

大型机械结构的分层动态优化方法*

秦仙蓉, 蔡敏, 廖鑫, 李永凤, 张氢, 孙远韬

(同济大学机械工程学院 上海, 200092)

摘要 针对大型机械结构动态优化设计维数高,同时涉及外形尺寸和截面尺寸两类变量,采用整体优化策略,存在收敛困难的问题,提出了采用分层优化结合子结构方法的机械结构动态优化策略。以有限元方法为基础,将外形尺寸和截面尺寸分离到两个相对独立的设计空间,从而将整体优化问题分解为整体层优化和局部层优化两个子优化问题。在整体层以整体结构动态特性最优为目标,完成对外形尺寸的优化;在局部层以子结构动态特性最优为目标,完成对截面尺寸的优化;两层优化交替进行直至问题最后收敛。某型大跨自动扶梯金属结构的动态优化工程实例表明,该方法优化效果良好且优化效率高。

关键词 分层优化; 子结构方法; 动态设计; 结构优化
中图分类号 O221.2

引言

机械结构不可避免地承受着各种动载荷,在传统机械设计过程中多采用拟静力法,通过动载系数来考虑动载荷的效应。从长期工程实践来看,该方法偏于安全,能够满足设计需要;但对非标机械以及新型轻柔机械,由于动载系数选取方法尚未在相关标准的覆盖范围,对其进行动态设计已是工程实际的迫切需求。

结构动态设计一般遵循3步策略:a.设计初始方案;b.动态建模与分析;c.动态优化设计。因机械结构外形复杂,构件众多,其动力学行为很难用解析函数来表征,故机械结构动态优化设计普遍需要借助工程数值分析方法(目前以有限元方法应用较为广泛),通过迭代求解完成。

机械结构优化设计中存在两类设计变量:外形尺寸变量与截面尺寸变量,分别对应于有限元法的节点信息和截面信息。若采用整体优化策略,同时对外形尺寸变量和截面尺寸变量进行优化,将出现数据量庞大、优化耗时长、收敛困难乃至不收敛的问题^[1]。解决思路是利用层次分解协调的策略对问题进行分层优化^[2]。

笔者以大型复杂机械结构为研究对象,采用分层优化结合子结构方法的策略,将整体动态优化问

题分解成两个(整体层和局部层)相对简单的、降维的子优化问题,以期改善问题的收敛性并提高计算效率。从某型大跨度自动扶梯的金属结构的动态优化设计结果及过程来看,该方法可以得到满意结果。

1 分层优化策略

基于有限元方法的大型复杂机械结构整体动态优化模型可以表示为

$$\begin{aligned} & \max: f(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}) \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: f 为结构的动力学特性,为优化的目标函数; $\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}$ 分别为结构有限元模型的节点信息和截面信息,为优化的设计变量; \mathbf{h} 和 \mathbf{g} 分别为优化的等式与不等式约束。

研究表明,结构的动力学特征对结构形状变化极为敏感,而结构动态特征本身的非线性度高,隐含性强,因此对结构动力学的优化尤其是大型机械结构体系的动力学整体优化难度很大^[3]。笔者利用分层优化策略,把节点信息和截面信息这两类变量分别置于两个相互分离的设计空间,优化过程也随之分两层:整体层和局部层。

在整体层,保持截面尺寸不变,以整体结构的外形尺寸作为优化变量,将影响有限元模型的节点位

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2009AA043000);国家自然科学基金资助项目(编号:50975207,51075304)

收稿日期:2011-07-24;修改稿收到日期:2011-09-22

置信息,通过搜索最优的节点变动,改善整体结构的动力学特征,为下一级的局部层优化提供最优的几何形状,相应的优化模型如下

$$\begin{aligned} \max : & f_{\text{Global}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}^*, \mathbf{X}_{\text{Area}}) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \mathbf{h}_{\text{Global}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}^*, \mathbf{X}_{\text{Area}}) = 0 \\ \mathbf{g}_{\text{Global}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}^*, \mathbf{X}_{\text{Area}}) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: f_{Global} , $\mathbf{h}_{\text{Global}}$ 和 $\mathbf{g}_{\text{Global}}$ 分别为整体层的目标函数、等式约束和不等式约束;上标 * 为该层的待优化设计变量。

在确定节点位置后,转入局部层优化。局部层优化的任务是以部件动态特性最优为目标,完成对单元截面属性的优化,即

$$\begin{aligned} \max : & f_{\text{Local}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}^*) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \mathbf{h}_{\text{Local}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}^*) = 0 \\ \mathbf{g}_{\text{Local}}(\mathbf{X}_{\text{Node}}, \mathbf{X}_{\text{Area}}^*) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: f_{Local} , $\mathbf{h}_{\text{Local}}$ 和 $\mathbf{g}_{\text{Local}}$ 分别为局部层的目标函数、等式约束和不等式约束。

整体层优化对应于结构设计中的总体设计,以整体动力学特性最优为目标,确定整体结构的总体布置参数,故约束函数全部来自设计要求对整体结构的各项限制。局部层优化以局部子结构的动力学特性最优为目标,确定结构的截面尺寸,局部层优化最关键的约束是不得劣化整体层的优化结果。可以看出,整体层优化是决策层,在分层优化中占主导地位。

将局部层获得的最优单元属性传递到整体层,继续对结构外形尺寸进行优化,两层优化交替进行直至最终收敛。分层优化策略及参数传递关系如图1所示。

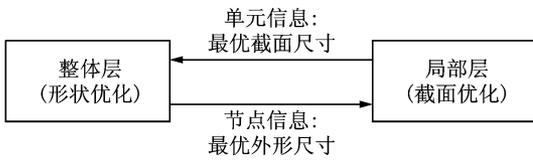


图1 分层优化策略

2 相关动力学建模

采用分层优化策略完成大型机械结构的动态优化设计需要解决两个问题:a. 将整体优化分解为整体层优化与局部层优化两个子优化问题;b. 层次间的协调,即如何保证某一子问题解的改善不致劣化另一子问题的解。其中的第1个问题即分解可以通过动力学中的经典动态子结构方法解决。

在整体层,以式(4)所描述的整体结构的动力学模型为基础来求解式(2)所示优化模型所涉及的目的

函数与约束函数

$$\mathbf{M}\ddot{\Delta} + \mathbf{K}\Delta = \mathbf{F} \quad (4)$$

其中: \mathbf{M} , \mathbf{K} 分别为结构的质量与刚度矩阵,由有限元方法得到,矩阵维数对应于整体结构的自由度总数; Δ , \mathbf{F} 分别为整体结构的位移响应与载荷向量。

在局部层,求解式(3)所示的优化模型中的目标函数和约束函数所依据的动力学模型可表示为类似于式(4)的形式,不过其中矩阵与向量的维数将对应于局部层所优化的子结构的自由度总数。局部层应优化哪些子结构、以哪些动力学特性为目标,应根据如下所述的子结构与整体结构动力学特性之间的关系确定。

不失一般性,假设整体结构系统由I,II两个子结构组成,则根据动态子结构方法,整体结构的动力学行为可统一表征为式(5)

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{T}^T [\overline{\mathbf{M}}^I & \\ & \overline{\mathbf{M}}^{II}] \mathbf{T} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_i^I \\ \dot{q}_i^{II} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{T}^T [\overline{\mathbf{K}}^I & \\ & \overline{\mathbf{K}}^{II}] \mathbf{T} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} q_i^I \\ q_i^{II} \end{Bmatrix} = 0 \quad (5)$$

其中: $\overline{\mathbf{M}}$, $\overline{\mathbf{K}}$ 为广义质量与广义刚度矩阵,与子结构的质量分布、刚度分布及其模态特征有关; \mathbf{T} 为转换矩阵,可由相关模态集及界面力确定,对不同子结构方法将有不同的表达式; q 为广义坐标,下标 i, j 分别为内部自由度和界面自由度。

式(5)表明,整体结构体系的动力学行为是各子结构动力学特征的隐式函数,为局部层目标函数的选择提供了依据。

3 工程实例

自动扶梯电梯广泛服役于各类公共建筑。人在乘坐自动扶梯时,振动将由梯级、扶手传递到人体。研究表明,人体对1~2 Hz 频段内的水平横向振动反应较为敏感^[4]。如果扶梯水平横向振动频率避开该频段,人体感受较为舒适。

自动扶梯的金属结构一般由首段、中段和尾段三部分组成,其中的中段由大量标准段拼接而成,如图2所示。

某型自动扶梯支撑距离超过45 m,提升高度高达20余米,因服役现场施工条件限制,不允许对其进行中部支撑。初步设计方案的第1阶固有振动为1.34 Hz 的水平横向振动,处于人体的敏感频段。为提高此扶梯的乘坐舒适性,必须对其进行动态优化^[5-6]。

对扶梯金属结构的各部件进行有限元建模。用空间梁单元模拟结构体系中的所有杆件,用质量单

元模拟张紧装置、驱动装置、控制柜等工作装置的集中质量,用修正单元密度的方式模拟梯级、导轨、扶手栏板、外装置和围裙等质量分布^[7]。

3.1 整体层优化

整体层优化以提高扶梯整体结构的第1阶水平振动频率为目标,优化整体结构的外形尺寸与标准段的个数。限于扶梯结构的安装条件,将标准段的个数 N 和断面高度 h (见图2)作为整体层的设计变量。整体层优化必须保证结构满足强度、刚度要求,且总质量不增加(不大于初始设计方案)。整体层的优化模型如式(6)所示

$$\begin{aligned} & \text{求} && N, H \\ & \text{使得} && f_{\text{Global}} = \omega_{1_Global} \rightarrow \max \\ & \text{s. t.} && W_{\text{Global}} \leq W_0 \quad u_{\max} \leq \bar{u} \quad \sigma_{\max} \leq \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (6)$$

其中: W_{Global}, W_0 分别为整体层优化方案与初始设计方案总重量; ω_{1_Global} 为整体结构第1阶水平横向振动频率; u_{\max} 为结构最大变形; \bar{u} 为许用刚度; σ_{\max} 为结构最大应力; $\bar{\sigma}$ 为许用应力。

3.2 局部层优化

灵敏度分析表明:单个标准段第1阶水平振动频率对整体结构第1阶水平振动频率的贡献最大,故局部层优化以提高单个标准段的第1阶水平振动频率为目标,优化标准段主要杆件的截面尺寸包括图2所示的弦杆、腹杆和中间桁架的截面尺寸等18个变量,具体包括:a.上、下弦杆的截面尺寸($S11, S12, S13$);b.两侧腹杆的截面尺寸($S31, S32, S33$);c.底层腹杆的截面尺寸($S41, S42, S43$);d.中间桁架的截面尺寸($S161, S162, S163$);e.上层直腹杆的截面尺寸($S201, S202, S203$);f.上层斜腹杆的截面尺寸($S231, S232, S233$)。

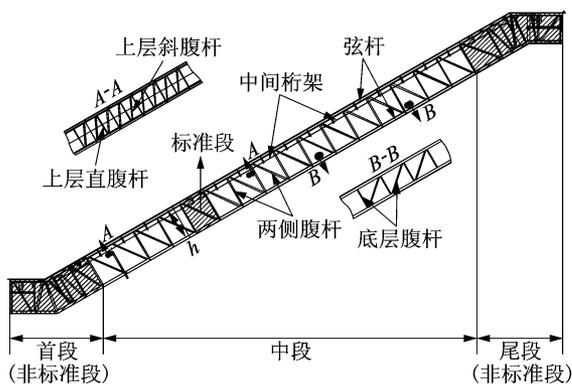


图2 某型大跨自动扶梯金属结构示意图

局部层优化中要求局部层优化后标准段的总质量 W_{Local} 不大于整体优化后的对应结果 \bar{W}_0 。式(7)给出了局部层的优化模型。

$$\begin{aligned} & \text{求} && x_k \quad (k = 1, 2, \dots, 18) \\ & \text{使得} && f_{\text{Local}} = \omega_{1_Local} \rightarrow \max \\ & \text{s. t.} && W_{\text{Local}} \leq \bar{W}_0 \end{aligned} \quad (7)$$

表1给出了该动态优化问题的主要信息。

表1 扶梯金属结构动态优化问题基本信息

| 名称 | 数值 |
|--------|--------|
| 模型单元数 | 1 673 |
| 模型自由度数 | 21 720 |
| 优化变量数 | 20 |
| 优化目标 | 频率最大 |

需要注意的是,在整体层与局部层的优化迭代中,可能出现水平刚度充分增大以至第1阶振型由水平振动转为竖向振动;因此,在每步迭代中均应进行振型匹配。

3.3 优化结果

1) 优化前扶梯整体金属结构的第1阶振动模态为水平弯曲,频率为1.34 Hz,处于人体敏感的频率范围内。经过分层优化1次层间迭代之后,整体结构的第1阶振动仍为水平弯曲,频率升至2.08 Hz,已避开人体的敏感频段,优化效果良好。

2) 整体层优化后,整体结构第1阶水平振动频率提高到1.72 Hz,经局部层18步优化迭代后(见图3),整体结构第1阶水平振动频率基本收敛,优化效率较高。

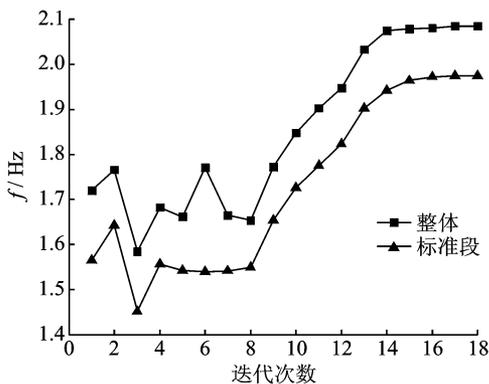


图3 局部层优化收敛曲线(变量数:18)

表2列举了所有优化变量的初值和优化值。其中 N 为标准段个数, h 为高度,其余18个变量为标准段桁架结构的截面尺寸。

表2 扶梯动态优化结果

| 变量 | 初值 | 优化值 |
|------|---------|---------|
| NUM | 16 | 12 |
| H | 2.375 | 2.003 |
| S11 | 0.200 | 0.259 |
| S12 | 0.200 | 0.299 |
| S13 | 0.010 | 0.008 |
| S31 | 0.100 | 0.044 |
| S32 | 0.100 | 0.095 |
| S33 | 0.050 | 0.006 |
| S41 | 0.100 | 0.095 |
| S42 | 0.060 | 0.109 |
| S43 | 0.005 | 0.004 5 |
| S161 | 0.043 | 0.077 |
| S162 | 0.080 | 0.069 |
| S163 | 0.005 | 0.004 8 |
| S201 | 0.075 | 0.055 |
| S202 | 0.050 | 0.036 |
| S203 | 0.006 | 0.006 |
| S231 | 0.040 | 0.062 |
| S232 | 0.063 | 0.068 |
| S233 | 0.004 8 | 0.007 |

4 结束语

针对大型复杂机械结构体系动态优化时出现维数高、模型无解析解和收敛困难甚至不收敛的情况,提出了以通用工程数值方法有限元方法为基础的分层优化结合子结构方法的优化策略。

将设计变量分为外形尺寸和截面尺寸两大类,分别对应于有限元方法的节点信息和截面信息,整体动态优化问题随之被分解为整体层和局部层两个子优化问题。在整体层以整体结构动力学行为最优为目标,优化结构的整体外形尺寸;在局部层以部件动力学特性最优为目标,优化局部部件的截面尺寸。对某型大跨扶梯金属结构的动力学优化表明,笔者提出的方法优化效果良好,收敛速度快,为大型复杂机械结构动态优化提供了一种可行思路。

参 考 文 献

[1] 隋允康,由衷. 具有两类变量的空间桁架分层优化方

法[J]. 计算结构力学及应用,1990,7(4):82-92.

Sui Yunkang, You Zhong. The dynamic hierarchical optimization method of space truss with two types of variables[J]. Computational Structural Mechanics and Application, 1990, 7(4):82-92. (in Chinese)

[2] Sobieski J. A liner decomposition method for large optimization problem-blueprint for development [R]. NASA TM-83248, 1982.

[3] 王栋,李晶. 空间桁架结构动力学形状优化设计[J]. 工程力学,2002,24(4):129-134.

Wang Dong, Li Jing. Shape optimization of space trusses subject to frequency constraints[J]. Engineering Mechanics, 2002, 24(4):129-134. (in Chinese)

[4] 方晓歆,朱昌明. 自动扶梯金属结构轻量化方法研究[J]. 机械强度,2008,30(3):433-436.

Fang Xiaomin, Zhu Changming. Research for the light-weight methods for the metal structure of escalator[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(3):433-436. (in Chinese)

[5] GB 16899—97 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范[S]. 北京:中国标准出版社,1997.

[6] 洪志育,谢明军,陈刚. 自动扶梯振动和噪声的测试和分析[J]. 振动与动态测试,1984(4):1-10.

Hong Zhiyu, Xie Mingjun, Chen Gang. Measurement and analysis of escalator vibration and noise[J]. Vibration and Dynamic Testing, 1984(4):1-10. (in Chinese)

[7] 朱昌明,洪志育,张惠侨. 电梯与自动扶梯[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007:308.

第一作者简介:秦仙蓉,女,1973年4月生,副教授、硕士生导师。主要研究方向为结构动力学与结构抗风。曾发表《Effect of frequency ratio on bridge aerodynamics determined by free-decay sectional model tests》(《Wind and Structures》2009, Vol. 12, No. 5)等论文。

E-mail: xianrongqin@hotmail.com