



机电传动控制

主讲教师：谢经明

华中科技大学 机械科学与工程学院

第二章

机电传动系统的动力学基础

基本要求和学习重点

- 运用运动方程式分别判断机电传动系统的运行状态；
- 掌握多轴传动系统负载转矩/转动惯量折算的基本原则和方法；
- 了解几种典型生产机械的机械特性曲线；
- 运用稳定运行的条件来判断机电传动系统的稳定运行点；
- 了解最优过渡过程的意义，实现加快系统过渡过程的方法；

CONTENTS



2.1

单轴拖动运动方程式

2.2

多轴系统简化

2.3

典型生产机械负载特性

2.4

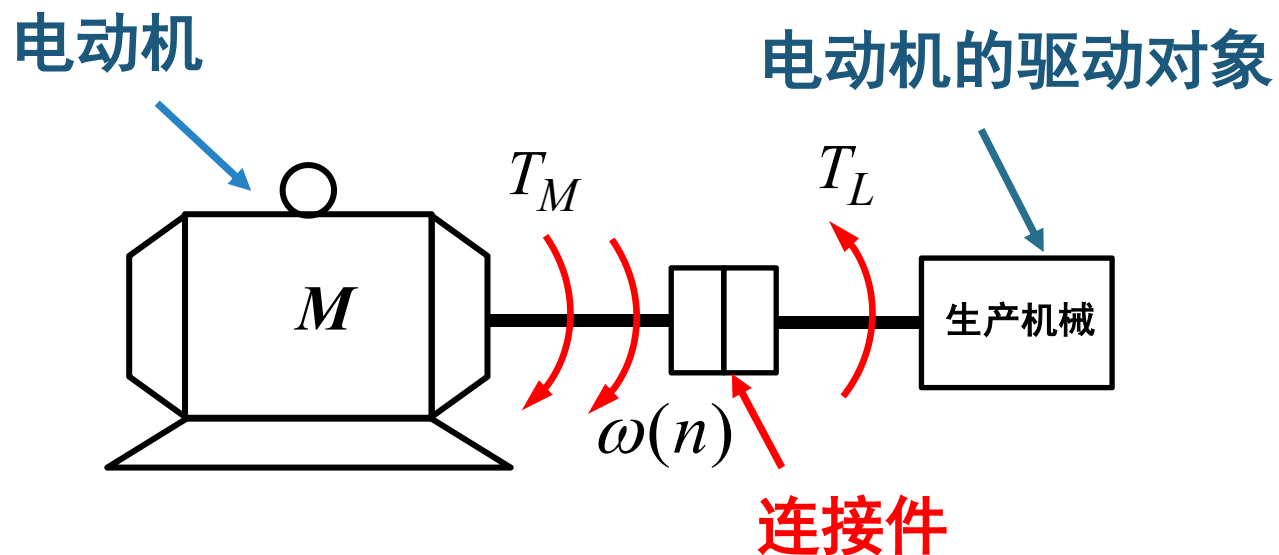
稳定运行条件

2.1 单轴运动方程式

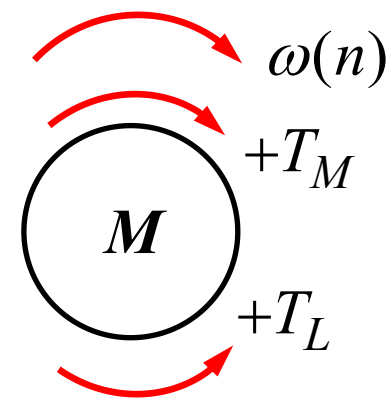


2.1 单轴拖动系统的组成

- 电动机 M 通过连接件直接与生产机械相连，由电动机 M 产生**输出转矩** T_M ，用来克服**负载转矩** T_L ，带动生产机械以角速度 ω （或速度 n ）进行运动



系统机构图



转矩正方向

2.1 单轴拖动系统的运动方程式

□ **运动方程式**：表明机电系统中 T_M , T_L , ω (或 n)之间的函数关系

根据动力学原理：
$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

T_M —电动机的输出转矩 ($N\cdot m$) ; T_L —负载转矩 ($N\cdot m$) ; t —时间 (s) ;

J —转动惯量 ($kg\cdot m^2$) ; ω —角速度 (rad/s) ; n —速度 (r/min) ;

□ **转矩平衡方程式**：

$$T_M - T_L = T_d$$

□ **动态转矩 ($N\cdot m$)**：

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

2.1 单轴拖动系统的运动状态

$$J = \frac{1}{4} m D^2 = \frac{1}{4} \frac{G}{g} D^2 = \frac{1}{4} \frac{G D^2}{g}, \quad G = mg$$

J —转动惯量 ($kg \cdot m^2$) ; m —质量 (kg) ; $g = 9.81$ —常数 (m/s^2) ;

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$



$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

飞轮转矩
飞轮惯量

2.1 单轴拖动系统的运动状态

➤ **稳态 ($T_M = T_L$) 时 :**

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad , \text{ 即 } \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad , \omega \text{ 为常数 , 传动系统以恒速运动}$$

$T_M = T_L$ 时 , 传动系统处于恒速运动的这种状态被称为稳态

电动机产生转矩的大小仅由电动机所带的负载 (生产机械) 决定

➤ **动态 ($T_M \neq T_L$) 时 :**

$$T_M > T_L \quad \text{时} \quad T_d = J \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad , \text{ 即 } \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad , \text{ 传动系统加速运动}$$

$$T_M < T_L \quad \text{时} \quad T_d = J \frac{d\omega}{dt} < 0 \quad , \text{ 即 } \frac{d\omega}{dt} < 0 \quad , \text{ 传动系统减速运动}$$

➤ **总结 :** 当 $T_M \neq T_L$ 时 : 传动系统处于加速或减速运动的这种状态被称为动态

2.1 单轴拖动系统运动的参考方向

□ **转矩方向**：因为电动机和生产机械以共同的转速旋转，所以，一般以 ω （或 n ）的转动方向为参考来确定转矩的正负。

➤ **拖动转矩促进运动；**

➤ **制动转矩阻碍运动。**

假定电动机某一转动方向的转速 n 为正，

则约定电动机转矩 T_M 与 n 一致的方向为正向，

负载转矩 T_L 与 n 相反的方向为正向

2.1 单轴拖动系统运动的参考方向

□ T_M 、 T_L 、 n 的参考方向

因为电动机和生产机械以共同的转速旋转，所以，一般以 ω （或 n ）的转动方向为参考来确定转矩的正负。

拖动转矩促进运动；制动转矩阻碍运动。

1. T_M 的符号与性质

当 T_M 的实际作用方向与 n 的方向相同时，取与 n 相同的符号；

当 T_M 的实际作用方向与 n 的方向相反时，取与 n 相反的符号；

当 T_M 的实际作用方向与 n 的方向相同（符号相同）时， T_M 为拖动转矩，否则为制动转矩。

2. T_L 的符号与性质

当 T_L 的实际作用方向与 n 的方向相同时，取与 n 相反的符号；

当 T_L 的实际作用方向与 n 的方向相反时，取与 n 相同的符号；

当 T_L 的实际作用方向与 n 的方向相同（符号相反）时， T_L 为拖动转矩，否则为制动转矩。₁₁

2.1 单轴拖动系统运动的参考方向

□ 举例：如图所示电动机拖动重物上升和下降。

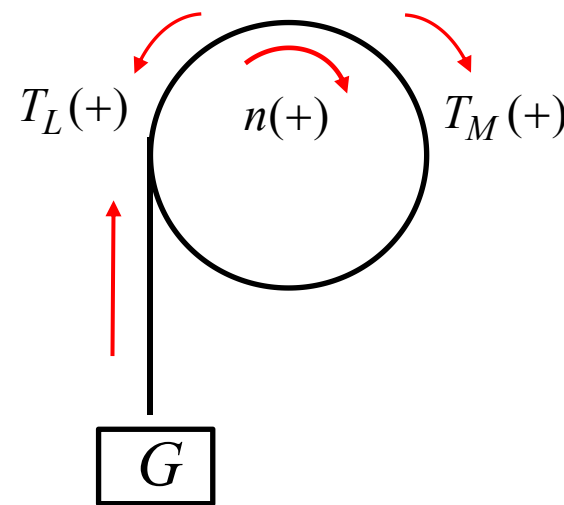
设重物**上升**时速度 n 的符号为**正**，**下降**时 n 的符号为负。

➤ 当重物**匀速上升**时： T_M 为正， T_L 为正。

运动方程式为：

$$T_M - T_L = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

因此重物上升时， T_M 为拖动转矩， T_L 为制动转矩。



(a)

2.1 单轴拖动系统运动的参考方向

□ 举例：如图所示电动机拖动重物上升和下降。

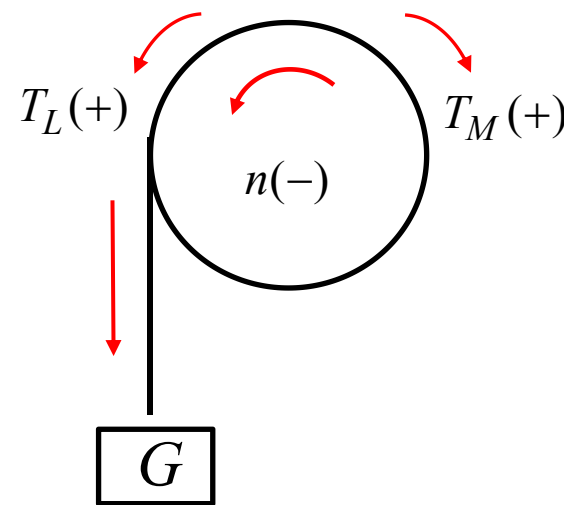
设重物**上升**时速度 n 的符号为**正**，**下降**时 n 的符号为负。

➤ 当重物**匀速下降**时： T_M 为正， T_L 为正。

运动方程式为：

$$T_M - T_L = -J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad \text{即} \quad T_L - T_M = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

因此重物**下降**时， T_M 为制动转矩， T_L 为拖动转矩。



(b)

2.1 单轴拖动系统运动的参考方向

□ 举例：如图所示电动机拖动重物上升和下降。

设重物**上升**时速度 n 的符号为**正**，**下降**时 n 的符号为负。

从静止加速到启动上升、

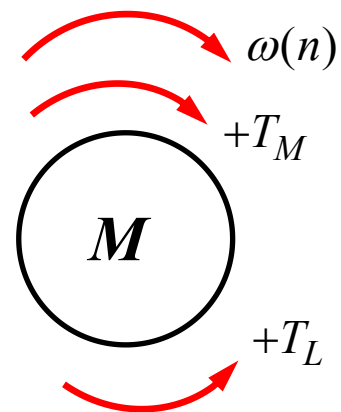
匀速上升、

从匀速上升到减速上升、

从静止加速到匀速下降、

匀速下降、

从匀速下降到静止

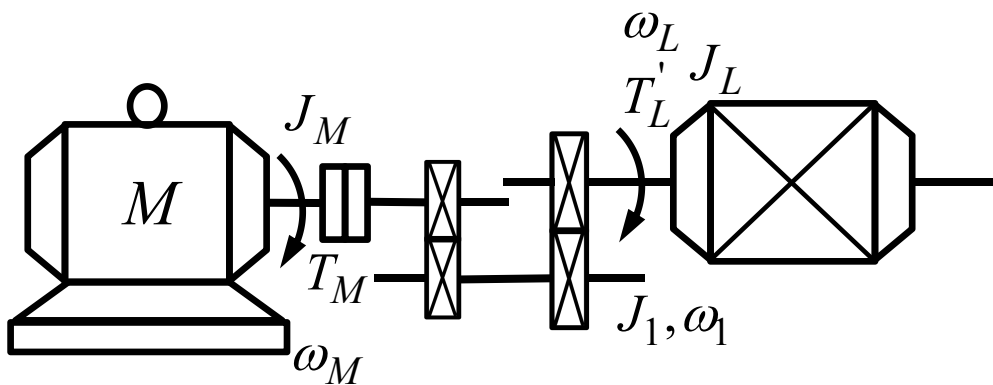


2.2 多轴运动简化

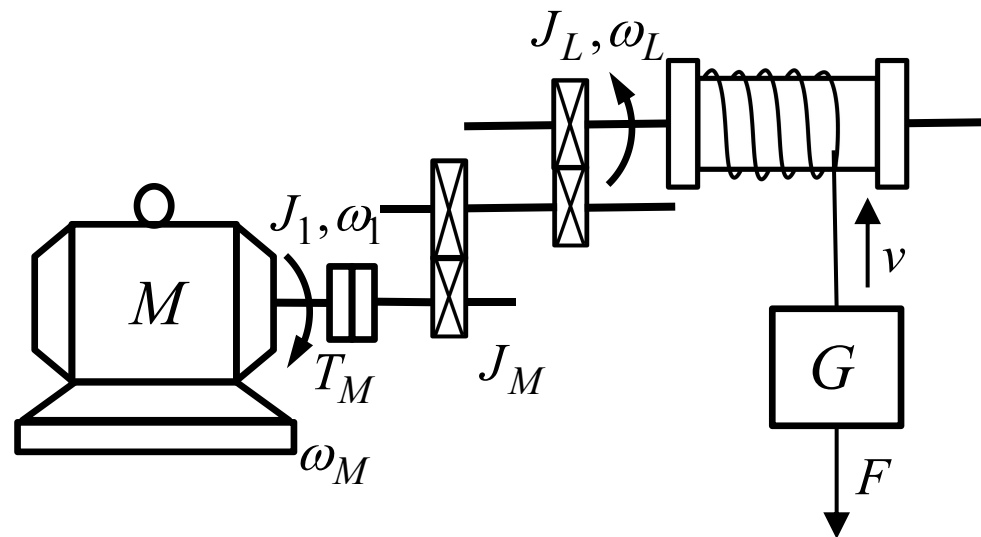


2.2 多轴拖动系统的组成

- 大多数机械装备要求低速运转，而电动机一般具有较高的额定转速
- **多轴系统**：电动机通过减速机构（如减速齿轮箱、蜗轮蜗杆、传动带等）与生产机械相连，如图所示：



(a) 多轴拖动系统—旋转运动



(b) 多轴拖动系统—直线运动

2.2 多轴拖动系统的简化

➤ **简化过程**：为了对多轴拖动系统进行运行状态的分析，一般是将多轴拖动系统等效折算为单轴系统，一般是折算到电动机轴上。

➤ **折算原则**：

多轴系统同折算后的单轴系统在**能量关系上或功率关系**上保持不变，即：

负载转矩—功率守恒原则（静态）

转动惯量—动能守恒原则

2.2 负载转矩的折算

- **传输功率**：假设电动机以角速度 ω_M 旋转，负载转矩 T_L 折算到电动机轴上的负载转矩为 T_{eq} ，而生产机械的旋转角速度为 ω_L ，则电动机输出功率 P_M 和负载所需功率 P_L 分别为

$$P_M = \omega_M \cdot T_{eq} \quad P_L = \omega_L \cdot T_L$$

- **传动效率**：考虑传动机构在传输功率的过程中有损耗，可用效率 η_c 来表示，且

$$\eta_c = \frac{\text{减速机构的输出功率}}{\text{减速机构的输入功率}} = \frac{T_L \omega_L}{T_{eq} \omega_M} \quad (\text{由电动机还是机械负载承担})$$

- **等效转矩**：生产机械上的负载转矩折算到电动机轴上的等效转矩为

$$T_{eq} = \frac{T_L \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T_L}{\eta_c j}$$

式中： η_c ---电动机拖动生产机械运动时的传动效率：

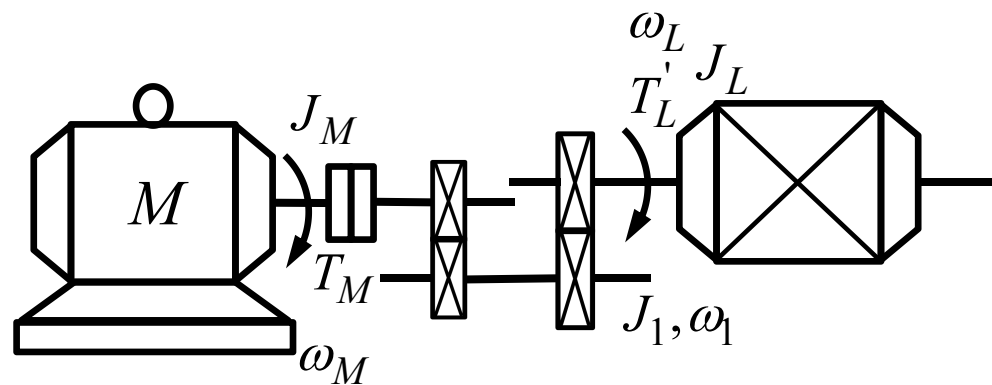
- **传动速比**：

$$j = \frac{\omega_M}{\omega_L}$$

2.2 转动惯量的折算 - 旋转运动

➤ **总转动惯量**：假设根据动能守恒原则，折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2}$$



式中：

J_M 、 J_1 、 J_L ——分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械运动轴上的转动惯量；

$j_1 = \frac{\omega_M}{\omega_1}$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比；

$j_L = \frac{\omega_M}{\omega_L}$ ——电动机轴与生产机械运动轴之间的速比；

ω_M 、 ω_1 、 ω_L ——分别为电动机、中间传动轴、生产机械运动轴的旋转角速度。

2.2 转动惯量的折算 - 旋转运动

□ **当速度比 j 较大时**，中间传动机构的转动惯量 J_I ，在折算后占整个系统的比重不大，实际工程中为方便计算，多用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 的方法，来考虑中间传动机构的转动惯量 J_I 的影响，于是有：

$$J_Z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2}$$

一般

$$\delta = 1.1 \sim 1.25$$

2.2 转动惯量的折算 - 直线运动

➤ **直线惯量折算**：设直线运动部件的质量为 m ，折算到电动机轴上的总转动惯量为：

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2}$$

□ 把具有中间传动机构带旋转运动部件或直线运动部件的多轴系统简化为等效的单轴系统，以此来研究机电传动系统的运动规律。

多轴系统运动方程式为：

$$T_M - T_L = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

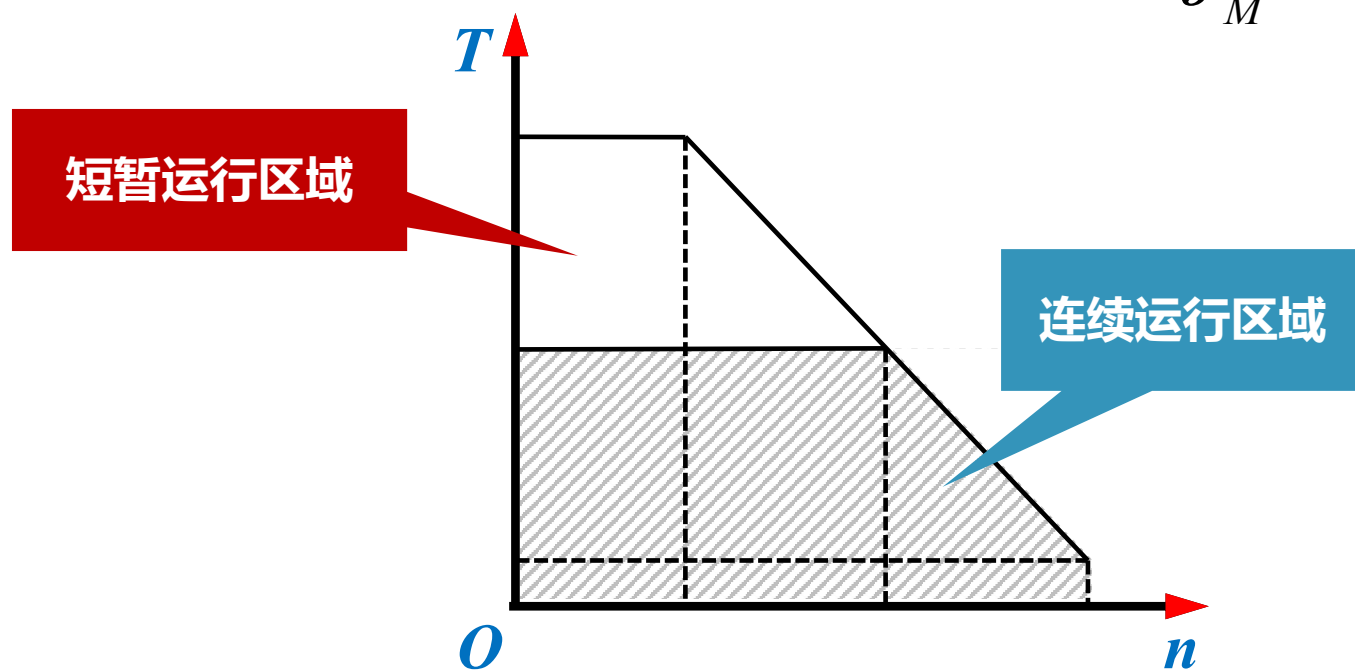
2.2 电动机转矩和转动惯量参数的选择

选型目标

电动机提供的转矩大于负载转矩

电动机和负载之间有合适惯量比

$$\lambda = \frac{J_z}{J_M}$$



连续转矩保留50%的裕量，峰值转矩保留30%的裕量

2.2 电机选型初步讨论

□ 选型基本步骤：

- 确定传动结构
- 计算负载惯量和负载转矩
- 画出一个电机工作循环周期的运动曲线
- 计算电机需要提供的转矩和转速

(电机额定峰值转矩应大于负载等效转矩加上加减速所需的动态转矩)

- 确定电机惯量范围

(高动态响应, $\lambda < 5$; 动态响应要求不高, $\lambda < 10$; $\lambda > 10$, 容易有共振)

- 在电机产品手册中选择合适电机

2.2 电机选型初步讨论

□ 选型软件案例

电机选型化繁为简！

DIGITAL AC SERVO MOTOR & DRIVER MINAS SERIES
Mselect

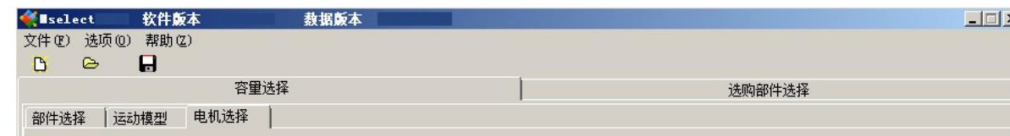


关于容量选定功能

标签 > 容量选定 > 容量选定功能相关

电机容量选定由以下构成

1. 输入机构部件的组装和其他部件的数据「[部件选择标签](#)」
2. 输入运动模型「[运动模型标签](#)」
3. 输入电机的系列和规格，表示和其相适的所有电机的计算结果「[电机选择标签](#)」
4. 「[电机选择标签](#)」中，所选电机容量选定计算的详细结果显示以及其打印功能「[电机详情画面](#)」



本软件启动时「容量选定标签 - 部件选择标签」处于被选择状态。

2.3 生产机械的机械特性



2.3 生产机械的典型机械特性

□ **机械特性**：同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系，也即为负载特性。

（电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系） $n = f(T_L)$

机械特性

恒转矩型机械特性（分为反抗型和位能型）

离心式通风型机械特性

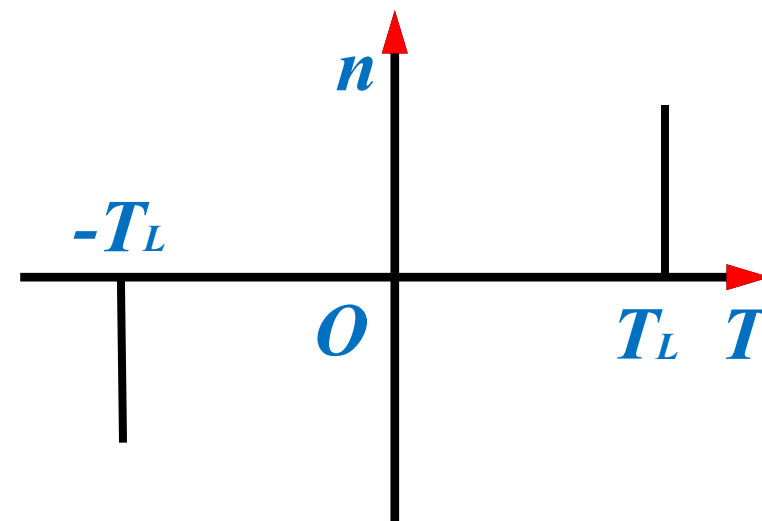
直线型机械特性

恒功率型机械特性

2.3 恒转矩型机械特性 - 反抗转矩

□ **反抗性转矩**：又称摩擦性转矩，因摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转、机械加工过程中切削力等作用而产生的负载转矩。

- 转矩大小恒定不变；
- 作用方向始终与速度 n 的方向相反，恒与运动方向相反，总是阻碍运动；
- 依据转矩正方向的约定，反抗转矩恒与转速 n 取相同的符号，即 n 为正方向时 T_L 为正，特性在第一象限； n 为负方向时 T_L 为负，特性在第三象限。



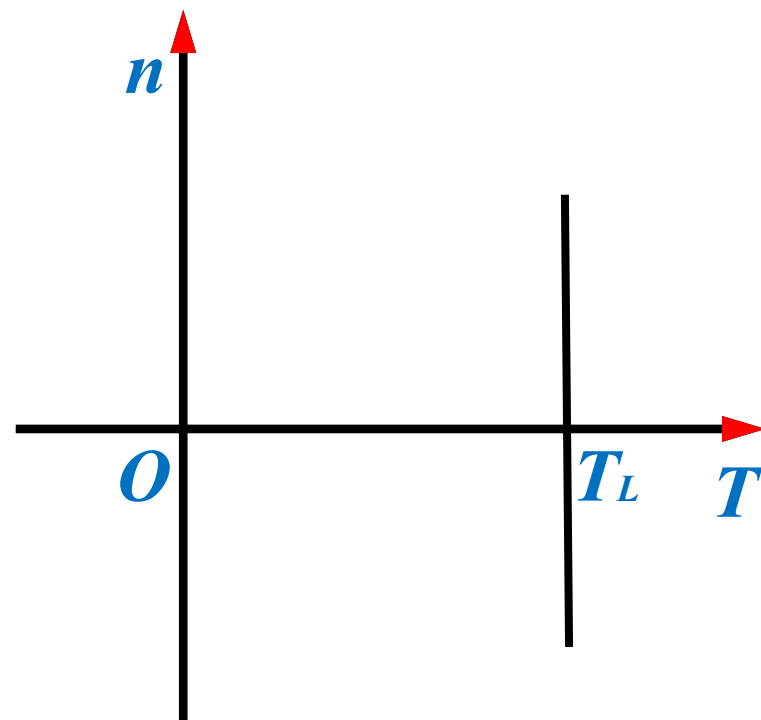
(a) 反抗转矩

2.3 恒转矩型机械特性 - 位能转矩

- **位能转矩**：由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用而产生的负载转矩，其特点为：
- 转矩大小恒定不变；
 - 作用方向不变，与运动方向无关，即在某一方向阻碍运动，而在另一方向促进运动。

卷扬机起吊重物时，由于重物的作用方向永远向着地心，负载转矩永远作用在使重物下降的方向，即：

- 当电动机拖动重物上升时， T_L 与 n 的方向相反；
- 当重物下降时， T_L 和 n 的方向相同；
- 不论 n 为正向还是负向， T_L 都不变，特性在第一、四象限。

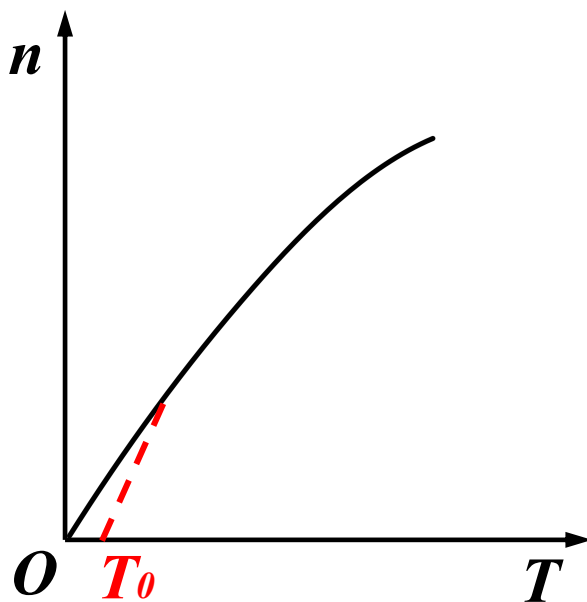


位能转矩

2.3 离心式通风型机械特性

- **离心式通风型负载**：按离心力原理工作，如离心式鼓风机、水泵等
- **负载转矩 T_L 与 n 的二次方成正比，即：**

$$T_L = Cn^2 \quad C \text{为常数}$$



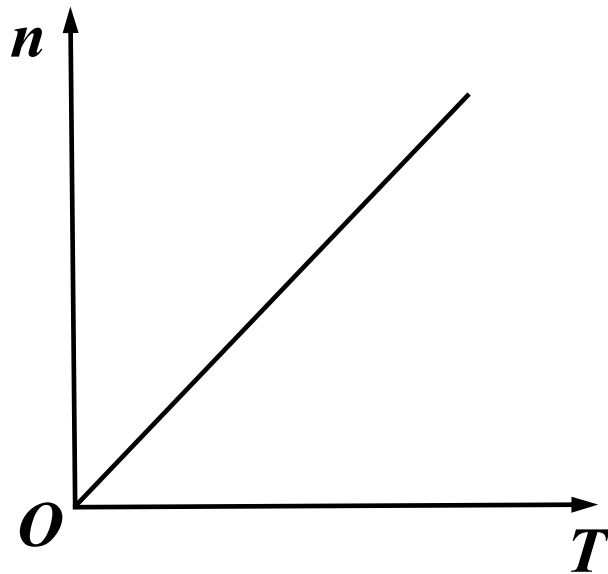
$$T_L = T_0 + Cn^2$$

T_0 摩擦转矩

2.3 直线型机械特性

➤ **直线型负载**：直线型负载的负载转矩随 n 的增加而成正比地增大

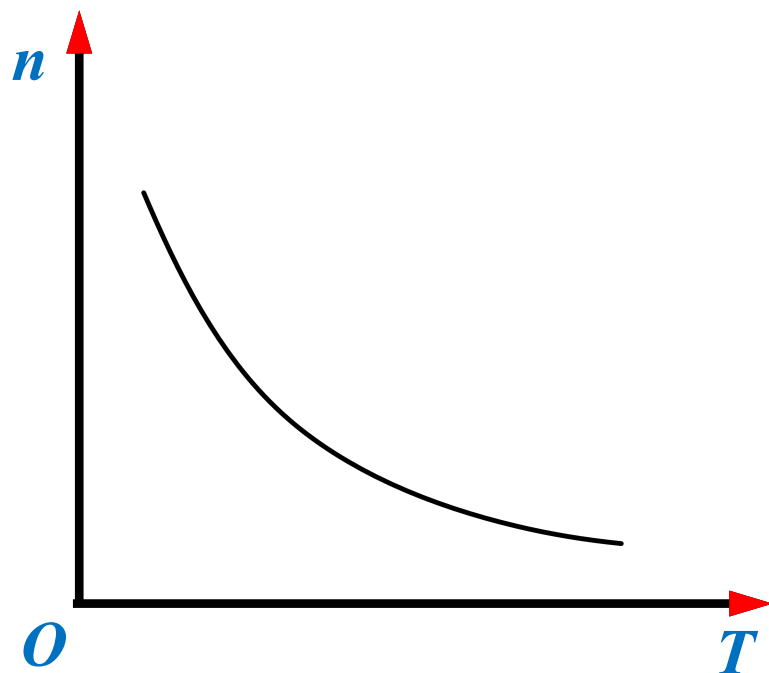
$$T_L = Cn \quad C \text{为常数}$$



他励直流电动机，当励磁电流和电枢电阻固定不变时，电磁转矩与转速成正比

2.3 恒功率型机械特性

- 恒功率型负载的负载转矩与转速 n 成反比



恒功率型机械特性

$$T_L = K / n$$

$$\text{或 } K = T_L n \propto P \text{ (} P \text{为常数)}$$

车床加工：

粗加工时，切削量大，走低速；

精加工时，切削量小，走高速。

在不同的转速下保持切削功率基本不变。

2.4 机电系统稳定运行条件



2.4 机电系统稳定运行的含义

□ 机电传动系统中，电动机与生产机械连成一体，为了使系统运行合理，就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合

特性配合好的最基本要求是系统能稳定运行

□ 机电系统稳定运行的含义：

- 系统应能一定速度匀速运行；
- 系统受某种外部干扰（如电压波动、负载转矩波动等）使运行速度发生变化时，应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

2.4 机电系统稳定运行的条件

➤ 系统具有平衡状态（稳定运行的必要条件）：

电动机的机械特性曲线 $n=f(T_M)$ 和机械负载的负载特性曲线 $n=f(T_L)$ 有交点（即拖动系统的**平衡点**）

➤ 系统受到扰动后，具有恢复到原平衡状态的能力（稳定运行的充分条件）：

- 转速大于平衡点所对应的转速时 $T_M < T_L$ ，。即若干扰使转速上升，当干扰消除后应有 $T_M - T_L < 0$ ；
- 转速小于平衡点所对应的转速时， $T_M > T_L$ 。即若干扰使转速下降，当干扰消除后应有 $T_M - T_L > 0$ 。

2.4 机电系统稳定运行的条件

□ 分析举例: a、b两点是否为稳定平衡点？

➤ **a点:**

$$T_M - T_L = 0$$

当对于恒转矩性负载突然增加后：

$$T_M - T'_L < 0 \rightarrow T'_M - T'_L = 0 \text{ (减速, 电动机转矩增加)}$$

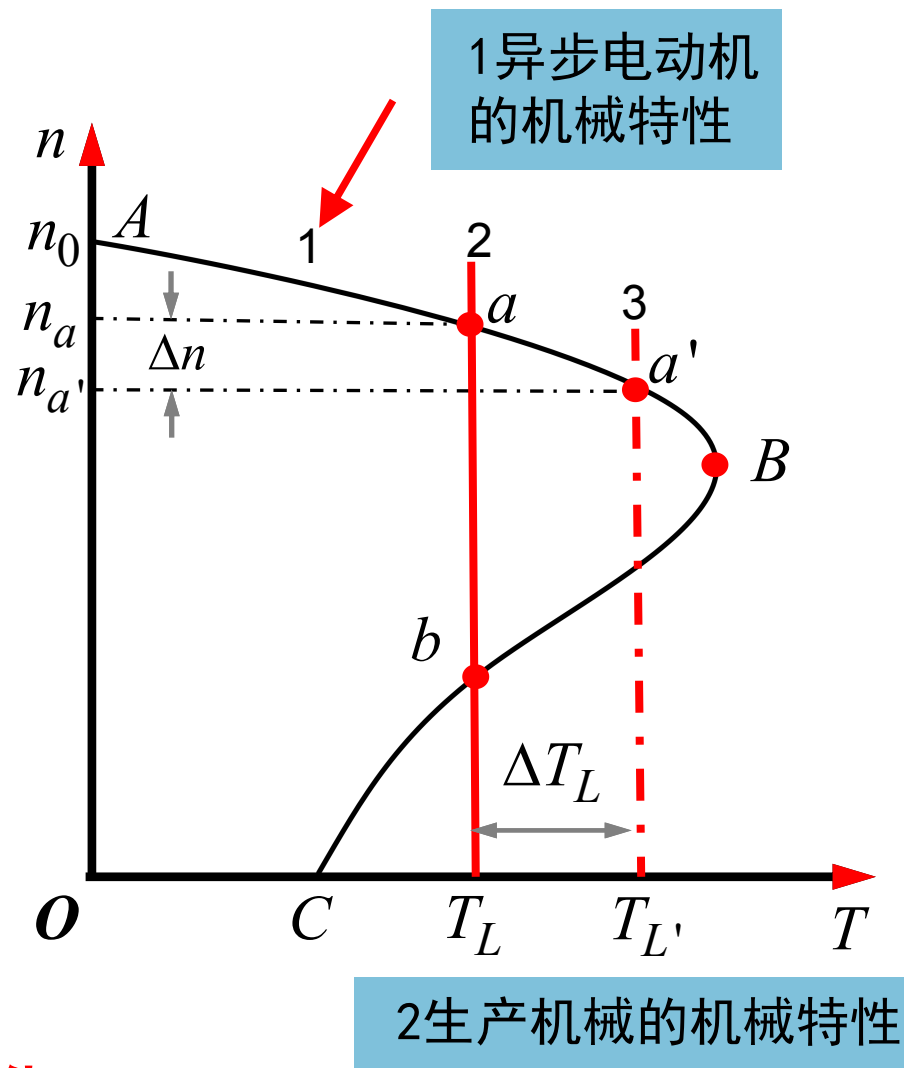
当负载波动消除后：

$$T'_M - T_L > 0 \rightarrow T_M - T_L = 0 \text{ (加速, 电动机转矩减小)}$$

故a点为系统的稳定平衡点。

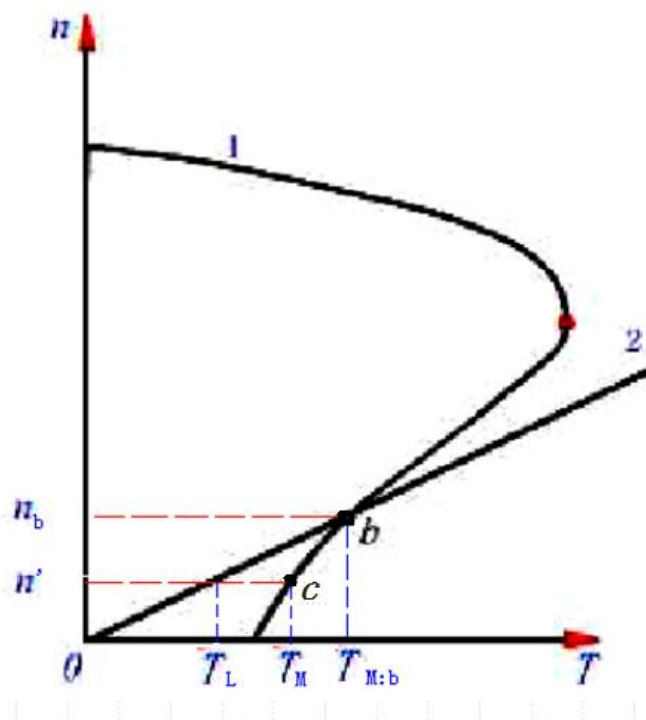
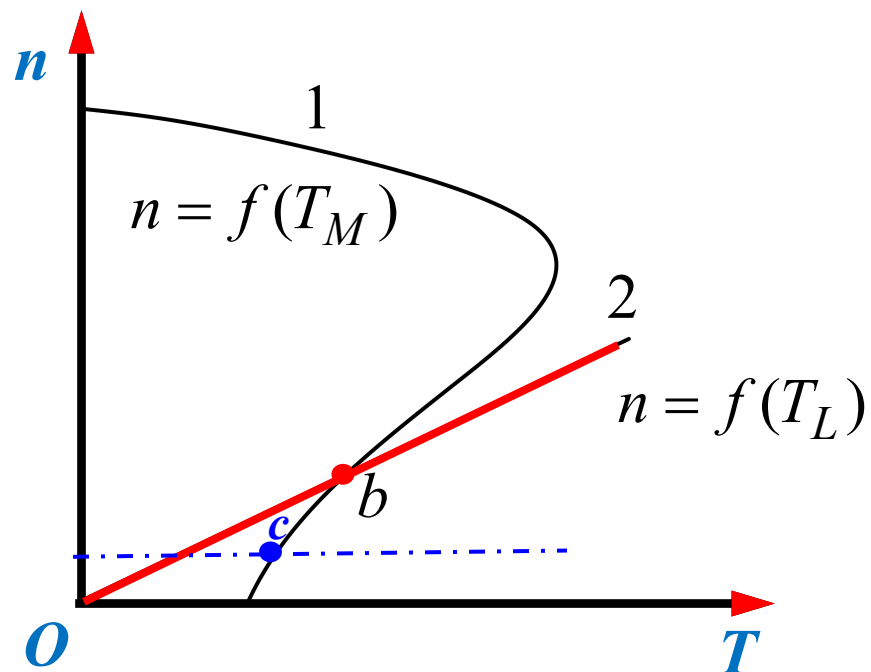
➤ 同理分析一下b点不是稳定平衡点呢？

➤ 对于不同性质的负载b点的性质有什么变化？



2.4 机电系统稳定运行的条件

- **示例一**：曲线1为异步电动机的机械特性，曲线2为异步电动机拖动的生产机械的机械特性-**线性负载**。两曲线有交点b，即拖动系统有一个平衡点。



分析：

干扰使 $n \downarrow \rightarrow n' \rightarrow$

$T_{M:n'} > T_{L:n'} \rightarrow$

使得电机加速，转速 n 上升；

反之亦然。

b点符合稳定运行的条件，因此b点为是稳定平衡点。此系统能在b点稳定运行。

2.4 机电系统稳定运行的条件

简单稳定性判断方法：

对于恒转矩负载，电动机 n 增加时，必须有向下倾斜的机械特性曲线系统才能稳定运行，若特性曲线向上翘，便不能稳定运行。

$$\frac{dT_M}{dn} > \frac{dT_L}{dn}$$

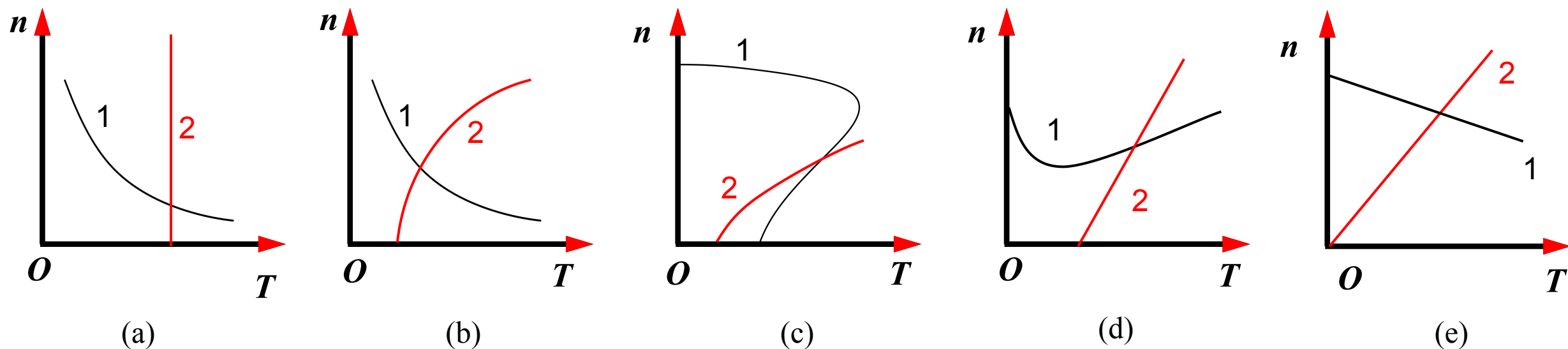
不稳定平衡点

$$\frac{dT_M}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

稳定平衡点

2.4 机电系统稳定运行的条件

示例二：如图(a)-(e)中，曲线1和曲线2分别为电动机的机械特性和电动机所拖动的机械负载的负载特性，曲线1与曲线2交于一点。试判断这些交点中哪些是系统的稳定平衡点。



平衡判断条件：当转速大于平衡点的转速 ($n' > n$) 时，需要满足 $T_M' < T_L$ ，则系统可以稳定运行。

↓
稳定运行

↓
稳定运行

↓
稳定运行

↓
不能稳定运行

↓
稳定运行

2.5 过渡过程与机电时间常数 (自学)



2.5 过渡过程

□ **过渡过程**：当系统中电动机的转矩或负载转矩发生变化时，系统需要由一个稳态变化到另一个稳态，这个变化过程称为过渡过程

（过渡过程中，转速、转矩为与时间有关的函数）

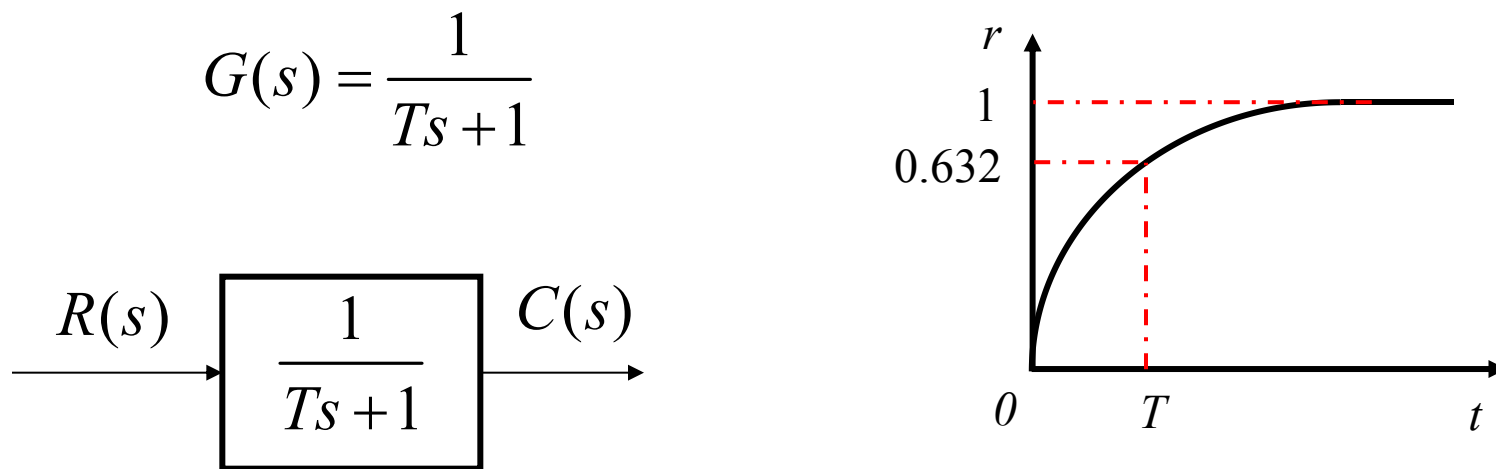
（启动、制动过程平滑；运行加速度不能过大；提升运行效率等）

□ **产生原因**

- **机械惯性**：反映在转动惯量上，使转速不能突变
- **电磁惯性**：反映在电动机绕组的电感上，使电流和励磁磁通不能突变
- **热惯性**：反映在温度上，使温度不能突变

2.5 机电时间常数

- **机电时间常数**：转速达到稳态值 63.2% 所经历的时间
- **国标定义**：电机在空载和额定励磁条件下，加以阶跃响应的额定控制电压，转速从零上升到空载转速的 63.2% 所需时间



- **过渡时间与系统的转动惯量和速度改变量成正比，与动态转矩成反比**
- **加快时间常数的方法：减少系统的转动惯量；增加动态转矩**