工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

基于 SIMPACK-ANSYS 的列车-线路三维空间耦合动力学仿真分析

朱志浩
中国铁路设计集团有限公司　广东深圳　518000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22587

［摘　要］随着我国城市轨道交通事业快速推进，在城市轨道交通工程施工过程中难免会产生施工误差，为了降低误差造成的影响，需要通过对线路平纵断面进行调整来满足限界要求。本文基于 SIMPACK-ANSYS 联合建立列车-线路三维空间耦合动力学模型，以我国某城市地铁盾构区间隧道为工程背景，对原设计方案和调坡方案的动力特性进行了仿真分析，研究结果表明区间调坡方案满足设计要求，车辆运行安全性和平稳性满足规范要求，方案合理可行。

［关键词］地铁；SIMPACK；ANSYS；耦合动力学理论；仿真分析

引言

随着国内轨道交通的快速发展，建成通车的项目正在不断增长。在土建结构完工后，为消除土建结构中心线偏离设计线位产生的影响，通常会在原设计线位的基础上进行线路调整以满足限界要求。本文将以我国某城市地铁盾构区间隧道为工程背景，开展建模仿真，分析原设计方案与调坡方案的动力特性差异，并将结果与相关规范进行对比分析，最终做出行车安全性和舒适性评估。

1 项目工程概况

我国某城市地铁盾构区间隧道纵断面设计如下：出 A 站后以 26.3‰、5‰的坡度下坡，后以 20.453‰、5‰、19.605‰的坡度上坡接入 B 站。本区间从 K1+477~K1+847 铺设预制板式钢弹簧浮置板道床（特殊减振）；从 K1+847~K2+884 铺设普通预制道床（普通减振）；从 K2+884~K3+196 铺设预制板式钢弹簧浮置板道床（特殊减振）；从 K3+196~K3+585 铺设普通预制板道床（普通减振）。

由于盾构机在掘进过程中遇到溶洞，施工过程中开挖底部不能临时承载盾构机重量，造成盾构机刀盘以及盾体下沉，从而导致盾构机垂直姿态下沉偏离既定轴线出现超限的情况。在调线调坡的过程中，将 K1+720 处插入 1 处变坡点，将原 26.3‰、400m 的坡段调整为 27.540‰、90m 和 25.412‰、312m 的两段坡；两段坡之间以 R-5000m 的竖曲线连接。

2 轨道结构动力特性分析

针对本区间隧道的调坡问题，基于 SIMPACK-ANSYS 联合建立列车-线路三维空间耦合动力学模型，重点计算了列车以不同速度通过设计坡度的动力响应，对车辆运行安全性和平稳性进行了分析，检算相关动力学参数是否满足规范要求。

2.1 三维空间耦合动力学模型

本工程全线采用 A 型鼓型车 6 动 2 拖列车编组形式：-Tc*Mp*M=MP*M=M*Mp*Tc-。车体材料选用铝合金，整体承载结构。其中，“-”为半永久车钩，主要用于两端带有司机室的拖车；“*”和“=”分别为半自动车钩和全自动车钩，主要用于连接动车。整车模型建立时，多次导入子模型，然后通过设置各子模型的位置来组装列车模型，每节车之间采用车钩缓冲器相连接。

根据实际工程需要，在 K1+720 插入 1 处变坡点，将原 26.3‰、400m 的坡段调整为 27.540‰、90m 和 25.412‰、312m 的两段坡；两段坡之间以 R-5000m 的竖曲线连接。同时将连接 0‰和 26.3‰间的竖曲线由 R-3000m 调整为 R-2500m，以达到优化轨道结构高度的目的。在该坡度段存在曲线路段，即平竖曲线重叠设置，为考虑动力学检算准确性，将线路总长度设置为 490m，其中圆曲线半径 R=753m，超高取 140mm。

2.2 车辆动力学性能检算

动力学检算主要分为车辆运行安全性、车辆运行平稳性两个方面。对建立的列车-线路耦合动力学模型中轮轴的仿真计算结果进行分析比较，选取最不利轮对的轮轨垂向力、轮

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

轨横向力、脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力等进行车辆运行安全性结果输出。选取车体模型中质点位置的车体垂向加速度、车体横向加速度等进行车辆运行平稳性结果输出，并通过相应公式计算平稳性指标。

2.2.1 车辆运行安全性对比分析

比较分析原设计方案和现设计方案最不利轮对处的轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等车辆运行安全性指标最值的区别，如表 1 所示。

表 1　时速 80km/h、100km/h、120km/h 车辆运行安全性对比情况

计算项目	原设计方案最值	现设计方案最值	安全限值
轮轨垂向力（kN）	97.05/106.33/115.92	99.12/107.36/116.86	170
轮轨横向力（kN）	10.05/14.18/18.38	10.92/14.30/18.69	66.64
脱轨系数	0.11/0.16/0.22	0.13/0.17/0.22	0.8
轮重减载率	0.20/0.24/0.32	0.21/0.25/0.33	0.6
轮轴横向力（kN）	16.42/18.90/22.76	16.89/19.66/22.98	65.59

综上，当车辆运行速度为 80km/h、100km/h 和 120km/h 时，不论是现有方案还是原有方案，两者在该区间内的行车动力学参数相差不大。通过对现有方案进行检算发现，由于存在两处边坡点，行车安全性指标略有增加，但仍满足规范要求。

2.2.2 车辆运行平稳性对比分析

比较分析原设计方案和现设计方案车体垂向加速度、车体横向加速度等车辆运行平稳性指标最值的区别，如表 2 所示。

表 2　时速 80km/h、100km/h、120km/h 车辆运行平稳性对比情况

计算项目	原设计方案最值	现设计方案最值	安全限值
车体垂向加速度（m/s2）	0.28/0.36/0.50	0.30/0.37/0.52	1.0
车体横向加速度（m/s2）	0.41/0.46/0.52	0.42/0.48/0.53	0.6

综上，当车辆运行速度为 80km/h、100km/h 和 120km/h 时，不论是现有方案还是原有方案，两者在该区段的行车动力学参数相差不大。通过对现有方案坡度段进行检算发现，由于存在两处边坡点，行车平稳性指标略有增大，但仍满足规范要求。

2.3 减振效果评价

原方案在特殊减振地段均采用预制钢弹簧浮置板轨道，现方案在部分地段采用现浇钢弹簧浮置板，为研究原方案与现方案的减振效果差异，本节针对列车在 120km/h 速度下的原方案与现方案的减振效果进行分析，计算隧道壁处 1~200Hz 范围内 1/3 倍频域各中心频率 Z 振级，并采用 1/3 倍频程频谱进行减振评价量分析。

2.3.1 减振效果有限元计算模型

在隧道-土体有限元模型中，将土体简化为弹性体处理，隧道结构取圆形。隧道埋深 15m，盾构壁的盾构管片尺寸为厚度 0.35m，内径 5.5m，外径 6.2m。为使模拟计算结果更加接近实际使用状况，在建立隧道-土体耦合模型时，隧道、道床仰拱采用实体单元。以两隧道中心线为对称界面取单个隧道结构，模型宽 120m，深 48m。在隧道横向远端和沿土体纵向各设置 20m 无限单元，沿无限远端不设置约束；土体上表面不设置约束；土体模型其余面均设置为对称约束，最终建立的隧道-土体有限元模型如图 1 所示。

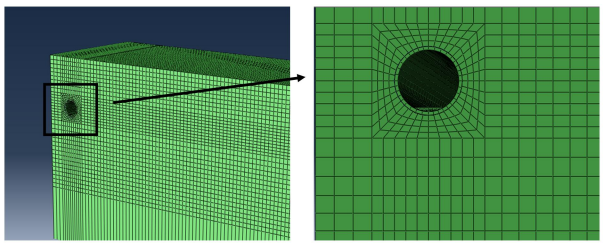

图 1　隧道-土体有限元模型

2.3.2 减振效果评价方法及标准

本文参考国家标准《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分:一般要求》中规定的计权因子，计算隧道壁处 1~200Hz 范围内 1/3 倍频域各中心频率 Z 振级，并采用 1/3 倍频程频谱进行减振评价量分析。减振评价量具体计算方法如下：减振评价量参照《浮置板轨道技术规范》要求，

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

频率考虑范围为 1Hz~200Hz，提取的量为垂向振动加速度，评价计算的量应为浮置板地段与普通整体道床地段隧道壁比较时的分频振级均方根的差值 ΔL_a，分频振级的最大差值 $\Delta L_{\max}$ 和最小差值 $\Delta L_{\min}$。其中减振效果的评价指标应为 ΔL_a，$\Delta L_{\max}$ 为参考量，在减振结构固有频率附近的某个频程出现 $\Delta L_{\min}$，并为正值时，ΔL_a 和 $\Delta L_{\max}$ 应减去该数值或分析原因后重新测量。具体公式如下。

$$\Delta L_a = 10\lg(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{VL_q(i)}{10}}) - 10\lg(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{VL_h(i)}{10}})$$

$$\Delta L_{\max} = \max_{i=1\to n}[VL_q(i)\text{-}VL_h(i)]$$

$$\Delta L_{\min} = \min_{i=1\to n}[VL_q(i)\text{-}VL_h(i)]$$

式中：$VL_q(i)$——选择没有采取减振措施的地段为参照系，其轨旁测点铅垂向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率的分频振级(dB)；$VL_h(i)$——采取减振措施的地段，其轨旁测点铅垂向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率的分频振级(dB)。

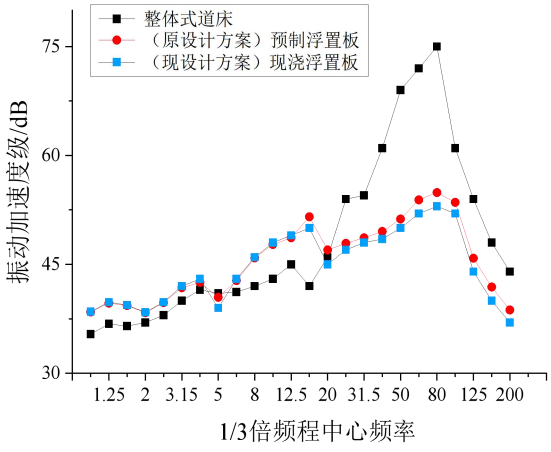

图 2　隧道壁振动加速度 1/3 倍频谱

2.3.3 原方案与现方案减振效果的对比分析

根据模型计算结果，列车运行得到预制标准浮置板与现浇钢弹簧浮置板的隧道壁振动加速度 1/3 倍频谱图如图 2 所示，普通道床隧道壁最大振级为 75.08dB(中心频率为 80Hz)。钢弹簧浮置板的减振效果在 1-5Hz 范围内减振效果不明显，在 8-20Hz 范围内出现了振动放大现象，符合钢弹簧浮置板轨道在基频附近振动放大现象，在 20-125Hz 范围减振效果较为显著，符合城市轨道交通减振主要在 20-80Hz 范围内的实际减振需求。

表 3　浮置板结构减振效果

板型	（原方案）预制浮置板	（现方案）现浇浮置板
减振效果（dB）	15.38	16.16

预制标准钢弹簧浮置板的减振效果为 15.38dB，现浇钢弹簧浮置板的减振效果为 16.16dB，均满足环评专业提出的分段减振分贝值要求，表明调坡方案与原设计方案的实际减振效果基本一致，方案合理可行。

3 结论

本文以我国某城市地铁盾构区间隧道为研究对象，从动力学角度出发，建立了列车-线路三维空间耦合动力学模型以及隧道-土体有限元模型，研究了该调坡区段在不同设计方案下的钢弹簧浮置板轨道结构的动力学性能，并且通过仿真实验论证了施工方案的可行，相关结论可为同类工程提供参考。

[参考文献]

[1]赵强. 武汉 2 号线调线调坡设计研究[J]. 铁道工程学报, 2013(10): 100-105.

[2]中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[3]崔圣爱, 刘品, 曹艺缤, 等. 多线铁路车桥耦合振动仿真研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(05): 835-843.

[4]张展飞, 周劲松, 孙文静, 等. 轨道车辆运行平稳性评价算法一致性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(09): 1442-1449.

[5]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分:一般要求: GB/T 13441.1-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[6]尹华拓, 袁宇, 曾志平, 等. 基于 1/3 倍频程与传递函数方法的地铁轨道振动规律实验对比研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(01): 193-199.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.