

第 1 章 射频和无线技术简介

一位工程师说：“这个手机是在 DECT-TDMA/TDD 模式下以 GFSK 方式调制以及零中频的 I/Q 检波”。他问：“我们如何能将它改成也能在 DCS1800 制式下工作？”工程师回答说：“我们需要加一个天线收发转换开关，至少一个带有 SSB 混频的本机振荡器，或许还要两个 SAW 滤波器”……

电话已经变得比先前复杂多了。射频(RF)电路也是如此。一个用手机往家打电话的普通人，多半不会知道成百上千的科学家和工程师几乎努力了整整一个世纪才使得无线技术变得用得着。他也不会知道手机的计算能力比某些早期个人计算机还要强。

在 1901 年，当 Marconi 成功地将无线电信号发过西洋时，无线技术就出现了。这个演示产生巨大影响和展示的前景是巨大的：用无线电波在“以太”中传递来取代电报和电话描绘了一个令人振奋的未来。然而尽管双向无线通信在军事领域得到应用，日常生活中无线传播仍然局限于由大型、昂贵发射站单向发无线电广播和电视。普通双向电话通话几十年来一直通过电话线进行。

晶体管的发明，Shannon 信息论的发展以及蜂窝系统概念的提出——所有这一切都发生在 Bell 实验室——这些为廉价移动通信铺平了道路。移动通信最初在汽车电话中得到实现，最终又在便携式手机中实现了。

但是为什么无线通信电子会突然出现突然的上升？市场调查表明，在美国每天有超过 2.8 万人加入使用手机的行列。这就激励了互相竞争的制造厂商提供具有更高性能和低成本的话机。事实上，当前的目标是使手机的功耗和成本每年减少 30%，尽管不清楚这种速率能维持多久。然而，当双向无线通信被引入我们生活的其他方面时，例如家庭电话、计算机、传真机和电视，一个更为耀眼的前景出现了。无线通信工业界近期的目标是将无绳电话和手机结合起来形成几乎任何地方都可使用的“无缝”通信，长期目标是实现一个无所不能的无线终端，它能处理声音、数据、图像，以及提供计算能力。其他一些更为“奢华”的应用，诸如全球定位系统(GPS)，也会在今后某一时通过这个终端变成现实。个人通信服务(PCS)几乎就在眼前。

1.1 复杂性比较

为了得到一个现代 RF 设计初步认识，首先来考虑一下如图 1.1 所示的一个调频(FM)接收发射系统。在图 1.1(a)中， Q_1 既作为一个振荡器又作为一个频

率调制”；即是话筒产生音频信号改变了变容二极管 D_1 两端的偏置电压,因此调制了振荡频率。在接收路径中, Q_1 同时用作振荡和频率解调,在节点 X 产生音频信号。这个音频信号然后放大并加到扬声器上去。

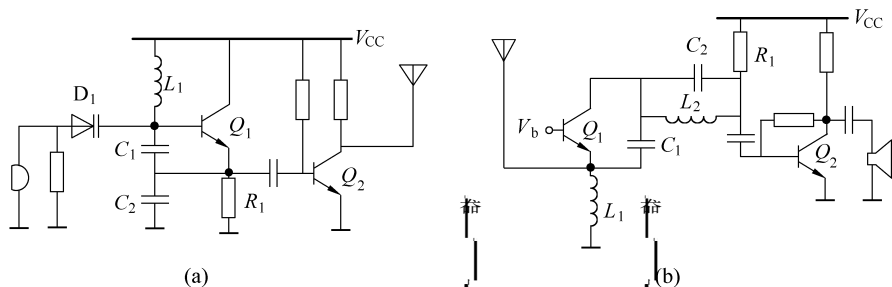


图 1.1 (a)调频发射(b)调频接收

现在考虑图 1.2 的电路,即手机的 RF 部分^[1]。这个电路比图 1.1 所示的 FM 电路要复杂好几个数量级,我们将其分析推迟到第 5 章进行。为什么 RF 设计者从图 1.1 的电路演化到图 1.2 的电路? 这个演变背后的思维过程是什么? 这些复杂性真的有必要吗? 当在第 2 到第 5 章中逐渐了解 RF 通信系统、体系结构和电路设计时,这些问题将得到回答。

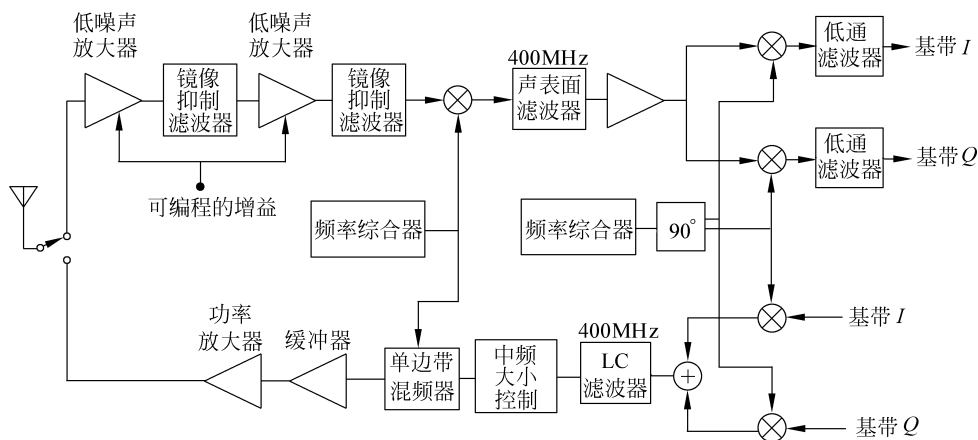


图 1.2 手机射频(RF)部分^[1]

1.2 设计瓶颈

今天的袖珍电话(即手机)包含了一百多万个晶体管,其中只有一小部分工作在射频范

围,其余都是进行低频的基带模拟和数字信号处理,如图 1.3 所示。换句话说,就一件作品而言,基带部分要比图 1.2 的电路复杂几个数量级。RF 和基带的定义随后会变得清楚,这里只是指出 RF 部分仍是整个系统设计中的瓶颈。这是因为有如下三个原因。

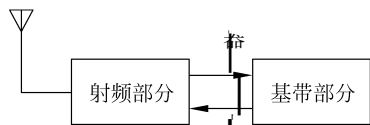


图 1.3 接收发射机和基带处理

1. 多学科领域

和其他类型的模拟与混合信号电路不同,RF 系统要求了解许多与集成电路并不直接相关的领域。如图 1.4 中所示,这些领域中许多已经被深入地研究了半个多世纪,这使得一个集成电路设计者要在较短的时间内掌握必要的知识相当困难。即使是在当前,有关 RF 设计的文献就出现在 30 多种杂志与会议上。

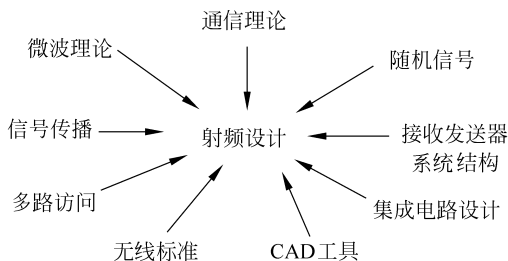


图 1.4 射频设计要求的多学科

由于这个原因,传统的无线系统设计是在某种程度上互相不连接的抽象级别上进行的。通信理论工作者创造了调制方案和基带信号处理;射频系统专家规划接收发射机系统结构;集成电路(IC)设计者开发每一个基本模块;制造厂则将 IC 及其他外部元件“粘”在一起。事实上,系统结构往往是按照可以购得的现成(off-the-shelf)产品元件来规划的,而 IC 则是被设计成能适用于尽可能多的体系结构。这样就造成了在系统和电路级大量的重复性。

随着工业界向更高的集成度和低成本发展,射频和无线设计要求增加越来越多,并行工程,因而要求 IC 设计者具有如图 1.4 所示的所有领域里的足够知识。

2. 射频设计六边形

RF 电路必须在很宽的动态范围及高频下处理模拟信号。有意思的是,即使调制信号是数字信号,或者振幅不载有任何信息,信号也必须按模拟信号处理(这一点会在以后的章节中解释)。在这种电路设计中涉及到的折衷考虑可以总结为如图 1.5 所示的“射频设计六边形”。在这个图中,6 个参数中任意两个几乎都可以在某种程度上进行折衷调节。我们将要在第 6 到第 9 章中看到这种折衷关系。但现在要看到的是,尽管数字电路直接从 IC 技术中进步得到好处,RF 电路却并没有得到同样多的帮助。这个问题因 RF 电路经常要用到外部元件,比如说电感,而变得更为严重。这些外部元件即使在现代集成电路工艺中也是很难

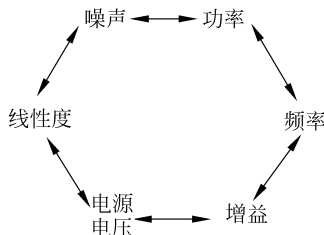


图 1.5 射频设计六边形

在片上实现。

3. 设计工具

用于 RFIC 的计算机辅助分析和综合的工具仍然处于初始阶段,这迫使设计者不得不依赖于经验、直觉或不那么有效的模拟技术来预测电路性能。比如说,RF 电路中非线性、时变性和噪声通常需要研究信号的频谱。但是,Spice 具有标准交流分析仅用到线性和时不变模型。这样,电路只能在时域里模拟以便包括非线性和时变效应,所得到波形后再变换到频域来得到频率响应。其中困难在于,时域里分析必须要足够长以便能分辨频率相近的成分,此外,若在时域分析中用到随机噪声,则可能需要用到频谱平均技术。

模拟 RF 电路时另外一个问题是,一些外部元件无法用 Spice 中已有典型元件来建立模型。比如,在接收和发射链路中都要用到表面声波(SAW)滤波器,其输入输出特性只能用散射(S)参数来表征——实质上是一个阻抗表格。用 RLC 网络来对这样的电路建模实现了一阶近似,但是,这种方法可能预测不到非稳定性及阻抗不匹配的影响。

1.3 应用

除了诸如传呼机和手机这些为人们熟悉的无线通信产品以外,RF 技术已经创造了许多其他市场。这些市场展示了快速成长的巨大潜力,每一个都对 RF 设计者提出了挑战。

1. 无线局域网 (WLAN)

在一个拥挤的场所,人们或设备之间的通信可以通过无线局域网来实现。采用在 900MHz 和 2.4GHz 附近的频段,WLAN 接收发射器能在办公室、医院、工厂等地提供移动通信连接,这样就免除了使用笨拙的有线网络的需要。便携性与重构性是 WLAN 的显著特征。

2. 全球定位系统 (GPS)

随着 GPS 接收器的成本和功耗下降,用它来确定一个目标的位置及寻得方向变得对消费者市场十分有吸引力。这样的系统在 1.5GHz 下工作,不仅引起了汽车制造厂家关注,而且在不久的将来可以作为低成本的手持产品。

3. 射频标签 (RF ID)

射频标识系统,简称“RF ID”,是小的、低成本标签。它们可以附加到物品或个人来跟踪其位置。应用范围包括从飞机场行李到军事行动的部队。因为标签的寿命可能为单个小电池的寿命所决定,所以低功耗尤其重要。工作在 900MHz 和 2.4GHz 频率范围的

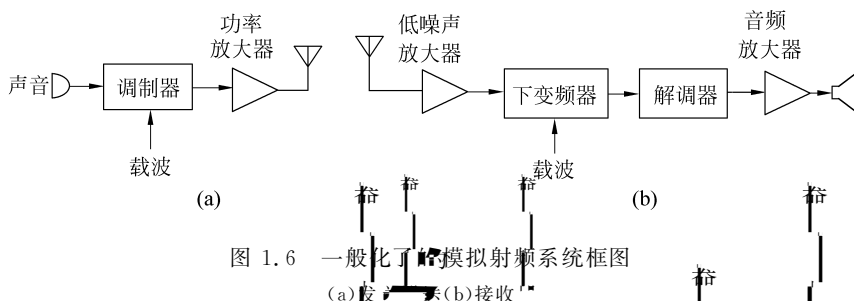
RF ID 产品最近已出现在市场上。

4. 家庭卫星网络 (home satellite network)

卫星电视所提供的节目与服务已经使众多用户为家庭卫星网络所吸引。这些网络工作在 10GHz 频段,需要附加碟形天线以及连到电视机接收。它们直接与有线电视竞争。

1.4 模拟与数字系统

为了得到一个一般性和初步了解,首先考虑图 1.6 所示的一个简单模拟体系结构。在发送路径中,话筒产生信号对高频载波进行调制,调制后信号被放大和缓冲来驱动天线。在接收路径中,信号经低噪声放大器 (LNA) 放大,频谱由一个下变频器 (通常是一个混频器) 变换到较低频率,以有利于随后解调操作。解调后输出被放大来驱动扬声器。



现在,考虑图 1.7 所示的一个数字接收。这里,声音信号首先被模数转换器 (ADC) 数字化,并经压缩以减少位率 (bit rate),因而也就是减少所需要带宽 (图 1.7(a))。下一步对数据进行编码和间插^[2]。这两个操作对数据进行了格式化,这样接收就能够通过反向操作来解调,并将误差减小到最低程度。因为矩形脉冲对调制而言并不是最佳,因此数据在到达调制及功率放大器 (PA) 之前先进行整形。在接收路径中 (图 1.7(b)),信号经过放大、下变频及数字化,然后在数字域里进行解调、平衡化、解码、去间插及去压缩。然后这样得到的数据经数模转换 (DAC) 转换成模拟信号,再经放大并驱动扬声器。

在这个最简单的例子里,这些接收可以通过如下方式来定量地评价其性能:接收在提供满意接收效果条件下能工作的最大距离。这个距离是由到达天线上去的功率和接收灵敏度,尤其是 LNA^① 噪声共同决定的。然而,在实际环境中,许多不同接收发

① 调制类型也是一个重要因素,但是我们目前先不考虑。

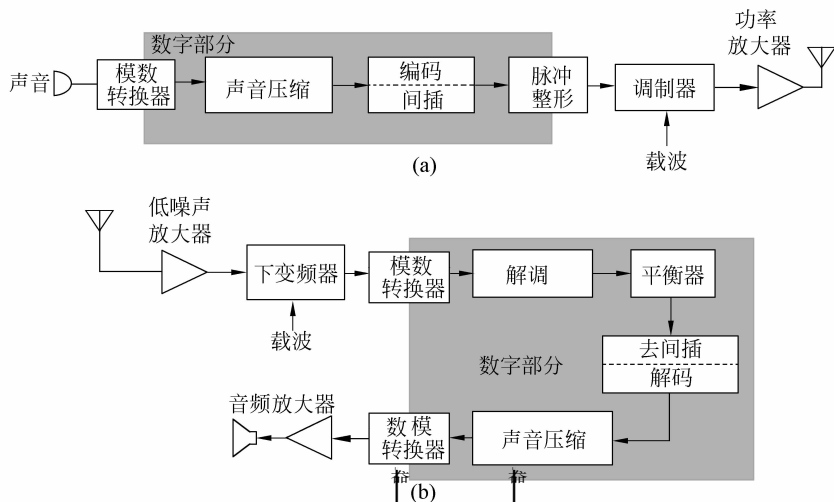


图 1.7 一般化了的数字射频系统框图

(a) 发送 (b) 接收

同时工作,而且往往彼此间距离很近,这样引起互相干扰。更进一步,通信媒介是十分复杂的:在建筑物和其他物体上发生的反射会在给定地点产生破坏性的干涉,使得接收到的信号强度被抑制到可检测到水准之下。在这样一个环境中,数字接收的信号处理可以取得比模拟系统更高的性能。

研究一下图 1.6 及图 1.7 所示的两个接发,读者会问哪些部分是和射频(RF)电子学有关的?我们将在其他章节看到,RF 的确切定义取决于具体的系统,但是这里我们将频谱中心不在零频率的模拟信号视作是在 RF 区域。这样在图 1.6 中除了音频放大器之外,所有电路模块都是 RF 电路。类似地,在图 1.7 中,调制、功放(PA)、低噪声放大器(LNA)及下变频器都工作在 RF 范围。然而,现代的 RF 电子学包括比以上这些电路单元多得多的内容,比如对每种情况都要仔细地研究系统级的折衷考虑^[3,4]。

这本书主要讨论 RF 集成电路的设计。但是,依照图 1.4 所示的领域和课题,本书也会提供相关的背景材料。我们在全书中将会看到 RFIC、RF 系统结构以及无线系统之间是紧密联系着的,因此读者经常要用到这些背景知识。

1.5 工艺技术的选择

用于 RF 电路的关键 IC 工艺技术不断地在变化。性能、成本以及进入市场的时间,是在竞争激烈的 RF 工业界中影响相关工艺技术选择的三个主要因素。此外,诸如集成度、体积面积因子(form factor)以及过去(成功)的经验都在设计者作决定时起着重要作用。

目前,砷化镓(GaAs)、HJ双极型和 BiCMOS 工艺技术构成了 RF 市场的主要部分。GaAs 场效应及异质结器件通常被看作是低成本率、高功耗和高成本的选择。但是它们仍然在 RF 产品中占重要位置,特别是在功率放大及前端开关中。

尽管 GaAs 工艺具有诸如更高的击穿电压、截止频率的乘积值、半绝缘衬底、高品质因子电感和电容等有用特点,但 VLSI 技术中 HJ 器件有潜力提供更高的集成度和更低的总成本。这一点在诸如频率综合一类复杂电路中已得到验证。事实上许多制造厂提供典型接发中所有构筑模块都可用 HJ 双极型技术来实现。

第三个竞争者是 CMOS 技术。受移动通信市场巨大冲力支持,CMOS 器件已经取得了很高的截止频率,比如用 $0.35\mu\text{m}$ CMOS 技术可以达到几十吉赫。正像在这本书中将要看到的,“RF CMOS”已突然变成活跃的研究课题。然而,CMOS 技术必须解决一些具体问题:幅度相差 100dB 的信号通过衬底的耦合、参数温度和工艺过程的变化以及针对 RF 工作情况建立器件模型。

参 考 文 献

- [1] C. Marshall et al., “2.7V GSM Transceiver ICs with On - Chip Filtering,” *ISSCC Dig. Tech. Papers*, pp. 148 - 149, February 1995.
- [2] B. Sklar, *Digital Communications*, Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1988.
- [3] K. Feher, *Wireless Digital Communications*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [4] R. Steele, ed. *Mobile Radio Communications*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1992.
- [5] R. Schneiderman, “GaAs Continues to Gain in Wireless Applications,” *Wireless Systems Design*, pp. 14 - 16, March 1997.

第 2 章 RF 设计中的基本概念

RF 设计者用到很多来自信号与系统理论的概念。本章将介绍这些概念并且定义一些用在射频电子学(RF electronics)中的术语,以便读者学习随后章节。

从非线性系统开始,介绍诸如谐波失真(harmonic distortion)、增益压缩(gain compression)、互调(cross modulation)和交调(intermodulation)等效应。然后将详细地研究符号间干扰(intersymbol interference)和奈奎斯特采样(Nyquist signaling),回顾随机过程和噪声知识,并且将介绍在电路中表示噪声的方法。最后将描述用无源元件实现阻抗变换。

2.1 非线性与时变性

如果一个系统的输入可以表示成每个输入分别对应一个线性系统,那么这个系统就是一个线性系统。更准确地说,如果对于输入 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$,有

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t), x_2(t) \rightarrow y_2(t) \quad (2.1)$$

其中箭头表示线性系统对信号的操作,那么对应于常数 a 和 b 的所有值,有

$$ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow ay_1(t) + by_2(t) \quad (2.2)$$

任何不满足这一条件的系统都是非线性系统。注意到根据这个定义,如果一个系统具有非零初始条件或者有限偏移量,就认为这是个非线性系统。

如果一个系统的输入时间平移将导致输出有相同的时间平移,那么这个系统就是时不变的。也就是说如果 $x(t) \rightarrow y(t)$,那么时不变系统对于所有的 τ 值都有 $x(t-\tau) \rightarrow y(t-\tau)$ 。如果一个系统不满足这个条件,就叫做时变系统。

非线性和时变性都是直观上很显然的概念,但是它们在某些情况下可能相互混淆。例如考虑如图 2.1(a)中的开关电路,开关的控制端由 $v_{in1}(t) = A_1 \cos \omega_1 t$ 驱动,输入端由 $v_{in2}(t) = A_2 \cos \omega_2 t$ 驱动。假设当 $v_{in1} > 0$ 时开关接通,反之则断开。那么这个系统是非线性的还是时变的? 如果如图 2.1(b)所示,我们考虑通路是从 v_{in1} 到 v_{out} (此时 v_{in2} 是系统的一部分,仍然等于 $A_2 \cos \omega_2 t$),那么这个系统是非线性的,因为这时控制只与 v_{in1} 的极性有关;同时又是时变的,因为 v_{out} 还与 v_{in2} 有关。另一方面,如图 2.1(c)所示,如果所考虑的路径是从 v_{in2} 到 v_{out} (此时 v_{in1} 是系统的一部分并仍然等于 $A_1 \cos \omega_1 t$),那么系统是线性的(式(2.2))和时变的。所以诸如“开关是非线性的”等笼统的说法是很含糊的。我们将在第6章中看到这些区别在混频器设计中很重要。

上述观察的另一个有趣的结果是,一个线性系统可以产生输入信号中并不存在的频率

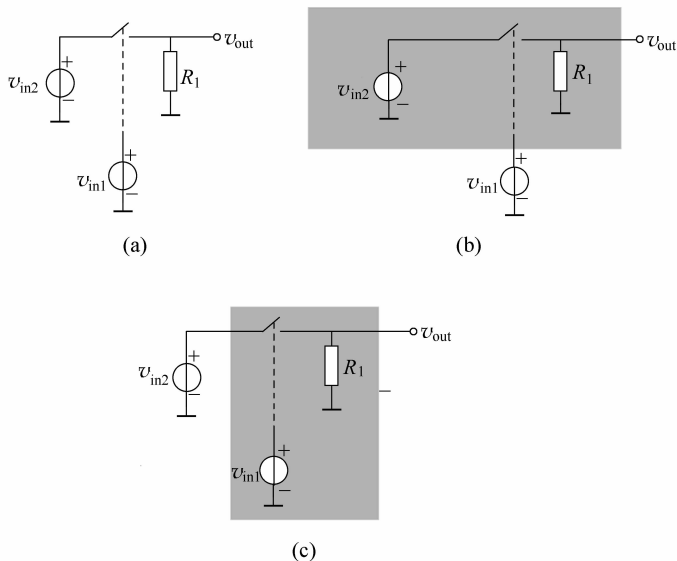


图 2.1 (a) 一个开关电路；(b) 非线性时变系统；(c) 线性时变系统

成分。这在系统是时变的情况下是可能的，例如图 2.1(c) 所示的电路就是如此。因为在这样的电路中 v_{out} 可以看作是 v_{in2} 和一个在 0、1 之间翻转的方波相乘的积，其输出频谱是

$$V_{out}(f) = V_{in2}(f) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi} \delta\left(f - \frac{n}{T_1}\right) \quad (2.3)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi} V_{in2}\left(f - \frac{n}{T_1}\right) \quad (2.4)$$

其中“*”代表卷积， $\delta(\cdot)$ 是单位脉冲函数， $T_1 = 2\pi/\omega_1$ 。所以输出是由 $V_{in2}(f)$ 在时间上平移 n/T_1 ，在幅度上乘以不同倍数的函数而成。

如果一个系统的输出与过去的输入信号无关，那么这个系统就是无记忆系统 (memory-less) 系统。对于一个无记忆线性系统，有

$$y(t) = \alpha x(t) \quad (2.5)$$

如果系统是时变的，那么其中的 α 是时间的函数，如图 2.1(c) 所示。对于一个无记忆非线性系统，输入-输出关系可以近似地用多项式表示为

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^2(t) + \alpha_3 x^3(t) + \dots \quad (2.6)$$

如果系统是时变的，其中的 α_j 一般是时间的函数。图 2.2(a) 描述了一个例子，其中输入信号作用于 Q_1 的基极，而 Q_2 和 Q_3 则由方波周期性地导通和截止。对于理想的双极型晶体管，这个电路可以看作如图 2.2(b) 的形式，并且有

$$v_{out}(t) = \left(I_{S1} \exp \frac{v_{in}}{V_T} \right) S(t) R \quad (2.7)$$

其中 I_{S1} 表示 Q_1 的饱和电流， $V_T = kT/q$ ， $s(t)$ 是一个在 -1、1 之间翻转的方波。

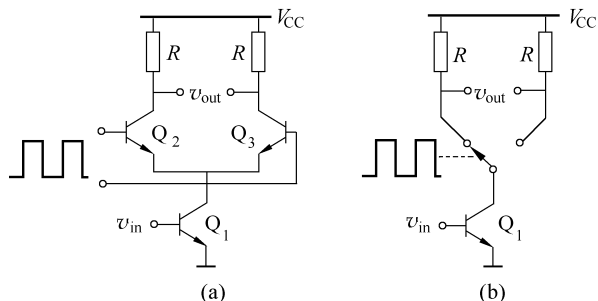


图 2.2 (a)尾电流源为信号所驱动开关差分对；(b)(a)等效电路

如果由式(2.6)描述系统对于相反输入 $x(t)$ 和 $-x(t)$ 有相反输出,那么它具有奇对称性。这一情况发生在偶次谐波对应 $\alpha_j = 0$ 时候。一个有奇对称性电路叫做差分电路或者平衡(balanced)电路。例如图 2.3 双极型差分对显示了下列输入-输出特性:

$$v_{out} = RI_{EE} \tanh \frac{v_{in}}{2V_T} \quad (2.8)$$

上式是一个奇函数。

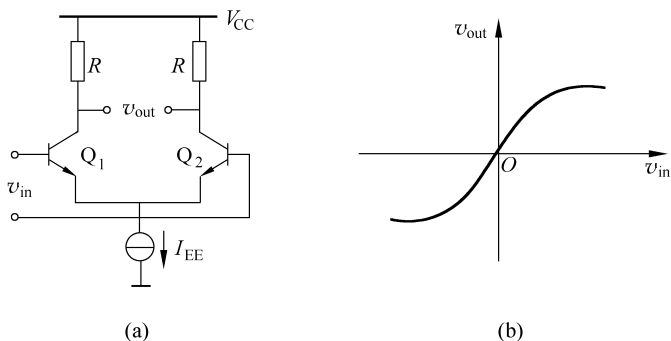


图 2.3 双极型差分对以及其输入-输出特性

如果一个系统输出依赖于输入或者输出以前值,那么这个系统叫做动态(dynamic)系统。例如对于一个线性时不变动态系统,有

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (2.9)$$

其中 $h(t)$ 表示脉冲响应。如果一个动态系统是线性但时变的,它的脉冲响应将和时间原点有关;如果 $\delta(t) \rightarrow h(t)$,那么 $\delta(t-\tau) \rightarrow h(t, \tau)$ 。所以

$$y(t) = h(t, \tau) * x(t) \quad (2.10)$$

最后,如果一个系统是非线性和动态的,那么它的脉冲响应可以近似地用 Volterra 序列表示^[1,2],但这一内容是超出了本书的范围。