

精益设计

Lean Design

(日) 丹波山 次郎 · 著

彭 刚 · 译

活学活用晶体管

电流反馈型放大电路的分析
差动放大器的补偿与偏差
误差放大器的动作
电流镜电路的动作



增加限流电阻会怎样
通过基极电压调整集电极电流很难
从特性图求工作点
双极型晶体管模型的应用
共发射极电路的放大作用



科学出版社

精益设计

活学活用晶体管

〔日〕丹波山 次郎 著

彭刚 译

科学出版社

北 京

图字：01-2013-1085号

内 容 简 介

随着数字技术的发展,以及电路的模块化,能够理解电路内部工作原理的技术人员越来越少,本书正是以此为契机,介绍晶体管的各种使用技巧,主要内容包括使用晶体管点亮LED、从电压/电流看晶体管的工作方式、通过电流与电压的关系来求工作点、双极型晶体管的特性及其动作、晶体管放大电路的动作、晶体管的种类与特征、晶体管基本电路集、耳机放大器的制作与各部分的动作、实验用调节器的制作及其各部位的动作等,旨在让年轻的技术人员对晶体管技术产生兴趣。

本书可供高等院校计算机、通信、电子信息、自动化等专业师生阅读,也可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

活学活用晶体管 / (日)丹波山次郎著;彭刚译. —北京:科学出版社, 2015.7

ISBN 978-7-03-044937-5

I. 活… II. ①丹…②彭… III. 晶体管 IV. ①TN32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第129258号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:魏 谨
责任印制:赵 博 / 封面设计:张鹏伟

北京东方科龙图文有限公司制作
<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年7月第 一 版	开本: 720×1000 1/16
2015年7月第一次印刷	印张: 12 1/2
印数: 1—3500	字数: 212 000

定价: 39.00元

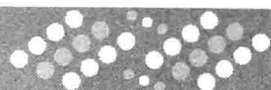
(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书主题是晶体管技术，即使现在，晶体管仍然是电子领域的主要角色，还看不出有衰退的趋势。另一方面，由于IC的发展，IC设计者以外的一般技术人员使用个别晶体管进行电路设计的机会急剧减少。另外，数字电路技术的发展将信号以数字方式处理，不再需要在意电气状态。但是，运用电子技术时熟练使用晶体管的技能必不可少。分析IC内部的晶体管，稍作变更追加外接电路，创造更高的性能，或者实现更难的功能，都有可能。

现在，由于企业的技术人员更迭，即使是实际应用的标准电路，能够理解其作用的人也难以找到，这种状况已经出现。为了让那些也许忘却了的技术重新浮现，让年轻一代对晶体管技术产生兴趣，执笔编写了本书。

丹波山 次郎



第1章 晶体管学习的建议	1
1.1 学习晶体管的必要性	1
1.2 晶体管到底是什么?	2
1.3 晶体管的基本作用: 开关作用和调节作用	5
1.4 离散晶体管的用武之地	8
1.5 只有三个参数——晶体管难于运用?	11
1.6 晶体管究竟为何物?	12
1.7 可使用界限值“绝对最大额定值”	17
1.8 表示个性的“电气特性”	20
第2章 使用晶体管点亮LED	23
2.1 双极型晶体管 (bipolar transistor) 的种类及构造	23
2.2 晶体管的基本原理	24
2.3 如何点亮LED	25
2.4 增加限流电阻会怎样?	27
2.5 只用1节电池会怎样呢?	28
2.6 使用晶体管的点亮电路	29
第3章 从电压/电流看晶体管的工作方式	31
3.1 用1节电池为基极提供电流	31
3.2 调节亮度	32
3.3 使基极电流连续变化	33
3.4 调光电路的各部分电压与电流	35
3.5 基极电流与集电极电流的关系	36
3.6 通过基极电压调整集电极电流很难	38
3.7 集电极电压上升则集电极电流下降	39
3.8 控制发射极电位	42
3.9 电压可变型LED调光电路	44
3.10 基极电压的范围广	45

3.11 不是因为晶体管自身发生变化	47
--------------------------	----

第4章 通过电流与电压的关系来求工作点 ————— 49

4.1 最大额定值及电气特性	49
4.2 晶体管的特性曲线	52
4.3 LED的工作点的确定	53
4.4 LED点亮电路的输出特性	54
4.5 从特性图形求工作点	56
4.6 求LED点亮电路的工作点	59
4.7 依特性图进行动作解析	60

第5章 双极型晶体管的特性及其动作 ————— 65

5.1 双极型晶体管的特性	65
5.2 画负荷线进行分析	66
5.3 二极管的模型化	68
5.4 确定发光二极管的限流电阻	69
5.5 双极管的结构与动作	71
5.6 晶体管大信号模型	72
5.7 注意模拟和实物间的差别	74
5.8 双极型晶体管模型的应用	76
5.9 绘制LED驱动电路的负荷线	76
附录A 不要模仿IC	80

第6章 晶体管放大电路的动作 ————— 83

6.1 用晶体管放大	83
6.2 线性放大必须有偏压	85
6.3 共发射极电路的放大作用	87
6.4 必须注意温度特性与差异性	89
6.5 共集电极电路的放大作用	90

6.6 电流反馈	93
6.7 电流反馈型放大电路实验	95
6.8 电流反馈型放大电路的分析	96
6.9 反馈型偏压AC放大电路的输出波形	98
6.10 电压可变型LED调光电路	100
附录B 简易音频测定系统	103

第7章 晶体管的种类与特征 109

7.1 双极型晶体管	109
7.2 金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)	111
7.3 结型FET (JFET)	114
附录C 空穴与耗尽层	116

第8章 晶体管基本电路集 119

8.1 继电器驱动	119
8.2 电流增压器 (简易电源)	120
8.3 纹波滤波器	122
8.4 简易调节器	123
8.5 MOSFET 驱动电路	125
8.6 低速电平转换器	126
8.7 电平检测电路	128
8.8 音频静音电路	129
8.9 缓冲放大器——单体发射极跟随器	131
8.10 缓冲放大器——SEPP	132

第9章 耳机放大器的制作与各部分的动作 135

9.1 首先试制作实用性的电路	135
9.2 耳机放大器的制作	136
9.3 放大动作的概要	142



9.4 差动放大电路的动作	146
9.5 差动放大电路的实验	149
9.6 差动放大器的补偿与偏差	151
9.7 电流镜电路的动作	155
9.8 第二段的电流放大段的动作	157
9.9 SEPP输出段的动作	159
9.10 按顺序决定常数的电路	162
附录D 负反馈	164

第10章 实验用调节器的制作及其各部位的动作——167

10.1 实验用调节器的制作	167
10.2 调节器部分的动作	172
10.3 基准电源的动作	175
10.4 误差放大器的动作	180
10.5 达林顿电流缓冲的动作	182
10.6 垂下型过电流保护电路的动作	185

参考文献	189
------	-----

第1章 晶体管学习的建议

1.1 学习晶体管的必要性

● 集成电路（IC）由晶体管组成

不管时代如何进步，电压、电流、电阻、电容器、线圈等知识在集成电子工业中是不可缺少的。除此之外，还有有源元件等，晶体管至今仍是电子电路里的主角。

的确，随着集成电路越来越发达，晶体管作为大明星登上电路大舞台的机会越来越少。但是，众多的晶体管却是组成集成电路不可缺少的要素。

● 了解晶体管，就能了解集成电路这个“黑盒子”

通用集成电路作为传统产品被广泛运用，其中有不少是20年前甚至30年前开发的。

当时，开发这些传统产品的时候，一般都要先理解等效电路内部的晶体管的
不了解集成电路的内部结构 = 不了解内部现象

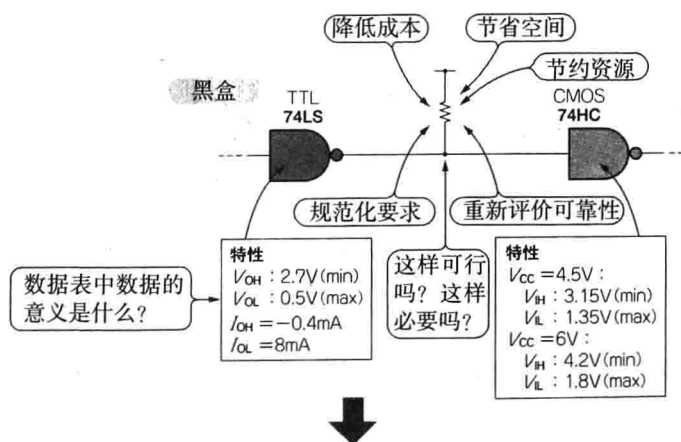
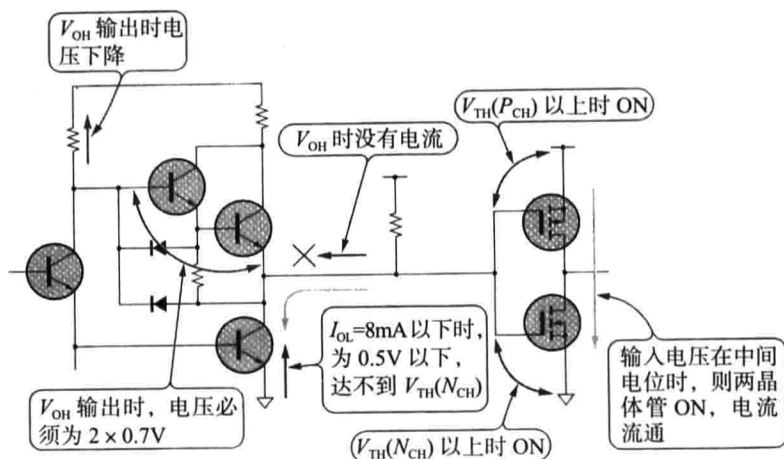


图1 了解集成电路内部的晶体管的作用，让晶体管在新领域的运用成为可能

理解 IC 内部的晶体管的运作方式, 抓住电路设计重点



续图1

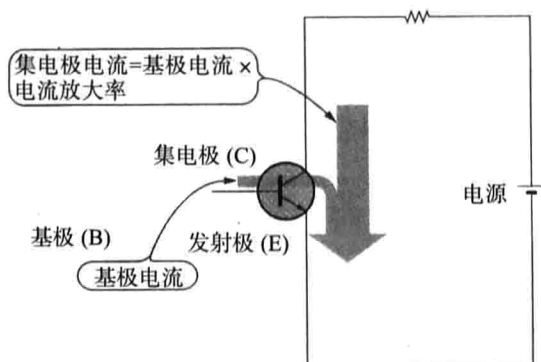
工作原理才能加以运用。而现在, 通过研究晶体管, 一直被视为黑盒子的集成电路在新领域的运用将变为可能。

晶体管相关的知识是当今时代的基本知识, 本书将介绍晶体管的使用方法。

1.2 晶体管到底是什么?

● 晶体管的种类

简单地说“晶体管”是指双极结型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT), 如图2所示。



- 利用基极电流控制电源电流
- 只在集电极和发射极之间施加电压, 那么什么都不会发生
- 但是即使是很小的基极电流, 也会引起很大的集电极电流
- 通常, 集电极电流要比基极电流大数十倍乃至数百倍

图2 双极型晶体管的组成

广义上也把场效应晶体管 (Field Effect Transistor, FET) 等归到晶体管一类。场效应晶体管也分为绝缘栅场效应管 (MOS管) 和结型场效应管两种 (图3)。

另外，也有常运用于高功率开关的IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极型晶体管)、运用于高频率的HEMT(High Electron Mobility Transistor，高电子迁移率晶体管)等。

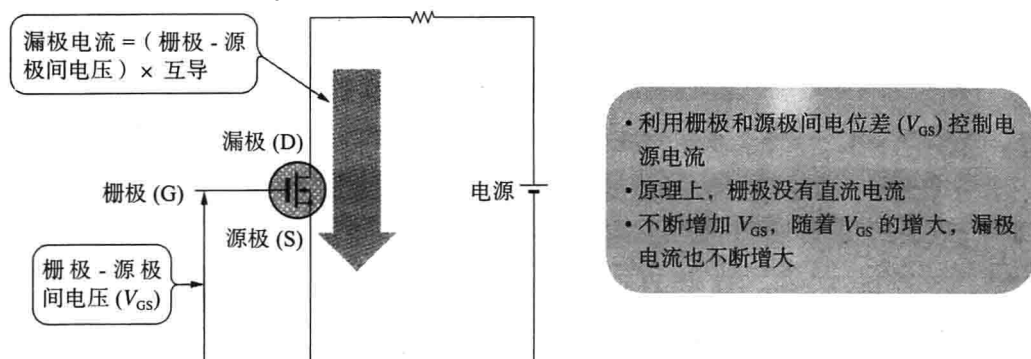


图3 MOS型场效晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor: MOSFET) 的组成

● 晶体管的三个端子

电阻器、电容器和电感器都是两个端子，而晶体管却有三个端子，特殊的晶体管甚至有更多的端子，这就是晶体管的特征。

● 没有晶体管就没有电子电路

没有晶体管，电子电路什么也做不了，此话并不夸张。

如图4所示，只靠无源元件(L、C、R)几乎不能发挥任何作用。

电子电路主要是处理电流和电压的关系。但是，只有无源元件也只能按照基本法则实现电流和电压的关系。

例如，“给定10V的电压要使电流为1A”，只要有10Ω的电阻就可以实现目标。

但是，“把电压升到20V，要使电流变为0”，要怎么组合电阻才可以实现这个目标呢？

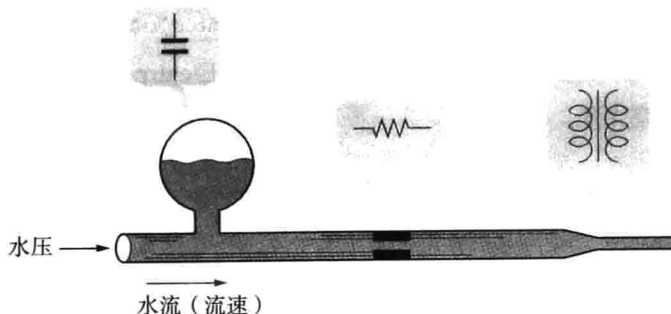
如果硬要说的话，利用像保险丝之类的特殊的电阻（现在已经不再称为“电阻”）或继电器那样的机械机构或许可以实现。但是，如果单纯利用电阻、电容器和电感器是不可能实现的。

这时，就是晶体管大展身手的时候。

● 晶体管发挥开关的作用

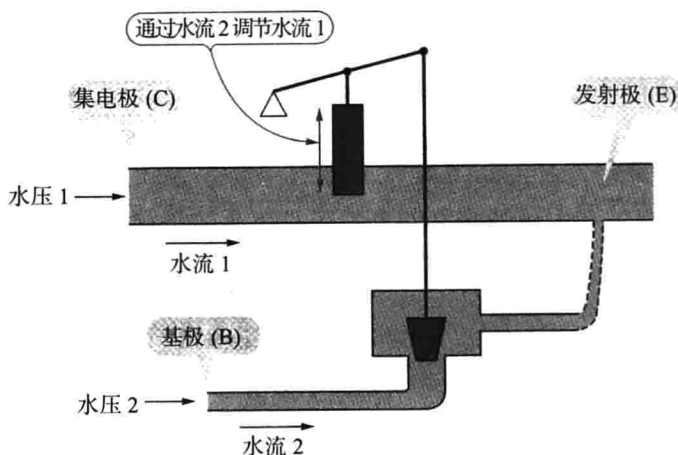
晶体管的开关作用，即晶体管能接通（ON）、切断（OFF）两个端子之间的电流和调节电流。

这种开关和调节的机能就是可通过第三个端子从外部随意控制电流。



事先可以确定水压与水流的关系，但是一旦确定两者形成固定关系，水压一定，就无法根据状况改变水量

(a) 无源元件组合的情况



电路构建后，为了任意调整水压和水流的关系，需要像阀门那样的部件。在电子电路中，开关和变阻器相当于阀门。开关和变阻器由手动操作，而设计一个新的端子，通过这个端子的电流实现阀门的调节，这样的器件就是晶体管。因为有第三个端子，众多的晶体管就可以进行组合

(b) 使用晶体管时的情况

图4 利用晶体管可以做什么？只有无源元件能力有限

● 联合使用晶体管可以实现复杂的控制

利用3个端子，联合使用两个以上的晶体管，就可以构成相互控制的大规模的电路系统。这种电路系统可以实现电阻和电容器组合不能实现的功能。

由大量晶体管组成的IC正是有效利用了这种性质。

运算放大器和音响放大器等模拟IC是在主板上配置数个至数十个晶体管，再根据电路布线实现的。电阻和电容器等也可以在主板上设置。

在数字IC中，下面将提到的使用MOS型场效应管（FET）的CMOS

(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 型数字IC数量众多。

IC根据晶体管数有不同叫法(表1)。一般,集成度达到大规模程度的集成电路统称为大规模集成电路(LSI)。最近,还出现了使用数亿个元件的电脑CPU。

表1 IC的名称和组成晶体管数

简称	英文	中文	晶体管数(概略)
SSI	Small Scale Integration	小规模集成电路	100个以下
MSI	Medium Scale Integration	中规模集成电路	100 ~ 1000个
LSI	Large Scale Integration	大规模集成电路	1000 ~ 10万个
VLSI	Very-Large Scale Integration	超大规模集成电路	10万 ~ 1000万个
ULSI	Ultra-Large Scale Integration	超超大规模集成电路	1000万 ~ 10亿
GSI	Giga- Scale Integration	超特大规模集成电路	10亿个以上

1.3 晶体管的基本作用：开关作用和调节作用

● 放大作用和开关作用

晶体管作为电流“阀门”的作用已经在前面进行了说明。

水阀大致有以下两种作用：

(1) 像自来水管的水龙头一样，可以任意调节水流。

(2) 像洗手间洗手盆的水栓和浴缸底部的塞子一样，打开能排光所有水，塞住便能储水。

晶体管也一样，有以下两种作用：

(1) 像变阻器一样，能调节电流。

(2) 像开关一样，能接通或断开(ON/OFF)电流。

第一个叫放大作用，第二个叫开关作用。

一个晶体管可以有以上两种功能，这两种功能要学会区分使用。只是使用情况因特性而异，有时适用，有时不适用，所以如果希望发挥高性能，就要根据用途选择合适的晶体管。

发挥晶体管的开关作用，可以实现数字电路。

● 模拟和数字

像“放大”和“开关”这组词语一样，“模拟”和“数字”是一组对比。

模拟，是指把连续的量当做连续的信号进行处理；而数字，是把分散的数值

进行变换处理。

● 通过电子电路处理数值

在电子电路中，处理量的值是与电压和电流的值一一对应的。例如，把某个数值0.2用电压0.2表示。

如表2所示，在进行数字处理的时候，把给定值分为“0”，“1”，“2”3个电平。

如果用电子电路简单表达这种规则，就是 $0 \rightarrow 0V$ 、 $1 \rightarrow 1V$ 、 $2 \rightarrow 2V$ ，这样一一对应。

表2 模拟数值与数字数值

使用的“量”	模拟数值	数字数值（小数点以下四舍五入）
0.2	0.2	0
0.6	0.6	1
1.5	1.5	2
2.3	2.3	2

● 通过晶体管的开关作用实现数字电路

如果把这种对应控制分为两组，则数值对应的是0V和1V，或是0V和2V，这样只需用ON和OFF就能表示。为了能用电气电路实现ON/OFF开关的功能，就要用到晶体管。

大致说来，放大作用和模拟电路在功能方面能相互配合，开关作用和数字电路能相互配合（图5）。

如果像上述的3电平数字电路一样用晶体管造出0V和2V中间的电压1V，那么根据方法的不同就可能变成放大作用。另外，模拟电路中也存在着开关。

不管是放大作用还是开关作用，都和晶体管的结构无关，而只和使用方法有关。

这就和同样有三个电极的半导体闸流管类有很大不同，因为这类闸流管在原理上只有开关作用。

图5以鱼和煤油物物交换为例，说明放大作用和模拟电路、开关作用和数字电路之间的关系。

我们假设：鱼和煤油1：1的比例交换，也就是1kg鱼换1L煤油。

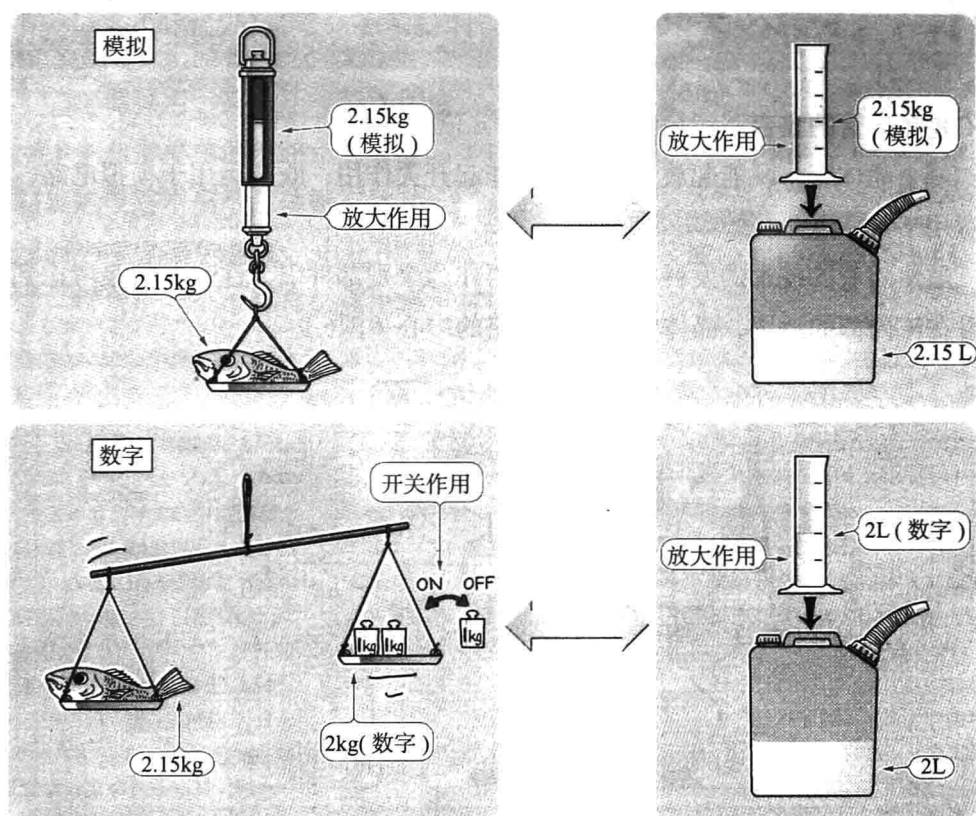


图5 放大作用和开关作用、模拟量和数字量

在图“模拟”中，弹簧秤起放大作用，它可以称出鱼的重量约是2.15kg。因此，根据1：1的交换比例，要用量筒量2.15L煤油。

但是，这个时候，称鱼的弹簧秤和量煤油的量筒都存在误差。实际上，要正确地称出鱼的重量和准确地量取煤油都是相当困难的事。

在图“数字”中，尝试只用天平和1kg砝码称鱼的重量。在这里，增减砝码，就相当于开关作用。因为只有1kg的砝码，所以我们只能知道鱼的重量是多于2kg而少于3kg。在此，我们舍弃不满1kg的部分，并和2L煤油交换。

在量取煤油的时候，用1L的容器连续量两次，这样就存在着数字化处理。

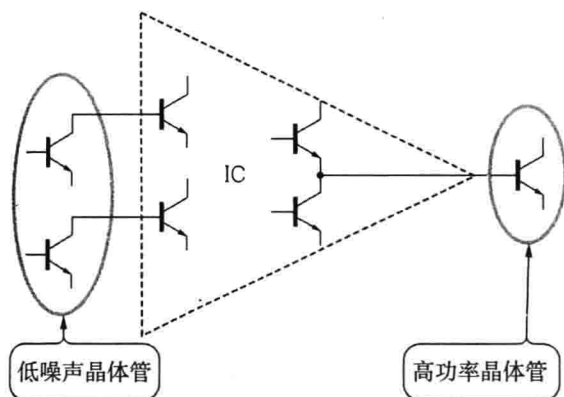
由于误差，对鱼的重量取整，即得鱼的重量为2kg。根据情况，也会出现近1kg的误差。但是在一般的数字处理中，电路的组合都是尽量避免这种误差。

1.4 离散晶体管的用武之地

● IC是晶体管的集合

一个晶体管，既能起放大作用，又能起开关作用；既能运用于模拟电路，又能运用于数字电路。

虽然随着IC技术的发展，晶体管不再作为个别部件引人注目，但是考虑到晶体管在IC内部的运用，晶体管依然是电路的中心（图6）。



IC的构成主要是晶体管，也就是通常的输入输出与IC内部的晶体管紧密相连。这部分的性能由晶体管的能力决定，因此，根据外观，追加高性能晶体管，就可能提高整体的性能。电源或变频器用时，很多IC都是以外接大型功率晶体管为前提的

图6 外接晶体管高性能化

● 根据用途，晶体管也可以单用

最近，作为个别部件使用的晶体管越来越少了，其中，作为部件使用的晶体管有下面4种用途（图7）：

不能使用IC的领域可以用离散晶体管替代

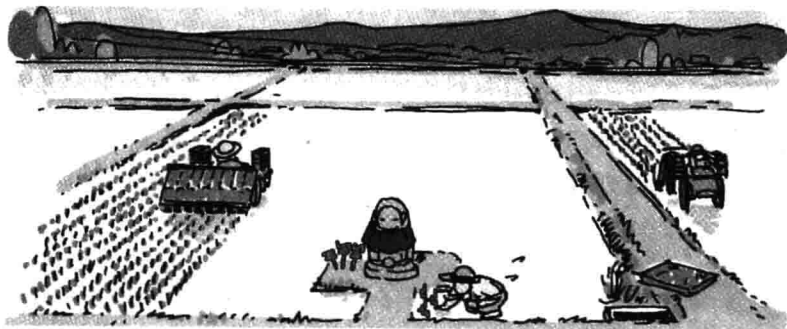


图7 大型机械不能进入的地方单独处理

- (1) 主电路。
- (2) 高频电路。
- (3) 低噪声、高耐压等特殊用途。
- (4) 非常简单的电路。

● 易发热电路中离散晶体管有优势

因为主电路的热量、电压/电流大，所以很难组装成一起形成小型电路。有时候，特意把一个个部件分离出来更有优势（图8）。

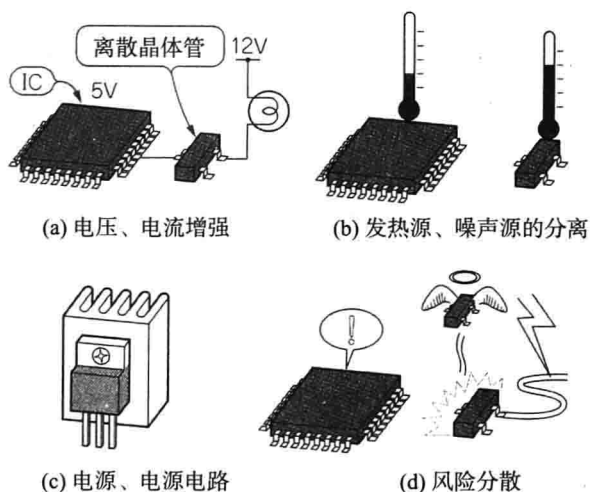


图8 不进行IC化的优点

► 以电动轮椅为例探讨晶体管的使用

例如，像电动轮椅这种用于行走的高输出输入的电动驱动，要使用离散晶体管或晶体管模块。但是，如果是小型、中型的电动机，除离散晶体管外，驱动专用IC也是不错的选择。

图9是电动轮椅的电路模式图。通览全图，下列部分有分立电路的用武之地。

- (1) IC难以运用的大功率、大电流、大电压电路。
- (2) 混用两个以上电源电压的部分，以及两个电源电压之间的过渡部分。
- (3) 被+5V或+3.3V额定电源电压稳定化的电路，或用于稳定化的电路。
- (4) 电源ON/OFF或异常时，必须由不确定电源电压供电的电路。
- (5) 必须和电路部分分离的部分。
- (6) 难以IC化、宽带、低噪声、低失真的电路。
- (7) 没必要用IC的小型设备。