

# 大容量光通信的发展现状

刘 博

(北京邮电大学 100876)

随着全球信息交换的增加,大容量长距离信息传输越来越重要。这个问题的解决方案就是光纤传输——已用于全世界的大多数语音和数据业务。相对于电缆来说,光波在光纤中传输衰减有限,因此光纤在长距离传输中特别有优势。单光纤信道传输信息的速率(比特率)受限于传输系统中电子元件的速度。然而,可以研究多载波的生成方案,用波分复用技术实现同一媒介,不同波长,多个信道的传输,这种技术可以使得系统容量达到 Tbit/s;用正交频分复用或高阶调制格式技术提高频谱利用率;同时,从光纤本身的角度出发,充分利用光纤的空间维度。本文介绍了大容量光通信的发展现状。文章主要分为三部分:第一部分讨论了高速光通信传输系统中的主要传输损耗;第二部分讲述了数据的调制格式;第三部分简要地比较了直接探测与相干探测。

## 1. 信号在光纤中的传输

承载信息的调制光波在光纤中传输时,会受到衰减、色散和非线性效应等的影响,这三种损耗是关系到光信号高速率、大容量和长距离传输的关键因素。光纤信道是一种非线性信道。信号在光纤中传输时,每一根光纤代表着一个传输系统,而不同的传输系统明显的根本差异在于频率。通信系统的目标是将信号  $A(t,z)$  从发射端传输到接收端,并且实现接收端的信号  $A(t,z_{\text{end}})$  与发射信号  $A(t,0)$  大致相同。

可以用非线性薛定谔方程来描述光脉冲在光纤中的传输:

$$j \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - j \frac{\alpha}{2} A - \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中,  $A$  是电场,  $\alpha$  是衰减系数,  $\beta_2$  是色散参数,  $\gamma$  是非线性系数,  $z$  和  $t$  分别是传输距离和时间。方程右侧

三项每一项对应一种导致信号失真的损伤,依次是色散效应、吸收效应及非线性效应,为了实现无误码传输,需要对其进行补偿。

### 1.1 衰减

光纤的传输损耗主要由物质吸收损耗,辐射分散和光纤弯曲损耗造成的。光纤中最重要的参数就是光纤的损耗系数  $\alpha$ ,它代表着光纤的传输损耗。功率衰减主要取决于光纤的传输路径。衰减导致信号在传输过程中功率电平减小,我们用光放大器对这种功率损失进行补偿。所要付出的代价是引入噪声,同时增加了系统成本。由于生产水平的提高,光纤的损耗越来越低。

去除色散及克尔非线性效应,我们解方程(1)将得到:

$$|A(t,z)|^2 = |A(t,0)|^2 e^{-\alpha z} \quad (2)$$

衰减系数  $\alpha$  是单位长度光纤引起的光功率衰减,单位为 dB/km,表达式如下

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (3)$$

式中,  $\alpha(\lambda)$  是在波长  $\lambda$  处的衰减系数,  $L$  是光纤长度,  $P_i$  是光纤输入的光功率,  $P_o$  是光纤输出的光功率。

不同的光频率范围有不同的衰减值,主要可以分为三个窗口:

第一个窗口中心频率在 850 nm 左右,衰减平均值在 2 ~ 3 dB/km;

第二个窗口中心频率在 1310 nm 左右,衰减平均值在 0.4 ~ 0.5 dB/km;

第三个窗口中心频率在 1550 nm 左右,衰减平均值在 0.2 ~ 0.25 dB/km。

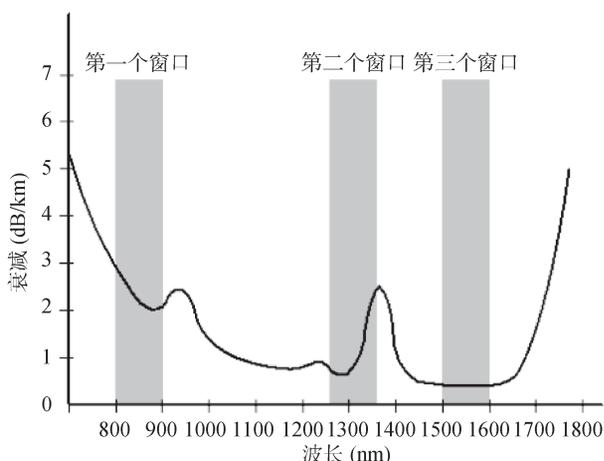


图1 不同光波长窗口的光纤衰减

## 1.2 色度色散

光传播速度是光波长的函数，信号的不同频率成分导致信号失真的相对延迟，这种现象叫做色度色散。也就是说，信号的频率或模式不同，导致在光纤中传输时的折射率不同，进而影响光信号的传播速度，使得到达接收端的时间不同，产生时延，最终导致脉冲展宽。

忽略方程(1)中的非线性和衰减，系统只存在光纤线性影响，我们可以写出只有色度色散效应的  $A(t,z)$  的表达式：

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = -j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t, z)}{\partial t^2} \quad (4)$$

其中色散参数  $\beta_2$  是群速度色散，常简称为色散。

群速度是光脉冲在光纤中的传播速度，是  $\omega$  的函数，因此信号不同的频率成分以不同的群速度传输。

对方程(4)进行傅里叶变换在频域中求解，我们得到：

$$A(\omega, z) = A(\omega, 0) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 z} \quad (5)$$

可以看出，色度色散会引起信号频谱相位的失

真，但频谱功率分布不会改变，且在传输接收端脉冲会展宽。

群速度色散参数  $\beta_2$  是一定频率间隔的两个不同频率成分之间的时间延迟，单位为  $s^2m^{-1}$ 。通常色散可以用色散系数  $D$  定义：

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (6)$$

其中， $\lambda=2\pi c/\omega$  为载波波长， $c$  为光速， $D$  是一定波长间隔的两个不同频率成分之间的时间延迟，单位为  $ps/(nm \cdot km)$ 。

## 1.3 偏振模色散

单模光纤中的另一种色散叫做偏振模色散。在长距离链路中使用标准单模光纤，传播场由两个正交的偏振模组成，理想光纤具有均匀的几何尺寸，没有应力，两偏振模具有相同的传播速度，没有时延差。然而由于机械张力、热梯度等（如图2所示），实际光纤的物理结构是不完美的核心圆对称。

由于这些缺陷，两个基本模有不同的有效折射率（图3），折射率不同导致传播常数不同，两个偏振模有不同的差分群时延，因此光纤会产生双折射。传播过程中偏振的状态会发生改变。偏振状态取决于波长并随着传播变化，在链路终端，不同偏振的两个脉冲部分将会以一个相对的时延差到达终端，我们把这个时延差叫做差分群时延，图4是其简单模型。

这种现象叫做偏振模色散，它是由于其起源随机性导致的一种随机现象。总的差分群时延为：

$$\sigma(z) = Dg\sqrt{z} \quad (7)$$

其中  $Dg$  是偏振模色散系数，它的平均值在  $0.1 \sim 1 ps/km$  范围内。

信号在光纤中进行传输，末端产生的信号重叠是

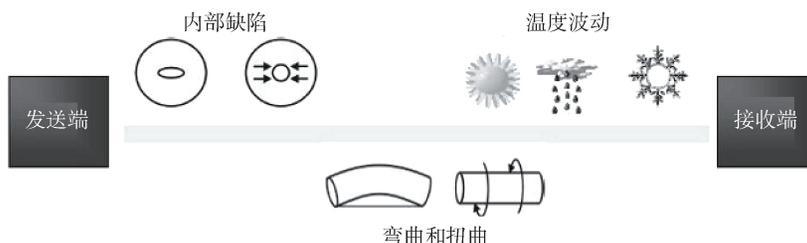


图2 光纤的非理想圆对称

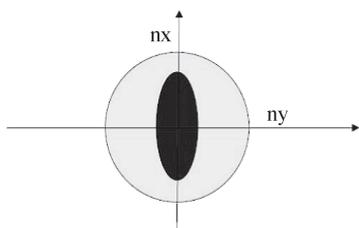


图3 纤芯的扰动

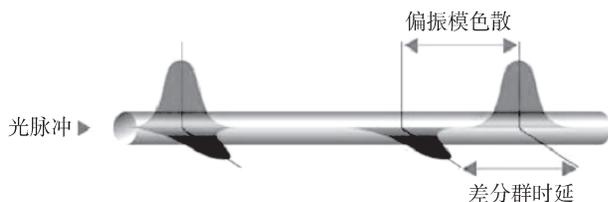


图4 偏振模色散对传输脉冲的影响

由色度色散和偏振模色散引起的，它们之间的关系由下面的等式说明。

$$D = \sqrt{D_{CD}^2 + D_{PMD}^2} \quad (8)$$

### 1.4 非线性效应

非线性响应来源于电磁场与硅电子之间的相互作用。电磁场的强度增加时，任何介质对光的响应都会变得非线性，硅制作而成的光纤也满足这种规律。

在没有色散的情况下 ( $\beta_2=0$ ) 解方程得：

$$A(t, z) = A(t, 0)e^{j\phi_{NL}(t, z)} \quad (9)$$

其中  $\phi_{NL}(t, z)$  是非线性相移，定义式为：

$$\phi_{NL}(t, z) = \gamma P_0 |A(t, 0)|^2 \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \quad (10)$$

其中  $P_0$  与脉冲峰值有关，方程 9 说明幅度引入了非线性相移，这种现象叫做自相位调制。这种非线性响应会使频谱展宽，但脉冲形状保持不变。如果系统使用波分复用技术，多个信号在不同波长上传输，一个波长上的信号  $A(t, 0)$  将受到相邻信道非线性相移的影响，这种现象叫做交叉相位调制。不同波长信道的存在也会产生新的频率，如四波混频。这些影响一般可以分为两类：信道内非线性效应及信道间非线性效应。第一种是处理单个信道自身产生的非线性效应，而第二种是解决相邻信道产生的影响。

## 2. 数据调制

先进调制技术是推动高速光通信系统向长距离和大容量发展的关键方法之一。掺铒光纤放大器在链路中的应用解决了光纤的损耗问题。但是由于单波长比特率不断在提高，光纤中的色散效应严重限制了光传输的中继距离。单波长速率达到 40Gb/s，偏振模色散的效应也越来越大，影响信号的传输。此时，无论是对单信道系统，还是波分复用系统，非线性效应都会特别明显。因此，针对不同的光传输系统，可以设计合适的新型调制方式，进而提高光传输系统的性能。利用适合的先进调制方式，不仅可以提高系统的色散容忍度，加大系统抗偏振模色散和抗非线性的能力，也可以提高单根光纤的速率。

现代通信系统中，我们通过从有限字母表选择符号表示数字数据，然后用这些数字数据来进行信息存储及传输。数字数据调制在于将每个符号值与特定的信号状态联系起来。在二进制传输系统中，只有两个符号值：0 和 1。在光传输系统中，数据调制是将信息存储到光信号的强度，相位或频率中。衡量一种调制格式的优劣可以从以下几点观察：抗噪声能力，抗色散能力，频带利用率，抗偏振模色散能力，抗非线性能力以及发射机与接收机的结构等。当前存在很多种光调制格式，各种调制格式的实现原理和方法及其性能各不相同，因此我们需要深入探究，以寻求在不同的光通信系统下的最佳先进调制格式。本节简要介绍了几种调制格式。

### 2.1 幅移键控

幅移键控是用载波幅度表示数字数据的一种调制方式。载波的频率和相位保持不变，幅度随着比特流变化。对于二进制传输系统，振幅的水平可以用于表示二进制逻辑 0 和 1（如图 5 所示，I 为同相分量，Q 为正交分量）。已调信号中，用有载波表示逻辑 1，用无载波表示逻辑 0，这样相当于开 / 关键操作，所以我们也给这种调制方式命名为开关键控。

### 2.2 相移键控

相移键控调制方式将信息存储到发送信号的相位

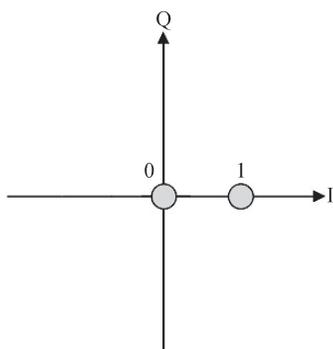


图5 开关键控星座图

中。这种调制格式的优点有：接收端有更好的噪声容忍度（接收灵敏度），且相对于开关键控调制方式，相移键控有更高的频谱效率及更好的色散容忍度。图6是二进制相移键控的星座图，相位与两个允许的相位状态(0,  $\pi$ )进行数字映射。用马赫曾德电吸收调制光调制器可以产生相移键控信号，获得图6的星座图，这种调制器是由单一的驱动信号进行驱动，如图7所示。

### 2.3 四相移相键控

四相移相键控又叫正交相移键控，星座图有四个点，均匀分布在一个圆上，四个相位值为(0,  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\pi$ ,  $\frac{3\pi}{2}$ )。四相移相键控用四个相位可以编码一个符号两比特的信息（如图8所示）。可以保持信号带宽不变实现二进制相移键控的二倍数据率，也可以保持与二进制相

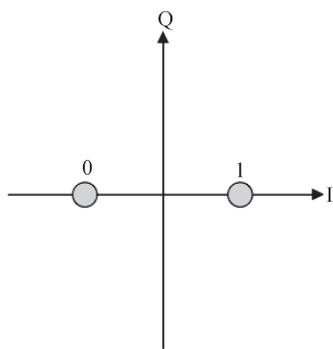


图6 二进制相移键控星座图



图7 用马赫曾德电吸收调制光调制器的相移键控 / 开关键控发射端

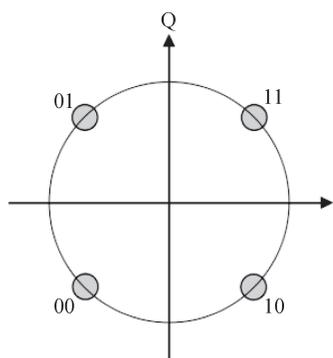


图8 四相移相键控的格雷编码星座图

移键控相同的数据率实现所需带宽减半。通常四相移相键控用并联的马赫曾德调制器结构实现，如图9所示，实现了同相和正交方向的复数域调制。

### 2.4 偏振移键控

偏振移键控调制方式中，用信号的偏振状态进行编码。用水平偏振信号表示二进制逻辑0，用垂直偏振信号表示二进制逻辑1。然而，偏振状态随着光信号在光纤中的传输会发生随机旋转。这个问题限制了系统的性能，尤其功率高时非线性效应会增强，光信号损伤更大，解决办法是通过正确的算法在电域对其进行补偿。用偏振自由度来传输两个正交偏振信道是非常有意义的。

偏振分束器（也叫起偏器）可以将入射光信号分为两个偏振态，偏振移键控调制采用光起偏器来实现。

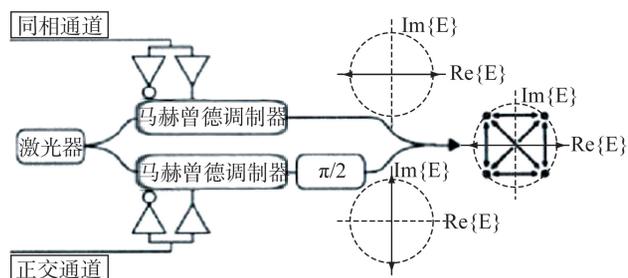


图9 并联马赫曾德调制器的四相移相键控发射端

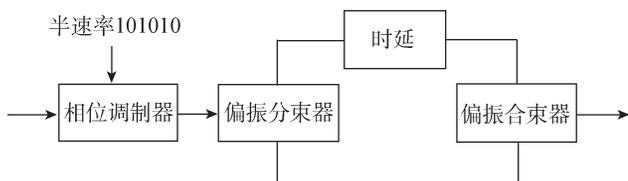


图10 交替偏振调制原理框图

交替偏振调制格式信号可以通过偏振分束器及相位调制器实现，实现原理如图 10 所示。

首先通过“101010”半速率时钟信号对光载频进行调制，产生相位在  $0$  与  $\pi$  之间变化的信号，该脉冲调制信号的周期为  $2T$ ，调制后的信号经过偏振分束器后分为偏振方向互相垂直的两路，一路直通，一路延迟，最后通过偏振合束器将两路光信号合为一路，实现  $e_x$  与  $e_y$  两个偏振方向上的信号交替，其形式如图 11 所示。

### 2.5 四相移相键控的偏振复用

四相移相键控的偏振复用调制格式的实现过程如下：先用偏振分束器将激光分为两路正交的光，然后用两个马赫曾德调制器产生的两路四相移相键控信号分别对其进行调制，再用偏振合束器将两路正交偏振的光合在一起，就实现了四相移相键控的偏振复用，发射端框图如图 12 所示。因为偏振复用四相移相键控调制方式需要的波特率是四相移相键控调制方式的一半（如图 13 所示），所以这种调制方式可以减少元件及光电元件的需求数量。

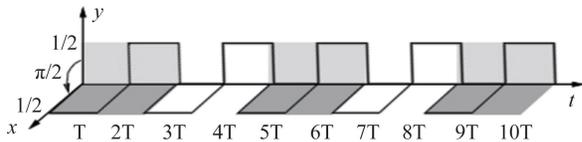


图 11 偏振移键控调制信号形式图

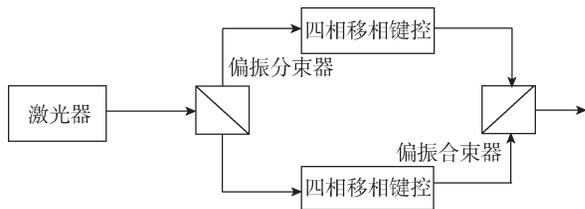


图 12 偏振复用的四相移相键控实现框图

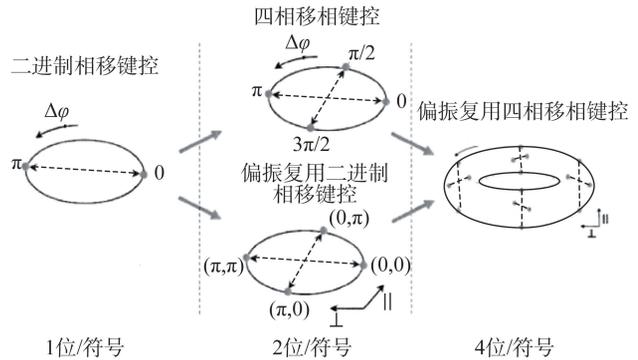


图 13 从二进制移相键控到偏振复用四相移相键控的演变

### 3. 直接探测与相干探测

直接探测中，使用光电探测器将光强度  $|E|^2$  转变为电信号，且相位信息全部丢失，直接探测接收端框图如图 14 所示。另一种探测光信号的方法就是相干探测，它是将接收到的信号先经过偏振分束器分成两路光信号，与本振激光器进行混频，再用光电探测器进行检测，相干接收端框图如图 15 所示。相干探测可以同时保留幅度和相位信息。相干探测最早的实验验证是在 1979 年，因为其需要同时跟踪输入信号的相位和偏振信息，高复杂度阻碍了相干探测的商用。

与传统的直接探测相比，相干探测有如下优势：支持多种调制方式，频谱效率高；有效地提高了光接

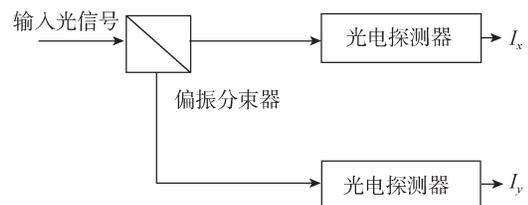


图 14 直接接收机的原理图

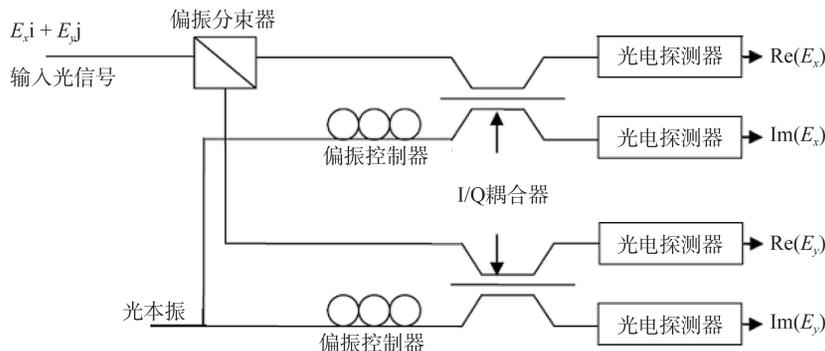


图 15 相干接收机的原理图

收机的灵敏度，从而增加了光信号光纤传输的中继传输距离；在基带或中频频率处有非常高的频谱分辨率，提高了相干光接收机的选择性，从而提高了系统的频带利用率，实现大容量传输。

数字相干接收端用很多函数对信号进行电域的数字信号处理可以大大减小光接收机的复杂度。相干探测同时将光域的强度与相位映射到电域，因此保留了所有信息，最大化了信号处理的有效性。用自适应线性滤波器可以补偿色散和偏振模色散，这样可以克服单信道的传统传输比特率极限。

#### 4. 结束语

随着时代的发展，人们对于大容量、超高速、超长距离的通信传输系统有了更高的要求。光通信系统作为通信传输系统的一种，相比较于传统的以电为基础的通信系统而言，具有更好的发展前景，因此也承载了更多的发展压力。

但是理论和实验研究表明，由于光纤的非线性及放大器的带宽等限制，通信容量已经接近了单模光纤的传输极限。因此，光纤通信的发展一方面需要克服单载波传输中的高速电器件的限制瓶颈，研究新型调制格式提高频谱利用率，新型调制格式不需改变现有线路，仅通过改变发射端和接收端的相应设备来完成调制格式的更改，不仅方便，还能降低建造成本。新型调制格式的研究以光信号的参量为基础，主要有强度调制、相位调制、频率调制、偏振调制，而角动量调制的发展也在逐渐推进。通过将不同的光信号调制格式混合，不断发展，使得光信号在光纤信道中的传输效率提升，增加信道容量实现 Pbit/s 甚至更高传输速率。另一方面需要我们从研究光纤本身的角度出发，研究信号在光纤中的传输特性，对比直接接收和相干接收，选择适合光传输系统的接收方式，同时接收端在电域用数字信号处理算法对接收到的信号进行线性失真补偿，以上是实现大容量长距离光传输的研究重点。



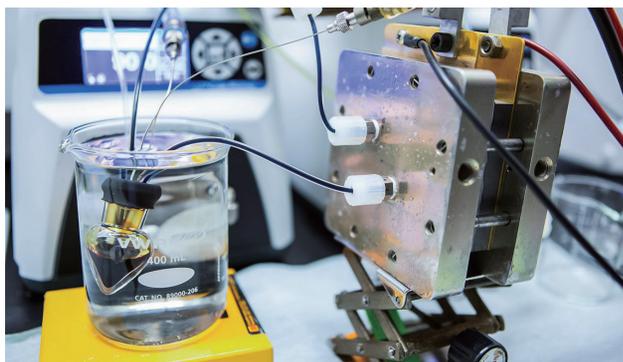
#### 科苑快讯

### 化学家发明维生素动力电池

维生素对强壮骨骼和维护健康有很好的作用，它们也是生产电池的好材料。在最新一代有机流体电池中，携带电荷的碳基有机化合物取代了金属离子，科学家引入一种类似维生素 B<sub>2</sub> 核心的分子。就像其他流体电池一样，它在两种液体中储存能量并生成电流，随着液体的相互流动，通过隔膜交换电子。因为液体可被封装在一个大罐中，所以这些电池能够储存来自风能和太阳能这类可再生能源几天的能量。以往这些

液体通常用矾这类金属来运送电子，但是金属较为昂贵或具有腐蚀性。而有机物，不论是来自石油、植物还是其他地方，也是电子的良好载体。

两年前，研究者利用来自大黄的普通化合物制作出第一个有机流体电池。现在，该研究组在《自然能源》(Nature Energy) 网络版上报告，他们用咯嗪 (B<sub>2</sub> 的主体化合物) 制造了类似电池。如果新电池能够得到推广，造价将低于各种金属电池，因为 B<sub>2</sub> 化合物可以在室温下从普通原料中轻松制得，而且毒性更低。它与大黄电池在成本上不分伯仲，维生素类材料代表着有机载体的一种新类型，能以不同方式定制，比如提高电压或为了增加充放电周期而匹配液体，不过这还有待观察。同时，科学家们也必须将维生素和其他有机化合物放在现实中进行测试，看看哪个运行效果更佳。



(高凌云编译自 2016 年 7 月 19 日 [www.science-mag.org](http://www.science-mag.org))