

# 急动度在列车运行安全平稳性评价中的应用及其对现有评价指标的补充价值

## I. 引言：列车动力学背景下的急动度认知

### A. 急动度 (Jerk) 的定义与物理意义

急动度，亦称为加加速度，在物理学中定义为加速度随时间的变化率<sup>1</sup>。从运动学角度看，急动度是位移对时间的叁阶导数、速度对时间的二阶导数，以及加速度对时间的一阶导数。其数学表达式为：

$$\vec{j} = \frac{d\vec{a}}{dt} = \frac{d^2\vec{v}}{dt^2} = \frac{d^3\vec{r}}{dt^3}$$

其中， $\vec{j}$  代表急动度向量， $\vec{a}$  代表加速度向量， $\vec{v}$  代表速度向量， $\vec{r}$  代表位移向量， $t$  代表时间<sup>1</sup>。急动度是一个矢量，这意味着其方向与大小同等重要。国际单位制中，急动度的单位是米每秒叁次方 ( $\text{m/s}^3$  或  $\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$ )，通常用符号“j”表示<sup>1</sup>。

急动度的矢量特性提示，在列车动力学分析中，必须关注其叁个主要分量：纵向急动度（与列车牵引、制动相关），横向急动度（与列车通过曲线、蛇行运动相关），以及垂向急动度（与轨道不平顺引起的颠簸相关）。这叁个分量各自对乘客的舒适感受以及车辆部件的受力状态产生不同的影响，因此，对急动度的评估不能简单地简化为一个标量值，而应进行多维度的考量。尽管在基础物理学问题中，相对于速度和加速度，急动度的应用频率较低，这可能是因为理想化模型中加速度的变化通常被简化或忽略。然而，在工程实践，特别是交通运输工具的设计与运行评估中，急动度扮演着至关重要的角色<sup>1</sup>。这反映了从理想物理模型向量化现实复杂工况的转变，在这些工况中，运动变化的“品质”（即平顺性）及其对人与物质系统造成的影响，成为不可忽视的核心议题。

### B. 急动度与列车性能的关联性概述

急动度是衡量列车运行品质，特别是乘客舒适性的一个关键参数。普遍的认知是，较低的急动度值通常对应着更为舒适的乘坐体验<sup>2</sup>。相反，过高的急动度会导致乘客明显的不适感<sup>1</sup>。因此，在各类交通工具（如电梯、汽车及列车）的设计阶段，工程师便会将急动度的控制纳入考量，以期提升乘坐品质。

除了对乘客舒适度的直接影响，急动度也被认为与材料的疲劳损伤相关。有观点将急动度描述为一种“柔性碰撞”（柔性碰撞），这种快速变化的力作用能够引发材料的疲劳累积<sup>1</sup>。这一特性表明，急动度的影响范畴超越了乘客的主观感受，延伸至列车结构部件的耐久性和可靠性。急动度对乘客舒适度和材料疲劳的双重影响，暗示了控制急动度可能带来的协同效益：一方面为乘客提供更为平顺的旅程，另一方面则可能延长车辆部件和轨道结构的使用寿命，或减少其维护需求。若单一参数（急动度）能同时优化这两个方面，那么针对急动度的设计与运营策略将极具效率。所谓“柔性碰撞”的概念进一步揭示，即使作用力的峰值（与加速度相关）在许用范围内，但力作用速率的快速变化（即高急动度）也可能诱发额外的磨损和损伤。这与单纯基于加速度的评估体系形成了重要区别，后者可能忽略了这种由力值变化速率引发的关键应力因素。

## II. 现行列车运行评价体系：基于加速度的框架

### A. 基于加速度的关键安全与平稳性指标

目前，中国铁路系统对车辆运行平稳性的评价，主要依据车体振动加速度（包括垂向振动加速度  $a_v$  和横向振动加速度  $a_l$ ）以及斯佩林（Sperling）平稳性指标  $W^3$ 。斯佩林指标本身便是一个综合了加速度  $a$  和振动频率  $f$  的复合指标，其计算公式通常表示为

$W = 0.896 \times \sqrt[10]{\frac{a^3}{f}} \cdot F(f)$ （其中  $a$  的单位为  $\text{cm/s}^2$ ）或类似形式，如

$W = 3.57 \sqrt[10]{f A^3 F(f)}$ （其中  $A$  的单位为  $\text{m/s}^2$ ）<sup>3</sup>。 $F(f)$  为频率修正系数。为了确保运行平稳性达到“良好”及以上等级，规范通常对车体横向和垂向加速度的限值做出规定，例如要求其小于  $2.5 \text{ m/s}^2$ <sup>4</sup>。此外，乘客舒适度也通过设定舒适度等级进行评估，如要求满足2级及以上的舒适度标准<sup>4</sup>。

对现有基于加速度的运行品质评价指标进行梳理，有助于理解急动度指标的补充价值。下表1概述了部分主流的评价指标。

表1: 现有基于加速度的运行品质评价指标概览

| 指标名称                           | 关键测量/计算参数                                      | 主要关注点       | 典型阈值/解读  | 依据/标准来源举例              |
|--------------------------------|--|-------------|--|------------------------|
| 斯佩林 (Sperling) 平稳性指标           | 车体振动加速度幅值、振动频率、频率修正系数 $F(f)$                   | 乘客舒适度、运行平稳性 | $W < 2.5$ (优); $2.5 \leq W < 2.75$ (良) <sup>4</sup>                  | 中国铁道行业标准 (TB/T) 等      |
| ISO 2631 频率计权加速度均方根值 (RMS)     | 叁向加速度 (纵向、横向、垂向)、频率计权函数                        | 乘客舒适度、健康风险  | 根据暴露时间、方向和频率有不同限值  | ISO 2631-1, ISO 2631-4 |
| 中国国家标准车体垂向/横向加速度限值             | 车体特定位置的垂向 ( $a_v$ ) 和横向 ( $a_l$ ) 振动加速度峰值或RMS值 | 运行平稳性       | 例如:<br>$a_v, a_l < 2.5 \text{ m/s}^2$<br>(平稳性满足良好及以上评级) <sup>4</sup> | 《高速动车组整车试验规范》等         |
| 车辆振动舒适度 (Vibration Comfort) N值 | 综合振动评价得到的舒适度值 N                                | 乘坐舒适感       | $N < 1.5$ (1级 非常舒适); $1.5 \leq N < 2.5$ (2级 舒适) <sup>4</sup>         | 相关行业标准或规范              |

这些指标，无论是采用频率计权的加速度（如斯佩林指数）还是直接的峰值加速度限值，都表明业界早已认识到振动的幅值和频率特性对评价运行品质的重要性。然而，这些指标主要描述的是振动的“状态”或力的“峰值”，并未直接刻画从一种运动状态平顺过渡到另一种状态的“过程”特征。例如，即使列车在两种不同速度下的稳态振动加速度均在限值内，但如果两者之间的过渡非常突兀，这种由高急动度表征的急剧变化本身就可能引起不适或对结构产生冲击。当前评价体系中存在多种指标（如斯佩林指数、直接加速度限值、舒适度等级等<sup>3</sup>）并行使用的现象，也从一个侧面反映出单一的加速度参数往往难以全面表征复杂的运行品质，业界一直在寻求一个多维度、更完善的评价工具集。急动度作为描述运动变化平顺性的物理量，有望为这一工具集提供有益的补充。

## B. 现有以加速度为核心的评价指标的优势与局限性

以加速度为核心的评价指标体系具有其固有优势。首先，加速度易于通过传感器直接测量，且根据牛顿第二定律，加速度与乘客及列车各部件所承受的惯性力直接相关<sup>5</sup>。其次，基于加速度的评价方法，如斯佩林指数<sup>3</sup>和国际标准ISO 2631系列（尽管ISO 2631在其部分文档中也提及了急动度，但其核心仍是基于加速度的评估<sup>6</sup>），已得到广泛应用和认可，形成了较为成熟的标准和规范体系。

然而，这些加速度中心论的指标也存在局限性。它们可能无法完全捕捉到与加速度剧烈变化相关的“平顺感”或“冲击感”等主观乘坐体验。有研究明确指出，不适感不仅来源于加速度本身，也与急动度密切相关<sup>1</sup>。这意味着，即便列车的加速度水平控制在可接受的规范范围之内，但在列车启动、制动、进出曲线等过渡阶段如果产生较高的急动度，仍可能导致乘客不满或加剧部件的磨损。斯佩林指数相对于简单的车体质心加速度，通过引入频率影响，在评估长时间运行对乘客的影响方面有所改进<sup>3</sup>，这本身就代表了加速度评价体系为更准确地捕捉细微差别而进行的演进。这种从简单峰值加速度向频率计权复合指标的演进趋势，表明业界持续致力于提升物理测量与人体感知及动态效应之间的关联度。引入急动度指标，可以视为这一演进趋势的自然延伸，它能够捕捉到运动特性中另一个对感知和力学行为均有重要影响的维度。

特别是在非稳态运行工况下，如列车制动、加速或曲线通过等，加速度中心论指标的局限性尤为突出。在制动工况下，“各部件的振动加强，轮轨间的接触状态和磨耗也更加复杂”<sup>8</sup>。尽管该文献未直接点名急动度，但这些恰恰是急动度可能较高的场景。加速度指标在表征稳态或准稳态振动时表现良好，但在这些涉及加速度快速变化的暂态事件中，急动度能提供对这类动态事件“剧烈程度”的量化描述，而这可能是现有加速度指标仅能通过瞬时峰值间接反映的。

### III. 急动度在列车运行安全评价中的应用

#### A. 急动度作为突发动态变化与潜在失稳指示器

尽管现有研究资料中并未直接将急动度与列车脱轨等重大安全事故建立明确的因果联系，但高急动度意味着作用力的快速变化。这种快速的力学状态改变，可能对悬挂系统部件造成瞬时过载，影响轮轨接触的动态特性，或导致货物窜动，从而间接对运行安全构成威胁。在讨论安全问题时提及的“急制动措施”<sup>9</sup>，其本身就蕴含着高急动度的特征。同时，对于安全评估，也存在引入“更多的判断准则”的需求<sup>9</sup>。

特别是在列车进出曲线或通过轨道几何形位不良区段时，若产生较高的横向急动度，即便峰值横向加速度在短时间内仍处于限值内，也可能成为挑战车辆稳定性的早期预警信号。突然的横向摇晃（高横向急动度）会引起车辆质心的快速偏移或轮轨作用力的瞬时激增。尽管由此产生的加速度作用时间可能很短，但其变化的急剧性，相比于以较缓和方式施加的同等峰值加速度，可能更具失稳风险。这与车辆及其悬挂系统的动态响应时间密切相关。



在紧急制动<sup>9</sup>或遭遇突发轨道缺陷等极端情况下，急动度能够量化事件的“冲击”程度。虽然现有的安全系统主要着眼于控制加速度的大小，但在可控的紧急操作中，若能同时最小化急动度，则可以通过降低因突然冲击导致的乘客跌倒或二次伤害风险，从而提升整体的乘客安全水平。加速度值与伤亡概率之间存在关联<sup>5</sup>，而急动度可以通过考量加速度作用的起始速率，对此关联性进行更精细化的补充。

## B. 急动度控制对降低风险的贡献（例如，紧急制动、通过过渡段）

控制急动度意味着确保加速度的过渡更为平滑。这对于在关键操纵过程中维持列车稳定性至关重要。例如，在自动驾驶系统中（可类比于列车的自动运行系统ATO），急动度被用作评估和优化控制模型的参数之一<sup>2</sup>。若平均急动度超过预设阈值，则会对控制模型进行调整。这表明，主动的急动度控制能够促使列车形成更安全的运行廓形。

将急动度控制策略融入列车的牵引与制动系统，尤其是在自动或半自动运行模式下，有助于在突发事件中实现“更安全的失效响应”（fail-safer）。例如，紧急制动程序的设计不仅应限制最大减速度，还应限制最大急动度。当前紧急制动系统设计的首要目标通常是缩短制动距离。然而，正如自动驾驶车辆研究中对急动度的关注所提示的<sup>2</sup>，控制系统可以针对急动度进行优化。一个限制了急动度的紧急制动曲线，在某些情况下可能会略微增加制动距离，但却可能显著提高乘客在车厢内的稳定性，减少因剧烈冲击造成的二次事故（如乘客摔倒、行李危险移位等）的风险。这代表了一种更为精细和人性化的安全理念。

此外，在列车通过过渡区域（如从直线段进入曲线、或通过道岔咽喉区）时，实施急动度控制能够减小施加于轮对和轨道部件上的瞬时载荷变化率。虽然有研究关注制动等工况下的轮轨作用力及磨损问题<sup>8</sup>，但通过降低急动度来使这些载荷过渡更为平缓，可以减小载荷的“冲击”特性，从而可能降低关键部件发生突发性损坏或在关键区段轨道加速劣化（例如，钢轨波磨或接头病害）的风险。高急动度意味着力的施加方式非常迅速，这种快速变化可能激起部件更高频率的振动，或导致类似冲击的应力状态，这些通常比平缓施加的载荷更具破坏性。通过平滑这些过渡，急动度控制有望减轻此类动态冲击的剧烈程度，从而增强安全关键部件的结构完整性。

## IV. 急动度在列车运行平稳性与乘客舒适度评估中的应用

### A. 急动度对乘客感知与乘坐品质的直接影响

急动度被明确认为是量化舒适度的指标之一，较低的急动度意味着较高的舒适感<sup>2</sup>。乘客对加速度的变化非常敏感；即使峰值加速度水平相近，平缓的变化也远比突然的冲击更易于接受。不适感来源于加速度和急动度两个方面<sup>1</sup>。

文献明确指出：“Jerk(急动)作为量化舒适度的一个指标，是指加速度对时间的变化率，即加速度，急动指数越低，舒适感越强。”<sup>2</sup>。这直接阐明了急动度在舒适度评价中的核心作用。另一项研究也重申了在自动化系统中，较低的急动度与更优的乘坐感受相关联<sup>2</sup>。更有定性的描述指出：“较大的急动度会使人体产生相当的不适感，例如在电梯升降、汽车、火车等加速和转弯的过程中。”<sup>1</sup>。

乘客对平顺性的感知，在列车启动、制动、曲线过渡、通过道岔等离散事件中，可能对急动度更为敏感，而非在匀速巡航阶段。这意味着急动度的评价或许应与特定事件触发相关联，或者在这些暂态操纵过程中赋予更高的权重。在匀速巡航时，理想情况下加速度水平（及其变化率，即急动度）都应较低。正是在从一种运行状态转变为另一种状态的过程中，急动度的影响才凸显出来。一列车可能在巡航时振动极小（低加速度），但若其启动或制动时发生剧烈顿挫（高急动度），乘客对整体平顺性的评价依然会很差。不同类型的乘客（如站立乘客与就座乘客、老年乘客、或正在进行阅读等活动的乘客）对急动度的敏感性可能存在差异。尽管现有资料未详述此点，但这在舒适度研究中是一个已知因素。国际标准ISO 2631-4也提及，“乘客评价乘坐舒适度不仅基于运动本身，还基于他们对所购服务等级的期望……以及乘客期望在车上进行的活动类型”<sup>7</sup>。虽然此处主要指振动，但其原理同样适用于急动度。例如，站立乘客因突然的冲击（高急动度）而失去平衡的风险远高于就座乘客。这暗示单一的急动度阈值可能不具备普适性，基于具体情境的评价标准可能更为有效。

## B. 人体对急动度的耐受性与舒适度阈值的建立

关于人体对急动度的耐受性，有研究指出，人体可承受的最大横向加加速度（即横向急动度）大约在  $0.4 \text{ m/s}^3$  至  $1.0 \text{ m/s}^3$  之间，并建议在自动驾驶系统的舒适度评估中，可采用  $0.1 \text{ m/s}^3$  作为评估阈值<sup>2</sup>。尽管这些数据主要针对自动驾驶汽车，但它们为讨论列车急动度问题提供了一个定量的参考起点。国际标准ISO 2631-4提及固定导轨运输系统（如铁路）的运动特性包括“由于轨道或道岔的较大缺陷引起的突然运动，或由于有无过渡曲线的曲线半径变化引起的准静态水平（急动度）的变化”<sup>7</sup>。其第一部分（ISO 2631-1）也说明“重力变化率或急动度可由加速度/时间曲线评估得到”<sup>6</sup>。然而，在这些标准的摘录中，并未提供针对铁路运营的特定急动度限值。

文献<sup>2</sup>提供了关于急动度限值的最具体数值指导：“人体可忍受的最大横向加加速度约在  $0.4 - 1.0 \text{ ms}^{-3}$ 。因此本实施例中可采用  $0.1 \text{ ms}^{-3}$  作为评估阈值。”<sup>2</sup>。尽管此数据来源于自动驾驶汽车领域，其参考价值不容忽视。与此同时，ISO 2631系列标准虽然在其框架内认知到急动度的存在，但其公开摘录部分并未给出针对铁路运输的明确量化限值<sup>6</sup>。特

别是ISO 2631-4，明确指出其“未提供涉及急动度的具体量化指南、限值或计算方法”<sup>7</sup>。

在现有研究资料中，尽管急动度对舒适度的影响已得到认可（尤其是在自动驾驶等邻近领域已有量化研究），但针对铁路运营的特定、标准化急动度限值的缺乏，构成了一个显著的空白，亟待未来的研究与标准化工作来填补。自动驾驶汽车舒适度评价中建议的  $0.1\text{ m/s}^3$  阈值<sup>2</sup>，远低于所提及的人体耐受极限（ $0.4 - 1.0\text{ m/s}^3$ ），这揭示了“可耐受”与“舒适”两个概念之间的区别。旨在提供高品质乘客服务的铁路系统，其急动度控制目标应更接近“舒适”标准而非仅仅满足“可耐受”的底线。“可耐受”通常指不引起极端不适或生理损伤的水平，而“舒适”则意味着一种愉悦的体验。这两个数值之间的显著差异表明，实现乘客舒适度的优化，需要比仅仅避免绝对不耐受更为严格的急动度控制。

下表2基于现有信息，示意性地列出了一些交通工具乘客舒适度的潜在急动度阈值。

表2: 交通工具乘客舒适度潜在急动度阈值（示意）

| 情景/方向                   | 建议“舒适”<br>阈值 (M/S <sup>3</sup> ) | “可耐受”<br>限值 (M/S <sup>3</sup> ) | 来<br>源/<br>依据 | 备注                                 |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|------------------------------------|
| 横向急动度 - 自<br>动驾驶汽车 (AV) | 0.1                              | 0.4 – 1.0                       | <sup>2</sup>  | 主要针对AV，铁路应用需进一步研究<br>验证            |
| 纵向急动度 - 通<br>用          | 尚无明确数<br>据                       | 尚无明确<br>数据                      |               | 需针对铁路场景研究，方向、姿态、<br>活动状态等因素均可能影响阈值 |
| 垂向急动度 - 通<br>用          | 尚无明确数<br>据                       | 尚无明确<br>数据                      |               | 需针对铁路场景研究，对站立乘客可<br>能更为敏感          |

### C. 急动度在评估过渡过程中的作用（例如，加减速阶段、进出曲线）

列车的加速/减速阶段以及进出曲线的过渡区段，是加速度变化最为显著的区域，因而也是急动度表现最为突出的地方。在这些过渡过程中，运行的平顺性对乘客舒适度至关重要。有研究直接指出，在“汽车、火车等加速和转弯的过程中”，高急动度会引发不适<sup>1</sup>。ISO 2631-4也特别提到，“由于有无过渡曲线的曲线半径变化引起的准静态水平（急动度）的变化”是固定导轨运输系统的一个运动特性<sup>7</sup>。

轨道过渡曲线（如羊角曲线/缓和曲线）的设计质量，其核心目标之一就是控制横向加速度的变化率（即横向急动度）。通过将实际测量的急动度曲线与这些过渡段的理论设计急动度曲线进行对比，可以为评估轨道几何形位质量和车辆悬挂系统性能提供一种有力的工具。过渡曲线在数学上被设计为实现横向加速度的逐渐累积。实测急动度与设计急动度之间的偏



差，可能指示了过渡段内存在轨道不平顺，或是车辆响应存在问题（例如，悬挂系统过硬导致反应过度）。这种分析方法比仅仅观察曲线主体部分的峰值横向加速度能提供更为精细的诊断信息。

对于采用再生制动的列车系统，制动力的施加平顺性（وبالتالي 急动度）不仅影响乘客舒适度，还可能关系到能量回收的效率和可预测性。过于突兀的制动力变化可能导致轮对滑移或能量回收效果不佳。平滑的、经过急动度控制的再生制动曲线，将对舒适度和能量效率两方面都有益。

## V. 急动度对现有基于加速度的评价指标的补充价值

### A. 提升平顺性与舒适度评估的精细度

急动度描述的是加速度水平是如何达成的。两种不同的运行情景可能具有相同的峰值加速度，但由于急动度特性迥异，会导致截然不同的舒适度感知。急动度为评价体系增加了一个新的维度，能够捕捉到单独的加速度指标，甚至是频率计权的加速度指标，在特别是暂态事件中可能忽略的细节。

急动度能够区分平稳、受控的运动变化与突然、刺耳的运动变化，即使这两种变化的起始和结束加速度状态完全相同。这对于评估那些以平顺性为设计目标的先进列车控制系统（例如，自动列车运行系统ATO）尤为有价值。一套先进的ATO系统或许能够精确达到目标速度并在加速度限值内保持运行，但如果其控制算法导致了启动和停车过程中的顿挫感（高急动度），乘客的满意度仍会大打折扣。急动度测量为评估和改进这些控制算法的平顺性提供了直接的度量手段。

从诊断角度看，在特定位置或特定操纵过程中出现的高急动度，能够比宽泛的振动水平更精确地指示问题所在（例如，设计不良的曲线过渡、突兀的制动/牵引控制、特定的轨道缺陷）。例如，整体加速度水平的升高（如斯佩林指数增大）可能表明某段线路较为粗糙；而一个急剧的急动度峰值则可能指向一个离散事件，如一个错位的接头或一个导致车辆颠簸的轨道几何突变，从而为养护维修提供更具针对性的指导。

### B. 急动度作为机械应力与部件磨损的先兆或指示器



有研究将急动度比作一种能导致材料疲劳的“柔性碰撞”<sup>1</sup>。快速变化的力（高急动度）相比于平缓施加的力，更容易在部件（如悬挂系统、车钩缓冲装置、轮轨接触界面）上产生较高的动态应力，这可能加速磨损或导致过早的疲劳失效。制动过程（通常伴随高急动度）会导致更为复杂的轮轨接触状态和磨损<sup>8</sup>。

文献<sup>1</sup>中“对于材料而言，急动度相当于一种‘柔性碰撞’，会使材料产生疲劳”的论断，有力地揭示了急动度与机械结构退化之间的联系。尽管文献<sup>8</sup>在讨论制动工况下的复杂磨损时未直接提及急动度，但由于制动必然涉及加速度的变化，急动度作为内含因素，很可能是导致这种复杂性的一个驱动因子。文献<sup>8</sup>同样探讨了制动时的磨损问题，其关注点虽集中于速度、轴重和摩擦系数，但潜在的力的快速变化（即急动度）是隐含其中的。

监测急动度，特别是在车钩、转向架等高应力部件或区域，有望比传统的振动分析更早地指示出潜在的机械问题或预测部件何时接近其疲劳寿命，从而对现有的状态监测和预测性维护策略形成补充。疲劳损伤随载荷循环次数和应力幅值累积。高急动度意味着应力的快速波动，这种波动通常比平滑的载荷循环更具破坏性。如果特定部件持续经历高急动度，它们可能需要更频繁的检查或提前更换，从而改进主动维护的有效性。

在轮轨相互作用的背景下<sup>8</sup>，高急动度（例如，在急加速/急减速或发生蛇行失稳时）可能导致接触力的瞬时激增或蠕滑率的急剧改变，从而加剧磨损，并可能增加滚动接触疲劳或钢轨损伤的风险。轮轨力是影响安全和磨损的核心因素<sup>8</sup>。急动度转化为这些力的快速变化。这种快速变化可能破坏接触斑的稳定性，导致微观滑移，或诱发高频应力波，所有这些都可能加速现有基于稳态力分析所预测之外的损伤机制。

## C. 改进控制算法以提升乘坐品质与运行效率（例如，在自动化系统中）

正如在自动驾驶汽车领域所观察到的<sup>2</sup>，急动度可以作为反馈参数来优化控制模型，以提升舒适性。这一原理可以直接应用于列车的ATO系统，乃至司机驾驶辅助系统（DAS），旨在实现更平滑的加减速曲线。更平顺的运行，通过避免不必要的、剧烈的牵引/制动切换，也可能带来能源效率的提升。

将急动度最小化目标整合到列车控制算法中（例如，用于ATO或节能驾驶模式），有望实现“叁赢”局面：改善乘客舒适度、降低部件的机械应力、以及通过避免剧烈且频繁波动的功率需求可能带来的更高效的能源利用。剧烈的加速和制动（高急动度）从能源角度看往往是低效的。更平滑的运行曲线通常更节能。如果控制系统被设计为最小化急动度，它们自然会促进更平顺、机械应力更小，且可能更节能的运行方式。

对于司机培训和驾驶辅助系统而言，提供关于急动度水平的反馈，可以帮助人类司机形成更平顺的驾驶习惯，即使在人工驾驶的列车上也能提升舒适度并减少磨损。正如一些现代汽车提供节能驾驶反馈一样，列车也可以向司机提供“平顺度”反馈，其中急动度是一个关键指标。这有助于在整个车队中规范驾驶行为，提升整体服务质量。

### D. 对比分析：急动度与加速度在表征动态事件方面的差异

加速度衡量的是力的大小或强度；而急动度衡量的是该强度变化的速率。一个动态事件可能表现为较低的峰值加速度但具有较高的急动度（例如，一次突然的、幅度不大的颠簸），也可能表现为较高的峰值加速度但急动度较低（例如，一次持续而平稳的加速过程）。它们描述的是运动的不同特性。

下表3对比了加速度与急动度在列车动力学评价中的主要特性。

表3: 列车动力学评价中加速度与急动度的特性对比

| 特性          | 加速度                        | 急动度  |
|-------------|----------------------------|--|
| 测量的物理量      | 速度对时间的变化率 / 惯性力强度          | 加速度对时间的变化率 / 惯性力强度的变化速率                        |
| 对乘客感知的主要影响  | 感受到的持续作用力大小 / 持续振动的幅值      | 运动变化的突然性或“冲击感” / 过渡过程的平顺程度                     |
| 对过渡过程变化的敏感性 | 相对较低，主要反映过渡前后的状态或过渡中的峰值    | 非常高，直接量化过渡的快慢与平顺性                              |
| 指示的机械应力类型   | 峰值应力 / 整体振动能量引起的应力         | 应力施加的速率 / 冲击载荷 / 疲劳累积的潜在加剧因素                   |
| 典型应用        | 斯佩林平稳性指标 / 峰值g值控制 / 结构强度校核 | 过渡区段（加减速、进出曲线）的舒适度评价 / 控制系统输出平顺性评估 / 材料疲劳分析的辅助 |

急动度在表征力的作用起始、终止以及不同运动状态之间过渡的特性方面，尤其优于加速度。加速度指标则更擅长表征在准静态或稳态振动条件下力的大小。例如，考虑列车进入一条曲线。横向加速度逐渐建立。曲线主要部分的峰值横向加速度描述了作用力的大小。而横向急动度则描述了在进入曲线时该加速度是如何平顺地施加上去的，以及在离开曲线时是如何平顺地撤销的。两者都很重要，但它们描述的是事件的不同阶段和不同方面。

在复杂的、非线性的动态事件中（例如，轮缘爬轨的初始阶段、对严重轨道缺陷的响应），急动度或许能够捕捉到一些关键的先兆或失稳指示，而这些信息可能被较为简单的加速度指标所掩盖或平均化。某些动态失稳过程可能始于非常迅速但幅度微小的运动变化，之后才发展为显著的加速度。由于急动度对这些快速变化非常敏感，它有可能比那些需要更大整体能量变化才能触发的加速度指标更早地探测到此类事件的萌芽。

## VI. 铁路系统基于急动度评价所面临的挑战与未来研究方向

### A. 急动度的测量技术与数据处理

急动度通常是通过对加速度信号进行微分运算得到的。这一过程会不可避免地放大原始信号中的噪声，因此需要审慎的滤波和信号处理技术。有研究指出，对于高速列车，“传统测量结果不稳定且噪声大，导致信息感知失准，信息感知不精确”<sup>10</sup>。在通过微分加速度来获取急动度时，这一挑战将更为严峻。

因此，开发鲁棒的微分算法和先进的噪声滤波技术，对于获得可靠的急动度测量结果至关重要。这可能需要采用传感器融合技术或基于模型的估算方法，而非简单地对原始加速度计数据进行数值微分。传感器的选择（加速度计）及其规格（如带宽、分辨率、噪声基底）对于以急动度为目标派生量的测量而言，变得尤为关键，因为原始信号中的任何缺陷都可能在微分过程中被放大，导致错误的急动度值。

### B. 急动度限值与评价规程的标准化

如前所述，尽管ISO 2631等国际标准在其框架内认知到急动度的概念，但并未针对铁路运营给出具体的急动度限值<sup>6</sup>。现有的各类铁路标准和规章，如<sup>11</sup>等，在其公开文本中也未见包含急动度限值或详细的基于急动度的评价方法。因此，建立行业公认的急动度阈值和评价方法学，是推广其应用的前提。

这需要开展系统的研究工作，很可能涉及在真实的列车运行环境中，针对不同乘客群体（年龄、健康状况、是否携带行李等）进行人因工程学研究，以建立具有科学依据且区分应用情境（如纵向、横向、垂向急动度；不同列车类型和运行速度等级）的铁路急动度限值。自动驾驶汽车领域提出的限值<sup>2</sup>可作为初步参考，但铁路系统具有其独特的动态特性和乘客期望，需要专门针对性的研究。标准化工作还应覆盖急动度的测量程序、数据处理技术和结果报告格式，以确保不同研究和运营商之间结果的可比性和一致性。



## C. 将急动度融入综合性多参数评估框架

急动度不应取代现有的加速度指标，而应作为其有益补充。未来的评价框架理想情况下应将加速度、急动度以及其他相关参数（例如，车内噪声、压力变化<sup>4</sup>等）整合起来，形成一个更为全面的运行品质综合指数。乘客的舒适体验是一个复杂的多因素感知过程。虽然低加速度是好的，低急动度也是好的，但它们在不同情境下的相对重要性可能有所不同。一个综合性的复合指数可以通过合理的权重分配来捕捉这些交互作用，为整体乘坐品质提供一个更易于理解和应用的单一评分。

将急动度信息与振动数据及其他传感器信息一同整合到预测性维护算法中，有望提高对部件故障或轨道状态恶化预测的准确性。急动度提供了关于动态载荷性质（平顺还是突兀）的信息。将其与关于载荷大小（来自加速度）及其他指标的信息相结合，可以发展出更为复杂的健康状态监测和预测性维护模型，并可借助机器学习或人工智能技术进一步提升其效能。

## VII. 结论与建议

### A. 急动度的重要性及其补充价值回顾

通过上述分析可见，急动度作为描述运动变化平顺性的核心物理量，对列车运行品质的评价具有不可忽视的价值。它不仅直接关联乘客的舒适体验，还可能对车辆部件及轨道结构的机械完整性和使用寿命产生影响。相较于传统的基于加速度的评价体系，急动度能够提供更深层次的洞察，尤其擅长表征启动、制动、曲线过渡等暂态运行过程中的动态特性，弥补了现有指标在捕捉“冲击感”和“顿挫感”方面的不足。

### B. 将急动度纳入铁路评价实践的建议

为充分发挥急动度在提升列车运行安全平稳性方面的潜力，建议采取以下措施：

- **短期措施：** 鼓励开展试验性研究，在现有运行品质监测中同步测量急动度，覆盖不同车型、线路条件和运行场景，以积累铁路领域特有的急动度数据库。可借鉴自动驾驶等相关领域已有的急动度阈值（如<sup>2</sup>中提及的数值）作为初步的参考基准。
- **中期措施：** 投入资源进行专项研究，旨在建立经过科学验证的、适用于铁路乘客（需考虑方向性、乘客姿态、进行中的活动等因素）的急动度舒适性限值。同时，开发并标准化鲁棒可靠的急动度测量技术和数据处理规范。

- **长期措施：** 推动将急动度指标逐步纳入国家及国际铁路标准体系，不仅作为乘坐舒适度的评价参数，也探索其在车辆/轨道相互作用评估中的应用潜力。将急动度最小化作为新型列车设计、轨道几何设计（特别是过渡曲线）的一项考量因素，并将其作为列车自动控制系统（ATO）和驾驶辅助系统（DAS）的优化目标之一。
- **持续应用：** 推广应用急动度分析方法，用于诊断轨道不平顺的类型与位置，评估车辆悬挂系统的减振性能，以及评价过渡曲线的设计与实际铺设质量。

通过上述系统性的努力，有望将急动度这一关键参数有效地融入铁路工程实践，从而进一步提升列车运行的安全性、平顺性和乘客的出行体验。

## 引用的著作

1. [加加速度- 维基百科，自由的百科全书 - Wikipedia](#), 访问时间为 五月 12, 2025
2. [CN107807625A - 一种基于端到端的自动驾驶系统舒适度的评估方法 ...](#), 访问时间为 五月 12, 2025
3. [多柔体车辆耦合系统对动力学性能的影响分析 - 汉斯出版社](#), 访问时间为 五月 12, 2025
4. [cms.myhuiyi.com](#) (注：标题为《市域（郊）铁路设计规范（征求意见稿）》)
5. [感受列车加速度 - 力学与实践](#), 访问时间为 五月 12, 2025
6. [www.ittc.info](#) (注：文件为 ISO 2631-1:1997)
7. [cdn.standards.iteh.ai](#) (注：文件为 ISO 2631-4:2001)
8. [pdf.hanspub.org](#) (注：标题为《列车制动时轮轨作用力及磨耗研究》)
9. [高速列车安全运行研究的关键科学问题 - 工程力学](#), 访问时间为 五月 12, 2025
10. [高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望 - 自动化学报](#), 访问时间为 五月 12, 2025
11. [关于印发《铁路200~250Km/h 动车组突发事件应急预案\(试行\)》的通知](#), 访问时间为 五月 12, 2025
12. [铁路技术管理规程 - 司法部](#), 访问时间为 五月 12, 2025
13. [我国市域铁路总体设计特点 - 兰州市轨道交通有限公司](#), 访问时间为 五月 12, 2025
14. [城际铁路设计细则 - 广东省交通运输厅](#), 访问时间为 五月 12, 2025
15. [PTS of Side Crash Buffers for Vande Bharat 16 car Sleeper Trainset - GeM](#), 访问时间为 五月 12, 2025
16. [RAILWAY TECHNICAL](#), 访问时间为 五月 12, 2025

17. [rtd light rail design criteria - NACTO](#), 访问时间为 五月 12, 2025
18. [Central Corridor Light Rail Project Design Criteria - Metropolitan Council](#), 访问时间为 五月 12, 2025