

# 模 拟 电 子 技 术 基 础

## 综 合 论 文

(2020 - 2021 学年度      春季学期)

关于对数运算电路特性及改进方案的深入研究

姓名	刘祖炎
学号	2019010485
院系	自动化系
教师	叶朝辉
时间	2021 年 6 月

## 摘要

本文从书中所述二极管、晶体管基本运算电路的原理出发，研究了其动态范围、温漂等相关性质以及在实际应用中存在的缺陷，提出了温度补偿、安全保护等措施改善缺陷并提升其稳定性，最终实现了可在  $10^8$  动态范围内工作的实用对数运算电路并完成了其参数调节工作。最后，对集成对数运算芯片 LOG114 的特性进行验证并与此前的分析进行比较。本文对课堂讲述的对数运算电路进行了较为深入的研究，通过完整的对比实验，补充了现有相关公开资料在实测数据、参数选取方面的部分空白。

**关键词：**对数运算电路；温度补偿；LOG114

# 目录

<b>1</b>	<b>引言</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>基于二极管的基本对数运算电路</b>	<b>3</b>
2.1	理论分析 . . . . .	3
2.2	仿真结果 . . . . .	4
<b>3</b>	<b>基于晶体管的基本对数运算电路</b>	<b>6</b>
3.1	理论分析 . . . . .	6
3.2	仿真结果 . . . . .	7
<b>4</b>	<b>引入温度补偿的对数运算电路</b>	<b>9</b>
4.1	理论分析 . . . . .	9
4.2	仿真结果 . . . . .	10
<b>5</b>	<b>引入安全保护措施的对数运算电路</b>	<b>12</b>
5.1	理论分析 . . . . .	12
5.2	仿真结果 . . . . .	13
<b>6</b>	<b>实用对数运算电路</b>	<b>16</b>
6.1	理论分析 . . . . .	16
6.2	仿真结果 . . . . .	17
<b>7</b>	<b>实际对数放大器 LOG114</b>	<b>19</b>
7.1	理论分析 . . . . .	19
7.2	仿真结果 . . . . .	20
<b>8</b>	<b>总结</b>	<b>21</b>

# 1 引言

对数运算电路利用 PN 结伏安特性的指数规律，将二极管或晶体管分别接入集成运放的反馈回路和输入回路，可使输入电压与输出电压之间呈现对数关系，是一种非线性函数运算电路。<sup>1</sup>利用对数运算电路、指数运算电路与加减运算电路相组合，即可实现乘法、除法、乘方、开方等多种必要的数学运算。除能够进行必要、精确的数学运算外，其可以在输入发生大幅度变化的情况下，对输出电压的动态范围进行有效抑制。作为实现基本运算关系的电路结构之一，对数运算电路广泛应用于包括通信、电子测量设备、各类放大器等多种模拟器件中。<sup>2</sup>

然而，一方面，在模拟电子技术基础的课堂讲述中，老师仅细致分析了利用二极管、晶体管实现的基本对数运算电路，对实用对数运算电路并未过多提及，在课本中与对数运算电路相关的讲述相比于其他运算电路也相对较少。<sup>3</sup>另一方面，笔者在网络上查阅资料时发现，能够查阅到的公开资料基本仅涉及对数运算电路的基本原理，少部分资料提出了实用对数运算电路的电路图却缺乏部分参数的设定，鲜有资料及文献对之进行较为完善的分析，这对需要应用对数运算电路于实际电路的研究者而言较为不利。

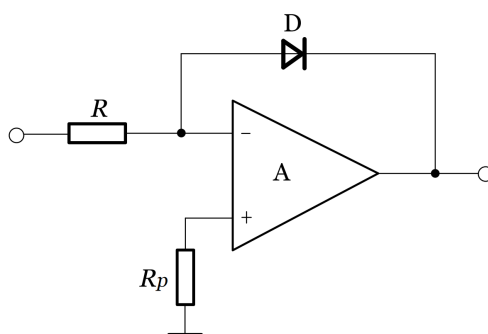
因此，基于上述现状，笔者在本文中对相关电路进行了较为详尽的分析。探究了基于二极管、晶体管的对数运算电路的参数选取、动态范围、温漂等内容，而后尝试引入温度补偿、安全保护措施对电路在面对环境温度变化以及宽输入电压变化时的缺陷进行改善。此后，笔者将各种改善方式进行融合，并加以滑动变阻器调节实现实用对数运算电路，最后对实际对数运算芯片 LOG114 的特性进行验证。笔者基于大量仿真结果，对相关数据及波形进行验证、说明及补充，并完成了各电路参数选取及调节的内容，有效填补了当前互联网资料在对数运算电路方面的空白。

## 2 基于二极管的基本对数运算电路

### 2.1 理论分析

根据《模拟电子技术基础》第五版<sup>4</sup>，二极管对数运算电路如图1所示。

图 1: 二极管对数运算电路原理图



该对数运算电路利用了 PN 结的伏安特性，对上述电路进行理论分析，为使二极管导通，输入电压  $u_I$  应大于 0。根据二极管基础知识可知，流过二极管的电流  $i_D$  与其端电压  $u_D$  的关系满足：

<sup>1</sup>童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 (第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.

<sup>2</sup>杨祥伦. 对数运算电路基本特性的分析和应用实例 [J]. 自动化技术与应用, 1983(03):95-101.

<sup>3</sup>模拟电子技术基础课件第 10 周

<sup>4</sup>童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 (第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. p289

$$i_D = I_S(e^{\frac{q u_D}{kT}} - 1) \approx I_S(e^{\frac{q u_D}{kT}})$$

式中,  $I_S$  表示二极管 PN 结反向饱和电流,  $q = 1.602 \times 10^{-19} C$  为电子电量,  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为当前的开尔文温度。  $u_T = kT/q$  为温度电压当量, 当室温下 ( $27^\circ$ ),  $u_T \approx 25.84 mV$ 。

根据上式可解得:

$$u_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{i_D}{I_S}$$

由于  $u_P = u_N = 0$  为虚地点, 故:

$$i_D = i_R = \frac{u_I}{R}$$

从而可解得输出电压:

$$u_o = -\frac{kT}{q} \ln \frac{u_i}{I_S R} \quad (1)$$

由于在同一条件下,  $I_S$ 、 $R$ 、 $u_T$  为定值, 故可见输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  满足对数关系式。

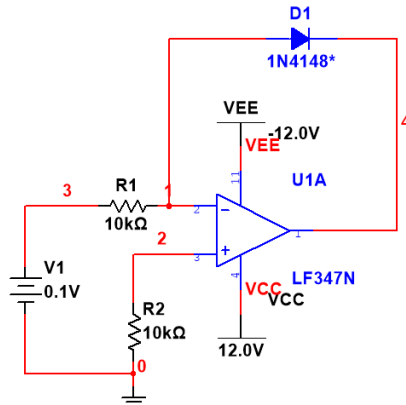
根据式1可知, 该运算式与温度  $T$ 、二极管反向饱和电流  $I_S$  有关, 受温度影响较大。此外, 根据半导体知识可知, 当电流较小时, 二极管内部载流子复合运动不可忽略; 当电流较大时, 二极管内阻不可忽略, 从而导致对数关系式仅在一定范围内成立。

定义当  $u_i$  变化时, 输出满足对数关系的  $u_i$  范围为该电路的动态范围, 由于动态范围和温度影响较难通过理论分析, 故下文中通过仿真结果对其进行探究。

## 2.2 仿真结果

在 Multisim 软件中搭建仿真电路如图2所示。

图 2: 二极管对数运算电路仿真电路图



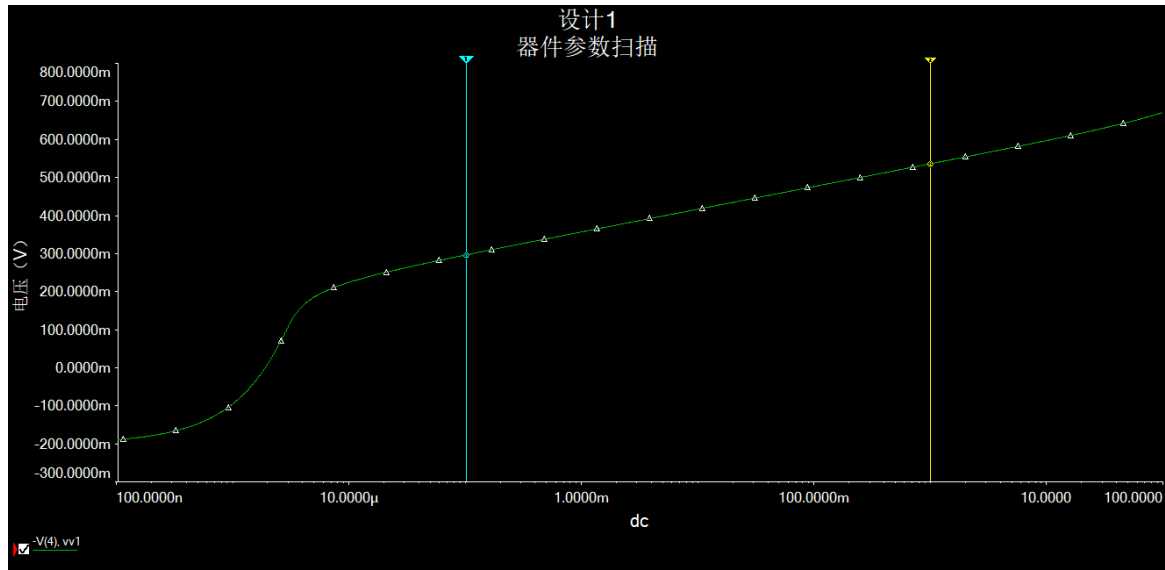
根据式1, 此时电路取值  $R = 10k\Omega$ , 根据 Multisim 中元件设置,  $I_S = 1 \times 10^{-13} A$ , 因此输入、输出满足理论关系式:

$$u_o = -25.84 \times 10^{-3} \times \ln \frac{u_i}{10^{-9}} \quad (2)$$

为方便起见，分析中均采用输出电压  $u_o$  的相反数进行分析。

利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电压  $u_i$ ，观察输出电压的变化情况如图3所示。

图 3: 二极管对数运算电路参数扫描结果



进行观察与测量，电路大致在  $100\mu V \sim 1V$  范围内满足对数关系式 (曲线呈一条直线)，当  $u_i < 100\mu V$  时，曲线有较为明显的下降，这可能与二极管自身特性相关；当  $u_i > 10V$  时，曲线有一定的抬升，这可能与二极管自身电阻相关，与理论分析相符。定量测量结果如表1所示，其中理论值根据式2计算得出。

表 1: 二极管对数运算电路动态范围测量

输入电压 $u_i$	$1\mu V$	$10\mu V$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$	$10V$	$100V$
理论值 / $mV$	178.50	237.99	297.49	356.99	416.49	475.99	535.48	594.99	654.45
测量值 / $mV$	-92.60	225.14	296.54	356.66	416.86	476.44	536.14	597.12	671.08
相对误差	151.88%	5.40%	0.32%	0.09%	0.09%	0.09%	0.12%	0.36%	2.54%

以 1% 作为对数运算电路的运算误差允许范围，则电路的工作范围为  $100\mu V \sim 1V$ ，动态范围为  $10^4V$ ，共 4 个数量级，与定性分析相同。在电路的工作范围内，输出电压的变化范围为  $240mV$ 。

取动态范围的中间值  $u_i = 100mV$ ，改变二极管的工作环境，探究温度变化对二极管对数运算电路的影响，仿真结果如表2、3所示。其中，相对误差与表1进行比较，此时工作温度为  $27^\circ C = 300K$ 。

表 2: 温度对二极管对数运算电路的影响

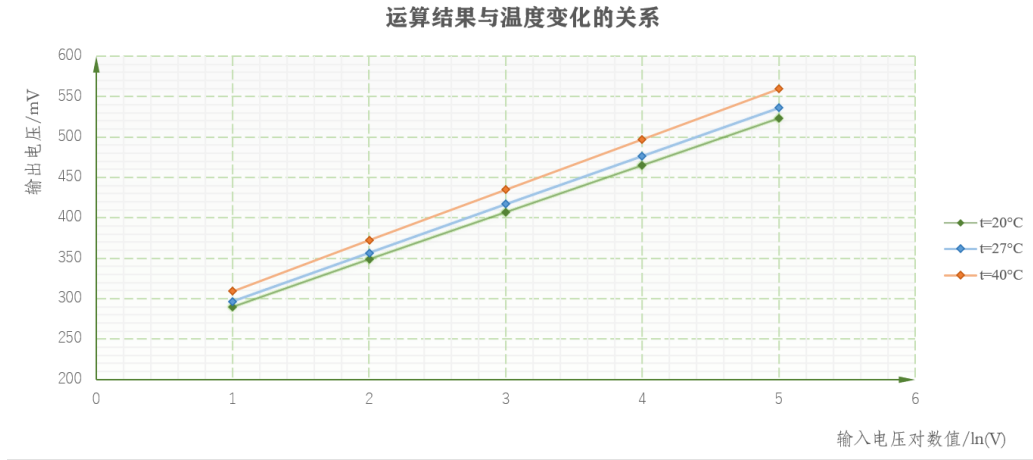
工作温度 / $^\circ C$	0	10	20	27(标准值)	30	40	50
测量值 / $mV$	433.59	449.46	465.33	476.44	481.21	497.08	512.95
相对误差	8.99%	5.66%	2.33%	0.00%	1.00%	4.33%	7.66%

表 3: 不同温度时输出值测量结果

输入电压 $u_i$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$
$t = 20^\circ C/mV$	289.64	348.86	407.14	465.33	523.64
$t = 27^\circ C/mV$	296.54	356.66	416.86	476.44	536.14
$t = 40^\circ C/mV$	309.35	372.65	434.92	497.08	559.36

根据表2可知，当电路工作温度产生极小扰动时，(大约为  $3^\circ C$ )，输出值即不满足运算误差允许范围，电路受温度影响极大，该电路无法用于实际对数运算。将表3测量结果进行可视化，以直观展示温度对测量结果的影响，结果如图4所示。

图 4: 二极管对数运算电路运算结果与温度的关系



根据图4，随着温度升高，对数运算电路的运算值明显增大，这主要与  $u_T = kT/q$  中  $T$  的增大有关，对数运算电路的斜率略有增高。

### 3 基于晶体管的基本对数运算电路

#### 3.1 理论分析

根据《模拟电子技术基础》第五版<sup>5</sup>，三极管对数运算电路如图5所示。

对电路进行理论分析，由于三极管集电极虚地，故集电极电压不变，且三极管基极接地，故输出电压即为发射极电压。根据三极管中 PN 结满足的关系式可知：

$$i_C = \alpha i_E = \alpha I_{SE} e^{\frac{q}{kT} U_{BE}}$$

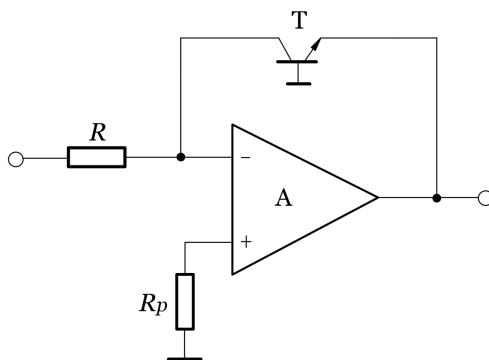
根据上式可解得：

$$U_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{i_C}{\alpha I_{SE}}$$

由于  $u_P = u_N = 0$  为虚地点，故：

<sup>5</sup>童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 (第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. p290

图 5: 三极管对数运算电路原理图



$$i_C = i_R = \frac{u_I}{R}$$

从而可解得输出电压：

$$u_o = -U_{BE} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{u_i}{\alpha I_S R} \quad (3)$$

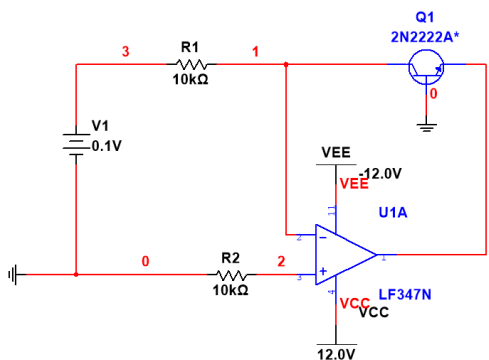
由于在同一条件下， $I_{SE}$ 、 $R$ 、 $u_T$ 、共基放大系数  $\alpha = \beta/(\beta + 1)$  为定值，故可见输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  满足对数关系式。

与二极管对数运算电路相似，该运算式与温度  $T$ 、晶体管 BE 端反向饱和电流  $I_S$  相关，受温度影响较大。相比于二极管，三极管的发射极体电阻远小于二极管导通电阻，因而在电压较大时，由体电阻引起的误差更小，动态范围相比于二极管对数运算电路更大。下通过仿真对其特性进行分析。

### 3.2 仿真结果

在 Multisim 软件中搭建仿真电路如图6所示。

图 6: 三极管对数运算电路仿真电路图



根据式3，此时电路取值  $R = 10k\Omega$ ，根据 Multisim 中元件设置， $I_S = 3.0611 \times 10^{-14} A$ ， $\beta = 220$ 。因此输入、输出满足理论关系式：

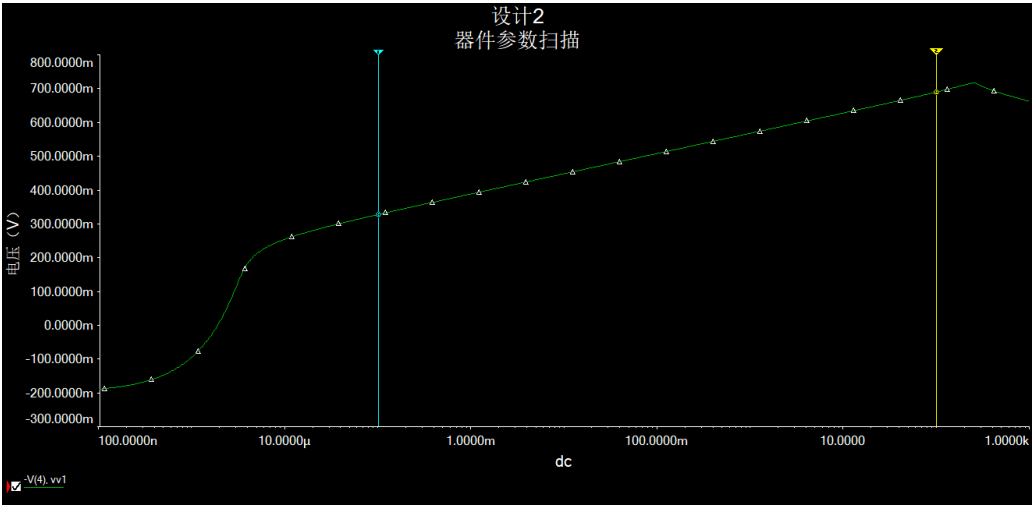
$$u_o = -25.84 \times 10^{-3} \ln \frac{u_i}{3.0472 \times 10^{-10}} \quad (4)$$



为方便起见，分析中均采用输出电压  $u_o$  的相反数进行分析。

利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电压  $u_i$ ，观察输出电压的变化情况如图7所示。

图 7: 三极管对数运算电路参数扫描结果



进行观察与测量，电路大致在  $100\mu V \sim 100V$  范围内满足对数关系式 (曲线呈一条直线)。当  $u_i < 100\mu V$  时不符合对数关系的原因与二极管相同；当  $u_i$  较大时其运算准确度相比于二极管更佳，表明体电阻对运算精度的影响更小。定量测量结果如表4所示，其中理论值根据式4计算得出。

表 4: 三极管对数运算电路动态范围测量

输入电压 $u_i$	$1\mu V$	$10\mu V$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$	$10V$	$100V$	$1kV$
理论值 /mV	209.20	268.70	328.20	387.70	447.20	506.70	566.20	625.70	685.19	744.69
测量值 /mV	-92.54	255.09	327.79	388.65	448.46	508.16	567.87	627.80	689.93	662.55
相对误差	144.23%	5.07%	1.25%	0.25%	0.28%	0.29%	0.29%	0.34%	0.69%	11.03%

以 1% 作为对数运算电路的运算误差允许范围，则电路的工作范围为  $100\mu V \sim 100V$ ，动态范围为  $10^6V$ ，共 6 个数量级，与定性分析相同。在电路的工作范围内，输出电压的变化范围为  $362mV$ 。相比于二极管对数运算电路，由于大电压部分的计算准确性更好，三极管对数运算电路明显有更大的动态范围。

取动态范围的中间值  $u_i = 100mV$ ，改变三极管的工作环境，探究温度变化对三极管对数运算电路的影响，仿真结果如表5、6所示。

表 5: 温度对三极管对数运算电路的影响

工作温度 / $^{\circ}C$	0	10	20	27(标准值)	30	40	50
测量值 /mV	462.41	479.35	496.30	508.16	513.24	530.19	547.14
相对误差	9.00%	5.67%	2.33%	0.00%	1.00%	4.34%	7.67%

表 6: 不同温度时输出值测量结果

输入电压 $u_i$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$	$10V$	$100V$
$t = 20^\circ C/mV$	320.16	379.58	437.99	496.30	554.61	613.15	673.88
$t = 27^\circ C/mV$	327.79	388.65	448.46	508.16	567.87	627.80	689.93
$t = 40^\circ C/mV$	341.97	405.49	467.90	530.19	592.49	655.01	719.75

与二极管对数运算电路的测量结果进行对比可知，三极管对数运算电路几乎以相同程度受到温度影响，温度变化对输出电压产生的相对误差与二极管对数运算电路几乎相同。当电路工作温度产生极小扰动时，(大约为  $3^\circ C$ )，输出值即不满足运算误差允许范围，电路受温度影响极大，该电路无法用于实际对数运算。

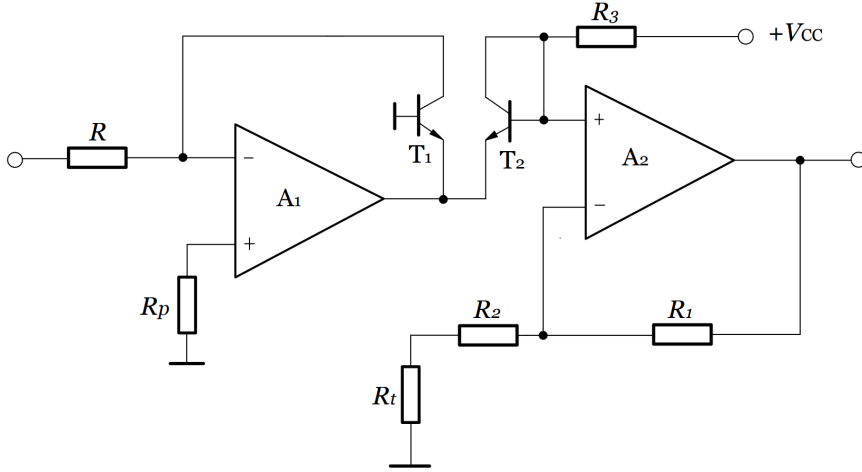
温度变化对测量结果的影响趋势与二极管对数运算电路相同。

## 4 引入温度补偿的对数运算电路

### 4.1 理论分析

为使电路能够在实际环境中正常工作，需减小温度对对数运算结果的影响。因此，在基本三极管对数运算电路的基础上引入温度补偿，设计电路图如图8所示。

图 8: 引入温度补偿的对数运算电路原理图



根据式3可知，要减小温度的影响，需要尽可能消去计算式中的  $I_S$ 、 $T$  两项与温度相关的量。因此，可根据差分放大电路的基本原理，利用相互对称、特性相同的两只晶体管进行补偿，消去  $I_S$  对运算关系的影响；利用热敏电阻  $R_t$  改变运放  $A_2$  的放大倍数，以补偿温度变化对  $u_T$  的影响。最终，尽可能消去  $I_S$ 、 $T$ ，从而使输出电压与输入电压的关系式与温度无关。

下进行理论分析：

与晶体管对数运算电路同理，对节点  $N_1$  列写电流方程，有：

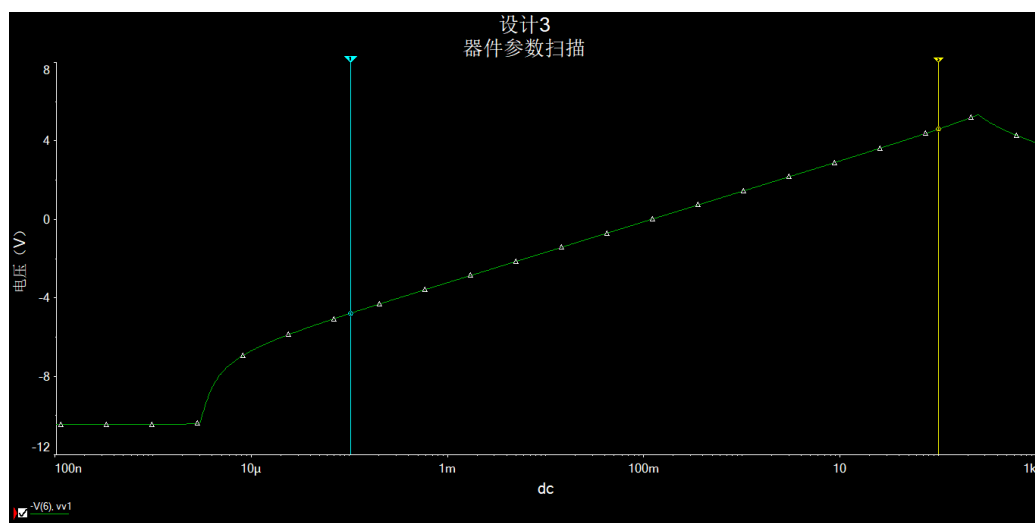
$$i_{C1} = i_1 = \frac{u_i}{R} = \alpha I_S e^{\frac{q}{kT} U_{BE1}}$$



为方便起见，分析中均采用输出电压  $u_o$  的相反数进行分析。

利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电压  $u_i$ ，观察输出电压的变化情况如图10所示。

图 10: 引入温度补偿的对数运算电路参数扫描结果



进行观察与测量，电路的曲线与基本三极管对数运算电路略有差异，其动态范围相似，均大致在  $100\mu V \sim 100V$  范围内满足对数关系式（曲线呈一条直线）。定量测量结果如表7所示，由于计算较为复杂，故此处不提供理论值进行比较。

表 7: 引入温度补偿的对数运算电路动态范围测量

输入电压 $u_i$	$1\mu V$	$10\mu V$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$	$10V$	$100V$	$1kV$
测量值 /V	-10.460	-6.684	-4.797	-3.219	-1.668	-0.119	1.430	2.984	4.596	3.885
增量 $\Delta/V$	—	3.776	1.887	1.578	1.551	1.549	1.549	1.554	1.612	-0.711

根据定量测量结果及其增量计算结果，可知其工作范围为  $100\mu V \sim 100V$ ，动态范围大约为  $10^6V$ ，共 6 个数量级。在电路的工作范围内，输出电压的变化范围为  $9.393V$ ，远大于二极管、三极管基本对数运算电路。这得益于运放  $A_2$  的存在，在运算式中提供系数  $(1 + R_1/(R_2 + R_t))$ ，起到了放大对数运算结果的作用。通过调节  $R_1$ 、 $R_2 + R_t$  的比例关系，可对输出电压的变化范围进行调节。

假设此处电阻为金属电阻，其阻值与温度的关系满足：

$$R_{t2} = R_{t1}[1 + a(t_2 - t_1)]$$

其中， $a$  表示金属电阻的温度系数，根据理论分析得热敏电阻应满足的条件，设置温度系数为：

$$a = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt} = \frac{1}{R_t} \frac{R_2 + R_t}{T} = \frac{1}{200} \frac{400}{300} = \frac{1}{150}$$

实际情况下，可根据现有热敏电阻的温度系数，选取适当的  $R_2$  阻值，使得其满足关系式。

设置输入电压  $u_i = 1V$ ，改变电路的工作环境，测量不同温度下输出电压的值，仿真结果如表8所示。

表 8: 温度对温度补偿对数运算电路的影响

工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	27(标准值)	30	40	50	60	70
测量值 /V	1.425	1.427	1.428	1.430	1.430	1.432	1.434	1.435	1.437
相对差值 /V	0.005	0.003	0.002	0.000	0.000	0.002	0.004	0.005	0.007
相对误差	0.35%	0.21%	0.14%	0.00%	0.00%	0.14%	0.28%	0.35%	0.49%

根据测量结果可见, 该电路对温度具有极高的鲁棒性, 在  $0^{\circ} \sim 70^{\circ}$  范围内均可保持 1% 内的运算精度, 引入的温度补偿有效。

需要注意的是, 在实际应用中, 由于运放的工作状态也将受到温度的影响, 因此在对运算结果要求较高的情形下, 需要尽量使用输入偏置电流和温漂较小的精密运放以减小电路的运算误差。

## 5 引入安全保护措施的对数运算电路

### 5.1 理论分析

考虑三极管组成的对数运算电路, 除受温度影响较大外, 该电路还具有另外两点缺陷。

一方面, 该电路满足自激振荡的条件:

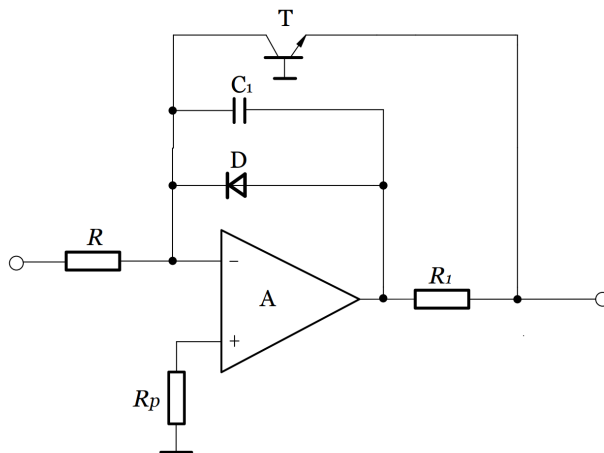
$$|\dot{A}\dot{F}| > 1$$

电路在某些频率  $f_0$  下可能会产生自激振荡, 使电路工作于不稳定状态, 无法正常进行对数运算。

另一方面, 电路要求输入电压  $u_i > 0$ , 若输入电压因信号波动而产生负电压, 则可能造成输出电压击穿三极管的发射结。

考虑到以上两点, 需要对三极管组成的对数运算电路引入一定的保护措施, 设计电路图如图11所示。

图 11: 引入安全保护措施的对数运算电路原理图

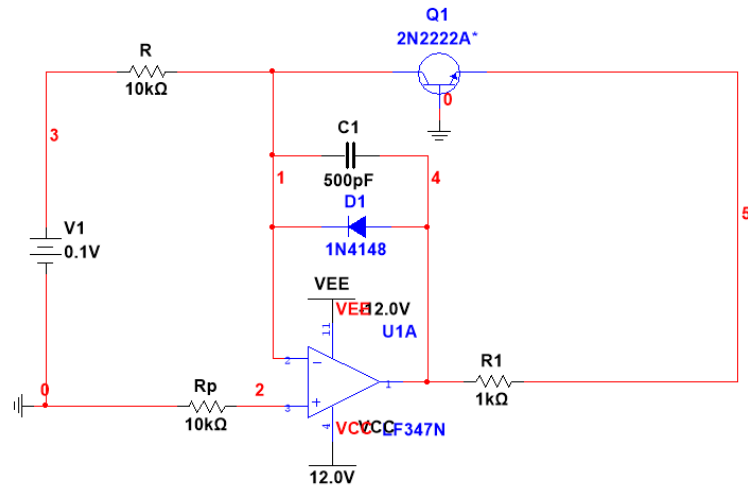


为消除电路可能存在的自激振荡, 采用密勒效应的补偿方法, 将补偿电容跨接在放大电路的输入端和输出端, 从而破坏满足自激振荡的条件, 使电路工作稳定。考虑电路输入负电压时, 为电路提供放电通路, 此时二极管导通, 电路可通过  $u_i - R - D - R_f$  进行放电, 从而对输出电压起到钳位作用。

## 5.2 仿真结果

在 Multisim 软件中搭建仿真电路如图12所示。取  $R_1 = 1k\Omega$ ,  $C = 500pF$  即可满足条件。

图 12: 引入安全保护措施的对数运算电路仿真电路图



首先对基本三极管对数运算电路再次进行仿真，以检验其在某些极端情况下的工作情况，仿真结果如图13、14、15所示。

图 13: 改进前电路输入正弦波时仿真结果

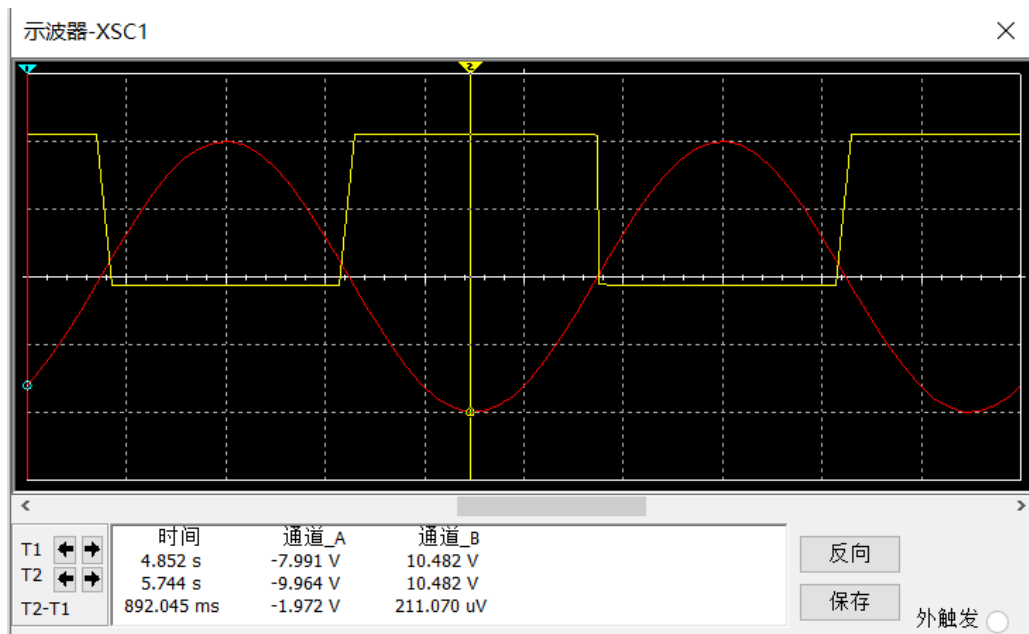


图 14: 改进前电路输入方波时仿真结果 (1)

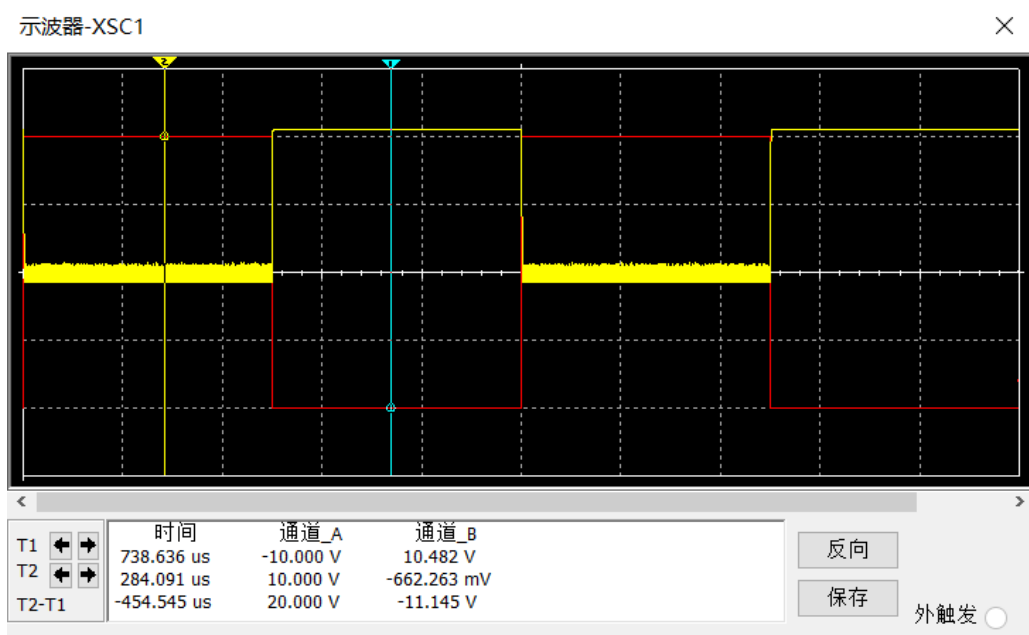
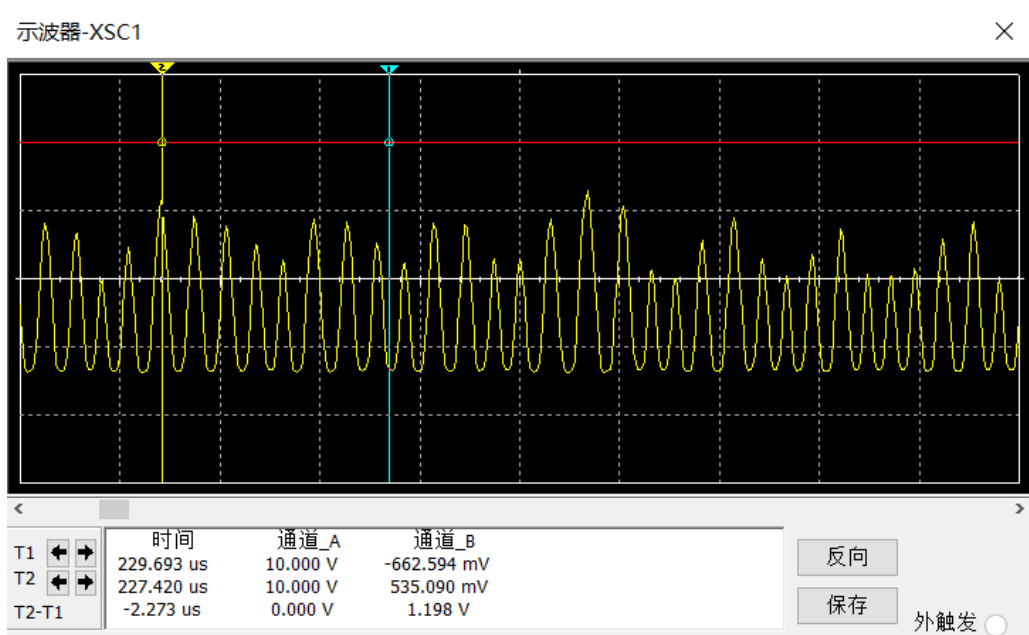


图 15: 改进前电路输入方波时仿真结果 (2)

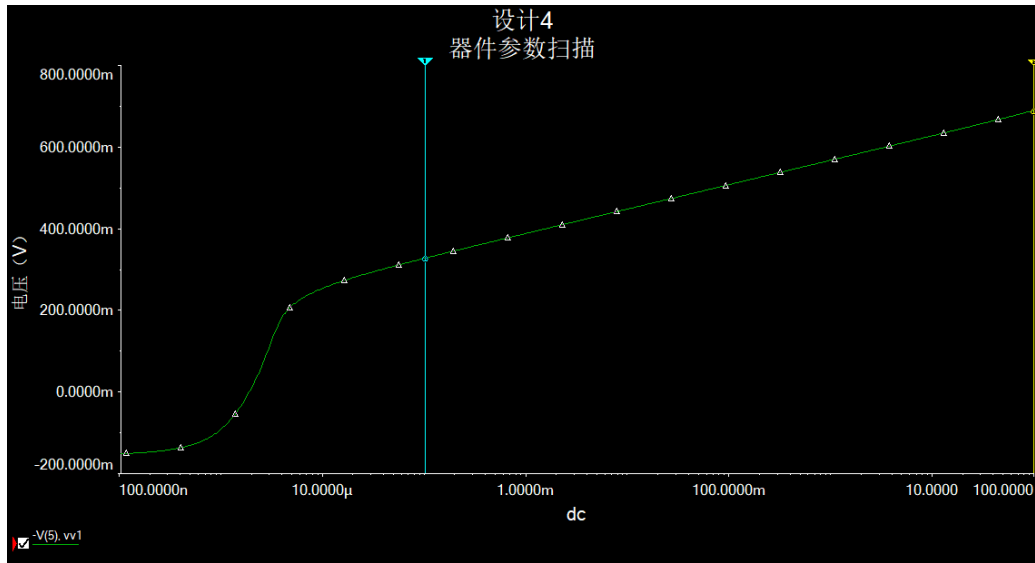


由仿真结果可知，输入幅值  $V_p = 10V$  的正弦波时，在正弦波的正半周能够产生正确的结果，而在正弦波的负半轴输出电压为  $10V$ ，加在三极管发射极两端的电压大于  $10V$ ，当输入幅值不断增大时，可能导致三极管发射极发生反向击穿。输入幅值  $V_p = 10V$  的方波时，在方波的正半周发生了明显的自激振荡，电路无法输出正确的结果。这可能是由于方波的频率合成中包含使电路产生自激振荡的频率分量。

综上所述，在上述两类情况下，基本三极管对数运算电路无法正常工作，因此相关改进措施是必要的。

在对电路进行改进后，利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电压  $u_i$ ，其输出结果如图16所示。

图 16: 引入安全保护措施的对数运算电路参数扫描结果



可见电路输出与基本三极管对数运算电路相似，新增模块并未对电路的对数运算结果造成影响。

分别输入  $V_p = 10V$  的正弦波和方波，观察电路的工作情况，以检验改进效果，仿真结果如图17、18所示。

图 17: 改进后电路输入正弦波时仿真结果

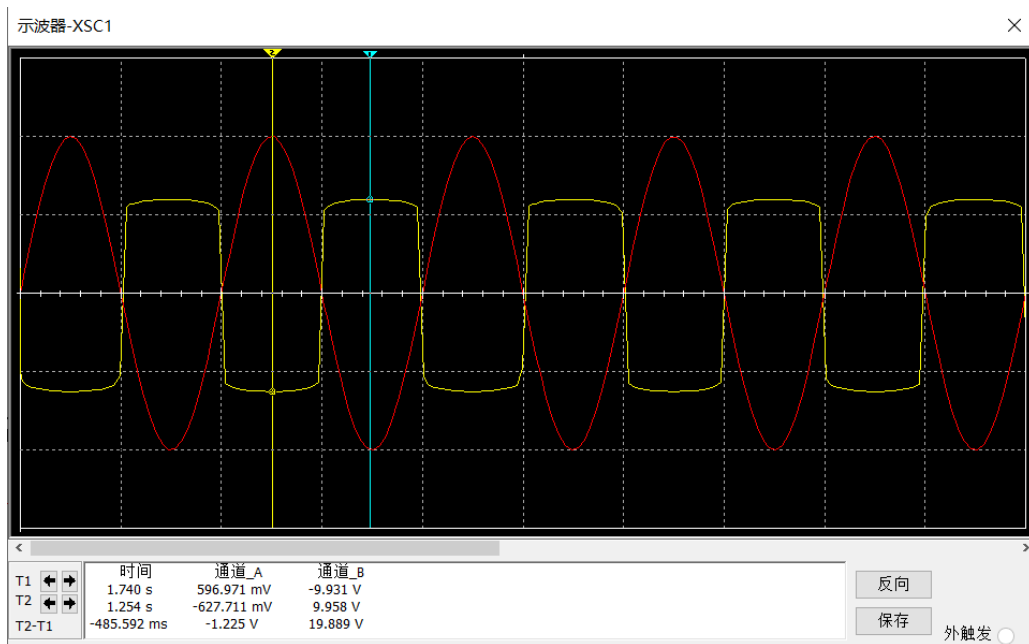
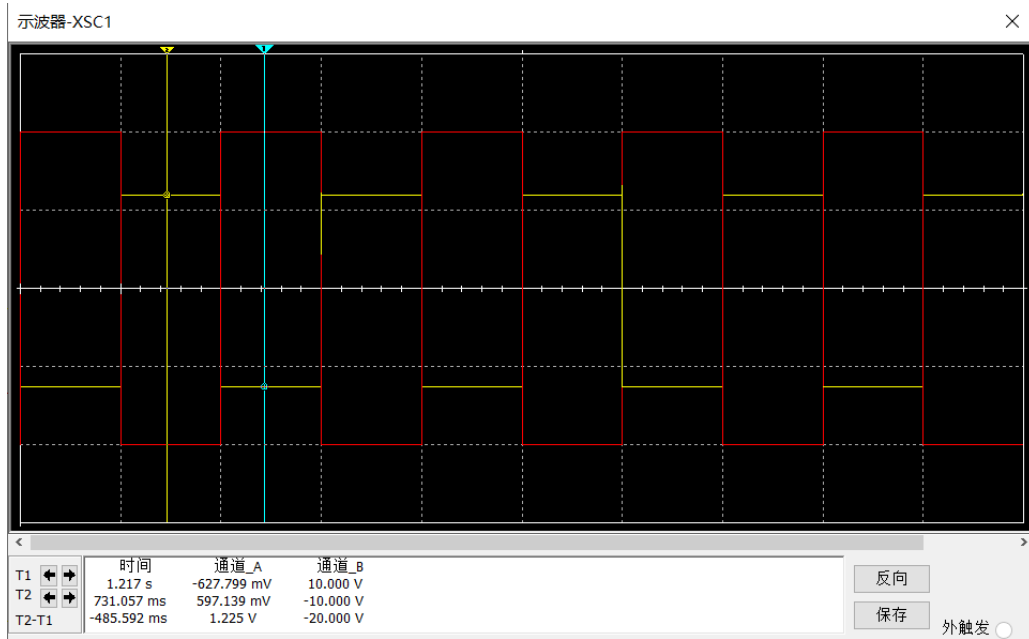




图 18: 改进后电路输入方波时仿真结果



明显可见，改进电路取得了较好的效果。输入  $V_p = 10V$  的正弦波时，除在正弦波的正半周能够产生正确的结果外，在正弦波的负半轴的电压得到了限制，且由于二极管  $D_1$  同样具有对数运算特性，故当输入电压为负值时，输出电压仍然与输入电压满足对数关系式。输入  $V_p = 10V$  的方波时，电路未产生自激振荡，输出信号稳定且正常。因此可知，该改进方案合理，能够使电路对实际情况可能产生的意外情况有更好的处理能力。

## 6 实用对数运算电路

### 6.1 理论分析

综合第 3、4、5 节的研究结果，并在电路中增加滑动变阻器以在实际情况下实现对电路进行精细调节，即可设计实用对数运算电路，其电路图如图19所示。<sup>6</sup>

电路基于第 4 节引入温度补偿的对数运算电路改进而来，在电路中加入了电容  $C_1$  防止电路产生自激振荡，加入二极管  $D_3$  对输入负电压时的情况进行钳位限制。

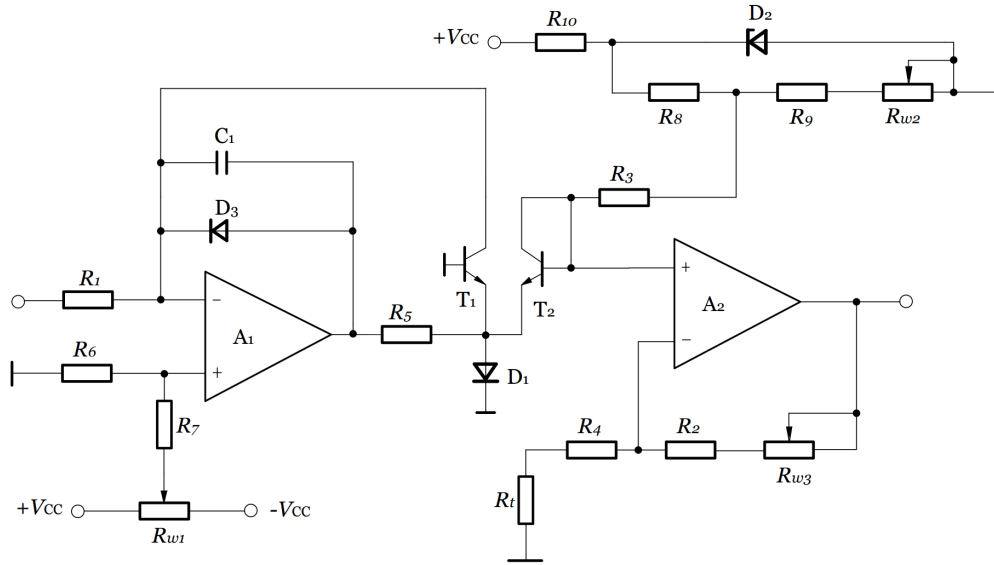
为进一步提升电路的精度，设计中必须对失调电压和输入偏置电流引入误差电流进行补偿。电路中引入了三个滑动变阻器，根据实际需求对上述误差进行精细调节。其中， $R_{w1}$  用于调节运放  $A_1$  的失调电压， $R_{w2}$  用于调节转换特性的过零点，即输出为 0 时的输入电压， $R_{w3}$  用于调节运放  $A_2$  的放大倍数，即所得输出曲线的斜率。实际应用中，可通过预期的电路输入、输出电压满足的转换特性对  $R_{w1}$ 、 $R_{w2}$ 、 $R_{w3}$  进行调节，从而得到满足设计要求的转换曲线。

尽管该电路看似较为复杂，其满足的理论公式仍与第 4 节引入温度补偿的对数运算电路相同，即：

$$u_o = -(1 + \frac{R_2}{R_4 + R_t}) \frac{kT}{q} \ln \frac{u_i}{i_R R} \quad (7)$$

<sup>6</sup>对数运算电路 - 电子常识 - 电子发烧友网  
<http://www.elecfans.com/dianzichangshi/20100423216688.html>

图 19: 实用对数运算电路原理图

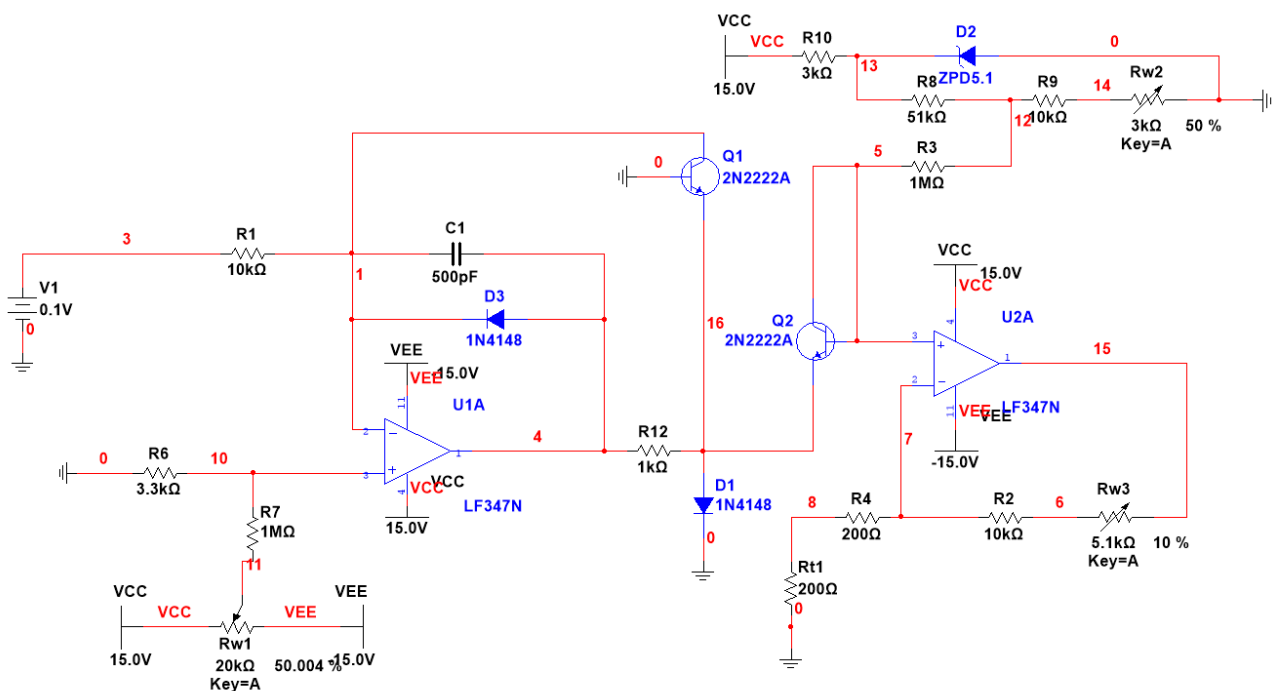


## 6.2 仿真结果

在 Multisim 软件中搭建仿真电路如图20所示。根据理论分析对电路的电阻、电容值进行选取。滑动变阻器  $R_{w1}$  部分，取平衡电阻  $R_6 = 3.3k\Omega$ ，通过  $R_7 = 1M\Omega$  引入极小的偏置电流对运放的失调电压进行调节。滑动变阻器  $R_{w2}$  部分，在  $R_3 = 1M\Omega$  的基础上，通过  $R_{10} = 3k\Omega$ ， $R_8 = 51k\Omega$ ， $R_9 = 10k\Omega$ 、 $R_{w2} = 1.5k\Omega$  引入输入偏置电流调节过零点。滑动变阻器  $R_{w3}$  的阻值选取  $R_{w3} = 0.51k\Omega$  调节运放的放大倍数。

根据电路的输出特性曲线仔细调节  $R_{w1}$  的阻值，最终取滑动变阻器阻值  $R_{w1} = 20k\Omega \times 50.004\% = 10.0008k\Omega$  时，输出曲线的动态范围最大。

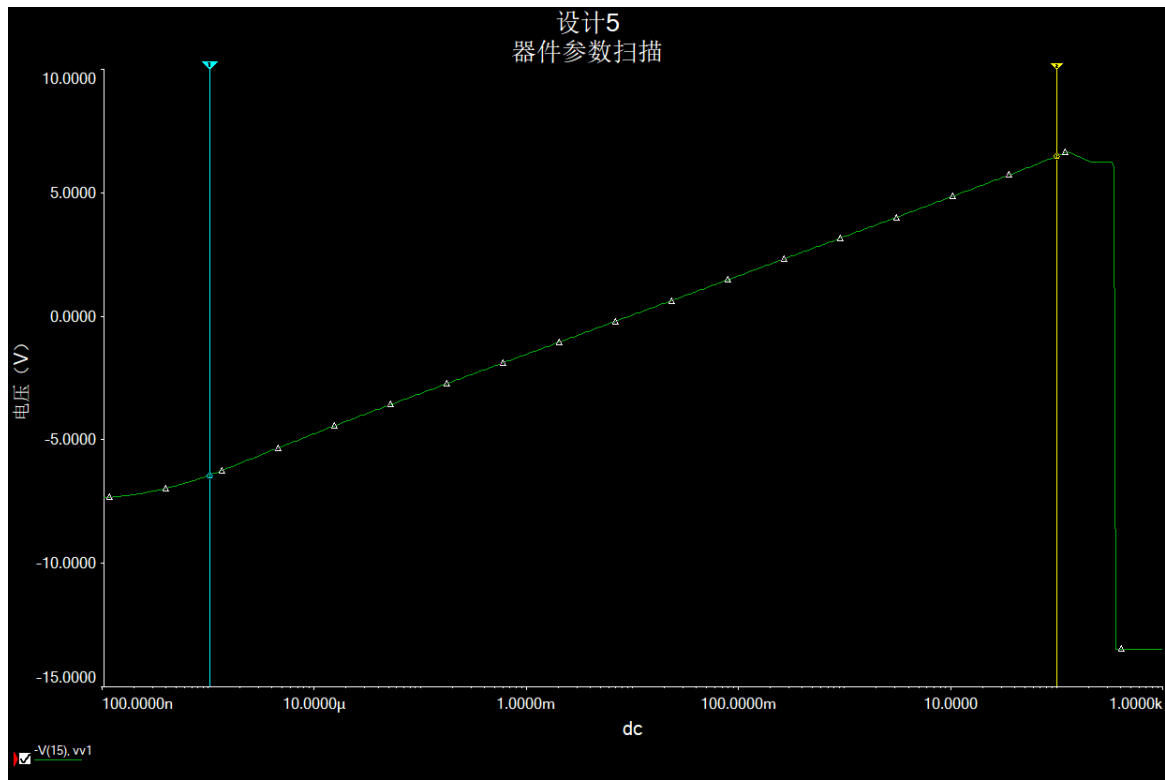
图 20: 实用对数运算电路仿真电路图



为方便起见，分析中均采用输出电压  $u_o$  的相反数进行分析。

利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电压  $u_i$ ，观察输出电压的变化情况如图21所示。

图 21: 实用对数运算电路参数扫描结果



进行观察与测量，电路大致在  $1\mu V \sim 100V$  范围内满足对数关系式 (曲线呈一条直线)，电路在输入小信号时未出现转折段，具有极好的对数特性。定量测量结果如表9所示。

表 9: 实用对数运算电路动态范围测量

输入电压 $u_i$	$1\mu V$	$10\mu V$	$100\mu V$	$1mV$	$10mV$	$100mV$	$1V$	$10V$	$100V$	$1kV$
测量值 /V	-6.381	-4.741	-3.115	-1.528	0.056	1.641	3.229	4.825	6.432	-13.476
增量 $\Delta/V$	—	1.640	1.626	1.587	1.584	1.585	1.588	1.596	1.607	-19.908

根据定量测量结果及其增量计算结果，可知其工作范围为  $1\mu V \sim 100V$ ，动态范围大约为  $10^8V$ ，共 8 个数量级。在电路的工作范围内，输出电压的电压范围为  $12.813V$ 。比较可知，得益于精细的调节，该电路的动态范围与输出电压范围远大于此前的电路，具有较高的实用价值与较大的适用范围。

与第 4 节相同，调节热敏电阻  $R_{t1}$  的温度系数  $a = 1/150 = 6.667 \times 10^{-3}$ ，设置输入电压  $u_i = 100mV$ ，改变电路的工作环境，测量不同温度下输出电压的值，仿真结果如表10所示。

表 10: 温度对实用对数运算电路的影响

工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	27(标准值)	30	40	50	60	70
测量值 /V	1.639	1.640	1.641	1.641	1.641	1.642	1.643	1.643	1.644
相对差值 /V	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003
相对误差	0.12%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.12%	0.12%	0.18%

与表8比较可知，实用对数运算电路受温度的影响极小，其对温度变化的鲁棒性好于基本的温度补偿对数运算电路，在各种环境下均可以正常工作。

综合上述分析可知，该实用对数运算电路在输入动态范围、输出变化范围、电路可调节性、抵抗温度变化、抵抗外界干扰方面均具有较好的特性，能够在实际环境下长期稳定使用。

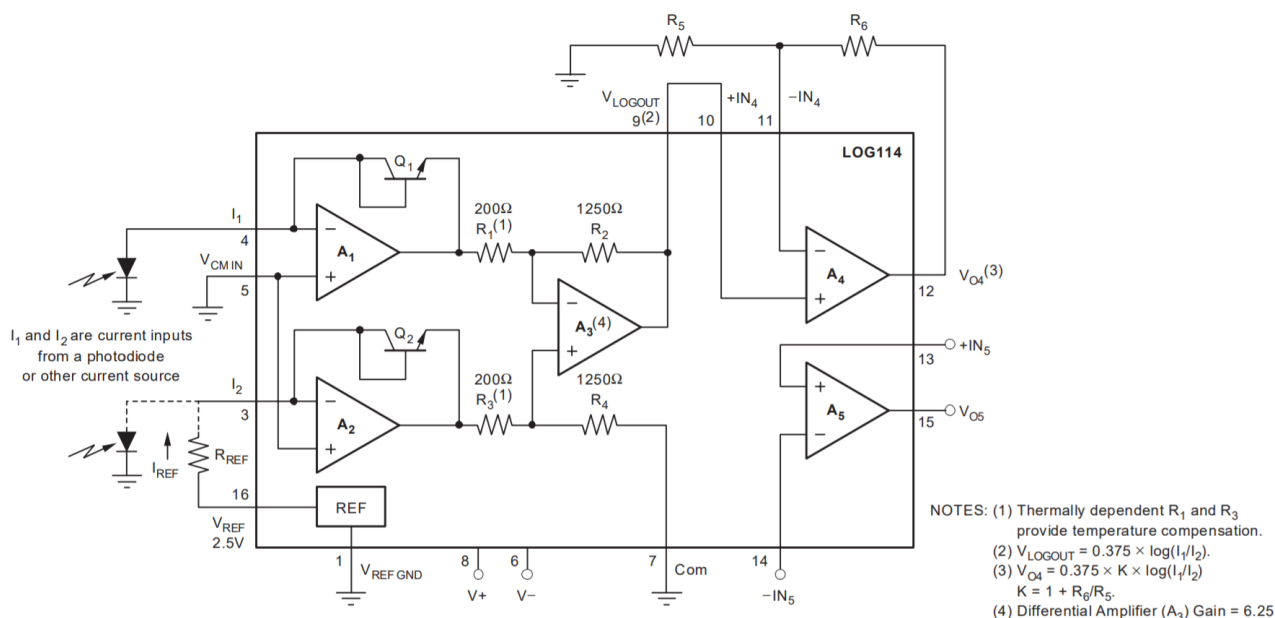
## 7 实际对数放大器 LOG114

### 7.1 理论分析

LOG114 是 TI 公司推出的一款直流精度的高速对数放大器，该芯片为测量通信、激光、医疗、工业系统领域中存在的低电平和宽动态范围电流设计，能够在 8 个数量级的动态范围内完成对数运算。

查阅其 Datasheet 可知<sup>7</sup>，其设计电路图如图22所示。

图 22: LOG114 电路原理图



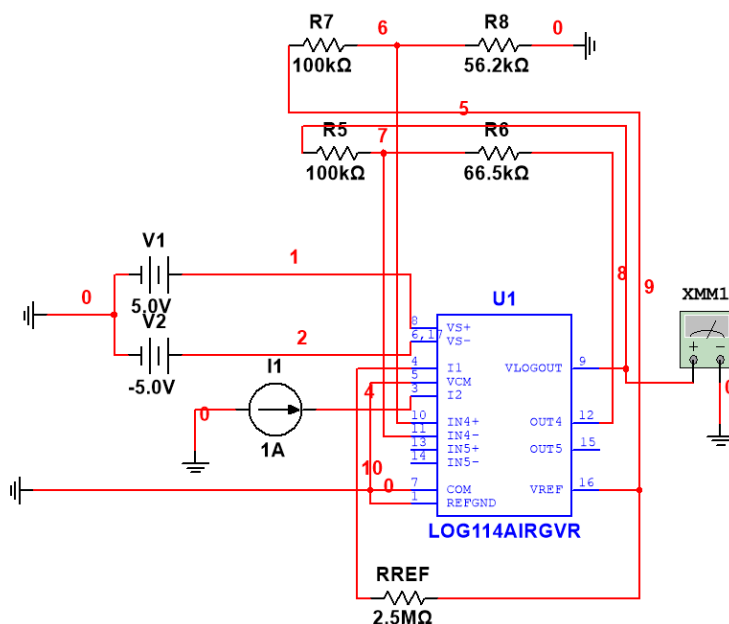
分析可知，其基本设计思路与引入温度补偿的差分放大电路类似，将两个基本对数运算电路的输出接入运放  $A_3$  构成减法器，从而消除  $I_S$  的影响。此外，电路通过参数相同的热敏电阻  $R_1$ 、 $R_3$  抵消温度  $T$  的影响。该电路通过输入  $V_{\text{REF}}$  对参考电流进行控制，从而起到对输出的调节作用。

<sup>7</sup>Single-Supply, High-Speed, Precision Logarithmic Amplifier datasheet (Rev. A)  
<https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/log114.pdf?ts=1623404510251>

## 7.2 仿真结果

按照 Datasheet 中的示例进行仿真电路搭建，其仿真电路图如图23所示。

图 23: LOG114 仿真电路图



根据 Datasheet 进行理论计算，可知输入  $V_{LOGOUT}$  与输入满足关系式：

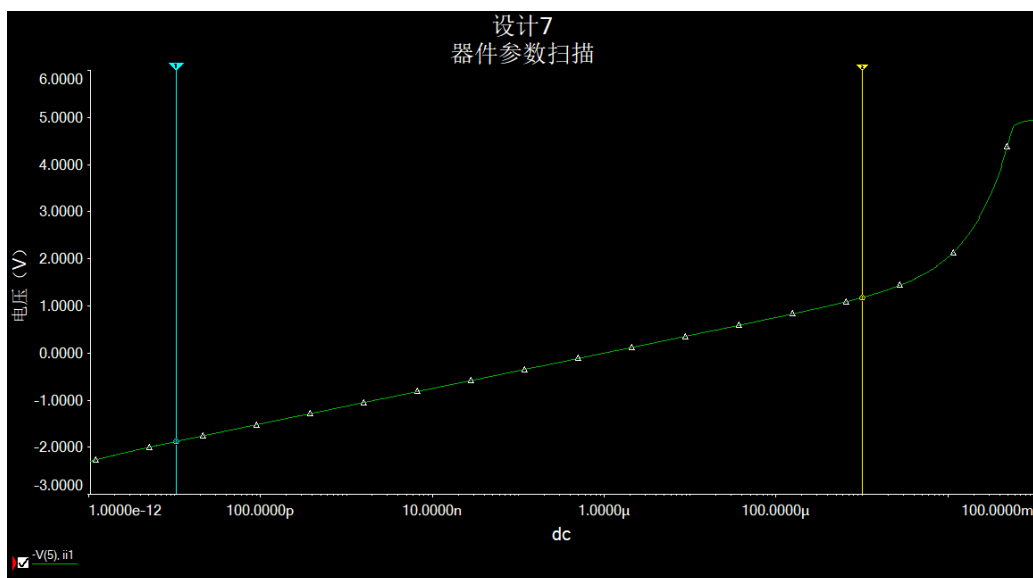
$$V_{LOGOUT} = 0.375 \times \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

其中，参考电流  $I_{REF} = 1\mu A$ ，参考电压  $V_{REF} = 2.5V$ 。

为方便起见，分析中均采用输出电压  $u_o$  的相反数进行分析。

利用参数扫描功能，以对数作为横坐标，改变输入电流  $I_i$ ，观察输出电压的变化情况如图24所示。

图 24: LOG114 参数扫描结果



进行观察与测量，电路大致在  $10pA \sim 1mA$  范围内满足对数关系式 (曲线呈一条直线)。定量测量结果如表11所示。

表 11: LOG114 动态范围测量

输入电流 $I_i$	$1pA$	$10pA$	$100pA$	$1nA$	$10nA$	$100nA$	$1\mu A$	$10\mu A$	$100\mu A$	$1mA$	$10mA$
理论值 / $mV$	-2.250	-1.875	-1.500	-1.125	-0.750	-0.375	0.000	0.375	0.750	1.125	1.500
测量值 / $V$	-2.302	-1.880	-1.500	-1.125	-0.750	-0.375	0.000	0.375	0.755	1.178	2.033
相对误差	2.31%	0.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.66%	4.71%	35.53%

以 1% 作为对数运算电路的误差允许范围，则电路的工作范围为  $10pA \sim 1mA$ ，动态范围为  $10^8A$ ，共 8 个数量级，与定性分析相同。在电路的工作范围内，输出电压的变化范围为  $4.335V$ 。在工作范围内，电路的相对误差极小，可见 LOG114 对数运算电路的运算精度极高。

## 8 总结

对实验数据及实验波形进行整理与总结，可得如表12所示的汇总数据：

表 12: 对数运算电路特性表

电路类型	动态范围	输出范围	温度变化	异常输入处理	电路可调节性
二极管	$10^4$	$240mV$			
三极管	$10^6$	$362mV$			
温度补偿	$10^6$	$9.393V$	√		
安全保护	$10^6$	$360mV$		√	
实用电路	$10^8$	$12.813V$	√	√	√
LOG114	$10^8$	$4.335V$	√	√	√

根据实验数据可得，由二极管、三极管构成的基本对数运算电路尽管能够实现对数运算，但其特性相对较差，无法在实际场合得到应用。应用差分放大电路以及热敏电阻的原理进行温度补偿可使电路具有温度鲁棒性；应用密勒补偿以及二极管保护可在发生异常输入时对电路进行保护；实用对数运算电路集合了上述优点，具有最宽的动态范围、输出范围，能够在不同温度下保持一致的输出，并可在异常输入下对电路进行保护，此外，可通过调节滑动变阻器对电路输出特性进行调节；LOG114 在上述优点的基础上，避免了调节滑动变阻器的繁琐，能够直接输出精确的结果。

综上，本文对课堂中出现的对数运算电路进行了探究，进行了大量理论分析及仿真验证，并取得了一定的有效成果。然而，由于时间、精力、学识有限，笔者难以对电路进行更为深入的理论分析，也难以进行实际电路的搭建以检验其实际运算效果，此外，随着电路设计水平的提高，更多特性更佳的对数运算电路也正出现在人们的视线中。希望未来笔者能够就本文仍存在的缺陷进行更为深入的研究。

## 参考文献

- [1] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 (第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] 杨祥伦. 对数运算电路基本特性的分析和应用实例 [J]. 自动化技术与应用, 1983(03):95-101.
- [3] 模拟电子技术基础课件第 10 周
- [4] 对数运算电路 - 电子常识 - 电子发烧友网  
<http://www.elecfans.com/dianzichangshi/20100423216688.html>
- [5] Single-Supply, High-Speed, Precision Logarithmic Amplifier datasheet (Rev. A)  
<https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/log114.pdf?ts=1623404510251>
- [6] 周向明, 姚建纯. 对数运算电路的温度误差及其补偿 [J]. 电测与仪表, 1986(01):11-13.