基于抗震性能的连续刚构桥主梁参数优化

周慧慧[1,2]，陈艳萍[3]，刘朝福[4]

（1. 昆明理工大学建筑工程学院，昆明 650001；2. 云南新创新交通建设股份有限公司，昆明 650001；
3. 云南禄丰市交通运输局，云南 禄丰 650200；4. 云南农业大学建筑工程学院，昆明 650100）

摘要：以昆明附近正在施工的一座连续刚构桥为研究对象，选取边中跨比、梁底效应曲线、0 号块梁高和跨中梁高 4 个关键参数，通过建立 25 个不同参数组合的连续刚构模型，并利用 ANSYS 软件进行静力弹塑性分析（Pushover 分析），采用正交试验的多目标函数优化方法，突破性地实现了基于抗震性能的优化结果。最终确定的最佳参数组合为：边中跨比值为 0.6，梁底抛物线次数为 1.6，0 号块梁高为 11.21 m，跨中梁高为 4.75 m。这种优化方法在连续刚构桥梁设计中取得重要突破，不仅提高了结构的抗震性能，也为工程实践提供了可靠的指导，具有重要的工程实用价值和科学意义。

关键词：连续刚构桥；抗震性能；Pushover 分析；正交试验

中图分类号：U443 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2024)17－0341－06

随着中国经济高速发展，交通基础设施的不断完善，预应力混凝土连续刚构桥因其美观简洁的外形、舒适的行车条件、优良的抗震性能和成熟的施工工艺方法[1]而受到工程界的广泛认可。在高墩大跨连续刚构桥的抗震设计[2-3]中，通常采用有限单元法结合实际工程经验确定主要设计参数。然而，这种方法存在计算工作量大且目标不明确的问题，获得较优设计方案较为困难，需要多次迭代计算才能找到合适的设计参数，并且边界条件的设置可能导致部分构件的安全储备过高或不足。因此，有必要针对连续刚构桥梁进行抗震设计优化，建立目标函数模型，并利用数学评价函数法对连续刚构参数进行优化，以简化和优化连续刚构桥梁的抗震设计方法。

1 工程概况

1.1 立面布置

选取云南昆明附近的一座预应力混凝土连续刚构桥为研究对象进行抗震性能优化。该桥全长为 748 m，跨径布置为连续 T 梁（4×30 m）＋连续刚构桥（103 m＋190 m＋103 m）＋连续 T 梁[4]（4×29 m＋4×29 m），底板厚度按 1.6 次抛物线变化。桥梁的立面布置如图 1 所示。

1.2 截面尺寸

支点及跨中处的主梁断面如图 2 所示。桥梁断面为单箱单室截面，箱梁顶宽 12 m，底宽 6.5 m，0 号块梁高为 12 m，跨中处梁高为 3.8 m，底板厚度

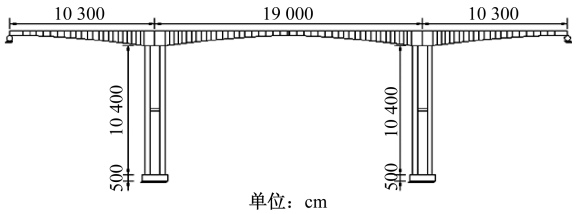

图 1 立面示意图

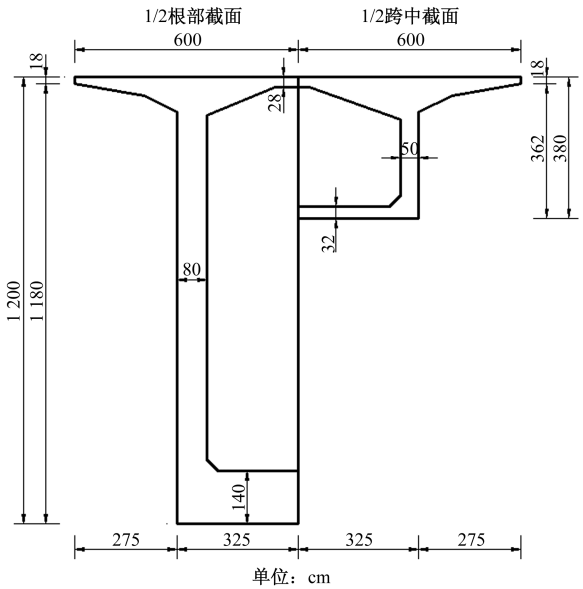

图 2 断面示意图

收稿日期：2024-05-29

作者简介：周慧慧（1985—），男，江西吉安人，高级工程师，研究方向为道路与桥梁工程；陈艳萍（1985—），女，云南禄丰人，高级工程师，研究方向为公路与桥梁工程；通信作者刘朝福（1983—），男，云南楚雄人，硕士，正高级工程师，研究方向为桥梁抗震。

按 1.6 次抛物线由跨中处的 0.32 m 变化至桥墩处的 1.40 m，腹板厚度分别为 0.8、0.6、0.5 m。

2　结构建模

2.1　荷载取值

荷载主要包括恒载与活载，恒载主要包括一期与二期恒载，活载主要包括人群荷载。①汽车荷载：公路Ⅰ级；②人群荷载：2.5 kN/m^2；③风荷载：根据《公路桥梁设计通用规范》(JTG D60—2015)，桥位处的 1/100 设计基本风速为 26.3 m/s；④温度荷载：考虑了结构整体升温 25 ℃，整体降温 25 ℃，温度梯度按规范取值；⑤地震荷载：震动峰值加速度为 0.20g(g 为重力加速度)，地震基本烈度：Ⅷ度。

2.2　有限元模型的建立

通过 ANSYS 的 APDL 语言建模，采用 BEAM188 单元模拟主梁，由关键点生成面，对面进行网格划分保存生成截面，建立主梁节点、单元与变截面。墩柱与主梁采用刚性连接模拟，墩柱与基础固结。建立的连续刚构桥模型如图 3 所示。

采用 ANSYS 的 APDL 语言建立上述模型，只需通过改变设计参数即可生成新的模型。

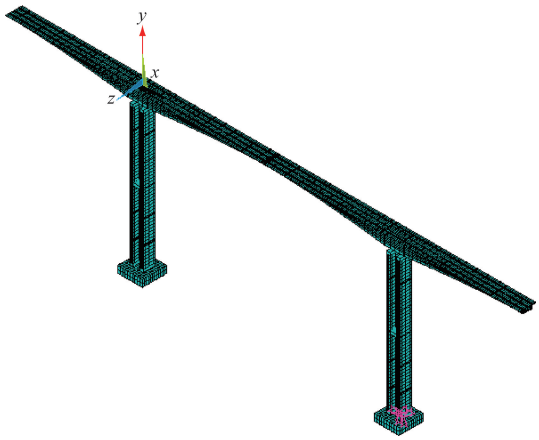

图 3　连续刚构桥的有限元模型

3　基于抗震性能的动力响应优化

3.1　参数范围分析

通过对国内外部分连续刚构桥边中跨比值统计分析得到边中跨比值范围，如图 4 所示。

根据图 4 分析可知，大跨度连续刚构桥的边中跨比值主要集中在 0.50～0.60 的范围内。综合考虑各种参考资料、规范要求和相关文献后，选择边中跨比值分别为 0.50、0.55、0.60、0.65、0.70 进行分析计算。

通过国内部分连续刚构桥梁底部抛物线的统计数据可以看出，现有桥梁的底部抛物线次数主要集中在 1.6～2.0 次[5]。选取底部抛物线次数分别为 1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 进行分析计算。

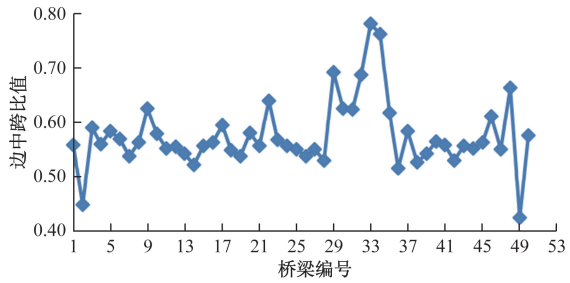

图 4　边中跨比值范围

通过分析图 5 和图 6，可以得知大部分连续刚构桥的 0 号块对应的高跨比分布在 0.05～0.065，而跨中处梁高所对应的高跨比集中分布在 0.015～0.025。因此，选择 0 号块梁高高跨比分别取 0.053、0.056、0.059、0.062、0.065，对应的 0 号块高度分别为 10.07、10.64、11.21、11.78、12.35 m 进行分析计算；跨中处梁高高跨比分别取 0.015、0.017 5、0.020、0.022 5、0.025，对应的跨中处梁高分别为 2.85、3.32、3.8、4.28、4.75 m 进行分析计算。

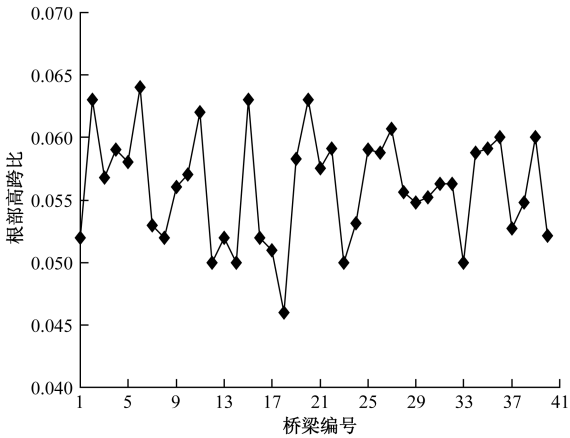

图 5　主梁根部梁高高跨比

3.2　正交试验参数组合

正交试验法[6]是一种设计多因素试验的有效方法，其通过合理安排试验方案、科学分析数据，以排列整齐的正交表为基础，实现对试验的整体设计、统计分析和综合比较。其优点在于具有“整齐可比性”和“均衡分散性”，通过少量的试验次数便可得到可靠的结果，从而节省了人力、物力和财力资源。

正交试验法的核心理念在于合理选择试验因

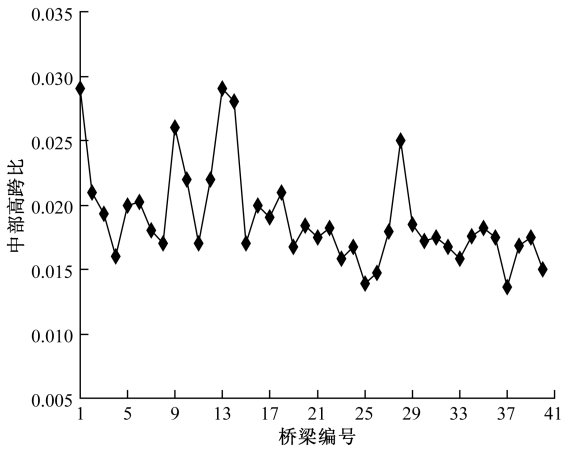

图 6　主梁中部梁高高跨比

素和水平,使得试验结果能够全面、准确地反映各因素对结果的影响,同时尽可能地减少试验次数。通过正交试验的设计,可以有效地探索多个因素之间的相互作用,找出对结果影响最显著的因素,为进一步优化和改进提供指导。

通过查标准手册可得到正交表 $L_{25}(5^6)$,根据本次试验的实际情况,本文的影响因素有 4 个(A:双薄壁墩墩间距、B:薄壁墩厚度、C:薄壁墩墩壁厚度、D:桥墩横系梁支数),而每个因素又各有 5 个水平,因而只在正交表 $L_{25}(5^6)$ 中选择了前 4 列有效数据进行分析计算,$L_{25}(5^6)$ 参数组合形式见表 1。表 1 中 1# ～25# 代表 25 个正交试验模型。

3.3　目标函数确定

目标函数Ⅰ:延性位移需求能力比最小。

根据结构抗震延性设计理论,在受到 E2 级地震作用时,结构的塑性铰区域应该具备足够的弹塑性变形能力,以有效地吸收和消耗地震能量,从而保证结构的安全性和稳定性。因此,延性位移需求应尽可能地小,以确保结构在地震荷载下的延性性能得到充分发挥[6]。

在优化目标函数的描述中,通常会考虑到结构的性能需求和设计目标。针对延性设计,可以将优化目标函数描述为最小化延性位移需求能力与结构设计参数之间的关系,以确保结构在地震作用下具有良好的延性性能。这种目标函数的设计可以通过数学建模和优化算法来实现,以在设计过程中有效地平衡结构的延性性能和其他设计要求。

通过优化目标函数,工程师可以在结构设计阶段就考虑到延性需求,并在设计过程中有效地调整结构参数,从而达到在 E2 级地震作用下最小化延性位移需求的目标。这样的设计方法有助于提高结构的抗震性能和安全性,降低地震灾害造成的损失。

$$f_{\mathrm{I}} = \min\left\{\frac{\Delta_{\mathrm{d}}}{\Delta_{\mathrm{u}}\mathrm{V}}\right\} \tag{1}$$

式中:f_{I} 为 E2 地震作用下的第一个目标函数;Δ_{d} 为 E2 地震作用下延性位移需求,用能力谱方法可以计算出延性位移需求;Δ_{u} 为 E2 地震作用下延性位移能力,用能力谱中极限位移能力表示。

由于延性位移需求能力比仅仅能控制结构破坏时的极限位移,并未考虑结构在地震作用下的损伤和疲劳破坏,但对实际结构而言,地震作用下结构都存在疲劳损伤,于是引出了目标函数Ⅱ:损伤系数最小。其优化目标函数 $\mathrm{DM_T}$ 描述如下:

$$\mathrm{DM_T} = \min\left\{1 - \frac{K_{\mathrm{r}}}{K_{\mathrm{o}}}\right\} \tag{2}$$

式中:K_{r} 为性能点处的割线刚度,可近似为 Pushover 分析时结构屈服点修正后的刚度;K_{o} 为屈服点处的切线刚度,可近似为 Pushover 分析时结构首次屈服点的初始刚度。

在地震作用下,通过能力谱可得结构的初始刚度及对应的割线刚度,然后就可以计算结构的损伤指数。

4　Pushover 分析计算结果

4.1　结构自振特性分析

在 Pushover 分析中,数据将用于确定结构在地震作用下的非线性行为,以及在不同地震强度下的响应。模型的阵型贡献率表明了在结构的振动中,各个模态对整体响应的贡献程度。频率和周期则是描述了结构在不同振动模态下的振动特性,这些信息将有助于推断结构在地震作用下的响应模式和振动特性。受篇幅有限,不一一对 25 个模型的阵型贡献率及阵型进行分析,仅列出模型的阵型贡献率及模型动力特性如表 2、图 7 所示。

表 1　正交表参数组合形式

$A_1B_1C_1D_1$(1#)	$A_2B_1C_2D_3$(6#)	$A_3B_1C_3D_5$(11#)	$A_4B_1C_1D_2$(16#)	$A_5B_1C_5D_4$(21#)
$A_1B_2C_2D_2$(2#)	$A_2B_2C_3D_4$(7#)	$A_3B_2C_4D_1$(12#)	$A_4B_2C_5D_3$(17#)	$A_5B_2C_1D_5$(22#)
$A_1B_3C_3D_3$(3#)	$A_2B_3C_4D_5$(8#)	$A_3B_3C_5D_2$(13#)	$A_4B_3C_1D_4$(18#)	$A_5B_3C_2D_1$(23#)
$A_1B_4C_4D_4$(4#)	$A_2B_4C_5D_1$(9#)	$A_3B_4C_1D_3$(14#)	$A_4B_4C_2D_5$(19#)	$A_5B_4C_3D_2$(24#)
$A_1B_5C_5D_5$(5#)	$A_2B_5C_1D_2$(10#)	$A_3B_5C_2D_4$(15#)	$A_4B_5C_3D_1$(20#)	$A_5B_5C_4D_3$(25#)

表 2　$A_2B_1C_2D_3$ 模型的自振特性

模态号	频率/Hz	周期/s	阵型贡献率/%
1	0.198	5.048	87.32
2	0.259	3.859	0
3	0.571	1.752	0
4	0.888	1.126	5.70
5	1.015	0.985	0

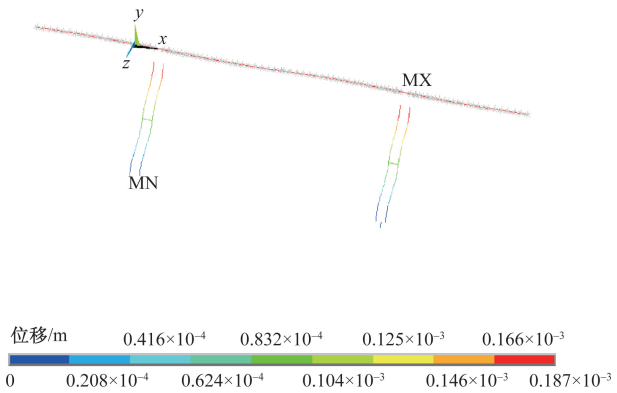

图 7　$A_2B_1C_2D_3$ 模型一阶纵飘图

桥梁结构的第一阶振型在桥梁纵向(顺桥向)振动中具有显著的贡献率,达到了 90%,这表明该振型对桥梁整体的动态响应有着主导性影响[7]。这种情况通常被认为是符合规范要求的,因为结构的主要振型贡献率较高,说明结构的动力响应主要由少数几个振型控制,从而简化了后续的动力分析和设计工作。接下来的研究工作可以进一步针对这些主要振型展开,以更深入地理解结构在地震作用下的响应,并制定相应的抗震设计策略和措施。

4.2　Pushover 分析计算结果

基于前文的结论,即第一阶振型的高贡献率,在 Pushover 分析中采用了与第一阶振型相匹配的侧向力加载模式。由 ANSYS 软件得出了 $A_2B_1C_2D_3$ 模型的基底剪力—顶点位移曲线,如图 8 所示,能力谱曲线如图 9 所示,需求谱与能力谱曲线如图 10 所示。受篇幅限制,其余模型相应的曲线不一一列出,这些曲线的分析有助于了解结构在地震作用下的强度、延性和稳定性等性能,为结构的抗震设计提供了重要参考。

需求谱与能力谱的交点为性能点,由能力谱理论可得性能点对应的位移为位移需求 Δ_d,结构的最大位移能力为延性位移能力 Δ_u,经计算 Pushover 曲线首次屈服点处的斜率为初始刚度 K_o,屈服点处的割线斜率为修正后的初始刚度 K_r 直接用于后面的多目标优化计算[8]。

在 Pushover 分析中,需求谱和能力谱的交点称为性能点,该点对应的位移称为位移需求,表示结构在地震作用下需要达到的最大位移。结构的最大位移能力称为延性位移能力,表示结构在地震作用下能够承受的最大位移。

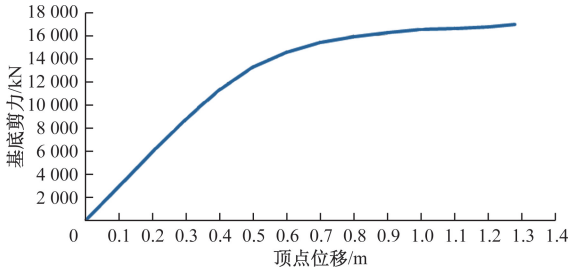

图 8　基底剪力与顶点位移关系曲线

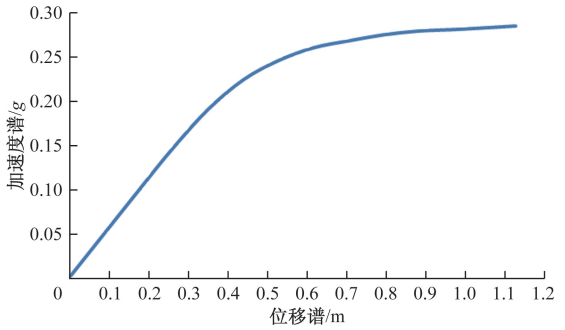

图 9　能力谱曲线

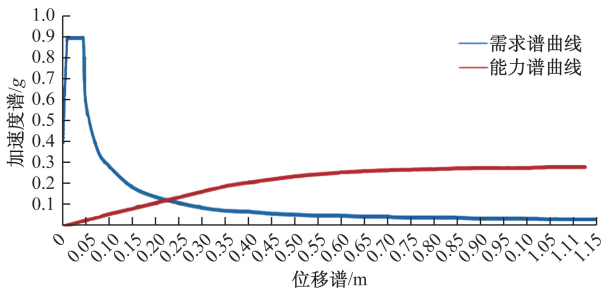

图 10　需求谱与能力谱曲线

根据能力谱理论,Pushover 曲线首次屈服点处的斜率为初始刚度[9],反映了结构在初始阶段的刚度特性。而屈服点处的割线斜率则为修正后的初始刚度,考虑了结构在屈服后的非线性变形特性。

这些参数的计算对于后续的多目标优化计算非常重要,因为它们反映了结构在地震作用下的非线性响应特性,能够为结构的抗震设计和优化提供基础。

例如,对于 $A_2B_1C_2D_3$ 模型需求位移为 0.228 m,延性位移能力为 1.28 m,首次屈服时初始刚度为 4.08×10^8 kN·m,修正后的初始刚度为 8.57×10^7 kN·m,经软件计算 25 个模型的试验数据及目标函数值见表 3。

表 3　各模型试验数据及目标函数值

试验号	延性位移需求能力/m	延性位移能力/m	首次屈服时结构刚度/(kN·m)	屈服时结构刚度/(kN·m)	延性位移需求比	损伤系数	多目标函数
1	0.23	1.17	3.43×10^{7}	4.82×10^{7}	0.20	0.86	0.160
2	0.27	1.24	3.72×10^{8}	6.72×10^{7}	0.22	0.82	0.125
3	0.35	1.33	4.12×10^{8}	9.48×10^{7}	0.26	0.77	0.109
4	0.34	1.36	4.63×10^{8}	1.24×10^{8}	0.25	0.73	0.077
5	0.31	1.39	5.04×10^{8}	1.52×10^{8}	0.22	0.70	0.043
6	0.228	1.28	4.08×10^{8}	8.57×10^{7}	0.18	0.79	0.090
7	0.35	1.42	4.51×10^{8}	1.28×10^{8}	0.25	0.72	0.068
8	0.31	1.42	4.92×10^{8}	1.33×10^{8}	0.22	0.73	0.049
9	0.19	1.25	3.36×10^{8}	4.36×10^{7}	0.15	0.87	0.173
10	0.33	1.32	3.54×10^{8}	7.40×10^{7}	0.25	0.79	0.115
11	0.29	1.41	3.91×10^{8}	1.09×10^{8}	0.21	0.72	0.033
12	0.21	1.31	3.29×10^{8}	4.91×10^{7}	0.16	0.85	0.152
13	0.28	1.37	3.51×10^{8}	9.17×10^{7}	0.20	0.74	0.046
14	0.32	1.36	3.74×10^{8}	1.05×10^{8}	0.24	0.72	0.059
15	0.28	1.45	4.21×10^{8}	1.01×10^{8}	0.19	0.76	0.062
16	0.26	1.35	3.88×10^{8}	8.20×10^{7}	0.19	0.79	0.090
17	0.31	1.40	3.75×10^{8}	1.09×10^{8}	0.22	0.71	0.042
18	0.33	1.39	4.16×10^{8}	8.74×10^{7}	0.24	0.79	0.107
19	0.36	1.42	3.72×10^{8}	1.09×10^{8}	0.25	0.71	0.074
20	0.24	1.32	3.21×10^{8}	5.13×10^{7}	0.18	0.84	0.140
21	0.36	1.46	4.26×10^{8}	1.29×10^{8}	0.25	0.70	0.067
22	0.36	1.53	3.42×10^{8}	8.92×10^{7}	0.24	0.74	0.068
23	0.27	1.37	3.12×10^{8}	4.26×10^{7}	0.20	0.86	0.164
24	0.27	1.34	3.65×10^{8}	8.12×10^{7}	0.20	0.78	0.080
25	0.34	1.45	3.87×10^{8}	9.87×10^{7}	0.23	0.74	0.071

4.3　多目标优化以及使用正交表寻优

采用极小距离理想点法进行多目标优化,首先确定了问题的理想点,然后通过计算每组参数与理想点之间的距离,以此作为评价参数组的标准。正交表则用于进行初步寻优,通过在参数空间中选择少量代表性参数组合,可以高效地评估参数对各个目标的影响,从而确定更接近理想点的参数组。

表 4 中的数据显示了每组参数组合相对于各个目标的距离,这些数据将有助于确定最优的参数组合,使得考虑的目标尽可能接近问题的理想点,从而达到多目标优化的目的。

为更简明直观地表现多目标函数值的分布情况,将表 4 绘制成柱状分布(图 11)。该柱状分布图显示了不同参数组合对于各个目标函数值的分布情况。每根柱子代表一个参数组合,柱子的高度表示该参数组合对应目标函数值的大小,可以通过柱状图的高低来比较不同参数组合在各个目标上的表现。这样的可视化方式能够帮助分析人员更直观地理解多目标函数值的分布情况,从而更好地进行参数优化和决策。

表 4　$L_{25}(5^{6})$ 正交表与多目标函数值

试验号	因素				多目标函数值
	1	2	3	4	
1	0.50	1.6	10.07	2.85	0.160
2	0.50	1.7	10.64	3.32	0.125
3	0.50	1.8	11.21	3.80	0.109
4	0.50	1.9	11.21	4.28	0.077
5	0.50	2.0	12.35	4.75	0.043
6	0.55	1.6	10.64	3.80	0.090
7	0.55	1.7	11.21	4.28	0.068
8	0.55	1.8	11.21	4.75	0.049
9	0.55	1.9	12.35	2.85	0.173
10	0.55	2.0	10.07	3.32	0.115
11	0.60	1.6	11.21	4.75	0.033
12	0.60	1.7	11.21	2.85	0.152
13	0.60	1.8	12.35	3.32	0.046
14	0.60	1.9	10.07	3.80	0.059
15	0.60	2.0	10.64	4.28	0.062
16	0.65	1.6	11.21	3.32	0.090
17	0.65	1.7	12.35	3.80	0.042
18	0.65	1.8	10.07	4.28	0.107
19	0.65	1.9	10.64	4.75	0.074
20	0.65	2.0	11.21	2.85	0.140
21	0.70	1.6	12.35	4.28	0.067
22	0.70	1.7	10.07	4.75	0.068
23	0.70	1.8	10.64	2.85	0.164
24	0.70	1.9	11.21	3.32	0.080
25	0.70	2.0	11.21	3.80	0.071

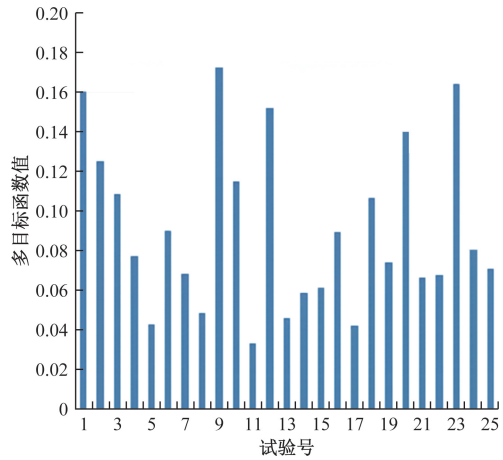

图 11　多目标函数值分布

根据表 4 和图 11 的分析结果，可以确定 11 号模型在多目标函数值方面表现最佳，因此其对应的参数组合被认为是最优的。据此，本桥的最优参数组合为：①边中跨比值为 0.6；②梁底抛物线次数为 1.6；③0 号块梁高为 11.21 m；④跨中梁高为 4.75 m。

这些参数组合经过多目标优化后被认为是最适合解决问题的[10]，可以作为设计或优化结构的最佳选择。这种基于多目标优化的方法能够在考虑多个设计目标时，找到最佳的平衡点，从而提高结构的性能和效率。

5　结论

通过以上计算分析可知，基于 Pushover 的静力弹塑性分析结合数学评价函数法进行多目标优化，在连续刚构桥梁抗震设计中具有重要意义。这种方法可以有效地简化和优化设计过程，为工程师提供了一种系统性、科学性的设计手段。

通过多目标优化，工程师可以在考虑多个设计目标时，找到最佳的参数组合，以最大限度地提高结构的性能、安全性和经济性。优化后的数据能够为实际工程设计和施工提供有价值的参考，使得设计方案更加合理和可靠。

基于 Pushover 的静力弹塑性分析结合多目标优化方法对于连续刚构桥梁抗震设计具有重要的实用意义，可以提高结构的抗震性能，并在一定程度上降低工程成本，同时也有助于提高工程施工效率和质量。

参考文献

[1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 5 版. 北京：人民交通出版社，2019.

[2] 彭林，周柏宇. 连续刚构桥抗震性能分析研究[J]. 交通世界，2023(12)：152-154.

[3] 李聪林，户东阳，李冲杰. 高烈度地震区高墩大跨连续刚构桥的设计关键技术及创新[J]. 科学技术与工程，2020，20(34)：14251-14256.

[4] 刘效尧，徐岳. 公路桥涵设计手册. 梁桥[M]. 北京：人民交通出版社，2011.

[5] 牛家伟. Pushover 分析在延性抗震及减隔震设计中的应用研究[D]. 西安：长安大学，2023.

[6] 杨东，门晟明，宁晓骏. 基于正交试验和多目标函数的连续刚构桥抗震分析[J]. 煤炭技术，2021.40(5)：186-189.

[7] 侣海波. 大跨连续刚构桥动力特性及地震响应分析[J]. 交通世界，2024(S1)：282-284.

[8] 杨亚磊. 大跨连续刚构桥参数优化与稳定性研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2018.

[9] 蒋威. 预应力混凝土连续刚构桥纵向配束设计研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2023.

[10] 黄炜，余健，李晓猛. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥跨中下挠原因分析[J]. 科技和产业，2023，23(4)：254-260.

Optimization of Continuous Rigid Frame Bridge Backbone Parameters Based on Seismic Performance

ZHOU Huihui[1,2], CHEN Yanping[3], LIU Zhaofu[4]

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650001, China; 2. Yunnan New Innovation Transportation Construction Co., Ltd., Kunming 650001, China; 3. Traffic and Transportation Bureau of Lufeng City, Lufeng, 650200, Yunnan, China; 4. College of Architecture and Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650100, China)

Abstract: Taking a continuous rigid-frame bridge under construction near Kunming as the research subject, edge span ratio, beam bottom effect curve, 0 block beam height and span beam height four parameters are selected as variables. 25 continuous rigid-frame models are established with different parameter combinations and utilizing ANSYS software for static pushover analysis. Through orthogonal test based on seismic performance optimization ,it is found that the edge span ratio is 0.6, the number of beam base parabola is 1.6,0 block beam height is 11.21 m, cross the beam height is 4.75 m. This optimization approach represents a significant breakthrough in the design of continuous rigid-frame bridges, not only enhancing structural seismic performance but also providing reliable guidance for engineering practice, thus possessing important practical and scientific significance.

Keywords: Keywords: continuous rigid structure bridge; seismic performance; Pushover analysis; orthogonal test