

浅谈差分放大电路

周 纬 陈贵才

(广西钦州农业学校, 广西 钦州 535000)

摘要: 差分放大电路在模拟电子技术的学习中是一个难点, 很多人在学习过后直言抽象难懂。差分放大电路在模拟电子技术乃至整个电子技术的应用中却是一个重点, 它对于电子技术的飞速发展起到关键的作用。不是曲高和寡, 只是不得要领。本文两位作者通过长期在电子技术的教学和应用两端结合的认识、探索, 总结出五点差分放大电路的“肯綮”所在, 从它的问世背景到发展意义, 从它的工作原理到使用要项, 都尽量做到深入浅出的再剖析, 有望为读者学好用好差分放大电路带来帮助。

关键词: 差分放大电路; 共模; 差模; 放大信号; 消除温度影响

差分放大电路在电子技术里占据重要地位, 这以其在各类电子技术教材或者资料中占据不小篇幅得到反映。但是在实际的电子技术应用中, 却存在着一个感受的偏差, 很多人会觉得它没有用, 或者说不知道用在何处, 对于简易电路设计者以及电路维修人员来说更是如此。为什么会出现这样的情况呢, 笔者做了个简单调查以及不完全的统计, 认为是很多学习电子技术的人甚至电子技术从业者, 在不同程度上都存在着对差分放大电路认识不足的问题。本文试图从以下几个方面去谈谈差分放大电路, 以期能对对各种相关教材形成一点有益的补充。

一、换一种角度认识和理解共模信号

抑制共模信号是差分放大电路最基本的功能之一, 其实也是它存在的意义所在。这关乎何为共模信号, 资料书上给出的定义是“当两输入端所接信号大小相等、极性相同时, 称为共模信号”, 可是很多人对此感到云里雾里, 既不知为什么会有这样一类的信号, 也不知这个信号如何接到放大电路的两输入端里, 更不知差分放大电路为什么要抑制它。我们换一个角度, 既然是抑制, 那么这类信号肯定是不利的, 那么, 一个放大电路, 它不利因素主要体现在哪里呢? 体现在处理有用信号的时候, 其组成的半导体容易受温度的影响, 导致放大参数波动, 从而让信号失真, 使信号不能“完璧归赵”。其罪魁祸首被“打回原形”之后, 其实就是一对共模信号。

差分放大电路的一大特点在于其电路的对称性, 即便没有完全一模一样的元器件, 但是电路的设计初衷就是尽可能地让两部分的材料、构造、参数一致, 所以实际上差分放大电路是由两路完全一样的基本共射放大电路构成。这里暂且不分析具体电路结构及其原理, 而温度对半导体的影响是客观存在且毋庸置疑的, 它使原信号在放大过程中产生抖动、偏差, 这就相当于加入了另一个信号, 于是, 差分电路对称的两边都受到温度的影响, 而且是受到同样的影响, 这就相当于输入了一对共模信号。

至此, 我们换了一种角度去认识和理解共模信号, 便得出了一个“温度对半导体的影响使差分放大电路输入了一对共模信号”的结论。虽然在实际的电路发展应用中, 差分放大电路输入的共模信号包括而限于此, 但至少, 我们通过这个角度, 对共模信号有了一个具体的认识。

二、剥出“差分放大电路抑制共模信号”的本质

上文述及, 温度对差分放大电路的影响就是差分放大电路输

入了一对共模信号, 差分放大电路则有抑制这对输入信号的影响。这个特点, 其实是在很大程度上奠定了半导体的划时代意义。与其说半导体是放大电流, 不如说半导体是放大信号。自然界中到处存在着包括电磁波在内的微弱的信号, 如果能够把他们放大到人类可以与之打交道的层面, 那么各种各样的电路将会回馈给人类形形色色的功能, 引领着人类进入如今的信息时代。然而, 自半导体进入人类的视野开始, 温度就是半导体难以甩掉的一个“捣蛋鬼”, 虽然半导体的温度特性帮助实现了太阳能发电, 但是更多的是扰乱半导体的放大信号, 使其出现“零漂”现象, 诸如此类。人类注定要在发展电子技术的道路上找到方法去克服温度对半导体的影响。

要克服温度对半导体的影响, 使放大电路能够更稳定地处理信号, 首要的是稳定静态工作点, 以负反馈为主, 很多种电路的设计都是基于这个目的。后来有了温度补偿的思路, 由此发明出各种温度补偿的方案, 这就是为什么基本放大电路会有那么多的外延电路。负反馈和温度补偿确实能起到一定的效果, 但仍远非完善之策。前者需要达到动态的平衡, 这个动态的过程中耗费了时间, 产生出波动; 后者在补偿中也不能保证“足量”“按时”“到位”。直到差分放大电路的发明, 才真正有机会消灭温度影响这个难缠的“捣蛋鬼”。其诀窍是什么呢? 是复制另外一个“捣蛋鬼”出来, 让它们鬼打鬼, 最后同归于尽。这个思路是绝妙的, 这个举措是辩证的, 这个电路当然也是有效的。

有效的前提则是把有用的信号通过差模的方式输入, 这一点将在下文中详加分析。当有用的信号成为了差模信号, 根据差分放大电路“对差模输入信号进行有效放大”的功能特点, 信号就实现了有效放大。想从中捣蛋的温度效应呢? 由于已经被成功复制另一路出来, 成为了共模信号, 也就被“对子”掉了。所以, 差分放大电路抑制共模信号的本质, 就是用一种奇妙而辩证的方式, 真正有效地消除温度效应对半导体电路放大信号带来的不利影响。

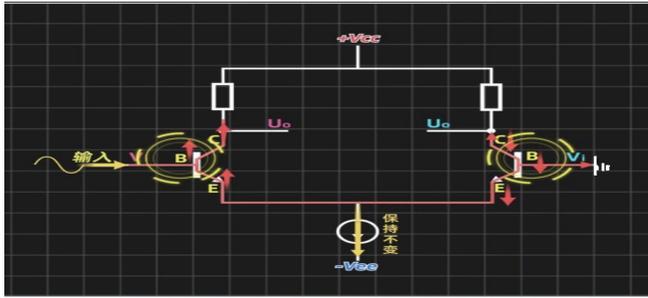
如果仍不能理解“对子”的原理, 还可以通过数学最简单的同数相减为零的原理去理解。在差分放大电路的输出端, 信号输出的有效值是端口相减的, 不管温度效应形成的共模信号如何, 原理上它都被相减为零, 也就是抑制掉了。

需要补充的是, 尽管利用差分的手段, 将温度影响等干扰因素化成共模信号去进行抑制是当前最有效的手段, 但是任何一种手段都不能做到绝对的完美。“共模抑制比”是需要理解的一个技术指标, 它正是用来衡量某个特定差分电路的性能。共模抑制比英文简称为 CMRR, 定义为差模信号的电压增益与对共模信号的电压增益之比的绝对值。KCMR 越大, 电路的性能越优良, 反之则仍有很大的改进空间。

三、抓住“有用的信号成为一对差模信号进入输入”的关键

差分放大电路的诞生, 肩负着一个使命, 就是要消除温度变化等干扰因素的影响, 处理好微弱的信号, 亦即是完整、有效地放大小幅值的电压信号, 确切说是变化幅度较小的交流信号。它可以是任何一个物理量经过传感器转化而成的, 比如红外线的变化, 比如声波的变化, 比如压力的变化, 等等。物理量经过电路

的处理，自然会产生相应的功能。事实证明，这些信号都是能给人类的生产生活带来便利的有用的信号。那么，差分放大电路是如何允许这样一个有用的信号输入的呢？如下图所示，信号的正极从左路进入，右路自然就是接地（共地）了。两路对称电路的公共部分此时在发挥着很奇妙的“化学反应”，让两边恰好等同于输入了大小相等、反向相反的电压信号，也就是实现了差模信号的进入。为什么会有这样的效果呢？接下来不妨就带有所谓长尾的差分放大电路的工作原理来作一番分析：



首先要说明的是，两路共射电路的公共部分并非简单的发射极连接，而是拖着一个长长的尾巴，戏称“长尾”，尾巴需要有阻抗无限大的元器件组成，因为这很难实现，所以又引入了恒流源，恒流源的另一头是要加负电源的。恒流源工作原理不赘述，它的作用则是保证流入的电路不变，根据基尔霍夫电流定律，节点电流为 0，当向下方向的电流不变的时候，动态产生的电路左边的电流 (Δi) 会完全流到右边去。左边从发射极流下来的电流 I_e 系由输入信号引起，接近于正比 U_i ；右边得到了流过来的 I_e ，其大小与左边相同，方向则相反，根据共射放大电路的特点以及两边电路的对称性，右边的 I_e 也会正比于一个 $-U_i$ ，实际上就起到了从左边端口输入 $-U_i$ 的效果。 U_i 和 $-U_i$ ，正好就是一对大小相同、方向相反的信号。按照定义，这个就是差模信号。所以，得出了“有用的信号成为一对差模信号进入输入”的结论。

四、差分放大电路的 2 输入 2 输出端口为其应用无限拓宽了空间

差分放大电路由两路完全对称的共射放大电路组成，因而有着两个输入端口和两个输出端口，经过组合，自然也就有四种输入/输出方式，分别是单输入单输出、单输入双输出、双输入单输出、双输入双输出。前面论述了单输入信号的原始应用状态，结合差模、共模信号的分析，易知此时不管是选择单个端口输出还是双口的输出，所输入的那个信号都将获得完整、有效的放大。差别仅在于，单口输出的放大倍数是双口输出的一半。

另外一个输入端口绝非浪费。有些资料还强调差分放大电路作为单个信号输入时，另一端不能悬空，必须接到共地。其实这个堪称“奢侈的烦恼”。当差分放大电路的问世，因其对共模信号的抑制，比较彻底地解决了信号处理面临的干扰问题后，电子技术的发展已经无可遏制地呈现出开阔、飞速发展的姿态。越来越多的功能电路顺势而生，其采集到的信号也越来越丰富多样，并且需要互相比较，或者与某些基准值进行比较，来完成信号的更复杂化的处理，甚至产生自动化的动作值。这就形成了差分放大电路的双输入，也就是允许两个信号分别从左右两个端口进行输入。此时，原有的“抑制共模信号、放大差模信号”的电路特点非但不用改变，还因此完美地满足了让两信号的差值进行放大的要求，奠定了运算放大器问世的基础。

差分放大电路是运算放大器输入段的主要组成部分，它为信

号的运算解决了采集的首要问题。而运算放大器通过高度的集成，又催生出包括 CPU 在内的各种功能芯片。电子技术迎来了黄金发展期，人类也由此得以进入了信息化时代。从数码照相机到车载音响，从收音机到个人电脑，相信现在仍处于风口的智能手机，依然也只是起点。

五、差分放大电路在简易电路的制作中仍然派上用场

差分放大电路在其功用上，完美地满足了电子技术突飞猛进的需求。在其结构上，也十分契合集成化发展的特点。不管是对称的两个晶体管，还是长尾的恒流源，都能很好地集成到芯片的内部。一个个的差分放大电路，就以这样一种集成的方式，进入到了一款款芯片的内部。从这个角度看，差分放大电路确实不常“见”。谚语说“鹰飞得越高，我们看它就越渺小”，将差分放大电路比作鹰，大概也是这样的道理。

鹰飞下来，停留在地面上，仍能派上用场的。差分放大电路的结构既然很利于集成，那么它在分立元件上的实现，自然也不费太多工夫。有人会考虑小制作的成本问题，简单地认为增加一路对称电路就要增加一倍的制作成本。其实，成本既不会翻倍，这也不是有完善的差分电路而弃之不用的理由。共射放大电路作为最基本的放大电路，那只是学习层面的，在应用层面，差分放大电路才算最基本的放大电路。但凡能够应用起电子技术的，多设计或者安装一个晶体管、几个偏置电阻甚至一个恒流源，都不是很难的事情，其带来的电路功能品质却是全方位的提升。有无差分放大电路的 USB 小音响，其音质明显有差别，前者常带有噪声，这不应该是“一分钱一分货”就可以推搪掉的理由。而在很多品牌电动玩具的电路里，即使是用分立元件的小制作，也都往往采用差分放大电路作为相关信号的输入端，成为其获得用户口碑和市场欢迎的一个细节体现。

有鉴于此，笔者提出三点建议。一是在各种电子技术的学习资料上，不妨把差分放大电路的地位从“基础”往前挪到“基本”上，原来的共射放大电路，本身是存在缺陷的，不应该成为基本，其结构原理放在差分放大电路上去说明即可；二是各种采用分立元件的小成本电路的设计和制作，如有需要，差分放大电路就该是必选，因为省那几个基本原件而带来性能缺陷根本就是得不偿失的；三是可以通过对差分放大电路的理解和应用，更好地把握住运算放大电路的精妙之处，从而真正地掌握电子技术发展的要义与方向。

六、总结

差分放大电路是在共射放大电路的基础上发展起来，旨在根本性消除温度对半导体的影响所形成的干扰，而让信号放大臻于完善的一款电路，它理应获得模拟电子技术最基本电路的一个地位。差分放大电路利用其两路电路的对称性，通过同数相减为零的原理，实现了对温度干扰这一共模信号的完美抑制，而有用的输入信号则作为差模信号输入进去获得有效放大。其两个端口输入的特点以及消除其他干扰因素的适用为其发展性应用提供了机会，运放电路、CPU 等因而得以问世，电子技术遂迎来了飞速发展期，引领着人类进入了自动化、信息化的时代。

参考文献：

- [1] 朱明, 秦佳昕, 宋文祥, 等. 差分放大电路原理分析 [J]. 电气电子教学学报, 2021, 43 (3) : 11.
- [2] 赵玮, 张海涛, 李治中, 等. 三维电场传感器微弱信号放大电路的设计与实验研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (5) : 5.