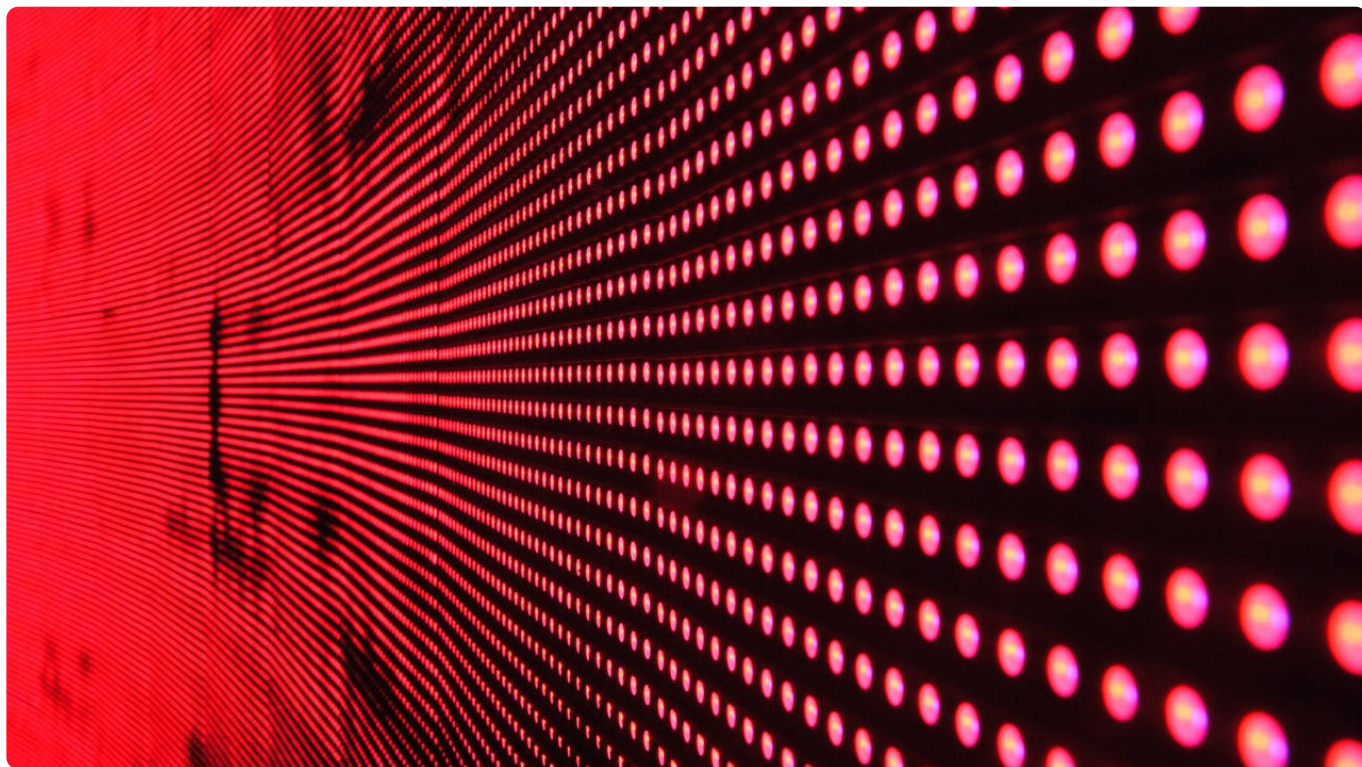


16 | 浮点数和定点数（下）：深入理解浮点数到底有什么用？

2019-05-31 徐文浩

深入浅出计算机组成原理

[进入课程 >](#)



讲述：徐文浩

时长 12:37 大小 11.57M



上一讲，我们讲了用“浮点数”这样的数据形式，来表示一个不能确定大小的数据范围。浮点数可以大到 3.40×10^{38} ，也可以小到 1.17×10^{-38} 这样的数值。同时，我们也发现，其实我们平时写的 0.1、0.2 并不是精确的数值，只是一个近似值。只有 0.5 这样，可以表示成 2^{-1} 这种形式的，才是一个精确的浮点数。

你是不是感到很疑惑，浮点数的近似值究竟是怎么算出来的？浮点数的加法计算又是怎么回事儿？在实践应用中，我们怎么才用好浮点数呢？这一节，我们就一起来看这几个问题。

浮点数的二进制转化

我们首先来看，十进制的浮点数怎么表示成二进制。

我们输入一个任意的十进制浮点数，背后都会对应一个二进制表示。比方说，我们输入了一个十进制浮点数 9.1。那么按照之前的讲解，在二进制里面，我们应该把它变成一个“**符号位 s+ 指数位 e+ 有效位数 f**”的组合。第一步，我们要做的，就是把这个数变成二进制。

首先，我们把这个数的整数部分，变成一个二进制。这个我们前面讲二进制的时候已经讲过了。这里的 9，换算之后就是 1001。

接着，我们把对应的小数部分也换算成二进制。小数怎么换成二进制呢？我们先来定义一下，小数的二进制表示是怎么回事。我们拿 0.1001 这样一个二进制小数来举例说明。和上面的整数相反，我们把小数点后的每一位，都表示对应的 2 的 -N 次方。那么 0.1001，转化成十进制就是：

$$1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 0 \times 2^{-3} + 1 \times 2^{-4} = 0.5625$$

和整数的二进制表示采用“除以 2，然后看余数”的方式相比，小数部分转换成二进制是用一个相似的反方向操作，就是乘以 2，然后看看是否超过 1。如果超过 1，我们就记下 1，并把结果减去 1，进一步循环操作。在这里，我们就会看到，0.1 其实变成了一个无限循环的二进制小数，0.0**0011**0011。这里的“0011”会无限循环下去。

行号	算式	是否超过1	0/1表示	剩余差值	
1	$0.1 \times 2 = 0.2$	否	0	0.2	
2	$0.2 \times 2 = 0.4$	否	0	0.4	
3	$0.4 \times 2 = 0.8$	否	0	0.8	
4	$0.8 \times 2 = 1.6$	是	1	$1.6 - 1 = 0.6$	
5	$0.6 \times 2 = 1.2$	是	1	$1.2 - 1 = 0.2$	
6	$0.2 \times 2 = 0.4$	否	0	0.4	6~9行重复 2~5行
.....					

然后，我们把整数部分和小数部分拼接在一起，9.1 这个十进制数就变成了 1001.0**0011**0011...这样一个二进制表示。

上一讲我们讲过，浮点数其实是用二进制的科学计数法来表示的，所以我们可以把小数点左移三位，这个数就变成了：

$$1.001000110011 \dots \times 2^3$$

那这个二进制的科学计数法表示，我们就可以对应到了浮点数的格式里了。这里的符号位 $s = 0$ ，对应的有效位 $f = 001000110011\dots$ 。因为 f 最长只有 23 位，那这里“0011”无限循环，最多到 23 位就截止了。于是， $f = 001000110011001100110011001$ 。最后的一个“0011”循环中的最后一个“1”会被截断掉。对应的指数为 e ，代表的应该是 3。因为指数位有正又有负，所以指数位在 127 之前代表负数，之后代表正数，那 3 其实对应的是加上 127 的偏移量 130，转化成二进制，就是 130，对应的就是指数位的二进制，表示出来就是 10000010。

s	指数位e								有效位f													
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	...
	8位代表3								23位													

然后，我们把“ $s+e+f$ ”拼在一起，就可以得到浮点数 9.1 的二进制表示了。最终得到的二进制表示就变成了：

$$01000001000100011001100110011001$$

如果我们再把这个浮点数表示换算成十进制，实际准确的值是 9.09999942779541015625。相信你现在应该不会感觉奇怪了。

我在这里放一个[链接](#)，这里提供了直接交互式地设置符号位、指数位和有效位数的操作。你可以直观地看到，32 位浮点数每一个 bit 的变化，对应的有效位数、指数会变成什么样子以及最后的十进制的计算结果是怎样的。

这个也解释了为什么，在上一讲一开始， $0.3+0.6=0.899999$ 。因为 0.3 转化成浮点数之后，和这里的 9.1 一样，并不是精确的 0.3 了，0.6 和 0.9 也是一样的，最后的计算会出现精度问题。

浮点数的加法和精度损失

搞清楚了怎么把一个十进制的数值，转化成 IEEE-754 标准下的浮点数表示，我们现在来看一看浮点数的加法是怎么进行的。其实原理也很简单，你记住六个字就行了，那就是**先对齐、再计算**。

两个浮点数的指数位可能是不一样的，所以我们要把两个的指数位，变成一样的，然后只去计算有效位的加法就好了。

比如 0.5，表示成浮点数，对应的指数位是 -1，有效位是 00...（后面全是 0，记住 f 前默认有一个 1）。0.125 表示成浮点数，对应的指数位是 -3，有效位也还是 00...（后面全是 0，记住 f 前默认有一个 1）。

那我们在计算 0.5+0.125 的浮点数运算的时候，首先要把两个的指数位对齐，也就是把指数位都统一成两个其中较大的 -1。对应的有效位 1.00...也要对应右移两位，因为 f 前面有一个默认的 1，所以就会变成 0.01。然后我们计算两者相加的有效位 1.f，就变成了有效位 1.01，而指数位是 -1，这样就得到了我们想要的加法后的结果。

实现这样一个加法，也只需要位移。和整数加法类似的半加器和全加器的方法就能够实现，在电路层面，也并没有引入太多新的复杂性。

	符号位s	指数位e	有效位1.f
0.5	0	-1	1.00...
0.125	0	-3	1.00...
0.125对齐指数位	0	-1	0.01
0.5 + 0.125	0	-1	1.01


同样的，你可以用刚才那个链接来试试看，我们这个加法计算的浮点数的结果是不是正确。

回到浮点数的加法过程，你会发现，其中指数位较小的数，需要在有效位进行右移，在右移的过程中，最右侧的有效位就被丢弃掉了。这会导致对应的指数位较小的数，在加法发生之前，就**丢失精度**。两个相加数的指数位差的越大，位移的位数越大，可能丢失的精度也就越大。当然，也有可能你的运气非常好，右移丢失的有效位都是 0。这种情况下，对应的加法

虽然丢失了需要加的数字的精度，但是因为对应的值都是 0，实际的加法的数值结果不会有精度损失。


32 位浮点数的有效位长度一共只有 23 位，如果两个数的指数位差出 23 位，较小的数右移 24 位之后，所有的有效位就都丢失了。这也就意味着，虽然浮点数可以表示上到 3.40×10^{38} ，下到 1.17×10^{-38} 这样的数值范围。但是在实际计算的时候，只要两个数，差出 2^{24} ，也就是差不多 1600 万倍，那这两个数相加之后，结果完全不会变化。

你可以试一下，我下面用一个简单的 Java 程序，让一个值为 2000 万的 32 位浮点数和 1 相加，你会发现，+1 这个过程因为精度损失，被“完全抛弃”了。

 复制代码

```
1 public class FloatPrecision {
2     public static void main(String[] args) {
3         float a = 20000000.0f;
4         float b = 1.0f;
5         float c = a + b;
6         System.out.println("c is " + c);
7         float d = c - a;
8         System.out.println("d is " + d);
9     }
10 }
```

对应的输出结果就是：

 复制代码


```
1 c is 2.0E7
2 d is 0.0
```

Kahan Summation 算法

那么，我们有没有什么办法来解决这个精度丢失问题呢？虽然我们在计算浮点数的时候，常常可以容忍一定的精度损失，但是像上面那样，如果我们连续加 2000 万个 1，2000 万的数值都会被精度损失丢掉了，就会影响我们的计算结果。


一个常见的应用场景是，在一些“积少成多”的计算过程中，比如在机器学习中，我们经常要计算海量样本计算出来的梯度或者 loss，于是会出现几亿个浮点数的相加。每个浮点数可能都差不多大，但是随着累积值的越来越大，就会出现“大数吃小数”的情况。

我们可以做一个简单的实验，用一个循环相加 2000 万个 1.0f，最终的结果会是 1600 万左右，而不是 2000 万。这是因为，加到 1600 万之后的加法因为精度丢失都没有了。这个代码比起上面的使用 2000 万来加 1.0 更具有现实意义。

 复制代码

```
1 public class FloatPrecision {
2     public static void main(String[] args) {
3         float sum = 0.0f;
4         for (int i = 0; i < 20000000; i++) {
5             float x = 1.0f;
6             sum += x;
7         }
8         System.out.println("sum is " + sum);
9     }
10 }
```

对应的输出结果是：

 复制代码

```
1 sum is 1.6777216E7
```


面对这个问题，聪明的计算机科学家们也想出了具体的解决办法。他们发明了一种叫作 [Kahan Summation](#) 的算法来解决这个问题。算法的对应代码我也放在文稿中了。从中你可以看到，同样是 2000 万个 1.0f 相加，用这种算法我们得到了准确的 2000 万的结果。

 复制代码

```
1 public class KahanSummation {
2     public static void main(String[] args) {
3         float sum = 0.0f;
4         float c = 0.0f;
5         for (int i = 0; i < 20000000; i++) {
6             float x = 1.0f;
7             float y = x - c;
8             float t = sum + y;
```

```
9         c = (t-sum)-y;
10        sum = t;
11    }
12    System.out.println("sum is " + sum);
13 }
14 }
```

对应的输出结果就是：

 复制代码

```
1 sum is 2.0E7
```

其实这个算法的原理其实并不复杂，就是在每次的计算过程中，都用一次减法，把当前加法计算中损失的精度记录下来，然后在后面的循环中，把这个精度损失放在要加的小数上，再做一次运算。

如果你对这个背后的数学原理特别感兴趣，可以去看一看[Wikipedia 链接](#)里面对应的数学证明，也可以生成一些数据试一试这个算法。这个方法在实际的数值计算中也是常用的，也是大量数据累加中，解决浮点数精度带来的“大数吃小数”问题的必备方案。

总结延伸

到这里，我们已经讲完了浮点数的表示、加法计算以及可能会遇到的精度损失问题。可以看到，虽然浮点数能够表示的数据范围变大了很多，但是在实际应用的时候，由于存在精度损失，会导致加法的结果和我们的预期不同，乃至完全没加上的情况。

所以，一般情况下，在实践应用中，对于需要精确数值的，比如银行存款、电商交易，我们都会使用定点数或者整数类型。

比方说，你一定在 MySQL 里用过 `decimal(12,2)`，来表示订单金额。如果我们的银行存款用 32 位浮点数表示，就会出现，马云的账户里有 2 千万，我的账户里只剩 1 块钱。结果银行一汇总总金额，那 1 块钱在账上就“不翼而飞”了。

而浮点数呢，则更适合我们不需要有一个非常精确的计算结果的情况。因为在真实的物理世界里，很多数值本来就不是精确的，我们只需要有限范围内的精度就好了。比如，从我家到办公室的距离，就不存在一个 100% 精确的值。我们可以精确到公里、米，甚至厘米，但是既没有必要、也没有可能去精确到微米乃至纳米。

对于浮点数加法中可能存在的精度损失，特别是大量加法运算中累积产生的巨大精度损失，我们可以用 Kahan Summation 这样的软件层面的算法来解决。

好了，到了这里，我已经把浮点数讲透了。希望你能从数据的表示、加法的实现，乃至实践应用、数值算法层面能够体会到，搞清楚一个计算机问题的基本原理，其实能够帮助你理解它的实践应用，乃至找到在特定问题下的可行解决方案。接下来，我们要深入到 CPU 的构造，去理解计算机组成原理。

推荐阅读

浮点数的加法我们讲完了。想要更深入地了解乘法乃至除法，可以参看《计算机组成与设计 硬件 / 软件接口》的 3.5.2 和 3.5.3 小节。

课后思考

这两节我讲的都是 32 位浮点数，那么对于 64 位浮点数的加法，两个数相差多少的情况后，较小的哪个数在加法过程中会完全丢失呢？


欢迎你在留言区写下你的思考和疑问，和大家一起探讨。你也可以把今天的文章分享给你朋友，和他一起学习和进步。

深入浅出计算机组成原理

带你掌握计算机体系全貌

徐文浩 bothub 创始人



新版升级：点击「 请朋友读」，20位好友免费读，邀请订阅更有**现金**奖励。

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 15 | 浮点数和定点数（上）：怎么用有限的Bit表示尽可能多的信息？

下一篇 17 | 建立数据通路（上）：指令+运算=CPU

精选留言 (13)

写留言



有米

2019-05-31

7

decimal是如何实现保证不丢精度呢？

展开



初心、可曾...

2019-05-31

2

64位浮点数，有效位是52位,所以相差 2^{53} 会丢失较小的数

展开





humor
2019-05-31



对于64位的浮点数，符号位是1位，所以应该是如果两个相差 2^{53} 倍及以上的数相加，较小的数会完全丢失吧。



任雪龙
2019-06-03



9.1 的二进制表示 0 10000010 0010 001100110011001 是如何转化为十进制的
9.09999942779541015625 的？f 为 0010 001100110011001，e 为 3，计算应该是
 $1.0010\ 001100110011001 * 8 = 8.00800088$ 呀，是我那里计算有问题吗



古夜
2019-06-03



请问，软硬件接口里第3章第一节118页里说的7右下角10是什么意思呢？

展开 ∨



晓明
2019-06-03



老师问个问题，浮点数表示中的有效位数为1.f中的f。在加法的示例中为了让0.125的指数为-1，有效位变成了0.01，并不是1.f的形式，这种情况下二进制是怎么表示的？电路是怎么设计的？

展开 ∨



senekis
2019-06-01



老师，我使用了IEEE754的网站，输入浮点数9.1，得到结果：

010000010 0010 0011001100110011 010

而按照老师的算法，得到的结果是：

010000010 0010 0011001100110011 001

差了一位，这是为什么呢？是使用方法不正确吗？...

展开 ∨



喜欢吃鱼
2019-05-31



老师，您能解释下Kahan算法for循环中y,c着两个变量的意思吗？

我想的是t用来保存累加和，c用来保存此次累加过程中被损失的精度，但是 $y=x-c$ 这里不太了解，望老师解答一下。

展开 ▾



有铭

2019-05-31



decimal难道就是所谓定点数？Java里的BigDecimal的原理是什么？

展开 ▾



龙猫

2019-05-31



Kahan Summation

```
sum = 0.0
```

```
c = 0.0
```

```
for -----...
```

展开 ▾



古夜

2019-05-31



这两章得反复看

展开 ▾



鱼向北游

2019-05-31



double按规范是符号位1位 阶码11位 尾码52位 精度差 2^{53} 就会有问题了

long double就和各平台差异相关了

展开 ▾



Linuxer

2019-05-31



请教64位的浮点数还是一位符号为，8位指数吗？另外浮点数减法是转换成加法进行运算吗？那符号位怎么处理？

