2024-2025 学年度春季

课程名称：《自动控制原理（一）》
第3讲 控制系统的传递函数

课程学时：共56学时

课程性质：专业基础课

学生对象： 自动化2305班 (26人)

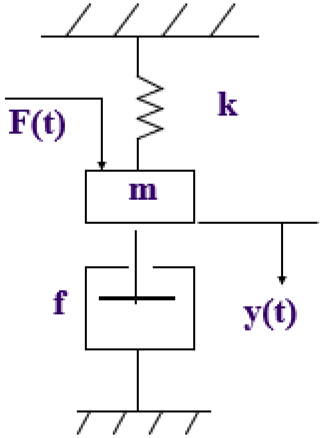
授课教师：刘骁康

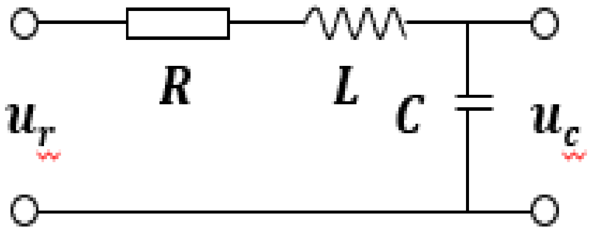
课程目标：掌握自动控制的基本原理、控制系统的建模、性能分析和综合设计方法

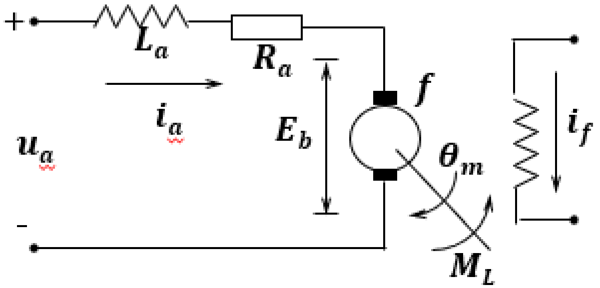
回顾

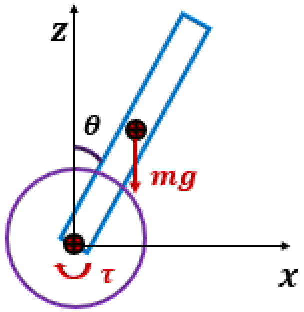
■ 控制系统的微分方程

机械系统、电路系统、电动机系统、轮式机器人平衡系统









$$a_n\frac{d^n c(t)}{dt^n}+a_{n-1}\frac{d^{n-1}c(t)}{dt^{n-1}}+\cdots\ldots+a_1\frac{dc(t)}{dt}+a_0c(t)$$
$$=b_m\frac{d^m r(t)}{dt^m}+b_{m-1}\frac{d^{m-1}r(t)}{dt^{m-1}}+\cdots\ldots+b_1\frac{dr(t)}{dt}+b_0r(t)$$

■ 非线性系统的线性化

- ➢ 工作点处线性化（泰勒展开）
- ➢ 建立偏差与偏差之间的关系

■ 案例：轮式机器人平衡系统

导入

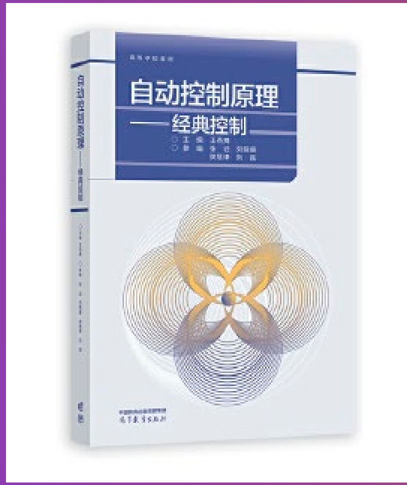
?微分方程模型的优缺点?

- ✓ 比较直观：微分方程是时间域描述系统动态性能的数学模型，在给定外作用以及初始条件下，求解微分方程可以得到系统的输出响应。
- ✓ 借助于电子计算机可以迅速而准确的求得结果。
- X 如果系统的结构改变或某个参数变化时，就要重新列写并求解微分方程，不便于系统的分析和设计。

因此，微分方程的方法，对研究参数或结构改变对性能的影响具有局限性。

□ 用拉氏变换求解线性系统的微分方程时，可以得到控制系统在复域的数学模型——传递函数。

- 既可表征系统的动态特性，还可用以研究结构参数的变化对系统性能的影响。



第二章：控制系统的数学模型

第3讲 控制系统的传递函数

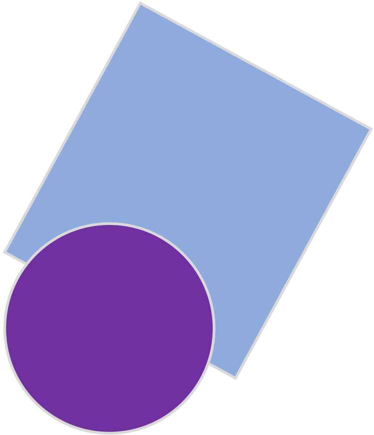
Transfer Function of Control System

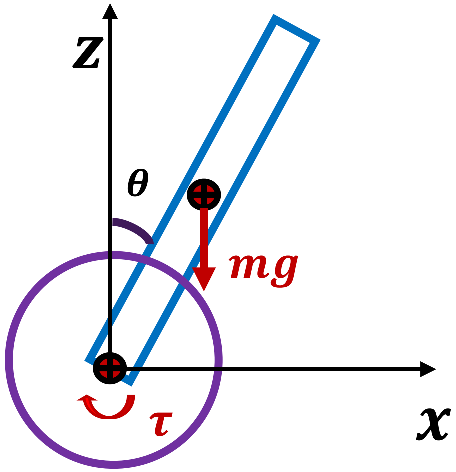
本讲内容

一、传递函数的基本概念

二、传递函数的性质与求解

三、案例：轮式机器人平衡控制系统的改进设计





一、传递函数的基本概念

?什么叫传递函数?

线性定常系统的传递函数为零初始条件下系统输出量的拉氏变换与系统输入量的拉氏变换之比。

◆几点说明：

?不是线性定常的系统是否有传递函数?

零初始条件的含义：

- 1.系统的输入在$t>0$时才作用于系统。即在$t=0^-$时系统输入及其各项导数均为零。
- 2.输入量在加于系统之前，系统为稳态，即在$t=0^-$时输出及其所有导数项为零。

?不满足零初始条件的系统是否有传递函数?

传递函数摒弃了非零初始状态对响应的影响，来考察系统的特性。

一、传递函数的基本概念

■ 传递函数的计算

◆ 设线性定常系统由下述n阶线性常微分方程描述：

$$a_n\frac{d^n c(t)}{dt^n}+a_{n-1}\frac{d^{n-1}c(t)}{dt^{n-1}}+\cdots\ldots+a_1\frac{dc(t)}{dt}+a_0c(t)$$
$$=b_m\frac{d^m r(t)}{dt^m}+b_{m-1}\frac{d^{m-1}r(t)}{dt^{m-1}}+\cdots\ldots+b_1\frac{dr(t)}{dt}+b_0r(t)$$

式中$c(t)$是系统输出量，$r(t)$是系统输入量，$a_i(i=1,2,\ldots n)$和$b_j(j=1,2,\ldots.m)$是与系统结构和参数有关的常系数。

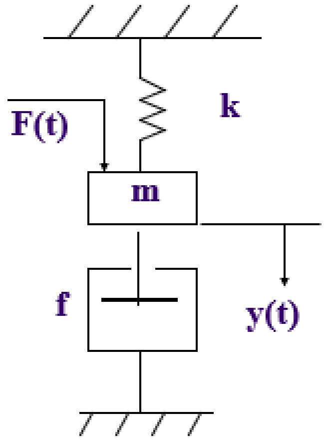
◆ 设$r(t)$和$c(t)$及其各阶导数在$t=0$时的值为0，即满足**零初始条件**，则对上式中各项分别求拉氏变换，并令$C(s)=L[c(t)]$，$R(s)=L[r(t)]$，可得s的代数方程为：

$$\left[a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0\right]C(s)=\left[b_ms^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0\right]R(s)$$

由定义得系统的传递函数的标准形式为
$$G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{b_ms^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}$$

一、传递函数的基本概念

例1.1：机械位移系统



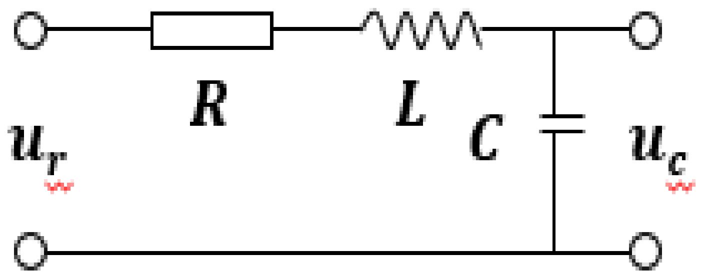
微分方程为

$$\frac{m}{k}\frac{d^2y(t)}{dt^2}+\frac{f}{k}\frac{dy(t)}{dt}+y(t)=\frac{1}{k}F(t)$$

传递函数为：

$$G(s)=\frac{1}{ms^2+fs+k}$$

例1.2：电路系统



微分方程为

$$LC\frac{d^2u_c(t)}{dt^2}+RC\frac{du_c(t)}{dt}+u_c=u_r(t)$$

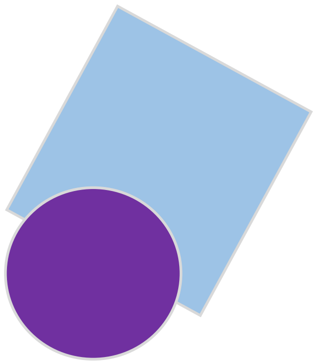
其传递函数为：

$$G(s)=\frac{U_c(s)}{U_r(s)}=\frac{1}{LCs^2+RCs+1}$$

一、传递函数的基本概念

【测试】：求轮式机器人平衡控制系统的传递函数

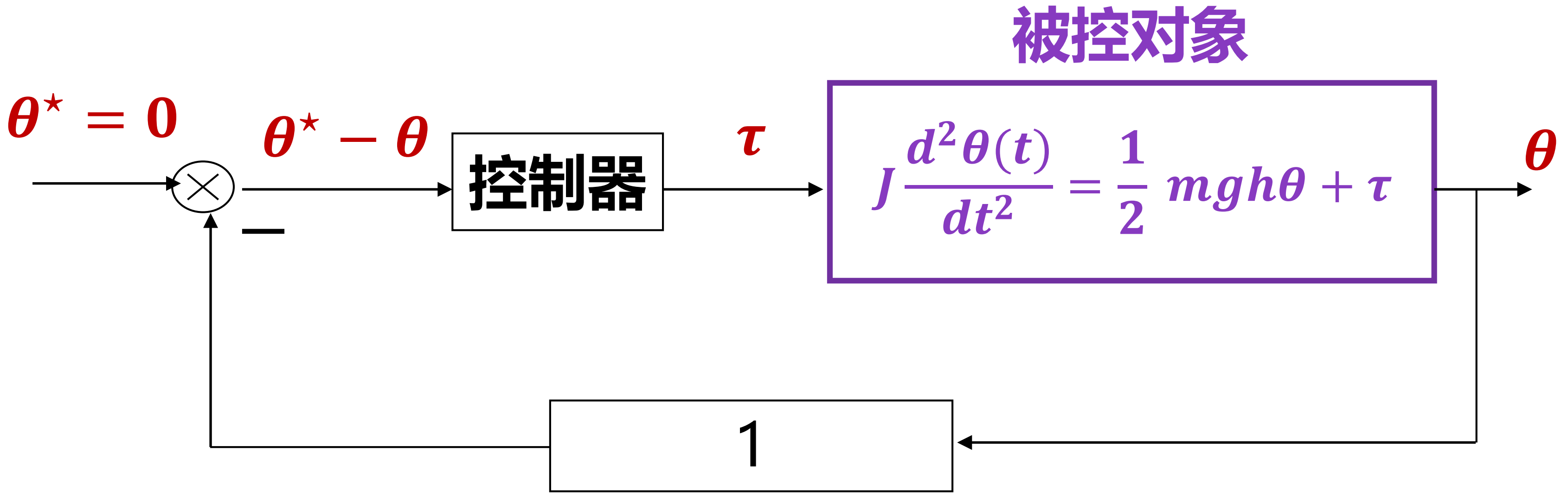
$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}=\frac{1}{2}mgh\theta+\tau$$

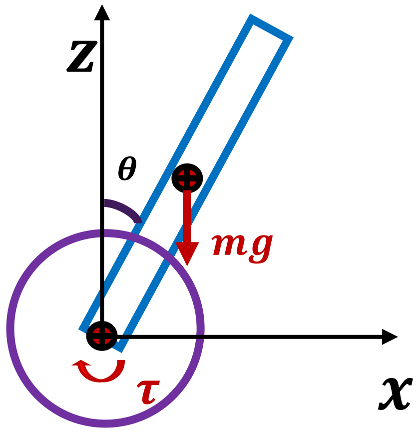


其中俯仰角为θ, 机器人主体质量为m, 高度为h转动惯量为J

机器人主体受到重力的转矩和电机作用的转矩τ

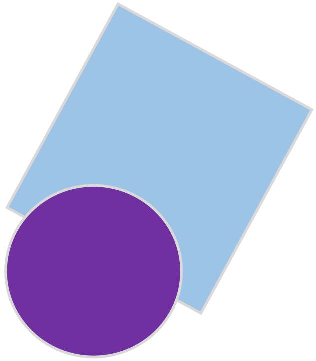
设计控制量$\tau=f(\theta^\star-\theta)=k*(-\theta)$





一、传递函数的基本概念

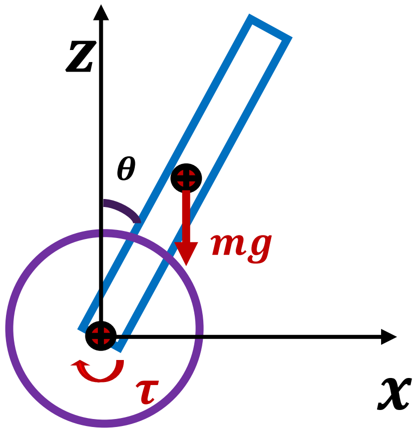
【测试】：轮式机器人平衡控制系统的传递函数



$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}=\frac{1}{2}mgh\theta+\tau$$

其中俯仰角为θ, 机器人主体质量为m, 高度为h转动惯量为J

机器人主体受到重力的转矩和电机作用的转矩τ



【解】

$$G(s)=\frac{\theta(s)}{R(s)}=\frac{k}{Js^2+k-\frac{1}{2}mgh}$$

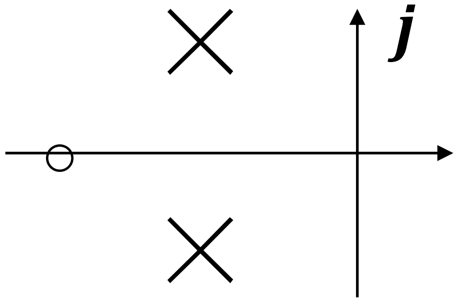
一、传递函数的基本概念

■ 传递函数的基本概念

$$G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=\frac{M(s)}{N(s)}$$

其中，$a_i(i=1,2,\dots n)$和$b_j(j=1,2,\dots.m)$是与系统结构和参数有关的常系数。

- $M(s)$为分子多项式，$N(s)$为分母多项式。对于实际的物理系统，a_i和b_j为实数。
- 系统的特征多项式：分母多项式。
- 系统的特征方程：$N(s)=0$
- 系统的极点（特征根）：$N(s)=0$的根。
- 系统的零点：$M(s)=0$的根。
- 系统的阶次：分母多项式的阶次。
- 零极点分布图：在复数平面上，用○表示零点，用╳表示极点。



零极点分布图示意图

一、传递函数的基本概念

■ 传递函数的三种呈现形式

◆1. 有理分式形式：

$$G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=\frac{M(s)}{N(s)}$$

◆2. 零极点形式：传递函数的分子和分母多项式可经因式分解后可写成如下形式

$$G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{b_m}{a_n}\frac{(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}=k\frac{\prod_{i=1}^{m}(s-z_i)}{\prod_{j=1}^{n}(s-p_j)}$$

- $z_i(i=1,2,\ldots,m)$ 为传递函数的零点
- $p_j(j=1,2,\ldots,n)$ 为传递函数的极点。
- k称为根轨迹增益。

- 传递函数的零极点完全取决于系统参数。且如果是复数，必共轭成对出现。

一、传递函数的基本概念

■ 传递函数的三种呈现形式

◆3. 时间常数形式：将传递函数的分子、分母多项式变为**尾一多项式**，然后在实数范围内因式分解，得

$$G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=K\frac{s^{l}(\tau_1 s+1)\left(\tau_2^2 s^2+2\xi_2\tau_2 s+1\right)\ldots(\tau_{m'}s+1)}{s^{v}(T_1 s+1)\left(T_2^2 s^2+2\xi_2' T_2 s+1\right)\ldots(T_{n'}s+1)}$$

式中一次因子对应于实数零极点，二次因子对应于共轭复数零极点；

▪τ_i和T_j称为**时间常数**。

▪K为**传递系数**或静态**放大系数**，即系统状态保持不变(s=0)时输入与输出之比。

▪放大系数K和根轨迹增益k之间的关系为

$$K=k\frac{\prod_{i=1}^{m}(-z_i)}{\prod_{j=1}^{n}(-p_j)}$$

一、传递函数的基本概念

测试：试求传递函数的零点、极点、传递系数和根轨迹增益。

$$G(s) = \frac{s+2}{2s^2+10s+8}$$

【解】将传递函数化为零极点形式

$$G(s) = \frac{s+2}{2(s^2+5s+4)} = \frac{0.5(s+2)}{(s+1)(s+4)}$$

零点为 $z=-2$

极点为 $p_1=-1, p_2=-4$

根轨迹增益为 $k^*=0.5$

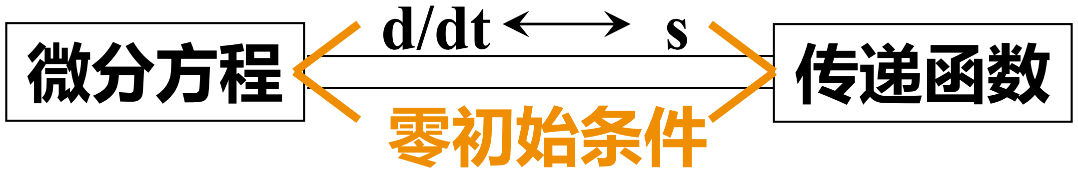
$$G(s) = \frac{2(0.5s+1)}{8(0.25s^2+1.25s+1)} = \frac{0.25(0.5s+1)}{(0.25s^2+1.25s+1)}$$

传递系数为 $K=0.25$

二、传递函数的性质与求解

?传递函数具有什么性质?

◆1. 传递函数与微分方程：将微分方程算符d/dt用复数s置换可以得到传递函数。反之亦然。



◆2. 传递函数反映系统自身固有特性，与输入和初始条件无关。

◆3. 不同的物理系统可能有相同的传递函数，而同一系统可以有不同的传递函数。

◆4. 一个传递函数只能表示一个输入对一个输出的函数关系，如果是多输入多输出系统，可以用传递函数阵表示。

对于m个输入、n个输出的线性定常系统，传递函数矩阵是一个$n \times m$阶矩阵。

二、传递函数的性质与求解

例1.3：直流电机模型

已知某电枢控制直流电动机系统的微分方程模型如下，求系统的传递函数。

$$T\frac{d\omega}{dt}+\omega=K_1u_a+K_2M_L$$

【解】系统有两个输入、一个输出，因此需要求两个传递函数。

首先对方程两边求拉氏变换得

令负载转矩为0，则求得电枢电压和输出间的传递函数：$\dfrac{\Omega(s)}{U_a(s)}=\dfrac{K_1}{Ts+1}$

令电枢电压为0，则求得负载转矩和输出间的传递函数：$\dfrac{\Omega(s)}{M_L(s)}=\dfrac{K_2}{Ts+1}$

写成矩阵的形式，传递函数矩阵

$$G(s)=\begin{bmatrix}\dfrac{K_1}{Ts+1} & \dfrac{K_2}{Ts+1}\end{bmatrix}$$ 满足 $$\Omega(s)=G(s)\begin{bmatrix}U_a(s)\\M_L(s)\end{bmatrix}$$

二、传递函数的性质与求解

◆5. 传递函数与单位脉冲响应之间是拉氏变换与拉氏反变换的关系。

✓ 单位脉冲响应：零初始条件下单位脉冲输入作用下的输出响应。类似的定义还有“单位阶跃响应”。

【证明】设线性定常系统的传递函数为G(s)，输入的拉氏变换为R(s)，在零初始条件下，系统的输出为

$$C(s)=G(s)R(s)$$

由于单位脉冲输入信号的拉氏变换为 $R(s)=L(\delta(t))=1$

所以 $C(s)=G(s)$

则 $c(t)=L^{-1}(G(s))$

证毕。

- 6 .一般情况下，传递函数分子的阶数m与分母的阶数n满足 $n \geq m$ (称为**物理现实性条件**) 。

  为什么$m > n$在实际中不可实现?

  因为能量有限，系统具有惯性。

  假设存在$G(s) = s$，

  当输入信号为单位阶跃信号$1(t)$时，

  系统的输出$c(t) = L^{-1}[C(s)] = L^{-1}[G(s)R(s)] = L^{-1}[s/s] = \delta(t)$，

  即为单位脉冲函数。这在现实世界是不可能的。

二、传递函数的性质与求解

?传递函数有哪些局限性?

- 只适于线性定常系统的表达。
- 不反映初始状态的信息。
- 不反映系统内部的任何信息。

二、传递函数的性质与求解

例2.1：已知某系统在零初始条件下，在输入信号$r(t)=1(t)$作用下，测得输出响应为

$$c(t)=1-2e^{-t}+e^{-2t}, t\geq 0,$$

求系统的传递函数。

【解】系统满足零初始条件，因此，只要分别求出系统输入和输出的拉氏变换，求二者之比即得。

系统输入的拉氏变换 $R(s)=\frac{1}{s}$,

输出的拉氏变换 $C(s)=\frac{1}{s}-\frac{2}{s+1}+\frac{1}{s+2}$

则系统的传递函数 $G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{2}{(s+1)(s+2)}=\frac{2}{s^2+3s+2}$

【思考】有无其它求解方法?

二、传递函数的性质与求解

?当不满足零初始条件时，如何求传递函数?

【例2.2】已知某系统初始条件为$c(0)=-1, \dot{c}(0)=0$。在$t=0^{+}$给系统施加输入$r(t)=1(t)$，得到输出响应为

$$c(t)=1-4e^{-t}+2e^{-2t}, t\geq 0$$

求系统的传递函数。

⬇

需要求出：零初始条件下当前输入所产生的输出

⬇

能否求出“非零初始条件”所产生的输出?

⬇

初始条件有两个，尝试待定系数法

⬇

如何获得待定表达式?

二、传递函数的性质与求解

【知识点】非0初始条件下传递函数的求解

重点

$$a_n\frac{d^n}{dt^n}c(t)+\cdots+a_0c(t)=b_m\frac{d^m}{dt^m}r(t)+\cdots+b_0r(t)$$

如果**初始条件不为0**，

根据拉氏变换的微分定理：

$$L[\frac{d^nc(t)}{dt^n}]=s^nC(s)-\sum_{k=1}^{n}\frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}}c(0)s^{n-k}$$

对微分方程模型求拉氏变换可得

$$C(s)=\frac{f(s,a_i,\frac{d^{n-1}c(0)}{dt^{n-1}},\cdots,c(0))+g(s,b_j,\frac{d^{m-1}r(0)}{dt^{m-1}},\cdots,r(0))}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}+\frac{(b_ms^m+\cdots+b_0)R(s)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}$$

其中$f(\cdot)$和$g(\cdot)$分别是输出及其各阶导数在零时刻的值和a_i、输入及其各阶导数在零时刻的值和b_j、以及s的函数。

二、传递函数的性质与求解

【知识点】非0初始条件下传递函数的求解

重点

●当与输入有关的初始条件为0时，仅由**输出的初始条件**和**传递函数的分母多项式$N(s)$**决定。

●由**初始条件**产生，与输入无关，称为**零输入响应**。

●改变输入不会改变零输入响应。

$$C(s)=\boxed{\frac{f\left(s,a_i,\frac{d^{n-1}c(0)}{dt^{n-1}},\cdots,c(0)\right)+g\left(s,b_j,\frac{d^{m-1}r(0)}{dt^{m-1}},\cdots,r(0)\right)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}}$$

$$+\frac{(b_ms^m+\cdots+b_0)R(s)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=C_1(s)+C_2(s)$$

微分方程模型

$$a_n\frac{d^n}{dt^n}c(t)+\cdots+a_0c(t)=b_m\frac{d^m}{dt^m}r(t)+\cdots+b_0r(t)$$

对应的传递函数

$$G(s)=\frac{b_ms^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=\frac{M(s)}{N(s)}$$

二、传递函数的性质与求解

【知识点】非0初始条件下传递函数的求解

重点

●当与输入有关的初始条件为0时，仅由输出的初始条件和传递函数的分母多项式$N(s)$决定。

●由初始条件产生，与输入无关，称为零输入响应。

●改变输入不会改变零输入响应。

$$C(s)=\frac{f\left(s,a_i,\frac{d^{n-1}c(0)}{dt^{n-1}},\cdots,c(0)\right)+g\left(s,b_j,\frac{d^{m-1}r(0)}{dt^{m-1}},\cdots,r(0)\right)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}$$

$$+\frac{(b_ms^m+\cdots+b_0)R(s)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=C_1(s)+C_2(s)$$

传递函数 $G(s)=\dfrac{C_2(s)}{R(s)}$

●由输入信号产生，与初始条件无关，称为零状态响应。

由于线性系统满足叠加原理，系统的响应等于零输入响应和零状态响应之和。

二、传递函数的性质与求解

✓ **当与输入有关的初始条件为0时**

令 $R(s)=\dfrac{R_m(s)}{R_n(s)}=\dfrac{R_m(s)}{\prod\limits_{k=1}^{l}(s-q_k)}$

$$C(s)=\frac{f\left(s,a_i,\dfrac{d^{n-1}c(0)}{dt^{n-1}},\cdots,c(0)\right)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}+\frac{(b_ms^m+\cdots+b_0)R(s)}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0}=C_1(s)+C_2(s)$$

以无重根的情况为例，利用留数定理对$C(s)$进行部分分式展开得

重根的情况类似可得

零输入响应：

$$C_1(s)=\sum_{j=1}^{n}\frac{\underset{s=p_j}{\mathrm{Res}}[C_1(s)]}{s-p_j}$$

零状态响应：

$$C_2(s)=\sum_{j=1}^{n}\frac{\underset{s=p_j}{\mathrm{Res}}[C_2(s)]}{s-p_j}+\sum_{k=1}^{l}\frac{\underset{s=q_k}{\mathrm{Res}}[C_2(s)]}{s-q_k}$$

- pj为$N(s)=0$的根(系统的特征根)，q_k为输入象函数分母=0的解。
- 据此可以由输出的拉氏变换分母$=0$的根确定传递函数的特征根，进而得到零输入响应的拉氏变换分母$=0$的根。

二、传递函数的性质与求解

【例2.2】已知某系统初始条件为$c(0)=-1, \dot{c}(0)=0$。在$t=0^+$给系统施加输入$r(t)=1(t)$，得到输出响应为

$$c(t)=1-4e^{-t}+2e^{-2t}, t\geq 0$$

求系统的传递函数。

?为什么没有0?

【解】由 $R(s)=\dfrac{1}{s}$ 时 $C(s)=\dfrac{1}{s}-\dfrac{4}{s+1}+\dfrac{2}{s+2}$

可以判断出：系统有两个特征根，分别为-1和-2。因此，设系统的零输入响应为

$$C_1(s)=\frac{a}{s+1}+\frac{b}{s+2} \qquad c_1(t)=ae^{-t}+be^{-2t}$$

由初始条件得 $\begin{cases} c_1(0)=a+b=-1, \\ \dot{c}_1(0)=-a-2b=0 \end{cases}$ $\begin{cases} a=-2, \\ b=1 \end{cases}$ 则系统的零状态响应

$$c_2(t)=c(t)-c_1(t)=1-2e^{-t}+e^{-2t}$$

则系统的传递函数为 $G(s)=\dfrac{C_2(s)}{R(s)}=\dfrac{2}{s^2+3s+2}$

二、传递函数的性质与求解

【测试】已知系统的传递函数为 $G(s)=\frac{2}{s^2+3s+2}$设系统的初始条件为

$$c(0)=-1,\dot{c}(0)=0 。$$

试求输入为单位阶跃函数时系统的响应。

【解】方法一：由传函得到系统的微分方程，然后在非零初始条件下求拉氏变换，将初始条件和输入的拉氏变换代入，得到输出的拉氏变换，最后求拉氏反变换。

方法二：系统响应 = 零状态响应 + 零输入响应

零状态响应=$L^{-1}\left[G(s)R(s)\right]=1-2e^{-t}+e^{-2t}$

零输入响应的求法:由特征方程得特征根为-1和-2，则可得到零输入响应的形式为

则$c(t)=1-2e^{-t}+e^{-2t}+a_1e^{-t}+a_2e^{-2t}$

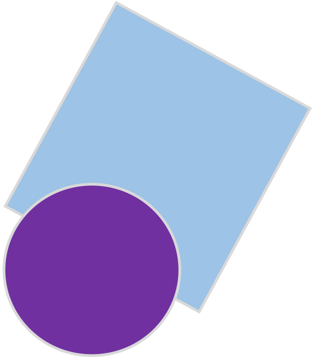
利用初始条件，用待定系数法求出a_i，得$a_1=-2$，$a_2=1$，即

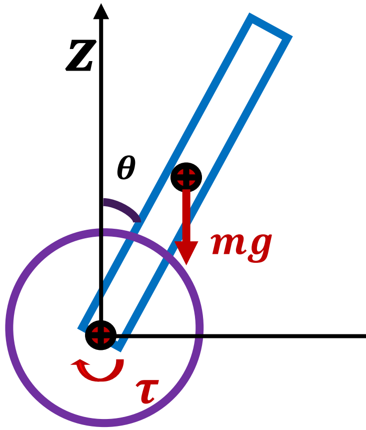
$$c(t)=1-4e^{-t}+2e^{-2t},t\geq 0$$

- 输入形式的改变不改变系统的零输入响应。

三、轮式机器人平衡控制系统的改进设计

【例3.1】：轮式机器人平衡控制系统的传递函数





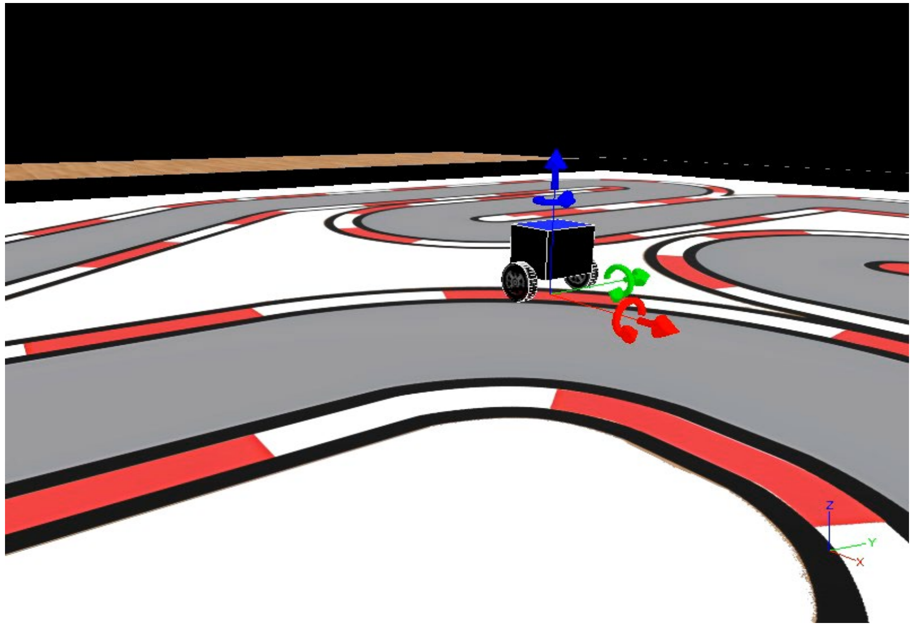
$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}=\frac{1}{2}mgh\theta+\tau$$

其中俯仰角为θ, 机器人主体质量为m, 高度为h转动惯量为J

机器人主体受到重力的转矩和电机作用的转矩τ

【解】

$$G(s)=\frac{\theta(s)}{R(s)}=\frac{k}{Js^2+k-\frac{1}{2}mgh}$$

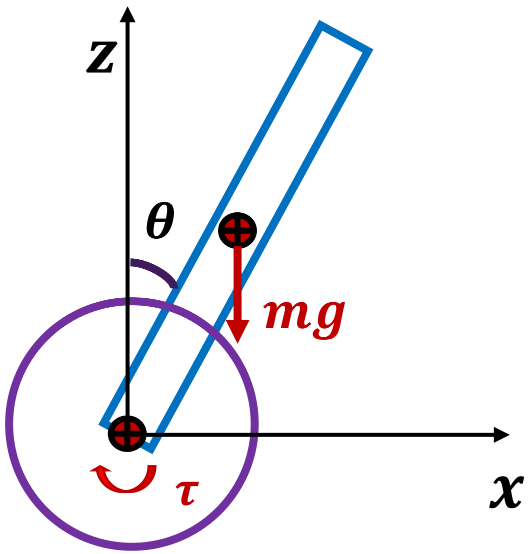


若设置参考输入$R(s)$为0，为什么车还动了?

三、轮式机器人平衡控制系统的改进

分析：轮式机器人平衡控制系统

$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}=\frac{1}{2}mgh\theta+\tau$$



【如何设计控制量τ】

$$\frac{d^2}{dt^2}f(t)\to s^2F(s)-sf(0)-f'(0)$$

$$\tau=k*(-\theta),$$

◆ **拉氏变换**

$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}=\left(\frac{1}{2}mgh-k\right)\theta$$

$$Js^2\theta(s)-s\theta(0)-\dot{\theta}(0)+\left(k-\frac{1}{2}mgh\right)\theta(s)=0,$$

$$J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}+\left(k-\frac{1}{2}mgh\right)\theta=0$$

得到$\theta(s)=\frac{\theta(0)s+\dot{\theta}(0)}{Js^2+(k-\frac{1}{2}mgh)}$

零输入响应

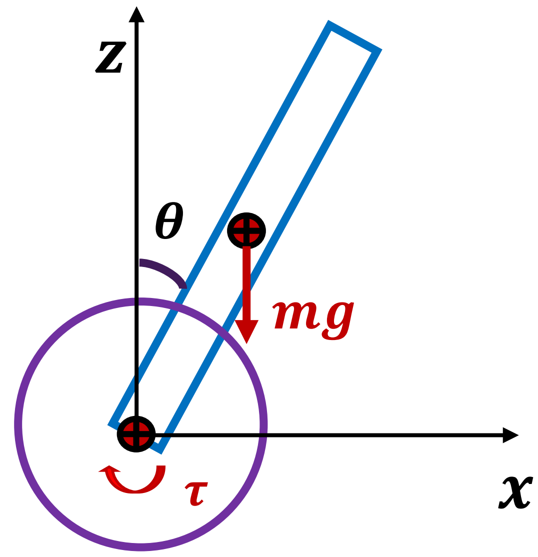
三、轮式机器人平衡动力学分析

分析：轮式机器人平衡控制系统

◆ **拉氏变换**

$$\theta(s)=\frac{\theta(0)s+\dot{\theta}(0)}{Js^2+(k-\frac{1}{2}mgh)}$$

$$\alpha=k-\frac{1}{2}mgh$$



✓ 若$\alpha>0$，则$\theta(s)=\frac{\theta(0)}{J}\frac{s}{s^2+\frac{\theta(0)\alpha}{J}}+\frac{\dot{\theta}(0)}{J}\frac{1}{s^2+\frac{\dot{\theta}(0)\alpha}{J}}$

➡ $\theta(t)=\frac{\theta(0)}{J}\cos\left(\sqrt{\theta(0)\alpha t}\right)+\frac{\dot{\theta}(0)}{J}\sin\left(\sqrt{\dot{\theta}(0)\alpha t}\right)$

$\theta(t)$ 随时间在振荡

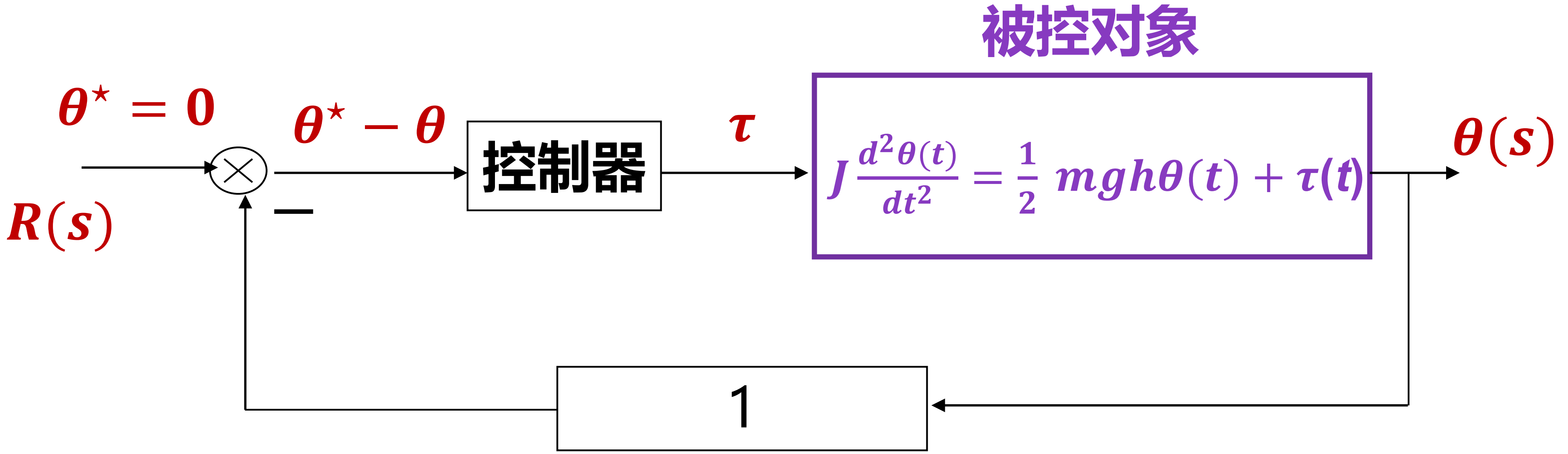
✓ 若$\alpha<0$，则 $\theta(s)=\frac{1}{J}\left(\frac{c_1}{s+\sqrt{\frac{\alpha}{J}}}+\frac{c_2}{s-\sqrt{\frac{\alpha}{J}}}\right)$

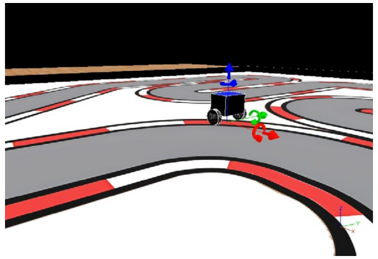
➡ $\theta(t)=\frac{c_1}{J}e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{J}}t}+\frac{c_2}{J}e^{\sqrt{\frac{\alpha}{J}}t}$

$\theta(t)$ 随时间趋向无穷

三、轮式机器人平衡控制系统的改进

【分组讨论】：定制方案如何克服等幅摇摆?





传递函数 $G(s) = \frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{k}{Js^2 + k - \frac{1}{2}mgh}$

小结

- 控制系统传递函数：
  - 基本概念：微分方程->传递函数
  - 传递函数的求解：零状态响应+零输入响应
  - 案例分析：轮式机器人稳定控制的改进设计
- 作业：
  - 参考书 2.5
  - 学习典型环节的传递函数。