

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.014

基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁横移 施工抗倾覆稳定设计

杨书生¹, 崔凤坤^{2*}, 王建圣¹, 宿宝忠¹, 徐少侠³

(1. 山东潍莱高速铁路有限公司, 山东 济南 250102; 2. 山东交通学院, 山东 济南 250357;

3. 中铁十局集团青岛工程有限公司, 山东 青岛 266033)

摘要:为了评估大悬臂钢桁梁在横移施工中的安全性,提出一种基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数评估方法,该方法在给定目标可靠指标和考虑结构参数随机性的前提下,采用可靠度反演理论,求解大悬臂钢桁梁在横移施工中的抗倾覆稳定安全系数。最后,采用该方法对潍莱高铁82 m大悬臂钢桁梁的抗倾覆稳定问题进行研究,并对参数的敏感性进行分析。计算结果表明:在大悬臂钢桁梁横移施工中,忽略参数不确定性的影响会导致过高地估计结构的抗倾覆稳定安全系数;抗倾覆稳定安全系数对横移配重质量和配重距离两个参数最为敏感,随着这两个参数变异性的增大,大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数迅速减小。

关键词:大悬臂钢桁梁;横移施工;可靠度反演理论;抗倾覆稳定设计

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

0 引言

简支及连续钢桁梁是中国大跨度铁路桥梁的主力桥型^[1-2]。随着中国高铁规模的不断扩大,大量新建铁路钢桁梁与既有线路产生交叉,导致临近营业线施工的情况频繁发生。为了解决钢桁梁跨线施工问题,横向顶推及拖拉(简称:横移)施工工艺被广泛应用^[3]。传统横移施工在桥梁端部设置横移滑道,通过千斤顶将桥梁拖拉至设计位置。为了克服少数连续钢桁梁现场施工条件复杂、端部滑道不宜设置的难题,大悬臂横移施工应运而生。

传统横移施工过程中钢桁梁始终处于简支状态^[4],力学体系明确,安全系数较高;而采用大悬臂横移施工的连续钢桁梁纵向倾覆稳定问题非常突出。目前,结构稳定性通常采用抗倾覆稳定安全系数进行控制,结构抗倾覆稳定安全系数定义为抗倾覆力矩与倾覆力矩的比值^[5]。然而,结构抗倾覆稳定安全系数是基于确定性模型分析得到的,没有考

虑结构施工中结构参数和多源荷载中存在的大量不确定因素,导致结构实际安全度(即可靠度水平)未知。

桥梁规范的发展方向为通过预设结构目标可靠度来保证结构安全,即桥梁结构及构件的可靠度指标是预先给定的^[6-7]。针对上述需求,程进等^[8]提出了大跨度悬索桥主缆安全系数的逆可靠度评估法,在充分考虑结构随机变量的基础上满足给定的主缆可靠度指标;刘杰等^[9]、楼灿洪等^[10]应用逆可靠度理论对连续梁桥悬臂施工阶段的倾覆稳定性进行了研究;骆佐龙等^[11]采用可靠度逆分析法对公路挡土墙的稳定安全性进行了评估。然而,针对连续钢桁梁大悬臂横移施工问题,基于可靠度反演(逆可靠度)理论的抗倾覆设计尚未开展。

本文基于可靠度反演分析理论建立连续钢桁梁大悬臂横移施工抗倾覆稳定安全评价方法,重点分析结构参数和荷载参数存在的不确定性对钢桁梁横移稳定性的影响,为合理评估大悬臂钢桁梁横移施工中的整体稳定性提供基础理论支撑。

收稿日期:2021-03-23

基金项目:国家留学基金委资助项目(编号:201606560011);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2020QE260)

作者简介:杨书生,男,大学本科,高级工程师.E-mail:63898497@qq.com

***通信作者:**崔凤坤,男,博士,讲师.E-mail:929599342@qq.com

1 可靠度反演理论

可靠度反演理论是在传统正可靠度理论^[12]的基础上发展起来的。结构可靠度反演问题可被定义为^[13]:对于结构功能函数 $G(\mu, \theta) = g(x, \theta)$, 找到一个设计参数 θ , 使求解功能函数得到的可靠指标 β 满足预设的目标可靠指标 β_i 。其中, $g(x, \theta)$ 为原始空间功能函数; $G(\mu, \theta)$ 为标准正态空间功能函数; x 为基本随机变量; μ 为标准正态变量; θ 为设计参数, 对于本研究为大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数。

给定目标可靠指标 β_i 后, 结构可靠度反演问题的求解可进一步表示为: 寻找设计参数 θ , 使目标函数最小, 即^[14]:

$$\begin{cases} \min(u^T u) = \beta_i^2 \\ G(\mu, \theta) = g(x, \theta) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

根据文献[15]可知, 标准正态随机变量可表示为:

$$\mu = \frac{-\beta_i \nabla_u G}{(\nabla_u G^T \nabla_u G)^{1/2}} \quad (2)$$

式中: ∇_u 为梯度算子。

式(2)以及约束条件 $G(\mu, \theta) = 0$ 是可靠度反演算法的基础。在标准正态空间下, 将功能函数在设计参数 θ_i 处进行泰勒展开, 则:

$$G(\mu_i, \theta) = G(\mu_i, \theta_i) + \frac{\partial G(\mu_i, \theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta_i} (\theta - \theta_i) = 0 \quad (3)$$

由式(3)可得设计参数(即抗倾覆稳定安全系数)的迭代公式为:

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{G(\mu_i, \theta_i)}{\frac{\partial G(\mu_i, \theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta_i}} \quad (4)$$

本文可靠度反演算法采用的收敛准则为:

$$\left| \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\theta_i} \right| \leq \varepsilon \quad (5)$$

式中: ε 取为 2×10^{-5} 。

通过文献[15]中的算例对本文提出的基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数算法进行验证, 算例的功能函数为: $G = e^{-\theta(u_1 + 2u_2 + 3u_3)} - u_4 + 1.5$, 其中 u_1, u_2, u_3 和 u_4 均为相互独立的标准正态随机变量, 初值均取0.2; θ 为设计变量, 初值取0.15。目标可靠指标取2.0, 则迭代计算结果见表1。

表1 算例迭代计算结果

迭代次数	u_1	u_2	u_3	u_4	θ
1	0.200 0	0.200 0	0.200 0	0.200 0	0.150 0
2	0.223 9	0.447 9	0.671 8	1.816 0	0.367 4
3	0.223 2	0.446 4	0.669 7	1.817 2	0.367 4
4	0.222 6	0.445 2	0.667 8	1.818 3	0.367 3
5	0.215 2	0.430 4	0.645 6	1.830 8	0.367 2
6	0.220 8	0.441 6	0.662 4	1.821 4	0.367 2
7	0.220 5	0.441 0	0.661 5	1.821 9	0.367 2
8	0.216 2	0.432 4	0.648 6	1.829 1	0.367 2

由表1可知: 经过8次迭代后, 设计参数 θ 收敛于0.367 2。将 θ 值代入算例功能函数, 采用FORM法得到可靠指标为2.0, 与目标可靠指标相一致, 从而验证本文算法的有效性与可靠性。

2 大悬臂钢桁梁横移施工倾覆稳定概率分析模型

连续钢桁梁大悬臂横移施工过程中由于不对称荷载的存在, 结构纵向存在整体倾覆失稳的问题。连续钢桁梁在悬臂横移施工阶段的受力状态如图1所示。

图1中, 为了不失一般性, 钢桁梁自重集中在图中以自重集度的形式表示, 左跨和右跨自重集度分别为 $g_1(x), g_2(x)$; q_1 为施工期钢桁梁两跨之间所受的最

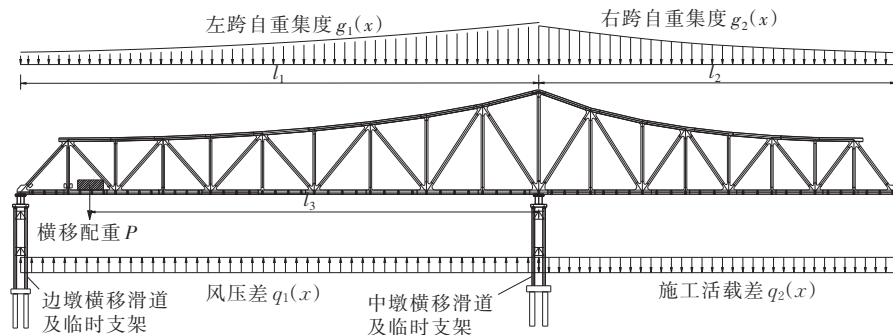


图1 大悬臂钢桁梁横移施工受力模式示意

大期望风压差; q_2 为施工临时活荷载,如施工人员、机具和临时设施等,取两跨之间荷载差,以均布荷载形式施加; P 为钢桁梁端部横移配重; l_3 为横移配重重心到前支点距离; l_1 、 l_2 分别为左跨、右跨的长度。

为了对大悬臂连续钢桁梁纵向倾覆稳定进行概率分析,首先需要建立结构的功能函数,抗倾覆稳定功能函数表示为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

式中: $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为基本随机变量。

当大悬臂连续钢桁梁达到纵向失稳临界状态时,钢桁梁结构绕右墩支点转动。则结构抗倾覆稳定功能函数可进一步表示为^[9]:

$$Z = M_w - KM_Q \quad (7)$$

式中: M_w 为结构抗倾覆力矩; M_Q 为结构倾覆力矩; K 为结构抗倾覆稳定安全系数。

对于连续钢桁梁大悬臂横移施工,结构抗倾覆力矩主要由左跨桥梁自重以及横移配重贡献,可表示为:

$$M_w = \int_0^{l_1} x \cdot g_1(x) dx + P \cdot l_3 \quad (8)$$

式中: x 为梁体任意位置到右墩支点的水平距离。

结构倾覆力矩主要由右跨桥梁自重、风压差和施工荷载差贡献,可表示为:

$$M_Q = \int_0^{l_2} x \cdot (1 + v) \cdot g_2(x) dx + \frac{q_1 l_1^2}{2} + \frac{q_2 l_2^2}{2} \quad (9)$$

式中: v 为钢箱梁加工制造引起的两跨梁体自重偏差系数。

公式(6)~(9)共同组成了大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定概率分析模型。该模型配合可靠度反演理论,可以对大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数进行研究。

3 工程应用及分析

3.1 工程概况

潍莱高铁跨青荣铁路特大桥,为不等高连续钢桁梁,跨径布置为(120+80)m。桥梁主桁架采用带竖杆三角桁,桁高13~25m,节段长度9~13m,主桁架中心距离为10m,全桥共分为18个节段。其中,上、下弦杆采用箱形截面,斜腹杆采用箱形截面和H形截面。

主桁节点采用整体式节点,上、下弦杆在节点外焊接,腹杆采用对接形式与整体节点焊接,腹板接头板焊于节点板上。连续钢桁梁全桥采用耐候钢,钢面板采用爆炸法制造的不锈钢复合钢板321+Q370qENH。钢桁梁立面布置如图2所示。

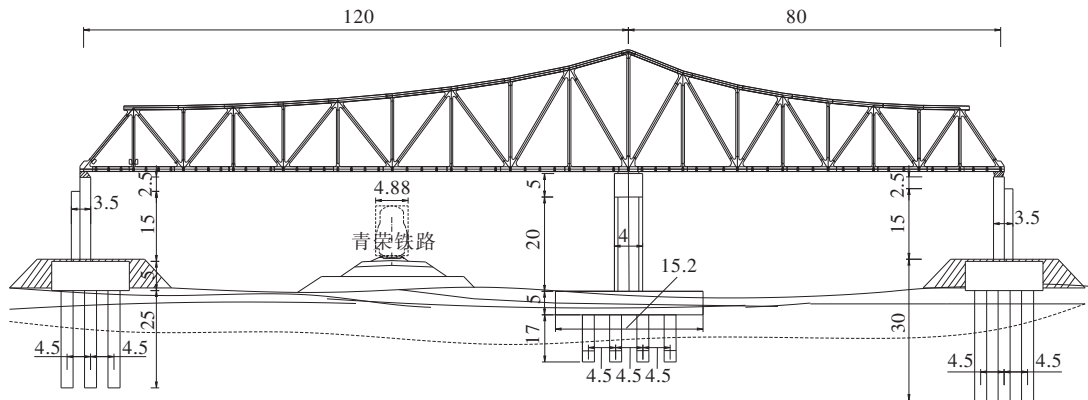


图2 钢桁梁立面图(单位:m)

由于地形条件的限制以及下穿铁路的影响,钢桁梁采用侧位拼装、大悬臂横移施工的方案。钢桁梁在横移拖拉施工中,拖拉重量为1985.4t,桥梁悬臂长度达82m,结构纵向倾覆问题十分突出。连续钢桁梁大悬臂横移施工示意如图3所示。

3.2 功能函数构建及随机变量选取

连续钢桁梁大悬臂横移施工阶段受力状态如图1所示,将相应参数代入公式(7),可得算例钢桁梁的抗倾覆稳定功能函数为:

$$Z = 624489 + P \cdot l_3 - K[(1 + v) \times 272699 + 7200q_1 + 3200q_2] \quad (10)$$

公式(10)中数字为本算例代入公式(7)后化简所得系数。本算例在抗倾覆稳定可靠度反演分析中,选择5个参数作为随机变量,分别为横移配重 P 、配重距离 l_3 、偏差系数 v 、外荷载 q_1 和 q_2 。根据《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)和相关文献,各随机变量的统计参数取值见表2。

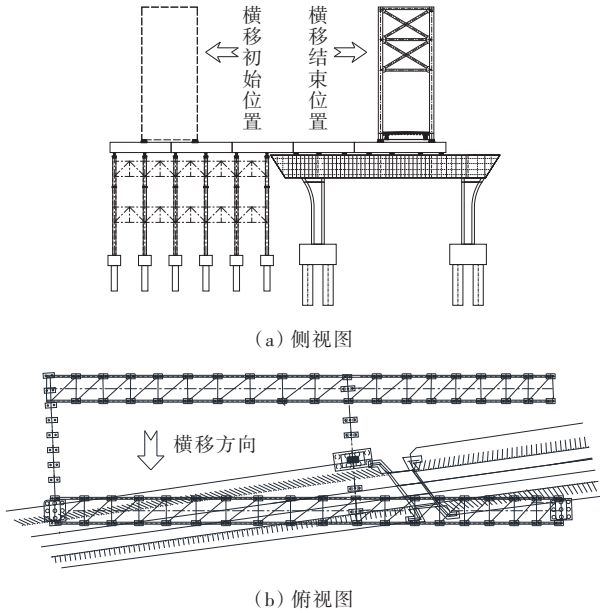


图 3 连续钢桁梁横移施工示意图

表 2 随机变量统计参数取值

随机变量	单位	分布类型	均值	标准差	参考文献
P	kN	正态分布	1 000	0.10	[10,13]
l_3	m	正态分布	105	0.15	[7, 10]
ν		正态分布	0.025	0.10	[7, 8]
q_1	kPa	正态分布	0.3	0.15	[7, 8]
q_2	kPa	均值 I 形分布	0.2	0.15	[7, 8]

3.3 目标可靠度选取

对于结构可靠度反演问题,目标可靠度的选取非常重要。连续钢桁梁整体倾覆问题属于承载能力极限状态的范畴,《铁路工程结构可靠性设计统一标准》(Q/CR 9007—2014)对结构承载能力极限状态的目标可靠度没有给出明确规定。参考加拿大安大略省桥梁设计规范和美国交通运输协会标准(AASHTO),大悬臂横移施工倾覆稳定的目标可靠度取 3.5。本文算例所取目标可靠指标并非同类问题标准值,目标可靠度也可以考虑结构和构件的失效后果和性质,采用风险水平类比法和费用效益分析法确定。

3.4 计算结果及分析

基于 Matlab 平台,采用可靠度反演理论,编写连续钢桁梁大悬臂横移施工倾覆稳定可靠度反分析程序。其中,5 个随机变量的初值选用其均值,抗倾覆稳定安全系数 K 的初值选为确定性模型的计算值 2.578。将初值代入后,算例迭代计算结果见表 3。

由表 3 可知:实桥算例经过 5 次迭代后收敛于容

表 3 实桥算例迭代计算结果

迭代次数	P/kN	l_3/m	ν	q_1/kPa	q_2/kPa	K
1	1 000.000 0	105.000 0	0.025 0	0.300 0	0.200 0	2.584 0
2	806.877 8	59.374 9	0.025 8	0.298 7	0.201 4	2.379 9
3	853.044 3	55.460 4	0.026 0	0.300 1	0.201 7	2.377 2
4	867.460 5	54.429 8	0.026 0	0.300 0	0.201 6	2.377 0
5	871.418 8	54.166 3	0.026 0	0.299 9	0.201 6	2.377 0

许误差,表明本文采用的反可靠度分析方法具有较快的收敛速度。同时,采用逆可靠度反演分析方法计算出的抗倾覆稳定安全系数(2.377)小于确定性分析得到的计算结果(2.584)。表明考虑随机变量的不确定性对连续钢桁梁大悬臂横移施工的抗倾覆稳定安全系数有较大影响,即在设计分析中忽略参数的变异性将会过高估计钢桁梁的抗倾覆稳定安全系数,对于结构的抗倾覆稳定设计而言是不合理的。

3.5 参数分析

3.5.1 不同 K 初始值的影响

为了验证可靠度反演算法的鲁棒性,研究不同 K 初始值对计算结果的影响。大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数 K 选取 5 个不同的初始值,分别为 1.5、2.0、2.5、3.0 和 3.5,目标可靠指标取 3.5,迭代计算结果如图 4 所示。

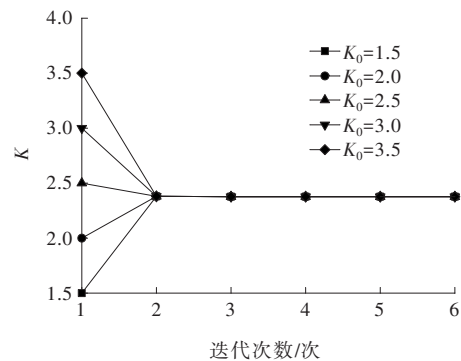


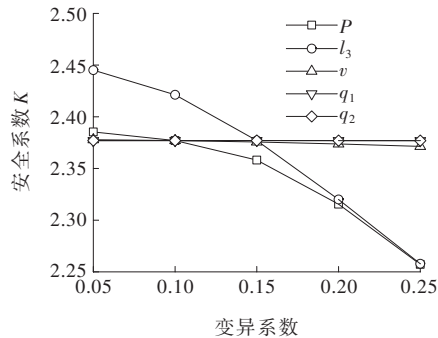
图 4 不同初始值下迭代计算结果

由图 4 可知:大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数的初始值选择不会对逆可靠度计算结果的准确性产生影响。表明可靠度反分析方法具有鲁棒性,适用于大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数的评估。

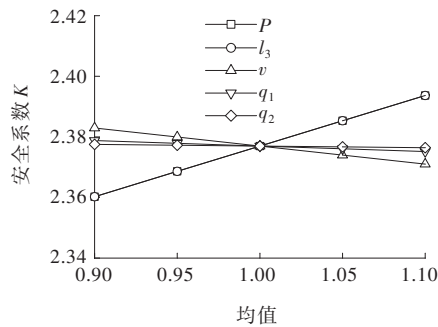
3.5.2 参数随机性的影响

为了研究参数的变异系数以及均值变化对大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数的影响,目标可靠指标取 3.5,5 个随机变量的变异系数控制为 0.05~0.25,得到安全系数与随机变量变异系数的关系如图

5(a)所示;保持目标可靠度不变,5个随机变量的均值为设计值的90%~110%,得到安全系数与随机变量均值的关系如图5(b)所示。



(a) 变异系数的影响



(b) 均值的影响

图5 参数随机性对安全系数的影响

由图5可知:①横移配重 P 以及配重距离 l_3 的变异性对大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数计算值有较大影响,随着 P 和 l_3 变异系数的增大,抗倾覆稳定安全系数迅速减小,因此在横移施工中应重点控制配重质量以及配重距离的偏差,降低桥梁的横移倾覆风险;②随着横移配重 P 以及配重距离 l_3 均值的增大,桥梁的抗倾覆稳定安全系数有所增加,而随结构自重的偏差系数 v 以及外荷载 q_1 、 q_2 均值的增大,桥梁的抗倾覆稳定安全系数降低,随机变量均值对抗倾覆稳定安全系数的影响与确定性分析模型反映的规律一致。

4 结论

(1) 提出一种基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数评估方法,该方法通过给定结构的目标可靠度反求桥梁抗倾覆稳定安全系数。采用该方法得到的安全系数既考虑了各种参数

随机性的影响,又满足了预先设定的可靠度水平;并将该方法成功应用于工程实践。

(2) 参数不确定性对大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数会产生较大影响,忽略参数不确定性的影响将会导致过高地估计桥梁的抗倾覆稳定安全系数。

(3) 横移配重质量以及配重距离的变异性对大悬臂钢桁梁抗倾覆稳定安全系数计算值影响最大。随着 P 和 l_3 变异系数的增大,抗倾覆稳定安全系数迅速减小。

参考文献:

- [1] 吴海涛,李鸥.大跨连续钢桁梁架施工控制分析[J].公路工程,2012,37(2):137-141,157.
- [2] 袁理,黄影,赵宇清.悬索桥浅滩区钢桁梁吊装施工新技术[J].中外公路,2019,39(3):155-157.
- [3] 王通芳.钢桁架梁整体横向滑移施工技术及其力学特性研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [4] 梁显伟,张义强,李国峰.大跨度简支钢桁梁施工精度控制技术[J].公路,2020,65(6):73-75.
- [5] 王家伟,孙全胜.脉动风效应对转体结构的稳定性影响研究[J].中外公路,2020,40(6):98-103.
- [6] 边海滨.基于逆可靠度法的三塔悬索桥主缆与中塔鞍座抗滑安全系数研究[J].中外公路,2020,40(2):111-114.
- [7] 章劲松.基于可靠度的公路桥梁结构极限状态设计计算原则及应用[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [8] 程进,肖汝诚.基于逆可靠度法的大跨悬索桥主缆安全系数评估[J].中国公路学报,2007,20(1):58-61.
- [9] 刘杰,杨吉新,董峰辉.大跨度连续梁桥悬臂施工整体抗倾覆稳定安全系数评估[J].中国公路学报,2018,31(3):89-95.
- [10] 楼灿洪,董峰辉.连续梁桥悬臂施工整体倾覆稳定安全系数研究[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(2):264-268.
- [11] 骆佐龙,徐航,董峰辉.基于可靠度逆分析理论的公路挡土墙稳定安全系数研究[J].结构工程师,2020,36(2):65-70.
- [12] 崔凤坤,王虎军,徐岳,等.基于BP神经网络和粒子群算法的钢管混凝土拱桥可靠度分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(8):1103-1109.
- [13] CHENG J, ZHANG J, CAI C S, et al. A new approach for solving inverse reliability problems with implicit response functions[J]. Engineering Structures, 2007, 29(1): 71-79.
- [14] 金辉,朱谊彪,徐岳,等.基于逆可靠度理论的连续刚构桥稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(2):422-426.
- [15] LI H, FOSCHI R O. An inverse reliability method and its application[J]. Structural Safety, 1998, 20(3): 257-270.