

差 值 放 大 器

晶体管直流放大器中
差值放大器的分析和应用

〔美〕R. D. 密德尔勃洛克著

邓汉馨译

內 容 簡 介

本书系統地阐述了差值放大器綫路的順序分析法，用以簡化运算，这种方法还可推广应用于其它对称綫路的分析。本书共分五章。第一章闡明了差值放大器的性质，第二章提出了順序分析法，第三章用它来分析一个基本的晶体管差值放大器綫路，第四章提出了基本綫路的一些改进措施，第五章用順序法詳尽地分析了共模負反饋綫路，进一步說明了这种方法的优越性。书末有附录和参考文献。

本书对于一般电子綫路設計和研究人員很有参考价值，也可供大专院校无綫电专业师生深入一步研究对称电子綫路之用。

DIFFERENTIAL AMPLIFIERS
Their Analysis and Their Applications
in Transistor d-c Amplifiers
[美] R. D. Middlebrook
John Wiley and Sons, Inc. 1963

差 值 放 大 器

晶体管直流放大器中差值放大器的分析和应用

邓 汉 馨 譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 3 $\frac{1}{2}$ 78 千字

1965年10月第一版 1965年10月第一次印刷 印数：0,001—4,140册

統一书号：15034·1013 定价：(科六) 0.50 元

序 言

差值放大器、阴极耦合或发射极耦合放大器和推挽放大器常常被用于若干仪表量测系统中。差值放大器一般具有一个三端子输入和一个三端子输出，在描述它们的工作性能时，通常是对共模 (CM) 信号和差模 (DM) 信号而言的。早期对差值放大器进行的很多研究工作，是为了把它们应用到生物学仪表量测系统中去；那时，需要在排除较大的 CM 干扰信号下把很小的 DM 信号予以放大。当时这些仪器毫无例外地都是使用真空管。后来，有了改进的晶体管后，就造成了用在遥测系统及其它信号控制系统中性能优良的固体直流差值放大器的发展。由于真空管差值放大器和晶体管差值放大器的历史几乎是完全隔离的，因此就有需要统一这两类放大器的理论，并把长期来研究真空管放大器所获得的一些原理，应用到现代的性能优良的固体电路中去。

由于差值放大器的输入和输出都是三端子的，在描述它们的工作性能时，就要求比那种将一个输入和一个输出端子接地的较熟悉的放大器定义更多的参数。因此，除其它量之外，还定义了 DM 增益、CM 增益、以及 DM 输入阻抗和 CM 输入阻抗。既然差值放大器的根本目的是放大 DM 信号而不是 CM 信号，因此很早就认识到，DM 增益与 CM 增益之比，即所谓抵制因数应较大。然而，后来又知道，还有其它由于 DM 信号和 CM 信号之间相互作用而产生的一些重要效应。这些效应是由于电路对称性中各量值的不平衡所致，它们用附加的性能参数来描述，例如 DM 对 CM 的转换增益和 CM 对 DM 的转换增益、CM 拒斥因数和 DM 拒斥因数、以及电源拒斥因数。

本专论的一个目的是弄清楚和定义差值放大器的一些重要

的性能参数。差值放大器是对称电路的一个例子，如果电路是平衡的，那末就可以利用均分定理分别地对 CM 信号和 DM 信号进行分析。但是，如果电路是不平衡的，那末分析一般要变得复杂些。本专论的另一个目的是推演一种分析技巧，用以通过均分定理的一种推广计入电路对称性中小量百分比的不平衡效应。这个方法称为“顺序法”，因为分析过程分成了一系列分离的简单步骤，从而对求解即使相当复杂的电路提供了比较简单的代数运算。

本专论的材料希望能对从事一般电子线路设计和一般电路分析技巧的人们有所帮助，对直接从事差值放大器的分析和设计的人们尤其有益，因为这里所详细探讨的原理和方法是适用于很多种实用放大器的。

差值放大器的性质以及不平衡对称电路的分析技巧，是借助于把它们用于两个具体的晶体管电路来加以说明的。第一个电路是基本的单级直流差值放大器，第二个电路是更复杂的具有共模负反馈的二级直流差值放大器。选择这些电路的原因，一则是因为它们便于讨论，二则是因为它们本身对实际应用来说是重要的。电路元件采用了一些典型的数值，目的是说明即使微小的不平衡也会对电路性能参数有巨大的效应，同时也便于把两个选择作为讨论的具体电路进行比较。由于这些效应为数极多而且极为复杂，因此自始至终注意到这样两个问题，即保证代数运算受到控制和把公式都表示为能具体解释的形式。虽然粗看起来，有些公式显得令人望而生畏，实际上它们只不过是冗长而不是复杂，其中各项是很容易辨认的。

虽然这里只详细探讨了二个具体的放大器电路，一般说来，顺序法适用于任何种类型的对称电路的分析，并且可以在一个直截了当和易于了解的基础上，对真空管或晶体管的直流或交流差值放大器中微小不平衡进行研究。

作者

目 录

序言	3
第一章 差值放大器的特性	7
1.1 对差值放大器的需要	8
1.2 基本差值放大器作为一个平衡对称电路的一些性质	10
1.3 电路不平衡的一些重要效应	16
1.4 不平衡对称电路分析的特点和处理	21
第二章 不平衡对称电路的顺序分析法	24
2.1 用均分定理分析平衡对称电路	24
2.2 推广均分定理来分析不平衡的对称电路	27
第三章 顺序法在单级晶体管直流差值放大器分析 中的应用	30
3.1 差值放大器的性能参数的定义	31
3.2 信号源阻抗为零时的放大器的分析	36
3.3 信号源阻抗所产生的效应的分析	45
3.4 单级放大器与信号源相结合的性能参数	50
第四章 对基本差值放大器电路的改进	56
4.1 恒流发生器的采用	56
4.2 共模负反馈的优点	59
第五章 具有共模负反馈的两级晶体管直流差值放 大器的分析	62
5.1 电路工作原理	63
5.2 共模回路增益的决定	65
5.3 利用顺序法的放大器的分析	66
5.4 两级放大器与信号源相结合的性能参数	83
5.5 晶体管电流增益与温度的依赖关系的一些效应	86

5.6 結束語	88
附录 I 小量百分比不平衡的对称电路的顺序分析 法的证明	90
附录 II 单级真空管交流差值放大器的共模拒斥因数	97
参考文献	100

第一章

差值放大器的特性

差值放大器是一种特殊类型的电路，它的功用是把两个信号的差值加以放大，而不管它们各自的数值是多少。它们在生物学量测方面的适宜性对于真空管差值放大器的发展提供了相当大的动力，最近，晶体管差值放大器在遥测应用方面已占有重要的地位。本专论的目的有三个：首先是一般地明确差值放大器的一些性质；其次是推演出它们的一种分析方法，为设计提供一个有用的基础；第三是通过若干具体而实用的晶体管直流差值放大器的研究来说明它们的性质和分析方法。

以上三个目的在某种程度上是同时达到的，原因是，具体的例子不仅用来确定差值放大器的一些基本性质，同时也是用来引入和说明分析方法的。然而，分析的技巧以及有关工作性能的一些特性，非但适用于差值放大器电路，而且对于更普遍性的所谓对称电路也同样适用，后者之所以称为对称电路是因为它们可以从电路图形上划分为两个镜像对称的部分。桥式网络就是无源对称电路的一个例子；有源对称电路不仅包括差值放大器，而且还包括推挽放大器以及组成不对称电路中部件电路的阴极耦合或发射极耦合放大器在内。

对差值放大器的需要将在 1.1 节中通过两个典型仪表系统的研讨来予以确立。在 1.2 和 1.3 节中将以一个简单的真空管差值放大器实例为线索，来追溯差值放大器理论的历史发展。同时也介绍了差值放大器的各种性质，特别着重有关电路不平衡方面的一些性质。最后，在 1.4 节中把差值放大器的分析问题给予总结，并列出了在以后各章中为解决这个问题所应遵循的步骤。

1.1 对差值放大器的需要

一个放大器通常有三组端子：一对输入端子，一对输出端子和一对供应工作所需电源的端子。大多数放大器，每一对中有一个端子是连接到一个共同点的，该点通常考虑处在“零”电位或“地”电位。这样一个放大器就称为具有一个“单端输入”和一个“单端输出”。然而，在某些应用中，一个有“单端输入”的放大器是不合适的。反而有必要使任一输入端子都不接地，在这种情况下，放大器就称为具有一个“浮动输入”。一个放大器，如果它提供的输出是和对地而言是浮动的二个输入端子之间的信号差值成比例，而对于二个输入端子共同的信号不产生任何输出，那末它就称为“差值”放大器。差值放大器的需要可以从下面两个例子来理解。

电子脑髓摄影术是用来研究和解释脑表面上发生的电位现象的。一般是把若干电极放在头皮的各个点上⁽¹⁾，然后把各对电极间的电位差加以放大和记录下来以供研究之用。一对电极构成一个信号源，并可用一个电压发生器和一个串联电阻来代表。电压是我们感兴趣的量，串联电阻则是电极间的生理电阻、每个电极的接触电阻、以及电路电

阻之和。图1是利用一个单端输入放大器的仪表系统的工作原理图。

不幸得很，由于信号源内部引入的干扰，在放大器输出处获得的结果很可能是完全杂乱无章的。最严重的干扰源是60赫电位，在典型的环境中它们是不可避免

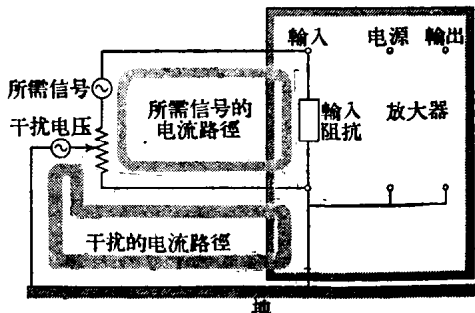


图1 采用一个有单端输入放大器的仪表系统。尽管放大器的输入阻抗很高，干扰电压仍能产生大的杂散输入电压

免地存在着的，通过相当大而且可变的电源电阻的耦合它们就会进入放大器的输入电路。干扰电流在图 1 中所表示的迴路中流动，就能够产生一个放大器的输入电压，而把构成所需信号的几十个微伏电压完全掩盖掉。

为了削弱干扰，就有必要采用如图 2 所示的一个有浮动输入的放大器。如果每个输入端子到地的阻抗足够高的话，那末干扰电压就不能把一个举足轻重的信号注入到输入回路中去。可以注意到，除去在二个输入端子处都具有高阻抗之外，放大器还必须能够把同时出现在二个输入端子处的干扰电压略去不计。有关差值放大器的很多早期工作就是在电子脑髓摄影术的量测要求的刺激下进行的。

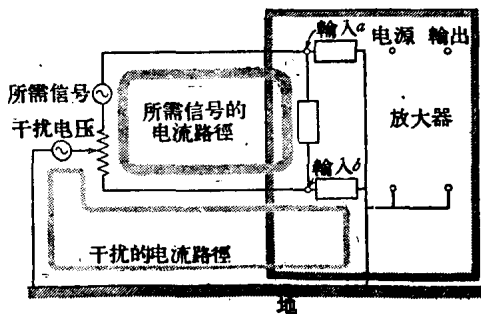


图 2 采用一个有浮动输入放大器的仪表系统。由于干扰电压造成的电流大为减小

有关差值放大器的很多早期工作就是在电子脑髓摄影术的量测要求的刺激下进行的。

在物理量的量测领域中可以找到为什么需要差值放大器的第二个例子。求取一个金属结构体所承受的机械应变往往是很重要的，决定这种应变的一种方法是把一个应变计量电桥加到金属表面上去⁽³⁾。火箭发动机外壳中的应变量测就是一个典型应用，在这种情况下，有关的放大器将安装在某一距离以外的有防护的建筑物中。一个应变计量电桥由四只接成电桥形式的电阻组成，其中一只或者两只电阻是对应变敏感的。电桥由一个直流电源电压供电，在另一对电桥端子之间产生的电压是待测应变的函数。因为电桥电源电压的一端是接地的，所以出现电桥输出电压的二端中的任何一端都不能接地，否则就有一个桥臂被短路。因此与电桥连接的放大器就有必要具有浮动的输入端子。系统的方框图如图 3 所示。

在应变計量仪表系統中干扰电压也是一个严重的問題。由于电桥和放大器之間的距离，电桥的“地”很少能和放大器的地处在相同的电位，因而就有一个由“地迴路”电流造成的干扰电压，可如图3所示。干扰信号的大小可能有若干伏，并且会含有很大的400赫分量，因为这类装备中的主电源頻率往往是400

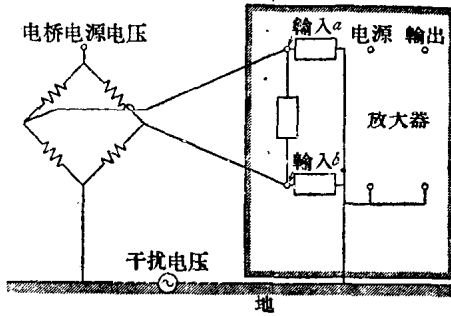


图3 — “接地的”应变計量电桥与一个有浮动輸入放大器相連接。干扰电压可以在“地迴路”中产生

赫。因此，很清楚，差值放大器的二个輸入端子必須对地具有高阻抗，它还必須能够抑止对二个輸入端子共同的大幅度电压，同时它也必須把由所需电桥信号造成在輸入端子之間的几个毫伏的电压予以放大。

其次，我們来研討在剛才描述的各种应用中适用的若干基本放大器电路。

1.2 基本差值放大器作为一个平衡对称电路的一些性质

从前面所述可見，对差值放大器的一个基本要求是具有一个对放大器的底而言是浮动的輸入。初看起来，对一个普通的单端放大級（例如一个简单的阴极接地真空管电路）提供一个变压器耦合的輸入似乎是一个充分的解决办法。可是，这个办法通常是不能令人滿意的，因为需要放大的輸入信号往往含有直流电压、或者至少含有一些低到使变压器耦合成为不切实际的低頻。另外，要以变压器来保持足够高的輸入阻抗是有困难的。

另外一种解决办法是把每个輸入端子对地的信号分别加以放

大。基本电路如图 4 所示（图中省略了偏压装置）。这个放大器属于浮动输入、浮动输出的类型，因而就有两种输入和输出信号，即共模的（同相的）和差模的（反相的）。共模的（CM）信号定义为两个端子对地的电压的平均值，或者就是它们的和的一半；差模的（DM）信号则定义为它们之差的一半。在图 4 的电路中，只要电路的两半完全一样，那末 DM 输出只与 DM 输入有关，而与任何 CM 输入无关。对于 CM 输出也可以相似地这样说。这样，我们就可以定义一个 CM 增益和一个 DM 增益，在这个电路的情况下，它们相等。

图 4 所示的简单电路原则上适宜于放大来自上面一节所描述的那些来源的信号。然而，应该注意，必须采用浮动的输出，并且电路的两半边必须完全平衡。此外，CM 信号的幅度必须小到足以防止过载的程度，以免引起 CM 信号的失真。在把图 4 所示那种电路若干个串接起来使用时，上述效应特别会引起很大的麻烦，而且由于信号源处常常发生在数量级上比实际所需 DM 信号大好几个数量级的 CM 信号而促使上述效应更加恶化。

为了削弱过载问题的效应，我们希望能把放大器的 CM 增益降低而不影响 DM 增益。奥夫纳建议过一种对这个基本电路的最早的变形电路⁽³⁾，他提出了一种把 CM 负反馈加到输入栅极去的方法。一种可以得到同样结果而更加简单的变形电路是在两个阴极和地之间加入一个公共电阻，如图 5 所示。这种“阴极耦合”放大器是一个用得很多的电路，值得较详细地加以研究。

要最好地理解图 5 所示电路的定性的工作性能，可以研究一下 DM 和 CM 输入信号分别加入时的情况。我们姑且假定两管

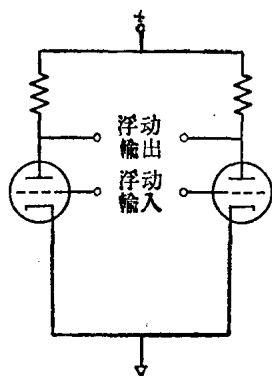


图 4 把一个浮动输入
的每个端子处信号分别
加以放大的电路。两边
必须完全平衡

全同，負載电阻相等。如果加上一個 DM 輸入信號，那末輸入端子 a “上升”和輸入端子 b “下降”同一個數值。在管子是綫性工作的假設下，兩管的陽流相應地從它們的相等的靜態值增大和減小，而這些電流變化在陰極耦合电阻中恰好相互抵消。輸出電壓 “下降”和 “上升”的數量相等，放大器的 DM 增益和每個管子的增益相同，因為兩個陰極處在虛地電位。如果加上一個 CM 輸入信號，兩個輸入端子一起 “上升”，兩個陽流增大同一個數量。這些變化在陰極耦合电阻中是相加的，在它二端就產生一個負反饋電壓。因此，放大器的 CM 增益就等每個管子在有陰極負反饋時的增益，負反饋相當於一只阻值一倍於陰極耦合电阻的电阻。係數 2 的所以發生是因為兩個陽流增量都流過這個电阻。由此可見，這樣就完成了所需要達到的效果，也就是使 DM 增益和 CM 增益之比大於 1。

圖 5 所示電路所固有的、有利於差模輸入信號和抵制共模輸入信號的這一特點造成了 “差值放大器” 這個名稱。以後各章中要研討的就是這種基本電路結構及其很多變形。現在把驗證上述的電路工作性能的定性闡述作為我們的分析工作的一個開端是適

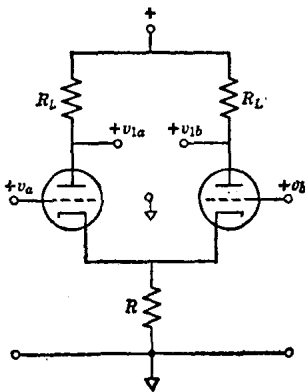


圖 5 基本差值放大器。
陰極耦合电阻 R 降低了共模增益而不影響差模增益

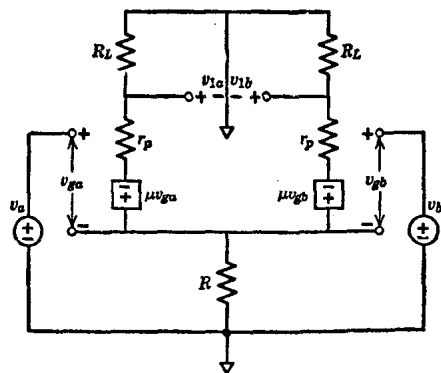


圖 6 對增量信號而言的基本差值放大器的等效電路。兩邊假設完全相同

宜的。

图 5 所示差值放大器的增量等效电路示于图 6 中。两个半边的完全相似性仍予保留，而且为了简明起见，只考虑了交流量。每个管子由常规的低频等效电路表示，即包括放大系数 μ 和阳极电阻 r_{p0} 。两个输入电压为 v_a 和 v_b ，两个输出电压为 v_{1a} 和 v_{1b} ，都是对交流的地而言。我们感到兴趣的是 CM 和 DM 输出电压（分别为 $(v_{1a} + v_{1b})/2$ 和 $(v_{1a} - v_{1b})/2$ ）以及输出电压 v_{1a} 和 v_{1b} 分别依赖于输入电压 v_a 和 v_b 的规律。对图 6 的电路进行直截了当的分析就可得到下列结果：

$$\left(\frac{v_{1a} + v_{1b}}{2}\right) = -\frac{\mu R_L}{R_L + r_p + 2R(1 + \mu)} \left(\frac{v_a + v_b}{2}\right) \quad (1.1)$$

$$\left(\frac{v_{1a} - v_{1b}}{2}\right) = -\frac{\mu R_L}{R_L + r_p} \left(\frac{v_a - v_b}{2}\right) \quad (1.2)$$

上述结果用 CM 和 DM 输入电压而不是用它们本身的数值来表示，目的是强调这种情况，即 CM 工作和 DM 工作是可以分开研讨的。

由式 (1.1) 和 (1.2) 可见，CM 增益 A_{cc} 和 DM 增益 A_{dd} 为

$$A_{cc} \equiv \frac{\mu R_L}{R_L + r_p + 2R(1 + \mu)} \quad (1.3)$$

$$A_{dd} \equiv \frac{\mu R_L}{R_L + r_p} \quad (1.4)$$

这些表达式验证了定性的结论，即，DM 增益就是单管的增益，而 CM 增益是一个管子受到一倍于阴极耦合电阻的负反馈效应后的增益。

把式 (1.1) 和 (1.2) 直接相加和相减，可以得到各个输出电压的表达式如下：

$$v_{1a} = -A_{cc} \left(\frac{v_a + v_b}{2}\right) - A_{dd} \left(\frac{v_a - v_b}{2}\right) \quad (1.5)$$

$$v_{1b} = -A_{cc} \left(\frac{v_a + v_b}{2}\right) + A_{dd} \left(\frac{v_a - v_b}{2}\right) \quad (1.6)$$

从这些结果得到的一个重要推論是，两个输出电压 v_{1a} 和 v_{1b} 总是同时存在的，甚至只加上一个輸入电压 v_a 或 v_b 时，也是如此。作为一个特例，如果 $v_b = 0$ ，則

$$v_{1a} = -\left(\frac{A_{dd} + A_{cc}}{2}\right)v_a \quad (1.7)$$

$$v_{1b} = +\left(\frac{A_{dd} - A_{cc}}{2}\right)v_a \quad (1.8)$$

如果 CM 增益 A_{cc} 比 DM 增益 A_{dd} 要小得多，例如使 R 很大就可做到这样，那末对应于輸入电压 v_a 的两个输出电压 v_{1a} 和 v_{1b} 就有幅度相等、相位相反的趋向。这种电路的这个性质就使得它作为一个“阴极耦合倒相器”来使用，后者的作用是在一个单端輸入下提供一个浮动的反相輸出。倒相器电路的一个常見的应用是作为推挽音频功率放大器的激励級，并且可以看到，图 5 的基本差值放大器也可用作推挽級。彼此分开的負載电阻通常当然是用一只負載电阻来代替的，后者是通过一只初級具有中心抽头的变压器耦合到二个阳极去的。在这个应用中的变压器的一个作用是把放大器的浮动輸出变换成为单端輸出，由于頻率响应并不一直低到零頻率(直流)，所以这样使用是可以的。

在差值放大器的更普遍的应用中，其中 CM 和 DM 輸入电压都存在，由式 (1.2) 可見，DM 輸出只是 DM 輸入的一个函数。在很多情况下，有可能直接利用浮动的輸出，例如在电子脑髓摄影术工作中，最終的电气負載是描笔式記錄器的驱动綫圈。然而，在很多应用中，有必要具备一个单端輸出，例如在遙測工作中，需要把放大器的輸出連接到一个单端輸入的装置上去，例如一个多路調制器或者一个副載波振蕩器。如果把輸出看成为一个輸出端子和地之間的話，图 5 的基本差值放大器是可以提供一单端輸出的。可是由式 (1.5) 可見，相应的单端輸出电压 v_{1a} (或 v_{1b}) 中含有由于 CM 輸入信号的分量，也含有由于 DM 輸入信号的分量。要把不需要的 CM 分量减小到最小，显而易見就必须采用很大的 DM 增益对 CM 增益之比 A_{dd}/A_{cc} 。这个要求大增益比的

理由是对前面所提到过的防止过载效应的一个补充。

DM 增益对 CM 增益之比, A_{dd}/A_{cc} , 是差值放大器的一个重要参数, 称为“抵制因数”。采用一只大阻值的阴极耦合电阻器 R 就可以得到大的抵制因数。然而, 由于 R 两端的静态直流电压降, 它的大小实用上是有限制的; R 的值越大, 那末要保持阴极接近于地电位所需接在 R 下端的负电源电压就要越高。H. 哥尔德贝格 (Goldberg) 曾经建议了一种既能获得大的 R 有效值 (或动态值)、又保持了比较低的直流电压降的十分巧妙的方法⁽⁴⁾。这种变形电路是把电阻 R 用一只“恒流”五极管来代替, 最好带有一个电阻 R_k 所造成的阴极负反馈, 如图 7 所示。五极管的固有高板阻 r'_p 就被提高到了实际上更高的数值, 接近等于 $r'_p(1+g'_mR_k)$, 其中 g'_m 为五极管的跨导。

在进一步讨论之前, 让我们先来看看一个数例, 目的是获得一个典型电路中有关数量级的概念。假定图 5 和 6 中的差值放大器电路的参数如下:

$$\mu = 20 \qquad R_L = 10 \text{ k}$$

$$r_p = 10 \text{ k} \qquad R = 10 \text{ k}$$

由式 (1.3) 和 (1.4), CM 增益和 DM 增益分别为

$$A_{cc} = 0.455 \qquad (1.9)$$

$$A_{dd} = 10 \qquad (1.10)$$

应该注意, 由于阴极耦合电阻 R 所产生的巨大的 CM 负反馈, CM 增益小于 1。抵制因数为 $A_{dd}/A_{cc} = 22$ 。如果 DM 输入信号 $(v_a - v_b)/2$ 为 10 毫伏, 例如从图 3 所示的应变计量电桥接法中就可得到这样的输入, 这个信号所产生的单端输出电压分量 v_{1a} 为 $10 \times$

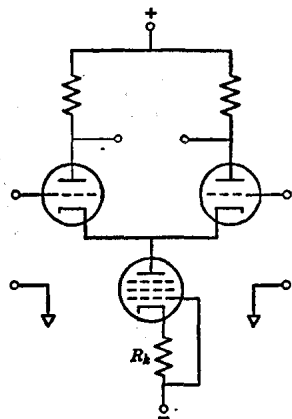


图 7 把阴极耦合电阻用一只“恒流”五极管来代替, 使抵制因数值大大获得改善

10 毫伏 = 0.1 伏 (由式 (1.5))。然而, 这个输出电压同样也可以由一个等于 0.1 伏 / 0.455 = 0.22 伏的 CM 输入电压 $(v_a + v_b) / 2$ 来产生。在一个实用系统中, 这样大小的、甚至于更大的 CM 输入电压是很容易发生的, 因此, 只观察单端输出电压并不能告诉我们, 输入信号究竟是某一个 DM 电压, 还是一个比它大 22 倍的 CM 电压, 或者是二种电压的某种组合。放大器在接受 DM 输入和抵制 CM 输入方面的性能显然并不很好。

把阴极耦合电阻 R 像图 7 所示变形电路中那样用一只恒流五极管来代替, 这个数例中所导出的差值放大器的工作性能就可以大大地改善。如果附加的电路具有下列参数:

$$g'_m = 2000 \text{ 微姆欧}$$

$$r'_p = 1 \text{ 兆欧}$$

$$R_k = 1 \text{ 千欧}$$

那末在式 (1.3) 和 (1.4) 的增益公式中要用的 R 有效值为 $r'_p(1 + g'_m R_k) = 3$ 兆欧。两个增益的数值结果为

$$A_{cc} = 0.00159 \quad (1.11)$$

$$A_{dd} = 10 \quad (1.12)$$

DM 增益 A_{dd} 当然是不变的, 但是 CM 增益 A_{cc} 要比前面数例中小得非常多。结果, 抵制因数增大到 $10 / 0.00159 = 6300$, 这样, 要给出同样的单端输出电压, 加到差值放大器的 CM 输入电压就必须要是 DM 输入电压的 6300 倍。对于 CM 输入电压的抵制显然比前面的数例大大改善了。

本节中我们讨论了基本差值放大器的某些性质, 并表明了一只有效阻值高的公共阴极耦合电阻能够怎样地改善工作性能。下面我们来研讨基本差值放大器工作性能方面的另一些十分重要的问题。

1.3 电路不平衡的一些重要效应

从上面一节的讨论看来, 似乎一个如图 5 或图 7 所示的那一

类差值放大器可以对于 CM 输入信号提供强烈的抵制作用。描述工作性能的那一些公式表明，要达到任意高度的抵制的唯一要求是采用尽可能大的耦合电阻阻值 R ，或者在用了更巧妙的电路时使它的有效阻值尽可能大。

不幸的是，問題并非如此简单。到目前为止，电路的两个半边假定是完全相同的；然而，差值放大器的对称性中不可避免的不平衡会使得一个 CM 输入产生一个不需要的 DM 输出。要研究这个附加的电路性质的实质，可以把图 5 的基本差值放大器和图 6 所示的等效电路重新加以考虑。

作为电路两个半边不平衡的效应的最简单说明，让我们假定，除去管子的放大系数之外，所有其它相应元件仍保持平衡。设左面和右面管子的修正后的放大系数分别为 $\mu + \delta\mu$ 和 $\mu - \delta\mu$ 。同前面一样，我们所感到兴趣的是两个输出电压以及它们的 CM 和 DM 分量是怎样依从于 CM 和 DM 输入电压的。

由图 6 的等效电路，考虑了不平衡的 μ 后，用了比前面冗长得多的代数运算，可得到下列方程式：

$$\left(\frac{v_{1a} + v_{1b}}{2}\right) = -\frac{\mu R_L}{r_p + R_L + 2R(1 + \mu)} \left[\left(\frac{v_a + v_b}{2}\right) + \frac{\delta\mu}{\mu} \left(\frac{v_a - v_b}{2}\right) \right] \quad (1.13)$$

$$\left(\frac{v_{1a} - v_{1b}}{2}\right) = -\frac{\mu R_L}{r_p + R_L} \left[\left(1 - \frac{(\delta\mu/\mu)^2 2R\mu}{r_p + R_L + 2R(1 + \mu)}\right) \left(\frac{v_a - v_b}{2}\right) + \left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right) \left(1 - \frac{2R\mu}{r_p + R_L + 2R(1 + \mu)}\right) \left(\frac{v_a + v_b}{2}\right) \right] \quad (1.14)$$

和式 (1.1) 和 (1.2) 比较，这些结果中最有特点的特点是在每一个表达式中都是既有 DM 输入电压项、又有 CM 输入电压项。当电路元件数值平衡时，也就是在本例中当 $\delta\mu = 0$ 时，这些“交叉耦合”项就消失了。为了方便起见，用两个转移增益来表示交叉耦合，因而现在由式 (1.13) 和 (1.14) 就可确立四个增益参数，即