

结构动力和抗震分析 方法及程序

Mario Paz 著

高小旺 苏经宇 谭健 樊水荣 编译

周锡元 审校

海洋出版社

1990年·北京

程序包中的每个程序分别在各章介绍。另外，每章都包括有关理论的简要说明，接下来是运用这些程序进行求解的实例。在所选的例子中，也有一些问题没有使用计算求解，而只是为了展示方程式和理论的应用。

作者希望这本书能引起有实际经验的工程师和学生获得运用微机程序快速解答结构动力学问题的兴趣。这本书对有兴趣从实用的观点学习结构动力学的读者来讲也将是非常有用的。在写这本书和编制计算机程序中，作者得到了出版公司（Van Nostrand Reinhold Company Inc）的许可，随意地运用了他以前出版的教科书——“结构动力学：理论和计算”一书中的资料。

Mario Paz

內容提要

本书是一本微机辅助的结构动力学教科书、学习参考书和实用手册。书中简要地介绍了结构动力抗震分析中各种常用的计算机分析方法,内容包括单自由度和多自由度结构在脉冲、简谐和任意动荷载作用下的弹性反应、频域和时域分析计算方法,单自由度体系的弹性和弹塑性反应分析和地震反应谱计算方法等;包括结构模型化为剪切型房屋、梁、平面框架、井字梁、平面桁架、空间框架、空间桁架的计算程序;包括多自由度体系的自振频率(周期)和振型的求解,用振型迭加法和逐步积分法计算多自由度体系的反应和用结构动力凝聚方法进行简化分析的程序,以及结构内力的分析程序。全书提供了20个BASIC程序,组成了一个实用的结构动力抗震计算软件包,本书列出全部的源程序清单,可在IBM—PC或其它兼容微机上运行。

本书不仅是学习如何用微机快速解答结构动力反应和抗震计算的实用工具,而且对学习和提高编程技巧也将有很大帮助。是结构、船舶、航空等专业的大学、研究生、工程技术人员和科研工作者的理想参考书。

结构动力和抗震分析方法及程序

Mario Paz著

高小旺 苏经宇 谭 健 樊水荣 编译

特约编辑 卢振恒

责任编辑 王加林

海洋出版社出版发行

海洋出版社印刷厂印刷

850×1168毫米大32开本 印张,10.3 字数,240千字

1990年4月第一版 1990年4月第1次印刷

印数:1—2000册 定价:4.60元

ISBN7-5027-0816-4/P·84

入及输出都是以人机对话方式进行的，这样做不仅方便了用户，同时也减少了出错的可能性。作为结构动力计算的实用软件包，书中的安排非常灵活和紧凑。书中提供的20个计算程序也都各有特点，在程序设计方面反映出了较高的技巧。为了便于读者使用这些程序，我们在编译过程中已进行了反复的调试，增补了原书和程序中的疏漏，使之能在国内常用的IBM-PC机与其它兼容机上运行。为了便于读者阅读、使用和修改补充书中提供的程序，我们已将全部源程序清单列在本书的附录2中，希望它们能对愿意学习和研究结构动力学计算机程序编制技巧的读者有所裨益。需要指出的是附录2中的程序清单虽然经过了仔细的核对，个别错漏仍然是在所难免的，另外读者在将这些程序输入计算机时也难免不会出错。因此，为便于读者使用这些程序，我们已将调试通过的程序录成磁盘，如有需要请与我们联系。

为了便于学习和应用，书中还给出了大量的例题，并列出了输入数据和数字计算结果。这些例题对读者熟练地掌握软件包的使用方法和加深对结构动力分析方法的理解无疑是很有意义的，但是由于占用的篇幅太大，我们只能忍痛割爱了，为了弥补这一不足，我们将大量的例题数据录制在一个专门的磁盘上，供读者作为练习用。例题数据磁盘可与程序盘一起提供给读者。

编译者的话

本书是一本在微机上学习结构动力学的教科书。书中对结构动力学原理和方法的讲解深入浅出，简明扼要，易于理解。书中提供的计算机程序概括了结构动力学中最常用的计算方法，通用性很强，适用于许多领域。读者在学习过程中可以结合自己在科研、设计和教学实践中遇到的实际问题进行上机实习，使学和用巧妙地结合起来，以达到事半功倍的效果。本书对愿意学习和需要应用结构动力学方法解决实际问题，但又没有很多时间学习和进行分析计算的工程技术人员和大专院校师生来讲无疑是一本很好的学习参考书和使用手册。

书中介绍的结构动力学的基本原理和常用的计算机分析方法包括单自由度和多自由度结构在脉冲、简谐和任意动荷载作用下的弹性反应的频域和时域分析方法，弹性和弹塑性反应谱分析方法等。结构类型包括剪切型房屋，梁、平面框架，井字梁，平面桁架，空间桁架和空间框架等。书中应用有限元方法集成刚度矩阵和进行内力分析，用迭代法和雅可比方法解算自振频率和振型，用振型分析法和步步积分法计算在脉冲、简谐和任意动荷载和支座运动下的反应。全书还提供了一个由20个BASIC程序组成的实用结构动力学计算软件包。

整个软件包是通过“主菜单”用人机对话的方式加以管理的。根据使用者的需求，可从“主菜单”上引出简单振子、结构模型化，库程序和求解结构模型等四个分菜单，在主菜单和分菜单之间可以随意进出，从而为求解各种实际问题提供了方便。程序的调用和数据输

序

这本教学和自学参考书提供了结构动力学方面的许多计算机程序和大量的求解实例，充分体现了现代分析方法和计算机程序编制技巧的结合。书中各章节介绍了20个程序及其在解答结构动力问题方面的应用。这些计算机程序录制在一个软盘上，可以人机对话方式在微机上加以应用。书中提供的程序是用 BASIC 语言编写的，可不加修改地在具有高级 BASIC 语言(BASICA)的 IBM-PC 机及兼容机上运行，对于其他微机只要稍加修改也能应用。

这本书由三部分共20章组成。第一部分共包括5个计算机程序，适用于能简化为单自由度体系（单质点振动物）的结构动力分析。这组程序不但包括在时域内的直接求解，而且也包括运用快速富里叶变换在频域内求解，同时还包括计算对特殊脉冲激励函数的动力反应，以便用于求解非线性反应和地震反应谱。第二部分包括结构模型化为剪切型结构、梁、平面框架、井字梁、空间框架、平面桁架、空间桁架的7个计算机程序。最后，在第三部分中汇集了对由第二部分程序模型化为多自由度结构进行分析和设计的所有计算机程序。第三部分的程序包括将动力学问题按照静力或动力缩聚方法进行简化和计算简化以后的多自由度体系的自振频率和振型。这一部分的其他程序还可应用振型迭加法或由逐步积分法计算动力系统的反应。另外还辟有专门一章考虑在简谐激励下的结构动力分析。

书中的程序是用人机对话的方式通过显示“菜单”（可供选择的清单）来适应各种各样的目的和要求。程序1“主程序”（“MASTER”）可对程序包中的任何程序自动地进行联系。

目 录

第一部分 可简化为单自由度体系的

简单结构的计算程序

第一章	结构动力学微机辅助技术 导 论	(1)
1.1	程序1“主程序”(“MASTER”)	(1)
1.2	数学模型	(2)
1.3	运动方程	(2)
1.4	自由度	(4)
1.5	隔离体图	(5)
1.6	支座运动	(6)
1.7	运动微分方程的解	(7)
1.8	频率和周期	(9)
第二章	动力反应的直接积分法	(10)
2.1	运动方程的解	(10)
2.2	程序2“DIRECT”——直接积分法计算反应	(13)
2.3	算例	(16)
第三章	对脉冲干扰的 反 应	(25)
3.1	脉冲反应的确定	(25)
3.2	程序3“IMPULSE”——对脉冲干扰的反应	(25)
3.3	算例	(30)
第四章	弹塑性反应计 算	(41)
4.1	弹塑性特征	(42)
4.2	线性加速度逐步积分法	(44)
4.3	逐步积分方法的计算步骤	(45)
4.4	程序4“PLASTIC”——弹塑性反应计算	(46)
4.5	算例	(48)
第五章	动力反应的频域计算方法	(59)

5.1	富里叶级数.....	(59)
5.2	离散富里叶变换.....	(60)
5.3	对简谐干扰的反应.....	(61)
5.4	快速富里叶变换.....	(62)
5.5	程序5 “FREQUENCY” ——频域反应计算.....	(62)
5.6	算例.....	(65)
第六章	地震反应谱的 计 算.....	(74)
6.1	三联反应谱.....	(74)
6.2	弹铰设计反应谱.....	(77)
6.3	程序6 “SPECTRA” ——反应谱计算	(78)
6.4	算例.....	(81)

第二部分 把结构简化为多自由度 体系的程序

引言	(87)
第七章 剪切型房屋	(89)
7.1 强迫振动的运动方程.....	(89)
7.2 基础激振的运动方程.....	(91)
7.3 程序7 “SHEAR BUILDING” ——把结构模型化为 剪切型房屋.....	(92)
7.4 算例.....	(94)
第八章 梁	(97)
8.1 单元模型坐标.....	(97)
8.2 单元刚度和质量矩阵.....	(97)
8.3 程序8 “BEAM” ——把结构模型化为梁.....	(99)
8.4 算例.....	(99)
第九章 平面 框 架.....	(103)
9.1 单元节点坐标.....	(103)
9.2 单元刚度和质量矩阵.....	(103)
9.3 矩阵变换.....	(104)
9.4 程序9 “PLANE FRAME” ——把结构模型化为平面	

框架.....	(106)
9.5 算例.....	(106)
第十章 井字梁	(109)
10.1 单元模型坐标.....	(109)
10.2 单元刚度和质量矩阵.....	(109)
10.3 转换矩阵.....	(110)
10.4 程序 10 “GRID FRAME” ——把结构模型化为井 字梁.....	(111)
10.5 算例.....	(111)
第十一章 空间框架	(117)
11.1 单元节点坐标.....	(117)
11.2 单元刚度和质量矩阵.....	(117)
11.3 转换矩阵.....	(120)
11.4 程序 11 “SPACE FRAME” ——把结构模型化为空间 框架.....	(121)
11.5 算例.....	(122)
第十二章 平面桁架	(127)
12.1 单元节点坐标.....	(127)
12.2 单元刚度和质量矩阵.....	(127)
12.3 转换矩阵.....	(128)
12.4 程序 12 “PLANE TRUSS” ——把结构模型化为平面 桁架.....	(129)
12.5 算例.....	(130)
第十三章 空间桁架	(132)
13.1 单元节点坐标.....	(132)
13.2 单元刚度和质量矩阵.....	(132)
13.3 转换矩阵.....	(134)
13.4 程序 13 “SPACE TRUSS” ——把结构模型化为空间 桁架.....	(134)
13.5 算例.....	(136)

第三部分 多自由度体系结构的程序

第十四章 自振频率和振型	(139)
14.1 多自由度体系的运动方程	(139)
14.2 主振型的正交性	(140)
14.3 程序14 “JACOBI” ——自振频率和振型	(141)
14.4 算例	(142)
第十五章 动力问题的缩聚	(149)
15.1 静力的缩聚	(149)
15.2 动力的缩聚	(151)
15.3 程序15 “CONDENSATION” ——动力问题的缩聚	(153)
15.4 算例	(154)
第十六章 振型迭加法	(162)
16.1 非耦联方程	(162)
16.2 程序16 “MODAL” ——振型迭加求反应	(164)
16.3 算例	(165)
第十七章 绝对和相对阻尼	(176)
17.1 程序17 “DAMPING” ——从振型阻尼比计算绝对 阻尼	(176)
17.2 算例	(178)
第十八章 用逐步积分法计算反应	(179)
18.1 Wilson- θ 法	(179)
18.2 程序18 “STEP INTEGRATION” ——用逐步积分 计算反应	(179)
18.3 算例	(181)
第十九章 对简谐激励的反应	(187)
19.1 运动方程式	(187)
19.2 程序19 “HARMO” ——简谐激励的反应	(187)
19.3 算例	(188)
第二十章 结构构件杆端力的计算	(194)
20.1 引言	(194)

20.2 程序20 “FORCE” ——结构构件杆端力.....	(194)
20.3 算例.....	(195)
附录1 计算机程序说明	(210)
附录2 计算机源程序清单	(212)

第一部分

可简化为单自由度体系的简单结构的计算程序

第一章 结构动力学微机辅助技术导论

1.1 程序1“主程序”(“MASTER”)

在这本书中,我们介绍了一组结构动力学程序,这些程序能够相互独立地执行。但有时常需要用这些程序中的两个或更多个来解答结构动力问题。程序1“主程序”包括根据用户要求使用任何程序必须的指令。这个程序是以用户从主程序菜单的以下方面中进行选择开始的。

主程序菜单

- 1.简单振子(单自由度体系)
- 2.结构模型化(梁、框架、桁架等)
- 3.库程序(频率、动力反应等)
- 4.多自由度结构的解答(反应等)
- 5.请求帮助
- 6.退出

用户选定以上方面之一后,计算机在屏幕上显示具有程序目录的新菜单,用户可按自己的需求选择指定的程序。在程序1“主程序”中可供使用的各个菜单框图示于图1.1。主程序菜单以简单

振子(SIMPLE OSCILLATOR)为标题的第一组程序包含了连同返回到主程序菜单方案在内的6种选择。这些程序专用于模型化为单自由度体系的结构。这组程序不但包括在时域内的直接解答,而且包括在频域内求解的程序。它还包括地震作用下的反应谱计算程序和一个分析弹塑性反应的程序。第二组程序的标题为结构模型化(MODELING STRUCTURES),它包括连同返回主程序菜单在内的8种选择。这组程序可用于计算结构模型化后的刚度和质量矩阵并将结果存在文件中。以库程序(LIBRARY PROGRAMS)开头的第三组程序的目的在于直接地和独立地调用和试验可用于结构计算的计算机程序。第四组是求解模型化结构的菜单(SOLUTION OF MODELED STRUCTURES),可直接应用多自由度体系的动力分析方法分析用第二组程序模型化以后的结构。这样的解答常常要求运用库程序组中的某些程序。总之,对模型化以后的结构进行求解,程序的调用与执行完全由主程序控制。运用这些程序的详细说明将在以后各章中给出。本章的其余部分用来介绍结构动力学的基本概念。

1.2 数学模型

结构动力学是关于遭受随时间变化的激励(力或运动)的结构分析与设计的研究领域。这样的研究由于运用数学模型而得到发展。实际结构体系和数学上的可能解答之间的联系是依靠数学模型建立起来的,这种数学模型是对物理问题作出各种假设和简化以后得到的理想体系的象征性或符号化代表。这里所说的简化关系到:①结构的几何形状,②结构的材料性质,③作用在结构上的激励随时间变化的函数。

1.3 运动方程

结构反应(包括位移、速度、加速度、内力或其它有意义的量)与干扰之间的数学关系可以通过运动方程来描述。运动方程

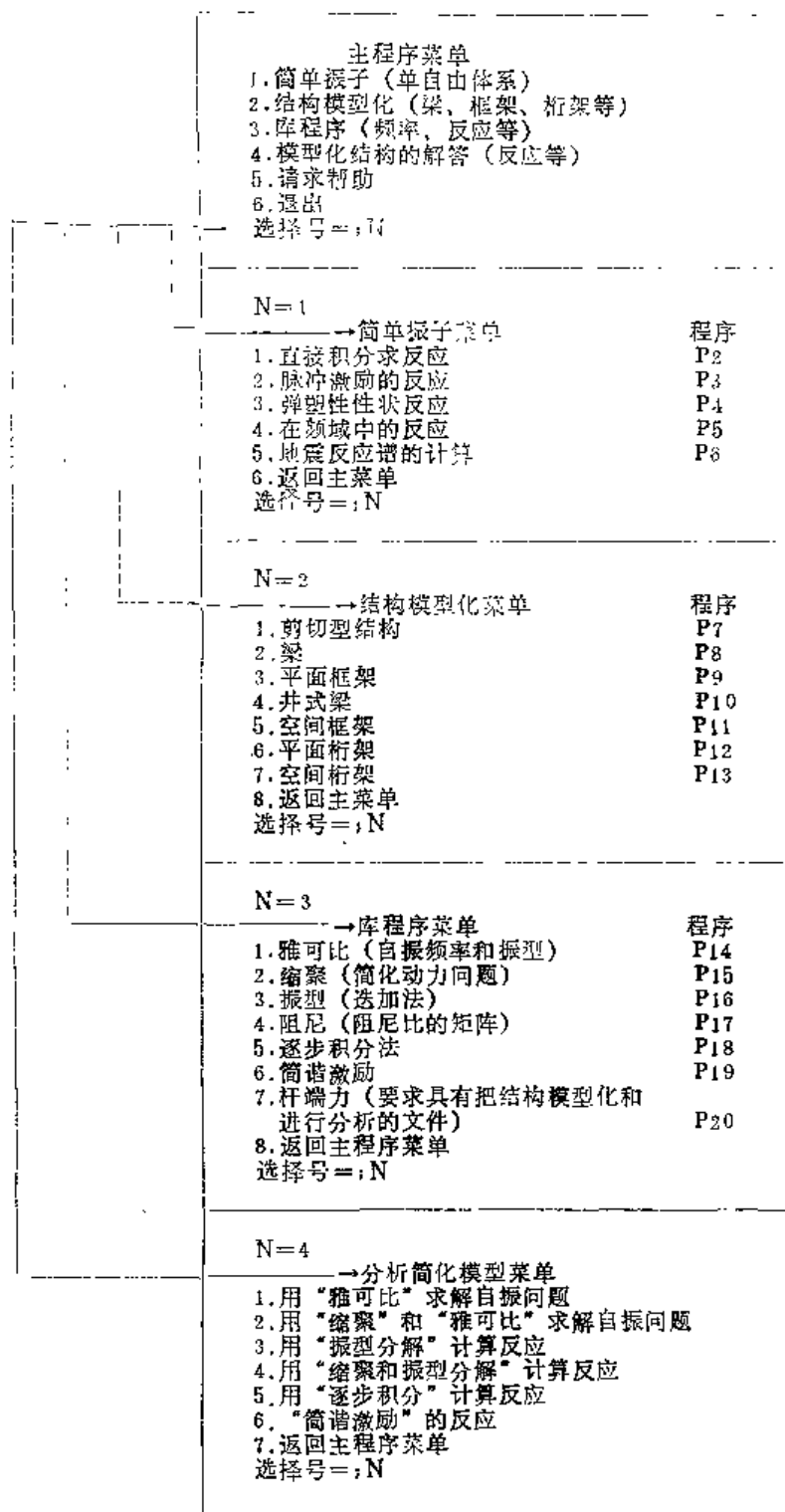


图1.1 程序1“主程序”的框图

可以运用与力和运动有关的基本原理来建立。动力学中的基本原理包括下述内容：

1. 牛顿运动定律：这个定律描述了质量为 m 的质点，在力 F （理解为作用于质点上的合力）作用下，按照以下方程改变运动状态：

$$F = ma \quad (1.1)$$

式中 a 为质点在干扰力 F 方向的加速度。

2. 动力平衡：应用达朗倍尔原理以后方程(1.1)可以写为：

$$F + (-ma) = 0 \quad (1.2)$$

该式可以理解为作用于质量上的所有力，其中包括作用于反方向上的惯性力 F_I

$$F_I = -ma \quad (1.3)$$

的平衡方程。

1.4 自由度

在结构动力学中，确定体系在任何时刻的形状或位置所必须的独立坐标数叫做自由度个数。一般来讲，连续结构有无限个自由度，尽管在结构理想化或者近似数学模型化的选择过程中，允许将自由度的数目减少到有限的几个，甚至在某些情况下，还可以简化为单自由度体系。图1.2给出了将结构理想化为单自由度体系的例子，它是由二根无质量的柱子支承一个刚性屋盖组成的。单自由度体系的结构模型可以通过众所周知简单振子(图1.3表示)的数学模型方便地加以描述。图1.3所示的数学模型具有以下基本单元：(1)质量单元 m ，表示结构的质量(或惯性特征)；弹簧单元 k ，表示结构的弹性恢复力(或可能储藏的能量)；(3)阻尼单元 c ，表示结构的摩擦特征(或能量耗散)；(4)干扰力 $F(t)$ 表示作用于结构系统的外力。当采用1.3所示的数学模型时，假定在体系中每个单元的特征是单一的。例如质量 m 仅体现惯性而无弹性变形或能量损耗，弹簧 k 仅表示弹性变形特征而无惯性和

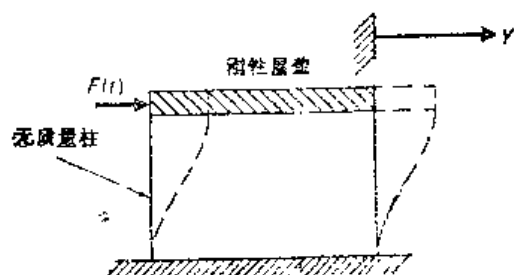


图1.2 理想化的单层结构

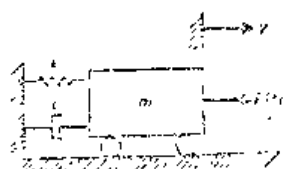


图1.3 单自由度体系数学模型

能量损耗，而阻尼 c 则仅表示能量损耗特性。为了方便分析，通常假定在运动时弹簧内所产生的恢复力是与弹簧的变形成正比。弹簧的变形等于质点的位移，比例系数由图1.3中的 k 表示。此外，通常还假定阻尼力与速度大小成正比，并且与运动方向相反，这种类型的阻尼可称为粘滞阻尼。

1.5 隔离体图

在应用牛顿运动定律建立运动方程时，最为方便的途径是画出体系的隔离体图 (FBD)。隔离体图是将任一物体或几个物体的集合体与所有其它物体脱开来，并将所有作用于该物体或几个物体集合体上的外力全部表示出来的示意图。图1.4 (b) 表述了简单振子质量的隔离体图，给出了恢复力 ky ，阻尼力 $c\dot{y}$ 和外力 $F(t)$ 。在上述符号中， $\dot{y}$ 和 $\ddot{y}$ 分别是位移 y 对时间的一阶和二阶导数，分别表示速度和加速度。对于图1.4(b)所示的隔离体图，应用牛顿运动定律，即方程 (1.1) 有：

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \quad (1.4)$$

这便是简单振子的运动方程。

图1.4(c)所示的隔离体图包含了惯性力 $F_I = -m\ddot{y}$ ，这样就能应用达朗倍尔原理来建立体系的“动力平衡”，也就是说在图

1.4(c)的隔离体上力的总和应等于零, 结果得:

$$F(t) - m\ddot{y} - c\dot{y} - ky = 0 \quad (1.5)$$

可见式 (1.4) 与 (1.5) 是等价的。

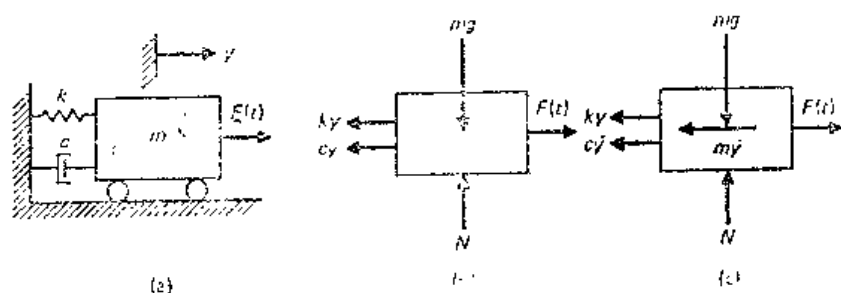


图1.4 各种隔离体图

- (a) 单自由度系统 (b) 仅表示外力的隔离体图
(c) 表示外力和惯性力的隔离体图

1.6 支座运动

图1.5给出地震时在支座运动激励下的理想化单层结构。通常支座的扰动可采用以 g 为单位的时间——加速度函数来表示, 也就是说干扰函数是以重力加速度的系数形式给出的。图1.6 (a) 所示的简单振子可以用来模拟图1.5中表示的结构, 其运动方程可以通过图1.6 (b) 中隔离体图所表示的力的动平衡来建立, 具体可写为:

$$m\ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{y}_s) + k(y - y_s) = 0 \quad (1.6)$$

为方便起见, 采用如下的变量替换表示质量相对支座的运动:

$$u = y - y_s \quad (1.7)$$

方程 (1.7) 求导后代入方程 (1.6), 得:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{y}_s(t) \quad (1.8)$$

比较方程(1.4)和 (1.8) 不难发现两者在数学上是等价的。假如将方程(1.8)的左边部分理解为等效力 $F_{eff}(t) = -m\ddot{y}_s(t)$, 则方程 (1.8) 变为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_{eff}(t) \quad (1.9)$$