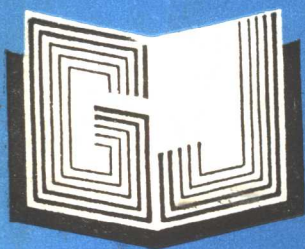


983218



高等学校教材

水电站机组控制计算机仿真

武汉水利电力大学 徐枋同 李植鑫 合编



736
47



高等学校教材

水电站机组控制计算机仿真

武汉水利电力大学 徐枋同 合编
李植鑫

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

高等学校教材

水电站机组控制计算机仿真

武汉水利电力大学 徐枋同 合编
李植鑫

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路 6 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 9 印张 205 千字

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月北京第一次印刷

印数 0001—1000 册

ISBN 7-120-02229-6/TV·887

定价 5.30 元

内 容 提 要

本书阐述控制系统计算机仿真的基本原理和方法,及其在水电站机组控制系统的分析、设计和参数优化整定等方面的应用。全书共六章,主要内容有:水电机组调节系统的数学模型;连续系统仿真原理和方法;采样系统仿真原理和方法;机组控制系统的参数整定和优化技术;考虑机组非线性特性的计算机仿真等。为了专业学习的需要,书中的仿真算例均结合水电机组控制中的问题。

本书是高等学校“水能动力工程”和其相近专业高年级学生“计算机仿真”课程的教材。也可供从事水电站机组自动控制和自动化工作的科研和工程技术人员阅读。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

前 言

本书是根据1988年5月“水利水电类”专业教学委员会南京会议精神和水利部1988年7月制订的1990~1995年教材选题规划,作为“水利水电动力工程”专业的“计算机仿真”选修课教材编写的。

全书主要内容有:水电站机组调节系统的数学模型;连续系统的仿真;采样系统的仿真;水轮机调节系统参数优化;水轮机非线性特性仿真计算等部分。

上述内容是在我院“水利水电动力工程”专业讲授了数届“计算机仿真”选修课的基础上选定的,其特点是紧密结合专业内容来介绍仿真的原理和方法,为此在每章都安排了结合专业的算例。在取材上,鉴于微机控制技术的日益推广应用,所以对采样系统仿真给予了足够的重视。对于按现代控制理论设计的控制系统仿真也安排了一定的篇幅。

学习本教材,其中第三、四、六章是基本内容,第五章可以根据需要选用。除课堂教学外,还应配合上机实验。

本书除可作为高年级的选修课教材外,也可供从事水轮机调节系统或自动励磁调节系统设计、制造、调试及运行等方面技术人员的参考书。

本书第一、二章和第六章第二节由徐枋同编写;第三章和第六章第一节由武丽雄编写;第四、五章由李植鑫编写;崔悦琳参加了部分程序的编制和调试。全书由徐枋同统稿。

本书由华中理工大学沈宗树主审。

由于编者水平有限,错误和不当之处敬请广大读者批评指正。

编 者

1994年3月

目 录

前 言	
第一章 概论	1
第二章 水电站机组调节系统的数学模型	3
第一节 数学模型的类型	3
第二节 水轮机调节系统的数学模型	4
第三节 自动调节励磁系统的数学模型	15
第三章 连续系统的计算机仿真	20
第一节 连续系统按环节离散化仿真	20
第二节 水轮机调节系统仿真计算	37
第三节 连续系统非线性的仿真	39
第四节 考虑调速器非线性的水轮机调节系统仿真	49
第五节 自动励磁调节系统仿真计算	50
第六节 直接面向微分方程的仿真算法	52
第七节 计算步长的选择	58
第四章 采样系统的计算机仿真	60
第一节 采样控制系统仿真的特点	60
第二节 线性采样系统的数学描述	62
第三节 离散系统(环节)的仿真	67
第四节 按直接设计法的采样系统仿真	76
第五节 信号的采样和保持	92
第五章 水轮机调节系统参数优化	97
第一节 概述	97
第二节 单纯形寻优法	101
第三节 最优参数的搜索	108
第四节 二次型最优调节器的设计与仿真	113
第六章 考虑水轮机非线性特性的计算机仿真	128
第一节 数表的制作及其相应子程序	128
第二节 考虑水轮机非线性特性的仿真	131
参考文献	136

第一章 概 论

人们在进行物理（或工业）系统的分析、综合和设计的过程中，通常要对系统进行实验研究。实验首先是在模型上进行的，模型要尽可能与真实的对象相像，所以叫做“仿真”，也就是“模拟”的意思。因此，仿真就是应用功率不大的，参数和结构易于按研究内容需要而变换的模型来代替真实的各种各样的物理系统。

用作研究和实验的模型可有三种型式，如图 1-1 所示。

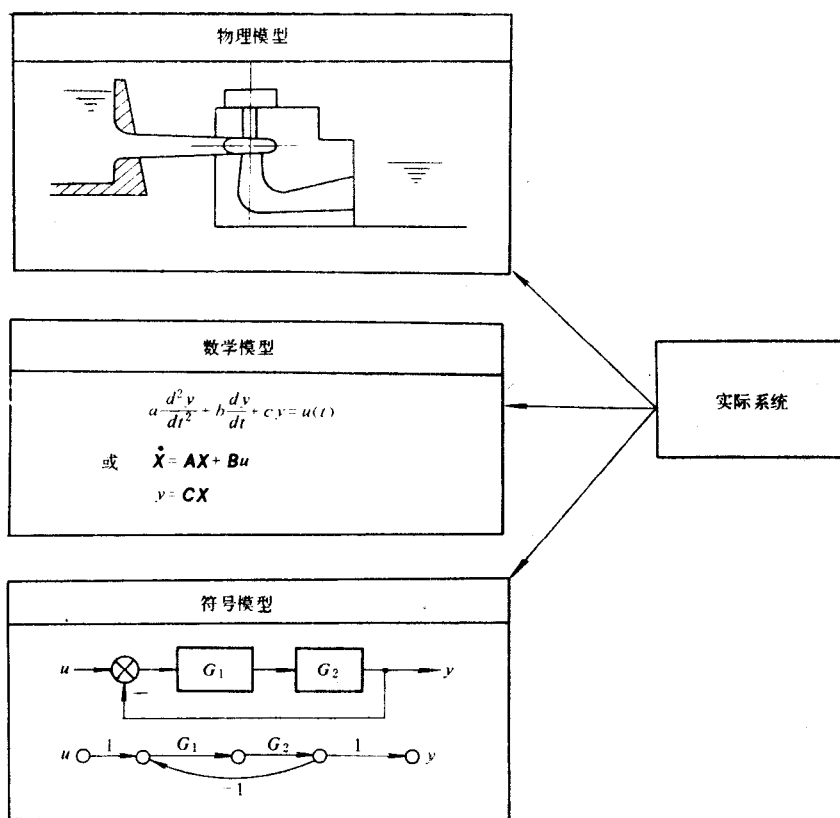


图 1-1 模型的分类

(1) 物理模型：用缩小（或放大）了的尺寸，制作与原系统符合相似律的模型。模型的变量与原型的变量完全一样。例如水轮机试验模型，水工试验模型等。

(2) 数学模型：根据物理学、化学等基本定律，用数学方程来描述所研究系统的工作原理或运动过程。例如用微分方程来描述压力水管中的水击现象或有储能元件电路的电压电流关系等，然后求解在某一种输入（或因素）作用下，该系统的运动或响应过程。

(3) 符号模型：用系统结构图或信号流程图来描述系统信息的传递和信息变量之间的关系。符号模型通常可以互相转换，所以它实质上也是数学模型。

因此，仿真可分为基本的两大类，即物理仿真和数学仿真。

物理仿真的主要优点是它保持了原型系统的物理本质，能直观地反映被研究对象的机理和过程，以及一些难以用数学描述或不可能概括在数学方程中的真实现象。它的缺点是：

(1) 不同的研究对象需要不同的物理模型。当对象的参数改变时，模型就得更换。

(2) 建造复杂对象的物理模型是很不容易的，需要花费很高的代价和较长的时间。

数学仿真情况就不一样。不同的物理系统只要它们的变化规律相同，其数学模型就是相同的，可用同一套装置（或同一方程）来进行仿真。所以数学仿真的基础，正是原型与模型之间数学方程描述的相似性。数学仿真可以方便地引入可变参数、各种初始条件和干扰作用等。

在仿真工作中，还可以将物理仿真与数学仿真结合起来，组成数学—物理混合仿真。例如，研究水轮机调节系统时，可将机组和调速器的液压随动部分采用数学仿真，而将调速器的电子（或微机）部分用真实的装置。

由此可见，物理仿真和数学仿真并不是相互排斥的，相反，两者是相辅使用的。在研究工作的初始阶段或当需要进行众多方案比较时，采用数学仿真可起到快捷和改变参数方便等优点。而随着工作的深入，往往需要采用物理仿真，以考虑实际存在而理论方法又难以描述的各种因素的影响。在数学仿真和物理仿真的基础上，有时还需要进行中间性的原型试验，以进一步考核和验证该项研究结果的正确性。

电子计算机是数学仿真的主要工具。首先是从应用电子模拟计算机开始的，描述控制系统的微分方程由多级运算放大器来模拟，调节模拟计算机中的电位器即可方便地改变方程中的参数或输入值。求出系统的解后，以直观的时间函数曲线（过程曲线）形式描绘出来。随着数字计算机的发展，当今更广泛的是应用数字计算机进行系统的仿真。它能得出精确的响应过程结果，而且使用灵活，改变参数方便，便于仿真非线性，能方便地选择各种型式的输入，能实现最优化决策，特别是当数字计算机配有绘图机或光笔时，则具有更大的优越性。因之使得数字计算机在系统仿真中，越来越得到重视和发展。需要指出的是，数字计算机运算需要占用一定的时间，所以仿真是非实时的，又称离线仿真。模拟计算机在一定范围内可做到实时仿真。上述的数学—物理混合仿真，就是应用模拟计算机做数学仿真，这种混合仿真具有较高的实时性，又称为实时仿真。

本书的内容是结合水电站机组控制系统数学仿真的要求，介绍用数字计算机离线仿真的原理和方法。

第二章 水电站机组调节系统的数学模型

第一节 数学模型的类型

数学模型按时间上是连续的还是离散的,可分为连续模型和离散模型两大类。一般我们所研究的工业被控对象都是连续的,如果所采用的控制器也是连续的,则所组成的控制系统就是一个连续系统。例如,当水轮机调速器是机械液压型或电子液压型时,水轮机调节系统即为连续系统。如果是微机型调速器,由于调速器微机部分是离散模型,而液压随动和机组部分是连续的,在此情况下,整个系统是一个混合系统,又称为采样系统。

我们知道,一个连续系统(或环节)的运动过程,是用微分方程来描述的。根据被研究对象的特性和运动规律,有线性微分方程和非线性微分方程。前者称为线性系统(或环节),后者称为非线性系统(或环节)。线性系统又可分为定常(时不变)的和时变的两种。

对于高阶微分方程,我们可以把它分解成为一阶微分方程组来求解。用一阶微分方程组描述的数学模型,称为状态方程模型。

求解线性定常微分方程,拉氏变换是有力的工具。因此可对微分方程式等号两边的输入量和输出量分别取拉氏变换,并在零初始条件下取输出量与输入量之间象函数的比,即为该系统(或环节)的传递函数。用传递函数描述的模型称为传递函数模型,它不同于微分方程模型和状态方程模型,因为已不是时间域的了。

应用经典控制理论分析、综合自动控制系统时,一般都采用传递函数模型。特别是因为自控系统均由若干个环节组成,各个环节又可分解为最基本的典型环节的组。按环节来构成系统模型进行计算机仿真,当需要改变其中某个参数时修改很方便,而且很容易考察系统中某个环节(中间变量)的信息。

描述离散系统(或环节)输入与输出之间的运动规律或过程是用差分方程。应用 Z 变换,在零初始条件下取输出量与输入量两者象函数之比,即为脉冲传递函数。脉冲传递函数是研究离散系统常用的数学模型。同理,在时间域内也可用一阶差分方程组来描述离散系统或环节,这就是离散状态方程模型。

自控系统当采用计算机作为控制器时,又称为计算机控制系统。如同前述,由于被控对象往往是连续的,所以是采样系统。我们知道,计算机采样输入和其输出在时间上是离散的,所以作为控制器的调节规律要用差分方程或脉冲传递函数来表达,例如差分方程形式的PID规律。当水轮机调节系统中具有微机型调速器时,调速器调节规律的设计和整定有两种方法:一是按连续系统理论设计,得出调速器的传递函数,然后将其离散化由计算机来实现此调节规律,此时系统的仿真模型由离散(调速器)和连续(水轮发电机组)两部分组成,称为模拟化设计法;另一种为直接设计法,即首先将连续的对象部分离散化,如变换成脉冲传递函数(或离散状态方程),然后按离散系统理论设计调速器的脉冲传递函数,此时系统的仿真模型为离散模型。

第二节 水轮机调节系统的数学模型

水轮机调节系统是由压力引水道、水轮机、发电机和调速器等单元所组成的反馈控制系统。下面我们分别阐述系统中各组成部分的数学模型。

一、水轮机

混流式和轴流定桨式水轮机的特性,可用下面两个方程来表示

$$\left. \begin{aligned} M_t &= M_t(H, n, \alpha) \\ Q &= Q(H, n, \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中: M_t 为水轮机主动力矩; Q 为水轮机的过流量; H 为工作水头; n 为水轮机转速; α 为导水叶开度。

式(2-1)方程的函数呈非线性关系,但如考察的是在某一稳定工况点附近小范围内的变动,则将其线性化,即将上式用泰勒级数展开后只取第一项,得

$$\begin{aligned} \Delta M_t &= \frac{\partial M_t}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial M_t}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial M_t}{\partial \alpha} \Delta \alpha \\ \Delta Q &= \frac{\partial Q}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial Q}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \Delta \alpha \end{aligned}$$

式中: $\Delta M_t = M_t - M_{t0}$, $\Delta Q = Q - Q_0$, $\Delta n = n - n_0$, $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$ 。符号下角标“0”表示某一稳定工况点的数值(初始值)。再用相对于基准值(可取额定值)的标么量来代替这些量,即 $m_t = \frac{\Delta M_t}{M_r}$, $q = \frac{\Delta Q}{Q_r}$, $h = \frac{\Delta H}{H_r}$, $x = \frac{\Delta n}{n_r}$ 。符号下角标“r”表示额定值。由于在实践中接力器行程 Y 量测方便,而且它与导叶开度 α 通常有较好的线性关系,所以可用 Y 来代替 α ,即 $\Delta Y = Y - Y_0$, $y = \frac{\Delta Y}{Y_m}$, 其中 Y_m 为接力器最大行程。于是有

$$\begin{aligned} m_t &= \frac{\partial m_t}{\partial h} h + \frac{\partial m_t}{\partial x} x + \frac{\partial m_t}{\partial y} y \\ q &= \frac{\partial q}{\partial h} h + \frac{\partial q}{\partial x} x + \frac{\partial q}{\partial y} y \\ \text{或} \quad m_t &= e_h h + e_x x + e_y y \\ q &= e_{qh} h + e_{qx} x + e_{qy} y \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中: $e_h = \partial m_t / \partial h$, $e_x = \partial m_t / \partial x$, $e_y = \partial m_t / \partial y$, 它们分别是水轮机转矩对水头的传递系数、转矩对转速的传递系数(又称水轮机自调节系数)和转矩对接力器行程的传递系数。 $e_{qh} = \partial q / \partial h$, $e_{qx} = \partial q / \partial x$, $e_{qy} = \partial q / \partial y$, 分别为水轮机流量对水头、流量对转速和流量对接力器行程的传递系数。这六个传递系数严格言应根据水轮机的动态特性得出,考虑到在调节过程中水轮机工况变化的角频率一般 $\omega < 2\text{rad/s}$, 根据实验和理论分析,在此范围内用静态特性代替动态特性求取传递系数,其误差在工程允许范围之内,因此常用水轮机的综合特性曲线近似求得。另外需要指出,这些传递系数是随工况而变化的,在小范围内可作为常数处理。图 2-1 为水轮发电机组结构框图。

对于轴流转桨式水轮机,增加了一个桨叶转角变量 φ , 于是

$$M_t = M_t(H, n, \alpha, \varphi)$$

$$Q=Q(H, n, \alpha, \varphi)$$

同理,用标么值 $z=\Delta\varphi/\varphi_m$ 代表桨叶转角的变化量,其中 φ_m 为桨叶接力器最大行程所对应的桨叶转角。当接力器行程与桨叶转角呈线性关系时, z 即为桨叶接力器行程的标么值。与前述处理方法相同,可写出

$$m_t = e_h h + e_r r + e_y y + e_z z$$

$$q = e_{qh} h + e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qz} z \quad (2-3)$$

式中: $e_z = \partial m_t / \partial z$ 为转矩对桨叶转角的传递系数, $e_{qz} = \partial q / \partial z$ 为流量对桨叶转角的传递系数,其值也可近似从综合特性曲线求取。所不同的是, e_y 、 e_{qy} 应利用各个定桨工况下的特性曲线,而 e_z 、 e_{qz} 应先将各定桨工况下的特性曲线转换成各个定导叶开度工况下的特性曲线求取。

正如前面所指出的,式(2-2)或式(2-3)仅在小波动情况下是成立的,即在此情况下将水轮机的特性作为线性考虑。当必须考虑水轮机的非线性时,因难以用紧凑的数学方程式表达,通用的方法是根据水轮机综合特性曲线,将数据列表,计算时由查表和内插取用,第六章将结合算例介绍此类模型的仿真。

二、压力引水道

压力引水道的运动方程由水击方程描述。一般在小扰动的情况下,且管道长度小于 600~800m 时,可认为是刚性水击。与前面定义相同,用流量和水头变化量的标么值 h 、 q 表示的刚性水击方程为

$$h = -T_w \frac{dq}{dt} \quad (2-4)$$

式中: $T_w = \frac{LQ_r}{gFH_r}$ 称为水流惯性时间常数(s),它表示在额定水头 H_r 下,管道中流量由零增加到 Q_r 所需的时间。 T_w 越大,水流惯性越大,同样的流量变化时,水击压力变化就越显著。 L 与 F 分别代表管道的长度与截面积。对(2-4)式两边取拉氏变换,可得刚性水击的传递函数为

$$h(s) = -T_w s q(s) \quad (2-5)$$

有了引水道的模型表达式,即可根据图2-1画出水轮机(含引水道)部分从 y 到 m_t 的模型框图2-2。

如为混流式水轮机, $e_{qr} \approx 0$, e_{qr} 支路可略去。再将 e_r 与发电机负载自调节系数 e_g (参阅本节三、机组运动方程)合并一起放在发电机部分考虑,则在图2-2中还可将 e_r 支路移走。

对于“理想水轮机”,即认为效率为常数,且运行的工况为额定工况时,系数 $e_{qh} = 0.5$, $e_{qy} = 1.5$, $e_y = 1.0$, $e_h = 1.0$, 对混流式水轮机,按图2-2可写出最简化的传递函数为

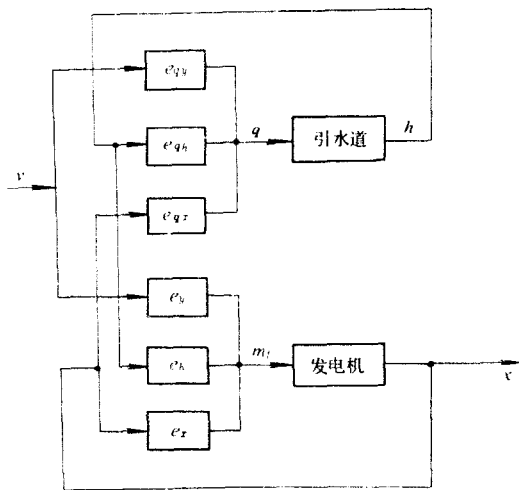


图 2-1 水轮发电机组
结构框图

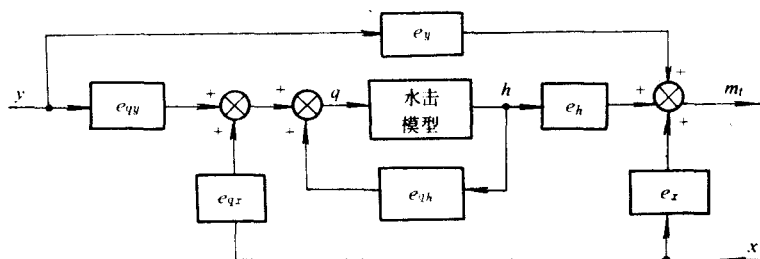


图 2-2 水轮机 (含引水道) 模型框图

$$G(s) = \frac{m_t(s)}{y(s)} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (2-6)$$

当引水道较长, 水及管壁的弹性不容忽略时, 应按弹性水击方程建立模型。其表达式为

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -2\beta \text{th} \left(\frac{T_r}{2} s + \alpha \right)$$

其中

$$\beta = \frac{2T_w}{T_r^2} \left(\frac{T_r}{2} s + \alpha \right); \quad T_r = \frac{2L}{c}$$

c 为压力波速, α 为考虑水力摩阻引入的系数, 当摩阻可忽略时, $\alpha=0$, 则有 $\beta=T_w/T_r=h_w$, h_w 称为管道特性系数, 于是

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -2h_w \text{th} \frac{T_r}{2} s \quad (2-7)$$

将正切双曲函数展开成级数并只取前两项, 有

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -h_w \frac{T_r s + \frac{1}{24} T_r^3 s^3}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2} \quad (2-8)$$

将 (2-7) 式纳入图 2-2 中水击模型的框内, 即可写出弹性水击下的水轮机 (含引水道) 的传递函数为

$$G(s) = \frac{e_y - (e_{qy} e_h - e_{qh} e_y) 2h_w \text{th} \frac{T_r}{2} s}{1 + 2e_{qh} h_w \text{th} \frac{T_r}{2} s} \quad (2-9)$$

需要指出的是, 上述模型均系引水道为简单管时, 如为复杂管 (有分叉) 或引水道中设有调压井时, 则应按具体边界条件写出相应的微分方程。有关内容读者可查阅相应专业书籍。

在需要考虑接力器行程 y 与导叶开度 τ 为非线性关系, 以及水轮机的非线性时, 模型框图将有所不同。设 y 与 τ 的关系可列数表 $\tau(y)$, 水轮机综合特性可列成数表 $\{Q'_1, n'_1, \tau\}$ 和数表 $\{\eta, n'_1, \tau\}$ 。在此情况下要用查表方法计算。需要指出的是, 水轮机综合特性曲线是在稳态情况下得到的, 所以用它计算只是一种近似方法。考虑非线性特性时水轮机 (含引水道) 从 y 到 m_t 的模型计算框图, 如图 2-3 所示。

图中所示的换算, 是因为上面所述的 h 、 q 、 m_t 均为偏差量的相对值, 而数表中的值非

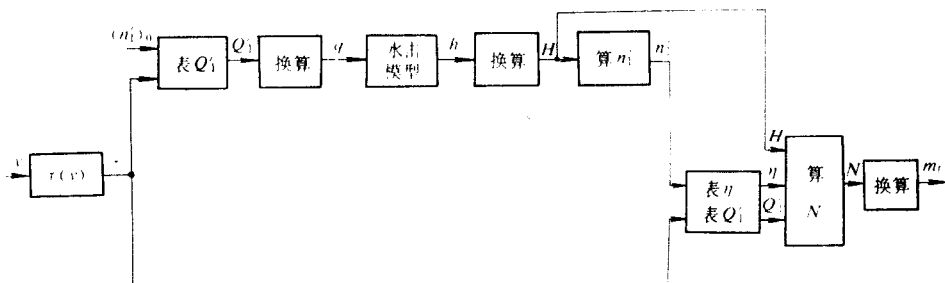


图 2-3 水轮机非线性模型计算框图

偏差量之故。

三、机组运动方程

水轮机主动力矩 M_t 与发电机负载力矩 M_g 之间的动态平衡关系，由机组运动方程描述。当两者相等时，机组保持恒速，当两者不相等时则转速变化。根据动力学原理，可建立其运动方程

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g$$

式中： J 为机组转动部分的转动惯量， $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ ； ω 为角速度， rad/s ； M_t 为水轮机主动力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； M_g 为发电机负载力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

与前述处理方法一样，采用相对于初始稳定工况（用下标“0”表示）的偏差量来代替，即 $\Delta M_t = M_t - M_{t0}$ ； $\Delta M_g = M_g - M_{g0}$ ； $\Delta \omega = \omega - \omega_0$ ，再用除以额定值 M_r 和 ω_r 后的标么值来表示，可改写运动方程为

$$\frac{J\omega_r}{M_r} \frac{d\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_r}\right)}{dt} = \frac{\Delta M_t}{M_r} - \frac{\Delta M_g}{M_r}$$

令 $\Delta\omega/\omega_r = x$ ； $\Delta M_t/M_r = m_t$ ； $\Delta M_g/M_r = m_g$ ； $J\omega_r/M_r = T_a$ ，得

$$T_a \frac{dx}{dt} = m_t - m_g \quad (2-10)$$

而 $T_a = \frac{J\omega_r}{M_r} = \frac{J\omega_r^2}{P_r} = \frac{1000GD^2}{4g} \left(\frac{\pi n_r}{30}\right)^2 / 102P_r = \frac{GD^2 n_r^2}{365P_r}$ (s)

式中： n_r 为机组额定转速， r/min ； P_r 为发电机额定功率， kW ； T_a 称为机组惯性时间常数，其物理意义是在不变的水轮机额定工况转矩作用下，机组从静止加速到额定转速所需要的时间，它表征机组本身惯性的大小。

对 (2-10) 式两边取拉氏变换，即得以力矩为输入量、转速为输出量的传递函数

$$G'(s) = \frac{x(s)}{m_t(s) - m_g(s)} = \frac{1}{T_a s} \quad (2-11)$$

水轮机转矩 m_t 前面已作讨论，这里讨论发电机负载力矩 m_g 。

电网的负荷是由并列运行的发电机共同担负的，负荷大小不仅与当时的电力用户有关，还与系统频率有关。为了便于分析，假设电力系统中只有一台发电机供电，则电网的负荷即为发电机的负载 m_g 。可将 m_g 分成两部分：一部分 m_{g0} 是由于电网中用户的投入或切除所导致的负载变化，它与系统频率的变化无关，在分析水轮机调节系统时，我们将其看作是负

荷的扰动量。另一部分是由于系统频率变化而引起的负载变动, 可用 $\frac{dm_g}{dx}x$ 表示, 所以

$$m_g = m_{g0} + \frac{dm_g}{dx}x$$

今用 e_g 代表 $\frac{dm_g}{dx}$, 称为发电机负载力矩对转速的传递系数, 又称为发电机负载的自调节系数, 于是

$$m_g = m_{g0} + e_g x \quad (2-12)$$

此即为发电机负载的表达式。

e_g 值的确定可根据实验数据得到, 也可由统计方法计算得出, 有关这方面的讨论请参阅专门书籍。

应该注意到, 在 (2-10) 式中的 T_a 只是代表机组这部分的转动惯量。实际上负载中的转动部分 (如电动机以及其它被拖动的转动机械) 也具有转动惯量, 它们起着与机组转动惯量相同的作用, 用负载惯性时间常数 T_b 表示其惯性的大小。 T_b 值的计算相当复杂, 因与负载有关, 一般由实验测定, 这里不作介绍。如根据国内外实验资料, 一般可取 $T_b = (0.24 \sim 0.30) T_a$ 。当计入 T_b 后, 式 (2-11) 改写为

$$G'(s) = \frac{x(s)}{m_t(s) - m_g(s)} = \frac{1}{(T_a + T_b)s}$$

对式 (2-12) 取拉氏变换, 有

$$m_g(s) = m_{g0}(s) + e_g x(s)$$

代入上式后, 有

$$G(s) = \frac{x(s)}{m_t(s) - m_{g0}(s)} = \frac{1}{(T_a + T_b)s + e_g} = \frac{1}{T_{ab}s + e_g} \quad (2-13)$$

据此可作出框图, 如图 2-4 (a), 再将前述水轮机转矩对转速的传递系数 e_x 归并在一起, 即得如图 2-4 (b) 的框图。

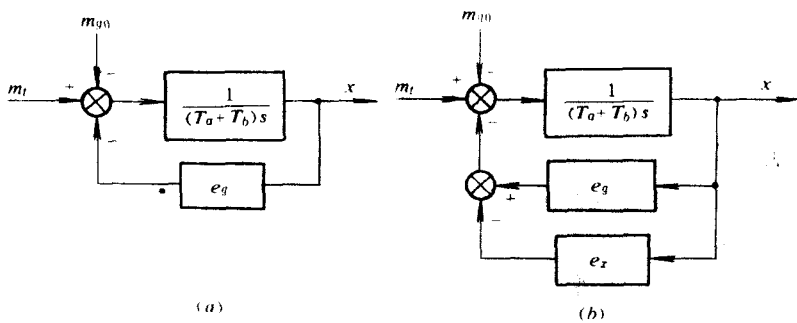


图 2-4 发电机及负载模型框图

上面讨论的是单机在孤立系统中的情况, 实际上电网中有若干台机组并列运行。在小扰动情况下, 可以认为各机组的转速与电网频率是同步的, 在此假设前提下, 可将并列运行的各台机组当作一个刚体绕固定轴转动来写其运动方程, 因此与 (2-10) 式具有相同的形式。此时系统总的机组惯性时间常数应按各台机在系统总功率中所占的比重加权总和折算而

得，总的力矩变化也可按此相同方法处理。关于这方面的进一步讨论已不属本书范围。

四、调速器^[5]

调速器的数学模型因其结构不同而异。一般目前应用的有四种类型，一是辅助接力器型，如 T 型、XT 型机械液压调速器和 DT-100 型、JST-100 型电气液压调速器等均属此类；二是中间接力器型的，如 DT-1800 型电液调速器；三是组合式集成元件电液调速器；四是微机调速器。这里我们仅从数学模型来作一介绍。

1. 辅助接力器型

根据其结构组成和信号流程，可将此类型的调速器概括成图 2-5 所示的框图。

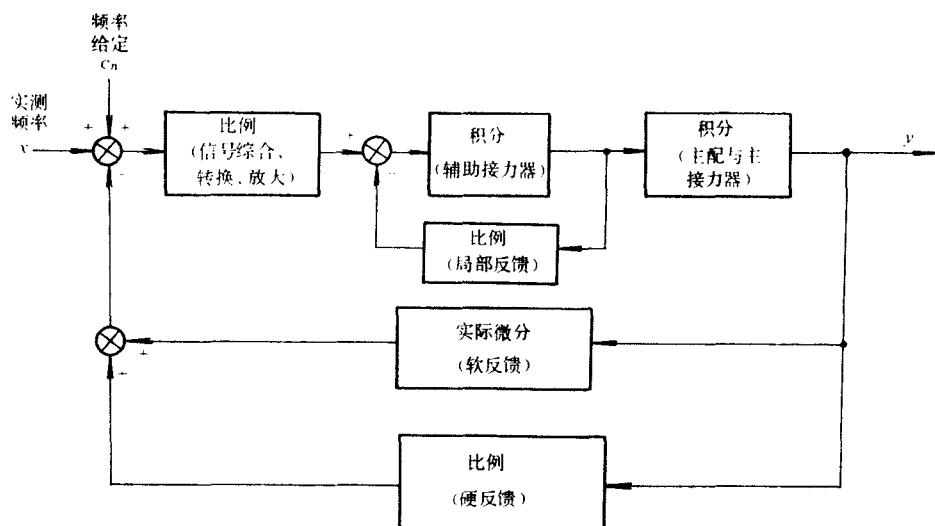


图 2-5 调速器结构框图（辅助接力器型）

按照习惯，辅助接力器和主接力器的积分时间常数分别用 T_{yB} 和 T_y 表示，局部反馈比例系数用 b_k 表示，实际微分为 $b_i T_d s / (1 + T_d s)$ ，比例硬反应用 b_p 表示，所以图 2-5 可改画为图 2-6 的传递函数模型框图。

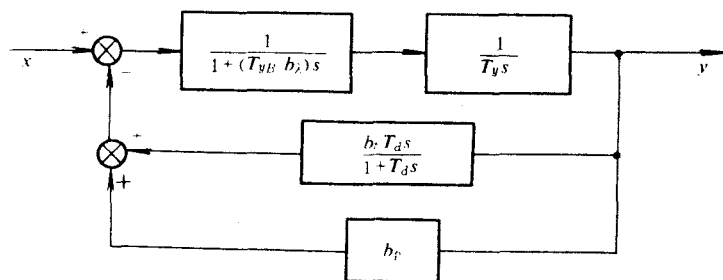


图 2-6 调速器模型框图（辅助接力器型）

当 T_{yB} 较 T_y 和 T_d 小得多而可以忽略时，则有

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1 + T_d s}{T_y T_d s^2 + [T_y + (b_i + b_p) T_d] s + b_p} \quad (2-14)$$

这类调速器具有 PI 调节规律，从图2-6的反馈通道中具有实际微分环节也可以看出。

2. 中间接力器型

此类调速器的主要特点是硬、软反馈是从中间接力器的输出端取出，由此将调速器分为调节部分和随动部分，其框图如图2-7所示。

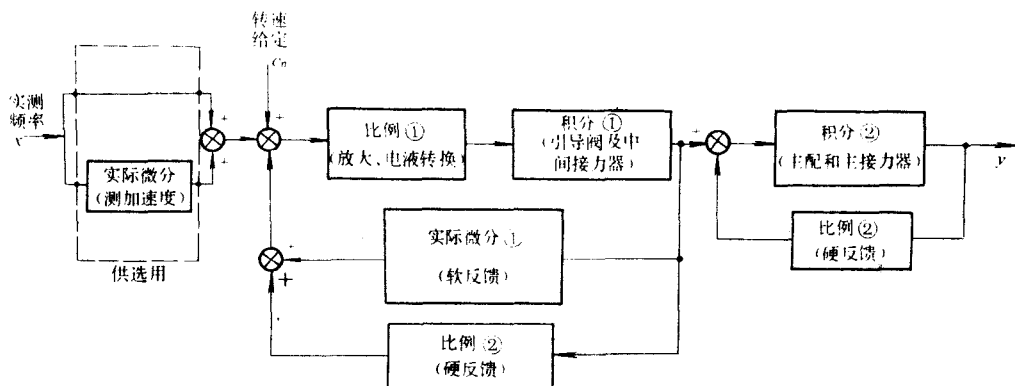


图 2-7 调速器结构框图 (中间接力器型)

以 DT-1800 型为例，如图2-7中比例环节①、②的增益均为1，积分环节①、②的时间常数分别为 T_{yn} 和 T_y ，软、硬反馈环节的表达式同前述，则整机的传递函数为

$$G(s) = \frac{1 + T_d s}{T_{yn} T_y T_d s^3 + [T_{yn} T_d + T_{yn} T_y + (b_p + b_i) T_d T_y] s^2 + [T_{yn} + (b_p + b_i) T_d + b_p T_y] s + b_p} \quad (2-15)$$

当 T_{yn} 与 T_y 和 T_d 相比小到可以忽略时，(2-15) 式降为二阶。当具有取加速度信号装置时，则 (2-15) 式 $G(s)$ 还应串联一项实际微分环节，即 $G(s)$ 再乘以 $K_{Ds}/(1 + T_n s)$ 项。

3. 组合式

采用集成运放元件的电调，可以很方便地构成组合式结构，此时 P、I、D 三功能一般采用并联的方式实现，以去除整定参数之间的相互干涉，另外将调节部分与随动部分分开，如图2-8所示。其传递函数按图2-9推导。

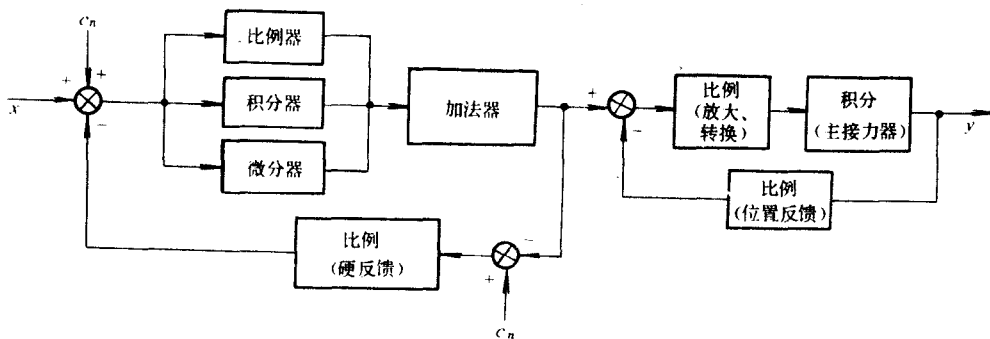


图 2-8 组合式电液调速器结构框图

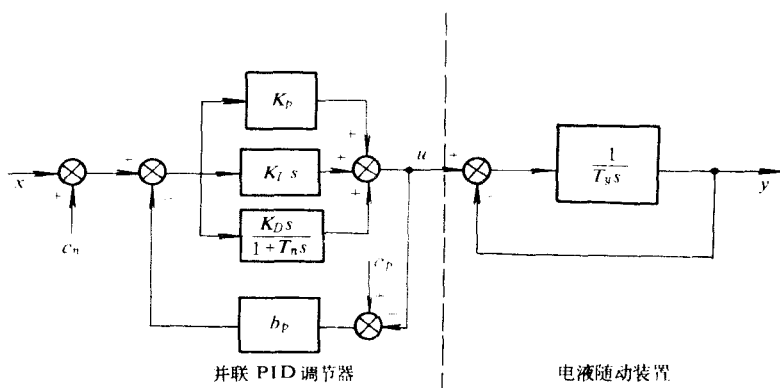


图 2-9 并联组合式电液调速器模型框图

$$G(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{b_p [K_D s^2 + (K_P + \frac{1}{b_p}) s + K_I] (T_y s + 1)} \quad (2-16)$$

当 $b_p=0$ 、 $T_y=0$ 时, 传递函数简化为

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

4. 微机型

微机型调速器的控制规律是由软件编程(算法)实现的, 所以是离散数学模型。当采用 PID 算法时, 一般先按连续系统理论设计, 然后再将其离散化, 即取 Z 变换成脉冲传递函数, 或直接接近似方法将连续的 PID 算式变换为离散的差分方程算式。

调速器的输入信号是频率偏差 $E(t)$, 其输出为控制作用 $u(t)$, 在连续系统情况下, PID 算式为

$$u(t) = K_P [E(t) + T_D \frac{dE(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \int_0^t E(t) dt] \quad (2-17)$$

式中: K_P 为比例增益, T_I 为积分时间常数, T_D 为微分时间常数。

要将上式改换成差分方程, 首先要选定采样周期 T , 用矩形法数值积分(欧拉法)近似替代微分和积分算式。对于 kT 时段, 可写出差分方程

$$u(k) = K_P [E(k) + T_D \frac{E(k) - E(k-1)}{T} + \frac{1}{T_I} \sum_{k=0}^k E(k) T] \quad (2-18)$$

(2-18) 式所表示的 PID 算式又称为全量式(位置式), 即控制器的输出 u 直接与执行机构的位置一一对应。如果执行部件具有保持位置(或状态)的功能, 则可用增量式算式, 此时控制器的输出量只是上一时段输出量的增减值。增量式算式的推导如下:

对于 $(k-1)T$ 时段, 有

$$u(k-1) = K_P [E(k-1) + T_D \frac{E(k-1) - E(k-2)}{T} + \frac{1}{T_I} \sum_{k=0}^{k-1} E(k)]$$

与式 (2-18) 相减, 可得增量式