

# 目 录

## 著者序

<b>第一章 功率图</b> .....	1
1.1 功率图.....	2
1.2 功率图的分析.....	5
1.3 电路.....	7
1.4 机械系统.....	13
1.5 转换元件.....	16
1.6 有源转换元件.....	17
1.7 大系统举例.....	18
1.8 晶体管电路.....	21
习题.....	23
<b>第二章 键合图</b> .....	27
2.1 因果律.....	27
2.2 因果律路径.....	33
2.3 简单回路法则.....	35
2.4 回路法则在简单网络中的应用.....	36
2.4.1 机械系统举例.....	38
2.4.2 磁路.....	40
2.5 实例研究：液电系统.....	42
习题.....	46
<b>第三章 开口回路</b> .....	51
3.1 全回路法则.....	51

3.2 运算放大器	55
3.3 RC滤波器	57
3.4 多匝变压器	58
3.5 模型的扩展	60
习题	64
<b>第四章 复杂系统</b>	65
4.1 矩阵分析	65
4.2 具有S项的矩阵	71
4.3 矩阵分解	74
4.4 文氏电桥振荡器	75
<b>第五章 状态变量</b>	79
5.1 状态变量方程组	79
5.2 数值解	81
习题	86
5.3 状态变量方程组的产生	86
5.3.1 直接代数组合法	88
5.3.2 回路法则组合法	89
5.3.3 状态变量方程组的矩阵组合法	95
5.4 输出方程的组合	97
5.5 状态方程组的矩阵组合法的应用	98
习题	104
<b>第六章 场</b>	107
6.1 将系统分解为场	107
6.2 电容场	109
6.3 电感场	111
<b>第七章 非线性系统和调制元件</b>	113
7.1 非线性储能元件	114

7.1.1 非线性电容	114
7.1.2 非线性电感	117
7.2 非线性耗能元件	118
7.2.1 非线性电阻	118
7.3 实例研究: 汽枪的动力学分析	119
7.4 调制元件	125
7.4.1 流量计	125
7.5 非零 $F$ 情况	127
7.5.1 具有输出电压控制的文氏电桥振荡器	129
7.6 机械连杆机构的调制变换元件	132
7.6.1 质量-弹簧振荡器	136
7.6.2 汽车的悬挂系统	138
<b>参考文献</b>	142
<b>附录 A 矩阵运算程序库</b>	143
<b>附录 B 状态变量方程组的积分程序</b>	161
<b>附录 C 因式分解逆变换</b>	170

## 第一章 功率图

能量是系统中的基本量。它从一个或多个源流入系统，并暂时贮存在系统元件中，或作为热量部分地耗散在阻抗上，最后到达“换能器”或“负载”产生预期的效果。有时能量在储能元件之间来回振荡，这可能是好事也可能是坏事，取决于应用场合——在振动器中是好事，但在电梯或升降机中却是坏事。

功率是能量流的速率，它是一个无方向的标量。尽管如此，我们仍常用功率流来表示能量流。本书中将用功率箭头来表示能量流的速率和方向。

采用各个点的功率值就可对系统的运行作很广义的描述。比如，若已知在一个机械连杆机构中无能量损失，则流入的功率流应等于流出的功率流，产生输入功率的输入力与输入速度之积应等于产生输出功率的输出力与输出速度之积。输入速度和输出速度通常都比较容易测量，它们的比值也可以求得。由此可以容易地计算出比较难以测量的输入力与输出力之比。

需要指出的是，机械连杆机构的具体情况是不需要知道的，它可以有任意的复杂度。

遗憾的是功率不便于直接测量，人们也更喜欢用“势”变量和“流”变量，如电路中的电压和电流，机械连杆机构中的力和速度，液压和气动系统中的压力和流。尽管如此，当人们想用数学方程来描述系统结构图这类困难问题的时候，可以使用一种以功率为基础的原理图来表示各个量之间关系的基本性质。如果原理图中加入势和流变量，图形就更完整了。

## 1.1 功率图

一般说来，“势”和“流”用于描述基本变量。电压、力、力矩及压力是势变量，而电流、速度、角频率及液体流量则是流变量。所以在任何系统中  $e$  和  $f$  都表示基本变量，并可以相同的方法用它们来标注所有的部分。然而人们往往喜欢用他们最熟悉的符号，所以本书中在一般系统中用  $e$  和  $f$ ，而在特殊例子中则用  $v$  和  $i$  或  $F$  和  $V$ 。

让我们用以下例子来说明这个概念。设电机以每秒  $\omega$  弧度的速度驱动一个机械旋转负载。负载的转动惯量为  $J$ ，轴承的摩擦阻力为  $R_d$ ，需要力矩  $T_l$ ，电机的电枢阻抗为  $r_a$ 。

图 1.1 示出了该系统，要求建立该系统的模型。

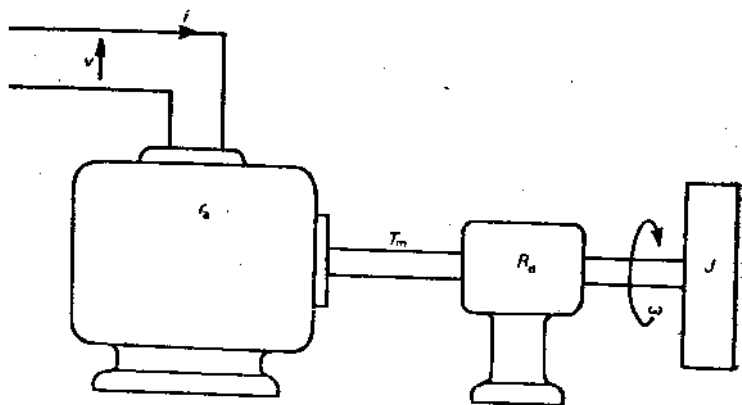


图1.1 电机驱动

第一步，如图 1.2 所示，画出表示系统各重要元件的示意图。在电机的接线柱上加上电压，则电枢中有电流通过。（由于电路很明了，表示十分方便。）电流产生一个常系数的力矩  $T_m$ ，

在这里系数可标为  $k_1$ ，但这部分比较难以说明；我们在图上必须简单地写出方程式并指明力矩是由转轴传动的。

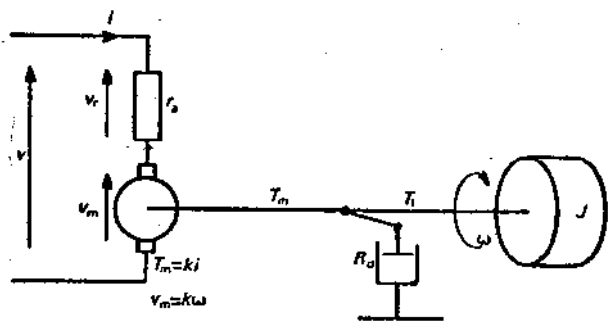


图1.2 电机驱动示意图

机械方面，一部分力矩损失在轴承阻抗的摩擦力上，剩余的力矩  $T_1$  用来使惯性负载加速。当负载以角速度  $\omega$  转动时，电枢中将产生一个与速度成正比的电压，其比例系数为  $k_2$ 。该电压将抵抗外加电压，但电流  $i$  引起在  $r_s$  上的压降除外。

示意图还不很明确，要从中观察势和流之间的相互作用还比较困难，尤其是机械部分。在开始建立功率流图之前，还是先来看前面提到过的用功率来简化的例子。例如  $r_s$  和  $R_d$  中包括了机电结点中电的和机械的损耗，则流入结点的功率应等于流出的功率。流入的电功率为

$$P_e = v_m i$$

流出的机械功率为

$$P_m = T_m \omega$$

故有

$$v_m i = T_m \omega = \frac{v_m k_1 i}{k_2}$$

因此  $k_1/k_2 = 1$ ，或  $k_1 = k_2$ 。用  $k$  置换  $k_1$  和  $k_2$ ，得

$$\begin{aligned} T_m &= ki \\ v_m &= k\omega \end{aligned} \quad (1.1)$$

可以看出两个关系式中的常数必须相同。

功率图如图 1.3 所示。功率从电压源流入，其方向如半箭头所示。并流向电机的电枢阻抗和机电结点。电流  $i$  作为这部分系统的公共变量，也是一个连接元件或“结点”元件，它表示两种基本的势和流结点中的一种，这些结点在图中占主要部分，并称之为“结点结构”。元件之间的连线称为“键”，因为功率图类似于化合物的结构图，其中原子间的连线表示化学键。

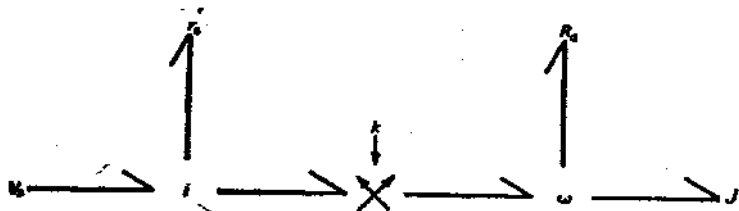


图1.3 电机驱动动的功率图

功率无损失地通过结点，并进入机械部分。这里  $\omega$  是联接负载的机械阻抗的公共变量。箭头表示有些功率在阻抗上耗散，剩余的加入负载的转动能量。图中使用的半箭头的特殊意义在以后讨论。

功率图简单明了。和信号流图等不同，各元件与它们的图示之间有一一对应的关系，这些对应关系有助于图形与系统的联系。

从现实情况来看，图形过于简单了一些，因为它明显地只表示了两个变量：电流和转速。下一步是将所有的势量和流量加到键上去。按常规，势写在键的上方或左方，流写在键的下方或右方。图 1.4 表示加有附加信息的图形。在  $i$  结点中，电

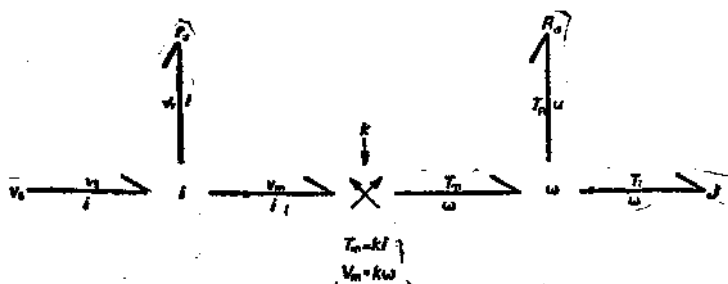


图1.4 加变量的功率图

流是所有在这个“公共流”结点上会合的键所共有的， $\omega$  结点的情况也类似， $\omega$  同样是公共流。

注意，不一定要在键上加  $i$  或  $\omega$ ，因为结点的公共变量表示的是同一件事。建议尽可能省略变量，但假如清晰度能得到改善的话就加上去。在机电结点中会出现这种情况：交叉箭头表示  $T_m$  与  $i$  相连而  $v_m$  与  $\omega$  相连。当结点两边的键上加上变量后，就能与写在结点上面的系数  $k$  一起把相互关系表达得很清楚。

## 1.2 功率图的分析

用图 1.4 中的功率箭头能较系统地写出系统的方程。在电气部分为

$$v_s = v_r + v_m \quad (1.2)$$

而在机械部分

$$T_1 = T_m - T_R \quad (1.3)$$

这些方程取决于系统的结构，所需要的信息仅仅是元件的连接方法。

在机电结点上

$$v_m = k\omega \quad (1.4)$$

及



$$T_m = ki \quad (1.5)$$

这些关系已由交叉箭头示出。

为了完成分析，需要知道能量如何耗散及贮存元件怎样工作。这些元件的方程称为“基本关系”，对耗散元件来说就是等效欧姆定律：

$$v_r = r_a i \quad (1.6)$$

$$T_R = R_a \omega \quad (1.7)$$

其中一个贮存元件的基本关系为：

$$T_1 = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.8)$$

这是线性定律

力 = 质量 × 加速度

的转动等效式，式中的  $d\omega/dt$  现在是角加速度。

假设施加一个规定的电压，要求转动质量的速度，即给出  $v_r$  求  $\omega$ 。由图中可见  $\omega$  与  $v_m$  有关，只有已知  $v_r$  才能求得  $v_m$ 。由式(1.6)可知， $v_r$  取决于  $i$ ，而  $i$  又取决于  $T_m$ ，它等于  $T_R + T_1$ 。然而这两者均取决于  $\omega$ ，因此很明显，可以导出一个用  $v_r$  及电路常数表示的方程，式中只有一个变量  $\omega$ 。

功率图的重要特点是能以清晰简单的方法来表示各种关系。

让我们从  $\omega$  开始向右边推导。

$$T_1 = J \frac{d\omega}{dt}$$

令  $d\omega/dt = s\omega$ ，其中  $s$  根据读者最熟悉的方式或可理解为算子  $d/dt$  或拉氏变换的幅频率，于是可写为：

$$T = Js\omega \quad (1.10)$$

则

$$\begin{aligned}
 T_m &= T_1 + T_R \\
 &= Js\omega + R_d\omega \\
 &= \omega(Js + R_d)
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

重新整理式(1.5)得

$$i = \frac{T_m}{k} = \frac{\omega}{k} (Js + R_d) \tag{1.12}$$

再从  $\omega$  开始并向左移动

$$v_s = v_m + v_r = k\omega + r_a i \tag{1.13}$$

但是  $i$  已经求得, 因此有

$$v_s = k\omega + \frac{r_a \omega}{k} (Js + R_d)$$

它可以写成标准的一阶微分方程

$$r_a J(s\omega) + (r_a R_d + k^2)\omega - kv_s = 0 \tag{1.14}$$

或写成用  $s$  表示的  $\omega$  的传递函数

$$\omega = \frac{kv_s / r_a J}{s + \left( \frac{k^2}{r_a J} + \frac{R_d}{J} \right)} \tag{1.15}$$

就此而言, 功率图仅仅是一种表示系统关系的图示法, 它还不能称为键合图, 键合图的功用应更大些, 在作进一步的推导之前, 最好把前面在介绍怎样画功率图的系统方法中已经介绍过的概念再加强一些, 用功率图可以容易地对较复杂的课题建立模型。

### 1.3 电 路

电压比电流更容易测量和记录, 电路的节点比回路更容易识别。因此建议用节点电压作为建立功率图的起点。图 1.5 表示了一个简单电路, 其节点标为  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $R$ 。当对图作简化

时用节点  $R$  作为电压基准。在图 1.6 中画出了带有与节点相应的下标的四个电压结点。

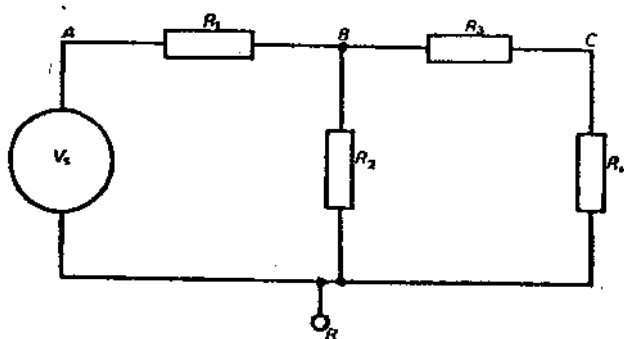


图1.5 电路

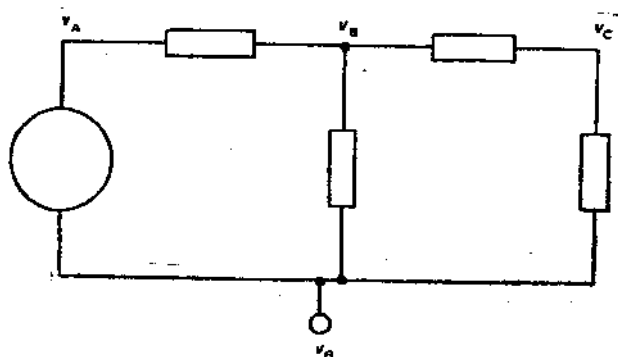


图1.6 标出电压结点

两个节点  $x$  和  $y$  之间的支路可以看作是有一个支路电流的串联电路，也包括如图 1.7 所示结点  $v_x$  和  $v_y$  之间的支路上的所有元件。在图 1.8 中已经画出了所有元件的支路，下一步是将图简化。



图1.7 加元件的方法

$R$  是参考节点,  $V_R$  置为零。因此这个结点是多余的, 可以将它同与图的其它部分相连的键一起去掉\*(图 1.9)。

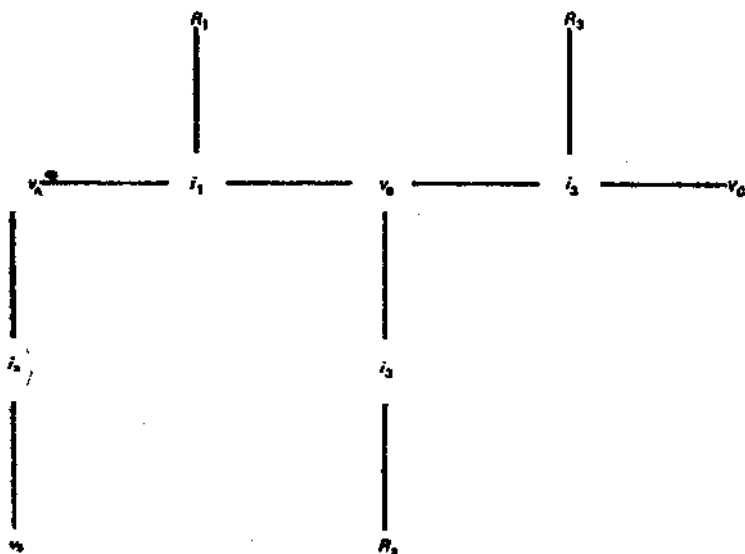


图1.9 参考节点及有关键的删除

接下来要注意的是, 如果一个结点上仅有两个键, 则此结点和它的键可以用一个如图 1.10 所示的键来代替。整个电路可

• 图的初始形式等效于电路的未定节点矩阵, 而简化形式等效于确定的或正规的节点矩阵。

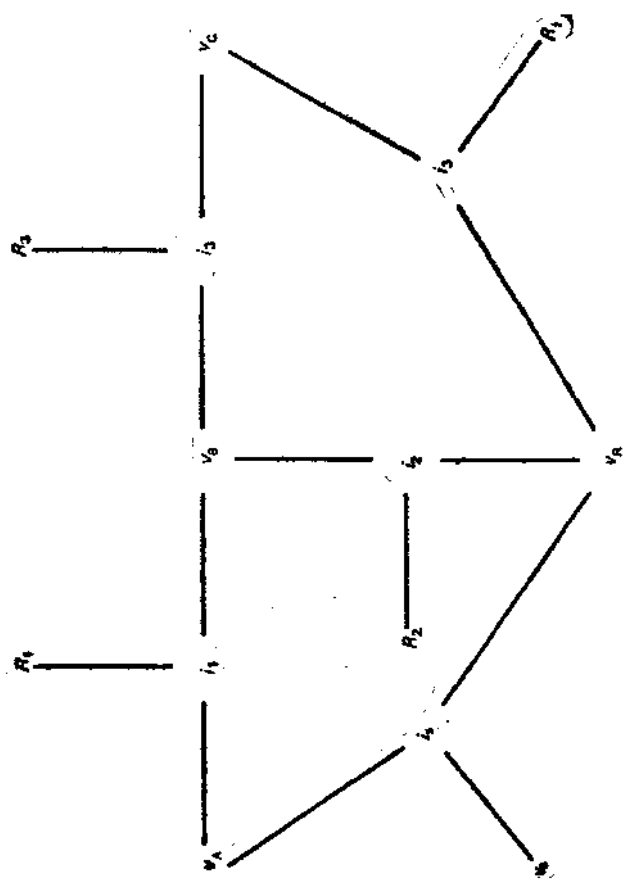


图1.8 元件和源的组合

简化为如图 1.11 所示。

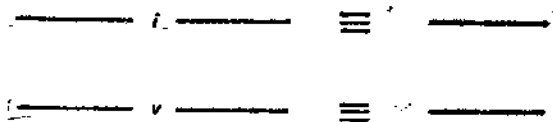


图1.10 键的精简

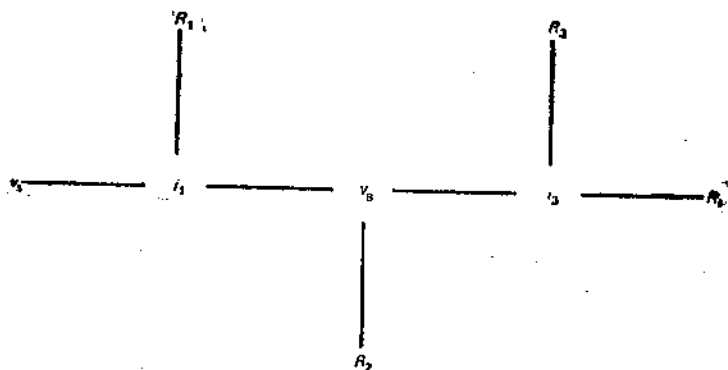


图1.11 简化图

最后再加上功率方向半箭头及公共结点变量没有表示出来的键变量,功率图就完成了如图 1.12。请观察功率是怎样从电压源流入电阻以产生所示出的电压和电流。

作为练习,现在用一种不太为人们所知的方法来分析功率图。它适用于所有类型的简单传递网络,它们可以包括有源元件,如晶体管,只要它们能等效于一个带有单一源的梯形网络即可。

诀窍是从输出开始,并假设存在一个简单的量,例如 1 伏特或 1 安培。这里我们设负载电阻上有 1 安培电流。图 1.13 示出了加入电阻值的功率图,圆圈内的数字表示计算步骤。电

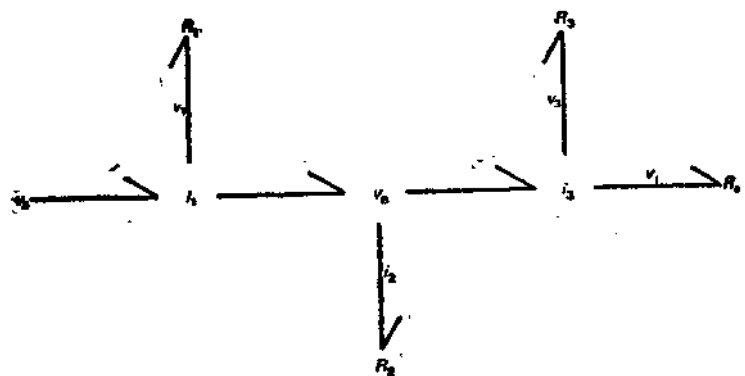


图1.12 电路最后的功率图

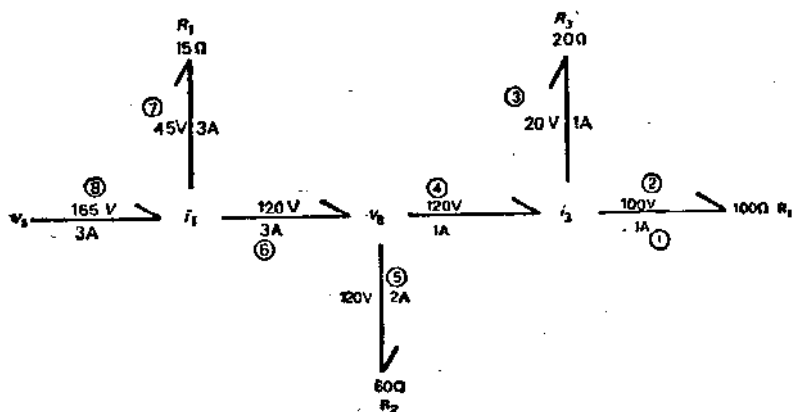


图1.13 键合图的分析

路每一部分的电压和电流求法如下：假设  $R_1$  上的电流  $i_1$  为  $1\text{A}$ ，并将它加到连接  $i_1$  的键上。该结点上电阻的基本关系  $v = Ri_1$ （其中  $i_1 = 1\text{A}$ ），将电压加给它们的键上。功率箭头说明连接  $v_B$  和  $i_3$  的键上的电压是其它键上的电压之和： $20 + 100 =$

120V, 因为  $v_B$  是公共电压结点, 所以所有和它连接的键都加上了 120V。知道  $v_B$  即可算得连接  $R_2$  的键上的电流为 2A。

功率箭头还说明, 从  $i_1$  到  $v_B$  键上的电流是 1A 和 2A 之和, 等于 3A。这对所有剩余的键都适用, 已知  $v_1$  为 45V, 加上  $v_B$  得电源电压  $v_s = 165V$ 。

所得到的结果对该系统来说是一组典型值, 因为系统是线性的, 故可得到任何输入的结果。比如, 若电源电压是 100V, 则图上的数值要乘以  $100/165$ , 因此负载电压将是 60.6V。

作为传递网络, 电压增益为  $100/165 = 0.616$ , 输入阻抗为  $v_s/i_s = 55\Omega$ , 等等, 需要时可从图上读取数值。

#### 1.4 机械系统

在电气系统中, 势(电压)是功率图设计中用作起始点的自然变量, 但在机械系统中流(速度)更容易观察和检验。图 1.14 表示一个由两个质量、一个弹簧和三个阻尼器(线性机械阻抗)组成的机械系统。三个速度分别为  $V_a$ ,  $V_b$  和  $V_c$ , 它们相应地为输入速度和两个质量的速度。参考速度为地球的速度。首先以适当的方式标上速度, 借助于公共力结点(图 1.15)使各分量相加, 这个结点是势结点, 类似于电路中所采用的公共流结点。

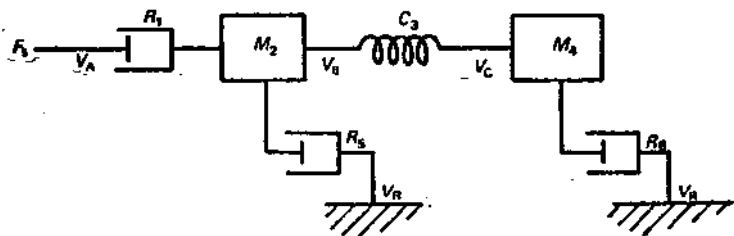


图 1.14 质量、弹簧和机械阻抗构成的机械系统



除了势和流结点互换之外，组合的方法完全与电路中的组合方法相同。但当功率图完成后，两种情况就完全等效，并可用同一方法进行分析。

删除参考结点和它的键，简化图形，再加上功率箭头和它们的键变量，最后得到图 1.16。

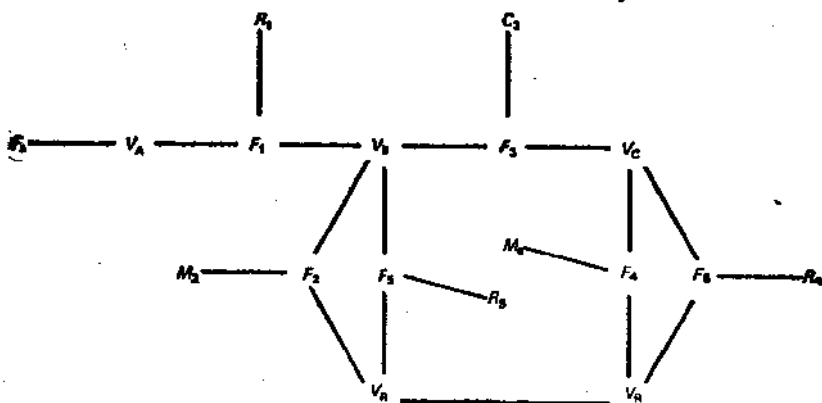


图1.15 各分量和源的组合

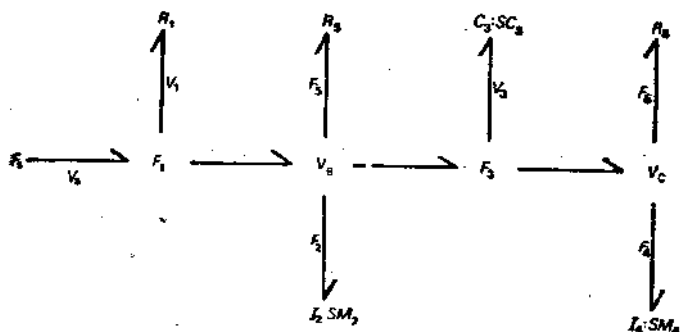


图1.16 简化后的功率图