

# 急动度在轨道车辆因轨道不平顺引发的结构损伤与故障评估中的应用及与加速度的对比分析

## 1. 急动度在结构动力学中的概述

### 1.1. 急动度的定义与物理意义

在工程动力学领域，特别是对于复杂动态系统响应的评估，理解高于加速度的运动学参数变得日益重要。急动度（Jerk），亦称冲击或加加速度，被定义为加速度对时间的变化率<sup>1</sup>。它是一个矢量，其标量大小是物体位置对时间的标量三重导数。急动度的量纲是[长度/时间<sup>3</sup>]，国际单位制（SI）中的单位是米每秒三次方 ( $\text{m/s}^3$ )<sup>1</sup>。

从物理意义上讲，加速度表征了作用在物体上的净外力（根据牛顿第二定律， $F = ma$ ）。因此，急动度间接反映了作用在物体上的力的变化速率 ( $dF/dt$ )。这种对力变化率的敏感性是急动度在识别和表征瞬态动力学现象（如冲击和突发载荷）方面具有潜在优势的核心。早在相关研究中就已指出，“过度的‘急动运动’可能导致在建筑物、桥梁中以及乘坐火车或电车时不舒适的体验，因此在设计时应减少急动度的影响”<sup>1</sup>。这表明急动度在早期就被认为与舒适度和工程设计相关。

“急动度”是国际上描述加速度变化率最常用且首选的术语，并已得到国际标准的认可，例如 ISO 2041:2018 标准将急动度定义为“加速度的变化率”<sup>4</sup>。其他历史或特定领域中使用的术语还包括“jolt”、“surge”、“lurch”或“TDoA”（加速度的时间导数）<sup>1</sup>。术语的标准化进一步证明了急动度在不同工程学科中日益增长的重要性及其应用的规范化。

### 1.2. 与加速度、速度和位移的关系

急动度与结构或系统运动的其他基本参数（位移、速度和加速度）之间存在明确的数学关系。急动度是加速度对时间的一阶导数、速度对时间的二阶导数以及位移对时间的三阶导数<sup>1</sup>。

这种层级关系意味着急动度提供了对运动更高阶的描述。如果位移描述了系统的位置，速度描述了位置的变化快慢，加速度描述了速度的变化快慢（即力的作用效果），那么急动度则描述了加速度变化的快慢，或者说，作用力变化的剧烈程度<sup>2</sup>。这种更高阶的视角使其能够捕捉到加速度本身可能无法充分反映的动态特性，特别是在加速度快速变化的场景中。

### 1.3. 在表征动态事件和结构响应中的相关性

过大的急动度不仅会导致乘客在交通工具（如火车、电车、电梯）或建筑物中的不适感，还对评估运动对机械装置的破坏效应至关重要<sup>1</sup>。对于铁道车辆而言，乘客舒适度和结构部件的完整性都是核心考量因素。因此，急动度作为一个参数，直接关联到这两个方面。

在结构工程设计中，特别是在动态载荷（包括地震作用）下，有研究提出应将急动度反应谱与位移、速度和加速度反应谱一并考虑<sup>1</sup>。这意味着要全面理解结构在复杂载荷（如轨道不平顺或地震动）下的动态响应，可能需要对急动度进行分析。正如一些文献明确指出的，“急动度在工程实践中具有重要的意义”<sup>5</sup>。

国际标准中对舒适性和运动控制设定急动度限值（例如，列车设计中目标急动度通常低于  $2\text{ m/s}^3$ <sup>1</sup>），这暗示了工程界认识到不仅需要管理力的大小（通过加速度），还需要管理力的施加速率。这一原则可以推广到结构完整性评估：快速变化的载荷可能比缓慢施加的同等大小的载荷更具破坏性。如果加速度的突然变化对人体舒适性不利，那么这种突然变化同样可能对机械结构部件产生不利影响，可能导致疲劳累积或局部应力过高，特别是当这些变化具有重复性时（例如由轨道不平顺引起的振动）。因此，监测急动度可能为那些导致加速磨损或损伤的工况提供早期指标。

## 2. 急动度在工程结构评估中的应用

急动度作为衡量加速度变化剧烈程度的物理量，在工程结构评估，特别是结构健康监测（SHM）和故障诊断领域，正受到越来越多的关注。

### 2.1. 急动度在结构健康监测（SHM）中的概述

结构健康监测旨在通过传感器监测和数据分析来评估结构的实时状态、检测损伤并预测其剩余寿命。急动度已被应用于结构健康监测、地震分析和冲击反应谱等领域<sup>4</sup>。尽管基于加速度的传感器在动态事件中指示结构建筑损伤严重性方面应用广泛，但在研究地震波对结构构件的影响时，力的变化率（与急动度相关）引起了人们的关注，因此急动度的计算变得必要<sup>6</sup>。这直接将急动度与SHM的核心目标——评估结构状况和检测损伤——联系起来。对“力的变化率”的关注<sup>6</sup>是研究急动度的关键理由之一。

现代数据采集系统，如Dewesoft的SHM解决方案，能够从包括用于地震监测的低频加速度传感器在内的各种传感器采集数据，并提供强大的分析工具<sup>7</sup>。虽然这些系统可能不直接以急动度为中心，但其处理动态信号的能力为基于急动度的分析（如果采用合适的传感器或处理技术）奠定了基础。

## 2.2. 基于急动度的土木结构损伤检测（例如地震冲击）

在土木工程领域，特别是在地震工程中，急动度分析已显示出其应用价值。急动度被用于识别和定位建筑物中的地震损伤<sup>4</sup>。例如，有研究者提出了基于急动度的结构动力响应控制和损伤控制方法<sup>5</sup>。这些在建筑地震损伤评估中的成功应用为急动度在其他承受动态载荷的结构（包括铁道车辆部件）中的应用潜力提供了有力先例。

需要注意的是，急动度对结构的影响通常比加速度小，其显著影响主要针对特定类型的结构或部件，特别是那些对脉冲作用敏感的结构<sup>4</sup>。这是一个关键的细微之处：急动度并非加速度的普适替代品，但对于特定的损伤机制或结构特性，尤其涉及突然冲击或高频响应时，它可能更优越。这一点在评估铁道车辆部件时需要深入探讨。

关于地震急动度的研究探讨了其特性和影响，包括弹性和非弹性急动度反应谱及楼层谱<sup>1</sup>。有研究发现，急动度对中短周期结构作用明显<sup>5</sup>。急动度反应谱的发展<sup>1</sup>与成熟的加速度反应谱类似，表明将急动度纳入动态结构分析已形成系统性方法。其中短周期结构的敏感性<sup>5</sup>可能与铁道车辆某些特定部件的响应特性相关。

## 2.3. 急动度在机械系统故障诊断中的应用（例如旋转机械、冲击载荷）

在机械系统领域，急动度在评估运动对机构的破坏效应方面非常重要<sup>1</sup>。设定较高的加速度和急动度可能会在运动过程中导致振动<sup>2</sup>。采用限制急动度的加速度曲线可以通过避免冲击和降低振动激励来减少机械系统的磨损<sup>8</sup>。这突显了急动度在预防性工程（通过设计限制急动度）中的作用及其与磨损和振动的联系，这两者都是故障诊断的核心。如果限制急动度能减少磨损，那么高急动度就可能指示了导致磨损或故障的工况。

已有研究将急动度信号（位移的三阶导数，记为 $x^{(3)}$ ）用于检查低速旋转的轴承。高阶导数（如急动度）为检测那些会引入高频振动或冲击的故障（例如损坏的轴承和齿轮）提供了额外的可能性<sup>9</sup>。这是急动度在机械部件故障诊断中的直接应用。轴承和齿轮是铁道车辆中的常见部件，轨道不平顺会对其施加类似冲击的载荷。



有学者指出，过大的急动度相当于脉冲性的循环荷载，会导致材料发生“疲劳”破坏，而绝对值很大的负急动度则可能造成例如凸轮-从动件系统中的脱离接触现象<sup>5</sup>。这直接将急动度与疲劳联系起来，疲劳是承受重复动态载荷的结构（如铁道车辆因轨道不平顺承受的载荷）的主要损伤机制。

直接急动度传感器的发展<sup>6</sup>是对通过对含噪加速度信号进行微分来获取急动度这一方法局限性的回应。这一趋势表明，急动度独特的诊断价值日益受到认可，同时也承认了实际测量中存在的挑战。直接急动度传感器的成功（例如，采用金属悬臂梁和陀螺仪的传感器<sup>6</sup>，或基于马赫-曾德尔干涉仪的光纤急动度传感器<sup>6</sup>）可以显著推动其在结构健康监测中的应用，因为它们旨在绕过微分过程带来的问题，从而提供更纯净的急动度数据。可靠的直接测量将使基于急动度的诊断更加稳健和适用，特别是在线监测场景。

此外，运动控制中“限制急动度的加速度曲线”概念<sup>8</sup>（用于减少机器的磨损和振动）为诊断提供了一个推论。如果在机器设计中通过控制急动度来最小化磨损，那么由严重轨道不平顺等引起的不受控的高急动度事件很可能指示了导致铁道车辆部件加速磨损或损坏的工况。限制急动度的曲线用于确保机器平稳运动并避免加速度的突变<sup>8</sup>。其益处包括减少磨损和降低振动激励<sup>8</sup>。轨道不平顺，特别是诸如不良接头或辙叉等离散型缺陷，会在铁道车辆中引起不平稳的运动和加速度的突变。这些事件将表现为高急动度。因此，在铁道车辆上测得的高急动度可能意味着轨道施加了“非最优”的运动模式，从而导致与机器中通过限制急动度控制所避免的类似的负面后果（例如，增加的磨损、振动引起的疲劳）。

### 3. 用于轨道不平顺引起的铁道车辆振动的急动度分析

铁道车辆在运行过程中不可避免地受到轨道不平顺的激扰，这些不平顺是车辆振动的主要来源，不仅影响乘客的乘坐舒适性，还可能对车辆部件和轨道结构造成累积损伤。

#### 3.1. 轨道不平顺的性质及其对车辆动力学的影响

轨道不平顺的类型多种多样，包括短波缺陷（如钢轨波浪形磨耗（波磨）、小的焊缝不平直）、离散型缺陷（如下陷的焊缝或接头、辙叉冲击、钢轨断裂）以及长波几何偏差（如方向不平顺、高低不平顺）<sup>10</sup>。这些不同类型和波长的不平顺会激起车辆不同的动态响应模式。例如，短波缺陷通常引起较高频率的振动，而长波不平顺则主要影响车辆的低频晃动和姿态。理解急动度或加速度在表征由这些不同类型缺陷引起的响应方面的能力，是比较分析的关键。

#### 3.2. 表征异常振动：急动度的潜在作用

在列车设计中，通常致力于减少过度的“急动运动”以提升舒适性和运行品质<sup>1</sup>。铁道车辆动力学中的急动度分析已被用于研究其对乘客安全和舒适性的影响，特别是在列车加速和减速等计划性操作过程中<sup>11</sup>。然而，这一分析原则同样可以扩展到由轨道不平顺引起的非计划性的、异常的振动。

有研究指出，在某些车辆环境中，急动度可能是比加速度更好的乘客不适感指标<sup>10</sup>。如果急动度能更好地关联人类对“颠簸”或“冲击”的主观感受，那么它也可能更好地关联机械部件所经受的“苛刻”载荷，特别是对于冲击性事件。此外，高阶导数（如急动度）对于检测那些会引入高频振动或冲击的故障非常有用<sup>9</sup>。严重的轨道不平顺（例如，通过断裂的钢轨、高低落差大的接头，或车轮通过扁疤时的冲击）会在车辆中产生高频、冲击性的振动，急动度在此类场景下的敏感性为其应用提供了有力支持。

尽管目前关于利用急动度诊断铁道车辆因轨道不平顺引起的结构损伤的直接文献证据在所提供的材料中较为缺乏，但急动度的基本特性（对力变化率  $dF/dt$  的敏感性、冲击表征能力）及其在类似机械系统（如轴承、齿轮<sup>9</sup>）和地震损伤评估<sup>4</sup>中的成功应用，强烈暗示了其在该领域的潜在效用。“异常振动”通常以其突然性或冲击性为特征，而急动度在本质上就适合捕捉这些特性。轨道不平顺，特别是离散型缺陷（如接头、焊缝、轨面剥离、断轨），会对车轮以及随后的车辆部件产生类似冲击的力。冲击的特点是力的快速变化（即高的  $dF/dt$ ）。由于急动度与  $dF/dt$  成正比，因此当车辆遇到此类缺陷时，急动度信号应表现出明显的特征（例如尖锐的峰值）。如果这些高急动度事件具有重复性，则可能导致疲劳损伤<sup>5</sup>。因此，与加速度（表示力本身，但不一定表示其施加速率）相比，监测急动度可能为有害事件提供更早期或更清晰的指示。

### 3.3. 将急动度特征与潜在的车辆部件损坏或故障联系起来

过大的急动度相当于一种冲击性的循环载荷，可能导致材料产生“疲劳”损伤<sup>5</sup>。急动度能够引起金属材料产生疲劳裂纹<sup>12</sup>。这是一个直接的力学机制联系：由轨道不平顺引起的重复性高急动度事件可能促使转向架部件、悬挂元件甚至车体连接件的疲劳累积。

急动度也与评估冲击作用相关，其分析结果可能为优化结构细部设计提供依据<sup>4</sup>。如果特定的轨道特征（如状态不良的道岔或接头）会产生高的急动度响应，这些区段就可能成为车辆部件损伤的“热点”。通过急动度特征识别这些“热点”，可以为养护维修决策或轨道设计改进提供信息。

尽管一些研究（如<sup>13</sup>和<sup>14</sup>）主要关注使用加速度进行车轮扁疤检测，但车轮扁疤撞击钢轨的冲击本质上是一个高急动度事件。关键在于，对于这种或类似的冲击诱发故障，急动度是否能提供超越加速度的额外诊断信息。这突出显示了一个需要直接比较研究的领域。由车轮扁疤引起的冲击与某些轨道缺陷引起的异常振动源相似。

目前铁路领域对急动度的研究主要集中在计划性的运行（如为保证舒适性而控制加减速过程中的纵向急动度<sup>11</sup>）。然而，需要将这种分析明确地扩展到由轨道不平顺引起的非计划性的、随机的激扰，以服务于故障和损伤评估。物理原理是相通的：无论是预期还是非预期的，加速度的快速变化仍然意味着高急动度。例如，当车轮高速通过一个10毫米的轨道空吊时，其垂向加速度会急剧变化——这是一个高急动度事件。急动度量化变化“剧烈性”的原理同样适用于这些由轨道引起的振动。研究的空白在于系统地将急动度分析应用于这些特定的振动特征，并将其与部件层面的损伤（而不仅仅是车辆整体的舒适性或纵向动力学安全性）关联起来。

## 4. 对比分析：急动度与加速度在铁道车辆评估中的应用

在评估铁道车辆因轨道不平顺产生的异常振动时，选择合适的物理量进行表征至关重要。传统上，加速度是主要的分析参数，但急动度作为加速度的变化率，在特定情况下可能提供更优的表征。

### 4.1. 对不同类型轨道激扰的敏感性

轨道不平顺的类型多样，其对车辆产生的激扰特性也各不相同。

- 短波长缺陷（例如，波磨、小的焊缝不平整）：
  - 急动度：由于这些缺陷会引起加速度曲线的快速、重复性变化，急动度可能更敏感。其对高频内容的捕捉能力可能更强。有研究表明，急动度等高阶导数对于检测引入高频振动或冲击的故障非常有用<sup>9</sup>。
  - 加速度：会显示振动水平的增加，但其信号中的“尖峰”或突变性可能不如急动度信号中那样显著。
- 冲击性事件（例如，不良的钢轨接头、车轮扁疤冲击、断轨）：
  - 急动度：理论上对与冲击相关的力的突然产生和消失高度敏感。理想情况下，加速度的跳跃式不连续会导致无限大的急动度，可用狄拉克 $\delta$ 函数在急动度中建模<sup>15</sup>。文献中也提及“冲击性的循环荷载”与急动度的关系<sup>5</sup>。
  - 加速度：会显示峰值，但急动度可能更好地量化冲击的“突兀”程度，有时“冲击”（Shock）一词在某些场合即指急动度<sup>2</sup>。
- 长波长起伏：
  - 急动度：与加速度相比，可能显示不出明显的优势，因为加速度的变化相对平缓。



- 加速度：通常能有效表征这些频率较低、变化较平滑的振动。

## 4.2. 急动度在表征突发振动变化方面的优势

急动度衡量的是力变化的快慢<sup>2</sup>。它可以通过作用于运动的平滑度来限制振荡行为<sup>16</sup>。这种“平滑度”的有无是关键。轨道缺陷引入的是“不平滑”的运动，而急动度正是为此类不平滑性的量化而生。

采用限制急动度的加速度控制可以避免冲击并减少磨损<sup>8</sup>，这意味着高急动度与冲击和磨损相关联。因此，测量到高急动度可能是指示潜在致损冲击工况的直接指标。

在地震事件中，急动度对于特定结构可能非常重要，高急动度指示加速度发生突然、快速的变化，从而产生冲击力<sup>4</sup>。这一原理可以很好地引申到铁路的冲击问题上：一个尖锐的轨道缺陷对车轮而言就像一个微小的脉冲激励。

## 4.3. 基于急动度分析的局限性和缺点

尽管急动度具有理论优势，但在实际应用中 also 面临一些挑战 and 局限性。

- 测量挑战：通过对加速度信号进行微分来获得急动度的方法容易产生误差，特别是噪声放大效应，对于小幅值、低频信号尤其如此<sup>6</sup>。这可能导致计算出的急动度值不精确。
- 适用范围的特异性：急动度对结构的影响通常比加速度小；其影响仅对特定类型的结构或损伤机制才显著<sup>4</sup>。这意味着急动度并非万能药。其优越性需要在铁道车辆特定故障类型中得到证实；它可能并非对所有情况都更好。
- 系统动力学行为的考量：如果不考虑系统的动态行为，单纯最小化急动度可能是次优方案<sup>16</sup>。这表明需要进行细致的理解，仅看急动度幅值可能不够，其在系统动力学背景下的意义更为重要。

## 4.4. 加速度法的背景：优势与劣势

加速度作为传统的振动分析参数，其优势和劣势如下：

- 优势：
  - 在振动分析和结构健康监测中被广泛使用和理解<sup>6</sup>。

- 与力成正比，使得在许多应用中解释直观。
- 拥有成熟的传感器技术（加速度计）和信号处理技术。
- 对于表征振动的整体能量以及许多常见的故障类型是有效的（例如，<sup>13</sup>综述了多种基于加速度的车轮扁疤检测方法）。
- 劣势（针对突发事件）：
  - 可能无法完全捕捉力的施加速率或冲击的“突兀”程度。
  - 如果仅考虑峰值，则在区分大的、缓慢的力变化和小的、非常快速的力变化方面效果可能较差。
  - 有研究指出，对于车轮扁疤，若不对加速度信号进行适当处理（如去噪、包络分析），其故障特征可能会被高频噪声掩盖，从而难以识别故障<sup>14</sup>。这也意味着即使是加速度信号也需要仔细处理。

#### 4.5. 表格：急动度与加速度在轨道不平顺引起的振动评估中的对比分析

为了更清晰地比较急动度和加速度在评估轨道不平顺引起的车辆振动方面的特性，下表进行了总结：



特征	急动度 (JERK, $da/dt$ )	加速度 (ACCELERATION, $dv/dt$ )
定义	加速度的变化率 ( $d^3x/dt^3$ )	速度的变化率 ( $d^2x/dt^2$ )
物理意义	力的变化率	与力成正比
对以下因素的敏感性:		
冲击/突发事件	高（捕捉“冲击感”，突然性） <sup>2</sup>	中到高（显示峰值）
高频成分	高 <sup>9</sup>	中（取决于采样和处理）
平滑变化	较低（可能不提供显著优势）	高（有效反映整体能量）
优势	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 更好地表征冲击载荷<sup>5</sup></li> <li>- 可能更早检测与冲击相关的疲劳<sup>12</sup></li> <li>- 可能为某些缺陷提供更清晰的特征<sup>9</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 成熟、广泛理解</li> <li>- 成熟的传感器技术</li> <li>- 直接关联力的大小</li> <li>- 对多种故障类型有效<sup>13</sup></li> </ul>
劣势	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 若通过加速度微分得到，易受噪声影响<sup>6</sup></li> <li>- 直接测量技术仍在发展中</li> <li>- 可能并非对所有缺陷类型/场景都更优<sup>4</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 可能无法完全捕捉“冲击感”或力的施加速率</li> <li>- 未经适当处理可能被噪声掩盖<sup>14</sup></li> </ul>
铁路应用示例	可能更适用于尖锐缺陷（如断轨、不良接头），识别导致部件疲劳的高冲击力。	常规振动监测，识别整体乘坐平顺性问题，检测由波磨引起的持续振动。

从比较中可以看出，急动度更可能在表征特定类型缺陷所引起的轮/轴动力学突变、冲击性变化方面提供更优的特性（例如，严重的钢轨接头、辙叉冲击、钢轨剥落，或某些导致突然运动的裂纹初始阶段）。对于更为普遍或平缓的轨道不平顺，加速度由于其测量的简便性可能仍然足够，甚至更为实用。关键在于故障的动态特征。加速度会记录这些事件的峰值，但作为导数的急动度会强调这些峰值上升和下降的速率，从而可能提供一个更清晰、更独特的特征，特别是当冲击持续时间非常短时。对于更平滑、波长更长的轨道不平顺，加速度的变化率较低，从而削弱了急动度的独特优势。加速度的均方根值或峰值可能更能代表此类缺陷输入的能量。此外，通过微分获得急动度时存在的噪声问题<sup>6</sup>，使得其在应用于非冲击性的微小变化时，相较于直接测量的加速度，吸引力有所下降。

此外，急动度可能对某些损伤的起始阶段或那些导致局部应力集中但可能不会显著提高整体加速度均方根值（RMS）的更小、更尖锐的缺陷更为敏感。这些可能是更大故障的先兆。疲劳损伤通常始于由尖锐的局部冲击可能引起的微小应力集中。即使整体能量（以及加速度RMS值）没有显著增加，这些微小、尖锐的冲击也会产生局部的高急动度值。如果没有非常高分辨率或特定的冲击检测算法，加速度可能会“平均掉”这些局部事件。急动度对  $dF/dt$  的固有敏感性可以作为此类损伤有利条件的“早期预警”，在其发展到足以导致加速度水平持续显著增加之前。这与一些研究提出使用高阶导数检测轴承/齿轮早期故障的观点相符<sup>9</sup>。

## 5. 用于诊断目的的急动度测量和信号处理

要有效地利用急动度进行故障诊断，必须解决其测量和信号处理方面的挑战。

### 5.1. 获取急动度数据的方法

目前获取急动度数据主要有两种途径：

- 加速度信号的微分：这是当前最常用的方法，即采集加速度信号，然后通过数值微分计算得到急动度<sup>6</sup>。
  - 挑战：此方法由于噪声敏感性和时间步长较小，容易产生较高的误差水平，并消耗更多的计算时间<sup>6</sup>。对于小幅值和低频信号，这种技术可能导致急动度值的计算不精确<sup>6</sup>。
- 直接急动度测量：这是新兴的技术方向，旨在直接测量急动度，避免微分带来的问题。
  - 示例：包括采用金属悬臂梁和陀螺仪组合的传感器<sup>6</sup>，基于差分马赫-曾德尔干涉仪的光纤急动度传感器（FOJS）<sup>6</sup>，以及基于悬臂梁的急动度传感器（Tamura等人，引用于<sup>6</sup>）。
  - 优势：旨在克服微分法的局限性，减少信号处理时间，消除微分误差，并提供更准确的测量，特别是对于低频/小幅值信号<sup>6</sup>。

### 5.2. 急动度信号采集和降噪的挑战

急动度信号的获取和分析面临的主要挑战之一是噪声。

- 噪声放大：数值微分过程会显著放大原始加速度信号中存在的噪声<sup>4</sup>。由于急动度是加速度的导数，它对信号中的高频成分（包括噪声）更为敏感。
- 滤波和去噪：对于有意义的急动度分析至关重要。
  - 技术：
    - 带通滤波：例如，在计算急动度之前，对加速度记录使用奥姆斯比（Ormsby）带通滤波器进行预处理<sup>4</sup>。
    - 小波分解：采用多级小波分解对加速度记录进行去噪（在微分之前）或直接对急动度信号进行去噪<sup>4</sup>。测试中会尝试不同的小波基函数、阈值确定方法和分解层级，以在消除噪声的同时保留重要的信号特征。
    - 其他鲁棒滤波技术：例如中值滤波等也可能适用。有研究在活动识别中提到，对于重力分量的估计，中值滤波比均值滤波效果更好<sup>17</sup>。
- 信噪比（SNR）：对于可靠的特征提取至关重要。急动度信号的低信噪比是一个主要问题。

### 5.3. 与损伤/故障特征相关的急动度信号特征提取技术

从处理后的急动度信号中提取能够有效指示损伤或故障的特征是诊断过程的核心。可以从急动度信号中提取与加速度信号类似的特征<sup>17</sup>。

提及的具体特征包括：

- 峰值：急动度信号的最高峰值平均值<sup>9</sup>，峰值幅度<sup>17</sup>。
- 统计特征：均方根（RMS）、标准差、峰值因子（Crest Factor）、峭度（Kurtosis）、偏度（Skewness）、 $L_p$ 范数等<sup>9</sup>。
- 信号分布特征：基于标准差的直方图分数<sup>9</sup>。
- 急动度角/方向变化：如果可以近似重力方向<sup>17</sup>。
- 峰值频率、峰高与峰宽之比<sup>17</sup>。
- 单位质量的冲击力：急动度在两个连续过零点之间的积分（用于地震分析，但可能适用于其他冲击事件）<sup>4</sup>。

特征的选择对于从背景噪声和正常运行振动中分离出故障特定信号至关重要。那些强调冲击性的特征（如峰值、峭度、峰值因子）可能与轨道缺陷冲击的诊断特别相关。文献<sup>9</sup>中提供了一个表格，将不同故障类型（如损坏的轴承、齿轮）与位移( $x$ )、速度( $\dot{x}$ )、加速度( $\ddot{x}$ )、急动度( $\dddot{x}$ )以及更高阶导数( $x^{(4)}$ )的特征联系起来。

急动度作为一种优越诊断工具的可行性在很大程度上取决于直接传感技术和鲁棒信号处理技术的进步。没有这些，急动度的理论优势（对瞬态的敏感性）可能会因实际测量和噪声问题而被抵消。急动度的定义( $da/dt$ )使其固有地对高频分量敏感，包括加速度信号中的噪声<sup>6</sup>。如果通过微分获得急动度，则加速度信号的质量和微分算法至关重要。如果直接感测急动度，则传感器自身的噪声基底、带宽和抗干扰能力变得至关重要。即使有良好的传感，原始急动度信号也可能需要复杂的去噪（例如，如<sup>4</sup>中使用的小波变换）和特征提取<sup>6</sup>才能用于诊断。因此，需要一种系统方法：传感器的改进必须与为急动度数据量身定制的先进信号处理相结合。

识别和验证能够可靠地关联轨道不平顺引起的铁道车辆部件损伤的急动度特定特征是一项重大的研究挑战。尽管存在通用特征（如峰值、RMS等），但在现有文献中，它们针对铁路故障的具体阈值和组合尚未得到充分确立。文献<sup>9</sup>列出了从急动度中提取的用于机械故障或活动识别的各种特征。然而，铁路环境复杂，存在多种振动源（轨道、车轮、悬挂、牵引系统）。一项关键任务是找到对故障引起的振动（例如，来自响应轨道接头的转向架裂纹）敏感，但对正常运行振动具有鲁棒性的急动度特征。这需要大量的实验数据、仿真，并可能需要机器学习来识别最佳特征集和决策边界，超越所提供的一般列表。例如，专利<sup>14</sup>使用BP神经网络对基于加速度特征的车轮扁平长度进行估计，这表明类似的方法可以应用于急动度特征。

## 6. 案例研究和增强故障表征的潜力（说明性）

尽管关于急动度直接用于诊断铁道车辆因轨道不平顺引起的结构损伤的案例研究在现有资料中不突出，但可以根据急动度的已知特性及其在相关领域的成功应用，推断其潜在效用。

### 6.1. 情景1：检测严重钢轨接头或断轨的冲击

- 假设：当车辆通过严重、突变的轨道不连续点（如错台严重的接头或断轨）时，与加速度信号相比，安装在轴箱或转向架上的传感器测得的急动度信号将显示出明显更尖锐且幅值更高的峰值。
- 原理：这基于急动度对力变化率  $dF/dt$  的高敏感性（如前述）及其表征“冲击”的能力<sup>2</sup>。在此类冲击过程中，力的变化速率将非常之高。



- **潜在优势：**能够更清晰地区分严重冲击与一般的轨道粗糙度，从而可能实现对关键轨道缺陷更精确的定位和严重性评估，并可能触发更及时的维护警报。

## 6.2. 情景2：悬架部件松动或早期故障的早期检测

- **假设：**失效的减振器或悬挂系统中的连接松动可能导致车辆对中等程度轨道输入的响应变得更不受控、更“颠簸”，或者引入具有高频急动度分量的颤振/嘎嘎声。
- **原理：**这基于急动度对高频振动的敏感性<sup>9</sup>以及对系统动态响应变化的敏感性。受损的悬挂系统会改变车辆对轨道输入的反应方式。有研究讨论了使用加速度和陀螺仪数据检测悬挂故障，表明了此类监测的需求<sup>19</sup>。
- **潜在优势：**在整体加速度水平显著上升之前，急动度可能捕捉到振动特性的细微变化（例如，“尖峰度”增加或出现新的高频成分），从而实现早期干预。

## 6.3. 情景3：表征车轮扁平冲击对车辆部件的影响

- **假设：**尽管文献<sup>13</sup>和<sup>14</sup>使用加速度进行车轮扁疤检测，但对由扁疤冲击引起的、在转向架或车体上产生的振动进行急动度分析，可能提供关于传递到这些部件的冲击严重程度的额外信息，而不仅仅是检测扁疤本身。
- **原理：**车轮扁疤产生的冲击力非常尖锐。急动度将量化该力通过悬挂系统传递的突变程度。
- **潜在优势：**除了现有的检测方法外，这可能有助于评估由重复性车轮扁疤冲击对轴承、车轴或转向架框架造成的累积损伤风险。

这些情景中急动度的潜在益处很大程度上是理论性的或从其他领域推断而来的。通过在已知缺陷的轨道上运行装有仪器的铁道车辆进行严格的实验验证，并与同期的加速度数据进行比较，对于证实（或证伪）这些假设至关重要。大多数文献讨论的是急动度在一般工程、地震应用或基本机械系统（轴承/齿轮）中的应用。铁道车辆动力学非常复杂，涉及多自由度、非线性悬挂特性以及宽频谱的轨道输入。将实验室轴承测试（例如<sup>9</sup>）的发现直接应用于运行中的铁道车辆，需要仔细考虑规模、环境因素和信号复杂性。在缺乏针对铁路结构损伤（不仅仅是舒适性或纵向动力学）的专门案例研究的情况下，对于本用户查询的具体问题，急动度的优越性仍属推测。

机器学习技术可能在释放急动度信号在铁路应用中的诊断潜力方面发挥关键作用。鉴于信号的复杂性和可变性，机器学习模型可以学习识别急动度数据（或急动度与加速度组合数据）中与特定故障类型或损伤状态相对应的细微模式。文献<sup>14</sup>使用BP神经网络根据加速度特征对车轮扁平长度进行定量估计。文献<sup>18</sup>讨论了将机器学习与肌动图（MMG，与肌肉振动相

关) 信号结合使用, 提取的特征包括RMS、峰峰值、最大值、最小值、平均值、标准差、偏度和峭度——其中许多特征也适用于急动度分析<sup>9</sup>。铁路诊断中的挑战通常不仅在于检测异常, 还在于对其进行分类和评估其严重性。通过在包含急动度/加速度信号与已知轨道/车辆状况配对的综合数据集上进行训练, 机器学习算法可以比基于规则的系统更有效地学习这些复杂的相关性, 特别是如果急动度能提供额外的、独特的特征维度。

## 7. 结论与建议

### 7.1. 急动度在轨道不平顺引起的铁道车辆故障诊断中应用的总结

急动度作为加速度的时间变化率, 在表征铁道车辆因轨道不平顺引起的异常振动和潜在故障方面具有理论上的优势。其对力的变化率敏感, 使其能够有效捕捉冲击、突变和高频振动等特性, 这些特性往往与严重的轨道缺陷(如不良接头、断轨)或车辆部件的早期损伤(如悬挂系统退化、轴承冲击)相关。通过分析急动度信号的峰值、统计特征和分布特性, 有望识别出加速度信号可能忽略或模糊化的故障指示信息。然而, 急动度的应用也面临实际挑战, 主要是通过加速度微分获取急动度时产生的噪声放大问题, 以及直接急动度测量技术的成熟度和成本问题。有效的信号处理技术, 如小波去噪和针对性的特征提取, 对于发挥急动度的诊断潜力至关重要。

### 7.2. 急动度是比加速度更优的指标吗? 细微差别和条件

关于急动度是否是比加速度更优的损伤与故障表征指标, 答案并非绝对。其优越性是有条件的, 并且可能局限于特定的场景:

- 对于由严重离散轨道缺陷或某些表现为动态行为突然改变的部件故障引起的突发性、冲击性事件, 急动度可能更优。在这些情况下, 急动度可以提供关于“冲击”或力的快速变化的更清晰、更显著的特征。
- 对于更平滑、波长更长的轨道不平顺或导致振动逐渐变化的故障, 加速度可能更实用且鲁棒。在这些情况下, 急动度可能无法提供显著的额外信息, 而加速度的测量和处理更为成熟。

关键在于诊断信息在经过处理后的急动度信号与加速度信号中的“信噪比”。一个物理量本身是否“更好”, 不仅仅取决于其物理定义, 还取决于整个测量和分析链(传感器->信号调理->处理->特征提取->决策制定)。如果一个理论上更优的参数无法被可靠地测量, 或者其信息内容无法被有效提取, 那么其实际效用就会大打折扣。急动度对冲击的理论敏感性是明确的<sup>1</sup>。然而, 如果从加速度推导它会引入过多噪声<sup>6</sup>, 或者如果直接急动度传感器对于广

泛的铁路应用来说过于昂贵/脆弱，其实际优势就会减弱。同样，即使有了干净的急动度信号，如果提取的特征对于特定故障的区分能力不比从加速度中提取的特征更好，那么增加的复杂性可能就不值得。

### 7.3. 对未来研究和实际应用的建议

为充分发掘急动度在评估铁道车辆因轨道不平顺引起的损伤与故障方面的潜力，并明确其相对于加速度的实际价值，建议未来在以下几个方面开展深入研究和技术开发：

- **开发和验证适用于铁路环境的直接急动度传感器：** 研发坚固、可靠且成本效益高的直接急动度传感器，对于推动急动度监测技术的广泛应用至关重要。这将有助于克服通过加速度微分带来的噪声问题。
- **开展对比性实验研究：** 在装有传感器的实际运营车辆上，针对包含不同类型和严重程度已知缺陷的各种轨道条件进行现场测试。直接比较经过处理的急动度数据和加速度数据在检测和表征这些缺陷及其引起的车辆响应方面的能力。
- **先进的信号处理和特征工程：** 针对铁路环境下的急动度信号，开发和优化信号处理技术（如去噪、滤波算法）。识别并验证那些能够鲁棒地指示轨道引起的车辆故障和部件损伤的急动度特有特征。
- **集成机器学习方法：** 探索利用人工智能/机器学习技术分析急动度数据以及急动度与加速度的组合数据，以增强故障诊断、分类和严重性评估的准确性和智能化水平。
- **关注特定的故障模式：** 深入研究急动度对铁道车辆特定部件（例如，悬挂衬套、减振器性能退化、转向架框架裂纹等）在轨道不平顺激励下的特定故障模式的敏感性。
- **进行成本效益分析：** 评估实施基于急动度的监测系统所带来的实际效益（例如，更早期的故障检测、改进的维护计划）与相应的成本（传感器、处理单元、数据分析等）之间的平衡。
- **从检测到预测的延伸：** 如果急动度能够更有效地量化部件承受的“冲击能量”或“冲击载荷”，那么它在因轨道不平顺引起的疲劳损伤部件的寿命预测（Prognostics）方面具有巨大潜力。疲劳寿命对载荷历史高度敏感，特别是对高幅值、尖锐的载荷循环<sup>5</sup>。如果急动度能更好地量化这些来自轨道缺陷的破坏性冲击载荷，那么累积的急动度相关指标（例如，“基于急动度的损伤指数”）可能比单独基于加速度的指标与疲劳累积的相关性更强。这有助于更准确地预测部件何时需要维护或更换，从而实现从反应式/预防式维护向预测式维护的转变，这与结构健康监测的目标一致<sup>20</sup>。

综上所述，虽然急动度在理论上为表征轨道不平顺引起的车辆异常振动和潜在损伤提供了新的视角，但其全面推广应用仍需在传感器技术、信号处理方法以及针对铁路特定工况的验证研究方面取得进一步突破。通过系统性的研究和开发，有望将急动度发展成为传统加速度监测方法的有力补充，甚至在特定场景下成为更优的诊断工具。

## 引用的著作

1. [\(PDF\) Jerk Response Spectrum - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025
2. [Jerk – Knowledge and References - Taylor & Francis](#), 访问时间为 五月 12, 2025
3. [加加速度- 维基百科，自由的百科全书](#), 访问时间为 五月 12, 2025
4. [An in-depth investigation of ground jerk characteristics for ... - Frontiers](#), 访问时间为 五月 12, 2025
5. [pubs.cstam.org.cn](#) (注：标题为《地震动急动度特性及其对结构影响的研究》)
6. [A Developed Jerk Sensor for Seismic Vibration Measurements ...](#), 访问时间为 五月 12, 2025
7. [结构健康监测| Dewesoft](#), 访问时间为 五月 12, 2025
8. [Jerk-limited default acceleration profile - Beckhoff Information ...](#), 访问时间为 五月 12, 2025
9. [\(PDF\) Advanced Signal Processing in Mechanical Fault Diagnosis](#), 访问时间为 五月 12, 2025
10. [The significance of the ride comfort index NMV. - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025
11. [\(PDF\) Jerk Analysis in Rail Vehicle Dynamics - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025
12. [Experimental and analytical ride comfort evaluation of a railway coach - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025
13. [铁道车辆车轮扁疤故障检测技术综述 - 交通运输工程学报 - 长安大学](#), 访问时间为 五月 12, 2025
14. [CN114056381A - 一种铁道车辆车轮扁疤监测方法- Google Patents](#), 访问时间为 五月 12, 2025
15. [Jerk \(physics\) - Wikipedia](#), 访问时间为 五月 12, 2025
16. [Influence of a Jerk Controlled Movement Law on the Vibratory Behaviour of High-Dynamics Systems - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025



17. [\(PDF\) Jerk-based feature extraction for robust activity recognition ...](#), 访问时间为 五月 12, 2025
18. [Leveraging Mechanomyography Signal for Quantitative Muscle Spasticity Assessment of Upper Limb in Neurological Disorders Using Machine Learning - The Science and Information \(SAI\) Organization](#), 访问时间为 五月 12, 2025
19. [Track and Vehicle Condition Monitoring during Normal Operation Using Reduced Sensor Sets | Request PDF - ResearchGate](#), 访问时间为 五月 12, 2025
20. [大型桥梁结构健康监测系统概述](#), 访问时间为 五月 12, 2025