

幕墙自平衡体系结构有限分析计算软件的研究^{*}

蔡 铭¹, 姜清海², 郭金基³, 张开成², 曾云程², 崔传芹², 杨欢军²

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510275;

2. 中山盛兴幕墙有限公司, 广东 中山 528412;

3. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 阐述幕墙自平衡体系结构有限分析计算软件的研究。分析自平衡体系结构的分类和计算模型, 给出了软件的实现方案。该软件以有限分析法为理论依据, 采用 Microsoft Visual C++ 实现软件, 实验及算例表明, 软件的计算结果精确有效, 而且操作简单, 运算速度快。

关键词: 自平衡体系结构; 有限分析法; 计算软件 BFACS; 实验

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 05-0024-04

玻璃幕墙建筑具有视线通透、简洁明快、立面性强等特点, 而且减轻了建筑的自重。它将建筑美感与结构功能有机地融为一体, 因而在近年来发展迅猛^[1], 深受建筑设计者喜爱。幕墙支撑结构常用的有钢刚架、钢索桁架、钢索结构及自平衡体系结构等, 其中自平衡体系结构由平衡钢杆、支撑杆和钢索组合而成, 是现代大型建筑、高层建筑楼宇玻璃幕支撑结构设计的常用选择, 其主要特点是由平衡杆来承受钢索拉力, 从而避免了钢索拉力对建筑结构可能造成的破坏。

玻璃幕墙支撑结构的计算, 常用的有代梁法^[2]和结构力学静力计算方法^[3], 这两者都将平衡方程建立在变形前的几何位置上, 由于钢索在受力后会呈现很强的非线性, 这样的做法带来较大的误差。针对这种情况, 姜清海等考虑钢索受力变形后的几何位置, 用有限分析法^[4,5]成功地得到索变形后的张力和位移, 并编制了相应的软件系统 FACSS。然而这个软件系统是以钢索结构为研究对象, 其模型较为简单, 并不能应用到复杂的自平衡体系结构。所以本文建立自平衡体系结构的两大类计算模型, 采用有限分析法以 Microsoft Visual C++ 语言编制了幕墙自平衡体系结构有限分析计算软件 (BFACS), 再根据工程实例设计实验对该软件进行验证。

1 软件的计算模型

如图 1 所示, 自平衡体系结构模型由平衡钢杆、与钢爪联接的支撑杆以及钢索组成, 其中 AB

为平衡杆, $C_i D_i$ 为支撑杆, $AD_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 B$ 为钢索。若以平衡杆为基准, 结构的几何形状是对称的, 称为自平衡体系对称结构, 如图 1 (a) 所示, 对称结构有抵抗正负风压的两根钢索; 相反称为非对称结构, 如图 1 (b) 所示, 非对称结构只有一根钢索。结构受水平荷载 P_i 和垂直荷载 G_i 的作用, 荷载作用点的间距可以不等。水平荷载由风荷载 P_i 和地震荷载组合而成, 垂直荷载由幕墙自重通过支撑杆传递而成, 依照《建筑结构荷载规范》GB50009-2001 的规定, 软件对这两种荷载的设计值及标准值自动进行计算^[6]。由于平衡杆、支撑杆与钢索组合的刚度较大, 不能忽略它们对变形和内力的影响, 其组合结构的理论计算模型与纯钢索结构的计算模型不同。在 P_i 及 G_i 的作用下, 自平衡索 (杆) 桁架结构产生拉伸与弯曲变形, 由于 P_i 相对 G_i 要大好多, 自平衡索 (杆) 结构以弯曲变形为主, 以此计算结构的位移, 而钢索的张力则由弯曲应力及来计算。

对上述计算模型, 可以写出自平衡体系结构受力变形后的平衡方程和位移的变系数微分方程, 应力与应变关系以及边界条件。根据自平衡结构的形状、受力情况和计算精度的要求, 将结构分成有限段单元体来寻求位移和内力的解析解, 再由单元体联结点的位移和内力的连续条件转化为全局数值解。这种将自平衡体系结构局部解析解转化为全局数值解的有限分析 (FA) 计算方法, 与有限元

* 收稿日期: 2004-02-24

基金项目: 广东省中山科技计划项目 (2003A129)

作者简介: 蔡铭 (1977 年生), 男, 讲师, 博士; 通讯联系人: 郭金基; E-mail: cmtry@163.net

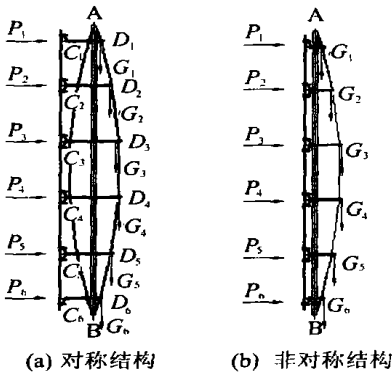


图 1 自平衡体系结构示意图

Fig. 1 The sketch of self-balance structure

(FE)、有限差分 (FD) 法不同，其精度相当高^[7]，而且形成有限分析法的代数方程组的过程易于规格化，具有较强的适用性。有限分析法一般用于解决热传导问题，国内外将其应用于固体力学^[8]的还很少，本文针对自平衡体系结构的计算模型，将有限分析法推广应用到四阶微分方程，计算技术上有重要的创新。

根据自平衡体系结构有限分析计算理论和自平衡结构的形状建立对称结构和非对称结构两大类的计算模型。

若自平衡体系结构是对称的，其主形心位置在平衡杆上，可以选取过主形心的直角坐标，建立受力变形后弯曲挠度与拉伸位移的变系数微分方程和平衡方程，精确求解十分困难。本项目采用有限分析法寻求数值解，建立如下 3 个计算模块：

(1) 在简化计算中结合实验，优化选择算出结构的变形刚度（几何特征量），选取有限段单元体将弯曲挠度和拉伸位移的变系数微分方程化为常系数微分方程寻求解析解，导出自平衡结构的位移和内力的表达式，按有限段结点的内力和位移的连续条件化为数值解，设计计算程序。这种算法称为整体算法，由此建立 Mode I ZPH—S 对称结构整体算法计算模块。

(2) 将自平衡体系结构分成有限段 (n 个) 单元体，把弯曲挠度和拉伸位移的变系数微分方程化为常系数微分方程，用初参数法求解。由起始段状态向量包含 2 个参数，通过 4×4 传递矩阵和荷载列阵相乘及中间单元体界面（结点）状态向量传递，到本段状态向量，再由末端状态向量及边界条件化为求解 2 个变元（参数）的代数方程。方程变元的系数可以达 $n \times 4 \times 4$ 项（例如有限单元体 n 取 100 时，便达 1 600 项）。求出 2 个始参数后，再循环递回单元体界面（结点）的状态向量求得每

一单元结点的位移和内力化为数值解，以此设计计算程序。由于 Microsoft Visual C++ 6.0 语言不具备矩阵运算功能，传递矩阵运算程序全靠自行编制，计算量很大（约比整体算法大 3 倍）；单元体的分割数目 n 随着计算精度要求而决定，计算精度较高。这种算法称为传递矩阵算法，以此建立 Mode I ZPH—CS 对称结构传递矩阵计算模块。

(3) 自平衡体系结构对称轴与垂直方向成一倾角，当承受风荷载与地震荷载的组合荷载作用时，必须投影到垂直于自平衡结构对称轴方向，再用传递矩阵算法设计计算程序。这种算法称为带倾角结构传递矩阵算法，以此建立 Mode I ZPH—QS 对称结构带倾角结构计算模块。

对于自平衡体系非对称结构，其主形心位置不在平衡杆上，而是连线为一条曲线，因而必须采用曲线坐标，受力变形后弯曲挠度的变系数微分方程必须选取过形心的主惯性而建立。由于结构非对称过主形心的惯性轴至两边的距离不等，因而弯拉伸及压缩应力不等，计算内力较对称结构较麻烦。这类结构多来用于屋面，自重荷载产生的拉伸位移常常可忽略，因而突出讨论弯曲挠度变系数微分方程，受力平衡方程及应力计算。类似于对称结构，采用有限分析法建立 3 个计算模块：① Mode II ZPH—D 非对称结构整体算法计算模块；② Mode II ZPH—CD 非对称结构传递矩阵计算模块；③ Mode II ZPH—QD 非对称结构带倾角结构计算模块。

这里顺便指出，以上对称（或非对称）结构整体算法 ZPH—S（ZPH—D）与传递矩阵算法 ZPH—CS（ZPH—CD）计算同一幕墙工程的位移和内力所得的结果是相容的，即基本一致。在相同的计算机（赛扬 366，128 MB）上，整体算法计算时间约 2 s，传递矩阵算法约 5~6 s，传递矩阵算法的计算精度比整体算法高 1%~3%。

2 软件设计及特点

根据有限分析法的理论推导，本文选择 Microsoft Visual C++ 6.0 语言作为开发工具，在 Windows 平台上进行自平衡体系结构有限分析计算软件 BFACS 的设计。C++ 语言作为此开发工具的内核，具有继承、多态、封装及易扩充等面向对象特性，已经被广泛应用并被证明是高效的程序开发语言。Microsoft Visual C++ 6.0 直接在 Windows 平台上进行开发设计，编制成功的程序也直接在

Windows 平台下运行。这种开发和运行的可视化特性, 既为程序设计节约了时间, 又方便了软件的操作使用。

整个软件的设计运行流程如下: ①前处理系统采用标准化图形界面, 方便录入各种基本参数; ②显示图形预览检查输入信息, 自动生成计算文件; ③内核程序根据计算文件进行数值运算; ④后处理系统分析结果, 输出工程完整报表和位移图; ⑤封装加密执行文件, 提交用户使用。

软件由主体程序和 6 个功能模块组成, 主体程序界面如图 2 (a) 所示, 点击选择要分析的自平衡结构类型, 便进入对应的功能模块。6 个功能模块分别对应于上节分析的对称与非对称 2 大类型的 6 种情况, 其界面如图 2 (b) 所示。模块的主视图是一个二行一列的分割窗口, 上部是图形显示区域, 前处理的预览和后处理的图形结果都在这个区域显示; 下部是数据的输入和控制区域, 由一些标准的窗口控件组成, 包括基本参数的编辑框、下拉框、表格, 和计算荷载、预览、总体计算的按钮。两个区域初始时各占主视图的一半, 可以通过它们之间的分割条任意调节两个区域的大小。

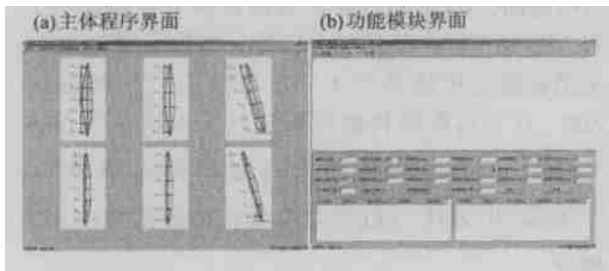


图 2 软件界面
Fig. 2 The interface of software

在数据输入界面填入结构与荷载的基本参数, 然后保存数据并进行计算, 结果首先会在图形区域显现出来。如图 3 (a) 所示, 蓝色的图表示变形前结构的形状, 红色的线表示在标准值荷载作用下钢索变形后的形状, 右下方指出了最大变形位置和大小。这时“查看”菜单里面的“报表”选项也由灰化变成亮化, 表示可以查看结果。如图 3 (b) 所示, 由程序自动产生的报表文件包括了所有的原始数据和计算结果, 用户可以直接在上面编辑、修改和打印。

BFACS 软件具有如下几个特点:

(1) 精确性。BFACS 采用有限分析 (FA) 法, 是一种将局部分析解和全局数值解相结合的方法, 得到的结果误差小, 精确性高。

(2) 可靠性。BFACS 在较低配置的计算机 (赛

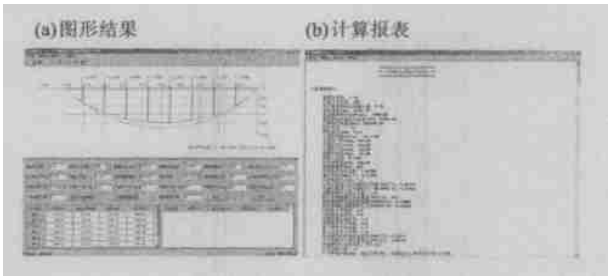


图 3 软件的计算结果
Fig. 3 The calculation result of software

扬 133, 64 MB) 上性能仍发挥稳定, 用户非法操作时有提示, 故障发生时容易重新运行, 可靠性良好。

(3) 易使用性。BFACS 是可视化软件, 学习简单; 采用标准窗口菜单、对话框的前处理图形化界面, 输入方便, 并自动生成计算文件; 后处理系统能画出整体的位移变形图, 自动生成明晰详细的报表文件, 操作简单。

(4) 可维护性。BFACS 的前处理系统能动态录入各种基本参数, 有预览功能, 修改方便; 自动生成的计算文件可以保存、重新载入、修改使用; 软件发生错误时, 有严密方便的调试系统; 采用面向对象设计程序, 有很强的继承、重载功能; 允许在不同软件环境上进行操作。

(5) 安全性。BFACS 采用面向对象的设计模式, 其封装性能和模块性能可以有效的保证数据的完整性、保密性和可信性; 用安装程序将各个模块的程序总体封装起来, 并用硬件加密, 使整个软件具有较高的安全性。

(6) 效率。BFACS 采用 Windows 的编程模式, 大部分的功能都通过调用 Windows 的底层函数来实现, 因而运算时间短, 在较低配置的计算机 (赛扬 366, 128 MB) 上, 计算速度不超过 6 秒。对内存、外存的使用较低, 效率很高。

(7) 可移植性。BFACS 软件的实现语言 C++ 在 Windows 操作平台上具有通用性, 适用于 Windows 9x/me、Windows2000/nt/xp 系统, 可移植性高。

3 实 例

为了检验 BFACS 软件的正确性, 中山盛兴幕墙有限公司委托中山大学工程力学测试有限公司对自平衡非对称结构进行实验测试, 结构跨度, 各支撑杆离端点距离为 800、1 600、2 500、3 400、4 200 mm, 相应的矢高为 235、336、400、335、235 mm, 平衡杆 $\phi 32 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$, 不锈钢杆 $\phi 30 \text{ mm}$

$\times 2.5\text{ mm}$ ，钢索 $\phi 6\text{ mm}$ ，杨氏模量为 $2.06 \times 10^5\text{ MPa}$ ，结构分五级荷载 $P = 98、196、294、392、490\text{ N}$ 作用。当 $P = 490\text{ N}$ 时，测量出的钢索两边张力均为 3.1 kN 、中点位移为 17.04 mm 。

同时，用专用软件 BFACS、通用软件 3D3S 和 ANSYS 对实验进行模拟计算，得到的钢索两边张力依次为 $3.074、4.7、4.155\text{ kN}$ ，得到的中点位移依次为 $17.13、9.7、9.78\text{ mm}$ 。也就是说，采用 BFACS、3D3S 和 ANSYS 计算钢索张力与实验对比误差依次为 $0.8\%、34\%、25.39\%$ ，计算结构中点挠度与实验对比误差依次为 $0.5\%、43\%、42.9\%$ ，可见 BFACS 的计算结果相当精确。分析其原因，造成差别主要有这两方面：一是有限分析法是半解析半数值方法，这种将局部分析解和全局数值解相结合的方法具有很好的数值逼近结果，其精度在理论上就较有限单元法高；二是对自平衡体系结构，有限单元法一般只能整体的以杆划分单元，而有限分析法则可以任意细分，对自平衡体系这种含有钢索的结构，分得越细精度越高。

4 结 论

BFACS 软件能很好解决工程中自平衡体系对称、非对称结构的强度和刚度计算。该软件采用有限分析法，结果与实验对比非常吻合，具有很高的计算精度。自平衡体系结构已应用于广州新白云国

际机场，中国网通宽带网络中心等多项点支玻璃幕墙工程，种类繁多，荷载复杂。本文用 Microsoft Visual C++ 编制的 BFACS 软件能适用各类结构，操作简单，运行快速，维护方便，在幕墙工程中具有重要的实用价值和广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 李明顺. 玻璃幕墙发展、国内现状与方向[J]. 工程质量, 1998(2): 22—25.
[2] 张芹. 玻璃金属板、石材、点式幕墙手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001: 274—277.
[3] 李耀庭. 点式玻璃幕墙的钢索杆结构内力分析和挠度计算[J]. 建筑结构, 2000, 30(12): 52—57.
[4] 姜清海, 宁松凯, 张开成, 等. 交叉式钢索结构的有限分析计算方法[J]. 机电工程技术, 2002, 31(6): 31—34.
[5] 姜清海, 郭金基, 宁松凯, 等. 钢索结构计算的有限分析法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2002, 41(5): 15—18.
[6] 姜清海, 张开成, 刘斌, 等. 玻璃幕墙承受空气动力荷载作用的计算软件[J]. 机床与液压, 2003(S): 52—54.
[7] 郭金基. 变截面开口薄壁杆件的有限分析法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1985, 24(4): 39—50
[8] LIN W L, YOUSEF H, RICHARD B, et al. Finite analytic method and its applications: a review [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1997, 27: 17—33.

A Study on Finite Analysis Calculation Software of the Curtain Wall Self balance Structure

CAI Ming¹, JIANG Qing hai², GUO Jin ji³,
ZHANG Kai cheng², ZHENG Yun cheng², CUI Chuan qin², YANG Huang jun²

(1. School of Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Zhongshan Shengxing Curtain Wall Co. Ltd, Zhongshan 528412, Guangdong, China;

3. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A study on finite analysis calculation software of the curtain wall self balance structure is presented. The types and their calculating model of self balance structure are introduced and the program composition is designed. The software by using the Microsoft Visual C++ as development tool is based on the finite analysis method. The experiments are designed and their results show that the software is very precise and valid for self balance structure. The software has the merit of simply operating and fast calculating.

Key words: self balance structure; finite analysis method; calculation software BFACS; experiment