

# Modeling Method for Structure of Shaft Equipment Based on SAP2000

Dongquan Wang, Hongmiao Jing, Guangyun Yu

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Xuzhou), Xuzhou Jiangsu  
Email: 917443727@qq.com

Received: Jul. 4<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jul. 19<sup>th</sup>, 2016; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

To develop structural analysis software for calculating shaft equipment, modeling method for structure of shaft equipment based on SAP2000 is firstly presented. First of all, based on the feature of shaft equipment and each member, structure of shaft equipment is divided into five types. Mathematic model of each member of shaft equipment is established, meanwhile, parametric modeling for shaft equipment is realized. Then, according to the feature of connection and boundaries, which belongs to the members of shaft equipment, the reasonable connection and boundaries of each member are set up in the model. On the basis of the load characteristics of horizontal force, the combination of the horizontal force's working position and condition is determined. In the end, it is helpful for developing the structural analysis software for shaft equipment based on SAP2000.

## Keywords

Shaft Equipment, SAP2000, Parameterized Modeling, Calculating Method

---

# 基于SAP2000的立井井筒装备结构建模方法

王东权, 靖洪淼, 于广云

中国矿业大学(徐州)力学与建筑工程学院, 江苏 徐州  
Email: 917443727@qq.com

收稿日期: 2016年7月4日; 录用日期: 2016年7月19日; 发布日期: 2016年7月26日

## 摘要

为了开发用于计算立井井筒装备结构分析软件,首次提出基于SAP2000的立井井筒装备结构建模方法;首先依据井筒装备结构和各构件特点,将井筒装备结构分为5种类型,构建了立井井筒装备各构件位置坐标的数学模型,实现了立井井筒装备参数化建模;然后根据立井井筒装备各构件连接特点和边界特点,合理设置了模型中各构件的连接和边界,又根据立井井筒装备荷载水平力特性,确定了荷载水平力作用位置和工况组合;最后为开发基于SAP2000的立井井筒装备结构计算软件提供了依据。

## 关键词

立井井筒装备, SAP2000, 参数建模, 计算方法

## 1. 引言

随着计算机硬件和有限元技术的飞速发展,给建筑物或构筑物的分析与设计带来了极大的便利,现在流行的通用分析软件有 ANSYS、ABAQUS、ADINA 等,专业的分析软件有 SAP2000、PKPM、Midas 系列等,分析和设计的计算机化是现在的大趋势。目前各大煤矿设计院,对于煤矿立井井筒装备结构的计算,还停留在笔算和简单的计算机分析阶段,这些分析和计算建立在对结构的过分简化和理想化之上,这就导致了计算结果和实际情况会有较大的误差。并且立井井筒装备结构的分析和计算需要进行大量的重复工作,即浪费时间,又有可能出现错误。针对立井井筒装备结构的分析和计算,设计一套专门的计算分析软件就十分有必要了。为了高效性和避免考虑本构关系等众多障碍,采用了 SAP2000 二次开发的方式实现,而且 SAP2000 分析软件为用户提供了二次开发的接口(SAP2000\_API\_Documentation.chm [1])。其中张月强等[2]完成了 SAP2000 到 ABAQUS 模型转换问题及软件开发研究;张建华等[3]做了基于 SAP2000 的钢板筒仓参数化建模与分析的工作;陈庆军等[4]利用.NET 平台及 SAP2000 API 实现空间杆系结构的蒙板功能。

本文首先把井筒装备分为 5 类,然后提出井筒装备各构件位置坐标的数学模型,并结合王东权[3]提出的井筒装备结构静动力计算模型,水平力荷载确定方法以及立井井筒装备结构的计算方法,提出了参数建模和计算方法的整体思路,对上文提到的专门软件的开发有指导意义,也为煤矿立井井筒装备结构的分析和计算提供了新思路,具有非常大的实用意义,也为类似工程的建模和分析提供了参考。

## 2. 井筒装备分类

为了方便程序的编写,对现有立井井筒装备结构进行归纳整理,根据井筒断面布置情况和井筒装备结构各构件特性,对井筒装备结构进行了分类,共分成了 5 种类型:

### (1) 类型一

在类型一的井筒装备结构中,只有罐道一种构件。罐道通过托架直接固定于井壁,其结构示意图见图 1。

### (2) 类型二

类型二的井筒装备结构是在类型一的基础上,增加了罐道梁这种构件。罐道梁两端通过托架直接固定于井壁,罐道通过耳板固定于罐道梁上,其结构示意图见图 2。

### (3) 类型三

类型三的井筒装备结构是在类型二的基础上，增加了支撑梁这种构件。罐道梁两端和支撑梁的一端通过托架直接固定于井壁，罐道通过耳板固定于罐道梁上，其结构示意图见图 3。

(4) 类型四

类型四的井筒装备结构是在类型三的基础上，增加了联结梁这种构件。联结梁是联结两根罐道梁的构件，其结构示意图见图 4。

(5) 类型五

类型五的井筒装备结构是在类型四的基础上，增加了副支撑梁这种构件。副支撑梁一端与联结梁相连，另一端与井壁相连，其结构示意图见图 5。

常见井筒装备结构经合理简化后均可按此五种类型分类。

### 3. 井筒装备各构件位置坐标的数学模型

建立井筒装备结构的几何模型是结构计算分析和后续操作的前提条件，也是参数建模的重要部分之一。

根据 1 中井筒装备结构分成的五种类型，对每种类型分别进行几何建模，每种类型自成体系。建立几何模型的首要任务是坐标系的确定，而 SAP2000 软件中已经规定好了总体坐标系和局部坐标系，所以在此基础上可以直接进行几何建模。对于井筒装备这种杆系结构的建模，采取自下而上的建模方式，即



Figure 1. Type 1 schematic diagram of shaft equipment  
图 1. 井筒装备结构类型一示意图

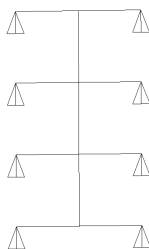


Figure 2. Type 2 schematic diagram of shaft equipment  
图 2. 井筒装备结构类型二示意图

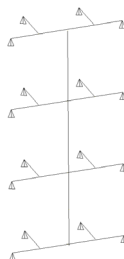


Figure 3. Type 3 schematic diagram of shaft equipment  
图 3. 井筒装备结构类型三示意图

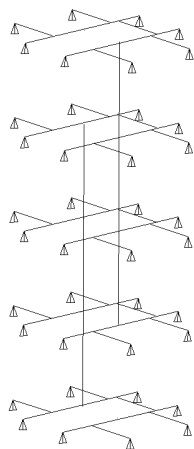


Figure 4. Type 4 schematic diagram of shaft equipment

图 4. 井筒装备结构类型四示意图

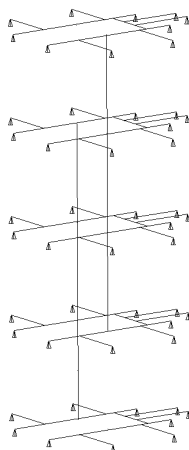


Figure 5. Type 5 Schematic diagram of shaft equipment

图 5. 井筒装备结构类型五示意图

先建立关键点，然后联结关键点成线。虽然 SAP2000 软件接口(API)中已经提供了具体的函数，如建立关键点和线的函数，但是立井井筒装备结构的具体几何关系，需要给出。井筒装备各类构件的几何模型如下。

### 3.1. 罐道几何模型

首先建立的是罐道关键点，单列罐道关键点的总数为：

$$NK_1 = GNP \frac{GL}{GS} + 1 \quad (2-1)$$

式中， $NK_1$  表示单列罐道关键点的总数； $GNP$  表示罐道根数； $GL$  表示罐道长度； $GS$  表示罐道固定点间距。

求得罐道关键点总数后，就可以将这些关键点逐个建立，并对这些关键点合理命名，其中第  $i$  个关键点的位置坐标计算公式如下：

$$\begin{cases} Gx_i = \Delta x_1 \\ Gy_i = \Delta y_1 \\ Gz_i = (i-1)GS + \Delta z_1 \end{cases} \quad (2-2)$$

式中,  $(Gx_i, Gy_i, Gz_i)$ 表示从下往上第  $i$  个关键点的坐标位置;  $(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1)$ 表示该列初始关键点的位置坐标, 初始关键点位置是任意的;  $i \in Z, i = 1, \dots, NK_1$ 。

接下来是联结关键点成线(罐道), 由于之前已经对关键点进行了命名, 所以可以按照关键点命名的规律, 联结相应关键点成线(罐道), 建立罐道几何模型, 同时这些线(罐道)同样需要有规律的命名。若这些关键点的命名为“1...i...NK<sub>1</sub>”, 则被联结的关键点如下:

$$K_{j-1} = (j-1) \frac{GL}{GS} + 1 \quad (2-3)$$

式中,  $K_{j-1}$ 表示需要联结的第  $(j-1)$  个关键点号,  $j \in Z, j = 1, \dots, GNP+1$ ; 这些关键点按  $(K_0, K_1), (K_1, K_2), \dots, (K_{j-1}, K_j), \dots, (K_{GNP}, K_{GNP+1})$  的方式联结成线(罐道), 就建立了罐道几何模型。

### 3.2. 罐道梁几何模型

如果有多列罐道, 需按一定的规律将相邻列罐道之间的罐道接头错开, 其中罐道梁的层数按下式计算:

$$NK = \begin{cases} GNP \frac{GL}{GS} + 1, & \text{罐道列数} = 1 \\ GNP \frac{GL}{GS} + \frac{GL}{GS} \setminus 2 + 1, & \text{罐道列数} \geq 2 \end{cases} \quad (2-4)$$

式中,  $NK$ 表示罐道梁层数; 符号“ $\setminus$ ”为取整运算。

罐道梁靠近整体坐标原点一端的关键点的位置坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} Bx_i = \Delta x_2 \\ By_i = \Delta y_2 \\ Bz_i = (i-1)GS + \Delta z_2 \end{cases} \quad (2-5)$$

式中,  $(Bx_i, By_i, Bz_i)$ 表示从下往上第  $i$  个关键点的坐标位置;  $(\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2)$ 表示该列初始关键点的位置坐标;  $i \in Z, i = 1, \dots, NK$ 。

而罐道梁远离整体坐标原点一端的关键点的位置坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} Bx'_i = Bx_i + BL \\ By'_i = By_i \\ Bz'_i = Bz_i \end{cases} \quad (2-6)$$

式中,  $(Bx'_i, By'_i, Bz'_i)$ 表示对应于  $(Bx_i, By_i, Bz_i)$  的关键点, 它们属于同一根罐道梁的两端点关键点;  $BL$ 表示罐道梁的长度。

除此之外, 罐道梁上还应该有用用于联结罐道的关键点, 对于类型三还有用于联结支撑梁的关键点, 对于类型四和类型五还有用于联结联结梁的关键点, 对式(2-5)或(2-6)稍作修改即可得出这些关键点的位置坐标, 这里不再赘述。

需要注意的是, 罐道梁上关键点的命名需要有规律性, 如罐道梁两端点关键点按“ $2i-1$ ”和“ $2i$ ”( $i \in Z, i = 1, \dots, NK$ )方式命名, 则建立罐道梁模型需要联结的关键点为:

$$(2i-1, 2i), (i \in Z, i = 1, \dots, NK) \quad (2-7)$$

在建立罐道梁的同时, 罐道梁的命名也必须具备一定的规律性, 方便以后的操作。

### 3.3. 支撑梁和其他构件几何模型

在几何模型中支撑梁的层数与罐道梁的层数一致, 公式(2-4)适用。但对于每列支撑梁两端点关键点

的位置坐标，仍需要另行计算，其中靠近原点一端关键点的位置坐标计算如下：

$$\begin{cases} Sx_i = \Delta x_3 \\ Sy_i = \Delta y_3 \\ Sz_i = (i-1)GS + \Delta z_3 \end{cases} \quad (2-8)$$

式中， $(Sx_i, Sy_i, Sz_i)$ 表示从下往上第*i*个关键点的坐标位置； $(\Delta x_3, \Delta y_3, \Delta z_3)$ 表示该列初始关键点的位置坐标； $i \in Z, i = 1, \dots, NK$ 。

而支撑梁另一端关键点的位置坐标计算如下：

$$\begin{cases} Sx'_i = Sx_i \\ Sy'_i = Sy_i \pm SL_j \\ Sz'_i = Sz_i \end{cases} \quad (2-9)$$

式中， $(Sx'_i, Sy'_i, Sz'_i)$ 表示支撑梁远离原点一端关键点的坐标位置； $SL_j$ 表示第*j*根支撑梁的长度；当支撑梁位于*y*轴负半轴时，式(2-9)中取负值，位于*y*轴正半轴时，式(2-9)中取正值。

根据这些关键点的命名规律，直接联结相应关键点即可建立支撑梁，如式(2-7)。支撑梁的命名也应有规律性，便于后面边界条件、截面属性和荷载等设置。

另外，还有联结梁和副支撑梁，式(2-8)和(2-9)稍作修改，即可用于求解联结梁和副支撑梁上关键点的坐标位置。建立关键点，并对关键点合理命名，联结相应关键点，就建立了联结梁和副支撑梁，最后对联结梁和副支撑梁按一定的规律命名。

#### 4. 井筒装备计算模型和计算方法

井筒装备的几何模型建立后，还需要赋予各个构件截面属性、材料属性，合理设置各构件的连接和模型的边界条件，计算荷载值并添加荷载工况组合到几何模型，这样就建立了井筒装备结构的计算模型。最后根据软件计算得到的结果，进行静力计算校核井筒装备的强度和刚度，动力稳定性计算校核井筒装备是否因水平力冲击作用而失稳，疲劳强度等计算确定井筒装备的使用寿命。

##### 4.1. 各构件截面和材料属性

构件的截面属性参数可参照相关型钢标准，结合局部坐标，在软件编写时事先设置好，以待选择备用，也可自定义设置；SAP2000软件的API种也提供了这些设置的函数，方便调用；而构件的材料属性，则按照我国型钢规范予以设置。

##### 4.2. 各构件连接和模型边界条件

在实际情况中，各个构件通过耳板以螺栓连接，其连接处的尺寸相较于构件很小，根据圣维南原理可以对这些构件的连接进行理想化处理，这里按铰接连接处理，在三维空间中，这些构件连接只传递位移，而不传递转角。如罐道接头的处理，罐道铰接于罐道梁上。

相应构件采用螺栓连接于托架，托架用锚栓固定在井壁上，同样根据圣维南原理，按铰接连接处理，即构件与井壁连接只约束构件的位移，而不约束构件的转角。

##### 4.3. 荷载

在井筒装备正常工作时，荷载分为水平力荷载[4]和竖向力荷载。在计算中，穷尽所有的荷载工况组合，并将其添加到计算模型中，保证了荷载工况的全面性，消除了以往人为筛选荷载工况组合的主观臆断性，避免了可能出现的错误。

## (1) 水平力荷载

水平力荷载是多绳提升深立井井筒装备结构设计计算的主要荷载，也是造成井筒装备结构损坏最直接最主要的原因[4]，其中水平力荷载又包括作用于罐道正面水平力  $P_y$  和作用于罐道侧面水平力  $P_x$ 。王东权等[4]-[6]已给出结构计算时可根据提升容器的运行情况，采用荷载随机组合的方式模拟提升容器对井筒装备结构随机冲击作用。当水平力作用在罐道梁与罐道联接处为不利于罐道梁的荷载组合；当水平力作用在两层罐道梁间罐道中部为不利于罐道的荷载组合。

为了在计算中尽量包含所有可能的荷载组合情况，首先求出荷载组合数：

$$\text{num}L = 2^{GNC} \quad (3-1)$$

式中， $\text{num}L$ 表示不利于罐道或罐道梁荷载组合数； $GNC$ 为一侧罐道的列数；2表示 $P_x$ 荷载在 $x$ 方向有正负两个值。

水平力荷载作用的具体罐道号按下式计算：

$$G = \begin{cases} GNP \setminus 2 + 1, & \text{奇数列} \\ GNP \setminus 2, & \text{偶数列} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， $G$ 表示水平力荷载作用的罐道号( $G \geq 1$ )，其中罐道按从下往上依次排列。

其次是求解荷载的作用位置。为了统一，荷载作用位置采用相对位置，那么水平力荷载作用位置按下式计算：

$$L1 = \begin{cases} 0, & \text{奇数列} \\ 1 - \frac{BS}{GL}, & \text{偶数列} \end{cases} \quad (3-3)$$

$$L2 = \begin{cases} \frac{BS}{2GL}, & \text{奇数列} \\ 1 - \frac{BS}{2GL}, & \text{偶数列} \end{cases} \quad (3-4)$$

式中， $L1$ 表示不利于罐道时的水平力荷载作用相对位置； $L2$ 表示不利于罐道梁时的水平力荷载作用相对位置； $BS$ 表示罐道梁层间距； $GL$ 表示罐道长度。

最后是荷载值和水平力冲击作用频率的计算。选取了王东权[5]提出的计算公式：

最小概率荷载

$$\begin{cases} P_{y\max} = P_{\max} \\ P_{x\max} = (0.7 \sim 0.9)P_{y\max} \end{cases} \quad (3-5)$$

最大概率荷载

$$\begin{cases} P_{yav} = (0.6 \sim 0.8)P_{\max} \\ P_{xav} = (0.7 \sim 0.9)P_{yav} \end{cases} \quad (3-6)$$

水平力冲击作用频率

$$F_p = 2.688 + 0.172v - 0.426H \quad (3-7)$$

上面三式中， $P_{\max}$ 为水平力峰值最大值，kN

当 $v = 10 \sim 20$  m/s， $W = 200 \sim 600$  kN时

$$P_{\max} = 0.427v^{0.925}W^{0.256}H^{-0.150} \quad (3-8)$$

当 $v \leq 10$  m/s,  $W < 200$  kN时, 可采用

$$P_{\max} = \frac{1}{12}W \quad (3-9)$$

$P_{y\max}$ ,  $P_{x\max}$ ,  $P_{yav}$ ,  $P_{xav}$ 分别为罐道正面、侧面水平力峰值的最大值和平均值, kN;  $F_p$ 为水平力冲击作用频率, Hz;  $v$ 为提升速度, m/s;  $W$ 为提升终端荷载, kN;  $H$ 为罐道梁层间距, m。

#### (2) 竖向力荷载

竖向力荷载的处理相对简单, 主要是根据实际工作情况, 在荷载作用位置添加即可。竖向力荷载主要包括排水管道荷载、线路荷载、梯子间等荷载。竖向荷载平均分配到相应的每一个作用点上, 具体荷载值按实景情况计算即可。

### 4.4. 计算内容和方法

立井井筒装备结构破坏包括强度破坏、刚度破坏、动力失稳破坏和疲劳破坏四种形式。针对这四种破坏形式, 提出了如下计算内容:

#### (1) 静力计算

静力计算是为了保证井筒装备结构在使用过程中, 不发生强度破坏和刚度破坏。

根据软件计算得到的每一组工况内力计算结果, 结合《钢结构设计规范》中强度计算公式, 筛选出最不利工况组合, 且计算结果应满足规范对强度的要求。

井筒装备结构的刚度应满足下式[3]:

$$C_{\max} = \frac{L}{\Delta_{\max}} = \frac{L}{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \geq [C] \quad (3-10)$$

式中,  $C_{\max}$ 为使用期末井筒装备结构最小刚度;  $L$ 为井筒装备结构构件的长度;  $\Delta_{\max}$ 为井筒装备结构最大节点位移;  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ 为井筒装备结构侧面、正面最大节点位移;  $[C]$ 为井筒装备结构容许刚度值,  $[C] = 400$ 。

#### (2) 动力稳定性计算

为了保证井筒装备结构在使用过程中不发生动力失稳破坏, 需要保证井筒装备结构在使用过程中不发生共振, 即水平力作用冲击频率与井筒装备结构的自振频率不一致:

$$F_z \neq F_p \quad (3-11)$$

式中,  $F_z$ 为井筒装备结构自振频率, 一般取前四阶;  $F_p$ 为水平力作用冲击频率。

当 $F_z$ 等于或接近 $F_p$ 时, 井筒装备可能发生动力失稳破坏(振型一致时发生动力失稳破坏), 此时应采取相关处理措施, 如改变提升速度、改变井筒装备构件布置方式等, 避免动力失稳破坏。

井筒装备结构的计算内容还包括疲劳强度计算, 罐道受水平力处的局部强度计算, 对井筒装备结构的联接件、固定件及其焊缝进行强度和疲劳强度校核, 以保证井筒装备结构整体在使用期内安全可靠[4]。

## 5. 主要结论

(1) 基于SAP2000结构分析软件, 建立了立井井筒装备结构计算模型, 开发了基于SAP2000的立井井筒装备结构分析软件。

(2) 立井井筒装备分成了五类, 在三维直角坐标系中给出了立井井筒装备各构件的数学模型, 实现了参数化建模; 模型中各构件的连接和边界条件按铰接处理; 确定了立井井筒装备最不利情况下的荷载水平力作用位置和大小以及工况组合。

(3) 针对立井井筒装备的强度破坏、刚度破坏、动力失稳破坏等破坏形式, 提出了静力计算、动力稳



定性计算等计算内容。

### 参考文献 (References)

- [1] 北京金土木软件技术有限公司. SAP2000\_API\_-Documentation\_chm [M]. 2009 年第 14 版软件安装目录.
- [2] 张月强, 焦春节, 丁洁民. 复杂高层结构从 SAP2000 到 ABAQUS 模型转换的关键问题及软件开发研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(6): 54-57.
- [3] 张建华, 郜殿伟, 黄珂, 等. 基于 SAP2000 的钢板筒仓参数化建模与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 9(3): 25-29.
- [4] 陈庆军, 谢小东, 郭金龙, 等. 利用.NET 平台及 SAP2000 API 实现空间杆系结构的蒙板功能[J]. 空间结构, 2012, 18(2): 64-69.
- [5] 王东权, 史天生, 刘志强, 等. 深立井刚性井筒装备结构的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(1): 5-8.
- [6] 史天生, 田建胜. 刚性井筒装备水平作用力的工程算法[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(1): 1-7.

#### 期刊投稿者将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>