

現代電子技術叢書

運算放大器基礎

THE
OPERATIONAL
AMPLIFIERS

殷寰本編譯 · 萬里書店出版



運算放大器基礎

殷寰本編譯

香港萬里書店出版

運算放大器基礎

殷寰本編譯

出版者：萬里書店有限公司

香港北角英皇道486號三樓

電話：5-632411 & 5-632412

承印者：龍景印刷有限公司

香港柴灣新業街11號八樓B座

定價：港幣十八元

版權所有 * 不准翻印

(一九八〇年六月版)

前 言

運算放大器是一種具有高放大倍數、深度負反饋的直流放大器，可用來實現信號的組合和運算，有很大的靈活性。它不僅是電子模擬計算機中的關鍵部件，而且在自動控制系統和測量裝置中得到廣泛的應用。

本書介紹運算放大器的基本規律、參數測量以及電路工作原理，並特別注重以實例說明如何利用基本原理來解決電路設計和實施中的問題。書中的前五章主要講述運算放大器的基本參數及特性，而後面四章則介紹了各種重要電路和應用，最後一章簡要地討論了噪聲、屏蔽和接地等問題。

每一章除了課文和例子外，還附有小結、習題及實驗練習。課文內容在顧及嚴密性的同時，盡量避免涉及太繁太深的數學。實驗設計則盡量考慮到利用容易買到和較便宜的普通設備和零件。

本書可供技術學院和學校的學生閱讀，也可供工程技術人員或技工參考。

目 次

前 言	I
第一章 什麼是運算放大器	1
§ 1-1 什麼是運算放大器	1
§ 1-2 運算放大器的引出端	5
§ 1-3 運算放大器的一些規格	6
§ 1-4 求和端的限制	7
§ 1-5 電壓跟隨器	8
§ 1-6 同相放大器	9
§ 1-7 反相放大器	12
§ 1-8 差動輸入放大器	13
§ 1-9 差動輸出放大器 (平衡的)	16
小 結	17
習 題	18
實驗練習	19
第二章 負反饋、非理想放大器和外部失調補償	25
§ 2-1 負反饋對增益的影響	25
§ 2-2 負反饋對輸出電阻的影響	26
§ 2-3 負反饋對輸入電阻的影響	28
§ 2-4 非理想同相放大器	30
§ 2-5 非理想反相放大器	32
§ 2-6 外部失調補償	34
小 結	37
習 題	39
實驗練習	39

第三章 偏置電流和共模抑制比	43
§ 3-1 偏置電流及其測量.....	43
§ 3-2 共模抑制比.....	45
§ 3-3 共模抑制比的測量.....	48
小 結.....	49
習 題.....	50
實驗練習.....	50
第四章 由溫度引起的誤差及斬波器穩定法	52
§ 4-1 對溫度敏感的參量.....	52
§ 4-2 由 $\Delta V_{os}/\Delta T$ 和 $\Delta I_{os}/\Delta T$ 引起的誤差.....	53
§ 4-3 斬波器穩定法.....	56
小 結.....	58
習 題.....	59
實驗練習.....	60
第五章 和頻率有關的特性	61
§ 5-1 頻率響應.....	61
§ 5-2 有關分貝的複習.....	64
§ 5-3 衰減率.....	65
§ 5-4 多級衰減率.....	67
§ 5-4.1 相位響應.....	71
§ 5-4.2 有反饋時的頻率響應.....	72
§ 5-4.3 增益頻寬積.....	75
§ 5-4.4 振 盪.....	76
§ 5-4.5 穩定性判據.....	79
§ 5-4.6 相位餘量.....	81
§ 5-4.7 壓擺率.....	81
§ 5-5 相位滯後的補償.....	83
§ 5-6 相位補償的其他方法.....	89
§ 5-6.1 密勒效應補償.....	89
§ 5-6.2 輸入級補償.....	90
§ 5-6.3 前饋補償.....	90
§ 5-6.4 強制補償.....	90

§ 5-6.5	均衡輸入電容法	92
§ 5-7	選擇RC的注意事項	93
§ 5-8	穩定容性負載	94
	小 結	95
	習 題	97
	實驗練習	97
第六章	求和電路	101
§ 6-1	反相加法器	101
§ 6-2	比例加法器	102
§ 6-3	加減器	105
§ 6-4	直接加法器	109
§ 6-5	解聯立方程	109
§ 6-6	綫性控制	114
§ 6-7	儀表放大器	117
§ 6-7.1	儀表放大器電路	118
§ 6-7.2	輸入保護	123
§ 6-7.3	集成電路儀表放大器	124
	小 結	125
	習 題	126
	實驗練習	127
第七章	積分器和微分器	130
§ 7-1	積分器	130
§ 7-2	實際的積分器	135
§ 7-3	積分器的頻率響應	137
§ 7-4	束縛電路	139
§ 7-5	積分求和器	140
§ 7-6	放大-積分器	141
§ 7-7	差動積分器	142
§ 7-8	三態積分器	142
§ 7-9	二重積分器	144
§ 7-10	微分器	145
§ 7-11	微分器的穩定	147

§ 7-12	用有補償的微分器作濾波器	149
§ 7-13	某些微分器的波形	150
§ 7-14	微分求和器	153
§ 7-15	放大 - 微分器	154
§ 7-16	分差微分器	155
§ 7-17	解微分方程	155
	小 結	158
	習 題	159
	實驗練習	160
第八章	對數電路	164
§ 8-1	對數電路	164
§ 8-2	更為成熟的對數電路	168
§ 8-3	反對數放大器	169
§ 8-4	乘法電路	170
§ 8-5	除法電路	172
§ 8-6	對數比例電路	174
§ 8-7	函數合成器	174
§ 8-8	信號壓縮	178
	小 結	180
	習 題	180
	實驗練習	181
第九章	電路精選	184
§ 9-1	比較器	184
§ 9-2	峰值檢波器	187
§ 9-3	峰 - 峰檢波器	188
§ 9-4	零點穿越檢測器 (鑿零器)	188
§ 9-5	相位檢測器 (鑿相器)	189
§ 9-6	輸出電流提升器	190
§ 9-7	電流源	192
§ 9-8	電壓源	194
§ 9-9	台階形波發生器	197
§ 9-10	信號源	198

§ 9-10.1	文氏電橋振盪器	198
§ 9-10.2	方波發生器	200
§ 9-10.3	三角形波發生器	201
§ 9-10.4	綫性斜波發生器	203
§ 9-11	運算放大器的類型	204
§ 9-12	有源濾波器	204
	小 結	205
	習 題	206
	實驗練習	206
第十章	噪 聲	208
§ 10-1	約翰遜噪聲 (熱噪聲)	208
§ 10-2	散粒噪聲	209
§ 10-3	閃變噪聲	210
§ 10-4	信號噪聲比	210
§ 10-5	噪聲係數	211
§ 10-6	干 擾	211
§ 10-7	接 地	211
	小 結	212
	習 題	213
	實驗練習	213
附錄 A		217
A-1	差動放大器	217
A-2	共模增益	221
A-3	失調電壓	223
附錄 B	式 (5-1) 的推導	225
附錄 C	相位滯後補償電路的 R c 表式的推導	228
附錄 D	習題答案	230

第一章

什麼是運算放大器 (What is an Op-Amp?)

爲了學會使用運算放大器 (*operational amplifier*, 簡寫爲 *op-amp*), 我們必須先要了解它們究竟是什麼東西。本章主要討論運算放大器的構造、特性, 以及一些主要規格, 同時也要討論用運算放大器組成的一些放大器的綫路結構。

§ 1-1 什麼是運算放大器 (What is an Op-Amp?)

運算放大器是一種有差動輸入 (*differential inputs*) 的組合式多級放大器, 它的許多特性都接近所謂的“理想放大器” (*ideal amplifier*) 的特性。理想放大器具有以下一些性質:

- a. 電壓增益爲無窮大 ($A_v \rightarrow \infty$)。
- b. 輸入阻抗爲無窮大 ($Z_{in} \rightarrow \infty$)。
- c. 輸出阻抗爲零 ($Z_{out} \rightarrow 0$)。
- d. 當 $V_1 = V_2$, $V_{out} = 0$ 。
- e. 頻帶寬 (*bandwidth*) 爲無窮大 (即信號通過放大器時沒有延遲產生)。

在實踐中, 雖然我們不能百分之百地達到上述要求, 但對於許多具體應用來說, 却可以十分接近地近似實現它們。例如, 如果利用反饋 (*feedback*) 來限制放大器電路的增益不超過10, 那末, 一個增益爲1,000 (無反饋) 的放大器對於實際運用來說就可以被看作是增益無窮大的放大器。

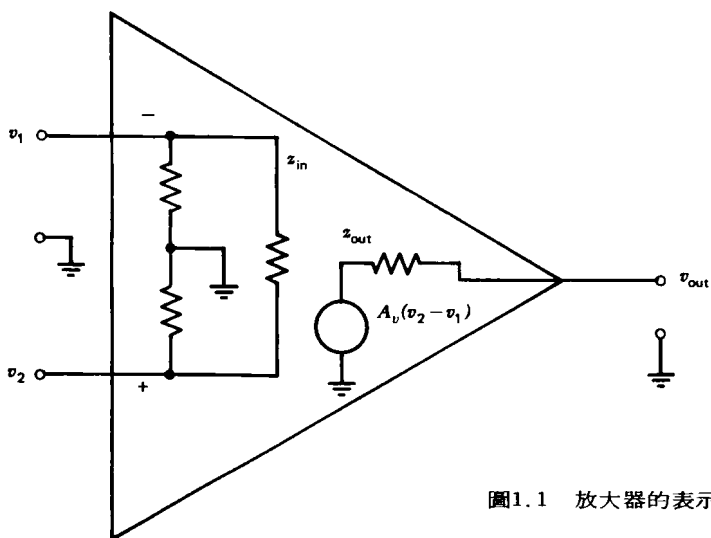
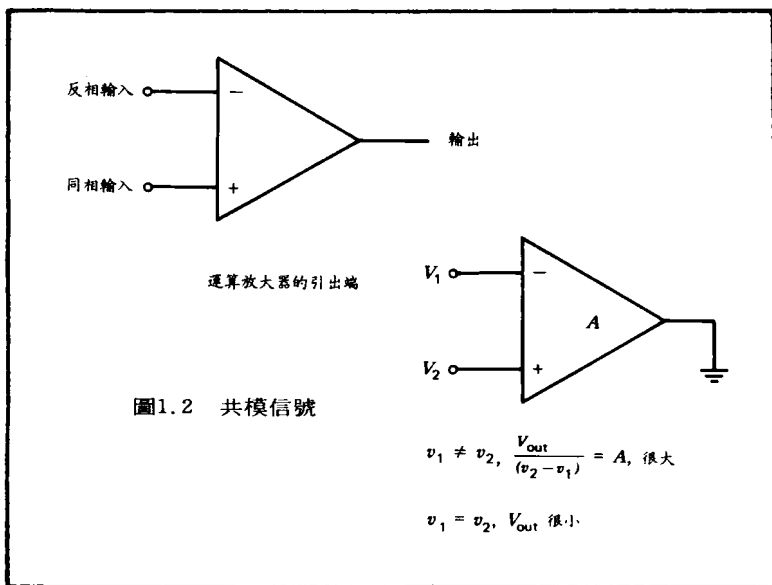


圖1.1 放大器的表示



運算放大器的第一級是一個差動放大器 (*differential amplifier*)。該差動放大器對差動信號 (圖1.1和1.2中的 $V_2 - V_1$) 提供一個高增益，而對那些同時施加於兩個輸入端的信號 (共模信號， *common-mode signal*) * 則提供一個低增益。

差動放大器也對任何輸入信號提供一個高阻抗。運算放大器的輸入級是最關鍵的，因為我們正是在這一級建立輸入阻抗，並使共模響應 (*common-mode response*) 及失調電壓 ** (*offset voltage*) 減至最小。

在輸入級 (*input stage*) 後面是一個以上的中間級 (*intermediate stage* ，如圖1.3所示)，它們把靜態電平移至輸出端處的零位，並提供電壓和電流增益。為了得到高的整體電壓增益，需要有這種附加的電壓增益；而為了在不增加輸入級負載的情況下向輸出級提供驅動電流，需要有這種電流增益。中間放大級既用單端接法又用差動接法。

輸出級必須提供一個低輸出阻抗，以及驅動預定負載所需的足夠的電流。它也應該有一個足夠高的輸入阻抗，以使最末一級中間放大級不會被加載。輸出級通常是一個射極跟隨器 (*emitter follower*) 或互補電路。

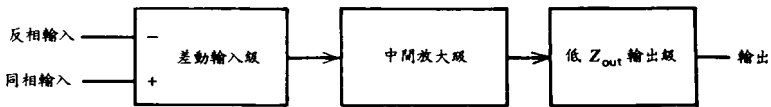


圖1.3 運算放大器的方框圖

-
- * 同時加於兩個輸入端的、相位和振幅均相同的信號，稱為共模信號 (或稱共態信號)。
 - ** 失調電壓是放大器內部產生的一些我們所不希望的小信號，它們呈現在輸入端之間，使得當兩輸入端均加有 0 V 電壓時仍有一定量的輸出電壓產生。失調電壓是由於輸入晶體管的射 - 基極電壓的不完全對稱所造成。

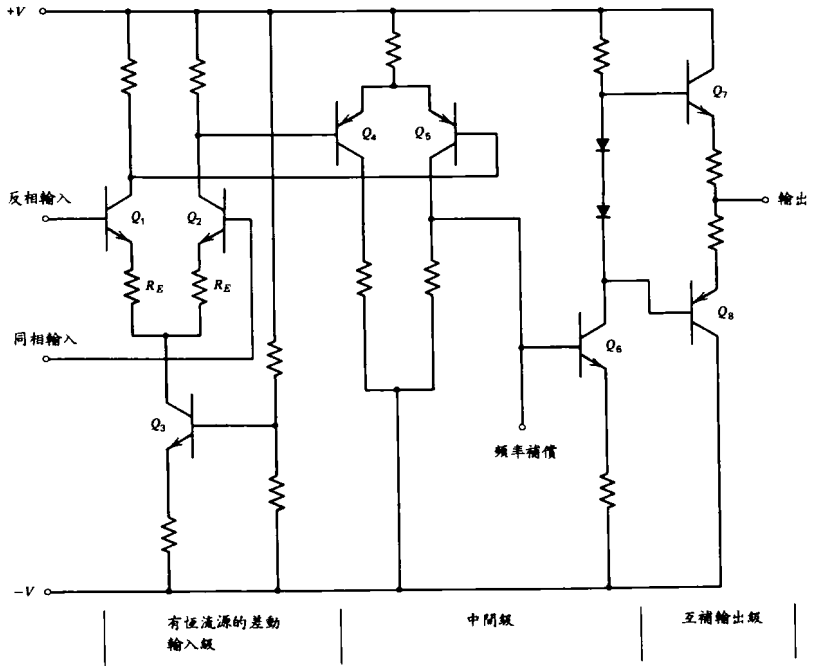


圖 1.4 典型的運算放大器電路

圖 1.4 是一個典型的運算放大器的示意圖。有關輸入電路需指出幾點： Q_1 和 Q_2 的發射極電阻使輸入級的輸入阻抗增大。輸入級的集電極電流通常較小，以使輸入晶體管的射 - 基極二極管的交流電阻較大，並使該電路可用低輸入電流驅動。這樣做將使第一級的電壓增益降低，故需要用中間級來補回。我們用一個恆定的電流源來提供第一級的發射極電流，目的是減少電路對共模信號的靈敏度。因為恆流源 (*constant current source*) 的內阻 (r_{oc}) 很高，故使差動放大器對共模信號 (A_{cm}) 的增益很低*。

為使驅動差動放大器所需的輸入電流總量減少，並提高輸入電阻，

* 見附錄 A 中 A_{cm} 的公式及其成因。

第一級電路中的 Q_1 和 Q_2 可以是達林頓對 (Darlington pair) 或場效應晶體管 (field effect transistor)。用場效應晶體管作 Q_1 和 Q_2 能使輸入阻抗變得很高。但是輸入失調電壓 (V_{os}) 以及 V_{os} 隨溫度的變化，也比用雙極晶體管 (bipolar transistor) 的差動放大器大；當然我們可以在放大器內部用各種反饋電路來降低 V_{os} 以及它的變化。現已有集成電路 (integrated circuit) 形式的運算放大器供應，它們是用場效應管作輸入晶體管，以得到高的輸入阻抗，而電路的其餘部分則用雙極晶體管。用達林頓對作 Q_1 和 Q_2 也會使 V_{os} 以及 V_{os} 隨溫度的變化增大。

如果第一級的電壓增益是10 ($A_{v1}=10$)，第二級是100 ($A_{v2} = 100$)，而第三級是20 ($A_{v3}=20$)，則總的增益 A_t 是各級增益之乘積：

$$A_t = A_1 A_2 A_3 = 10 \times 100 \times 20 = 20,000$$

它是相當高的。

§1-2 運算放大器的引出端 (Terminals of an Operational Amplifier)

圖1.5 為運算放大器的外部接頭。它們是：

1. $+V, -V$ ：電源接頭。
2. 頻率補償 (frequency compensation*)：這些接頭是在放大器內部沒有補償時，用以連接一定的電路而防止運算放大器電路產生振盪的。
3. 輸出在該接頭處可得到放大的電壓。
4. 反相輸入 (inverting input)：如果把同相輸入端接地，並把信號加於反相輸入端，則輸出信號的相位和輸入信號相差 180° 。
5. 同相輸入 (noninverting input)：如果把反相輸入端接地並把信號加於同相輸入端，輸出將和輸入信號同相。

* 有時也稱作 lead, lag, 或 roll off。

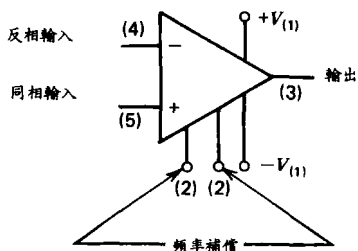


圖1.5 運算放大器的引出端

§1-3 運算放大器的一些規格 (Some Specifications)

1. 開環增益 (*open loop gain*) A_{oi} : 無反饋時放大器的增益，通常是數千。
2. 輸入失調電壓 (*input offset voltage*) V_{os} : 由放大器產生的一些不利的小信號，呈現在輸入端之間，它會造成當兩個輸入端均接 $0V$ 時仍有輸出電壓存在。它是由輸入晶體管的射 - 基極電壓的不完全對稱所引起。 V_{os} 一般是數 mV 。
3. 偏流 (*bias current*) I_B : 驅動運算放大器的輸入級所需要的電流；即必須供應給輸入晶體管的基極電流。
4. 輸入失調電流 (*input offset current*) I_{os} : 運算放大器的兩個輸入晶體管所需要的偏流之差。由輸入晶體管的 β 值的不完全對稱所造成。在圖 1.6 中，若 I_{B_1} 是驅動反相輸入晶體管所需的電流，而 I_{B_2} 是驅動同相輸入晶體管所需的電流，則 $I_{os} = I_{B_1} - I_{B_2}$ 。當輸入改變時，偏流也相應改變，於是失調電流也有改變。 I_{os} 通常在數至數百 nA 範圍內。
5. 輸入電阻 (*input resistance*): 放大器對一個輸入信號所呈現的電阻 (R_{in})。 R_{in} 一般均大於 $1M\Omega$ ，並可以達到數百 $M\Omega$ 。
6. 輸出電阻 (*output resistance*): 從加在放大器的輸出端的一個電壓看來，放大器所表現的電阻。 R_{out} 通常小於數百 Ω 。
7. 絕對的最大額定值 (*absolute maximum ratings*): 包括如

下一些額定值：

- a. 最大功耗 (*maximum power dissipation*)
- b. 工作溫度範圍 (*operating temperature range*)
- c. 最高電源電壓 (*maximum supply voltage*)
- d. 最高差動輸入電壓 (*maximum differential input voltage*, 在反相和同相輸入端之間)
- e. 最高共模輸入電壓 (*max. common mode input voltage*)
- f. 存儲溫度範圍 (*storage temperature range*)

如果超出了這些額定值，運算放大器就可能損壞。

運算放大器製造商在他們的說明書中常給出許多放大器參數曲線。其中可能包括 V_{out} 最大 對 R_L ， V_{out} 最大 對電源電壓， V_{os} 對溫度， I_b 對溫度等關係曲線。要正確使用運算放大器，必須仔細閱讀有關的說明書。

對於 V_{os} 和 A_{oi} 之類重要參數，常常給出它們在最高和最低工作溫度以及常溫下的值。在後面章節中當有需要時還會討論另一些規格。

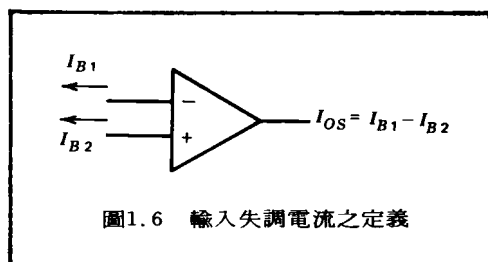


圖1.6 輸入失調電流之定義

§ 1-4 求和端的限制 (Summing Point Restraints)

放大器的兩個輸入端常被稱作求和端 (或相加端, *summing point*), 原因在後面將會討論。對求和端的限制是偏流要低, 而且, 在兩輸入端之間的電壓和電路的任何其他電壓值相比, 在有反饋情形

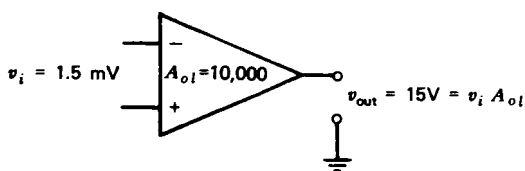


圖1.7 差動輸入電壓的限制

下是很低的。後一個限制（或條件）是由放大器的高開環增益所保證。例如，若輸出電壓為15 V，而開環電壓增益是10,000，則在輸入端之間所呈現的電壓（圖1.7中的 v_i ）必須是 $V_{out}/A_{ol} = 15\text{ V}/10,000 = 1.5\text{ mV}$ 。應該明瞭，輸出電壓僅是由輸入端之間的小電壓所引起，而不是由其他電壓引起。因為開環增益很高，該輸入電壓是很低的。

§ 1-5 電壓跟隨器 (Voltage Follower)

在圖1.8中， V_{out} 被直接回輸到反相輸入端。回憶起輸入端間的電壓是放大器增益（ A_{ol} ）所作用的電壓，我們看到，若在同相輸入端加上一個電壓，放大器將被驅動直到 $v_i = V_{out}/A_{ol}$ 時為止，而輸出將停留在這個數值一直到輸入再有改變時為止。由於放大器的增益很高， v_i 很小，故 V_{out} 和 V_{in} 近似相等。

例如，若 $A_{ol} = 10,000$ 而 $V_{in} = 1\text{ V}$ ，輸出將一直上升到 $v_i \cong 0$ 時為止。此時應有 $V_{out} \cong V_{in}$ 。在此情形， $v_i = 1\text{ V}/10,000 = 0.1\text{ mV}$ ，和1 V相比近似為零。

圖1.8 電壓跟隨器

