

外部超单元在民用飞机整机静力分析中的应用研究

Application of External Super-element in Whole Aircraft Structure Static Analysis

刘国方 / Liu Guofang

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

基于 MSC. NASTRAN 软件, 推导出超单元用于静力分析的理论基础, 提出外部超单元在民用飞机中的应用流程, 将吊挂结构做为外部超单元, 静力计算中, 通过与传统计算结果对比表明, 外部超单元与传统计算结果吻合程度较好, 且节省了约 97% 的计算时间和 93% 的存储空间。

关键词: 民用飞机; 有限元分析; 超单元

中图分类号: V216.1

文献标识码: A

[Abstract] Based on MSC. NASTRAN software, a theory of super-element used in structure static analysis is deduced. The application procedure of the external super-element in civil aircraft structure analysis is proposed. The external super-element technology is adopted to deal with the finite element model of a pylon. Compared results show that, in static analysis the calculation results of external super-element are relatively consistent with those of the traditional calculation. Furthermore, about 97% of the computing time and 93% of the memory space are saved.

[Key words] Civil Aircraft; Finite Element Analysis; Super-element

0 引言

在飞机全机有限元分析中, 由于模型规模大而存在计算时间长、求解效率低、计算结果占用较大规模的存储空间等问题; 在进行大规模有限元模型的多方案重复计算时, 上述问题更加突出。解决上述问题的主要方法, 其一是不断提高求解计算机的配置; 其二是使用各种加速计算, 在现有的计算资源前提下尽量提高计算效率, 优化存储空间。为解决复杂结构的求解问题, 在 20 世纪 60 年代, 学者 Hurty 提出了模态综合的思想^[1], 后经过 Craig 和 Bampton 的完善^[2], 模态综合法被逐步应用到工程计算中, 形成具有工程意义的子结构模态综合法。

基于 MSC. NASTRAN 软件, 本文推导出将超单元用于静力分析的理论基础, 提出了外部超单元在民用飞机中的应用流程, 将动力装置吊挂结构作为

外部超单元进行静力计算。通过与传统模型计算结果对比表明, 外部超单元方法在大规模有限元计算中计算时间和存储空间方面具有巨大优势。

1 MSC. NASTRAN 超单元静力分析基本原理

超单元 (Super-element) 分析可以被称为子结构法, 即根据用户需要, 将一个完整的有限元模型划分为不同的超单元, MSC. NASTRAN 求解器将单独分析各超单元。各超单元经过自由度凝聚后生成相关矩阵 (质量阵、刚度阵和载荷阵), 以此表征其与相邻结构连接的属性。所有超单元经过自由度凝聚处理后生成的矩阵与剩余结构组装, 并进行求解, 得到剩余结构及边界点的结果数据。

NASTRAN 求解时将模型信息处理为不同的集, 在所有 M 集 (多点约束集, 包括 MPC 和 RIGID

ELEMENTS)和S集(约束集,包括SPC和节点永久约束)处理后,节点剩余自由度集合被称为F集(无约束自由度集)。O集(剩余结构节点自由度)和A集(超单元分析中的装配集)是F集的子集^[3]。

线弹性结构静力学F集有限元方程是:

$$[K_{ff}]\{U_f\} = \{P_f\} \quad (1)$$

式中:

- [K_{ff}]表示结构总刚度矩阵;
- {U_f}表示结构待求位移矩阵;
- {P_f}表示结构外载荷向量。

将总刚度阵[K_{ff}]分为O集和A集,代入扩展后的式(1),得:

$$\begin{bmatrix} [K_{oo}] & [K_{oa}] \\ [K_{oa}]^T & [\bar{K}_{aa}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_o\} \\ \{U_a\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_o\} \\ \{\bar{P}_a\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中:

[K_{aa}]表示超单元缩减后A集刚度阵;

{P_a}表示超单元缩减后A集载荷阵。

A集包括Q集(模态集)、R集(支持集)及L集(剩余自由度集),静力分析时,不考虑Q集和R集,超单元剩余自由度集L集与A集等效,将式(2)改写为:

$$\begin{bmatrix} [K_{oo}] & [K_{ol}] \\ [K_{ol}]^T & [\bar{K}_{ll}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_o\} \\ \{U_l\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_o\} \\ \{\bar{P}_l\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

等式的上半部分:

$$[K_{oo}]\{U_o\} + [K_{ol}]\{U_l\} = \{P_o\} \quad (4)$$

等式两边都左乘[K_{oo}]⁻¹得到:

$$\{U_o\} = -[K_{oo}]^{-1}[K_{ol}]\{U_l\} + [K_{oo}]^{-1}\{P_o\} \quad (5)$$

为简化等式,定义边界转换矩阵[G_{ol}]:

$$[G_{ol}] = -[K_{oo}]^{-1}[K_{ol}] \quad (6)$$

剩余结构自由边界位移求解公式为:

$$\{U_o\}^{free} = [G_{ol}]\{U_l\} \quad (7)$$

超单元固定边界位移求解公式为:

$$\{U_o\}^{fix} = [K_{oo}]^{-1}\{P_o\} \quad (8)$$

改写后的位移阵公式为:

$$\{U_o\} = \{U_o\}^{free} + \{U_o\}^{fix} \quad (9)$$

式(3)下半部分为:

$$[K_{ol}]^T\{U_o\} + [\bar{K}_{ll}]\{U_l\} = \{\bar{P}_l\} \quad (10)$$

即:

$$[K_{ol}]^T\{[G_{ol}]\{U_l\} + [K_{oo}]^{-1}\{P_o\}\} + [\bar{K}_{ll}]\{U_l\} = \{\bar{P}_l\} \quad (11)$$

剩余结构刚度矩阵[K_{ll}]和载荷矩阵{P_l}分别为:

$$[K_{ll}] = [K_{ol}]^T[G_{ol}] + [\bar{K}_{ll}] \quad (12)$$

$$\{P_l\} = [G_{ol}]^T\{P_o\} + \{\bar{P}_l\} \quad (13)$$

由式[K_{ll}]{U_l} = {P_l}可得剩余结构位移阵{U_l}。

剩余结构刚度及载荷阵包括其它未被赋予超单元的模型阵和缩减后的各超单元阵。各超单元缩减后得到的缩减阵与剩余结构进行组装,组装后的总刚度阵[K_{gg}]为:

$$[K_{gg}] = [K_{jj}] + \sum [K_{aa}] \quad (14)$$

式中:

[K_{jj}]表示剩余结构不含超单元的刚度阵;

[K_{aa}]表示超单元缩减后的刚度阵。

求解后,得到剩余结构内力结果及各超单元的边界位移,这些边界位移用于后续各超单元内部求解。

2 MSC. NASTRAN 外部超单元静力分析流程

外部超单元的分析流程如图1所示。

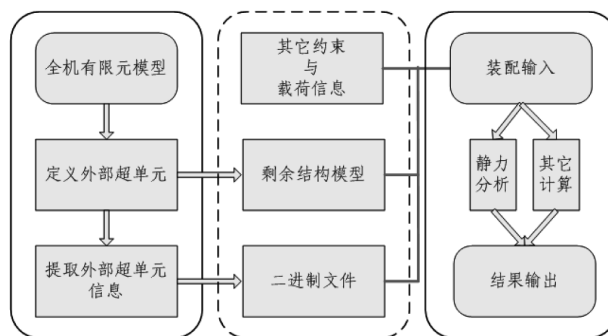


图1 外部超单元静力分析流程图

2.1 外部超单元生成

创建外部超单元包括定义求解序列、界面点及其自由度和超单元输出等,相关NASTRAN命令如表1所示。

表1 外部超单元的创建命令

名称	NASTRAN 命令	
求解序列	SOL 101	
界面点	ASET/ASET1	
超单元输出	EXTOUT	PARAM, EXTOUT, DMIGOP2
	ASSIGN	

(下转第62页)

选型程序。

(8) 输入《某型飞机地面支援设备清单》

将推荐的某型飞机三脚架千斤顶型号及其信息输入《某型飞机地面支援设备清单》,《某型飞机三脚架千斤顶选型报告》作为《某型飞机地面支援设备清单》阶段性评审的支持性文件。

5 结论

本文针对民用飞机通用地面支援设备选型,提出了目的、要求和程序。该程序以飞机地面支援设备需求分析为设计输入,以通过技术论证得出选型结论并编制选型报告为输出,选型结论输入地面支援设备清单以供航空公司/维修单位自行选择。

文中详细阐述了通用地面支援设备选型程序每一个步骤所做的工作及输出,并通过选型实例,

(上接第 47 页)

界面点在后续分析中用于与其他结构对接。参数 EXTOUT 位置设置在工况卡之前,用于控制超单元输出方式,当将参数 EXTOUT 设为 DMIGOP2 时,缩减后的刚度阵和载荷阵以 OUTPUT2 格式输出,输出标识用参数 EXTUNIT 定义。超单元中边界点编号与剩余结构边界点编号一致时,这种存储格式能使之与分析模型自动关联。超单元刚度及载荷阵可通过 ASSIGN 命令在文件管理部分(FMS)定义输出文件格式。

2.2 模型组装

模型装配是指将外部超单元与剩余结构或超单元之间连接的过程。将超单元与剩余结构组装,需要使用 ASSIGN 命令在提交计算文件中引用超单元缩减矩阵文件,并使用 SEBULK 定义引用外部超单元。

3 外部超单元在民用飞机整机中的应用

对民用飞机整机进行分析时,将吊挂作为子结构,通过外部超单元法与飞机机翼结构相连。凝聚处理后的模型规模显著降低,有效减少了系统级力学分析所需要的时间。此外,使用外部超单元的模型在保留原模型力学特性的同时,屏蔽了吊挂本身的结构设计信息,有利于对吊挂信息的保护。

为防止因为计算机配置不同而引起计算结果的差别,本文所有计算均使用相同配置的计算机,

证明了该程序的可行性和有效性。民用飞机通用地面支援设备选型及程序可进一步规范越来越重要的通用地面支援设备选型工作,与飞机总体、结构、系统等各个专业紧密联系在一起,一方面,通过通用地面支援设备选型,保障飞机的维修安全性、出勤可靠度和运营经济性;另一方面,通过通用地面支援设备选型,降低航空公司地面支援设备的采购成本以及地面支援设备的维护保养成本。

参考文献:

- [1] 吴正勇. 飞机设计手册第 21 册:产品综合保障[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [2] 陈付生,徐庆宏. 民用飞机客户服务入门[M]. 北京:航空工业出版社,2006.

计算同一种载荷情况,使用 NASTRAN 101 求解器,经比较,外部超单元与传统模型位移计算结果基本一致。外部超单元与传统模型求解机时及存储空间对比见表 2,由表 2 可知,在全机分析时,吊挂作为超单元后,可节省约 97% 的计算机时,减少约 93% 的存储空间。

表 2 外部超单元与传统模型内力计算所用资源对比

计算方法	计算时间	存储空间
外部超单元	63s	76MB
传统计算	2 263s	1.05GB

4 结论

超单元的应用能够有效减少整机模型的自由度数,进而提高分析效率。基于 MSC. NASTRAN 软件,本文提出外部超单元在民用飞机中的应用流程,结合某型飞机,将吊挂结构做为外部超单元,通过与传统计算静力计算结果对比表明,外部超单元与传统计算结果吻合程度较好,且节省了约 97% 的计算时间和 93% 的存储空间。

参考文献:

- [1] Hurty W C. Dynamic analysis of structural systems using component modes[J]. AIAA Journal, 1965, 3(4): 678-685.
- [2] Craig RR, Bampton M. Coupling of substructures for dynamics analysis[J]. AIAA Journal, 1968, 6(7): 1313-1317.
- [3] MSC. Nastran 2010, Superelement User's Guide[M]. MSC Corporation, 2010.