

## 控制系统的基本概念

### 1.1 控制系统的发展历史

自动控制与许多现代科技领域有着密不可分的联系,它已经成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。什么是自动控制?自动控制就是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置(称为控制器)使机器设备或生产过程(称为被控对象)的某种工作状态或某参数(称为被控量,或称为输出量)按照预先设定的规律(称为参考输入或输入量)自动地运行。例如,人造地球卫星能够准确地进入预定轨道运行并且准确回收,宇宙飞船能够准确地降落在月球上并且安全返回,数控机床能够按照预先编制的程序自动地切割工件等都是自动控制水平发展的结果。

实现自动控制的理论称为自动控制理论。所谓自动控制理论,就是研究自动控制共同规律的技术科学。从自动控制理论发展的历程看,大致可分为以下三个阶段。

#### 1. 经典控制理论阶段(20 世纪 40~60 年代)

自动控制理论有着悠久的发展历史。早在三千多年前,中国人就发明了自动计时的“铜壶滴漏”装置;公元 132 年,东汉人张衡发明了世界上第一台自动测量地震的“地动仪”。

18 世纪欧洲产业革命的兴起,加快了经典控制理论和技术的产生与发展。1765 年俄国人波尔祖诺夫发明了最早的、具有历史意义的反馈系统——蒸汽机锅炉水位调节器;1784 年英国人瓦特发明了蒸汽机离心式调速器。在大机器时代,如何判定及设计稳定、可靠的调节器成为当时的主要研究课题。1872 年劳斯和 1890 年赫尔维茨先后提出了线性系统稳定性的代数判据,1892 年李雅普诺夫提出了非线性系统的稳定性判据,从而总结和发展了经典时域分析法;1932 年奈奎斯特发表了反馈放大器稳定性的著名论文,给出了在频域内系统稳定性的判据;1940 年伯德又进一步提出了简便、实用的频域响应的对数坐标图,1945 年伯德写了“网络分析和反馈放大器设计”一文,奠定了经典控制理论的基础。20 世纪 50 年代是经典控制理论发展和成熟的阶段。

经典控制理论的内容主要包括频率法(拉普拉斯变换及  $z$  变换)、根轨迹法、相平面法、描述函数法、稳定性的代数判据和几何判据、校正网络等。经典控制理论较好地解决了单输入单输出自动控制系统存在的问题。与此同时,自动控制系统不断由线性控制向

非线性控制发展,由定常系数控制向时变系数控制发展,由连续控制向采样控制发展,由分散控制向集中控制发展,由反馈控制向前馈控制、最优控制发展。

## 2. 现代控制理论阶段(20世纪60~70年代)

随着空间技术和电子计算机的快速发展,促进了现代控制理论和技术的产生与发展。20世纪50年代初期,空间技术的发展迫切需要对多输入多输出、高精度参数的时变系统进行设计和分析。当时,对于像这类控制系统都是经典控制理论无法解决的。于是,出现了把高阶常微分方程转化为一阶微分方程组的方法来描述系统的动态过程,即“状态空间法”,这一新的自动控制理论就是现代控制理论。1954年贝尔曼提出了动态规划理论,1956年庞特里亚金提出了极大值原理,1960年卡尔曼发表了“控制系统的一般理论”,1961年卡尔曼又与布西合作发表了“线性滤波和预测问题的新结果”,这一切奠定了现代控制理论的基础。20世纪70年代初期,奥斯特隆姆和郎道在自适应控制理论和应用方面作出了贡献。

现代控制理论的内容主要包括状态空间法、系统辨识、最佳估计、最优控制。现代控制理论基本上解决了多输入多输出自动控制系统的问题,系统既可以是线性的、定常的,也可以是非线性的、时变的。现代控制理论不但很好地应用于航空航天及军事等领域,而且还在工业生产过程中逐步发挥作用。

## 3. 大系统理论与智能控制理论阶段(20世纪70年代至今)

20世纪70年代末,控制理论从广度和深度上向“大系统理论”和“智能控制理论”方向发展。所谓大系统理论是以过程控制和信息处理为理论基础,研究规模庞大、结构复杂的多输入多输出控制系统。大系统理论的主要内容包括自适应控制、鲁棒控制、预测控制、现代频域控制等,应用于生产过程、空间技术、交通运输、环境保护等大型系统以及社会科学领域。目前,大系统理论仍然处于研究和发展中。

所谓智能控制理论是研究和模拟人类思维方式及其控制与信息传递过程的规律,应用于具有仿人智能的工程控制与信息处理系统,例如智能机器人。20世纪60年代初期,Smith提出采用性能模式识别器来学习最优控制法以解决复杂系统的控制问题;1965年Zadeh创立模糊集合论,为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具;1966年Mendel提出了“人工智能控制”概念;1967年Leondes和Mendel正式使用“智能控制”,标志着智能控制思想已经形成。20世纪70年代初期,傅京孙、Gloriso和Saridis提出了分级递阶智能控制,并成功地应用于核反应、城市交通等控制领域;20世纪70年代中后期,Mamdani创立基于模糊语言描述控制规则的模糊控制器,并成功用于工业工程控制。20世纪80年代以来,专家系统、神经网络理论及应用对智能控制起着促进作用。智能控制的主要内容包括专家系统、神经网络、模糊控制等。随着科学技术的不断发展,智能控制理论还会不断丰富和发展。

# 1.2 控制系统的基本类型

随着自动化技术和自动控制理论的发展,自动控制系统也日益复杂和日趋完善,涌现出各种类型的自动控制系统。下面就从不同的角度,阐述几个常见的自动控制系统的基

本类型以及它们的主要特点。

### 1.2.1 恒值控制系统和随动控制系统

按给定量的变化规律来划分,控制系统分为恒值控制系统和随动控制系统。

#### 1. 恒值控制系统

恒值控制系统又称镇定系统或自动调节系统,这种类型的系统是以给定量恒定不变为主要特点,其基本任务就是保证系统在任何扰动信号作用下,系统的被控量保持恒定,如以温度、压力、速度为参变量的控制系统大多数都属于恒值控制系统。

#### 2. 随动控制系统

这种类型的系统是以给定量随着时间任意变化为主要特点,其基本任务就是保证被控量以一定的精度跟踪(复现)给定量的变化。如位置随动系统、导弹发射架的控制、程控机床等都属于随动控制系统。

### 1.2.2 线性控制系统和非线性控制系统

按组成系统主要元件的性能来划分,控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统。

#### 1. 线性控制系统

它是由线性元件组成的控制系统,采用线性微分方程或差分方程来描述系统的状态和性能。如果方程的系数是常数,也称为线性定常系统,线性定常系统是经典控制理论中最常用来描述系统状态和性能的数学模型。线性控制系统的主要特点就是具有齐次性和叠加性,而且系统的响应与初始状态无关。

#### 2. 非线性控制系统

系统中含有一个或多个非线性元件,采用非线性微分(差分)方程来描述系统。其特点就是具有非齐次性和非叠加性,而且系统的响应与初始状态有关系。如含有像放大器和电磁元件这类具有饱和特性元件的控制系统就属于非线性控制系统。

### 1.2.3 连续控制系统和采样控制系统

按系统中的信号是否随着时间进行连续变化来划分,系统分为连续控制系统和采样控制系统。

#### 1. 连续控制系统

系统中各部分的信号都是时间的连续变化函数,常采用线性微分方程、拉普拉斯变换、传递函数、频率特性对系统进行数学描述和性能分析。目前,大多数闭环控制系统都属于连续控制系统,如常规 PID 仪表控制器。

#### 2. 采样控制系统

系统中某一处或多处的信号是以脉冲序列或数码形式进行传递的,其主要特点是将连续时间函数  $e(t)$  通过脉冲开关或采样开关变为离散的脉冲序列  $e^*(t)$ 。采样控制系统常用差分方程、 $z$  变换、脉冲传递函数、频率特性对系统进行数学描述和性能分析。

对于离散信号取脉冲形式的系统称为采样脉冲控制系统,如图 1-1 所示。如果采用数字计算机或数字控制器将连续形式的信号转变为数码形式的系统,称为采样数字控制

系统。图 1-2 所示为典型的采样数字控制系统。由于计算机的输入量  $e^*(t)$  和输出量  $u^*(t)$  是数字量,所以要在计算机的前和后分别加入模/数(A/D)转换装置和数/模(D/A)转换装置。工业计算机控制系统就属于典型的采样数字控制系统。

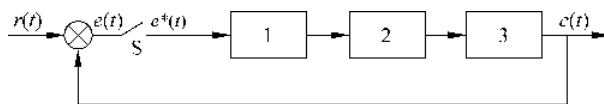


图 1-1 采样脉冲控制系统

1—脉冲控制器；2—数据保持器；3—控制对象

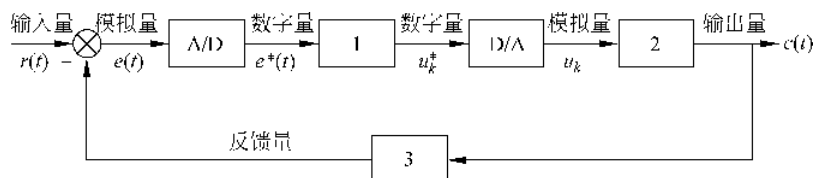


图 1-2 采样数字控制系统

1—计算机；2—控制对象；3—检测装置；A/D—模/数转换；D/A—数/模转换

### 1.2.4 开环控制系统和闭环控制系统

按控制方式划分,控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

#### 1. 开环控制系统

开环控制系统是指组成系统的控制装置与被控对象之间的信号是单向传递的。其特点是系统的输出量对系统的输入量不产生影响,由于不需要对输出量进行测量,所以,这种类型的控制系统很容易实现。其缺点是一旦遇到各种干扰后,系统就无法实现正常控制,因此,这种类型系统的控制精度很难保证。如图 1-3 所示的直流电动机速度控制系统,就是一个开环控制系统的例子,图 1-4 表示了直流电动机速度开环控制系统的输入量与输出量之间的关系。又如包装机等自动化流水线、传统的交通红绿灯控制系统等也都属于开环控制系统。

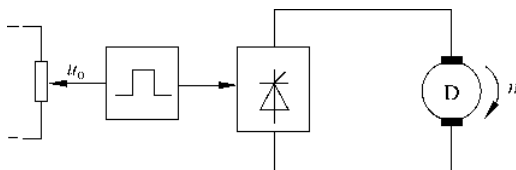


图 1-3 电动机速度控制系统

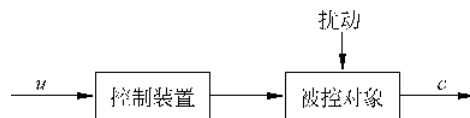


图 1-4 开环控制系统示意图

#### 2. 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制装置与被控对象之间既有向前信号传递,又有信号反向联系的控制系統。它将测量到的输出量反馈到输入端形成闭合环路,与输入量进行比较,得到

偏差信号来产生控制作用,达到消除或减小偏差的目的。这一控制过程的原理称为反馈原理,由于这个反馈作用能使输出量按照相反方向变化,如果经过反馈使系统的偏差增大,即正反馈,就达不到自动控制的目的,所以,一般闭环控制系统都采用负反馈。闭环控制系统能补偿、抵抗干扰信号对系统的影响,提高系统的精度。但同时需要考虑到系统的稳定性。图 1-5 所示为闭环速度控制系统的一个例子。目前,闭环控制系统已经得到普遍应用,如加热炉的炉温控制、轧机的速度控制和位置控制等都属于闭环控制系统。

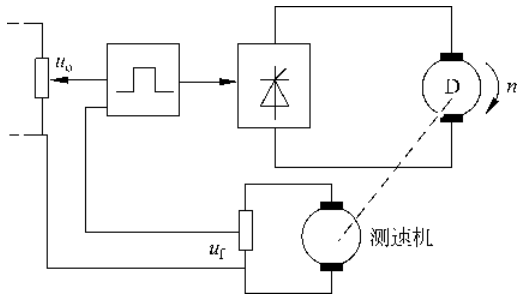


图 1-5 闭环速度控制系统

一个典型的闭环控制系统一般由以下几部分组成。

- (1) 控制对象：指要进行控制的设备或过程。所要控制的某个物理量或某种状态，就叫做系统的输出量或被控量。
- (2) 执行装置：一般由传动机构和调节机构组成，直接作用于控制对象，使被控量达到所要求的数值。
- (3) 检测装置：用于检测被控量，并将其转变为与给定量相同的物理量。
- (4) 比较装置：将检测到的反馈量与给定量进行比较，确定两者之间的偏差量。
- (5) 校正装置：为改善系统特性而附加的装置；通过某种规律对偏差量进行运算，用运算的结果去控制执行装置，以达到改善被控量的稳态和暂态性能的目的。
- (6) 放大装置：一般由放大器件组成，将偏差量放大、变换成适合执行装置作用的信号。

其中，比较装置、校正装置、放大装置统称为控制装置。图 1-6 就是一个典型闭环控制系统的示意图。

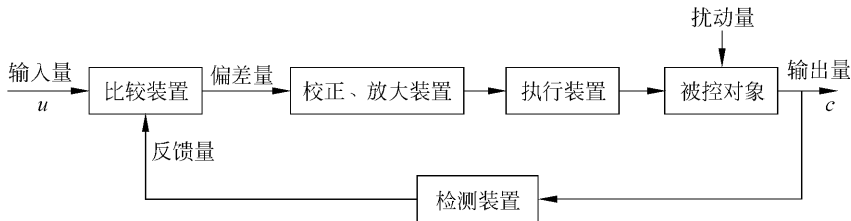


图 1-6 闭环控制系统示意图

在有些系统中,还可以将开环控制系统和闭环控制系统结合在一起,构成复合控制系统,它是在闭环控制系统的基础上增加一个干扰信号的补偿控制,以提高控制系统的抗干

扰能力,但它只适用于干扰量是可以测量的场合。

自动控制系统的分类方法还有许多,在此不一一赘述。本书中,将重点研究和分析恒值、线性、连续的闭环控制系统的理论和方法。

## 1.3 控制系统的基本要求

虽然控制系统有许许多多的划分方法,而且每种类型的控制系统又可能有各自不同的要求,但是,它们都有一个共同的基本要求,就是稳定性、快速性和准确性。

### 1. 稳定性

稳定性是控制系统正常工作的首要条件。它是指系统受到扰动作用,偏离原工作状态后,能否重新回到受扰动以前的工作状态的能力。如果扰动消失后,系统能回到原来的工作状态,则称系统稳定;如果扰动消失后,系统不能回到原来的工作状态,甚至随着时间的推移越来越偏离原来的工作状态,这样的系统就称为不稳定。不稳定的控制系统无法完成预定的控制任务。

### 2. 准确性

常用稳态误差来衡量一个稳定系统的准确性。所谓稳态误差就是指系统达到稳定状态后,被控量的实际值和希望值之间的偏差有多大。这个偏差值的大小反映出系统的控制精度,也反映出控制系统的准确程度。

### 3. 快速性

快速性是指系统的暂态过程(也称过渡过程)的时间长短。由于工程上的控制系统都存在惯性,致使系统在扰动量或给定量发生变化时,被控量不能突变,需要有一个过渡过程,即暂态过程。一般说来,任何稳定系统都应该有足够的快速性,但是暂态过程时间太短,会使系统产生很大的机械冲击力,损坏设备;如果暂态过程持续太久,会影响生产效率。通常用超调量、调节时间、振荡次数等作为衡量反映自动控制系统快速性的指标。这些指标将在第3章中进行详细介绍。

综上所述,对控制系统的性能要求,可归结为稳定性好、动作快、精度高。但这三者之间又是相互制约的,要想提高系统的快速性,可能会导致系统稳定性降低,引起系统强烈振荡;要想改善系统的稳定性,又可能会使系统的快速性变差,导致系统精度下降。因此,在分析和设计时,应视具体情况合理地解决这些问题。

## 小 结

自动控制原理研究的对象是自动控制系统,本书所介绍的自动控制系统主要是按照反馈原理构成的闭环控制系统,这是目前应用最广泛的一种自动控制系统类型。

重点掌握自动控制系统是如何利用反馈原理来纠正或削弱由系统内外因素引起的偏差。

自动控制系统研究的主要问题就是系统的分析和综合。对一个自动控制系统的最基

本的要求是稳定性。对自动控制系统分析,就是对自动控制系统性能指标的要求,一般来说,在系统稳定的基础上,要求系统稳、准、快;对自动控制系统的综合,就是在给定系统性能指标后,如何合理地确定系统的控制装置结构和参数。

本章还介绍了自动控制理论发展的三个阶段,即经典控制理论、现代控制理论、大系统理论和智能控制理论。

## 习 题

1.1 试列举几个日常生活中遇到过的开环控制系统和闭环控制系统的例子,说明它们的工作原理并画出相应的示意图。

1.2 试分析反馈控制系统中反馈的性质和作用。

1.3 对已经构成的控制系统,如何改变反馈的极性? 如果极性反接,会对系统产生什么样的后果? 为什么?

1.4 试说明开环控制系统和闭环控制系统的主要特征,并比较它们的优缺点。

1.5 自动控制系统的基本性能要求是什么? 最主要的要求是什么?

1.6 将两个线性定常系统串接起来后,所得到的系统仍是线性定常系统吗? 为什么?

1.7 闭环控制系统一般情况下由哪几部分组成? 它们在系统中各起什么作用?

1.8 下列各式是描述系统的方程式,其中  $c(t)$  为输出量,  $r(t)$  为输入量,试判定哪些是线性定常系统,哪些是非线性系统。

$$(1) c(t) = 10 + 3r^3(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$$

$$(2) c(t) = 5r(t) \sin \omega t + 2$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + 4c(t) = 2r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt}$$

$$(4) c(t) = 12r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt} + 7 \int_{-\infty}^t r(\lambda) d\lambda$$

$$(5) c(t) = 0, t < 3; c(t) = 1 + r(t), t \geq 3$$

1.9 图 1-7 所示为液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下,希望液面高度  $H$  保持不变。

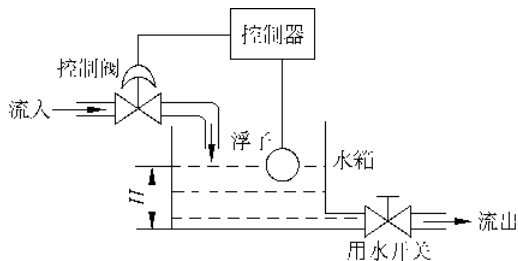


图 1-7 液位自动控制系统原理示意图

- (1) 试说明系统的工作原理;
- (2) 画出系统方框图,并说明被控对象、给定量、被控量及干扰量是什么。

1.10 图 1-8 所示为电炉温度控制系统原理示意图。试分析系统保持电炉温度恒定不变的工作过程;指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用;最后画出系统方框图。

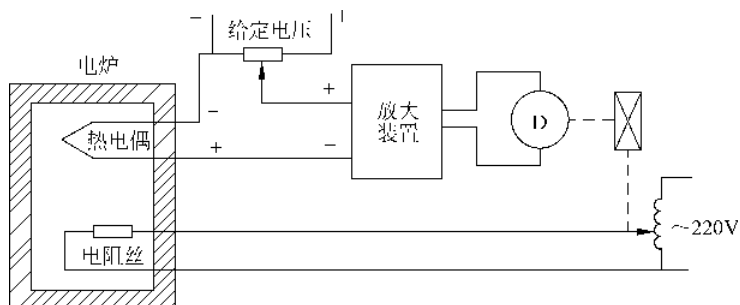


图 1-8 电炉温度控制系统原理示意图

## 控制系统的数学模型

控制系统的数学模型,就是描述系统输入、输出变量以及内部变量之间动态关系的数学表达式,也称为动态数学模型。常用的动态数学模型有微分方程、传递函数和动态结构图,它们是经典控制理论中研究控制系统的常用的数学模型。

本章着重介绍如何用解析法建立控制系统的数学模型。所谓解析法就是根据控制系统及元件各变量之间所遵守的物理规律,借助数学工具进行理论推导,从而建立控制系统的数学模型。它是最常用的建模方法。

### 2.1 建立动态微分方程的一般方法

用解析法建立系统或子系统(也称元件)微分方程的一般步骤如下:

- (1) 清楚系统的工作原理,确定系统和子系统之间的输入、输出变量。
- (2) 从系统的输入端开始,根据各子系统所遵守的物理规律列出它们的微分方程,一般为微分方程组。
- (3) 消去中间变量,写出仅含有系统输入、输出变量的微分方程。一般情况下,与输入量有关的项写在微分方程的右端,与输出量有关的项写在微分方程的左端,微分方程两端变量的导数项均按降幂排列。

**注意:**

- (1) 在列写某子系统的微分方程时必须注意负载效应问题;
  - (2) 子系统或元件的信号传递是单向性的,前一个元件的输出是后一个元件的输入。
- 下面通过一些例子说明建立微分方程的步骤和方法。

**例 2-1** 试编写出图 2-1 所示 RC 无源网络的微分方程。其中电压  $u_r$  为输入量,电压  $u_c$  为输出量。

**解** 根据电路理论,可写出

$$u_r = Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

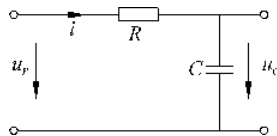


图 2-1 RC 无源网络

式中,  $i$  为流经电阻  $R$  和电容  $C$  的电流。消去中间变量  $i$ , 得到

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u_r$$

令  $T=RC$ , 则

$$T \frac{du_c}{dt} + u_c = u_r \quad (2-1)$$

式中,  $T$  称为网络的时间常数。式(2-1)表示了  $RC$  电路的输入量  $u_r$  与输出量  $u_c$  之间的关系。

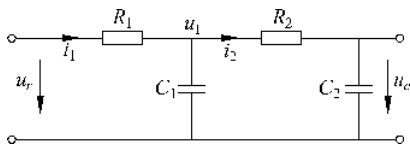


图 2-2 滤波网络

**例 2-2** 编写图 2-2 所示滤波网络的微分方程。其中电压  $u_r$  为输入量, 电压  $u_c$  为输出量。在这个电路中, 后一级  $RC$  电路的电流  $i_2$  影响着前一级  $RC$  电路的输出电压, 即影响电容  $C_1$  的端电压, 这就是负载效应。

**解** 根据基尔霍夫电压定律, 可写出下列方程组:

$$\begin{cases} u_r = R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt \\ \frac{1}{C_1} \int (i_1 - i_2) dt = R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \\ u_c = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt \end{cases}$$

消去中间变量  $i_1$ 、 $i_2$ , 整理得

$$R_1 C_1 R_2 C_2 \frac{d^2 u_c}{dt^2} + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) \frac{du_c}{dt} + u_c = u_r$$

令  $R_1 C_1 = T_1$ ,  $R_2 C_2 = T_2$ ,  $R_1 C_2 = T_3$ , 则得到以  $u_r$  为输入量、 $u_c$  为输出量的微分方程:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 u_c}{dt^2} + (T_1 + T_2 + T_3) \frac{du_c}{dt} + u_c = u_r \quad (2-2)$$

可见该滤波网络的动态数学模型是一个二阶线性微分方程。

**例 2-3** 图 2-3 表示一台用电枢电压控制的他励直流电动机, 以电枢电压  $u_a$  为输入量, 电动机转速  $n$  为输出量, 试写出电动机的微分方程。

**解** 根据电路基本定律, 对电动机电枢回路可写出电压方程

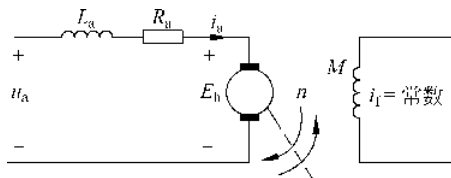


图 2-3 他励直流电动机

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E_b = u_a$$

$$E_b = C_e n$$

$$M = C_m i_a$$

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

以上各式中,  $R_a$  为电枢回路电阻,  $\Omega$ ;  $L_a$  为电枢回路电感,  $H$ ;  $i_a$  为电枢回路电流,  $A$ ;  $u_a$  为