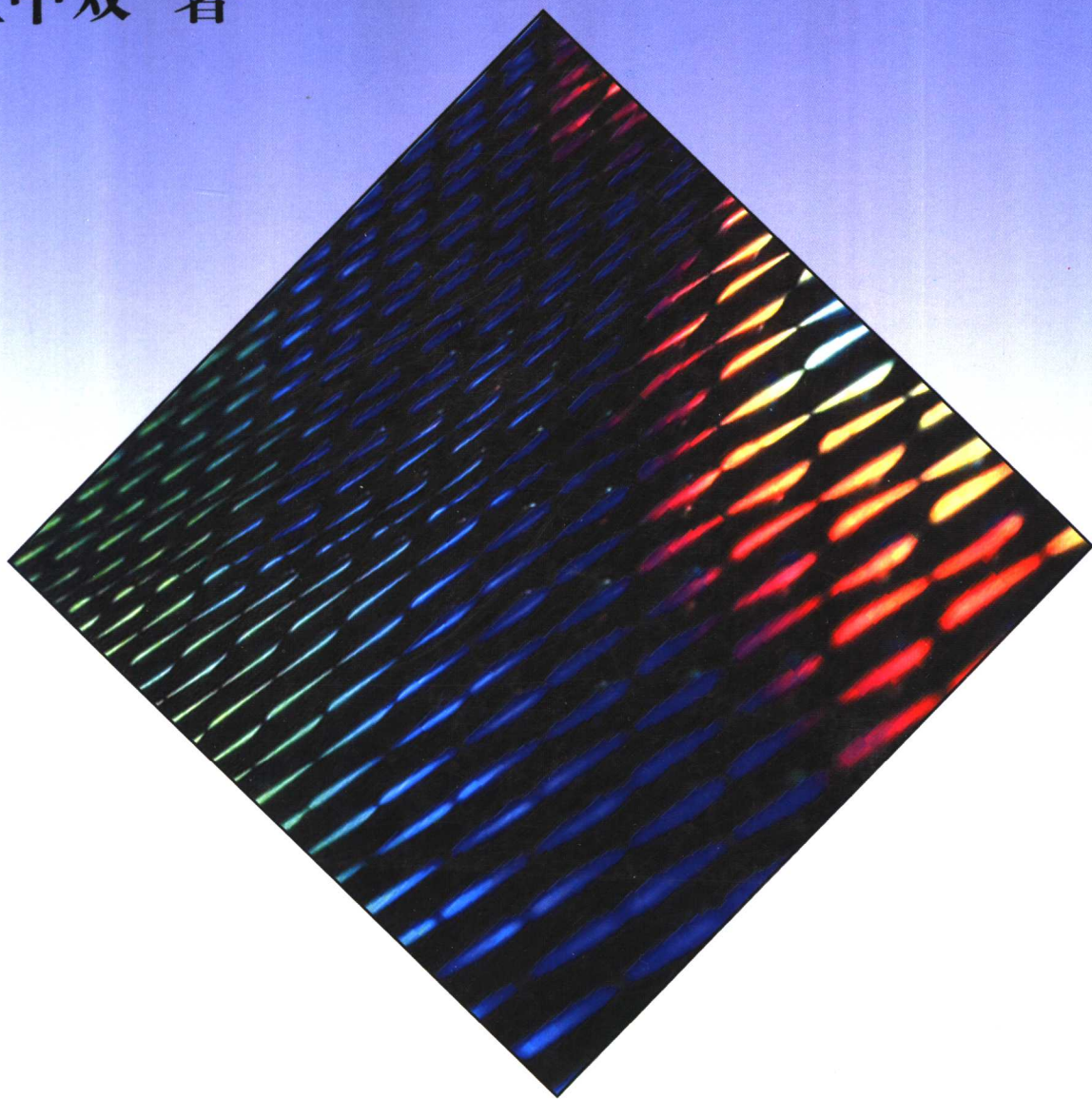


键合图理论

及其在系统动力学中的应用

王中双 著



41.3

470

哈尔滨工程大学出版社

键合图理论及其在 系统动力学中的应用

王中双 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括四大部分。第一部分介绍键合图的基本理论,其中包括键合图语言、电、液压及简单机械系统的键合图模型的建立方法、由键合图模型列写系统状态方程。第二部分介绍基于键合图的面向计算机的系统动力学建模方法,内容包括场和结型结构、键合图法线性系统动态仿真、键合图法非线性系统动态仿真、线性系统及非线性系统源输入计算的键合图法。第三部分介绍机构动力学问题的键合图方法,内容包括复杂机械系统动态仿真的键合图法、机构动态静力分析问题的键合图法。第四部分介绍回转键合图法在机械系统动力学中的应用,它包括回转键合图(Gyrobondgraph)的定义及类型、标准键合图向回转键合图的转化方法、回转键合图法机械系统动态仿真及机构动态静力分析问题的回转键合图法。

本书可供电气、机械、液压等工程领域中从事系统分析、设计工作的中、高级工程技术人员和高等学校中从事机械设计、系统动力学、系统仿真等学科教学的本科高年级学生、研究生以及教师参考。

键合图理论及其在系统动力学中的应用

王中双 著

责任编辑 罗东明

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新 华 书 店 经 销
哈 尔 滨 工 业 大 学 印 刷 厂 印 刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 11.25 字数 263 千字

2000年3月第1版 2000年3月第1次印刷

印数:1~1000册

ISBN 7-81073-021-5
TH·2 定价:20.00元

序

随着科学技术的进步与发展,各类工程系统的复杂程度及技术水平不断提高。对各类工程系统的动态性能也提出了越来越高的要求。由于实际系统的多样性及复杂性,科学工作者所研究的对象已不只是单一能量形式,而多数是多种能量形式的耦合。因而使得在计算机上自动地进行系统的动态分析与设计遇到了较大的困难,键合图理论正是在这一背景下产生和发展起来的。

目前,国外许多国家的高等学校和研究机构,都开展了键合图理论及其应用的研究。在 IMACS 领导部门的支持下,在 IMACS 组织中专门成立了键合图组织。每年都有该领域的研究论文发表。由于我国在该领域的研究工作起步较晚,其深入程度与国外相比尚有较大差距。王中双副教授在键合图理论及应用的研究方面,取得了良好的成果。他在总结自己多年来在该领域的研究成果的基础上,同时大量搜集和整理国内外有关资料,撰写了此书,这无疑是对该研究领域的重要贡献。

本书系统地阐述了键合图的组成原理及方法、基于键合图的面向计算机的建模方法及其在机械系统动力学中的应用。本书内容丰富,条理清晰,深入浅出,反映了作者独到的学术见解及较高的学术水平。

相信该书的出版会给有关专业本科高年级学生、研究生送去一本良好的教材,同时也给从事系统分析和机械动态设计的工程技术人员提供一本有价值的参考书。

中国科学院院士 闻邦椿
东北大学机械学院教授

2000年3月22日

前 言

随着科学技术的迅猛发展,工程系统的动态分析与设计已显得日益重要。性能良好的工程系统,在设计、试验、操作及合理使用方面都需要充分了解有关系统的动态性能,计算机仿真为此提供了有效的手段。其中关键的问题是如何有效合理地建立系统的动力学模型并加以处理。

由于工程系统的复杂性及多样性,一个系统不仅仅涉及单一能量形式,往往是多种能量形式的耦合。现有的各种系统动力学分析方法,往往仅限于单一能域的系统,对多能域并存的工程系统,具有局限性。

50年代末由美国的 H. M. Paynter 教授所提出的键合图理论为此提供了有效的解决途径。几十年来,以 D. C. Karnopp 及 R. C. Rosenberg 为代表的一批学者,在键合图理论及应用的研究方面起到了重要的作用,为多能域复杂系统的动态分析奠定了基础。与其它系统动力学分析方法相比较,键合图法具有许多独到之处。可以用统一的方式处理多种能量形式并存的系统;表达系统动态性能的键合图模型结构简明,包含信息量大,可以直观地揭示组成系统各元件间的相互作用及能量转换关系,加深人们对系统动力学结构的认识;其动力学方程的建立方法具有规则化的特点,便于计算机自动生成。

目前,美国、荷兰、澳大利亚、加拿大、英国、日本、法国、德国等许多国家的高等学校和研究机构,都开展了键合图理论及应用的研究,取得了可喜的研究成果,并将其作为研究生及高年级本科学生的系统动力学选修课程的内容。近二十多年来,国内部分高等学校及研究机构也开始了这一领域的研究工作,应用这一理论对液压及其它系统进行研究开发,自行研制了各具特色的仿真软件,也取得了可喜的进展。

为促进键合图理论及应用的研究在我国的进一步发展和推广,作者在从事该领域研究成果及搜集、整理国内外有关资料的基础上,著写了此书。本书第一章至第三章介绍键合图的基本理论;第四章至第七章介绍基于键合图的面向计算机的建模方法;第八章至第十章介绍机构动力学问题的键合图方法;第十一章介绍回转键合图法(Gyrobondgraph)及其在机械系统动力学中的应用。

由于作者时间和水平有限,错误或不当之处在所难免,竭诚欢迎读者不吝指正。

作 者

1999年9月

目 录

第一章 键合图语言	1
第一节 常用术语	1
一、键合图	1
二、通口、键	1
三、广义变量	2
四、功率流方向	4
第二节 基本键合图元	4
一、一通口元件	4
二、二通口元件	7
三、多通口元件	8
第三节 键合图的增广	9
一、编键号	9
二、标注功率方向	9
三、因果关系及标注	10
第四节 键合图的变换和简化	15
一、结型结构的简化	15
二、环状结构的简化	16
三、一通口键合图元的合并	16
四、带变换器的结构的简化	16
五、带回转器的结构的简化	17
第五节 键合图与方块图	18
一、键合图元与方块图单元的对应关系	18
二、由键合图绘制方块图的步骤	19
第二章 系统键合图模型	21
第一节 电系统键合图模型	21
一、基本电路元件键合图模型	21
二、电路的键合图模型	23
三、电动机的键合图模型	27
第二节、简单机械系统的键合图模型	31
一、基本机械元件的键合图模型	31
二、简单机械系统的键合图模型	33
第三节 液压系统的键合图模型	38
一、液压系统中基本物理效应的键合图描述	38
二、液压元件的键合图模型	41
三、液压系统键合图模型的建立方法和步骤	46

第三章 由键合图模型列写系统状态方程	49
第一节 系统状态方程的形式	49
第二节 列写系统状态方程的键合图方法	51
一、由全积分因果关系键合图列写状态方程	51
二、由含不确定因果关系键的键合图列写状态方程	54
三、由具有微分因果关系键合图列写状态方程	56
第四章 场和结型结构	58
第一节 储能场	58
一、容性场	58
二、惯性场	61
三、储能场的特性	64
第二节 阻性场	65
第三节 结型结构	68
一、结型结构的性质	68
二、结型结构的类型	68
第四节 键和场的分类	69
第五章 键合图法线性系统动态仿真	72
第一节 线性系统状态方程的统一公式	72
一、全积分因果关系线性系统状态方程的统一公式	72
二、混合因果关系线性系统状态方程的统一公式	73
第二节 系统状态方程的求解	74
第三节 算例	74
第四节 系统状态方程的转化	79
一、系统状态方程的转化	79
二、算例	81
第六章 键合图法非线性系统动态仿真	85
第一节 非线性系统状态方程的统一公式	85
一、全积分因果关系非线性系统状态方程的统一公式	85
二、混合因果关系非线性系统状态方程的统一公式	86
第二节 系统状态方程的求解	88
第三节 算例	89
第七章 系统源输入计算的键合图法	92
第一节 线性系统源输入计算的键合图法	92
一、全积分因果关系线性系统源输入计算的统一方程	92
二、混合因果关系线性系统源输入计算的统一方程	93
三、算例	93
第二节 非线性系统源输入计算的键合图法	95
一、非线性系统源输入计算的统一方程	95
二、算例	97

第八章 基于键合图理论的一种机构动力学的统一方法	102
第一节 多通口转换器 MTF 的作用	102
第二节 机构的统一键合图模型.....	105
第三节 机构动力学正、逆问题的统一方程	109
第四节 算例.....	110
第九章 复杂机械系统动态仿真的键合图法	114
第一节 惯性系下平面连杆机构的键合图模型.....	114
第二节 惯性系下弹性连杆机构的键合图模型.....	116
第三节 非惯性系下平面连杆机构的键合图模型.....	117
第四节 非惯性系下柔性连杆机构的键合图模型.....	119
第五节 系统状态方程的统一公式.....	120
第六节 算例.....	122
第七节 机器人机构动态仿真的键合图法.....	128
第十章 机构动态静力分析问题的键合图法	133
第一节 机构平衡力矩及运动副约束反力的统一公式.....	133
第二节 算例.....	137
第三节 机器人机构动态静力分析问题的键合图法.....	144
第十一章 回转键合图法及其在机械系统动力学中的应用	148
第一节 回转键合图(Gyrobondgraph)的定义及类型	148
一、回转键合图的定义	148
二、回转键合图的类型	149
第二节 标准键合图向回转键合图的转化方法.....	150
第三节 回转键合图法机械系统动态仿真.....	153
一、系统状态方程的统一公式	153
二、系统状态方程的求解	155
三、算例	156
第四节 机构动态静力分析问题的回转键合图法.....	160
一、系统平衡力矩(平衡力)及运动副约束反力的统一公式	160
二、算例	163
参考文献	169

第一章 键合图语言

本章介绍键合图理论的基本概念、基本元件及组成原理,同时介绍了键合图的等效变换与简化以及键合图与自动控制理论中所采用的方块图间的转换关系。

第一节 常用术语

一、键合图

系统依据能量守恒的基本原则,由一些基本元件以一定的连结方式用规定的符号来表示,称为系统键合图。键合图是系统动态性能统一的直观图形表示。构成它的基本元件称为键合图元,键合图元间的连线代表功率的流动,称为键。图 1-1(a)、图 1-1(b)分别为机械系统和电路系统,两系统的能量形式虽然不同,但是它们有共同的键合图表示,如图 1-1(c)所示。

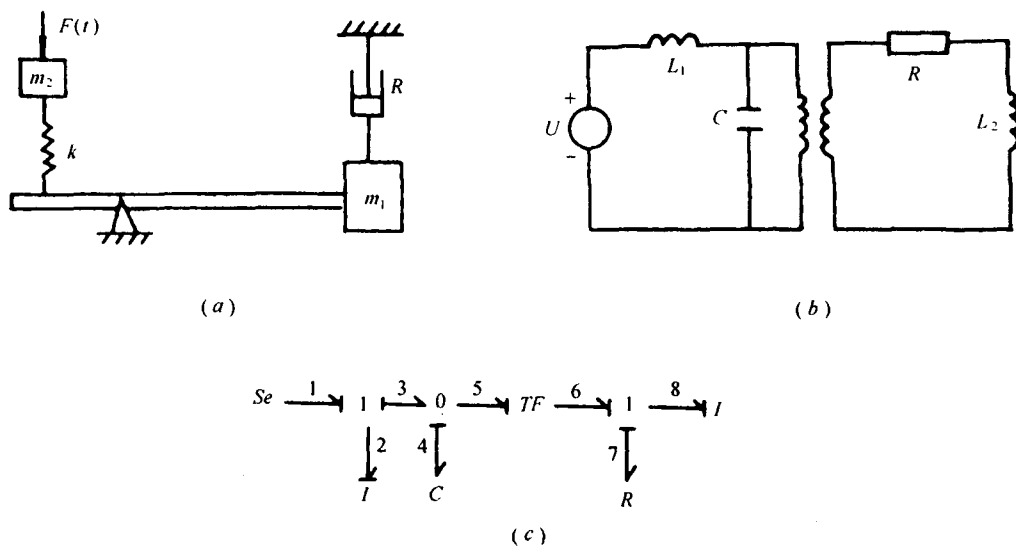


图 1-1 系统键合图模型

图中的 R 、 C 、 I 、 Se 、 TF 、 1 、 0 等为键合图元,两键合图元之间的连线是键。

二、通口、键

一个键合图元与另一个键合图元进行能量传递的地方称为通口。通口用画在键合图元旁边的一根线段表示。图 1-1(c)中的线段 1、2、4、5、6、7、8 分别表示键合图元 Se 、 I 、 C 、 TF 、 R 、 I 的通口。键合图元的通口相互联接便形成键。图 1-1(c)中的线段 3 便是 Se 的通口 1、 I 的通口 2 与 C 的通口 4 相互联接后所形成的键。值得说明的是通口是对一个键

合图元而言,而键则关联着两个键合图元。在未形成键的通口上没有能量流动,而键则用以传送功率。这种传送功率的键又称为功率键。还有一种键也关联着两个键合图元,但它不传送功率,而只传递信号,故这种键称为信号键。在功率键的一端带有半个箭头符号,而在信号键上则带有全箭头符号。

一根键所关联的键合图元之间的联接称为链接。当键合图元链接后,能量从一个键合图元传送到另一个键合图元的过程中,在键上没有能量损失。

三、广义变量

键合图理论将多种物理参量统一地归纳成四种广义变量,即势变量、流变量、广义动量和广义位移。其中势变量 $e(t)$ 和流变量 $f(t)$ 的标量积称为功率 $P(t)$,即

$$P(t) = e(t)f(t) \quad (1-1)$$

故势变量和流变量又称为功率变量。

广义动量 $p(t)$ 定义为势变量的时间积分,即

$$p(t) = \int e(t)dt \quad (1-2)$$

或

$$p(t) = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt \quad (1-3)$$

式中, p_0 是在时间 t_0 时的初始动量。

广义位移 $q(t)$ 定义为流变量的时间积分,即

$$q(t) = \int f(t)dt \quad (1-4)$$

或

$$q(t) = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (1-5)$$

式中, q_0 是在时间 t_0 时的初始位移。

广义动量和广义位移是能量变量。因为通过一根键的能量 $E(t)$ 可以写成

$$E(t) = \int e(t)f(t)dt \quad (1-6)$$

由式(1-2)和式(1-4)知

$$e(t)dt = dp(t) \quad (1-7)$$

$$f(t)dt = dq(t) \quad (1-8)$$

将式(1-7)和式(1-8)分别代入式(1-6)可得

$$E(t) = \int f(t)dp(t) \quad (1-9)$$

和

$$E(t) = \int e(t)dq(t) \quad (1-10)$$

若将势变量 $e(t)$ 写成广义位移 $q(t)$ 的函数 $e(q)$, 将流变量 $f(t)$ 写成广义动量 $p(t)$ 的函数 $f(p)$, 则可将式(1-9)和式(1-10)写成

$$E(t) = \int f(p)dp \quad (1-11)$$

和

$$E(t) = \int^t e(q) dq \quad (1-12)$$

式(1-11)和式(1-12)表明,广义动量和广义位移是能量变量。

表 1-1、表 1-2 和表 1-3 分别列写了广义变量与机械变量、电变量及液压变量的对应关系。

表 1-1 机械变量与广义变量的对应关系

广 义 变 量		机 械 变 量	
		名 称	单 位
势变量 e		力 F	牛顿(N)
		转矩 T	牛顿·米(N·m)
流变量 f		速度 v	米/秒(m/s)
		角速度 ω	弧度/秒(rad/s)
广义动量 p		动量 p	牛顿·秒(N·s)
		角动量 h	牛顿·米·秒(N·m·s)
广义位移 q		位移 x	米(m)
		角位移 θ	弧度(rad)
功率 $P = ef$		$P = Fv$	瓦特(W)
		$P = T\omega$	
能 量	动能 $E(p) = \int v dp$	$E(p) = \int v dp$	焦耳(J)
		$E(h) = \int \omega dh$	
	势能 $E(q) = \int e dq$	$E(x) = \int F dx$	
		$E(\theta) = \int T d\theta$	

表 1-2 电变量与广义变量的对应关系

广 义 变 量		电 变 量	
		名 称	单 位
势变量 e		电压 u	伏特(V)
流变量 f		电流 i	安培(A)
广义动量 p		磁通链 ψ	韦伯(Wb)
广义位移 q		电荷 q	库仑(C)
功率 $P = ef$		功率 $P = ui$	瓦特(W)
能量	$E(p) = \int^p f dp$	$E(\psi) = \int^{\psi} i d\psi$ (磁能)	焦耳(J)
	$E(q) = \int^q e dq$	$E(q) = \int^q u dq$ (电能)	

表 1-3 液压变量与广义变量的对应关系

广 义 变 量	液 压 变 量		
	名 称	单 位	
势变量 e	压力 p	牛顿/米 ² (N/m ²) (帕(Pa))	
流变量 f	流量 Q	米 ³ /秒(m ³ /s)	
广义动量 p	压力动量 λ	帕·秒(Pa·s)	
广义位移 q	体积 V	米 ³ (m ³)	
功率 $P = ef$	功率 $P = pQ$	瓦(W)	
能量	$E(p) = \int f dp$	$E(\lambda) = \int Q d\lambda$ (动能)	焦耳(J)
	$E(q) = \int e dq$	$E(V) = \int p dV$ (势能)	

四、功率流方向

功率是能量流动的速率,故它是一种标量,没有方向。但人们往往习惯于用功率流来表示能量流,故把能量流的方向称为功率流方向。因此,键合图中每一根键均有两个变量,即势变量 $e(t)$ 和流变量 $f(t)$ 。势变量 $e(t)$ 写在键的上方或左方,流变量写在键的下方或右方。功率流的参考方向用画在键端的半箭头符号表示,如图 1-1(c) 所示。当键上的势变量与流变量的乘积为正值时,半箭头的指向就是该键上功率流的实际方向。

第二节 基本键合图元

尽管实际系统多种多样,涉及的能量范畴不同,不同能域的系统有不同的理想元件,但它们之间存在着几种相同的物理性质。某种键合图元就是具有某种物理本质的不同能域理想元件的代表。键合图元是构成键合图的基本元素。这样,仅需要很少几种基本元件就能统一地表示多能域系统的模型。

基本键合图元可分为一端口、二端口和多端口三类。

一、一端口元件

所谓一端口是指一个单独的功率端口,其端口处只存在一对势和流变量。

(一)阻性元件 R

势变量 $e(t)$ 和流变量 $f(t)$ 之间存在某种静态关系的键合图元定义为阻性元件。图 1-2(a) 为一端口阻性元件的表示符号。阻性元件不但是无源键合图元,而且是耗能键合图元。它用来描述系统的功率损耗。符号中半箭头的方向表示阻性元件总是消耗系统的功率。

线性阻性元件的特性方程是

$$e(t) = R_0 f(t) \quad (1-13)$$

式中, R_0 是线性阻抗,它是联系线性阻性元件的势变量和流变量的一个参数。由于线性阻性元件的势与其流成正比,故 R_0 是常数。

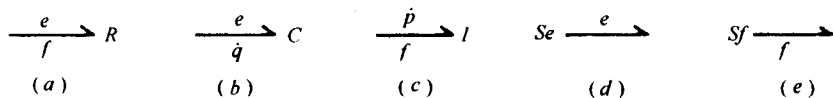


图 1-2 一端口基本键合图元表示符号

非线性阻性元件的特性方程可写成

$$e = \varphi_R(f) \quad (1-14)$$

式中, φ_R 表示联系阻性元件的势和流的一个非线性函数。非线性阻性元件的势不与流成比例关系, 它的阻抗将随它的势或流变化而改变。

例如, 电路中的电阻、机械系统中的阻尼器、流体管道中的多孔塞等都可以用 R 元件表示。

(二) 容性元件 C

势变量 $e(t)$ 和广义位移 $q(t)$ 之间存在某种静态关系的键合图元定义为容性元件。容性元件是无源键合图元。一端口容性元件的符号如图 1-2(b) 所示。容性元件是用来描述联系势和广义位移的物理效应(容性效应)的元件。

线性容性元件的特性方程是

$$e(t) = \frac{1}{C_0} q(t) \quad (1-15)$$

式中, C_0 是联系线性元件的势变量和广义位移的线性容度参数。线性容性元件的势任何时刻都与它的广义位移成正比, 线性容度参数是一个与容性元件的势和广义位移无关的常数。

非线性容性元件的特性方程可写成

$$e = \varphi_c(q) \quad (1-16)$$

式中, φ_c 表示联系容性元件的势和广义位移的一个非线性代数函数。非线性容性元件的势不与它的广义位移成比例关系。容度参数将随容性元件的势变量或广义位移的变化而改变。

由方程(1-15)或方程(1-16)可求得容性元件的势和流之间的关系如下:

$$e(t) = e(0) + \frac{1}{C_0} \int_0^t f(t) dt \quad (1-17)$$

或

$$e(t) = e(0) + \varphi_c \left(\int_0^t f(t) dt \right) \quad (1-18)$$

式中, $e(0)$ 为容性元件在时间 $t=0$ 时的势。由式(1-17)或式(1-18)知, 容性元件在任一时间 t 的势与初始值 $e(0)$ 和时间从零到 t 期间的所有流的数值有关。

容性元件是一种储能元件, 它在任一时间 t 所储存的能量 $E(t)$ 可利用方程(1-6)进行计算。设在 $t=0$ 时所储存的初始能量为零, 则线性容性元件在时间 t 时所储存的能量为

$$E(t) = \int_0^t e(t) f(t) dt = C_0 \int_0^t e(t) \frac{de(t)}{dt} dt = \frac{1}{2} C_0 e^2(t) \quad (1-19)$$

式(1-19)表明, 容性元件所储存的能量是与势有关的能量。

因为容性元件的势是广义位移的代数函数, 故式(1-19)也可写成

$$E(q) = \int_0^q \varphi_c(q) dq = \frac{1}{C_0} \int_0^q q dq = \frac{1}{2C_0} q^2 \quad (1-20)$$

容性元件符号中半箭头的方向表示,当容性元件的势与流的乘积为正值时,它处于储能状态,而负值时为释能状态。容性元件在储能、释能过程中没有任何能量损失。故容性元件为能量守恒键合图元。

例如,电路中的电容器、机械系统中的弹簧及流体动力系统中的蓄能器都可以用容性元件来表示。

(三) 惯性元件 I

流变量 $f(t)$ 与广义动量 $p(t)$ 之间存在某种静态关系的键合图元定义为惯性元件。惯性元件是无源键合图元。一通口惯性元件的符号如图 1-2(c) 所示。惯性元件是用来描述联系流变量与广义动量的物理效应(惯性效应)的元件。

线性惯性元件的特性方程是

$$f(t) = \frac{I}{I_0} p(t) \quad (1-21)$$

式中, I_0 是联系惯性元件的流和广义动量的线性惯量参数。由式(1-21)知,在任何时刻线性惯性元件的流都与它的广义动量成正比,线性惯量参数是一个与它的流和广义动量无关的常数。

非线性惯性元件的特性方程可写成

$$f = \varphi_I(p) \quad (1-22)$$

式中, φ_I 是联系惯性元件的流和广义动量的一个非线性代数函数。非线性惯性元件的流不与它的广义动量成比例关系。它的惯量参数将随它的流或广义动量的变化而改变。

由式(1-21)或式(1-22)可求得惯性元件的流和势之间的关系如下:

$$f(t) = f(0) + \frac{I}{I_0} \int_0^t e(t) dt \quad (1-23)$$

或

$$f(t) = f(0) + \varphi_I \left(\int_0^t e(t) dt \right) \quad (1-24)$$

式中, $f(0)$ 是惯性元件在时间 $t=0$ 时的流。由式(1-23)和式(1-24)知,惯性元件在任何时刻 t 的流与它的初始值 $f(0)$ 以及时间从零到 t 期间所有势的大小有关。

惯性元件是一种储能元件,设在 $t=0$ 时所储存的初始能量为零,则线性惯性元件在时间 t 时所储存的能量可利用方程(1-6)计算如下:

$$E(t) = \int_0^t e(t) f(t) dt = I_0 \int_0^t f(t) \frac{df(t)}{dt} dt = \frac{1}{2} I_0 f^2(t) \quad (1-25)$$

式(1-25)表明,惯性元件所储存的能量是与流有关的能量。

因为惯性元件的流是广义动量的代数函数,故式(1-25)也可写成

$$E(p) = \int_0^p \varphi_I(p) dp = \frac{1}{I_0} \int_0^p p dp = \frac{1}{2I_0} p^2 \quad (1-26)$$

惯性元件符号中半箭头的方向表示,当惯性元件的势与流的乘积为正时,惯性元件处于储能状态,而负值时则为释能状态。惯性元件是能量守恒的键合图元件,在储能和释能过程中没有任何能量损失。

例如,电路中的电感和机械系统中的质量块都可以用惯性元件来表示。

(四) 势源 S_e

势源 S_e 是有源键合图元,它用来描述环境对系统的势的作用,其符号如图 1-2(d)所示。这里定义的势源是独立势源。势源对系统施加一个大小为恒值或某一给定时间函数的势。它是一通口键合图元,具有如下特点:

(1) 势源的势与它的流无关,不随它所作用的系统不同而改变。

(2) 势源的流的大小和方向决定于它所作用的系统。

(3) 当势源的势变量与流变量的乘积为正值时,势源起源的作用,向系统输送功率;负值时则作为负载出现,从系统吸取功率。

例如,电路中的电压源和机械系统中的压力源等都可以用势源来表示。

(五) 流源 S_f

流源是有源键合图元,它用来描述环境对系统的流的作用,其符号如图 1-2(e)所示。这里定义的流源是独立流源。流源对系统施加一个大小为恒值或某一给定时间函数的流。它是一通口键合图元,具有如下特点:

(1) 流源的流与它的势无关,不因它所作用的系统不同而变化。

(2) 流源的势的大小与方向决定于它所作用的系统。

(3) 当流源的势与流的乘积为正值时,流源起源的作用,向系统输送功率;负值时则从系统吸取功率。这时的流源便成为负载。

例如,电路中的电流源、机械系统中的速度源及流体动力系统中的定量液压泵皆可用流源表示。

二、二通口元件

二通口元件具有两个通口,用以与系统进行能量交换。在输入一侧通口处势和流的乘积总是等于输出一侧通口处的势和流的乘积。在该意义上,它们是功率守恒键合图元。

(一) 变换器 TF(MTF)

变换器用来描述系统能量传输过程中势变量对势变量、流变量对流变量之间的变换关系,图 1-3(a)是变换器的符号,它是一个二通口的无源键合图元。变换器的特性方程是

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= m e_1 \\ m f_2 &= f_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-27)$$

式中,参数 m 称为变换器模数。当参数 m 是某变量的函数时,变换器被称为可调变换器,其表示符号如图 1-3(c)所示。方程(1-27)表明,在任何时刻变换器输出的势与输入的势成正比,输入的流与输出的流成正比。输入变换器的能量形式和它输出的能量形式可以相同,也可以各异。

例如,电力系统中的变压器、流体动力系统中的液压泵和液压缸、机械系统中的齿轮减速器等都可用变换器 TF 表示。可调变压器、变量泵及速比可调变速器皆可用可调变换器表示。

(二) 回转器 GY(MGY)

回转器用来描述系统能量传输过程中势变量与流变量之间的变换关系。它是一个二通口无源键合图元,图 1-3(b)是回转器的符号。回转器的特性方程是

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= r f_1 \\ r f_2 &= e_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-28)$$

式中,参数 r 是回转器的模数。当参数 r 是某变量的函数时,回转器被称为可调回转器,其表示符号见图 1-3(d)。方程(1-28)表明,在任何时刻回转器输出的势与输入的流成正比,而输入的势与输出的流成正比。输入回转器的能量形式和它输出的能量形式可以相同,也可以各异。

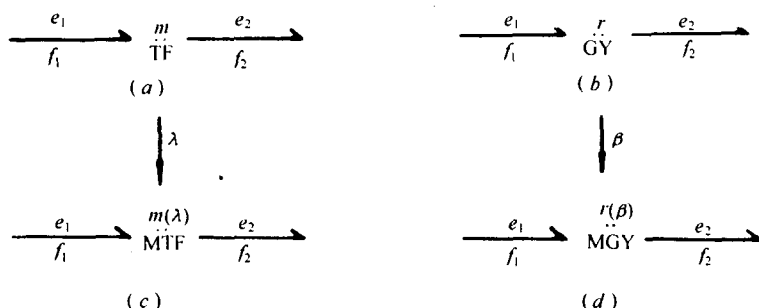


图 1-3 二端口基本键合图元表示符号

例如,激磁恒定的直流电机可用回转器表示,具有可变激磁电流的电机可用可调回转器来表示。

三、多端口元件

(一) 共势结(0-结)

共势结用来联系系统有关物理效应中能量形式相同、数值相等的势变量。它是多端口无源结形键合图元。图 1-4(a)是 n 端口共势结的符号。多端口共势结的特性方程是

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_2 = e_3 = \cdots = e_n \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

式中, n 是端口数; α_i 是功率流向系数,对于半箭头指向 0-结的键 $\alpha_i = 1$,半箭头背离 0-结的键 $\alpha_i = -1$ 。

方程(1-29)表明,与共势结键接的各根键上的势相等,而流的代数和等于零;流入共势结的功率等于该结流出的功率。共势结不损耗能量也不储存能量,它是一个功率守恒的键合图元。

例如,电路中的并联电路或流体动力系统中直径大而长度短的管道,都可以用共势结表示。

(二) 共流结(1-结)

共流结用来联系系统有关物理效应中或构件中能量形式相同、数值相等的流变量。共流结是多端口无源结形键合图元。图 1-4(b)是 n 端口共流结的符号。多端口共流结的特性方程是

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_2 = f_3 = \cdots = f_n \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

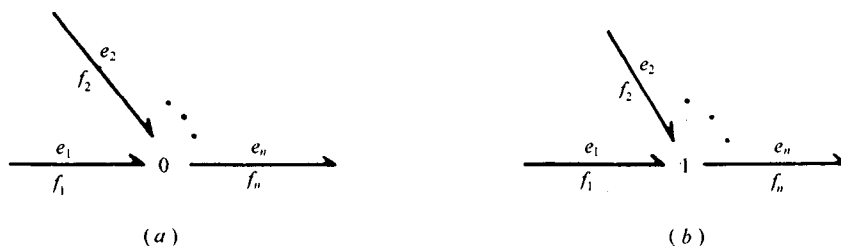


图 1-4 多端口基本键合图元表示符号

式中, n 是通口数; α_i 是功率流向系数, 半箭头指向 1-结的键 $\alpha_i = 1$, 否则 $\alpha_i = -1$ 。

方程(1-30)表明, 与共流结键接的各根键上的流相等, 而势的代数和等于零。共流结不损耗能量也不储存能量, 流入共流结的功率等于流出该结的功率。共流结是一个功率守恒键合图元。

例如, 电路中的串联电路、流体动力系统中的直径小而长度较大的管道、机械系统中的固定联轴节和连接件, 都可以用 1-结来表示。

第三节 键合图的增广

键合图的增广包括三项内容: (1) 编键号, (2) 标注功率流向, (3) 标注因果关系。增广后的键合图具有可计算性, 使系统状态方程的列写具有规则化的方式。

一、编键号

编键号的目的在于识别系统的变量和键合图元。键号一般用数字表示, 从 1 开始连续编号。

例如, 图 1-1(c) 是已经编号的键合图。 Se_1 表示与 1 号键键接的势源, I_2 表示与 2 号键键接的 I 元件, C_4 表示与 4 号键键接的 C 元件, R_7 表示与 7 号键键接的 R 元件, I_8 表示与 8 号键键接的 I 元件, $TF_{5,6}$ 表示与键 5、键 6 键接的转换器。与键 1、键 2 和键 3 键接的 1-结用 $1_{1,2,3}$ 表示, 与键 3、键 4 和键 5 键接的 0-结用 $0_{3,4,5}$ 表示。另外, e_6 、 f_6 分别表示键 6 上的势和流, e_8 、 f_8 分别表示键 8 上的势和流。

二、标注功率方向

在键合图上, 功率流的正方向用半箭头表示。对于每个键, 都须恰当地选择功率流的正方向, 这与确定符号一样。通常按下述基本原则进行选择: 将键上能量流动占优势的方向定为正向。例如, 由驱动装置流向负载, 这一方向称为能量流动的自然方向。为此, 键上的功率流参考方向按如下规则标注:

- (1) 半箭头方向由势源或流源指向系统。
- (2) 半箭头的方向指向阻性元件 R 、惯性元件 I 及容性元件 C 。
- (3) 半箭头方向由势源、流源这一侧指向键合图的另一侧。

对于二端口元件的转换器和回转器来说, 不存在事先选择正向功率流动方向的问题。对于多通口的结型元件, 键合图功率流方向标注后, 就意味着确定了式(1-29)或式(1-30)