

Simulation Study on Stability of Half-Through Steel Truss Girder

Guo Xiangren^{1,2}, Wang Cong^{1,2}, Zhang Wenbo^{1,2}, He Honglin^{1,2}, Han Shoushuai^{1,2}, Zhao Man^{1,2,*}

¹School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, China

²Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang, China

Email address:

3188923587@qq.com (Guo Xiangren), 2732294087@qq.com (Wang Cong), 1524611418@qq.com (Zhang Wenbo),

921399980@qq.com (He Honglin), 1129756624@qq.com (Han Shoushuai), sjzhaoman@163.com (Zhao Man)

*Corresponding author

To cite this article:

Guo Xiangren, Wang Cong, Zhang Wenbo, He Honglin, Han Shoushuai, Zhao Man. Simulation Study on Stability of Half-Through Steel Truss Girder. *Science Discovery*. Vol. 11, No. 3, 2023, pp. 100-106. doi: 10.11648/j.sd.20231103.14

Received: May 2, 2023; Accepted: May 23, 2023; Published: May 29, 2023

Abstract: In order to discuss and analyze the simplified calculation model and influence factors of external stability of half-through steel truss girder. 56 m half-through railway steel truss girder was set as a study object. Its 3-D whole model was build with finite element software ANSYS. The linear stability coefficient and the buckling mode under different load conditions were analyzed. The results show: The buckling curves under all conditions present as that external buckling of upper chord. According to the structural features and buckling features of half-through steel truss girder, the whole model was simplified as plane model. It was composed of semi-frame and upper chord with lateral elastic bearings, and the calculating steps in external stability analysis are given. On the basis of simple plane model, the parameter effect analysis of external stability of half-through steel truss girder was conducted with finite element method. The influence law of the high, the width of main truss and area of wind brace on lateral displacement of semi-frame, lateral stiffness of upper chord and overall structural stability coefficient. The results show: increasing the high of main truss, decreasing the width of main truss and installing wind brace all can effectively improved stability.

Keywords: Half-Through Steel Truss Girder, External Stability, Simulation Analysis, Plane Model, Influence Factors

半穿式钢桁梁的面外稳定性仿真分析研究

郭向仁^{1,2}, 王聪^{1,2}, 张文博^{1,2}, 何泓林^{1,2}, 韩守帅^{1,2}, 赵曼^{1,2*}

¹石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄, 中国

²道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 石家庄, 中国

邮箱:

3188923587@qq.com (郭向仁), 2732294087@qq.com (王聪), 1524611418@qq.com (张文博), 921399980@qq.com (何泓林),

1129756624@qq.com (韩守帅), sjzhaoman@163.com (赵曼)

摘要: 为探析半穿式钢桁梁面外稳定性的简化计算模型及其影响因素, 本文以56 m半穿式铁路钢桁梁为研究对象, 采用有限元软件ANSYS建立了结构的整体模型, 分析了不同荷载工况下的线弹性稳定系数和屈曲模态, 结果表明: 半穿式钢桁梁各工况的失稳曲线均表现为上弦杆的面外挠曲变形; 根据半穿式钢桁梁的结构特点和屈曲特征, 将整体模型简化为由半框架和侧向弹性支撑的上弦杆组成的平面模型, 并给出了面外稳定性分析的计算步骤。基于平面简化模型, 采用有限元法对56 m半穿式钢桁梁面外稳定性进行参数影响分析, 探讨了主桁高度、主桁宽度以及风撑面积对

半框架侧向位移、上弦杆侧向支撑刚度以及整体稳定系数的影响规律。结果表明：增加桁高、减小桁宽以及加装风撑均可有效提高结构稳定性。

关键词：半穿式钢桁梁，面外稳定性，仿真分析，平面模型，影响因素

1. 引言

半穿式钢桁梁因结构简洁、施工方便、桥面净空不受限制，在铁路、公路、港口桥梁中应用广泛。但由于两片主桁顶部不设横向联结系，使得上弦杆侧向刚度较低，容易引起结构的横向失稳[1-5]。

国内外因半穿式钢桁梁平面外屈曲而导致桥梁整体失稳的事故屡有发生。1875年俄罗斯的克夫达敞式桥，因上弦杆受压失稳而引起全桥破坏，这一事故引起了桥梁界的广泛关注，国内外许多学者针对半穿式钢桁梁的稳定问题进行了研究[6-10]。既有研究方法主要分为两种，一种是将半穿式钢桁梁上弦杆简化为侧向弹性支撑下的连续梁，根据能量法或势能驻值原理推导屈曲临界力的理论解析解[11-15]，但这种方法大都基于一定的假定，如假定节间长度相等，杆件轴力相等，弹性支撑等间距，与实际结构存在一定差异，且解析解计算繁复，实用性较差；另一种是借助于有限元软件建立结构的整体仿真模型进行屈曲分析[16, 17]，由于半穿式钢桁梁的构件种类和数量繁多，建模工作量大，不利于结构的快速化设计。

基于以上原因，本文以56 m半穿式铁路钢桁梁为研究对象建立空间整体模型，开展不同荷载工况下的屈曲分析，根据半穿式钢桁梁的结构特点和屈曲特征，建立一种基于有限元法的面外屈曲分析简化模型，并对其面外屈曲影响因素开展参数分析。

2. 半穿式钢桁梁的整体分析

2.1. 空间整体模型的建立

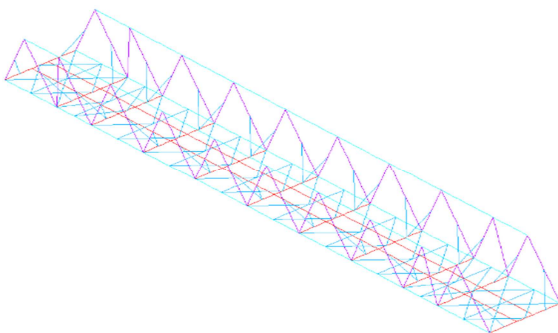


图1 56 m半穿式钢桁梁空间有限元模型。

某半穿式铁路钢桁梁主桁采用无竖杆的三角形结构体系，跨径56 m，两片主桁横向中心距6.5 m，主桁上下弦杆竖向中心距6.0 m，设计荷载采用客货共线列车荷载。为探究半穿式钢桁梁整体结构的屈曲特征，并充分考虑结构的整体效应，本文采用有限元软件ANSYS [18]建立56 m半穿式钢桁梁的空间整体模型，采用beam189 [19]模拟杆

件受力，结构空间有限元模型如图1所示，考虑恒载和列车设计活载的组合作用，对半穿式钢桁梁整体结构进行线弹性稳定分析。

2.2. 线弹性屈曲分析

由于结构稳定性与列车荷载位置和荷载分布长度等密切相关，故在此选择列车荷载分布长度为 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $L/2$ 、 $5L/8$ 、 $3L/4$ 、 $7L/8$ 及 L （ L 为跨径）时（分别记作工况1~工况8）8种工况进行分析，不同荷载工况下的线弹性稳定系数如图2所示。由图2可知，当列车荷载处于钢桁梁不同位置时，列车荷载在钢桁梁的分布长度不同，结构稳定系数将随之变化，且相差较大。列车荷载分布长度小于 $L/2$ 时，稳定系数均很大，且稳定系数随荷载分布长度的增加，稳定性迅速减弱；当列车荷载分布长度大于 $L/2$ 时，随着列车荷载分布长度的逐渐增加，稳定系数的增幅逐渐趋缓，其中工况8稳定系数最低，约为9.15，说明列车荷载满布桥跨时为最不利荷载工况，最容易发生失稳，其屈曲模态如图3所示。由图3可知最不利荷载工况下的屈曲变形主要表现为上弦杆的侧向屈曲失稳，腹杆随上弦杆侧向挠曲变形而发生变位，同时腹杆也在一定程度上限制上弦杆的侧向位移，对上弦杆的侧向变形起到一定约束作用。

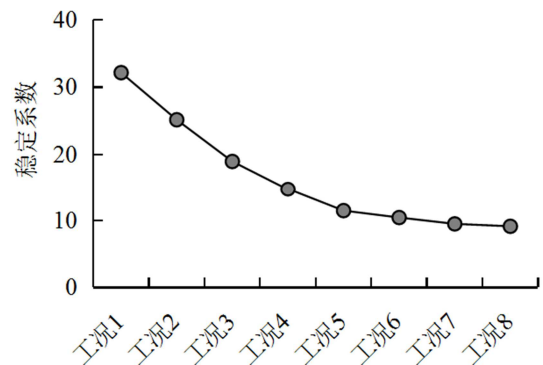


图2 不同荷载工况下的线弹性稳定系数。

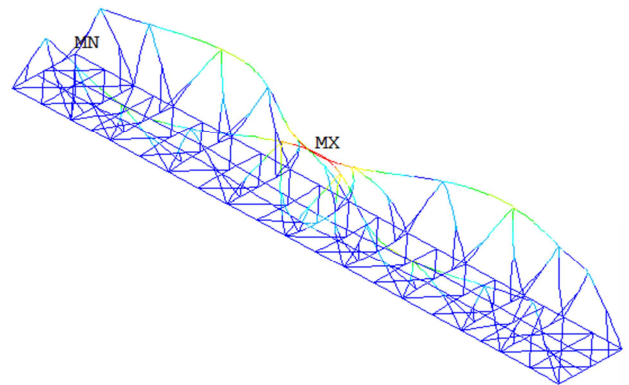
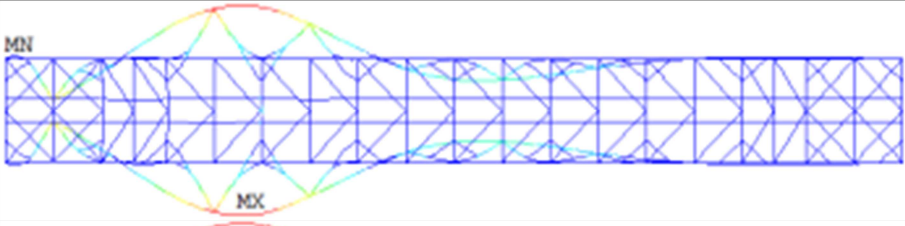
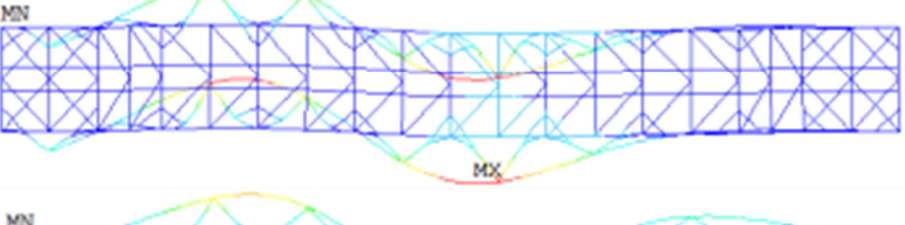
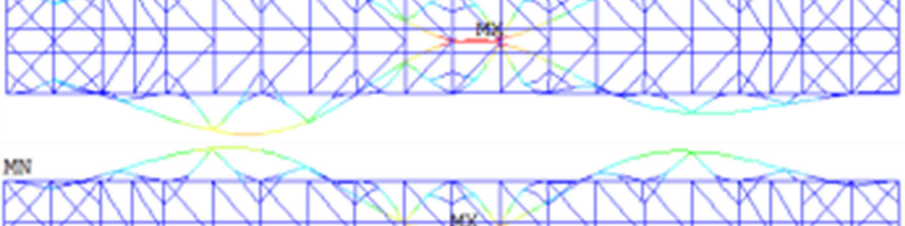
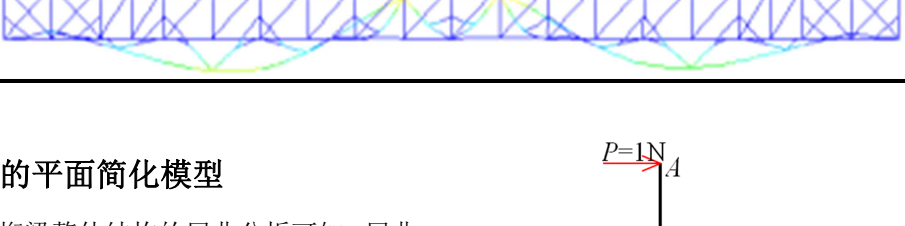


图3 最不利工况下的屈曲模态三维图。

表1 给出了4种代表性工况的稳定性分析计算结果，不同工况下半穿式钢桁梁的屈曲模态均表现为上弦杆的侧向挠曲变形，而下弦杆、腹杆、桥面系等杆件变形相对较小，主要是因为半穿式钢桁梁上弦杆之间没有横向杆件连接，虽然腹杆和横梁组成的半框架对上弦杆的横向变形有限制，但半框架所能提供的侧向支撑刚度较小，上弦杆横向约束较弱，因此荷载作用下上弦杆易发生侧向挠曲失稳。

另外从表1还可看出不同荷载工况的屈曲半波数不同，说明屈曲失稳时挠曲线形状与列车荷载分布长度有关，主要是由于随着列车荷载分布长度的不同，上弦杆各杆件轴力大小和分布均会随之改变，因此屈曲模态也呈现不同的半波，综合来看满布列车荷载时稳定系数是最低的，屈曲半波数最多，后续参数分析均已此工况为基础进行计算。

表1 不同荷载工况下的稳定性分析计算结果。

工况	稳定系数	1阶屈曲模态	半波数
工况2	25.16		2
工况4	14.77		2
工况6	10.46		3
工况8	9.15		3

3. 半穿式钢桁梁的平面简化模型

通过对半穿式钢桁梁整体结构的屈曲分析可知，屈曲模态主要是上弦杆的侧向挠曲变形，而主桁腹杆、联结系横梁以及风撑共同组成开口半框架，对上弦杆提供侧向支撑，因此半穿式钢桁梁面外屈曲分析可以采用如图4所示的平面简化模型，图4(a)中AB、CD均为腹杆，BC为横梁，EF、GH为风撑。图4(b)中，图中L为半穿式钢桁梁上弦杆总长度，z为半穿式钢桁梁上弦杆平面外方向，k为半框架对上弦杆的侧向支撑刚度，根据图4(a)计算确定，P为上弦杆轴向力。

根据图4所示的平面简化模型进行稳定分析的主要步骤如下：①首先按图4(a)计算单位水平荷载作用下半框架顶端的横向水平位移 δ ；②根据位移和刚度互为倒数的关系，计算半框架对上弦杆的侧向支撑刚度k；③按图4(b)进行稳定分析，计算屈曲荷载 P_{cr} 、稳定系数，确定屈曲模态等。

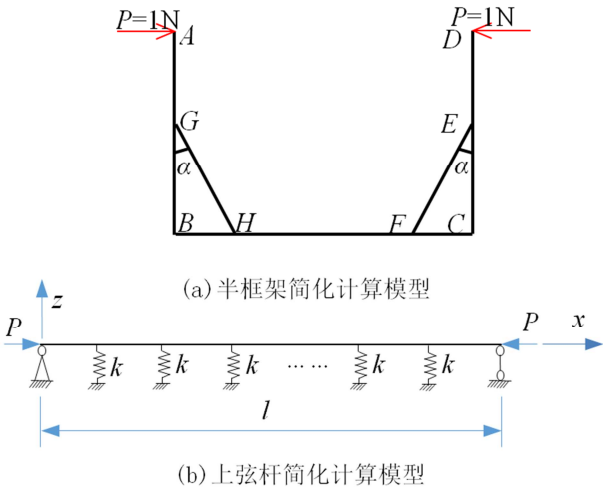


图4 半穿式钢桁梁面外屈曲分析平面简化模型。

针对平面模型很多文献给出了相关的理论计算公式,如张维超[10]给出了计算半框架顶端横向水平位移 δ 的计算公式:

$$\delta = \left(\frac{h^3}{3EI_c} + \frac{Bh^2}{2EI_g} \right) - F \left(\frac{5h^3 \sin \alpha}{48EI_c} + \frac{h^3 \sin \alpha \tan \alpha}{8EI_g} \right) \quad (1)$$

式中 F 为风撑轴力,计算公式为:

$$F = \frac{5I_g \cos \alpha + 6I_c \sin \alpha}{2I_g \sin \alpha \cos \alpha + 2I_c \sin^2 \alpha + \frac{24I_c I_g}{h^2 \sin \alpha} \times \frac{1}{A}} \quad (2)$$

式中, h 为腹杆高度,也就是主桁高度; EI_c 为腹杆抗弯刚度; B 为横梁长度,也就是主桁宽度; EI_g 为横梁抗弯刚度; A 为风撑面积; α 为风撑与腹杆夹角。

岳子翔等[11]采用能量法对半穿梁上弦杆的屈曲临界力进行了推导,最终的计算公式为:

$$\left(2P \frac{t^2 \pi^2}{l^2} \sum_{i=1}^{N/2} x_i \int_{(i-1)l/N}^{il/N} \cos^2 \frac{\pi x}{l} dx - \frac{\pi^4 EI}{2l^3} t^4 - \frac{kN}{2} \right) a_t + P \sum_{i=1}^{N/2} x_i \int_{(i-1)l/N}^{il/N} \sum_m \frac{2tm\pi^2}{l^2} a_m \cos \frac{\pi x}{l} \cos \frac{m\pi x}{l} dx = 0 \quad (3)$$

式中, P 为上弦杆杆件 midpoint 最大轴力; a_t 、 a_m 为特定系数, $t=1 \sim n$, $m=1 \sim n$, n 为三角级数的项数。由于解析解表达式繁杂,不管是计算半框架位移还是计算屈曲荷载,计算过程都比较复杂,因此实用性较差,故本文采用有限元软件ANSYS分别建立半框架和上弦杆的数值模型,可很便捷更准确地计算屈曲临界力、稳定系数以及屈曲模态。

4. 基于平面模型的稳定性参数影响分析

由半穿式钢桁梁平面模型可知,结构稳定性与半框架所能提供的侧向支撑刚度有密切关系,而半框架由腹杆、横梁和风撑三种构件组成,其尺寸主要由结构总体高度和宽度决定,故本文从主桁高度、主桁宽度以及风撑的设置三个方面,对半穿式钢桁梁稳定性进行分析。

4.1. 主桁高度影响分析

主桁高度为主桁上下弦杆截面中心的竖向距离,是钢桁梁结构设计最重要的参数之一,一般根据高跨比并结合结构受力综合比选确定桁高。

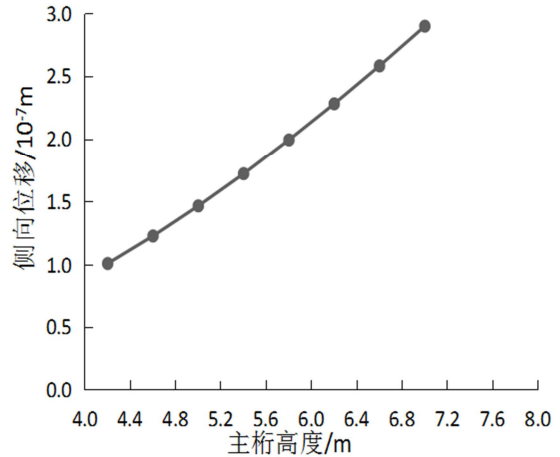
4.1.1. 侧向位移和侧向支撑刚度

不同主桁高度时,半穿式钢桁梁的半框架侧向位移、上弦杆侧向支撑刚度的变化规律如图5所示。由图5可知,随着主桁高度的增加,半框架侧向位移逐渐增加,与之相反侧向支撑刚度则逐渐减小,故对上弦杆的横向约束减弱,因此上弦杆的屈曲临界力会有所减小,但由于支撑刚度对临界荷载的影响有限,故临界荷载减小幅度不会很大。

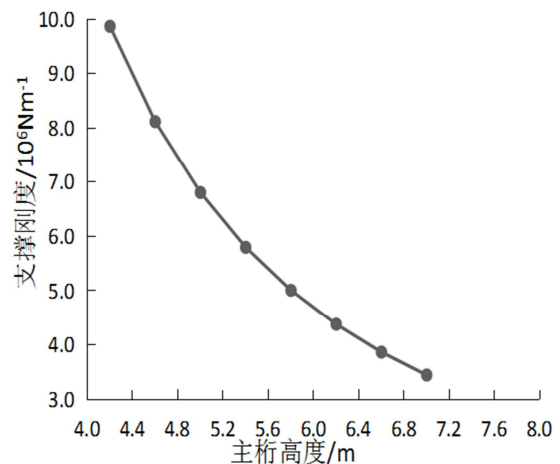
4.1.2. 线弹性稳定分析

不同主桁高度时稳定系数的变化规律如图6所示。由图6可知稳定系数随主桁高度增加线性递增,桁高每增加1m,稳定系数提高4%左右。这是由于主桁高度增加,使得上弦

杆轴向压力减小,因此在屈曲临界力基本不变或变化较小的前提下,结构稳定系数则会相对提高。因此增加桁高,虽然会使上弦杆侧向支撑刚度减小,并使屈曲荷载有所减小,但增加梁高可使弦杆轴向压力显著减小,因此总体而言增加桁高更有利于提高结构安全系数。故在条件允许的情况下,建议选择较大的主桁高度以保证结构具有足够的稳定性。



(a) 半框架侧向位移



(b) 上弦杆侧向支撑刚度

图5 主桁高度对侧向位移和支撑刚度的影响。

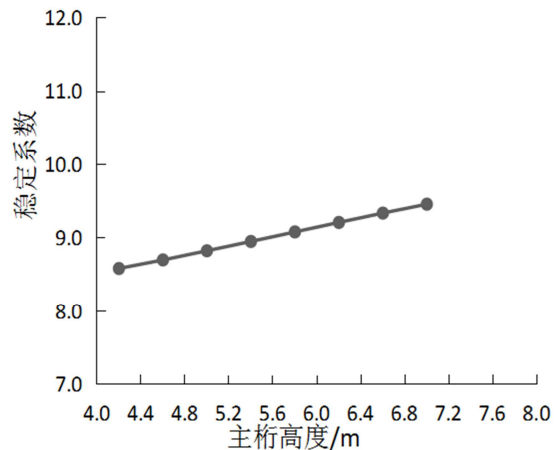


图6 主桁高度对稳定系数的影响。

4.2. 主桁宽度影响分析

主桁宽度为钢桁梁两片主桁间的横向距离，一般根据线路类型并结合规范规定确定，对结构的横向刚度影响较大，TB 10091—2017《铁路桥梁钢结构设计规范》[20]规定，简支钢桁梁宽跨比不宜小于1/20。

4.2.1. 侧向位移和侧向支撑刚度

不同主桁宽度时半框架侧向位移、上弦杆侧向支撑刚度如图7所示。由图7可知，侧向位移随着主桁宽度增加而增加，这是由于主桁跨度增加，使得横梁变形加大，半框架侧向位移也将随之增加，上弦杆侧向支撑刚度将会逐渐减小，结构横向稳定性减弱，更容易发生侧向弯曲失稳。但是较大的主桁宽度，可提高半穿式梁的抗扭性能。在进行半穿式钢桁梁设计时，在满足规范的前提条件下，应综合考虑弯曲失稳和扭转失稳，以保证结构安全。在桁宽受限条件下，亦可通过其他方法来提高结构稳定性，如增加弦杆、腹杆和横梁截面尺寸等方法，提高构件刚度和承载力，进而提高结构的整体稳定性。

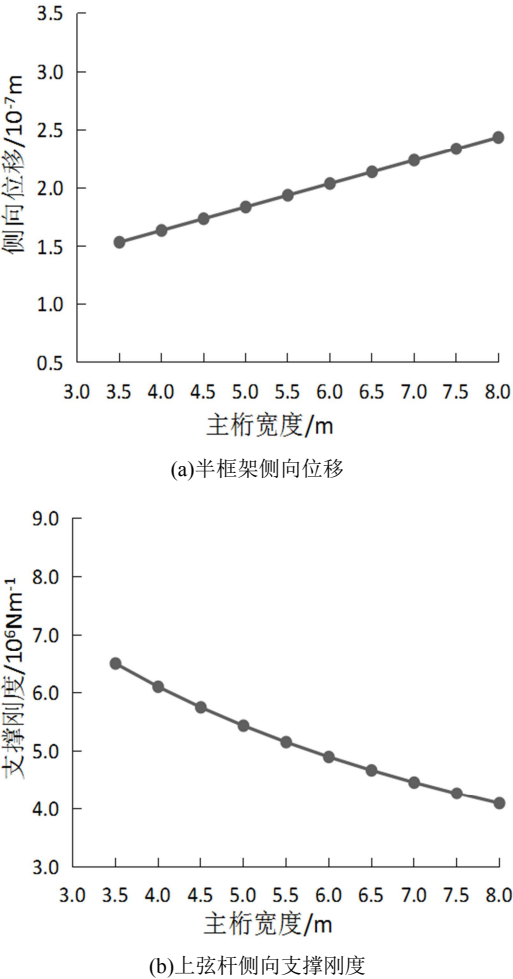


图7 主桁宽度对侧向位移和支撑刚度的影响。

4.2.2. 线弹性稳定分析

主桁宽度对结构稳定系数的影响如图8所示。由图8可知，随着主桁宽度的增加，结构稳定系数略有减小，桁

宽每增加1m，稳定系数减小约3%。由此可见，增加桁宽不利于提高结构面外稳定性，但是较大的桁宽可以提高半穿式钢桁梁的抗扭刚度，因此桁宽的确定要兼顾抗扭性能和稳定性能。建议在保证结构具有足够良好的抗扭性能前提下，采用较小的桁宽，以提高结构的稳定性。

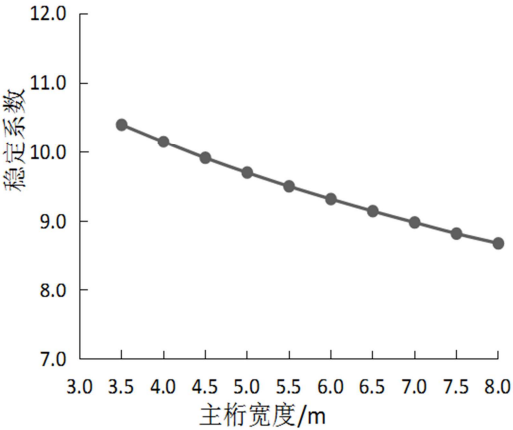


图8 不同主桁宽度时的各参数变化规律。

4.3. 风撑面积影响分析

半穿式钢桁梁由于两片主桁顶部不设横向联结系，横向刚度较低，通常可在桁架底部腹杆和横梁之间加装斜向风撑，以提高结构横向刚度和稳定性。风撑的设置相当于在半框架腹杆和横梁之间增加了弹性连接撑杆，故风撑内力以轴力为主，在风撑倾角一定前提下，风撑对半框架的支撑程度主要取决于风撑面积。

4.3.1. 风撑轴力

风撑面积对风撑轴力的影响如图9所示。由图9可知，随着风撑面积的增加，风撑轴力先是迅速增加而后增幅逐渐减缓并趋于定值。加装风撑相当于对半框架腹杆和横梁增加弹性支撑，使半框架结构由静定结构变为超静定结构，结构体系的改变使整体刚度显著提高。由于风撑轴力并不会随风撑面积增加而无限增加，因此在确定风撑面积时，不能单一为了增加支撑力而选择过大截面尺寸的风撑，应结合侧向位移、侧向支撑刚度等参量综合考虑。

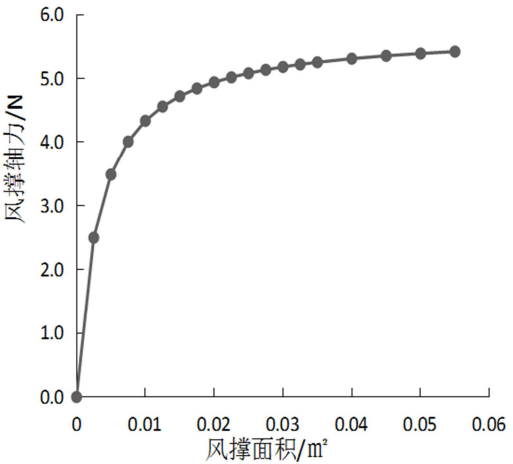


图9 风撑面积对风撑轴力的影响。

4.3.2. 侧向位移和侧向支撑刚度

风撑面积对半框架侧向位移和上弦杆侧向支撑刚度的影响如图10所示。由图10可知，随着风撑面积的增大，半框架位移先是迅速减小而后降幅逐渐减缓并趋于最小值，而侧向支撑刚度则是迅速增加后增幅逐渐减缓并趋于最大值。相比于无风撑情况，即便是增加截面尺寸很小的风撑，如设置截面面积为 0.0025m^2 的风撑时，半框架侧向位移将减小35.7%，上弦杆侧向支撑刚度将提高57.2%，由此可见风撑对半穿梁结构侧向支撑刚度影响很大，对半穿梁的稳定性影响不容忽视。

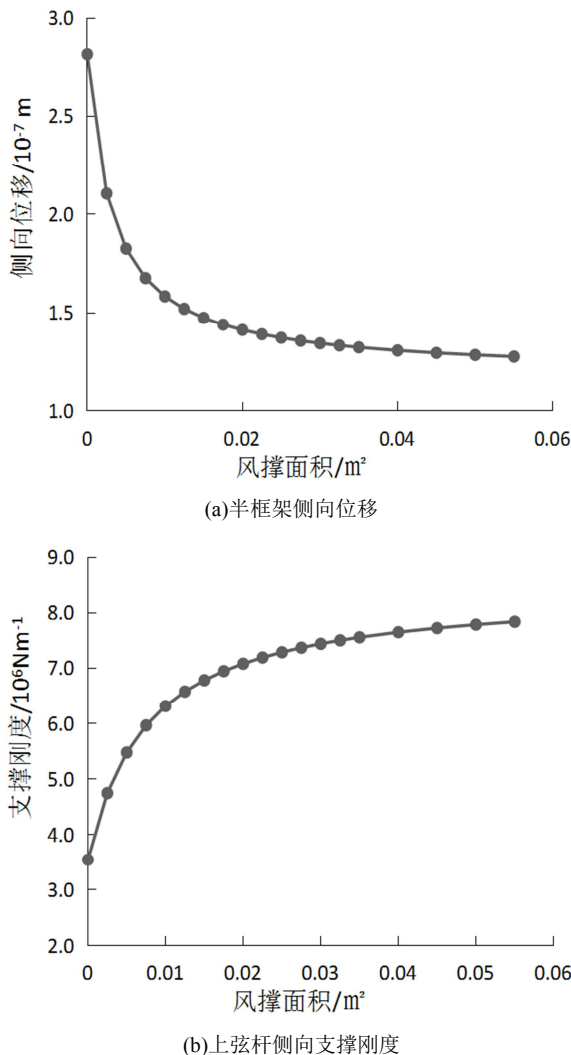


图10 风撑面积对侧向位移和侧向支撑刚度的影响。

4.3.3. 线弹性稳定分析

风撑面积对结构稳定系数的影响如图11所示。由图11可知，稳定系数增长率随风撑面积增大逐渐趋缓，说明风撑对稳定性的改善是有限的，稳定性不会随风撑面积增大一直提高，建议风撑面积的取值能使稳定系数增加率达到无风撑情况的30%左右。既不增加过多费用和工序，同时又能显著提高结构稳定性，风撑的综合效率达到最优。

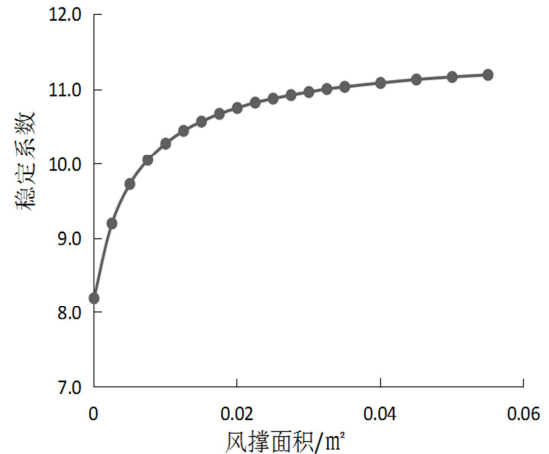


图11 不同风撑面积对稳定系数的影响。

综上所述，在半穿式钢桁梁底部加装风撑能显著改善结构面外稳定性，风撑的影响是不容忽视的。因此，在半穿式钢桁梁设计中，应尽量设置截面尺寸适宜的风撑，以提高结构的整体稳定安全系数。

5. 结论

本文以半穿式钢桁梁面外稳定性为研究目标，以仿真分析为手段，通过对半穿式钢桁梁面外稳定性的整体分析，总结了半穿式钢桁梁的屈曲特征，给出了面外稳定性分析的简化计算模型，进一步分析了桁高、桁宽以及风撑对结构稳定性的影响。通过仿真分析得到了以下结论：

- (1) 56m半穿式钢桁梁整体结构的仿真分析表明：不同荷载工况下的线弹性稳定系数和屈曲模态各不相同，但各工况下的失稳曲线均表现为上弦杆的面外挠曲变形；
- (2) 根据半穿式钢桁梁的结构特点和屈曲特征，将整体模型简化为由半框架和弹性支撑下的上弦杆组成的平面模型，并给出了面外稳定性分析的计算步骤。
- (3) 基于半穿式钢桁梁面外稳定性分析的平面简化模型，采用仿真分析法对面外稳定影响因素进行参数分析，探讨了主桁高度、主桁宽度以及风撑面积对半框架位移、上弦杆支撑刚度以及整体稳定系数的影响规律。结果表明：增加桁高、减小桁宽以及加装风撑均可有效提高结构稳定性。
- (4) 基于半穿式钢桁梁面外稳定性平面简化模型的仿真分析方法，简单实用，准确性高，有利于实现半穿式钢桁梁的快速化设计，亦可为半穿式钢桁梁的结构设计提供参考。另本文对半穿式钢桁梁面外稳定性分析是基于56m跨径开展的，相关结论对于其他跨径或有所差异，后期将继续研究。

致谢

本文为石家庄铁道大学大学生创新创业训练计划项目《半穿式钢桁梁的稳定性研究》（编号：202210107150）的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 程高, 张之恒, 姬子田, 等. 半穿式钢桁梁桥上弦杆外面稳定性研究 [J]. 公路工程, 2021, 46 (2): 15-19, 26.
- [2] 赵曼, 陈士通, 孙志星, 等. 新型大跨铁路应急钢桁梁稳定性研究 [J]. 铁道学报, 2022, 44 (1): 120-127.
- [3] 岳子翔. 半开式桁架桥平面外稳定性能与抗扭特性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [4] 张攀, 张宽, 裴永忠. 半穿式张弦桁架人行连廊稳定性分析 [C]//第二十届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 天津市钢结构协会, 2020: 113-118.
- [5] 周平, 王光. 上莘大桥结构设计与分析 [J]. 桥梁建设, 2010, 40 (3): 43-46.
- [6] 胡汉舟, 叶梅新. 桥梁事故及经验教训 [J]. 桥梁建设, 2002, 32 (3): 71-75.
- [7] Jankowska-Sandberg J, Kolodziej J. Experimental study of steel truss lateral-torsional buckling [J]. Engineering Structures, 2013, 46 (46): 165-172.
- [8] BIEGUS A. Trapezoidal sheet as a bracing preventing flat trusses from out-of-plane buckling [J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2015, 15 (3): 735-741.
- [9] 周平, 王光. 上莘大桥结构特性分析 [J]. 世界桥梁, 2010, 38 (3): 32-35.
- [10] 张维超. 跨度48m半穿式钢桁梁横向刚度加固研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2007 (2): 24-27.
- [11] 岳子翔, 温庆杰, 卓涛. 半开式桁架桥结构稳定性分析 [J]. 工程力学, 2018, 35 (增刊): 270-277.
- [12] 孙纲廷, 崔玉辉, 张方银. 半穿式桁架上弦杆的侧向稳定性研究 [J]. 烟台大学学报 (自然科学与工程版), 1992, 5 (4): 50-55.
- [13] 张方银, 黄剑源. 半穿式桁架桥上弦杆侧向稳定性计算方法的研究[J]. 宁波大学学报 (理工版), 1998, 11 (2): 62-68.
- [14] 张方银. 半穿式桁架桥上弦杆的侧向稳定性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 1989.
- [15] 段明德, 黄耀怡. 对铁路《桥规》关于半穿式梁计算的建议 [J]. 铁道标准设计通讯, 1984 (4): 1-5.
- [16] 赵曼, 陈士通, 孙志星, 等. 风撑对半穿式应急钢桁梁面外稳定性的影响研究 [J]. 铁道学报, 2023, 45 (3): 144-152.
- [17] 温庆杰, 岳子翔, 周牧等. 半开式桁架桥上弦杆平面外屈曲临界力研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (1): 104-109.
- [18] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [19] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS结构分析单元与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [20] 国家铁路局. 铁路钢桥设计规范: TB 10091—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.