

4.1 仿真试验设计简介

王正明 易泰河

系统工程学院 军事建模与仿真系

2019 年 12 月 27 日

知识回顾

- 因子设计: 全面实施和部分实施, 正交设计, 方差分析法;
- 回归设计: 线性回归模型的参数估计和假设检验, 回归的正交设计和回归的最优设计;
- 响应曲面法: 响应曲面未知的情况下寻找最佳处理, 一阶响应曲面分析的最速上升法, 二阶响应曲面的典型分析法.

4.1 仿真试验设计简介

4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

- 随着科学技术的发展, 被试对象日益复杂, 使试验的层级、场地和方式都得到了大大的拓展;
- 从试验对象的层级上可以分为部件、分系统、系统以及体系等层级的试验;
- 从试验方式的角度可以分为数字仿真、半实物仿真、实物仿真和物理试验四种类型;
- 从试验的场地来分类, 可以分成内场试验、外场试验和内外场联合试验三种类型.

- 随着科学技术的发展, 被试对象日益复杂, 使试验的层级、场地和方式都得到了大大的拓展;
- 从试验对象的层级上可以分为部件、分系统、系统以及体系等层级的试验;
- 从试验方式的角度可以分为数字仿真、半实物仿真、实物仿真和物理试验四种类型;
- 从试验的场地来分类, 可以分成内场试验、外场试验和内外场联合试验三种类型.

- 随着科学技术的发展, 被试对象日益复杂, 使试验的层级、场地和方式都得到了大大的拓展;
- 从试验对象的层级上可以分为部件、分系统、系统以及体系等层级的试验;
- 从试验方式的角度可以分为数字仿真、半实物仿真、实物仿真和物理试验四种类型;
- 从试验的场地来分类, 可以分成内场试验、外场试验和内外场联合试验三种类型.

- 随着科学技术的发展, 被试对象日益复杂, 使试验的层级、场地和方式都得到了大大的拓展;
- 从试验对象的层级上可以分为部件、分系统、系统以及体系等层级的试验;
- 从试验方式的角度可以分为数字仿真、半实物仿真、实物仿真和物理试验四种类型;
- 从试验的场地来分类, 可以分成内场试验、外场试验和内外场联合试验三种类型.

- 在试验设计领域, 主要研究物理试验和计算机试验两类.
- 物理试验: 通过可控的实物试验进行的观测, 包括田间试验、临床试验和工业试验等试验设计领域传统研究对象.
- 计算机试验: 通过在计算机上运行程序代码的试验, 也称为数字仿真试验.
 - 随着计算机的飞速发展, 计算机试验已成为一种经济有效的试验方式.
 - 缺陷: 仿真建模难度大; 试验结果的可信度难以保证.

- 在试验设计领域, 主要研究物理试验和计算机试验两类.
- 物理试验: 通过可控的实物试验进行的观测, 包括田间试验、临床试验和工业试验等试验设计领域传统研究对象.
- 计算机试验: 通过在计算机上运行程序代码的试验, 也称为数字仿真试验.
 - 随着计算机的飞速发展, 计算机试验已成为一种经济有效的试验方式.
 - 缺陷: 仿真建模难度大; 试验结果的可信度难以保证.

- 在试验设计领域, 主要研究物理试验和计算机试验两类.
- 物理试验: 通过可控的实物试验进行的观测, 包括田间试验、临床试验和工业试验等试验设计领域传统研究对象.
- 计算机试验: 通过在计算机上运行程序代码的试验, 也称为数字仿真试验.
 - 随着计算机的飞速发展, 计算机试验已成为一种经济有效的试验方式.
 - 缺陷: 仿真建模难度大; 试验结果的可信度难以保证.

- 半实物仿真和实物仿真是介于物理试验和计算机试验中间的两种试验方式.
- 半实物仿真试验: 系统的关键部分以及难以建立可信仿真模型的部分为实物, 其它部分为数字仿真模型, 又称虚实结合试验.
- 实物仿真试验: 利用系统的实物模型进行的试验
 - 爆炸试验中的缩比试验
 - 空气动力学中的风洞试验
 - 飞行器的地面火箭撬试验
- 实物仿真和物理试验之间不存在严格的区分, 物理试验中或多或少存在一些替代模型.

- 半实物仿真和实物仿真是介于物理试验和计算机试验中间的两种试验方式.
- **半实物仿真试验**: 系统的关键部分以及难以建立可信仿真模型的部分为实物, 其它部分为数字仿真模型, 又称虚实结合试验.
- **实物仿真试验**: 利用系统的实物模型进行的试验
 - 爆炸试验中的缩比试验
 - 空气动力学中的风洞试验
 - 飞行器的地面火箭撬试验
- 实物仿真和物理试验之间不存在严格的区分, 物理试验中或多或少存在一些替代模型.

- 半实物仿真和实物仿真是介于物理试验和计算机试验中间的两种试验方式.
- **半实物仿真试验**: 系统的关键部分以及难以建立可信仿真模型的部分为实物, 其它部分为数字仿真模型, 又称虚实结合试验.
- **实物仿真试验**: 利用系统的实物模型进行的试验
 - 爆炸试验中的缩比试验
 - 空气动力学中的风洞试验
 - 飞行器的地面火箭撬试验
- 实物仿真和物理试验之间不存在严格的区分, 物理试验中或多或少存在一些替代模型.

- 半实物仿真和实物仿真是介于物理试验和计算机试验中间的两种试验方式.
- **半实物仿真试验**: 系统的关键部分以及难以建立可信仿真模型的部分为实物, 其它部分为数字仿真模型, 又称虚实结合试验.
- **实物仿真试验**: 利用系统的实物模型进行的试验
 - 爆炸试验中的缩比试验
 - 空气动力学中的风洞试验
 - 飞行器的地面火箭撬试验
- 实物仿真和物理试验之间不存在严格的区分, 物理试验中或多或少存在一些替代模型.

- 复杂系统的试验, 需要采用系统工程的思想:
 - 自顶向下将系统的指标体系进行分解, 指导开展部件级、分系统级试验;
 - 再自底向上聚合, 开展不同类型的系统级、体系级的验证试验;
- 不同级别试验的试验方式有所不同:
 - 部件级试验主要采用物理试验;
 - 系统级和体系级试验主要采用计算机仿真.

- 复杂系统的试验, 需要采用系统工程的思想:
 - 自顶向下将系统的指标体系进行分解, 指导开展部件级、分系统级试验;
 - 再自底向上聚合, 开展不同类型的系统级、体系级的验证试验;
- 不同级别试验的试验方式有所不同:
 - 部件级试验主要采用物理试验;
 - 系统级和体系级试验主要采用计算机仿真.

例 (导弹武器抗干扰试验)

导弹武器抗干扰试验是以检测和考核导弹武器抗干扰指标为目的的试验. 根据国内外试验靶场的成熟经验, 可以归纳出五种常用试验方式:

- 数字仿真和半实物仿真两种内场试验,
- 地面静态模拟、挂飞试验和飞行试验三种外场试验.

地面静态模拟和挂飞试验是实物仿真试验, 飞行试验是物理实验.

例 (导弹武器抗干扰试验)

- (1) 数字仿真试验: 在内场条件下, 针对被试导弹、导引头的性能和目标、干扰及其环境特性参数, 建立数学模型, 形成虚拟对抗条件. 优点是试验消耗低, 可大量重复试验; 缺点是建模难度大, 置信度受到限制.
- (2) 半实物仿真试验: 在内场条件下, 导弹 (主要是导引头单机) 以飞行转台为平台, 通过弹道仿真工作站建立导弹运动环境, 在暗室条件下模拟形成目标、干扰和环境信号. 其优点是导引头提供了较好的导弹飞行环境, 试验消耗低, 重复性好; 缺点是难于建立高置信度的目标、干扰和环境模型.
- (3) 地面静态模拟: 在外场地面条件下, 导弹 (主要是导引头单机) 以角转台为平台, 采用实装或模拟实装方法形成目标与干扰环境, 在关键对抗点上进行试验. 其优点是导弹 (导引头) 提供较好的角运动环境, 试验消耗低, 重复性好; 缺点是不能直接得到导弹命中概率.

例 (导弹武器抗干扰试验)

- (4) 导弹挂飞试验: 整个导弹武器系统 (或导引头) 以飞机或其它飞行器为运动平台, 采用实装或模拟实装方法形成目标与干扰环境. 其优点是导弹武器系统 (或导引头) 提供了较为真实的环境, 试验消耗较低, 重复性较好; 其缺点是不能直接得到导弹命中概率, 逼真度依赖于平台特性.
- (5) 导弹飞行试验: 整个导弹武器系统参加的全尺度试验, 采用模拟实装方法形成目标与干扰环境. 其优点是导弹武器系统 (或导引头) 提供了真实工作环境, 可直接得到导弹命中概率; 其缺点是形成的目标与干扰环境较为单一, 不宜设置复杂条件, 试验消耗巨大, 重复性最差.

4.1 仿真试验设计简介

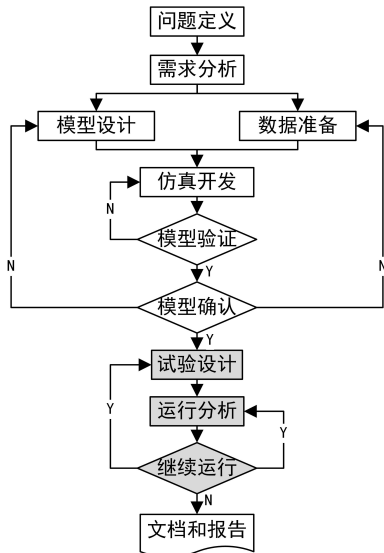
4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

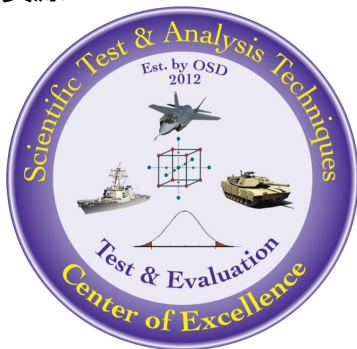
4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

(1) 实验设计与分析是仿真开发的重要环节之一



- **科学试验设计与分析技术**能够有效提高仿真试验的效率, 节省时间和计算资源.



- (1) 实验设计与分析是仿真开发的重要环节
- (2) 实验设计与分析是模型验证的有效手段

2016 年 3 月 14 日, 美军作战试验鉴定局局长迈克尔·吉尔莫向陆军试验鉴定司令部司令、海军作战试验鉴定部队司令、空军作战试验鉴定中心主任、海军陆战队作战试验鉴定部主任和联合互操作能力试验司令部司令, 签发了一份题为《作战试验与实弹设计评估所用建模与仿真的验证指导》的备忘录, 强调对于仿真数据和真实数据, 不能仅靠视觉上的对比就确定两者“足够接近”, 应该引入严谨的统计学和分析原理. 具体地讲, 就是将实验设计与分析的方法作为确定模型验证所需的数据、确定模型反映现实世界真实程度的手段和依据, 对子系统、全系统、环境等每一个要素的建模与仿真进行充分的验证和统计分析, 确保利用模型能完整呈现真实世界中的系统.

- (1) 实验设计与分析是仿真开发的重要环节
- (2) 实验设计与分析是模型验证的有效手段
- (3) 实验设计与分析是统筹多种试验方式的科学方法
 - 数字仿真、半实物仿真、实物仿真和物理试验的可重复性依次降低, 资源消耗逐次增加, 试验结果的可信度依此增加. 它们既需要互相验证, 也需要信息融合.
 - 这就要求采用试验设计的方法, 建立一体化的试验优化模型, 统筹不同类型试验的占比, 统筹不同类型试验的试验方案.

4.1 仿真试验设计简介

4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

(1) 从响应变量来看, 即便只考虑单响应试验, 计算机试验中有时会出现一些相关的输出 $y_1(\cdot)$, $y_2(\cdot)$, \dots , $y_m(\cdot)$:

- 高低精度试验并存. 低精度试验所需的运行时间较少, 试验设计需要统筹高低精度试验以达到更好的效率.
- 相关信息. 如 $y_1(\cdot)$ 是响应变量, $(y_2(\cdot), \dots, y_m(\cdot))$ 是 $y_1(\cdot)$ 的一阶偏导数.
- 制约信息. 因 $y_1(\cdot)$ 是响应变量, 故这种情况下一般以 $(y_2(\cdot), \dots, y_m(\cdot))$ 作为约束条件.

(2) 从试验因子来看

- 在仿真领域中习惯把因子称为变量或参数, 称试验设计为**参数规划**.
- 此前把因子分为**试验因子**和**干扰因子**两类. (Santner, 2003) 把计算机试验中的因子划分为三类:
 - **控制因子**(control variables): 可由研究者设定的、用来控制系统或过程的变量.
 - **环境因子**(environmental variables): 系统所处环境决定的因子. 在计算机试验中, 环境因子也可以人为设置, 通常采用统计方法对环境因子建模.
 - **模型因子**(model variables): 用于刻画数学模型不确定性的参数. 一般需要通过物理试验获得的数据来估计.

(2) 从试验因子来看

- 在仿真领域中习惯把因子称为变量或参数, 称试验设计为**参数规划**.
- 此前把因子分为**试验因子**和**干扰因子**两类. (Santner, 2003) 把计算机试验中的因子划分为三类:
- **控制因子**(control variables): 可由研究者设定的、用来控制系统或过程的变量.
- **环境因子**(environmental variables): 系统所处环境决定的因子. 在计算机试验中, 环境因子也可以人为设置, 通常采用统计方法对环境因子建模.
- **模型因子**(model variables): 用于刻画数学模型不确定性的参数. 一般需要通过物理试验获得的数据来估计.

(3) 从试验目的来看, 除处理比较、因子筛选、系统辨识、系统优化和问题发现外

- **不确定性分析**(uncertainty analysis) 或 **不确定性量化**(uncertainty quantification): 研究环境因子的随机性如何传递到响应变量的随机性.
- **模型校正**(model calibration): 确认最佳模型参数, 使仿真结果与真实结果接近, 需要物理试验数据的支撑.
- 如果同时包含控制因子和环境因子, 则给定 \mathbf{x}_c , $y(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_e)$ 为一个随机变量, 试验目的可能是估计随机过程 $y(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_e)$ 的均值函数 $\bar{y}(\mathbf{x}_c) := \mathbb{E}[y(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_e)]$ 或分为数函数 $y^\alpha(\mathbf{x}_c) : \mathbb{P}\{y(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_e) \geq y^\alpha(\mathbf{x}_c)\} = \alpha$.

(4) 从响应模型来看

- ① 仿真系统的输入与输出之间的关系一般无法通过一个解析形式来刻画, 即响应模型是未知的;
- ② 环境因子的存在使得响应模型中仍然包括随机因素, 因而仍可用模型 $y = F(\mathbf{x}, s, \omega)$ 表示计算机试验的响应模型;
- ③ 仿真系统响应模型的随机性是可控的, 是人为模拟的拟随机性, 因此在试验设计时还需考虑如何从给定的分布中抽取一定的样本;
- ④ 可能存在多个相关的响应模型, 例如精度不同的计算机程序是真实系统响应关系的不同程度的近似.

- 与物理试验相比, 计算机实验设计与分析具有以下两个特点:
 - 仿真系统的可控性使得计算机试验中一般不考虑重复、区组和随机化的技术;
 - 响应模型的复杂性使得我们不能用简单的固定效应模型和线性回归模型对其建模.
- 针对这些特点,
 - 计算机试验设计采用空间填充设计(space-filling design) 和序贯设计(sequential design);
 - 试验数据建模时采用代理模型(surrogate model), 即用一个计算便捷的数学模型去“代理”复杂的仿真系统.

- 与物理试验相比, 计算机实验设计与分析具有以下两个特点:
 - 仿真系统的可控性使得计算机试验中一般不考虑重复、区组和随机化的技术;
 - 响应模型的复杂性使得我们不能用简单的固定效应模型和线性回归模型对其建模.
- 针对这些特点,
 - 计算机试验设计采用**空间填充设计**(space-filling design) 和**序贯设计**(sequential design);
 - 试验数据建模时采用**代理模型**(surrogate model), 即用一个计算便捷的数学模型去“代理”复杂的仿真系统.

4.1 仿真试验设计简介

4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

- (1) 对不确定性的理解
- (2) 贝叶斯方法简介
- (3) 基于不确定性量化的试验设计

美国国家研究委员会对不确定性的定义是:

信息缺乏或不完整, 定量不确定性分析试图分析和描述计算值与真实值之间的差异程度, 描述方法有时候是概率分布; 不确定性取决于数据的质量、数量和相关度, 以及模型和假设的可靠性和相关性.

- 认知不确定性: 也称为无知、表象不确定性和可约减不确定性, 由于缺乏知识引起.
 - 认识到的无知在决策时可以采取相应的手段来降低风险, 没有认识到的无知则可能造成严重后果.
 - 认知不确定性可通过试验探索不断降低.
- 随机不确定性: 也称为变异、内在不确定性、偶然不确定性和不可降低不确定性, 主要由自然变异和随机性引起.
 - 在相同的条件下重复试验若干次, 随机不确定性使得每次试验结果都不相同;
 - 增加试验次数不能降低试验结果的变异, 但可以更加准确地给出变异的概率分布.

- 认知不确定性: 也称为无知、表象不确定性和可约减不确定性, 由于缺乏知识引起.
 - 认识到的无知在决策时可以采取相应的手段来降低风险, 没有认识到的无知则可能造成严重后果.
 - 认知不确定性可通过试验探索不断降低.
- 随机不确定性: 也称为变异、内在不确定性、偶然不确定性和不可降低不确定性, 主要由自然变异和随机性引起.
 - 在相同的条件下重复试验若干次, 随机不确定性使得每次试验结果都不相同;
 - 增加试验次数不能降低试验结果的变异, 但可以更加准确地给出变异的概率分布.

响应模型

$$y = F(\boldsymbol{x}, s, \omega)$$

中, s 表示认知不确定性, ω 表示随机不确定性.

- 虽然 s 不是随机变量, 但把它当作随机变量处理;
- 利用概率分布来刻画 s 的认知不确定性, 此即贝叶斯学派中所谓的主观概率.

科学研究是一个不断收集信息的过程. 研究者评估当前的认知状态, 设计试验收集新的数据, 然后综合历史数据和新数据重新评估认知状态. 贝叶斯推断为科学研究的这一迭代过程提供了一个逻辑严密的、定量的框架.

—<https://bayesian.org>

- 基于不确定量化的试验设计就是一种贝叶斯方法

科学研究是一个不断收集信息的过程. 研究者评估当前的认知状态, 设计试验收集新的数据, 然后综合历史数据和新数据重新评估认知状态. 贝叶斯推断为科学研究的这一迭代过程提供了一个逻辑严密的、定量的框架.

—<https://bayesian.org>

- 基于不确定量化的试验设计就是一种贝叶斯方法

4.1 仿真试验设计简介

4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

- (1) 对不确定性的理解
- (2) 贝叶斯方法简介
- (3) 基于不确定性量化的试验设计

- 事件形式的贝叶斯公式:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)},$$

- $P(A)$ 和 $P(B)$ 分别表示事件 A 和 B 的概率, 而 $P(A|B)$ 和 $P(B|A)$ 则分别表示 B 发生的条件下事件 A 的概率和 A 发生条件下事件 B 的概率.
- 贝叶斯学派们把 $P(A)$ 看作事件 A 的先验概率, 而把 $P(A|B)$ 看作事件 B 发生后的后验概率.

- 事件形式的贝叶斯公式:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)},$$

- $P(A)$ 和 $P(B)$ 分别表示事件 A 和 B 的概率, 而 $P(A|B)$ 和 $P(B|A)$ 则分别表示 B 发生的条件下事件 A 的概率和 A 发生条件下事件 B 的概率.
- 贝叶斯学派们把 $P(A)$ 看作事件 A 的**先验概率**, 而把 $P(A|B)$ 看作事件 B 发生后的**后验概率**.

- 1 把未知参数 s 视作随机变量, 样本的密度函数 $p_s(\mathcal{D}_n)$ 是给定 s 的条件下, 数据 \mathcal{D}_n 的条件分布, 记作 $p(\mathcal{D}_n|s)$;
- 2 根据对参数 s 的先验信息确定先验分布 $\Pi(s)$, 假设先验分布的密度函数为 $\pi(s)$;
- 3 数据 \mathcal{D}_n 的产生分两步进行, 首先从先验分布 $\pi(s)$ 中产生一个 s , 然后从条件分布 $p(\cdot|s)$ 中产生数据 \mathcal{D}_n ;
- 4 数据 \mathcal{D}_n 与参数 s 的联合分布的密度函数为

$$h(\mathcal{D}_n, s) = p(\mathcal{D}_n|s)\pi(s);$$

- 5 能够用来对 s 做决策的是后验分布 $\Pi(s|\mathcal{D}_n)$, 它的密度函数的计算公式是

$$\pi(s|\mathcal{D}_n) = \frac{p(\mathcal{D}_n|s)\pi(s)}{\int_{\mathcal{S}} p(\mathcal{D}_n|s)\pi(s) \mathrm{d}s}$$

- $\pi(s|\mathcal{D}_n)$ 为参数的后验密度函数, $\int_{\mathcal{S}} p(\mathcal{D}_n|\theta)\pi(s) \mathrm{d} s$ 是数据的边际分布, 也称为归一化因子.
- 贝叶斯公式:

$$\text{Posterior Density} = \frac{\text{Likelihood} \times \text{Prior Density}}{\text{Normalizing Factor}}$$

- 贝叶斯推断: 对参数 s 的一切统计推断都应当依据它的后验分布进行.
 - 如后验均值估计和极大后验估计;
 - 贝叶斯假设检验直接依据后验概率的大小.

例

设 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} \stackrel{i.i.d.}{\sim} N(\mu, 1)$, 记样本均值为 \bar{y} , 考虑参数 μ 的统计推断. 频率学派假定 μ 为未知但固定的参数, 即存在一个真值, 在这一假定下作出如下推断:

- μ 的极大似然估计为 $\hat{\mu} = \bar{y}$.
- 估计量的标准误差 (standard error) 为
$$se(\hat{\mu}) = \sqrt{\text{Var}(\bar{y})} = 1/\sqrt{n};$$
- 因 $\bar{y} \sim N(\mu, 1/n)$, 故 95% 的置信区间为 $\hat{\mu} \pm 1.96se(\hat{\mu})$.

例

设 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} \stackrel{i.i.d.}{\sim} N(\mu, 1)$, 记样本均值为 \bar{y} , 考虑参数 μ 的统计推断. 假定 μ 先验分布为 $N(\mu_0, \tau_0^2)$, 根据贝叶斯公式, 可以得到 μ 的后验分布为

$$\mu|\bar{y} \sim N\left(\frac{\frac{1}{\tau_0^2}\mu_0 + n\bar{y}}{\frac{1}{\tau_0^2} + n}, \frac{1}{\frac{1}{\tau_0^2} + n}\right).$$

- 参数 μ 的后验均值估计为

$$\tilde{\mu} = \frac{\frac{1}{\tau_0^2}\mu_0 + n\bar{y}}{\frac{1}{\tau_0^2} + n} = \frac{\frac{1}{\tau_0^2}}{\frac{1}{\tau_0^2} + n}\mu_0 + \frac{n}{\frac{1}{\tau_0^2} + n}\bar{y}.$$

- 称参数后验分布的方差的平方根为标准偏差 (standard deviation, sd).

例

- 贝叶斯学派称参数的区间估计为可信区间(Credible Interval, CI), 可直接取后验概率为 $1 - \alpha$ 的区间作为参数的可信区间.
 - 本例中参数的 95% 可信区间为 $\tilde{\mu} \pm 1.96sd(\tilde{\mu})$.
 - 置信区间是随机区间, 参数是常量; 可信区间是非随机的区间, 参数是随机变量. 称满足以下两个条件
- 对于检验问题, $H_0 : \mu \in \Theta_0$ vs $H_1 : \mu \in \Theta_1$, 可直接计算集合 Θ_0 和 Θ_1 的后验概率, 如果 $\Pi(\Theta_0|\bar{y}) > \Pi(\Theta_1|\bar{y})$, 则接受原假设, 否则拒绝原假设.

4.1 仿真试验设计简介

4.1.1 系统的不同试验类型

4.1.2 实验设计与分析在仿真中的地位

4.1.3 物理试验与计算机试验的区别

4.1.4 基于不确定量化的试验设计

- (1) 对不确定性的理解
- (2) 贝叶斯方法简介
- (3) 基于不确定性量化的试验设计

- 试验方案应尽可能降低模型的认知不确定性
- 使后验分布尽可能地“concentration”
- 使后验分布于先验分布之间的“距离”尽可能大
- 线性回归模型中, 利用概率分布之间的 KL 距离, 可得到 A 最优准则.

- 试验方案应尽可能降低模型的认知不确定性
- 使后验分布尽可能地“concentration”
- 使后验分布于先验分布之间的“距离”尽可能大
- 线性回归模型中, 利用概率分布之间的 KL 距离, 可得到 A 最优准则.

- 试验方案应尽可能降低模型的认知不确定性
- 使后验分布尽可能地“concentration”
- 使后验分布于先验分布之间的“距离”尽可能大
- 线性回归模型中, 利用概率分布之间的 KL 距离, 可得到 A 最优准则.

- 试验方案应尽可能降低模型的认知不确定性
- 使后验分布尽可能地“concentration”
- 使后验分布于先验分布之间的“距离”尽可能大
- 线性回归模型中, 利用概率分布之间的 KL 距离, 可得到 A 最优准则.

总结

- ① 试验的不同方式
- ② 实验设计与分析在仿真中的地位
- ③ 物理试验与计算机试验的区别
- ④ 基于不确定性量化的试验设计