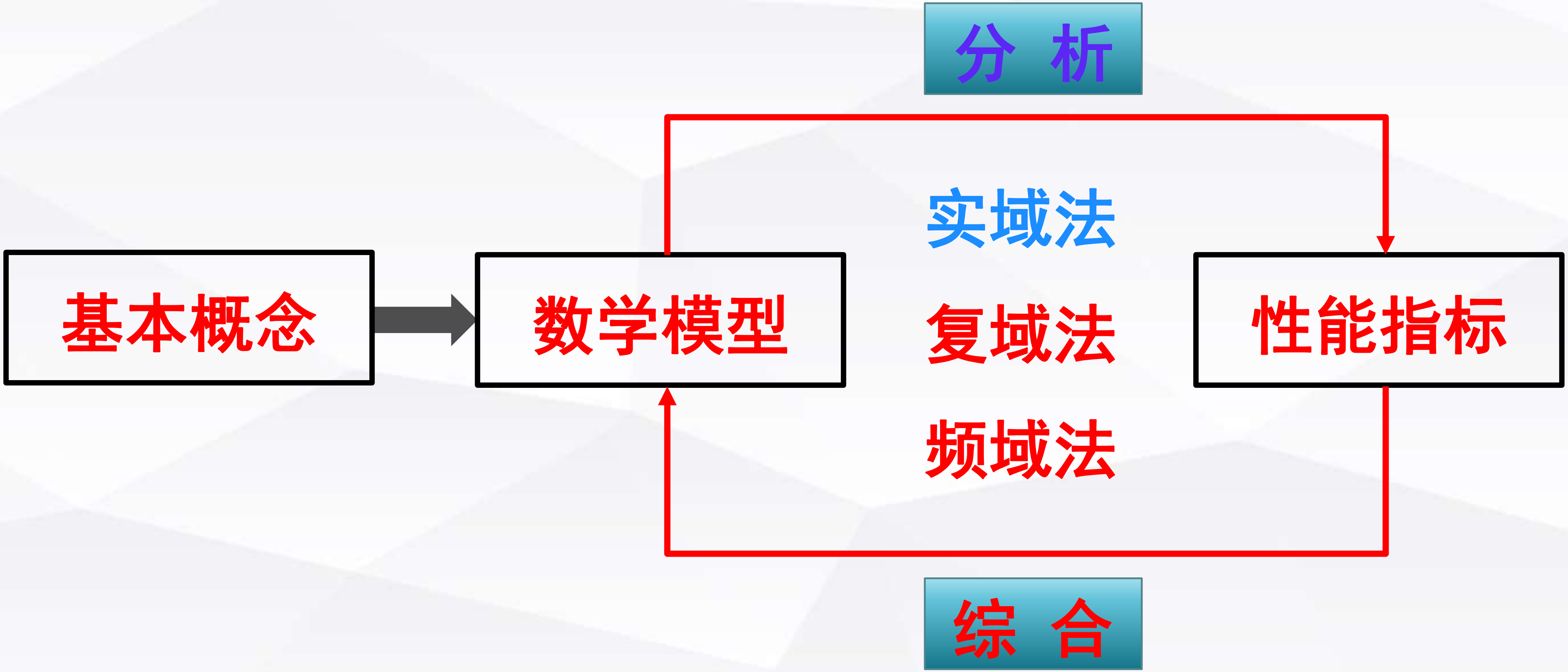
作 业

B2.1, B2.2, B2.4, B2.9, B2.13, B2.14

本课程知识体系脉络图



第二章 控制系统的数学模型

§ 2.1控制系统的输入输出模型

§ 2.2控制系统的状态空间模型

§ 2.3线性微分方程和状态方程的解

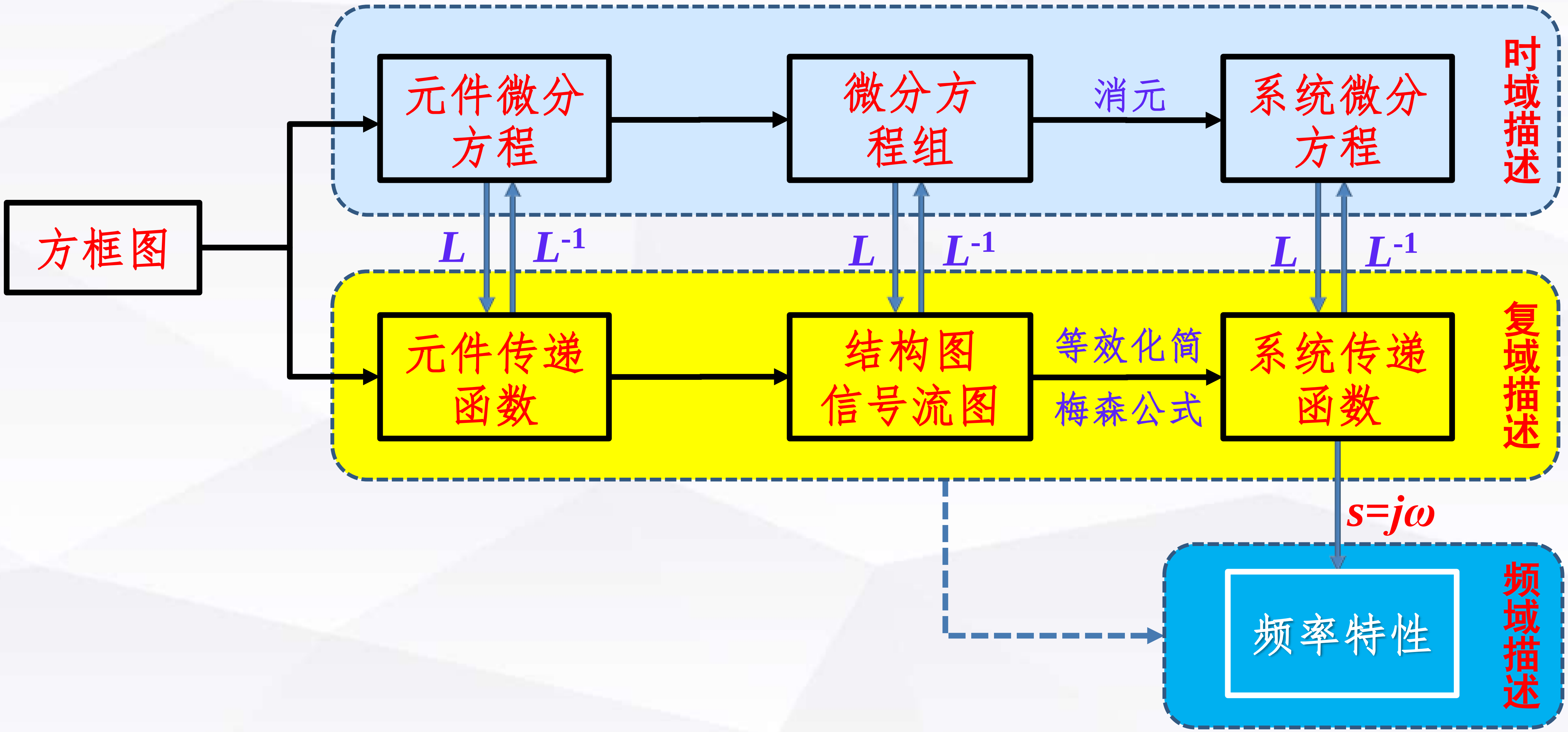
§ 2.4结构图与梅逊公式

§ 2.5状态空间模型与I/O模型之间的等价变换

§ 2.6控制系统数学模型举例

§ 2.7利用Matlab处理系统数学模型

本章节知识体系脉络图



方框图
元件微分方程
微分方程组
消元
系统微分方程
时域描述
L
L-1
L
L-1
L
L-1
元件传递函数
结构图
信号流图
等效化简
梅森公式
系统传递函数
复域描述
s=jω
频率特性
频域描述

§2.0 拉普拉斯变换复习（作业）

①引入拉普拉斯变换的目的

控制系统中使用的信号，通常是非周期的（且含e^{at}项），往往不能满足狄利克莱条件，因此傅里叶变换不再适用，故引入拉氏变换。

注：狄利克莱条件是指：（1）在一周期内，连续或只有有限个第一类间断点；（2）在一周期内，极大值和极小值的数目应是有限个；（3）在一周期内，信号是绝对可积的。

- 如果对于非周期信号，上述条件中信号的周期可视为无穷大。

②常用拉氏变换与基本性质见课本表2.1和2.2，第43，44页

③部分分式展开（海维赛定理）与计算

④拉氏变换法求解线性定常系统微分方程

§2.1 输入输出描述：数学模型

控制系统的数学模型

物理量随时间的变化称为运动，将反映控制系统运动特性的各变量之间的关系用数学方程加以描述，从而建立起控制系统的运动方程，称为控制系统的数学模型。

简言之：描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式。建立系统的数学模型，是分析和设计系统的基础。

适用的控制系统的数学模型

建模时要抓住主要因素，忽略一些次要因素。

模型能以最简化形式在一定范围内正确表达控制系统的特征即可；模型要适当简化，准确又便于处理。

§2.1 输入输出描述：定义

控制系统的输入输出模型

输入输出模型是指用系统的**输入**、**输出**信号或**其变换式**所表示的数学模型；也称作外部描述。

①微分方程：时域信号：$u(t)$, $y(t)$

②传递函数：复域信号：$U(s)=L[u(t)]$, $Y(s)=L[y(t)]$

③频率特性：频域信号：$U(j\omega)$, $Y(j\omega)$

§ 2.1 输入输出描述：来源 *

控制系统的输入输出模型

输入输出模型是指用系统的输入、输出信号或其变换式所表示的数学模型；也称作外部描述。

①初始时刻：t_0

②系统状态：$x(t)$ & 初始状态：$x(t_0)$

③系统响应：零输入响应 & 零状态响应

④输入-状态-输出模型 & 输入-输出模型

§2.1 输入输出描述：①微分方程（时域模型）

高阶线性定常单输入单输出系统微分方程：

$$a_n\frac{d^n y(t)}{dt^n}+a_{n-1}\frac{d^{n-1}y(t)}{dt^{n-1}}+\cdots+a_1\frac{dy(t)}{dt}+a_0y(t)$$
$$=b_m\frac{d^m u(t)}{dt^m}+b_{m-1}\frac{d^{m-1}u(t)}{dt^{m-1}}+\cdots+b_1\frac{du(t)}{dt}+b_0u(t)$$

其中$\boldsymbol{a_i}$，$\boldsymbol{b_j}$为实数，由系统本身结构、参数所决定。

说明：

- 利用系统的物理规律来获得系统动态特性的微分方程
- 不同的动态系统可能用相同的线性微分方程来表示
- 求解一个给定微分方程等效于求解一类的物理动态系统

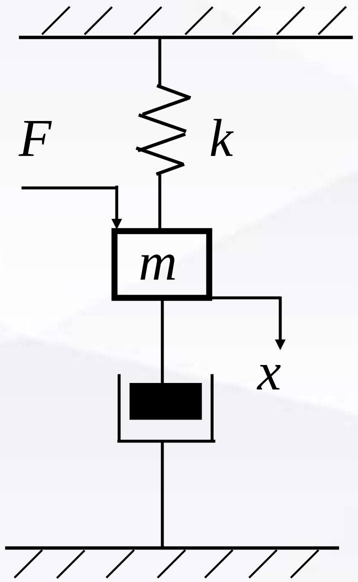
思考：

线性系统与线性微分方程是何种关系？

§2.1 输入输出描述：①微分方程（机械系统）

机械系统：

机械系统指的是存在机械运动的装置，它们遵循物理学的力学定律。机械运动包括直线运动（相应位移称为线位移）和转动（位移称为角位移）两种。



例： 一个由弹簧-质量-阻尼器组成的机械平移系统如图所示。其中m为物体质量，k为弹簧系数，f为粘性阻尼系数，外力F为输入量，位移$x(t)$为输出量，给出系统的运动方程。

解： 在物体受外力F的作用下，质量m相对于初始状态的位移、速度、加速度分别为x、dx/dt、d^2x/dt^2。设外作用力F为输入量，位移x为输出量。

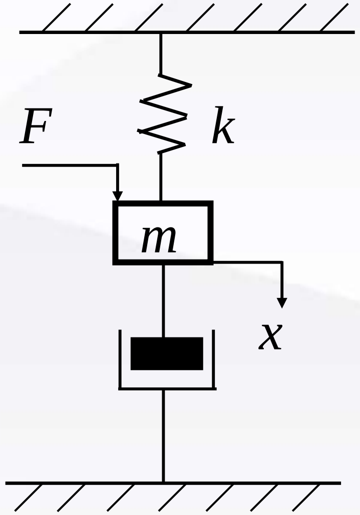
§2.1 输入输出描述：①微分方程（机械系统）

根据弹簧、质量、阻尼器上力与位移、速度的关系和牛顿第二定律，可列出作用在物体上的力和加速度之间的关系为

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=F-f\frac{dx}{dt}-kx$$

注意：负号表示弹簧力的方向和位移的方向相反；粘性摩擦力的方向和速度的方向相反。

将输入变量和输出变量分离至等号两侧，可得系统的运动方程为：



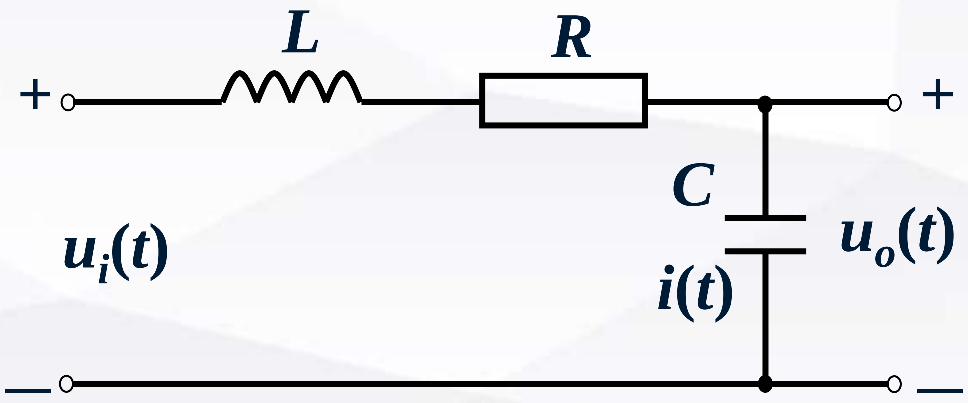
$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2}+f\frac{dx(t)}{dt}+kx(t)=F$$

可见，该机械系统的运动方程是一个二阶线性定常微分方程。

§2.1 输入输出描述：①微分方程（电气系统）

电气系统：

由电阻、电感、电容、运算放大器等元件组成的电路，又称电气网络。由电阻、电感、电容(无源器件)组成的电气网络称为无源网络；如果电气网络中包含运算放大器(有源器件)，称为有源网络。



例： 由电阻R、电感L和电容C组成无源网络，其中u_i输入，u_o输出，求系统微分方程。

解： 设回路电流为 $i(t)$ 如图所示。由基尔霍夫电压定律可得到

$$L\frac{di(t)}{dt}+Ri(t)+u_o(t)=u_i(t)$$

§2.1 输入输出描述：①微分方程（电气系统）

注意上式中$i(t)$是中间变量，必须消去。考察电容C，可知其电流$i(t)$和输出电压$u_o(t)$的关系满足：

$$i(t) = C\frac{du_o(t)}{dt}$$

消去中间变量$i(t)$，可得

$$LC\frac{d^2u_o(t)}{dt^2} + RC\frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t)$$

可见，该电器系统的运动方程是一个二阶线性定常微分方程。

相似系统：具有相同数学模型的不同物理系统称为相似系统；其占据相应位置的物理量称为相似量。上述R-L-C串联网络系统和弹簧-质量-阻尼器系统为一对相似系统，故可用电子线路来模拟机械平移系统。

§2.1 输入输出描述：②传递函数（定义）

传递函数的定义：

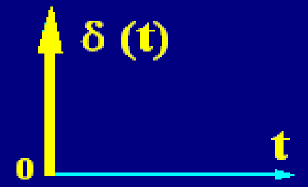
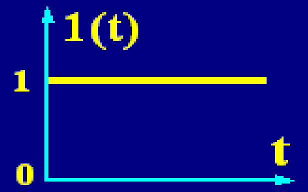
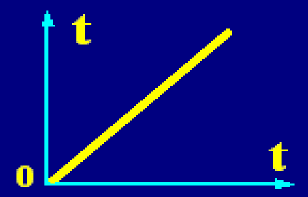
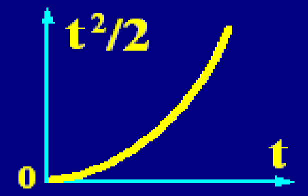
当系统的初始条件为零时，系统输出信号的拉氏变换$Y(s)$与输入信号的拉氏变换$X(s)$之比（即零状态响应拉氏变换和输入信号拉氏变换之比），称为系统的传递函数。

关于定义中零初始条件的特别说明：

（1）输入在$t = 0$以后才作用于系统，故系统输入量及其各阶导数在$t \le 0$时均为零；

（2）输入作用于系统之前，系统是相对静止的，故系统输出量及其各阶导数在$t \le 0$时的值均为零。

§2.1 输入输出描述：②传递函数（测试信号）

函数图象	像原函数	时域关系	像函数	复域关系	例
	单位脉冲 $f(t)=\delta(t)$	$\frac{df}{dt}$	1	$\times s$	撞击 后坐力 电脉冲
	单位阶跃 $f(t)=\begin{cases}1 & t\geqslant 0\\ 0 & t<0\end{cases}$		$\frac{1}{s}$		开关量
	单位斜坡 $f(t)=\begin{cases}t & t\geqslant 0\\ 0 & t<0\end{cases}$		$\frac{1}{s^2}$		等速跟踪
	单位加速度 $f(t)=\begin{cases}t^2/2 & t\geqslant 0\\ 0 & t<0\end{cases}$		$\frac{1}{s^3}$		

§2.1 输入输出描述：②传递函数（定义）

高阶线性定常单输入单输出系统的传递函数：

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_1 s+b_0}{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_2 s^2+a_1 s+a_0}$$

关于传递函数的说明：

(1) 传递函数是系统固有特性的描述，反映线性定常(因果)系统输入量与输出量之间的关系；

(2) 传递函数只取决于系统本身结构参数，与外界输入无关；

(3) 传递函数是在零初始条件下确定的，因此利用传递函数分析系统时，只能得到系统零初始条件下系统的响应情况。

(4) 传递函数是系统的一种完全描述当且仅当无零、极点相消时，否则只能是一种局部描述。

§2.1 输入输出描述：②传递函数（标准型）

零极点形式俗称**首1标准型**：传递函数分子、分母最高次项系数化为 1：

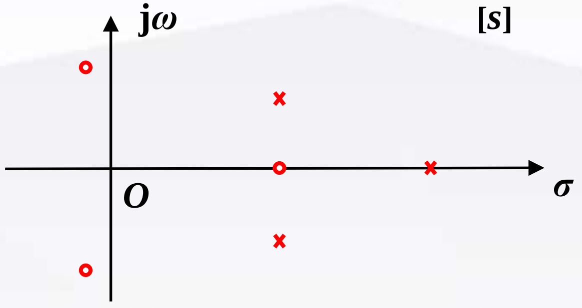
$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=K_g\frac{(s+z_1)(s+z_2)\ldots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\ldots(s+p_n)}$$

（1）K_g为常数，叫做<u>传递系数</u>；若$G(s)$为开环传递函数，则K_g称为根轨迹增益；

（2）z_i，p_j 分别叫做传递函数的零点和极点，只能为实数或共轭复数；

（3）控制系统的零极点分布示意图绘制：

- 零点（○），极点（×）
- 复平面：$s=\sigma+j\omega$



控制系统的零极点分布示意图

§2.1 输入输出描述：②传递函数（标准型）

典型环节形式俗称**尾1标准型：** 传递函数分子、分母最低次项系数化为1：

$$G(s)=K\frac{\prod_{k=1}^{m_1}(\tau_k s+1)\prod_{l=1}^{m_2}(\tau_l^2 s^2+2\zeta\tau_l s+1)}{s^v\prod_{i=1}^{n_1}(T_i s+1)\prod_{j=1}^{n_2}(T_j^2 s^2+2\xi T_j s+1)}e^{-\tau s}$$

（1）若**G(s)**为闭环传递函数，则常数**K**叫做系统的增益；

（2）若**G(s)**为开环传递函数，则常数**K**叫做闭环系统的开环增益，***v***叫做系统的型号，二者与系统的稳定性、稳态性能具有密切关系；

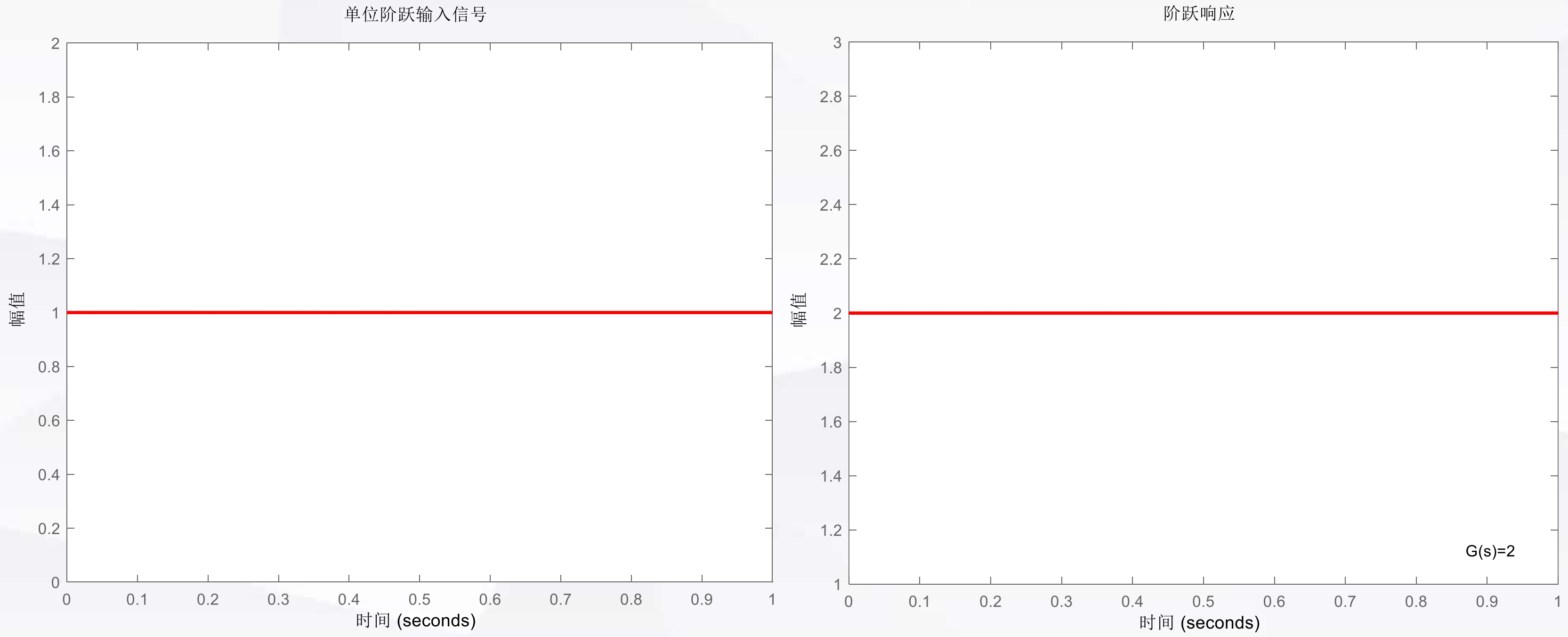
§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

序号	环节名称	微分方程	传递函数
1	比例环节	$y(t)=K\cdot r(t)$	K
2	惯性环节	$T\dot{y}(t)+y(t)=r(t)$	$\dfrac{1}{Ts+1}$
3	振荡环节	$T^2\ddot{y}(t)+2\zeta T\dot{y}(t)+y(t)=r(t)$ （欠阻尼：$0<\zeta<1$）	$\dfrac{1}{T^2s^2+2\zeta Ts+1}$
4	积分环节	$\dot{y}(t)=r(t)$	$\dfrac{1}{s}$
5	微分环节	$y(t)=\dot{r}(t)$	s
6	时滞环节	$y(t)=r(t-\tau)$	$e^{-\tau s}$

§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

①比例环节：输出量与输入量成比例关系

- 微分方程： $y(t)=K\cdot r(t)$
- 传递函数： $G(s)=K$

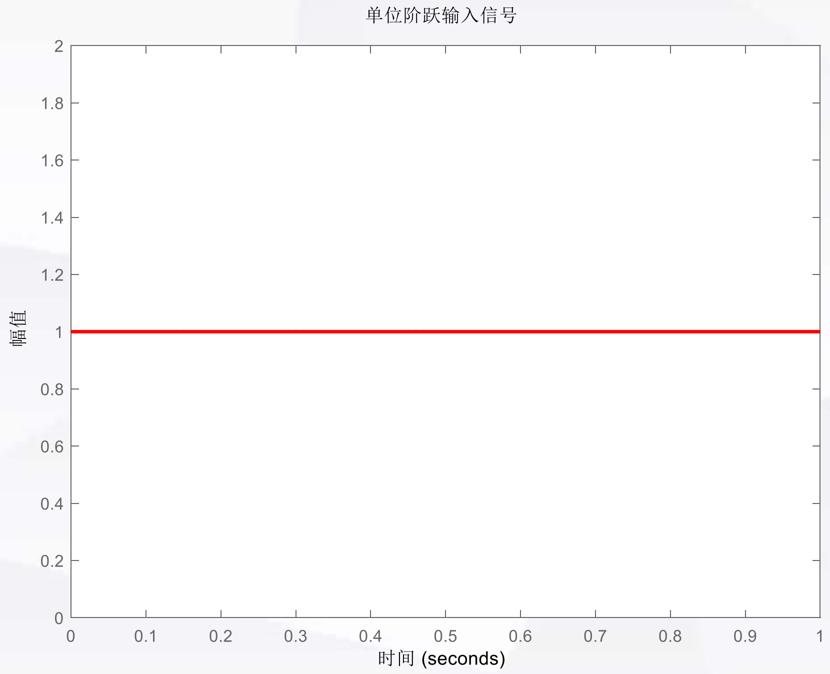


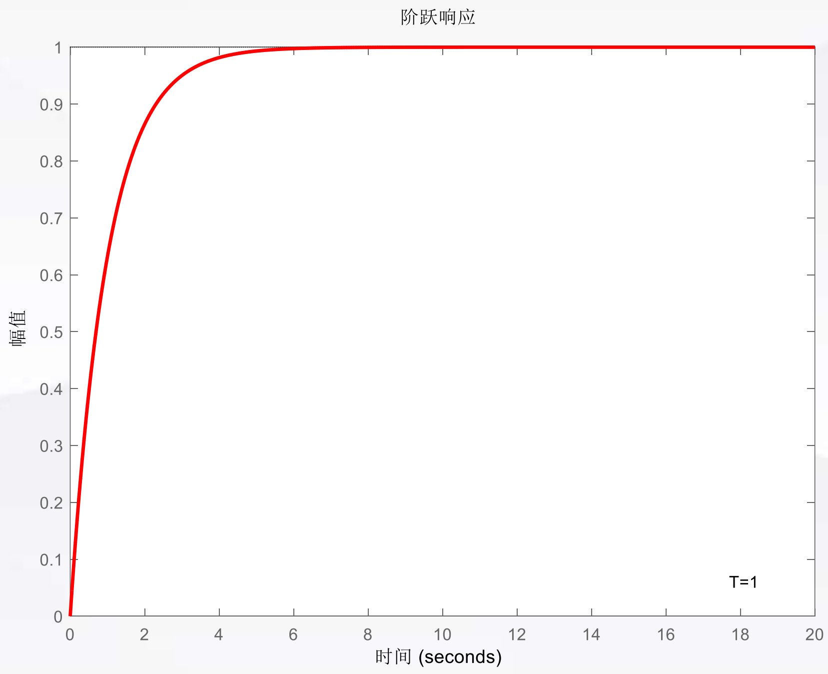
§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

②惯性环节：即一阶系统，输出量按照指数规律变化逐渐趋于稳态值，呈现惯性的特点，通常由一个储能元件和一个耗能元件组成

- 微分方程：$T\dot{y}(t) + y(t) = r(t)$
- 传递函数：

$$G(s) = \frac{1}{Ts+1}$$



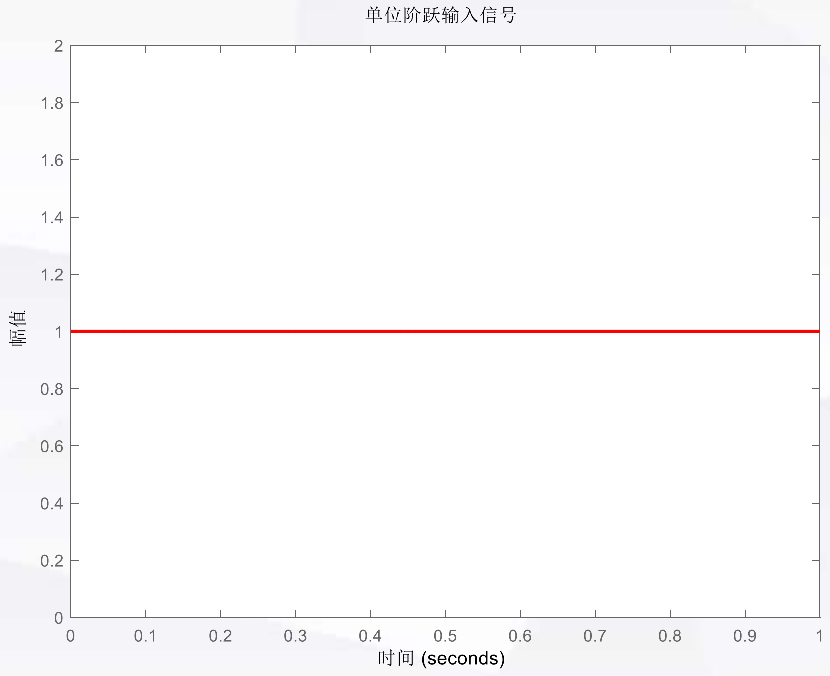


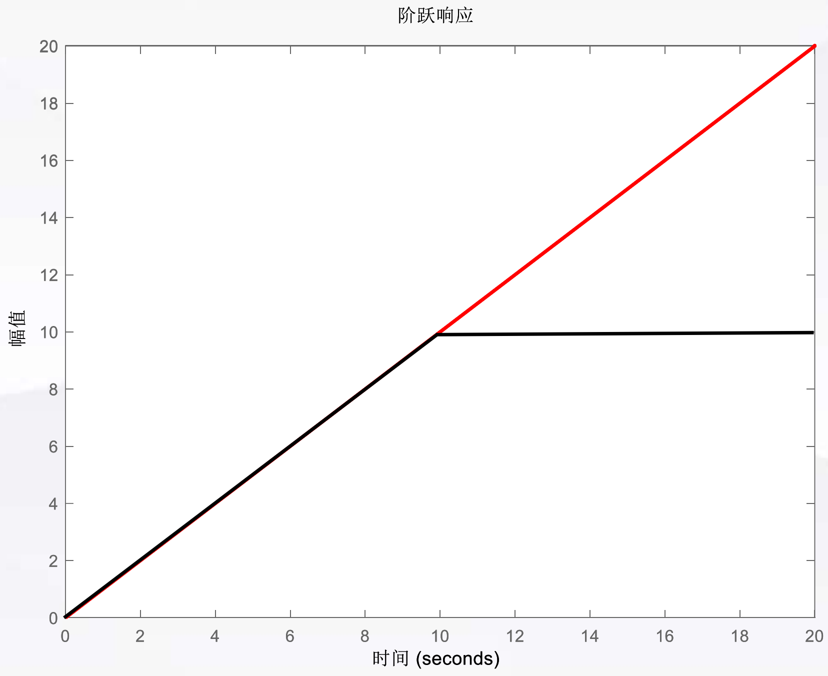
§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

③**积分环节：** 输出量是输入量的积累（即积分），若输入量消失则积累停止，输出量维持在原数值上，因此具有记忆功能

- 微分方程：$\dot{y}(t) = r(t)$
- 传递函数：

$$G(s) = \frac{1}{s}$$



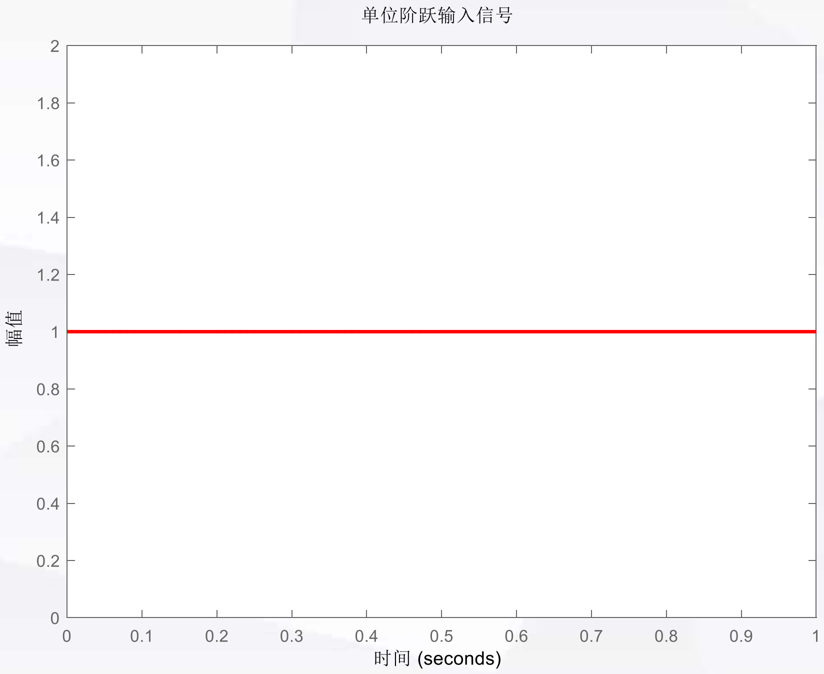


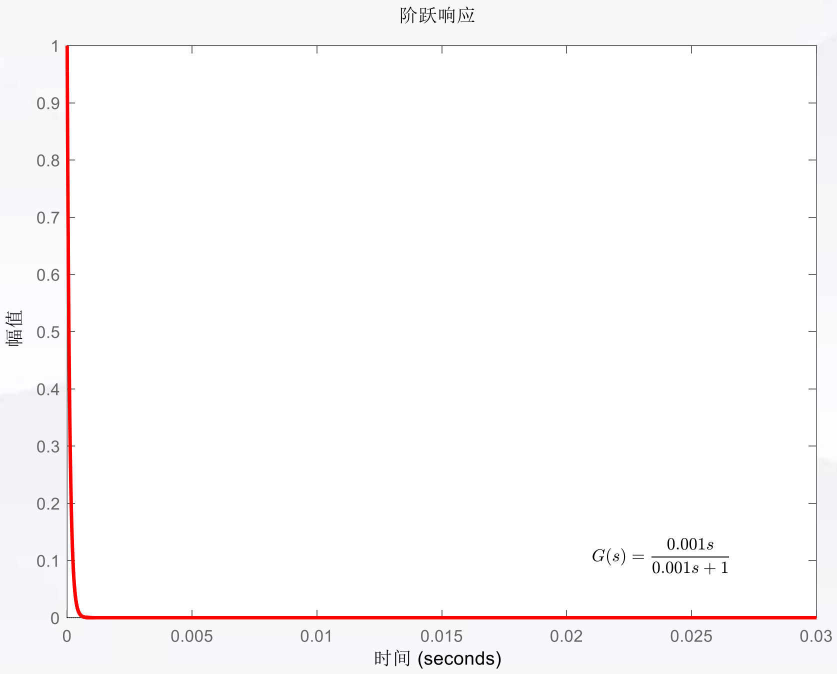
§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

④微分环节：暂态过程中输出量含有与输入量微分成比例的分量

- 微分方程：$y(t)=\dot{r}(t)$
- 传递函数：$G(s)=s$

工程上理想微分环节，如测速电机等，一般是难以实现的，实际中常采用近似微分环节



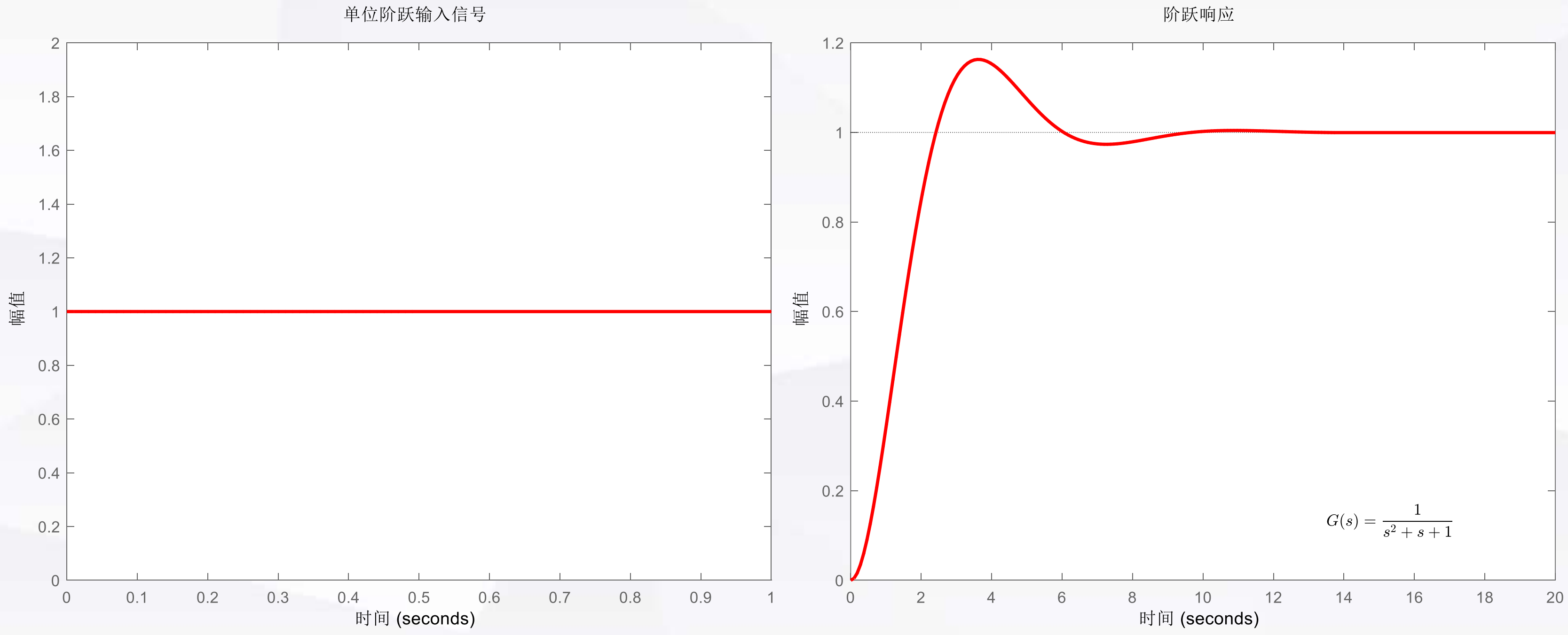


§2.1 输入输出描述：②传递函数（典型环节）

⑤振荡环节：具有振荡衰减的特性，环节中具有两种储能元件，能量不断转化，且含有一定的阻尼作用消耗能量

- **微分方程：**$T^2\ddot{y}(t)+2\zeta T\dot{y}(t)+y(t)=r(t)$（欠阻尼：$0<\zeta<1$）
- **传递函数：**

$$G(s)=\frac{1}{T^2s^2+2\zeta Ts+1}$$



§ 2.1 输入输出描述：②传递函数（矩阵形式* ）

多输入多输出(MIMO)系统，采用传递函数矩阵来描述：

$$Y(s)=\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_l(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1r}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2r}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{l1}(s) & G_{l2}(s) & \cdots & G_{lr}(s) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \\ \vdots \\ X_r(s) \end{bmatrix}$$

其中：

$$G_{ij}(s)=\frac{Y_i(s)}{X_j(s)},\quad i=1,\ldots,r;\ j=1,\ldots,l$$

§2.1 输入输出描述：②传递函数（由来* ）

线性定常因果系统传递函数的由来*

设单位冲击函数为$\delta(t)$，线性系统的单位冲击响应为$g(t)$，则在输入$u(t)$作用下，线性系统的输出$y(t)$满足

$$y(t)=\int_0^{+\infty} g(t-\tau)u(\tau)d\tau$$

零初始条件下有$t<\tau$时，$g(t-\tau)=0$，故有：

$$\int_0^{+\infty} y(t)e^{-st}dt=\int_0^{+\infty}\left(\int_0^{+\infty} g(t-\tau)u(\tau)d\tau\right)e^{-s(t-\tau)}e^{-s\tau}dt$$

$$=\boxed{\int_0^{+\infty} g(t-\tau)e^{-s(t-\tau)}dt}\times\boxed{\int_0^{+\infty} u(\tau)e^{-s\tau}d\tau}$$

令$v\triangleq t-\tau$，注意到：

当$t<\tau$时，$g(t-\tau)=0$

$$=\boxed{\int_0^{+\infty} g(v)e^{-sv}dv}\times\boxed{\int_0^{+\infty} u(\tau)e^{-s\tau}d\tau}$$

§ 2.1 输入输出描述：②传递函数（由来* ）

零初始条件下有

$$\boxed{\int_0^{+\infty} y(t)e^{-st}dt} = \boxed{\int_0^{+\infty} g(v)e^{-sv}dv} \times \boxed{\int_0^{+\infty} u(\tau)e^{-s\tau}d\tau}$$

由此可以定义一种变换，即拉普拉斯变换 $L(*)|t \to s$，有

$$\boxed{L[y(t)]} = \boxed{\int_0^{+\infty} g(v)e^{-sv}dv} \times \boxed{L[u(t)]}$$

定义 s 域上的函数

$$G(s) = \int_0^{+\infty} g(t)e^{-st}dt = L(g(t))$$

在 s 域上，系统的输入输出满足乘法关系

$$Y(s) = G(s)U(s)$$

传递函数定义：

将零初始条件下，线性定常因果系统的单位冲激响应的拉氏变换定义为系统的传递函数。

§ 2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

例： 已知某线性定常系统的传递函数为：

$$G(s)=\frac{1}{s(s+1)},$$

系统初始条件为$y(0_)=1,\ \dot{y}(0_)=3$，当系统输入为单位冲击函数$u(t)=\delta(t)$时，求系统的输出。

分析：系统的传递函数必须是在零初始条件下求取的，但传递函数可以描述任意初始条件下的系统，因而可以用于求取非零初始条件下系统的输出。

解： 根据传递函数的定义，可知：

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{1}{s(s+1)},$$ 零初始件下

§ 2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

整理可得：

$$s^2Y(s)+sY(s)=U(s),\quad \text{零初始件下}$$

经过拉氏反变换可得：

$$\ddot{y}(t)+\dot{y}(t)=u(t),\quad \text{零初始件下}$$

经过拉氏变换可得：

$$[s^2Y(s)-sy(0\_)-\dot{y}(0\_)]+[sY(s)-y(0\_)]=U(s)$$

将初始条件$y(0_)=1,\ \dot{y}(0_)=3$和输入 $U(s)=1$ 带入得：

$$(s^2+s)Y(s)=s+5\Rightarrow Y(s)=\frac{s+5}{s(s+1)}\quad\left(!\neq G(s)=\frac{1}{s(s+1)}\right)$$

§ 2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

部分分式展开：

$$Y(s)=\frac{s+5}{s(s+1)}=\frac{\alpha}{s}+\frac{\beta}{s+1}$$

则有：

$$\alpha=\lim_{s\to 0}sY(s)=\frac{0+5}{0+1}=5$$

$$\beta=\lim_{s\to -1}(s+1)Y(s)=\frac{-1+5}{-1}=-4$$

经过拉式反变换可得：

$$Y(s)=\frac{s+5}{s(s+1)}=\frac{5}{s}+\frac{-4}{s+1}\overset{L^{-1}}{\Rightarrow}y(t)=5-4e^{-t}$$

§2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

思考： 若传递函数为 $G(s)=\dfrac{s+2}{s(s+1)}$，则在任意初始条件下有：

$$[s^2Y(s)-sy(0\_)-\dot{y}(0\_)]+[sY(s)-y(0\_)]=[sU(s)-u(0\_)]+2U(s)$$

整理可得：

$$Y(s)=\boxed{\frac{(s+2)U(s)}{s(s+1)}}+\boxed{\frac{\dot{y}(0\_)+(s+1)y(0\_)-u(0\_)}{s(s+1)}}$$

$$=\boxed{Y_{zs}(s)}+\boxed{Y_{zi}(s)}$$

***系统的零输入响应分母特征根与闭环传递函数分母的特征根相同；系统输出的极点由输入极点和系统闭环极点共同组成。**

§2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

例*： 已知某线性定常系统的输出为

$$y(t)=5-4e^{-t},$$

系统的初始条件 $y(0\_)=1,\ \dot{y}(0\_)=3$，系统输入为单位冲击函数 $u(t)=\delta(t)$ 时，求系统的传递函数。

分析：①系统的初始条件必然对应于系统的零输入响应；②线性系统响应=零状态响应+零输入响应；③零输入响应的极点和闭环传递函数极点相同；④传递函数可以表示为零状态响应拉氏变换和输入拉氏变换之比。

解： 对输出进行拉氏变换可得：

$$Y(s)=\frac{s+5}{s(s+1)}=\frac{5}{s}+\frac{-4}{s+1}$$

§2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

设系统的零输入响应为：

$$Y_{zi}(s)=\frac{a}{s}+\frac{b}{s+1}$$

经拉式反变换可得： $y_{zi}(t)=a+be^{-t}$

关于时间求导可得： $\dot{y}_{zi}(t)=-be^{-t}$

结合初值条件可得：

$$\begin{cases}a+b=1\\ -b=3\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}a=4\\ b=-3\end{cases}$$

系统零输入响应为：

$$Y_{zi}(s)=\frac{4}{s}+\frac{-3}{s+1}$$

§2.1 输入输出描述：②传递函数（例题）

系统的零状态响应为：

$$Y_{zs}(s) = Y(s) - Y_{zi}(s) = \frac{1}{s(s+1)}$$

由于系统输入为单位冲激函数，故系统传递函数等于系统零状态响应，故系统的传递函数为：

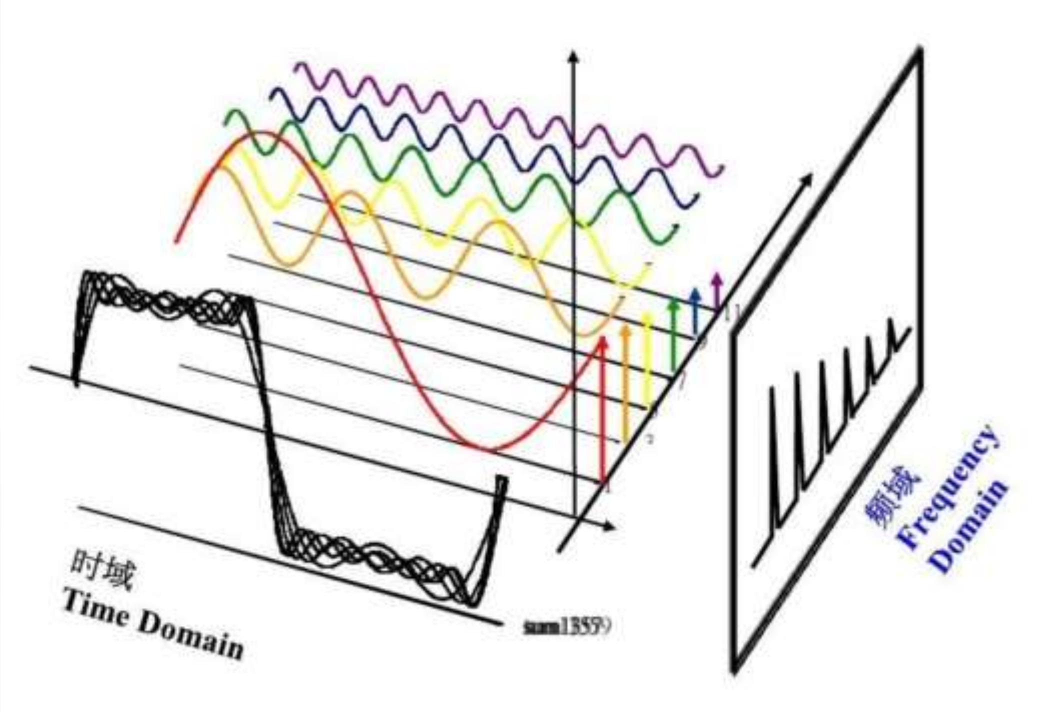
$$G(s) = Y_{zs}(s) = \frac{1}{s(s+1)}$$

线性定常单变量系统无零极点相消时，传递函数反映了其零状态响应和零输入响应的完全信息，因而是系统的一种完全描述。

§2.1 输入输出描述：③频率特性

频域和时域的关系：

对于稳定的线性因果系统：若输入量为正弦信号，则系统的稳态输出必为同频率（ω）的正弦信号，改变的只有幅值（A）和相位（φ）。



- 任意周期输入信号满足满足狄利克莱条件，则傅里叶变换存在；
- 任意非周期输入信号满足满足狄利克莱条件①②并在无穷时域内绝对可积，则傅里叶变换存在；
- 任意正弦信号可以由频率ω、幅值A和相位φ唯一确定。

§2.1 输入输出描述：③频率特性

频率特性的物理意义：

频率特性描述了在不同频率下系统传递正弦信号的能力

频率响应法的基本思想和物理意义：

- **基本思想：**将控制系统变量视为信号，每一个信号通过傅里叶分解可视为由不同频率的正弦信号所合成，线性系统各变量的运动就是系统对各不同频率信号响应叠加的结果。
- **物理意义：**控制系统的运动就是信号沿各个相关环节传递和变换的过程：每个信号含有不同频率的正弦分量，这些不同频率的正弦信号在不同环节的传递和变换过程中，其振幅和相位的变化规律不同，从而产生不同形式的运动。

§2.1 输入输出描述：③频率特性

频率响应的定义：

线性系统在输入正弦信号时，其稳态输出随着频率（$\omega=0\to\infty$）变化的规律，称为该系统的频率响应。

正弦输入信号的频率响应：

线性系统在输入正弦信号$u(t)=X\sin\omega t$时，稳态输出与输入是同频率的正弦信号：

（1）输出正弦信号与输入正弦信号的幅值之比为频率特性$G(j\omega)$的幅值$|G(j\omega)|$，称为幅频特性；

（2）输出正弦信号与输入正弦信号的相位之差是频率特性$G(j\omega)$的相位$\angle G(j\omega)$，称为相频特性；

（3） 频率特性函数$G(j\omega)=|G(j\omega)|\angle G(j\omega)$，可见$G(j\omega) \mid j\omega\to s$.

§2.1 输入输出描述：③频率特性

频率响应法的优点：

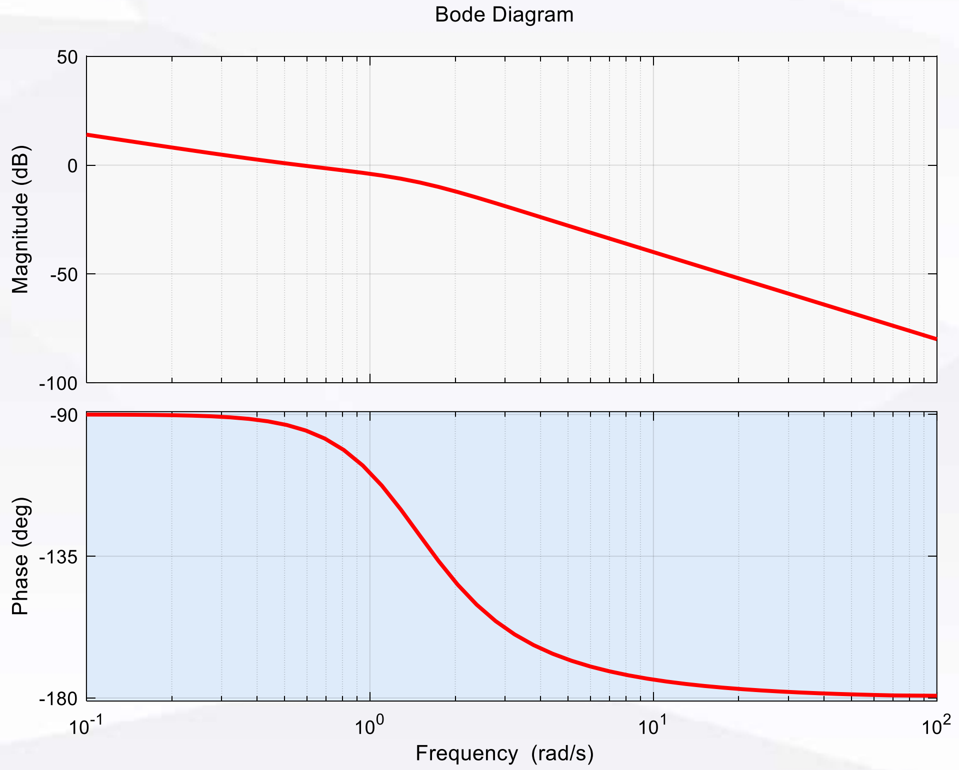
①物理意义鲜明；

②可以用实验的方法测出系统的频率特性，求得传递函数或其他形式的数学模型，对于难于机理建模的复杂系统更有意义；

③图解方法：形象直观，计算量小

思考：

频率响应法能否用于分析系统的动态特性？



采用**Matlab**软件绘制的**Bode**图，开环传递函数为：

$$G_k(s)=\frac{s+1}{s(s^2+2s+2)}$$

§2.1 输入输出描述：复阻抗法求传递函数*

复阻抗法：

网络元件用复阻抗表示，网络中的变量用其拉氏变换表示，然后根据基尔霍夫定律导出输出量与输入量之比的表达式，即可得到网络的传递函数。

复阻抗：$Z(s)=U(s)/I(s)$

电　阻：R　　$u=iR \Rightarrow R=U(s)/I(s)$

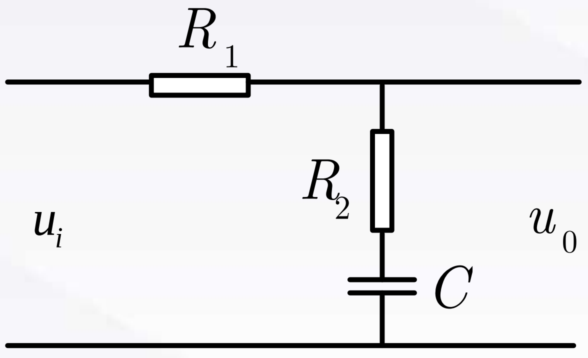
电　感：Ls　　$u=Ldi/dt \Rightarrow Ls=U(s)/I(s)$

电　容：$1/Cs$　　$i=Cdu/dt \Rightarrow 1/(Cs)=U(s)/I(s)$

§2.1 输入输出描述：复阻抗法求传递函数*

例： 求如下电气网络的传递函数。

1\.



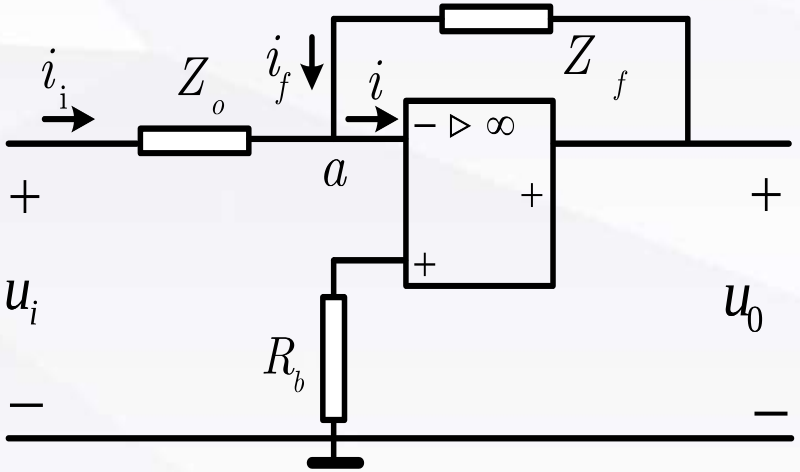
无源网络

$$Z_1(s) = R_1$$

$$Z_2(s) = R_2 + 1/(Cs)$$

$$G(s) = \frac{U_O(s)}{U_i(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)+Z_2(s)}$$

2\.



有源网络：a点虚地

$$i_i + i_f = 0 \Rightarrow I_i(s) = -I_f(s)$$

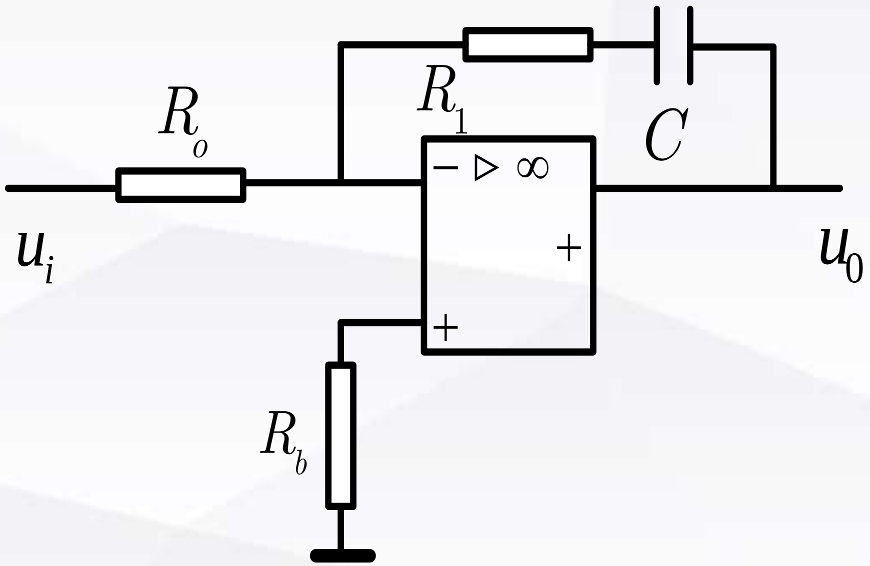
$$U_i(s)=I_i(s)Z_o(s)$$

$$U_o(s)=I_f(s)Z_f(s)$$

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_f(s)}{Z_o(s)}$$

随堂练习：

试用复阻抗法求取如下有源网络的传递函数。



$$Z_0(s) = R_0$$

$$Z_f(s) = R_1 + 1/(Cs)$$

$$G(s) = -\frac{Z_f(s)}{Z_o(s)}$$