机 械 电 子 化 基 础

[日] 江村 超 著
李玉璇 译

大 连 轻 工 业 学 院
一 九 八 五 年

原书著作　江村　超
日本　日刊工业新闻社　1983年出版
译者　李玉璇
出版　大连轻工业学院
印刷　大连大重印刷厂
1985年8月1日

前 言

最近，由于电子技术的发展，特别是以微计算机为中心的集成电路技术的进步，使机械技术受到了极大的冲击。这是因为，由于适当地运用了电子线路而陆续研制出了一些不仅量轻形小且精度较高的机械，并且也研制出了，仅仅是利用机械技术就很难以实现的、而且又具有优越性能和柔性的新机械。

1981年7月，日刊工业新闻社出版了“机械设计”月刊增刊——“装有微计算机的机械”设计学——第三部分“机械电子化”（Mechatronics）入门特集。在那一年前，当时该刊的责任编辑委托我执笔撰写这一特集，并且指示我要写得尽量通俗易懂。我和当时在东北大学精密工学系的内山胜副教授等人共同撰写了这一特集。不过完成了的文稿不一定就能说是通俗易懂。

现在这本书，是以上述特集中笔者撰写部分的原稿为基础，考虑了各方面读者所提出的意见而改写的一本入门书。因为是入门书，所以是以“机械电子化”学的初学者为对象的，因而对于已经实际从事机械电子化工作的人来讲，可能就显得分量不足。对于需要更深更专门知识的读者，希望能去参考有关方面的专门书籍。并且，本书是以机械技术人员为对象的，所以就没有必要去叙述那些对于机械技术人员已是常识的东西。

对于实践机械电子化这一学科来讲，电子电路的知识是必不可少的。没有这方面的知识，就难以设计出使机械技术与电子技术得到平衡的机械。因此，本书中电子电路的基础占了较大篇幅。只要切实掌握基础，应用应该是容易的。

本书，第一章讲的是模拟电路，第二章讲数值电路，只要将这二章切实学好。就应该能够设计一些简单的电子电路。

第三章到第六章讲的是，在机械电子化中广泛应用的数模转换器、模数转换器、电源、伺服放大器以及步进电机驱动等。

第七章说明了数字计算机，特别是可以称之为机械电子化主角的微计算机，它的动作原理及软件。

第八章就传感器、第九章就执行机构，进行了概略的解说。

第十章讲解电伺服，这种伺服方式使用及维护都比较容易，所以现在在数控机床及机器人的控制中，是应用得最广泛的一种伺服方式。

十一章叙述机械电子化的应用实例。本章所介绍的机械，都是笔者在学生们的协助下研制成功的。

以往的机械，连杆、凸轮等等机构构件占有很大部分，它们通常都具有动作原理明白易懂的特点。对于笔者来说，设计一台要在机构学上下很多功夫的机械，是一件很愉快的事。尤其是在分析研究我们的前辈们所制做的机器时，一步步地探索到设计者的苦心，会感受到无穷尽的乐趣。

可是，一台对于机构构件依赖性很高的机械，随着所要求的功能的提高，它的机构就会愈加复杂。如果设计不当，通常就会变得笨重不堪。并且一般都缺少适应规格改变所需的柔性。

近年来，随着半导体技术的进步，模拟电子计算机和数字电子计算机已经小到可以装备到一般机器中去的程度。并且由于大功率控制元件的研制成功，就是高输出伺服电机也能够随意地进行控制。再加上大量传感器被研制成功，就可能高精度地获得各种“情报”数据。

在上述基础上，逐步开展了不少研究工作，主要目的是，将至今为止由机械机构进行的情报处理、逐步转移到让电子电路担任，以求得机械的小型化和轻量化。更积极的目的是，付与机械以更高的功能和使机械具有柔性。

恰好和这一活动相呼应，在大约1976年前后开始启用了“机械电子化”（Mechatronics）这一术语。这一术语是由日本人创造的日本式英语，在外国不一定就通用(译者注：在美国这一术语也已开始流行）。

在“机械电子化”这一术语刚诞生时，mecha是指mechanism（机械，机械设备）而tronics则指electronics（电子学），这一术语的意义就是“电子化的机械设备”，而最近的报刊上，则多认为mecha是mechanics（机械学），使mechatronics具有更为广泛的含意，即“机械学与电子学领域里的技术科学”。

象这样，mechatronics这一术语，即“它含义在不断地演化，可以认为，到这个术语确实被定义时为止，还是需要若干岁月的。因而，在这里不必对究竟什么是“机械电子化”作严密的议论，而应该举出一些作为“机械电子化”设计取得显著效果的实例，例如按顺序可以是：打印机、缝纫机、照相机、钟表、数控机床，工业机械人，以及电子控制发动机等。

打印机，特别电子计算机使用的电打印机被CRT显示装置及电子打印机所代替，就解决了噪音及速度问题。

由于采用了微计算机控制，缝纫机的机能有了飞跃的提高。

照相机上增加了自动曝光，自动对焦以及防止误操作等机能。

钟表、除了表示部分外，机构全被电子电路所代替，使计时精度有了飞跃的提高，并且由于在表示部分采用液晶以及LED（发光二极管）而完全取消了机械机构，因而很难以再说这种表是机械产品了。

数控机床，不仅能够反复进行同一程序的自动加工，更为重要的是，它能够很容易地加工从前机床所难以加工的曲面。

产业机器人，随着计算机的进步，它的功能在不断地提高，在不久的将来，会具有类似于“智能”的功能。

电子控制内燃机，用各种传感器检测内燃机的运行状态，由微计算机操纵各种执行机构使之接近于理想运行状态，发动机排气得以净化并且降低了燃料消耗。

上面只是介绍了部分机械电子化产品，其它尚有很多已研制完成的，和正在研制的产品。

下面想说一下笔者对于机械电子化的想法。这只是笔者个人的意见，也许含有偏见。我想有的读者会持有不同见解，就请这些读者谅解。

学习“机械电子化”的最捷径，我认为就是从简单的产品开始，自己实际去设计、制作机械电子化产品。

在具体制造产品的过程中，会有助于加深思考，并且在不断的失败过程中，产生对技术世界深刻的洞察能力，更为重要的是在此过程中就会获得创造能力。

创造能力，不可能是仅仅由读书、听讲等等接受他人的教授而产生的，创造能力只能通过自己的实际思考和体验而产生。不过读书和听讲对于获得创造能力的开端是起作用的。

创造是建立于自己体验基础上的反复思考，有时，这种思考可能是无意识的。因而，有时在拼命思考时，反而不能产生好的设想，而在浅睡时以及洗澡的呆想状态中，无意地会浮想出有益的设想。我深信，不经努力，是得不到创造能力的。

本书是以1982年当时的技术水平为基础而撰写的，技术世界不断地在日新月异，我想几年后本书有不少部分会变得陈旧。为了防备内容变得陈旧而把有关机械电子化的表面知识大量塞进书中，这样，并不可能造就具有创造能力的技术人员。

真空管电路的大部分已经被半导体电路所代替，可是在真空管时代建立起来的技术，基本内

容至今仍然具有生命力。实践技术的手段尽管可以变化，而技术的本质以及思考方法，是不会大变的。

不要害怕技术陈旧，技术陈旧是研究人员与技术人员创造的结果，因之应该是高兴才对。永远保有使自己与最新技术相适应的柔性，这才是技术人员所必需的。

笔者，作为一名研究人员兼技术人员，祝愿使本书的内容变为陈旧的技术革命能够顺利进行。

最后，届本书出版之际，向给予指导的东北大学酒井高男教授与箱守京次郎教授，以及就机械电子化经常讨论的内山胜副教授表示谢意。本书得以出版是由于日刊工業新闻社的有关各位的努力，在此表示感谢。

1982年 9月

笔者

目　录

第十一章 机械电子化应用

第一章　模拟电路

机械电子化领域中应用的模拟电路，大部分是以运算放大器为主的运算电路。因而本章主要是叙述运算放大器及其应用电路。

1．1．运算放大器与理想OPAmp

运算放大器（Operational　Amplifier）是为了运算电路而设计的一种电压增益较高的直流放大器，也把运算放大器称为OP　Amp。

在运算放大器的输出端子连接上阻抗、电容等就能够进行加减、积分、微分等各种运算。并且接上乘法器后也可进行除法运算。从前、用数量不小的真空管、半导体等能动部件和阻抗电容等电路部件组合在一起，构成一个运算放大器，所以它是一种价格高昂的贵重物品。所以人们在设计电路时，努力设法减少运算放大器的数量。

可是自从集成电路（IC）技术，使得高性能的运算放大器价格变得便宜以后，模拟电路的设计思想就发生了完全的变化，不再是计较运算放大器的数量多少，而是重视电路可靠，动作稳定和易于调节。同时人们更习惯于轻快地称它为OPAmp，而不用笨重的运算放大器这一名称。并且也都把它看成一个电路部件，尤其是像DIP（双列式封装）型等小型封件中装有四个运算放大器这类部件，除了用于高精度模拟电路等特殊情况外，同逻辑元件一样能够很容易处理。

基于上述情况，本书以后采用OPAmp这一略称以代替运算放大器。

图1·1是用电路图符号表示的OP Amp。V^{+}、V^{-}是启动OPAmp所必要的电源接线端。通常V^{+}接在+15伏、V^{-}接−15伏电源，不一定电源就必需±15伏，当输出电压可以较低时，降低到±5伏也能动作，更为特殊的情况下，以±1.5伏的微小电压也可能使某些OP Amp动作。这对于采用乾电池作为电源，当然是很值得重视的。Vout为输出端，输出电压为输入端的输入电压V_{in}^{+}、V_{in}^{-}之差：V_{in}^{+}−V_{in}^{-}乘以OP Amp的电压增益A，即

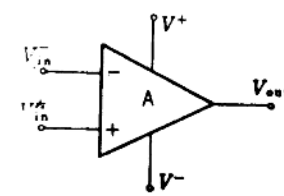


图1·1 OPAmp的符号表示

$$V_{out}=A(V_{in}^{+}-V_{in}^{-}) \qquad (1·1)$$

令1·1式V_{in}^{+}＝O，则V_{out}＝−AV_{in}^{-}，输出电压的极性与输入电压的极性相反。如令V_{in}^{-}＝O，则V_{out}＝AV_{in}^{+}，输出电压的极性与输入的一致。因此，将V_{in}^{-}侧的输入端称为反相输入端，在图上的表示方法是在三角形的内部加上一个负（−）号，而V_{in}^{+}侧的输入端称为同相输入端，在三角形内部以正（+）号表示。

图1·2表示OP Amp的输出输入特性，由图可知电压增益A为：

$$A=\frac{dV_{out}}{d(V_{in}^{+}-V_{in}^{-})} \qquad (1·2)$$

实际应用的OPAmp的A值在10[illegible]～10[illegible]范围内，当电源电压为±15V时，输出电压的饱和值大约为±12V，一般随着输出电流的增大，这一值的绝对值减少。

图1·1为OP Amp的简化符号表示，实际的OP Amp还必须如图1·3考虑输入端的输入

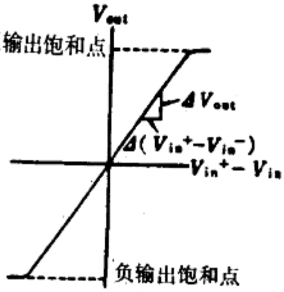


图1·2OPAmp的输入，输出特性

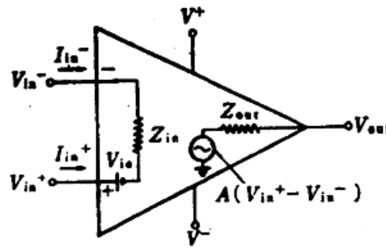


图1·3OP Amp 等价电路

阻抗Z_{in},输入偏置电压V_{io}以及输入电流I_{in}^{+}, I_{in}^{-}，以及输出的输出阻抗Z_{out}。

这些常量,在分析使用OP Amp的电路时很难以处理。因此作下列假定:

$$\left.\begin{array}{ll} I_{in}^{-}=I_{in}^{+}=0, & V_{io}=0 \\ Z_{in}=\infty & Z_{out}=0 \end{array}\right\} \quad (1\cdot3)$$

（1·3）式对于任何OP Amp都可以说是理想条件,所以正在研究在电路组成以及制造方法上使之尽量接近这一理想条件。并且如果能使电压增益尽可能增大，对于提高运算精度以及使运算电路的分析更为容易这两方面都更有效。如以数式表示，即为:

$$A=\infty \quad (1\cdot4)$$

可是过分提高A，会引起运算电路不稳定而造成振荡。这主要是由于OP Amp本身的相位滞后引起的。因此，通常以某种方法进行相位补偿以期OP Amp 的相位滞后在较宽的频率范围里徐徐变化。另外还有几个希望理想化的特性如OP Amp 的频率特性以及共态抑制比等。这些将在下面叙述。

下面，就称（1·3）、（1·4）式所表示的OP Amp 为理想OP Am ,用它进行各种运算。另外，要使OP Amp动作，无疑都要有电源，所以，除了特别情况外，下面在表示中都将OP Amp 的电源接端省略。

1·2 反相放大器与同相放大器

1·2·1反相放大器

设用两个电阻R_i, R_f和一个OP Amp组成图1·4所示的运算电路。图中GND（接地端）与正负电源的COM（公共端）接端相同。为了帮助读者理解，取741型OP Amp 为例将具体接线方式表示于图1·5。

这里，1，5，8点没有与任何东西联接，下面称未联接点为NC。

在图1·4中,我们假定OP Amp满足（1·3）式，所以在R_i，R_f的连接点P与OP Amp的输入端之间没有电流流过。这意味着Ri中流过的电流，必须全部流过R，即:

$$I_i=I_f \quad (1\cdot5)$$

由图，有下列关系:

$$V_i-V_{in}^{-}=I_iR_i \quad (1\cdot6)$$

$$V_{in}^{-}-V_0=I_fR_f \quad (1\cdot7)$$

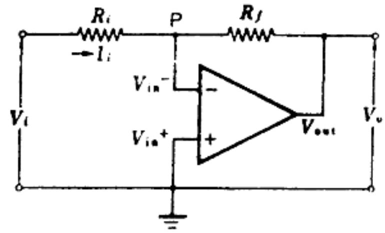


图 1・4 反相放大器

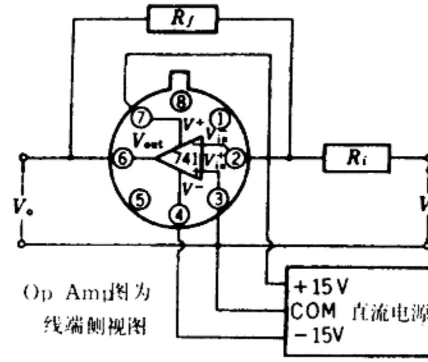


图 1・5 反相放大器的具体接线图

$$V_o = V_{out}, \quad V_{in}^+ = O \qquad (1 \cdot 8)$$

由（1・1），（1・8）式，得：

$$V_{in}^- = -\frac{V_o}{A} \qquad (1 \cdot 9)$$

由（1・6），（1・7），（1・9）式，得：

$$I_i = \frac{1}{R_i}\left(V_i + \frac{V_o}{A}\right) \qquad (1 \cdot 10)$$

$$I_f = \frac{1}{R_f}\left(-\frac{V_o}{A} - V_o\right) \qquad (1 \cdot 11)$$

由（1・5），（1・10），（1・11）式中消去 I_i，I_f，并经整理，而得：

$$\left.\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= -\frac{K_i}{1+(1+K_i)/A} \\ \text{上式中：}\quad K_i &= R_f / R_i \end{aligned}\right\} \qquad (1 \cdot 12)$$

当（1・4）式成立时，（1・12）将简化如下式：

$$\frac{V_o}{V_i} = -K_i = -\frac{R_f}{R_i} \qquad (1 \cdot 13)$$

（1・13）式表示这构成了一个输出输入相位相反、电压增益可以以 R_f / R_i 表示的反相放大器。（1・13）式的推导过程，可以改成下面这种说法：A→∞时，由（1・9）式 $V_{in}^- = O$，即P点的电位是接地的。由此也可以称P点为假想接地点。另一方面，在瞬间，V_{out} 被调节使 R_i 中流过的电流，按（1・5）式完全流过 R_f 而平衡。因而，在同时考虑到P点为假想接地点的情况下，就可以得出图1・6表示的平衡图。如果将图比喻成一个撬板，P点就相当于撬板的支点，V_i，V_o 就相当于人的位移，而 R_i，R_f 就相当于人与支点间的距离。

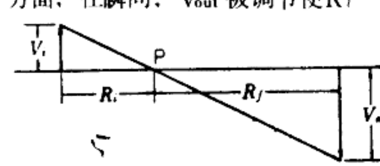


图 1・6 反相放大器的平衡图

1・2・2 同相放大器

如将2个电阻 R_1，R_2 和一个OP Amp接成图1・7那样，就构成一个同相放大器。理由简要说明如下：

V_{in}^- 是将 V_o（= Vout）以电阻 R_1、R_2 分压的值。并且，当A→∞时 $V_i = V_{in}^+ = V_{in}^-$，所以

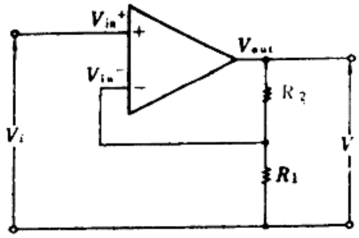
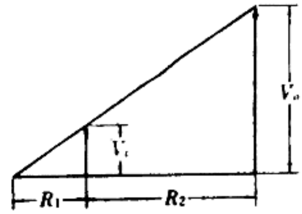


图1·7同相放大器



1·8同相放大器的平衡图

$$V_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 \qquad (1\cdot14)$$

由（1·14）式，得：

$$\frac{V_0}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (1\cdot15)$$

（1·15）式意味着，这得到了一个电压增益为 $1 + R_2$ 的同相放大器。从而，就得到了如图1·8的同相放大器的平衡图。当然，在同相放大器中反极输入端不能是假想接地点。

下面，求A ≠ ∞ 时的同相放大器的电压增益V_0／V_i。

由图1·7得：

$$V_{in}^{+} = V_i \qquad (1\cdot16)$$

$$\left.\begin{aligned} & V_{in}^{-} = \frac{V_0}{K_n} \\ & \text{式中}\ K_n = 1 + R_2/R_1 \end{aligned}\right\} \qquad (1\cdot17)$$

将（1·16）式及（1·17）式代入（1·1）式，并令$V_{out} = V_0$，则得：

$$V_0 = A\left(V_i - \frac{V_0}{K_n}\right) \qquad (1\cdot18)$$

由（1·18）式，得：

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{K_n}{1 + K_n/A} \qquad (1\cdot19)$$

令（1·19）式中的A→∞，就得V_0／V_i = K_n，这和（1·15）式是一致的。

1·3加减法器

如图1·9，将几个阻抗Z_1，Z_2，…Z_n与一个阻抗Z_f（Z_1，Z_2，…，Z_n，Z_f称运算阻抗）连接在一个OP Amp上各点电位如图所示。上述的反相放大器以及同相放大器中运算放大器都是使用纯电阻作运算阻抗，而图1·9中的运算阻抗却是用电容或电抗、电阻串联或并联而成。令图中流过Z_1，Z_2，Z_3…Z_n中的电流分别为I_1，I_2，I_3…I_n，令流过Z_f的电流为I_f，则得到下式关系。

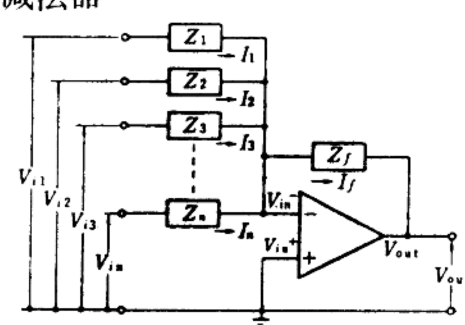


图1·9 一般运算电路

$$I_1+I_2+I_3+\cdots\cdots+I_n=I_f \tag{1·20}$$

$$I_1=\frac{V_{i1}-V_{in}^-}{Z_1},\ I_2=\frac{V_{i2}-V_{in}^-}{Z_2},\ I_3=\frac{V_{i3}-V_{in}^-}{Z_3},\ \cdots,\ I_n=\frac{V_{in}-V_{in}^-}{Z_n} \tag{1·21}$$

$$I_f=\frac{V_{in}^- -V_o}{Z_f} \tag{1·22}$$

将（1·21），（1·22）式代入（1·20）并经整理，得：

$$V_o=-\left(\frac{Z_f}{Z_1}V_{i1}+\frac{Z_f}{Z_2}V_{i2}+\frac{Z_f}{Z_3}V_{i3}+\cdots\cdots+\frac{Z_f}{Z_n}V_{in}\right)$$
$$+\left(1+\frac{Z_f}{Z_1}+\frac{Z_f}{Z_2}+\cdots\cdots+\frac{Z_f}{Z_n}\right)V_{in}^- \tag{1·23}$$

上式中，$V_{in}^+=0$，所以（1·9）式成立，亦即$V_{in}^-=-V_o/A$，将其代入（1·23）式，得

$$V_o=-\frac{\frac{Z_f}{Z_1}V_{i1}+\frac{Z_f}{Z_2}V_{i2}+\frac{Z_f}{Z_3}V_{i3}+\cdots\cdots+\frac{Z_f}{Z_n}V_{in}}{1+\left(1+\frac{Z_f}{Z_1}+\frac{Z_f}{Z_2}+\frac{Z_f}{Z_3}+\cdots\cdots\frac{Z_f}{Z_n}\right)/A} \tag{1·24}$$

例如，如同上式中$Z_1=R_i$，$Z_2=Z_3=\cdots\cdots=Z_n=\infty$，$Z_f=R_f$，就和反相放大器的（1·12）式一致

如同（1·24）式，$A\to\infty$，则得：

$$V_o=-\left(\frac{Z_f}{Z_1}V_{i1}+\frac{Z_f}{Z_2}V_{i2}+\frac{Z_f}{Z_3}V_{i3}+\cdots\cdots+\frac{Z_f}{Z_n}V_{in}\right) \tag{1·25}$$

（1·25）式表示，如果对运算阻抗Z_1、Z_2……Z_n以及Z_f作种种不同选择就能进行各种运算

1·3·1 加法器

如同（1·25）式中$Z_1=R_1$，$Z_2=R_2$，……，$Z_n=R_n$且$Z_f=R_f$，则：

$$V_o=-\left(\frac{R_f}{R_1}V_{i1}+\frac{R_f}{R_2}V_{i2}+\frac{R_f}{R_3}V_{i3}+\cdots\cdots+\frac{R_f}{R_n}V_{in}\right) \tag{1·26}$$

也就是，对输入电压V_{i1}、V_{i2}、V_{i3}、…V_{in}各分别乘以R_f/R_1、R_f/R_2、R_f/R_3、……、R_f/R_n再相加，并使符号相反，就得到输出电压 这称为加法器 加法器的电路表示于图1·10·

组成加法器时必须注意的是，应将高电压增益的输入数降到最小限度 当未连接的高电压增益输入端开路时，有引起感应噪音的危险 并且当为了避免噪音感应而将输入端接地时，用于加法器的OP Amp自身的零漂移以及噪音会被大为放大而表现在输出上 可以说，在设计模拟运算电路时，总是要尽量省掉那些不必要的机能，以便设计出可靠的、动作稳定的电路

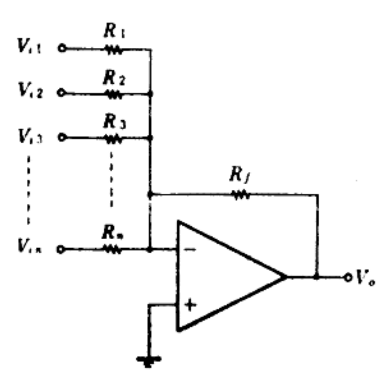


图1·10 加法器电路

1·3·2、加减法器

图1、11是将2组加法器组合起来得到的加减法器的电路图·图中的V_{io}利用（1·26）式，表示为：

$$V_{io} = -\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1}v_{i1} + \frac{\gamma_0}{\gamma_2}v_{i2} + \frac{\gamma_0}{\gamma_3}v_{i3} + \cdots\cdots + \frac{\gamma_0}{\gamma_m}v_{im}\right) \qquad (1·27)$$

而V_o则为：

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{\gamma_0}V_{io} + \frac{R_f}{R_1}V_{i1} + \frac{R_f}{R_2}V_{i2} + \cdots\cdots + \frac{R_f}{R_n}V_{in}\right) \qquad (1·28)$$

将（1·27）式代入（1·28）式得到下式：

$$V_o = \left(\frac{R_f}{\gamma_1}v_{i1} + \frac{R_f}{\gamma_2}v_{i2} + \frac{R_f}{\gamma_3}v_{i3} + \cdots\cdots + \frac{R_f}{\gamma_m}v_{im}\right)$$

$$-\left(\frac{R_f}{R_1}V_{i1} + \frac{R_f}{R_2}V_{i2} + \frac{R_f}{R_3}V_{i3} + \cdots\cdots + \frac{R_f}{R_n}V_{in}\right) \qquad (1·29)$$

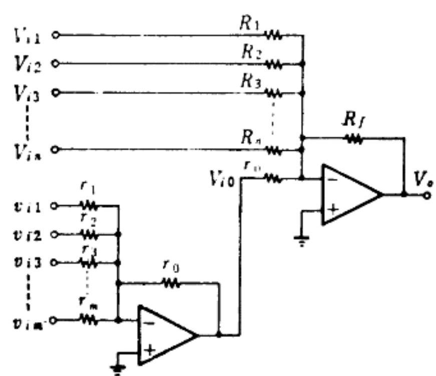


图1·11加减法器电路，

（1·29）式表明可以进行v_{i1}、v_{i2}、v_{i3}…v_{im}及V_{i1}、V_{i2}、V_{i3}、……、V_{in}与$\frac{R_f}{\gamma_m}$、$\frac{R_f}{R_n}$的乘积之间的加减运算

1·4 微分器 积分器

1·4·1 积分器，加法积分器

图1·12为积分器电路 令（1·25）式中的$Z_1=R$，$Z_2=Z_3=\cdots\cdots Z_n=\infty$，$Z_f=1/j\omega C$，即得输出为：

$$V_o = -\frac{1}{j\omega RC}V_i \qquad (1·30)$$

$j\omega$是分母就表示积分 就是将输入电压V_i积分并令相位反转的就是输出V_o。

下面从另一角度说明一下积分器的动作原理 图1·12的反相输入端为假想接地点，从而流过电阻R的电流I为

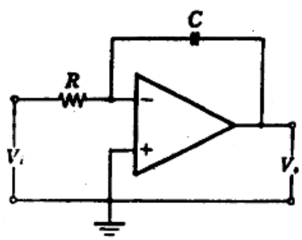


图1·12积分器电路

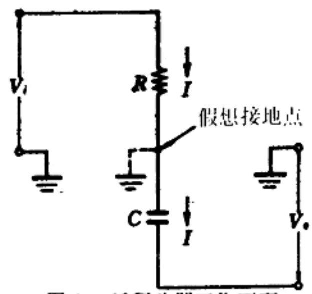


图1·13积分器工作原理

$$I=V_i/R \tag{1·31}$$

调节OP Amp输入电压以使在电容C上在任何瞬间有同样的电流I流过，就可以与图1·13的电路等效。从而有：

$$V_o=-\frac{1}{C}\int Idt \tag{1·32}$$

将（1·31）式代入（1·32）式，得

$$V_o=-\frac{1}{RC}\int V_i dt \tag{1·33}$$

（1·33）式表示将输入电压积分，乘以RC的倒数，再使符号相反，就会求得输出电压V_o·也就是进行积分运算。

将积RC称为积分时间常数。令此常数为T，将一个输入常值电压在t时间内进行积分，得：

$$\left.\begin{aligned}&V_o=-\frac{1}{T}\int_0^t V_{ic}dt=-\frac{t}{T}V_{ic}\\&\text{式中}\quad T=RC\end{aligned}\right\} \tag{1·34}$$

由（1·34）式得：

$$\frac{V_o}{V_{ic}}=-\frac{t}{T} \tag{1·35}$$

由（1·35）式测定积分时间常数时，须先将积分器清零、（将积分电容两端以低电阻加以短路，除去电容器的充电即可清零），然后在输入端上加一恒定电压V_c，当输出端电压V_o达到$-V_{ic}$时测定此时间即为积分时间常数。

下面，先讲一下使用OP Amp的积分电路与图1·14所表示的简易RC积分电路的区别。第一个区别是，图1·14的电路中输出电压V_o受下一级输入阻抗以及输入电流的影响，而OPAmp积分电路的输出电压不受下级的影响。

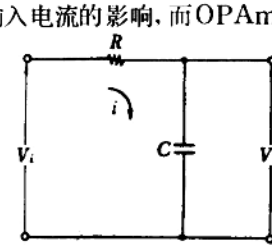


图1·14 RC积分电路

第二点区别是图1·14的电路所能进行积分动作的输出电压只是一个与输入电压相比可以忽视的小范围，而应用OP Amp的积电路，则是只要输出电压与输入电压在OP Amp能力以内就能与输出入电压无关地进行积分动作。

其原因在于，在图1·14中，如令流过电阻及电容的电流为i，则：

$$V_i = V_o + Ri \tag{1.36}$$

$$V_o = \frac{1}{C}\int i\,dt \tag{1.37}$$

由（1·36），（1·37）式消去i，并令RC＝T，则得：

$$V_o = \frac{1}{T}\int V_i dt - \frac{1}{T}\int V_o dt \tag{1.38}$$

（1·38）式的第一项表示输入电压的积分，但是由于第二项的作用，输出电压V_o偏离V_i的积分值。这称作V_o为V_i的不完全积分。对使用OP Amp的积分电路与RC积分电路分别施加一输入电压V_i时，其输入电压如图1·15所示。另外，当V_o较小时（1·38）式的第二项可以忽略，而接近完全积分动作，这是很明显的。

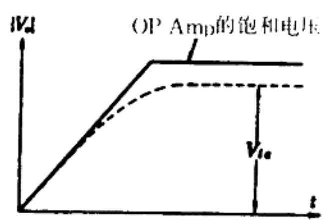


图1·15积分器与RC积分电路的差别

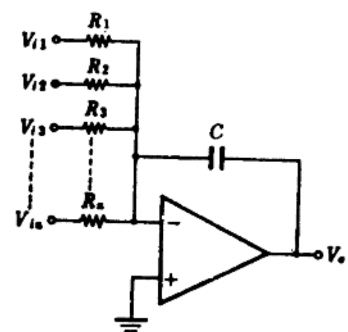


图1·16加法积分器

只要将图1·9中的输入端的运算阻抗换成强电阻R_1. R_2. R_3. …，Rn，并且把反馈的运算阻抗换成电容C，即可得到加法积分器。加法积分器的电路表示于图1·16。令（1·25）式的$Z_1=R_1$. $Z_2=R_2$. $Z_3=R_3$. ……，$Z_n=R_n$. $Z_f=1/j\omega C$. 即可得图1·16的运算公式：

$$V_o = -\left(\frac{1}{j\omega R_1C}V_{i1} + \frac{1}{j\omega R_2C}V_{i2} + \frac{1}{j\omega R_3C}V_{i3} + \cdots\cdots + \frac{1}{j\omega R_nC}V_{in}\right) \tag{1·39}$$

$1/j\omega$就意味着积分，所以（1·39）式可以变形为下式：

$$\left.\begin{aligned}&V_o = -\left(\frac{1}{T_1}\int V_{i1}dt + \frac{1}{T_2}\int V_{i2}dt + \frac{1}{T_3}\int V_{i3}dt + \cdots + \frac{1}{T_n}\int V_{in}dt\right)\\&\text{式中}T_1=R_1C.\ T_2=R_2C.\ T_3=R_3C.\ \cdots,\ T_n=R_nC\end{aligned}\right\} \tag{1·40}$$

1·4·2 微分器 加法微分器

图1·17为使用OP Amp的微分电路。只要令（1·25）式中的$Z_1=1/j\omega C$. $Z_2=Z_3=\cdots\cdots Z_n=\infty$、$R_f=R$，即可得到这时的运算公式，即：

$$V_o = -j\omega RC \tag{1·41}$$

上式中，乘以$j\omega$就意味着微分，所以可将（1·41）式写成：