

# 桁架结构人行天桥设计与分析

邹卫平

中誉设计有限公司，广东 佛山

收稿日期：2021年11月2日；录用日期：2021年11月16日；发布日期：2021年11月30日

---

## 摘要

近年来，城市人行桥越来越注重“以人为本”，人行桥设计越来越注重创新设计、景观设计、舒适性设计。城市人行桥已成为集人行过街、商业文化、观光功能于一体的构筑物。城市人行桥多为跨越城市主干路，地铁线路等，跨径较大，本文论述了佛山某大跨桁架人行天桥设计思路、方案比选和几个关键节点设计与分析，为类似工程设计提供参考。

---

## 关键词

城市人行天桥，钢桁架桥，有限元分析

---

# Design and Analysis of Truss Structure Pedestrian Bridge

Weiping Zou

Zhongyu Design Co. Ltd., Foshan Guangdong

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Nov. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

In recent years, urban pedestrian bridges pay more and more attention to “people-oriented”, and pedestrian bridge design pays more and more attention to innovative design, landscape design and comfort design. Urban pedestrian bridge has become a structure integrating pedestrian crossing, commercial culture and sightseeing functions. Most urban pedestrian bridges span urban trunk roads, subway lines, etc. with large span. This paper discusses the design idea, scheme comparison and selection and several key node design and analysis of a long-span truss pedestrian bridge in Foshan, so as to provide a reference for similar engineering design.

## Keywords

**Urban Pedestrian Bridge, Steel Truss Bridge, Finite Element Analysis**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市人行天桥常建于人口密集区，地上建筑密集，地下地铁、管线错纵交织，对于城市人行天桥的建造难度越来越大，不仅要满足安全、经济、美观、适用的原则，更重要的是要和已有构筑物的协调和融合，同时对桥梁景观也提出更高的要求[1] [2] [3]。国内外学者们基于天桥的选址、景观设计、舒适性设计、附属设施设计等方面的研究较多，但对于天桥设计关键节点设计较少，本文以佛山市某人行天桥为例，详细介绍了天桥关键节点设计和计算分析，为类似工程设计提供参考。

## 2. 概述

### 2.1. 工程概况

项目位于佛山市禅城区，横跨佛山某城市主干道(道路红线宽度为 67.5 米)，地下管线复杂且延主干道方向有 5 条地铁隧道，其中一条已废弃，平面位置如图 1 所示。

关键节点 1：人行桥需跨越 5 条地铁隧道，地面为 67.5 m 宽的主干道，桥梁跨度较大，桥型选择时需考虑经济、舒适、美观的桥型；

关键节点 2：南侧梯道第一跑梯道平面布置有一半与商业广场地下室结构边线重合，因此该部分梯道桥台和桥墩桩基布置应错开地下室布置，南侧梯道和周边构筑物关系，如图 2 所示；

关键节点 3：南侧梯道盖梁偏心布置，立墩条件受限，且为连续结构，需考虑梯道稳定性，同时需考虑下部结构的承载力。

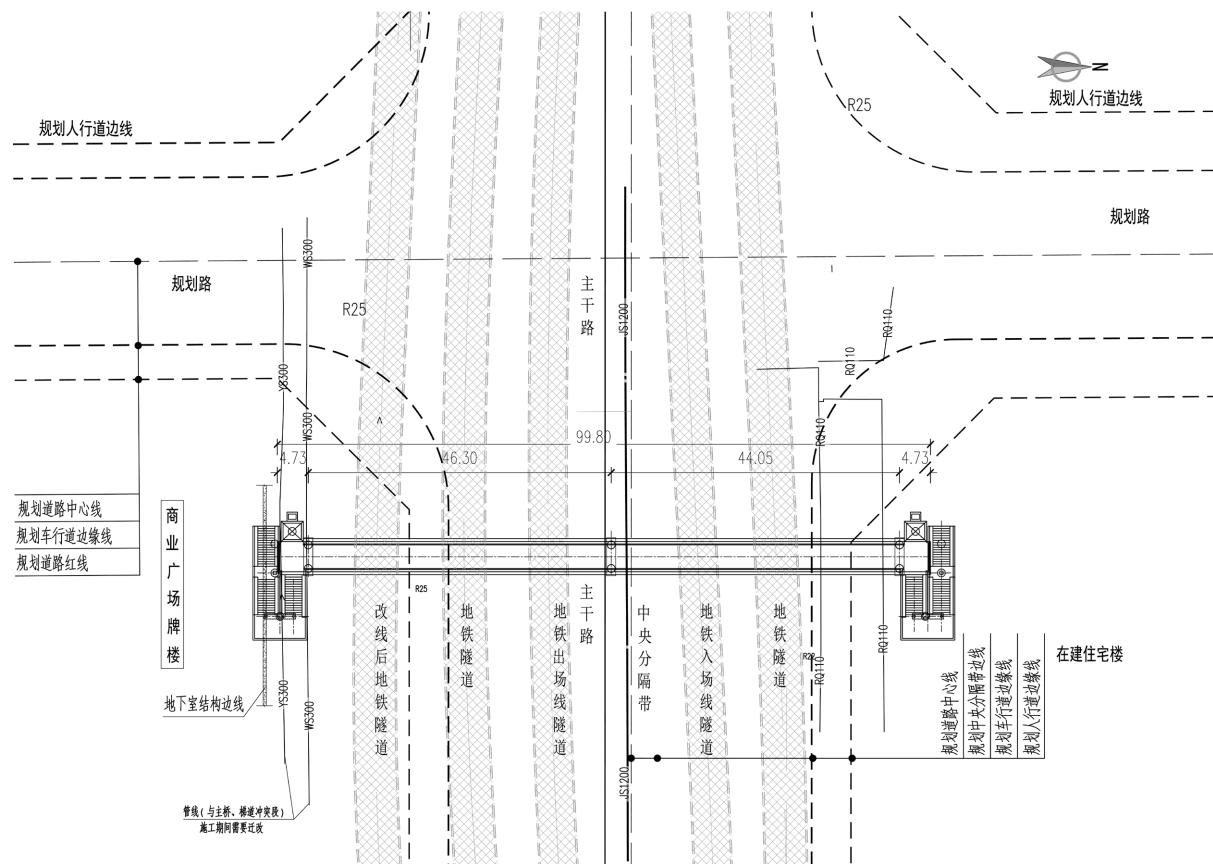
### 2.2. 主要技术标准

- (1) 设计荷载[4] [5]：人群荷载取 4.0 kPa，桥面板取 5 kPa。
- (2) 天桥净空高度：净空 5.0 m，实际预留 5.5 m，限高 5.0 m。
- (3) 桥梁抗震设防类别：丁类；抗震设防等级：按地震基本烈度 7 度设计，地震动峰值加速度为 0.1 g。
- (4) 设计安全等级：一级。
- (5) 环境类别：I 类。
- (6) 天桥设计基准期为 100 年。
- (7) 主桥横向布置：0.45 m (花槽) + 0.35 m (桁架) + 0.15 m (栏杆) + 3.6 m (人行道) + 0.15 m (栏杆) + 0.35 m (桁架) + 0.45 m (花槽) = 5.5 m。
- (8) 结构竖向基频：>3 Hz。

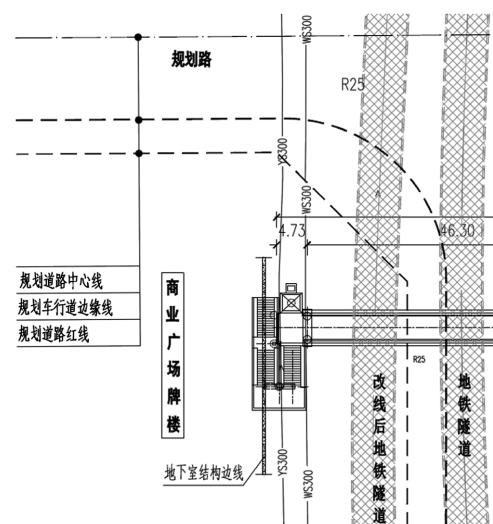
### 2.3. 工程地质

场地原始地貌单元属珠江三角洲冲积平原，场地为河涌。场地内素填土层厚 5.1~7.1 m，淤泥质土

22.0~27.5 m, 粉质黏土层厚 3.6~4.8 m, 强风化泥质粉砂岩层厚 11.0~14.4 m, 中风化泥质粉砂岩层厚 3.2~3.5 m。



**Figure 1.** Layout plan of bridge site  
**图 1.** 桥位平面布置图



**Figure 2.** South stairway layout plan  
**图 2.** 南侧梯道平面布置图

### 3. 主桥设计

#### 3.1. 总体设计

由于桥梁受地铁 2 号线、两侧商业广场、10 KV 高压电缆、雨水管、燃气管及规划中央分隔带上 1.2 m 铸铁供水管、规划绿地等的影响，综合考虑最终确定桥梁跨径组合为 4.5 m + 46.3 m + 44.05 m + 4.5 m。

#### 3.2. 桥型方案比选

##### 3.2.1. 桥梁结构比选

常见的城市人行天桥桥型有预应力混凝土连续梁桥、钢箱梁桥、钢桁架桥，本文比选了以上三种桥型，如表 1 所示，结合本项目实际情况，得出最优桥型。

**Table 1.** Comparison and selection of bridge type schemes

**表 1.** 桥型方案比选

桥式方案内容	钢桁架人行天桥	钢箱梁人行天桥	预应力混凝土连续箱梁桥
跨径组合		4.5 m + 46.3 m + 44.05 m + 4.5m	
特点	有利于较大跨径人行天桥，充分利用桁架空间用于行人，减小桥面与地面高差。	受力明确简单，但跨径较大时梁高较大，桥面与地面高差较大。	受力明确简单，刚度较大，但跨径较大时梁高较大，桥面与地面高差较大。
实施难度及周期	技术成熟、施工快捷。	技术成熟、施工快捷。	技术成熟、施工较慢。
雨棚设置	可利用桁架受力，简单美观。单独设立柱，雨棚形式多样化。	单独设立柱，雨棚形式多样化。	单独设立柱，雨棚形式多样化。
适用范围	大跨有景观要求的人行天桥。	小跨径有景观要求的人行天桥。	小跨径无景观要求的人行桥。
比选	推荐	不宜采用	不宜采用

由于钢箱梁、预应力混凝土连续梁桥梁桥结构自身高度较高，且需满足桥下净空限高要求，故梯道需要提升更高，需要更长的梯道进行展线，但桥址地处道路交叉口，延长梯道展线必将占用人行道，影响行人正常通行，故本设计推荐采用钢桁架结构。

##### 3.2.2. 桁架结构比选

桁架结构形式众多，本文选择了一个等高桁架方案和两个变高桁架方案进行比选，如图 3~5 所示，从经济、适用、美观几个方面对以上三个方案进行分析。



**Figure 3.** Effect drawing of recommended scheme

**图 3.** 推荐方案效果图

**Figure 4.** Effect drawing of comparison scheme I**图 4.** 比选方案一效果图**Figure 5.** Effect drawing of comparison scheme II**图 5.** 比选方案二效果图**Table 2.** Comparison and selection of truss structure**表 2.** 桁架结构比选表

比较内容	推荐方案	比选方案	
		比选方案一	比选方案二
桥梁跨径	$4.5 \text{ m} + 46.3 \text{ m} + 44.05 \text{ m} + 4.5 \text{ m} = 99.35 \text{ m}$	$4.5 \text{ m} + 46.3 \text{ m} + 44.05 \text{ m} + 4.5 \text{ m} = 99.35 \text{ m}$	
主桥方案	等桁高桁架桥		变桁高桁架桥
主桥结构特点	等桁高传力明确、受力合理，结构简洁明了；有标准段加工简单、施工方便，形状规整便于运输、安装。		变桁高桁架造型优美，构造复杂，无标准节段，不利于加工、施工。
后期养护	桁架结构需防腐。		桁架结构需防腐，雨棚平整度差养护存在安全隐患。
景观效果	造型美观，景观效果较好。		总体造型优美，但由于杆件较粗、跨径布置不对称影响景观效果。
用钢量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	318	411	383
主桥造价	较低	较高	较高
比选	推荐	不宜采用	不宜采用

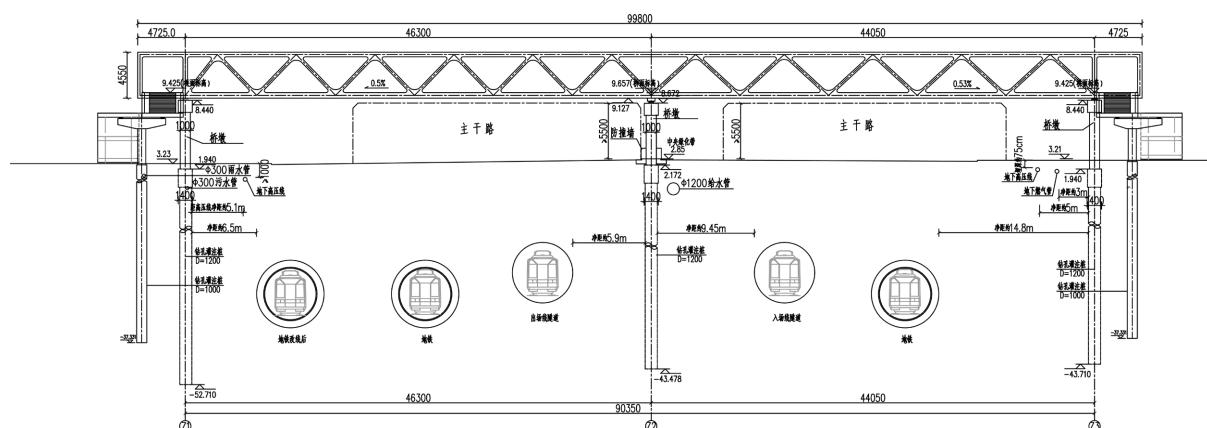
推荐方案造型上，用三角形构成整个受力结构，三角形桁架结构传力明确、受力合理，结构简洁明

了，更能有效的降低梁高，增大桥下净空；顶棚及天桥桁架三角位置采用简洁现代风的钢制中空三角框架装饰，带给司机、乘客及行人一种轻松愉快地感觉。

综合表 2 及以上比选，充分考虑人行天桥所处的地理位置，以及天桥的使用要求、造价和美观适用性，等桁高的桁架构造简洁明了、施工方便，从整个环境上与周围环境也更加协调，因此推荐第一个方案，即本工程中采用了等桁高双跨连续钢桁架的方案。

### 3.2.3. 天桥立面设计

天桥桁架高 4.55 m，高跨比约 1/10。天桥第一跨设置 6 个桁架节间，第一个节间为调整节间，其余为标准节间，调整节间长 7.1 m，腹杆倾斜角 52°，标准节间长 7.84 m，腹杆倾斜角 46°；天桥第二跨桁架节间长均为 8.81 m，腹杆倾斜角均为 43°，桥梁立面布置如图 6 所示。



**Figure 6.** Elevation layout of bridge

图 6. 天桥立面布置图

#### 4. 计算分析

采用 Midas/civil 软件建立有限元计算分析模型，对等高桁架人行桥进行强度验算、刚度验算和舒适度验算，并将计算结果与规范限值进行分析、总结。

#### 4.1. 强度计算

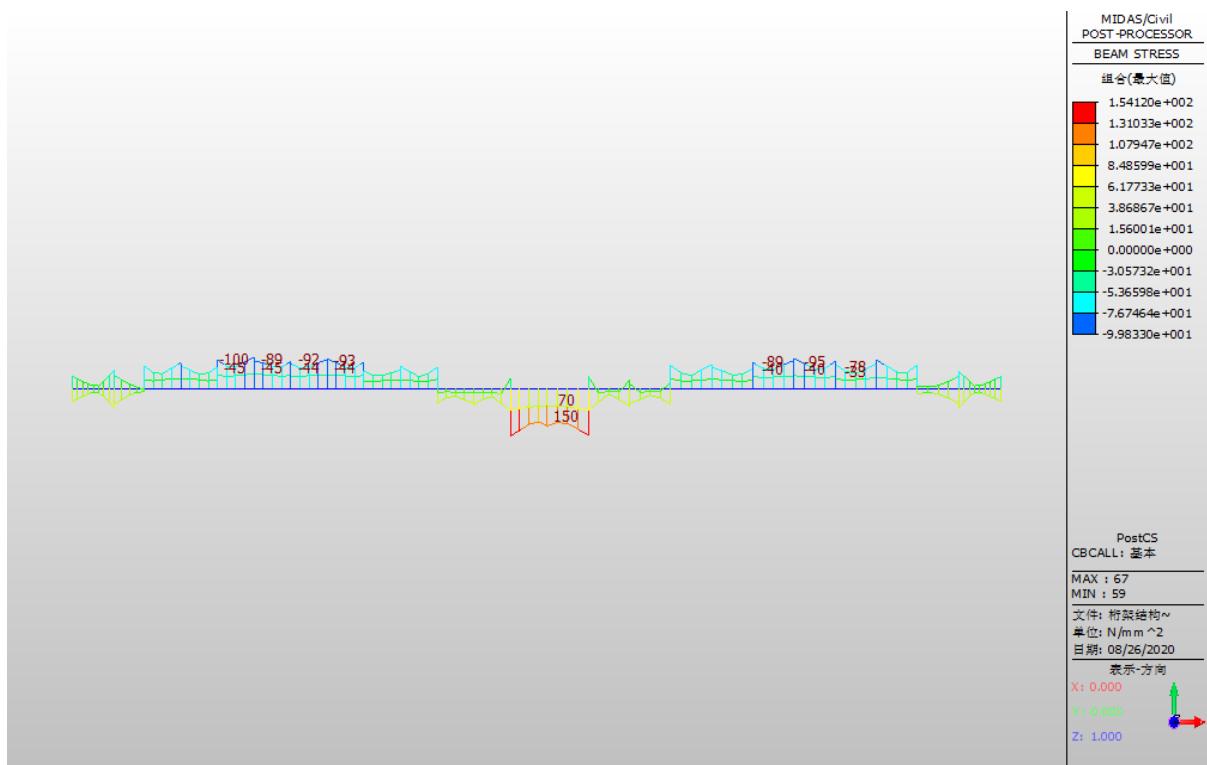
主梁在基本组合作用下，对承载能力极限状态进行分析，得到桁架桥主要受力杆件的应力包络图如图 7~9 所示。

从图7可以看出,上弦杆最大拉应力为150 MPa,位于中墩支点截面;最大压应力为100 MPa,位于跨中截面。从图8可以看出,下弦杆最大压应力为136 MPa,位于中墩支点截面;最大拉应力为94 MPa,位于跨中截面。从图9可以看出,腹杆最大压应力为157 MPa,位于跨中支点截面处;最大拉应力为114 MPa,位于近中墩支点截面处。计算结果与结构力学变形协调相符,计算结果合理,且最大各杆件组合应力均小于275 MPa,满足要求。

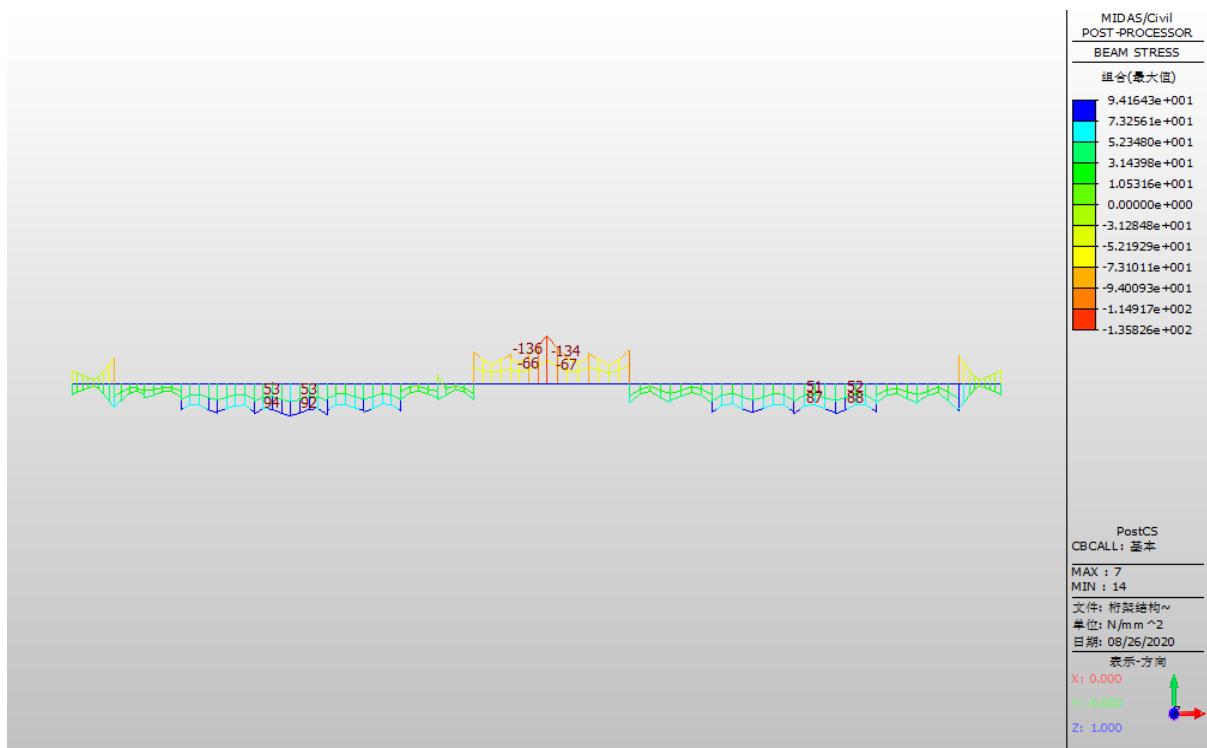
## 4.2. 挠度计算

主梁在标准组合作用下，挠度数据如图 10 所示：

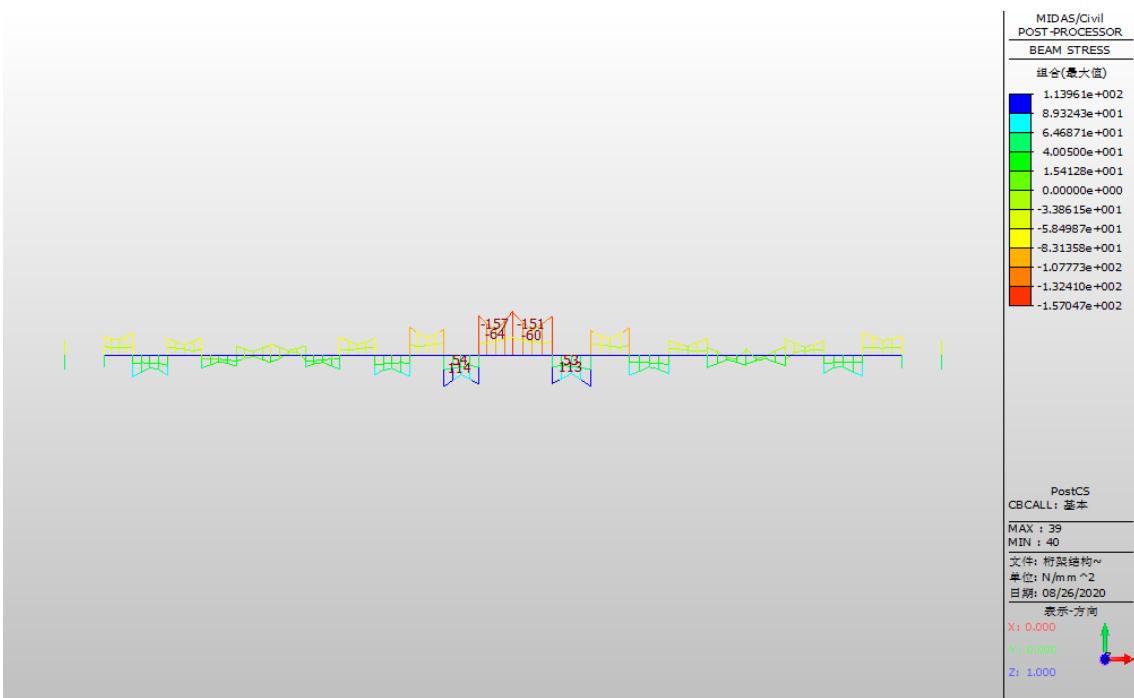
从图中可以看出，主梁在标准组合作用下最大挠度为  $37 \text{ mm} < 46300/800 = 57.9 \text{ mm}$ 。即满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》2.5.2 条小于  $L/800$ ，满足要求。



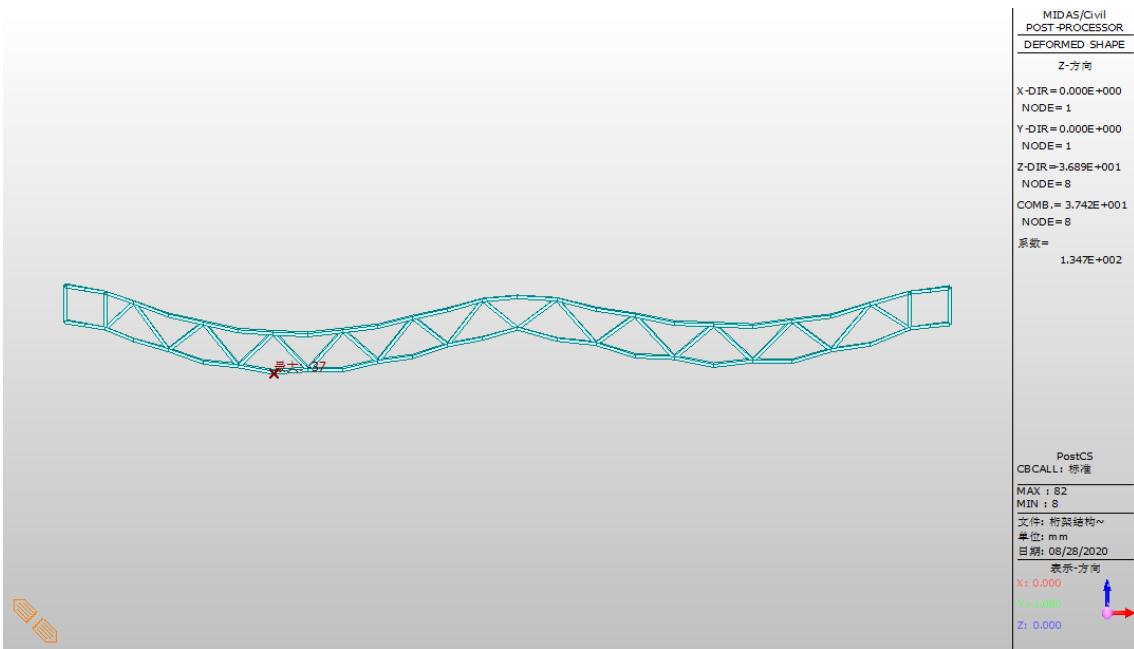
**Figure 7.** Basic combined stress envelope diagram of top chord  
**图 7.** 上弦杆基本组合应力包络图



**Figure 8.** Basic combined stress envelope diagram of bottom chord  
**图 8.** 下弦杆基本组合应力包络图



**Figure 9.** Basic combined stress envelope diagram of web member  
**图 9.** 腹杆基本组合应力包络图

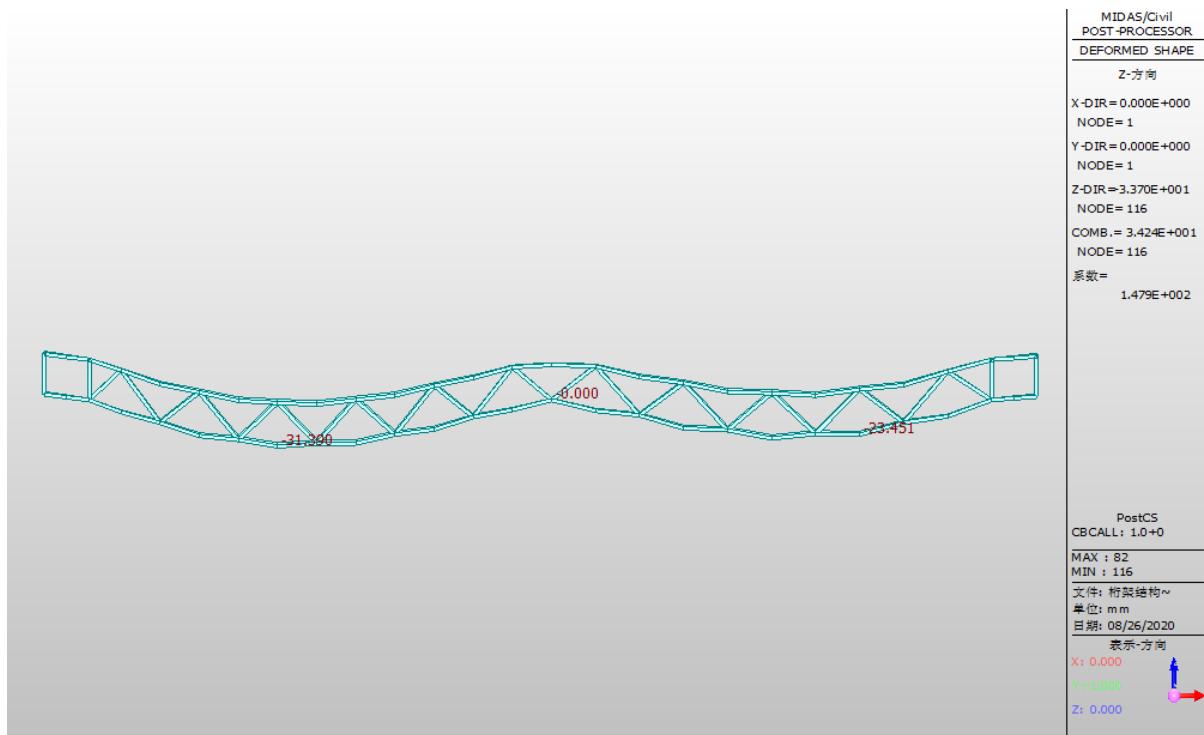


**Figure 10.** Maximum deflection under standard combination  
**图 10.** 标准组合下最大挠度图

### 4.3. 预拱度分析

由本文 3.2 可知, 标准组合下最大挠度为  $37 \text{ mm}$ , 大于  $L/1600 = 46300/1600 = 28.9 \text{ mm}$ , 因此需设置预拱度, 考虑  $1.0 * \text{恒载} + 0.5 * \text{活载}$  作用下竖向最大位移为  $31.390 \text{ mm}$ , 计算结果如图 11 所示。主梁施工

时预设预拱度为 32 mm。



**Figure 11.** Deflection data diagram of dead load + 0.5 live load  
**图 11.** 恒载 + 0.5 活载挠度数据图

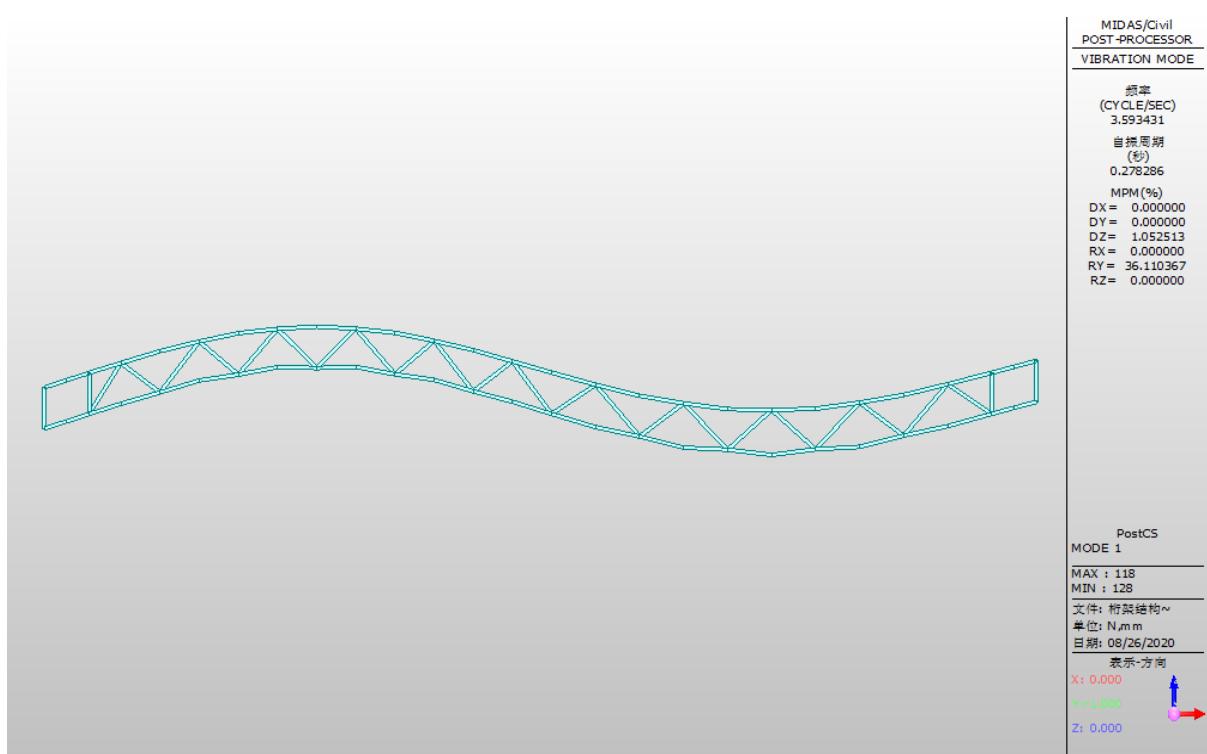
#### 4.4. 舒适性验算

依据《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69-95)要求, 天桥的频率不得小于 3 Hz, 本计算对天桥舒适性计算[6], 由模型提取频率如表 3 所示, 其中振型计算考虑二期荷载转化为节点质量(种植土除外), 计算结果偏安全。

**Table 3.** Summary of first 5 frequencies of overpass truss structure  
**表 3.** 天桥桁架结构前 5 阶频率汇总表

模态号	频率		周期
	(rad/sec)	(cycle/sec)	
1	22.58	3.59	0.28
2	30.86	4.91	0.20
3	39.34	6.26	0.16
4	45.51	7.24	0.14
5	51.94	8.27	0.12

由图 12 可以看出, 第一阶阵型频率为 3.59 Hz (考虑二期荷载, 计算结果偏安全), 大于 3 Hz, 满足舒适性要求。

**Figure 12.** First order mode diagram**图 12.** 第一阶振型图

## 5 局部设计

### 5.1. 南侧梯道桥台设计

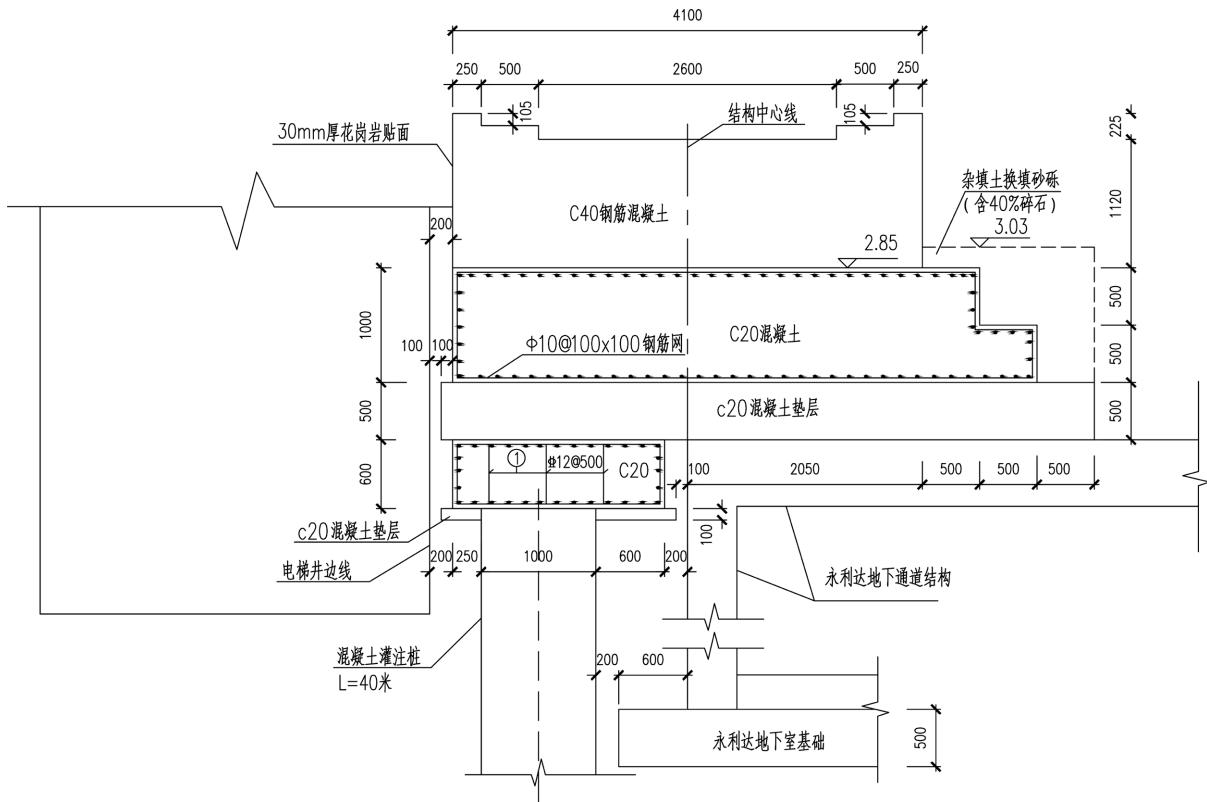
南侧梯道桥台与周边构筑物的关系较为复杂，桥台下方有一半为已有地下结构物，故无法在桥台中心立桩，本文桥台采用了扩大基础，为避免桥台产生不均匀沉降，在地下结构顶板与电梯井之间设置承托板；地下室顶板与桥台之间有 500 mm 的净距，如采用回填土，须采用机械进行压实，对已有地下室结构影响较大，为减小对地下结构的影响，本文采用 c20 砼垫层进行回填；南侧桥台与周边构筑物关系如图 13 所示：

### 5.2. 南侧梯道支座布置设计

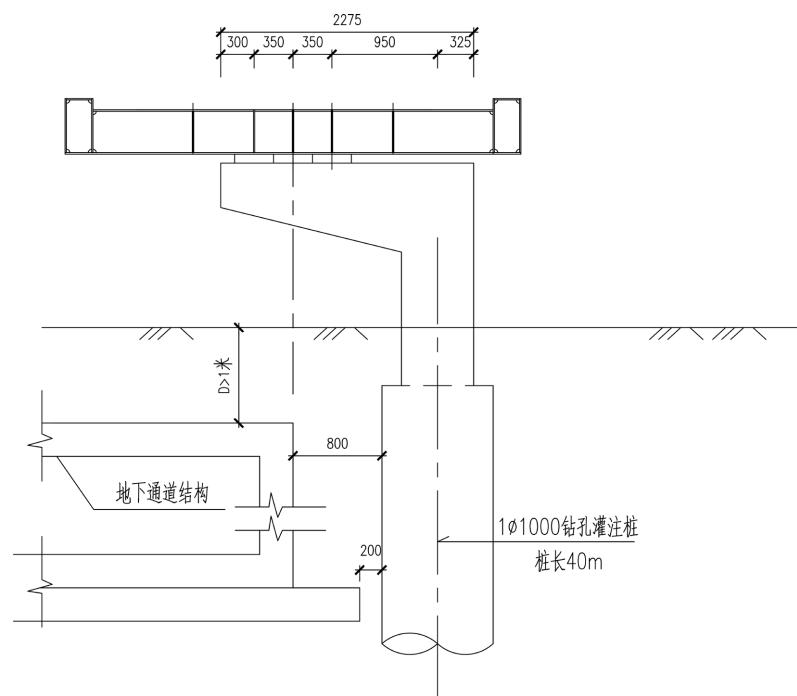
梯道桥台和桥墩均为偏心布置，本文就如何布置梯道偏心盖梁支座进行优化设计，通过固定悬臂盖梁外侧支座的位置，改变内侧支座距桥墩的距离，分析支座反力的变化，以及对下部结构的影响。偏心梯道立面布置如图 14 所示。

如图 15 所示，通过改变 P2 支座的位置，研究梯道反力重分布的情况，以及对下部结构内力的影响。采用 midas 有限元软件，建立梯道梁格模型如图 16 所示。

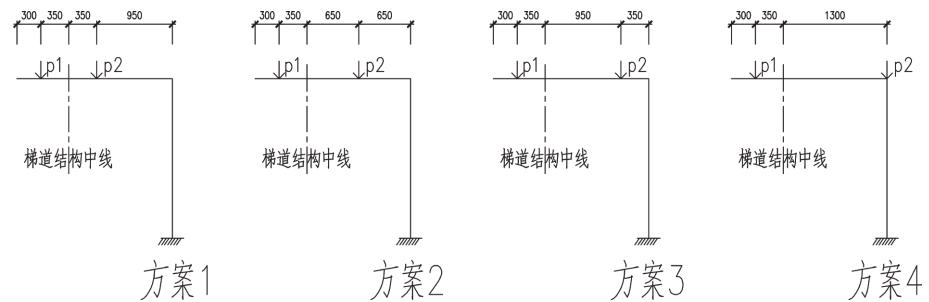
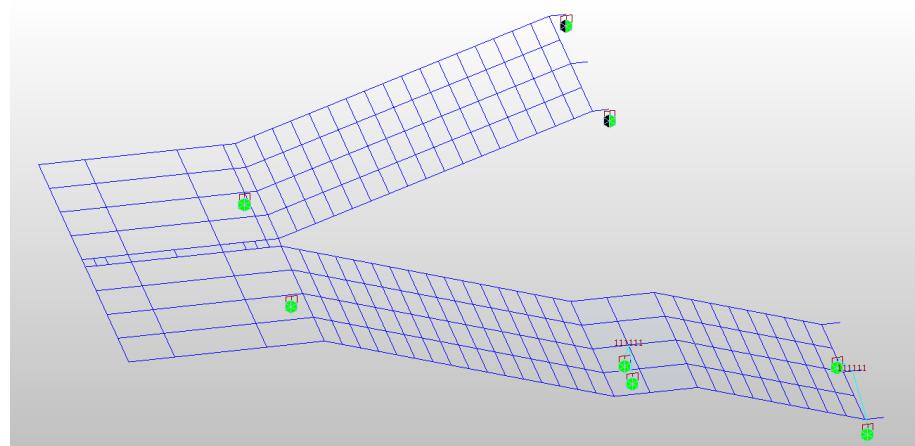
由表 4 可知，对于双支座悬臂盖梁，支座中心与上部结构中心偏心越大，两支座反力分布越不均匀；外偏载工况下，盖梁根部的合力矩最大；中载作用下，支座偏心对盖梁根部的影响最大；上部结构中心线与盖梁桥墩的偏心距不变，仅改变支座与上部结构中心的偏心距，对盖梁根部总力矩影响不大；综上所述，方案 I 能为梯道提供较好的支撑，且对上部结构的扭转力最小，故本文支座采用方案 I 的布置形式。



**Figure 13.** Relationship between abutment and underground structure facade  
**图 13.** 桥台与地下构筑物立面关系



**Figure 14.** Relationship between eccentric terrace pier and underground structure facade  
**图 14.** 偏心梯道桥墩与地下构筑物立面关系

**Figure 15.** Layout scheme of T1-1 eccentric stair pier support**图 15.** T1-1 偏心梯道桥墩支座布置方案**Figure 16.** Finite element calculation model of ladder**图 16.** 梯道有限元计算模型**Table 4.** Calculation results of support reaction of cantilever bent cap**表 4.** 悬臂盖梁支座反力计算结果

项		偏心距(m)	反力(kN)	力矩(kN·m)	合力矩(kN·m)
人群荷载 中载作用	方案 1	0.95	128	121	310
		1.65	114	189	
	方案 2	0.65	105	69	283
		1.65	130	215	
	方案 3	0.35	84	29	259
		1.65	139	229	
	方案 4	0	65	0	238
		1.65	144	238	
人群荷载 外偏载作用	方案 1	0.95	139	132	432
		1.65	182	300	
	方案 2	0.65	97	63	423
		1.65	218	360	
	方案 3	0.35	75	26	418
		1.65	238	392	
	方案 4	0	59	0	415
		1.65	252	415	

Continued

人群荷载 内偏载作用	标准组合	方案 1	0.95	175	166	385
			1.65	133	219	
	方案 2	0.65	123	80	369	
		1.65	175	289		
	方案 3	0.35	94	33	361	
		1.65	199	328		
	方案 4	0	74	0	356	
		1.65	216	356		

### 5.3. 梯道抗倾覆验算

采用梯道计算模型，施加恒载和人群偏载，偏心距为 1.8 m (1/2 梯道宽)，计算结果如下所示：

由图 17 可知，偏载作用下，梯道所有支座均未出现负反力，内外侧支座反力的分布较均匀，桥台处支座应力储备较小，桥台处第一个钢箱梯道内填充 C30 微膨胀混凝土，可从构造上增加桥台处支座压应力储备，从而提高梯道抗倾覆安全系数。

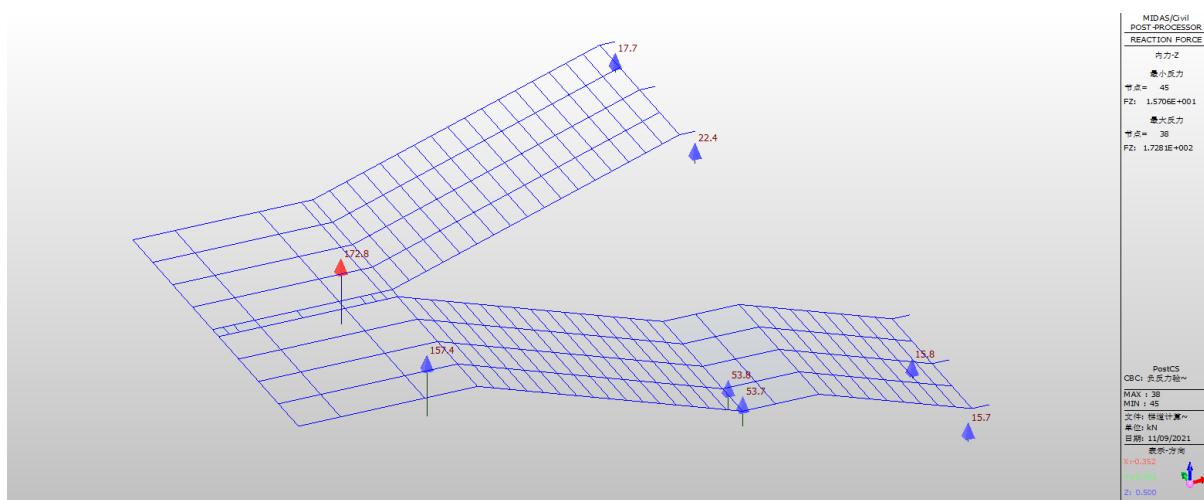


Figure 17. Bearing reaction under partial load

图 17. 偏载作用下支座反力

## 6. 结论

人行天桥的投入使用，不仅实现了人车分流，而且也为城市建设增光添彩，创造了自然、人文和城市相互融洽的空间场所。

1. 桁架结构桥梁能够较好地适应大跨结构，对于跨越城市主干道及大跨径天桥桥型有较大竞争力；
2. 对于跨越道路的人行天桥，桁架结构天桥桥面人行道板标高较箱梁结构天桥低，故桁架结构天桥梯道踏步较少，有利于提高行人过街通行的效率及通行舒适度；
3. 等高桁架结构具有构造简单、传力明确、受力合理；有标准节段，有利于工厂化加工；构造规整方便现场吊装施工；用钢量小，故总造价较变桁高桁架桥低；造型优美，景观效果好等优点；
4. 由 midas/civil 计算分析可知人行天桥结构应力满足规范要求；

5. 人行天桥结构刚度满足规范要求, 经验算设置 32 mm 预拱度可使该桁架结构桥梁在运营期间受力更加合理;
6. 竖向一阶振型频率为  $3.59 \text{ Hz} > 3 \text{ Hz}$ , 舒适度满足规范要求;
7. 对于地下环境复杂, 且无立墩条件的桥台, 可采用扩大基础, 但因保证处理后的地基承载力满足设计要求, 且须考虑地基的不均匀沉降, 本文为类似工程提供一个参考思路;
8. 对于布置双支座的悬臂盖梁, 仅改变支座偏心对悬臂盖梁根部的影响不大, 支座布置中线与上部结构中线重合, 对上部结构产生的扭矩最小, 该布置方案最合理;
9. 对于箱型结构, 进行抗倾覆计算时, 压应力储备较小时, 可通过填充微膨胀砼, 增加结构自重, 从而提高结构压应力储备。

## 参考文献

- [1] 肖春, 钱治杭, 李杰. 横向偏心桥墩的设计探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 109-112, M0010.
- [2] 陈珊珊. 城市人行天桥造型设计研究——以深圳市滨河大道人行天桥更新改造设计为例[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [3] 褚东升, 赵国栋, 曾革助. 空间异形桁架人行天桥设计与计算[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 127-130.
- [4] 北京市市政工程研究院. 城市人行天桥与人行地道技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [5] 上海市政工程设计研究总院. 城市桥梁设计规范 CJJ11-2011 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 陈政清, 华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.