
第一篇 物联网基础理论

物联网概述

一般来说,物联网被认为是传统的互联网向物理世界的一个延伸,它通过连接物理世界,使得网络能够更好地为人类服务。维基百科上对物联网的定义为:

“The Internet of things (IoT) is the extension of Internet connectivity into physical devices and everyday objects. Embedded with electronics, Internet connectivity, and other forms of hardware (such as sensors), these devices can communicate and interact with others over the Internet, and they can be remotely monitored and controlled.”

简单而言,通过物联网,各种不同的设备都能够互相连接起来,这些设备能够感知物理世界、互相交流和沟通,连接起来提供不同的服务。物联网能够广泛应用在生产和生活的各个方面,产生了智慧家庭(smart home)、智慧城市(smart city)、智慧农业(smart agriculture)、智慧医疗(smart medical and healthcare)、环境监测(environmental monitoring)等一系列相关的应用场景。

在探索物联网发展历史的过程中,会发现它包含的很多不同的技术其实能够追溯到很久以前。感知技术是物联网技术的重要组成部分,最早的感知物理世界的设备是传感器,几乎所有的传感器都能够通过将外界物理世界的信号转化为电信号(通常是电压信号)来精确地感知外部世界,例如温度传感器,它能够通过将温度信号转化为电压信号来感知温度的变化(注:到本书成书时为止,用来测量温度的传感器都是通过间接的方式来获取温度)。再例如气体传感器($PM_{2.5}$, 甲醛等),它通过光化学或者电化学的方法将气体的含量转化为电压信号,通过电压信号的高低来表示气体浓度。传感器的出现使得物理世界可以数字化,极大提高了生产和生活中处理物理世界信息的效率,因此传感器成为物联网的基础。

不过仅有传感器本身还不是完整的物联网。最初传感器出现时并没有网络的概念,它仅仅作为物理世界数字化的手段。1991年,施乐研究中心(XEROX Palo Alto Research Center)的 Mark Weiser 提出了通用计算(ubiquitous computing)的概念:系统能够通过无处不在的计算,提高计算的随时随地的可用性(availability),降低计算的可见性(visibility)来提供服务。通俗来说,就是让技术在不知不觉中提供服务。

“The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into

the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it.” —Mark Weiser

要想实现不知不觉中提供无所不在的服务,还需要对设备的控制和信息的互联。感知、控制、互联,这些概念描绘出了物联网的基本蓝图。

无线传感网(wireless sensor networks)的发展是物联网发展历史中重要的一环。当时伯克利大学的一个研究小组要在某个海岛上做生态监测的实验,但小岛并没有基础的网络设施可以用。为了采集岛上的实验数据,研究小组部署了多个不同的小型无线传感器网络节点,这些节点上面有传感器能够感知外部世界的环境,同时这些节点能够互相通信,以自组网的方式构成网络并完成通信、数据处理和任务分发等工作,这就是最早的无线传感网。传感网的出现拓展了传统传感器的使用范围,将传感器向物理世界进行了延伸;同时也拓展了传统网络的概念,不再需要专用的网络设施,而是通过网络节点自组织通信构成网络。

无线传感网的出现引起了大量关注,受到了各方面的重视,人们希望能够将无线传感器网络用在森林监控、城市监控、环境监控等领域。无线传感网也成为当时研究的热点,由此开展了大量的研究工作,并涌现了一大批杰出的研究人员。虽然无线传感网在后来并没有太多的直接应用,但是在研究过程中出现的一系列技术,如低功耗技术、自组网技术等,却成为现在物联网应用的基础。

还有一个重要的应用场景就是无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)的应用。研究人员对物联网还有另外一个方向的发展愿景:让物联网朝着物流网络的方向进行发展,通过 RFID 的应用提高物流的效率,基于当时的互联网、无线通信、RFID 技术和 EPC 标准等,实现全球物品的实时信息共享网络。

由于物联网领域涌现出上述技术,以及它的出现给人们带来了美好愿景,物联网技术在 2003 年一度成为非常有前景的技术,还被评为未来改变人们生活的十大技术之一。

在 2005 年,国际电信联盟的 2005 年报告(ITU Internet reports 2005: <https://www.itu.int/net/wsis/tunis/newsroom/stats/The-Internet-of-Things-2005.pdf>)更是以“The Internet of Things”作为标题报道了物联网,这可能是物联网概念第一次在 ITU 官方正式报告中出现。这个报告的信息量很大,推荐大家去阅读一下。虽然这个报告是在 2005 年写成的,但里面的很多信息直到现在为止依然适用。这个报告指出,随着物联网的发展,最终每一个颗粒和尘埃都可以被标记和联网,这样的技术能够连接每一个设备,能够使得看起来静态不变的物体变得动态并具备智能;虚拟世界能够映射物理世界,每一个物体都有其地址,人和物体之间能够交流,同时物体和物体之间也能够交流。

In this way, the “virtual world” would “map” the “real world”, given that everything in our physical environment would have its own identity (a passport of sorts) in virtual cyberspace. This will enable communication and interaction between people and things, and between things, on a staggering scale.

这个 2005 年的报告已经为物联网提供了基本的定义,也畅想了物联网应用的美好前景。

物联网为传统网络提供了一个新的维度,即在“随时互联、随地互联”之外,提供了“万物互联”的可能,如图 1-1 所示。

ITU 报告描述了一个对物联网应用进行畅想的例子,在一个技术报告中展现了一个有

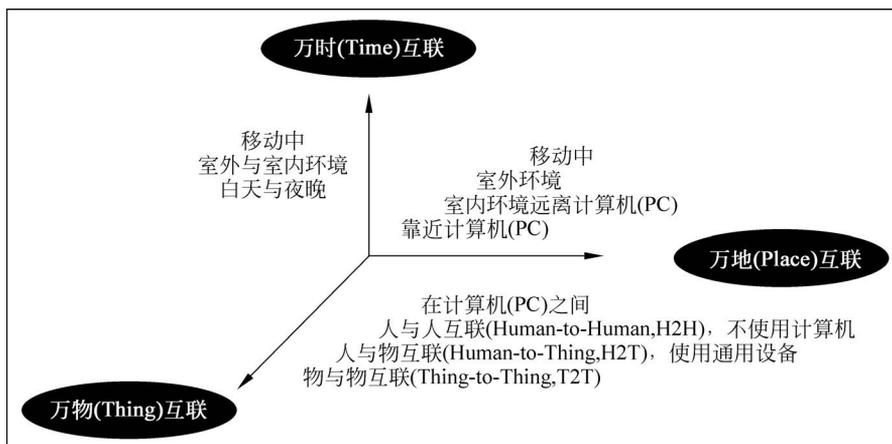


图 1-1 网络连接的三个维度

技术、爱情、浪漫等不同元素的未来应用畅想故事。

推荐大家都来读一读这个故事，感受当时对物联网的应用畅想。现在看来，这是一个不那么科幻的科幻故事，这一点恰恰证明，这个近 20 年前形成的报告中，提到的很多技术正在慢慢走向现实。

2009 年，时任美国总统的奥巴马与美国工商界领袖举行了一次圆桌会议。在这次会议上，IBM 首次提出了“智慧地球”的概念：将计算机技术应用到各行各业，将感知功能嵌入工业生产的方方面面。IBM 前首席执行官郭士纳曾提出一个重要的观点，即计算模式每隔 15 年发生一次变革。这一判断像摩尔定律一样准确，人们把它称为“十五年周期定律”。1965 年前后发生的变革以大型机为标志，1980 年前后以个人计算机的普及为标志，而 1995 年前后则发生了互联网革命。每一次这样的技术变革都引起了企业间、产业间甚至国家间竞争格局的重大动荡和变化。同样在 2009 年，物联网被正式列为国家的五大新兴战略产业之一，并写入了政府工作报告，从此物联网在中国也受到了前所未有的关注。

近些年来，物联网在不同场景应用，例如物联网在工业生产的工业互联网，体现了物联网技术的巨大潜力，有很多行业通过物联网和工业相结合来提高生产效率。同时物联网和人工智能(AI+IoT)的结合也成为产业的重要发展目标，有不少的公司开始以 AI+IoT 为主打的方向。

在这些繁华的背后，本书抛开应用五花八门的畅想，来透过现象看到物联网本质，理解物联网技术。

物联网一般包含感知层、连接层、网络层、应用层。感知层主要来进行物理世界的感知，可以通过专用的传感器设备来进行感知，而现有的研究前沿工作也发现即使不用专用的传感器，也能够实现感知的目的，例如，利用物体不同的位置和人的动作对无线信号的影响，通过分析无线信号的变化来实现对物体的定位和人的行为的感知；连接层需要考虑如何将大量的物理设备接入网络，这里既要结合传统网络技术(WiFi、蓝牙等)，也需要解决物联网应用场景下新的问题，例如，物联网中要支持大量计算能力比较低的设备的连接，需要支持低功耗的连接、远距离的连接和并发的大量连接等；网络层是指如何将物联网中的数据和指令等传输到指定的地方，这里面既包括传统的互联网应用的基本架构，也出现了物

联网领域大量设备连接起来之后新的特征,例如,群智感知应用等;应用层是指基于前面三层的物联网应用的实现,在物联网数据的基础之上,构建物联网的应用需要应用到不同维度的信息和结合不同的技术,例如,人工智能算法的处理、大数据分析技术等。

纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行。想要掌握物联网的知识,除了理论部分外,实践同样重要。本书在介绍基础的物联网概念性知识之外,还有各种实验案例来反映物联网学习中的实践过程。希望大家在阅读本书的过程中既要动脑,也要动手,理论与实践相结合,定会有所收获!

物联网无线信号处理基础

2.1 信号的生成、发送和接收

在物联网组网传输的过程中,不可避免地要接触到各种无线信号,其中电磁信号和声波信号是比较有代表性的两种。为了实现无线传输的基本功能及在上面发展出来的各种技术,首先需要了解信号的基本处理方法和相关的理论知识,并且最好还能够实际动手尝试。

在真实场景中,一般使用电磁波信号进行通信和感知,现在市面上有了能够进行信号处理的设备,例如,通用软件无线电设备(universal software radio peripheral, USRP)可以对电磁波进行发射、接收等处理。但是,除了可见光之外,常用作通信的电磁波本身难以被人的感官所感知,因此对于刚开始接触无线信号的人来说,电磁波不够直观。

为了使大家能够更加直观地感受和学习信号的特点、更加直观地看到信号、更加直接地处理和分析信号,本书后面的材料中如果没有特殊声明,都将使用声波信号来模拟物联网连接过程中的各种技术,这样做有以下好处:

- 声波信号可以较好地模拟电磁波的特点,大部分的处理方法都是通用的,可以使大家比较容易地理解基本方法。
- 声波信号对硬件的要求较低,现有的手机等设备就能够进行声波信号处理,方便大家直接做实验,也降低了硬件门槛。
- 声波信号可以比较直观地画图展示,便于大家进行分析对比。同时声波信号能够被人听到,可以有更加直观的感受。
- 有了声波信号的基础,学习其他信号会非常方便,可以方便地扩展到电磁波等其他信号。

通过后面的学习,大家能够熟悉信号处理的基本方法,以及物联网通信和感知的基本思路。本章内容将介绍信号处理的基本方法和理论知识,为之后的物联网传输、通信、感知技术奠定基础。

在介绍信号的生成、发送和接收之前,先来了解一下声波信号的基本特征。声波是一种机械波,是由发声体振动并在介质中传播产生的。声波每秒钟振动的周期数称为声波的频率,单位是赫兹(Hz)。一般来说,人耳可以听到的声波频率在 20Hz 到 20kHz 之间,频率超过 20kHz 的声波称为超声波,低于 20Hz 的声波称为次声波。

由于声波的传播是由物体的振动引起了空气的振动,因此声波也可以带动其他物体振动,出现了类似超声波洗龙虾、超声波洗眼镜、超声波洗牙等应用。

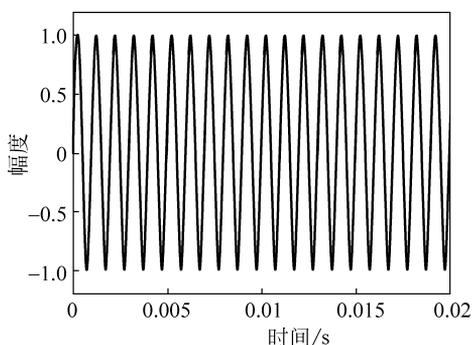


图 2-1 1kHz 正弦声波信号

图 2-1 展示了一个频率为 1kHz 的正弦声波信号,图中横轴为时间,纵轴为信号的幅度。信号的幅度在 1 和 -1 之间周期性变化,变化的频率为 1kHz,即一秒钟内有一千个周期。

接下来,本书会介绍一段样例代码,来解释这段声音是如何生成的。为了产生这段声音,只需要在 MATLAB 中运行如下代码就可以。大家可以用 MATLAB 的 `sound()` 函数将这段声音播放出来(代码第 5 行播放声音),代码最后会将生成的声波保存成本地文件 `sound.wav`,用电脑上的音频播放器播放该文件的效果应与 `sound()` 函数在代码中直接播放的效果一致。

```

Fs = 48000;           % 采样频率(单位:Hz)
T = 4;               % 时间长度(单位:s)
f = 1000;            % 信号频率(单位:Hz)
y = sin(2 * pi * f * (0 : 1/Fs : T)); % 产生声音
sound(y, Fs)         % 播放声音
audiowrite('sound.wav', y, Fs);    % 保存声音

```

上面的代码完整地实现了声波的生成、发送(播放)和保存成本地文件的功能。大家可以注意,这里出现了采样这一概念,其中还涉及两个频率:采样频率和信号频率。这些概念及它们之间的联系与区别将在之后的章节介绍。

这个材料里面很多代码是基于 MATLAB 来写的,如果没有使用过,网上有很多参考资料。

MATLAB 同样可以实现声波的接收功能,代码如下:

```

Fs = 48000;           % 采样频率(单位:Hz)
Rec = audiorecorder(Fs, 16, 1); % 定义录音对象
T = 4;               % 录音时长(单位:s)
record(Rec, T);      % 开始录音
pause(T);            % 等待录音结束
y = getaudiodata(Rec); % 从录音对象中取出音频数据
audiowrite('sound.wav', y, Fs); % 保存声音

```

上面的代码录制一段时间的声波信号并保存成本地文件。在定义录音对象时调用了函数 `audiorecorder`,这个函数有 3 个参数,从前到后依次是采样频率、采样位数和声道数。理解这个函数,要理解信号处理的几个关键概念,包含采样、量化等。在这个例子中,设置采样频率为 48kHz,采样位数为 16 位,声道数为 1(即单声道)。这 3 个参数从 3 个不同的维度确定了所接收声波的格式。声道数一般指的是该声音有几路(例如,是几个麦克风录制的)。在 MATLAB 代码中,如果声道数为 1,则录制得到的音频数据是一个列向量;如果声道数为 2,则录制得到的音频数据是两个列向量组成的矩阵,每一列分别代表从一个麦克

风录制的结果。麦克风就是信号的采样设备,在电磁波场景中,就使用电磁波采样设备对电磁波信号进行采集。

这就是信号发送和接收的基础,大家可以动手来尝试一下。在这个例子中,用声波来模拟信号的发送和接收,而在真实场景的无线信号平台上,经历的也是类似的过程,只不过用来发送、采样的硬件设备不一样,这里使用声波更加直观。

2.2 模拟信号与数字信号介绍

日常生活中能看到的信号大部分都是模拟信号。如果要将日常生活中的信息,比如看到的风雨雷电、听到的声音、感受到的温度变化等,存入电脑中,就需要经过一系列的处理,其中一个重要的步骤就是模拟信号到数字信号的转换(简称模/数转换),它的核心思想可以概括为“从连续到离散”。

如果物理世界中真实存在着一个 1kHz 的声波信号,需要接收并使用计算机处理这个信号,就先要对信号进行模/数转换。真实存在的光信号或者其他无线信号,在使用计算机处理时,也需要将它们模/数转换。进行模拟信号到数字信号的转化是所有计算机处理数据和信号的基础。

计算机中模/数转换是通过采样和量化来实现的。具体来说,先将模拟信号转化为电信号(比如电压信号),然后对电信号采样并量化转成数字信号。注意,这里面实际上经过了两个步骤,第一步是将物理信号转变为电信号,这是处理的基础,转变为电信号后仍然是连续信号,所以第二步就需要对电信号进行采样,然后对采样到的结果进行量化。具体到声音信号的处理中,首先需要麦克风来接收声波,这里的接收过程具体是指麦克风能够将模拟的声波信号转化为电压信号。如图 2-2 所示,麦克风上面有一个可以随着声音振动而振动的薄膜,薄膜振动引起了产生电压的不断变化,因此电压的变化就代表了声波信号的变化。

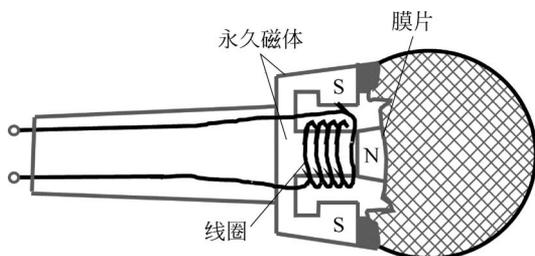


图 2-2 麦克风的简化原理

需要注意的是,麦克风转化后成电压信号后,这个时候的电压信号在时间和幅度上仍然是连续的,在时间上可以取任意时刻的电压值,电压值在理论上可以取到任意的实数值。显然,这样连续的数据是无法在电脑上存储的,平时在电脑上处理的声音信号也不是这种格式。如果要全部存储下来,需要的存储空间将是无穷大的。

思考: 为什么时间连续的信号需要的存储空间是无穷大的?

为了保存这样的数据,先要对数据进行处理。第一个处理就是把时间上连续的信号转化为时间上离散的信号,这一步是通过采样来实现的。采样是指设备定时地对电压信号进行采集。“定时地采集”一般情况下是指按照固定的时间间隔进行采集(如果时间间隔并不固定,可以参考“非均匀采样”这个概念),一秒钟采集的样本数称为采样频率,简称采样率,单位是赫兹(Hz)。

这里出现了一个关键问题:采样率设置为多大,或者说如何确定最合适的采样频率?在后面信号采样和采样定理一节中有具体阐述。

可是采样后的电压值仍然没有办法直接保存,因为电压值在可能的取值范围内是连续的。因此即便是采样后的电压值,存储起来理论上的开销也是无穷大。

思考:为什么取值连续的信号需要的存储空间是无穷大的?

为了解决这个问题,需要对信号进行量化。简单来说就是将数值上连续的电压取值转化为离散的电压取值,将电压值从无限多种取值转化为有限多种取值。经过了采样和量化,才能够真正地保存声音信号。平时说的模拟/数字转换器(analog to digital converter, ADC)其实做的就是这样的事情,与之对应的是数/模转换器,即 DAC。DAC 的用途在于,如果要把电脑中存储的声波播放出来,就需要跟模/数转换相反的操作:数/模转换。这里以扬声器(喇叭)举例,扬声器从电脑处接收到需要播放的音频数据,通过数/模转换器转换为电信号,电信号驱动电磁铁的运动,进而带动喇叭上的薄膜振动,最终将声波播放出去。真实的无线数据发送过程也是类似的,数据通过通信设备转化为电磁波信号,然后将电磁波传播出去。

如何进行量化,量化的影响如何,将在后面信号量化一节进行阐述。

2.3 信号采样与采样定理

关于采样有两个核心的问题:①采样具体是如何实现的。②采样后得到的信号,会不会与原来的信号不一样。也就是说,是否能够通过采样后的信号来完全恢复原始信号。先来看采样具体是怎么实现的。

为了更形象地说明这一点,首先通过简单的仿真实验来展示采样,然后再通过实际的信号让大家体会这一过程。假设存在一个正弦的声波信号,频率为 5Hz。假设采样率为 200Hz,即 1 秒内有 200 个采样点,这个正弦波信号的采样点在 MATLAB 下可以使用如下的代码生成并画图。

```
%% 信号的产生过程
%% 产生一个频率为 5Hz、时长为 1s 的信号;
t = 0:1/200:1; % 1s 内 200 个采样点
f = 5; % 频率 f = 5Hz
y = sin(2 * pi * f * t);
plot(t, y);
```

在图 2-3 中,取的采样点比较密集,因此图像看上去是一条连续的曲线,然而实际上它是不连续的。这条看上去是曲线的图形实际上是折线,利用 MATLAB 绘图界面的放大镜可以看到,这条折线是由很多离散的采样点组成的,在相邻的采样点之间用直线连接,由于