

# CNG 储气井检测技术与系统的设计与研究

Design and Research on the Detection Technology and System  
for CNG Storage Well

何庆中 张明 王志鹏

(四川理工学院机械工程学院,四川 自贡 643000)

**摘要:** 针对变径管井因长期使用引起疲劳破坏等现象,提出了一种基于直进式推进的无损检测系统的设计方案。采用三维建模软件 Solidworks 对所设计的零部件进行实体建模,设计了检测系统的机械机构;同时,通过 Solidworks Simulation 对检测系统关键零部件进行了有限元分析。验证结果表明,该检测系统在压缩天然气储气井中具有运行平稳可靠、驱动效率高、检测精度高及成本低的优点。

**关键词:** 检测系统 无损检测 管井机器人 直进式推进 有限元分析 Solidworks

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

**Abstract:** Aiming at the fatigue damage of the tubewell with variable diameter because of long term operation, the design strategy of nondestructive detection system based on straight forward is proposed. Solid modeling is conducted by adopting 3D modeling software Solidworks and the mechanical mechanism of the detection system is designed and developed. In addition, through Solidworks Simulation, the finite element analysis for critical parts of the system is accomplished. The verification result indicates that this system operates stably and reliably in compressed natural gas (CNG) storage tubewell, and features advantages of high driving efficiency and detection accuracy, but low cost.

**Keywords:** Detecting system Nondestructive detection Tubewell robot Straight forward Finite element analysis Solidworks

## 0 引言

压缩天然气(compressed natural gas,CNG)储气井作为一种新的储气装置而被广泛应用。由于管井内的工作环境恶劣,储气井在长久使用后易出现腐蚀、疲劳等破坏现象而最终导致破损,引起泄漏等事故<sup>[1]</sup>。因此,管井系统需要定期进行检测、诊断、清理和维护。目前,无损检测技术已成为管井检测的一项重要技术,尤其是管井的在役和在线勘查也成了管井无损检测技术应用发展的重要方向之一<sup>[2]</sup>。《中华人民共和国石油天然气行业标准》(高压气地下储气井 SY/T 6535-2002)规定,储气井全面检测周期为6 a<sup>[3]</sup>。目前已有上百口储气井使用期超过6 a,因此,对 CNG 站储气井进行安全检测显得尤为必要。

## 1 管井检测机器人的设计

### 1.1 检测机器人总体概述

管井检测机器人系统由移动驱动器、万向节、检测

动力头、储液筒和传感器自适应头组成。它集机电液与信号传输技术于一体,实现管井内自适应定位的稳定回转驱动,结构新颖。在内窥探头回转检测的同时,采用一体化集成设计技术,实现介质耦合以及动力电源和传输信号的有效回转转接。在管境内实现的螺旋式扫描检测技术,攻克了现行管井内窥检测存在检测盲区的难题。回转驱动系统具有串行多级型化对接能力,与移动驱动系统对接可实现对非直管井内窥检测。该机器人在操作人员的程序控制下可对管道进行一系列的检测和诊断。因此,本文所设计、研发的机器人是一种较为理想的管井自动化检测设备。

### 1.2 机器人的结构组成

本文在分析与研究了现有管井检测机器人的基础上,结合设计要求,提出了一种融合直进式推进、管井内探头回转驱动、无损检测、无线控制以及轮式管内自适应定位等技术,适合管径为 200 ~ 260 mm 的管井检测机器人的设计方案。同时对管井检测机器人的传动机构、无线控制模块、检测设备的匀速提升装置以及驱动动力组等进行了设计和开发。其中,驱动动力组包括检测工作组和电容储备组,这些机构组成了管井检测机器人的总体结构。

该机器人的驱动动力组具备导向和管内自适应定

国家 863 计划基金资助项目(编号:2008AA11A134)。

修改稿收到日期:2013-01-09。

第一作者何庆中(1962-),男,2003年毕业于重庆大学机械电子工程专业,获硕士学位,教授;主要从事机电一体化方面的研究。

位的能力,它由平行四边形的弹簧自适应定位机构、电机、蜗轮蜗杆、电源和驱动控制模块所组成。

检测工作组是由检测回转动力装置、电源和信号回转转接机构以及检测传感器安装自适应机构组成,它同样具备导向和管内自适应定位的能力。

耦合液储备组的作用是用来储备耦合液,耦合液从一端进入筒体,在筒体内增压后从另一端输出,供给到超声波传感器,用于对管井壁进行检测。

为使管井检测机器人可以平稳可靠地运行,移动载体不发生侧翻,驱动关节、检测回转动力装置机构以及耦合液储液机构采用三组十二轮周向均布,检测传感器安装自适应机构则采用三组六轮周向均布。

移动驱动体机构采用的是管井内部导向、平行四边形弹簧自适应定位机构、多电机并行驱动的轮式驱动移动直进式推进方式。传感器自适应头可以在检测回转动力装置的带动下实现 360° 的转动,并且在管井内实现了螺旋式扫描检测,这种技术攻克了现行管井内窥检测存在检测盲区的难题。

由于管井检测机器人总体结构应具有一定的柔性和管内适应能力,因此,各个工作组之间都是由万向节连接的。

机器人的控制模块由远程遥控 PTR8000 芯片和 AVR88 单片机芯片组成。远程遥控 PTR8000 芯片对无线信息进行传递,AVR88 单片机芯片对管井检测机器人各关节动作的信号加以解析及控制。运载体结构由直进式推进驱动体、螺旋推进式检测工作体、无线控制模块以及导向式模块组成。

### 1.3 主要技术性能指标

管井检测机器人的主要技术性能指标为:首先是最大检测深度 >260 m,井筒直径  $D > 175$  mm;其次,检测的速度 >30 m/h,这样可以实现量化无损检测;再次,腐蚀区域和腐蚀层厚度的检测误差  $\leq 0.2$  mm,并自动记录腐蚀区域的图象,当腐蚀深度 >5 mm 时,就会报警;最后,金属井筒厚度的检测误差  $\leq 0.4$  mm。系统具有分析预警、现场标定、数据共享和实时信息查询等功能。数据传输到系统后可直接得出是否安全的结论。

管井检测机器人还应满足以下几个条件。

① 检测要方便、直观、高效;

② 在满足工作要求的前提下,管井检测机器人的成本要经济适用;

③ 在设计过程中,必须对移动载体、数据采集及传输系统和信号传输系统进行详细的研究和模拟,以便适应不同的工作环境;

④ 硬件技术应成熟,系统搭建简单,可靠性高;

⑤ 软件开发工具和资源要丰富,便于软件的开发和算法的实现;

⑥ 在实际工作中,对信号采用无线传输,这样可以避免信号失真,确保数据传输质量,提高检测系统的处理能力;

⑦ 检测机器人驱动方式应易于实现。

## 2 模型的建立及分析

### 2.1 三维模型的建立

管井检测机器人是由四个带有万向节的关节串联而成的,其刚度的大小就在连接检测动力筒的那一节十字头上。在实际工作中,如检测动力筒中电机的转速大于移动驱动器的电机转速,那么电机就会产生振动循环功率,这样会使电机与机器人发生共振而使机器人损坏。因此,就必须对机器人中的关键零部件进行建模与分析。利用三维建模软件 Solidworks 建立直进推进式管井检测机器人的三维模型。其中,万向节的好坏直接影响机器人的检测精度,所以万向节的设计十分关键,而十字头是万向节的核心,因此,用 Solidworks 建立了十字头的三维模型,再利用 Solidworks Simulation 对其进行有限元分析。

### 2.2 有限元分析

Solidworks Simulation 有限元分析有静态分析和动态分析两种,其主要区别在于静态分析是在机械构件上施加载荷,而动态分析则不需要。Solidworks Simulation 有限元分析的一般流程为:从三维实体建模模块进入有限元分析模块→在形体上施加约束→在形体上施加载荷→计算(包括网格划分),解方程和生成应力应变结果→分析计算结果,单元网格、应力或变形显示→对重点区域细化网格、重新计算。

### 2.3 机器人主要零部件分析

在串联结构的管井检测机器人中,万向节起到了连接各关节以及传递拉力和扭矩的作用<sup>[4]</sup>。所以在既定设计尺寸下,万向节能否稳定可靠地完成预定工作,关键取决于相应的静态分析。

本文采用 Solidworks Simulation 有限元分析方法的流程如图 1 所示<sup>[5-7]</sup>。

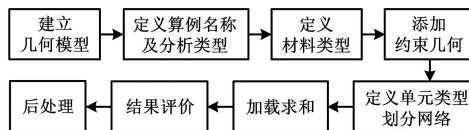


图 1 Solidworks Simulation 有限元分析流程

Fig. 1 Process of the finite element analysis through Solidworks Simulation

Solidworks 对万向节建立了三维模型后,在 Solidworks 中依次点击:工具→插件→Solidworks Simulation,即可激活 Solidworks Simulation 插件。在使用过程中点击新建运动算例按钮,在下拉菜单中选择 Simulation 分析即可。

在运用 Solidworks Simulation 系统分析过程中,对所分析零部件进行系统默认网格划分。在对十字头进行网格划分的操作中,不仅要考虑到实际工况和几何特征,还要考虑计算机的内存大小和计算结果。在划分网格时,在只要求实体几何变形的情况下,网格数越少越好。Solidworks Simulation 默认的网格单元是中等密度,网格设置可以使离散化误差保持在可接受范围内,同时分析时间短。系统分析完成后可以根据需要选取所用的显示模式<sup>[8-10]</sup>。

十字节的实体网格如图 2 所示。

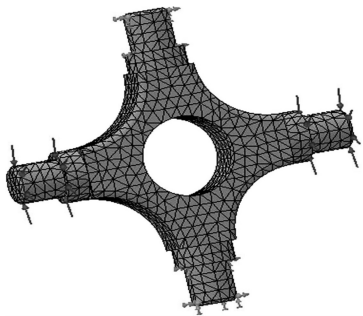


图 2 十字节的实体网格图

Fig. 2 The physical grid of universal joint

将十字头下端固定住,并在十字头的左右两端的上部施加与实际工况一致的载荷<sup>[11-13]</sup>。对所建立的有限元分析模型进行计算后,可以在结果分析中显示对应的应力应变图和相应的应力应变值。

由计算可以得出:万向节所受最大应力为 16.57 MPa,发生在十字连接头的连接处;最大位移为 0.028 84 mm,发生在十字连接头活动端面的圆周上。十字节应力图如图 3 所示。

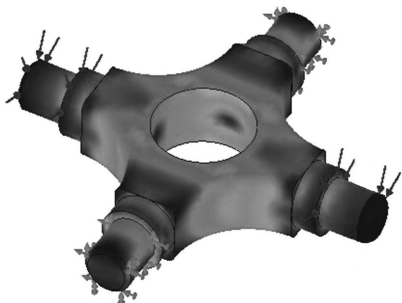


图 3 十字节的应力图

Fig. 3 Stress diagram of universal joint

若想要缩小仿真模拟与实际的误差,得到精确的数据资料,仅靠系统默认网格划分是不够的。这就需要手动划分网格,调整并细化零件关键受力部位网格划分与大小。完成网格细分后,对需要分析零件重新进行计算,可进一步调整分析的模型应力应变的显示方式,以便进行观察及局部放大。

完成模型分析后,可调用 Solidworks 软件中的误差估算模块,对多次结果分析数据进行比较,并显示结果。经手动细化网格后,计算的估计误差从 29.1% 下降到了 25.3%。

### 3 结束语

本文提出了应用于管径为 200 ~ 260 mm 的变径 CNG 储气井管井检测技术与系统的设计方案,并运用 Solidworks 三维软件对所设计零部件进行了三维建模和有限元分析,从静力学角度对整机设计的可行性进行了校验。通过对虚拟样机模型的设计与校核运算,极大地缩短了设计周期,提高了管井机器人的可靠性。

#### 参考文献

- [1] 徐小云,颜国正,鄢波.一种新型管道检测机器人系统[J].上海交通大学学报:自然科学版,2004,38(8):1324-1327.
- [2] 徐小云,颜国正,阎小雪.油/气管道检测机器人[J].上海交通大学学报:自然科学版,2003,37(11):1653-1656.
- [3] 米智楠,龚振邦,钱晋武.一种无损检测的新型机器人[J].无损检测,2000,22(11):485-491.
- [4] 向忠祥,杨国清.城市排水管道自动清淤检测机器人设想方案[J].中国市政工程,1998(4):40-45.
- [5] Koganei K. 8th intelligent ground vehicle competition vehicle design competition written report [J]. Systems and Control Engineering Department, 2000(8):1-14.
- [6] 方彦军,程继红.检测技术与系统[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [7] 安永东.水下船体表面清刷机器人检测系统[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [8] 樊三新,吴琼,谭铁山,等.小口径管道腐蚀状况无损检测[J].无损检测,1999(2):16-18.
- [9] 熊有伦.机器人技术基础[M].武汉:华中理工大学出版社,1999.
- [10] 文怀海,佟仕忠,付贵增,等.立式金属罐容积检定爬壁机器人的研制[J].自动化仪表,2007,28(8):45-47.
- [11] Halfpenny D R, Kane D M. A quantitative analysis of single pulse ultraviolet dry laser cleaning[J]. Applied Physics, 1999, 86(12): 6642-6645.
- [12] Suzumori K, Miyagawa T, Kimura M, et al. Micro inspection robot for inpipes[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 1999, 4(3): 285-298.
- [13] 张艳玲.管井检测机器人的设计与开发[D].自贡:四川理工学院,2012:1-7.