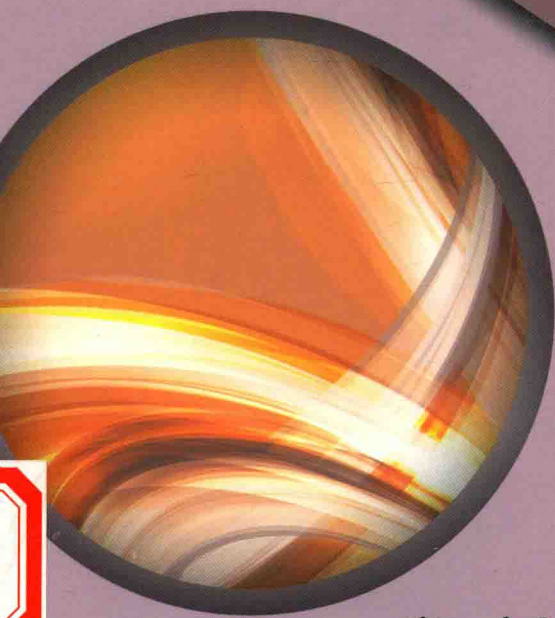


XIANXING DUOBIANLIANG SHIZHI XITONG JIEOU KONGZHI YANJIU

线性多变量时滞系统

解耦控制研究

胡增嵘 著



中国水利水电出版社

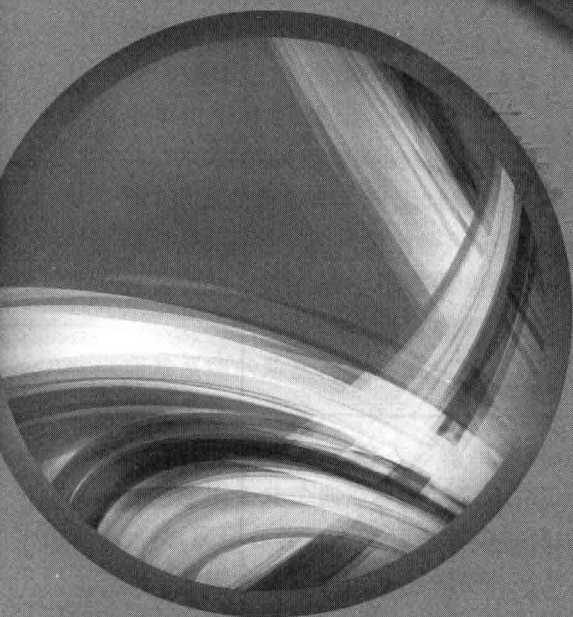
www.waterpub.com.cn

XIANXING DUOBIANLIANG SHIZHI XITONG JIEOU KONGZHI YANJIU

线性多变量时滞系统

解耦控制研究

胡增嵘 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对多变量时滞系统,在已有的频域解耦技术基础上,对解耦控制系统进行了更为深入的研究。本书分八章,前五章以理论为主,针对双输入双输出系统(TITO),根据耦合矩阵的思想,提出一种更为简单的动态解耦矩阵设计方法,解析设计PID解耦控制器;针对多输入多输出系统(MIMO),对逆解耦控制方案进行了深入研究和改进,分析讨论了前向通道选取对逆解耦矩阵实现性的影响,给出了逆解耦矩阵可实现的必要条件,提出一种逆解耦补偿矩阵规范设计准则,并对逆解耦矩阵的稳定性进行分析,给出完整的设计方案。后三章针对高维多输入多输出系统,设计逆解耦控制方案。将逆解耦控制方案应用于几个典型控制对象上,与目前多变量控制的各种典型方案进行比较,展示和验证了逆解耦方案在高维多变量控制上的优越性。

本书内容完整、结构系统、语言准确简练、图文并茂,兼具科学性、实用性等特点,希望为解耦控制系统的理论发展和生产实践应用提供帮助。

图书在版编目(CIP)数据

线性多变量时滞系统解耦控制研究/胡增嵘著. —

北京:中国水利水电出版社,2014.4

ISBN 978-7-5170-1858-2

I. ①线… II. ①胡… III. ①时滞系统—解耦系统—研究 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 061574 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:崔 蕾

书 名	线性多变量时滞系统解耦控制研究
作 者	胡增嵘 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.25印张 148千字
版 次	2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



作者简介

胡增嵘，男，汉族，1971年4月生，山西平遥县人，1995年7月参加工作，工学博士，太原科技大学机械工程学院教师，主要研究方向：多变量解耦控制。参加工作以来，在省级以上刊物共发表论文多篇，其中EI收录5篇。

摘 要

多变量时滞系统普遍存在于工业过程中,多变量系统由于时滞的存在,使得无论是对其控制还是理论分析都非常困难。多变量频域法由于各变量的物理概念比较明确、直观,在过程控制领域中被广泛应用。基于频域理论的研究成果大都限于单变量时滞过程,有关多变量时滞过程的解耦控制研究还很不完善,在设计方法和系统性能分析上都存在需要改进和完善的地方。

本书针对多变量时滞系统,在已有的频域解耦技术基础上,对解耦控制系统进行了更为深入的研究,希望为解耦控制系统的理论发展和生产实践应用提供帮助。本书的主要研究成果包括以下几个部分:

1. 针对双输入双输出系统,根据耦合矩阵的思想,提出一种更为简单的动态解耦矩阵设计方法,结合二自由度 PID 预期动态法(Desired Dynamic Equation, DDE),解析设计 PID 解耦控制器,采用 Monte Carlo 原理检验和评价控制系统的性能鲁棒性。

2. 对逆解耦器的设计问题进行研究,分析讨论了前向通道选取对逆解耦矩阵实现性的影响,给出了逆解耦矩阵可实现的必要条件。以时滞补偿为例,提出一种逆解耦补偿矩阵规范设计准则,对不满足时滞可实现条件的一类控制对象,提出一种基于 Pade 近似逆解耦矩阵改进设计方法。

3. 对逆解耦矩阵的稳定性进行分析,给出多变量系统逆解耦矩阵 BIBO 稳定充要条件。对无时滞逆解耦矩阵,采用矩阵分式描述(MFD)的数学工具,提出一种判定逆解耦矩阵稳定性的方案;对含时滞逆解耦矩阵稳定性分析,采用 Matlab 仿真形式进行判定。

4. 采用 Monte-Carlo 随机方法分析逆解耦矩阵概率稳定性,获取了多变量系统的阶次与逆解耦矩阵概率稳定性的分布规律,为逆解耦方法的应用提供指导意义。

5. 针对高维多输入多输出系统,设计逆解耦控制方案。将逆解耦控制方案应用于几个典型控制对象上,与目前多变量控制的各种典型方案进行比较,展示和验证了逆解耦方案在高维多变量控制上的优越性。

关键词:多变量,时滞,解耦,逆解耦,预期动态法(DDE)

Abstract

Multivariable system with time delays universally exist industrial processes. Due to time delays, both control and theoretic analysis of multivariable system are difficult. Multivariable frequency domain approach is broadly applied in process control field because of definite and intuitive physical conception of each variable. Frequency-domain-theory-based research results are restricted to single variable process with time delays whereas research on decoupling control of multivariable process with time delays is still very imperfect. There are still aspects of design method and system performance to be improved.

For multivariable system with time delays, this paper studies decoupling control system to some extent based on existing frequency domain techniques for decoupling. The main research results are reported as follows:

First, for TITO system, a simpler design method for dynamically decoupling matrix is proposed in terms of the idea of coupling matrix. PID decoupling controller is designed analytically by combining DDE (Desired Dynamic Equation) method for two degree-of-freedom PID. The robustness of system is checked and evaluated using Monte Carlo principle.

Secondly, The design of inverted decoupler is studied. The impact of choice of forward channel on realizability of inverted decoupling matrix is discussed and the necessary condition of realizability is presented. Taking time-delay compensation as an example, a normal principle of designing inverted decoupling compensation matrix is proposed. And for a large class of control objects that do not satisfy the realizability condition of time delays, an improved method of designing inverted decoupling matrix is proposed based on Pade approximation.

Thirdly, by virtue of analyzing stability of inverted decoupling matrix, a necessary and sufficient condition for BIBO stability of inverted decoupling matrix of multivariable system is presented. For inverted decoupling matrix without time delays, a scheme of determining stability of in-

verted decoupling matrix is proposed using the mathematical tool of matrix fraction description. For analyzing stability of inverted decoupling matrix with time delays, stability is determined through simulating in MATLAB.

Fourthly, stability of inverted decoupling matrix is analyzed using stochastic Monte-Carlo method, thereby distribution law of order of multivariable system and stability of inverted decoupling matrix. Some guidelines for application of inverted decoupling method are presented.

Finally, for MIMO system, an inverted decoupling control scheme is designed. The scheme is applied to several typical control objects. In comparison with other typical schemes of multivariable control, the scheme is superior in multivariable control.

Key Words: Multivariable, Time delays, Decoupling, Inverted decoupling, Desired Dynamic Equation

目 录

摘 要	I
Abstract	II
插图清单	VII
附表清单	IX
1 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 现代多变量频域控制理论的发展	2
1.3 现代多变量频域解耦控制方案综述	3
1.3.1 系统内部耦合分析方法研究	3
1.3.2 解耦控制方法研究	6
1.4 本书的主要研究内容	12
2 双输入双输出时滞过程解耦控制设计	15
2.1 问题描述	16
2.2 双输入双输出时滞过程 PID 解耦控制器解析设计	16
2.2.1 解耦控制器矩阵设计	16
2.2.2 预期动态法 (DDE)	17
2.2.3 基于 Monte-Carlo 原理的控制系统性能鲁棒性评价	20
2.2.4 解耦 PID 控制器设计步骤	20
2.2.5 仿真实例	21
2.3 本章小结	31
3 逆解耦控制器设计	33
3.1 逆解耦矩阵设计及分析	34
3.1.1 逆解耦矩阵设计	34
3.1.2 逆解耦矩阵可实现分析	35
3.2 逆解耦补偿矩阵设计	36
3.2.1 前向通道选取	36
3.2.2 时滞补偿矩阵规范设计	39

3.2.3 基于 Pade 近似逆解耦矩阵设计	41
3.3 逆解耦控制器设计实例	42
3.3.1 时滞补偿矩阵规范设计	42
3.3.2 相对阶补偿矩阵设计	46
3.3.3 可实现补偿矩阵判定	46
3.3.4 逆解耦矩阵设计	47
3.4 本章小结	47
4 逆解耦矩阵稳定性分析	48
4.1 逆解耦矩阵 BIBO 稳定充要条件	49
4.1.1 无时滞逆解耦矩阵 BIBO 稳定性判据	50
4.1.2 时滞逆解耦矩阵 BIBO 稳定性判定	53
4.2 逆解耦矩阵概率稳定性分析	55
4.3 本章小结	58
5 多输入多输出时滞过程逆解耦控制设计	59
5.1 问题描述	60
5.2 逆解耦方案设计步骤	60
5.3 仿真实例	61
5.3.1 3×3 模型	61
5.3.2 4×4 模型	67
5.3.3 6×6 模型	75
5.4 本章小结	79
6 板形板厚系统解耦控制研究	80
6.1 板形板厚耦合系统模型分析	81
6.2 板形板厚系统仿真实验	83
6.2.1 控制方案描述	83
6.2.2 逆解耦方案设计	84
6.2.3 仿真实验	85
6.3 本章小结	88
7 四水箱液位控制研究	89
7.1 水箱液位控制问题描述	90
7.1.1 Feedback 四水箱实验装置介绍	90
7.1.2 Feedback 四水箱数学模型	92
7.1.3 控制方案描述	93
7.1.4 解耦控制器设计	94
7.2 四水箱仿真研究	96

7.2.1	仿真实例 1	96
7.2.2	仿真实例 2	99
7.2.3	仿真实例 3	101
7.3	四水箱实验	104
7.3.1	Feedback 四水箱关联分析	104
7.3.2	Feedback 四水箱解耦控制	105
7.3.3	Feedback 四水箱液面跟随控制	107
7.4	本章小结	109
8	总结及展望	110
8.1	研究总结	110
8.2	待完善的工作	111
	参考文献	112

插图清单

图 1-1	单位闭环多变量控制系统	3
图 1-2	能量响应曲线	5
图 1-3	分散控制结构	7
图 1-4	带有解耦器的控制结构	9
图 1-5	逆解耦控制结构	11
图 1-6	标准内模控制结构	11
图 1-7	Smith 预估控制结构	12
图 2-1	双输入双输出二自由度 PID 解耦控制系统	16
图 2-2	系统输出响应图	24
图 2-3	摄动系统性能鲁棒性分析	26
图 2-4	系统输出响应图	30
图 2-5	系统性能鲁棒性分析	31
图 3-1	逆解耦控制器矩阵表达	34
图 4-1	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	54
图 4-2	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	55
图 4-3	阶次与逆解耦矩阵稳定频率分布图	57
图 5-1	多变量过程逆解耦控制系统	60
图 5-2	时滞逆解耦矩阵稳定判定图	64
图 5-3	系统输出响应图	64
图 5-4	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	65
图 5-5	系统输出响应图	67
图 5-6	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	68
图 5-7	系统输出响应图	71
图 5-8	HVAC 四房间温控模型	71
图 5-9	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	74
图 5-10	系统输出响应图	75
图 5-11	时滞逆解耦矩阵稳定性判定图	77

图 5-12	系统输出响应图	78
图 6-1	板形板厚系统逆解耦 PI 解耦控制系统	84
图 6-2	板形板厚系统解耦方法比较	85
图 6-3	板形板厚系统输出响应图	86
图 6-4	板形板厚系统性能鲁棒性分析	87
图 7-1	水箱实验装置结构示意图	90
图 7-2	水箱实验装置	91
图 7-3	水箱示意图	91
图 7-4	水箱工作原理图	92
图 7-5	预期动态解耦控制系统	93
图 7-6	不确定性结构图	95
图 7-7	系统输出响应图	98
图 7-8	摄动系统性能鲁棒性分析	98
图 7-9	系统输出响应图	100
图 7-10	摄动系统性能鲁棒性分析	101
图 7-11	系统输出响应图	103
图 7-12	摄动系统性能鲁棒性分析	103
图 7-13	四水箱关联分析	105
图 7-14	四水箱解耦效果对比图	107
图 7-15	四水箱预期动态解耦控制系统	107
图 7-16	四水箱液面跟随实验	109

附表清单

表 2-1	对象模型及解耦矩阵表	22
表 2-2	控制器参数表	23
表 2-3	摄动系统性能指标统计表	26
表 2-4	控制方案参数	29
表 2-5	标称系统性能指标统计表	30
表 2-6	摄动系统性能指标统计表	31
表 4-1	阶次与逆解耦矩阵稳定频率分布表	57
表 5-1	控制方案参数	62
表 5-2	例 1 的 IAE 指标值比较	64
表 5-3	控制方案参数	66
表 5-4	例 2 的 IAE 指标值比较	67
表 5-5	控制方案参数	69
表 5-6	例 3 的 IAE 指标值比较	70
表 5-7	控制方案参数	72
表 5-8	例 4 的 IAE 指标值比较	75
表 6-1	IAE 指标值统计	87
表 6-2	摄动系统性能指标统计表	87
表 7-1	控制方案参数	97
表 7-2	摄动系统性能指标统计表	99
表 7-3	控制方案参数	100
表 7-4	摄动系统性能指标统计表	101
表 7-5	控制方案参数	102
表 7-6	摄动系统性能指标统计表	104
表 7-7	实验数据	105
表 7-8	控制方案参数	108

1 引言

1.1 研究背景及意义

多输入多输出时滞系统普遍存在于工业过程中,随着先进制造工艺的快速发展,越来越多的生产过程被构造为高维多变量时滞系统。如化工过程中的物料传输、石油冶炼过程中的质量控制和循环流化床的燃烧控制等都属于这一类系统。

在线性系统理论领域,基于所采用的分析工具和研究方法的不同,形成四个主要学派,分别是线性系统的状态空间法、线性系统的几何理论、线性系统的代数理论和线性系统多变量频域法^[1]。

状态空间法采用系统内部的状态描述来取代传递函数形式的外部输入输出描述,并将系统的分析和综合直接置于时域进行。状态空间法适用于单输入单输出系统(Single-Input-Single-Output, SISO)和多输入多输出系统(Multi-Input-Multi-Output, MIMO),线性时不变系统和线性时变系统,大大拓宽了所能处理问题的领域。能控性和能观性的引入使得系统的分析和综合过程建立在严格的理论基础上,并且已经发展了一整套较为完整成熟的理论和算法。

线性系统的几何理论对线性系统的研究转化为状态空间中的相应几何问题,采用几何语言对系统进行描述、分析和综合。

线性系统的代数理论是采用抽象代数工具表征和研究线性系统的一种方法。把系统各组变量间的关系看作是某些代数结构之间的映射关系,对线性系统描述和分析完全形式化和抽象化,使之转化为纯粹的抽象代数问题。

线性系统多变量频域法基于过程传递函数,采用频率域的系统描述和频率域的计算方法来分析和综合线性时不变系统。

线性系统的几何理论和线性系统的代数理论需要使用者具备一定数学

基础,并不适用于工程技术人员。状态空间法的优点是能够实现综合最优设计,能反映系统的内在优劣,解决经典频域法无法解决的一些设计问题;但缺点是需要有精确的数学模型,物理概念不直观,难于获得全部状态变量,设计的控制器阶次较高,结构过于复杂,成本高,因此难于工程实现。而多变量频域法方法则只需利用系统的外部输入、输出关系,各变量的物理概念比较明确、直观,因而更容易被工程技术人员掌握并接受。多变量频域控制理论已在应用中展示出许多优点,因而受到了控制工程界的极大关注,迅速在工业生产过程中得到广泛应用,且已在诸如造纸生产过程、化学反应过程、燃气轮机发电过程、核电站生产过程、空气压缩机运行、精馏塔的精馏过程、工业加热炉加热过程以及飞机发动机、飞机自动驾驶仪等多变量控制系统设计中收到了良好的预期效果^{[2][3]}。

多输入多输出系统由于时滞的存在使得无论是对其控制还是理论分析都有很大困难,目前基于频域理论的研究成果大都限于单变量时滞过程,如何实现多输入多输出时滞过程的控制是过程控制领域的研究热点和难点。过程控制领域中的许多学者已经对上述问题进行了大量研究和探讨^{[4][5][6][7]},基于频域传递函数模型,通过设计解耦器弱化或去除多变量各通道间的耦合,把多变量系统转化为一系列独立的单变量系统,再按照单变量的设计方法对多变量过程进行控制是过程控制领域中被广泛采用的研究手段和途径。虽然在解耦控制系统设计方面取得了一定的成果,但是有关多变量时滞过程解耦控制系统设计问题的研究还很不完善。多变量控制系统的解耦理论内容丰富,牵涉面广,有必要做细致的工作以促进和完善多变量过程控制理论的发展。

1.2 现代多变量频域控制理论的发展

现代多变量频域控制理论是以古典频域理论为基础发展形成的,主要设计思路是对多变量系统内部耦合进行分析和研究,根据分析结果确定合适的解耦控制方法,其实质是把多变量系统的设计转化为一系列独立的单变量系统的设计。

在现代多变量频域控制理论的发展过程中,对角矩阵法、逆 Nyquist 曲线法和特征轨迹法是普遍认可的几类频域方法。Boksenbom^[8]、Kavanagh^[9]和 Mesarovic 等人^[10]建立和发展起来的对角矩阵法是过程控制领域中普遍采用的一种解耦方法,这种方法的设计思路是设计一个解耦矩阵,使得被控对象传递函数矩阵模型和解耦矩阵的乘积是一个对角矩阵。

Rosenbrock 等人^[11]提出的逆 Nyquist 曲线法,对被控系统进行预补偿,使补偿后的传递函数矩阵具有对角优势,然后对各个对角元素采用单变量系统的 Nyquist 图设计方法进行设计,完成整个多变量系统的设计工作。MacFarlane 等人^[12]提出的特征轨迹法,通过分析特征函数的轨迹和系统稳定性之间的关系,提出控制器矩阵的设计方法。

这些方法都是单变量频域控制理论的自然推广,都保留了单变量频域设计方法的主要优点,能在设计动态性能良好的多变量控制系统时兼顾抑制交连^[13]。

1.3 现代多变量频域解耦控制方案综述

现代多变量频域解耦控制方案先对多变量系统内部耦合进行分析和研究,根据分析结果确定合适的解耦控制方法,把多变量系统的设计转化为一系列独立的单变量系统的设计。多变量控制系统的解耦方案的研究主要包含两方面内容:一是对系统内部耦合分析方法的研究,另一个是对解耦控制方法的研究^[13]。

1.3.1 系统内部耦合分析方法研究

对一个多变量耦合系统如何判断耦合程度,系统的各个通道中哪个通道耦合最严重,弱化系统的耦合度从哪个通道分离最好,系统控制变量和输出变量间的最佳配对等等,都迫切需要对系统内部的耦合进行分析研究。图 1-1 为单位闭环多输入多输出系统。

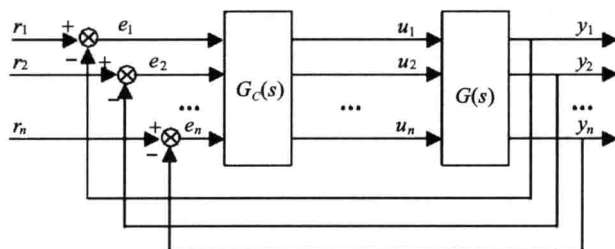


图 1-1 单位闭环多变量控制系统

其中 r_i 为设定值输入, y_i 为系统输出, u_i 为控制信号, e_i 为偏差信号, $i, j = 1, 2, \dots, n$, $G_c(s)$ 为控制器, $G(s)$ 为被控对象, $g_{ij}(s)$ 表示第 j 个输入至第 i 个输出的传递函数, $G_c(s)$ 和 $G(s)$ 的具体形式见公式(1-1)和(1-2)。

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdots & g_{nm} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ & c_{22} & & \\ & & \cdots & \\ & & & c_m \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

1) 对角优势矩阵方法

Rosenbrock^[11] 针对 $G(s)$ 提出对角优势矩阵方法, 给出当 s 的取值为 D 形围线(以半径无穷大的半圆顺时针包围右半复平面一周所形成的围线, 围线上如有传递函数的极点, 以半径为无穷小的半圆从右侧绕过) 时, 行对角优势的判定公式为:

$$|d_{ii}(s)| > \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n |d_{ij}| \quad (1-3)$$

列对角优势的判定公式为:

$$|d_{ii}(s)| > \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n |d_{ji}| \quad (1-4)$$

对于具备行或列对角优势的系 统, 不需解耦, 系 统也具有较好的调节性能。该方法简单实用, 但并不能定量说明系统的耦合程度。

2) 相对增益矩阵法(RGA) 方法

相对增益矩阵法(Relative Gain Array, RGA) 是被普遍认可的分析系统内部耦合的方法^[15], 由 Bristol^[16] 提出, 配对法则是通过分析系统内部耦合的静态特性推导出来的, 推导过程只需要考虑过程稳态增益, 方法简单实用。

定义 $(\partial y_i / \partial u_j)^1$ 为开环增益, $(\partial y_i / \partial u_j)^2$ 为 $[y_i, u_j]$ 环开环, 其他环闭合时的增益, λ_{ij} 为相对增益系数。

$$\lambda_{ij} = \frac{(\partial y_i / \partial u_j)^1}{(\partial y_i / \partial u_j)^2} \quad (1-5)$$

则 RGA 为:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nm} \end{bmatrix} \quad (1-6)$$