

# 临近地铁的燃气设备振动特性及隔振措施分析<sup>\*</sup>

马 宁<sup>1</sup> 赵富壮<sup>1</sup> 邬玉斌<sup>2</sup> 郑永军<sup>1</sup> 宋瑞祥<sup>2\* \*</sup>

(1. 北京城乡建设集团有限责任公司, 100067, 北京;

2. 北京市劳动保护科学研究所, 100054, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 对燃气设备自身运行的振动特征及临近的地铁线路列车经过后叠加的振动响应特性进行了现场测试, 分析了地铁线路对临近的燃气设备的振动影响特征。以某地铁线路下穿燃气调压站实际工程为案例, 对燃气设备应对地铁列车振动的控制措施及其效果进行了研究分析。研究结果表明: 地铁列车通过时, 周边燃气设备的振动速度幅值增加明显、加速度幅值变化较小; 燃气设备自身运行主要产生 100 Hz 以上的高频振动, 而地铁列车振动影响主频集中在 20 ~ 80 Hz; 实测的地铁列车对燃气设备振动加速度级增大值可达 10 dB 以上。

**关键词** 地铁周边; 燃气设备; 振动响应特性; 隔振措施

**中图分类号** Y270.1<sup>+</sup>6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.012

## Analysis of Vibration Characteristics and Vibration Isolation Measures of Gas Equipment Adjacent to Metro

MA Ning, ZHAO Fuzhuang, WU Yubin, ZHENG Yongjun, SONG Ruixiang

**Abstract** The vibration response caused by gas equipment running and superimposed action of adjacent metro train passing is measured on site, and the vibration characteristics of metro line impact on adjacent gas equipment is analyzed. Taking the actual project of a metro line under-passing gas regulator station for case study, the vibration control measure for gas equipment against metro train vibration and its effect are studied and analyzed. Research results show that the vibration velocity amplitude of adjacent gas equipment increases distinctly when train is passing, while the acceleration waveform does not change as much; the frequency of vibration acceleration caused by gas equipment is mainly above 100 Hz, and the main frequency of vibration acceleration caused by metro train is 20 Hz to 80 Hz. Field measurement shows that metro train causes the vibration acceleration level of gas equipment to in-

crease by more than 10 dB.

**Key words** adjacent to metro; gas equipment; vibration response characteristics; vibration isolation measure

**First-author's address** Beijing Urban & Rural Construction Group Co., Ltd., 100067, Beijing, China

随着地铁线网的不断加密, 地铁不可避免地近距离接触甚至下穿城市燃气管网或设施, 地铁列车运行对临近燃气管道或设施产生长期、间歇性的环境振动影响, 以及如何对其进行控制, 已引起了国内学者的关注。文献[1]通过振动监测, 对列车通过铁路桥时对邻近地下天然气管道的振动影响进行了分析评价; 文献[2-4]采用数值仿真计算方法, 对城际铁路或地铁下穿燃气管道引起的振动响应进行了分析评价。但关于燃气设施随地铁列车振动的响应特性、耐振限值及控制措施的研究国内还少见报导。本文通过现场测试, 分析了燃气设施自身运行特点和周边地铁列车振动荷载作用下的振动响应特性, 对燃气设施的耐振限值进行了探讨, 并对某地铁下穿燃气调压站的振动控制方法进行了介绍。

## 1 燃气设备振动响应测试分析

### 1.1 测试对象及测点布设

本文以某燃气调压站内部设备为测试对象。该燃气调压站南侧 40 m 处有 1 条运营中的地铁线路。燃气调压站内主要有过滤设备和调压设备(见图 1), 其中: 过滤设备位于燃气站室外, 调压设备位于室内。在燃气设备上共布设了 6 个测点。在过滤设备上设 3 个测点(见图 2 a), 其中: 测点 A1、A2 为加速度传感器, 分别位于过滤设备支撑结构基础地面和设备外壁面; 测点 V1 为速度传感器, 位于设

<sup>\*</sup> 北京市自然科学基金资助项目(8192013); 北京市科学技术研究院青年学者项目(YS202102)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

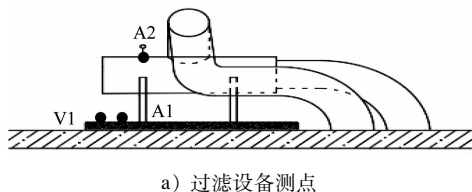


a) 室外的过滤设备

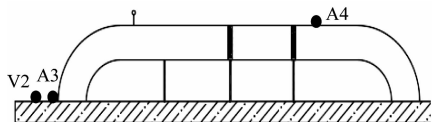
b) 室内的调压设备

图1 燃气设备现场图

备支撑钢结构基础地面,靠近测点 A1。在调压设备上设 3 个测点(见图 2 b)),其中:测点 A3、A4 为加速度传感器,分别布设在入地调压管道基础地面和管道外壁;测点 V2 为速度传感器,位于入地调压管道基础地面,临近 A3 测点。



a) 过滤设备测点



b) 调压设备测点

图2 燃气设备测点布设示意图

## 1.2 数据分析及评价量

地铁列车运行对环境振动影响以竖向为主,因此本文只对燃气设备的竖向振动响应进行测试、分析。采用振动加速度级作为燃气设备振动响应的评价量。振动加速度级  $L$  和振动加速度有效值  $a$  的计算式为:

$$L = 20 \lg \left( \frac{a}{a_0} \right) \quad (1)$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2)$$

式中:

$L$ ——振动加速度级, dB;

$a$ ——振动加速度有效值,  $\text{m/s}^2$ ;

$a_0$ ——基准加速度,  $a_0$  取  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ ;

$a(t)$ ——加速度时程;

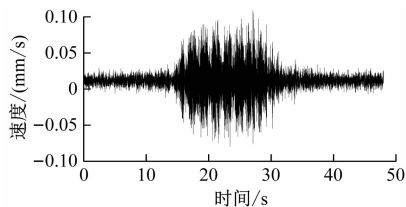
$T$ ——加速度持续时间, s。

## 2 测试结果分析

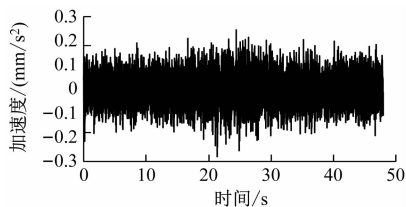
### 2.1 实测振动数据的时域分析

图 3 为过滤设备 3 个测点的典型实测振动时程

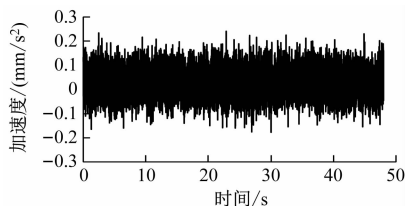
曲线。由图 3 可知:地铁列车对过滤设备基础位置的振动速度波形影响较大,存在明显的因列车通过引起的振动速度波形;地铁列车通过对加速度波形的影响并不显著,实测数据未出现明显的地铁列车振动加速度波形,振动加速度仍以设备的自振响应为主。对比图 3 b)、图 3 c)可知,地铁列车通过时,过滤设备的管道加速度峰值大于基础加速度峰值。



a) 速度测点 V1



b) 加速度测点 A1



c) 加速度测点 A2

图3 地铁列车通过时过滤设备 3 个测点的实测振动时程曲线

由图 4 所示的调压设备 3 个测点的典型振动实测波形可知:地铁列车通过对振动速度波形影响较大,而对加速度波形没有明显影响,即振动加速度仍以调压设备自身运行产生的振动为主。相比而言,管道外壁 A4 处的振动加速度大于基础位置 A3 处的振动加速度。这是由于高压气体在调压设备内部流动首先导致管道产生振动,并向外辐射声音,振波再经过管道和钢支撑结构传至基础位置。

### 2.2 实测振动数据频谱分析

由图 5 所示的调压设备 3 个测点的实测振动频谱图可知:地铁列车通过对调压设备基础位置低频振动加速度和速度的影响均较为明显,其振动影响主频为 20 ~ 80 Hz,对 80 Hz 以上的高频振动影响不明显。对于设备管道,除 54 Hz 存在 1 个较大的因

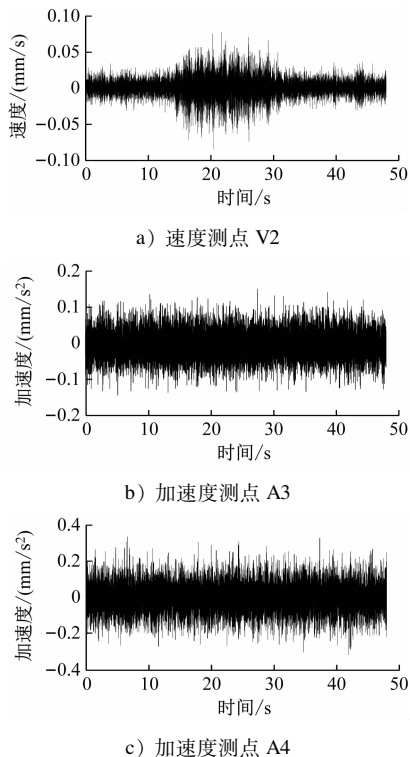


图4 地铁列车通过时调压设备3个测点的实测振动时程曲线

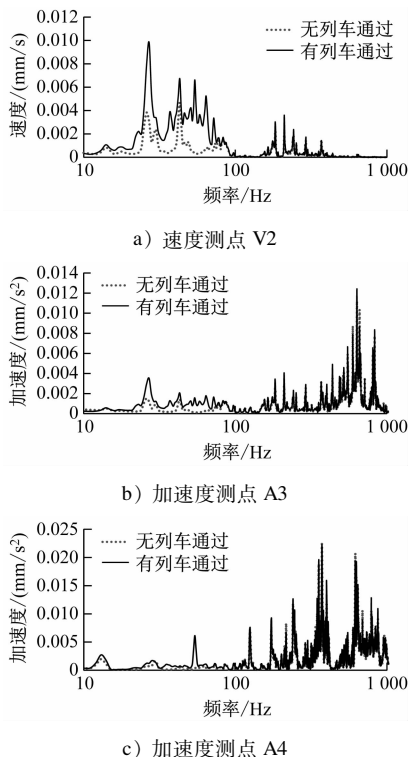


图5 调压设备3个测点的实测振动频谱

地铁列车通过引起的振动波峰外,其他频率对地铁列车振动影响不明显。燃气设备运行主要产生100 Hz以上的高频振动,基础位置的速度振动主要集中在

在20~100 Hz,这与地铁列车引起的速度振动响应频率较为接近。

## 2.3 实测加速度振级分析

为分析地铁列车通过对燃气设备的振动影响强度,通过速度测点V1、V2的时域波形识别列车通过时段,经连续测试获取了5列地铁列车通过及燃气设备自身运行共同作用下的竖向加速度数据。采用上文所述的加速度振级计算方法,对实测的加速度振级进行分析。

图6为测点A1、A2的典型实测加速度振级时程图。由图6可知,地铁列车通过时,燃气设备自身(A2处)、基础位置(A1处)的加速度振级有明显的加强作用(加速度振级幅值可增加10 dB以上)。单列地铁列车通过的振动影响持续时间约为18 s。

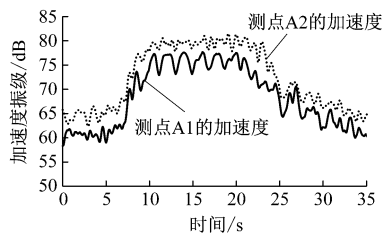


图6 测点V1、V2的典型实测加速度振级时程曲线

参考GB 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》,燃气设施自身运行产生的振动采用加速度级等效值作为评价量,地铁振动采用加速度振级最大值作为评价量。测试选取5列地铁列车,计算列车通过时产生的平均振动加速度级最大值。表1为各测点的振动加速度振级实测值。由表1可知:无地铁列车通过时,与过滤设备的测点A1、A2相比,调压设备自身运行引起A3、A4的振动加速度级较大,说明调压设备自身运行的振动强度更大;地铁列车通过时,燃气设备管道和基础的振动均有加强,相比燃气设备自身运行的振动加速度级等效值,测点A1、A2、A3、A4处在列车通过时产生的振动加速度振级最大值平均值分别大19.9 dB、17.0 dB、11.5 dB和12.4 dB。相比而言,地铁列车运行对室外过滤设备的振动影响更为明显。

## 3 燃气设备应对列车振动的控制案例分析

### 3.1 应对地铁列车振动的控制措施

目前地铁列车振动控制措施主要有源强减振、传播途径隔振和受振体控制。其中,源强减振主要指轨道减振措施,包括钢轨减振、扣件减振、轨枕减

表 1 地铁列车通过时实测的振动加速度振级

测点	自身振动加速度 等效值/dB	实测的地铁列车振动加速度振级最大值/dB					
		第 1 列列车	第 2 列列车	第 3 列列车	第 4 列列车	第 5 列列车	5 列列车平均值
A1	59.8	79.3	79.7	78.1	80.0	77.7	78.9
A2	64.6	81.2	81.3	81.8	82.1	81.5	81.6
A3	67.5	78.8	79.3	79.1	79.2	78.7	79.0
A4	68.5	81.6	80.6	80.2	80.8	81.2	80.9

振和道床减振等。地铁的源强减振措施技术成熟、效果明显,是地铁列车振动控制的优选方案,但对已经规划设计完成或已开通运营线路而言,该措施的实施难度较大。

传播途径隔振措施是在振源和受振体振动传播路径介质中设置空沟或异质体,利用弹性波的反射、折射和衍射原理达到隔断或阻碍振波传播的目的。国内外学者对传播途径隔振措施开展了大量的研究工作<sup>[5-6]</sup>,但受隔振屏障施工和维护难度影响,该措施在实际工程中的应用较少。

当以上措施均无法实施或不能满足控制要求时,可对受振体自身采取隔振防护措施。如在建筑的基底或基础竖向构件顶部设置阻尼弹性单元(一般为弹性减振垫或弹簧隔振支座)<sup>[7-8]</sup>,通过降低建筑的竖向固有频率来达到整体隔振的目的。对于燃气设备,可以参考建筑基础隔振方式进行振动控制。本文以实际的项目为例,介绍燃气设备应对地铁列车振动采取的自身振动控制措施。

3.2 案例项目概况

拟在燃气调压站下方修建 1 条地铁线路。地铁线路、燃气调压站设备及主要管线的平面位置关系如图 7 所示。燃气调压站内设有调压计量箱、燃气中压调压箱(以下简称“调压箱”)、过滤器等 3 个主要燃气设备,3 个设备的基础平面尺寸分别为 6.5 m×3.5 m、3.5 m×3.5 m 和 6.5 m×3.5 m。

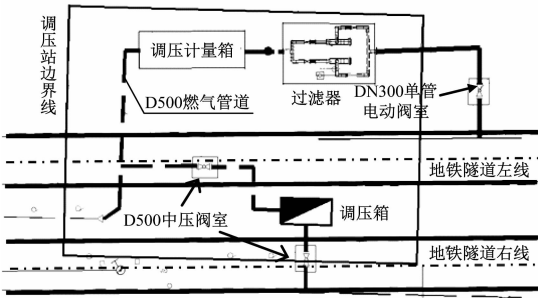


图 7 燃气调压站与地铁线路的平面位置关系示意图

该燃气项目所对应的地铁区间线路未采取轨道减振措施,地铁轨面埋深约 11 m。相比上文临近地铁的燃气设备测试对象,本项目为地铁下穿燃气设备,势必会产生更为严重的振动影响,因此有必要采取可行的控制措施,以降低地铁列车对燃气设备的振动影响。

3.3 控制方案设计

考虑到地铁隧道在施工期间可能引起上方燃气设备基础场地的不均匀沉降,燃气站进行临时搬迁,待隧道施工完成后再迁回重建,因此该项目具备了燃气设备自身振动控制的实施条件。综合考虑场地土不均匀沉降问题,重建的燃气设备采用“厚重筏板共用基础+箱型基础”形式,同时将新建燃气调压站设施位置尽量远离地铁线路。图 8 为回迁后新建燃气设施的基础隔振方案。

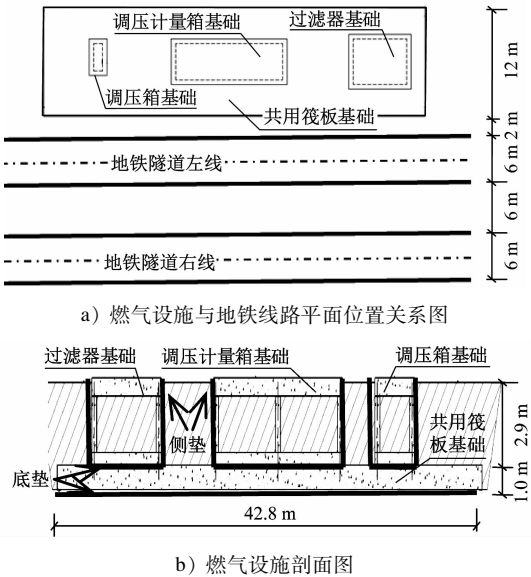


图 8 回迁后新建燃气设施的隔振方案示意图

控制措施的隔振效果可以用传递系数(传递率) $\beta$ 表示,计算公式为:

$$\beta = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta f/f_0)^2}{[1 - (f/f_0)^2]^2 + (2\zeta f/f_0)^2}} \tag{3}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4)$$

式中:

$\zeta$ ——阻尼比;

$f$ ——源强的激振频率, Hz;

$f_0$ ——系统设计的固有频率, Hz;

$K$ ——弹性垫的刚度, N/m;

$M$ ——减振垫上部承受的质量, kg。

图9为不同 $\zeta$ 下单自由度系统传递系数与频率比( $f/f_0$ )之间的关系曲线。由图9可知:当频率比大于 $\sqrt{2}$ 时,传递系数小于1,即系统进入隔振区。频率比越大,隔振效果越好。本项目在筏板基础底部、箱型基础底部及其侧壁铺设置弹性减振垫层,通过降低“燃气设施-基础-弹性减振层”的竖向固有频率,以避开地铁列车振动主频的方式达到隔振目的。

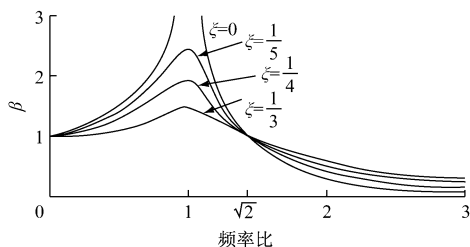


图9 不同 $\zeta$ 下单自由度系统传递系数与频率比关系曲线

由式(4)可知,当减振材料上部承受的荷载确定后,隔振系统的固有频率主要受弹性垫刚度影响,而弹性垫刚度又同减振材料的弹性模量和厚度相关。减振材料越厚,系统的固有频率越低,隔振效果越好。

### 3.4 隔振措施实施效果分析

根据上述设计方案开挖燃气调压站整体基坑,在基坑底部浇筑混凝土垫层。在此基础上铺设弹性材料,用胶带对垫块缝隙进行粘贴,同时覆盖塑料膜,防止混凝土等杂物进入减振垫缝隙。为保护减振垫层,在减振垫上方首先浇筑素混凝土保护层,进而浇筑共用筏板基础和箱型基础,同时在箱型基础侧壁粘贴弹性减振材料。图10为施工现场实景图。

## 4 结论

1) 燃气调压站附近地铁列车对燃气设备的振动速度波形影响较为明显,而对振动加速度波形影



a) 底垫铺装



b) 保护层浇筑



c) 侧垫铺设



d) 新建的调压计量箱及过滤器设施

图10 案例项目隔振施工现场实景图

响较小。

2) 燃气设备自身运行产生的加速度以100 Hz以上的高频振动为主,而地铁列车通过时产生的振动加速度主要集中在20~100 Hz。

3) 与燃气调压站水平距离40 m的地铁线路对燃气设备仍有较大的振动影响,列车通过时加速度振级可增加11.5~19.9 dB。

4) 本文以实际地铁线路下穿燃气调压站项目为例,依据隔振原理对燃气设备的基础被动隔振措施进行了探讨分析,可为相似工程的地铁环境振动控制提供参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] 朱学仁,王志灵,方毅. 列车运行对地下管道的振动影响的监测与分析[J]. 中国水运,2008(12):212.
- [2] 李怀龙,贺玉龙,彭道平. 城际铁路地下段运营振动对上部埋地燃气管道的影响[J]. 安全与环境学报,2016(5):99.
- [3] 翁多斯. 地铁振动对埋地燃气管道的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [4] 吴昭华. 城际轨道交通下穿燃气管道振动影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [5] 楼梦麟,贾宝印,宗刚. 混凝土连续墙隔振后建筑结构的地铁振动实测与分析[J]. 华南理工大学学报,2013(3):50.
- [6] 郭玉斌,宋瑞祥,何蕾,等. 地面列车荷载作用下地屏障对建筑楼板的隔振效果分析[J]. 振动工程学报,2020(2):322.
- [7] 李爱群,王维. 三维多功能隔振支座设计及其在地铁建筑减振中的应用[J]. 地震工程与工程振动,2014(2):202.
- [8] 宋瑞祥,张学刚,孙国栋,等. 探讨两种建筑隔振基础措施在地铁沿线物业开发中的应用[J]. 噪声与振动控制,2018(5):156.

(收稿日期:2019-07-15)