

基于正交试验设计的正交异性钢桥面系多因素优化研究

王柏文¹, 唐 焱², 刘 扬¹, 王 龙¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司市政建筑工程公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:以某大跨悬索桥钢箱梁为研究对象, 建立精细化的局部正交异性钢桥面系有限元模型。采用正交试验设计方法, 研究了最不利轮载作用下正交异性板结构参数及铺装层材料与结构参数对铺装层力学特性的影响。以钢桥面铺装体系质量最轻和铺装层横向拉应力最小为目标函数, 拟合得到各变量间响应面模型, 最后对正交异性钢桥面系进行优化设计。结果表明: 轮载对称施加在 U 肋正上方时, 铺装层内横向拉应力及弯沉值最大; 最不利轮载作用下, 铺装层弹性模量变化对铺装层横向拉应力、铺装层与钢桥面板间层间剪应力、铺装层弯沉值影响最为显著, 增大铺装层厚度及弹性模量可改善钢桥面系受力状况, 钢桥面板厚度变化对钢桥面系力学特性影响较小; 基于响应面对正交异性钢桥面系进行多目标优化设计, 减小了铺装层横向拉应力的同时, 降低了结构自重, 具有很好的应用价值。

关键词: 正交异性钢桥面系; 子模型; 正交试验设计; 响应面法; 多目标优化设计

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0842-08

Research on multi-factor optimization of the orthotropic steel bridge deck pavement system based on orthogonal experimental design

WANG Bowen¹, TANG Yan², LIU Yang¹, WANG Long¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Municipal and Architecture Engineering Company, Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd, Changsha 410205, China)

Abstract: A finite element model of the orthotropic steel bridge deck system with pavement layer was established. Under the most unfavorable wheel load, mechanical performances of pavement layer reacted to the change of structural parameters and materials were studied. Minimum weight of the steel deck pavement system and minimum of transverse tensile stress were selected as the design objectives. Response surface models were established between variables, and the optimization design was conducted. Results showed that transverse tensile stress and deflection value of the pavement were greatest when wheel load was applied on above of U rib symmetrically. Modulus change of pavement layer has a significant influence on transverse tensile stress and deflection value of the pavement, as well as shear stress value between pavement and steel deck. Increasing thickness of pavement layer and elastic modulus can reduce the stress value of steel deck pavement system. Thickness changes of the steel bridge deck has a smaller effect on mechanical performance. Multi-objective optimization based on the response surface method reduced the transverse tensile stress and the weight of steel deck pavement system. It has a good application value.

Key words: orthotropic steel bridge deck pavement system; submodel; orthogonal experimental design; response surface method; multi-objective

正交异性钢桥面板具有质轻、高强、易施工等优点, 近年来被广泛应用于国内外大跨桥梁建设中。桥面铺装作为钢桥面板的保护层和荷载扩散层, 在改善行车舒适性和安全性的同时, 对钢桥面板耐久性也有重要意义。现有钢桥面系铺装

层的一些病害问题较为突出, 主要表现在纵横向裂缝破坏和铺装层与钢桥面间脱层^[1-7]。由于钢桥面板与铺装层间存在复合作用, 铺装层的存在有效地降低了桥面板细节的疲劳应力, 同时, 由于正交异性板复杂的结构形式及显著的荷载局部效

收稿日期: 2017-08-30

修改稿日期: 2018-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057701); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B471)

第一作者: 王柏文(1993—), 男, 博士生, 主要从事正交异性钢桥面板疲劳特性研究与设计优化。E-mail: wangbowenbridge@163.com

通信作者: 唐 焱(1993—), 男, 硕士生, 主要从事正交异性钢桥面板疲劳特性研究。E-mail: tangyan-bridge@qq.com

应,其构造参数对铺装层的应力场分布有着重要影响。桥面板与铺装层互相影响、共同受力,桥面铺装设计应与主梁设计同步、协调进行,以保证桥梁结构具有足够的刚度。为解决钢箱梁桥面铺装破坏的问题,国内外学者已进行了大量研究,黄成造^[8-9]等研究了构造参数对铺装层应力的影响,提出在钢箱梁顶板纵向加劲肋之间加设横向加劲小肋的办法用以改善铺装层的受力状况,最终指导了珠江黄埔大桥钢箱梁桥面铺装层的设计。林广平^[10]等基于BP神经网络模型,对钢桥面铺装体系构造参数进行了优化设计。明图章^[11]等将钢桥面板与铺装层的性能要求结合在一起,以铺装体系造价和铺装层表面极限应力最小化为目标,进行了多目标优化设计。

以往的研究虽然取得了令人满意的结果,但也存在以下不足:1)未能明确正交异性板结构参数及铺装层材料与结构参数对铺装层力学特性影响的大小顺序;2)在对正交异性钢桥面系进行优化设计时,如何能以较少的计算成本取得良好的优化结果。

本文以某大跨悬索桥钢箱梁为研究对象,建立精细化的局部钢桥面系有限元子模型,将正交异性钢桥面板和铺装层作为整体进行分析,计算轮载作用下铺装层的应力分布状况并确定最不利轮载位置。通过正交试验设计方法,研究正交异性板结构参数及铺装层材料与结构参数对铺装层力学特性的影响。以桥面铺装体系质量最轻及铺装层内横向拉应力最小两类指标构造目标函数,通过建立变量间的响应面近似模型,对正交异性钢桥面系进行优化设计分析,以期今后的正交异性钢桥面系设计提供借鉴与指导。

1 局部正交异性钢桥面系有限元分析

1.1 工程概况

国内某大跨悬索桥,主缆分跨 $192+820+176\text{m}$,主梁采用钢箱梁形式,桥轴中心线处梁高 3m ,宽 29.78m (不含风嘴),桥面横坡 2% ;全桥共划分65个标准梁段,长度为 12.8m ,内设4道横隔板,横隔板间距为 3.2m ,厚度为 10mm ;桥面铺装层为 67mm (35mm 改性沥青玛蹄脂碎石SMA-10+ 30mm 浇筑式沥青砼GA-10+ 2mm 钢桥面防水粘结层)。钢箱梁桥面板采用正交异性板,主要组成构件的具体尺寸分别见表1所示。

表1 钢箱梁主要构造参数

Tab. 1 structural parameters of steel box girder

构件参数	参数大小/mm
顶板/底板/腹板厚度	16/10/14
顶板/底板纵向加劲肋厚度	8/6
顶板纵向加劲肋上/下口宽	300/170
底板纵向加劲肋上/下口宽	240/500
顶板/底板纵向加劲肋高度	280/260
顶板/底板纵向加劲肋标准间距	600/1 000

1.2 局部钢桥面系有限元模型

在有限元方法对钢箱梁桥面铺装体系分析时,采用简化的局部子模型由于对用户和计算机要求不高而被广泛采用。为了保证选用的局部模型能反映结构实际的受力状态,同时提高计算精度、减少计算成本,文献^{[12]~[13]}利用子模型技术和综合评价方法对局部钢桥面系模型几何尺寸与边界约束条件进行了优化,对比分析表明简化子模型具有较高的计算精度。文献^[14]完成了局部子模型的参数优化分析,对某工程实桥进行测试,将采用优化的局部子模型分析得到的计算值与实桥加载得出的实测值对比,结果表明计算值与实测值差别不大,优化的局部子模型可作为钢桥面铺装计算模型使用。

基于上述研究成果,本文采用通用有限元分析软件Workbench建立了精细化的局部钢桥面系有限元子模型,模型初始构造参数均与原桥一致。模型纵向为三跨,横向有7个U肋,横隔板高 1.2m ,正交异性板采用板壳单元Shell181模拟,弹性模量 210GPa ,泊松比 0.3 ;不单独建立钢桥面防水粘结层,另外两铺装层简化为材料一致的单层等厚铺装层,铺装层沥青混凝土采用solid186单元模拟,假定为各向同性且连续的完全弹性体,其模量与温度及材料密切相关,参考文献^[8]取弹性模量为 $3\ 000\text{MPa}$,泊松比 0.25 。铺装层与钢桥面板之间采用Bonded接触,不考虑桥面板与铺装层间的黏结滑移效应。另外,由于铺装层的施工通常是在正交异性钢桥面板完全施工结束后才进行铺筑,因此在计算中可不考虑钢桥及铺装层自重^[12-13]。建立的有限元模型单元总数为68 761,节点总数为178 286,如图1所示。

1.3 计算结果分析

计算荷载按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)取公路-I级 550kN 车辆荷载后轴一侧

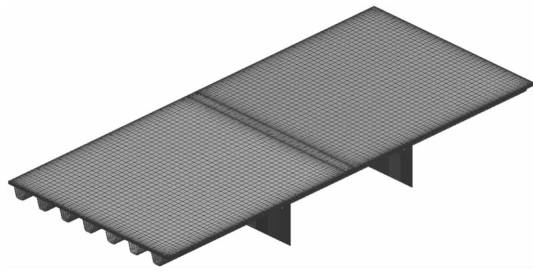


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element model

车轮, 单轮重 70 kN, 着地面积为 $0.6 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 考虑冲击系数和车辆超载的影响后轮压取 0.7 MPa 。模型边界条件设置为纵边自由, 横边两侧为简支约束, 横隔板底端固结。荷载纵向布置在第二跨跨中截面处, 沿桥面横向布置了 3 个荷载作用位置, 如图 2 所示: 荷位 1 为车载施加于两 U 肋中心之间正上方; 荷位 2 为车载以 U 肋一肋边为中心对称施加于正上方; 荷位 3 为车载对称施加于 U 肋正上方。

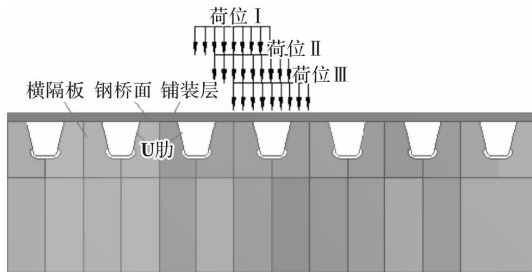


图 2 荷载横向布置示意图

Fig. 2 Load diagram of transversal arrangement

计算结果表明: (1) 钢桥面铺装层荷载局部效应显著, 建立的局部钢桥面系有限元子模型分析结果与文献[8]中的结论一致; (2) 以铺装层横向拉应力或挠跨比为控制指标时, 横桥向最不利荷位是荷位 3, 铺装层最大横向拉应力出现在荷载作用区边缘外加劲肋顶处。图 3 给出了轮载作用在最不利荷位 3 时, 钢桥面铺装层纵横向拉应力、层间剪应力及弯沉值分布状况。

2 参数敏感性分析

2.1 正交试验设计法

正交试验法是一种对多因素多水平进行有效研究和处理的设计方法, 根据正交性从全面试验中挑选出部分具有代表性的点进行试验, 这些点具有“均匀分散, 齐整可比”的特点^[16-17]。与全面试验相比, 采用正交试验法, 在保证试验结果可靠和结论正确的前提下, 尽可能的减少了试验次

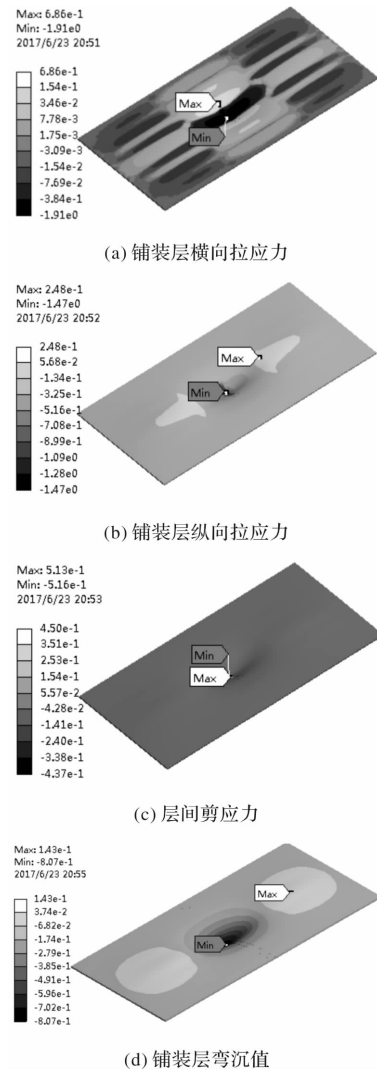


图 3 荷载效应

Fig. 3 Load effect analysis

数, 因而在各学科领域应用广泛。近年来在土木工程领域也常见基于正交试验法的研究成果, 如贾超^[16]等基于正交试验设计对层状盐岩地下储库群进行了多因素优化研究。付宏渊^[17]等运用正交试验法对岩质边坡进行了动力稳定性分析。

试验设计一般有以下几个步骤: (1) 试验方案设计; (2) 按照方案进行试验获得试验结果; (3) 对记录的试验结果进行数据分析; (4) 对结果进行试验验证。

2.2 数值模型与计算参数

引言部分介绍了铺装层破坏常见形式及原因, 从实际安全角度出发, 本文分别以铺装层最大横向拉应力 δ_{\max} 、层间最大剪应力 τ_{\max} 及铺装层最大弯沉值 h_{\max} 为评价指标, 旨在通过正交试验设计, 利用数值模拟软件完成分析, 明确影响因素对各评价指标的影响程度, 通过合理的参数设计降低

三种评价指标数值, 以提高铺装层寿命, 同时为今后同类桥梁结构铺装提供借鉴与指导。

对上述正交异性钢桥面系进行优化研究时, 在已有的研究成果之上, 结合《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)主要构件的设计要求, 按上节确定的最不利轮载方式加载, 考虑了轮载作用下铺装层厚度、铺装层沥青混凝土弹性模量、钢桥面板厚度 3 个因素对钢桥面系力学特性的影响, 每种因素分别选择 3 种不同的水平, 如表 2 所示。

在确定了试验因素及其参数水平之后, 选择一张合适的正交表至关重要, 它不仅决定了整个数值模拟试验过程的进行, 同时对结果的处理也有重要影响。本文拟选用 $L_9(3^4)$ 正交表, 式中: “9”为正交表行数(试验数), “4”是列数, 表示在此正交数值模拟试验中最多可安排的因子个数, 本次数值模拟试验共 3 个因子, 故多余一列为空列, “3”表示试验中各因素的水平数。正交表设计与计算结果如表 3 所示。

表 3 $L_9(3^4)$ 正交数值模拟试验设计
Tab. 3 Orthogonal numerical simulation test design of $L_9(3^4)$

试验号	因子				评价指标		
	A/mm	B/MPa	C/mm	D(空列)	δ_{\max}/MPa	τ_{\max}/MPa	h_{\max}/mm
1	(1)55	(1)1 500	(1)14	(1)	0.596	0.404	-1.029
2	(1)55	(2)3 000	(2)16	(2)	0.777	0.490	-0.871
3	(1)55	(3)4 500	(3)18	(3)	0.847	0.509	-0.780
4	(2)65	(1)1 500	(2)16	(3)	0.500	0.360	-0.912
5	(2) 65	(2)3 000	(3)18	(1)	0.626	0.430	-0.776
6	(2) 65	(3)4 500	(1)14	(2)	0.821	0.680	-0.770
7	(3)75	(1)1 500	(3)18	(2)	0.406	0.304	-0.827
8	(3) 75	(2)3 000	(1)14	(3)	0.628	0.553	-0.783
9	(3) 75	(3)4 500	(2)16	(1)	0.638	0.547	-0.692

表 4 极差分析
Tab. 4 Extreme difference analysis

指标	最大横向拉应力 δ_{\max}/MPa			最大层间剪应力 τ_{\max}/MPa			铺装层最大弯沉值 h_{\max}/mm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
$k_1(\times e^{-3})$	740	501	682	468	356	546	-893	-923	-861
$k_2(\times e^{-3})$	649	677	638	490	491	466	-819	-810	-825
$k_3(\times e^{-3})$	557	769	626	469	579	414	-767	-747	-794
$R(\times e^{-3})$	183	268	56	22	223	132	126	176	67
水平主次	3 2 1	1 2 3	3 2 1	1 3 2	1 2 3	3 2 1	3 2 1	3 2 1	3 2 1
因素主次	B: A: C			B: C: A			B: A: C		

注: 以最大横向拉应力 δ_{\max} 为评价指标为例, 安排 A 因子的第 1 列时, 记相应第 i 个试验号的结果为 y_i , 第 1 列的 k_1 就是对应于该列中“1”水平的 3 个试验结果数值相加后取平均值, 同样方法分别计算 k_2 、 k_3 , $R=k_{\max}-k_{\min}$ 。如在第 1 列中: $k_1=(y_1+y_2+y_3)/3=(0.596+0.777+0.847)/3=740\times e^{-3}$, $k_2=649\times e^{-3}$, $k_3=557\times e^{-3}$, $R=k_{\max}-k_{\min}=k_1-k_3=740\times e^{-3}-557\times e^{-3}=183\times e^{-3}$ 。

从表4可以看出,采用3种不同的评价指标时,铺装层弹性模量 B 的极差 R 均大于铺装层厚度 A 及钢桥面板厚度 C 的极差 R ,说明铺装层弹性模量 B 是它们最显著的影响因素,铺装层弹性模量的改变对钢桥面系结构各方面力学性能都具有很大的影响.对于铺装层内最大横向拉应力,钢桥面板厚度变化时的极差 $R=56 \times e^{-3}$ 为最小,说明其对最大横向拉应力影响最弱,以降低横向拉应力为目标时,根据不同因素不同水平计算出的 k_i ,列于表4,当因素 ABC 分别取水平3、水平1、水平3时, k 指标分别是 $557 \times e^{-3}$ 、 $501 \times e^{-3}$ 、 $626 \times e^{-3}$,分别为不同因素各水平 k_i 的最小值.因此可确定此时因素的最佳水平为 $A_3 B_1 C_3$;同理,对于铺装层与钢桥面板间最大剪应力,铺装层厚度对其影响最弱,以减小层间剪应力为目标,其因素的最佳水平为 $A_1 B_1 C_3$;对于铺装层最大弯沉值,钢桥面板厚度对其影响最弱,为保证安全需尽量减小铺装层弯沉值,因素的最佳水平为 $A_3 B_3 C_3$.

从图4可以看出,随着铺装层厚度的增加,铺装层内最大横向拉应力及铺装层最大弯沉值均有所减小,而铺装层与钢桥面间的最大剪应力变化不是很明显,铺装层厚度在逐渐增加的同时,层间剪应力先逐渐增加后慢慢减小;在铺装层的弹性模量逐渐增加的过程中,虽然铺装层的最大弯沉值在逐渐减小,但是铺装层内的最大横向拉应力及最大层间剪应力反而在逐渐变大;钢桥面板厚度逐渐增加的过程中,3个评价指标均有所降低,但效果并不明显.

钢桥面铺装层的破坏形式是多样的,其背后的原因也不尽相同,所以在进行钢桥面铺装设计时,应考虑多方面因素.若仅以一个参数为控制指标,往往会导致不合理的设计,造成顾此失彼的现象,最终降低了铺装层的寿命,也增加了后期维修加固的费用.具体到本次正交试验设计,若仅以铺装层内最大横向拉应力为控制指标,根据表4或图4可知,当铺装层内最大横向拉应力最小时,因素 A 的最优水平为水平3,因素 B 的最优水平为水平1,因素 C 的最优水平为水平3,故因素的最优组合为 $A_3 B_1 C_3$,但是我们可以发现,最优组合中 B 因子若取水平“1”,此时铺装层的弯沉值又会最大,这与我们想要达到的多目标最优并不一致.同样的,仅以其他两个参数分别为单

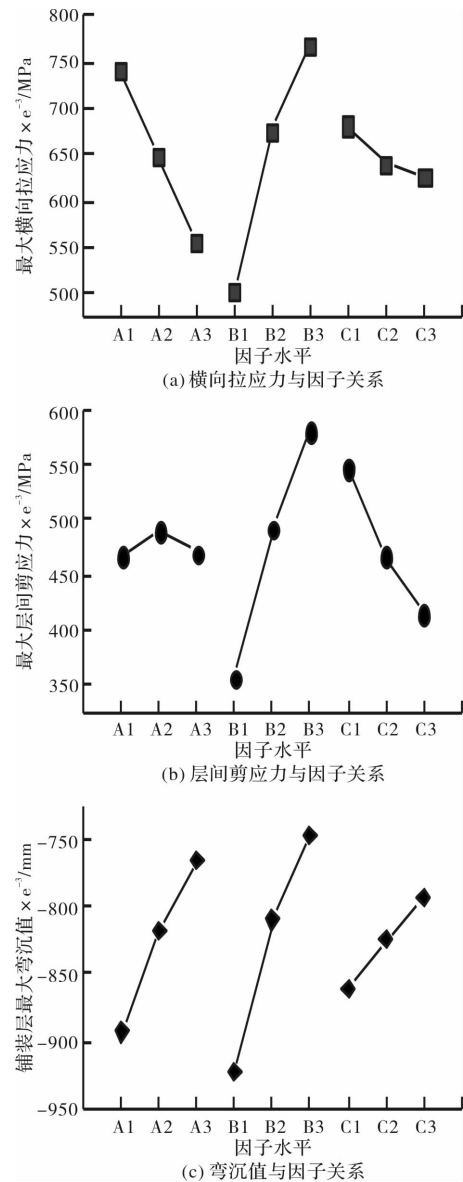


图4 指标与因子关系

Fig. 4 Relationship of target with factors

一的控制指标时,也会面对同样的问题.基于正交试验设计进行多目标优化时,往往会由于评价指标间的矛盾性,带来方案的不可比较性,这使得在寻找满意方案的试验过程中会遇到困难;另外,基于正交试验的优化研究所确认的仅仅是因子的最优组合,组合的因子水平与最初设计有关,无法准确确定各因子最优取值.可以利用响应面法进行优化设计解决上述问题,本文将在下节做出详细介绍.

3 基于响应面法的多目标优化设计

响应面法(RSM)是以试验设计(DOE)为基础的用于处理多变量问题建模与分析的一套统计处理技术,其原理是当某点周围部分数量点的实际函数值已知时,通过某种方式利用这些已知点建

立一个超曲面，将隐函数显化，在充分靠近这个点的区域内，可用这个近似曲面替代实际函数进行计算。响应面模型包含了前述正交试验设计点，克服了正交试验无法准确确定各因子最优取值的问题。基于响应面法的优化设计是结构优化设计上的一次质的飞跃，与传统的优化设计方法相比，它解决了传统优化过程中的繁重的迭代次数问题，大大提高了优化设计的效率^[18]。RSM 方法的主要步骤如下：(1) 确定优化设计变量和目标函数；(2) 制定 DOE 方案并完成试验设计；(3) 利用完成的试验设计点通过回归分析，建立响应面模型；(4) 基于建立的响应面模型完成优化设计，并检验优化结果是否满足要求。

3.1 优化变量及目标函数

优化设计的目的通常体现在结构满足力学性能与功能要求的前提下，材料使用最少，结构质量最轻，达到经济最优的效果；同时，考虑到钢桥面铺装层破坏主要是纵横向裂缝破坏，前两节计算结果也表明，最不利轮载作用下，铺装层内横向拉应力比纵向拉应力要大。因此，本文将铺装层内最大横向拉应力 δ_{\max} 及钢桥面系的质量 M 作为两个优化目标，目标函数为： $\min G = d_1 \min \delta_{\max} + d_2 \min M$ 式中： d_1 、 d_2 为权重系数，用来描述各目标函数的重要程度，这里 d_1 、 d_2 分别取 0.3 和 0.7，主要基于以下几点：(1) 单纯的以横向拉应力最小或结构质量最轻为目标，优化效果往往不够理想；(2) 在保证横向拉应力处于安全范围的前提下尽可能减轻结构自重，降低工程造价。

在结构优化设计的过程中，需要优选参数作为优化设计中的设计变量，对优化目标影响较小的参数往往可以保持原设计值不变。由上节计算结果可以看出，最不利轮载作用下，铺装层厚度的变化及铺装层弹性模量的改变对铺装层内最大横向拉应力影响较大，设计规范给出了铺装层厚度可在 30~80 mm 之间，将铺装层厚度 A 及沥青混凝土弹性模量 B 作为设计变量，考虑到计算规模及响应面拟合精度要求，优化范围为在原设计值基础上变动 $\pm 10\%$ ；钢桥面板厚度变化时，铺装层内最大横向拉应力变化不是很明显，且从施工及安全角度出发，钢桥面板厚度变化范围有限，因此可不将其作为设计变量。

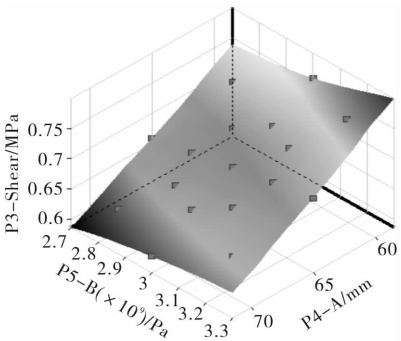
表 5 设计变量取值
Tab. 5 Ranges of design parameters

优化范围	铺装层厚度 A	沥青混凝土弹性模量 B/MPa
	/mm	
下限	58.5	2 700
原值	65	3 000
上限	71.5	3 300

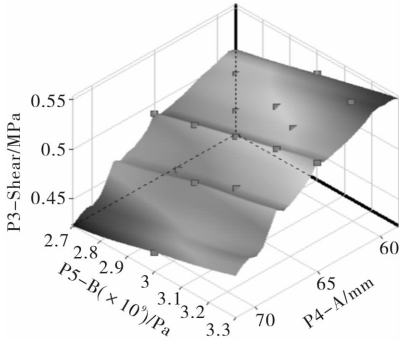
钢桥面铺装结构由正交异性钢桥面板与铺装层组合而成，在服役过程中的使用性能应满足要求。为防止铺装层与钢桥面板间发生铺装层剪切滑动破坏，最不利轮载作用下，最大层间剪应力 τ_{\max} 不得超过容许剪应力值 $[\tau]_{\text{容许}}$ ，参考以往研究成果， $[\tau]_{\text{容许}}$ 取 0.5 MPa ^[6]。由于钢桥面系显著的荷载局部效应，荷载作用下，钢桥面板铺装层表面会形成高应力区域，局部挠度随之增加，降低了铺装层的抗裂性能。设计规范采用铺装层的局部挠跨比表征铺装层与正交异性钢桥面板的变形性能，最不利轮载作用下，局部挠跨比 d/l_{\max} 不得超过容许值 $[d/l_{\max}]_{\text{容许}}$ ，按规范 $[d/l_{\max}]_{\text{容许}}$ 取 $1/1\ 000$ 。

3.2 响应面模型建立

Workbench 中运用模块 Design Exploration，根据上节给出的设计变量取值范围，采用 CCD 法（中心复合设计）完成了两因素五水平设计，总共 17 次试验，基于 Genetic Aggregation 原则拟合得到设计变量与约束变量和目标变量间的响应面模型，拟合的相关系数平方 (R^2) 均大于 0.99，验证了响应面模型的准确性。图 5 给出了部分响应面模型。



(a) 横向拉应力响应面



(b) 层间剪应力响应面

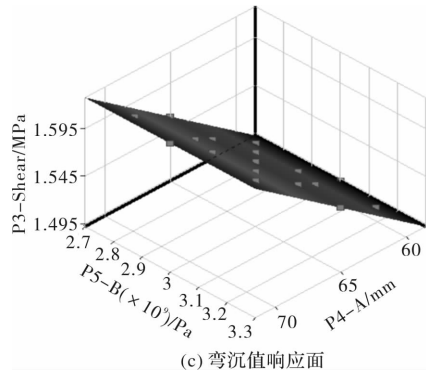


图 5 变量间响应模型

Fig. 5 Response surface model between variables

3.2 优化设计及有限元验证

以上述拟合的响应面模型为基础,采用筛选法对试验模型进行优化设计,此方法是从 1 组给定的样本(设计点)中按照响应面模型得出最佳设计点,其优化精度与样本数量选取有关.本文将样

本点设为 10 000,在满足状态变量要求的前提下,按照优化设定目标,产生了三组候选的优化设计点,如表 6 所示.综合评价后选用第一候选设计点,其层间剪应力及挠跨比约束条件均满足要求,优化后的铺装层横向拉应力较原设计降低了 0.99%,质量较原设计减小了 2.12%.同时为了验证设计优化结论的准确性,按照候选设计点 1 的结构尺寸进行仿真分析,表 7 列出了优化前、基于响应面法优化及按照优化点仿真的计算结果对比.从表 7 结果可以看出优化结果与仿真结果误差较小,优化结果满足要求.由于本文仅针对局部子模型进行优化,同时优化考虑的因素有限,优化效果并不十分显著.若将此优化方法推广到整个桥面系中,同时考虑更多因素的影响,定会取得很好的优化效果,这将是下阶段要进行的主要工作.

表 6 优化设计结果

Tab. 6 The optimized design results

优化结果	A/mm	B/MPa	$\tau_{\max x} / e^{-2} \text{ MPa}$	d / l_{\max}	$\sigma_{\max} / e^2 \text{ MPa}^{-1}$	m/kg
1	61.84	2 702	49.79	1/2322	68.61	15269
2	62.56	2 767	49.77	1/2380	68.42	15345
3	63.24	2 828	49.96	1/2424	68.20	15415

表 7 优化前后的对比分析

Tab. 7 Results comparison before and after optimization

序号	A/mm	B/MPa	$\tau_{\max x} / e^{-2} \text{ MPa}$	d / l_{\max}	$\sigma_{\max} / e^2 \text{ MPa}^{-1}$	m/kg
优化前	65	3 000	51.38	1/2 543	68.63	15 598
优化后	61.84	2 702	49.79	1/2 322	67.95	15 269
按优化点仿真	61.84	2 702	49.38	1/2 267	67.94	15 269

4 结论

研究了正交异性板结构参数及铺装层材料与结构参数对铺装层力学特性的影响,据此选取铺装层厚度和弹性模量为优化变量,由正交试验设计方法进行数值模拟计算得到各变量间响应面模型,并开展了多目标优化设计研究,主要得出以下结论:

(1)轮载对称作用在 U 肋正上方时,铺装层处于最不利受力状态,此时铺装层内横向拉应力最大.

(2)铺装层弹性模量对横向拉应力、层间剪应力及弯沉值影响最为显著;铺装层厚度逐渐增加的过程中,横向拉应力及弯沉值逐渐减小,层间剪应力先逐渐增加到一定数值后逐渐减小;钢桥

面板厚度的变化对横向拉应力及弯沉值影响较小,层间剪应力随着钢桥面板厚度的增加而减小.

(3)基于响应面法进行的多目标优化设计,优化后的桥面系质量降低了 2.12%,横向拉应力降低了 0.99%,最优设计点经仿真验证误差较小,优化结果满足要求.下阶段工作是将此优化方法推广到整个桥面系中,同时考虑更多因素的影响,以提高优化效果.

参考文献 References

[1] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
HUANG Wei. Theory and Method of deck paving design of long-spanbridge[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2006.

- [2] 傅中秋,吉伯海.考虑桥面铺装作用的正交异性钢桥面板应力幅分析[J].工业建筑,2015,45(5):143-146.
FU Zhongqiu, JI Bohai. Stress amplitude analysis of orthotropic steel bridge deck with pavement [J]. Industrial Construction, 2015, 45(5):143-146.
- [3] 李艳春,张静.温度-荷载耦合作用对钢桥面铺装层力学特性的影响[J].武汉理工大学学报,2013,35(11):98-102.
LI Yanchun, ZHANG Jing. Study on mechanics analysis of asphalt pavement on steel bridge under thermal-mechanical coupling condition[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(11):98-102.
- [4] 唐细彪.正交异性板及桥面复合铺装影响面测试试验研究[J].铁道工程学报,2015,198(3):37-40.
TANG Xibiao. Experimental research on the influence surface of the orthotropic plate and the bridge deck pavement[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 198(3):37-40.
- [5] 徐勋倩,黄卫,刘振清.大跨径桥梁钢桥面双层铺装力学性能控制指标计算简式[J].公路交通科技,2008,25(7):85-89.
XU Xunqian, HUANG Wei, LIU Zhenqing. New regression formulas for mechanical indexes of two-layer deck paving of long-span steel bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7):85-89.
- [6] 赵锋军,李宇峙.钢桥面铺装防水粘结层抗剪问题研究[J].公路交通科技,2007,24(2):37-39.
ZHAO Fengjun, LI Yuzhi. Research on shear resistant waterproof-adhesive layer in steel bridge pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(2):37-39.
- [7] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65-77.
HUANG Wei. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9):65-77.
- [8] 黄成造,李保木,刘泽佳,等.钢箱梁桥面铺装体系构造参数对铺装层应力的影响[J].桥梁建设,2008,6:30-33.
HUANG Chengzao, LI Baomu, LIU Zejia, et al. Influences of Structural Parameters of Deck Pavement System on Pavement Layer Stress of Steel Box Girder[J]. Bridge Construction, 2008, 6:30-33.
- [9] 黄成造,刘泽佳,汤立群,等.基于钢箱梁结构改进的铺装层受力优化研究[J].公路,2010,7:9-13.
HUANG Chengzao, LIU Zejia, TANG Liqun, et al. Optimization of Stress States in Pavement Based on Structural Improvement of Steel Box Girder [J]. HIGHWAY, 2010, 7:9-13.
- [10] 林光平,黄卫,方么生,等.基于BP神经网络的正交异性钢桥面系多目标结构优化设计[J].公路交通科技,2005,22(5):83-86.
LIN Guangping, HUANG Wei, FANG Mesheng, et al. Multi Objective Optimum Design of the Paving System on the Orthotropic Steel Bridge Deck by the BP Neural Network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(5):83-86.
- [11] 明图章,胡光伟,黄卫.大跨径钢桥面铺装体系多目标优化设计[J].土木工程学报,2007,40(2):70-73.
MING Tuzhang, HU Guangwei, HUANG Wei. Multiple-objective optimum design of pavement system for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2):70-73.
- [12] 邓强民,倪富健,顾兴宇,等.大跨钢桥桥面铺装有限元分析合理简化模型[J].交通运输工程学报,2008,8(2):53-58.
DENG Qiangmin, NI Fujian, GU Xingyu, et al. Rational simplified model of finite element analysis for deck pavement of long-span steel bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2):53-58.
- [13] 冯伟林,倪富健,邓强民.子模型法在大跨钢桥面铺装有限元模型优化中的应用[J].公路交通科技,2008,25(7):90-94.
FENG Weilin, NI Fujian, DENG Qiangmin. Application of Submodel Method of FE Model Optimization for Long span Steel Bridge Deck Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7):90-94.
- [14] 张德佳,叶奋.基于实桥加载的钢桥面铺装数值模型优化[J].公路交通科技,2013,30(7):103-106.
ZHANG Dejia, YE Fen. Optimization of Numerical Model of Steel Deck Pavement Based on Practical Bridge Loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(7):103-106.
- [15] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General Specification for Design of Highway Bridge and Culverts: JTG D60-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

- China Architecture and Building Press, 1989, 3.
- [6] 申茂盛,冯丹.秦汉帝王陵门阙建筑比较研究[J].秦始皇帝陵博物院,2015(00):119-135.
- SHEN Maoshen. A comparative study of imperial mausoleum buildings in Qin and Han Dynasties[J]. Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Museum, 2015(00):119-135.
- [7] 李玉洁.先秦古都城门的装饰建筑研究—以阙与象魏为视角[J].中原文物,2016(1):49-53.
- LI Yujie. Research on the decorative architecture of the ancient capital gate of pre-Qin dynasty-under the vision of gate tower and palace door [J]. Cultural Relics of Central China,2016(1):49-53.
- [8] 中国科学院自然科学史研究所.中国古代建筑技术史[M].北京:科学出版社,1985,5.
- The institute for the history of natural sciences, Chinese academy of sciences. History of Architectural Technology in Ancient China [M]. Beijing: Science Press, 1985, 5.
- [9] 清华大学建筑系.中国建筑史论文选辑 1[M].北京:清华大学出版社,1983.10
- Department of architecture, Tsinghua University. Selected papers on Chinese architecture history 1 [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1983.10.
- [10] 赵海洲,张广军.汉代陵墓前的阙门及其起源探讨[J].平顶山学院学报,2015,20(6):56-59.
- ZHAO Haichou, ZHANG Guangjun. The doors and palaces in Front of the Mausoleum of Han Dynasty and Its Origin [J]. Journal of Pingdingshan University, 2015,20(6): 56-59.
- [11] 杨光壹.中国汉阙建筑艺术及其影响研究[J].山西建筑,2016,42(1):21-23.
- YANG Guangyi. Research on Chinese Hanque architectural art and its influence[J]. Shanxi Architecture, 2016,42(1): 21-23.
- [12] 韩建华.汉代宅第阙的类型及相关问题[J].四川文物,2008(4):83-89.
- HAN Jianhua. The types and related problems of houses in Han Dynasty[J]. Sichuan Cultural Relics,2008 (4):83-89.
- [13] 张善庆.河西石窟阙形龕溯源刍议[J].考古与文物,2012(3):68-73.
- ZHANG Shanqing. Hexi Grottoes discuss the origin of the Que-shaped niches[J]. Archaeological and Cultural Relics, 2012(3): 68-73.
- [14] 李允铎.华夏意匠[M].天津:天津大学出版社,2005.
- LI Yunhe. Chinese craftsman [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [15] 刘敦桢.中国古代建筑史[M].北京:中国建筑工业出版社,1980.
- LIU Dunzhen. History of ancient Chinese architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1980.

(编辑 吴海西)

(上接第 849 页)

- [16] 贾超,张凯,张强勇,等.基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J].岩土力学,2014,35(6):1718-1726.
- JIA Chao, ZHANG Kai, ZHANG Qiangyong, et al. Research on multi-factor optimization of underground laminated salt rock storage group based on orthogonal experimental design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(6):1718-1726.
- [17] 付宏渊,刘建华,张立,等.基于正交试验的岩质边坡动力稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(9):2853-2859.
- FU Hongyuan, LIU Jianhua, ZHANG Li, et al. Dynamic stability analysis for rock slope based on orthogonal test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(9): 2853-2859.
- [18] 程兵,于兰峰,吴永明,等.基于响应面法的地坑式架车机轻量化研究[J].工程设计学报,2016,23(6):607-611.
- CHENG Bing, YU Lanfeng, WU Yongming, et al. Research on lightweight design of underfloor lifting system based on response surface method [J]. Chinese Journal of Engineering Design,2016,23(6):607-611.

(编辑 吴海西)