

# 工程振动理论概述

西北工业大学 方同 陈松淇

## 一、引言

工程振动理论是一门技术科学。它研究工程技术中发生的各种振动问题。它借助于数学、力学、实验和计算技术,探讨各种振动现象的机理,设法克服振动引起的消极因素,利用其积极因素,合理地解决各种工程问题。

振动引起的消极方面有:

1. 振动使结构物或机器产生大变形破坏或疲劳损坏。
2. 振动使机器或仪器丧失功能。
3. 振动产生强刺激,形成公害。

振动的积极方面有:

1. 利用机器振动实现某种功能,例如传输、筛选、光饰加工等等。
2. 利用振动提高某种工效,例如沉桩、压路等等。

各个不同领域中的振动现象往往有着相似的数学力学描述。正是在这个基础上,有可能建立某种统一的理论来处理各种振动问题。

虽然如此,工程中的各种振动问题又往往各具不同的特点。因而它吸引着各个不同领域(例如,核技术、航空、控制、运输、造船、土建、机械制造、声学工程和电工程等等)中的工程研究人员致力于处理各自的特殊问题。

振动问题极为广泛,有关文献数以千计。本文只作工程振动理论的一般介绍。

## 二、分类

**振动系统** 振动系统按其物理模型和数学描述的不同角度可分类如表 1。

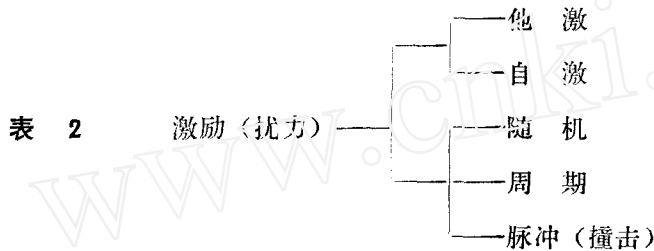


线性系统仍然是许多工程问题很好的初步近似模型。振动系统固有频率谱和振型的计算是绝大部分工程分析不可缺少的步骤。

但是有不少振动现象，线性模型显得无能为力，甚至给不出正确的定性结果。其中最典型的是自激振动，它本质上属于非线性振动。

系统运动微分方程不显含时间  $t$  的叫做自治系统，反之叫做非自治系统。属于后者的有各种类型的受迫振动与参激振动。

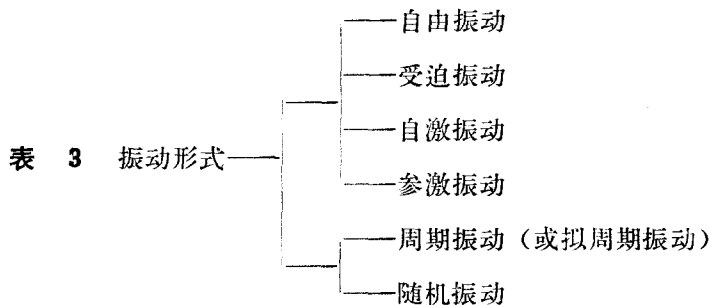
**激励** 系统的激励可分类如表 2。



自激励是由系统本身反馈得来的，在合适反馈条件下，系统产生自激振动。

随机激励是由那些不完全确定的干扰引起的，例如阵风、波浪、道路、喷气噪声等等。这种激励只能用具有某些统计特性的随机过程来描述。

**振动现象分类** 振动现象可分类如表 3。



当系统的激励或者系统的参数随机地变动时，系统的输出也只能用随机函数来描述，这种振动称为随机振动。在随机力与周期力同时作用下，系统的输出既含有随机分量又含有周期分量。

参激振动是由于系统参数周期地 (或随机地) 变动而激起的振动。弹性体 (杆、板、壳) 动力不稳定现象属于这一范围。

表 3 只列出了单一的振动形式，更复杂的振动形式可能是复合的，例如强制同步即属于自振系统的受迫振动。

**工程振动问题的一般处理方法** 一个工程振动问题的解决往往需要通过一系列过程：建立模型，进行运动分析和工程分析，确定设计方案或准则等等。

工程振动的一般理论是进行运动分析的基础。

但是无论在建立模型或分析过程中，实验和计算技术都是不可缺少的手段。特别是，快速电子数字计算机 (下面简称为“数字机”) 是解决许多复杂振动问题十分有力的工具。科

技人员完全有必要熟悉这一工具。

### 三、分析工具

**线性振动理论** 固有频率谱和振型的计算,由于快速数字机的出现而变得大大方便了。

系统反应的计算可有效地采用频率法和频谱法。

实践证明,矩阵法十分便于快速数字机的使用。

**非线性振动理论** 非线性系统的分析工具有定性方法与定量方法两大类。

定性方法主要有相平面法<sup>[1]</sup>、点变换法<sup>[2]</sup>。

定量方法主要有小参数法<sup>[3]</sup>、渐近法<sup>[4]</sup>。对于拟线性系统的周期振动,小参数法和渐近法给出的各次近似解都是一致的<sup>[5]</sup>。

渐近法对于非线性系统非定常运动的研究是很方便的<sup>[6]</sup>。

非线性振动理论中还发展了各种近似解法,如等值线性化、谐波平衡、描述函数、能量平均、最小均方差、Ritz-Галеркин方法等,它们实质上都是等价的<sup>[7]</sup>。

分布函数法<sup>[8,9]</sup>对于扰力为多次谐波的情形,研究系统的强迫振动是比较有效的。

Ritz-Галеркин法可用于计算次谐共振和张弛振动<sup>[8,7]</sup>。

周期系数微分方程的理论<sup>[3]</sup>是研究大多数参激振动的有效工具。

在解决运动稳定性问题时,大量应用着Ляпунов法。

关于非线性振动理论的发展史和较详细的介绍可参考文献[10,11]。

**随机振动理论** 在解决随机问题时广泛采用相关法。相关法是以研究输入与输出过程某些特征量(主要是相关函数与功率谱密度)之间的关系为基础的。

许多工程问题中,激励源(大气湍流、喷气噪声、海浪等等)属于平稳随机过程,并且往往具有各态历经特性,因而使得问题大为简化。

对于线性系统,输入与输出功率谱密度 $\Phi_i(\omega)$ ,  $\Phi_o(\omega)$ 之间存在着极为简单的关系:

$$\Phi_o(\omega) = |H(\omega)|^2 \Phi_i(\omega),$$

式中 $|H(\omega)|$ 是系统的频率特性。

当线性系统的输入是高斯过程时,输出也是高斯过程。

如果系统是非线性的,上述二个关系不再存在。

为解决非线性问题,提出了各种线性化方法<sup>[12,13]</sup>。

关于随机振动理论较详细的介绍可参考文献[14]。

### 四、实验方法

振动实验主要是实测和模拟。

关于振动测试设备,国外已有系列产品<sup>[15]</sup>,包括从传感器、数据记录装置、频率分析仪、频谱分析仪、传递函数分析仪、相关仪等等到各种激振设备。分析仪正朝着数字化方向发展以配合数字机的运用。

近来数字机已被引入振动试验,例如振动台试验的方块图如图1,2<sup>[16]</sup>。数字机有准确度高、适应性强等特点。

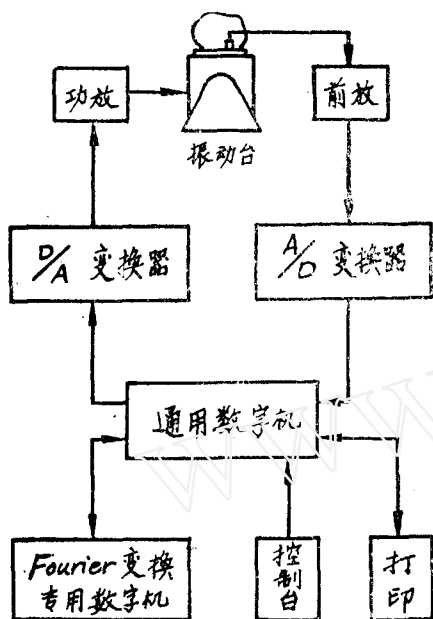


图1 计算机控制振动试验台

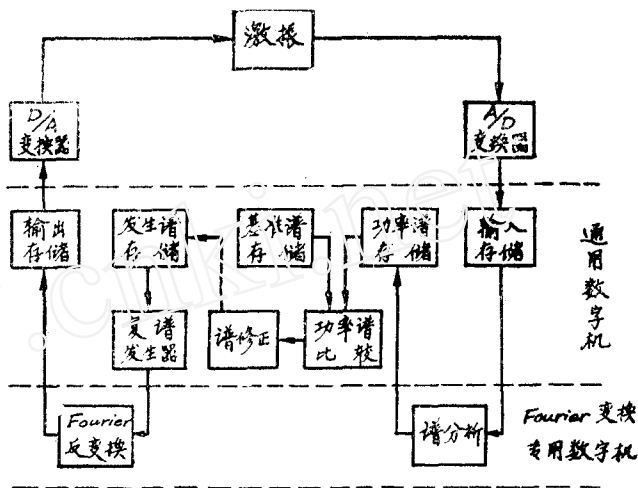


图2 处理过程方块图

## 五、工程应用

工程史上由于振动而引起的失事已屡见不鲜。闻名的Tacoma吊桥事件就是一例。该桥长2800呎，宽39呎，于1940年因风载激起自振，历时一小时（振动约720周），破坏殆尽，文献〔17〕曾对该桥的振动进行过详细的分析。

文献〔17〕还讨论了汽车前轮摆振（即方向不稳定），这仍然是一个现实的工程问题。

文献〔18〕提到的高速飞机滑行时前轮摆振问题是与此相似的问题，文献〔19〕最早研究了这一问题。

直升机的空中与地面共振问题也是一个现实的工程问题。最早研究铰支旋翼地面共振问题的有文献〔20—22〕，近来开始研究无铰旋翼的振动问题的有文献〔23〕。

文献〔24〕广泛地介绍了振动理论的工程应用，包括弹性体振动（特别是涡轮盘的振动）、地基振动、喷气噪声、陀螺章动、转轴旋振、壁板颤振等问题。

文献〔25〕介绍了非线性振动理论的若干应用，特别是振动机问题与防振问题，这些问题近来又有所发展。

振动机的动力学问题有两类。

一类是研究物料在振动载体面上的振动位移问题。找出在特定的振动频率、最大加速度和摩擦等条件下，载体应作何种运动才能使平均传输速度为最大。研究表明，载体运动中所含的高次谐波分量对于传输过程有利的影响〔26〕；载体进行撞击—振动能够提高传输速度〔27,28〕。目前研究得较详尽的是将物料理想化为孤立质点的情形〔26〕，这一模型对于一些实际情形过于简化。

另一类问题是载体的激振。通过载体反馈作用达到自同步的理论〔29〕已推广用于撞击—振动系统〔30〕。

考虑到物料的运动对同步问题的影响还只有一些定性的结论<sup>[31]</sup>。

设计高效能的减振装置是航空、汽车、造船等工程中必不可少的课题之一。实际的减振装置往往是非线性的，而干扰又往往是随机的。分析和综合这类系统时可有效地应用分布函数法和统计线性化法<sup>[8,9]</sup>。

为了使设计的减振装置具有预定的减振效能，而减振装置本身又有尽可能小的尺寸，或反过来，减振装置的尺寸已由环境所限，而要求它有最大的减振效能，提出了所谓最佳减振设计问题。这类问题可归结为求某泛函的条件极值问题，用线性规划或非线性规划的方法来解<sup>[32,33]</sup>。

## 六、結 語

1. 推广和发展工程振动理论对于我国社会主义建设有着重要的现实意义。
2. 发展理论应与解决具体任务相结合，在研究解决各项工程振动问题过程中，注意总结、交流、提高，不断丰富工程振动理论。
3. 加强调查研究，在这基础上，集中力量，首先解决几项急待解决的工程振动问题，有利于我国社会主义建设的进行。
4. 在解决各项工程振动问题中，理论分析要与实验技术、计算技术密切配合进行，特别要注意充分发挥快速电子数字计算机的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Андронов, А. А., Витт, А. А., Хайкин, С. Э., Теория колебаний, Физматгиз, М. (1959).
- [2] Неймарк, Ю. И., Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний, Труды МСНК, Т. II (1961).
- [3] Малкин, И. Г., Некоторые задачи теории нелинейных колебаний, Гостехиздат (1956).
- [4] Крылов, Н. М., Боголюбов, Н. Н., Нелинейная теория колебаний, М.: Наука (1963).
- [5] Проскураков, А. П., 庞卡莱法和克雷洛夫-博戈留波夫法求解拟线性系统周期解的比较, 力学译丛, 1966年第4期.
- [6] Митропольский, Ю. А., Проблемы асимптотической теории нестационарных колебаний, Изд. «Наука», М. (1964).
- [7] Magnus, K., 非线性振动的各种近似算法之间的关系, 力学译丛, 1966年第4期.
- [8] Коловский, М. З., Нелинейная теория виброзащитных систем, Изд. Наука, М. (1966).
- [9] Коловский, М. З., О возбуждении высокочастотных колебаний в нелинейной виброзащитной системе, Инж. ж., МГТ, №3 (1966).
- [10] 前沢成一郎, 非线性振动解析の发达史, 日本机械学会志, 第74卷, 第629号, 第652页 (1971).
- [11] 前沢成一郎, 非线性振动专题讲座(1) — (17), 连载, 机械の研究, 第22卷 第1号—第23卷 第5号 (1970—1971).
- [12] Казаков, И. Е., Некоторые вопросы теории статистической линеаризации и ее приложений, Труды I международного конгресса по автоматике, Изд. АН СССР, Т. 3 (1961).
- [13] Caughey, T. K., Equivalent linearization techniques, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, №11 (1963).
- [14] 下乡太郎, 机械技术者のためのランダム振动入门, (1) — (28), 连载, 第21卷第11号—第24卷 第4号 (1969—1972).

- [15] 松原十三生, 最近の振动计测システムとその応用(1), (2), 機械の研究, 第24巻第1号, 第2号 (1972).
- [16] 中村一郎, 機械力学におけるコンピュータの利用, 日本機械学会志, 第74巻, 第629号, 第646頁 (1971).
- [17] Rocard, Y., *Dynamic Instability*, London (1957).
- [18] Den Hartog, J. P., *Vibration: A Survey of Industrial Applications*, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 172, p. 8 (1958).
- [19] Келдыш, М.В., Шимми переднего колеса трехколесного шасси, Труды ЦАГИ, №564 (1945).
- [20] Coleman, R. P., *Theory of self-excited mechanical oscillations of hinged rotor blade*, *NACA ARR*, № 3G29 (1943).
- [21] Arnold, M.F., *Theory of mechanical oscillations of rotors with two hinged blades*, *NACA ARR*, № 3I13 (1943).
- [22] Coleman, R. P., Arnold, M. F., *Theory of ground vibrations of a two-blade helicopter rotor on anisotropic flexible supports*, *NACA TN*, №1184 (1947).
- [23] Lytwyn, R. T., Miao, W., Woitsch, W., *Airborne and ground resonance of hingeless rotors*, *J. Amer. Helicop. Soc.*, 16, №2 (1971).
- [24] Arnold, R. N., *Mechanical Vibration, Mech. Engineering, A Decade of Progress 1960—1970*, London (1971).
- [25] 季文美等, 非线性振动理论在机械工程中的几个应用, 力学学报, 1965年第3期.
- [26] Блехман, И. И., Джанелидзе, Г. Ю., *Вибрационное перемещение*, Изд. Наука, М. (1964).
- [27] Лавендел, Э. Э., *Оптимальной закон колебаний лотка с резонансным приводом при безотрывной транспортировке деталей*, В кн.: *Динамика машин*, Машиностроение, М. (1966).
- [28] Нерубенко, Г. П., *Безотрывное движение частиц на двухкомпонентном виброударном лотке*, *Машиноведение*, №3 (1972).
- [29] Блехман, И. И., *Проблема синхронизации динамических систем*, *ПММ*, 28, вып. 2 (1964).
- [30] Зарецкий, Л. Б., *Синхронизация центробежных вибровозбудителей в системах с разрывными характеристиками*, *Инж. ж. МТТ*, №1 (1968).
- [31] Блехман, И. И., Марченко, Ю. И., *Влияние реологических свойств рабочей среды на самосинхронизацию механических вибраторов*, *Изв. АН СССР, МТТ*, №5 (1969).
- [32] Коловский, М. З., *Об оптимальной амортизации*, *Машиноведение*, №5 (1966).
- [33] Гуреикий, В. В., *Об оптимизации параметров системы амортизации при стационарных случайных воздействиях*, *Машиноведение*, №5 (1971).