

非对称悬挂式轨道梁结构优化分析

吴湛, 陈卓异*, 柯红军, 李传习

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为优化非对称悬挂式轨道梁的结构构造以满足运营刚度和强度等要求,参考国内外已建成的类似悬挂式单轨交通系统,初步设计了悬挂式单轨轨道梁结构,采用设计软件Midas/Civil和Abaqus建立有限元模型,分别进行整体分析和局部受力分析。调整截面尺寸、跨径和板厚等参数,分析非对称悬挂式轨道梁的变形和应力分布。研究表明:轨道梁结构跨径取30 m比较合适,当截面尺寸一定的情况下,增加钢板厚度能有效地提高轨道梁的刚度与强度,但当钢板厚度增加到一定值后,轨道梁刚度提高的速率明显减缓,此时加大截面尺寸比增加板厚对结构强度与刚度的提升效果更好,更能减少用钢量,经优化最终提出了一种新型悬挂式单轨轨道梁结构。

关键词:非对称;悬挂式轨道梁;有限元分析;应力分布;结构优化

行详细的选型和优化分析。

1 研究背景

悬挂式轨道交通系统以其方便、快捷的优点成为景区旅游线路的首要选择。此系统采用新能源、新材料、新设计、集成若干相关成熟技术建造,吸收了既有轨道交通安全可靠、正点准时、全天候无污染等优点,又具有占地少、投资成本低、工程周期短、适用范围广等优势;且不受各种恶劣天气的影响,是一种新型现代交通系统。

悬挂式单轨最先出现在德国伍帕塔尔市,其轨道梁结构为桁架形式,列车侧挂于轨道梁上,桥墩采用门式墩柱,轨道梁结构置于墩柱中间。由于列车侧挂于轨道梁,结构受力为偏载,目前这种侧挂式轨道梁结构也仅出现在德国。而设计考虑到列车的净空要求以及桥墩占地面积,决定采用T形墩+钢箱梁并且列车侧挂于钢箱梁的形式,结构存在偏载问题和变形刚度要求需要解决。法国、日本以及中国等地修建的类似轨道梁,都是采用胶轮胶轨,主梁受力为对称加载,截面为槽形截面,T形桥墩受力为偏载,但偏载受力没有侧挂式显著。该设计结构轮载更大,偏载效应显著。需要考虑刚度、强度、用钢量等对工程造价的影响,需进

2 结构选型

悬挂式单轨交通系统是一种轨道由一条特制的工字钢组成、列车悬挂于轨道梁下行驶的工具,其主要组成部分为轨道梁和塔架。各国的悬挂式单轨交通系统虽在桥梁结构形式上不尽相同,但其轨道大多都位于轨道梁中心,而该文所设计的轨道梁结构与国外已运行的轨道梁有所差异,其轨道位于主梁一侧,列车行驶荷载对结构属于偏载。该悬挂式单轨轨道是由特制的工字钢组成,通过钢横梁与主梁连接;结构主梁采用钢箱梁,钢横梁设置在钢箱梁的一侧,通过焊接与钢箱梁的腹板相连,而钢横梁与轨道之间通过连接板螺栓连接,其连接如图1所示;对于双线轨道,当线路中心与道路中心重合时,桥墩一般选用T形,采用截面为矩形的钢柱结构,墩柱两边支撑起两条轨道。考虑到该线路列车的构造,转向架需要一定的净空与宽度,轨道梁设置于主梁的一侧可以满足列车行驶要求,但结构在整体受力上是偏心的,所以对桥墩以及主梁的刚度要求就更大一些。

收稿日期:2019-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51708047,51778069)

作者简介:吴湛,男,硕士研究生,E-mail:wuzhan.insist@foxmail.com

*通信作者:陈卓异,男,博士,讲师,E-mail:chenzyhit@163.com

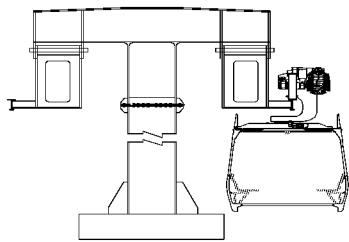


图 1 轨道梁结构构造截面图

3 主要技术标准及列车荷载

3.1 主要技术参数及标准

列车形式:三节车厢编组,如图 2 所示;车道类型:非对称悬挂式单轨车辆的标准轨道梁;线路性质:旅游景区悬挂式单轨交通线;运营速度:最高运行速度 70 km/h;列车满载下设计荷载轴重:116.7 kN;列车空载下设计荷载轴重:66.7 kN。

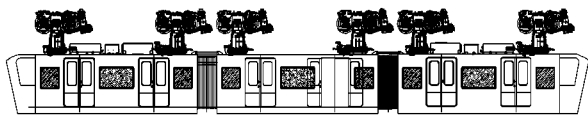


图 2 悬挂式单轨车辆

结构自重包括主梁自重及各加劲肋自重;附属设备及建筑自重:包括轨道结构、轨道梁轨面铺装、电缆支架、栏板、接触网立柱、防噪屏和附加管道等结构;列车竖向静活载及动力作用:列车及乘客重量,满载 70 t,空载 40 t,即满载轴重 116.7 kN,空载轴重 66.7 kN;在钢制薄壁轨道梁的设计过程中,需要考虑列车运行时对轨道梁的冲击作用,列车的冲击荷载也叫列车垂向活载,列车垂向活载等于列车静活载乘以动力系数 μ 。参考 DG/T J08-109-2017《城市轨道交通设计规范》,支承单轨交通轨道梁的桥梁结构的动力系数 μ 按下式计算:

$$\mu = \left(1 + \frac{20}{50 + L_1}\right) \cdot \frac{20}{50 + L_2} \quad (1)$$

考虑列车横向摇摆力:由于车辆上桥前的初始横向振动及轨面横向不平顺的存在,将使桥跨结构产生一定的横向振动,该振动引发的车辆左右摇摆力作用于轨面,称为列车的横向摇摆力,其会对桥梁施加影响。列车横向摇摆力应按相邻两节车 4 个轴重的 15% 计,应以横桥向集中力形式取最不利位置作用于轨顶面。

温度荷载取值如下:体系整体按升温 25 °C,降温

18 °C 计;局部温差:按 GB/T 51234-2017《城市轨道交通桥梁设计规范》取值,正温差 $T_1=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2=11\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_3=6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_4=3\text{ }^{\circ}\text{C}$;负温差 $T_1=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

考虑制动力或牵引力:按照 GB/T 51234-2017《城市轨道交通设计规范》,桥梁的制动力或牵引力应按竖向静活载的 15% 计算。

3.2 轨道梁主要设计校核标准

根据规范要求,Q345 钢材的容许轴向应力为 200 MPa,弯曲应力为 210 MPa,剪应力为 120 MPa。最大应力应不大于容许应力 210 MPa。

刚度影响列车的行驶舒适性和脱轨安全性,因此竖向刚度要求:在静载作用下挠度 $<L/1\ 000$;横向刚度要求:在列车横向摇摆力、离心力、风力和温度力作用下,桥跨结构梁体的横向水平挠度不大于计算跨度的 1/4 000。桥塔:墩顶横向和竖向水平位移分别应满足:

$$\Delta_h \leq 4\sqrt{L} = 21.9\text{ mm (横向)} \quad (2)$$

$$\Delta_h \leq 5\sqrt{L} = 27.3\text{ mm (竖向)} \quad (3)$$

4 轨道梁结构的设计

轨道梁是引导列车运行、承载列车重量的结构,它是悬挂式单轨交通系统中最主要的部件。轨道梁结构的设计应满足悬挂式单轨列车运行的净空和净宽要求,即列车车厢以下的净空大于 8.5 m,列车左右的净宽应满足其车身左右摆动 15°,约 0.8 m。根据国外已建轨道梁结构,为满足箱梁构件的整体稳定性,箱梁高宽比一般小于 6。根据轨道梁上述要求,箱梁梁高为 1.6~1.9 m、梁宽为 0.8~1.1 m 构造满足要求。据此初步设计轨道梁的结构尺寸,如表 1 所示。

| 表 1 轨道梁各板件参数 | | | | | | mm |
|--------------|----|----|------|-------|-------|-----|
| 顶板 | 底板 | 腹板 | 横梁板厚 | 横梁间距 | 主梁高 | 主梁宽 |
| 18 | 18 | 16 | 14 | 1 250 | 1 700 | 900 |

该文通过有限元软件 Midas/Civil 建立轨道梁单梁杆系模型,采用梁单元模拟实际结构。以跨径为 30 m 的模型为例,整个模型共有 124 个节点,147 个单元,轨道梁两端的边界为一般支撑以及弹性连接,轨道与横梁之间以及横梁与钢箱梁之间为刚性连接。

4.1 不同截面尺寸对轨道梁结构的影响

在轨道梁的设计过程中,主梁截面尺寸决定了结构的整体刚度与强度,为了确定合适的主梁截面尺寸,

建立 30 m 跨的轨道梁结构有限元模型,各钢板厚度以及横梁间距保持不变,改变主梁截面尺寸如表 2 所示;有限元计算的结果以及每千米用钢量如表 3 所示。

表 2 30 m 轨道梁不同截面尺寸参数 mm

| 工况号 | 梁高 | 梁宽 | 横梁间距 | 顶板 | 底板 | 腹板 |
|-----|-------|-------|-------|----|----|----|
| 1 | 1 600 | 800 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 2 | 1 600 | 900 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 3 | 1 700 | 900 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 4 | 1 700 | 1 000 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 5 | 1 800 | 1 000 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 6 | 1 900 | 1 100 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |

表 3 30 m 轨道梁不同截面尺寸有限元分析结果

| 工况号 | 最大应力/MPa | 最大竖向变形/mm | 最大横向变形/mm | 1 km 用钢量(双线)/t |
|-----|----------|-----------|-----------|----------------|
| 1 | 194.52 | 35.76 | 8.30 | 1613.33+34Q |
| 2 | 171.61 | 33.51 | 6.71 | 1666.67+34Q |
| 3 | 157.13 | 29.29 | 6.19 | 1720+34Q |
| 4 | 141.20 | 27.62 | 5.08 | 1773.33+34Q |
| 5 | 130.15 | 24.34 | 4.73 | 1826.67+34Q |
| 6 | 110.12 | 20.47 | 3.69 | 1933.33+34Q |

注:Q 为每个桥墩用钢量。

从表 3 可以看出:当各钢板厚度保持不变时,增大主梁截面尺寸,轨道梁的强度和刚度都有所提高,工况 1、2 其竖向变形超过轨道梁允许的最大变形 30 mm,不符合要求;从工况 3~6 可以看出:加大截面尺寸对轨道梁的强度、刚度的影响在一定程度上越来越大;截面尺寸越大,轨道梁强度、刚度越高,但同时用钢量也越多。综合考虑结构的强度、刚度以及用钢量,建议采用 3 号工况下的主梁截面尺寸。

4.2 不同跨度对轨道梁结构的影响

轨道梁不同的跨度影响着结构的刚度,同时也影响着整条线路的总用钢量。在轨道梁结构设计过程中,为了确定轨道梁的最佳跨度以及不同跨度下刚度和强度的变化规律,根据已确定的钢箱梁截面尺寸以及初步设计的板厚,参考国外已建轨道梁的跨度区间,建立 25、27.5、30、32.5、35 m 等不同跨度的有限元模型来分析比较,确定最佳跨度。不同跨度下轨道梁的有限元分析结果如图 3~5 所示。

从图 3~5 可以看出:① 随着跨度的增加,轨道梁的竖向挠度、横向变形、最大应力都越来越大;② 轨道梁最大应力随着跨度的增加呈将近线性增长,但均没

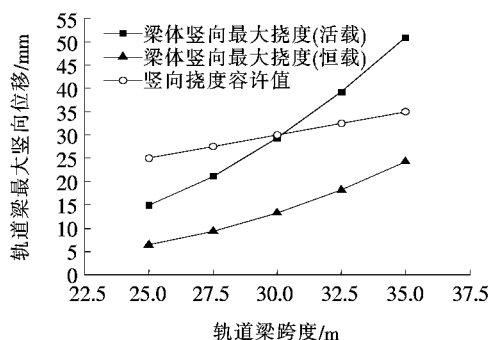


图 3 轨道梁竖向变形值图

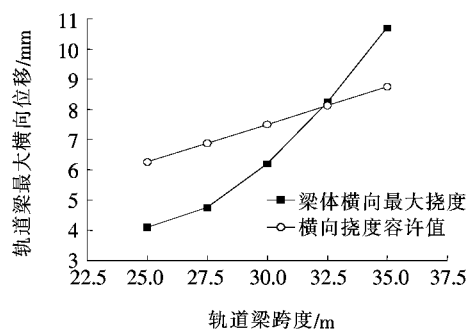


图 4 轨道梁横向变形值图

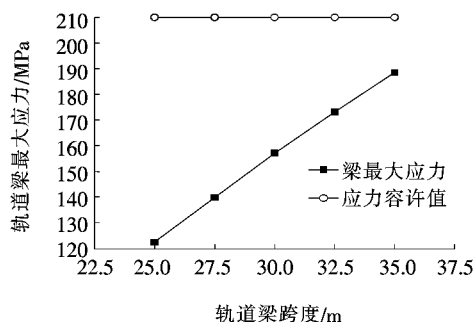


图 5 轨道梁最大应力值图

有超过结构的容许应力值;③ 当跨度大于 30 m 时,轨道梁的竖向挠度大于容许的竖向挠度值,当跨度大于 32.5 m 时,横向挠度也大于容许的横向挠度值,而当跨度小于 30 m 时,轨道梁的刚度和强度均有一定富余,由此可见,跨度取 30 m 时最为合理。

4.3 不同构件板厚对轨道梁的影响

轨道梁不同的钢板厚度影响着结构的刚度与强度,板太厚导致过多的用钢量会增加建造成本,所以确定合适的钢板厚度尤为重要。为了确定合适的钢板厚度以及分析不同钢板厚度对轨道梁结构的影响情况,建立 30 m 跨的轨道梁结构有限元模型,主梁截面尺寸以及横梁间距保持不变,改变各钢板件厚度如表 4 所示;有限元计算的结果如表 5 所示。

表 4 轨道梁不同板件厚度参数 mm

| 工况号 | 梁高 | 梁宽 | 横梁间距 | 顶板 | 底板 | 腹板 |
|-----|-------|-----|-------|----|----|----|
| 7 | 1 700 | 900 | 1 250 | 14 | 14 | 12 |
| 8 | 1 700 | 900 | 1 250 | 16 | 16 | 14 |
| 9 | 1 700 | 900 | 1 250 | 18 | 18 | 16 |
| 10 | 1 700 | 900 | 1 250 | 20 | 20 | 18 |
| 11 | 1 700 | 900 | 1 250 | 22 | 22 | 20 |
| 12 | 1 700 | 900 | 1 250 | 24 | 24 | 22 |

表 5 30 m 轨道梁不同厚度参数有限元分析结果

| 工况号 | 最大应力/MPa | 最大竖向变形/mm | 最大横向变形/mm | 1 km 用钢量(双线)/t |
|-----|----------|-----------|-----------|----------------|
| 7 | 193.28 | 36.22 | 8.30 | 1 400+34Q |
| 8 | 176.46 | 32.36 | 7.10 | 1 560+34Q |
| 9 | 157.13 | 29.29 | 6.19 | 1 720+34Q |
| 10 | 147.15 | 26.80 | 5.49 | 1 880+34Q |
| 11 | 133.77 | 24.72 | 4.93 | 2 040+34Q |
| 12 | 124.96 | 22.97 | 4.47 | 2 200+34Q |

注:Q 为每个桥墩用钢量。

从表 5 可以看出:随着板厚的增加,轨道梁结构的强度和刚度都在增加,工况 7、8 的竖向变形超过轨道梁允许的最大变形,不符合要求;从工况 9、10、11、12 可以看出:当各板件厚增加到 18、18、16 mm 以后,再增加钢板厚度轨道梁的刚度和强度增加的速率在变缓,而用钢量还在持续增加,由此建议采用 18、18、16 mm 厚度的钢板。

加大钢板厚度的工况 9、10、11、12 对比加大截面尺寸的工况 3、4、5、6,加大主梁截面尺寸提高轨道梁结构强度和刚度的效果更好,且用钢量也更少。由此可见,改变主梁截面尺寸比改变钢板厚度对轨道梁影响的程度更大。

5 桥墩的设计

由于该文悬挂式轨道梁为双线布置,桥墩两侧需支撑起轨道梁,考虑到桥墩的占地面积以及施工难易程度,设计采用变截面 T 形桥墩,T 形桥墩和轨道梁通过销轴连接,在各荷载工况下,桥墩横桥向和顺桥向位移应在规定的范围内。根据轨道梁设计要求,为满足桥墩结构物下部界限,桥墩高度要大于 11.5 m;为满足箱梁构造稳定性,箱形截面高宽比要小于 6,参考

国外已建的悬挂式单轨线路,确定桥墩的截面尺寸,并初步设计桥墩板厚,尺寸如表 6 所示。建立双线单跨简支的悬挂式轨道梁有限元模型,分析不同参数下的桥墩对整个轨道梁结构的影响。

表 6 桥墩各参数尺寸

| 部件 | 高×宽/(mm×mm) | 板厚/mm |
|-------|-----------------------------|-------|
| 墩柱截面 | 1 000×1 000 | 30 |
| 盖梁截面 | 1 100×1 000~1 000×1 000 变截面 | 30 |
| T 形桥墩 | 11 800×4 800 | 30 |

5.1 不同板厚的影响

为了确定桥墩最合适的钢板厚度以及不同钢板厚度对轨道梁结构的影响,根据已确定的桥墩参数,通过建立单跨轨道梁有限元模型,钢板厚度在合理的区间内分别取 26、28、30、32、34 mm 进行有限元分析比较,确定最合适的桥墩钢板厚度,不同桥墩钢板厚度下结构有限元结果如表 7 所示。

表 7 不同桥墩板厚有限元分析结果

| 板厚/mm | 恒载+活载 | 活载 | |
|-------|----------|-----------|-----------|
| | 最大应力/MPa | 最大竖向变形/mm | 最大横向变形/mm |
| 26 | 193.45 | 31.71 | 5.14 |
| 28 | 190.98 | 31.01 | 4.88 |
| 30 | 188.68 | 30.36 | 4.63 |
| 32 | 187.03 | 29.89 | 4.45 |
| 34 | 185.35 | 29.40 | 4.28 |

注:最大竖向变形包含塔顶的竖向变形。

从表 7 可知:桥墩的钢板厚度对轨道梁结构的变形有一定影响,轨道梁的变形包含了 T 形墩墩顶的变形。随着板厚的增加,结构的刚度和强度都有所增加,过度增加板厚会增加结构建设成本。由于 30 m 跨轨道梁容许最大竖向变形为 30 mm,当板厚取 30 mm 时,结构竖向变形为 30.36 mm,除去塔顶的竖向变形,轨道梁实际的变形小于 30 mm,符合要求,且结构用钢量最少。

5.2 桥墩的强度和刚度有限元分析

上文确定了桥墩的尺寸与板厚,对于墩顶,在列车荷载作用下,需验算其强度与刚度。现建立单个桥墩的局部模型,分析单线列车荷载作用下桥墩的变形,判断其是否符合要求。已知 T 形桥墩的尺寸如表 6 所示,有限元分析结果如图 6~9 所示。

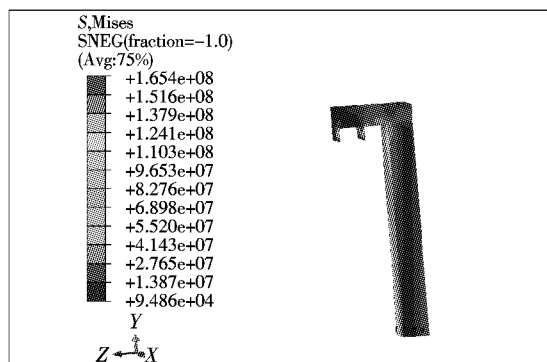


图 6 桥墩的 Mises 等效应力(单位:Pa)

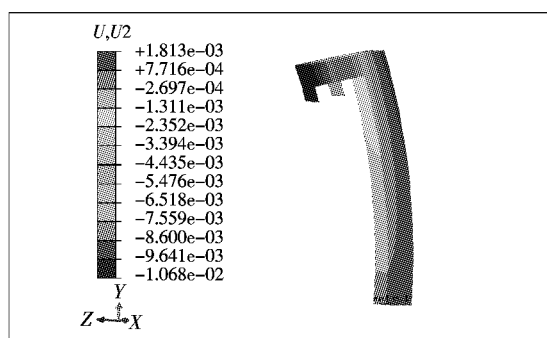


图 7 桥墩的竖向变形(单位:m)

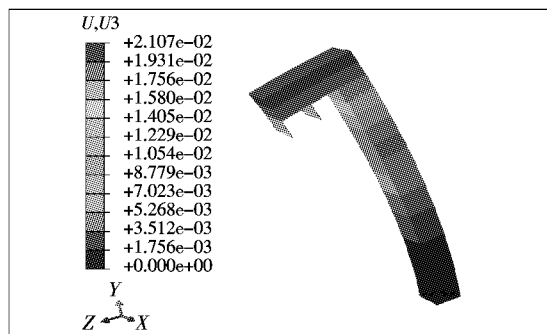


图 8 横桥向桥墩变形(单位:m)

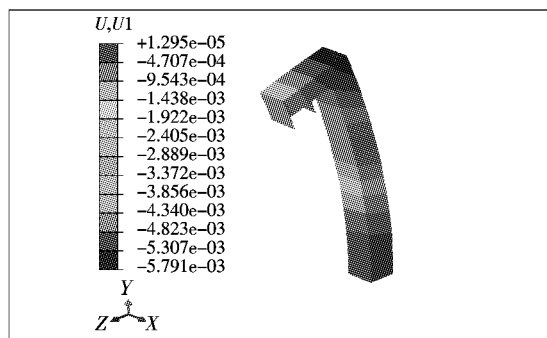


图 9 顺桥向桥墩变形(单位:m)

从图 6 中可以看出:在单列列车荷载以及恒载作用下,桥墩的最大应力为 165.4 MPa,小于容许应力 210 MPa;图 8 最大横桥向变形为 21.1 mm,小于墩顶

横向水平位移容许值 21.9 mm;图 9 中桥墩顺桥向的水平位移 5.8 mm,小于容许位移 27.3 mm;图 7 中最大竖向位移为 10.6 mm,小于容许位移 30 mm,故桥墩的强度和刚度满足设计要求。

6 结论

(1) 参照国外已建的悬挂式单轨轨道梁结构,在考虑列车转向架构造及尺寸下,设计出了一种侧挂式的悬挂式单轨结构,建立了有限元整体模型,分析了其在恒载和活载作用下的强度和刚度,证明符合列车行驶要求。

(2) 分析了轨道梁不同截面尺寸、不同跨度、不同钢板厚度对整体结构的影响,确定了轨道梁各参数尺寸;在截面尺寸一定的情况下,增加钢板厚度能有效地提高轨道梁的刚度与强度,但当钢板厚度增加到一定值后,轨道梁刚度提高的速率明显减缓,此时加大截面尺寸比增加板厚效果更好,更节省材料。

参考文献:

- [1] 周庆瑞,金锋.新型城市轨道交通[M].北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 李芾,许文超,安琪.悬挂式单轨车的发展及其现状[J].机车电传动,2014(2).
- [3] 李定南.国内外悬挂式单轨列车的发展与展望[J].国外铁道车辆,2017(3).
- [4] 辛建平.西德多特蒙德大学的高架悬挂客运系统[J].铁道科技动态,1984(4).
- [5] Giesen U, M ller S. Die Fahrzeuge Des H-Bahn-Systems University Dortmund [J]. Verkehr und Technik, 1983, 36(10): 371-382.
- [6] Kikuchi S, Onake A. Monorail Development and Application in Japan [J]. Journal of Advanced Transportation, 1988, 22(1): 17-38.
- [7] BAO T Z, HAN K, PAN D F. Method for Secondary Spring Load Equalization of Railway Vehicles with Two-Stage Spring Suspension: Modeling and Optimal Regulation [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(4): 936-948.
- [8] 杨平,鲍玉龙,曾永平,等.悬挂式单轨交通系统桥梁结构的选型设计[J].铁道工程学报,2016(7).
- [9] 肖云霞,王月明,杨东晓,等.悬挂式单轨直线轨道梁结构优化设计探讨[J].钢结构,2015(4).
- [10] Florian NEUNER, Ulrich GRAF. People Mover - Design of a Guideway for Suspended Vehicles [R]. 16TH Congress of Iabse, Lucerne, 2000.