

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.004

城市轨道交通车致环境振动 评价标准对比研究

罗 伟^{1,2}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 2. 铁路轨道安全服役湖北省重点实验室, 武汉 430063)

摘 要: 针对我国城市轨道交通车致环境振动评价标准存在不明确、不统一而影响评价结论的问题, 采用现场实测和统计分析相结合的方法, 对比研究现行相关标准中关于评价指标、计权曲线、分析频率范围、列车通过时段判断等方面的规定。结果表明: 建议同时设置时频综合评价指标和分频评价指标对轨道交通车致环境振动进行评价; 时频综合评价指标采用最大 Z 振级 $VLz_{\max}$, 分频评价指标采用最大分频振级 $VAL_{\max}$ 并选用峰值保持法计算; 评价指标计算建议采用 W_k 计权曲线, 分析频率范围取 1~80 Hz; 为有效消除列车通过时段判断中的主观因素对评价结果的影响, 建议采用时间计权的方式和峰值保持法计算 $VLz_{\max}$ 和 $VAL_{\max}$ 。

关键词: 城市轨道交通; 环境振动; 评价标准; 计权曲线; 振级

中图分类号: TH113; TB533

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0029-09

Comparative Study on Train-Induced Environmental Vibration Evaluation Standards for Urban Rail Transit

LUO Wei^{1,2}

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group, Wuhan 430063;

2. Railway Service Safety Key Laboratory of Hubei Province, Wuhan 430063)

Abstract: In response to ambiguities and inconsistencies in China's evaluation standards for train-induced environmental vibrations in urban rail transit, which affect assessment conclusions, this paper adopts a combination of field measurements and statistical analysis to conduct a comparative study of current standards regarding evaluation indicators, weighting curves, analysis frequency ranges, and determination of train pass-by intervals. The main conclusions are as follows: it is recommended to establish both a time-frequency comprehensive evaluation indicator and a frequency-domain evaluation indicator. It is suggested to set the single-value evaluation indicator as the maximum vertical vibration level ($VLz_{\max}$), the frequency-domain octave evaluation indicator as the maximum vibration level of 1/3 octave bands ($VAL_{\max}$), and adopt the peak value retention method in the calculation. The W_k weighting curve is suggested to be adopted and the analysis frequency range is recommended as 1~80 Hz. To effectively eliminate the influence of subjective factors in determining train passing periods on evaluation results, it is recommended to use time weighting for vibration signal analysis and the peak hold method for calculating $VLz_{\max}$ and $VAL_{\max}$.

Keywords: urban rail transit; environmental vibration; evaluation standard; weighting curve; vibration level

收稿日期: 2025-08-06 修回日期: 2025-11-11

作者简介: 罗伟, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通减振降噪技术研究工作, 657927429@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272348); 中铁第四勘察设计院集团有限公司重大科技开发课题(KY2023042S, KY2023131S, KY2024002S)

引用格式: 罗伟. 城市轨道交通车致环境振动评价标准对比研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 29–37.

Luo Wei. Comparative study on train-induced environmental vibration evaluation standards for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 29–37.

城市轨道交通可极大缓解城市交通拥堵的压力，但也不可避免地引起诸多伴生问题，其中列车运行引起的振动经下部结构及大地传播后，会对沿线居民的生活工作、建筑物的结构寿命及精密仪器设备的正常使用造成不利影响^[1-2]，即城市轨道交通车致环境振动问题。

对车致振动的准确评价，直接影响城市轨道交通减振等级的评定和措施的选用，当评价结果高于实际超标量时，会导致过减振进而造成工程浪费，而当评价结果低于实际超标量时，则会导致欠减振进而带来超标投诉等不利的社会影响。针对城市轨道交通车致环境振动的评价，我国现行可参考的相关标准包括《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)、《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)、《环境影响评价技术导则城市轨道交通》(HJ 453—2018)、《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)及《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)等。此外，浮置板轨道减振效果评价还常采用《浮置板轨道技术规范》(CJJ/T 191—2012)。当对城市轨道交通车致环境振动的影响进行评价时，现行相关标准在评价指标设定、评价指标计算方法、评价指标计算参数等方面存在不明确或不统一之处，容易对使用者造成一定困扰，给评价工作带来极大不便，国内相关学者对此从不同角

度做了一些初步探讨和分析^[3-5]。本文在梳理我国城市轨道交通车致环境振动评价相关现行标准的基础上，针对其中若干问题进行深化研究，并提出合理建议，以期为我国城市轨道交通车致环境振动的评价提供参考。

1 现行评价标准介绍

1.1 重要条款对比

表 1 从 6 个方面对与城市轨道交通车致环境振动评价强相关的 7 部标准进行对比，可以看出：计权标准方面，国际标准 ISO 2631.1: 1985 推荐采用 W 计权曲线，修订后的 ISO 2631.1: 1997 推荐采用 W_k 计权曲线，GB 10070—88 和 GB 10071—88 自 1988 年发布至今并未进行修订，仍采用 W 计权曲线，HJ 453—2018 因引用 GB 10070—88 和 GB 10071—88，采用的也是 W 计权曲线，其余标准均采用 W_k 计权曲线；评价量方面，除 GB 50868—2013 采用垂向振动加速度外，其余标准的 Z 振级 VL_z 和振动加速度级 VAL 在城市轨道交通车致环境振动的评价中均有采用；评价指标方面，目前采用的有 Z 振级 VL_z 、最大 Z 振级 VL_{zmax} 、分频振级 VAL_f 、最大分频振级 VAL_{max} 和垂向振动 4 次方剂量值；分析频率范围方面，上限有 80 Hz 和 200 Hz 2 种，其中以 80 Hz 为主；时间计权方式方面，GB 10070—88、GB 10071—88 和 HJ 453—2018 规定采用时间常数为 1 s 的计权方式，其余标准均未明确规定；列车通过时段判断规则方面，各标准均未明确规定。

表 1 现行相关评价标准对比
Table 1 Comparison of current evaluation standards

项目标准编号	计权标准	评价量	评价指标	分析 频率范围	时间 计权方式	列车通过 时段判断规则
GB 10070—88 GB 10071—88	W 曲线	Z 振级 VL_z	$VL_{z\max}$	1 ~ 80 Hz	时间常数为 1 s 的计权方式	未明确规定
HJ 453—2018	W 曲线	Z 振级 VL_z	$VL_{z\max}$	1 ~ 80 Hz		
GB/T 50355—2018	W_k 曲线	时频综合评价量: VL_z 分频评价量: VAL	VAL_f	1 ~ 80 Hz	未明确规定	
GB 50868—2013	W_k 曲线	垂向振动加速度	垂向振动 4 次方剂量值	1 ~ 80 Hz		
JGJ/T 170—2009	自定义, 与 W_k 曲线接近	振动加速度级 VAL	$VAL_{\max}$	1 ~ 200 Hz		
CJJ/T 191—2012	执行 JGJ/T 170—2009	Z 振级 VL_z	VL_z	4 ~ 200 Hz	不进行时间计权	

1.2 时间计权、评价量及评价指标

根据 ISO 8041.1—2017《人体对振动的反应 测量仪 第 1 部分: 通用测振仪》，振动信号需要进行时间计权分析，将连续采集的信号划分为若干个等时长 t (时间常数)的段落，对每段数据分别进行计算，提取

用以代表该时段内信号量级的有效值，进而获得全部测量时间内信号量级的有效值。GB 10071—88 采用了时间常数 $t=1$ s 的时间计权方式。

图 1 为一组典型的城市轨道交通车致环境振动数据，按照 GB 10071—88 的规定，为了获取该振动数

据对应的评价指标,数据被时长为 1 s 的窗口逐步截取,然后逐窗口进行 1/3 倍频程分析,得到表 2 所示的计算结果,进而可提取出表 1 所列的评价量和评价指标。在表 2 中, M 为中心频率个数; N 为时间窗口移动步数; $VAL_{11} \sim VAL_{MN}$ 为 $M \times N$ 个振动加速度级; VAL_{fi} 是由 $VAL_{11} \sim VAL_{MN}$ 进一步计算得到的中心频率 f_i 对应的振动加速度级(简称“分频振级”),即分频评价量,具体计算方法在 1.3 节中介绍; VLz_k 为第 k 步时间窗口内的数据计算得到的 Z 振级,即所说的时频综合评价量,其时域分布如图 2 所示。然后,求所有分频振级 VAL_{fi} 的最大值,即为 GJ/T 170—2009 采用的分频评价指标最大分频振级 $VAL_{\max}$; 求所有时频综合评价量 $VLz_1 \sim VLz_N$ 的最大值,即为 GB 10070—88 和 GB 10071—

88 采用的评价指标 $VLz_{\max}$ 。

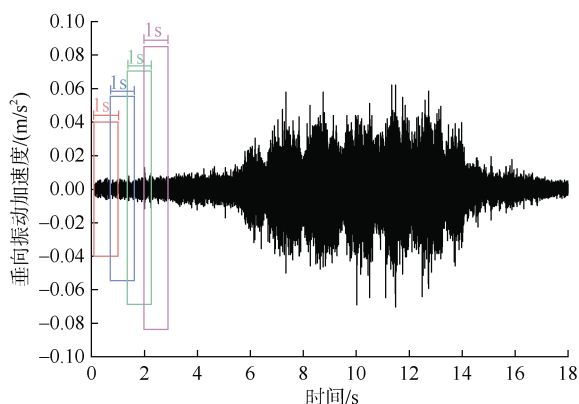


图 1 典型城市轨道交通车致环境振动样本

Figure 1 Typical sample of train-induced environmental vibration

表 2 基于时间常数 1 s 计权方式进行分析所得评价量及评价指标

Table 2 Evaluation quantities and indicators obtained using time weighting with a 1-second time constant

中心频率	时间段落							分频 评价量	分频 评价指标
	t_1	t_2	...	t_k	...	t_{N-1}	t_N		
f_1	VAL_{11}	VAL_{12}	...	VAL_{1k}	...	$VAL_{1(N-1)}$	VAL_{1N}	VAL_{f1}	$VAL_{\max}$
f_2	VAL_{21}	VAL_{22}	...	VAL_{2k}	...	$VAL_{2(N-1)}$	VAL_{2N}	VAL_{f2}	
f_3	VAL_{31}	VAL_{32}	...	VAL_{3k}	...	$VAL_{3(N-1)}$	VAL_{3N}	VAL_{f3}	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
f_i	VAL_{i1}	VAL_{i2}	...	VAL_{ik}	...	$VAL_{i(N-1)}$	VAL_{iN}	VAL_{fi}	
f_{i+1}	$VAL_{(i+1)1}$	$VAL_{(i+1)2}$	...	$VAL_{(i+1)k}$	...	$VAL_{(i+1)(N-1)}$	$VAL_{(i+1)N}$	$VAL_{f(i+1)}$	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
f_{M-1}	$VAL_{(M-1)1}$	$VAL_{(M-1)2}$	...	$VAL_{(M-1)k}$	...	$VAL_{(M-1)(N-1)}$	$VAL_{(M-1)N}$	$VAL_{f(M-1)}$	
f_M	VAL_{M1}	VAL_{M2}	...	VAL_{Mk}	...	$VAL_{M(N-1)}$	VAL_{MN}	VAL_{fM}	
时频综合评价量 VLz	VLz_1	VLz_2	...	VLz_k	...	$VLz_{(N-1)}$	VLz_N	/	/
时频综合评价指标	$VLz_{\max}$							/	/

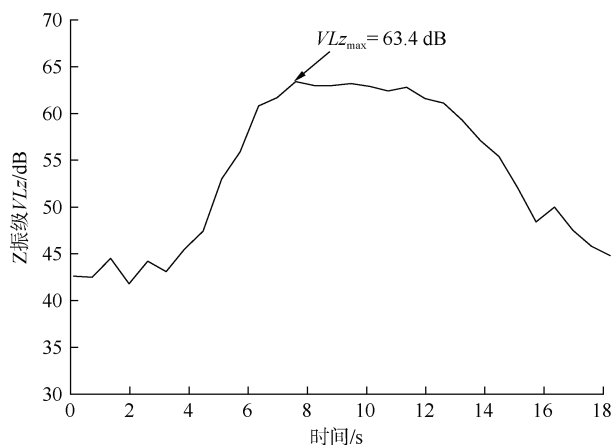


图 2 VLz 时程曲线

Figure 2 Time history of VLz

1.3 评价指标计算方法

从 1.2 节的分析可知, GB 10070—88 和 GB 10071—88 所涉评价指标 $VLz_{\max}$ 的计算过程清晰, 此外 GB 50868—2013 给出了垂向振动 4 次方剂量值的计算公式, CJJ/T 191—2012 也给出了 VLz 的计算公式, 均不存在计算方法的分歧。但需要指出的是, CJJ/T 191—2012 采用的计算方法是对整个列车通过时段的振动数据做 1 次 1/3 倍频程分析, 与 GB 10070—88 和 GB 10071—88 采用的将振动数据进行时间常数为 1 s 的计权分析并不相同。

JGJ/T 170—2009 评价指标的定义决定了其必须沿用 GB 10070—88 和 GB 10071—88 规定的时间计权方式计算 $VAL_{11} \sim VAL_{MN}$, 但并未明确由 $VAL_{11} \sim VAL_{MN}$ 进

一步计算各分频振级的方法，不同方法会导致评价指标 $VAL_{\max}$ 计算结果出现明显差异。

分频振级常用的确定方法为峰值保持法和线性平均法^[6]。在求中心频率 f_i 对应的分频振级 VAL_{f_i} 时，峰值保持法对所有时间窗口内中心频率 f_i 对应的振动加速度级取最大值，如式(1)所示；线性平均法则对所有时间窗口内中心频率 f_i 对应的振动加速度级取平均值，如式(2)所示。进一步地，取所有分频振级的最大值，即可得到 JGJ/T 170—2009 采用的分频评价指标 $VAL_{\max}$ ，如式(3)所示。

$$VAL_{f_i} = \max_{k=1 \rightarrow N} (VAL_{ik}) \quad i \in (1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

$$VAL_{f_i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N VAL_{ik} \quad i \in (1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

$$VAL_{\max} = \max_{i=1 \rightarrow M} (VAL_{f_i}) \quad (3)$$

2 现行标准存在的问题

现行评价标准在计权标准、评价指标设定、分析频率范围等方面的规定上存在诸多不一致、不明确之处，具体包括： W 和 W_k 新旧计权曲线并用，更新不及时，如图 3 所示；新旧 2 种计权曲线存在显著差异；分频振级的计算方法不明确，导致评价指标 $VAL_{\max}$ 计算结果有差异；列车通过时段无判断规则，受不同分析人员主观因素的影响，列车通过时段的判断势必存在差异，如图 4 所示， t_{si} 、 t_{ei} 代表不同数据分析人员所判断的列车通过时段起终点；评价指标设定不统一，且主次不明；分析频率范围不一致。

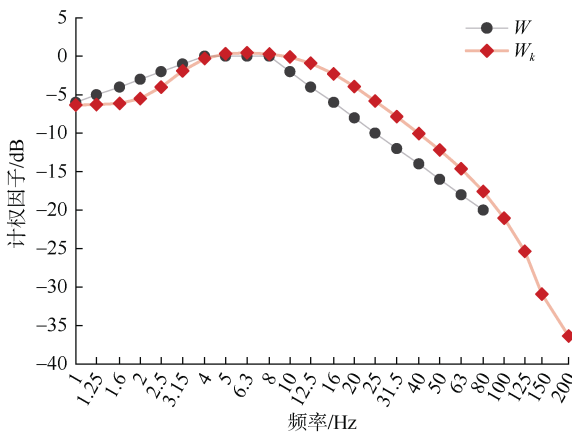


图 3 W 和 W_k 计权曲线
Figure 3 Comparison of W and W_k weighting curves

可以预见，这些不一致、不明确之处势必会对城市轨道交通车致环境振动的准确评价造成一定困扰。我

国城市轨道交通减振措施通常按照中等、高等、特殊 3 级设置，以最新发布的安徽省地方标准《城市轨道交通轨道减振设计与评价标准》(DB34/T 4572—2023)为例，各级减振分别对应的振动超标量、常用措施及其单价如表 3 所示。中等、高等、特殊 3 个等级对应的振动超标量为连续分布，评价结果的偏差可能导致对减振措施等级的错误评定，而由此造成的工程投资偏差不容忽视，其中常用的高等减振措施较中等减振措施每千米增加 620 万元，特殊减振措施较高等减振措施每千米增加 600 万元。

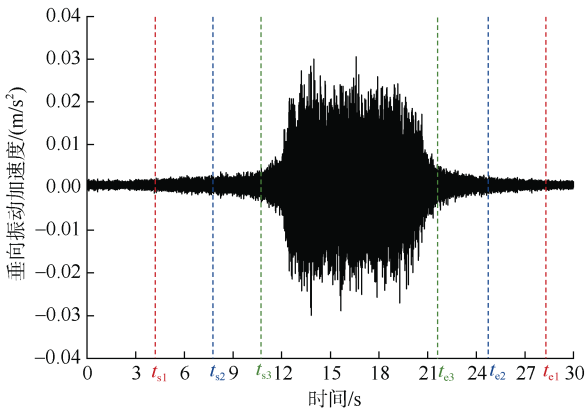


图 4 列车通过时间的判断
Figure 4 Judgment of train passing period

表 3 城市轨道交通减振等级划分及常用措施
Table 3 Classification of vibration reduction levels and common measures for urban rail transit

振动超标量	措施等级	常用措施	单价/(万元/km)
≤3 dB	中等	减振扣件	580
3~8 dB	高等	橡胶隔振垫减振道床	1 200
≥8 dB	特殊	钢弹簧浮置板道床	1 800

注：单价考虑市场行为因素可能存在偏差。

3 存在的问题对评价结果的影响

3.1 车致环境振动数据样本

选取某地铁列车通过普通整体道床、减振扣件整体道床、橡胶隔振垫减振道床和钢弹簧浮置板道床 4 个断面所致隧道壁振动(车致环境振动源强)的 407 组加速度为数据样本，针对现行标准存在的问题对城市轨道交通车致环境振动评价的影响进行详细分析。数据样本采集概况见表 4，加速度计安装位置为轨面上方 1.25 m 处隧道内壁(为现行标准规定的振动源强测点)。如无特殊说明，本文所列各断面结果均为全部数据样本的算术平均值。

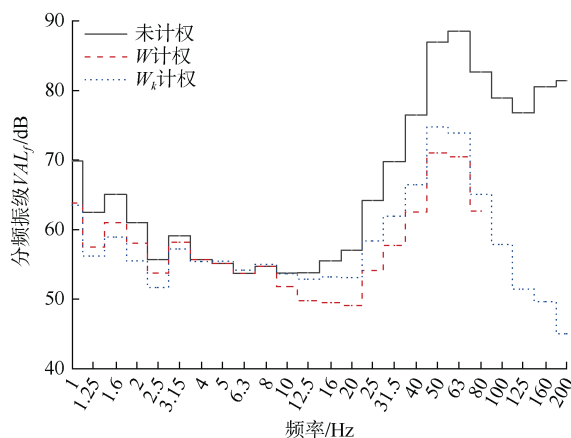
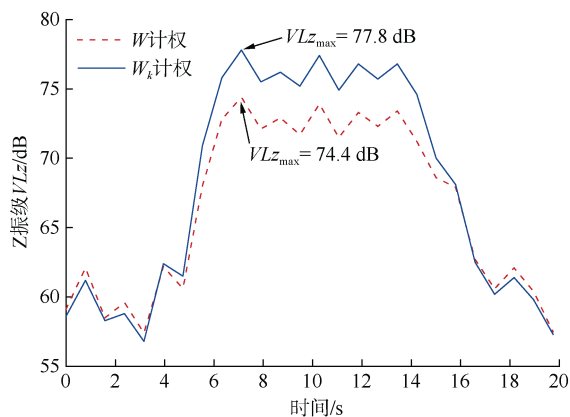
表4 现场测试数据采集概况

Table 4 Overview of in-situ test data collection

断面编号	轨道类型	直/曲线	车速/(km/h)	样本数
断面1	普通整体道床	直线	60	68
断面2	减振扣件整体道床	直线	60	101
断面3	橡胶隔振垫减振道床	直线	60	126
断面4	钢弹簧浮置板道床	直线	60	112

3.2 计权标准

采用 W 和 W_k 2 种计权曲线, 计算断面 1 的分频振级、Z 振级, 结果如图 5 和图 6 所示。从图 5 可知: 在 10~80 Hz 范围内基于 W 计权曲线的分频振级显著小于基于 W_k 计权曲线的, 这一结果与图 3 所示的 2 种计权曲线权系数的大小关系对应。由图 6 可知: 对于 Z 振级的时程曲线, 基于 W 计权的 Z 振级小于基于 W_k 计权曲线的, 尤其在列车通过时段内两者之间的差异更加显著。

图5 计权方式对分频振级 VAL_f 的影响Figure 5 Effect of weighting methods on VAL_f 图6 计权方式对 Z 振级 VL_z 的影响Figure 6 Effect of weighting methods on VL_z

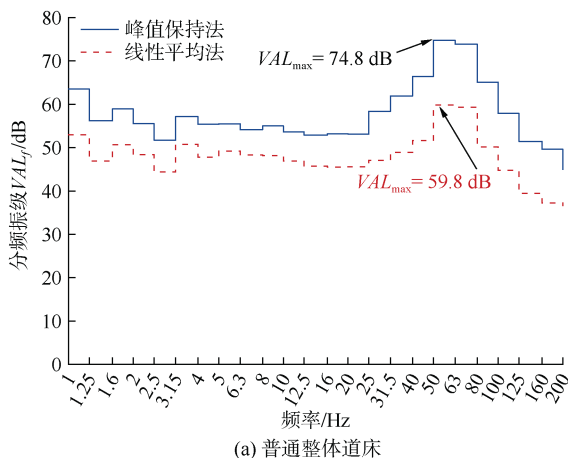
采用 W 和 W_k 2 种计权曲线, 各断面时频综合评价指标 $VL_{z_{max}}$ 的计算结果及各轨道减振措施减振效果的评价结果见表 5。采用 W 和 W_k 2 种计权曲线, 普通整体道床、减振扣件整体道床、橡胶隔振垫减振道床和钢弹簧浮置板道床断面振动源强 $VL_{z_{max}}$ 的差值分别为 3.3、3.8、3.4 和 1.7 dB; 减振扣件整体道床、橡胶隔振垫减振道床和钢弹簧浮置板道床的减振效果差值分别为 0.5、0.1 和 1.6 dB。因此, 采用 W 计权曲线存在低估城市轨道交通振动环境影响的可能, W 和 W_k 2 种计权曲线也对减振轨道的减振效果评价产生较大影响。而相较于 W 计权曲线, W_k 计权曲线能更加准确地反映环境振动对人体健康、舒适度及感觉等方面的影响。因此, 建议在对 GB 10070—88 及 GB 10071—88 进行修编时, 采用 ISO 2631.1: 1997 推荐的 W_k 计权曲线。

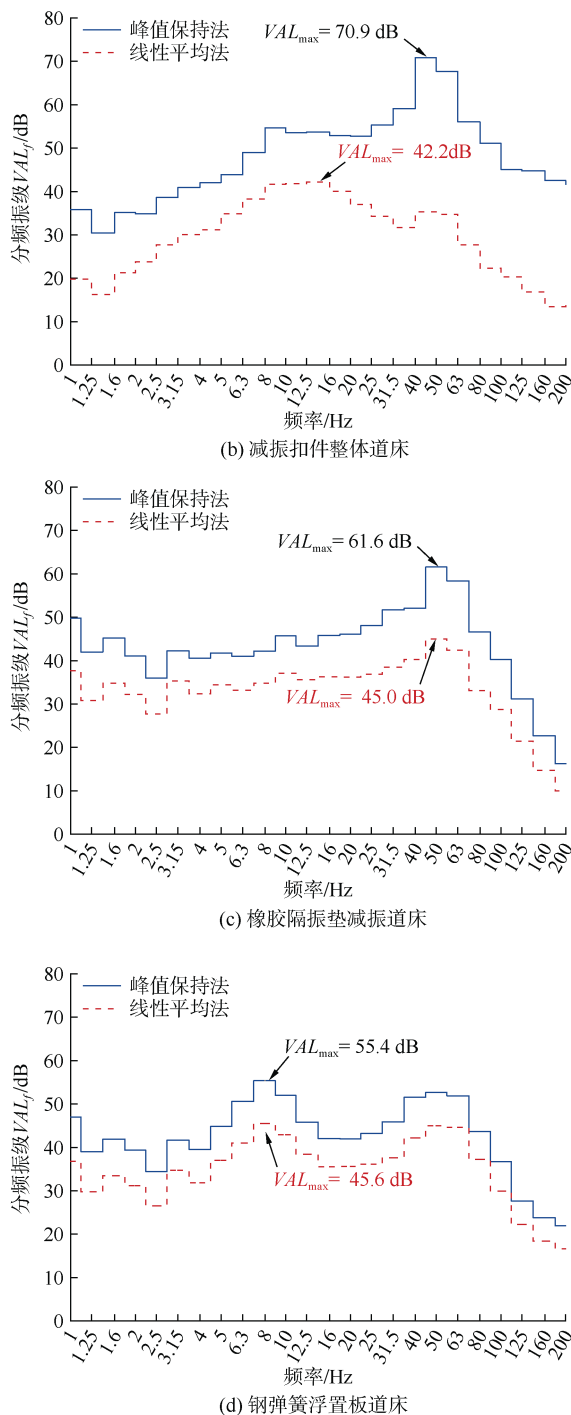
表5 基于不同计权标准的评价指标 $VL_{z_{max}}$ 计算结果Table 5 Calculation results of the evaluation indicator $VL_{z_{max}}$ based on different weighting standards dB

计权标准	普通整体道床 振动源强	减振扣件整体道床 振动源强/ 减振效果	橡胶隔振垫 减振道床 振动源强/ 减振效果	钢弹簧 浮置板道床 振动源强/ 减振效果
W 计权曲线	74.5	68.7/5.8	60.3/14.2	59.1/15.4
W_k 计权曲线	77.8	72.5/5.3	63.7/14.1	60.8/17.0
差值	3.3	3.8/0.5	3.4/0.1	1.7/1.6

3.3 评价指标计算方法

由于现行的部分标准并未明确规定分频振级的计算方法, 常用的有峰值保持法和线性平均法。采用 2 种计算方法, 计算 4 个断面分频振级及分频评价指标 VAL_{max} 结果如图 7 所示。采用峰值保持法得到的分频振级显著大于采用线性平均法的, 其中采用峰值保持法得到的分频评价指标 VAL_{max} 更加接近时频综合



图7 2种计算方法对分频振级 VAL_f 的影响Figure 7 Effect of two calculation methods on VAL_f

评价指标 $VLz_{\max}$, 而采用线性平均法得到的分频评价指标 $VAL_{\max}$ 偏离时频综合评价指标 $VLz_{\max}$ 较大。可见采用线性平均法得到的分频评价指标 $VAL_{\max}$ 已显著偏离振动对沿线居民的实际影响程度, 其原因主要在于: 列车运行所致振动加速度的时程曲线总体上呈现两头小中间大的橄榄球形状, 如图1所示, 线性平均

法会导致两端部(尤其位于列车通过时段外的)数据的计算结果拉低 $VAL_{\max}$ 的数值。因此, 建议采用峰值保持法进行计算。

3.4 列车通过时段判断

图8为2种不同计算方法下列车通过时段判断对分频振级计算结果的影响。2种计算方法中, 采用峰值保持法可有效避免列车通过时段判断对计算结果造成的影响, 而采用线性平均法受列车通过时段判断的影响则比较显著。

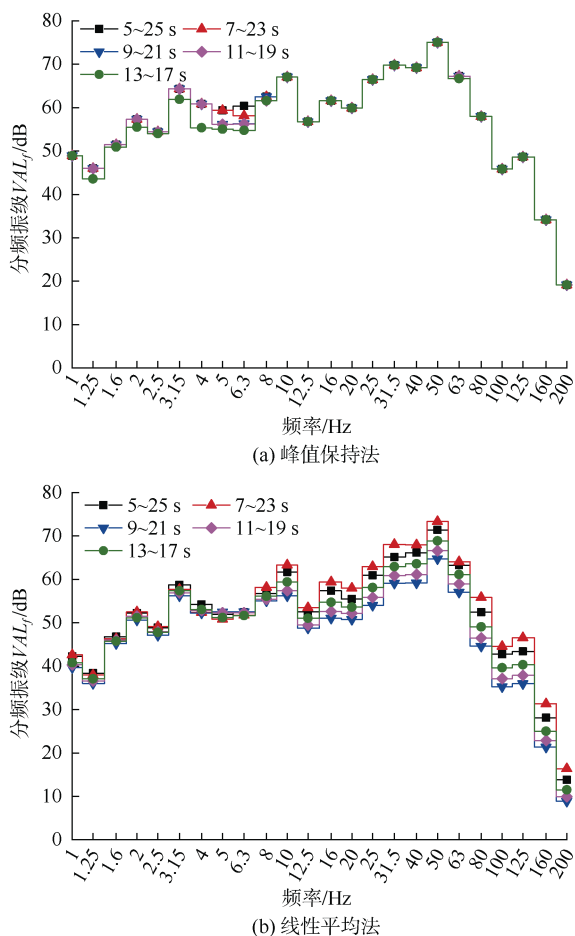
图8 列车通过时段判断对分频振级 VAL_f 的影响Figure 8 Effect of judgment of train passing period on VAL_f

图9为列车通过时段判断对同一组振动数据时频综合评价量 VLz 及时频综合评价指标 $VLz_{\max}$ 计算结果的影响, 图中还包含了 HJ 453—2008 版环评导则所采用的另一时频综合评价指标——累计百分比 Z 振级 VLz_{10} 。 $VLz_{\max}$ 的计算结果不受列车通过时段判断的影响, 而 VLz_{10} 计算结果受列车通过时段判断的影响比较显著。这也为 HJ 453—2018 版环评导则摒弃 VLz_{10} 这一评价指标提供了理论依据。

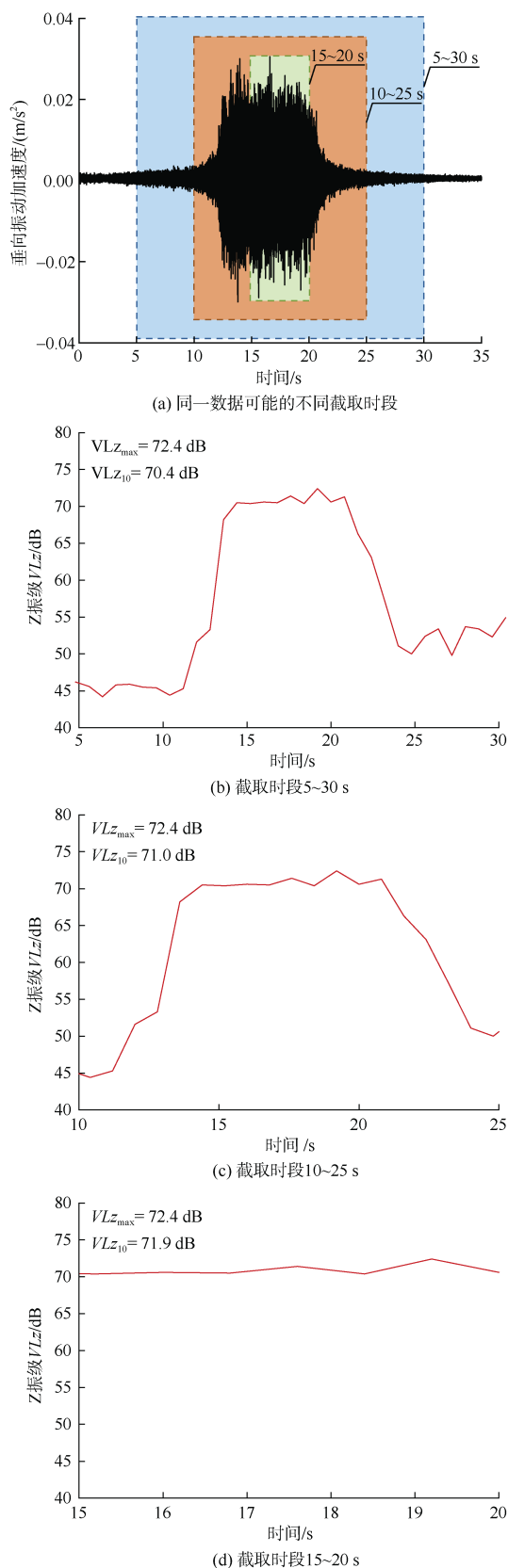


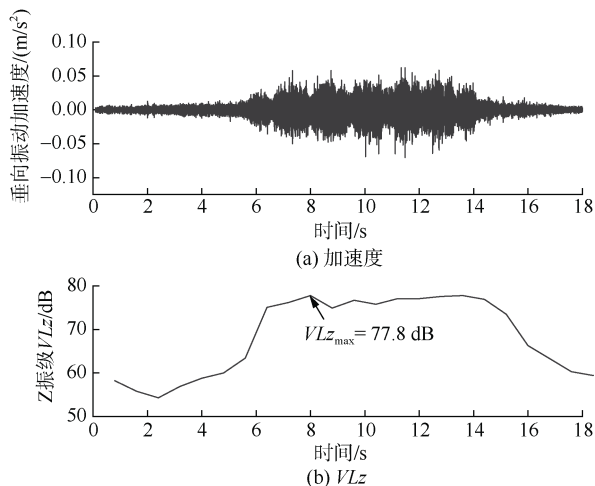
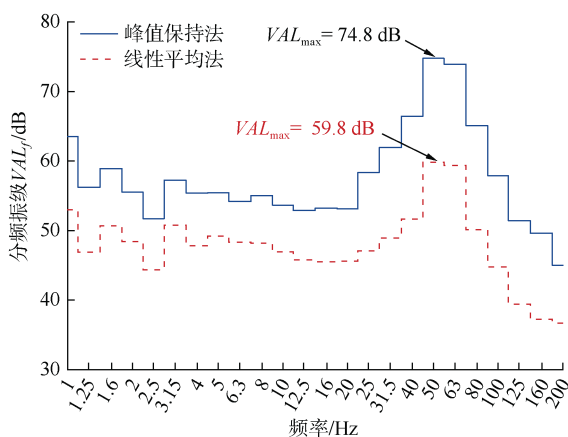
图9 通过时段判断对时频综合评价指标计算结果的影响

Figure 9 Effect of train passing period determination on time-frequency evaluation indicators

因此,列车通过时段判断是影响评价结果的重要主观因素,为了避免其影响,时频综合评价指标建议设为 $VLz_{\max}$, 分频评价指标设为 $VAL_{\max}$, 并采用峰值保持法进行计算。

3.5 评价量及评价指标设定

现行标准采用的评价指标并不统一,其中 $VLz_{\max}$ 和 $VAL_{\max}$ 是最为常用的2种,图10和图11为同一组振动数据2种评价指标的计算结果。 $VLz_{\max}$ 的计算结果为77.8 dB,而 $VAL_{\max}$ 采用峰值保持法的计算结果为74.8 dB,采用线性平均法的计算结果为59.8 dB。

图10 加速度样本及 VLz 时程曲线Figure 10 Time history of VLz and calculation of $VLz_{\max}$ 图11 VAL_f 及 $VAL_{\max}$ 计算结果Figure 11 Calculation results of VAL_f and $VAL_{\max}$

采用2种评价指标,各断面振动量级的计算结果以及对各轨道减振措施减振效果的评价结果见表6。采用2种评价指标,无论是各断面振动量级还是轨道减振效果的评价,均存在着比较显著的差异,尤其是以 $VAL_{\max}$ 作为评价指标并采用线性平均法计算时相关计算

表6 基于不同评价指标的振动量级计算结果

Table 6 Calculation results of vibration magnitude based on different evaluation indicators dB

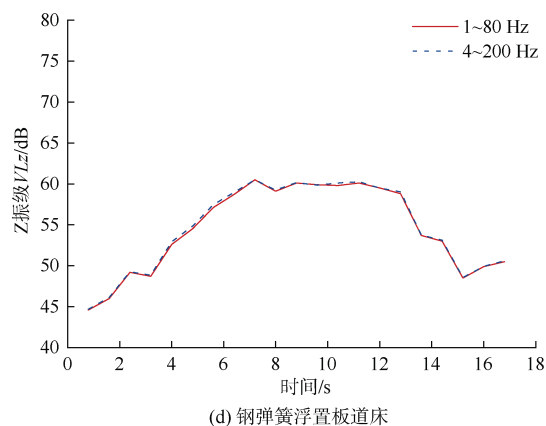
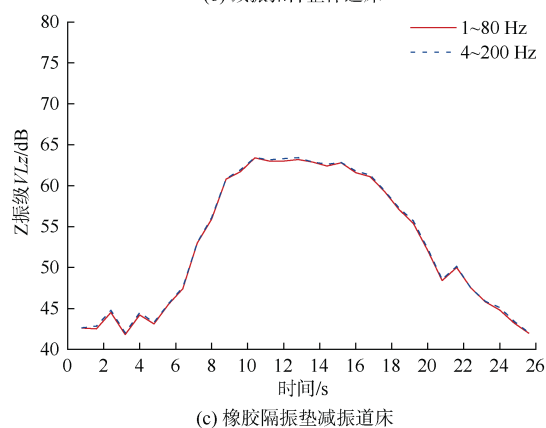
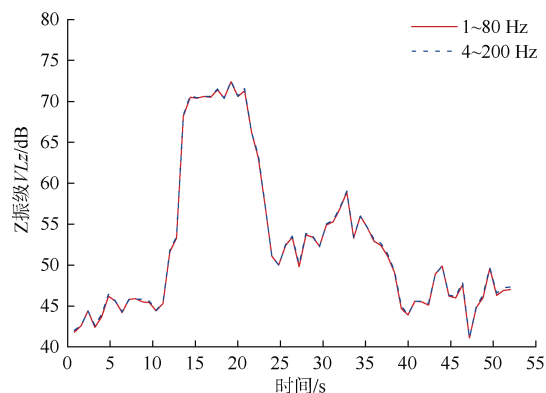
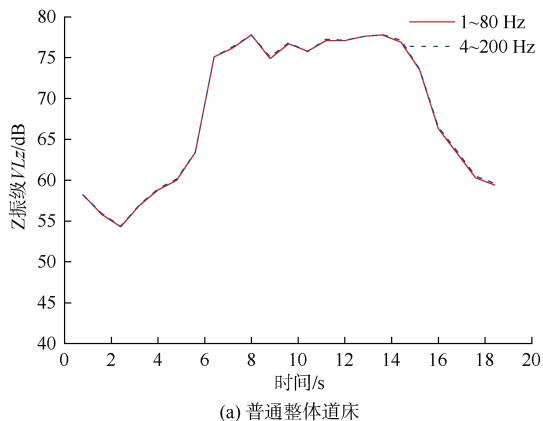
评价指标	普通整体道床 振动源强	减振扣件 整体道床 振动源强/ 减振效果	橡胶隔振垫 减振道床 振动源强/ 减振效果	钢弹簧 浮置板道床 振动源强/ 减振效果
$VLz_{\max}$	77.8	72.4/5.4	63.7/14.1	60.8/17.0
$VAL_{\max}$ (峰值保持法)	74.8	70.9/3.9	61.6/13.2	55.4/19.4
$VAL_{\max}$ (线性平均法)	59.8	42.2/17.6	45.0/14.8	45.6/14.2

结果已严重失真。考虑振动对沿线居民的影响是所有频率振动分量综合作用的结果,同时兼顾人体不同部位、不同类型受振体如古建筑、精密仪器设备等受不同频率振动分量影响的差异性,建议同时设时频综合评价指标和分频评价指标,以 $VLz_{\max}$ 为主要指标, $VAL_{\max}$ 为辅助指标,其中主要指标 $VLz_{\max}$ 为用于与《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)等相关限值标准对照评定减振措施等级,辅助指标 $VAL_{\max}$ 则结合受振体类型,用以指导对特殊敏感频率振动分量进行控制的针对性设计。

3.6 分析频率范围

图12以时频综合评价量 VLz 为例展示了1~80和4~200 Hz 2种分析频率范围对源强振动量级计算结果的影响。2种分析频率范围条件下的计算结果并未显示出明显的差异。

大量试验研究结果表明^[7-9],城市轨道交通列车运行所诱发的地面(或建筑物室内)振动主频一般为50~60 Hz。相关研究还发现^[10-11],人体各部位的敏感频率通常较低(一般低于80 Hz),对于垂向振动,主要为4~8 Hz,躺卧时头部敏感频率相对较大,为50~70 Hz。此外,在国外振动环境影响评价的有关标准中,分析频率范围多规定为1~80 Hz^[12-14],而作为我国振动环境

图12 分析频率范围对Z振级 VLz 的影响Figure 12 Effect of analysis frequency range on VLz

影响评价采用的基础性标准,ISO 2631.1—1997在其推荐的 W_k 计权曲线中,赋予80 Hz以上中心频率处的计权系数均在-20 dB以下,这表明80 Hz以上振动分量的权重较小。因此,建议将我国城市轨道交通车致环境振动评价相关标准的分析频率范围进行统一,采用1~80 Hz。

4 结论

本文对我国城市轨道交通振动环境影响评价现行相关标准进行梳理和对比分析,主要结论和建议如下:

1) 采用 W 和 W_k 2 种计权曲线计算最大 Z 振级 $VLz_{\max}$, 基于本文数据样本的差值达 1.7~3.8 dB, 采用 W 计权曲线存在低估城市轨道交通振动环境影响的可能, 建议在对 GB 10070—88 及 GB 10071—88 进行修编时, 计权标准采用 ISO 2631.1: 1997 推荐的 W_k 计权曲线。

2) 现行标准中常用 $VLz_{\max}$ 和 $VAL_{\max}$ 2 种评价指标, 评价结果存在差异。考虑到振动对沿线居民的影响既是所有频率振动分量综合作用的结果, 同时兼顾人体各部位受不同频率振动分量影响的差异性, 建议同时设时频综合评价指标 $VLz_{\max}$ 和分频评价指标 $VAL_{\max}$, 并以 $VLz_{\max}$ 为主要指标, $VAL_{\max}$ 为辅助指标。

3) 列车通过时段判断为影响振动评价结果的 1 个重要的主观因素, 为了避免其影响, 建议时频综合评价指标建议设为 $VLz_{\max}$, 分频评价指标设为 $VAL_{\max}$, 并采用峰值保持法进行计算。

4) 分析频率范围为 1~80 和 4~200 Hz 对振动评价指标计算结果的影响并不显著, 但鉴于国内外现行标准多采用 80 Hz 为上限频率, 且最新版的计权标准 W_k 计权曲线赋予 80 Hz 以上中心频率的权系数较小, 建议将分析频率范围统一为 1~80 Hz。

参考文献

- [1] Li Minghang, Ma Meng, Cao Zhonglei, et al. Dynamic response analysis of train-induced vibration impact on the Probhutaratna pagoda in Beijing[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2021, 20(1): 223-243.
- [2] Qu Shuai, Yang Jianjin, Zhu Shengyang, et al. A hybrid methodology for predicting train-induced vibration on sensitive equipment in far-field buildings[J]. Transportation geotechnics, 2021, 31: 100682.
- [3] 罗伟. 温州市域铁路高架线环境振动源强试验研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 108-112.
Luo Wei. Experimental study on the environmental vibration source of Wenzhou suburban railway elevated line[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(3): 108-112.
- [4] 张凌, 雷晓燕, 刘全民, 等. 地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(1): 89-94.
Zhang Ling, Lei Xiaoyan, Liu Quanmin, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2020, 40(1): 89-94.
- [5] 罗伟, 李秋义, 林海锋, 等. 现行城市轨道交通振动环境影响评价标准讨论[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 13-17.
Luo Wei, Li Qiuyi, Lin Haifeng, et al. Discussion on current urban rail transit vibration environmental impact evaluation standards[J]. Urban mass transit, 2022, 25(12): 13-17.
- [6] 杜林林, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 城市轨道交通环境振动评价指标计算与分析[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(5): 40-45.
Du Linlin, Liu Weining, Liu Weifeng, et al. Computation and analysis of evaluation indicators of environmental vibration induced by urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2017, 30(5): 40-45.
- [7] 贾晓宏, 石广田. 地铁列车在隧道运行时引起的环境振动影响分析[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(2): 104-110.
Jia Xiaohong, Shi Guangtian. Analysis of environmental vibration impact induced by metro train running in tunnels[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2025, 44(2): 104-110.
- [8] 刘文武, 冯青松, 罗信伟, 等. 地铁隧道振动源强受车辆状态影响因素实测分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 24-31.
Liu Wenwu, Feng Qingsong, Luo Xinwei, et al. Measured analysis of vibration source strength in metro tunnels influenced by vehicle condition factors[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 24-31.
- [9] 杨宜谦, 刘鹏辉, 房斌, 等. 城市轨道交通地下线振动源机理和频率特性[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 171-178.
Yang Yiqian, Liu Penghui, Fang Bin, et al. Vibration source mechanism and frequency characteristics of underground lines of urban rail transits[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(4): 171-178.
- [10] 郭云强, 刘忠, 杨先海, 等. 坐姿人体动态特性的有限元法研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(6): 1445-1452.
Guo Yunqiang, Liu Zhong, Yang Xianhai, et al. The dynamic characteristics of sitting human body studied by finite element method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(6): 1445-1452.
- [11] 林杰威, 李蒙, 郭智, 等. 垂向振动下坐姿人体局部频率敏感特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(5): 482-488.
Lin Jiewei, Li Meng, Guo Zhi, et al. Research on local frequency-dependence of seated human body under vertical vibration[J]. Journal of Tianjin University, 2024, 57(5): 482-488.
- [12] American National Standard. Guide to the evaluation of human exposure to vibration in buildings: ANSI S3.29—1983[S]. Acoustical Society of America, 1983.
- [13] British Standards. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings Vibration sources other than blasting: BS 6472.1—2008[S]. British Standards Institution, 2008.
- [14] German Institute for Standardisation. Structural vibration—Part 2: Human exposure to vibration in buildings: DIN 4150.2—1999[S]. German Institute for Standardisation, 1999.

(编辑: 傅依萱)