

未检出的差错。如果比特差错的概率小，而且比特之间的差错可以被看作是独立发生的，在一个分组中多个比特同时出错的概率将是极小的。在这种情况下，单个奇偶校验位可能是足够的了。然而，测量已经表明了差错经常以“突发”方式聚集在一起，而不是独立地发生。在突发差错的情况下，使用单比特奇偶校验保护的一帧中未检测出差错的概率能够达到 50% [Spragins 1991]。显然，需要一个更健壮的差错检测方案（幸运的是实践中正在使用这样的方式！）。但是在研究实践中使用的差错检测方案之前，我们考虑对单比特奇偶校验的一种简单一般化方案，这将使我们深入地理解纠错技术。

图 5-5 显示了单比特奇偶校验方案的二维一般化方案。这里 D 中的 d 个比特被划分为 i 行 j 列。对每行和每列计算奇偶值。产生的 $i+j+1$ 奇偶比特构成了链路层帧的差错检测比特。

现在假设在初始 d 比特信息中出现了单个比特差错。使用这种二维奇偶校验（two-dimensional parity）方案，包含比特值改变的列和行的校验值都将会出现差错。因此接收方不仅可以检测到出现了单个比特差错的事实，而且还可以利用存在奇偶校验差错的列和行的索引来实际识别发生差错的比特并纠正它！图 5-5 显示了一个例子，其中位于 $(2, 2)$ 的值为 1 的比特损坏了，变成了 0，该差错就是一个在接收方可检测并可纠正的差错。尽管我们的讨论是针对初始 d 比特信息的，但校验比特本身的单个比特差错也是可检测和可纠正的。二维奇偶校验也能够检测（但不能纠正！）一个分组中两个比特差错的任何组合。二维奇偶校验方案的其他特性将在本章后面的习题中进行探讨。

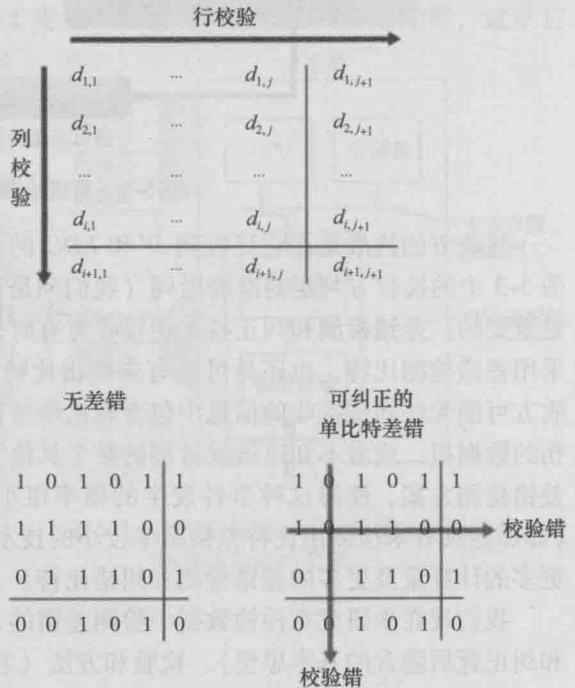


图 5-5 二维偶校验

接收方检测和纠正差错的能力被称为前向纠错（Forward Error Correction, FEC）。这些技术通常用于如音频 CD 这样的音频存储和回放设备中。在网络环境中，FEC 技术可以单独应用，或与链路层 ARQ 技术一起应用，ARQ 技术与我们在第 3 章研究的协议类似。FEC 技术很有价值，因为它们可以减少所需的发送方重发的次数。也许更为重要的是，它们允许在接收方立即纠正差错。FEC 避免了不得等待的往返时延，而这些时延是发送方收到 NAK 分组并向接收方重传分组所需要的，这对于实时网络应用 [Rubenstein 1998] 或者具有长传播时延的链路（如深空间链路）可能是一种非常重要的优点。研究差错控制协议中 FEC 的使用的资料包括 [Biersack 1992; Nonnenmacher 1998; Byers 1998; Shacham 1990]。

5.2.2 检验和方法

在检验和技术中，图 5-4 中的 d 比特数据被作为一个 k 比特整数的序列处理。一个简单检验和方法就是将这 k 比特整数加起来，并且用得到的和作为差错检测比特。因特网检验和（Internet checksum）就基于这种方法，即数据的字节作为 16 比特的整数对待并求