

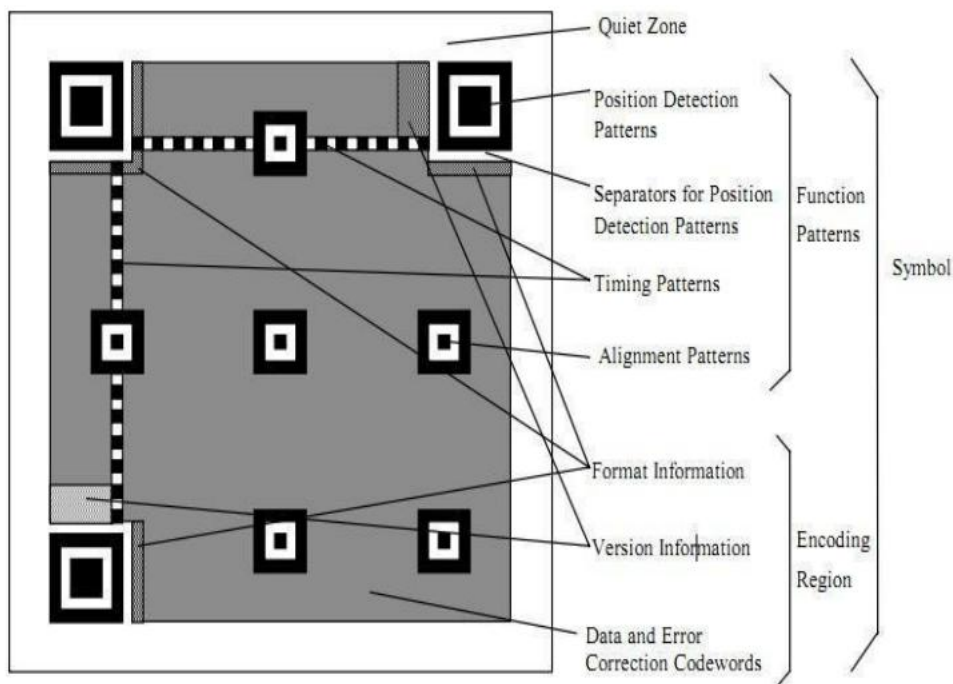
二维码的生成细节和原理

二维码又称 QR Code，QR 全称 Quick Response，是一个近几年来移动设备上超流行的一种编码方式，它比传统的 Bar Code 条形码能存更多的信息，也能表示更多的数据类型：比如：字符，数字，日文，中文等等。这两天学习了一下二维码图片生成的相关细节，觉得这个玩意就是一个密码算法，在此写一这篇文章，揭露一下。供好学的人一同学习之。

基础知识

首先，我们先说一下二维码一共有 40 个尺寸。官方叫版本 Version。Version 1 是 21 x 21 的矩阵，Version 2 是 25 x 25 的矩阵，Version 3 是 29 的尺寸，每增加一个 version，就会增加 4 的尺寸，公式是： $(V-1)*4 + 21$ （V 是版本号）最高 Version 40， $(40-1)*4+21 = 177$ ，所以最高是 177 x 177 的正方形。

下面我们看看一个二维码的样例：



定位图案

- Position Detection Pattern 是定位图案，用于标记二维码的矩形大小。这三个定位图案有白边叫 Separators for Position Detection Patterns。之所以三个而不是四个意思就是三个就可以标识一个矩形了。

- Timing Patterns 也是用于定位的。原因是二维码有 40 种尺寸，尺寸过大了后需要有根标准线，不然扫描的时候可能会扫歪了。
- Alignment Patterns 只有 Version 2 以上（包括 Version2）的二维码需要这个东东，同样是为了定位用的。

功能性数据

- Format Information 存在于所有的尺寸中，用于存放一些格式化数据的。
- Version Information 在 \geq Version 7 以上，需要预留两块 3×6 的区域存放一些版本信息。

数据码和纠错码

- 除了上述的那些地方，剩下的地方存放 Data Code 数据码 和 Error Correction Code 纠错码。

数据编码

我们先来说说数据编码。QR 码支持如下的编码：

Numeric mode 数字编码，从 0 到 9。如果需要编码的数字的个数不是 3 的倍数，那么，最后剩下的 1 或 2 位数会被转成 4 或 7bits，则其它的每 3 位数字会被编成 10,12,14bits，编成多长还要看二维码的尺寸（下面有一个表 Table 3 说明了这点）

Alphanumeric mode 字符编码。包括 0-9，大写的 A 到 Z（没有小写），以及符号 \$ % * + - . / : 包括空格。这些字符会映射成一个字符索引表。如下所示：（其中的 SP 是空格，Char 是字符，Value 是其索引值）编码的过程是把字符两两分组，然后转成下表的 45 进制，然后转成 11bits 的二进制，如果最后有一个落单的，那就转成 6bits 的二进制。而编码模式和 字符的个数需要根据不同的 Version 尺寸编成 9, 11 或 13 个二进制（如下表中 Table 3）

Char.	Value	Char.	Value	Char.	Value	Char.	Value	Char.	Value	Char.	Value	Char.	Value
0	0	6	6	C	12	I	18	O	24	U	30	SP	36
1	1	7	7	D	13	J	19	P	25	V	31	\$	37
2	2	8	8	E	14	K	20	Q	26	W	32	%	38
3	3	9	9	F	15	L	21	R	27	X	33	*	39
4	4	A	10	G	16	M	22	S	28	Y	34	+	40
5	5	B	11	H	17	N	23	T	29	Z	35	-	41

Byte mode，字节编码，可以是 0-255 的 ISO-8859-1 字符。有些二维码的扫描器可以自动检测是否是 UTF-8 的编码。

Kanji mode 这是日文编码，也是双字节编码。同样，也可以用于中文编码。日文和汉字的编码会减去一个 值。如：在 0X8140 to 0X9FFC 中的字符会减去 8140，在 0XE040 到 0XEBCF 中的字符要减去 0XC140，然后把前两位拿出来乘以 0XC0，然后再加上后两位，最后转成 13bit 的编码。如下图示例：

Input character	“点”	“茗”
(Shift JIS value):	935F	E4AA
1. Subtract 8140 or C140	$935F - 8140 = 121F$	$E4AA - C140 = 236A$
2. Multiply m.s.b. by C0	$12 \times C0 = D80$	$23 \times C0 = 1A40$
3. Add l.s.b.	$D80 + 1F = D9F$	$1A40 + 6A = 1AAA$
4. Convert to 13 bit binary	$0D9F \rightarrow 0\ 1101\ 1001\ 1111$	$1AAA \rightarrow 1\ 1010\ 1010\ 1010$

Extended Channel Interpretation (ECI) mode 主要用于特殊的字符集。并不是所有的扫描器都支持这种编码。

Structured Append mode 用于混合编码，也就是说，这个二维码中包含了多种编码格式。

FNC1 mode 这种编码方式主要是给一些特殊的工业或行业用的。比如 GS1 条形码之类的。简单起见，后面三种不会在本文 中讨论。

下面两张表中，

- Table 2 是各个编码格式的“编号”，这个东西要写在 Format Information 中。注：中文是 1101
- Table 3 表示了，不同版本（尺寸）的二维码，对于，数字，字符，字节和 Kanji 模式下，对于单个编码的 2 进制的位数。（在二维码的规格说明书中，有各种各样的编码规范表，后面还会提到）

Table 2 — Mode indicators

Mode	Indicator
ECI	0111
Numeric	0001
Alphanumeric	0010
8-bit Byte	0100
Kanji	1000
Structured Append	0011
FNC1	0101 (First position) 1001 (Second position)
Terminator (End of Message)	0000

Table 3 — Number of bits in Character Count Indicator

Version	Numeric Mode	Alphanumeric Mode	8-bit Byte Mode	Kanji Mode
1 to 9	10	9	8	8
10 to 26	12	11	16	10
27 to 40	14	13	16	12

下面我们看几个示例，

示例一：数字编码

在 Version 1 的尺寸下，纠错级别为 H 的情况下，编码： 01234567

1. 把上述数字分成三组：012 345 67
2. 把他们转成二进制： 012 转成 0000001100； 345 转成 0101011001； 67 转成 1000011。
3. 把这三个二进制串起来：0000001100 0101011001 1000011
4. 把数字的个数转成二进制（version 1-H 是 10 bits）：8 个数字的二进制是 0000001000
5. 把数字编码的标志 0001 和第 4 步的编码加到前面： 0001 0000001000 0000001100 0101011001 1000011

示例二：字符编码

在 Version 1 的尺寸下，纠错级别为 H 的情况下，编码：AC-42

1. 从字符索引表中找到 AC-42 这五个字条的索引（10, 12, 41, 4, 2）
2. 两两分组：（10, 12）（41, 4）（2）
3. 把每一组转成 11bits 的二进制：

（10, 12） $10 \times 45 + 12$ 等于 462 转成 00111001110

(41, 4) $41 \times 45 + 4$ 等于 1849 转成 11100111001

(2) 等于 2 转成 000010

4. 把这些二进制连接起来: 00111001110 11100111001 000010

5. 把字符的个数转成二进制 (Version 1-H 为 9 bits): 5 个字符, 5 转成 000000101

6. 在头上加上编码标识 0010 和第 5 步的个数编码: 0010 000000101 00111001110
11100111001 000010

结束符和补齐符

假如我们有个 HELLO WORLD 的字符串要编码, 根据上面的示例二, 我们可以得到下面的编码,

编码	字符数	HELLO WORLD 的编码
0010	0000001011	01100001011 01110000110 10001011100 10110111000 10011010100 001101

我们还要加上结束符:

编码	字符数	HELLO WORLD 的编码	结束
0010	0000001011	01100001011 01110000110 10001011100 10110111000 10011010100 001101	0000

按 8bits 重排

如果所有的编码加起来不是 8 个倍数我们还要在后面加上足够的 0, 比如上面一共有 78 个 bits, 所以, 我们还要加上 2 个 0, 然后按 8 个 bits 分好组:

00100000 01011011 00001011 01111000 11010001 01110010 11011100
01001101 01000011 01000000

补齐码 (Padding Bytes)

最后, 如果还没有达到我们最大的 bits 数的限制, 我们还要加一些补齐码 (Padding Bytes), Padding Bytes 就是重复下面的两个 bytes: 11101100 00010001 (这两个二进制转成十进制是 236 和 17, 我也不知道为什么, 只知道 Spec 上是这么写的) 关于每一个 Version 的每一种纠错级别的最大 Bits 限制, 可以参看 QR Code Spec 的第 28 页到 32 页的 Table-7 一表。

假设我们需要编码的是 Version 1 的 Q 纠错级，那么，其最大需要 104 个 bits，而我们上面只有 80 个 bits，所以，还需要 24 个 bits，也就是需要 3 个 Padding Bytes，我们就添加三个，于是得到下面的编码：

00100000 01011011 00001011 01111000 11010001 01110010 11011100 01001101
01000011 01000000 11101100 00010001 11101100

纠错码

上面我们说到了一些纠错级别，Error Correction Code Level，二维码中有四种级别的纠错，这就是为什么二维码有残缺还能扫出来，也就是为什么有人在二维码的中心位置加入图标。

错误修正容量

- L 水平 7%的字码可被修正
- M 水平 15%的字码可被修正
- Q 水平 25%的字码可被修正
- H 水平 30%的字码可被修正

那么，QR 是怎么对数据码加上纠错码的？首先，我们需要对数据码进行分组，也就是分成不同的 Block，然后对各个 Block 进行纠错编码，对于如何分组，我们可以查看 QR Code Spec 的第 33 页到 44 页的 Table-13 到 Table-22 的定义表。注意最后两列：

- Number of Error Code Correction Blocks ：需要分多少个块。
- Error Correction Code Per Blocks：每一个块中的 code 个数，所谓的 code 的个数，也就是有多少个 8bits 的字节。

5	134	L	26	1	(134,108,13)
		M	48	2	(67,43,12)
		Q	72	2 2	(33,15,9) (34,16,9)
		H	88	2 2	(33,11,11) (34,12,11)
6	172	L	36	2	(86,68,9)
		M	64	4	(43,27,8)
		Q	96	4	(43,19,12)
		H	112	4	(43,15,14)
<p>^a (c, k, r): c = total number of codewords k = number of data codewords r = number of error correction capacity</p> <p>^b Error correction capacity is less than half the number of error correction codewords to reduce the probability of misdecodes.</p>					

举个例子：上述的 Version 5 + Q 纠错级：需要 4 个 Blocks（2 个 Blocks 为一组，共两组），头一组的两个 Blocks 中各 15 个 bits 数据 + 各 9 个 bits 的纠错码（注：表中的 codewords 就是一个 8bits 的 byte）（再注：最后一例中的（c, k, r）的公式为： $c = k + 2 * r$ ，因为后脚注解了：纠错码的容量小于纠错码的一半）

下图给一个 5-Q 的示例（因为二进制写起来会让表格太大，所以，我都用了十进制）

组块	数据	对每个块的纠错码
1	67 85 70 134 87 38 85 194 119 50 6213 199 11 45 115 247 241 223 229 248 154	
1	18 6 103 38	117 154 111 86 161 111 39
2	246 246 66 7 118 134 242 7 38 86 2287 204 96 60 202 182 124 157 200 134 27 129	
2	198 199 146 6	209 17 163 163 120 133
1	182 230 247 119 50 7 118 134 87 38148 116 177 212 76 133 75 242 238 76 195 230	
2	82 6 134 151 50 7	189 10 108 240 192 141
2	70 247 118 86 194 6 151 50 16 236 17235 159 5 173 24 147 59 33 106 40 255 172	
2	236 17 236 17 236	82 2 131 32 178 236

注：二维码的纠错码主要是通过 Reed-Solomon error correction（里 德-所罗门纠错算法）来实现的。对于这个算法，对于我来说是相当的复杂，里面有很多的数学计算，比如：多项式除法，把 1-255 的数映射成 2 的 n 次方（ $0 \leq n \leq 255$ ）的伽罗瓦域 Galois Field 之类的神一样的东西，以及基于这些基础的纠错数学公式，因为我的数据基础差，对于我来说太过复杂，所以我一时半会儿还有点没搞明白，还在学习中，所以，我在这里就不展开说这些东西了。还请大家见谅了。（当然，如果有朋友很明白，也繁请教教我）

最终编码

穿插放置

如果你以为我们可以开始画图，你就错了。二维码的混乱技术还没有玩完，它还要把数据码和纠错码的各个 codewords 交替放在一起。如何交替呢，规则如下：

对于数据码：把每个块的第一个 codewords 先拿出来按顺序排列好，然后再取第一块的第二个，如此类推。如：上述示例中的 Data Codewords 如下：

```
块 167 85 70 13487 38 85 19411950 6 18 6 10338
块 224624666 7 1181342427 38 86 221981991466
块 318223024711950 7 11813487 38 826 134151507
块 470 24711886 1946 15150 16 2361723617 23617236
```

我们先取第一列的：67， 246， 182， 70

然后再取第二列的：67， 246， 182， 70， 85， 246， 230 ， 247

如此类推：67， 246， 182， 70， 85， 246， 230 ， 247 ， 38， 6， 50， 17， 7， 236

对于纠错码，也是一样：

```
块 121319911 45 11524724122322924815411715411186 16111139
块 287 20496 60 20218212415720013427 12920917 163163120133
块 314811617721276 13375 24223876 19523018910 108240192141
块 42351595 17324 14759 33 10640 25517282 2 13132 178236
```

和数据码取的一样，得到：213， 87， 148， 235， 199， 204， 116， 159， 39， 133， 141， 236

然后，再把这两组放在一起（纠错码放在数据码之后）得到：

67， 246， 182， 70， 85， 246， 230， 247， 70， 66， 247， 118， 134， 7， 119， 86， 87， 118， 50， 194， 38， 134， 7， 6， 85， 242， 118， 151， 194， 7， 134， 50， 119， 38， 87， 16， 50， 86， 38， 236， 6， 22， 82， 17， 18， 198， 6， 236， 6， 199， 134， 17， 103， 146， 151， 236， 38， 6， 50， 17， 7， 236， 213， 87， 148， 235， 199， 204， 116， 159， 11， 96， 177， 5， 45， 60， 212， 173， 115， 202， 76， 24， 247， 182， 133， 147， 241， 124， 75， 59， 223， 157， 242， 33， 229， 200， 238， 106， 248， 134， 76， 40， 154， 27， 195， 255， 117， 129， 230， 172，

154, 209, 189, 82, 111, 17, 10, 2, 86, 163, 108, 131, 161, 163, 240, 32, 111, 120, 192, 178, 39, 133, 141, 236

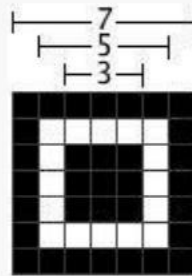
Remainder Bits

最后再加上 Remainder Bits，对于某些 Version 的 QR，上面的还不够长度，还要加上 Remainder Bits，比如：上述的 5Q 版的二维码，还要加上 7 个 bits，Remainder Bits 加零就好了。关于哪些 Version 需要多少个 Remainder bit，可以参看 QR Code Spec 的第 15 页的 Table-1 的定义表。

画二维码图

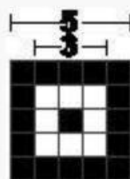
Position Detection Pattern

首先，先把 Position Detection 图案画在三个角上。



Alignment Pattern

然后，再把 Alignment 图案画上

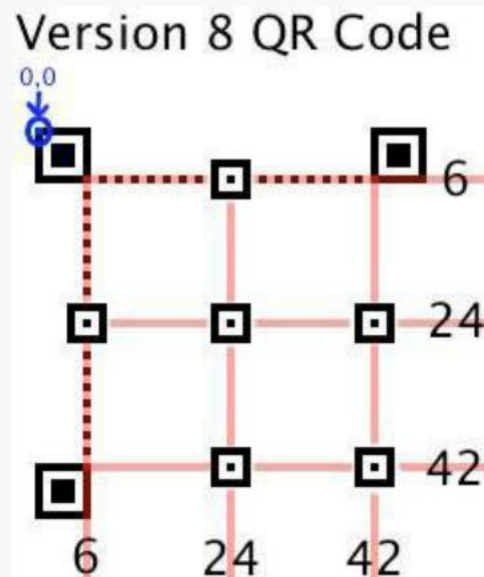


关于 Alignment 的位置，可以查看 QR Code Spec 的第 81 页的 Table-E.1 的定义表（下表是不完全表格）

Table E.1 — Row/column coordinates of center module of Alignment Patterns

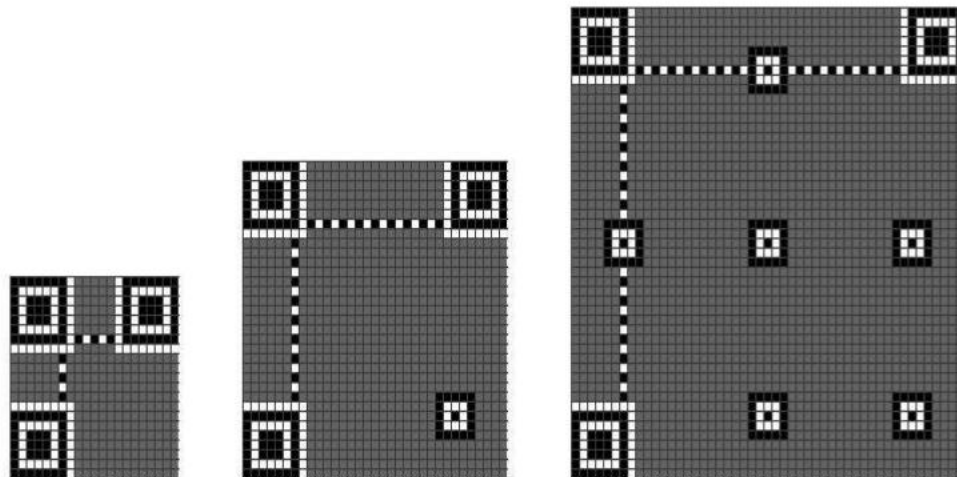
Version	Number of Alignment Patterns	Row/Column coordinates of center module						
1	0	-						
2	1	6	18					
3	1	6	22					
4	1	6	26					
5	1	6	30					
6	1	6	34					
7	6	6	22	38				
8	6	6	24	42				
9	6	6	26	46				
10	6	6	28	50				

下图是根据上述表格中的 Version8 的一个例子（6，24，42）



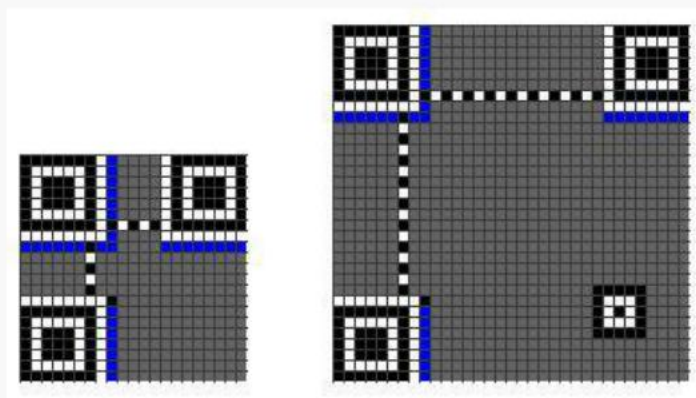
Timing Pattern

接下来是 Timing Pattern 的线（这个不用多说了）

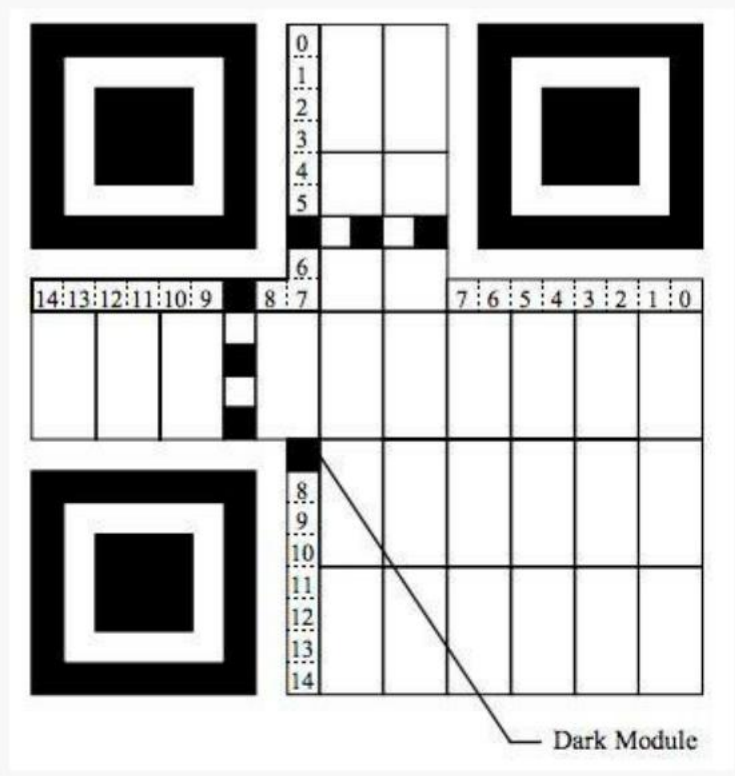


Format Information

再接下来是 Formation Information，下图中的蓝色部分。



Format Information 是一个 15 个 bits 的信息，每一个 bit 的位置如下图所示：（注意图中的 Dark Module，那是永远出现的）



这 15 个 bits 中包括:

- 5 个数据 bits: 其中, 2 个 bits 用于表示使用什么样的 Error Correction Level, 3 个 bits 表示使用什么样的 Mask
- 10 个纠错 bits。主要通过 BCH Code 来计算

然后 15 个 bits 还要与 101010000010010 做 XOR 操作。这样就保证不会因为我们选用了 00 的纠错级别, 以及 000 的 Mask, 从重造成全部为白色, 这会增加我们的扫描器的图像识别的困难。

下面是一个示例:

Assume Error Correction Level M:	00
and Mask Pattern Reference:	101
Data:	00101
BCH bits:	0011011100
Unmasked bit sequence:	001010011011100
Mask pattern for XOR operation:	101010000010010
Format Information module pattern:	100000011001110

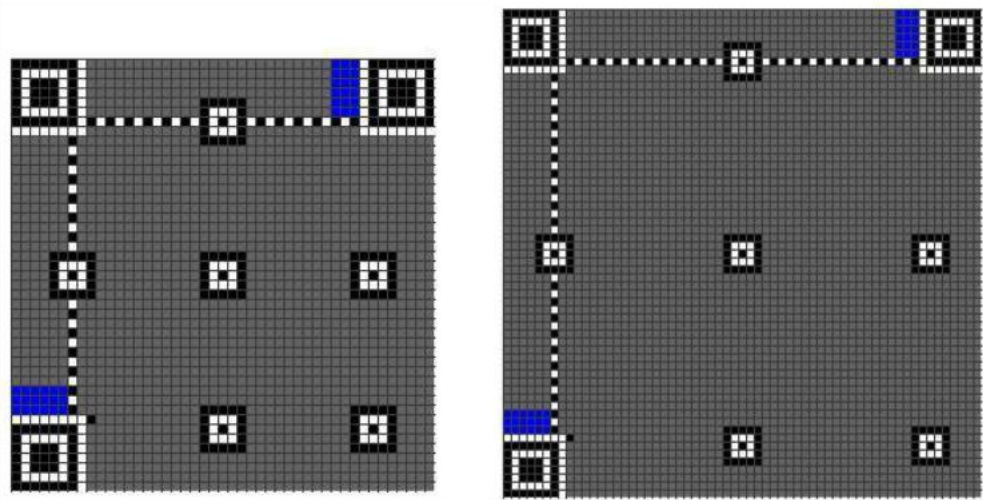
关于 Error Correction Level 如下表所示:

Error Correction Level	Binary indicator
L	01
M	00
Q	11
H	10

关于 Mask 图案如后面的 Table 23 所示。

Version Information

再接下来是 Version Information（版本 7 以后需要这个编码），下图中的蓝色部分。



Version Information 一共是 18 个 bits，其中包括 6 个 bits 的版本号以及 12 个 bits 的纠错码，下面是一个示例：

Version number:	7
Data:	000111
BCH bits:	110010010100
Format Information module pattern:	000111110010010100

而其填充位置如下：

0	3	6	9	12	15
1	4	7	10	13	16
2	5	8	11	14	17

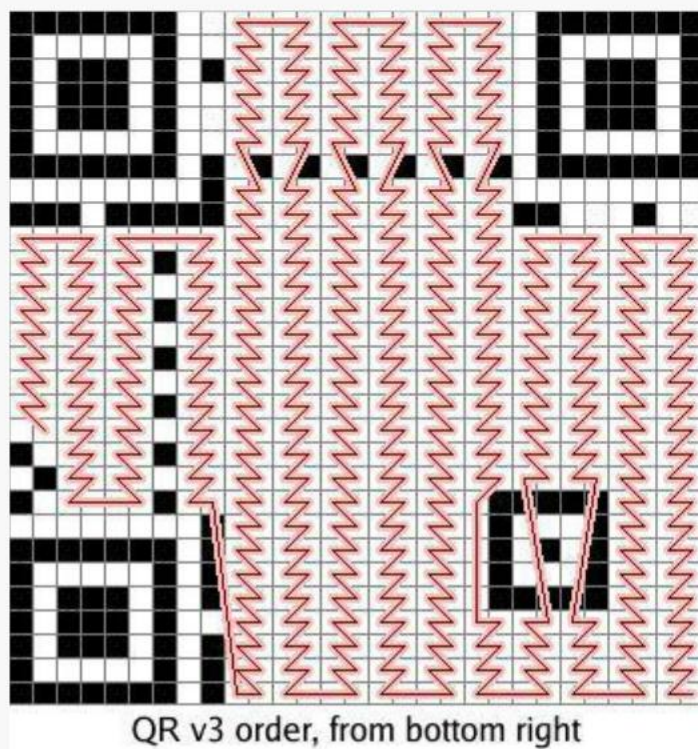
Version Information in lower left

0	1	2
3	4	5
6	7	8
9	10	11
12	13	14
15	16	17

Version Information in upper right

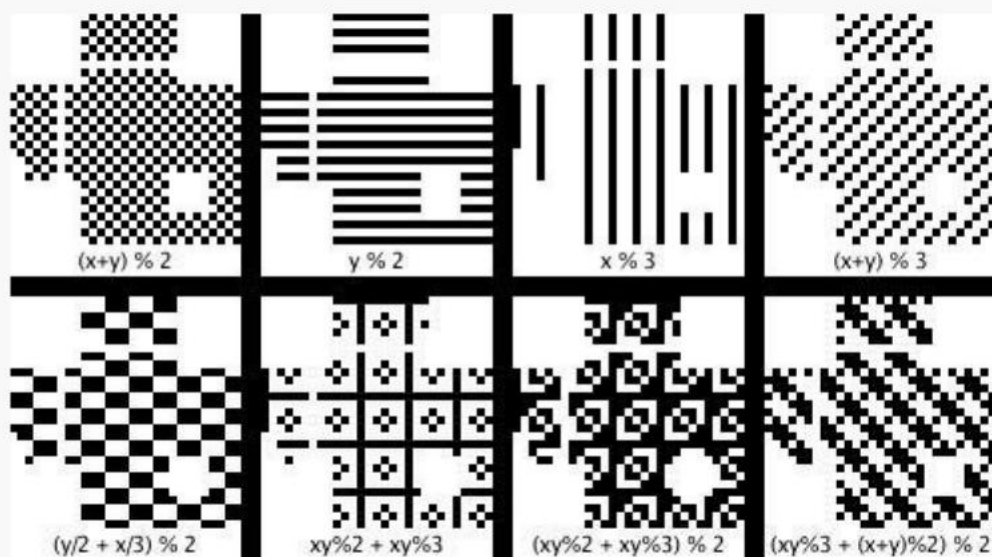
数据和数据纠错码

然后是填接我们的最终编码，最终编码的填充方式如下：从左下角开始沿着红线填我们的各个 bits，1 是黑色，0 是白色。如果遇到了上面的非数据区，则绕开或跳过。



掩码图案

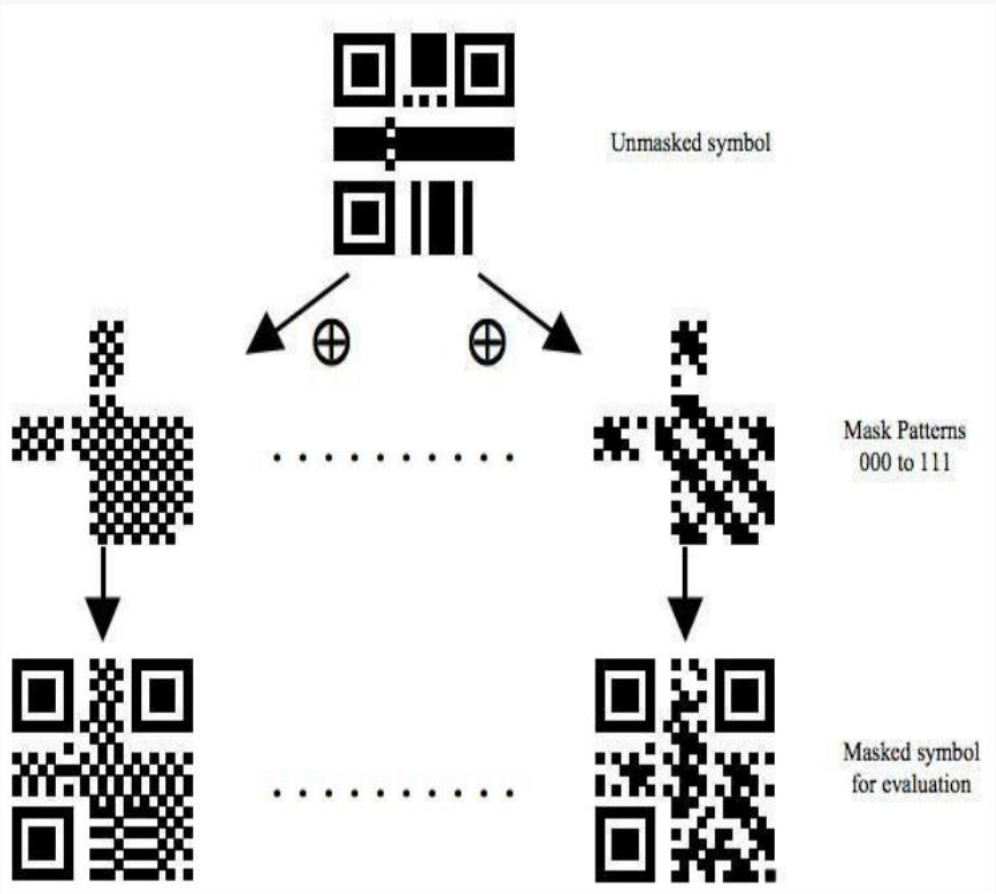
这样下来，我们的图就填好了，但是，也许那些点并不均衡，所以，我们还要做 Masking 操作（靠，还嫌不复杂）QR 的 Spec 中说了，QR 有 8 个 Mask 你可以使用，如下所示：其中，各个 mask 的公式在各个图下面。所谓 mask，说白了，就是和上面生成的图做 XOR 操作。Mask 只会和数据区进行 XOR，不会影响功能区。



其 Mask 的标识码如下所示：（其中的 i, j 分别对应于上图的 x, y）

Table 23 — Mask pattern generation conditions	
Mask Pattern Reference	Condition
000	$(i + j) \bmod 2 = 0$
001	$i \bmod 2 = 0$
010	$j \bmod 3 = 0$
011	$(i + j) \bmod 3 = 0$
100	$((i \div 2) + (j \div 3)) \bmod 2 = 0$
101	$((i \div j) \bmod 2 + (i \div j) \bmod 3) \bmod 2 = 0$
110	$((i \div j) \bmod 2 + (i \div j) \bmod 3) \bmod 2 = 0$
111	$((i \div j) \bmod 3 + (i \div j) \bmod 2) \bmod 2 = 0$

下面是 Mask 后的一些样子，我们可以看到被某些 Mask XOR 了的数据变得比较零散了。



Mask 过后的二维码就成最终的图了。

好了，大家可以去尝试去写一下 QR 的编码程序，当然，你可以用网上找个 Reed Soloman 的纠错算法的库，或是看看别人的源代码是怎么实现这个繁琐的编码。