

Design of TPMS Wireless Sensor Nodes with Silicon Piezoresistive Pressure Transducer^{*}

LI An^{*}

(Department of Electronic Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: It is necessary to equip TPMS on a vehicle like a van or a bus to reduce the risk of accidents that are caused by under inflated tires, however, TPMS sensor chips with maximum pressure over 800kPa are very expensive. This paper discusses the development of a novel design of TPMS wireless sensor nodes based on TI processor MSP430F2112, including the system architecture, hardware, software control strategy and the nonlinear compensation algorithm of the pressure sensor. The test results show that the temperature compensation approach of the pressure sensor is simple and effective. The proposed scheme of TPMS sensor nodes possesses the advantages of reliable communication, flexible configuration, small size, light weight, low power consumption and cost, and wide application prospect.

Key words: sensor technique; tire pressure monitoring; compensation; pressure sensor

EEACC: 7230S; 6210Q

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.02.013

基于硅压阻式压力传感器的 TPMS 无线传感器节点设计^{*}

李 安^{*}

(南昌大学电子信息工程系, 南昌 330031)

摘 要: 针对量程在 800kPa 以上进口 TPMS 传感器芯片价格非常昂贵和目前大客/货车安装胎压监测的必要性之间的矛盾, 本文使用 TI 公司生产的处理器 MSP430F2112, 提出了一种高性价比的 TPMS 无线传感器节点设计方案, 包括总体方案、压力传感器非线性补偿算法、详细的硬件设计、软件控制策略。最后通过实验室测试表明: 该设计的硬件电路及补偿计算均较简单; 压力传感器的热灵敏度补偿效果明显; 系统无线通信可靠、组态灵活; 无线传感器节点功耗低, 体积小, 重量轻, 性价比合理, 有着广阔的应用前景。

关键词: 传感器技术; 胎压监测; 补偿; 压力传感器

中图分类号: TP212.9; TP274.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)02-0220-07

随着半导体技术的不断发展和汽车电子安全产品市场的日益成熟化, 胎压监测系统(Tire Pressure Monitoring System, TPMS)等汽车主动安全技术得到广泛应用。如今, 车厂和用户都已经形成共识: 主动安全技术(如 TPMS 等), 不仅能显著提高车辆的安全性; 更重要的是, 它能够和驾驶员协作, 避免交通事故发生^[1-2]。

据公安部交管部门报告, 2009 年全国共发生道路交通事故 23.8 万起, 营运车辆肇事导致一次死亡 10 人以上特大道路交通事故比例上升; 数据统计表明, 因汽车轮胎漏气爆胎而引发的严重交通事故占总体事故的 46.8%。由于量程在 800 kPa 以上的进

口 TPMS 传感器芯片(如 SP30T、MPXY8320 等)价格非常昂贵^[3-4], 让用户望而却步, 这导致高速公路中的大巴、大货车和城市交通的公交车等, 轮胎安全隐患较大, 一旦因爆胎造成事故, 人民生命财产损失巨大, 社会负面影响大^[5-6]。虽然国内有少数汽车电子厂家有量程在 800 kPa 以上的低价位膜片式传感器, 但是实际结果是: 要么胎压监测系统成本过高, 要么压力传感器使用效果太差。我国虽已具备生产硅压力传感器的能力, 但是针对胎压监测系统, 量程 800 kPa 以上的硅压力传感器确实存在国内技术产业化的盲点^[7]。

本文介绍一种基于硅压阻式压力传感器的

TPMS无线传感器节点设计,方案中,硅压阻式压力传感器将胎压转换成电压值,同时无线传感器节点采集温度、电量等,这些数据送至处理器进行计算分析,再依据编码和发射软件策略,与车架下的中继模块进行无线数据交互,并通过CAN-BUS上传至车身模块,实时监测和显示轮胎状况。该设计的压力监测准确,实时性强,无线通信稳定,节点功耗低,在可靠性、灵活性、经济性等方面有着明显的优势,既能

提高驾驶大客/货车的安全性,又能避免购买进口TPM sensor,从而大大降低整车厂和用户加装胎压监测系统的成本。

1 胎压监测系统原理和总体结构

整个胎压监测系统采用2层分布式的结构,即监控层和现场数据采集层,其结构框图如图1所示。

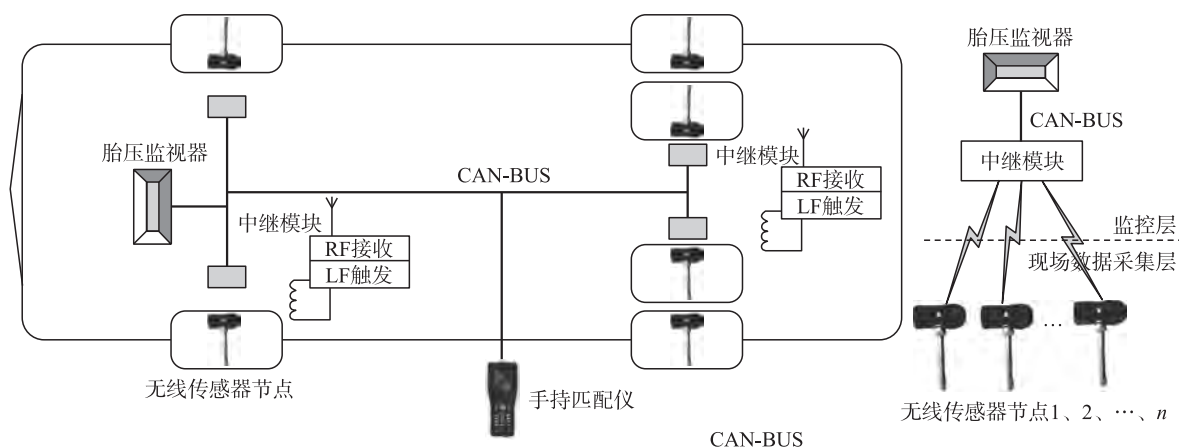


图1 大客/货车胎压监测系统结构框图

在现场数据采集层,无线传感器节点1、2、...、 n 依次收到中继模块的低频唤醒命令,然后现场采集胎压、温度、电量、无线传感器节点ID等参数和变量,并进行实时运算和判别,经过编码处理,再使用FSK射频传送方式将这些现场数据依次上传至中继模块;在监控层,中继模块通过CAN现场总线与BCM(Body Control Module)车身模块实现数据交互,同时使用车身模块中的ICM(Instrument Control Module)仪表模块将胎压、温度等现场信息直观地显示出来;在整车厂或4S店,手持轮胎定位匹配仪^[8]用于采集轮胎内的无线传感器节点ID信息,并通过CAN现场总线将无线传感器节点ID信息下载、显示和存储到ICM中,实现轮胎内无线传感器的定位匹配。

2 无线传感器节点电路原理框图

无线传感器节点实时监测轮胎内部气压和温度的状况,通过无线方式将数据发送至中继模块。考虑到胎压和温度监测的实时性和无线传感器节点的使用寿命,无线传感器节点均选用超低功耗的高集成度芯片,其处理器芯片选用美国TI公司超低功耗嵌入式微处理器—MSP430F2122^[9]。该芯片使用16 bits-RICS的内核处理器,运算能力强,内核采用矢量中断和可软件选用的LPM4:0(Low-Power

Mode)5种低功耗模式;芯片内置RAM、FLASH存储空间、WDT+软件看门狗定时器,8路10 bits-AD转换器等,内置的2路USCI(Universal Serial Communications Interface)支持同时使用IIC和SPI总线,最多可达32线的PORT,MSP430F2122不仅体积小、功耗低、运算和处理能力强,同时外围接口丰富,非常适用于胎压监测环境下的传感器设计。无线传感器节点硬件电路原理框图如图2所示。

无线传感器节点选用TI公司的双路12 bits低功耗汽车级DAC芯片TLV5618A作为压力传感器的可调电压源。TLV5618A的输出调节分辨率高达0.000 5 V/bit,输出的零位漂移和输出增益误差分别为3 ppm/°C和1 ppm/°C;MSP430F2122的USCI_A0使用SPI接口与TLV5618A直接连接,最高处理时钟高达20 MHz,寄存器配置时间短,DA转换速度快。压力传感器的桥臂输出电压经过放大后,直接接入微处理器的AD模块,电路既简单又可靠。

无线传感器节点还需要采集轮胎内的温度,本设计选用TI公司的12 bits温度传感器芯片TMP112,该芯片精度高,功耗极小,ShutDown模式下最大耗电仅0.1 μ A,温度采样时间最大耗时仅35 ms;MSP430F2122的USCI_B0使用IIC接口和TMP112连接,HS模式时钟高达3.4 MHz,完全满足设计的需求。

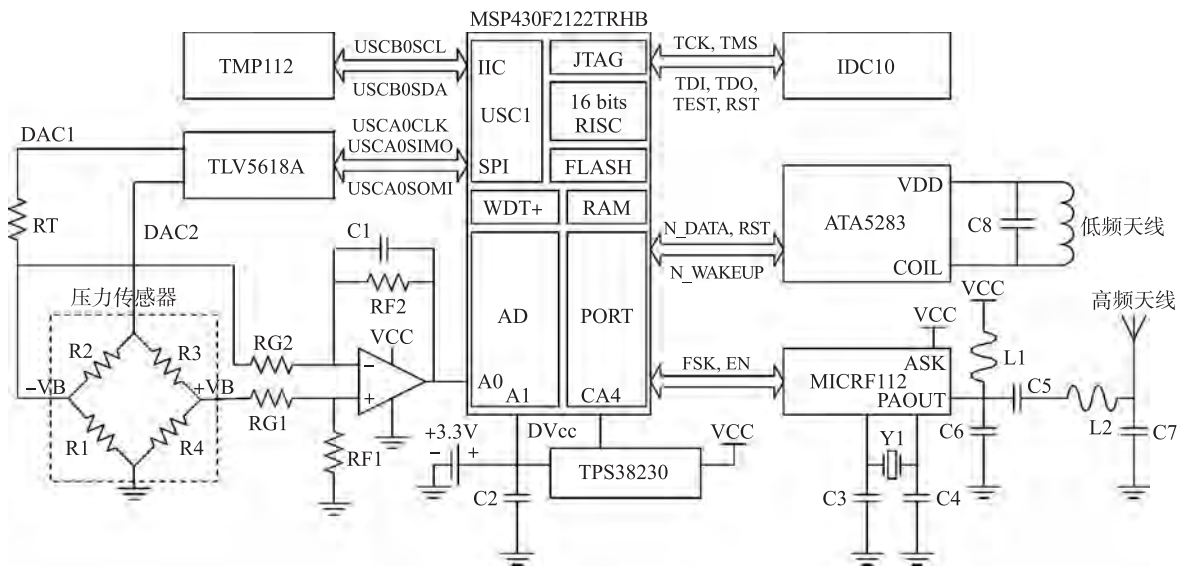


图2 无线传感器节点硬件电路原理框图

无线通信是无线传感器节点的核心部分。在设计中,无线传感器节点的RF发射芯片选用MICREL公司的MICRF112,LF接收芯片选用ATMEL公司的ATA5283,这两款芯片均为胎压监测系统专用IC。MICRF112的发射频率范围为380 MHz~450 MHz,输出功率最大可达+10 dBm,可选择ASK/FSK调制方式,数据(曼彻斯特编码)传输率最高可达50 Kbps ASK/10 Kbps FSK,该芯片工作效率高,射频信号传输稳定可靠、抗干扰能力强;ATA5283是125 kHz超外差接收器,芯片封装小、功耗低,空闲状态耗电仅为1 μ A,能自动探测引导码,唤醒的灵敏度可达1 mVrms,该芯片集成度高,外围电路少,使用非常灵活。

MSP430F2122使用内置10 bits-AD模块定时监测Li电池的电量,如果电压低于阈值,则发送电池电量低的报警信号,其方法简单有效,功能实现难度低,可靠性强。

由于无线传感器节点绝大部分时间处于不工作状态,为延长无线传感器节点的使用寿命,所以本设计选用带使能控制的LDO(Low Drop-Out)芯片TPS38230,该芯片工作温度范围宽,关断后的漏电流仅为500 nA,是维护无线传感器节点的电池电量的非常好的解决方案。

3 压力传感器的软件补偿设计

因为半导体材料对温度很敏感,所以硅压阻式压力传感器的温度误差较大。本方案不仅在电路上进行补偿和修正,如图2所示,而且下面将详细介绍压力传感器的软件补偿设计,这使得压力传感器既降低成本又可高精度应用。

3.1 硅压阻式压力传感器原理

硅微型压力传感器在国内已经开展了多年的研究,正逐步走向产业化。本设计中选用了国内某知名厂家研发生产的硅压阻式压力传感器,其原理是^[10]:压力传感器的敏感元件为一惠斯通电桥,先把一个惠斯通电桥做在一个硅杯上,硅杯受压后产生形变,由于半导体硅的压阻效应,导致硅的电阻率发生变化,从而打破了电桥平衡,产生随压力变化而变化的输出电压。硅压阻式压力传感器的尺寸为 $1 \times 1 \times 0.5$ mm,四条力敏电阻条两条纵向布局,两条切向布局,对称分布在正方形硅薄膜的中心,形成惠斯顿应变全桥,有100 mV/V左右的输出灵敏度,典型阻抗设计为 $5 \text{ k}\Omega \pm 20\%$,在加工工艺上,该硅压阻式压力传感器采用先进的硅/硅真空键合全硅结构的制作方式,将硅弹性膜封接在另一个有腔的硅片上,形成压力真空参考腔,这种制作工艺既可以缩小传感器尺寸,又能利用硅键合实现热胀系数匹配,增强传感器的热稳定性。

3.2 热灵敏度漂移的非线性补偿算法

表1为激励电压为1.5 V时,硅压阻式压力传感器在不同压力和温度下的测试数据,表中数据显示,传感器的温度误差较大。图3是最大量程为149 psi(约1 000 kPa)的传感器样品在不同温度下,压力与输出电压特性曲线图,从图的变化趋势可以看出,不同温度下,传感器的压力/输出电压是一族以零点(无负荷点)为出发点的喇叭口状的直线;在相同压力条件下,传感器的输出随着温度的升高而降低,即压力传感器的热灵敏度漂移是负值。图4是压力传感器样品的灵敏度与温度特性曲线,可以看出,恒压激励下,压力传感器的灵敏度随温度升高而减小。

表 1 硅压阻式压力传感器的测试数据

激励电 压(V)	温度 (°C)	不同压力下的输出电压(mV)				
		14.7 psi	42 psi	97 psi	123 psi	149 psi
1.5	0	13.8	37.27	83.30	106.74	129.98
	25	11.92	34.18	77.93	100.20	121.09
	50	10.03	31.05	72.46	93.55	112.11
	60	9.17	29.30	68.95	89.65	107.03
	70	8.57	28.32	67.38	86.91	103.52
	80	7.91	26.95	64.45	83.20	98.83
	90	6.94	25.39	61.33	80.47	94.92
	100	6.48	24.61	60.16	78.52	92.38

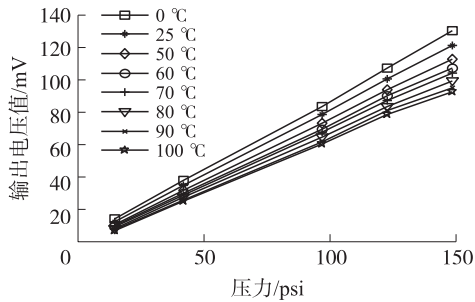


图 3 不同温度下,输出电压与压力特性曲线图

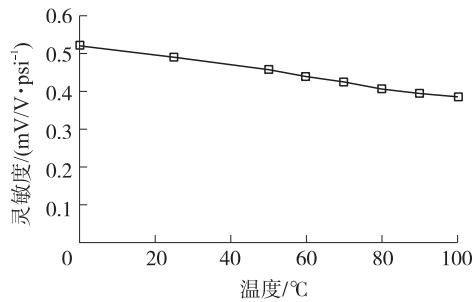


图 4 灵敏度与温度特性曲线图

用 $R_i(P, t)$, $i=1, 2, 3, 4$ 表示力敏电阻在压力 P 下, 温度 t 时的阻值^[11], $K_i(t)$, $i=1, 2, 3, 4$ 表示温度 t 时力敏电阻的压力灵敏度。

通常, 传感器设计成无负荷时, 电桥桥臂的阻值相等, 即

$$R_i(0, t) = R(0, t) \quad (1)$$

并且通常, 力敏电阻的压力灵敏度满足

$$K_1(t) = K_3(t) = -K_2(t) = -K_4(t) = K(t) \quad (2)$$

已知力敏电阻的压力灵敏度的定义 $K_i(t) =$

$$\frac{1}{R_i(P, t)} \frac{\partial R_i(P, t)}{\partial P}$$

将式(1)代入可得

$$R_i(P, t) = R(0, t) e^{K_i(t)P} \quad (3)$$

根据图 2 的电路所示, 当压力为 P , 温度为 t 时, 电桥的输出

$$U_0(P, t) = U_{DAC2}(t) \times \left[\frac{R_1(P, t)}{R_1(P, t) + R_2(P, t)} - \frac{R_4(P, t)}{R_3(P, t) + R_4(P, t)} \right]$$

将式(2)、式(3) 代入, 可得

$$U_0(P, t) = U_{DAC2}(t) \left(\frac{e^{K(t)P} - e^{-K(t)P}}{e^{K(t)P} + e^{-K(t)P}} \right) \quad (4)$$

对 $e^{K(t)P}$ 和 $e^{-K(t)P}$ 进行 Taylor 展开, 并去掉其高次项, 得出

$$U_0(P, t) = U_{DAC2}(t) \left[\frac{(1+K(t)P) - (1-K(t)P)}{(1+K(t)P) + (1-K(t)P)} \right] = U_{DAC2}(t) K(t) P \quad (5)$$

所以依照传感器的压力灵敏度定义,

$$S(T) = \frac{U_0(P, t)}{P} = U_{DAC2}(t) K(t) \quad (6)$$

定义线性拟合问题 $\begin{cases} K(t) = k_1 T + b_1 \\ U_{DAC2}(t) = k_2 T + b_2 \end{cases}$, 那么由

式(6) 得出, $S(T) = (k_1 T + b_1)(k_2 T + b_2)$, 对 $S(T)$ 求导, 并使导数在 298 K (即 25°C) 时为零, 即

$$\frac{dS(T)}{dT} = 2k_1 k_2 T + b_1 k_2 + b_2 k_1 = 0 \quad (7)$$

我们已知, 298 K (25°C) 时, $U_{DAC2}(t) = 1.5$ V, 即

$$k_2 T + b_2 = 1.5 \quad (8)$$

参照表 1 的数据, 及式(6) - (8), 可得出 $k_2 = 0.004 27$, 为方便微处理器软件计算, 我们取 $k_2 = 0.004 5$ 。

3.3 压力传感器温度漂移补偿方法

传感器本身的输出信号比较小, 仅为毫伏级, 所以温度漂移也较明显。在无负荷情况下对传感器缓慢加温或降温到一定的温度, 可测得传感器的零点温漂^[12]; 设计中采用以下方法对温度漂移进行补偿: ①无负荷的条件下, 温度为 -40 °C 时, DAC2 依照 3.2 节的计算结果设定激励电压; ②增加 DAC1 输出电压直到 ADC 读取的数值大于 0; ③在表格中记下 DAC1 和 DAC2; ④温度增加 1 °C, 增加 DAC2 输出电压 9 个比特, 增加 DAC1 输出直到 ADC 读的数值大于 0, 记下 DAC1 的数值; ⑤循环步骤④, 直到温度达到 125 °C

在实际应用中, 补偿温度漂移时的 DAC1 数据不需要全温区, 实践证明, 汽车行驶几分钟后, 即使在冬天, 轮胎的温度也不会低于 30 °C, 而且轮胎温度超过 100 °C, 胎压监测系统会高温报警。经验证明, 当汽车行驶时, 压力传感器工作温度在 30 °C ~ 100 °C, 其中绝大多数时间的工作温度在 50 °C ~ 90 °C 之间。

4 无线通信设计和软件控制策略

无线传感器节点无线通信软件流程图如图 5 所示。

无线传感器节点每 1 s 定时唤醒, 首先进行 LF 模块初始化, 然后侦听 LF 唤醒指令, 进入中断后,

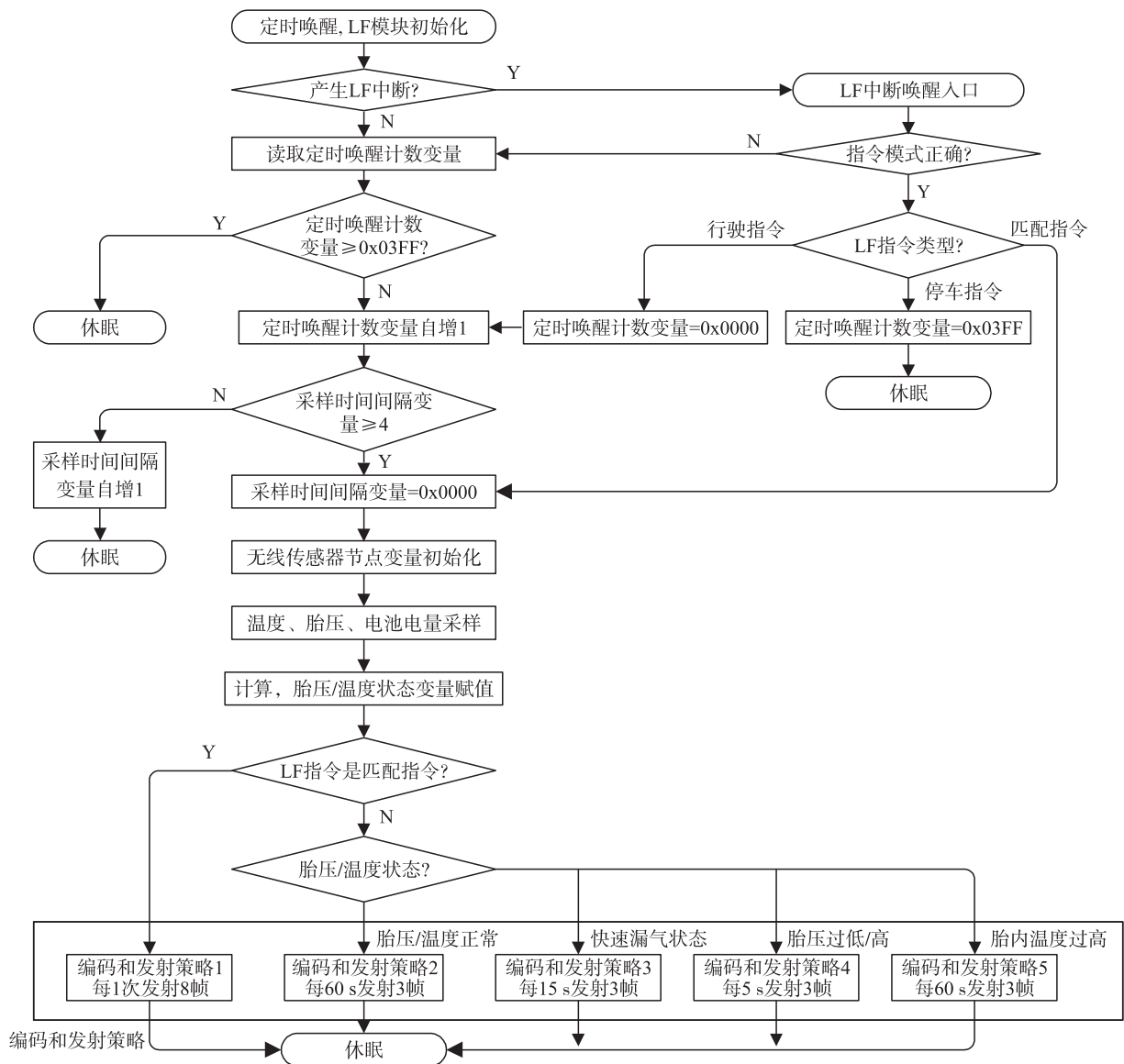


图5 无线传感器节点无线通信软件流程图

判断指令数据帧格式^[8]是否正确。一旦探测到 LF 唤醒指令格式正确,立即跳转执行相应的命令。如果执行“匹配指令”,无线传感器节点立即完成采样胎压、温度、电量等信息,并依照编码和发射策略 1,对无线传感器节点芯片 ID 和现场采样的数据信息进行曼彻斯特格式编码,然后以 FSK 的无线调制方式连续发送 8 个响应帧到手持匹配仪,最后进入休眠;如果执行“行驶指令”,无线传感器节点每 5 秒采样胎压、温度、电量等信息,通过微处理器软件算法计算,判断胎压的状况,并给状态变量赋值,再按照相应的编码^[8]和发射策略 2、3...*n* 实现操作,最后进入休眠;如果执行“停车指令”,无线传感器节点直接进入休眠。

需要指出的是,一旦大客/货车车身模块供电,车架底盘的中继模块每 15 s 向无线传感器节点发送一

次 LF “行驶指令”;如果车身模块断电,中继模块切换到电池供电,延时后,发送数次 LF “停车指令”后休眠。使用定时唤醒计数变量的目的是:当无线传感器节点没有接收到最后发送的 LF “停车指令”,节点经过一段时间后,也能自动进入停车状态。

5 测试

5.1 压力传感器热灵敏度补偿测试

在测试前,先超负荷加载 20 次以上,超载量为传感器额定负荷的 120% ~ 150%。

无负荷情况下,温度 25 °C 时,传感器样品的 $R(0, 25\text{ °C}) = 5\text{ K}$;压力灵敏度 $K(25\text{ °C}) = 0.488\ 5\text{ mV/V}\cdot\text{psi}^{-1}$;激励电压 $U_{\text{DAC}2}(25\text{ °C}) = 1.500\ 0\text{ V}$;利用 TLV5628A 的 DAC2 可编程电压输出,依照 3.2 节计算的结果,调整不同温度下 DAC2 激励电压的

大小,测试传感器样品,当压力分别为 14.7 psi, 42 psi,97 psi,123 psi 和 149 psi 时,测试数据如表 2 所示。

表 2 硅压阻式压力传感器灵敏度补偿后的测试数据

激励电 压(V)	温度 (°C)	不同压力下的输出电压(mV)				
		14.7 psi	42 psi	97 psi	123 psi	149 psi
1.387 5	0	12.06	34.41	78.54	100.82	121.83
1.500 0	25	11.99	34.22	78.02	100.21	121.18
1.612 5	50	11.90	33.94	77.55	99.73	120.49
1.657 5	60	11.87	33.87	77.24	99.42	120.20
1.702 5	70	11.84	33.75	77.03	99.19	119.86
1.747 5	80	11.80	33.65	76.89	98.84	119.55
1.792 5	90	11.80	33.60	76.80	98.51	119.24
1.837 5	100	11.75	33.54	76.57	98.18	118.87

图 6 为最大量程为 149 psi(约 1 000 kPa)的传感器样品补偿后不同温度下,传感器的压力/输出电压特性曲线图,对比图 6 和图 3,可以看出,在 0 °C ~ 100 °C 温区,补偿后的输出电压曲线近似为一组略微倾斜的平行线,补偿后传感器的热灵敏度温度漂移

表 3 连续 300 周期测量的统计结果

序号	无线传感器 节点 ID	测试距 离(米)	静/动态	理想 数据帧	实际 数据帧	错误 数据帧	数据帧 有效率
1	0101767Ah	18	静态拉距测试, 无线传感器节 点离地高度 h=30cm	900	818	0	90.89%
2	0101EAF5h			900	823	0	91.44%
3	0101EAEBh			900	830	0	92.22%
4	010107EAh			900	815	0	90.56%
5	010108DBh			900	824	0	91.56%
6	0101ECB0h			900	826	0	91.78%
1	0101767Ah	5	动态测试, 无线传感器节 点的线速度 v=100 km/h	900	597	0	66.33%
2	0101EAF5h			900	550	0	61.11%
3	0101EAEBh			900	630	0	70.00%
4	010107EAh			900	542	0	60.22%
5	010108DBh			900	619	0	68.78%
6	0101ECB0h			900	574	0	63.78%

统计结果显示,每个无线传感器节点响应数据帧误码率低;18 m 拉距测试,数据帧有效率在 90.89% ~ 92.22% 之间,100 km/h 动态测试,数据帧有效率大于 60.22%,说明中继模块接收无线传感器节点发射的数据是可行的。

6 结论

本文提出的基于硅压阻式压力传感器的 TPMS 无线传感器节点设计可行,使用可编程激励电压对硅压阻式压力传感器灵敏度温度漂移进行补偿,补偿效果

为-0.012% FSO/°C,与补偿前-0.139% FSO/°C 相比,灵敏度温度效应得到了明显的改善。

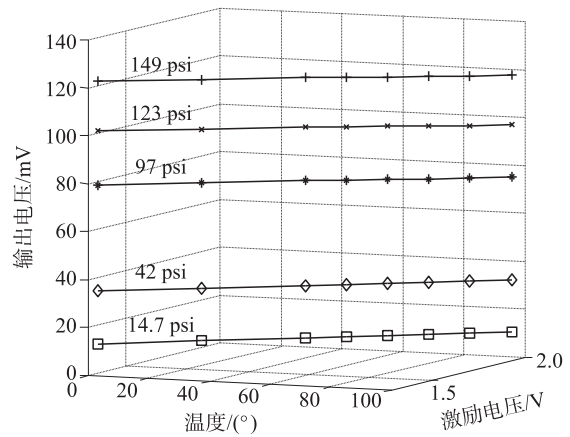


图 6 补偿后不同温度下,传感器的压力/输出电压特性曲线图

5.2 无线传感器节点无线通信测试

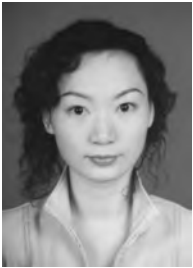
执行编码发射策略 2,使用中继模块对 6 个不同 ID 的无线传感器节点进行持续的信息交互,即数据帧率为 3 帧/分钟,记录连续 300 周期的测量数据,并将多组数据进行统计分析,结果如表 3 所示。

显著,满足设计的要求;无线传感器节点射频模块性能测试结果显示,无线数据信息交互正常,性能稳定。

参考文献:

[1] Han Jiapeng, Tang Xiaofeng. Research on ABS and TPMS Merging System Based on Sliding Mode Variable Structure Control System [C]//Patrick Kellenberger eds Proc of International Forum on Computer Science-Technology and Applications Los Alamitos: CPS,2009:340-342.
 [2] 李白. 主动安全系统领域的重要角色 TPMS[J]. 汽车与配件, 2009,24(6):22-23.

- [3] Sankaranarayanan V, Levent G. Tire Pressure Monitoring[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(6): 22-25.
- [4] Kolle C, Scherr W, Hammerschmidt D, et al. Ultra Low-Power Monolithically Integrated Capacitive Pressure Sensor for Tire Pressure Monitoring [C]//Rocha D eds Proc of IEEE Sensors. Piscataway: IEEE, 2004, 1: 244-247.
- [5] Chen Qing-zhang, Guo li-shu. Development of Truck Overloading Automatic Detection System Based on TPMS [C]//Lisa O'Conner eds Proc of 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation Los Alamitos: CPS, 2010, 2: 19-21.
- [6] Zhou Yulan, Chai Yongsheng, Wang Yantao. Tire Pressure Monitoring System for Trucks [C]//Proc of CCDC 2008. Piscataway: IEEE, 2008, 1743-1745.
- [7] Zhang Yanhong, Liu Bingwu, Liu Litian, et al. Design, Fabrication and Characterization of Novel Piezoresistive Pressure Microsensor for TPMS [C]//Proc of ASSCC 2006. Piscataway: IEEE, 2006: 443-446.
- [8] 李安, 张莉. 基于 Power Architecture 处理器的便携式 TPMS 轮胎定位匹配仪设计[J]. 电子技术应用, 2009, 25(4): 102-106.
- [9] Texas Instruments Incorporated. MSP430F21x2 Mixed Signal Microcontroller[Z]. SLAS578B, 2008.
- [10] Ranjit Singh, Low Lee Ngo, Ho Soon Seng, et al. A Silicon Piezoresistive Pressure Sensor [C]//Renovell M eds Proc of the First IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'02) Los Alamitos: CPS, 2002: 181-184.
- [11] 张莉丽, 戎华. 扩散硅压力传感器热灵敏度漂移补偿方法的研究[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2005, 3: 16-18.
- [12] Texas Instruments Incorporated. Lower-Power Signal Conditioning for a Pressure Sensor Application Report[Z]. SLAA034, 1998.



李安(1980-),女,讲师,2004年毕业于华中科技大学电子与信息工程系通信与信息专业,主要研究方向为无线通信理论,传感信息处理及汽车主动安全, promisewind.an@gmail.com。