

多管式烟囱钢内筒安装可靠性分析初探

刘荣桂, 蒋峰, 谢桂华, 李成绩, 蔡建良

(江苏大学土木工程系, 江苏 镇江 212013)

摘要:利用 ANSYS 软件基于 Monte-Carlo 法和响应面法的概率分析功能, 编制专用的参数化语言程序, 对某电厂多管式烟囱基于液压提升倒装法的钢内筒安装过程进行可靠性分析。在工程实践的基础上, 结合可靠性分析相关理论提出了大型复杂系统的分析计算模型。最后, 以吊装平台结构为例给出其可靠性分析结果。

关键词:多管式烟囱; 钢内筒; 可靠性; 液压提升倒装法; 吊装平台

中图分类号: TU35

文献标识码: A

文章编号: 1008-1933(2006)03-0056-05

Superficial discussion on the reliability analysis of internal steel stacks' installation in multi-flue chimney

LIU Rong-gui, JIANG Feng, XIE Gui-hua, LI Cheng-ji, CAI Jian-liang

(Department of Civil Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The reliability analysis of the internal steel stacks' installation in multi-flue chimney was carried through by using the special parameter language program and the probability analysis function of ANSYS software based on Monte-Carlo method and response surface method. The structural model was for other large scale complicated structures provided, according to the engineering practice and the relative theory of reliability analysis. Finally, the results was presented by the lifting platform structural.

Key words: multi-flue chimney; internal steel stacks; reliability analysis; hydraulic lifting upside-down method; lifting platform

0 引言

据了解, 目前国内外多管式烟囱的钢内筒安装方法主要有: 大型吊机散装法、卷扬机提升倒装(顺装)法、气压顶升倒装法、自爬式液压顶升倒装法、液压提升倒装法等 5 种。其中, 液压提升倒装法是将电力部电力建设研究所研制的“GYT 系列钢索式液压提升装置”经改进后应用到烟囱钢内筒安装中的, 属国内首创, 在火电施工中具有革新性的发展前途。但国内的应用实例表明, 应用液压提升倒装法进行钢内筒安装虽然综合效益较高, 但风险较大。因为缺乏科学的决策分析和实用的理论指导, 施工过程中存在一些隐患, 有时可能会因缺乏有效的技术手段而不得不返工。

笔者基于数值模拟方法, 针对结构具体情况编制了 ANSYS 软件专用的参数化设计语言程序, 对多

管式烟囱钢内筒安装进行可靠性分析。最后, 以某电厂多管式烟囱施工中所使用的吊装平台为依据给出了分析结果。

1 可靠性分析基本理论

1.1 系统可靠性分析

一般而言, 系统可靠性分析的主要研究内容包括失效模式研究和可靠度计算。要进行系统可靠性分析, 首先必须搞清楚结构的各种失效模式。结构系统的失效模式非常复杂, 如果要想考虑所有可能的因素, 计算出一个“全面”的结构体系可靠度几乎是不可能的。为此, 本文采用基于功能的结构系统可靠度的概念, 将可靠度与结构的某种功能联系起来, 这样更符合实际情况, 而且计算也比较简便^[1]。计算结构的可靠度, 首先要得到有关随机变量的统计参数, 然后建立所分析问题的极限状态方程, 之后应用已有的比较成熟的可靠度分析方法进行计算。

1.2 极限状态功能函数

在结构可靠性分析中, 结构的极限状态是以功能函数 $Z = g(X)$ 表达的, 其中随机矢量 X 表征了工程中存在的不确定性因素, 如材料参数与结构几何尺寸的随机性、荷载的随机性等。结构的工作状态

收稿日期: 2005-05-10

作者简介: 刘荣桂(1957-), 男, 江苏江都人, 教授, 博导, 主要从事结构可靠性方面的研究。

基金项目: 江苏省供电局协作课题资助项目(GZ2004071G148)

E-mail: jiangf 818@sohu.com

如图 1 所示^[2]。

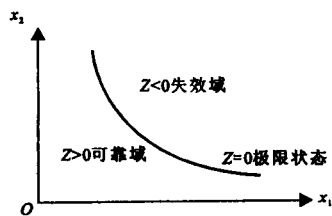


图 1 工作状态

Fig. 1 The working state chart

当 $Z > 0$ 时, 结构处于安全状态;

当 $Z = 0$ 时, 结构处于极限状态;

当 $Z < 0$ 时, 结构处于失效状态。

结构的失效概率是

$$P_f = P[g(X) < 0] = \int_{g(X) < 0} f(X) dX$$

其中 $f(X)$ 为随机矢量的联合概率密度函数。对于大部分结构而言, $f(X)$ 表达式一般不能以显式表达^[3]。

1.3 可靠性数值模拟方法

在实际工程中, 极限状态功能函数大多是随机变量的高次非线性隐式函数, 应用数值模拟方法 (Monte-Carlo 法、响应面法等) 进行分析非常有效, 具有一定的优势。

Monte-Carlo 法的基本原理是对各随机变量进行大量抽样, 结构失效次数占抽样数的频率即为其失效概率。采用该法进行可靠性分析应解决两个基本问题: 确定随机抽样数和确定抽样方法。采用频率来估算概率的基本前提是随机抽样数必须足够大, 否则达不到精度要求。但是, 当实际工程的结构失效概率在 10^{-3} 以下时, 该方法的抽样数就会相当大, 进而占用大量时间。因此, 在应用于大型复杂结构时就受到了限制。为提高工作效率, 各种抽样方法 (如重要抽样法等) 应运而生, 均尽可能地减少了抽样数。随着抽样技术的改进和计算机硬件水平的提高, 该方法的应用将越来越广^[4]。

响应面法的基本思想是以试验设计为基础, 进行回归分析得到一个响应面方程来模拟真实的极限状态方程, 从而可以较容易地进行可靠度分析。由于该方法的精度是由表达式和插值点的位置确定的, 所以这两方面便成为所要研究的主题。所求得的可靠指标是针对响应面方程而言的, 因此其精度由回归模型拟合匹配程度确定。当随机变量个数较多时, 该法的试验次数就多, 因此必须选择最重要的、对结果影响较大的随机变量, 如不能确定时, 抽样点个数至少应为响应面方程系数的 2 倍^[5]。响应面法的优点是所需模拟次数比 Monte-Carlo 法少, 结

果一般又能满足实际工程精度, 具有较高的效率。

2 结构系统分析模型

2.1 某电厂烟囱简介

某电厂多管式烟囱如图 2 所示, 由一个钢筋混凝土外筒与 2 只钢内筒组成。外筒高度为 229 m, 在其内部布置 2 只高度为 240 m 的钢内筒。钢内筒设计为自承重式结构, 烟囱基础为圆形承台结构。在内、外筒之间, 自下而上设置 7 层钢平台, 其中标高 226 m 处的平台兼作吊装平台。

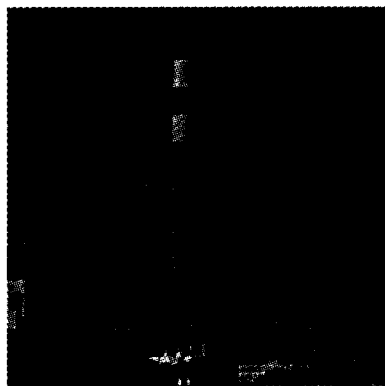


图 2 某电厂多管式烟囱

Fig. 2 The multi-flue chimney of a power plant

该工程采用液压提升倒装法进行钢内筒安装, 基本工作原理是: 将钢内筒分段制作, 先提升首段, 然后对接组焊下段, 提升已倒装好的筒体到对接位置, 继续重复以上步骤, 逐段进行提升倒装, 直至所有筒段安装完毕。由于内筒超出外筒 11 m, 因此吊装时至少应使用 2 层吊点。具体施工顺序如下:

(1) 外筒施工到顶后, 利用施工电动提升平台安装搁置梁;

(2) 以搁置梁作为承力点, 利用卷扬机提升吊装平台梁及其构件;

(3) 安装吊装平台, 在平台梁上布置液压提升装置;

(4) 在筒体上焊接吊点环梁;

(5) 穿钢索, 安装锚具;

(6) 提升钢内筒, 至第 2 吊点处转换吊点后, 继续提升钢内筒;

(7) 提升完毕后, 下降筒体与基础连接;

(8) 检查止晃点, 松弛钢绞线;

(9) 拆除液压提升装置;

(10) 烟道口开孔。

2.2 建立结构系统模型

本文根据结构系统实际的工作状况建立计算模型, 以进行相应的可靠性分析。由上述施工工艺可

知,吊装平台支承在外筒上,液压提升装置固定在吊装平台上,并通过钢索及锚具与吊点环梁相连,环梁被焊接在钢内筒筒体上。因此,本文应用子结构系统组合分析法来进行分析:根据系统层次性特点,把系统整体分成若干个子系统,再根据串连方式估算整体系统的失效概率^[6]。钢筋混凝土外筒、吊装平台、液压提升装置、吊点环梁和钢内筒分别作为一个子系统,整体系统形成一个串连体系,如图 3 所示。

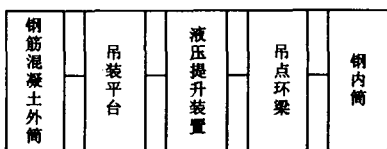


图 3 结构串连体系模型

Fig. 3 System model in series of the structure

这种系统只有当其子系统全部处于正常状态时,系统才可靠,否则系统失效。按前述可靠度计算理论先分别对各个子系统进行可靠性分析,求出其失效概率,然后通过下式求得整体系统的失效概率:

$$P_{fs} = P_r \left(\bigcup_{i=1}^n F_i \right)$$

式中 n ——结构系统的子系统数数目;

F_i ——某一子系统的失效事件。

由于系统实际上属于并联—串联混合形式,所以失效概率偏于保守,从工程安全角度来看,这么做是允许的,且这一方法将有效地减少计算机的存贮空间和分析处理时间。

2.3 结构荷载处理

按照随时间的变异性可将荷载分为永久荷载(恒载)、可变荷载和偶然荷载等。

(1)永久荷载在整个使用期内必然出现,其量值不随环境而变,一般服从正态分布。

(2)可变荷载在整个系统中随空间、时间的变化会有很大的不同,可以用随机过程来描述。但由于缺乏充足的数据,很难预测荷载在未来的变化,用随机过程精确地描述各种荷载有一定难度。结构可靠性分析是以随机变量模型为基础的,因而对于随机过程模型,还需遵循一定的原则采用近似的方法将之描述为随机变量模型^[7]。

(3)偶然荷载的发生概率较低,且结构施工期相对较短,因此可不予考虑。

作用于外筒上的荷载包括结构自重、固定设备自重、风荷载、雪荷载、吊装荷载以及由基础不均匀沉降引起的附加弯矩、日照温度荷载等;吊装平台和吊点环梁主要承受结构自重、固定设备自重、吊装荷载,结构在使用过程中所承受的各种活荷载等,其中吊装荷载主要包括施工吊装设备重量、单只钢内筒

及其附件自重及可能产生的动荷载和施工活载等;钢内筒会伸出外筒 11 m,所以除了结构自重外,它还将受到风荷载、雪荷载的影响。

2.4 结构抗力分析

计算可靠度首先必须确定抗力的随机模型,抗力即结构抵抗外界作用的能力,如结构的承载力、刚度等,可以看作是随机变量。引起结构抗力的不确定性主要包括:

(1)结构材料性能的不确定性:材料强度和弹性模量的变异等。

(2)结构几何参数的不确定性:截面几何特征、截面尺寸。

(3)结构计算模式的不确定性:所用近似方法、本构关系等。

由于这些因素都是随机变量,所以抗力通常表现为多元随机变量函数。要直接得到抗力函数很困难,故本文将抗力作为一个综合的随机变量来考虑。在实际应用中,可以近似地认为抗力服从对数正态分布。

3 基于 ANSYS 的可靠性分析

笔者利用面向对象程序设计技术,基于数值模拟方法,针对结构的具体情况编制和设计了 APDL 语言程序进行批处理分析。该程序主要包括数据抽象模块、初始化模块、预处理模块、求解模块、后处理模块、分析模块和输出模块^[8]。基于 ANSYS 进行可靠性分析的流程如图 4 所示。

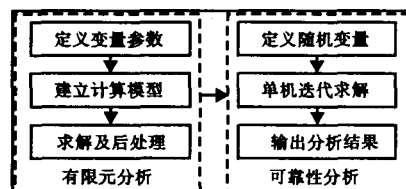


图 4 可靠性分析流程

Fig. 4 Flow chart of reliability analysis

先通过有限元分析得出结构所允许的最大变形与最大应力,然后将其作为输出变量,通过可靠性分析得出各输入变量与输出变量的相关系数,得出结构的失效概率等^[9]。最后进行整体系统概率分析及可靠性评估,计算出相应可靠度指标。

笔者利用 ANSYS 软件对空间结构系统进行有限元模拟,先后进行了下列工作。

吊装平台整体和局部节点的强度、刚度、稳定性校核;吊装平台主梁翼板与腹板焊缝处的应力分析;吊装平台与外筒接触支点处的应力分析;吊点环梁局部疲劳、受力失效分析;吊点环梁与钢内筒连接后

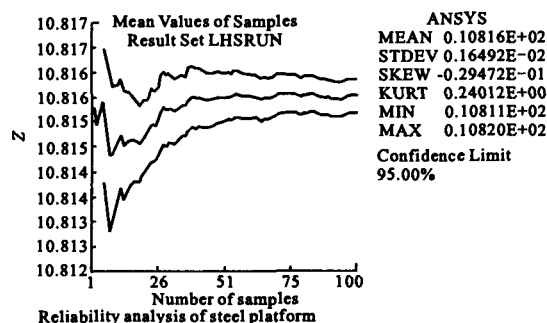


图 6 DMAX 抽样过程显示

Fig. 6 Sample history of DMAX

当失效概率小于 5% 时, 结构可以正常工作, 由图 7 可得结构最大变形小于 10.81 mm 即是可靠的。

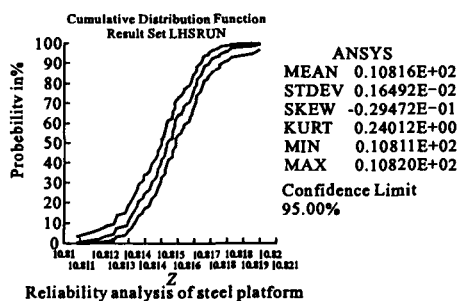


图 7 DMAX 累积分布函数

Fig. 7 Cumulative distribution function of DMAX

(3) DMAX 灵敏度分析如图 8 所示, 由图 8 也可以直观的看到随机输入变量与最大变形的相关程度。与 DMAX 关系最密切的随机变量是弹性模量和荷载这 2 个量, 对 DMAX 影响程度最大的因素是荷载, 弹性模量次之。

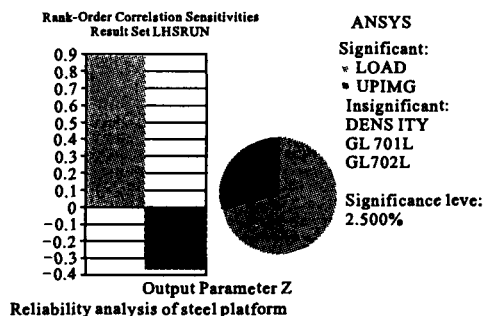


图 8 DMAX 灵敏度相关图

Fig. 8 Correlation sensitivities of DMAX

在进行优化设计时, 从而可只考虑这 2 个参数, 而将其余输入变量作为常量处理。

5 结 语

(1) 在设计时, 将荷载、结构几何尺寸和材料强度性能等均看作某种概率分布的统计量, 运用概率统计法进行分析, 把结构在指定时间内的失效概率限制在预先给定的一个较小范围内, 计算出较高精度的可靠度, 为改进结构提供理论依据, 从而达到结构的可靠性设计, 比常规设计方法更接近实际。

(2) 利用 APDL 语言面向对象程序设计的结构可靠性分析方法, 充分利用了 ANSYS 软件强大的二次开发能力和输出能力, 自编程序工作量小, 可以避免做大量的实验, 从而达到了节约资源的目的; 且减少了模拟时间, 提高了效率, 具有一定的推广价值。

(3) 对吊装平台的分析结果有力地指导了工程实践, 确保了施工安全可靠。吊装钢内筒时, 在 GL701, GL702 梁的跨中设置变形观测点, 用水平仪定期进行观测, 验证钢梁挠度弹性恢复情况。虽然影响平台结构受力状态的因素较多, 但实测结果与计算所得的下沉位移曲线吻合较好, 可见本文所采用的方法的正确性和实用性。

参 考 文 献:

- [1] 李 刚, 许 林, 程耿东. 基于 ANSYS 软件的大型复杂结构可靠度分析[J]. 建筑结构, 2002, 32(5): 58-61.
- [2] 谢桂华. 在役结构可靠性评价及程序实现[D]. 湖北: 长江大学, 2004.
- [3] 任 重. ANSYS 实用分析教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [4] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 邓子胜. 工程结构可靠度设计的研究与应用进展[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2001, 15(3): 19-25.
- [6] 李清富, 高健磊, 乐今朝, 等. 工程结构可靠性原理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [7] 赵国藩, 贡金鑫, 赵尚转. 工程结构生命全过程可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [8] 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS7.0 的结构分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [9] 聂 磊, 钟毓宁, 张业鹏, 等. 基于 ANSYS 的缓冲包装结构可靠性分析方法[J]. 湖北工学院学报, 2002, 17(4): 25-27.
- [10] 叶 勇, 郝艳华, 张昌汉. 基于 ANSYS 的结构可靠性分析[J]. 机械工程与自动化, 2004, (6): 63-65.
- [11] 董 聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 程耿东, 李 刚. 基于功能的结构抗震设计中一些问题的探讨[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 5-11.