

基于 ZigBee 的智能压差式液体密度计的设计与实现

杨云涛, 向 忠, 吴学进, 胡旭东

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 传统的密度计常采用的 4~20 mA 电流输出或有线 RS232/485 串口通讯距离较短, 网络节点数和前期布线与后期系统升级维护过程繁琐。文中设计了一种带有 ZigBee 无线网络通讯功能的智能压差式液体密度计, 采用两个独立的压力传感器取代传统的压力探头的测量方案和引入 ZigBee 无线网络功能, 使得密度计具有通讯距离远、成本低、实时性强、网络节点数多等特点。

关键词: 压差式密度计; ZigBee; MSP430F149

中图分类号: TH715.2 **文献标志码:** A

0 引 言

目前, 我国石油化工、造纸、食品加工、纺织印染等行业测量液体介质的密度多采用压差式液体密度计。传统的压差式液体密度计的压力感应部分由两个压力探头和一个敏感元件组成, 敏感元件多为电容式的。王海群等^[1]设计了一种电容式差压变送器用于重介选煤过程中介质密度的检测, 利用经验公式补偿后精度可达 0.2 级, 并输出 4~20 mA 电流信号, 供上位机使用, 但这种密度计测量时需要将导管中充满硅油来进行压力传导, 可靠性不高, 导管中的空气难以完全排除, 残留的空气对测量精度有影响; 管文剑等^[2]采用 CCPS32 陶瓷电容压力传感器取代电容式压差传感器, 在测量钻井泥浆密度时精度可达 0.2 级, 输出 4~20 mA。这种有线传输距离较短, 网络节点数少和前期布线与后期系统升级维护过程繁琐; 董方武^[3]将 ZigBee 网络应用在电化学碱液浓度传感器中, 在恶劣的工业环境中成功取代有线传输方式。

针对上述问题, 本文提出了一种带有 ZigBee 无线网络通讯功能的智能压差式液体密度计的设计方案。ZigBee 无线传感网络省去了铺设各种通信线

路带来的麻烦, 支持节点达 65535, 提高了通讯的可靠性, 用户只需要在无线接收端通过串口的方式与 PLC 或者其他控制器相连即可得到密度信号。

1 设计原理

根据流体静力学原理, 在流速恒定的液体中, 垂直高度的两点间的压强差为一定值。假定在垂直管道上高度分别为 H_1 、 H_2 点处测得的压力为 P_1 、 P_2 , 根据流体静力学原理可得管道内液体密度可表达成:

$$P_1 - P_2 = \rho g (H_1 - H_2) \quad (1)$$

其中 ρ 为待测量液体密度, g 为重力加速度。令 $H_1 - H_2 = h$, $P_1 - P_2 = \Delta P$, 则待测液体密度:

$$\rho = \frac{\Delta P}{gh} \quad (2)$$

2 系统硬件设计

系统总体设计方案如图 1 所示。硬件系统主要包括 Keller10LD 表压 20 kPa 扩散硅 OEM 压力敏感芯体; 信号调理电路 AD7794 采集垂直管道的高低压力信号; 通过单片机与一线制温度传感器 DS18B20 测量环境温度, 用于压力传感器的温度补

收稿日期: 2013-04-24

基金项目: 浙江理工大学科研启动基金(1003836-Y); 浙江省科技厅公益性项目(2012C21011)

作者简介: 杨云涛(1986-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 主要从事自动化仪表方面的研究。

通信作者: 向 忠, E-mail: xz@zstu.edu.cn

偿; ZigBee 模块 CC2531 组建 ZigBee 无线网络, 传感节点加入网络后, 将采集的温度、密度信号用远程无线发送到无线接收模块; RS485 接口电路为预留接口, 可在短距离传输时使用; 两级稳压的电源处理方案将既可以提高供电效率, 又可满足纹波电压小的要求; EEPROM 以及按键实现密度计的自动调零功能。

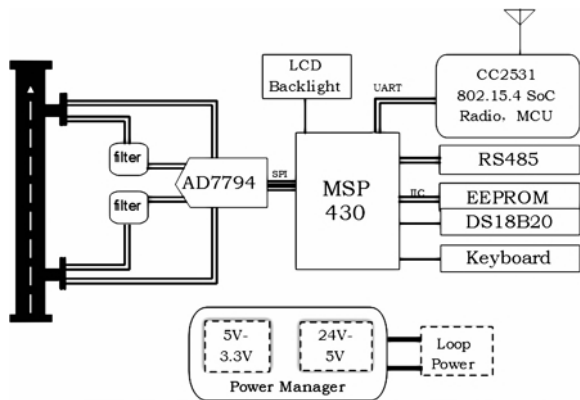


图1 系统硬件总体结构

AD7794 是内部自带低噪声可编程增益仪表放大器的低功耗、低噪声, 完整模拟前端^[4]。AD7794 开启缓冲工作模式, 以适应模拟输入引脚上的 R-C 滤波器网络的阻抗。IOUT1 和 IOUT2 引脚给两个压力传感器提供两路 1 mA 恒流源, 采样的参考电压采用内部 1.17 V 的基准电压。SCLK, DIN, DOUT/RDY, CS 引脚为 SPI 串行接口, RDY, CS 为低电平有效。

根据 AD7794 内部仪表放大器的增益和模拟输入范围的关系, 当下方的压力芯体输出电压超过 9.14 mV 时, 密度计将达到满量程。由密度公式计算得到密度计的测量范围是 0~2 g/cm³。

ZigBee 模块选用 TI 公司最新一代的 ZigBee 无线射频单片机 CC2531, 其与 MSP430F149 的 USART1 模块 (P3.7 和 P3.6) 相连的引脚是 UART1 模块的收发引脚 P1.6 和 P1.7。

将系统的电源采用模拟电源和数字电源分离的方式设计。采用了线性稳压器和开关式稳压器相结合的方法^[5]实现将工业现场提供的 24 V 常见电源变成 3.3 V 低电压电源。

在定期地给密度计调零时, 测得新的零点漂移值刷新旧值^[6]。单片机在上电复位后将 EEPROM 中的零点漂移值读出, 每测到一个数据都减去零点补偿值即可。这样就可以实时地更新零点漂移值, 实现自动校准零位。LCD 选用 1602 液晶将作为温度、电压、密度测量数据的实时显示终端。

3 压差式液体密度计的温度补偿

3.1 压力信号的温度补偿

压差式密度计使用了两个独立的压力传感器来取代传统的压力探头, 在理想状态下, 由压力传感器基本原理可知, 电压输出信号与外界施加的压力是成线性关系的, 但是存在环境温度的影响, 压力传感器的输出电压会随着温度漂移。密度计量程 0~2 g/cm³, 根据测量管尺寸: 下方压力探头距液面高度为 0.7 m, 如图 2 为瑞士 Keller10LD 扩散硅 OEM 压力芯体输出特性曲线。

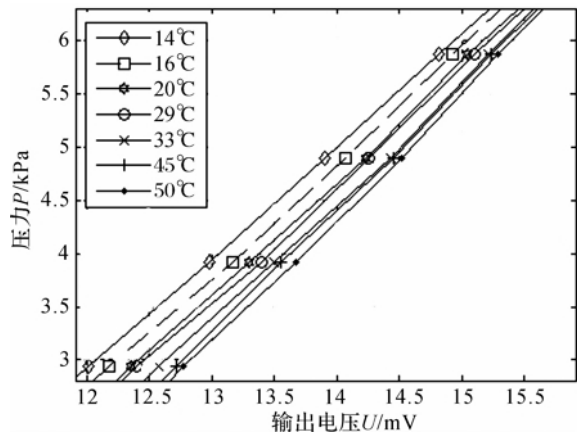


图2 瑞士 Keller10LD 扩散硅 OEM 压力芯体输出特性曲线

压力芯体一般是在 n 个标准温度 T , m 个标准压力 P_i ($i=1, 2, \dots, m$) 下进行标定^[7], 得到 $n \times m$ 组标定点, 基于标定过程得到的压力传感器的实测数据 (T, P_i, U_i) , 其中 U_i 为与被测压力对应的输出电压, 利用最小二乘法和拉格朗日插值相结合的算法求得三者之间的函数关系如下:

$$P=f(U, T) \quad (3)$$

压力芯体的温度补偿算法实现步骤^[8-9]如下:

a) 固定温度 T 不变, 对压力 P 和电压 U 进行曲线拟合, 得到两者关系曲线: $P=f(U)$ 。 n 组温度标定点将会得到 n 条这样的曲线, 二次曲线拟合可通过在 MATLAB 中编程实现;

b) 实际测量过程中, 将测得的电压 U 分别代入 $P=f(U)$ 中, 可以求出在 n 组标定温度下的压力值;

c) 对上述压力值和标定温度进行拉格朗日插值, 得到压力 P 和温度 T 、电压 U 的关系曲线 $P=f(U, T)$;

d) 将温度传感器测得的实时温度值 T 代入上述曲线, 即可得到经过温度补偿的压力值。

3.2 密度的温度补偿

由公式(2)可知,压力随着环境温度漂移时也必定会影响到密度值的测量,因此,从压力的补偿模型可以推导出密度的补偿模型。

两个压力芯体的压力差与输出的电压差之间的关系:

$$\Delta P = f(\Delta U) \quad (4)$$

那么,采用与压力温度补偿相同的方法可以得到:

$$\Delta P = f(\Delta U, T) \quad (5)$$

而 ΔP 与密度关系是成线性关系的,所以得出密度的补偿模型:

$$\rho = Kf(\Delta U, T) \quad (K \text{ 为非零常数}) \quad (6)$$

在对两个温度点进行补偿时,密度补偿公式为:

$$\rho = Kf(\Delta U, T) = K[P_0(\Delta U)L_0(T) + P_1(\Delta U)L_1(T)] \quad (7)$$

其中: $K = \frac{1}{gh}$, g 为重力加速度, h 为两个测量点高度差 0.6 m,

$$L_0(T) = \frac{(T - T_1)}{(T_0 - T_1)} \quad (8)$$

$$L_1(T) = \frac{(T - T_0)}{(T_1 - T_0)} \quad (9)$$

4 系统软件设计

系统软件如图 3,其分为两大部分:采集模块程序设计和 ZigBee 模块程序设计。采集模块程序在 MSP430F149 中运行,主要功能是压力、温度信号的采集,传感器调零,密度软件补偿;ZigBee 模块程序运行在 CC2531 中,主要包括 Z-Stack 2007 协议栈的移植,串口无线传输。

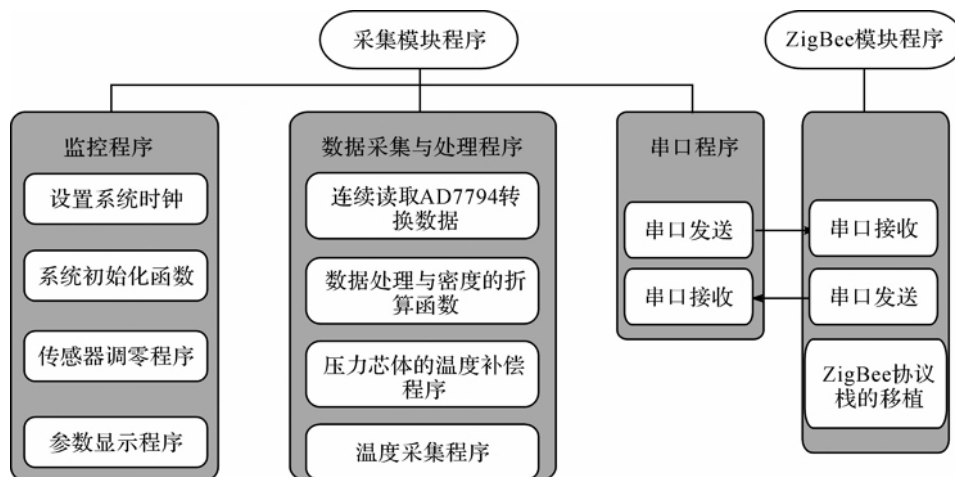


图 3 系统软件框图

4.1 采集模块程序设计

采集模块程序分为三部分:监控程序、数据采集与处理程序、串口程序。监控程序主要负责完成系统的时钟设置,软硬件初始化,传感器调零,以及在液晶屏上显示测量参数,协调和引导压差式密度计进入工作状态;在密度计开始工作之后,数据采集与处理程序将依次完成环境温度的测量,通道 1 的低压压力信号,通道 2 的高压压力信号。最后,利用温度补偿模型折算出液体密度;MSP430F149 将采集到的温度和经过算法处理后的密度值经过串口模块 UART1 发送给 CC2531。

采集模块程序流程如图 4。考虑到智能压差式密度计中单片机读取的参数较多,各个量的实时性要求较强,还涉及到与外部两个设备之间的通信。因此,在密度计进入工作模式时,设置其主系统时钟 MCLK,以及子系统 SMCLK 均为 8MKZ,以提高运算速度。系统初始化主要是

MSP430 单片机的 UART 模块和 SPI 模块的初始化。SPI 模块的初始化主要完成 AD7794 内部多个寄存器的配置。

4.2 ZigBee 模块程序设计

ZigBee 模块程序基于 TI 的 Z-Stack2007 协议栈,对应的开发环境为 IAR7.60。Z-Stack2007 协议栈是 ZigBee 众多协议中的一种半开源实现。TI 公司免费向用户提供 Z-Stack2007 协议栈的开发模板 GenericApp,借助该模板可实现无线透明传输。

智能压差式液体密度计作为终端节点,ZigBee 无线网络由协调器模块负责建立,终端节点加入该网络。由于测试实验节点数较少,智能压差式密度计加入网络后将与协调器以点对点(或广播)的方式进行无线透明传输。

在无线透明传输应用中,压差式密度计的采集模块 MSP430F149 将测量参数密度和温度等数据通过串口发送给 ZigBee 模块 CC2531,ZigBee 模块

以无线方式编码发送到父节点,即协调器模块。协调器模块接收到传感节点发送的无线信号后进行解

码,把解码后的数据再通过串口发送 PC 机显示, ZigBee 模块程序流程如图 5。

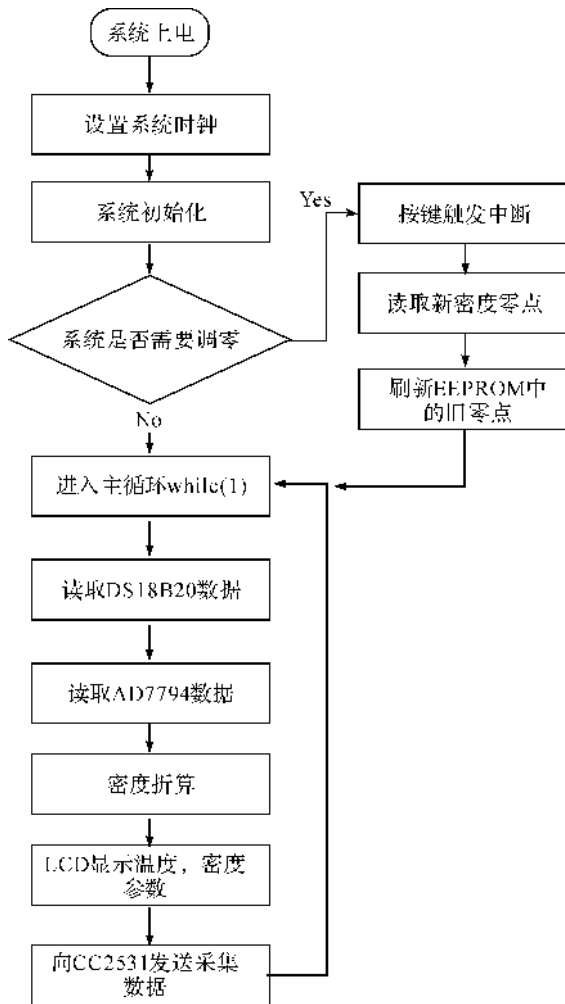


图4 采集模块程序流程

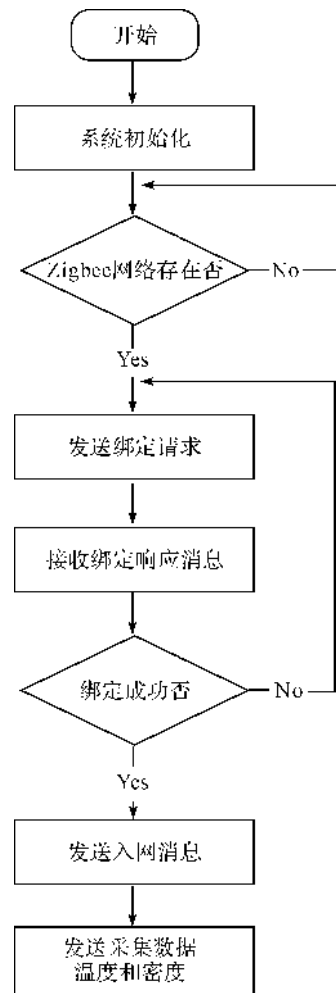


图5 ZigBee 模块程序流程

5 实验结果与误差分析

图6为实验研制的智能压差式密度计样机。在液体密度测量试验中,针对待测液食盐水进行测量试验得到两组数据:第一组数据是18℃时食盐水实验数据,第二组数据是16℃时食盐水实验数据,测量结果分别为表1和表2所示。表中的参考值是由称重法测得的。所用设备是精度为0.1 g的电子秤,以及大容量的溶杯。测量参考值时,每次选取体积为1.25 L的待测液,经过电子秤称重后,计算出待测液的参考密度;测量值是分别根据相应温度下密度补偿模型公式(7),将温度值和测量的电压差代入公式,得到密度的测量值如表1和表2所示。

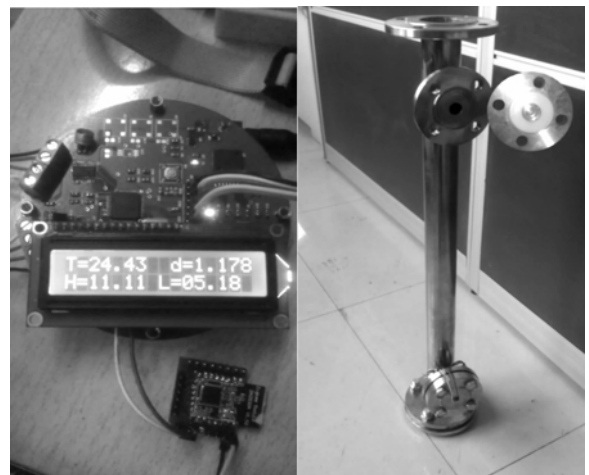


图6 智能压差式密度计样机

表 1 18℃ 时食盐水密度实验数据

压力差 $\Delta P/\text{kPa}$	电压差 $\Delta U/\text{mV}$	测量值/ (g/cm^3)	参考值/ (g/cm^3)	补偿误差/ (g/cm^3)	相对误差/ $\%$
8.302	5.63	1.235	1.218 6	0.016 4	1.35
8.13	5.75	1.210	1.192 2	0.017 8	1.49
7.961	5.84	1.192	1.175 1	0.016 9	1.44
7.852	5.92	1.174	1.159 8	0.014 2	1.22

表 2 16℃ 时食盐水密度实验数据

压力差 $\Delta P/\text{kPa}$	电压差 $\Delta U/\text{mV}$	测量值/ (g/cm^3)	参考值/ (g/cm^3)	补偿误差/ (g/cm^3)	相对误差/ $\%$
7.22	6.20	1.118	1.098 6	0.019 4	1.77
7.405	6.09	1.140	1.113 0	0.027 0	2.42
7.483	6.04	1.149	1.122 9	0.026 1	2.32
8.184	5.60	1.242	1.224 6	0.017 4	1.42

根据表 1 和表 2 中的数据,可以计算出本文的研制智能压差式液体密度计的相对误差最大值为 2.42%,相对于满量程的综合误差 ξ 由如下公式求得:

$$\xi = \frac{\Delta \rho_{\max}}{\rho_{FS}} \times 100\% = \frac{0.0270}{2} \times 100\% = 1.35\% \quad (10)$$

式中, $\Delta \rho_{\max}$ 为补偿误差最大值, ρ_{FS} 为压差式密度计的量程。

非线性误差最大不超过 1.35%。在图 7 曲线中加压、减压的输出—输入正反行程曲线重合得很好,几乎分辨不出加压、减压曲线印迹,正反行程最大差值为 0.011,迟滞误差小于 0.55%。

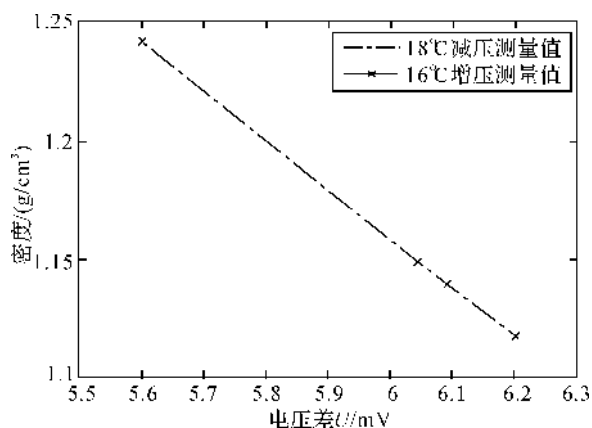


图 7 密度计减压和加压过程对比

在通讯试验中,当密度计测量到待测液的密度和环境温度后,传感节点将测量数据通过 ZigBee 无线传感网络远程发送到协调器节点,协调器节点通过串口将接收数据发送到 PC 机中显示,试验结果表明接收稳定可靠,实时性较强。

6 结 论

设计的密度计在压差量程 0~14 kPa 内,量程为 0~2 g/cm³,精度是 0.027 0 g/cm³,相对误差不超过 2.42%,非线性误差不超过 1.35%,迟滞误差小于 0.55%。在增加适量的温度补偿点时,密度计的性能指标还会有较大提高,这对于解决高精度密度测量具有一定的理论意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 王海群,曹 义,张玉贵,等. 差压式重介煤浆密度计的设计及实现[J]. 矿山机械,2011,2(39): 109-111.
- [2] 管文剑,金伟明. 新型泥浆池差压式密度计的设计与实现[J]. 传感技术学报,2006,19(1): 199-201.
- [3] 董方武. 基于 ZigBee 的碱液浓度传感器设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2009(4): 25-27.
- [4] Analog Devices. Data sheet for AD7794/AD7795 6-Channel, Low Noise, Low Power, 24-/16-Bit Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp and Reference[EB/OL]. [2007-03-27]. <http://www.analog.com>.
- [5] 郝祖龙,常太华,田 亮. 基于 HART 总线智能变送器的电源分析与设计[J]. 现代电力,2005,22(6): 53-56.
- [6] 何一文,许维胜. 基于 PIC16F877 的瓦斯传感器设计[J]. 测控技术,2009,28(8): 9-12.
- [7] Palmer J. Precise pressure sensor temperature compensation algorithms[D]. New York: State University of New York, 2006: 67-75.
- [8] 张艳峰,严家明. 基于最小二乘法的压力传感器温度补偿算法[J]. 计算机测量与控制,2007,5(2): 1870-1874.
- [9] 卞金洪,王吉林,周 锋. 高精度压力传感器中温度补偿技术研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(6): 55-57.

Design and Realization of Intelligent Differential Pressure Type Liquid Density Meter Based on ZigBee

YANG Yun-tao, XIANG Zhong, WU Xue-jin, HU Xu-dong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University,
Hangzhou 310018, China)

Abstract: Traditional density meters often use 4~20 mA current output or wired RS232/485 serial port which involves a short communication distance, a few network nodes and complicated wiring process in the earlier stage and complex system updating and maintenance process in the later stage. This paper designs an intelligent differential pressure liquid density meter with ZigBee wireless network communication function, replaces the traditional measurement program of pressure probe with two independent pressure sensors and introduces ZigBee wireless network function, making this density meter characterized by long communication distance, low cost, strong real-time capability and many network nodes etc.

Key words: pressure gradient; liquid densimeter; ZigBee; MSP430F149

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 23 页)

Dynamic Topology Optimization of Auxiliary Frame of Passenger Cars Based on ANSYS

YANG Zhang-cheng, CHEN Li-li, LI Jian-min

(Zhejiang Key Laboratory of Reliability Technology Research for Mechanical and Electrical Products,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Taking the former auxiliary frame of one vehicle model of Shanghai Volkswagen as research object, this paper establishes a finite element model for auxiliary frame, and verifies the accuracy of the model with free modal test by ANSYS; conducts topology optimization of frequency for auxiliary frame, obtains the cloud picture of topology density and modifies the geometric model. Modal analysis and calculation results showed that the optimized auxiliary frame vibration model consistent with the original model, the inherent low-order frequency is greatly improved and the optimization objective of improving the inherent frequency is realized.

Key words: modal analysis; topology optimization; modal test

(责任编辑: 张祖尧)