

文章编号: 1673-9469(2018)02-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.001

# 大跨空间结构阻尼布置的改进蚁群算法优化

胡多承, 黄真

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240)

**摘要:** 针对大跨空间结构减振控制中的优化问题, 对传统蚁群算法进行研究和改进, 提出引入解决阻尼器布置的最优位置与数量问题的思路与具体方法, 并通过典型网壳结构的模拟加载算例验证了蚁群优化算法的有效性。通过蚁群优化算法应用在空间网壳结构上的高效计算, 可以准确得到兼顾减振有效性与工程经济性的阻尼器布置最优方案。

**关键词:** 蚁群算法; 振动控制; 阻尼器; 空间结构; 优化

**中图分类号:** TU352

**文献标志码:** A

## Research on optimization of dampers layout in long-span spatial structures based on Ant Colony Optimization

HU Duo Cheng, HUANG Zhen

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The optimization problems of vibration control of long-span spatial structures are mainly studied. By studying and improving the classic ant colony optimization, this paper proposes the idea and the specific solution to introduce ant colony optimization into solving the optimal layout of dampers in long-span spatial structures, and the effectiveness is verified by the simulation results on typical reticulated shell structures. With the method of ant colony optimization applying on the spatial structures and effective calculation, the optimal layout of dampers which balance the effectiveness of vibration reduction and engineering economy can be obtained accurately.

**Key words:** ant colony optimization; vibration reduction; damper; spatial structure; optimization.

大跨空间结构拥有许多普通平面结构不能比拟的优势特性, 近年来随着几项盛会的举办, 国内掀起了一波大跨空间结构快速发展的热潮。大跨空间结构的结构特征<sup>[1-2]</sup>, 导致其在风振作用下响应剧烈<sup>[3-4]</sup>。安装阻尼器是目前普遍采用的一种有效的减振方法<sup>[5-6]</sup>, 但阻尼器的使用会带来工程成本的上升, 因此必须研究阻尼器布置的最优位置与最优数量问题。作为典型的离散型优化问题, 目前国内对阻尼器布置最优化问题已有一定的探索, 选用了一些计算机界常见的优化算法, 如遗传算法, 模拟退火算法, 神经网络算法等。但是在实际应用中, 这些算法给研究者造成的最大问题是, 其往往不能保证收敛的全局性, 即计算过程会早早陷入局部搜索, 即使收

敛也会位于此局部中, 难以得到全局最优解, 甚至次优解也会屏蔽真正的全局最优解, 给研究者带来了极大的额外工作量。越是大尺寸多构件的空间结构, 陷入局部最优的机率就越大, 这一问题就表现得越为突出严重。

蚁群算法是一种建立在全局性上的底层优化算法, 天然避免了上述的局部最优陷阱问题<sup>[7]</sup>。其算法内容较为复杂, 在针对实际问题时并行计算量大, 计算机性能对收敛速度影响很大, 因此长久以来受研究者重视不足。近年来随着计算机性能的普遍迅速提高, 这一算法在计算机界重新受到关注, 应用范围大大扩展。本文计划将蚁群优化算法引入大跨空间结构减振系统阻尼器布置的最优布置计算中,

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178265)

作者简介: 胡多承(1994-), 男, 安徽六安人, 硕士, 主要研究方向为结构振动控制与大跨空间结构。

通过算例分析发现,该组合算法可以较好解决空间结构的阻尼器位置寻优和数量寻优问题。

### 1 蚁群优化算法

蚁群优化算法(ACO)由 Marco Dorigo 于 1992 年提出,是基于蚂蚁群体觅食过程中沿最短路径行进的生物学行为发展起来的一类群智能优化概率性方法,具有鲁棒性强、易于与其他算法融合、全局优化等优点,已经成为解决复杂组合优化问题的有力的手段<sup>[8-10]</sup>。

蚁群算法对搜索空间的“了解”机制主要包含 3 个方面:蚂蚁的记忆、蚂蚁的集群活动和蚂蚁利用信息素相互通信。基本的 ACO 模型由下面三个公式描述<sup>[11]</sup>:

$$P_{ij}^k = \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta / \sum_{j \in \Lambda} \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(n+1) = \rho \times \tau_{ij}(n) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \frac{Q}{\sum L_k} \quad (3)$$

式中,  $m$  为蚂蚁个数;  $n$  为迭代次数;  $i$  为蚂蚁所在位置;  $j$  为蚂蚁可以到达的位置;  $\eta_{ij}$  为启发性的信息,这里为由  $i$  到  $j$  的路径的能见度,即  $\eta_{ij}=1/d_{ij}$ ;  $\Lambda$  为蚂蚁可以到达位置的集合;  $L_k$  为目标函数,这里是两点间的欧氏距离;  $\alpha$  为路径权;  $\beta$  为启发性信息的权;  $\tau_{ij}$  为由  $i$  到  $j$  的路径的信息素强度;  $\Delta \tau_{ij}^k$  为蚂蚁  $k$  由  $i$  到  $j$  的路径上留下的信息素数量;  $\rho$  为路径上

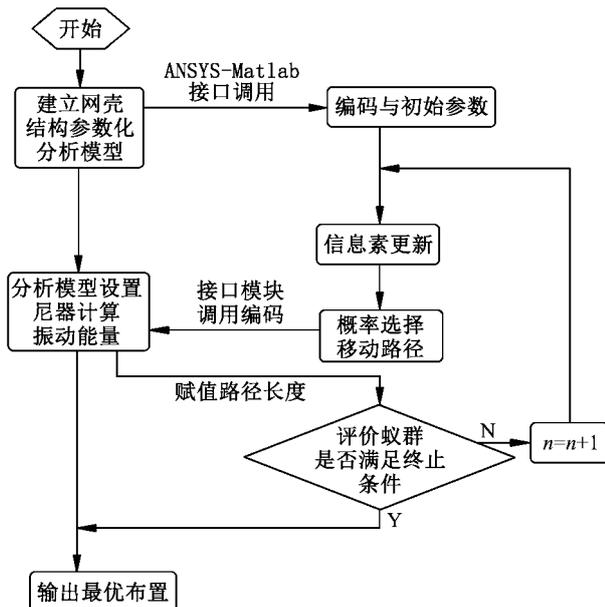


图 1 蚁群优化算法(ACO)分析流程图

Fig.1 The flow chart of ACO analysis

信息素的蒸发系数;  $Q$  为信息素质量系数;  $P_{ij}^k$  为蚂蚁  $k$  从位置  $i$  移动到位置  $j$  的转移概率。

本文所用蚁群优化算法的流程图如图 1。

实际情况中的空间结构往往是中心对称或轴对称的,因此可以采取特殊的编码策略以减少分析量。在实际编码中,结合空间结构杆件的对称性对全体杆件进行分组,对各组杆件采取同位同码的策略,可以大幅度压缩能量传递的同效杆件重复分析的计算量,也大大降低了优化算法陷入发散或局部最优的风险。

### 2 网壳结构模型算例分析

#### 2.1 蚁群优化算法寻求阻尼器最优布置的有效性

图 2 为一个作用对称载荷的 24 杆网壳结构模型。模型包裹球面半径为 5 m,结构矢高为 0.3 m,有径向和环向两种结构钢管,其截面尺寸分别为:径向钢管  $\Phi 300$  mm 壁厚 20 mm,环向钢管  $\Phi 200$  mm 壁厚 15 mm,钢管材料内部阻尼为 0,弹性模量为  $2 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,阻尼器的阻尼系数为 200 kN·s/m。对该网壳结构模型在网壳顶点处施加 5 000 N 的冲击荷载,方向竖直向下,使之做自由衰减振动。

蚁群算法的计算结果如表 1:

为了保证蚁群算法计算结果的正确性和可靠性,本文采用了穷举法计算阻尼器数量递增所对应的最

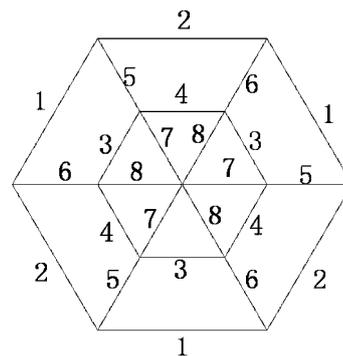


图 2 24 杆模型及分组编码示意

Fig.2 The schematic diagram of grouping coding of 24-bar model

表 1 算例一蚁群算法计算结果

Tab.1 The analysis results by ACO

阻尼器数量 $n$ / 根	最优解计算结果
6	00110000
9	10110000
12	11110000
15	11110000

优位置，结果如表 2：

由于施加载荷以及模型结构的对称性，在某些数量的阻尼器的最优解往往会有两个是对称的，这和钢管构件的分组方式有关，但最后的布置结果不受影响。

通过验证对比由穷举法得出的阻尼器最优位置布置，可以看出，在 24 杆模型上，通过蚁群优化算法得到的结构阻尼器最优位置布置方案是符合实际的，是与准确结果相一致的。更进一步地研究可以发现，在 96 杆模型、320 杆模型上，蚁群优化算法都可以得出阻尼器最优位置布置或包含阻尼器最优位置布置的解集合，这里不作赘述。

将蚁群优化算法的计算结果呈现在模型图上，在阻尼器数量  $n=6、9、12$  时，其阻尼器布置位置如下图 3 所示，其中粗线杆件为布置阻尼器的位置。

可以看出，在模型施加对称荷载情况下，阻尼器均布置在径向钢管位置上，并且根据  $N=15$  时的结果可知，只有在径向钢管全布置有阻尼器时，其他阻尼器才会布置在环向。由此可以说明，凯威特型网壳结构在振动能量传递的过程中，径向位置的

杆件所起的作用比环向位置杆件更重要。

### 2.2 阻尼器布置的最优数量问题

在大跨网壳结构中，由于中心节点加载所引起的激振振型与结构本身的基本振型极为接近，因此在同等总荷载值的情况下，中心节点加载所引起的能量响应要大于各种随机节点加载的能量响应。中心加载方式的结构位移、速度、加速度等动力反应最强烈，结构破坏的风险也最大。大跨网壳结构的消能减振应主要考虑更接近基本振型的中心加载方式<sup>[12]</sup>，因此本算例中只考察中心加载方式的结构激振响应。

图 4 建立某凯威特型球面网壳，其球面半径为 19 m，矢高 14.08 m，跨度 36.71 m，网壳矢跨比为 0.384，共 320 杆。杆件截面  $\phi 89 \times 4.5$ ，弹性模量取  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 。采用加载方式为中心节点加载：在网壳中心节点处，竖直向下施加 20 kN 的冲击荷载。阻尼器选用 MR 阻尼器，系数选定为 44 480 N·s/m，模型如图 4、图 5 所示。底部节点均为铰支座。

根据网壳结构的对称特性，所有 320 杆可以分

表 2 穷举法计算最优位置结果

Tab.2 The analysis results by the method of exhaustion

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
3 根	0	0	0	0	1	0	0	0
3 根	0	0	0	0	0	1	0	0
6 根	0	0	0	0	1	1	0	0
9 根	0	0	0	0	1	1	1	0
9 根	0	0	0	0	1	1	0	1
12 根	0	0	0	0	1	1	1	1
15 根	0	0	1	0	1	1	1	1
15 根	0	0	0	1	1	1	1	1
18 根	0	0	1	1	1	1	1	1
21 根	1	0	1	1	1	1	1	1
21 根	0	1	1	1	1	1	1	1

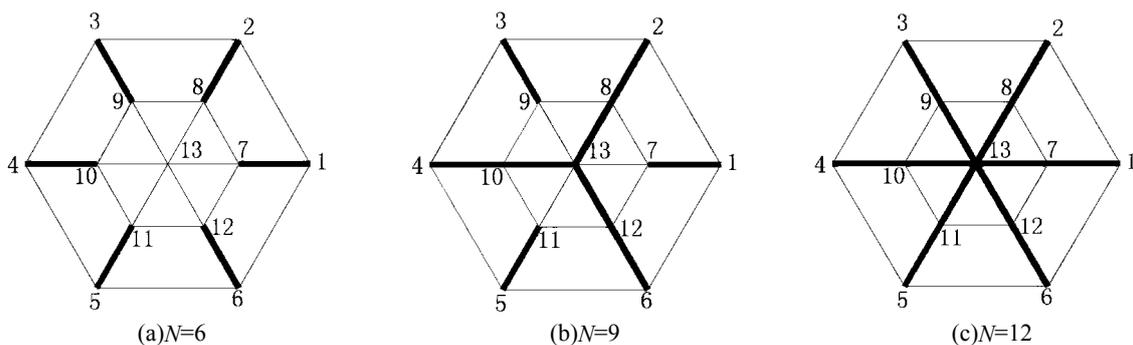


图 3 不同阻尼器数量下最优布置

Fig.3 The schematic diagram of optimal layout with various quantities of dampers

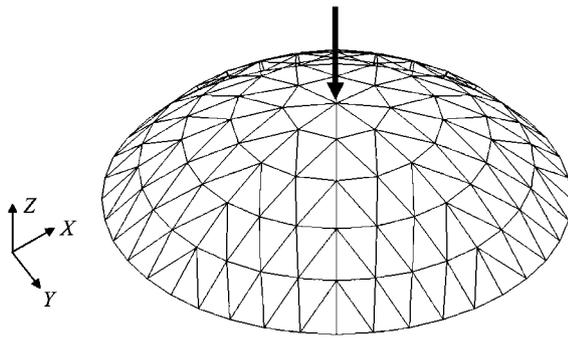
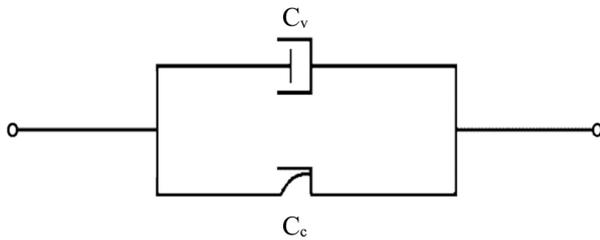
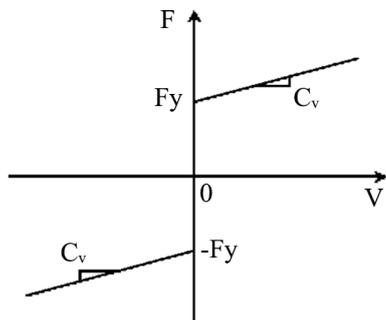


图4 模型与加载位置示意图

Fig.4 The schematic diagram of model and location of loading



(a) 阻尼器模型示意图



(b) 阻尼器 F-v 关系

图5 阻尼器粘塑性模型

Fig.5 The viscoplasticity model of dampers

为等效的8组,因此在增加阻尼器设置的数量时,以8个为一个步长,通过蚁群优化算法,分别计算各步的最优位置及其耗能效果,作为技术有效性指标。共得到41组响应能量数值,其中第1组为阻尼器数量  $N=0$  也即结构未设置阻尼器时的激振响应能量,第41组为阻尼器数量  $N=320$  也即机构所有杆件位置均设置阻尼器时的激振响应能量。表3为其中的部分计算结果。

使用的阻尼器数量实际上代表了工程成本,可以作为工程经济性指标。另一方面,以安装阻尼器后的耗能值作为技术有效性指标,考虑两个指标的增长情况,如图6。

从图6可以看出,320杆网壳中,在安装112个阻尼器时,减振系统的耗能值达到最大耗能值的92.77%;在安装152个阻尼器时,减振系统耗能值达到最大耗能值的97.22%。此两种布置已经具有了明显的减振抑制效果。如果要求耗能值再增长约3%

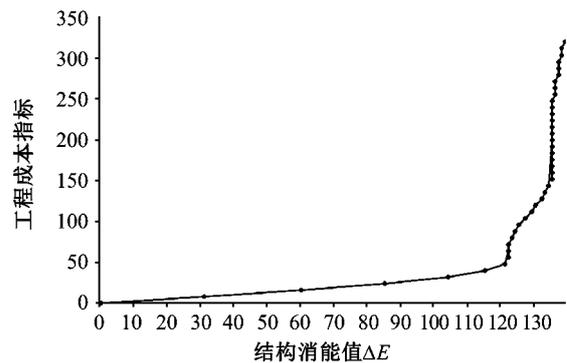


图6 工程成本与耗能值关系图

Fig.6 The chart of relationship between engineering cost and energy dissipation value

表3 阻尼器最优位置与激振能量部分计算结果

Tab.3 Part of the analysis results of optimal location of dampers and vibration energy

阻尼器数量 $N$	0	32	64
最优位置布置			
激振能量响应	158.972	54.510	36.511
阻尼器数量 $N$	144	176	320
最优位置布置			
激振能量响应	24.074	23.393	19.756

至最大消能值,此时工程成本会增长近110.53%,这显然是不符合工程设计的经济性要求的。总体来看,整个曲线的趋势在一点处(阻尼器数量 $N=52$ )出现了明显的变化,在此之前增加阻尼器数量可以有效提高减振效果,在此点之后继续增加阻尼器则并不能再有效提高消能值,此点记为消能特征点。320杆凯威克型网壳结构的消能特征点出现在阻尼器数量 $N=52$ 处。

进一步的研究显示,对于其他更小或更大规模的凯威克型网壳结构,其消能值与设置阻尼器数量的影响关系同样存在典型的消能特征点,且消能特征点的阻尼器数量均位于网壳结构总杆件数的25%~55%区间内。

### 3 结论

1) 蚁群优化算法可以完全避免落入局部最优陷阱,准确地找到问题的全局最优解。同时,其收敛速度表现相对于其他寻优算法,在小型简单结构中基本一致,在较大型结构中优势明显。

2) 凯威克型网壳的最优减振阻尼器数量应出现在总杆件数的25%~55%区间,此时可以达到技术有效性与工程经济性的平衡,这为其他算法的寻优结果筛选过程提供了可信的参考。

3) 当空间结构的结构振动接近基本振型时,结构的各项动力指标的反应均更为剧烈,破坏性更强。在阻尼器位置寻优的场景中蚁群优化算法给出的解说明了,为应对接近结构基本振型的结构振动,阻尼器的布置应优先考虑结构能量传递主要路径上的构件。另一方面,蚁群算法的解实际上揭示了大跨空间结构振动能量传递的路径,在应用传统方法计算极其繁杂的复杂空间结构中,这可能会提供一种分析结构力传递、能量传递的新思路。

### 参考文献:

- [1] 柯世堂,葛耀君,赵林,等.一致耦合方法的提出及其在大跨空间结构风振分析中的应用[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(11):4457-4463.
- [2] 韩庆华,陈越,曾沁敏,等.大跨度球面网壳结构德风振系数研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(1):38-45.
- [3] 周岱,舒新玲,周笠人.大跨空间结构风振响应及其计算与试验方法[J].振动与冲击,2002(4):7-12.
- [4] 张相庭.结构风压和风振计算[M].上海:同济大学出版社,1985.
- [5] 高超,曲激婷,姜峰.浅谈大跨度空间结构相关振动控制[J].防灾减灾工程学报,2010,30(Z1):226-230.
- [6] 贾斌,罗晓群,丁娟,等.粘滞阻尼器对空间桁架结构减震作用研究[J].振动与冲击,2014,33(6):124-130.
- [7] 姜坤霖,李美安,张宏伟.面向旅行商问题的蚁群算法改进[J].计算机应用,2015,35(Z2):114-117.
- [8] 孟祥萍,片兆宇,沈中玉,等.基于方向信息素协调的蚁群算法[J].控制与决策,2013,28(5):782-786.
- [9] Modifying Ant Colony Optimization. Sarayut Nonsiri, Siriporn Supratid[C]//2008 IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications (SMCia/08), 2008.
- [10] 杨洁,杨胜,曾庆光,等.基于信息素强度的蚁群算法[J].计算机应用,2009,29(3):865-867.
- [11] SHI W M, SHEN Q, KONG W, et al. QSAR analysis of tyrosine kinase inhibitor using modified ant colony optimization and multiple linear regression[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2007, 42(1): 81-86.
- [12] 帅虹.空间网格结构风振抑制的改进模拟退火算法研究[D].上海:上海交通大学,2008.

(责任编辑 王利君)

## 声 明

为适应我国信息化建设的需要、提高本刊的学术影响力、扩大作者知识信息交流渠道,本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据库等以数字化方式通过信息网络传播本刊全文。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。