

文章编号:1006-1355(2017)02-0192-05

# 城市轨道交通环境影响评价振动预测模型对比分析

曹宇静

(中国铁道科学研究院, 北京 100081)

**摘要:**近年来,城市轨道交通发展迅速,在已经开通运营的线路中,地下线比重相当大,约占总线路长度的70%。地下线在运营过程中产生的环境影响主要为环境振动。因此,预测列车运营过程中产生的环境振动影响是地下线环境影响评价的关键。通过系统地对比分析国家环境保护标准《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ453-2008)和北京市地方标准《地铁噪声与振动控制规范》(DB11/T 838-2011)中推荐的环境振动预测模型,结合地铁实际运营过程中产生的环境振动影响,分析这两种振动预测模型各自的优点和不足之处,为下一阶段国标和北京市地标的修订工作提出针对性的意见和建议。

**关键词:**环境振动;城市轨道交通;地下线;环境影响评价;振动预测模型

中图分类号:TH113.1

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.039

## Comparison and Analysis of Vibration Prediction Models in Environmental Impact Assessment of Urban Rail Transit

CAO Yu-jing

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract :** Urban rail transit has developed rapidly in recent decades. Underground lines occupy a considerable proportion, about 70 %, of all the rail transit lines. However, the running trains on the underground transit lines can cause environmental vibration. Therefore, prediction of the environmental vibration induced by the underground trains operation is the key of the environmental impact assessment of the underground transit lines. In this paper, the vibration prediction models recommended by the state environmental protection standard—“Technical Guidelines for Environment Impact Assessment of Urban Rail Transit” (HJ453- 2008) and the local environmental protection standard of Beijing—“Code for Application Technique of Metro Noise and Vibration Control” (DB11/T 838 - 2011) are compared and analyzed. Considering the environmental vibration impact in the process of actual train operation, the advantages and disadvantages of the two vibration prediction models are analyzed. The corresponding opinions and suggestions are proposed for further revision of the national standard and the Beijing local standard.

**Keywords :** environmental vibration; urban rail transit; underground lines; environmental impact assessment; vibration prediction model

城市轨道交通是指具有运量大、速度快、安全、准点、保护环境、节约能源和用地等特点的交通方式,包括地铁、轻轨、快轨、有轨电车等。根据《2015年中国城市轨道交通运营线路统计和分析》<sup>[1]</sup>,截至2015年12月31日,中国内地开通运营城市轨道交通线路的城市共计25座,运营线路总长为3 293 km。在各城市轨道交通运营里程排序中,上海以627 km名列第一,北京以555 km名列第二,广州、南京、重庆分别以260 km、232 km、202 km名列

第三、四、五名。在各城市轨道交通运营线路数量排序中,北京以18条线路名列第一,上海以16条线路名列第二,广州、南京、大连分别以10条、7条、6条名列第三、四、五名。在中国内地所有的城市轨道交通运营线路中,有地下线、高架线、地面线等几种形式,其中,以地下线为主,地下线约占总线路长度的70%。

鉴于目前城市轨道交通线路敷设方式以地下线路为主,地下线路的振动影响是城市轨道交通的主要环境影响问题。列车运行过程中,由于车轮与钢轨之间产生撞击,经钢轨、扣件、轨枕、道床向隧道结构传递,再经隧道结构传到地面,并通过地面向建筑物传播,从而对周围区域产生振动干扰<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2016-11-04

作者简介:曹宇静(1985—),女,内蒙古乌兰察布市人,硕士,目前主要从事城市轨道交通环境影响评价工作。  
E-mail: 780954650@qq.com

因此,环境振动影响预测是城市轨道交通地下线环境影响评价的重要内容,而振动预测模型的确定又是环境振动影响预测的关键。

### 1 目前普遍采用的振动预测模型

目前城市轨道交通地下线环境振动影响预测方法普遍采用模型预测法,振动预测模型主要分为两类:一类为国家环境保护标准《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ453-2008)<sup>[3]</sup>中推荐的环境振动预测模型(以下简称为“国标振动预测模型”);一类为地方环境保护标准,如北京市地方标准《地铁噪声与振动控制规范》(DB11/T 838-2011)<sup>[4]</sup>中推荐的环境振动预测模型(以下简称为“北京市地标振动预测模型”)。下面分别介绍一下这两种预测模型。

#### 1.1 国标振动预测模型

国标适用于地铁、轻轨等轮轨导向系统的城市轨道交通建设项目环境影响评价,单轨、有轨电车、自动导轨、直线电机轨道交通建设项目环境影响评价参照执行。

国标振动预测模型中预测点处的振动值  $VL_Z$  计算公式见式(1)。

$$VL_Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VL_{z0,i} \pm C \quad (1)$$

式中

$VL_{z0,i}$ ——列车振动源强,列车通过时段参考点的Z计权振动级;

$n$ ——列车通过列数,  $n \geq 5$ ;

$C$ ——振动修正项,单位为dB,按式(2)计算;

$$C = C_V + C_W + C_L + C_R + C_H + C_D + C_B \quad (2)$$

式中

$C_V$ ——速度修正,单位为dB;

$C_W$ ——轴重修正,单位为dB;

$C_L$ ——轨道结构修正,单位为dB;

$C_R$ ——轮轨条件修正,单位为dB;

$C_H$ ——隧道结构修正,单位为dB;

$C_D$ ——距离修正,单位为dB;

$C_B$ ——建筑物类型修正,单位为dB。

(1) 速度修正  $C_V$

$$C_V = 20 \lg \frac{v}{v_0} \quad (3)$$

式中

$v_0$ ——源强的参考速度,单位为km/h;

$v$ ——列车通过预测点的运行速度,单位为km/h。

(2) 轴重修正  $C_W$

$$C_W = 20 \lg \frac{w}{w_0} \quad (4)$$

式中

$w_0$ ——源强的参考轴重,单位为t;

$w$ ——预测车辆的轴重,单位为t。

(3) 轨道结构修正  $C_L$ ,可参考表1选用。

表1 不同轨道结构的减振量/dB

轨道结构类型	减振量(振动加速度级)
普通钢筋混凝土整体道床	0
轨道减振器式整体道床	-3~-5
弹性短轨枕式整体道床	-8~-12
橡胶浮置板式整体道床	-15~-25
钢弹簧浮置板式整体道床	-20~-30

(4) 轮轨条件修正  $C_R$ ,可参考选用表2。

表2 不同轮轨条件的减振量/dB

轮轨条件	减振量(振动加速度级)
无缝线路、车轮圆整、钢轨表面平顺	0
短轨线路、车轮不圆整、钢轨表面不平顺	5~-10

(5) 隧道结构修正  $C_H$

由于各类隧道结构差别较大,情况比较复杂,建议尽量采用类比测量法,即选择类似的隧道结构,通过类比方法确定修正值。

(6) 距离修正  $C_D$ (地下段)

① 隧道垂直上方预测点(当  $L \leq 5$  m时)

$$C_D = -a \lg \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad (5)$$

式中

$H_0$ ——隧道顶至轨顶面的距离,单位为m。

② 隧道两侧预测点(当  $L > 5$  m时)

$$C_D = -a \lg(R) + b\lambda(R) \quad (6)$$

式中

$R$ ——预测点至隧道底部外轨中心线的直线距离,单位为m,采用下式计算得出:  $R = \sqrt{L^2 + H^2}$

$L$ ——预测点至外轨中心线的水平距离,单位为m;

$H$ ——预测点至轨顶面的垂直距离,单位为m;

$\lambda$ ——地层阻尼因子,见表3。

表3 地层内部阻尼因子

地质条件	阻尼因子 $\lambda$
基岩	0~0.01
沙石土、淤泥	0.01~0.05
黏土、亚黏土、轻亚黏土	0.05~0.25

(7) 建筑物修正  $C_B$

预测建筑物室内振动时,应根据建筑物类型进行修正。不同建筑物室内振动响应不同,一般将建筑物划分为三种类型进行修正,见表4。

### 1.2 北京市地标振动预测模型

北京市地标适用于指导北京地铁建设项目噪声与振动环境影响评价工作,具体措施的设计和既有线路的降噪隔振治理可参照执行。

北京市地标振动预测模型中预测点处的振动值  $VL_{Zmax}$  计算公式见式(7)

$$VL_{Zmax} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VL_{Zmax0,i} + C \quad (7)$$

式中

$VL_{Zmax0,i}$ ——列车振动源强,列车通过时段隧道洞壁的参考点Z计权振动级最大值,单位为dB;

$n$ ——列车通过列数,  $n \geq 5$ ;

$C$ ——振动修正项,单位为dB。

振动修正项  $C$ ,按式(8)计算。

$$C = C_{\text{轨道减振措施}} + C_{\text{车速}} + C_{\text{弯道}} + C_{\text{过渡段}} + C_{\text{车况载重等}} + C_{\text{埋深}} + C_{\text{水平衰减}} + C_{\text{建筑物}} \quad (8)$$

$C_{\text{轨道减振措施}}$ ——轨道减振措施修正,单位为dB;

$C_{\text{车速}}$ ——车速修正,单位为dB;

$C_{\text{弯道}}$ ——弯道修正,单位为dB;

$C_{\text{过渡段}}$ ——过渡段修正,单位为dB;

$C_{\text{车况载重等}}$ ——车况载重修正,单位为dB;

$C_{\text{埋深}}$ ——埋深修正,单位为dB;

$C_{\text{水平衰减}}$ ——水平衰减修正,单位为dB;

$C_{\text{建筑物}}$ ——建筑物修正,单位为dB。

(1) 轨道减振措施修正  $C_{\text{轨道减振措施}}$ ,可参考表5选用。

表4 不同类型建筑物的振动修正值/dB

建筑物类型	建筑结构及特性	振动修正值
I类	基础良好框架结构建筑(高层建筑)	-13~-6
II类	基础一般的砖混、砖木结构建筑(中层建筑或质量较好的低层建筑)	-8~-3
III类	基础较差的轻质、老旧房屋(质量较差的低层建筑或简易临时建筑)	-3~3

表5 不同减振措施修正量/dB

轨道减振措施	普通扣件	初级减振措施	中级减振措施	高级减振措施	特殊减振措施
修正量	0	-5	-10	-15	-20

注:规划设计线路取普通扣件对应的修正量,既有线路取实际使用减振措施的修正量。

(2) 车速修正  $C_{\text{车速}}$ ,可参考表6选用。

表6 车速修正量/dB

运行状态	匀速状态	加速状态	减速状态
修正量	$20 \lg(V/V_0)$	+1	-1

注:  $V_0=70$  km/h

(3) 弯道修正  $C_{\text{弯道}}$ ,可参考表7选用。

表7 弯道修正量/dB

线路形式	直道或弯道 $R > 2000$ m	弯道 $500 < R \leq 2000$ m	弯道 $R \leq 500$ m
修正量	0	+1	+2

(4) 过渡段修正  $C_{\text{过渡段}}$ ,按下述方法确定:距离两种减振措施连接点前后各100 m范围内为过渡段。过渡段外修正量按表5进行修正,过渡段内应按式(9)计算。

$$C_L = C_{\text{减振措施A}} + (C_{\text{减振措施B}} - C_{\text{减振措施A}}) \times \frac{L}{200} \quad (9)$$

式中

$C_{\text{减振措施A}}$ ——A减振措施修正量,单位为dB。

$C_{\text{减振措施B}}$ ——B减振措施修正量,单位为dB。

其中  $C_{\text{减振措施A}} \geq C_{\text{减振措施B}}$

$C_L$ ——L处修正量

L——自两种减振措施连接点向A减振措施方

向延伸100 m作为原点,即为过渡段上距原点的距离。

(5) 车况载重等修正  $C_{\text{车况载重}}$ ,在车况载重轮轨条件与平稳驾驶水平等因素综合影响下,源强振动的修正量可参考表8选用。

表8 车况载重等修正量/dB

状态	修正量
列车减振系统状态较好,轮轨条件较好,载重较小	0
列车减振系统状态较差,轮轨条件较差,载重较大	+5

(6) 埋深修正量  $C_{\text{埋深}}$ ,可参考表9选用。

表9 埋深修正量/dB

地铁埋深(h)	$8 \text{ m} \leq h \leq 13 \text{ m}$	$13 \text{ m} < h \leq 17 \text{ m}$	$17 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m}$
修正量	-1	-2	-3

注:埋深是指轨顶面至地面的垂直距离。

(7) 水平衰减修正量  $C_{\text{水平衰减}}$ ,可参考表10选用。

(8) 建筑物修正量  $C_{\text{建筑物}}$ ,可参考表11选用。

## 2 两种振动预测模型的对比分析

国标和北京市地标中振动预测模型的计算公式

本质是一样的,不同的是:

(1) 国标振动预测模型的预测值和源强值为依据 ISO2631-85 Z 计权网络确定的 Z 计权振动加速度级,而北京市地标振动预测模型的预测值和源强值为依据 ISO2631-97 Z 计权网络确定的 Z 计权最大振动加速度级;

(2) 振动修正项 C 中的修正参数不完全一致。

对于同一个振动源,即在振动源强相同的情况下,使用国标和北京市地标对同一个预测对象进行预测,得出的预测值不同,主要是由于二者振动修正项 C 的不同。通过对比,可以发现,这两种振动预测模型所采用的振动修正项 C 有相同之处,亦有不同之处,分析如下:

1) 国标和北京市地标均对速度进行了修正,当列车匀速行驶时,二者的速度修正计算公式相同;不同的是北京市地标还划分了列车的不同运行状态,即分为匀速、加速、减速三个状态,不同状态下速度修正量不同,而国标没有细分,统一采用一个修正公式;

2) 国标对列车轴重进行了修正,北京市地标的振动修正项中没有考虑列车轴重这个参数;

3) 国标和北京市地标均对轨道结构进行了修正,只是在修正参数名称上有所不同,国标称之为“轨道结构修正”,北京市地标称之为“轨道减振措施修正”;虽然国标和北京市地标针对该修正参数划分的等级均为五级,但各个等级的修正量有所不同,国标给出的是一个范围值,而北京市地标给出的是一个固定值;

4) 国标和北京市地标均对列车轮轨条件、线路条件进行了修正,只是在修正参数名称上有所不同,国标称之为“轮轨条件修正”,北京市地标称之为“车况载重等修正”,但是,二者的修正量有所不同,当列车轮轨、线路条件不好时,国标给出的修正量是一个范围值,北京市地标给出的修正量是一个固定值;

5) 国标和北京市地标均对距离进行了修正,但

二者在修正参数上差异较大:国标没有将距离分为“水平距离”和“埋深”分别进行修正,而是对距离进行了整体修正,但针对预测点,分为“隧道垂直上方预测点”和“隧道两侧预测点”,然后用不同的修正公式进行了修正;北京市地标没有针对预测点进行详细划分,但是将距离分为“水平距离”和“埋深”分别进行了修正,并且在修正时将水平距离和埋深分别划分了几个不同的等级,每一个等级对应一个固定的修正量;

6) 国标和北京市地标均对建筑物进行了修正,并且在对建筑物类型的划分上完全一致,但二者对同一类型的建筑物的修正量不同,国标给出的是一个范围值,北京市地标给出的是一个固定值;

7) 国标将“隧道结构”作为修正参数,但是没有给出具体的修正量或计算公式,仅提出“应选择类似的隧道结构,通过类比方法确定修正值”;北京市地标没有考虑该修正参数;

8) 北京市地标将“弯道”和“过渡段”作为修正参数,并且针对这两个修正参数,分别给出了修正量和计算公式;国标没有将这两者作为修正参数。

### 3 两种振动预测模型的优缺点比较

国标和北京市地标振动预测模型的机理本质上是一样的,二者在振动修正项 C 上修正参数的选取的不同,导致二者在振动预测时有各自的优缺点。

#### 3.1 国标振动预测模型的优缺点

国标振动预测模型的优点在于:

(1) 考虑了“轴重”这一修正参数,由于列车产生的振动主要来源于车轮与钢轨之间产生的撞击,因此,“轴重”作为列车的主要指标之一,对于撞击的强度有着重要的影响,故而对振动源强也有一定的影响;

(2) 考虑了“隧道结构”这一修正参数,由于列车产生的振动最终经隧道结构传播到地面,因此,隧道结构将直接影响到预测点的振动预测值<sup>[5-6]</sup>。

表 10 地面水平距离衰减修正量/dB

水平距离	0 m<d≤10 m	10 m<d≤20 m	20 m<d≤30 m	30 m<d≤40 m	40 m<d≤50 m	50 m<d≤60 m
修正量	0	-1	-2	-3	-5	-9

注:水平距离是指外侧轨道中心线至预测点的水平距离。

表 11 建筑物修正量/dB

建筑物类型	III类建筑物	II类建筑物	I类建筑物
建筑结构及特征	基础较差的轻质、老旧房屋 (质量较差的低层建筑或简易建筑)	基础一般的砖木、砖混结构建筑 (中层建筑或质量较好的低层建筑)	基础良好的框架结构建筑 (高层建筑)
修正量	-1	-5	-10

国标振动预测模型的缺点在于:

(1) 没有考虑“弯道”和“过渡段”这两个修正参数,由于列车产生的振动来源于车轮与钢轨之间的撞击,根据对已经投入运营的地铁线路的实测结果,当其他条件相同时,由于弯道、过渡段的钢轨的不平顺,使得列车在弯道和过渡段处产生的振动明显高于在平直轨道上产生的振动,因此,不考虑这两个修正参数,对预测值的准确性会有一定的影响;

(2) 国标中振动修正项  $C$  中的修正参数(如轨道结构修正、轮轨条件修正、建筑物修正)给出的是范围值,且上、下限差距较大,当针对同一个预测对象进行预测时,不同的预测者由于采用了不同的修正参数值,得出的预测结果可能相差较大,这导致国标在实际运用中,缺乏一定的可操作性。

### 3.2 北京市地标振动预测模型的优缺点

北京市地标振动预测模型的优点在于:

(1) 考虑了“弯道”和“过渡段”这两个修正参数,比较符合地铁在实际运行过程中产生的振动影响;

(2) 地标中振动修正项  $C$  中的修正参数均采用公式或固定值计算,避免了由于人为因素而导致预测结果出现较大差距,这使得地标在实际运用中,具有较强的可操作性。

北京市地标振动预测模型的缺点在于:

(1) 没有考虑“轴重”这一修正参数,在地标中给出了6节编组  $B$  型车的振动源强,但当列车的车型、编组不同时,如果不进行“轴重”修正,直接采用给定的源强进行预测的话,对预测值的准确性会有一定的影响;

(2) 地标中列出了“埋深”这一修正参数,并且将小于等于20 m的地铁线路埋深划分为3个等级,分别给出了对应的修正量,但是没有给出大于20 m的埋深所对应的修正量。目前,在北京市已经投入运营的地铁线路中,有的埋深已经超过了20 m,因此,“埋深”这一修正参数亟需修改完善;

(3) 地标中列出了“水平衰减”这一修正参数,并且根据振动环境评价范围,将水平距离划分为6个等级,分别给出了对应的修正量,然而第五个等级(距离为  $40\text{ m} < d \leq 50\text{ m}$ ,修正量为  $-5\text{ dB}$ )和第六个等级(距离为  $50\text{ m} < d \leq 60\text{ m}$ ,修正量为  $-9\text{ dB}$ )的修正量差距较大,这有可能会预测点的距离仅差0.1 m时,预测结果可能相差4 dB,与实际情况不符,因此,“水平衰减”这一修正参数亟需修改完善。

## 4 结语

(1) 国标和北京市地标振动预测模型在实际运用时,都有各自的优点和不足之处,在进行城市轨道交通振动环境影响评价时,应将这两种振动预测模型有机地相结合,灵活应用,扬长避短,使得得出的预测结果更加贴近实际情况;

(2) 国标中振动修正项  $C$  没有将“弯道”和“过渡段”作为修正参数,这对预测结果的准确性将产生一定的影响,建议在下一步修订国标的过程中,考虑这两项修正参数,可以参照北京市地标中这两项修正参数的修正量和修正公式;

(3) 国标中轨道结构修正、轮轨条件修正、建筑物修正这三个修正参数的修正量为范围值,且上、下限差距较大,建议在下一步修订国标的过程中,深入研究分析这类修正参数的修正量,避免由于人为因素而导致预测结果出现较大偏差,增强国标在实际运用过程中的可操作性;

(4) 北京市地标中振动修正项  $C$  没有将“轴重”作为修正参数,这对预测结果的准确性将产生一定的影响,建议在下一步修订地标的过程中,考虑该修正参数,可以参照国标的轴重修正公式:

$$C_w = 20 \lg \frac{w}{w_0};$$

(5) 建议北京市地标补充完善“埋深”修正参数,增加20 m以上的埋深所对应的修正量;建议深入研究“水平衰减”修正参数所对应的修正量,特别是水平距离为  $50\text{ m} < d \leq 60\text{ m}$  时的修正量,使得预测结果更加贴近实际情况。

参考文献:

- [1] 樊佳慧,张琛,卢恺,等. 2015年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(1): 1-3.
- [2] 辜小安. 城市轨道交通环境影响评价中地下线路振动源强取值存在的问题与建议[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2013, 3(5): 211-215.
- [3] HJ453-2008, 环境影响评价技术导则城市轨道交通[S].
- [4] DB11/T 838-2011, 地铁噪声与振动控制规范[S].
- [5] 谢咏梅,刘扬,辜小安. 城市轨道交通地下线工程条件对振动环境影响的研究分析[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2011, 1(5): 237-243.
- [6] 谢咏梅,刘扬,辜小安. 城市轨道交通地下线振动环境影响分析[J]. 都市快轨交通, 2012, 25[2]: 59-63.