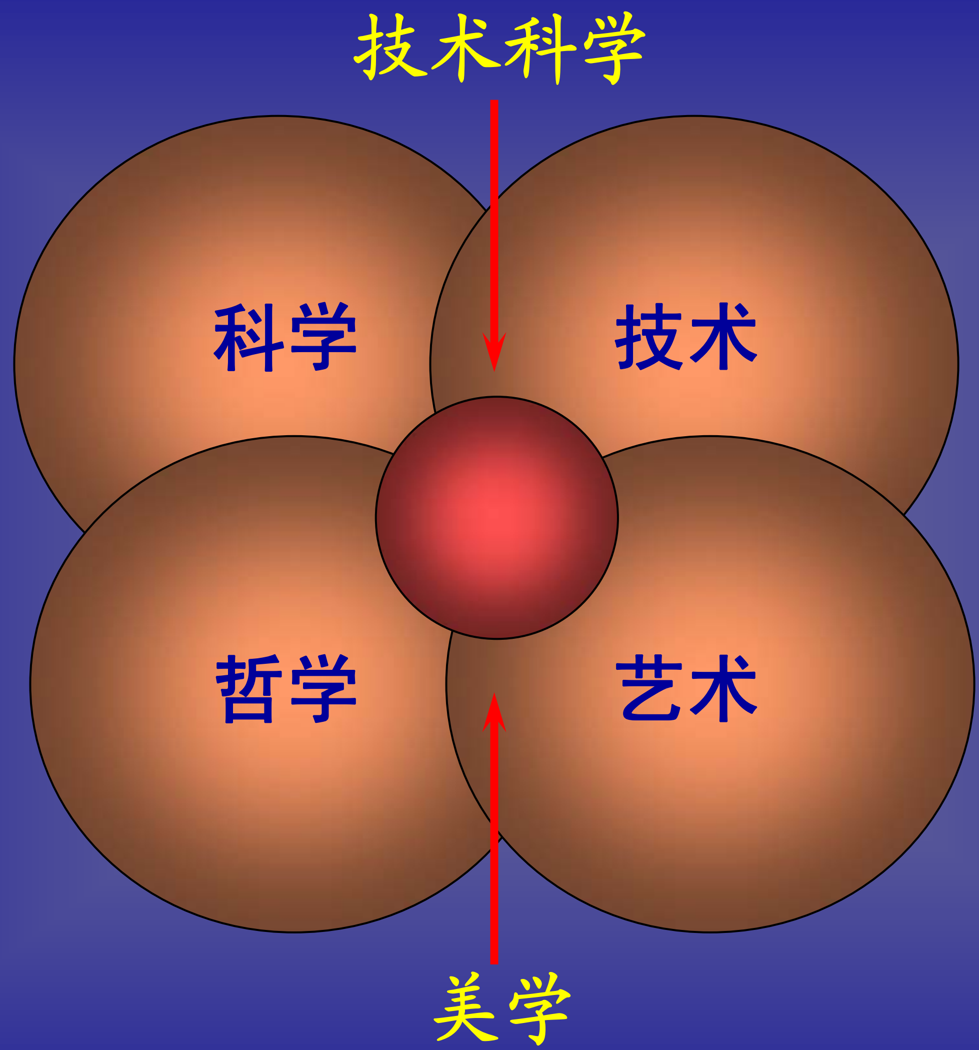
技术科学中的美学

胡海岩　南京航空航天大学

教育部飞行器结构力学与控制重点实验室


技术科学
科学
技术
哲学
艺术
美学

要　点

1. 几个基本概念
2. 科学与艺术的关系
3. 如何欣赏技术科学
4. 欣赏技术科学的意义
5. 审美能力的培养
6. 展望

1. 几个基本概念

现代汉语辞典（修订本）1997. Oxford Dictionary of Current English, 1996.

- **技术：** 人类在利用自然和改造自然的过程中积累起来并在生产劳动中体现出来的经验和知识，也泛指其他操作方面的技巧。

  Technology： Knowledge or use of the mechanical arts and applied sciences. Application of science to the design, building, and use of machines and so on.

- **科学：** 反映自然、社会、思维等的客观规律的分科的知识体系。

  Science： Branch of knowledge involving systematized observations and experiments.

- **艺术：** 用形象来反映现实但比现实有典型性的社会意识形态，包括文学、绘画、雕塑、建筑、音乐、舞蹈、戏剧、电影等。

  Arts： Human creative skill or its application. Branches of creative activity concerned with the production of imaginative design, sounds, or ideas, e.g., painting, music and writing.

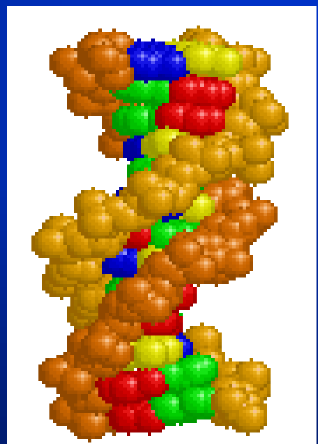
2. 科学与艺术的关系

2.1 相似与统一

- 科学对自然现象进行准确的抽象和规律的提炼。抽象和提炼结果越简单，应用越广泛，科学的创造就越深刻。
- 艺术用创新的手法去唤起人们意识或潜意识中深藏的已经存在的情感。情感越珍贵，唤起越强烈，反映越普遍，艺术就越优秀。
- 例：**College of Science and Arts**，强调在创造性层面上的统一。

$$ma = f$$

$$E = mc^2$$



2. 科学与艺术的关系

2.1 相似与统一

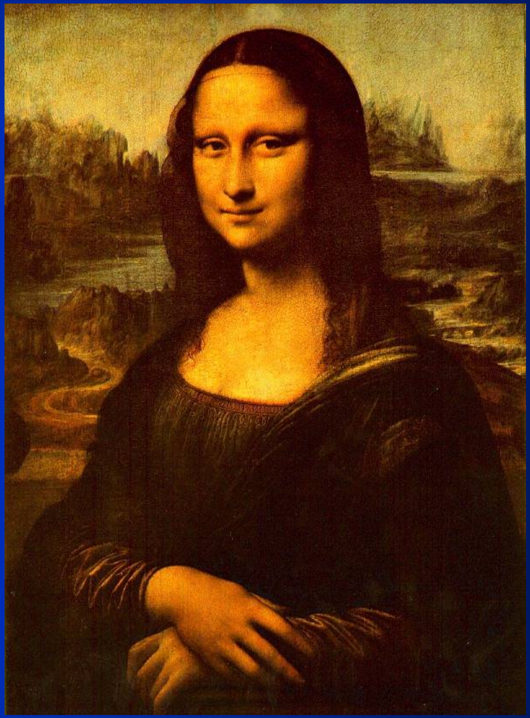
- 科学对自然现象进行准确的抽象和规律的提炼。抽象和提炼结果越简单，应用越广泛，科学的创造就越深刻。
- 艺术用创新的手法去唤起人们意识或潜意识中深藏的已经存在的情感。情感越珍贵，唤起越强烈，反映越普遍，艺术就越优秀。
- 例：**College of Science and Arts**，强调在创造性层面上的统一。

科学

艺术

2.2 著名科学家的艺术素养

- **Sir Issaac Newton**喜爱管风琴，**Max Plank**是精湛的钢琴家，**Albert Einstein**、李四光、袁隆平擅长小提琴。
- **Da Vinci**擅长油画。李政道擅长绘画和艺术理论，**1994**年与吴冠中等组织了“艺术与科学”研讨会，邀请著名画家以近代物理为题作画。
- 苏步青、王梓坤擅长作诗添词。
- 科学家和艺术家需要相同的想象力。



凡人怎么办？从学会欣赏开始

3. 如何欣赏技术科学

- **美学：**研究感性知识的科学，研究人对现实的审美观体系的科学，艺术的哲学。
- **美学的研究范围：**
  - ✧ 美的存在，包括类型和形态以及彼此间的关系；
  - ✧ 美的感受，包括美感的产生与发展，美感的性质与特征，美与美感的关系等；
  - ✧ 美的创造与审美教育。
- **科学美：**科学向人们展示的外在与内在美。对科学美的探索可追溯到Copernicus和Kepler对太阳系行星运动的研究。Kepler把论述行星运动第三定律的专著起名为《宇宙的和谐》，而和谐是科学美的最基本体现。通常，和谐、简洁、整齐、对称被作为科学美的重要标志。
- 技术科学根基于数学、物理学等科学，具有科学美的基本特征。

3.1 统一性

- 技术科学具有相当统一的理论框架，其部分与部分、部分与整体之间高度和谐，形成了统一的、优美的整体。如离散机械系统、振荡电路的模型都是二阶常微分方程，而描述弹性波、声波、电磁波的模型都是双曲型偏微分方程。
- 线性系统由线性微分方程、积分方程、泛函方程描述。在**Fourier**变换或**Laplace**变换下，又可由线性代数方程来描述。建立在叠加原理基础上的线性系统理论具有令人陶醉的统一性。

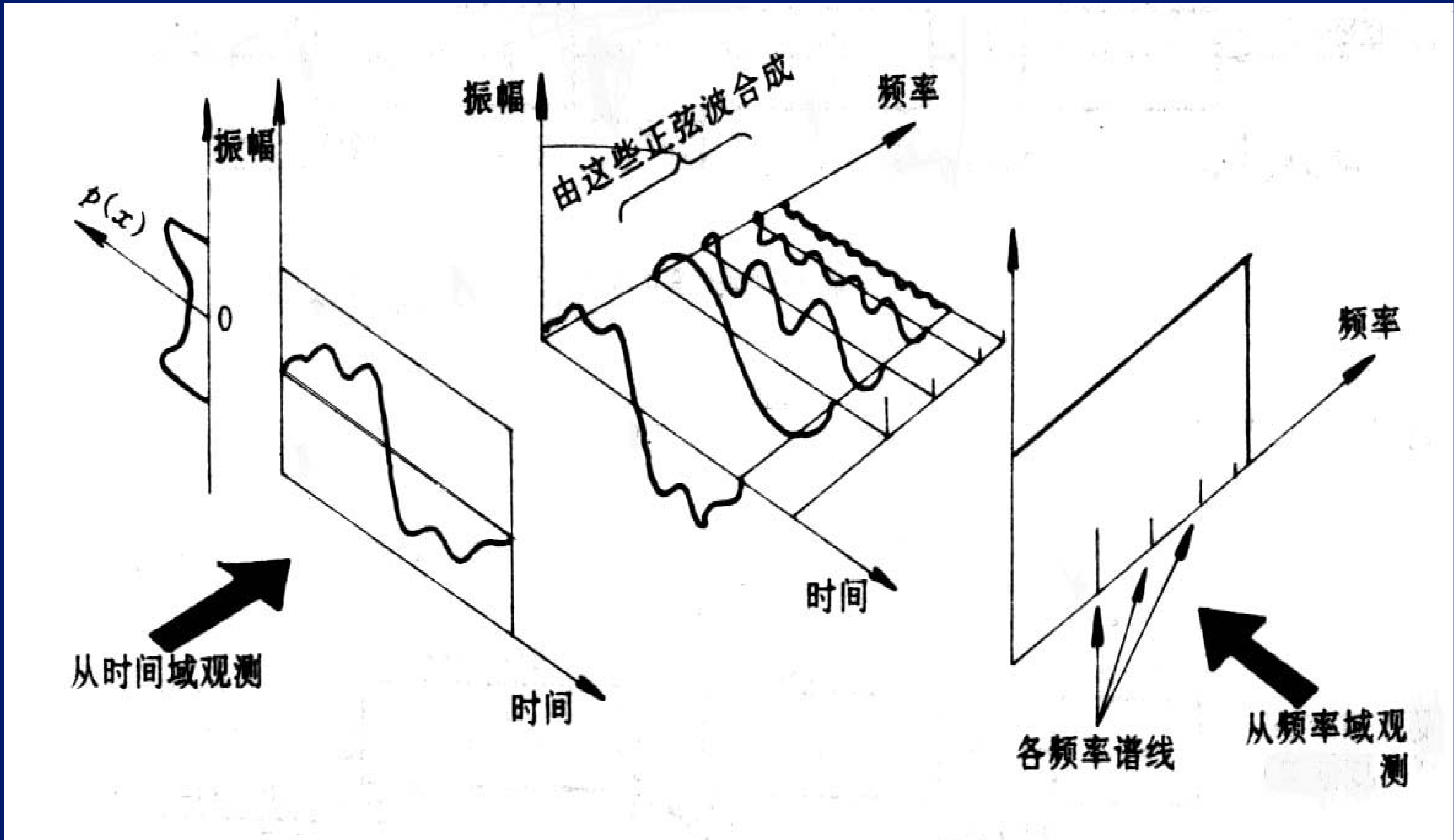
$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{f}(t)$$

$$\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{U}(t)\boldsymbol{u}_0+\boldsymbol{V}(t)\dot{\boldsymbol{u}}_0+\int_0^t \boldsymbol{h}(t-\tau)\boldsymbol{f}(\tau)\mathrm{d}\tau$$

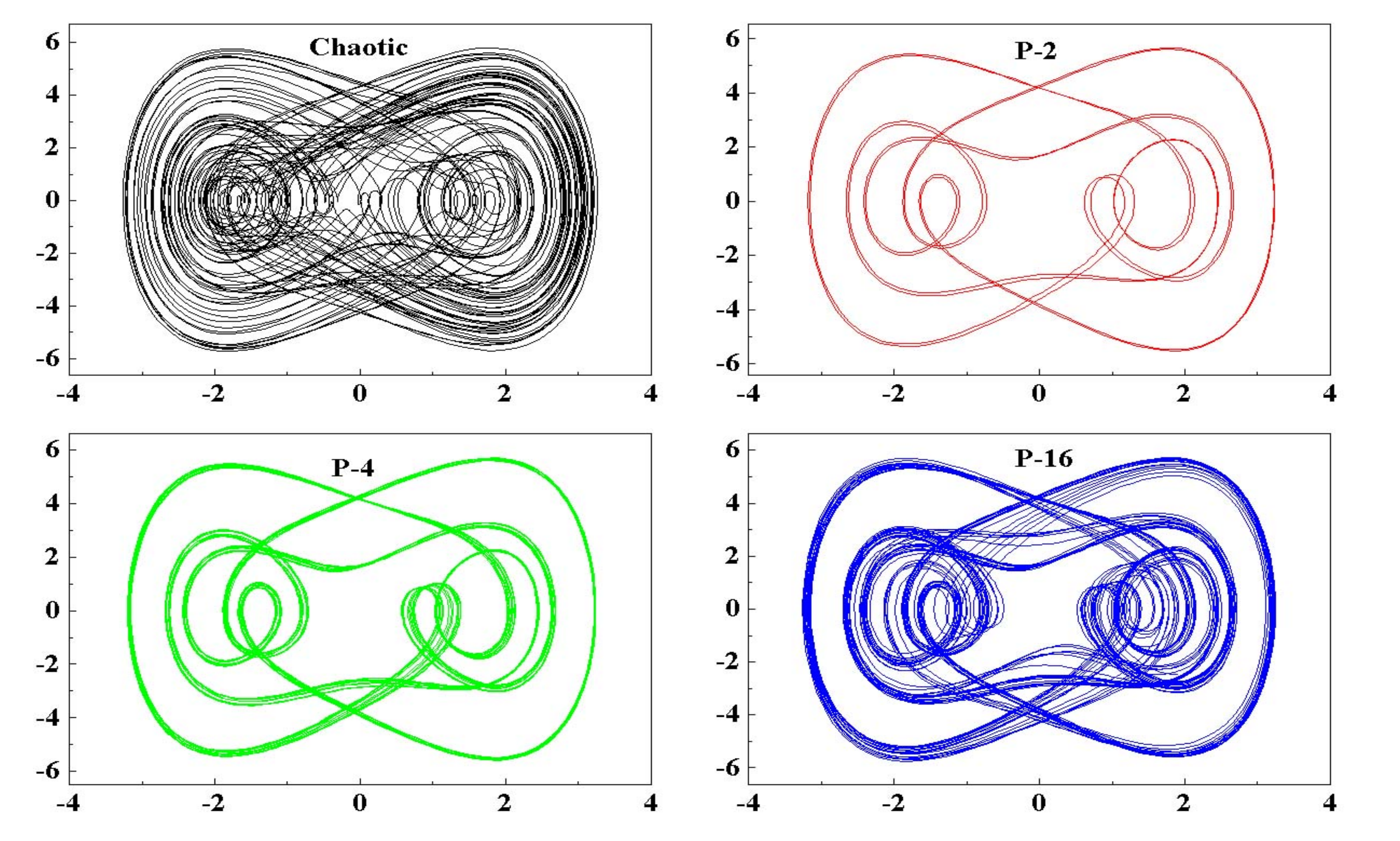
- 非线性问题个性极强，没有通解。**60**年代起，人们的认识发生了变化。一是勾划出了可积非线性问题的概貌；二是发现了不可积非线性问题和耗散系统的混沌。不同学科的专家正站在非线性科学的高度研究非线性问题。

3.2 简洁性

- 技术科学的理论体系具有清晰的纲目、最少构成要素的概念和结构，从而有可分解性。整个理论体系建立在为数不多的、非常简洁而又无比深刻的定理、方法和公式基础上：
  - 研究线性时不变系统的模态方法
  - 研究线性时变系统的**Floquet**定理
  - 研究非线性系统稳定性的**Lyapunov**方法
- 技术科学所研究的现象具有可分解性：
  - 多自由度线性系统的响应可分解为一系列单自由度系统的响应
  - 线性时不变系统的响应可分解为非零初始状态引起的响应和非零输入引起的响应
  - **Fourier**级数或积分将复杂的振动、噪声分解为简谐振动、纯音的和
  - 杂乱无章的混沌吸引子，可分解为一系列不稳定周期运动



复杂声音信号的Fourier谱分解



Ueda混沌吸引子及嵌入的不稳定周期运动

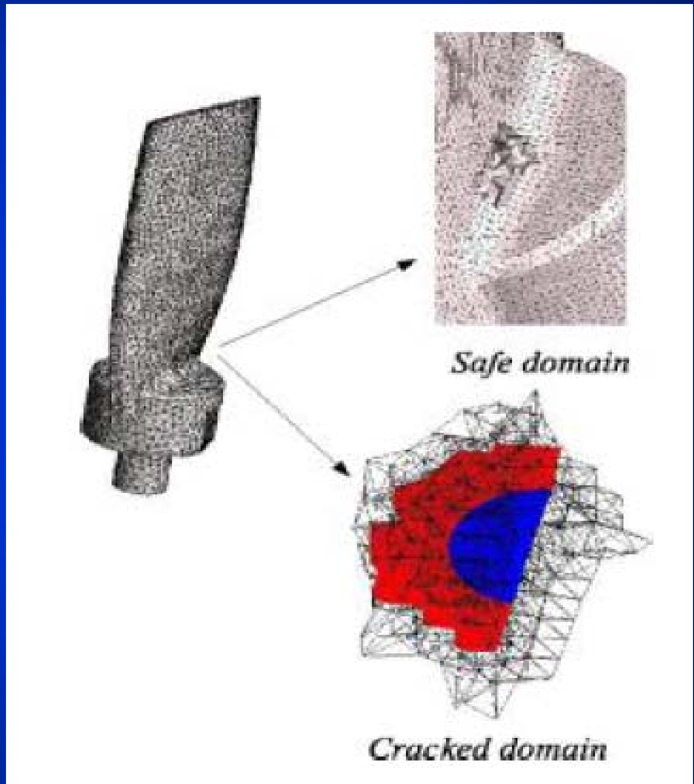
- 将复杂系统进行分解、降维是20世纪系统分析方法发展的主线：
  - 功率谱方法
  - 模态方法
  - 子结构方法
  - **Lyapunov-Schmidt**约化方法
  - **Poincaré-Birkhoff**规范型方法
  - 中心流形方法
- 经过漫长历史演化的大自然具有令人钦佩的最佳结构，它从来不用麻烦和困难的方法来做本可用简易方法完成的事情。
  - 系统的运行原理总是要遵循某种最优原则，如**Hamilton**原理。
  - 今天，越来越多的机电系统具备主动控制功能，所采用的控制策略无一不具有某种最优准则，包括基于遗传基因算法的控制策略。

分解与降维 — 1

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{f}(t), \quad \boldsymbol{u}\in R^N$$

$$\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{q}(t), \quad \boldsymbol{q}\in R^N$$

$$\ddot{q}_r(t)+\omega_r^2 q_r(t)=f_r(t),$$
$$q_r\in R^1, \quad r=1,2,\cdots,N$$



模态分解方法

子结构方法

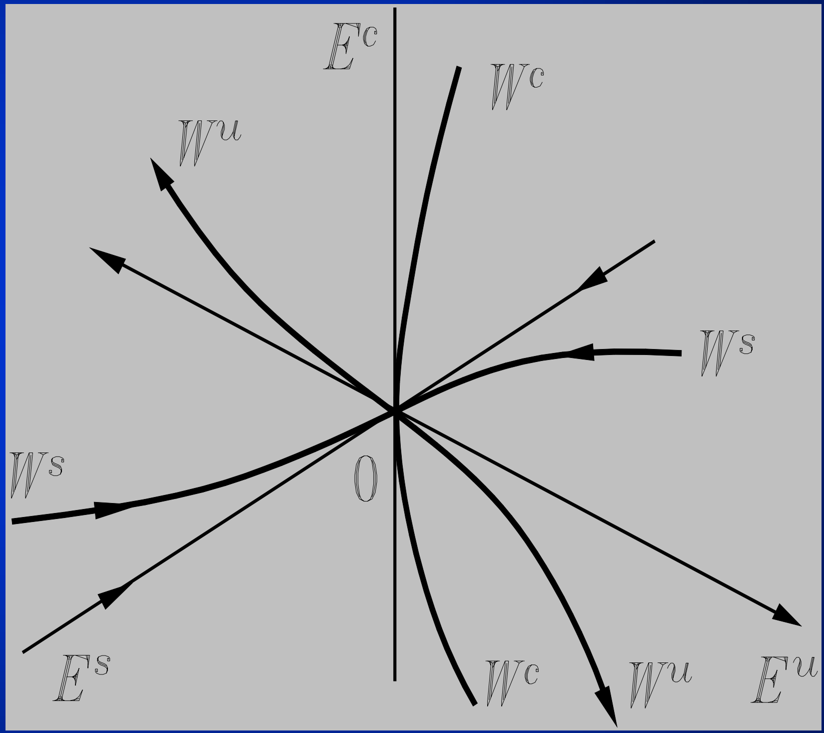
分解与降维 — 2

$$f(\boldsymbol{u})=0, \quad \boldsymbol{u}\in R^n, \quad A\equiv \boldsymbol{D}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u})$$

$$R^n = N(A)\oplus M_1 = R(A)\oplus M_2$$

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{v}+\boldsymbol{w}, \quad \boldsymbol{v}\in N(A), \quad \boldsymbol{w}\in M_1$$

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{v})\equiv \boldsymbol{Q}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{v}+\boldsymbol{w}(\boldsymbol{v}))=0$$



Lyapunov-Schmidt约化方法

中心流形方法

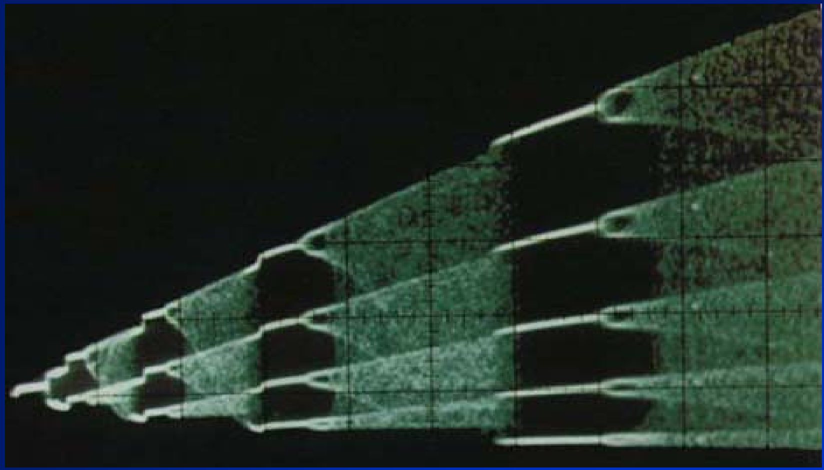
3.3 整齐性

- 整齐指同一形状的一致重复。在技术科学中，可列举出像简谐振动、纯音这样一些整齐规则的现象，像线性系统模态正交关系、**Rayleigh**商这样整齐优美的规律，像非线性分析中的摄动法、多尺度法、随机信号分析中的矩方法这样整齐规律的方法。这些整齐的图形、表达式、规律令人赏心悦目，留下深刻印象。

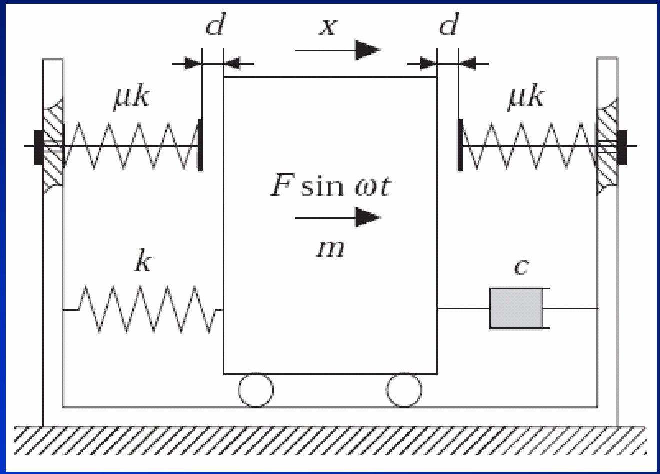
$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{\Lambda},\qquad \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{I},\qquad r(\boldsymbol{\varphi})=\frac{\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}}{\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varphi}}$$

$$u(t)=u_0(t)+\varepsilon u_1(t)+\varepsilon^2 u_2(t)+\cdots$$

$$\begin{cases} D_0^2 u_0+\omega_0^2 u_0=0 \\ D_0^2 u_1+\omega_0^2 u_1=f_1(u_0) \\ D_0^2 u_2+\omega_0^2 u_2=f_2(u_0,u_1) \quad \cdots \end{cases}$$



分段线性电路的分叉

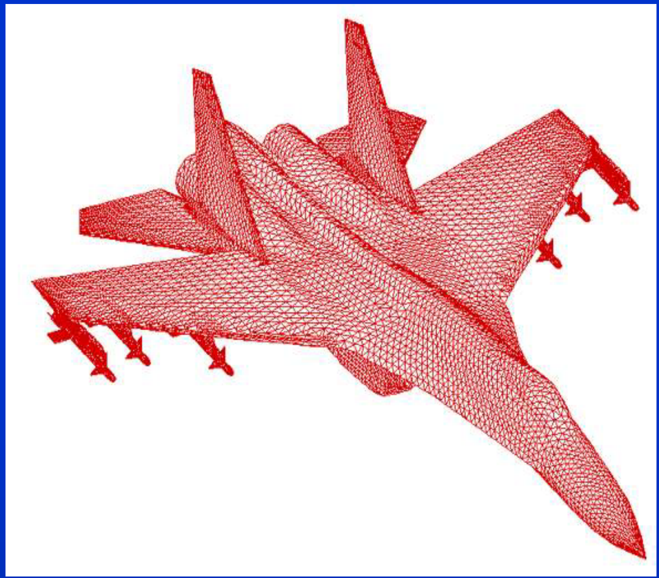


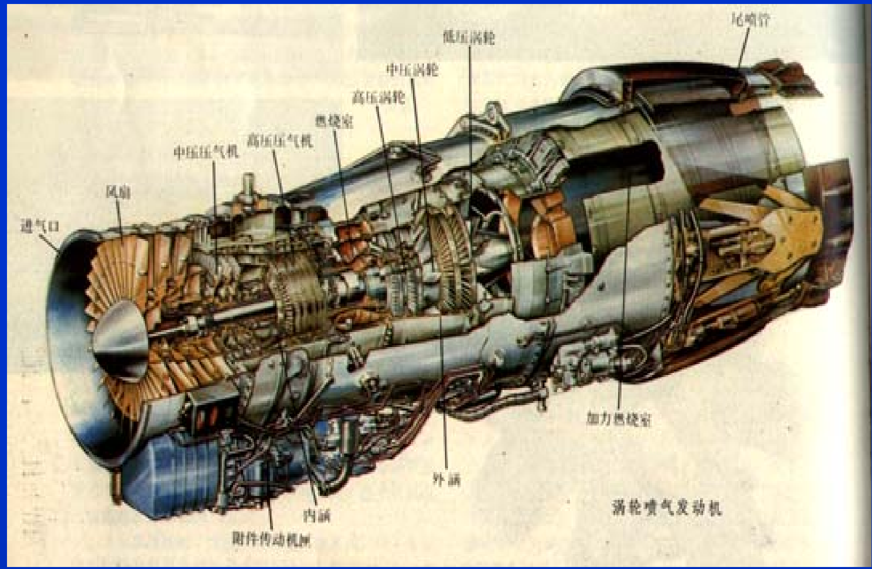
碰撞振动机械系统

- 杂乱无章的现象或复杂冗长的公式在新的认识层次上具有整齐性：
  - 概周期运动的时域图形很复杂，而**Fourier**频谱很整齐。谱分析和小波方法提供了揭示杂乱信号内在整齐性和规律的工具。
  - 根据**Lagrange**描述建立的线性粘性阻尼系统的模态正交关系复杂冗长，而在状态空间描述下简洁整齐，物理意义清晰。
- 寻求整齐性的动机常常会推动对技术科学的深入研究。

3.4 对称性

- 对称性是特殊的整齐性。许多系统具几何对称性：飞机有一个对称面，埃菲尔铁塔有二个对称面，发动机叶盘有旋转对称性，桥梁、航天结构有周期链式对称性等。对称性不仅具有系统功能上的需要，还带来视觉美的享受。

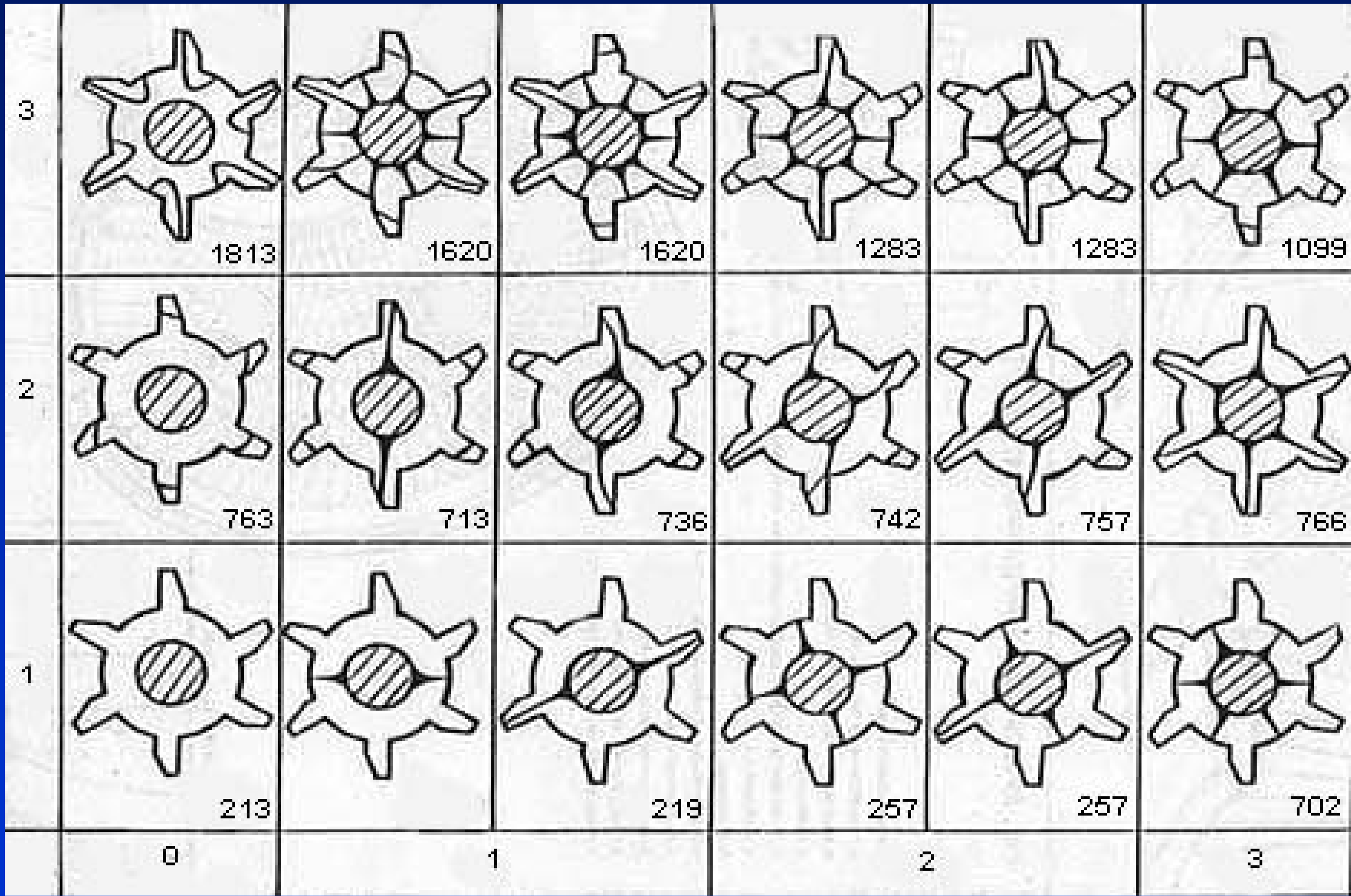




- 随着技术科学的了解，人们会被其内在对称性带来的美所折服。

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{C}=-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}, \quad r(\boldsymbol{\varphi})=\frac{\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}}{\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varphi}}$$

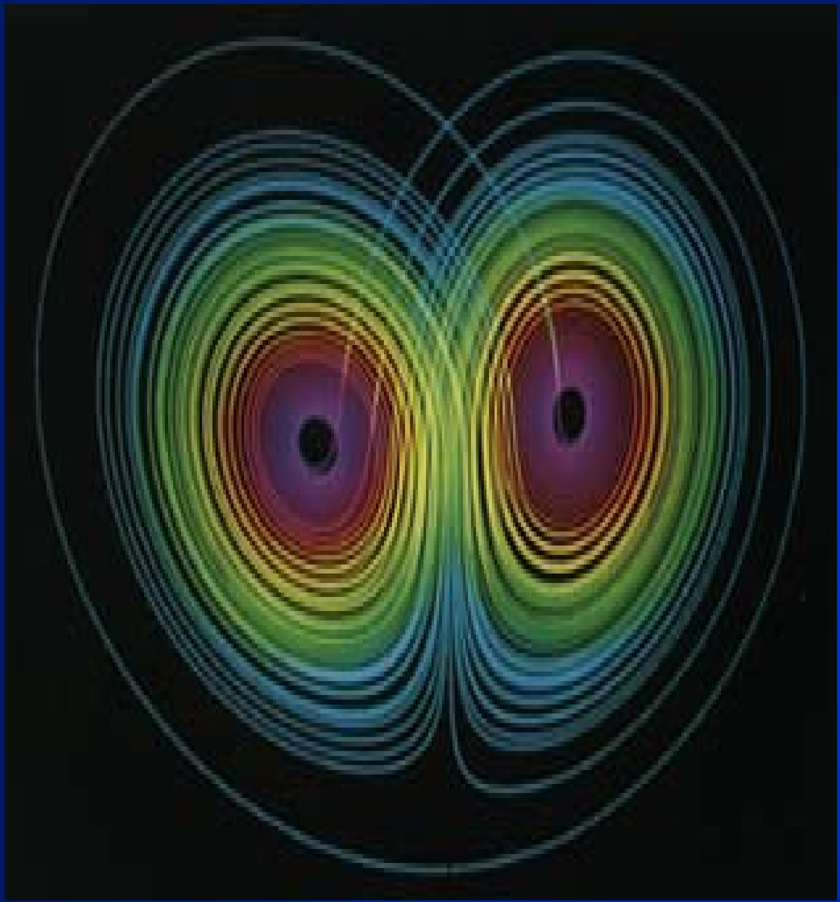
- 若系统具有对称性，则其可剖分为二个以上相同的子系统，从而可设法进行分解，简化分析。例如，将群表示论与模态综合法、奇异性理论等结合，研究对称系统的振动以及对称破缺现象。



C6群上对称的叶盘固有模态

3.5 奇异性

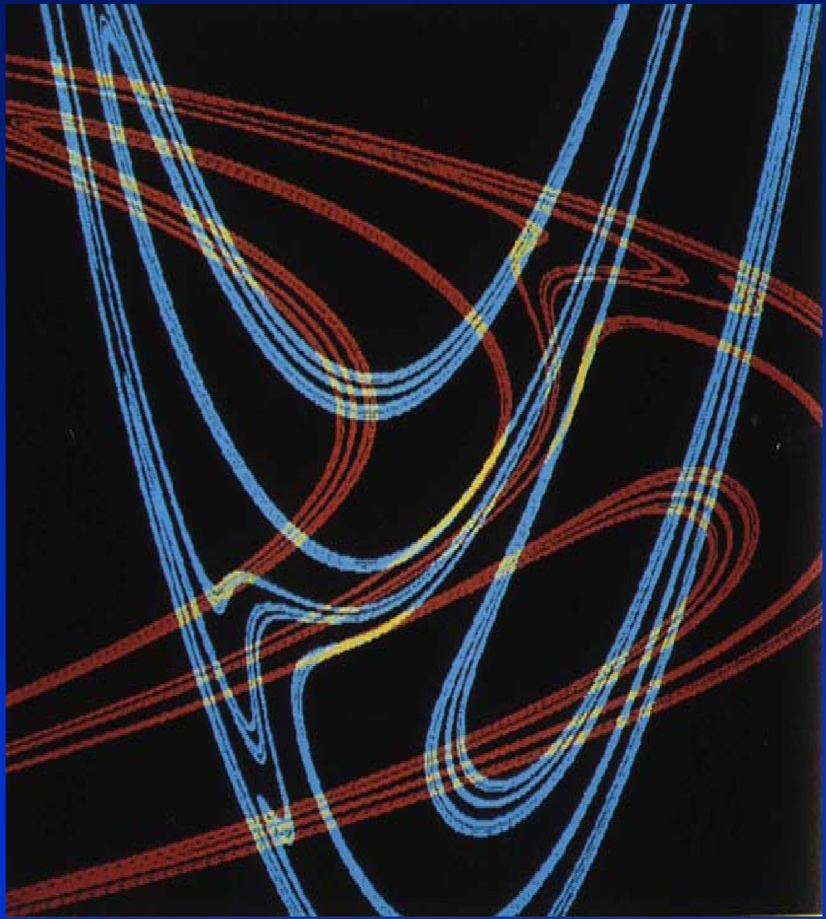
- 奇异是指某些奇怪现象的极端。许多奇异现象是灾难，但一旦揭示出奇异现象的本质，它们就可造福人类，令人感到变幻莫测的奇异美。如：桥梁共振，转子临界转速、飞行器颤振、电力系统内共振、动力失稳，激光器进入突发混沌。
- 为了描述和分析奇异性，发展了许多方法：奇异摄动法、突变理论、奇异性理论、分叉理论、分形几何学 它们不仅与奇异性现象相关，而且在研究思想上体现了新奇的色彩。
- 对奇异性的研究结果通常具有令人折服的美学结构：
  - 通过对系统平衡点的奇异性研究，给出了最可能发生的局部分叉及其受扰动后所有可能发生的情况。
  - 通过分形几何学，揭示了无比奇妙的自相似结构。分形图案已被工艺美术家采用，正逐步发展成为一门艺术。



Lorenz混沌运动的相轨线

Ueda 混沌吸引子的截面

Henon映射的混沌吸引子

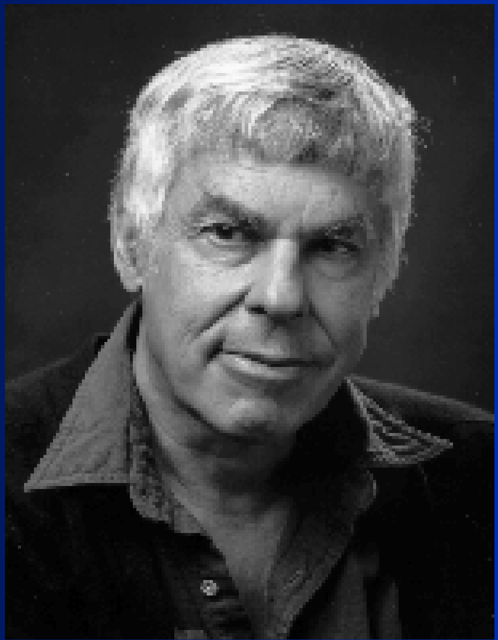


不动点的稳定与不稳定流型

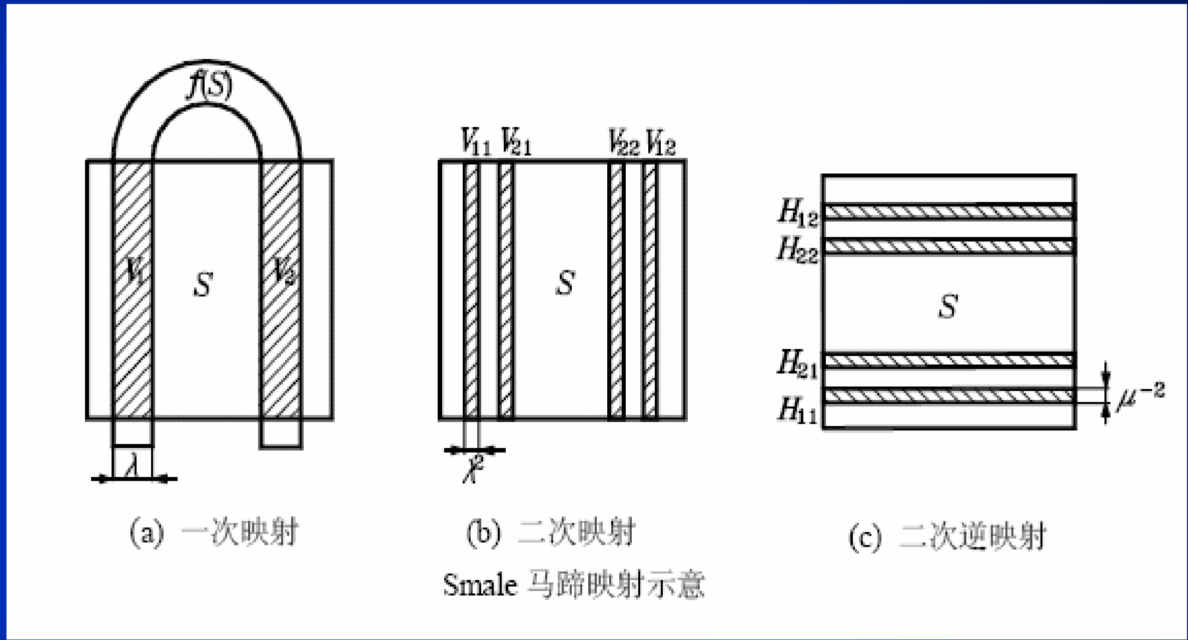
4. 欣赏技术科学的意义

- 有助于增强研究者的创新能力。创新的关键是使思维超出已有知识的范围，通过想象和灵感思维，透过复杂的、没有美感的现象抓住其内在的、具有美学特征的本质。许多认识过程充满了跳跃、但具有审美观的创造性思维。如：
  - **Einstein**对**Brown**运动的研究，
  - **Smale**提出马蹄映射。
- 有助于从美学特征发现已有理论和方法的不完善之处，提出新理论。简洁、整齐、对称是自然界的普遍规律。理解这些本质，对于科学理论的简洁必将怀有执着信念，从而获得新发现。如：
  - **Maxwell**方程的建立，
  - **Cooley**和**Tukey**提出**FFT**蝶形算法。

Smale马蹄映射（1963）



（1930-）



$$\Lambda \equiv \bigcap_{r=-\infty}^{+\infty} f^{r}(S)$$

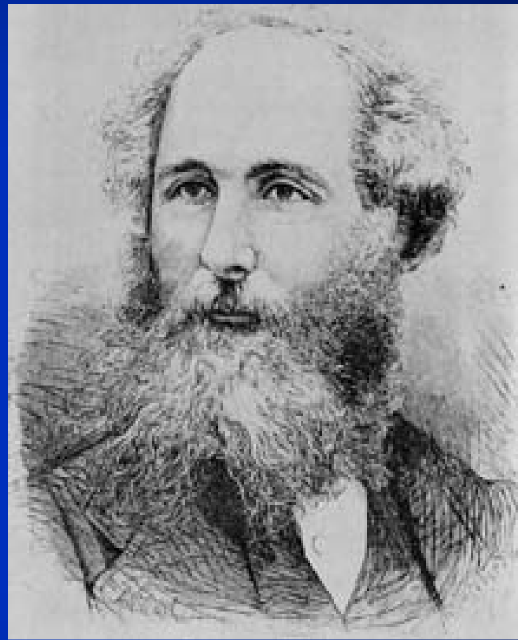
Maxwell方程（1873）

$$\nabla\cdot\boldsymbol{E}=4\pi\rho,$$ Gauss

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t},$$ Faraday

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0,$$ Gauss

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{J}$$ Ampere



（1831-1879）

Maxwell方程（1873）

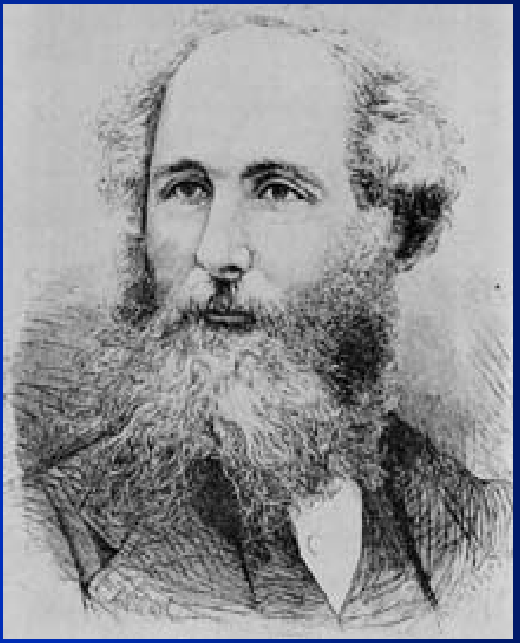
$$\nabla\cdot\boldsymbol{E}=4\pi\rho,$$ Gauss

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t},$$ Faraday

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0,$$ Gauss

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{J}+\frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}$$ Ampere

非定常因素



（1831-1879）

- 有助于增强研究者的学术兴趣，提高其学术品位。通常，一流学者将复杂问题简单化，三流学者将简单问题复杂化。形成这种差异的关键就是学术品位。学术大师的代表作总是揭示一些基本的科学规律或提出通用的研究方法，具有统一、整齐、简洁等美的特征，能够成为永久性的科学文献。要取得这样的研究成果必须有高雅的学术品位和审美兴趣。
- 有助于从总体上把握技术科学的理论框架。可以从深入理解一门技术科学出发，带着对科学美的感受，融会贯通其它的技术科学分支；也可以从研究技术科学中领悟科学美，很快把握具体分支的本质。20世纪，**Den Hartog**、**Timoshenko**、**von Karman**、**Andronov**、钱学森等的贡献已说明了这种可能性。在新世纪中，技术科学彼此间会有更多的交叉，这迫切需要从事技术科学研究的学者能够进行跨学科研究。

5. 审美能力的培养

- 审美能力的培养必须是启发式的，其过程必须使学生具有愉悦感。教师应靠启发式、探索式教学设计，使学生处于发现主体的地位。学生应通过自主发现，自我超越，不断体会“发现”的乐趣。儒家美学思想将“完美”及“统一”视为美的最高境界，对我国教育思想有重要影响，是“满堂灌”的思想基础。这种“完美”观念偏离了美的新奇性特征，使学生丧失兴趣和主动思维。
- 审美能力的培养必须有实践环节。对于本科生，通过归纳整理理论体系、论证某些教材正文中未尽细节来增加对科学美的感受。对于研究生，则可通过对学科前沿文献的消化和评述、对某些悬而未决问题的探索增加对学科美的欣赏能力。

6. 展 望

- 对科学美的认识是一个不断完善的渐进过程，若绝对化则将会束缚创新思维。历史上，不少科学家陶醉在某种理论的“完美”之中，因而延误了发展新理论，如Laplace确定论对发现混沌的负面影响。
- 在研究手段日益先进的今天，具备出色科学和人文素养的科学家才能从错综复杂、充满悬念的数据、图象、现象中感受其内在的科学美，获得突破性的研究进展。
- 想象与猜测带来突破：技术科学还有许多不完美之处，存在大量尚未探明内在规律的复杂现象。可根据美学特征来想象、猜测一些规律和理论，激发起青年学者投入研究。
- 技术科学领域之外的突破：如生命节律是一种振荡，起因很复杂，具有高度非线性；但节律现象与机械系统的张驰振动很相像。可否根据简洁性原则，建立简单模型或对复杂系统约化呢？

在技术科学的探索和研究中，沿着欣赏完美、发现不完美、探索更高层次完美的螺旋式道路去攀登，可望不断创造新的辉煌。