

基于安全裕度与信息熵的轮轨系统状态评价方法

周素霞^{1,2} 张书闻^{1*}

1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 北京 100044

2. 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室(北京建筑大学), 北京 100044

摘要: 针对轮轨系统多项动力学响应量纲不同、综合状态难以统一表征的问题, 提出一种基于安全裕度与信息熵的状态评价方法。依据轮轨系统输入—响应关系, 将列车运行速度、轨道不平顺和侧风速度作为工况输入, 将脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力作为状态响应; 以安全评价限值构造无量纲风险比, 并据此定义综合风险指数和安全裕度, 再利用标准化信息熵描述各指标风险贡献的分布特征。数值试验表明, 状态响应同步增加时, 综合风险指数随整体风险水平上升而增大, 信息熵保持稳定; 单项指标接近或超过限值时, 综合风险指数上升, 风险贡献向该指标集中, 信息熵相应降低。该方法能够同时保留单项指标的工程含义和多指标综合信息, 可为轮轨系统状态比较与风险识别提供参考。

关键词: 轮轨系统; 安全裕度; 信息熵; 状态评价; 动力学响应

DOI: 10.64649/yh.shfzykjc.issn3078-8994.202609038

0 引言

高速列车轮轨系统长期受运行速度、轨道不平顺、轮轨接触状态及外部环境等因素共同作用, 脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力等安全指标随工况呈关联变化。由于各指标量纲和变化范围不同, 单项比较难以反映多项响应共同变化下的整体状态。

现有研究主要集中于车辆—轨道耦合动力学、轮轨磨损、轨道不平顺影响及运行安全评价, 并形成了较成熟的单项指标评价体系。为在保留单项安全判据的基础上统一比较多项动力学响应, 可引入信息熵补充描述多指标风险贡献的分布结构。

轮轨系统与车辆、轨道及外部环境持续交换能量和信息, 并受检修、维护与运行控制调节, 具有开放性、非平衡性和涨落性。基于此, 将安全限值与信息熵结合, 分别表征风险水平与风险贡献结构。

据此, 建立基于安全裕度与信息熵的轮轨系统状态评价方法, 并通过无量纲数值试验分析各评价量的响应规律。

1 耗散结构与信息熵基础

1.1 耗散结构理论

耗散结构理论认为, 开放系统在远离平衡态条件下, 通过与外界持续交换物质、能量和信息, 可在内部涨落作用下形成新的有序结构, 其基本条件包括开放性、非平衡性和涨落性。轮轨系统持续受到动力输入、轨道激励、环境扰动及维护调节, 具备相应特征。

耗散结构理论用于解释轮轨系统状态演化的系统性特征, 具体安全状态仍需结合动力学指标及其评价限值判断。

1.2 信息熵理论

熵最初来源于热力学, 用于表征系统无序程度。信息论中的信息熵可用于衡量系统状态不确定性。申农提出的信息熵表达式为:

$$H(x) = -k \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

式(1)中: $H(x)$ 为随机变量 x 的信息熵; k 为正常数; x_i 为第 i 种可能状态; $p(x_i)$ 为其发生概率; n 为状态数。

信息熵用于描述各动力学指标风险贡献的分布, 而不直接作为安全判据。熵值较大表示各指标贡献较为接近, 熵值较小表示风险更多集中于少数指标。

2 轮轨系统的耗散结构特征分析

2.1 开放性

列车运行过程中, 车辆、轨道及外部环境之间持续发生动力、能量和信息交换, 状态监测、线路维护和车辆检修又形成外部调节, 因此轮轨系统具有开放性。

从系统熵变角度看, 轮轨系统总熵变可表示为:

$$dS = d_e S + d_i S \quad (2)$$

式(2)中: dS 为系统总熵变; $d_e S$ 为系统与外界的熵交换量; $d_i S$ 为系统内部不可逆过程产生的熵变。开放系统的熵变关系见图1。

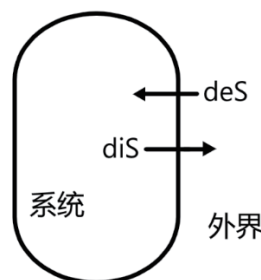


图1 开放系统的熵变

轮轨磨损、冲击振动和接触疲劳会增加系统无序程度，维护、检修和状态监测则可抑制不利状态的累积，体现出轮轨系统的开放性。

2.2 非平衡性

高速列车轮轨系统由车辆、轮轨接触和轨道等多个子系统构成，各部分动力响应及变化规律存在差异，运行过程中难以保持静态平衡。轨道不平顺、轮轨冲击、磨损及气动扰动等因素持续作用于系统，使轮轨动力响应随运行条件不断变化。因此，轮轨系统长期处于动态非

平衡状态，具有明显的非平衡性特征。

2.3 涨落性

涨落性主要表现为局部扰动在耦合作用下传播并放大。轨道波磨、不平顺及轮轨状态变化可引起冲击振动，并进一步影响轮轨接触和车辆运行状态；脱轨系数、轮轴横向力和轮重减载率等指标也会随工况变化发生波动。车辆、构架、轮对和轨道通过悬挂系统及轮轨接触形成动力耦合关系，如图 2 所示。

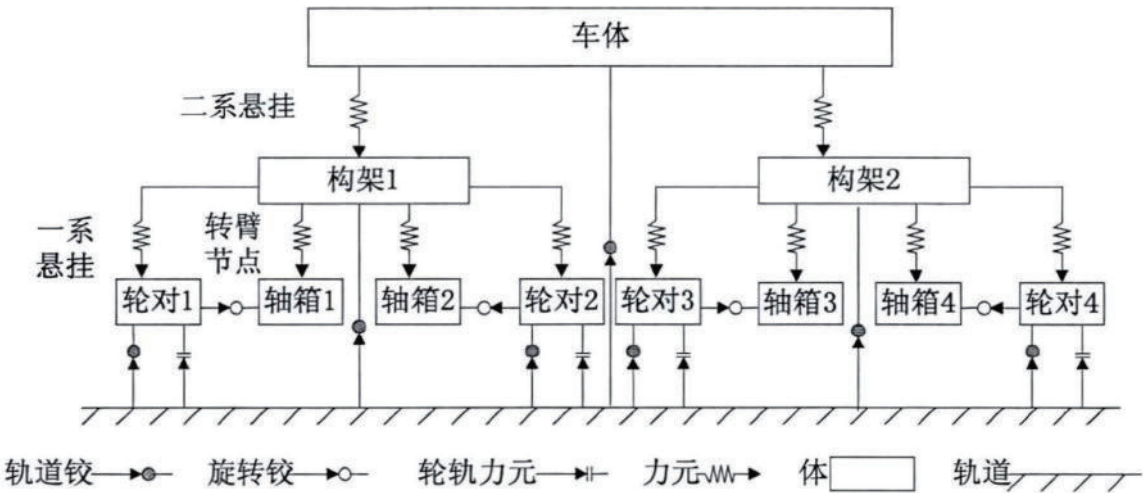


图 2 列车模型构造拓扑图

外部激励或局部状态变化可沿耦合链路传递并形成系统级响应，体现出轮轨系统的涨落性。

3 工况输入与状态响应指标

3.1 状态参数分类原则

按照轮轨系统输入—响应关系，将参数分为工况输入和状态响应两类。列车运行速度、轨道不平顺和侧风速度用于描述运行条件与外部激励；脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力

作为综合评价的状态响应指标。

3.2 状态参数集合构建

设轮轨系统状态参数集合为：

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (3)$

式(3)中：C 为轮轨系统状态参数集合； c_i 为第 i 个状态参数；n 为状态参数数量。结合高速列车轮轨动力学特征，选取列车运行速度、轨道不平顺和侧风速度作为工况输入，选取脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力作为状态响应，共同构成轮轨系统状态参数集合，如表 1 所示

表 1 轮轨系统状态参数集合

参数类别	参数名称	符号	参数含义
工况输入变量	列车运行速度	v	表征车辆运行工况
工况输入变量	轨道不平顺	A	表征轨道激励条件
工况输入变量	侧风速度	V _w	表征外部环境扰动
状态响应指标	脱轨系数	Q/P	表征脱轨安全状态
状态响应指标	轮重减载率	$\Delta P/\bar{P}$	表征轮重变化程度
状态响应指标	轮轴横向力	H	表征横向动力作用

3.3 基于安全限值无量纲化处理

脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力的量纲及数值范围不同。为统一比较尺度，以各指标对应的安全评价限值为基准进行无量纲化。列车速度、轨道不平顺和侧风速度仅作为工况输入，不参与风险比计算。

对第 i 个状态响应指标，定义无量纲风险

比为： $r_i = \frac{x_i}{L_i} \quad (4)$

式(4)中： r_i 为第 i 个状态响应指标的风险比； x_i 为按相应评价标准取得的非负评价特征值（如最大值或最大绝对值）。 L_i 为对应的安全评价限值。 $r_i < 1$ 、 $r_i = 1$ 和 $r_i > 1$ 分别表示未达到、达到和超过限值。以安全限值无量纲化，可统一

不同动力学指标的比较尺度。

4 基于安全裕度与信息熵的状态评价方法

状态评价从单项限值、整体风险和风险分布三个层面展开。单项风险比用于判断指标是否接近或超过评价限值；综合风险指数和安全裕度反映多项响应的整体水平；信息熵描述各指标风险贡献的分布结构。

4.1 综合风险指数与安全裕度

根据式(4)，各状态响应指标经安全限值无量纲化后得到风险比 r_i 。对于某一运行工况，状态响应指标的无量纲结果可表示为

$$r=\{r_1, r_2, \dots, r_n\} \quad (5)$$

式(5)中： r 为无量纲状态响应集合； r_i 为第 i 个状态响应指标的风险比。为反映各动力学响应整体接近安全评价限值的程度，定义综合风险指数 R ：

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (6)$$

R 越大，说明多项动力学响应整体越接近评价限值。数值试验采用等权处理，以减少主观赋权对方法特性分析的影响，但不表示各指标工程重要性相同。在 R 基础上定义安全裕度 M ：

$$M=1-R \quad (7)$$

M 越大，表示整体状态距离评价边界越远； M 减小时，说明多项响应总体向评价边界靠近。任一 $r_i \geq 1$ 时，应优先依据该指标的评价标准进行判断，避免平均结果掩盖单项超限。

4.2 状态信息熵

仅用综合风险指数难以区分风险由单项指标主导还是由多项指标共同形成，因此引入信息熵描述风险贡献结构。第 i 个状态响应指标的相对风险贡献定义为：

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (8)$$

式(8)中： p_i 为第 i 个指标的相对风险贡献，且各 p_i 之和为1。

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (9)$$

在此基础上，采用标准化 Shannon 信息熵计算状态信息熵 H ：

$$H = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (10)$$

式(10)中： H 为状态信息熵； n 为状态响应指标数量。当 $p_i=0$ 时取 $p_i \ln p_i=0$ ，标准化后 $H \in [0,1]$ 。 H 较大表示各指标风险贡献较为接近； H 较小表示风险集中于某一项或少数指标。

因此，安全程度主要由单项风险比、综合风险指数和安全裕度反映，信息熵仅用于补充描述风险贡献结构。

4.3 轮轨系统状态综合评价

评价时先判断各 r_i 与1的关系；各单项指标未超限时，再比较 R 与 M 的变化；最后结合 H 判断风险贡献是分散还是集中。

该组合评价不预设固定的状态熵等级，而是结合单项指标限值、综合风险指数、安全裕度和信息熵进行状态分析。

5 数值试验与结果分析

为检验各评价量的计算特性，以无量纲风险比设置两组数值试验：一组考察3项状态响应同步变化时 R 、 M 和 H 的变化；另一组固定两项风险比，仅改变单项指标。试验参数依据风险比定义设置，仅用于验证评价量之间的计算关系，不代表具体车型、线路实测数据或动力学仿真结果。

5.1 数值试验设计

脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力经安全限值无量纲化后分别记为 r_1 、 r_2 和 r_3 。 $r_i < 1$ 、 $=1$ 和 >1 分别表示未达到、达到和超过相应评价限值。第一组令 $r_1=r_2=r_3$ ，并在 $0 < r \leq 1$ 范围内按0.20递增；第二组固定 $r_2=0.40$ 、 $r_3=0.30$ ，仅改变 r_1 ，并围绕 $r_1=1$ 设置试验点。

5.2 数值试验结果分析

5.2.1 状态响应同步变化

首先令3项状态响应具有相同的风险比，即

$$r_1=r_2=r_3=r \quad (11)$$

在 $0 < r \leq 1$ 范围内分别取 $r=0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00$ ，该组取值覆盖3项响应由评价限值20%增至100%的过程。计算结果见表2。

表2 状态响应同步变化时的评价结果

r_1	r_2	r_3	R	M	H
0.20	0.20	0.20	0.200	0.800	1.000
0.40	0.40	0.40	0.400	0.600	1.000
0.60	0.60	0.60	0.600	0.400	1.000
0.80	0.80	0.80	0.800	0.200	1.000
1.00	1.00	1.00	1.000	0.000	1.000

由表2可见，3项风险比同步由0.20增至1.00时， R 由0.200增至1.000， M 由0.800降至0，整体状态逐渐接近评价边界。由于各风险比始终保持相同比例，其相对风险贡献不变， H 始终为1.000。说明 R 主要反映风险总体水平， H 反映各指标之间的风险贡献结构。

5.2.2 单项指标跨越评价限值

实际运行中各动力学响应并不一定同步变化。固定 $r_2=0.40$ 、 $r_3=0.30$ ，仅改变 r_1 。并以 $r_1=1$ 为评价边界，分别取 $r_1=0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20$ ，计算结果见表3。

表 3 单项风险比达到及超过评价限值时的评价结果

r_1	r_2	r_3	R	M	H	单项指标情况
0.80	0.40	0.30	0.500	0.500	0.919	未达到限值
0.90	0.40	0.30	0.533	0.467	0.896	未达到限值
1.00	0.40	0.30	0.567	0.433	0.873	达到限值
1.10	0.40	0.30	0.600	0.400	0.850	超过限值
1.20	0.40	0.30	0.633	0.367	0.828	超过限值

表 3 显示, r_1 由 0.80 增至 1.20 时, R 由 0.500 增至 0.633, M 由 0.500 降至 0.367, 整体风险水平随单项响应增加而上升。当 $r_1=1.00$ 时, 该指标达到评价限值; $r_1>1.00$ 时已超过限值。此时 R 仍小于 1, 说明综合风险指数不能替代单项安全判定。随着 r_1 增大, H 由 0.919 降至 0.828, 表明风险贡献逐渐向该指标集中。

6 结论

基于轮轨系统输入—响应关系, 构建了安全限值、综合风险和熵相结合的状态评价方法, 主要结论如下:

参考文献:

[1] 翟婉明. 铁道机车车辆—轨道耦合动力学理论及工程应用 [C]// 中国力学学会. 庆祝中国力学学会成立 50 周年暨中国力学学会学术大会论文摘要集 (上). 成都: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 2007: 90.

[2] 金学松, 温泽峰, 张卫华, 等. 世界铁路发展状况及其关键力学问题 [J]. 工程力学, 2004, 21(增刊 1): 90-104.

[3] 翟婉明, 姚力, 孙立, 等. 基于车辆—轨道耦合动力学的 400 km/h 高速铁路线路平面参数设计研究 [J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 1-10, 16.

[4] 李琛悦. 重载铁路轨道不平顺影响分析及动态管理值优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.

[5] 孙丽霞, 胡晓依, 朱亮, 等. 400 km/h 速度等级高速列车服役安全性研究现状及展望 [J]. 中国铁路, 2025(6): 15-25.

[6] 傅彩慧. 强风沙环境下不同线路类型对高速列车运行安全性影响 [D]. 大连: 大连交通大学, 2025.

[7] 孙丽霞, 朱亮, 吴宁, 等. 轮轨接触条件对风载作用下高速列车运行安全性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2025, 56(3): 1210-1222.

作者简介: 周素霞 (1971—), 女, 汉族, 河南鹤壁人, 博士, 教授, 研究方向: 车辆结构疲劳强度与可靠性研究等。

通讯作者: 张书闻 (2002—), 女, 汉族, 天津人, 硕士研究生, 研究方向: 信息管理。

(1) 将列车速度、轨道不平顺和侧风速度作为工况输入, 将脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力作为状态响应, 并利用安全评价限值构造无量纲风险比, 实现不同量纲动力学指标的统一比较。

(2) 综合风险指数 R 与安全裕度 M 用于描述多项状态响应整体接近评价边界的程度, 标准化信息熵 H 用于描述各指标风险贡献的分布。风险水平与风险结构分开表征后, 各评价量的物理含义更加明确。

(3) 数值试验表明, 3 项风险比同步增加时, R 增大、M 减小而 H 保持不变; 单项风险比增加时, R 增大且 H 下降, 说明风险逐渐向该指标集中。

(4) 综合评价不能替代单项安全判定。任一 $r_i \geq 1$ 时, 应优先依据相应安全限值判断; 各指标均未超限时, 再结合 R、M 和 H 比较整体状态及风险结构。

后续可结合车辆动力学仿真或线路监测数据, 对所提出方法的工程适用性进行进一步检验。