

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.006

# 基于 ANSYS Workbench 的胶带硫化罐 吊装机械手动力学研究

潘晓彬, 李永涛, 周 嵘

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**为了研究胶带硫化罐吊装机械手整机的动力学特性,应用有限元分析软件 ANSYS Workbench 建立有限元模型并对其进行静态结构分析、模态分析和谐响应分析,得出了吊装机械手的静态结构应变、前6阶模态和在额定负载作用下的谐响应特性。通过对结果的分析,找出了该机械手Z轴的刚度和伺服电机的运动参数是影响该机械手稳定性的主要因素,为后续优化设计和控制系统设计提供了理论依据和参考。

**关 键 词:**吊装机械手;硫化罐;ANSYS Workbench 软件;有限元

中图分类号:TP241.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)02-0020-04

## Dynamic Research of Tape Vulcanizing Tank Hoisting Manipulator Based on ANSYS Workbench

PAN Xiaobin, LI Yongtao, ZHOU Rong

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** In order to research the whole dynamic of the tape vulcanizing tank hoisting manipulator, its finite element analysis mold was found based on ANSYS Workbench. The static structure analysis, modal analysis and harmonic response analysis were performed on the hoisting manipulator. The static stress, first six natural frequencies and harmonic response of the hoisting manipulator were obtained. The frail parts that impact the dynamics of the tape vulcanizing mold hoisting manipulator are the Z-axis' stiffness and the characters of the servo motors. Furthermore, the results provide a theoretical basis and reference for the hoisting manipulator's later optimization and control system design.

**Key words:** hoisting manipulator; vulcanizing tank; ANSYS Workbench; finite element analysis (FEA)

胶带硫化罐吊装机械手是一种为实现胶带硫化车间自动化联动生产而设计的自动化设备。在传统的胶带硫化罐硫化生产中<sup>[1]</sup>,胶带硫化模具的入罐和出罐是依靠人工操作吊运设备完成的。这种操作方式效率低、精度差、工人劳动强度大、不安全,而且这种吊装方式也不能与自动化的硫化设备相匹配,阻碍了硫化车间联动生产的实现,严重影响胶带硫化生产的效率<sup>[2]</sup>。鉴于此,文章在分析胶带硫化生产的工艺过程和参考现有吊装设备的基础上,设计出了一种胶带硫化罐吊装机械手,如图1所示。

吊装机械手的静力学和动力学特性直接关系到机

械手的工作稳定性<sup>[3]</sup>。因此,利用 Pro/E 建立了胶带硫化罐吊装机械手的三维模型并利用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对胶带硫化罐吊装机械手进行了有限元静力学和动力学分析。通过对其进行静力学、模态和谐响应等方面的分析,得到了所设计的胶带硫化罐吊装机械手的静、动态特性,进而为吊装机械手结构的优化、控制系统参数设计、电气元件型号的选择提供了参考和依据。

### 1 胶带硫化罐吊装机械手结构设计和动作分析

胶带硫化生产的过程包括以下几步<sup>[4]</sup>:胶带硫化模具装带、吊装入罐、硫化、吊装出罐、模具冷却和卸

收稿日期:2013-09-24;修回日期:2013-11-10

作者简介:潘晓彬(1973),男,湖北浠水人,副教授,博士,主要研究方向为机电测控。E-mail:panxiaobin@nbu.edu.cn

带。其中,胶带硫化模具的装带和卸带由工人手动完成,其余由吊装设备和硫化罐完成<sup>[5]</sup>。根据胶带硫化生产实际工艺过程,设计出的胶带硫化罐吊装机械手如图 1 所示。其结构主要包括:龙门式机架、Y 向运行大车、升降 Z 轴和末端执行机构等 4 部分。

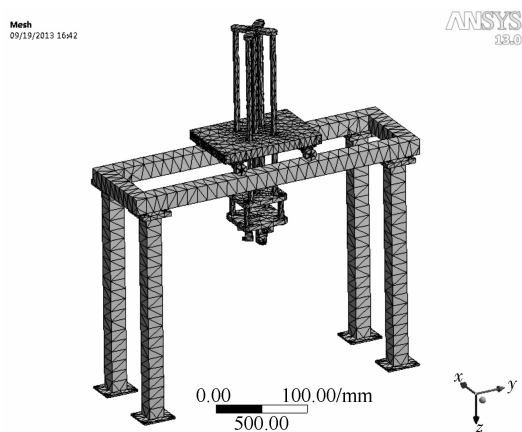


图 1 吊装机械手结构及网格划分结果

Figure 1 Hoisting manipulator's structure and meshing results

龙门式机架结构稳定、承载能力强<sup>[6]</sup>;Y 向运行大车通过伺服电机和减速器驱动齿轮转动,齿轮与安装在龙门式框架上的齿条啮合;齿轮齿条承载力大,传动精度较高,可达 0.1 mm,并可以无限长度对接延续,传动速度可以很高,运动速度  $> 2$  m/s;Z 轴采用伺服电机通过同步带驱动旋转螺母式滚珠丝杠副实现升降,进而实现末端执行机构的升降;4 根导向柱可以起到机械手在运行过程中防止末端执行机构的摆动,提高定位精度和刚度,同时还可用作末端执行机构气路管道的通道;末端执行机构通过气缸的伸缩实现对胶带硫化模具的自动夹紧与释放。

为了提高胶带硫化的生产率,该机械手采用硫化罐每次硫化装入两副硫化模具;两副硫化模具上下叠放,中间用隔板隔开。

该胶带硫化罐吊装机械手主要技术参数如下:

- 1) 运动行程—Y 轴 3 000 mm,Z 轴 1 800 mm;
- 2) 负载重量—100 kg;
- 3) 最大运行速度—Y 轴 67.5 m/min,Z 轴 42 m/min;
- 4) 最大加速度—Y 轴  $2 \text{ m/s}^2$ ,Z 轴  $1 \text{ m/s}^2$ ;
- 5) 重复定位精度—Y 轴/Z 轴  $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

## 2 胶带硫化罐吊装机械手有限元分析

### 2.1 建立有限元模型

在进行有限元分析之前,有必要对吊装机械手的

三维模型进行简化以提高运算速度、减少计算时间<sup>[7-8]</sup>:

1) 删除小尺寸圆角、倒角和螺栓孔等特征,通过 ANSYS Workbench 与三维设计软件 Pro/E 之间转换接口将吊装机械手三维模型导入 ANSYS Workbench 里;

2) 对模型进行材料定义,设计中机架采用结构钢,其弹性模量  $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.3$ ,密度  $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ ;丝杠采用不锈钢材质弹性模量  $E = 1.93 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.31$ ,密度  $\rho = 7.75 \text{ g/cm}^3$ ;

3) 将作为驱动部件的电机、减速器和气缸在网格划分的时候作为集中质量进行处理<sup>[9]</sup>,只是按照其实际的连接方式连接在机械手的各个柔性臂上,以此简化模型、提高运算速度;

4) 接触设置和网格划分:将接触部件间分别进行接触设置,并对设置好的模型进行网格划分。最后得到如图 1 所示的胶带硫化罐吊装机械手的有限元模型,共有 117 317 个节点和 70 555 个单元。

### 2.2 机械手静态特性分析

胶带硫化罐吊装机械手的运动性能取决于机械手的静、动态特性<sup>[10-11]</sup>。首先对机械手整机进行静力学分析:为模型设置竖直方向的重力,给吊装机械手的末端执行器施加 1 000 N 的负载载荷并将四立柱底面固定。由结构力学知,吊装机械手 Y 向大车运行至 Y 轴中间位置时龙门式机架变形最大。选用求解器进行求解得吊装机械手的变形图和结果分别如图 2 和表 1 所示。

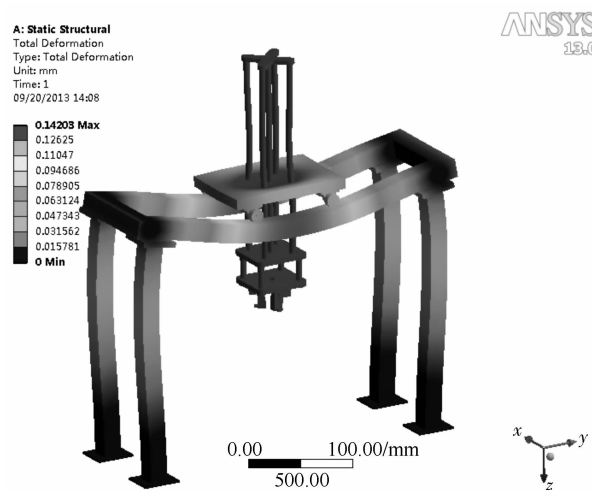


图 2 吊装机械手静态结构分析图

Figure 2 Hoisting manipulator's static structure chart

表1 吊装机械手静态结构分析结果  
Table 1 Results of the hoisting manipulator's static structure analysis

| 类别 | 最大变形量/ $\mu\text{m}$ |
|----|----------------------|
| X向 | 9.68                 |
| Y向 | 39.09                |
| Z向 | 141.99               |

由分析结果可知,吊装机械手在Z向变形量最大,其次是Y向变形。产生Z向变形的原因是Z轴丝杠在负载的拉力作用下伸长,Y向变形是由于龙门式机架发生弯曲。可见吊装机械手升降Z轴的抗拉强度和龙门式机架的刚度是影响静态变形的主要原因。

### 2.3 吊装机械手模态分析

对吊装机械手的整机进行模态分析可以确定机械手的固有频率和振型。固有频率与机械手所受的外界载荷和自身的运动状态无关,同时模态分析也是机械手进行谐响应分析和瞬态动力学分析的基础。分析计算机械手前六阶自由振动振型可以很好地表现出机械手的动态特性,其前六阶振型图和固有频率如图3和表2所示。

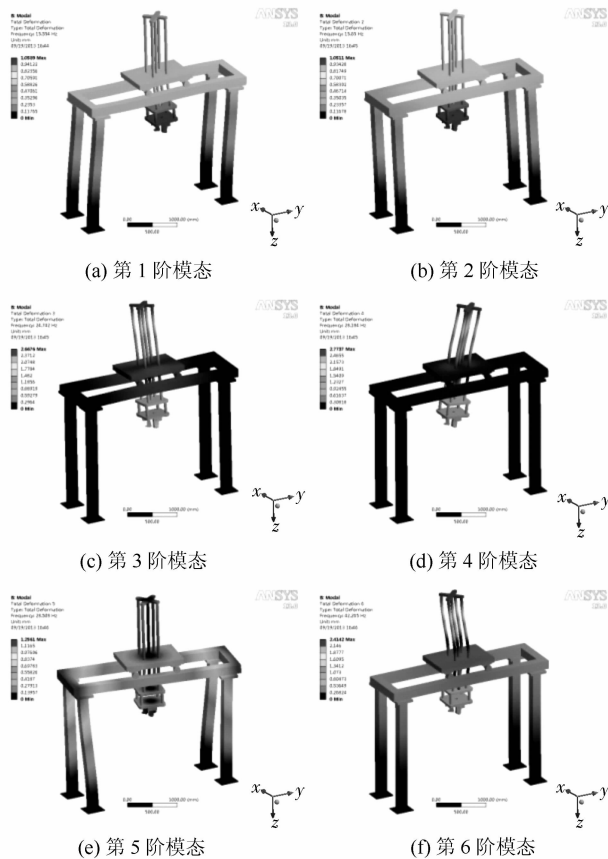


图3 吊装机械手模态分析图

Figure 3 Hoisting manipulator's modal analysis charts

表2 吊装机械手前6阶固有频率  
Table 2 Hoisting manipulator's first 6 natural frequency

| 模态 | 频率/Hz  | 模态 | 频率/Hz  |
|----|--------|----|--------|
| 1  | 15.554 | 4  | 28.184 |
| 2  | 15.650 | 5  | 28.508 |
| 3  | 24.742 | 6  | 42.265 |

由以上吊装机械手的模态振型图可知,吊装机械手的第1阶模态为Y轴方向的水平振动,第2阶模态为X轴方向的水平振动。Y轴方向和X轴方向的最大水平振动位移分别为1.058 9 mm和1.051 1 mm,且最大变形都发生在吊装机械手的末端执行机构的位置。吊装机械手的第3阶模态为绕Y轴方向的转动振动,最大变形量为2.667 6 mm;第4阶模态为绕X轴方向的转动振动,最大变形量为2.773 7 mm;最大变形发生在吊装机械手Z轴的上端位置。吊装机械手的第5阶模态为绕Z轴方向的转动振动,最大位移发生在龙门式机架横向的两端位置,其最大变形为1.256 1 mm;第6阶模态为吊装机械手龙门式机架与Z轴在X轴方向的相对振动,最大变形发生在Z轴的上端位置,最大变形量为2.414 2 mm。

吊装机械手在振动时,最大变形发生在Z轴。因此,在胶带硫化罐吊装机械手进行优化时一定要注意Z轴的刚度和起升的高度。

### 2.4 吊装机械手谐响应分析

吊装机械手在作业时,各阶模态振型对其振动作用的大小不同<sup>[12]</sup>。对吊装机械手进行谐响应分析可以更清楚地看出吊装机械手在动载荷作用下的振动情况。

谐响应分析的运动方程为

$$(-\omega^2[\mathbf{M}] + i\omega[\mathbf{C}] + [\mathbf{K}])(\{\varphi_1\} + i\{\varphi_2\}) = (\{F_1\} + i\{F_2\})$$

其中:[K]为刚度矩阵、[M]为质量矩阵是定值、[C]为阻尼矩阵、 $F_1$ 为激振力的实部、 $F_2$ 为激振力的虚部、 $i$ 为虚数单位、 $\omega$ 为激振频率、 $\varphi_1$ 为位移幅值的实部、 $\varphi_2$ 为位移幅值的虚部。

由于吊装机械手的负载为1 000 N,设定激振力是振幅为1 000 N的正弦激励;根据机械手的实际工况,激振力的频率变化范围是0 ~ 60 Hz。在ANSYS Workbench中进行相应的设定之后进行求解,得到吊装机械手Z轴末端执行机构的振动情况,其最大变形在Y轴方向,如图4所示。

由图可知,外载荷频率在28 Hz左右时,吊装机械手末端执行机构在Y轴方向的振动位移达到最大值

38.354  $\mu\text{m}$ ,此时与吊装机械手的4、5阶模态相近。因此,吊装机械手的控制系统在设计和控制参数确定时应作合理选择,以避免共振现象发生而影响机械手的定位精度。

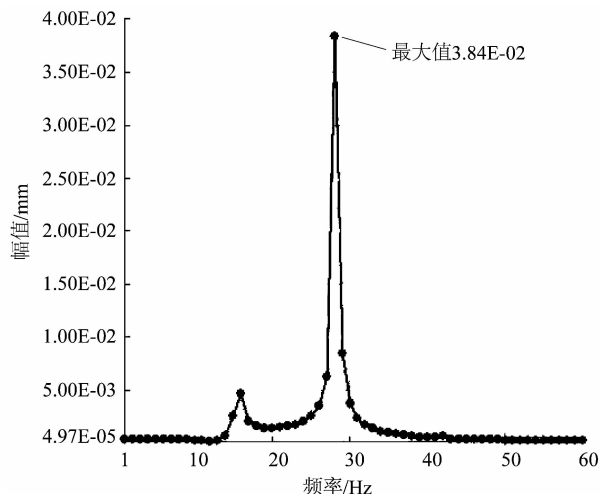


图4 吊装机械手Y轴谐响应振幅图

Figure 4 Hoisting manipulator's Y-axis harmonic response analysis chart

### 3 结论

利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对胶带硫化罐吊装机械手进行了有限元分析,对所设计的胶带硫化罐吊装机械手的静、动态特性有了掌握。

1) 对胶带硫化罐吊装机械手进行静力学结构分析,得到了吊装机械手整机在额定负载作用下的变形:Z轴在负载作用下变形相对较大,应对Z轴丝杠的材质进行合理选择;龙门式机架可以通过设置加强筋以增强刚度,以减小变形。

2) 通过对吊装机械手的模态分析知吊装机械手的Z轴是变形发生的主要方向,吊装机械手在作业时

必须合理设置Z轴的运行速度、加速度和长度。

3) 通过谐响应分析得出吊装机械手在外载荷频率为28 Hz时,即接近机械手的第4、5阶模态时吊装机械手的振动幅度最大。因此,在吊装机械手工作时应进行合理的运动参数设置以避免共振的发生。

文中所得结论为胶带硫化罐吊装机械手的结构优化设计、控制系统控制参数的确定等提供了理论依据和参考。

### 参考文献:

- [1] LABBAN A E, MOUSSEAU P, DETERRE R, et al. Temperature measurement and control within moulded rubber during vulcanization process [J]. Measurement, 2009, 42(6): 916-926.
- [2] 杨清芝. 现代橡胶工艺学[M]. 北京: 中国石油出版社, 1997: 654-683.
- [3] 张广鹏, 方英武, 田忠强, 等. 工业机器人整机结构方案的动态性能评价[J]. 西安理工大学学报, 2004, 20(1): 5-9.
- [4] 翁国文. 橡胶硫化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 杨日俊. 一种自动硫化机及其硫化方法: 中国, 201210086422. 6 [P]. 2012-05-15.
- [6] 丁长春, 殷国富, 方辉, 等. 龙门加工中心立柱静力学分析与结构优化设计方法[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 3-4.
- [7] 凌桂龙, 丁金滨, 温正. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [8] 马静敏, 范云霄. 基于 ANSYS Workbench 的太阳能热水器支架优化设计[J]. 轻工机械, 2011, 29(5): 97-101.
- [9] 田东升, 胡明, 邹平, 等. 基于 ANSYS 的六自由度工业机器人模态分析[J]. 机械与电子, 2009(2): 59-62.
- [10] 何洋, 项基, 彭勇刚. 基于 ARM9 和嵌入式 Linux 的注塑机械手上位机控制器[J]. 机电工程, 2012, 29(3): 297-301.
- [11] 丛明, 石会立, 宋鸿升, 等. 桁架机械手动态特性的有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(6): 19-22.
- [12] 徐先勇, 崇凯, 严小林, 等. 基于 ANSYS Workbench 的内螺纹磨削中心整机动态特性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(12): 23-25.

### [信息·资讯]

#### · 行业简讯 ·

## 高效、精巧、灵活的最新一代减速电动机 SIMOGEAR

SIMOGEAR 融合了西门子最新设计理念,以及超过一百年生产经验的电动机和变速器的最新一代减速电动机。与同类传统产品相比, SIMOGEAR 的创新技术带来了许多亮点,并且能够最大程度为用户创造价值。

西门子的 SIMOGEAR 系列产品包括 4 种类型,即同轴式减速电动机、平行轴式减速电动机、蜗轮蜗杆减速电动机及伞齿轮式减速电动机,被广泛应用于汽车、机场、物流、烟草和食品饮料等行业,尤其是适用于输送技术领域。

与同类传统产品相比, SIMOGEAR 的创新技术带来了许多亮点: (1) 高效; (2) 结构更紧凑,重量更轻; (3) 高度的模块化设计。

除了以上产品特点, SIMOGEAR 还具有强大的兼容性。其安装尺寸完全符合市场标准,转矩分级更加精细,可以为用户提供更加精准的产品,避免设计裕量过大产生的浪费。另外,具有西门子标准接口的 SIMOGEAR 可以完美地融入西门子全集成驱动链,与西门子变频器、PLC 及控制系统实现无缝链接,通过完整的解决方案,能够给用户带来最大的附加价值。

(刘 钢)