, XU Y S. Component-level fault detection for suspension system of maglev trains based on autocorrelation length and stable kernel representation [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 7594 – 7604.
- [21] 贺德强, 柳国强, 陈彦君, 等. 基于正态云模型和模糊层次分析法的列车通信网络性能评估方法[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(2): 310 – 320.
- HE D Q, LIU G Q, CHEN Y J, et al. Evaluation method of train communication network performance based on normal cloud model and fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(2): 310 – 320. (in Chinese)
- [22] 李鹏, 党伟, 李桃, 等. 基于模糊层次分析法的系统加速验证试验设计[J]. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(1): 121 – 129.
- LI P, DANG W, LI T, et al. System-level accelerated reliability demonstration testing design based on fuzzy logic and AHP [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 38(1): 121 – 129. (in Chinese)
- [23] 薛彦卓, 周莹, 鲁阳, 等. 基于模糊 AHP-DEMATEL 的北极冰区船舶冰困风险评价[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(7): 944 – 949, 992.
- XUE Y Z, ZHOU Y, LU Y, et al. Risk assessment of ships stuck in ice in Arctic ice area based on fuzzy AHP-DEMATEL [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(7): 944 – 949, 992. (in Chinese)

- [24] SAKHARDANDE M J, PRABHU GAONKAR R S. On solving large data matrix problems in Fuzzy AHP[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 194: 116488.
- [25] ZHANG B W, LI C C, DONG Y C, et al. A comparative study between analytic hierarchy process and its fuzzy variants: a perspective based on two linguistic models[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(11): 3270–3279.
- [26] QENDRAJ D H, XHAFAJ E, THANASI T. A hybridized approach of PLS-SEM and fuzzy Z-AHP to evaluate the UTAUT2 model for an LMS[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2022, 43(1): 657–669.
- [27] WANG Z J. A representable uninorm-based intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(10): 2555–2569.
- [28] CHEN X F, FANG Y T, CHAI J Y, et al. Does intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process work better than analytic hierarchy process? [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2022, 24(2): 909–924.
- [29] LIU Y, ECKERT C M, EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 161: 113738.
- [30] ZHANG P D, LIU Q, KANG B Y. An improved OWA-fuzzy AHP decision model for multi-attribute decision making problem[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 40(5): 9655–9668.