



研究生教材

模糊控制与系统

张文修 梁广锡 编著

西安交通大学出版社

TP273.4

Z26

研究生教材

模糊控制与系统

张文修 梁广锡 编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

模糊控制技术是现代工业与新产品开发的高新技术之一,在国内外受到普遍重视。本书系统地叙述模糊控制技术的原理、方法及设计技巧。同时还包含了模糊系统模糊辨识方法以及模糊专家系统。

本书作为研究生的教材,也可以作为大学本科生和工程人员的科学研究参考书。

(陕)新登字 007 号

模糊控制与系统

张文修 梁广锡 编著

责任编辑 叶 涛

责任校对 祝 捷

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话(029)3268316)

陕西省轻工印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张: 6.5 字数: 160 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—2000

ISBN7-5605-1002-7/O·132 定价:10.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

《研究生教材》总序

研究生教育是我国高等教育的最高层次,是为国家培养高层次人才的人才。他们必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识,以及从事科学研究工作或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是研究生培养中的重要环节。为此,我们组织出版这套《研究生教材》,以满足当前研究生教学,主要是公共课和一批新型的学位课程的教学需要。教材作者都是多年从事研究生教学工作,有着丰富教学和科学研究经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要,充分反映国内外的最新学术动态,使研究生学习之后,能迅速接近当代科技发展的前沿,以适应“四化”建设的要求;其次,也注意到研究生公共课程和学位课程应有它最稳定、最基本的内容,是研究生掌握坚实强调突出重点,突出基本原理和基本内容,以保持学位课程的相对稳定性和系统性,内容有足够的深度,而且对本门课程有较大的覆盖面。

这套《研究生教材》虽然从选题、大纲、组织编写到编辑出版,都经过了认真的调查论证和细致的定稿工作,但毕竟是第一次编辑这样高层次的教材系列,水平和经验都感不足,缺点与错误在所难免。希望通过反复的教学实践,广泛听取校内外专家学者和使用者的意见,使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院

西安交通大学出版社

1986年12月

前 言

模糊控制技术作为现代工业与新产品开发的高新技术之一,受到国内外普遍重视。1965年,美国加州大学自动控制专家Zadeh引入了模糊集合;1974年,Mamdani将模糊集合方法用到控制技术取得了成功;80年代模糊控制技术得到了普遍的应用。于是,模糊理论与应用的研究及模糊产品的开发像一股强劲的风浪席卷世界各地。

模糊控制技术能够被广泛重视,根本在于它反映了人类的经验与思维原则,并且能够将人们用语言表达的知识予以量化,使模糊环境下的控制技术通过计算机实现成为可能。它排除了建立繁杂数学模型的艰难,使工业界技术人员更容易接受和实现。模糊控制技术的应用大大地超前于模糊控制理论的研究。

本书是在大量应用成果的基础上,综述模糊控制技术的一般原理和方法。最核心的部分是模糊推理技术与模糊系统模型的建模技术。我于1994年在香港中文大学与梁怡教授、梁广锡博士经过近半年的科研合作,提出了包含度理论。理论上和实践上都指出,包含度理论概括了模糊推理技术。同时,它也可以用来研究不确定性模糊规则的产生方法;可以研究模糊规则的谐调性以及矛盾规则的排除;可以研究模糊系统模型的建模方法;可以研究模糊专家系统的实现方法。

本书叙述严格,深入浅出,简明扼要。可以作为工程学科研究生的教科书,也可作为工程研究人员的科研参考书。

张文修

1997.3.8

目 录

前 言

第 1 章 模糊控制系统的结构

- 1.1 模糊控制系统产生的背景 (1)
- 1.2 自然语言与模糊集合 (4)
- 1.3 模糊控制系统的基本结构 (8)
- 1.4 模糊控制系统的特点 (13)
- 1.5 模糊系统的应用与发展前景 (16)

第 2 章 模糊集合的概念与运算

- 2.1 模糊集合的运算及其性质 (20)
- 2.2 模糊集合的基本定理 (25)
- 2.3 模糊关系与模糊关系方程 (31)
- 2.4 模糊测度与模糊积分 (37)
- 2.5 模糊度与相似度 (42)
- 2.6 模糊集及其运算的扩充 (47)

第 3 章 模糊推理的基本原理

- 3.1 模糊推理的基本思想 (55)
- 3.2 模糊推理的 Mamdani 算法 (60)
- 3.3 多段模糊推理的 Mamdani 算法 (65)
- 3.4 模糊推理算法的生成方法 (72)
- 3.5 模糊推理的规则再现算法 (78)
- 3.6 模糊值推理 (85)
- 3.7 包含度理论 (91)
- 3.8 可能性推理 (95)

第4章 模糊控制器的设计

4.1 模糊控制器设计原理	(99)
4.2 模糊控制与PID控制的比较	(105)
4.3 汽车驾驶系统的模糊控制	(110)
4.4 目标跟踪系统的模糊控制	(113)
4.5 模糊控制器的完备性	(116)
4.6 模糊控制器的相容性	(117)
4.7 模糊控制器的稳健性	(126)
4.8 模糊控制器设计的进展	(128)

第5章 模糊系统模型

5.1 模糊系统模型的模糊性	(135)
5.2 模糊系统模型的辨识	(140)
5.3 模糊系统模型辨识的强力方法	(144)
5.4 模糊系统模型辨识的逼近方法	(151)
5.5 模糊系统模型辨识的代数方法	(155)
5.6 神经网络与模糊系统的等价性	(159)
5.7 模糊系统模型辨识的神经网络方法	(163)

第6章 模糊专家系统

6.1 专家系统与模糊性	(168)
6.2 模糊专家系统	(171)
6.3 相似度及其在专家系统中的应用	(175)
6.4 专家系统中证据的合成、传播与修正	(180)
6.5 关系数据库上的知识获取	(184)
6.6 蕴含度与专家系统中的不确定性推理	(188)

参考文献	(194)
------	-------

第 1 章 模糊控制系统的结构

1.1 模糊控制系统产生的背景

控制技术被广泛地应用在各种工业技术领域里,成为现代高新技术的重要手段之一。随着控制技术的发展,控制理论与方法也得到发展。除了对 PID 型控制器在应用前景方面的广泛研究以外,状态空间方法,随机方法,优化控制,滤子方法以及状态估计法的理论研究及应用也取得了明显的成功。

经典的控制技术有一个明显的特征,即模型的结构非常精确。它是根据控制系统的物理、化学以及力学等特征,导出一些常常是复杂的模型方程。求解这些方程需要比较复杂的算法。由于数值计算与计算机技术的发展,算法复杂性已不会太大影响实际控制的精度。但是在这些模型方程中含有众多的参数需要估计,求解这些参数却缺少足够的信息量与信息特征。如果不能很好解决这些参数估计问题,再好的模型方程也是一个不太好的控制系统。

目前研究的控制系统更多涉及到多变量、非线性、时变的大系统,系统的复杂性与控制技术的精确性形成了尖锐的矛盾。正如 L. A. Zadeh 所指出的,当系统日益复杂,人们对它的精密而有意义的描述的能力将相应地降低,以至达到精密与有意义成为两个几乎相互排斥的特征的地步。要想精密确切地描述复杂现象和系统的任何现实的物理状态,事实上是办不到的。这样就迫使人们在控制系统的精确性与有意义之间寻求某种平衡和折衷。

人们又重新回到实际控制系统。比如汽车驾驶系统,一个熟练的汽车司机可以自由地控制汽车通过各种狭窄的通道,躲避各

种各样的障碍物,但是应用经典的控制理论建立模型方程的方法是相当困难而且不现实的。

又如自动洗衣机系统,给出了洗涤、清洗与烘干的过程与过程选择,事先由人们根据所洗衣服的状况对过程的各个步骤进行设定。一旦设定以后,洗衣机就根据设定进行控制操作整个洗衣服的过程。

再如空调器,它本身不能理解人的感觉,当温度迅速回升与迅速下降时,它不能够迅速地将室温控制到一个正常温度。它总是按照某种设定的参数运行。为了加速升温过程必须重新改变某种设定。

在以上的系统中,人被理解为最成功的非线性控制器,而这种控制器的参变量则是时间变化的函数。人的经验参与控制过程的成功,激发了人们对控制原理的深入研究。这种原理是以能包含人类思维的控制方案为基础,而且反映人类经验的控制过程的知识,以及可以达到的控制目的能够利用某种形式表达出来,同时还很容易被实现。这样的控制系统既避免了那种精密、反复、有错误倾向的模型建造过程,又避免了精密地估计模型方程中各种参数的过程。在多变量、非线性、时变的大系统中,人们可以采用简单灵活的控制方式,这就是模糊控制器产生的背景。

模糊控制器最重要的特征是反映人们的经验以及人们的常识推理规则,而这些经验与常识推理规则是通过语言来表达的,比如说“温度太高,温度上升的速度也很快,就要采用大幅度降温的控制策略”。对于用语言表达的这种经验必须给出一种描述的方式,而且这种经验是多种多样的。比如还可以有经验规则“温度稍低,升温的速度很快,就要采用稍微降温控制策略”。综合考虑众多的控制策略,即是一种常识推理规则。

幸运的是,美国加利福尼亚大学的自动控制教授 L. A. Zadeh 于 1965 年首次提出了“模糊集合”的概念,借助于“模糊集

合”可以描述诸如“太高”、“很快”、“稍低”、“大幅度”等语言变量值,并且对这些语言变量值进行某种复合运算,这样就使得有人的经验参预的控制过程成为实际可能。1973年,L. A. Zadeh 又进一步研究了模糊语言处理,给出了模糊推理的理论基础。1974年,E.H. Mamdani 提出了模糊控制,1980年开始模糊控制的应用研究,1985年开始模糊推理集成块的开发,1986年在日本模糊控制器已成为商品之后,各种各样的模糊控制产品及系统应运而生。特别是于1987年在日本,基于模糊控制的仙台地铁开通以后,各种家电的模糊产品相继研制成功并进入市场,如洗衣机、照像机、摄像机、复印机、吸尘器、电冰箱、微波炉、电饭锅、空调器、电视机、淋浴器等。这些家电产品在节约资源、方便使用以及使用效果方面更富有“人情味”,更符合人的实际生活。同时,各种各样的模糊控制系统也被研制成功。比如,各种熔炉、电气炉以及水泥生成炉的控制系统,核能发电供水系统,金属板成形控制系统,汽车的控制系统,电梯及升降机的控制系统,机器人的控制系统,以及活跃于航空、宇宙、通讯领域里的专家系统。这些模糊控制系统的应用取得了明显的效益,并且在日本、美国、西欧、东南亚和中国引起了普遍重视。1984年,国际模糊系统学会成立;1985年,召开了第一届国际模糊系统学会的学术交流会。各个国家相继成立了模糊系统工程研究所,世界上一些大公司开始了模糊产品的开发。模糊理论与应用的研究以及模糊产品的开发像一股强劲的风浪席卷世界各地。

1989年,L. A. Zadeh 在接受本田奖授奖仪式上发表讲话指出,模糊理论是对“彻底排除不明确事物只以明确事物为对象”的科学界传统所作的挑战。这种理论对于如何处理与对待不明确事物,所依据的思路与过去的科学实质上完全不同。他认为,模糊理论今后将在两个领域取得较大进展。一是熟练技术者替代系统。这种系统将人无意识进行的操作由机器替代,如日本仙台市营地

铁的自动驾驶系统。二是替代专家的专家系统。像山一证券公司的股票交易系统以及医疗诊断系统。为使专家头脑中所进行的思考与决策能实现自动化,模糊理论将起重要的作用。当然,模糊理论并不能解决所有可能问题,但是只要不回避现实中的不确定事物并加以认真对待,就有可能大大提高在不确定(模糊)环境中进行智慧思考与决策的人及机器的能力。

我们相信,随着模糊控制与模糊系统的发展,人工智能、认知科学、行为科学、系统科学、管理科学、计算科学、情报科学等领域,也会借助模糊集理论得到迅速发展。

1.2 自然语言与模糊集合

在模糊控制系统中,首先涉及到的是人的经验。而人的经验通常是用语言来表达的。比如在医学等专家系统中,“年轻的人”、“年老的人”等是一种语言变量,“高个子”、“低个子”也是一种语言变量,“胖”与“瘦”也是一种语言变量。在一般的控制系统中,“大”与“小”、“高”与“低”、“左”与“右”、“稍许”、“非常”、“可能”等都是语言变量。这些语言的特征即是不确定性与模糊性以及模棱两可的性质。比如,20岁算“年轻的人”,25岁是不是“年轻的人”?60岁算“年老的人”,55岁是不是“年老的人”?向左进五档是“大”,向左进四档算不算大?这些语言变量所描述的概念通常是一个模糊集合。

数学意义上的集合是一个确定的事物的集合。对于某个事物,可以清楚而明确地确定它属于这个集合,或不属于这个集合。比如“女性”的集合,即是通常意义下的集合,某个人要么属于这个集合,要么不属于这个集合。“18岁以上的人”也是通常意义下的集合,一个人要么属于这个集合,要么不属于这个集合。这样,数学意义下的经典集合满足“排中律”,即“非此即彼”。但是“美

丽女子”的集合,以及“年轻人”的集合即是模糊集合,它是一个边界不明确的集合。比如对于女子王芳进行评价的时候,我们一般并不武断地声明“王芳属于美丽女子的集合”,或“王芳不属于美丽女子的集合”,我们宁可给出王芳一个实在的评价,比如王芳隶属于“美丽女子”集合的程度为0.8。这个评价值在0与1之间,越接近于1,隶属于“美丽女子”的集合的程度越大。比如考虑王芳、李春、刘艳、赵莹四个女子的集合,即

$$X = \{\text{王芳、李春、刘艳、赵莹}\}$$

这是一个经典集合,“美丽女子”的集合可以表示为

$$B = \{(\text{王芳}, 0.8); (\text{李春}, 0.7); (\text{刘艳}, 0.4); (\text{赵莹}, 0.6)\}$$

像这种基于将各种对象在0与1之间进行程度分配的描述即是模糊集合。具体来说,王芳隶属于“美丽女子”集合的程度为0.8;李春隶属于“美丽女子”集合的程度为0.7;刘艳隶属于“美丽女子”集合的程度为0.4;赵莹隶属于“美丽女子”集合的程度为0.6。这种隶属程度的给出,虽然具有某种主观性,但它比仅仅给出属于与不属于的简单方法要好得多。

假定 X 是一个普通集合, X 中的一部分 A 即是一个子集合。对于 X 中的元素 x , 要么 x 属于 A , 记为 $x \in A$; 要么 x 不属于 A , 记为 $x \notin A$ 。对于子集合, 我们可以用 X 到 $\{0, 1\}$ 的一个映射来给出

$$A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

因此映射 $A: X \rightarrow \{0, 1\}$ 给出了一个普通子集合。即

$$A = \{x \in X; A(x) = 1\}$$

假设 X 是一个普通集合, 称为论域。从 X 到区间 $[0, 1]$ 的映射 A 称为 X 上的一个模糊子集合。为方便计, 用正体表示经典集合, 用斜体表示模糊集合。 $A(x)$ 表示 x 隶属于模糊子集合 A 的

程度,称为隶属度, $A(\cdot)$ 称为隶属函数。若 X 为离散集合,可以表示为

$$A = \sum A(x)/x$$

如果 X 不是离散集合,可以表示为

$$A = \int A(x)/x$$

例 1.1 “美丽女子”的集合 B 为(见图 1.1)

$$B = 0.8/\text{王芳} + 0.7/\text{李春} + 0.4/\text{刘艳} + 0.6/\text{赵莹}$$

例 1.2 “年轻的人”的集合 Y (见图 1.2)

$$Y(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 25 \\ \left[1 + \left(\frac{x-25}{5}\right)^2\right]^{-1}, & 25 < x \leq 100 \end{cases}$$

在例 1.2 中,得到

$$Y(20) = 1, Y(30) = 0.5, Y(60) = 0.02$$

表明 20 岁绝对隶属于“年轻的人”, 30 岁隶属于“年轻的人”的程度为 0.5, 60 岁隶属于“年轻的人”的程度为 0.02, 可以认为 60 岁基本上不属于“年轻的人”。

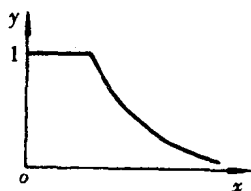
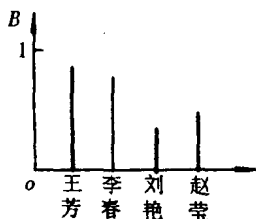


图 1.1 “美丽女子”的模糊集合 图 1.2 “年轻的人”的模糊集合

例 1.3 设论域 $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 可定义 X 上模糊子集

$$\text{“大”} = 0.6/3 + 0.8/4 + 1/5$$

$$\text{“小”} = 1/1 + 0.8/2 + 0.6/3$$

$$\text{“中”} = 0.8/2 + 1/3 + 0.8/4$$

$$\text{“非常大”} = 0.36/3 + 0.64/4 + 1/5$$

$$\text{“稍许大”} = 0.8/3 + 0.9/4 + 1/5$$

$$\text{“非常小”} = 1/1 + 0.64/2 + 0.36/3$$

$$\text{“稍许小”} = 1/1 + 0.9/2 + 0.8/3$$

例 1.4 “真”与“假”是 $[0, 1]$ 上的模糊子集。设论域为 $X = [0, 1]$, T 与 F 表示 X 中模糊子集“真”与“假”(见图 1.3 和 1.4), 即

$$T(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{1-a}\right)^2, & a < x \leq \frac{a+1}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-1}{1-a}\right)^2, & \frac{a+1}{2} < x \leq 1 \end{cases}$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - 2\left(\frac{x}{1-a}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{1-a}{2} \\ 2\left(\frac{x-1+a}{1-a}\right)^2, & \frac{1-a}{2} < x \leq 1-a \\ 0, & 1-a < x \leq 1 \end{cases}$$

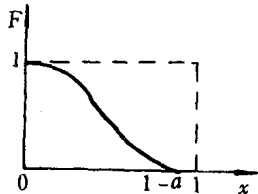
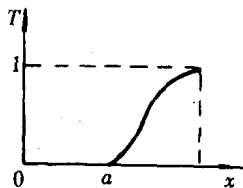


图 1.3 “真”的隶属函数

图 1.4 “假”的隶属函数

隶属函数是模糊子集的特征, 一个模糊子集与一个特定的隶

属函数相对应。经典子集是仅取 0 和 1 的隶属函数，而模糊子集是在 $[0,1]$ 上取值的隶属函数。由此可见，模糊子集是经典子集概念的推广。

1.3 模糊控制系统的基本结构

模糊控制系统是一种在模糊或非模糊推理规则中处理模糊信息的工具。各种研究表明，模糊控制系统在人工控制的各种控制系统中发挥了很好的作用。由于人类的经验参与控制过程，模糊控制系统已不是人为的，而是更加适应了一类特殊的控制过程。在这种控制过程中，最重要的是人工操作者的控制方案。这些方案是由某些“如果，那么”这样一些条件语句所构成。其中，“如果”表示条件和原因，“那么”表示结果或所采用的控制行为。它是用语言表达的人们的经验，表达了人们的思想，表明了当一种特定的控制过程状态被观察时，哪一种控制方案是比较现实的。

例 1.5 我们考虑空调器使室温最合适(保持在 23°C)的控制系统。通常的空调器是人工操作的，而且是依据以下人们的经验

规则 1: 如果热，那么加强致冷；

规则 2: 如果正好，那么原封不动；

规则 3: 如果冷，那么减弱致冷。

在这些规则中，“热”、“正好”、“冷”等概念都是一些模糊概念。同样“加强致冷”、“原封不动”、“减弱致冷”也是一些模糊概念。因此，这些规则本身都是用自然语言表示的一些模糊语句。这些规则表示了系统状态与控制行为之间的关系(如图 1.5)，我们称为“行为规则集”。但是，我们对目前系统状态给出的指标，可能是“ 25°C ”，或“ 21°C ”的数值，也可能是“稍冷”，“稍热”一类的感觉。因此，行为规则集不是一个简单的查询集，它要从目前的实际状

态出发,通过行为规则集的推理得到控制方案。

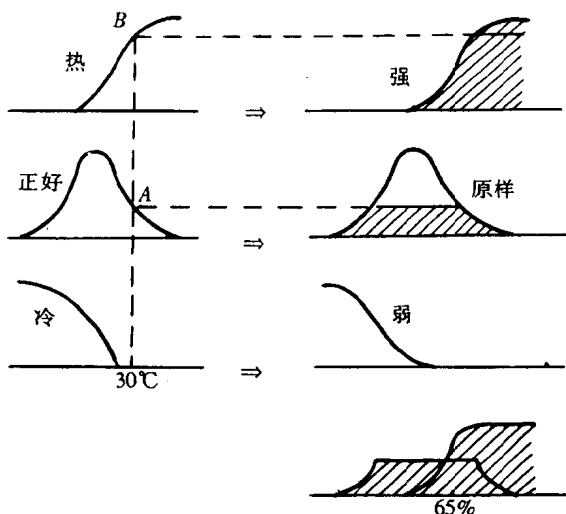


图 1.5 模糊空调器的控制过程

图 1.5 中的三个“ $\Rightarrow$ ”表示三条行为规则。箭头左边是系统状态,箭头右边是控制行为。如果目前的系统状态为 30°C ,则在规则 1 与规则 2 的“热”与“正好”的条件的隶属函数对应的交点为 B 与 A,用 B 的高度去截系统控制行为“强”的隶属函数,用 A 的高度去截控制行为“原样”的隶属函数即得两个阴影区域。将这两个阴影区域叠合起来,即得最下边图形上的阴影区域,求这个阴影区域在横坐标轴上的投影重心得到 65%,即是控制行为。

卷曲 65 型空调器的控制系统可以归结为(见图 1.6)

日本三菱重工业公司早在 1989 年 11 月就开始销售应用模糊技术控制的卷曲 65 型空调器,行为规则集在制冷与制热方面有 25 条,它不仅使用了温度差,还使用了温度差的变化。利用温度

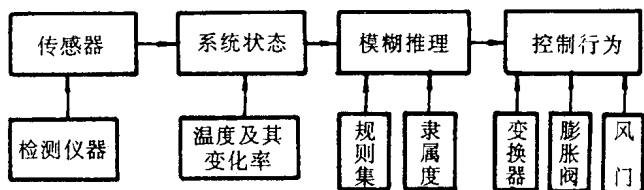


图 1.6 卷曲 65 型空调器模糊控制系统

差及温度差的变化率的“正大”、“负大”、“几乎为 0”的不同的组合,制定出各种行为规则。模糊空调器取得了明显效果。首先,最大效果是室温稳定,对室温的急剧变化反应灵敏。同时消耗的电能减少到原有产品的 76%,而且对于一般空调器改造起来比 PID 投资要少。

例 1.6 研究汽车运行的系统。为了防止与先行车发生冲突,我们有以下的经验规则

规则 1: 如果车间距离大、时速快,那么加速器原封不动;

规则 2: 如果车间距离大、时速慢,那么踏加速器;

规则 3: 如果车间距离小、时速快,加速器迅速退回;

规则 4: 如果车间距离小、时速慢,加速器原封不动;

这些规则称为行为规则集。其中的“大”、“小”、“快”、“慢”、“踏”、“退回”、“原封不动”为模糊概念,可以用模糊集来表示。模糊集“大”及“小”为 30m 区域作为论域区间 $[0, 30]$,模糊集“快”与“慢”是以 60km/h 的速度作为区域的论域区间 $[0, 60]$,模糊集“踏”、“退回”、及“原封不动”(原样)可以以 100%作为区域的论域区间 $[0, 100]$ (见图 1.7)。

图 1.7 中的四个箭头 $\Rightarrow$ 表示四条控制规则。它与例 1.5 控制系统不同的是箭头左边有两个状态。一是与先行车的车间距,二是汽车的时速。前件有两个条件决定后件的一个行为。与例 1.5