



大学课程学习与考研
全程辅导系列丛书

名师教案
名师课堂
名师课堂
名师课堂

名师 大课堂

自动控制原理

梅晓榕 主 编

柏桂珍 王述一 副主编



科学出版社
www.sciencep.com

大学课程学习与考研全程辅导系列丛书

自动控制原理名师大课堂

梅晓榕 主编

柏桂珍 王述一 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是高等院校“自动控制原理”课程的例题和习题集,包括现在通行的“自动控制原理”课程的基本内容。全书分为9章。每一章都列出该章整体的知识结构框图,并简明扼要地列出重点与难点。全书有例题60多道,习题220多道。所选习题难度适中,全部例题都有较详细的解答。

本书主要供自动化专业及相关专业的本科生正常上课时同步学习和期末考试复习使用,也可作为研究生入学考试复习用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理名师大课堂/梅晓榕主编. —北京:科学出版社,2006
(大学课程学习与考研全程辅导系列丛书)

ISBN 7-03-016801-1

I. 自… II. 梅… III. 自动控制理论-高等学校-教学参考资料
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 004757 号

责任编辑:资丽芳 段博原 于宏丽/责任校对:赵桂芬

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年5月第一次印刷 印张:10 3/4

印数:1—4 000 字数:233 000

定价:18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《大学课程学习与考研全程辅导系列丛书》编委会

编委(按姓氏笔画排列):

于 枫 (吉林大学)

于洪珍 (中国矿业大学)

孙立山 (哈尔滨工业大学)

陈乔夫 (华中科技大学)

胡华强 (科学出版社)

徐家恺 (南京大学)

唐竞新 (清华大学)

梅晓榕 (哈尔滨工业大学)

程 靳 (哈尔滨工业大学)

焦其祥 (北京邮电大学)

责任编辑:

资丽芳 (科学出版社)

《大学课程学习与考研全程辅导系列丛书》出版说明

2006 年教育部公布的最新数字显示：目前全国拥有普通高等学校 1550 余所；全国各级各类高等院校在校生总数超过 2000 万；高等教育已基本实现了由精英化向大众化的转变。

高等院校扩大招生，一方面极大地满足了我国社会主义建设对高素质人才的迫切需求，为当代青年的成才和发展提供了更高更好的平台；另一方面，其造成的最直接的矛盾就是招生与就业的矛盾。如何提高学习效果、培养科学的思维方法和解题能力、增强自身就业竞争力是广大学子面临的最为迫切的问题。为此，我们在北京地区的高校中进行了大量设计严密的，包括对教师、学生、课程、教材等各方面信息的调研，结果发现：名师的指点和加强自修练习成为解决上述问题最重要的选项。

基于上述原因，我们组织策划了本套丛书，同时面向全国重点高校遴选并约请长期在教学第一线的优秀教师，尤其是国家级教学名师和省级教学名师，来参与本套丛书的编写工作。一方面希望能使广大学子们受益于这些名师丰富的教学经验并掌握学习技巧，同时也给在教学第一线工作的青年教师们以示范和启发。本套丛书将针对大学本科课程的学习与考研对学生进行全面辅导，考虑到学生在学习的不同阶段、不同层次的不同需要，该套丛书将分成如下两个系列：

第一层次：“名师大课堂”系列——辅助课程学习，应对各种考试。

第二层次：“考研大串讲”系列——针对考研复习，帮助考生备考。

本套丛书的编写主要具有以下特点：

【定位明确，针对性强】本丛书针对不同的读者定位对课程学习的全程进行了科学的安排，分为课程学习和考研辅导两个层次。课程学习的指导部分重在帮助学生掌握知识要点，增强分析问题及解决问题的能力；考研辅导部分重在帮助参加研究生入学考试的学生掌握课程考点，迅速提高应试能力。

【名师开讲，经验丰富】本丛书充分挖掘优秀的教师资源，从全国各重点高校中约请经验丰富的任课教师参加编写，从基本知识点到重点、难点进行全程讲解，对学生容易出错的地方进行分析，指导效果显著。

【源于基础，构建网络】本丛书在深入挖掘学科知识点的基础上，梳理各部分知识间的内在联系，把零散、孤立的知识交汇，编制成具有系统性、条理性的网络结构，使学生能够在解决问题时迅速地检索、提取和应用。

【全程优化，科学设计】本丛书根据学生学习的特点和要求，设计了不同的单元和模块，从知识点的归纳到理解再到运用，层层加深学生理解的程度，最终使学生能够达到熟练掌握所学知识并能灵活应用的目的。

【循序渐进，逐级提升】本丛书遵循由浅入深、由易到难、由简到繁的原则，例题和习题都设置了科学、合理的梯度与坡度，能够兼顾不同层次和水平的学生，使之成为

学生们十分有用而必备的学习工具。

我们相信，本套丛书的出版一定能够为提高我国高等教育的教学质量做出应有的贡献。

科学出版社高等教育分社

2006 年 5 月

前 言

本书是“自动控制原理”课程的例题和习题集，包括现在通行的“自动控制原理”课程的基本内容。主要供学生正常上课时同步学习和期末考试复习使用，也可作为研究生入学考试复习用书。全书有例题 60 多道，习题 220 多道，全部例题都有较详细的解答。希望读者通过对例题的阅读理解和对习题的练习，深刻领会自动控制的基本概念、原理和方法，从而真正掌握这门课程的知识。

全书分为 9 章。每一章首先列出本章整体的知识结构框图，然后简明扼要地列出重点与难点，接着是典型例题精解，最后是习题精选。附录 A 为模拟试卷，主要选自哈尔滨工业大学期末试题，附录 B 为习题精选参考答案，附录 C 是模拟试卷参考答案。

本书由哈尔滨工业大学控制科学与工程系梅晓榕教授任主编，柏桂珍、王述一任副主编。参加编写工作的还有李醇铎、王坚、岳海峰等。

书中不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 12 月

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 名师辅导	1
1.1.1 知识结构框图	1
1.1.2 重点	1
1.1.3 难点	2
1.2 名师课堂	2
1.2.1 典型例题精解	2
1.2.2 习题精选	3
第 2 章 系统的数学模型	5
2.1 名师辅导	5
2.1.1 知识结构框图	5
2.1.2 重点	5
2.1.3 难点	6
2.2 名师课堂	6
2.2.1 典型例题精解	6
2.2.2 习题精选	10
第 3 章 线性系统的时域分析	17
3.1 名师辅导	17
3.1.1 知识结构框图	17
3.1.2 重点	17
3.1.3 难点	19
3.2 名师课堂	19
3.2.1 典型例题精解	19
3.2.2 习题精选	22
第 4 章 根轨迹法	30
4.1 名师辅导	30
4.1.1 知识结构框图	30
4.1.2 重点	30
4.1.3 难点	32
4.2 名师课堂	33
4.2.1 典型例题精解	33
4.2.2 习题精选	37
第 5 章 频域分析法	39
5.1 名师辅导	39

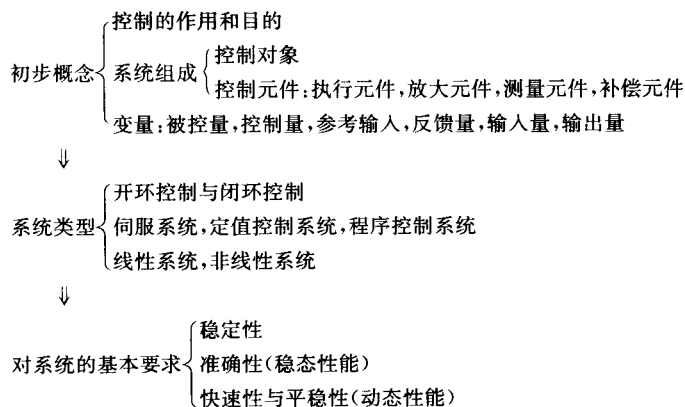
5.1.1	知识结构框图	39
5.1.2	重点	39
5.1.3	难点	40
5.2	名师课堂	40
5.2.1	典型例题精解	40
5.2.2	习题精选	46
第6章	控制系统设计	51
6.1	名师辅导	51
6.1.1	知识结构框图	51
6.1.2	重点	51
6.1.3	难点	52
6.2	名师课堂	52
6.2.1	典型例题精解	52
6.2.2	习题精选	58
第7章	非线性系统分析	63
7.1	名师辅导	63
7.1.1	知识结构框图	63
7.1.2	重点	63
7.1.3	难点	63
7.2	名师课堂	64
7.2.1	典型例题精解	64
7.2.2	习题精选	72
第8章	线性离散系统	76
8.1	名师辅导	76
8.1.1	知识结构框图	76
8.1.2	重点	76
8.1.3	难点	77
8.2	名师课堂	77
8.2.1	典型例题精解	77
8.2.2	习题精选	81
第9章	状态空间法	85
9.1	名师辅导	85
9.1.1	知识结构框图	85
9.1.2	重点	86
9.1.3	难点	86
9.2	名师课堂	87
9.2.1	典型例题精解	87
9.2.2	习题精选	94

参考文献.....	100
附录 A 模拟试卷.....	101
附录 B 习题精选参考答案.....	112
附录 C 模拟试卷参考答案.....	151

第 1 章 自动控制的基本概念

1.1 名师辅导

1.1.1 知识结构框图



1.1.2 重点

1. 闭环(反馈)系统的特征

采用负反馈,被控量对控制量有直接作用,即被控量对自己有控制作用。

2. 闭环控制系统的典型功能框图(图 1-1)

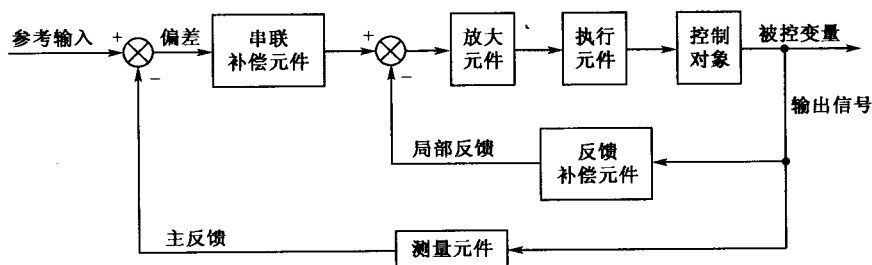


图 1-1 闭环系统的功能框图

3. 对控制系统的基本要求

稳定性、准确性、快速性与平稳性。

1.1.3 难点

由系统的物理结构图或原理示意图绘出系统元件框图。

1.2 名师课堂

1.2.1 典型例题精解

图 1-2 为导弹发射架自动定位系统。SM 为直流伺服电动机, TG 为直流测速发电机。简述工作原理, 指出控制对象、执行元件、测量元件和反馈补偿元件, 指出参考输入和被控变量。并绘出系统元件框图。

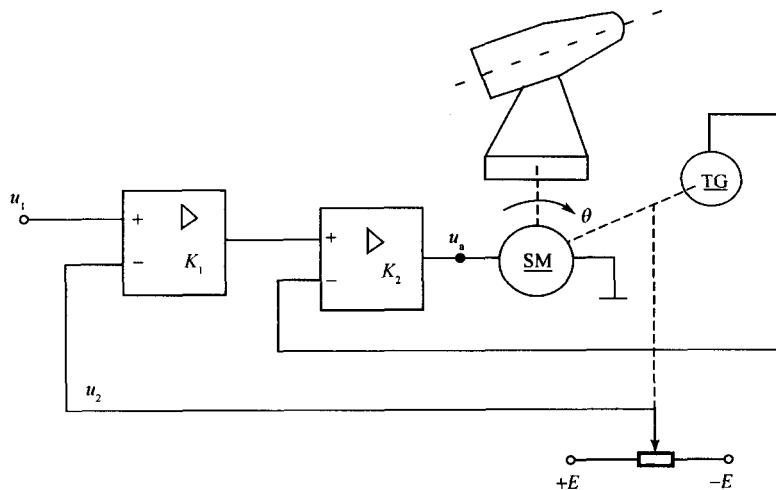


图 1-2 导弹发射架自动定位系统

名师提示 绘元件框图时要参考图 1-1 的系统功能框图。

解 系统的目的是使发射架转到希望的角度。电压 u_1 代表希望的角度, 电位器输出电压 u_2 表示发射架的实际转角。它们的差值称为偏差电压, 放大后加到电机电枢绕组上成为电压 u_a , 使电机转动, 使偏差角减小至零。

控制对象是导弹发射架, 执行元件是伺服电动机, 主要测量元件是电位器, 反馈补偿元件是测速机。参考输入量是电压 u_1 , 被控变量是发射架转角 θ 。系统元件框图见图 1-3。

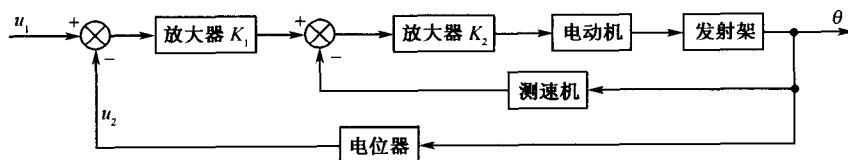


图 1-3 导弹发射架系统元件框图

1.2.2 习题精选

1. 电冰箱制冷系统工作原理如图 1-4 所示。继电器的输出电压就是加在压缩机上的电压。简述工作原理,指出控制对象、执行元件、测量元件、被控变量、参考输入,绘出系统元件框图。

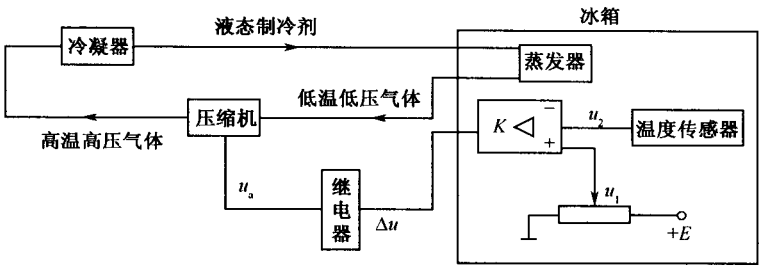


图 1-4 电冰箱制冷系统原理图

2. 图 1-5 为两个水位控制系统。SM 是直流伺服电动机。指出控制对象、控制元件、被控变量、扰动量和参考输入,绘出系统元件框图。产生恒值扰动后哪一个系统必然存在误差? 为什么?

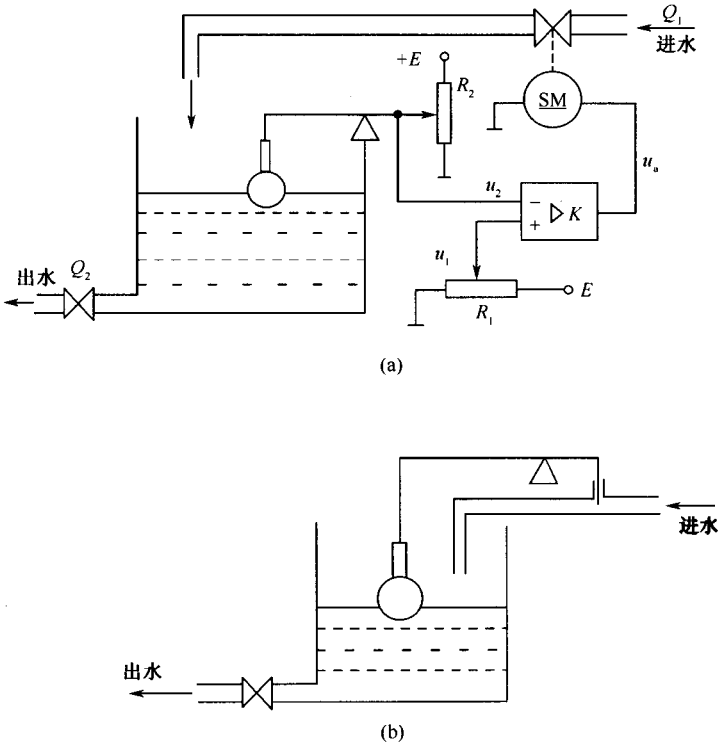


图 1-5 水位控制系统

3. 图 1-6 表示一个机床控制系统,用来控制切削刀具的位移 x 。说明它属于什么类型的控制系统,指出它的控制器、执行元件和被控变量。

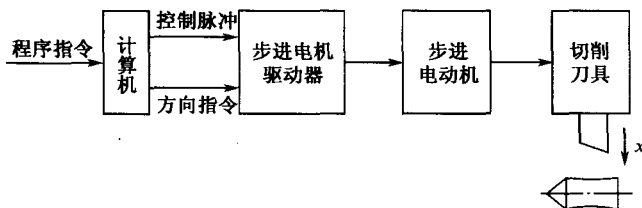


图 1-6 机床控制系统

4. 判定下列方程描述的系统是线性定常系统、线性时变系统还是非线性系统。式中 $r(t)$ 是输入量, $c(t)$ 是输出量。

$$(1) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_0^t r(\tau) d\tau;$$

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

$$(3) c(t) = [r(t)]^2;$$

$$(4) c(t) = 5 + r(t) \cos \omega t;$$

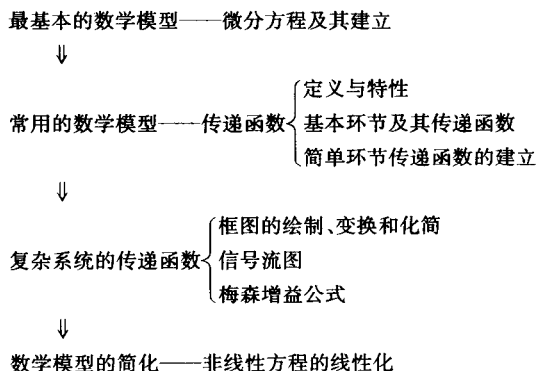
$$(5) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t);$$

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

第 2 章 系统的数学模型

2.1 名师辅导

2.1.1 知识结构框图



2.1.2 重点

1. 建立系统的微分方程

微分方程是系统最基本的数学模型,建立系统微分方程的步骤如下:

- (1)明确输入量和输出量。
- (2)列出原始方程组。对复杂系统可设中间变量,方程个数应比中间变量多 1。
- (3)消去中间变量,使方程只含输入量、输出量及其导数。

2. 绘制系统的动态结构框图或信号流图并求传递函数

在零初始条件下对常系数线性微分方程取拉普拉斯变换就可求得传递函数。对复杂的系统,先利用拉普拉斯变换将系统的微分方程组变成 s 的代数方程组。然后,用代数方法消去中间变量,或者绘出动态结构框图或信号流图,再求传递函数。

3. 动态结构框图的变换与化简

- (1)等效原则:变换前后该环节的输入量、输出量及相互关系不变。
- (2)主要方法:将串联环节、并联环节和基本反馈环节用一个等效环节代替。
- (3)关键:解除交叉结构,即移动分支点或相加点,使被简化的环节内部不存在与外部直接相连的分支点和相加点。
- (4)注意:互换分支点和相加点的位置时容易出错,需小心。

4. 利用梅森公式求传递函数

输出和输入之间的传递函数 $\Phi(s)$ 可用下述梅森公式计算

$$\Phi(s) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (2-1)$$

式中 n ——从输入到输出的前向通路的总数;

P_k ——从输入到输出的第 k 条前向通路上各传递函数(包括相加点前的符号)之积;

Δ ——特征式, $\Delta = 1 - \sum L_i + \sum L_i L_j - \sum L_i L_j L_k + \dots$ 其中 L_i 是所有各回路“回路传递函数”之和; $\sum L_i L_j$ 是所有两两互不接触的回路, 其“回路传递函数”乘积之和; $\sum L_i L_j L_k$ 是所有的 3 个互不接触的回路, 其“回路传递函数乘积之和”……上述传递函数包括相加点处的符号。

Δ_k ——余因子式, 在 Δ 中, 将与第 k 条前向通路相接触的回路所在项除去后余下的部分。

梅森公式中的输入量只能是不受系统中其他变量影响的变量。

2.1.3 难点

1. 求复杂系统的微分方程

力学系统要用牛顿第二定律, 电子电路要用节点电流定律和回路电压定律。电子电路常用运算阻抗的方法。

2. 非线性函数线性化

非线性函数 $y = y(x_1, x_2)$ 对应的线性化函数为

$$y = y(x_1, x_2) = \left. \frac{\partial y}{\partial x_1} \right|_{y_0} x_1 + \left. \frac{\partial y}{\partial x_2} \right|_{y_0} x_2 + A \quad (2-2)$$

令式(2-2)中自变量 x_1, x_2 为工作点 y_0 处的值, 就可求得常数 A 。

2.2 名师课堂

2.2.1 典型例题精解

1. 图 2-1 中, m 是质量, k 是弹簧弹性系数, b 是黏性阻尼系数, $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 是位移, $f(t)$ 是外力。以 $f(t)$ 为输入量, 以 $x_1(t)$ 为输出量, 写出系统的微分方程和传递函数。

名师提示 对两个质量块分别应用牛顿第二定律, 消去中间变量。对微分方程组, 解消中间变量时, 可用拉普拉斯变换变成代数方程后再消中间变量。

解

$$(a) \quad \begin{cases} f(t) - kx_1 - k(x_1 - x_2) = m\ddot{x}_1 \\ k(x_1 - x_2) - b\dot{x}_2 = m\ddot{x}_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$(2)$$

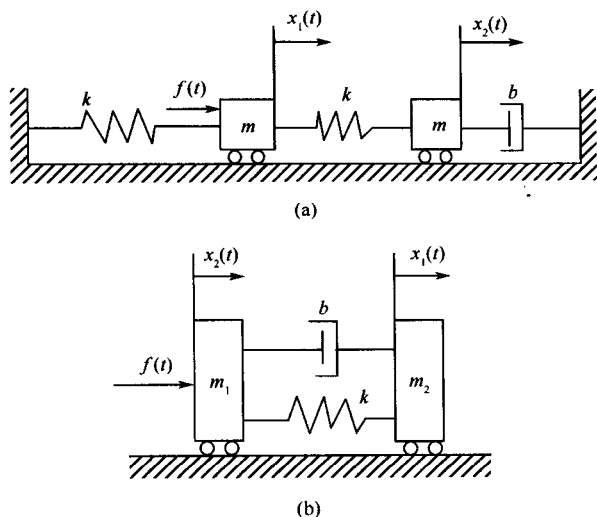


图 2-1 弹簧-质量块

式(1)

$$\Rightarrow kx_2 = m\ddot{x}_1 + 2kx_1 - f(t) \Rightarrow x_2 = \frac{m}{k}\ddot{x}_1 + 2x_1 - \frac{1}{k}f(t) \quad (3)$$

式(3)代入式(2)得

$$k\left[x_1 - \frac{m}{k}\ddot{x}_1 - 2x_1 + \frac{1}{k}f(t)\right] - b\left[\frac{m}{k}\ddot{x}_1 + 2\dot{x}_1 - \frac{1}{k}\dot{f}(t)\right] = m\left[\frac{m}{k}\ddot{x}_1 + 2\ddot{x}_1 - \frac{1}{k}\ddot{f}(t)\right]$$

$$\Rightarrow \frac{m^2}{k}\ddot{x}_1^{(4)} + \frac{bm}{k}\ddot{x}_1^{(3)} + 3m\ddot{x}_1 + 2b\dot{x}_1 + kx_1 = \frac{m}{k}\ddot{f}(t) + \frac{b}{k}\dot{f}(t) + f(t)$$

取拉普拉斯变换得

$$\left(\frac{m^2}{k}s^4 + \frac{bm}{k}s^3 + 3ms^2 + 2bs + k\right)X_1(s) = \left(\frac{m}{k}s^2 + \frac{b}{k}s + 1\right)F(s)$$

$$\frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{\frac{m}{k}s^2 + \frac{b}{k}s + 1}{\frac{m^2}{k}s^4 + \frac{bm}{k}s^3 + 3ms^2 + 2bs + k}$$

名师提示 本题的另一种解法是,先对微分方程取拉普拉斯变换,再用矩阵方法解方程

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + kx_1 + k(x_1 - x_2) = f(t) \\ m\ddot{x}_2 + k(x_2 - x_1) + b\dot{x}_2 = 0 \end{cases}$$

取拉普拉斯变换得

$$\begin{cases} (ms^2 + 2k)X_1(s) - kX_2(s) = F(s) \\ -kX_1(s) + (ms^2 + bs + k)X_2(s) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} ms^2 + 2k & -k \\ -k & ms^2 + bs + k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) \\ 0 \end{bmatrix}$$