

中承式钢拱与刚构协作体系慢行系统景观桥设计研究

麦梓浩¹, 裴泽骏², 郭钰瑜¹

(1.广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510095; 2.华南理工大学建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510640)

摘要: 随着人民生活品质的不断提升, 人们的需求也逐渐升华, 对于桥梁不再仅满足于其通行功能, 也开始追求桥梁之美。以灵山-横沥组团慢行过江桥梁为例, 以景观设计作为出发点, 对城市景观中承式钢拱桥的跨径设计、体系设计、结构设计和结构计算进行分析研究, 追求力与美完美结合。钢拱桥采用刚性吊杆以及刚性吊杆与遮阳棚骨架结合的设计, 提出施工过程中张拉临时系杆解决拱桥推力的方法, 以期为城市景观钢拱桥桥梁设计提供思路和参考。

关键词: 景观桥; 中承式拱桥; 钢拱桥; 桥梁遮阳棚; 刚性吊杆

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)09-0094-05

0 引言

城市桥梁的设计不仅需要确保基本的交通功能, 还应当综合融入城市景观, 以满足城市的美感需求。国内设计者在城市桥梁设计中不断探索桥梁美学, 而钢拱桥恰是一种兼具曲线美与力度感的现代结构形式。

钢拱桥首先被运用于大跨径桥梁设计中, 林元培^[1]设计的卢浦大桥为 550 m 中承式拱梁组合体系钢拱桥, 目前仍排名世界第二。近几年, 钢拱桥越来越多地运用到景观桥梁中, 宋馨^[2]设计的无锡兴塘大桥采用中承式钢拱桥结构, 拱肋外倾 20°, 形成蝴蝶拱; 李甲丁^[3]设计的青海西宁北川河片区滨河西路桥, 呈现“空间、多肢、弯斜”的显著特点, 属于复杂景观钢拱桥; 赵煜^[4]对中承式空间 Y 形钢拱桥进行力学分析。

综上所述, 钢拱桥能够展现出多种多样的形态美, 与现代景观融洽。本文的中承式钢拱桥运用到桥梁景观设计中, 采用刚性吊杆设计, 吊杆与遮阳棚融合, 是一种力美结合的全新设计。

1 工程概况

灵山-横沥组团慢行过江桥梁位于广州南沙新区的明珠湾起步区内, 是连接灵山岛与横沥岛的慢行桥梁。总体呈北-南走向, 起点位于灵山岛尖南侧

滨水景观带, 往南上跨上横沥水道后, 接入横沥岛尖北侧滨水景观带。桥位所在位置江面宽度约 300 m, 桥长约 500 m, 桥面通行净宽不小于 13 m, 包含自行车道、人行道等完整慢行体系功能的联通桥及两岸下地坡道。

2 设计主题

结合南沙的蓬勃发展和传统民间工艺, 构思了整体意境概念“云纱起舞、明珠纽带”——响云浮水, 序南沙底蕴; 莼纱曼舞, 绘湾区宏愿。从南沙特色香云纱起笔, 以场地所在的明珠湾落笔。桥梁形体如同香云纱制作的连贯柔美的纽带, 衔接灵山岛与横沥岛, 意喻两座岛尖深度关联、融合互补, 共筑明珠湾起步区的宏伟蓝图。

景观方案力求实现标志性与体验性的共融。桥形设计从南沙香云纱汲取灵感, 桥身的立面设计汲取香云纱在制作流程“柔软拉幅”中形成的优美飘逸的形态, 如图 1 所示。桥身的平面以开放的姿态环抱湾区, 桥面分设快速通道与漫步休闲道, 节庆期间利用观景台阶, 打造以城市为背景的江上舞台。桥上置入适配岭南气候的绿化植被, 构建绿色生态的江上绿廊。主拱融入香云纱轻薄如翼、流畅秀逸的特征, 在现代形态中融入岭南传统工艺与文化特色。

3 总体设计

结合景观设计, 桥梁结构设计为中承式钢拱桥结构, 香云纱状的遮阳棚与主拱、主梁融为一体。主梁为

收稿日期: 2023-10-29

作者简介: 麦梓浩(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

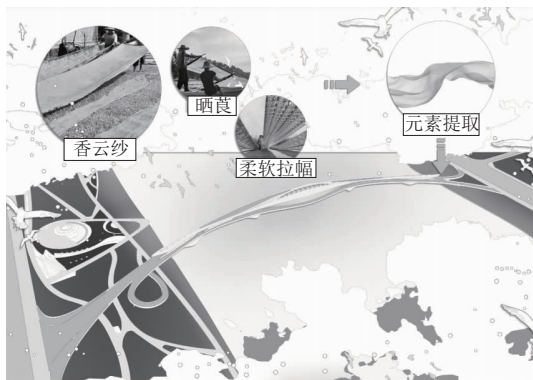


图1 造型景观概念思路图

直-圆-直的平面设计线上的弯梁,整体采用不断变化变宽。中跨主梁采用镂空设计,将分岔为宽窄不同的两段分离式梁体,通过中间横梁连接。主拱与分离式主梁采用刚性吊杆设计,刚性吊杆上延伸出遮阳棚主骨架,骨架间镶嵌铝合金面板。

3.1 跨径设计

根据航道部门要求,考虑1 000~2 000 t船舶通行,净宽不少于75 m;根据水利部门要求,桥墩的阻水率不应高于7%,桥墩避开深水槽。由于主拱拱脚侵入通航净空,主桥主跨当大于110 m且主桥为5跨,满足上述要求。

桥梁跨径尽可能采用对称设计,各跨结构应受力平衡,起伏有致,和谐统一,力与美结合。桥梁采用(46+72+130+72+48) m跨径组合,如图9、图10所示。从力学角度分析,次V构两侧跨径接近,受力自身平衡,次跨反作用力平衡主跨负弯矩力。从美学角度分析,中间三跨较大,共同形成河面的视觉重点。中间三跨主次分明,72:130的宽度比例关系近似 $1:\sqrt{3}$,属于主次明显的比例,造型美观,韵律协调。桥位所在河道水面宽度约350 m,最大跨度130与水面350的比例关系近似等于 $(1-0.618):1$,即不被主跨占据的水面与整体水面的宽度比例存在黄金分割关系。

综上所述,在水中设置一个130 m的桥跨布置,是一种既能适度体现造型标志性,又较为克制避免过多占用水体的策略。在这种策略背后,既有建筑师设计概念的感性表达,也有理性严谨的几何美学规律和力学内涵作为支撑。

3.2 体系分析

从桥梁外形的景观角度和结构整体受力平衡以及客观限制因素,确定(46+72+130+72+48) m跨径组合。主桥可考虑三种结构体系,分别是柔性系杆拱桥+T型刚构桥、刚性系杆拱桥与刚构连续梁组合

体、刚性系杆拱桥+T型刚构桥,如图2所示。

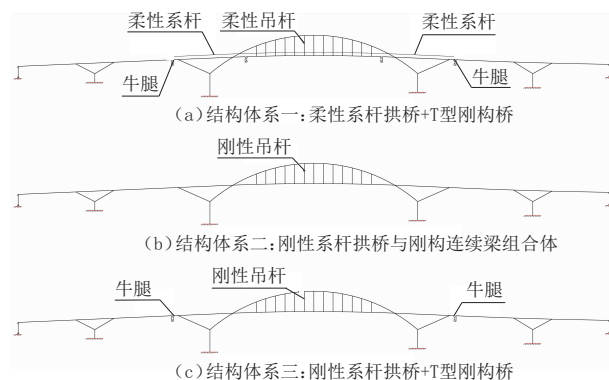


图2 结构体系图

结构体系一体系成熟,施工过程柔性系杆可动态平衡主拱水平推力,成桥阶段拱脚桥墩对外部零推力,适用于地质条件较差的河道;主梁分为5部分,温度应力较小,主跨的梁体漂浮体系设计,抗震性能最好;但该结构体系一般适用于平面直线型拱桥,柔性吊杆适用于梁体横向自平衡,无法与景观遮阳棚适应,分离式弯梁设置柔性系杆困难,水平产生较大的径向力。结构体系二和结构体系三主拱整体稳定性好,刚性吊杆适用于弯梁和横向不对称的主梁设计,与景观遮阳棚适配,提供支撑力。结构体系二整体结构连续,没有牛腿设计,但主梁联长368 m,温度应力较大,温度产生的水平推力集中到次跨的V构上,结构基础难以满足要求。结构体系三主拱后斜腿位置设置牛腿,释放温度应力,主拱的水平推力由主墩承担;主跨拱桥部分采用刚性吊杆和把主梁作为刚性系杆,保证主跨的整体稳定性;次跨T型刚构在平面内的刚度较弱,牛腿上和边墩的支座限制横向位移,保证面内稳定性。

从结构受力和适用性的角度,结构体系三的刚性系杆拱桥+T型刚构桥具有明显优势,选用该体系。

3.3 结构设计

3.3.1 拱肋设计

拱肋设计为八边形变宽变高截面二次抛物线Q420qD钢箱拱。拱跨130 m,立面矢高24 m,矢跨比1/5.4。主跨拱肋截面尺寸从拱脚至拱顶逐渐变小,拱脚处尺寸为5 m×3.5 m,拱顶处尺寸为3 m×1.5 m,中间箱室保持2 m宽,竖直墩尺寸为5 m×4 m,如图3所示。主拱后斜腿和竖向墩内填充C50微膨胀混凝土。主拱钢箱结构连续,主梁钢箱与主拱刚接联合一体。主拱肋共分7个节段进行吊装,其中主拱竖直墩和后斜腿节段钢箱内灌注C50微膨胀混凝土。其余未灌注混凝土的5个主拱肋节段内部沿

轴向每隔 3 m 设一道环形加劲板, 拱肋吊点处加劲板与耳板一体成型, 与锚箱相焊接。

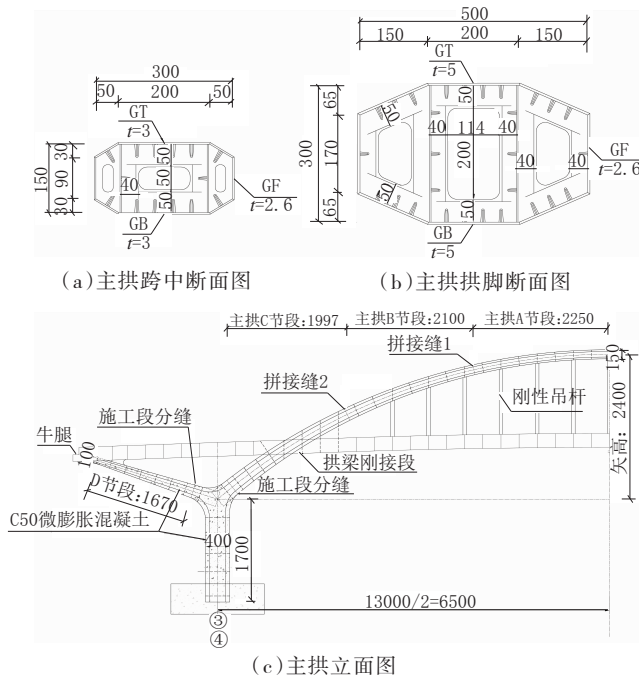


图 3 主拱结构设计图(单位:cm)

3.3.2 主梁设计

主梁采用 Q370qD 钢箱梁,梁底设计为鱼腹型。边跨主梁标准段总宽 15 m,梁高 2.3 m,悬臂 1.4 m,外侧第一个箱室保持宽 4 m,中间调整中间箱室个数和宽度适应梁宽变化;主跨主梁平面分叉为两肢钢箱梁,梁高 2.3 m,内肢梁宽 7.5 m,外肢梁宽 8.7~12 m,如图 10 所示。

主梁顶板、底板及腹板采用板式加劲肋,箱室内每隔 6 m 设置一道实腹式强横隔,与刚性吊杆同间距;强横隔间每隔 3 m 设置一道框架式弱横隔。

3.3.3 刚性吊杆设计

全桥共设置 13 对刚性吊杆, 采用 Q420qD 钢箱, 尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 箱型, 如图 4 所示。

钢箱中腹板与主拱的横隔板、横梁的腹板整板连续,外侧腹板与拱底、横梁顶焊接。下端与横梁采用螺栓连接,加强多构件连接面外稳定。

3.4 施工方案

桥梁施工采用“先梁后拱”的成熟方案。首先,搭设栈桥施工基础、承台和 V 型墩;其次,架设临时墩,浮吊钢箱梁,在主拱跨中分离式主梁预留合拢段;再次,分离式主梁的横梁架设主拱临时支架,分段吊装主拱;主拱合拢后,拆除主拱临时支架,分离式主梁分别对拉 1 000 t 的临时主动系杆,保持预拉力,合拢主梁,施工刚性吊杆,拆除所有临时墩,完成体系

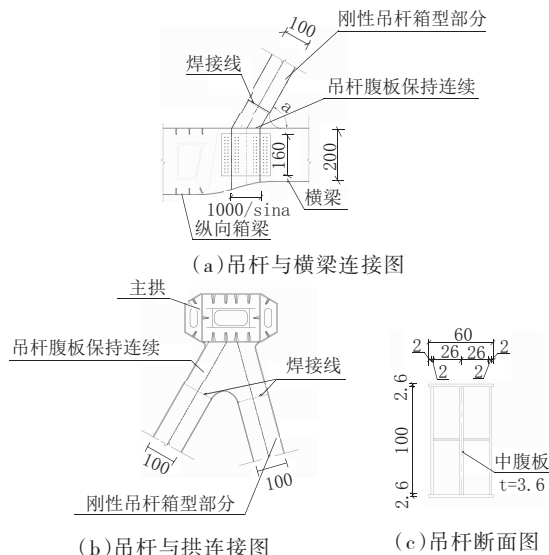


图 4 刚性吊杆结构设计图(单位:cm)

转换;最后,施工遮阳棚,铺装等附属工程。

4 结构计算

4.1 计算模型的建立及分析方法

主桥结构的静力计算分析以空间杆系理论为基础,采用 MIDAS Civil 2021 进行结构分析。主拱、主梁、横梁、刚性吊杆和遮阳棚主骨架采用空间梁单元模拟,遮阳棚面板采用板单元模拟;主拱与主梁、V 构与主梁采用刚性连接。桩基根据实际地质报告利用 M 法计算每米的土弹簧,加载至模型。计算模型按照设计方案模拟施工各阶段。结合施工方案进行结构离散,全桥共划分为 2 147 个梁单元,384 个板单元,2 502 个节点,结构几何模型如图 5 所示。

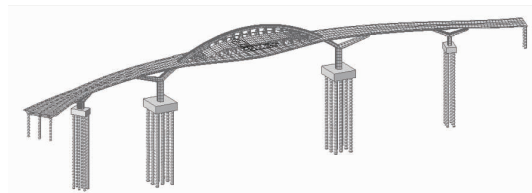


图 5 计算模型图

4.2 计算参数选取

(a)恒载按照设计实际计算,人群荷载取 4 kPa。

(b)环境温度作用考虑整体升温 26 度,整体降温 23 度;构件温差考虑主拱和刚性吊杆同时升温 10 度或降温 10 度;钢箱梁温度梯度按照英国规范 BS5400 考虑。

(c)不均匀沉降按照单轴 10 mm 考虑。

(d)风荷载按照 100 a 一遇的风压计算。

4.3 静力分析结果

十年成桥工况,计算结果表明,主拱和 V 构最大应力为 -125.5 MPa (压),刚性吊杆应力为 77.2 MPa

(拉),主梁最大应力为 108 MPa(拉),如图 6 所示。

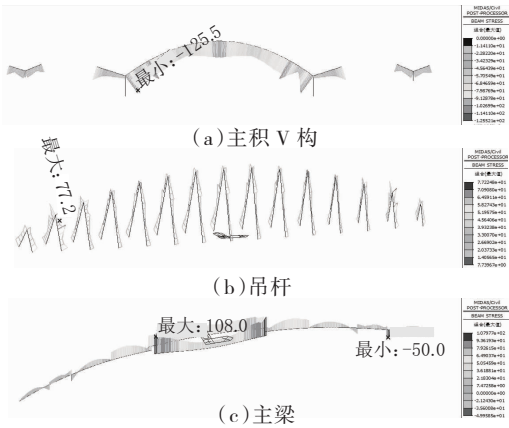


图 6 成桥阶段主拱 V 构、吊杆、主梁应力包络图(单位:MPa)

基本组合工况,计算结果表明,主拱和 V 构最大应力为 -190.9 MPa (压),刚性吊杆应力为 168.1 MPa (拉),主梁最大应力为 202.5 MPa (拉),如图 7 所示。应力均满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)第 5.3.1 条要求。

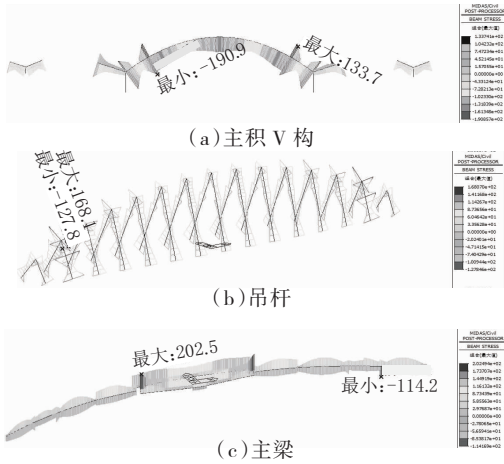


图 7 基本组合主拱 V 构、吊杆、主梁应力包络图(单位:MPa)

人群荷载下最大挠度 37.4 mm ,如图 8 所示,不大于计算跨径的 $1/500$,刚度满足规范要求。



图 8 人群荷载下最大位移图(单位:mm)

4.4 空间稳定和动力分析

计算模型屈曲分析考虑了结构恒载,人群及风荷载,前三阶失稳模态分别表现为边墩失稳,边墩失稳,主拱横向失稳,一阶的稳定系数为 46.7。

计算模型运用 Lanczos 方法分析,前三阶阵型分别为主拱面外摆动,桥面竖向振动,次跨 V 构纵向摆动,对应的自振频率为 0.828、0.890、1.304。主梁应进一步采用 TMD 调谐质量阻尼器提高人行舒适性。

4.5 临时系杆对主墩反力的影响

中跨分离式主梁在合拢前张拉 $1\,000\text{ t}$ 的临时系杆和不张拉临时系杆的两种工况进行对比,对比结果见表 1。结果表明:施工过程张拉临时系杆有利于降低主墩水平推力峰值,成桥情况下保持主墩水平推力接近为零,主拱自身保持平衡。

表 1 主墩水平反力对比表 单位:kN

施工工况	张拉阶段	成桥阶段	标准组合
张拉 $2 \times 1\,000\text{ t}$ 临时系杆	-13 141	-730.9	6 955
不张拉临时系杆	3 410	11 627	19 313

5 结 语

本文以灵山-横沥组团慢行过江桥梁为例,结

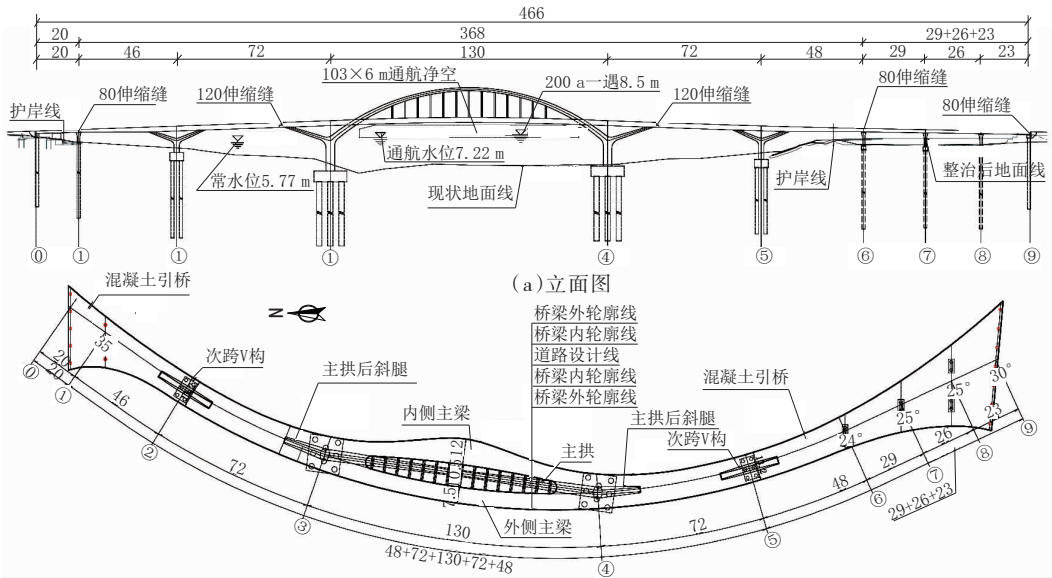


图 9 桥梁立面、平面图(单位:m)

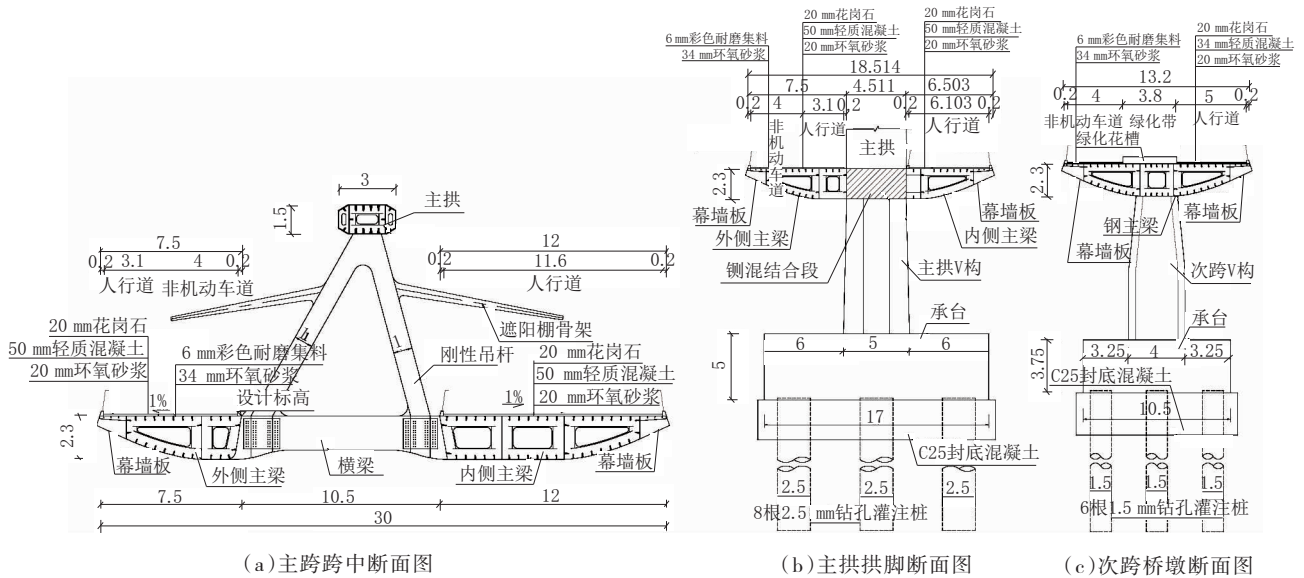


图 10 桥梁主跨跨中、主拱拱脚、次跨桥墩断面图(单位:m)

合景观美学和桥梁力学分析和研究,得到以下设计经验。

- (1)景观桥梁设计应赋予当地的文化特色的内涵,从形态上和细节上展现。
- (2)景观桥梁形态优美,桥梁结构设计应根据客观条件和景观设计的初始理念进行优化桥梁跨径、结构体系和构件设计。
- (3)中承式钢拱桥采用刚性吊杆设计,刚性吊杆与遮阳棚骨架融合设计是可行的,为桥梁设计增加了多样性。
- (4)刚性系杆拱桥可通过施工过程主梁合拢前

张拉临时系杆解决拱推力的问题。

- (5)景观桥梁相对常规桥梁,更需要全面的受力分析,确实安全可靠美观。

参考文献:

- [1] 林元培,章曾焕,马磊,等.上海市黄浦江芦浦大桥设计[J].土木工程学报,2005,38(1):71-77.
- [2] 宋馨,黄鑫,孟丹丹,等.无锡兴塘大桥——外倾拱肋中承式钢拱桥的设计研究综述[J].城市道桥与防洪,2007,1(9):31-35.
- [3] 李甲丁,李升玉,张海平,等.空间多肢弯斜钢拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2023,1(1):83-88.
- [4] 赵煜,罗轩,张和,等.中承式空间Y形钢拱桥力学分析[J].科学技术与工程,2023,23(6):2606-2611.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com