



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102435558 B

(45) 授权公告日 2013. 11. 20

(21) 申请号 201110269385. 8

US 2009/0021740 A1, 2009. 01. 22, 全文.

(22) 申请日 2011. 09. 13

CN 201293761 Y, 2009. 08. 19, 全文.

(73) 专利权人 河海大学常州校区

许俐. 机械视觉在两种颜色分类中的应用研究. 《农业机械学报》. 1997, 第 28 卷 (第 4 期), 第 82 页.

地址 213022 江苏省常州市新北区晋陵北路 200 号

审查员 李帅

(72) 发明人 李庆武 霍冠英 李豪 王永珍

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 董建林 许婉静

(51) Int. Cl.

G01N 21/27(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101556240 A, 2009. 10. 14,

CN 1793868 A, 2006. 06. 28,

CN 87105619 A, 1988. 02. 24, 全文.

CN 1821750 A, 2006. 08. 23, 全文.

CN 102253164 A, 2011. 04. 26, 全文.

US 5291879 A, 1994. 03. 08, 全文.

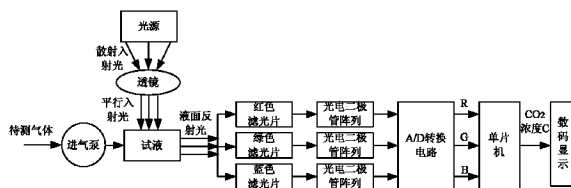
权利要求书1页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器及其检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器及其检测方法, 基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器包括进气泵, 进气泵的输出端通入颜色测量试液, 用于测量试液的 R、G、B 三基色的光电检测电路与单片机相连, 单片机与数码显示装置相连。本发明由于需检测的信号变化明显, 所需的测试液体配方原料价格低廉, 另外本发明采用的三基色检测方法对系统的机械制造精度没有过高的要求, 所以本发明具有制造难度低、成本小、灵敏度高、使用范围广等优点。



1. 一种基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在於:包括进气泵,进气泵的输出端通入颜色测量试液,用于测量试液的 R、G、B 三基色的光电检测电路与单片机相连,单片机与数码显示装置相连,所述光电检测电路包括电源电路、发射光源,透镜位于发射光源与试液之间,用于将散射光转变为平行光,试液的反射光通过位置交错均匀排列的红、绿和蓝滤光片到达光电二极管,位于同一色彩滤光片后的光电二极管之间并联成二极管阵列,二极管阵列的输出信号接入 A/D 转换电路,所述颜色测量试液以 0.001mol/l 的 NaHCO₃ 溶液,3-5 滴酸碱指示剂制成,所述酸碱指示剂选择变色范围在 pH7 ~ 9 之间。

2. 根据权利要求 1 所述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在於:所述酸碱指示剂为下列中的一种:

甲酚红 :pH7.2 ~ 8.8 ;

中性红 :pH6.8 ~ 8.0 ;

混合指示剂:一份 0.1% 中性红乙醇溶液,一份 0.1% 亚甲基蓝乙醇溶液,混合指示剂在 pH7.0 变色。

3. 根据权利要求 1 所述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在於:所述电源电路采用反馈稳流电路,发射光源为小功率半导体激光二极管,A/D 转换采用 ADC0809。

4. 根据权利要求 1 所述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器的检测方法,其特征在於,包括以下步骤:

1) 配置颜色检测试液;

2) 通过进气泵获得定量的待检测气体,待检测气体通过经由步骤 1) 得到的颜色检测试液,发生酸碱中和,产生颜色变化的测试液;

3) 利用激光光源和光电检测电路得到描述试液颜色的三基色 R、G、B 的强度;

4) 由试液颜色的三基色 R、G、B 的强度计算得到色调的定量描述 k_{wc} ,

用色度坐标 X, Y, Z 表示颜色,即

$$X = \frac{R}{R+G+B} \quad Y = \frac{G}{R+G+B} \quad Z = \frac{B}{R+G+B} \quad (1)$$

其中, R、G、B 代表三基色数量,即该颜色的三刺激值,色调的定量描述 k_{wc} 的计算公式为:

$$k_{wc} = \frac{Y-0.333}{X-0.333} \quad (2)$$

5) 由色调的定量描述 k_{wc} , 通过单片机内置的 BP 神经网络实现颜色 -CO₂ 浓度转换,采用 BP 神经网络拟合 CO₂ 浓度 C 与 k_{wc} 之间的非线性关系,以精确实现颜色 -CO₂ 浓度转换,具体方法为在计算机上完成 BP 神经网络的训练,然后将训练好的 BP 神经网络移植到单片机上,通过改变 CO₂ 浓度 C 与实验环境获取多组 k_{wc} 与 C 的对应数据,其中 CO₂ 浓度 C 由精密的红外线式传感器标定;

6) 经单片机处理得到的 CO₂ 浓度送数码显示装置显示。

基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器及其检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及传感器技术领域,具体而言是一种基于试液颜色测量的新型 CO₂ 传感器。

背景技术

[0002] 二氧化碳 (CO₂) 气体是一种无色无味的气体,它与我们的日常生活及工农业生产息息相关。二氧化碳浓度是决定空气质量的关键指示器,为提高人民的居住生活质量,适当控制室内环境中 CO₂ 含量是十分必要的。在农业生产中,如塑料大棚,适当控制 CO₂ 浓度可以明显提高作物和蔬菜的产量。此外,CO₂ 传感器在生物医疗、食品包装、储存运输等方面也都有广泛的应用。虽然 CO₂ 气体相当稳定,不利于检测,但人们还是利用其特性制作了各种类型的 CO₂ 气体传感器。如利用它对特定波长的红外线的吸收特性制作了红外线式 CO₂ 气体传感器;利用 CO₂ 气体与其他气体的热导不一样的特性制作了热导式 CO₂ 气体传感器等等;国内外不少研究者还对声表面波型、谐振型、半导体氧化物型和固态电解质型 CO₂ 气体传感器进行了大量的研究。

[0003] 目前已经实用化的 CO₂ 传感器主要有红外线式、电化学式以及热传导式。红外线式 CO₂ 传感器以芬兰 VAISALA 公司生产的 GMW20 系列 CO₂ 传感器为代表,它利用 CO₂ 吸收波长红外线的物理特性来有选择地准确测量 CO₂ 的分压,在 CO₂ 浓度较高时,测量的精度及稳定性都较好。但这种方法在测量低浓度 CO₂ 时要求红外线通过较长的光学路径,才能获得足够明显的吸收效应,因此需要采用非常精密的光学镜头,导致了其价格非常昂贵,设备体积也很庞大,限制了它的使用,特别是在农业和日常生活这些需要大量使用 CO₂ 检测控制的场合。电化学式 CO₂ 传感器以 FIGARO 公司生产的 TG S4160 为代表,其体积小、成本低,但预热时间较长(一般为 2 小时),适合于在室温下长时间通电连续工作。若长期在不加热的情况下存放(尤其是在高湿度环境下,比如蔬菜大棚)会导致输出电动势降低,因此不适合用来测量 CO₂ 的绝对浓度,而只适合用来测量相对于大气中自然的 CO₂ 浓度。热传导式 CO₂ 传感器以日本产 NAP-21A 为代表,它通过检测气体的热传导率差异来测量 CO₂ 浓度,其稳定性较好,但工艺较为复杂,测量精度及对气体的选择性也不太理想,不太适用于低浓度和需要精确测量的场合。

[0004] 专利检索表明,丹佛斯公司设计了一种带有滤波器和分析装置的红外传感器(ZL200580019565.3),具有更好的测量精确性,但无疑进一步增加了传感器的生产成本。ELT 株式会社设计了一种非发散的红外传感器光腔(ZL200480036879.X),用以提高测量的精度,其设备也非常复杂。专利 ZL200510086426.4 针对电化学式 CO₂ 传感器电势容易降低的问题,提出一种双固体电解质 CO₂ 传感器及其制备方法,采用经不可逆热力学修正的电动势公式以提高传感器的测量准确性。为降低热传导式传感器工艺的复杂度,专利 ZL200710053652.1 公开了一种气体敏感阵列传感器及其制备方法,采用丝网印刷技术制备在耐高温、电绝缘、导热的氧化铝、氮化铝或者硅的基片上,得到气体敏感阵列;气体敏感阵列通过轴固定在基座上,经超声热压焊接电极引线构成气体敏感阵列传感器。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题提供一种结构简单、成本低的 CO₂ 传感器。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明是通过以下技术方案实现的:

[0007] 一种基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在于:包括进气泵,进气泵的输出端通入颜色测量试液,用于测量试液的 R、G、B 三基色的光电检测电路与单片机相连,单片机与数码显示装置相连。

[0008] 前述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在于:所述颜色测量试液以 0.001mol/l 的 NaHCO₃ 溶液,3-5 滴酸碱指示剂制成,所述酸碱指示剂选择变色范围在大约 pH7 ~ 9 之间。

[0009] 前述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在于:所述酸碱指示剂为下列中的一种:

[0010] 甲酚红:pH7.2(黄)~8.8(紫红);

[0011] 中性红:pH 6.8(黄)~8.0(红);

[0012] 混合指示剂:一份 0.1% 中性红乙醇溶液,一份 0.1% 亚甲基蓝乙醇溶液 pH 7.0 变色(绿-蓝紫)。

[0013] 前述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在于:所述光电检测电路包括发射光源,透镜位于发射光源与试液之间,用于将散射光转变为平行光,试液的反射光通过位置交错均匀排列的红、绿和蓝滤光片到达光电二极管,位于同一色彩滤光片后的光电二极管之间并联成二极管阵列,二极管阵列的输出信号接入 A/D 转换电路。

[0014] 前述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器,其特征在于:所述电源电路采用反馈稳流电路,发射光源为小功率半导体激光二极管,A/D 转换采用 ADC0809。

[0015] 一种基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器的检测方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0016] 1) 配置颜色检测试液;

[0017] 2) 通过进气泵获得定量的待检测气体,待检测气体通过经由步骤 1) 得到的颜色检测试液,发生酸碱中和,产生颜色变化的测试液;

[0018] 3) 利用激光光源和光电检测电路得到描述试液颜色的三基色 R、G、B 的强度;

[0019] 4) 由试液颜色的三基色 R、G、B 的强度计算得到色调的定量描述 k_{wc} ;

[0020] 5) 由色调的定量描述 k_{wc} ,通过单片机内置的 BP 神经网络实现颜色-CO₂ 浓度转换;

[0021] 6) 经单片机处理得到的 CO₂ 浓度送数码显示装置显示。

[0022] 前述的基于试液颜色测量的 CO₂ 传感器的检测方法,其特征在于:在所述步骤 4) 中,用色度坐标 X, Y, Z 表示颜色,即

$$[0023] \quad X = \frac{R}{R+G+B} \quad Y = \frac{g}{R+G+B} \quad Z = \frac{B}{R+G+B} \quad (1)$$

[0024] 其中,R、G、B 代表三基色数量,即该颜色的三刺激值,色调的定量描述 k_{wc} 的计算公式为:

$$[0025] \quad k_{wc} = \frac{Y - Y_w}{X - X_w} = \frac{Y - 0.333}{X - 0.333} \quad (2)$$

[0026] 式(2)中, X_w , Y_w 分别为色度图中心点 w 的横坐标和纵坐标, 值均为 0.333。

[0027] 前述的基于试液颜色测量的 CO_2 传感器的检测方法, 其特征在于: 在所述步骤 5) 中, 采用 BP 神经网络拟合 CO_2 浓度 C 与 k_{wc} 之间的非线性关系, 以精确实现颜色- CO_2 浓度转换, 具体方法为在计算机上完成 BP 神经网络的训练, 然后将训练好的 BP 神经网络移植到单片机上, 通过改变 CO_2 浓度 C 与实验环境获取多组 k_{wc} 与 C 的对应数据, 其中 CO_2 浓度 C 由精密的红外线式传感器标定。

[0028] 本发明提供一种基于试液颜色测量的新型 CO_2 传感器, 不需要特殊的生产工艺, 首先配置一种颜色对 CO_2 浓度变化非常敏感的测试液体, 该测试液体可重复利用; 再利用光电技术测量颜色, 并实现颜色到浓度的映射, 从而达到测试出 CO_2 浓度的目的。由于需检测的信号变化明显, 所需的测试液体配方原料价格低廉, 再加上本发明采用的三基色检测方法对系统的机械制造精度没有过高的要求, 所以本发明具有制造难度低、成本小、灵敏度高、使用范围广等优点, 非常适用于塑料大棚、玻璃温室、会议室、家庭等农业生产和民用场合。

附图说明

[0029] 图 1 为基于试液颜色测量的 CO_2 传感器设计示意图;

[0030] 图 2 为 CO_2 传感器的光电检测电路示意图;

[0031] 图 3 为单片机的主程序流程图;

[0032] 图 4 为 ADC0809 采集 R、G、B 三基色程序流程图;

[0033] 图 5 为颜色计算的色度图;

[0034] 图 6 为 BP 神经网络模型示意图;

[0035] 图 7 为基于神经网络的颜色- CO_2 浓度转换的程序流程图。

具体实施方式

[0036] 1 CO_2 传感器系统设计

[0037] 完整的传感器设计如图 1 所示。测试气体由进气泵吸入, 进气泵的输出端通入颜色测量试液。待检测的气体与颜色测量试液发生化学反应, 反应后试液颜色发生改变, CO_2 颜色敏感化学实验如 2 所述。通过光电检测电路精确测量试液的 R、G、B 三基色, 将得到的 R、G、B 三基色的值输入到单片机, 由单片机进行颜色计算, 并借助神经网络完成颜色- CO_2 浓度的非线性转换, 最终测量的 CO_2 浓度结果送数码管显示。测量 R、G、B 的光电检测电路设计如 3 所述, 颜色计算如 4 所述, 基于神经网络的颜色- CO_2 浓度的非线性转换如 5 所述。

[0038] 2 CO_2 颜色敏感化学实验

[0039] 根据化学反应原理, 选配一种化学溶液, 使其颜色对 CO_2 气体浓度变化敏感, 从而将 CO_2 气体浓度变化对应为试液的颜色变化。对 CO_2 浓度的测量可以转换成对试液颜色的测量。

[0040] 由于 CO_2 是一种酸性气体, 利用酸碱中和的原理, 与标准的溶液进行比色。该标准试液以 0.001 当量的 $NaHCO_3$ 溶液, 数滴酸碱指示剂 (选择变色范围在大约 pH7 ~ 9 之间) 制成。由于碳酸氢钠具有弱碱性, 该标准试液的初始颜色为碱色, 通入一定体积的空气后, 空气含有的 CO_2 溶于试液中并与水反应生成不稳定的碳酸, 从而增加了酸性, 使试液由弱

碱性转变为弱酸性,导致颜色变为酸色。 CO_2 的浓度越高,颜色变化越明显。静置一会以后,饱和的 CO_2 自动逸出,试液逐渐恢复弱碱性,颜色也相应恢复为初始颜色。测试后试液组成不变,反应可逆,因此试液可循环使用。

[0041] 其中试液中的酸碱指示剂可有多种选择,以下给出几种典型选择方案:

[0042] 甲酚红 ($\text{C}_{21}\text{H}_{18}\text{O}_5\text{S}$):pH7.2(黄)~8.8(紫红);

[0043] 中性红:pH 6.8(黄)~8.0(红);

[0044] 混合指示剂:一份0.1%中性红乙醇溶液,一份0.1%亚甲基蓝乙醇溶液 pH 7.0 变色(绿-蓝紫)

[0045] 目前,已有基本配方,将对其进行进一步的理论分析和实验调整。拟采用分子动力学计算机模拟的方法,理论指导实验,研究出最佳配方。

[0046] 3 光电检测电路设计

[0047] 光电检测电路部分由电源电路、发射光源、透镜、红、绿和蓝滤光片、光电二极管阵列、A/D 转换电路及单片机组成。图 2 给出了除电源电路、发射光源、滤光片外的核心电路图。电源电路采用反馈稳流电路,能够稳定激光光源的输出功率。发射光源选择体积小、重量轻、性能价格比高、安装移动方便的小功率半导体激光二极管。透镜位于发射光源与试液之间,用于将散射光转变为平行光,便于光电二极管的感光测量,透镜到试液的距离及其焦距通过实验固定。A/D 转换采用 ADC0809,单片机采用 8051。

[0048] 试液的反射光通过位置交错均匀排列的红、绿和蓝滤光片到达光电二极管,位于同一色彩滤光片后的光电二极管之间并联成二极管阵列,以消除不同位置探测光强不同带来的色彩测量误差。物体反射光经过红,绿蓝三色滤光片加到光电二极管阵列上产生变化的电流,变化的电流经过电阻变成变化的电压。

[0049] 三种颜色的光电二极管阵列分别得到模拟的 R、G、B 电压值,电压经过运算放大器(LM324)放大输入到 ADC0809 的模拟通道(IN0-IN2),ADC0809 的输出数字通道(2-1-2-8)接单片机的输入 P0.0-P0.7 脚,将 ALE 四分频作为 ADC0809 的时钟工作信号。单片机加电后首先完成初始化,然后等待程序启动按钮开启,程序启动后首先控制 ADC0809 依次采集 R、G、B 三个信号,并存储到指定的空间中,数据采集完毕后指示灯(接在 P3.4 的发光二极管)亮,处理完毕后送数码管显示。系统配置有启动(P1.0)和关闭按钮(P1.1),可以随时开启和关闭系统。单片机的主程序流程图如图 3 所示。

[0050] ADC0809 转换器的片选信号由 P2.7 控制,其通道地址 IN0-IN7 分别为 7FF8H-7FFFH。当 8051 产生 WR(低电平有效)信号时,则由一个或非门产生转换器的启动信号 START 和地址锁存信号 ALE(高电平有效),同时将通道地址 ADDA、ADDB、ADDC 送地址总线,模拟量由被选中的通道送到 A/D 转换器,并在 START 下降沿时开始逐位转换,当转换结束时,转换器结束信号 EOC 变高电平。经反相器可向 CPU 发中断请求或由 CPU 查询,当 8051 产生 RD(低电平有效)信号时,则由一个或非门产生 OE 输出允许信号(高电平有效),使 A/D 转换的结果读入单片机。ADC0809 接口控制程序我们主要采用的是查询方式,程序先启动 ADC0809,然后再等待 P3.2 由高变低(代表 ADC0809 采集数据完成)并将采集数据转存入数据存储器中,然后接着启动下一次 ADC0809,直至三次数据采集完成。启动 ADC0809 时我们使用指令“MOVX@RO,A”使 P2.7 及 WR 信号有效启动 A/D 转换,ADC0809 根据 P2.0、P2.1、P2.2(接 ADDA、ADDB、ADDC)的状态选通三个通道中一个将其进行 A/D 装换。ADC0809 转换

完成以后使 EOC 变高,经反相器后变低,单片机程序查询到 P3.2 变低以后使用指令“MOVX A, @DPTR”使 RD 信号有效,将转换后数据读入寄存器 A 中后转存入数据存储器中。三次数据采集完成以后程序将采集完成指示灯(接在 P3.4 口)闪烁三下后,单片机完成颜色计算与浓度测定后,指示灯亮 30 秒钟,然后将最终结果送数码管显示。ADC0809 采集 R、G、B 三基色程序流程图如图 4 所示。

[0051] 显示数值时,使用单片机程序将显示的值依次从串口串行的输出(P3.1 作为时钟, P3.0 作为输出口),经过移位寄存器 74LS164 将串行数据转换成并行数据送数码管显示。测量范围为:0 ~ 2000ppm,可显示多位。

[0052] 4 颜色计算

[0053] 任何颜色均可用红、绿、蓝三基色按比例匹配而成,若以 (C) 代表被匹配的颜色, C 代表其颜色数量;以 (R)、(G)、(B) 代表三基色, R、G、B 代表三基色数量,即该颜色的三刺激值,则 $C(C) \equiv R(R)+G(G)+B(B)$,其中“ \equiv ”符号表示视觉上相等。用色度坐标 X, Y, Z 表示颜色,即

$$[0054] \quad X = \frac{R}{R+G+B} \quad Y = \frac{g}{R+G+B} \quad Z = \frac{B}{R+G+B} \quad (1)$$

[0055] 以色度坐标表示的平面图称为色度图。色度图中, X 轴色度坐标相当于红基色的比例; Y 轴色度坐标相当于绿基色的比例。色度图中没有 Z 轴色度坐标(即蓝基色所占的比例),因为比例系数 $X+Y+Z = 1$, Z 的坐标值可以推算出来,即 $Z = 1-(X+Y)$ 。根据 CIE(国际照明委员会)标准色度学系统所规定的一套颜色测量原理、数据和计算方法进行颜色测量。这种模式可实现微小颜色差别的检测。

[0056] 颜色计算可由图 5 说明:一个样品的色调可以由色度图中 w 点(标准白点)和样品所在点 c 连线 wc 的延长线与光谱轨迹的交点 d 所确定, d 点的波长值 λ_d 称为样品 c 的主波长或补色波长;直线 wc 的斜率 k_{wc} 和主波长或补色波长形成一对一的关系。由此,斜率 k_{wc} 可以有效地区分样品的色调,对颜色进行总体的定量描述。其计算公式为

$$[0057] \quad k_{wc} = \frac{Y - 0.333}{X - 0.333} \quad (2)$$

[0058] 首先测量构成液体颜色的红、绿、蓝光三基色的反射(或透射)R、G、B 值。然后由公式(1)计算出色度坐标 X, Y, Z 的值,也即三种颜色的混合比例。进一步可由公式(2)得到定量描述色调的斜率 k_{wc} 的值。通过 k_{wc} 的值即可实现颜色测量。这种颜色检测法准确性高,因为检测距离无论怎样变化,只能引起光强的变化,而三种颜色光的比例不会变,因此,即使在目标有机械振动的场合也可以检测。对传感器在机械精密度方面要求不高,传感器成本也就可以很容易地降下来。

[0059] 5 基于神经网络的颜色-CO₂ 浓度转换

[0060] 改变 CO₂ 浓度 C,测量其对应的 k_{wc} 值,同时由精密的红外线式传感器标定 CO₂ 浓度 C,从而可以预测定多组 (k_{wc} , C) 数据。该组数据可用于拟合 C 随 k_{wc} 变化的关系曲线 f。得到关系曲线 f 之后,即可由每次测量得到的 k_{wc} 值,通过关系曲线 f 计算得到其对应的 CO₂ 浓度 C 的值。C 与 k_{wc} 的关系是非线性的,若通过线性拟合得到关系曲线 f,难免会存在较大的偏差。因此,我们考虑进行非线性拟合。

[0061] BP 神经网络具有非线性逼近能力强、网络结构简单、泛化能力好、学习速度快等优点,被广泛应用于非线性逼近等领域。拟采用 BP 神经网络实现非线性曲线的拟合和 CO₂ 浓

度的计算。构建一个单节点的（色调的定量描述 k_{wc} ）输入层和一个单节点的输出层（CO₂ 浓度 C）的多层神经网络模型，通过预测定的多组样本数据，在 MATLAB 上通过训练构建神经网络，如果训练的结果达到系统的误差要求，则输出各隐含层和输出层的权值和阈值，然后，就可以利用训练好的网络参数，将其移植到单片机上，通过单片机的神经网络算法程序计算后，就可得到当前精确的 CO₂ 浓度 C 的值。

[0062] 1) 神经网络模型及其训练

[0063] MATLAB 有神经网络的专门工具箱，可利用 MATLAB 的函数来训练求解神经网络参数。CO₂ 传感器对应的输入为：色调 k_{wc} 的值，因此输出为一元函数，即 $C = f(k_{wc})$ 。利用 BP 神经网络对样本数据进行拟合，隐含层选取 5 个节点，输出层选取 1 个节点，对应 CO₂ 浓度 C 的输出。建立的神经网络模型如图 6 所示。

[0064] 图 6 中 k_{wc} 为计算得到的色调值；C 为输出的 CO₂ 浓度； W_k 为输入层到隐含层色调的权值； W_o 为隐含层到输出层的各个权值； G_1 、 G_o 分别为隐含层和输出层的阈值。隐含层选用 S 型函数 $\log\text{sig}$ ，函数原型为 $f(x) = 1/(1+e^{-x})$ 。输出层选用线型函数 purelin ，函数原型为 $f(x) = x(-1 < x < 1)$ 。为了使训练更快、更稳定，对所有样本数据进行归一化处理，归一化函数为

$$[0065] \quad X_n = 2(X - \min(X)) / (\max(X) - \min(X)) \quad (3)$$

[0066] 式 (3) 中， $\min(X)$ 、 $\max(X)$ 分别为样本变量的最小值和最大值。利用 newff 函数生成一个 2 层前向网络： $\text{net} = \text{newff}(\text{minmax}(X_n), [5, 1], \{ 'logsig', 'purelin' \}, 'trainlm')$ ， X_n 表示含有归一化后的样本色调 k_{wc} 矩阵。 Trainlm 表示采用附加动量法和自适应学习速度法的网络进行训练。

[0067] 将 k_{wc} 和对应的 CO₂ 浓度 C 的值进行训练，网络训练性能目标（均方误差）定义为 $\text{MSE} = 10^{-10}$ ， $\text{net} = \text{train}(\text{net}, X_n, C)$ ，此处 C 为归一化后的 CO₂ 浓度；通过不断调整网络的势态因子与学习因子，经过多次训练可达到目标误差要求，最终可得到神经网络模型。通过 $G_1 = \text{net}.b\{1\}$ ， $G_o = \text{net}.b\{2\}$ ， $W_k = \text{net}.IW\{1\}$ ， $W_o = \text{net}.LW\{2\}$ 得到训练好的神经网络算法的隐含层阈值、输出层阈值及隐含层权值、输出层权值。

[0068] 2) 神经网络移植到单片机

[0069] 神经网络的训练结束后，可得到隐含层、输出层阈值；隐含层、输出层权值。根据每次采集得到的色调 k_{wc} ，在单片机中完成神经网络模型算法。由图 6 的神经网络的结构示意图可得到 CO₂ 浓度 C 的表达式

$$[0070] \quad C = \sum_{i=1}^5 \log\text{sig}[k_{wc} \cdot W_k(i) - G_1(i)]W_o(i) - G_o \quad (4)$$

[0071] 式 4 中的所有值都已知，在单片机上可以通过程序实现。由于在网络训练的时候进行了归一化的处理，因此，在实际实现的过程中还必须把色调 k_{wc} 值 P 采用公式 (3) 进行归一化的处理，同时，得到的结果必须进行反归一化处理。设神经网络得到的归一化的 CO₂ 浓度为 C_n ，采用 $C = 0.5(C_n + 1) \cdot (\max(C) - \min(C)) + \min(C)$ 得到最终的 CO₂ 浓度 C 值。用单片机 8051 实现的基于神经网络的颜色 - CO₂ 浓度转换的程序流程如图 7 所示。

[0072] 本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，实施的技术方案可参考前面所述的技术方案及对应的示意图，此处主要是给出了进一步的操作细节，特别是对可灵活选择、需要注意的实施环节进行了说明，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0073] 具体实施说明如下：

[0074] 1、由 0.001 当量的 NaHCO_3 溶液及数滴酸碱指示剂配置成颜色检测试液，其中，酸碱指示剂的变色范围在 $\text{pH}7 \sim 9$ 之间，可灵活选择，比如选择甲酚红 ($\text{C}_{21}\text{H}_{18}\text{O}_5\text{S}$) 作为酸碱指示剂。试液对 CO_2 浓度变化敏感，且由于反应可逆，试液可循环使用。

[0075] 2、通过进气泵获得定量的待检测气体，待检测气体通过经由 1 调试得到的颜色检测试液，发生酸碱中和，产生颜色变化的测试液。

[0076] 3、利用激光光源和光电检测电路得到描述试液颜色的三基色 R、G、B 的强度。

[0077] 4、由公式 (1)、(2) 计算得到色调的定量描述 k_{wc} 。

[0078] 5、由色调的定量描述 k_{wc} ，通过单片机内置的 BP 神经网络实现颜色 - CO_2 浓度转换。

[0079] 6、采用 BP 神经网络拟合 C 与 k_{wc} 之间的非线性关系，以精确实现颜色 - CO_2 浓度转换。首先在计算机上完成 BP 神经网络的训练，然后将训练好的 BP 神经网络移植到单片机上。通过改变 CO_2 浓度 C 与实验环境获取多组 (k_{wc}, C) 的对应数据， CO_2 浓度 C 可由精密的红外线式传感器标定。 k_{wc} 的值由单片机根据获得的三基色 R、G、B 的强度，采用公式 (1)、(2) 计算得到。

[0080] 7、为得到较为精确的结果，可降低 BP 神经网络的训练误差、增加训练次数并提高 BP 神经网络的隐层节点数。

[0081] 8、经单片机处理得到的 CO_2 浓度送数码管显示。

[0082] 以上已以较佳实施例公开了本发明，然其并非用以限制本发明，凡采用等同替换或者等效变换方式所获得的技术方案，均落在本发明的保护范围之内。

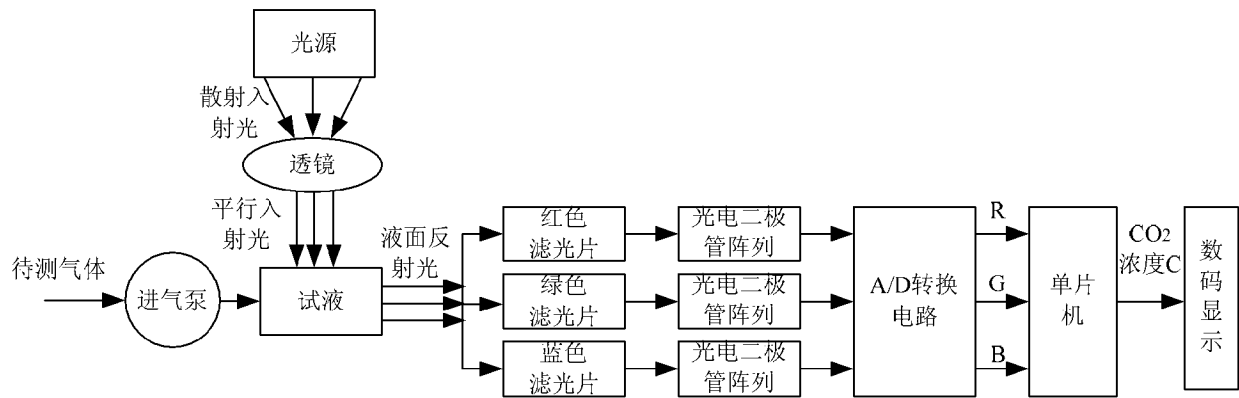


图 1

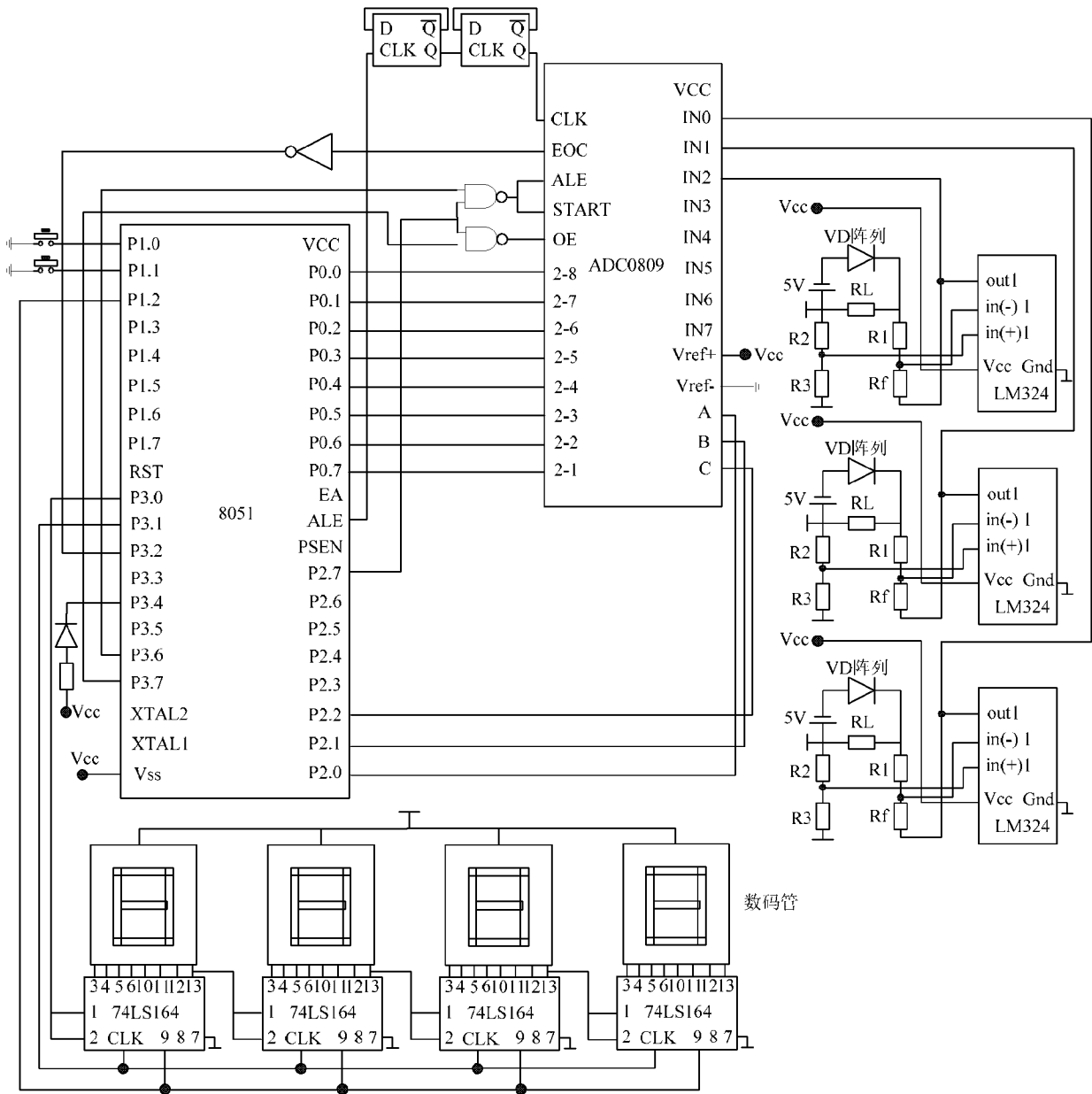


图 2

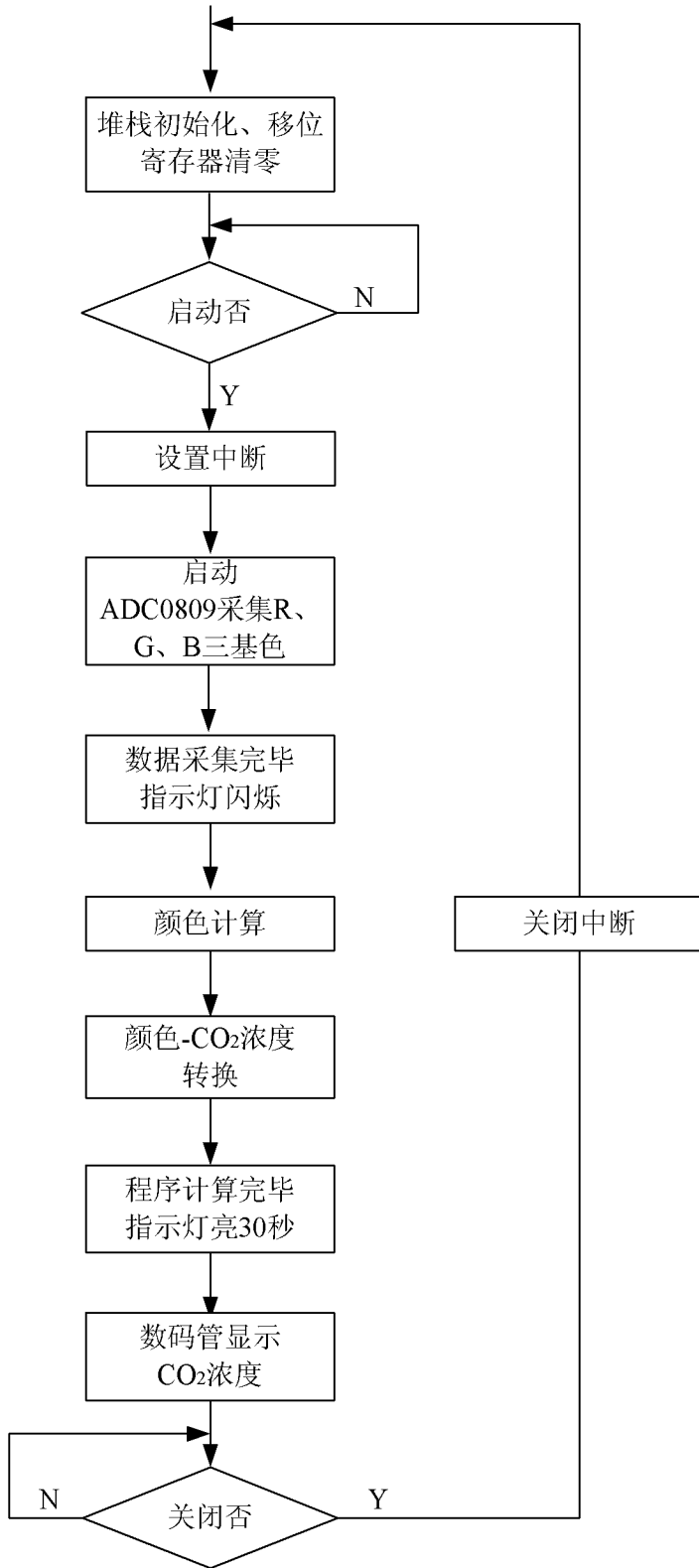


图 3

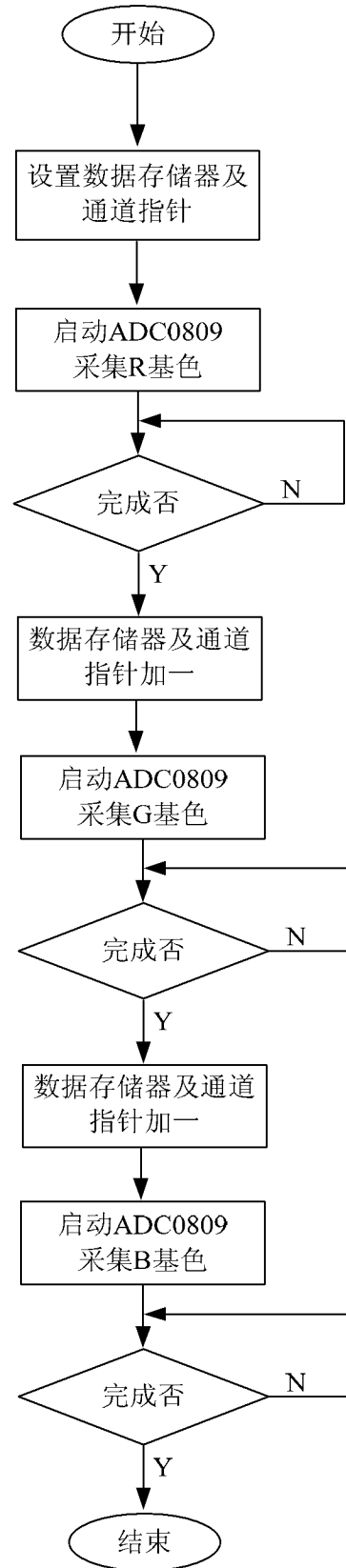


图 4

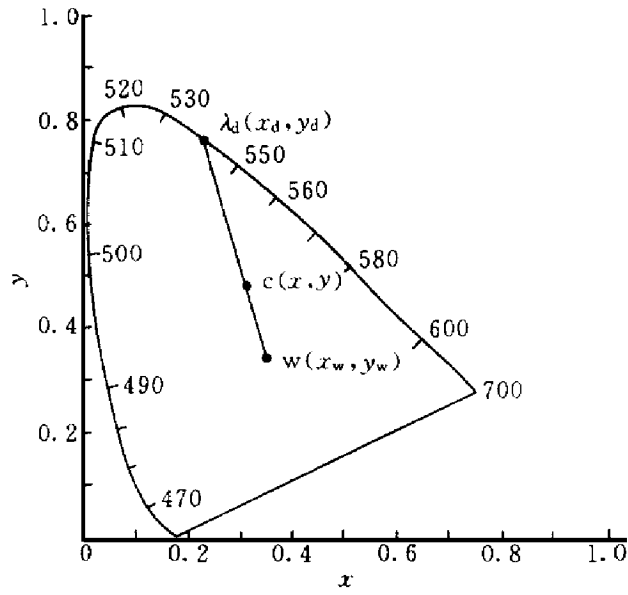


图 5

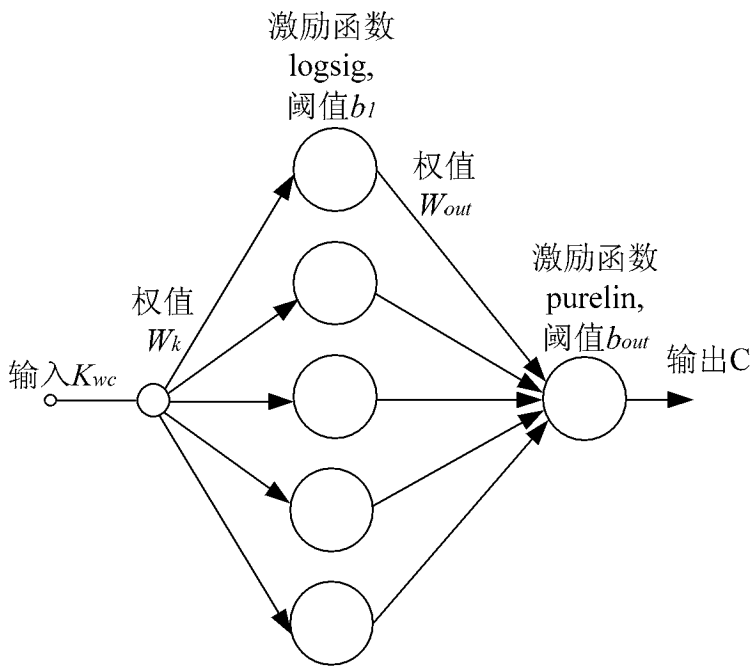


图 6

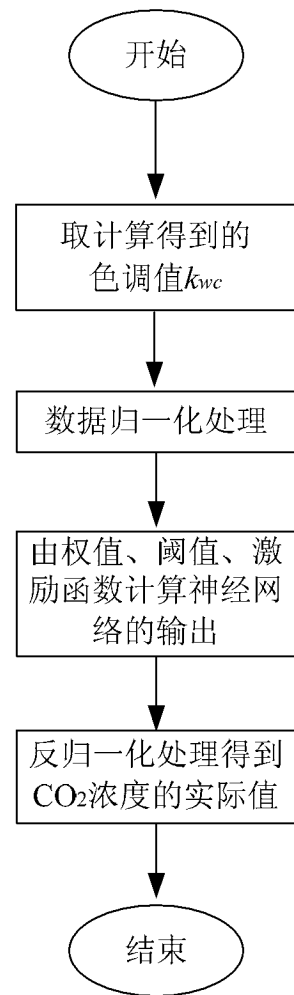


图 7