

文章编号:1673-2049(2013)03-0025-05

# 基于 SAP2000 的钢板筒仓参数化建模与分析

张建华, 郜殿伟, 黄珂, 徐 颀, 刘新生

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对目前实际工程中大型钢板筒仓有限元分析时建模困难、重复性工作多等不足,利用 .NET 平台上的 C# 语言开发了平底钢板筒仓快速建模、施加荷载及提取主要数据的 OAPI 插件。介绍了基于有限元分析软件 SAP2000 的 API 函数和插件的开发过程,以某筒仓的实际工程为例,验证了 OAPI 插件的可行性。结果表明:利用 .NET 平台上的 C# 语言调用 SAP2000 的 API 函数可以方便地开发出适用于具有新型仓壁、立柱形式的大型钢板筒仓参数化建模及分析的插件,为进一步拓展 SAP2000 在钢板筒仓设计分析方面的应用具有实际意义,也为今后类似工程的参数化建模和分析提供一定的参考。

**关键词:**钢板筒仓;SAP2000;API 函数;二次开发;OAPI 插件

**中图分类号:**TU392.6

**文献标志码:**A

## Parameterized Modeling and Analysis of Steel Silos Based on SAP2000

ZHANG Jian-hua, GAO Dian-wei, HUANG Ke, XU Qi, LIU Xin-sheng

(School of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University,  
Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** It was complex and repetitive to establish a finite element model for large steel silos in the actual project. To solve the problems, the OAPI plug-in of rapid modeling, applying loads and extracting main results for steel silos was developed using C# language on the .NET platform. Moreover, the API functions of finite element analysis software SAP2000 and the development procedures of plug-in were introduced, an actual engineering example demonstrated that the OAPI plug-in was feasible. The analysis results show that it is convenient to develop the plug-in which applies for parameterized modeling and analysis of large steel silos with new types of walls and columns based on C# language on the .NET platform calling the API functions of SAP2000. The research work can help further application of SAP2000 in designing and analysis of steel silos and can provide some references for parameterized modeling and analysis of similar engineering in the future.

**Key words:** steel silo; SAP2000; API function; secondary development; OAPI plug-in

## 0 引言

筒仓结构广泛应用于农业、矿业、化工、电力等诸多领域中的散料储存。相比于混凝土筒仓,钢板

筒仓在诸多情况下更为经济<sup>[1]</sup>。钢板筒仓结构主要分为落地式(平底式)和高架式(锥底式),根据筒仓高度与平面尺寸的关系,又将筒仓分为浅仓和深仓<sup>[2]</sup>。典型的钢板筒仓主要由仓顶、仓壁板、立柱等

收稿日期:2013-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51209060);中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCF130211);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20122304120035)

作者简介:张建华(1980-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zjh@hrbeu.edu.cn。

构件组成。

多年来,各国学者对钢板筒仓的散料压力分布<sup>[3-4]</sup>、静动力<sup>[5-8]</sup>、稳定性<sup>[9-10]</sup>等方面进行了大量的研究,大多研究中采用有限元分析方法,但在实际工程中,建模比较复杂,不便于设计人员使用。目前可以采用一些商业软件,如 STRAT,PKPM 进行部分固定形式的筒仓设计计算,但随着一些新型仓壁、立柱形式的出现<sup>[11]</sup>,这些商用软件往往很难满足实际需要。因此,基于有限元软件平台,进行二次开发成为一种切实可行的方法。

本文中笔者将介绍基于有限元分析软件 SAP2000 的 API 函数,以 .NET 为开发平台,利用 C# 语言开发钢板筒仓快速建模、施加荷载及提取主要数据的 OAPI 插件的全过程,并通过具体工程实例验证程序的可靠性。

1 SAP2000 的 API 简介

SAP2000 的 API 是从 SAP2000V11 开始引进的,即应用软件编程接口。用户可以编写程序,通过 API 来调用 SAP2000 的内部功能。在应用 API 时主要可实现以下几个功能:自动建模、自动分析、图形输入、计算书输入、调整参数、反复运行、多种方案比较等。

同时利用 .NET 平台强大的编程功能,可以开发出直接内嵌于 SAP2000 的 OAPI 插件。本文中正是以 .NET 平台下的 C# 语言为开发语言进行 OAPI 插件的开发。

2 OAPI 插件结构框架

同类型的钢板筒仓结构形式相对固定,便于参数化建模。仓顶结构关键参数包括仓顶直径  $L$ 、仓顶高度  $h$ 、仓顶倾角  $\alpha$ 、斜梁与系杆数量及支撑等,仓壁主要由仓壁板厚度、立柱数量、抗风圈数量和位置来确定,具体结构组成如图 1 所示。本文中基于 SAP2000 平台,利用 API 函数进行 OAPI 插件开发,形成了钢板筒仓计算程序(Calculating Program of Steel Silos,CPSS),该计算程序主要包括输入几何参数、施加荷载和输出结果 3 个模块,可以实现参数化数据输入、有限元模型建立、荷载计算和施加、位移、内力数据提取等。OAPI 插件总体框架如图 2 所示。

3 插件功能

3.1 输入几何参数模块

输入几何参数模块编程的重点是在于找出其节

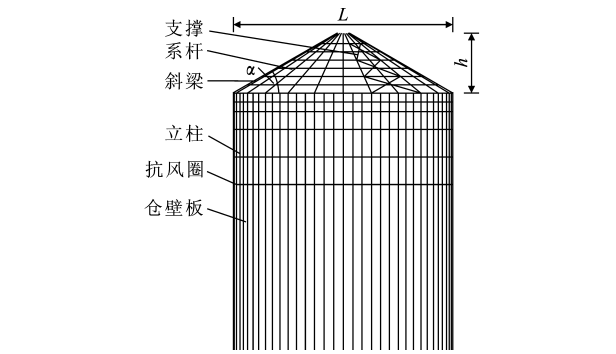


图 1 典型钢板筒仓结构组成  
Fig. 1 Structure Composition for Classical Steel Silos

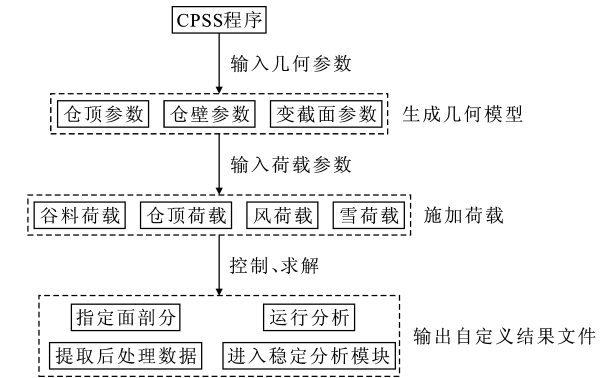


图 2 OAPI 插件总体框架  
Fig. 2 General Framework of OAPI Plug-in  
点、杆件、连接之间的相互关系。该模块主要包括 4 个部分:视图提示、仓顶参数、仓壁参数及变截面定义,如图 3 所示。

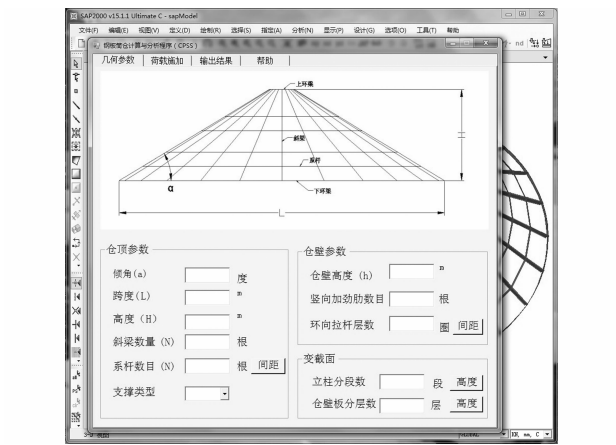


图 3 输入几何参数模块界面  
Fig. 3 Interface for Module of Input Geometric Parameter

3.1.1 仓顶参数

仓顶建模主要分为建立节点、梁单元和面单元 3 个步骤。在 SAP2000 整体坐标系下,根据仓顶的几何拓扑关系,在  $xOz$  平面建立主要控制节点,利用对称关系旋转复制生成其他节点,旋转角度  $\beta =$

$360^{\circ}/N$ ,  $N$  为斜梁数量。生成仓顶节点的主要 API 函数是 `SapModel.PointObj.AddCartesian`, 通过函数 `SapModel.EditGeneral.ReplicateRadial` 可以绕  $z$  轴进行旋转复制, 建立梁单元用函数 `SapModel.FrameObj.AddByPoint` 来实现。为了在计算分析中方便选取单元, 通过函数 `SapModel.GroupDef.SetGroup` 来建立组集, 利用函数 `SapModel.FrameObj.SetGroupAssign` 将对象指定到组集中, 建立面单元用函数 `SapModel.AreaObj.AddByPoint` 来实现。同时, 函数 `SapModel.EditFrame.DivideAtIntersections` 可以分割 `Frame` 对象, 在本文中利用此函数将斜梁在与系杆相交处分割, 以方便仓顶虚面的建立及节点位移的提取。

3.1.2 仓壁参数

仓壁建模的主要控制参数见表 1。通过函数 `SapModel.EditGeneral.ReplicateLinear` 进行仓底部节点的线性复制可得到仓底关键点, 进而可以完成立柱的建立。通过函数 `SapModel.EditFrame.DivideAtIntersections` 及 `SapModel.EditArea.Divide` 可以将立柱和仓壁面分割成指定的数量, 并指定到相应的组中以方便后续处理。另外, 还需要通过节点的线性复制来定位抗风环梁的位置, 并在 2 条加劲肋间建立一段抗风环梁。在程序中点击相应按钮可以方便定义每层加劲肋或截面的厚度, 用户只需输入相应的参数, 程序就会自动计算出用平板等效波纹钢板后的等效厚度并赋给相应的各层截面, 具体实现界面如图 4 所示。

表 1 仓壁建模主要控制参数  
Tab. 1 Major Controlling Parameters for Silo Wall Modeling

控制参数	参数说明
$H$	仓壁高度
Column_Num	立柱数量
ColumnParts_Num	立柱变截面数量
ColumnParts_Height	立柱变截面处高度
WindBar_Num	抗风圈层数
WallParts_Num	仓壁变截面数量
WallParts_Height	仓壁变截面处高度
$d$	等效截面长度
$u$	波纹板实际长度
$t$	波纹板实际厚度

3.2 施加荷载模块

本文中开发的 CPSS 计算程序, 根据中国现行《粮食钢板筒仓设计规范》(GB 50322—2011), 按照筒仓的类型(浅仓或深仓)计算谷料荷载、仓顶荷载、风荷载、雪荷载等, 根据定义的荷载工况组合, 将荷

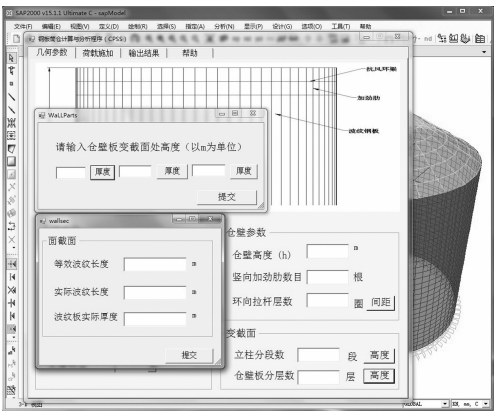


图 4 仓壁变截面及等效截面导算参数输入界面  
Fig. 4 Input Interface for Non-uniform Silo Wall and Equivalent Section Transfer Parameters

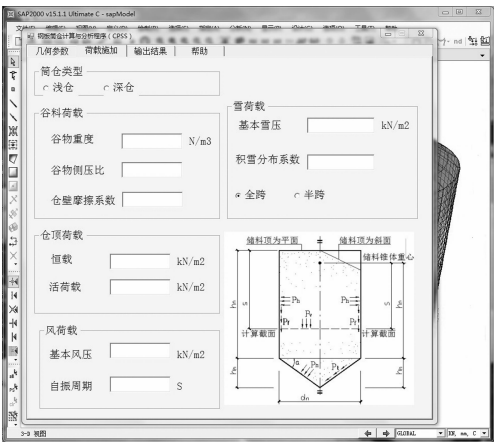


图 5 施加荷载模块界面  
Fig. 5 Interface for Module of Load Application

载作用在相应的构件上, 具体实现界面如图 5 所示, 设计人员可根据需要自行添加其他荷载形式。在施加仓壁散料荷载时通过 `SapModel.LoadPatterns.Add` 和 `SapModel.PatternDef.SetPattern` 分别用于定义荷载模式和节点样式。函数 `SapModel.SelectObj.GetSelected (ref NumberItems, ref ObjectType, ref ObjectName)` 用于返回选择的对象数量、对象类型以及对对象名称。函数 `SapModel.PointObj.GetCoordCartesian (ObjectName, GetValue (i).ToString(), ref X, ref Y, ref Z)` 用于返回指定节点对象的坐标值,  $If$  循环可用来区分不同的水平压力修正系数。通过函数 `SetPatternByXYZ (Name, PatternName, a, b, c, d, ItemType, Restriction, Replace)` 来定义节点样式数据, 具体的节点样式值通过  $Value=aX+bY+cZ+d$  来计算得出,  $X, Y, Z$  均为节点对象的坐标值,  $a, b, c, d$  均为要求输入的参数。

通过函数 SapModel. AreaObj. SetLoadUniform 来指定仓顶恒荷载、活荷载及雪荷载,在施加荷载后程序可以自动指定梁、柱端部释放及仓筒底部约束。

3.3 输出结果模块

本程序的输出结果模块主要包括前处理控制、运行分析、后处理及稳定性分析,如图 6 所示。前处理控制主要是利用用户输入的几何及荷载参数建立最终的有限元模型,并可实现壳单元及梁、柱单元的网格划分。通过函数 SapModel. Analyze. RunAnalysis 开始运行分析,在开始运行分析前要先保存模型数据到指定的路径下或从一个已存在的文件打开,且文件名称后面要有 .sdb 后缀。

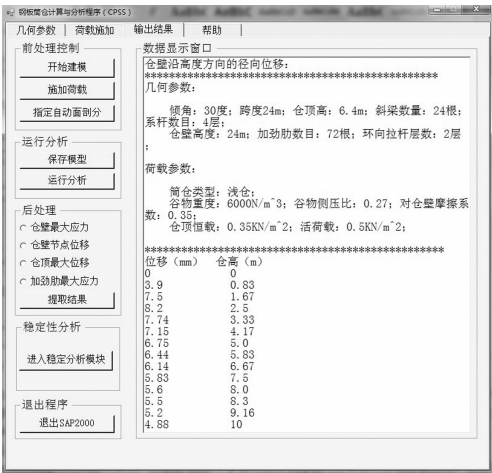


图 6 输出结果模块界面

Fig. 6 Interface for Module of Output Results

在后处理部分,通过函数 SapModel. Results. Setup. SetComboSelectedForOutput 来指定输出工况组合,本程序可以输出节点位移、单元应力等信息。

在输出结果模块点击“进入稳定分析模块”后即弹出“整体稳定分析”窗口,如图 7 所示,在此窗口可以进行仓顶和仓壁的整体线性稳定性分析,根据相关规范,仓顶和仓壁的整体稳定性计算可以分别最多输出 4 种工况及 2 种工况下的临界荷载系数,每种工况可以进行 6 阶屈曲模态的计算。通过函数 SapObject. SapModel. LoadCases. Buckling. SetCase 来定义屈曲荷载工况,屈曲荷载可以通过函数 SapObject. SapModel. LoadCases. Buckling. SetLoads 来定义,此函数包括 5 个参数,可以分别指定一个存在的屈曲荷载工况、屈曲荷载数目、荷载类型、荷载名称及比例系数。通过函数 SapObject. SapModel. LoadCases. Buckling. SetParameters 可



图 7 筒仓整体稳定性分析模块界面

Fig. 7 Interface for Module of Whole Stability Analysis of Silo

以指定需要的屈曲模态数及特征值收敛容差。计算完成后,可以通过函数 SapObject. SapModel. Results. BucklingFactor 来提取临界荷载系数,并显示在窗口的相应位置。

4 工程实例

本文中以一大型落地式钢板筒仓的实际工程为例,利用 OAPI 插件提取仓壁节点的径向位移输出到指定文件中来验证程序的可行性和可靠性。该筒仓为稻壳仓,直径为 24 m,仓壁高度为 24 m,仓顶高度为 6.4 m,仓顶倾角为 30°,仓顶斜梁数目为 24 根,竖向加劲肋数目为 72 根,仓壁及加劲肋均为变截面。施加的荷载包括仓顶恒荷载、活荷载、储料对仓壁的侧压力及摩擦力。

利用 OAPI 插件的参数化建模可以直接得到钢板筒仓有限元模型,如图 8 所示,加载分析后提取出仓壁节点随仓壁高度变化的径向位移数据,如图 9 所示,并利用相关软件绘制出曲线,如图 10 所示。

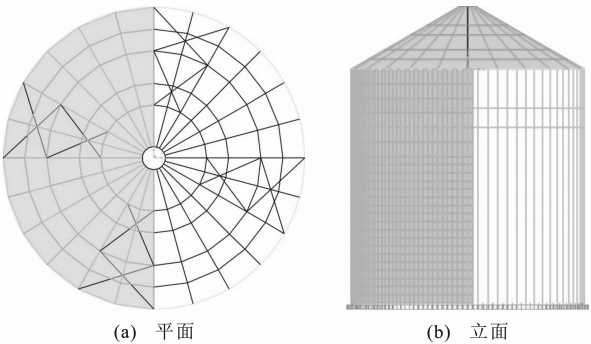


图 8 钢板筒仓有限元模型

Fig. 8 Finite Element Models of Steel Silo

5 结 语

本文中介绍了利用 SAP2000 的 API 函数在

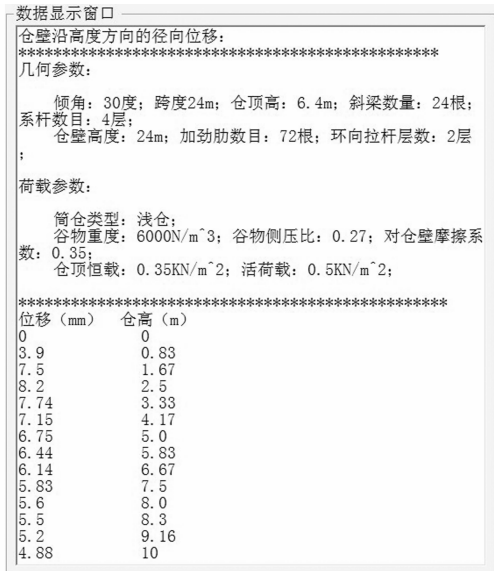


图 9 仓壁节点径向位移

Fig. 9 Radial Displacements of Silo Wall Nodes

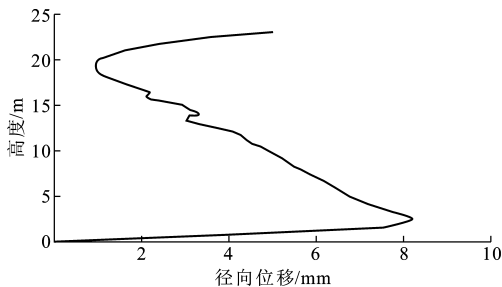


图 10 仓壁径向位移沿高度变化曲线

Fig. 10 Variation Curve of Silo Wall Radial Displacement Along Height

.NET平台上进行 OAPI 插件开发的流程,并通过钢板筒仓快速建模、施加荷载、运行分析和提取数据全过程,具体介绍了利用 SAP2000 的 API 函数编制程序的步骤,实现了快速开发钢板筒仓计算分析程序,结合具体工程实际验证其可行性和可靠性,从而进一步拓展了 SAP2000 在相关领域的应用,利用 SAP2000 的 API 函数开发 OAPI 插件的过程简单,针对性强,可以极大地发挥 SAP2000 的强大功能,实用性强,值得在工程设计中推广应用。

参考文献:

References:

[1] 滕锦光,赵 阳.大型钢筒仓的结构行为与设计[J].土木工程学报,2001,34(4):46-55.  
TENG Jin-guang, ZHAO Yang. Structural Behavior and Design of Large Steel Silos[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(4): 46-55.

[2] GB 50322—2011,粮食钢板筒仓设计规范[S].

GB 50322—2011, Code for Design of Grain Steel Silos[S].

[3] 杨代恒. 钢筒仓设计研究及散料压力的数值模拟[D]. 杭州:浙江大学,2008.  
YANG Dai-heng. Design Research of Steel Silos and Numerical Simulation of Buck Material Pressure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[4] GONZALEZ-MONTELLANO C, GALLEGO E, RAMIREZ-GOMEZ, et al. Three Dimensional Discrete Element Models for Simulating the Filling and Emptying of Silos: Analysis of Numerical Results[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 40: 22-32.

[5] 张炎圣,杨晓蒙,陆新征. 钢板筒仓侧壁压力的非线性有限元分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(增 1): 447-451.  
ZHANG Yan-sheng, YANG Xiao-meng, LU Xin-zheng. Nonlinear Finite Element Analysis for the Wall Pressure in a Steel Silo[J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1): 447-451.

[6] VIDAL P, GALLEGO E, GUAITA M, et al. Finite Element Analysis Under Different Boundary Conditions of the Filling of Cylindrical Steel Silos Having an Eccentric Hopper[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(4): 480-492.

[7] 高金锁. 落地式钢筒仓地震作用分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.  
GAO Jin-suo. The Analysis of a Floor-steel Silo Under Seismic Force[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.

[8] RUIZ A, COUTO A, AGUADO P J. Design and Instrumentation of a Mid-size Test Station for Measuring Static and Dynamic Pressures in Silos Under Different Conditions—Part II: Construction and Validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85: 174-187.

[9] LWICKI P, WOJCIK M, TEJCHMAN J. Failure of Cylindrical Steel Silos Composed of Corrugated Sheets and Columns and Repair Methods Using a Sensitivity Analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2064-2083.

[10] 袁海龙. 粮食钢板筒仓整体稳定设计综述[J]. 特种结构, 2008, 25(3): 21-24.  
YUAN Hai-long. Summary of Total Stability Design for Grain Steel Silos[J]. Special Structures, 2008, 25(3): 21-24.

[11] 王庆卫. 螺旋咬口钢板筒仓: 中国, CN2011202618-62. 1[P]. 2012-03-07.  
WANG Qing-wei. Spiral Grip Steel Silos: China, CN201120261862. 1[P]. 2012-03-07.