

组合近似重分析方法的 ANSYS 二次开发

孙睿珩¹, 徐涛^{2,3}, 张昊³, 吕岗³, 邱冰³

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130022; 3. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:将 C++ 强大的字符操作能力和 MATLAB 方便的矩阵处理功能结合起来, 采用混合编程的方法开发了一个重分析模块, 将精确高效的组合近似算法应用到 ANSYS 软件中, 扩展了该软件在快速重分析方面的能力, 实现了二次开发, 为处理大型结构的重分析问题提供了强有力的工具。

关键词: 计算机应用; 组合近似法; ANSYS; 二次开发; 混合编程; 结构重分析

中图分类号: TP31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)Sup. 2-0396-05

Secondary development of ANSYS of combined approximations method

SUN Rui-heng¹, XU Tao^{2,3}, ZHANG Hao³, LÜ Gang³, QIU Bing³

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The advantage of hybrid programming of C++ and MATLAB is both the powerful function of character operating in C++ language and the convenience of matrix treatment in MATLAB. As the result, the mix-language programming is applied in structure reanalysis using combined approximations method. It is efficient and convenient to reanalyze the structure by running the application in ANSYS, thus the secondary development of ANSYS is achieved. At the same time, it provides a powerful approach to reanalyze large-scale structures.

Key words: computer application; combined approximations method; ANSYS; secondary development; hybrid programming; structure reanalysis

在结构优化设计中, 求解一系列大规模线性方程组通常需要很大的计算量^[1], 这一问题促进了针对结构重分析方法的研究。到目前为止, 所研究出的各种近似方法可分为以下三类: 全局近似法、局部近似法、组合近似法 (Combined Approximations Method, 即 CA 法)。其中, 组合近似法是将局部近似法的高效率与全局近似法的

高质量相结合的有效求解方法, 该算法的求解过程是基于一次精确单点分析的结果, 所以同样适用于对结构进行大规模修改的重分析问题。实施该算法所需要的 CPU 使用量远远小于完整分析修正模型所需的使用量^[2-3]。近年来, 组合近似法在结构重分析领域取得了长足发展, 无论是静力问题、非线性动力问题、还是拓扑优化问题, 采用

收稿日期: 2009-02-19.

基金项目: 吉林大学“985”平台资助项目.

作者简介: 孙睿珩(1978-), 男, 博士研究生. 研究方向: 计算机应用技术. E-mail: sdd1102@163.com

通信作者: 徐涛(1955-), 女, 教授, 博士生导师. 研究方向: 计算力学, 结构优化, 图像处理. E-mail: xutao@jlu.edu.cn

组合近似法进行重分析,都能够得到较精确的结果。但工程应用中常用商业软件(如 ANSYS)进行设计计算,所以如何将这种高效精确的 CA 算法与 ANSYS 结合,提升 ANSYS 的计算效率,就成为了工程应用所要面临的问题。考虑到 CA 算法以矩阵运算为主,因此可以利用 MATLAB 语言方便的矩阵处理能力开发一个重分析模块,并且在 ANSYS 中调用该模块,从而实现 ANSYS 的二次开发。

但是对于大规模工程结构而言,当重分析模块与 ANSYS 软件进行数据交换时,其速度之慢往往令人难以忍受。为了建立快速的数据传输通道,本文在编写重分析主程序的同时,利用 C++ 强大的字符操作能力开发了能够加速数据交换的接口程序,进而搭建出 ANSYS 软件与重分析主程序之间的桥梁,有效实现了组合近似算法在商业软件(ANSYS)中的应用,为 ANSYS 添加了新的实用的算法工具。

1 组合近似法简介及其计算流程

1.1 求解静力问题的组合近似法

当载荷不发生变化时,修改后结构的有限元方程通常可表示为

$$(\mathbf{K}_0 + \Delta\mathbf{K})\mathbf{r} = \mathbf{R} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_0 、 \mathbf{R} 分别为原结构的刚度阵和载荷向量, $\Delta\mathbf{K}$ 、 \mathbf{r} 为修改后的刚度阵增量和结构的位移向量。

组合近似法中假定修正设计中的位移向量可以通过 s 个线性无关向量来线性逼近^[4],且 s 比结构自由度的个数小很多。根据这一假设,位移向量可以近似表达成

$$\mathbf{r} = y_1 \mathbf{r}_1 + y_2 \mathbf{r}_2 + \dots + y_s \mathbf{r}_s = \mathbf{r}_B \mathbf{y} \quad (2)$$

这里

$$\mathbf{r}_B = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_s\} \quad (3)$$

$$\mathbf{y}^T = \{y_1, y_2, \dots, y_s\} \quad (4)$$

式中: \mathbf{r}_i 是用来逼近修正后结构位移的基向量; y_i 是待求的系数。

将式(2)代入修改后的静力方程式(1)中,令 $\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \Delta\mathbf{K}$,并且两边同时左乘 \mathbf{r}_B^T ,得

$$\mathbf{r}_B^T \mathbf{K} \mathbf{r}_B \mathbf{y} = \mathbf{r}_B^T \mathbf{R} \quad (5)$$

记 $\mathbf{K}_R = \mathbf{r}_B^T \mathbf{K} \mathbf{r}_B$, $\mathbf{R}_R = \mathbf{r}_B^T \mathbf{R}$ (6)

则(5)为

$$\mathbf{K}_R \mathbf{y} = \mathbf{R}_R \quad (7)$$

这样,近似位移向量可以通过求解方程组(7)

得到。由于 s 远远小于结构自由度的数目,所以求解 $s \times s$ 阶方程组(7)大大减少了计算量,节省了计算时间。最终的位移向量由式(2)求出。

问题的关键在于求出基向量 \mathbf{r}_B ,组合近似法采用二项式级数作为基向量^[4],事实证明这种方法具有适用性强、精确、高效、便于执行等优点。通常,方程(1)可以写成如下所示的一种迭代格式^[4]

$$\mathbf{K}_0 \mathbf{r}^{(k+1)} = \mathbf{R} - \Delta\mathbf{K} \mathbf{r}^{(k)} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{r}^{(k+1)}$ 是第 k 次迭代之后的结果。在式(8)中,令 $\mathbf{B} = \mathbf{K}_0^{-1} \Delta\mathbf{K}$,并给定初始值为 $\mathbf{r}^{(1)} = \mathbf{r}_0 = \mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{R}$,得到

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^{(2)} &= \mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{R} - \mathbf{K}_0^{-1} \Delta\mathbf{K} \mathbf{r}^{(1)} = \\ &\mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{R} - \mathbf{B} \mathbf{r}^{(1)} = \\ &\mathbf{r}_0 - \mathbf{B} \mathbf{r}^{(1)} \\ \mathbf{r}^{(3)} &= \mathbf{r}_0 - \mathbf{B} \mathbf{r}^{(2)} = \\ &\mathbf{r}_0 - \mathbf{B}(\mathbf{r}_0 - \mathbf{B} \mathbf{r}^{(1)}) = \\ &\mathbf{r}_0 - \mathbf{B} \mathbf{r}_0 + \mathbf{B}^2 \mathbf{r}^{(1)} \\ &\vdots \end{aligned}$$

以此类推,可得到

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^{(1)} - \mathbf{B} \mathbf{r}^{(1)} + \mathbf{B}^2 \mathbf{r}^{(1)} - \dots + \mathbf{B}^{s-1} \mathbf{r}^{(1)} \quad (9)$$

则取基向量为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}^{(1)} = \mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{R} \\ \mathbf{r}_2 = -\mathbf{B} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_3 = -\mathbf{B} \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{r}_s = -\mathbf{B} \mathbf{r}_{s-1} \end{cases}$$

即

$$\mathbf{r}_i = -\mathbf{B} \mathbf{r}_{i-1} (i = 2, 3, \dots, s) \quad (10)$$

1.2 用 CA 法计算位移的程序流程

对于修改后的刚度阵 \mathbf{K} ,载荷向量 \mathbf{R} ,运用 CA 法求解结构修改后的位移 \mathbf{r} 的步骤如下:

(1)根据文献[4],可以选取 \mathbf{K} 的对角阵(记作 \mathbf{K}_d)作为 \mathbf{K}_0 ;

(2)计算基向量 $\mathbf{r}_B = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_s)$;

1)令 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_0 = (\mathbf{K}_d)^{-1} \mathbf{R}$

2)用式(10)循环计算 \mathbf{r}_i ,即 $\mathbf{r}_i = -\mathbf{B} \mathbf{r}_{i-1}$

(3)根据式(6)计算出 \mathbf{K}_R 和 \mathbf{R}_R ;

(4)求解线性方程组(7);

(5)按照式(2)求出修改后的位移 \mathbf{r} 。

2 系数矩阵的预处理方法

为了提高线性方程组(7)的计算稳定性,采用适当的预处理方法是必要的。通常使用预条件算

法来进行处理,降低系数矩阵的谱条件数。在进行预条件处理时可以使用左预条件子矩阵 M 使式(7)变成下述良态且易于求解的形式

$$MK_R y = MR_R \quad (11)$$

然后求解式(11),其中 M 的选择要使得 MK_R 近似等于单位矩阵,此时矩阵 MK_R 满足

$$Cond(MK_R)_2 \rightarrow 1 \quad (12)$$

式(12)表示 MK_R 的谱条件数趋近于 1。

根据代数约化 Jordan 标准型理论,存在可逆矩阵 U 成立

$$K_R U = U J \quad (13)$$

式中: J 为 K_R 的 Jordan 标准型,即

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & & & \\ & J_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & J_r \end{bmatrix}, r \leq s \quad (14)$$

式中: s 为矩阵 K_R 的阶数, r 为 Jordan 块的个数,且

$$J_i = \begin{bmatrix} \lambda_i & 1 & & \\ & \lambda_i & \ddots & \\ & & \ddots & 1 \\ & & & \lambda_i \end{bmatrix}_{s_i \times s_i}, \sum_{i=1}^r s_i = s \quad (15)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_r$ 为 K_R 矩阵的不重复特征值。不妨假设

$$|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_3| \leq \dots \leq |\lambda_r|, r \leq s$$

根据文献[5]中的广义模态理论,特征问题(13)的伴随问题为

$$V^H K_R = J V^H \quad (16)$$

式中: V, U 分别为矩阵 K_R 的左、右特征矩阵, V^H 为 V 的共轭转置矩阵,满足广义正交条件

$$V^H U = E \quad (17)$$

$$V^H K_R U = J \quad (18)$$

式中: E 为单位矩阵。

为将原系统(7)的系数矩阵 K_R 的模最小特征值变大,选定待改善的前 k 个特征值^[6],根据文中假设,为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$,对取定的 k ,将 V 按矩阵列分块为 $V = [V_k V_{n-k}]$ 。其中, V_k 为 V 的前 k 列, V_{n-k} 为 V 的后 $n-k$ 列。记

$$K_c = V_k^H K_R V_k, M_c = V_k K_c^{-1} V_k^H$$

因此,取改进的预条件因子 $M = M_c$ 。

3 应用程序的实现及其部署

应用组合近似法进行结构重分析的程序流程如图 1 所示。

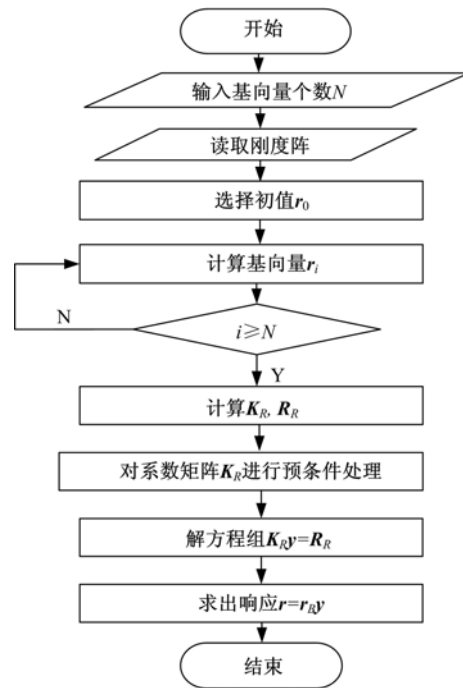


图 1 重分析模块的程序流程图

Fig.1 The flow chart of the application

3.1 Harwell-Boeing 格式刚度阵的读取

如图 1 所示,应用组合近似法进行重分析的前提是得到原模型的刚度阵、载荷向量以及修改后的模型的刚度阵。ANSYS 软件为我们提供了存储刚度阵和载荷向量的二进制文件(扩展名为 full),并且可以用/AUX2 过程中的 HBMAT 命令将其转换成 Harwell-Boeing 格式的文本文件。

根据该文件格式,我们就可以编写通用程序实现对刚度阵的读取。例如,用 MATLAB 语句

```
Xpointr = fscanf(Xstiffness_read, '% d', XPRTCRD);
```

可以将列指针数据存储在数组 Xpointr 中,其中参数 XPRTCRD 为列指针的总行数。以此类推,就能够将行索引数据和矩阵元素数据分别存储在数组 Xrowind 和 Xvalues 中,再通过 C++ 接口程序调用这些参数,根据相应的索引号读取矩阵。之所以用 C++ 程序,是因为还原矩阵的操作需要大量使用循环语句,而 MATLAB 在这方面的运算速度非常慢^[7]。

3.2 MATLAB 与 C++ 混合编程的实现

MATLAB 与 C/C++ 语言的接口可以通过将 C++ 代码写入 MEX 文件的方法实现,而 MEX 文件可以通过编译 C/C++ 源文件来产生,这就给用户提供了一种在 MATLAB 中使用其他编程语言的途径。

MEX 文件与 MATLAB 进行数据交换的接口函数为 `void mexFunction(int nlhs, mxArray * plhs[], int nrhs, const mxArray * prhs[])`, 参数 `nlhs` 和 `plhs[]` 分别为输出参数个数和输出数据, 与 MATLAB 函数的左侧参数对应, `nrhs` 和 `prhs[]` 分别为输入参数个数和输入数据, 与 MATLAB 函数的右侧参数对应^[7]。

MEX 文件的编写包括以下三个部分: ①以 C\C++ 语言编写的函数完成主要工作; ②编写接口函数 `mexFunction`, 完成 MATLAB 与 C\C++ 程序的数据交换。将①、②两部分作为 C\C++ 源文件。③在 MATLAB 中将源文件编译成 MEX 文件, 等待主程序的调用。

下面以读取修改后结构刚度阵的函数 `genstiffnew` 为例, 说明程序的实现过程。如 3.1 节所示, 已经用 MATLAB 命令读取了列指针 (`Xpointr`)、行索引 (`Xrowind`)、矩阵元素数据 (`Xvalues`) 以及矩阵的行数 (`XNROW`) 和列数 (`XNCOL`) 这些参数, 在 MATLAB 中希望 `Xs2=genstiffnew (Xpointr, Xrowind, Xvalues, XNROW, XNCOL)`; 命令将新结构的刚度阵赋给变量 `Xs2`。

首先, 要编写 `genstiffnew.cpp` 文件。`genstiffnew` 函数共有 5 个参数, 根据接口函数 `mexFunction` 的定义, 可知 `nlhs==1`, `plhs[0]==Xs2`, `nrhs==5`, `prhs[0]==Xpointr`, `prhs[1]==Xrowind`..., 依次类推就能够得到五个参数和变量 `Xs2` 的地址, 进而根据 Harwell-Boeing 格式编写 C++ 函数读取矩阵。然后, 将 `genstiffnew.cpp` 文件在 MATLAB 中编译成 `genstiffnew.dll`, 即 MEX 文件。这样在主程序中就可以直接调用 `genstiffnew` 函数了。

数据读取完毕后, 用 MATLAB 语言编写 CA 算法, 计算出修改后的结构的位移。

3.3 程序的编译及调用

使用 MATLAB 编译器可以将 M 文件编译成独立于 MATLAB 运行的可执行应用程序。如本文的主程序 `CAMethod.m` 通过编译生成 `CAMethod.exe`。调用方式与 M 文件相似, 即

`camethod 参数 1 参数 2`

其中, 参数 1 为组合近似法中线性无关的基向量个数 (`s`), 参数 2 为计算预处理因子 `M` 时, 待改善的特征值个数 (`k`), 对于小修改, `k` 可取为 0, 对于中等规模的修改量, `k` 取 1 就可以得到满意的结果, 对于较大的修改, 可以将 `k` 取 2, 通常考虑到

计算成本 `k` 尽量不取大于 5^[6]。

经过编译之后, 当用户需要在 ANSYS 中进行重分析的时候, 就可以用 APDL 命令 `/SYP` 调用 `CAMethod.exe` 程序^[8]。

4 算例

通过 APDL 参数化设计语言调用外部程序 `CAMethod.exe` 进行重分析, 模型如图 2 所示。

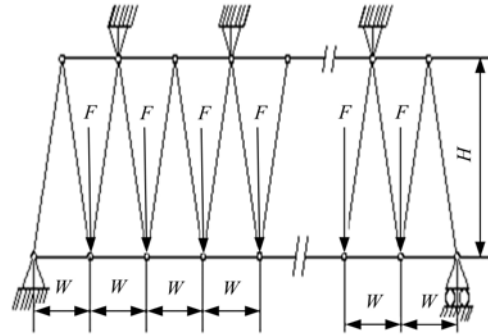


图 2 平面桁架结构模型

Fig. 2 Model of plane trusses

该桁架结构共有 100 321 个节点, 杆的杨氏模量 $E=200$ GPa, 原截面直径为 40 mm, 修改后为 80 mm。在 ANSYS 中对模型进行修改, 执行 `SOLVE` 命令之前, 先执行命令 `WRFULL`, 该命令通知 ANSYS 在组装刚度阵之后就停止计算 (我们只需要得到修改后的模型刚度阵, 求解的过程交给重分析模块完成), 最后, 将刚度阵导出到 `stiff.txt`。

在 ANSYS 中输入命令

`/SYP,CAMETHOD,17,2`

调用重分析模块 `CAMethod.exe`, 参数 17 为组合近似法中线性无关的基向量个数 (`s`), 2 为计算预处理因子 `M` 时, 待改善的特征值个数 (`k`), 用户可以根据模型的大小和精度要求进行调整。执行该命令之后, ANSYS Output Window 就会打印出字符串 “SYSTEM=camethod 17 2”, 说明该程序正在运行。然后根据提示分别输入修改后的结构刚度阵文件以及要输出的结果文件, 如图 3 所示。

重分析程序执行完毕之后, 会在 ANSYS 工作目录下建立文件 `r.txt`, 该文件保存了计算结果。经过对比分析 (表 1、表 2) 可以看出应用 `CAMethod.exe` 重分析模块在保证较高质量计算精度的前提下, CPU 时间降低了 39.3%。

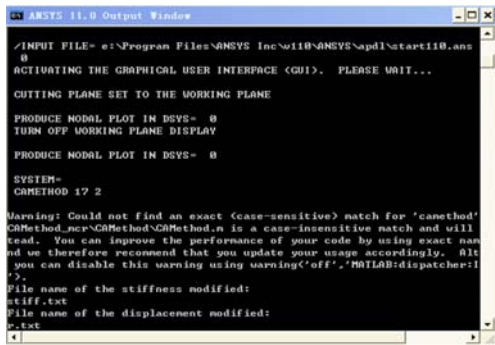


图 3 重分析模块的使用

Fig. 3 An example of the reanalysis module

表 1 计算结果对比

Table 1 Comparison of the results

| 节点号 | X | | Y | |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | ANSYS 计算结果 | 重分析模块 计算结果 | ANSYS 计算结果 | 重分析模块 计算结果 |
| 100309 | -0.16967 | -0.169531 | -1.4153 | -1.415187 |
| 100310 | -0.008757 | -0.009019 | -1.4880 | -1.486843 |
| 100311 | 0.090844 | 0.091424 | -1.4103 | -1.408604 |
| 100313 | -0.24528 | -0.245226 | -1.3975 | -1.396682 |
| 100314 | -0.035357 | -0.034986 | -1.4371 | -1.436177 |
| 100315 | -0.072992 | -0.073092 | -1.3771 | -1.378342 |
| 100317 | -0.55055 | -0.550813 | -2.1436 | -2.144503 |
| 100318 | -0.31291 | -0.312196 | -2.7689 | -2.771045 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

表 2 CPU 时间对比

Table 2 Comparison of the CPU time

| | 直接用 ANSYS 计算 | 应用重分析模块计算 |
|----------|--------------|-----------|
| CPU 时间/s | 28.5469 | 17.3281 |

5 结束语

通过在 ANSYS 中调用 MATLAB/C++ 编写的外部程序,方便而有效的应用组合近似法对模型进行了重分析。CAMethod.exe 模块以数据文件为接口,将 C++ 强大的字符操作能力和 MATLAB 方便的矩阵处理功能结合起来,实现

了对 ANSYS 软件的二次开发,扩展了 ANSYS 在重分析方面的能力。同时,也为除组合近似法(CA 法)以外的重分析算法在 ANSYS 中的应用提供了参考。

参考文献:

[1] 吕振华. 结构动力修改重分析方法的发展[J]. 计算结构力学及其应用, 1994, 11(1): 85.
Lü Zhen-hua. Development of reanalysis methods for structural dynamics modifications[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1994, 11(1): 85.

[2] Kirsch U. Approximate vibration reanalysis of structures[J]. AIAA Journal, 2003, 41(3): 504-511.

[3] Kirsch U, Bogomolni M. Procedures for approximate eigenproblem reanalysis of structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 60: 1969-1986.

[4] Kirsch U. Combined approximations: a general reanalysis approach for structural optimization [J]. Struct Multidisc Optim, 2000, 20: 97-106.

[5] Xu Tao, Chen Su-huan, Liu Zhong-sheng. Perturbation sensitivity of generalized modes of defective systems[J]. Comp and Sturct, 1994, 52(2): 179-185.

[6] 程飞. 复杂结构优化重分析算法及车身结构优化设计的研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2008.
Cheng Fei. Research on complex structures optimum reanalysis algorithm and structure optimization in autobody[D]. Changchun: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2008.

[7] 董维国. 深入浅出 MATLAB7. X 混合编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[8] 张俊峰, 郝际平, 邢海东, 等. 基于数据文件的 ANSYS 二次开发[J]. 钢结构, 2007, 22(6): 86.
Zhang Jun-feng, Hao Ji-ping, Xing Hai-dong, et al. Secondary development of ANSYS basing on output data files[J]. Steel Construction, 2007, 22(6): 86.