# 超低损耗孔助光纤弯曲性能优化设计

佘雨来,周德俭\*,陈小勇

(桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004)

摘 要:建立了弯曲光纤的二维轴对称有限元分析模型,对初始光纤弯曲性能进行了有限元分析,分别计算其弯曲损耗,有效模场面积和连接损耗;选取芯层到下陷层距离 b,下陷层宽度 c,下陷层深度  $\Delta t$ ,空气孔孔径 r 为设计变量,以弯曲损耗和连接损耗最小为目标,利用正交试验和灰度关联分析相结合的方法对光纤弯曲性能进行了多因素多目标优化设计。研究结果表明:优化后光纤弯曲损耗从0.127 8 dB/m 减小到 1.749 8×10<sup>-4</sup> dB/m;有效模场面积从 94.741  $\mu$ m² 减小到 82.37  $\mu$ m²;连接损耗由0.174 3 dB 减小到 5.805×10<sup>-4</sup> dB。与标准单模光纤对比发现,新型光纤在弯曲半径为 3 mm 的情况下,有效模场面积从 209.21  $\mu$ m² 减小到 82.3  $\mu$ m²,连接损耗从 7.535 8 dB 减小到 5.805×10<sup>-4</sup> dB,大大地降低了光纤的连接损耗。新型光纤在小半径弯曲情况下,也能保证系统的传输质量。

关键词:光纤光学; 光纤弯曲性能; 灰度关联分析法; 弯曲损耗; 连接损耗

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0918006

# Optimization design of bending performance for ultralow loss hole assisted fiber

She Yulai, Zhou Dejian\*, Chen Xiaoyong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A two-dimensional axisymmetric finite element model for fiber bending was established. The fiber bending performance was analyzed by finite element method. The fiber bending loss, the effective mode field area and the splice loss were calculated respectively. The multi-objective orthogonal optimization was combined with gray relational analysis method in the design for fiber bending performance which was carried out taking the bending loss and splice loss as objective functions, taking the distance b from the core to the trench, the width of trench c, the depth of trench  $\Delta t$  and the radius of air holes r as design variables. The results show that the bending loss of optimized fiber decreases from 0.127~8~dB/m to  $1.749~8\times10^{-4}~\text{dB/m}$ , the effective mode field area of optimized fiber decreases from  $94.741~\mu\text{m}^2$  to  $82.37~\mu\text{m}^2$ , the splice loss of optimized fiber reduces from 0.174~3~dB to  $5.805\times10^{-4}~\text{dB}$ . Compared with the standard single-mode fiber, it is found that the effective mode area of the proposed fiber decreases from  $209.21~\mu\text{m}^2$  to  $82.3~\mu\text{m}^2$  with the bend radius of 3 mm and the splice

收稿日期:2019-04-11; 修订日期:2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(51765013); 广西自然科学基金(2017GXNSFBA198180); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室课题 (1725905004Z)

作者简介: 佘雨来(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电互联方面的研究。Email: 294281554@qq.com

导师简介:周德俭(1954-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事微电子产品制造技术方面的研究。Email: emezdj@guet.com

loss decreases from 7.535~8~dB to  $5.805 \times 10^{-4}~dB$ . The proposed fiber can also ensure the transmission quality of the system in the case of small bending radius.

**Key words:** optical fiber optics; fiber bending performance; gray relational analysis method; bending loss; splice loss

### 0 引 言

传统的电互联不仅易产生寄生电容、时间延迟、信号串扰等寄生效应,而且在弯曲时产生的损耗较大,严重制约了电子产品地延展性和柔韧性[1]。新兴的光互联技术能够很好的解决上述问题,具有潜在优势 [2]。光互联技术主要用光波导或光纤等传输介质来代替传统的铜导线,实现高信息传输。光波导制作工艺复杂,光衰减问题较为突出,很难兼容常规的印制电路板(PCB)制作工艺;而光纤具有较低的衰减性和较高的机械鲁棒性,能够兼容常规工艺,还能用于弯曲半径较小的地方,具有较低的弯曲损耗,保证传输质量。因此,光纤抗弯性能引起研究者的广泛关注。

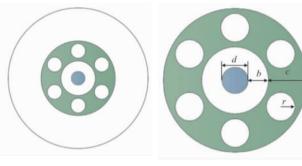
众所周知,光纤的弯曲性能主要由光纤弯曲损耗和有效模场面积(连接损耗)来决定。如何提高光纤的弯曲性能,国内外学者展开了研究。Marek Napierala 等<sup>[3]</sup>提出了双晶格结构光子晶体光纤,弯曲半径为 10 cm,光纤损耗小于 0.01 dB/m,但制作困难。Pramod R. Watekar 等<sup>[4]</sup>提出了双下陷层结构来降低光纤弯曲损耗。董繁龙等<sup>[5]</sup>研究了光纤弯曲对光纤输出光质量的影响。高峰等<sup>[6]</sup>详细阐述了弯曲波导的弯曲损耗和耦合机制。王艳红等<sup>[7]</sup>计算得到满足基模传输且不损耗能量的弯曲半径。张会新等<sup>[8]</sup>基于塑料光纤弯曲损耗和受抑制全内反原理,设计了液位传感器。北京交通大学设计多种抗弯光纤,但弯曲损耗性能提升不明显<sup>[9-10]</sup>。

为获得更小的弯曲损耗与连接损耗,文中提出一种新型超低弯曲损耗单模光纤。利用全矢量有限元数值模拟的方法对光纤的弯曲损耗,有效模场面积和连接损耗进行了有限元分析,在此基础上采用正交优化设计与灰度关联分析相结合的方法,对影响光纤弯曲性能的结构参数进行多因素多目标优化设计,从而为提高光纤弯曲性能提供一种有效的分析手段和相应的理论指导。

# 1 光纤结构弯曲性能有限元分析

#### 1.1 光纤结构

设计的超低弯曲损耗下陷层孔助光纤(THAF) 结构横截面如图 1 所示,中心为掺杂纤芯,直径为定值 D; 在光纤大包层中有一圈掺杂的低折射率包层(下陷层,绿色),芯层到下陷层距离为 b,宽度为 c,深度为  $\Delta t$ ,下陷层上有一圈空气孔,孔数为 6 个,其半径为 r,大包层直径为定值 125  $\mu$ m,包层折射率为 1.444,入射波长为 1.550 nm。



(a) 光纤结构图

(b) 光纤局部图

(a) Schematic of fiber structure (b) Partial schematic of fiber 图 1 设计的光纤截面结构示意图

Fig.1 Cross section schematic of the proposed fiber structure

## 1.2 初始光纤弯曲性能有限元分析

模型中结构如图 1 所示,参数尺寸分别为 D=9  $\mu$ m,b=7.5  $\mu$ m, $\Delta t$ =0.002,c=14  $\mu$ m,r=3  $\mu$ m。采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了二维轴对称有限元分析模型,分别计算光纤弯曲损耗[ $^{[11-13]}$ ],有效模场面积[ $^{[14-15]}$ 和连接损耗[ $^{[16]}$ ]。在计算连接损耗时,标准单模直光纤的有效模场面积为 83  $\mu$ m<sup>2[17]</sup>。

图 2 为入射波长为 1 550 nm,光纤弯曲损耗和有效模场面积随弯曲半径变化曲线。从图中可知随着弯曲半径的增加,弯曲损耗和有效模场面积均减小。当弯曲半径为 3 mm 时,由于弯曲半径较小,纤芯束缚光能较弱,大部分光能泄露到包层,导致损耗和有效模场面积的增大,此时光纤弯曲损耗为

6.81 dB/m,有效模场面积为327.06 μm²,连接损耗为14.814 3 dB;随着弯曲半径的增大,大多数光能能够被约束在纤芯,只有少部分能量泄漏到包层,损耗和有效模场面积都会减小,当弯曲半径为5 mm 时,弯曲损耗为0.1278 dB/m,有效模场面积为94.74 μm²,连接损耗为0.174 5 dB。

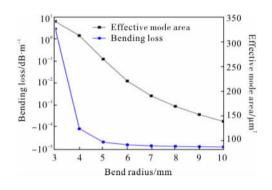


图 2 光纤弯曲损耗和有效模场面积随弯曲半径变化曲线 Fig.2 Bending loss and effective mode area as a function of R

# 2 光纤结构正交优化设计

#### 2.1 光纤的优化目标和设计变量的确定

光纤在使用过程中会不可避免地发生弯曲,导致弯曲损耗,模场面积增大,连接损耗增大。为了提高光纤的抗弯曲性能,降低连接损耗,对光纤结构参数进行多目标优化设计极为必要。因此,将弯曲损耗和连接损耗作为优化目标,选取光纤结构的四个参数作为设计变量,四个参数分别为芯层到下陷层距离为b,下陷层宽度为c,深度 $\Delta t$ ,空气孔孔径r。

#### 2.2 按正交试验方法确定优化设计方案

考虑到设计要求和制造工艺的可行性,设计变量是一系列离散可变的值,为了获得最优设计参数组合,势必需要进行大量的设计方案的对比分析,为了减少分析的次数,又能全面地获取影响性能参数的全部信息,文中引入正交试验法,对光纤结构进行优化设计,把光纤结构的多目标优化设计的四个设计变量作为正交试验的因素,并结合各变量值的允许变化范围,每个变量均选取四个水平值,安排如表1的四因素四水平正交表。

表 1 光纤结构参数因素水平表
Tab.1 Factors and levels of optical fiber structure

Land		Fac	etor	
Level	b/μm	$\Delta t$	c/µm	r/μm
1	2.5	0.001	12	2
2	5	0.002	14	3
3	7.5	0.003	16	4
4	10	0.004	18	5

根据正交试验设计的原理,采用 L16(4°)正交表安排正交试验,得出光纤结构参数因素水平正交矩阵如表 2 所示。表 2 中共有 16 组不同光纤结构参数组合,分别根据这 16 组结构参数按照文中第一节的方法建立 16 个二维有限元分析模型并进行相应的弯曲性能分析后得到设计变量和仿真试验的结果如表 2 所示。

表 2 光纤结构参数组合正交矩阵及有限元分析结果

Tab.2 Orthogonal array of fiber structure parameters and the results of finite element analysis

No.		Factor			Simulation experiment results		
110.	b/µm	$\Delta t$	c/µm	r/μm	Bending loss/dB⋅m <sup>-1</sup>	$A_{ m eff}/\mu{ m m}^2$	Splice loss/dB
1	2.5	0.001	12	2	0.091 6	81.574	0.003 0
2	2.5	0.002	14	3	0.004 46	77.871	0.040 7
3	2.5	0.003	16	4	1.554e-4	75.823	0.081 7
4	2.5	0.004	18	5	3.391e-6	74.382	0.1199
5	5.0	0.001	14	4	0.042 81	87.094	0.023 2
6	5.0	0.002	12	5	2.997e-4	81.763	0.002 3
7	5.0	0.003	18	2	0.005 663	84.751	0.004 4

续表 2 Continued Tab.2

NI-	Factor				Simulation experiment results		
No.	b/μm	$\Delta t$	c/µm	r/μm	Bending loss/dB⋅m <sup>-1</sup>	$A_{ m eff}/\mu{ m m}^2$	Splice loss/dB
8	5.0	0.004	16	3	1.982e-4	83.336	1.6e-4
9	7.5	0.001	16	5	0.2642	96.978	0.241 3
10	7.5	0.002	18	4	0.147 4	95.246	0.1888
11	7.5	0.003	12	2	0.015 7	91.714	0.099 5
12	7.5	0.004	14	3	0.001 0	90.313	0.071 2
13	10	0.001	18	3	8.752 2	194.254	6.497 3
14	10	0.002	16	2	1.771 1	127.725	1.803 1
15	10	0.003	14	5	0.0228	101.289	0.394 0
16	10	0.004	12	4	0.0049	99.327	0.3208

# 3 采用灰色关联获取最优解

正交优化设计只进行 16 次仿真试验,实际上却有 64 种参数组合,其余 48 种方案的指标信息是未知的,这就构成了一个既含有已知信息又含有不确定信息的灰色系统,因而难以获取最优参数组合。灰色关联分析方法[18]是灰色系统理论的重要组成部分,是分析灰色系统中各因素间关联程度的一种量化方法。可根据各因素间的发展趋势的相似或程度来衡量因素间关联度的方法,因此文中将采用灰色关联分析法来解决这种多目标优化设计问题以弥补正交试验设计法只能进行单一目标分析的缺陷。

#### 3.1 光纤弯曲性能正交优化设计的灰度关联分析

为了提高光纤的抗弯性能和连接性能,即弯曲 损耗与连接损耗越小越好,所以将权重系数设为  $\lambda_1$ = 0.6, $\lambda_2$ =0.4,计算可得 16 组实验方案的灰色关联度,如表 3 所示。为了确定最优的参数水平组合时,需要分析光纤各个参数的平均关联度。根据灰色关联分析方法,平均关联度越大,它所对应的优化目标越接近最优值。通过计算,各参数的平均关联度,如表 4 所示。由表 4 可知,光纤各影响因素的最佳设计尺寸为 b 为 5  $\mu$ m,c 为 12  $\mu$ m,r 为 4  $\mu$ m, $\Delta t$  为 0.004,即最优化参数水平组合为  $b_2c_1r_3\Delta t_4$ 。

表 3 目标函数的关联度
Tab.3 Relational degree of objective function

Number		Fac	etor		Relational		
Number	b/μm	$\Delta t$	c/µm	r/μm	degree		
1	2.5	0.001	12	2	0.987 351		
2	2.5	0.002	14	3	0.994 460		
3	2.5	0.003	16	4	0.990 185		
4	2.5	0.004	18	5	0.985 781		
5	5	0.001	14	4	0.991 371		
6	5	0.002	12	5	0.999 696		
7	5	0.003	18	2	0.998 704		
8	5	0.004	16	3	0.999 973		
9	7.5	0.001	16	5	0.938 194		
10	7.5	0.002	18	4	0.958 497		
11	7.5	0.003	12	2	0.985 985		
12	7.5	0.004	14	3	0.991 299		
13	10	0.001	18	3	0.333 333		
14	10	0.002	16	2	0.684 367		
15	10	0.003	14	5	0.953 642		
16	10	0.004	12	4	0.963 397		

表 4 设计变量对目标的平均关联度
Tab.4 Average relational degree of design
variables

b/μm	Relational degree	$\Delta t$	Relational degree
2.5	0.989 4	0.001	0.812 5
5	0.997 4	0.002	0.909 2
7.5	0.968 4	0.003	0.982 1
10	0.733 6	0.004	0.985 1
c/µm	Relational degree	r/μm	Relational degree
12	0.984 1	2	0.914 1
14	0.982 7	3	0.829 7
16	0.903 2	4	0.9758
18	0.819 1	5	0.9693

#### 3.2 优化结果分析

通过灰度关联得到了光纤弯曲损耗与连接损耗 的最优参数水平组合为 $b_2c_1r_3\Delta t_4$ 。为了验证该水平 的正确性,采用该参数水平组合对光纤重新建模并 再次对弯曲损耗,有效模场面积和连接损耗进行有 限元分析。图 3 为优化前后的弯曲损耗和有效模场 面积随弯曲半径变化的曲线图。从图中可知, 优化 后,光纤弯曲性能得到了很大的提高。由图可知,优 化前,半径从3mm增加到10mm,光纤弯曲损耗从 6.81 dB/m 减小到 1.87×10<sup>-4</sup> dB/m, 优化后弯曲损耗从 0.014 28 dB/m 减小到 6.527×10<sup>-6</sup> dB/m。光纤有效模 场面积从 327.06 μm² 迅速减小到 94.74 μm², 随着 弯曲半径的继续增加, 光纤有效模场面积基本保 持在 85 μm²。优化后, 当弯曲半径从 3 mm 增大到 6 mm, 有效模场面积从 86.87 μm² 减小到 81.87 μm², 随着弯曲半径的继续增加, 有效模场面积维持在 81.5 μm<sup>2</sup>。弯曲半径为 5 mm 时, 优化前后的弯曲损 耗分别为 0.127 8 dB/m 与 1.749 8×10<sup>-4</sup> dB/m, 弯曲 损耗值降低了四个数量级:有效模场面积分别为 94.741 µm² 与 82.37 µm², 有效模场面积减小 13.06%,连接损耗从 0.1743 dB 减小为 5.805×10<sup>-4</sup> dB。 优化后光纤的芯层与包层之间的折射率差增大,纤 芯约束光能的能力增强,大部分光能不能泄漏到包 层中,光纤的弯曲性能得到了极大的提升。

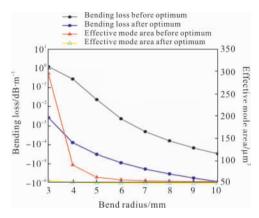
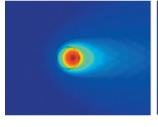
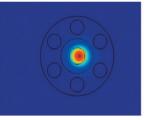


图 3 优化前后的弯曲损耗和有效模场面积随弯曲半径变化图 Fig.3 Bending loss and effective mode area before and after optimization as a function of R

图 4 为优化后光纤与标准单模光纤电场模和磁场 Phi 分量对比图。由图可知,优化后光纤纤芯的束缚光能的能力强于标准单模光纤。由于空气孔的存在,进一步增强了芯层与包层折射率差,限制了光能

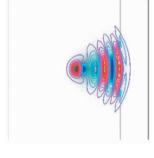


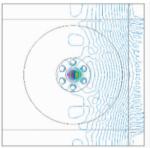


- (a) SMF-28 光纤模场分布
- (a) Mode field distribution of SMF-28

(b) THAF 光纤模场分布

(b) Mode field distribution of THAF





- (c) SMF-28 光纤 Phi 分量 磁场分布
- (d) THAF 光纤 Phi 分量 磁场分布
- (c) Magnetic field of Phi component of SMF-28
- (d) Magnetic field of Phi component of THAF

图 4 波长为 1 550 nm 弯曲半径为 3 mm,两种光纤的电场模和磁场 Phi 分量分布图

Fig. 4 Mode distribution of eloctric field and Phi component of magnetic field of fundamental mode as a function of  $R=3\,$  mm at wavelength 1 550 nm

向包层的辐射,减少了损耗。

表 5 为设计光纤与标准单模光纤的弯曲性能对比,由表 5 可知,与标准 SMF-28 光纤相比,弯曲损耗减小了四个数量级,极大地降低了光纤的弯曲损耗;标准单模光纤的有效模场面积为 209.21 μm²;连接损耗为 7.535 8 dB。优化后的抗弯光纤的有效模场面积为 82.3 μm²,连接损耗降低为 5.805×10<sup>-4</sup>dB,有效模场面积也得到了有效的控制。

表 5 两种光纤的弯曲性能 Tab.5 Bending performance of two types of fiber

Fiber type	Bending loss/dB⋅m <sup>-1</sup>	$A_{ m eff}/\mu{ m m}^2$	MFD/μm
SMF-28	21.54	209.21	16.31
Proposed fiber	2.13×10 <sup>-5</sup>	82.37	10.24

由此可见,将正交设计法和灰色关联分析法相结合进行多目标优化设计是切实可行的,为提高光纤弯曲性能提供了一种具有实用价值的理论设计方法。

# 4 结 论

通过对光纤的弯曲性能进行有限元分析并采用 灰度关联法对光纤参数进行优化设计,得到如下结 论:

- (1)有限元分析表明:光纤弯曲,光能不能被约束在纤芯,光能泄露到包层,导致能量损失。随着弯曲半径的增加,弯曲损耗,有效模场面积和连接损耗都会降低。优化后光纤的芯层与包层之间的折射率差增大,纤芯约束光能的能力增强,大部分光能不能泄漏到包层中导致光纤弯曲损耗降低幅度大。
- (2) 对光纤结构进行多因素多目标优化设计表明:在弯曲半径为 5 mm 时,优化后光纤弯曲损耗从 0.127 8 dB/m 减小到 1.749 8×10<sup>-4</sup> dB/m;有效模场面积由 94.741 μm² 减小到 82.37 μm², 有效模场面积减小 13.06%; 连接损耗由 0.174 3 dB 减小到 5.805×10<sup>-4</sup> dB。优化后与传统的 SMF-28 光纤相比,弯曲损耗减小了四个数量级,极大地降低了光纤的弯曲损耗;标准单模光纤的有效模场面积为 209 μm²;连接损耗为 7.535 8 dB。优化后的抗弯光纤的有效模场

面积为 82.3 μm²,连接损耗降低 5.805×10<sup>-4</sup> dB,有效 模场面积也得到了有效的控制,光纤的弯曲性能得到了极大地提升。

(3) 将正交设计法和灰色关联分析法相结合进行多目标优化设计是切实可行的,这为提高光纤弯曲性能提供了一种具有实用价值的理论设计方法。

#### 参考文献:

- [1] Tanaka K, Ide S, Tsunoda Y, et al. High-bandwidth optical interconnect technologies for next-generation server systems [J]. *IEEE Micro*, 2013, 33(1): 6-13.
- [2] Zhou Dejian, Cheng Lei. The domestic and international research situation of photoelectric interconnection technology [J]. Advanced Materials Research, 2013, 760-762: 383-387.
- [3] Napierala M, Nasilowski T, BeresPawlik E, et al.

  Large -mode -area photonic crystal fiber with double lattice constant structure and low bending loss [J].

  Optics Express, 2011, 19(23): 22628-22636.
- [4] Watekar P R, Ju S, Han W T. Single-mode optical fiber design with wide -band ultra -low bending -loss for FTTH application [J]. Optics Express, 2008, 16 (2): 1180-1185.
- [5] Dong Fanlong, Zhao Fangzhou, Ge Tingwu, et al. Fiber bending impacts on beam quality of Yb-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (11): 3565-3569. (in Chinese)
- [6] Gao Feng, Qin Li, Chen Yongyi, et al. Research progress of bent waveguide and its application [J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 176-193. (in Chinese)
- [7] Wang Yanhong, Wang Gao, Hao Xiaojian. Reducing bandwidth of sapphire crystal fiber gratings based on rejecting higher order mode method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3075–3078. (in Chinese)
- [8] Zhang Huixin, Feng Lishuang. Design of twisted-pair type of frustrated total internal reflection passive fiberoptic liquid level sense measurement system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1217001.
- [9] Jiang Youchao, Ren Guobin, Lian Yudongn, et al. Multilayer-core fiber with a large mode area and a low bending loss [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 41-45.
- [10] Lian Yudong, Ren Guobin, Jiang Youchao, et al.

- Ultralow bending -loss trench -assisted single -mode optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(3): 346-349.
- [11] Ma Shaoshuo, Ning Tigang, Li Jing, et al. Design and analysis of a modified segmented cladding fiber with large mode area [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 172-179.
- [12] Ma Shaoshuo, Ning Tigang, Li Pei, et al. Bend-resistant large mode area fiber with novel segmented cladding [J]. Optics Laser Technology, 2018, 98: 113-120.
- [13] Yan Dexian, Zhang Haiwei, Xu Degang, et al. Numerical study of compact terahertz gas laser based on photonic crystal fiber cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3373-3378.
- [14] Kabir S, Razzak S M A. An enhanced effective mode area fluorine doped octagonal photonic crystal fiber with extremely low loss [J]. *Photonics & Nanostructures*, 2018, 29: 1-6.

- [15] Kabir S, Razzak S M A. Bending resistive improved effective mode area fluorine doped quadrilateral shaped core photonic crystal fiber for high power fiber lasers [J]. Optik, 2018, 162: 206-213.
- [16] Xu Zhongnan, Duan Kailiang, Liu Zejin, et al. Numerical analyses of splice losses of photonic crystal fibers [J]. *Optics Communications*, 2009, 282 (23): 4527-4531.
- [17] Suzuki M, Tamura Y, Yamamoto Y, et al. Low-loss splice of large effective area fiber using fluorine-doped cladding standard effective area fiber [C]//Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. IEEE, 2017: M2F.4.
- [18] Xiong Guoji, Huang Chunyue, Liang Ying, et al.

  Optimization design for TSV interconnect structure based on orthogonal experimental and grey relational analysis under random vibration load [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(7): 22-26.