

模 拟 计 算 机 部 件 设 计 基 础

[美] R. M. 郝沃著



國防工業出版社

模拟计算机部件设计基础

[美] R. M. 郝沃 著

刘锦德 陈真 译
章鉴汀 吴鹤龄

刘锦德 校



国防工业出版社

1965

620422

內 容 簡 介

本书是电子模拟计算机部件方面的专门論著。书中詳尽地介紹了各种模拟机部件的工作原理、設計原則与具体电路，同时探討了各种部件的誤差对解題結果的影响。此外，也介紹了模拟机的总体設計原則。

全书篇幅虽不多，但內容精练扼要，对关键問題交代清楚，是一本不可多得的佳作。本书对从事模拟机設計与使用的工程技術人員有較大的参考价值，并且也可作为高等学校计算机专业的教学参考书。

DESIGN FUNDAMENTALS OF
ANALOG COMPUTER COMPONENTS
[美] R. M. Howe
D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC.

1961

*

模拟计算机部件設計基础

刘錦德 陈 眞 譯
章鉴汀 吳鶴齡

刘 錦 德 校

*

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 $1/32$ 印張 9 228 千字

1965 年 10 月第一版 1965 年 10 月第一次印刷 印数：0,001—1,940 册

統一书号：15034·992 定价：(科六) 1.40 元

序 言

自从第一台商品模拟计算机在 1947 年問世后,模拟計算技术很快地发展着。現在,各种通用模拟计算机在許多研究单位和工程技术单位中已成为标准設備,并且这种設備的制造厂也有了不少。由于这样的蓬勃发展,电子模拟計算技术已成为众所周知。但是,对于模拟计算机部件的一些設計細节(即它們为何要如現在那样地設計)以及部件誤差对模拟计算机所解題目有何影响,还不是为大家普遍所了解。

本书的編写目的,是企图尝试弥补这一方面的缺陷。为了实现这一意图,书中詳尽地探討了在性能良好的模拟计算机部件制成前所必須进行的設計考虑。在此人們可能会問,为何一些設計細节对于计算机使用者來說也显得很重要呢?問題的答案是,客觀事实告訴我們,假使使用者对部件的詳情以及它們对模拟计算机解答的影响方面沒有丰富的知識,則要想全面地了解一台电子模拟计算机所具备的能力,将是是不可能的。

本书第一章討論了模拟计算机的总体設計原則,同时列举了一些現有商品模拟计算机的实例。第二章广泛地討論了模拟计算机部件的誤差以及它們对題目解答的影响。以下各章則分別专論直流放大器、乘法器、函数发生器、記錄仪和其它設備,同时也介紹了許多商品設備的实例。最后一章則列出了以前各章所討論的各种模拟计算机部件的照片。

本书是根据作者的一套筆記整理和补充而成,这套筆記是作者 1958 年为通用电动机公司(General Motors Corporation)的研究實驗室開設模拟计算机部件的課程而編写的。

R. M. 邦沃

1960 年 11 月

目 录

序言	3
第一章 模拟计算机的总体考虑	9
1.1 总体考虑的重要性	9
1.2 排队板系统	10
1.2.1 金属排队板与绝缘排队板的比较, 屏蔽排队塞绳	11
1.2.2 一般的排队板布置	13
1.2.3 在排队板上进行换接	17
1.3 设置方法与控制方法	17
1.3.1 电位器设置方法	17
1.3.2 模拟计算机的控制开关	19
1.3.3 时间校准讯号源	22
1.3.4 过载指示	22
1.4 题目检验电路	23
1.4.1 平衡检验电路	23
1.4.2 静态检验电路	25
1.4.3 动态检验电路	27
第二章 模拟计算机部件的误差及其对题目解答的影响	31
2.1 引言	31
2.2 运算放大器的误差	32
2.2.1 运算放大器的基本方程式	32
2.2.2 稳定性对放大器的要求	34
2.2.3 加法放大器的动态性能	38
2.2.4 积分器的动态性能	42
2.2.5 介质吸收的影响	47
2.2.6 放大器漂移和噪声的影响	51
2.2.7 放大器栅流的影响	54
2.3 随动乘法器的误差	55
2.3.1 概述	55
2.3.2 电位器非线性引起的静态误差	56
2.3.3 有限分辨力引起的静态误差	57

2.3.4 綫性时延引起的动态誤差	57
2.3.5 大运动非綫性引起的动态誤差	60
2.3.6 小运动非綫性引起的动态誤差	61
2.3.7 簡要結論	62
2.4 电子乘法器的誤差	62
2.5 运算放大器动态誤差对綫性微分方程式解答的影响	64
2.5.1 求解二阶方程式的誤差	64
2.5.2 求解任意阶綫性方程式的誤差	71
2.5.3 介质吸收引起的誤差	73
2.6 无源元件值不准所引起的誤差	76
2.7 非綫性部件的动态誤差对微分方程式解答的影响	81
2.8 簡要結論	84
第三章 直流放大器	86
3.1 引言	86
3.1.1 对直流增益的要求	86
3.1.2 直流放大器的漂移	87
3.1.3 栅流产生的原因	88
3.1.4 稳定性对頻率响应的要求	89
3.2 直流放大器的輸入級	90
3.2.1 三极管放大級	91
3.2.2 阴极輸出器电路	93
3.2.3 差量放大器电路	94
3.3 中間放大級	97
3.3.1 三极管放大級	98
3.3.2 五极管放大級	100
3.4 輸出放大級	101
3.4.1 三极管輸出級	102
3.4.2 阴极輸出器輸出級	103
3.4.3 串联輸出級	104
3.4.4 五极管輸出級	105
3.5 一个直流放大器設計的詳細分析	107
3.5.1 輸入級的分析	107
3.5.2 第二級的分析	108
3.5.3 第三級的分析	109
3.5.4 輸出級的分析	109
3.5.5 总的直流增益	110
3.5.6 頻率响应的計算	110

3.5.7 放大前频率响应的衰减.....	114
3.6 漂移的稳定	117
3.6.1 自动稳定式直流放大器的基本原理.....	118
3.6.2 漂移稳定用放大器的频率响应.....	120
3.6.3 漂移稳定用放大器电路.....	122
3.6.4 利用隔流电容器消除栅流.....	124
3.7 专用模拟机放大器的实例	125
第四章 乘法器	137
4.1 随动乘法器	137
4.1.1 引言.....	137
4.1.2 电位器的选择.....	138
4.1.3 齿轮比的决定.....	140
4.1.4 执行电动机.....	144
4.1.5 随动系统的传递函数.....	146
4.1.6 电子式随动放大器.....	153
4.1.7 磁式随动放大器.....	155
4.1.8 常用随动乘法器的介绍.....	158
4.1.8.1 Electronic Associates Inc. 的产品(PACE)	158
4.1.8.2 Berkeley Division 的产品(EASE)	160
4.1.8.3 Reeves Instrument Cor. 的产品(REAC)	160
4.1.8.4 Goodyear Aircraft Cor. 的产品(GEDA)	161
4.1.9 利用随动乘法器作除法运算.....	162
4.2 时分割式电子乘法器	162
4.2.1 引言.....	162
4.2.2 GEDA A-14 160型电子乘法器.....	167
4.2.2.1 GEDA 160型乘法器的技术数据	167
4.2.2.2 GEDA 160型乘法器所用的放大器	168
4.2.2.3 GEDA 160型乘法器所用的电压开关	168
4.2.2.4 整个乘法器的工作情况.....	171
4.2.2.5 输出滤波器.....	173
4.2.3 EASE 1156型电子乘法器.....	173
4.2.3.1 EASE 1156型乘法器的技术数据	174
4.2.3.2 整个乘法器的工作情况.....	174
4.2.3.3 EASE 1157型乘法器	180
4.2.4 PACE 7.006 型电子乘法器	180
4.2.4.1 PACE 7.006 型乘法器的技术数据	181
4.2.4.2 PACE 7.006 型除法器的技术数据	181
4.2.4.3 PACE 7.006型乘法器所用的直流放大器.....	182

4.2.4.4	PACE 7.006型乘法器所用的电流开关	182
4.2.4.5	整个乘法器的工作情况	185
4.2.4.6	用 PACE 7.006型乘法器作除法运算	187
4.3	二极管平方律式乘法器	188
4.3.1	基本原理	188
4.3.1.1	二极管平方电路的理论准确度	189
4.3.1.2	小摆动输入下乘法器的性能	189
4.3.2	REAC 型二极管电子乘法器	189
4.3.2.1	二极管网络	190
4.3.2.2	REAC M-400-1 型二极管电子乘法器的技术数据	192
4.3.2.3	乘法器的其它应用	193
4.3.3	PACE 7.007型二极管乘法器	194
4.3.3.1	PACE 7.007 型乘法器的技术数据	195
4.3.3.2	二极管网络	195
4.3.3.3	乘法器电路	197
4.3.3.4	除法器电路	199
4.3.3.5	平方根电路	200
第五章	函数发生器	201
5.1	抽头电位器式函数发生器	201
5.1.1	引言	201
5.1.2	用恒流源调整垫整电阻	203
5.1.3	PACE 16-20Z型设置电位器垫整电阻的装置	205
5.2	分解器	206
5.3	二极管函数发生器	208
5.3.1	引言	208
5.3.2	EASE 1173B型函数发生器	211
5.3.3	PACE 16-6B型函数发生器	215
5.3.4	REAC FG-400-1型二极管函数发生器	219
5.3.5	GEDA 280型二极管函数发生器	222
第六章	记录仪	227
6.1	记录仪的型式	227
6.2	笔记录仪	227
6.2.1	原理	227
6.2.2	Sanborn 记录仪	229
6.2.3	Brush 记录仪	231
6.2.4	PACE 1902 D 型八线记录仪	234
6.3	X-Y 描繪仪	235

6.3.1 概述	235
6.3.2 PACE 1100 D 型描繪儀	237
6.4 阴極射綫示波器	239
第七章 其它設備	241
7.1 引言	241
7.2 噪声发生器	241
7.2.1 噪声特性的介紹	241
7.2.2 噪声发生器应有的特性	243
7.2.3 利用放射源的噪声发生器	243
7.2.4 利用閘流管的采样式噪声发生器	244
7.2.5 PACE 201 型噪声发生器	245
7.2.6 噪声特性的測量	247
7.3 时延仿真器	248
7.3.1 时延系統的介紹	248
7.3.2 产生时延的方法	248
7.3.3 PACE 1.002 型时延仿真器	249
第八章 部件的結構	253
8.1 引言	253
8.2 模拟計算机部件的照片	253
参考文献	287

第 一 章

模拟计算机的总体考虑

1.1 总体考虑的重要性

任何通用计算机，无论它是模拟式的还是数字式的，都必然是一台复杂的设备。这一事实意味着，对这种计算机必须从“总体”观点出发正确地进行设计，以保证当各组成部分连接在一起时计算机能有效地工作，并保证操作人员能以最高的效率来使用机器。后面这一点是极其重要的，然而，到目前为止，在设计计算机时人们仍常常忽视了这一点。在某种意义上，操作人员是计算机总体中的一个部分，对模拟计算机来说则更是如此。因此，在信息交换的方法和速度、题目检验的方法、故障的找寻以及其它方面，必须使计算机完全适应于操作人员。

本章将讨论在设计 and 评价模拟计算机总体方案时所必须加以考虑的许多问题。至于对放大器、乘法器、函数发生器等运算部件，以及它们对模拟计算机准确度的影响，将在后面各章中详细介绍。在开始讨论时，我们假定读者对模拟计算机，特别是对电子微分分析机已经有了一些了解[●]。

几乎任何一部现有的电子微分分析机都能求解适合于在这类计算机上处理的大多数题目。在这些机器中，线性运算部件（加法器、积分器、系数电位器）的准确度，一般比大多数题目所要求的准确度高一个数量级；非线性部件的准确度，虽总比线性部件的差些，但通常仍能满足一般题目的要求。这就意味着，所谓选择最好的计算机，往往只不过是选择从总体观点来看是设计得最

● 不熟悉这种计算机的读者可参阅有关著作，如文献[1、2]，或在阅读本章前先看书其余各章。

好的计算机罢了。所谓“设计”，是指对排题板的布置、电位器的设置方法、题目检验的方法、操作的方便性、可靠性和易于找寻故障等问题的考虑。显然，由于计算机成本的关系，有时要求我们对以上各个方面进行折衷考虑；但是一般来说，如果与使用和维护一台大型或中型计算机在人员时间上的耗费相比较，则两台计算机之间的成本差将是微不足道的。因此，在考虑一台计算机的设计时，千万不能忽视对操作人员是否方便这一点。

1.2 排题板系统

目前生产的中型和大型电子微分分析机全都带有预排题板，这就允许操作人员在远离计算机的地方把题目连接好。这样，当一个排题盘配有許多预排题板（此后简称为排题板）时，就可使计算机得到充分的利用。因为在对某一个题目进行接线时，并不需要占用模拟机本身。对于多班制（即一天24小时内有一个以上的班次）下使用的模拟机，在排题板上操作是一项很重要的工作；因为操作人员用在排题板上的时间常比用在模拟机中其它部件上的时间要多，或者至少要在排题板上进行更多的操作。所以排题板的设计，是设计和评价模拟机时一个非常重要的考虑因素。

用于电子微分分析机的第一套商品排题板装置，组合在 RE AC 100 系列模拟机[●]中（1949年），是根据 Rand Corporation 的建议而制成的。该排题板上有24个标准连接器插头，每个插头有22个触点。排题板可以插入模拟机上的插座盘，后者有24个插座，它们正好与排题板上的连接器插头配合。排题板中连接器上的各个插孔间的连接，是利用不屏蔽的排题塞绳来实现的。这块排题板共有528个孔，分别接至20个放大器、4个随动乘法器和分解器以及其它各种部件。这个装置的主要缺点是：（1）孔的数目有限，因此任一块排题板上可用的运算部件的数量也有限；（2）装置采用对插的形式，在使用多年后会产生接触不良。

● 美国 Reeves Instrument Corporation 的产品。

现在的大多数排题板装置是一块矩形的平板，上面有许多排成矩阵形式的孔。排题塞绳的金属端穿过排题板，与装在模拟机上的排题板装置内的金属接点指相接触。这种排题板的可靠性非常好，而且成本也比最初的 REAC 排题板降低很多。在这种排题板上可以多达 4896 个孔。

1.2.1 金属排题板与绝缘排题板的比较，屏蔽排题塞绳

目前的 PACE[●] 和 GEDA[●] 排题板是全金属的，而 REAC 和 EASE[●] 排题板则是绝缘的。全金属排题板的优点是：当排题板接地时（一般总是这样做的），任何排题塞绳的泄漏电流都是到地的，这样的泄漏电流一般是无关紧要的，因为我们所不希望发生的是各端子之间的漏电。全金属排题板的另一个优点是便于在其上使用屏蔽排题塞绳。这种塞绳的屏蔽上装着一个金属套，当塞绳端插入排题板时，这一金属套就成了塞绳该端的外层接头。EASE 1100 系列的排题板采用了网状结构，在金属网格内填有塑料嵌入物。这样，每个孔就可依靠接地的金属网与它旁边的孔相互屏蔽，而孔的本身却被绝缘材料包围着（见图 1.2.1）。此外，还利用弹簧与排题塞绳的屏蔽套接触。所以，这种排题板装置综合了金属排题板和绝缘排题板的优点；当然，它的成本也要高得多。

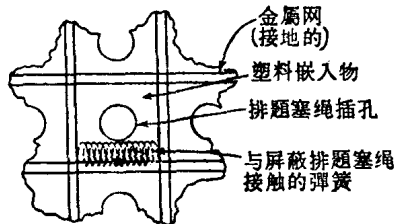


图1.2.1 EASE 排题板的结构

比较老的 EASE 1032 型、GEDA L-3 型模拟机以及 REAC 400 系列模拟机（1955 年），都采用了全绝缘材料构成的排题板。这种绝缘排题板与金属排题板相比较，有这样的一个优点：当排题板已经插入机器而借排题塞绳改变题目的连接时，不会发生低

● 美国 Electronic Associates, Inc. 的产品。

● 美国 Goodyear Aircraft Cor. 的产品。

● 美国 Berkeley Division, Beckman Instruments, Inc. 的产品。

阻抗电压源与地短路事故。除 REAC 排题板以外，它們都有一个缺点：各端子之間可能漏电。REAC 排题板是利用印在其正、反表面的接地金屬格子来防止这种漏电的（因为比較严重的漏电都发生在表面，所以可以用接地的金屬格子来防止）。絕緣排题板的另一个缺点是不可能使用屏蔽排题塞绳。

在考虑排题板时，最好牢記下列各点：

1. 孔間的金屬网要接地，以防孔間漏电 实践証明，在全絕緣的排题板上，漏电問題并不显露出来；但在恶劣的潮湿条件下，它是可能存在的。

2. 每个孔的外圍四周要絕緣，以防排题板未从机器上卸下而改变排题塞绳的连接时发生瞬时短路 对全金屬的排题板装置，可以在改变排题板上的连接时断开接至排题板的参考电压，或者經常保持最后连接塞绳的带电端，借以防止短路現象。用全金屬排题板时，短路的可能性是必然存在的，但并不是一个很严重的問題。

3. 排题塞绳要屏蔽 这一措施的优点是可以几乎完全消除模拟机各部件間的相互干扰，其缺点是它比不屏蔽的排题塞绳粗，同时也增加了对地电容。对于大多数題目來說，屏蔽塞绳并不是必要的，因为这些題目的解答頻率很低，不致于使排题塞绳間的耦合变成一个严重的問題。然而，当迴路中可以組成沒有积分器的反饋环路时，由于排题塞绳間的耦合，可能会、有时也确实会引起高频振蕩。当有高频訊号存在时，例如在时分割式乘法器中，即使已通过滤波使高频訊号减至很低的电平，最好还是用屏蔽的排题塞绳。当放大器被設計得能承受相当大的容性負載时，屏蔽塞绳所增加的对地电容是不会引起問題的。然而，当电位器以屏蔽的排题塞绳为負載时，却可能产生一些相移。例如，100 仟欧的电位器設置在 0.5 时，輸出阻抗将为 25 仟欧。假使这时輸出滑动臂的負載是 100 微微法（如在将几呎长的屏蔽塞绳接至电位器輸出端的情况中），則在下式所給出的頻率 f_0 下，电位器将

产生 45° 的相移:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 25 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12}} \approx 64 \text{ 千赫}.$$

至于在较低频率下的相移,可近似地按 f/f_0 (弧度) 来计算。因此,在 100 赫时的相移将为 $1/640$ 弧度,或约有 0.1° ; 这可能比运算放大器本身在同一频率下所引起的相移要大得多。然而,对大部分题目来说,上述相移仍可忽略不计,所以一般还是希望用屏蔽的排题塞绳。但是在大多数情况下,这并不算是一个重要的特点。

1.2.2 一般的排题板布置

通常排题板上有着许多孔,用以连接所有的运算部件。这些孔可连接运算放大器输出端、输入电阻、相加点、放大器栅极、初始条件电路、继电器控制电压、电位器输入端和输出端、参考电压 (通常为 ± 100 伏)、乘法器和函数发生器输入端和输出端、二极管、记录仪输入端、开关以及差动继电器。此外,还有一些复接插孔和通过中继线与其他模拟机相连的外接插孔等。在此不拟详细描述商品排题板的编排,而只准备讨论一下排题板布置方面的一些重要特点和趋势。

最初的 REAC 100 系列模拟机所采用的排题板布置,是将相同的运算部件成组地安排在一起。排题板的上部是 6 个积分器和 6 个反号器,中部是 6 个加法放大器和 22 个系数电位器,而下部是 4 个随动乘法器和分解器。在这种编排下,排题人员可以很快地从排题板上找到所需要的任何运算部件。PACE 16-31R 型、GEDA L-3 型和 EASE 1032 型模拟机的排题板,也采用了同样的部件分组原则,只是稍有不同而已。

但是,在排题板上编排实际的题目时,各种运算部件在解题电路图中是夹杂在一起的。例如,系数器 (电位器) 就常常分布在一些放大器之间。这样,在按上述原则布置的排题板上排题时,就需要有很多的排题塞绳从放大器部分接至电位器部分。于

是，在求解相当大的题目时，排题板上将插满了排题塞绳。事实上，在很多情况下，这种排题板上的排题塞绳常密得使人难以看清排题板的板面。当然，在这方面最终起决定因素的还是排题塞绳与排题板上孔間空隙的相对大小。为了避免这个问题，近来趋向于把电位器、乘法器和函数发生器分布在各放大器之間，使得求解典型题目时的大部分連接只在排题板上相邻孔之間进行。在使用这样的排题板时，可以采用“短接插塞”来进行連接，以代替大量的排题塞绳。这种短接插塞也可用来将放大器接成积分器或加法器。現以一简单的例子来说明这种排题板的布置原則。設有下列质量-彈簧-減震器的方程式：

$$m\ddot{y} = -c\dot{y} - ky,$$

式中 $\dot{y}$ 表示 dy/dt ， $\ddot{y}$ 表示 d^2y/dt^2 。图 1.2.2 中画出了求解这个方程式的电子微分分析机电路。图 1.2.3 中則示出了在 PACE 16-231R 型模拟机上求解这个方程时采用上述原則的排题板編排，应注意到，除了图上沒有画出的初始条件連線外，必須連接七条連線；但其中只有一条連線必須用排题塞绳，而其余六条連線都是用的短接插塞。因此，排题板上非常清晰，即使在题目已經連好以后，也能够很容易地看清板面。EASE 1100 系列模拟

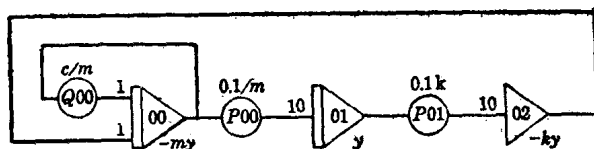


图 1.2.2 求解方程式 $m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0$ 的电路

机的排题板布置，也采用了同样的原則，只是沒有达到这种清晰程度。

另一方面，在这种排题板上排题时，还必须很小心地为特定的放大器选定适当的电位器。可是由于事先很难預計到各种情况，电位器与（或）放大器就有可能处于不太恰当的位置上。因此，最近的 REAC 400 系列和 GEDA A-14 型模拟机排题板的

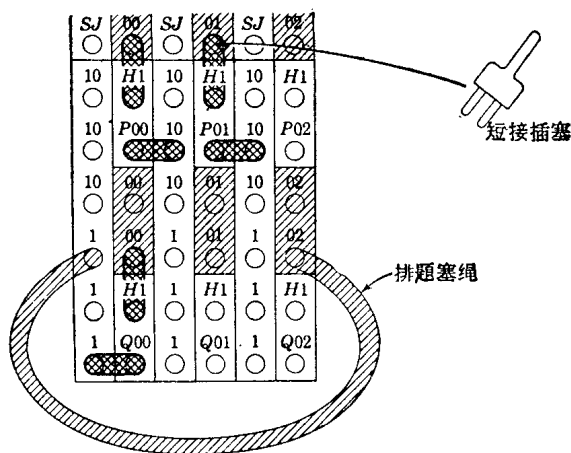
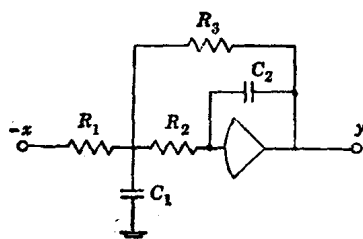


图1.2.3 图1.2.2所示电路在 PACE16-231R 型
排题板上的连接

布置，又保留了许多按它们以前形式分组的部件组。任何上述模拟机都可配备一些已经布置好的排题板，它们对编排某些类型的题目特别容易。当然，任何设计好的排题板布置都应该实地编排一些典型的复杂题目来进行试验，只有用这种方式才能确切地评定这块排题板是否使用方便。

关系到排题板布置原则的另一个普遍问题，是简单性与灵活性这一矛盾的问题。特别是对放大器的输入，究竟应使它们具有固定的增益（通常是1或10），还是应使排题人员能大体上选用任意的输入阻抗或反馈阻抗呢？还有，究竟阻抗应装在排题盘后面通过排题板孔来选用，还是应作为外部元件而插在排题板的前面呢？比较老的 GEDA L-3 型排题板非常强调灵活性，因此它备有许多外部插入元件。因为在许多情况下，利用由电阻和电容组成的复杂输入网络和反馈网络，就能用单级放大器电路来模拟二阶和更高阶的系统，所以毫无疑问，对于同样的题目，在 GEDA L-3 型排题板上求解时所需放大器的数量较少；同时，在许多情况下，其电路也比较简单（虽然并非经常是如此的）。为了便于比较，在图 1.2.4 中示出了模拟二阶系统的单级放大器电路和三



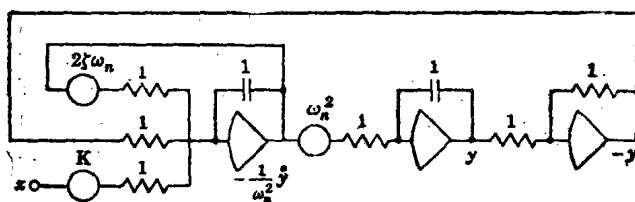
$$\frac{y}{x} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1}$$

$$\text{式中 } p = d/dt, K = \frac{R_3}{R_1},$$

$$\zeta = \frac{C_2}{2} \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) \sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2},$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

注：对给定的 K 、 ζ 、 ω_n ，为了求得 R_1 、 R_2 、 R_3 、 C_1 和 C_2 ，需要进行复杂的计算。



注：在 K 、 ζ 、 ω_n 与电位器设置之间有简单的关系式。为了便于进行标度变换，图中设置在 ω_n^2 的一个电位器可以用两个都设置在 ω_n 的电位器来替代。

图1.2.4 模拟二阶系统的单级放大器电路与
三级放大器电路的比较

级放大器电路。由图中可见，单级放大器电路的元件数量较少，但元件值与题目参数之间的关系非常复杂。所以对排队人员来说，单级放大器电路实际上是更为复杂的。此外，利用外部元件还有下列缺点：（1）排队板上的接线很杂乱；（2）当将排队板作为题目的一部分存放起来时，大量的精密元件也就一起被“冻结”了起来。另外，采用了外部运算元件还使题目检验更为困难。这些缺点在 EASE 1032 型排队板上都表现得很明显，因为这块排队板必须使用大量的插入元件。

由于上述这些原因，后来的商品模拟机中的排队板布置，都牺牲了使用外部插入元件而带来的灵活性，使放大器具有固定增