

制造业信息化： 集成、协同、优化 (智能无处不在!)

清华大学 吴 澄

2014. 6. 5

“先进制造”是交叉学科

从信息技术的角度，各种计算机辅助技术的应用，

进一步，必然关注信息集成：互联互通以及互操作。

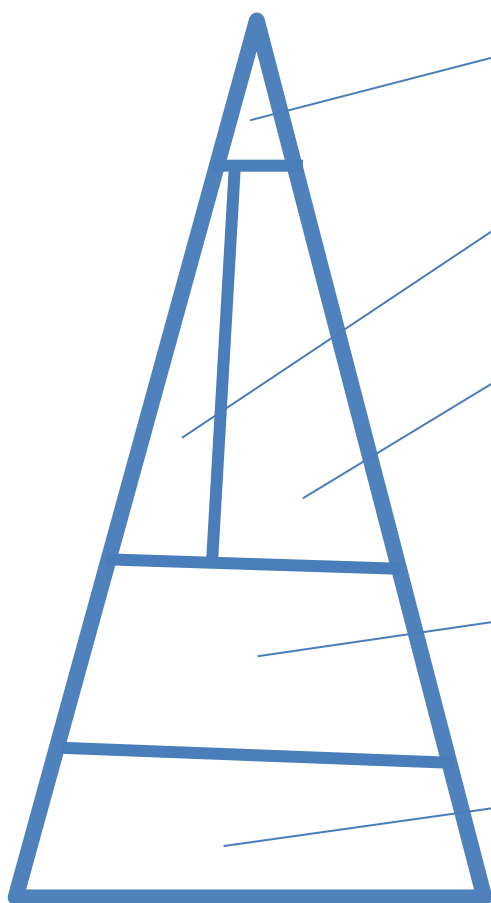
从系统理论和技术角度，更多关注系统（即全局）

的优化，这就需要建模和优化方法。

提纲

- 1, 企业制造信息系统
- 2, 异构信息集成---互联互通的信息平台
- 3, 协同设计、仿真和优化---互联互通互操作的信息平台
- 4, 一体化优化运行---建模与优化平台
- 5, 结束语

1, 企业制造信息系统 (简单一览, 不同企业可以有不同的表达)



OA、SCM、ASP、CPC、BI、PLM

设计: **CAD**、CAPP、CAM、**CAE**、CE、**VM**、**PDM**

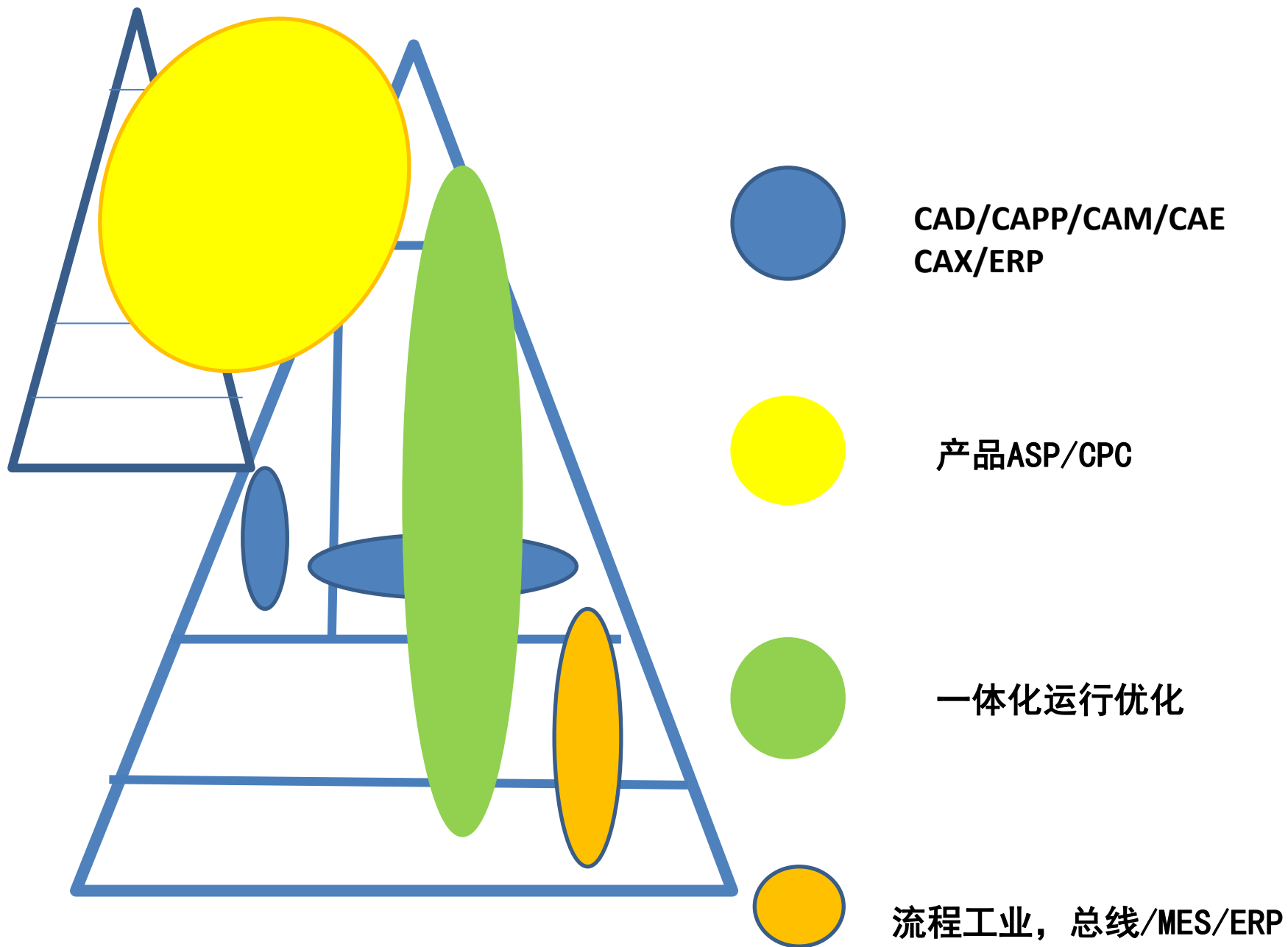
管理: **ERP**、CRM

企业内网 (INTRANET)、**工程DB**、**管理DB**

制造执行系统 **MES**

底层设备 (生产线、塔、釜、罐.....)

控制系统及装置 (机器人、**PLC**、**DCS**、**SCADA**
NC、FMS、加工中心...,工业以太网, 现场总线...
实时**DB**



2, 异构信息集成——互联互通的信息平台

对于离散制造业，设计过程**CAD**、**CAPP**、**CAM**、**CAE**的信息集成，**PDM**(产品数据管理) 可以作为平台工具。

如果是同一个厂商的**CAX**软件，用**STEP**（产品数据交换标准），可以比较方便地实现信息集成。

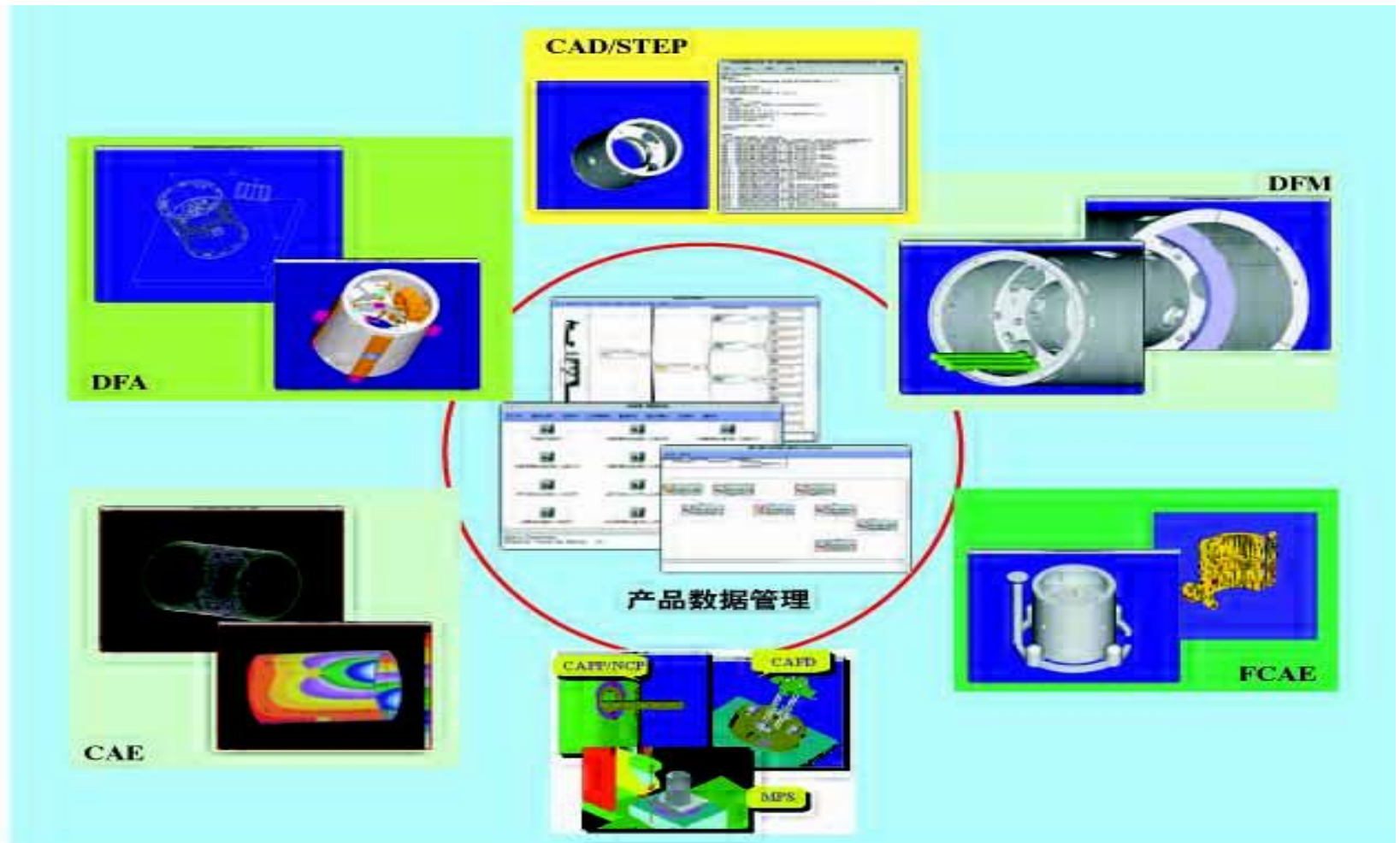
如果是不同厂商的**CAX**软件，由于采用的分别是**STEP**的子集，信息集成还要做一点工作。

这类信息集成，有大量的、包括有一定水平的研发工作可做，如：

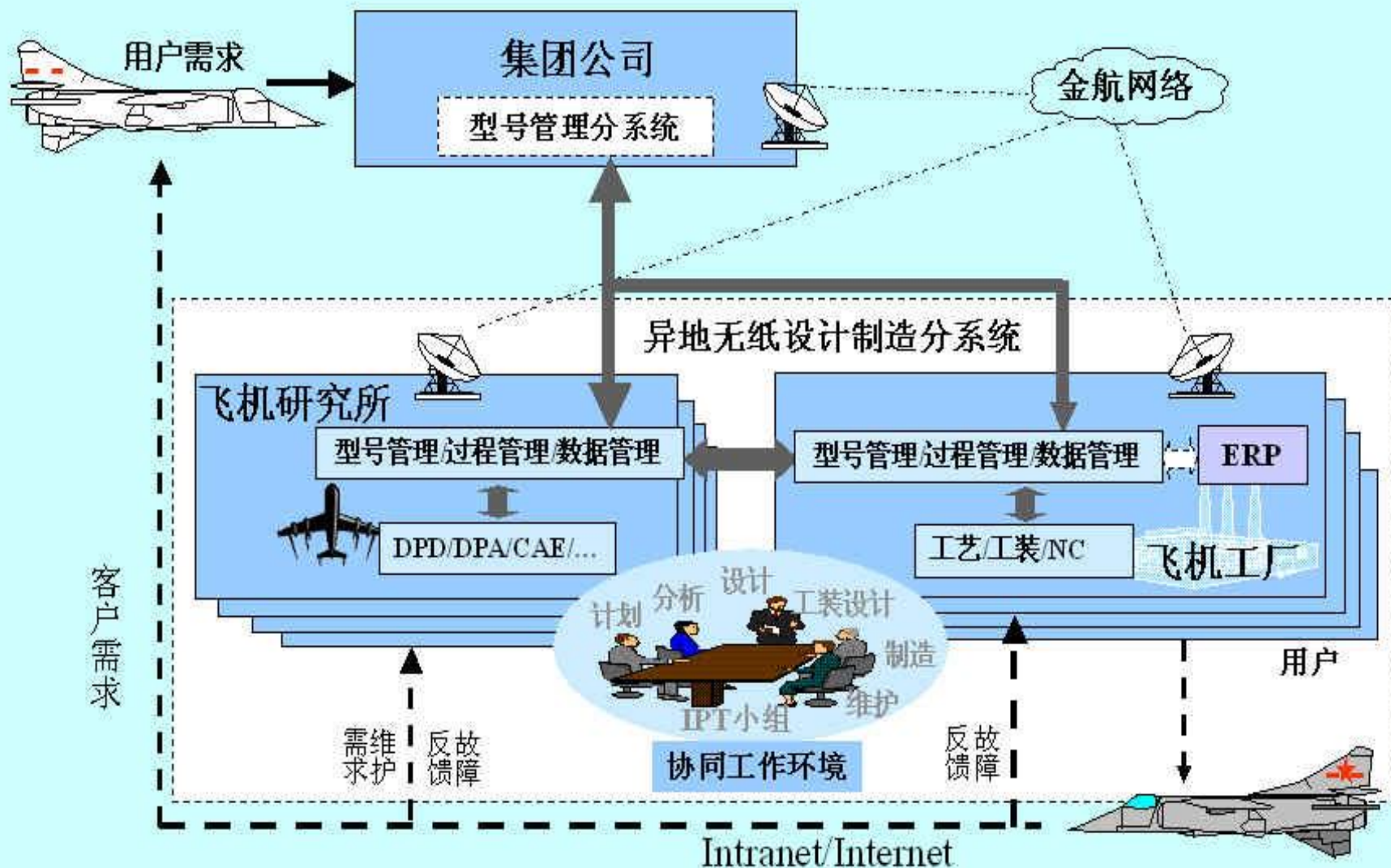
在信息集成基础上的虚拟装配、虚拟制造、并行工程等。无论军用、民用，几乎100% 有效。

如果加上**MES**，可以实现数字化车间，集成产品的设计过程和加工制造过程。然后必然是要实现与**ERP**的集成。

网上并行工程、虚拟制造，
缩短产品开发时间40%



航空行业信息集成

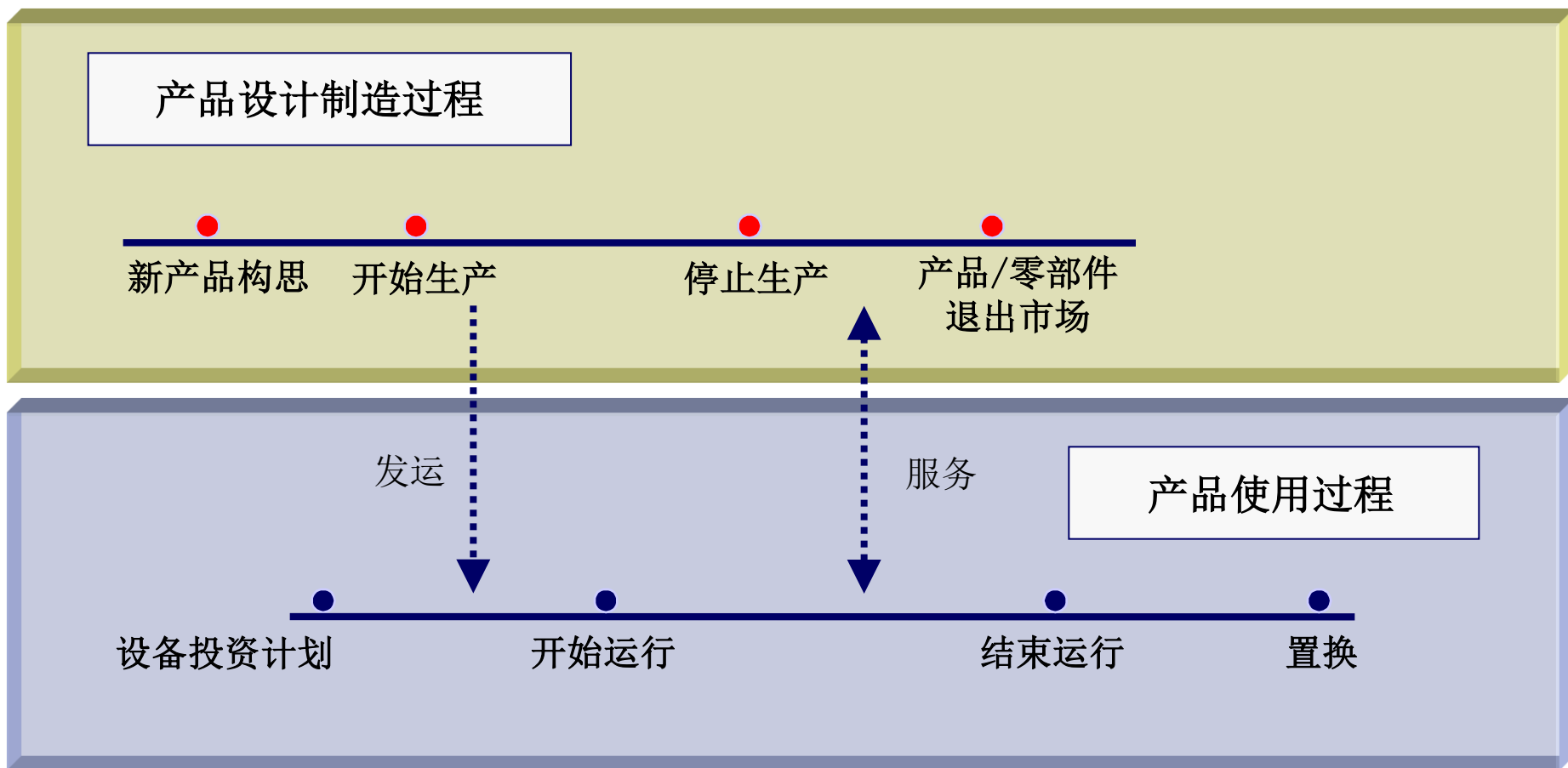


如果要实现**设计**过程与**管理**的信息集成，还应该有一个**编码系统**（覆盖企业供应链内外部涉及的产品、零部件、原材料等）以及**BOM**表（联系设计和管理），在此基础上，**PLM**平台可以满足这个需要。

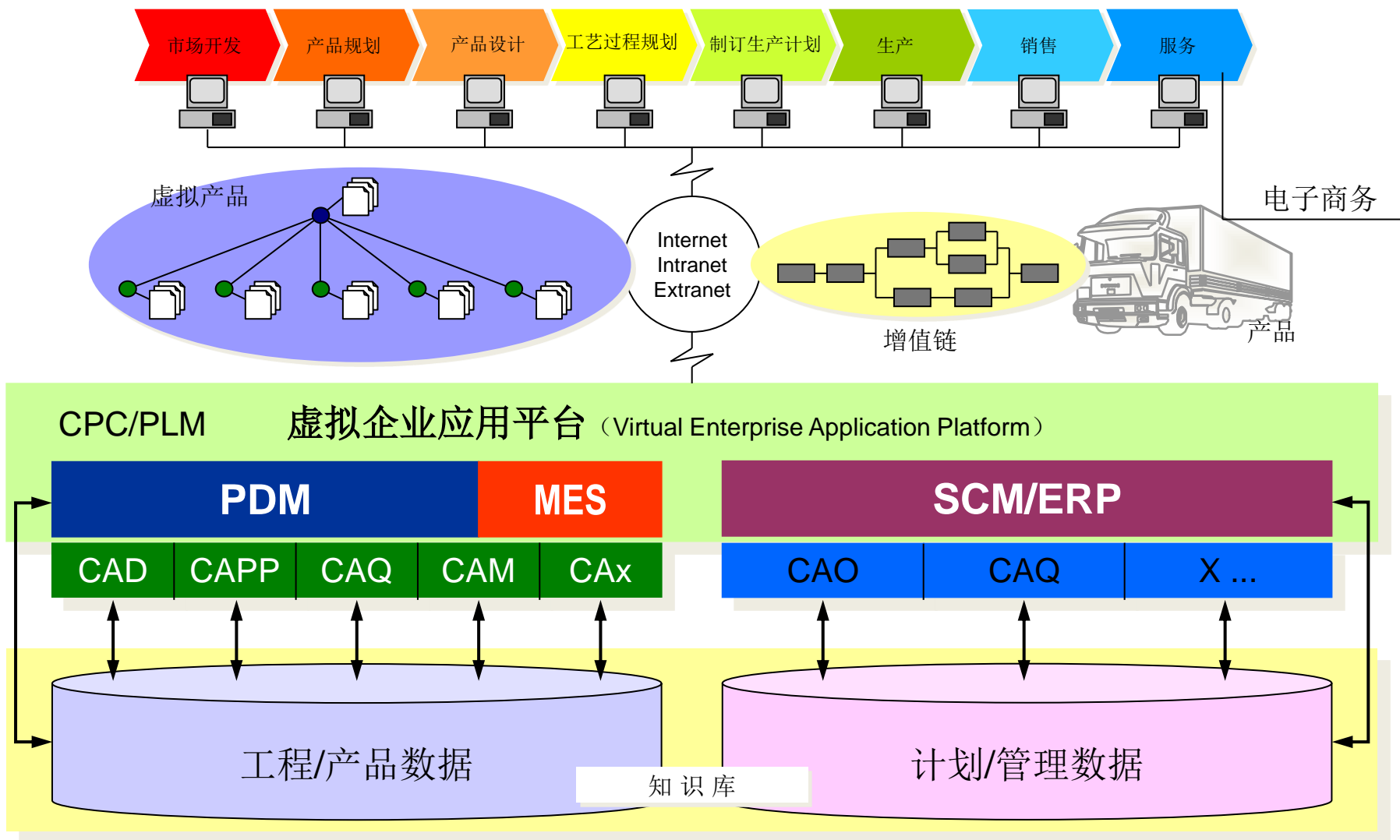
问题是我国的**PDM**、**PLM**都是小型软件为主，大型的这类工具软件，是我国的短板。

产品全生命周期管理 PLM

产品全生命周期 = 产品设计制造过程 + 产品使用过程



PLM平台

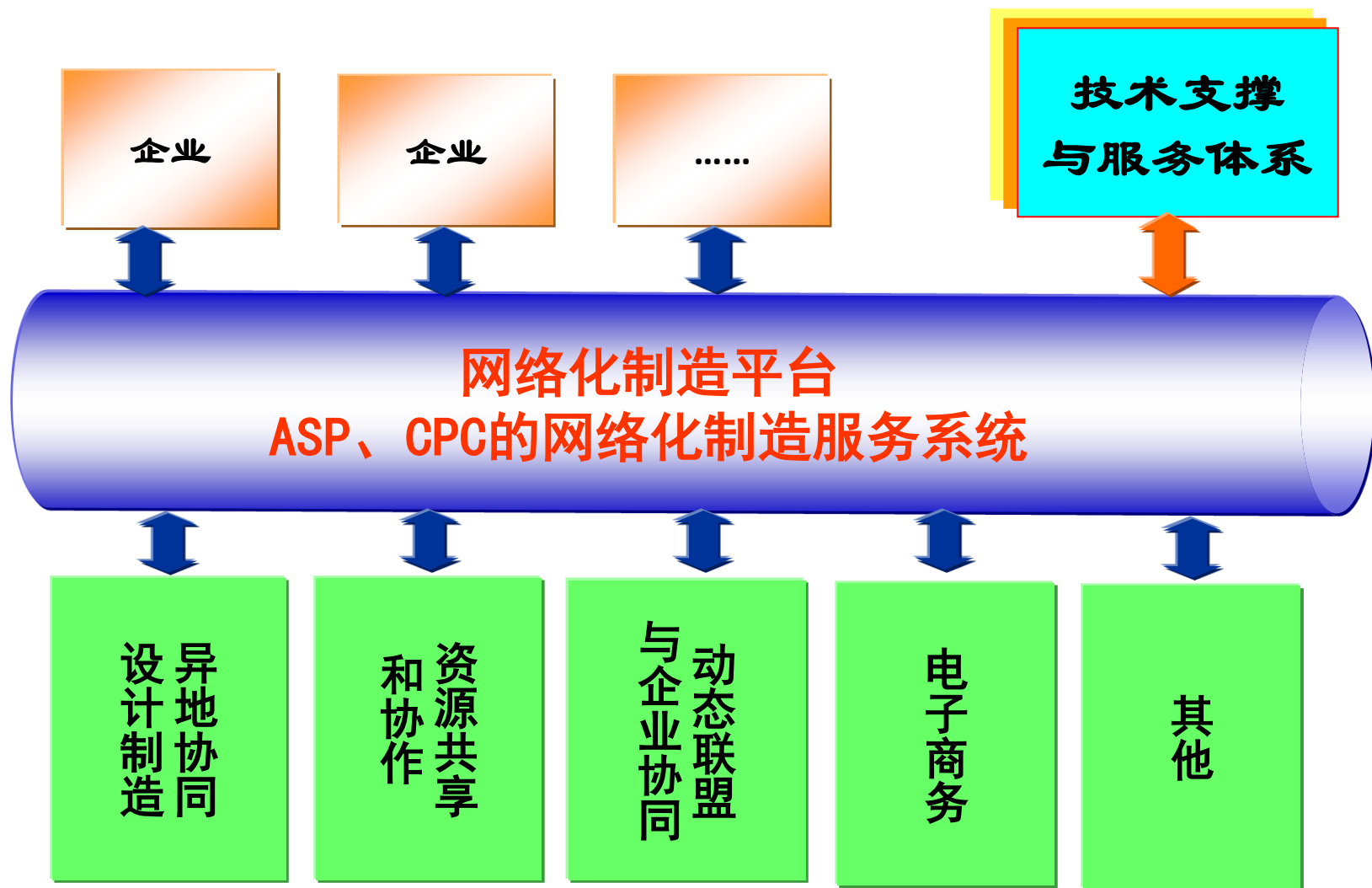


对于流程工业，其信息集成主要是异构数据库之间的信息交换。

过程控制需要实时数据库，对现场的传感、状态、控制、执行等信息的存储。而MES, 特别是ERP（采用关系数据库）不需要这么高频率的采样。

这个数据的转换（当然包含了集成）是应该由相应的DCS厂家提供的。

3, 协同设计、仿真和优化——互联互通互操作的信息平台（离散制造业）



应用服务提供商（ **ASP** ）和协同产品商务（**CPC**），
以**ASP**为例（不是一般的，而是可以支持协同产品开发）

- ASP工业协会定义：通过互联网，从数据中心为多个实体提供和管理**应用服务**。
- 基本含义：ASP是一种面向商业用户，以在线方式和租赁形式，提供包括硬件、软件和信息服务在内的系统解决方案的网络增值服务类型。
- 扩展：泛指基于网络的应用服务，包括基于网络的经营、物流、供应链、客户管理、生产制造过程的服务、CAE等相关应用服务 ……

ASP的商业模式

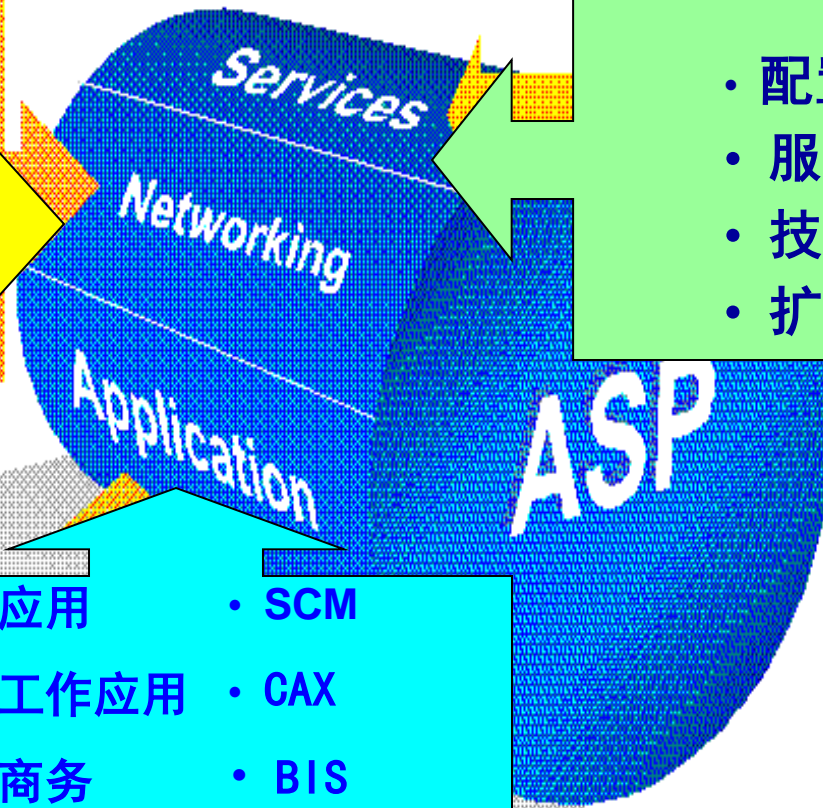


ASP 提供的服务

- 网络平台
- 管理服务
- 数据中心

- 配置
- 服务支持
- 技术培训
- 扩展服务

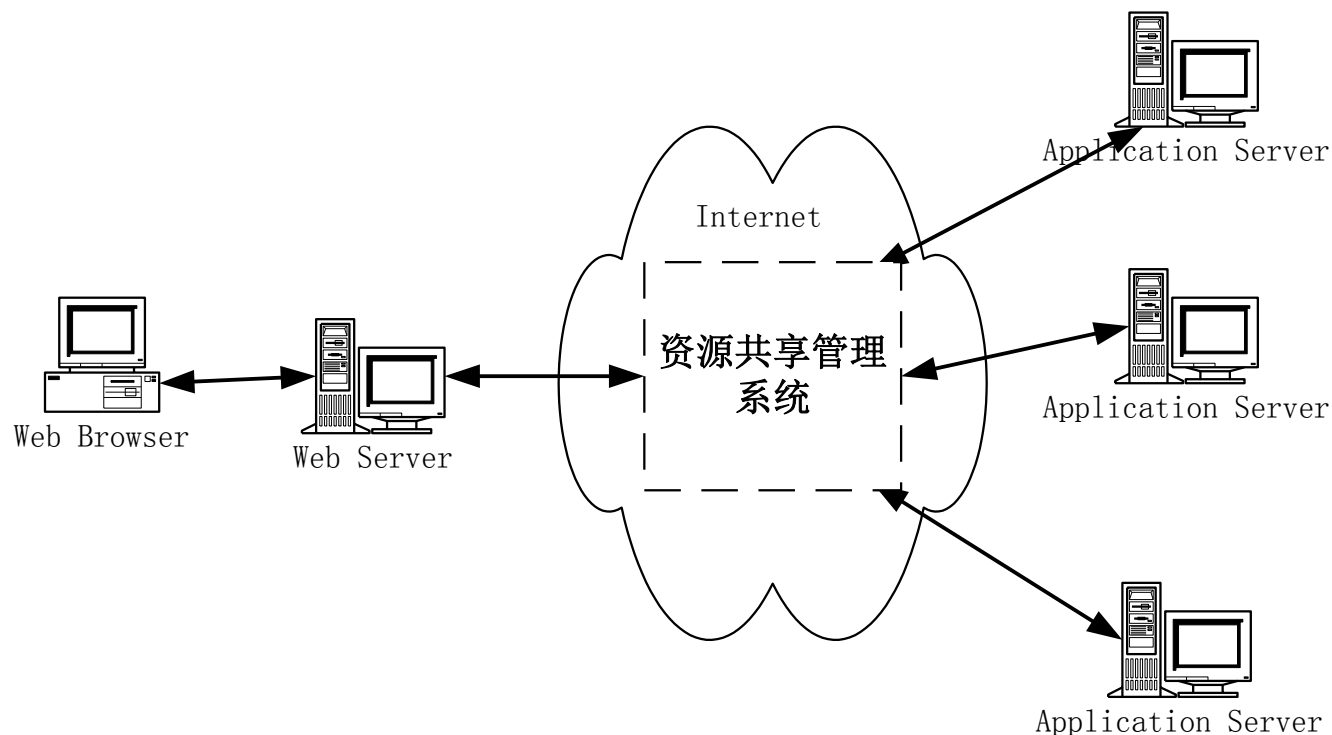
- 个人应用
- 协作工作应用
- 电子商务
- CRM
- SCM
- CAX
- BIS
- 其他应用



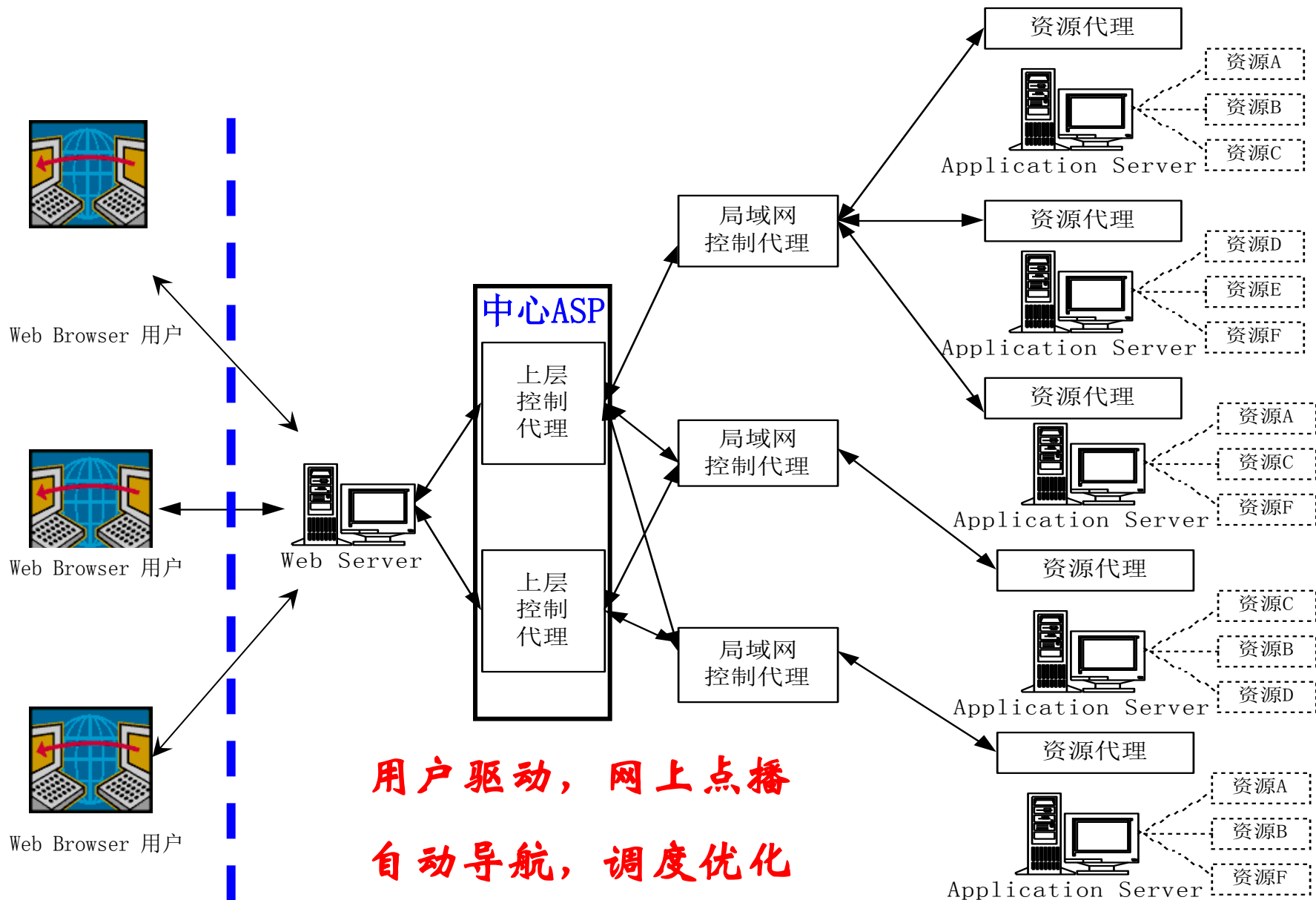
ASP的特征

- 以应用为核心：通过签定商务协议，向用户提供某项应用并负责管理这项应用；
- 出售应用访问：可以为客户提供租赁形式的应用服务，客户企业可以不必在设备、软件、人员等方面作大规模的投资，而外包给ASP企业，按使用周期付费，降低企业应用系统的投资风险和初期投入；
- 应用统一管理：ASP服务一般在一个中心位置进行管理，客户通过互联网进行远程访问所需的应用；
- 一对多的服务方式：ASP提供统一标准的应用包，为不同用户提供专业化的应用服务；
- ASP对应用负责：多数情况下，ASP与几家合作伙伴一起提供某一项应用，但由ASP对用户最终负责。

ASP框架



- 基于Browser-Web, Server-Application, Server三层结构
- 在Web Server和Application Server之间构建管理与调度系统



ASP应该：

- ASP的主要特点是用户的多样性而带来的需求的多样性，从而带来应用模式的多样性、共享资源的多样性、商业模式的多样性、安全保证的复杂性、计费方式的复杂性。
- 开展ASP平台的实现模式、应用模式和商务模式的研究，将ASP平台做“精”，做“深”，避免退化为一般的门户网站

ASP协同产品设计平台

- 采用Web浏览器/Web服务器/局域网控制代理/应用服务器的四层结构；
- 采用自适应的png格式图像压缩与解压缩，局部更新png格式，并进行三次样条插值的图像压缩与传输，达到实时同步交互式协同设计；
- 无同时登陆人数限制；无登陆人员地点限制；
- 设计人员可以在协同设计的过程中通过在线交流功能随时交流；
- 平台具有跨操作系统的能力：可以安装在Windows 2000/2003, Windows XP, Unix, Linux...系统下，而且对于客户端没有任何限制。

ASP服务平台的实现（要求）

- 建立基础框架，支持跨地域、行业的多种应用服务
- 实现用户跨平台点播，自动导航
- 实现平台之间互惠互利的互联、互通和互操作的资源共享
- 原有平台既能独立运行，又能集成运行，任何平台的加入和退出都不影响其它平台的运行。

实现：FIA框架

- 联邦(Federation)是分布服务系统，它由若干个相互作用的联邦成员(Federate)组成，而每个联邦成员则是一个具体的网络化制造服务平台或是一个参与联邦执行的应用系统。
- 联邦执行是指在联邦运行过程中，联邦管理根据联邦成员的请求，用一个指定的联邦成员及相关的系统，为实现联邦成员间的交互而创建的一个虚拟世界。

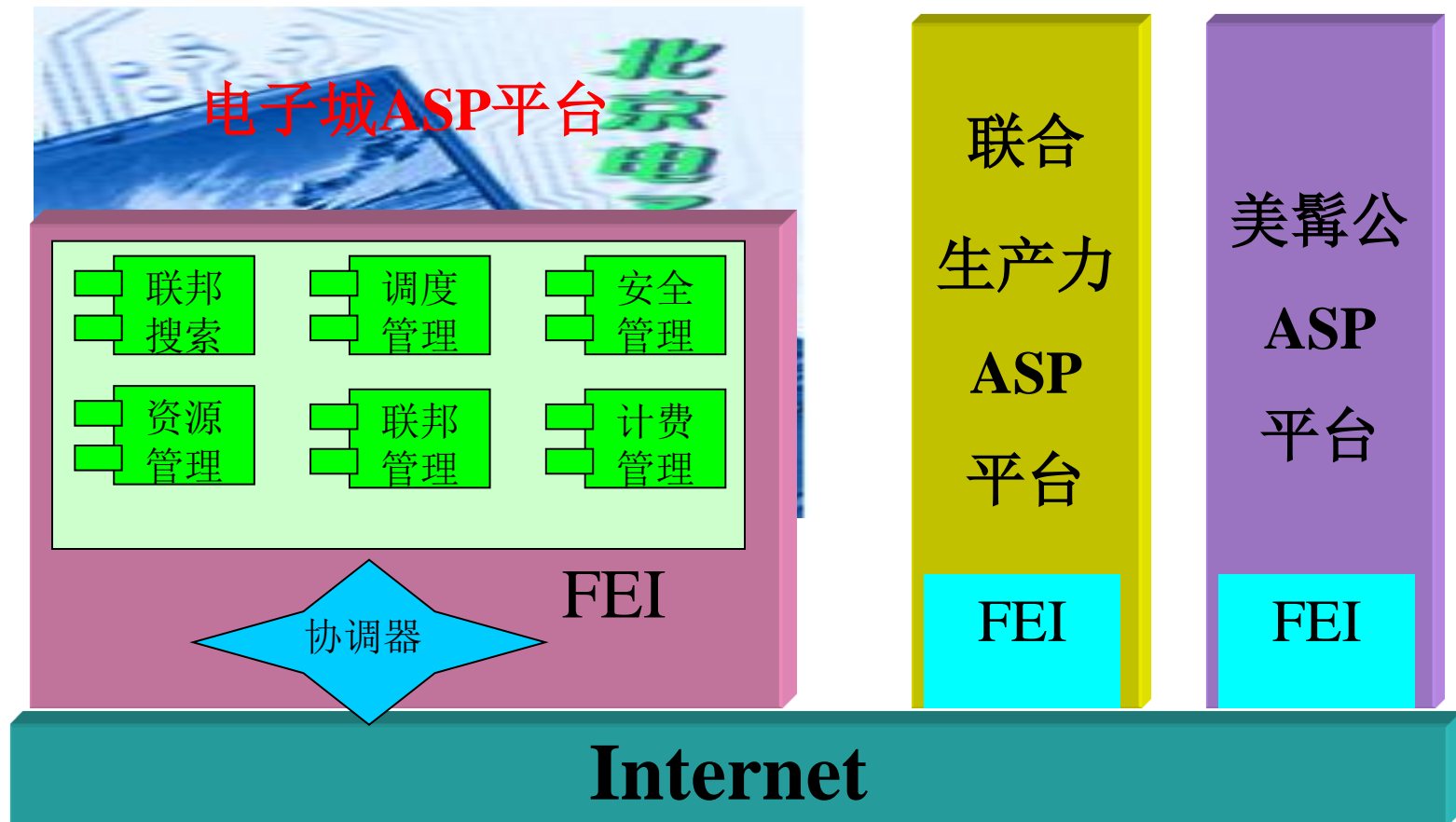
FIA框架

- 借鉴HLA联邦集成与GLOBUS的思想，提出了“联邦集成框架”（FIA—Federation Integration Architecture）
- FIA不是一个系统的实现，而是一种平台集成的框架体系标准，不仅要实现平台的互联、互通，更重要的是要实现网络化制造平台之间的互操作

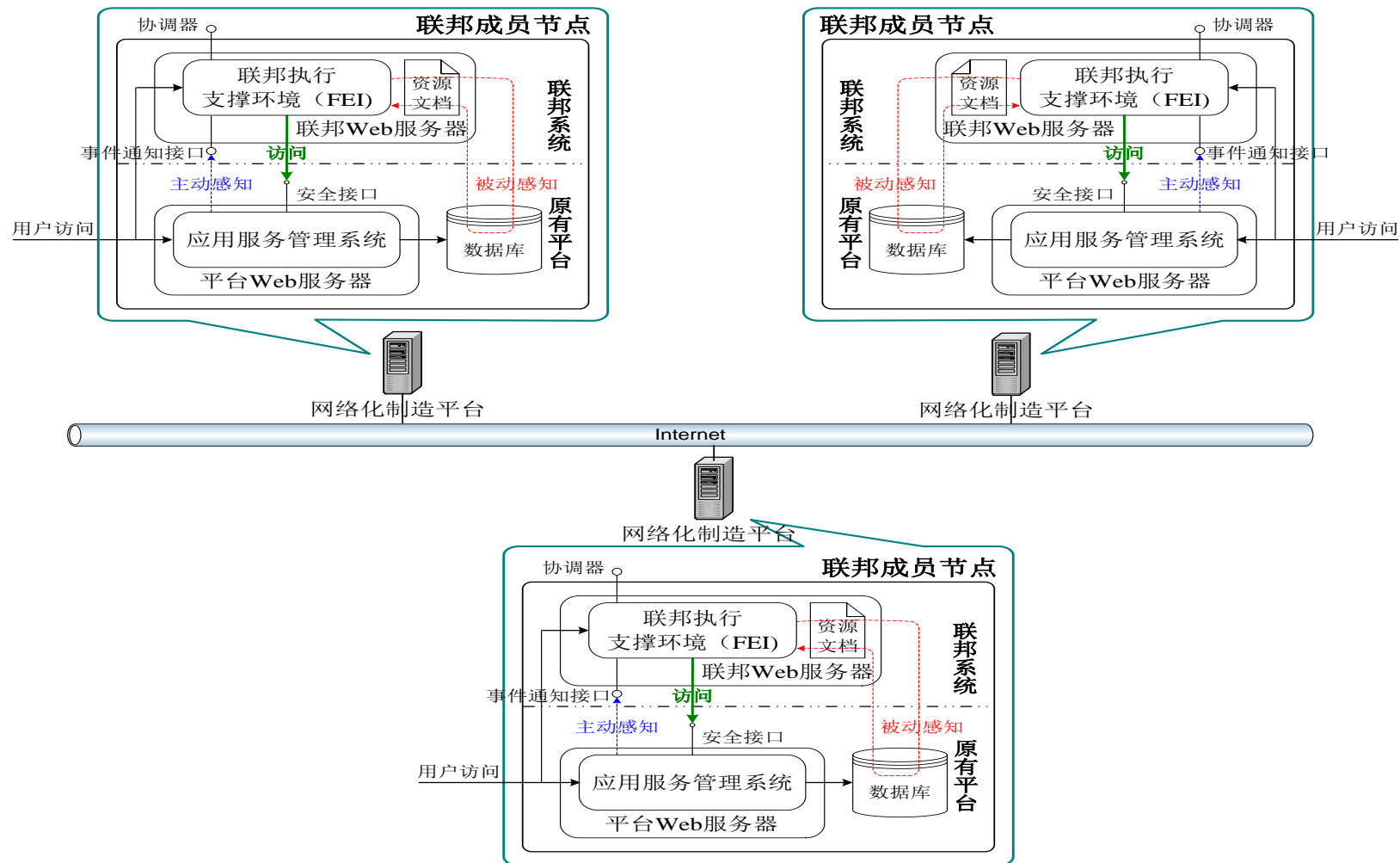
FIA框架

- FIA主要由3部分组成：
 - 规则(rules)
 - 对象模型模板 (OMT)
 - 联邦执行支撑环境 (FEI Federation Executive Infrastructure) 接口规范说明 (interface specification)
- 联邦执行支撑环境 (FEI) 作为 FIA 接口规范所规定服务的软件实现
 - 其功能类似于某种特殊目的的分布式操作系统，为联邦成员提供执行时所需的服务。
 - 主要功能6种，联邦管理、资源管理、搜索管理、计费管理、调度管理和安全管理。

FIA框架的一个例子



FEI接口规范



关键技术

联邦集成核心是开发一个联邦执行支撑环境，安装在各平台之中，通过该系统实现各平台之间联邦形式的集成，关键：

- 基于数据过滤机制的动态资源信息按需传输技术
 - 采用声明管理和数据分发管理的思想，基于“匹配”机制
- 分布式共享资源的服务调度技术
 - 基于分类学对共享资源进行分类，将复杂的调度转换为根据调度策略中描述的约束，对搜索结果的进行分类
 - 达到“尽可能的提供符合约束条件的调度结果”并“兼顾服务的响应时间”两者之间的平衡
- 基于配置文件和广播搜索模式的跨平台联邦搜索技术

关键技术（续）

- 网络化制造联邦集成平台的安全授信技术
 - 保证本平台的数据不被越权的泄露、修改、利用、限制和破坏——采取口令字控制
 - 防止本平台的用户资料被其他的平台获得——采取用统一身份标识代替用户访问
- 分布共享资源动态监测和数据同步技术
 - 采用“复制”同步技术来实现，确保分布在不同地点的数据自动同步更新，从而保证数据的一致性
- 基于WTO模式的互激励集成计费管理技术
 - 参照WTO（世界贸易组织）模式，建立联邦成员共同遵守的运营协议，以及联邦成员之间互利互惠的特定服务协议

本平台与Pc anywhere、VNC、Terminal Service、NetMeeting的比较

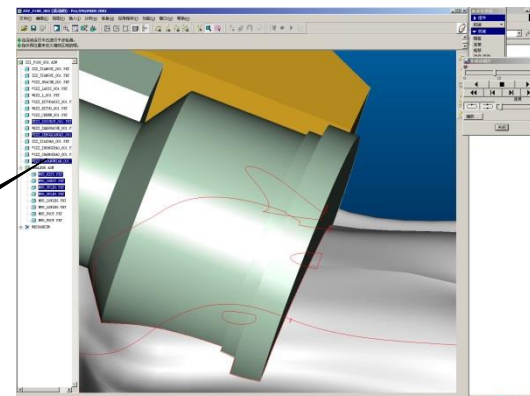
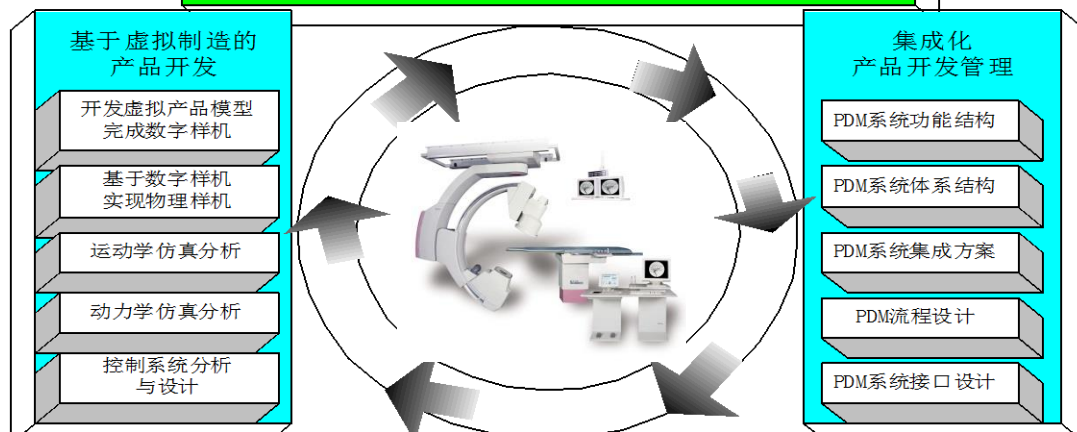
产品项目	Pc anywhere	Vnc	Terminal service	NetMeeting	ASP异地协同设计平台
功能	远程控制，视频会议	远程控制、管理	远程控制、远程管理	视频会议、语音交换、在线chat、白板画图，以及用直观的方式远程控制	在线协同设计、远程控制、在线chat
多人协同	最多2人协同	最多2人协同	最多2人协同	多人协同	支持多人系统
地理限制	一人必须在本机	一人必须在本机	地理位置任意	一般在局域网中使用，广域网效果差	地理位置任意
权限分配与冲突消解	服务端能够分配权限	无权限分配与冲突消解机制	无权限分配与冲突消解机制	服务端能够分配权限	权限分配与冲突消解健全，并且可以定制
3D图形的支持效果	一般	差	好	差	好
跨平台	否	有多平台的支持	否	否	是
可扩充性	差	差	差	差	好
主要缺点	功能简单，共享一个会话，不能多人同时登录	共享一个会话，不能多人同时登录，速度比较缓慢	要购买license，并且license比较贵。服务端必须是Windows操作系统	对图像的传输支持不是很好，特别对于有二级图形缓存的大型设计软件来说，在使用中会出现问题，不如不能定时刷新某些区域。	
客户端是否安装	要	要	WinXP以后不需要	要	不需要，在浏览器中运行

应用例子，万东医疗网络化协同设计

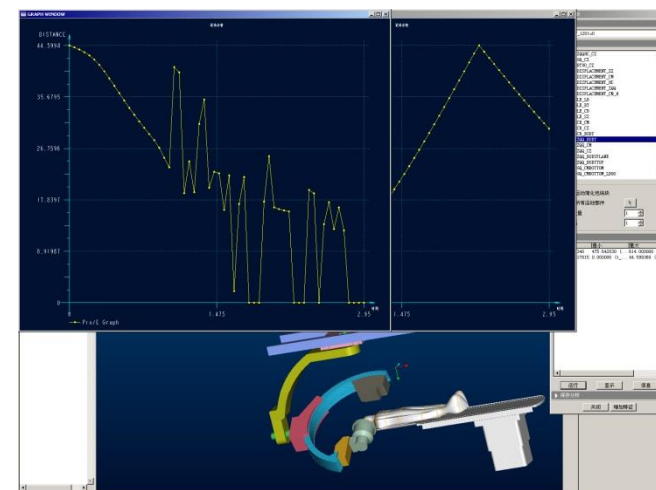
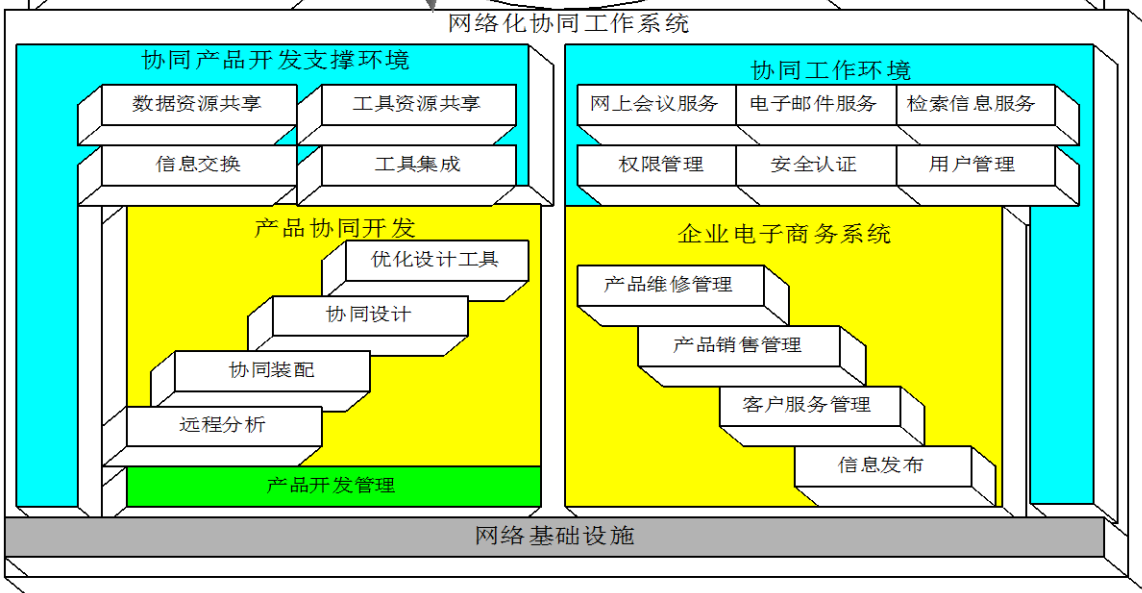
- 万东和清华大学异地协同开展了医用心血管造影介入治疗系统C型臂的运动防碰和动态稳定性仿真分析和改进、优化，新开发产品CGO-3000和原产品CGO-2100C相比，性能有了显著提高，产品达到了并局部超过了当前国际同类产品的技术指标。

产品型号	CGO-3000	PHILIP同类产品	GE公司的LC+型 C形臂系统
旋转造影速度	40°/s	30°/s	35°/s
绕水平纵轴转动角度	范围 ±120°	范围±90°	范围-117° ~ +105°
C臂绕水平横轴转动	-45° ~ +50°	±90°	-50° ~ +45°

产品开发过程质量控制与管理



利用运动回放检测干涉



旋造干涉有碰撞情形



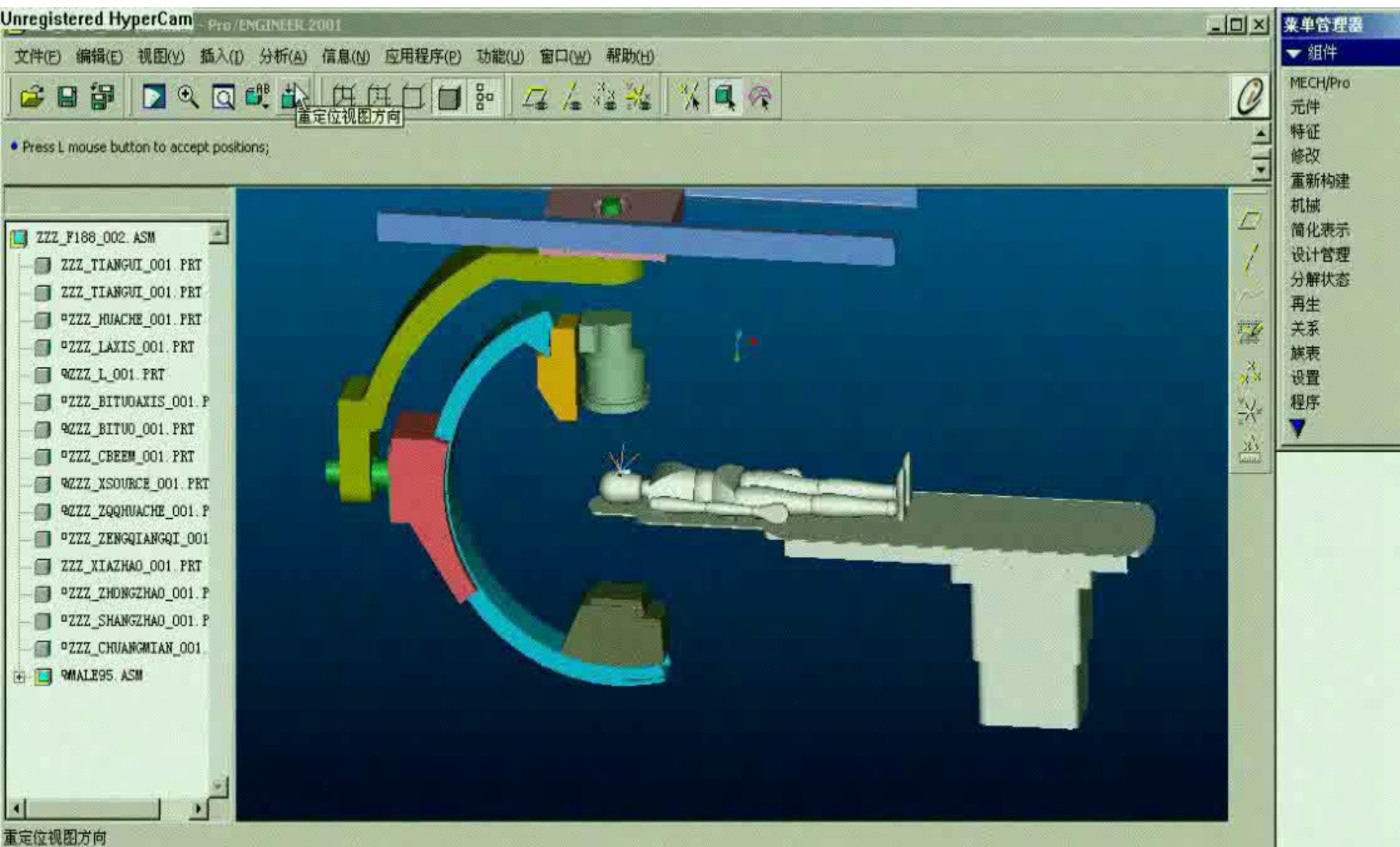
INTERNET

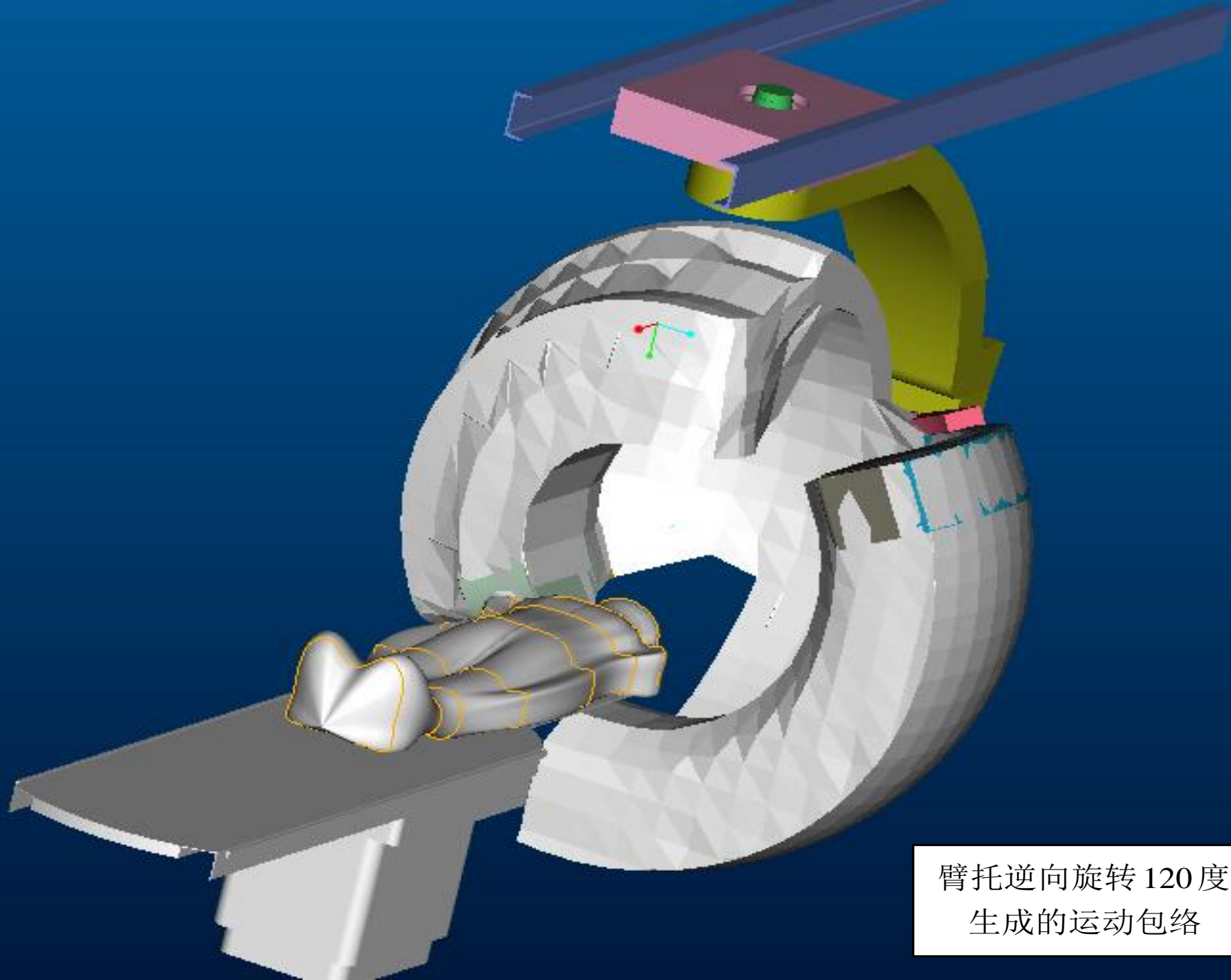
万东基于网络开发医用
心血管造影介入治疗系统

CGO-3000 血管造影及介入治疗系统

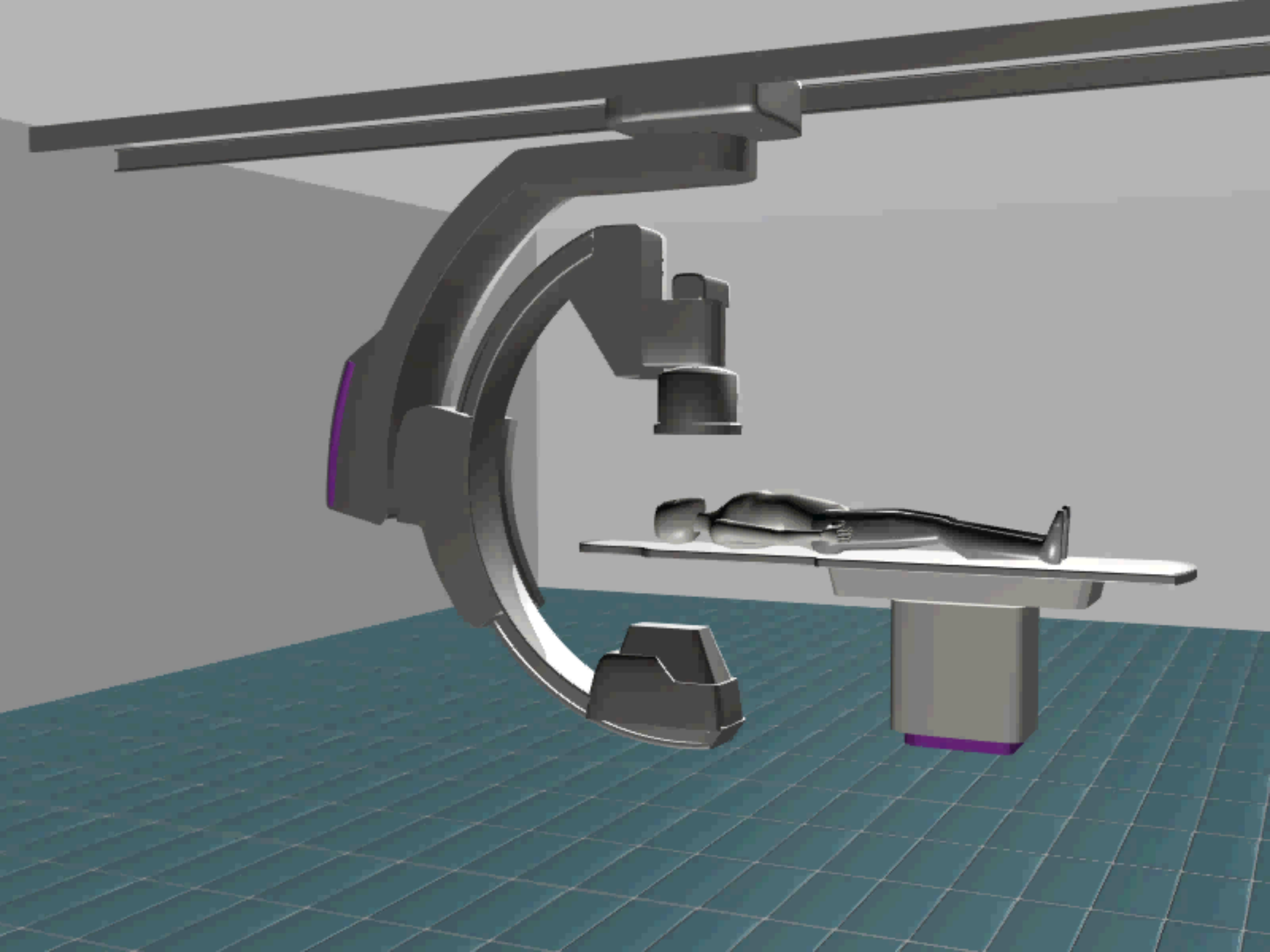


自动避碰虚拟设计

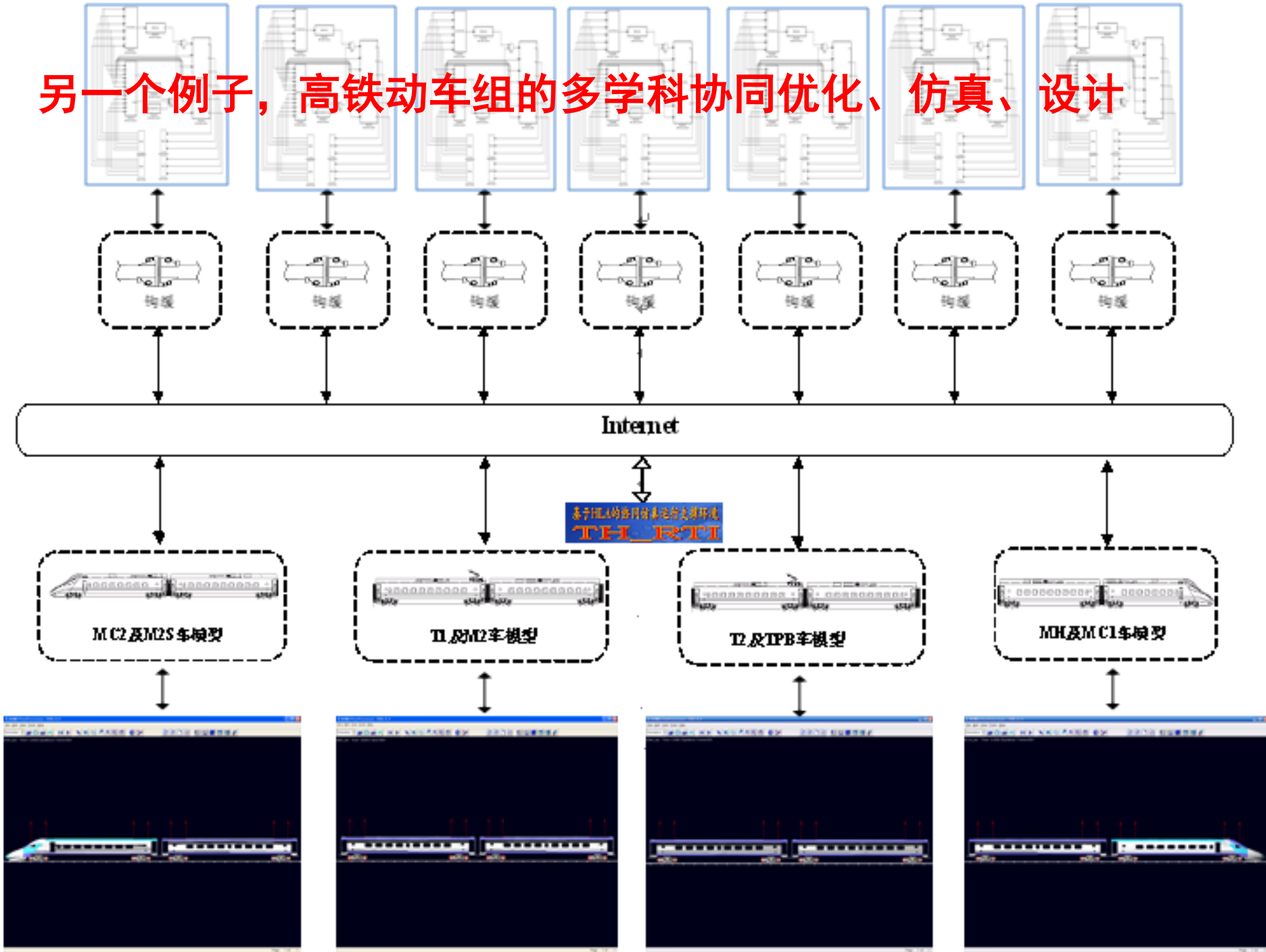




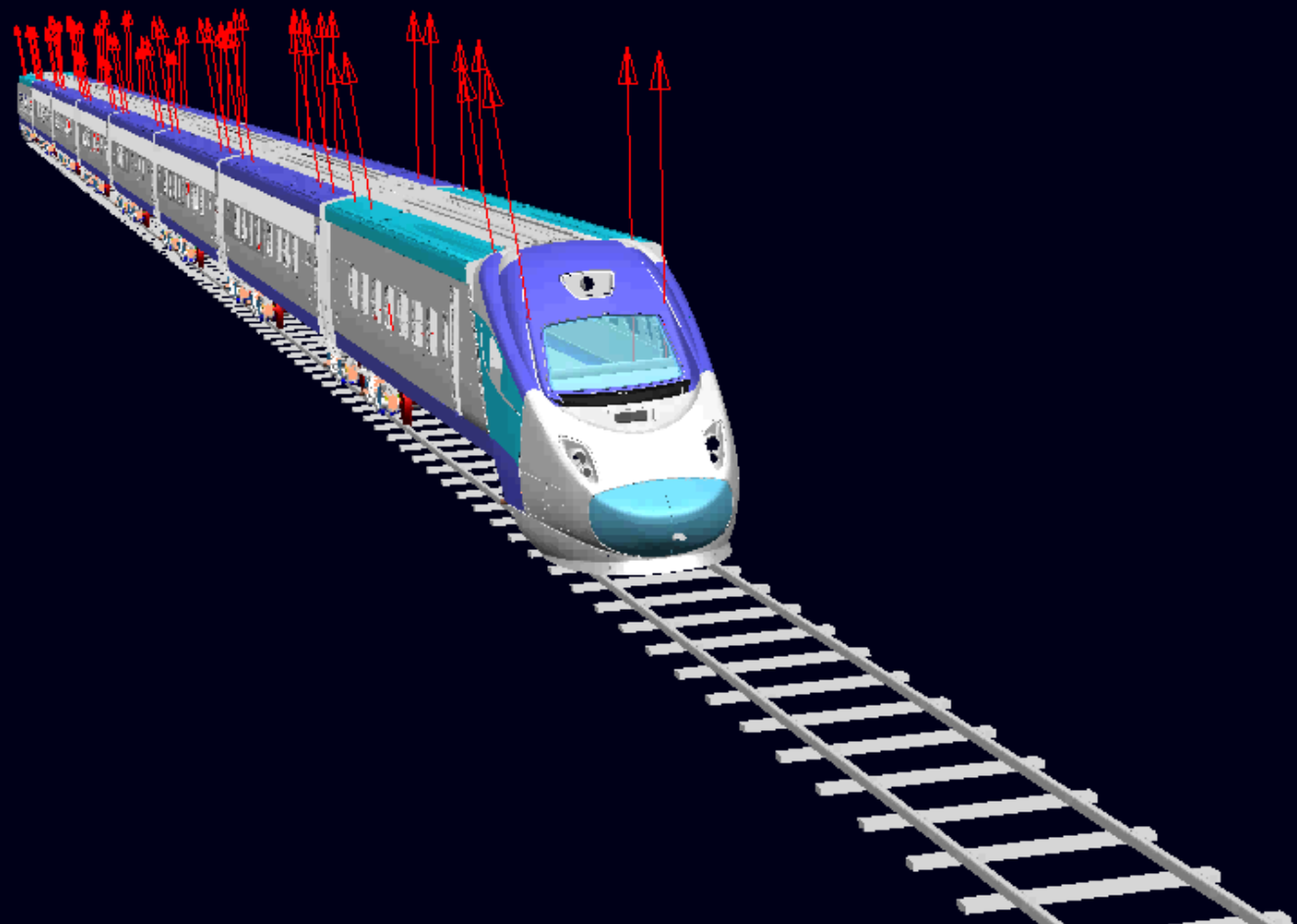
臂托逆向旋转 120 度
生成的运动包络



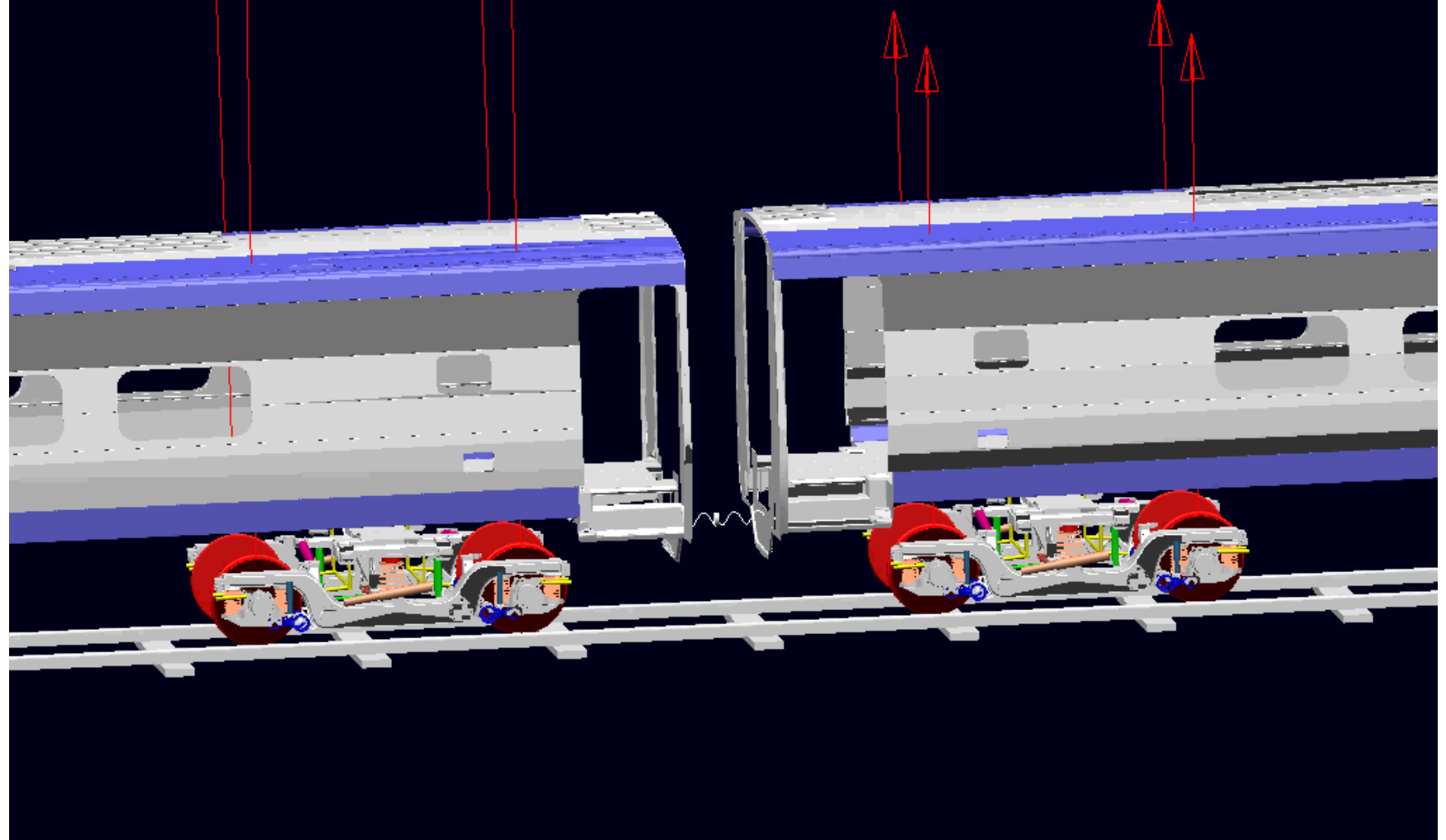
另一个例子，高铁动车组的多学科协同优化、仿真、设计



SR300_V25_8_dyn Time= 0.0000 Equilibrium Frame=0001



SR300_V25_8_dyn Time= 0.0000 Equilibrium Frame=0001



4, 一体化优化运行——建模与优化平台

信息化、工业化的协同发展实质上是要用信息化解决工业化过程的经济增长和质量、成本、资源、环境的关系中多方面矛盾的协调。

这是一个多目标优化问题（不能采用常规的加权为单目标求优）

即使对于一个企业，涉及：

各种约束，变量耦合、高维、不确定性、非线性等复杂条件下的求解

这里提出一种方法论以及智能建模、智能优化等多种算法

从应用于大型企业的案例及取得的明显效益说明方法是有效的。

实际上，这样的方法可以应用于其它场合。

从企业的优化运行需求看，是制造信息化、智能化的深层次的问题

4-1, 问题的提出

任何企业都希望：

产品上市尽可能快（制造周期短、全部合同的拖期时间最短）

质量尽可能好

成本尽可能低

能耗尽可能低

排放尽可能少

物耗尽可能低

这就是我们在企业信息化中强调的效益驱动要体现在

T、Q、C、S、E 这些具体的指标上。

过去都是定性的处理这些指标，能不能有定量的办法，科学地兼顾方方面面？

问题是相当复杂的：非结构化问题、不确定性、时滞，数据样本少、变量类型多……。还可能有问题规模大（变量多）、强约束等等

过去的确很难进行定量的分析，智能技术和方法提供了可能性。

4-2, 问题的形式化描述

例如, 企业的主要优化运行指标 (同时满足各种指标的极小、极大)

$\min M, \min T, \max U, \min W, \max Q, \min E, \min R, \min G, \min P$

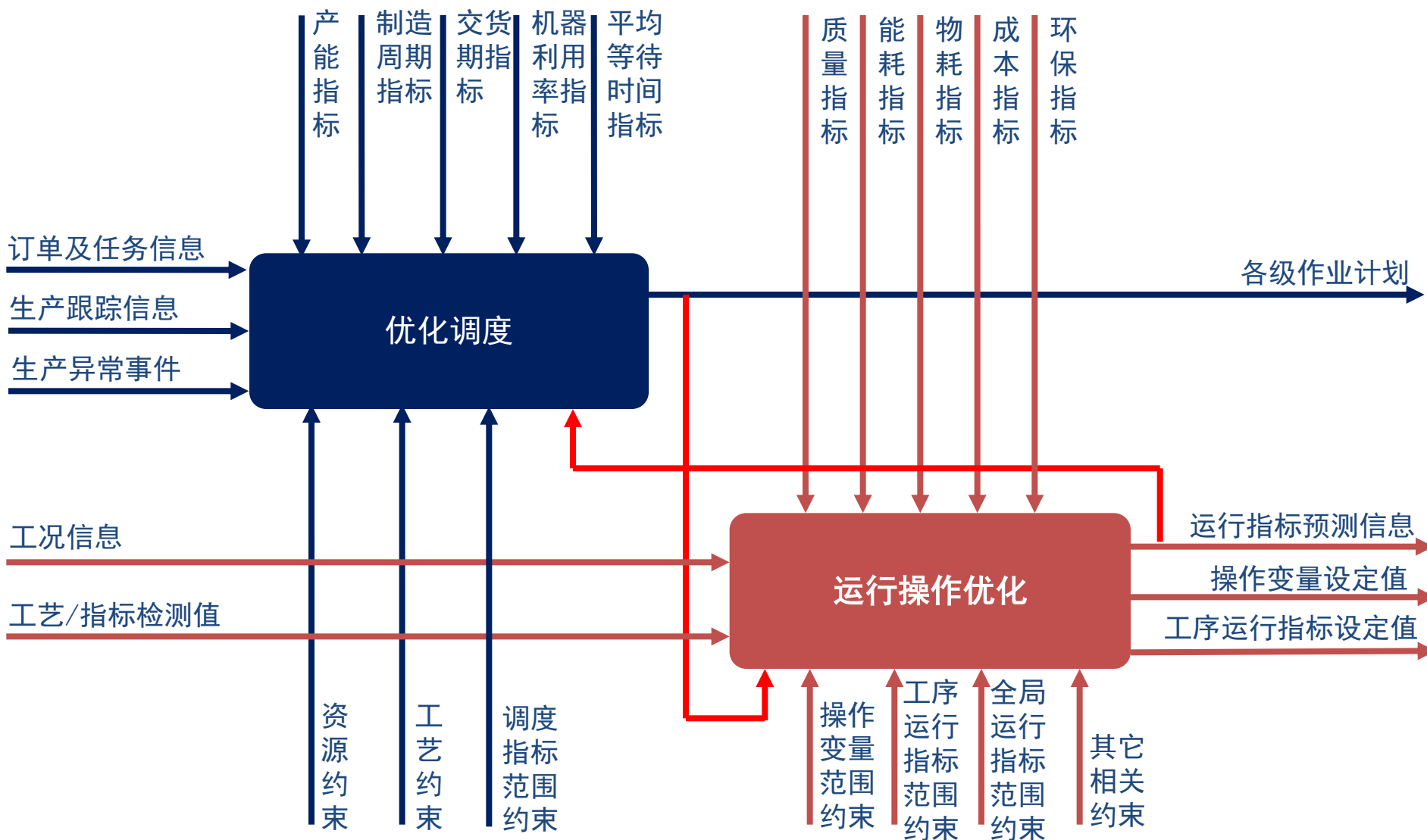
- M - 制造周期
- T - 总拖期数/总拖期时间
- U - 关键机器平均利用率
- W - 关键操作平均等待时间
- Q - 产品质量
- E - 能耗
- R - 物耗
- G - 成本
- P - 污染物排放

解决这类问题的现实办法是调度会, 多数只能解决产品数量、合同等问题。
基本上是定性的

首先要了解过程（工艺），确定决策变量。例如对生产运行的优化问题，主要决策变量可以是：

- **作业计划 S** ：包括每个生产任务中各操作的加工机器 m_{ij} 、加工开始时间 b_{ij} （或各操作的加工顺序）等信息，其中 $i=1,2,\dots,N$ 为生产任务序号， $j=1,2,\dots,n_i$ 为任务 i 所含操作序号
- **操作变量设定值**：令全流程中关键操作变量共有 K 个，则操作变量为 $\{p_k \mid k=1,2,\dots,K\}$ ，操作变量可为回路控制器设定值或其它工艺参数
- **工序运行优化指标设定值**：令全流程中工序运行优化指标共有 L 个，则运行优化指标设定值为 $\{a_l \mid l=1,2,\dots,L\}$

问题描述



主要约束

■ 初始条件 I

- ✓ 生产订单信息、生产进度信息、原料/能源信息、生产工况信息、相关操作变量设定值、相关工艺参数/指标检测值等

■ 工艺约束

- ✓ 生产任务中各操作的加工顺序需满足工艺路径要求
- ✓ 生产任务中各操作需在指定工序中的相应设备上加工
- ✓ 操作变量范围约束：各操作变量设定值需在工艺要求的指定范围内，即 $p_{kmin} \leq p_k \leq p_{kmax}$, $k=1,2,\dots,K$
- ✓ 全局和工序运行优化指标范围约束：质量、能耗、物耗、成本、环保等指标需要在指定范围内
- ✓ 其它资源和工艺约束

— 相关运行优化指标（全局和工序）计算模型

- 制造周期计算模型： $M = f_1(I, S, p_k^S)$
- 总拖期数计算模型： $T = f_2(I, S, p_k^S)$
- 关键机器平均利用率计算模型： $U = f_3(I, S, p_k^S)$
- 关键操作平均等待时间计算模型： $W = f_4(I, S, p_k^S)$
- 质量指标计算模型： $Q = f_Q(I, S, p_k^Q, Z^Q, \Delta_Q)$
- 能耗指标计算模型： $E = f_E(I, S, p_k^E, Z^E, \Delta_E)$
- 物耗指标计算模型： $R = f_R(I, S, p_k^R, Z^R, \Delta_R)$
- 成本指标计算模型： $G = f_G(I, S, p_k^G, Z^G, \Delta_G)$
- 环保指标计算模型： $P = f_P(I, S, p_k^P, Z^P, \Delta_P)$

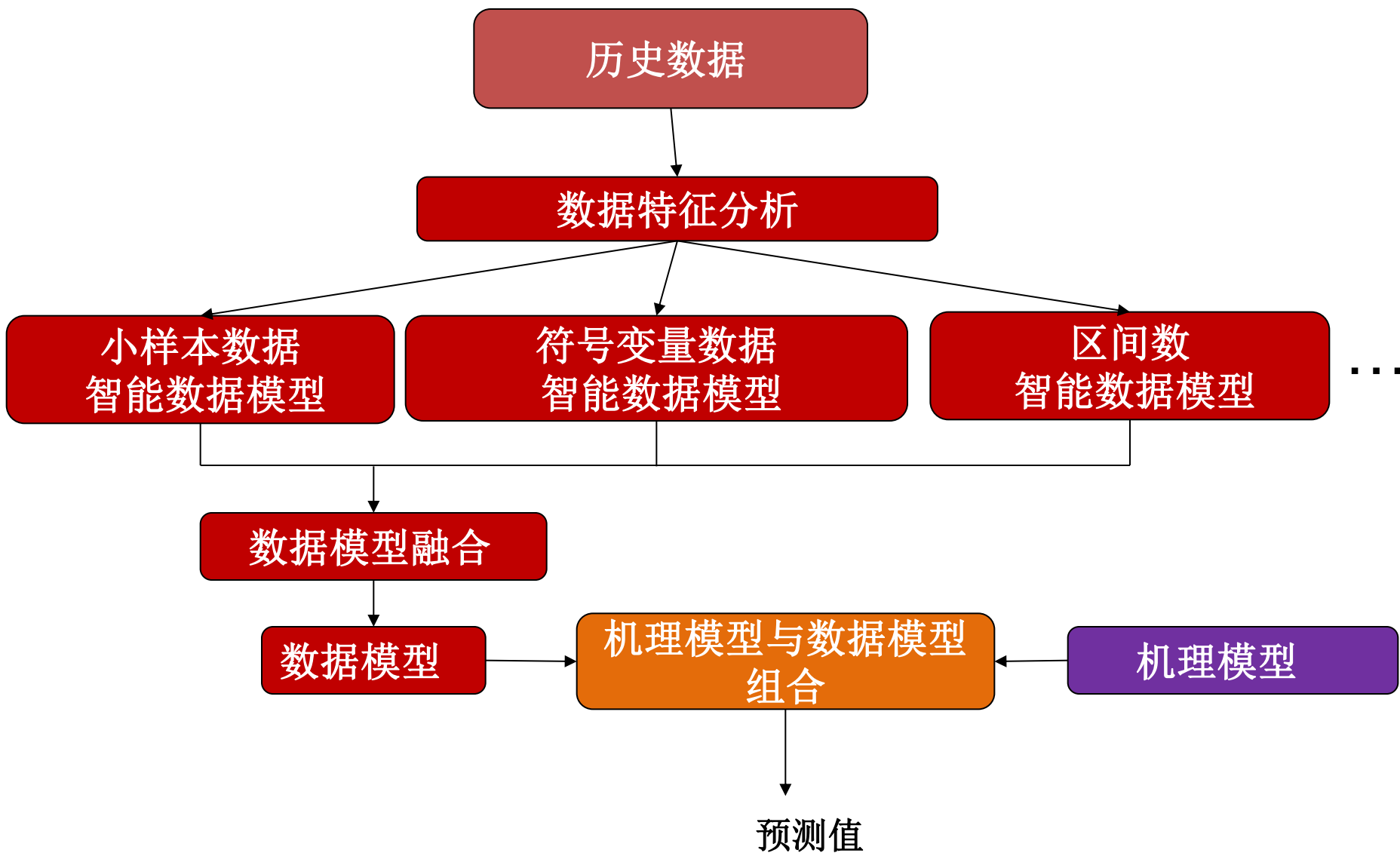
上述计算模型均与作业计划和操作变量设定值等密切相关。

- I, S, p_k^S 分别为初始条件、作业计划及与调度相关的操作变量；
- p_k^Q, Z^Q, Δ_Q 分别为与质量指标有关的操作变量、工况变量和指标模型未建模特性；
- p_k^E, Z^E, Δ_E 分别为与能耗指标有关的操作变量、工况变量和指标模型未建模特性；
- p_k^R, Z^R, Δ_R 分别为与物耗指标有关的操作变量、工况变量和指标模型未建模特性；
- p_k^G, Z^G, Δ_G 分别为与成本指标有关的操作变量、工况变量和指标模型未建模特性；
- p_k^P, Z^P, Δ_P 分别为与环保指标有关的操作变量、工况变量和指标模型未建模特性。

可以看出，建模问题是问题求解的核心问题之一，
各种优化指标、约束、以至某些决策变量都要用模型表示。
由于处理的是不确定性，都是预测模型。

4-3, 智能建模

数据模型和机理模型结合的智能建模框架



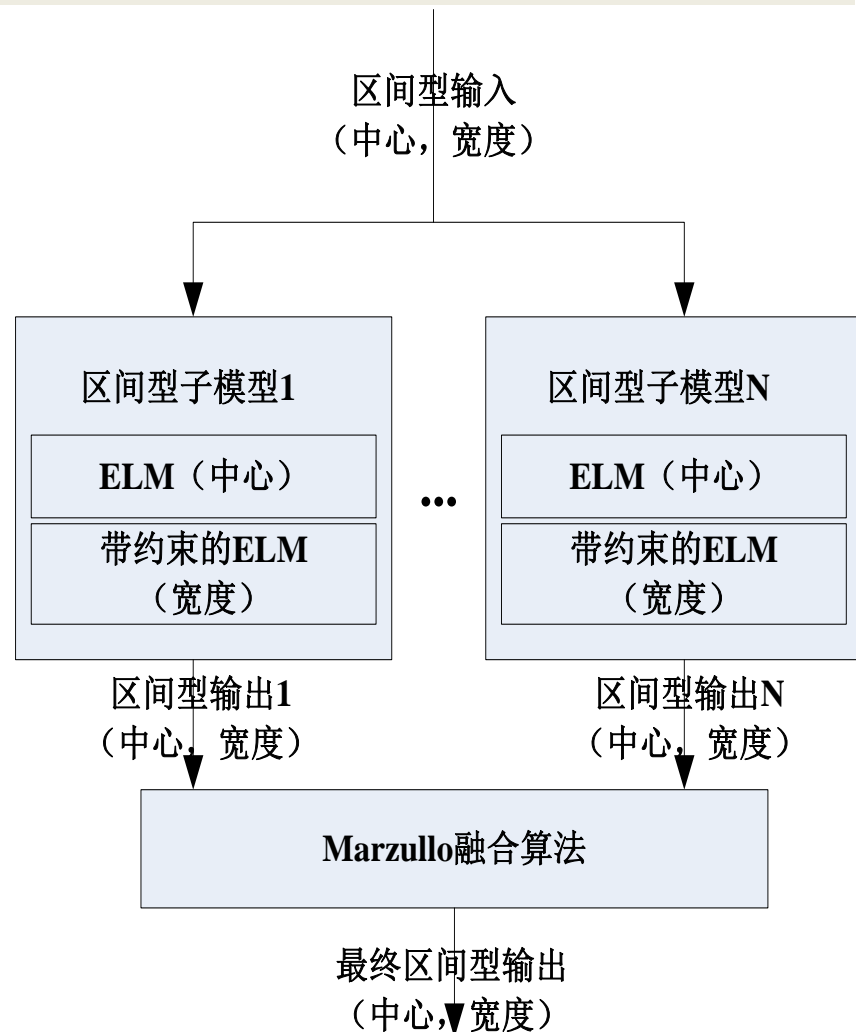
基于数据的指标预报模型智能建模方法,举例

1) 针对指标模型的输入/输出数据是**区间型变量**的特点（如钢锭的预测温度为区间数等），可使用基于区间数的ELM建模方法

□ 将区间数以中心/宽度的形式表示，
并将区间数模型转化成中心模型和宽度模型

- ✓ 采用普通极限学习机对中心模型进行建模
- ✓ 提出一种带约束的极限学习机学习算法用于宽度模型的建模，以满足宽度大于零的约束条件

□ 采用Marzullo融合算法对多个区间数模型进行融合，提高模型精度



基于区间数的ELM建模方法

- 中心模型

- 利用普通ELM方法对中心模型进行建模

$$\mathbf{T}^M = \mathbf{H}^M \boldsymbol{\beta}^M + \boldsymbol{\varepsilon}^M$$

- 上述模型中的输出权值矩阵能用如下公式进行求解

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^M = ((\mathbf{H}^M)^T \mathbf{H}^M)^{-1} (\mathbf{H}^M)^T \mathbf{T}^M$$



普通 ELM

基于区间数的ELM建模方法

- 宽度模型

- 区间型数据需要满足如下约束： $\mathbf{T}^U \geq \mathbf{T}^L$ ，这意味着对于宽度模型的输出值需要满足： $\hat{\mathbf{T}}^W = \mathbf{H}^W \hat{\boldsymbol{\beta}}^W \geq \mathbf{0}$ 。从而，宽度模型的参数学习变成了一个带约束的ELM学习问题。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^W &= \mathbf{H}^W \boldsymbol{\beta}^W + \boldsymbol{\varepsilon}^W \\ s.t. \quad \tilde{\mathbf{H}}^W \boldsymbol{\beta}^W &\geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

对将要学习的参数增加约束条件。

上述问题能够通过带约束的最小二乘进行求解

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^W = ((\mathbf{H}^W)^T \mathbf{H}^W)^{-1} (\mathbf{H}^W)^T \mathbf{T}^W + ((\mathbf{H}^W)^T \mathbf{H}^W)^{-1} (\tilde{\mathbf{H}}^W)^T \boldsymbol{\lambda}^*$$

$\boldsymbol{\lambda}^*$ 是如下所示的线性互补问题的解

$$\mathbf{v} = \mathbf{W} \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{q}$$

$$s.t. \quad \mathbf{v}^T \boldsymbol{\lambda} = 0, \mathbf{v} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}$$

其中，

$$\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{H}}^W ((\mathbf{H}^W)^T \mathbf{H}^W)^{-1} (\tilde{\mathbf{H}}^W)^T$$

$$\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{H}}^W \hat{\boldsymbol{\beta}}^W - \mathbf{c}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^W = ((\mathbf{H}^W)^T \mathbf{H}^W)^{-1} (\mathbf{H}^W)^T \mathbf{T}^W$$

基于区间数的ELM建模方法

- 区间数融合

- 生成 n_f 个中心模型和宽度模型，并进行学习，从而得到 n_f 个区间子模型.
- 假设需要预测的输入数据为: $\{(\mathbf{x}_{N+1}^M, \mathbf{x}_{N+1}^W) | \mathbf{x}_{N+1}^M \in \mathbf{R}^{n_1}, \mathbf{x}_{N+1}^W \in \mathbf{R}^{n_2}\}$, 则通过上述 n_f 个区间子模型计算其相应的输出 $(\hat{t}_{N+1,k}^L, \hat{t}_{N+1,k}^U), k = 1, \dots, n_f$

$$\begin{aligned}\hat{t}_{N+1,k}^L &= \hat{t}_{N+1,k}^M - \hat{t}_{N+1,k}^W / 2 = H_{N+1,k}^M \hat{\beta}_k^M - H_{N+1,k}^W \hat{\beta}_k^W / 2 \\ \hat{t}_{N+1,k}^U &= \hat{t}_{N+1,k}^M + \hat{t}_{N+1,k}^W / 2 = H_{N+1,k}^M \hat{\beta}_k^M + H_{N+1,k}^W \hat{\beta}_k^W / 2\end{aligned}$$

区间子模型的输出

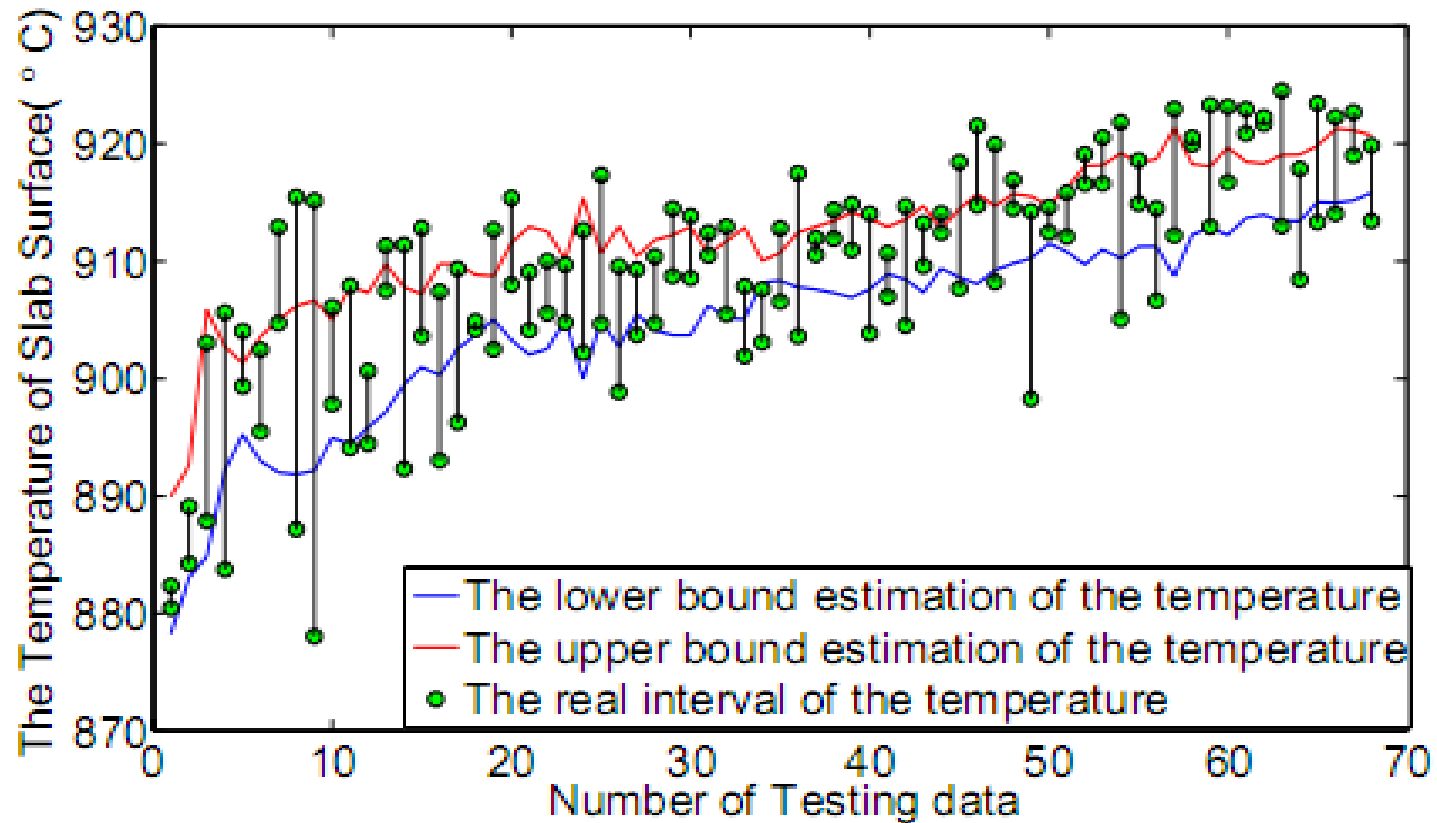
- 假设 n_f 个区间子模型中有 t 个输出值不可靠, $n_f - t$ 个输出值可靠. 根据Marzullo融合算法, 可以得到:

$$\begin{aligned}\hat{t}_{i_1, i_2, \dots, i_{(n_f-j)}} &= \bigcap_{k=1}^{n_f-j} \hat{t}_{i_k}, j = 0, \dots, t, i_1, i_2, \dots, i_{(n_f-j)} \in \{1, 2, \dots, n_f\} \\ S_{n_f-j} &= \bigcup_{\substack{\hat{t}_{i_1, i_2, \dots, i_{n_f-j}} \\ \neq \emptyset}} \hat{t}_{i_1, i_2, \dots, i_{n_f-j}} \\ S &= \bigcup_{j=0}^t S_{n_f-j}\end{aligned}$$

区间子模型输出的融合.

- 集合 S 中的最小值记为 $\hat{t}_{N+1, fusion}^L$, 最大值记为 $\hat{t}_{N+1, fusion}^U$. 则, 融合后的模型最终的输出为: $\hat{t}_{N+1, fusion} = [\hat{t}_{N+1, fusion}^L, \hat{t}_{N+1, fusion}^U]$.

Predicting the temperature of slab surface in continuous casting process



基于数据的指标预报模型智能建模方法举例（续）

一种基于非对称高斯分布贝叶斯网络和ELM的区间型指标建模方法

- 该方法比之前上述区间数建模方法的建模精度更高，建模效率更快
- 该方法采用非对称高斯分布贝叶斯和ELM方法对实际生产数据进行学习，
并通过对一对互为倒数的权值进行自适应调整获得上边界模型和下边界模型，上述两个模型分别作为运行指标区间上界和下界的预报

LF炉钢水温度预报

其推导过程可以简单地看一看

该方法采用非对称高斯分布贝叶斯和 ELM 方法对实际生产数据进行学习,并通过对一对互为倒数的权值进行自适应调整获得上边界模型和下边界模型,上述两个模型分别作为运行指标区间上界和下界的预报。↵

1) 问题描述: ↵

设训练样本为输入维数为 n , 输出维数为 1: ↵

$$\begin{aligned} & \{(\mathbf{x}_i, t_i)\}_{i=1}^N; \\ & \mathbf{x}_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,n}), i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1) \quad \leftarrow$$

ELM 模型可简写成如下形式: ↵

$$\mathbf{t} = \mathbf{h}(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta} + \varepsilon \quad (2) \quad \leftarrow$$

将非对称高斯分布引入 ELM 模型, 即↵

$$p(t | \boldsymbol{\beta}, b, w) = \sqrt{\frac{2b}{\pi}} \frac{1}{w+1} \begin{cases} e^{-\frac{b}{2}(t-\mathbf{h}\boldsymbol{\beta})^2} & \text{if } t < \mathbf{h}\boldsymbol{\beta}, \\ e^{-\frac{b}{2w^2}(t-\mathbf{h}\boldsymbol{\beta})^2} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3) \quad \leftarrow$$

则，训练数据的似然函数可写成：

$$p(\mathbf{t} | \boldsymbol{\beta}, b, w) = \left(\sqrt{\frac{2b}{\pi}} \frac{1}{w+1} \right)^N e^{-\frac{b}{2}(\|\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\beta}\|^2 + \|\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\beta}\|^2 / w^2)} \quad (4)$$

对输出权值 $\boldsymbol{\beta}$ 使用高斯先验分布，即

$$p(\boldsymbol{\beta} | a) = \left(\frac{a}{2\pi} \right)^{\frac{M}{2}} \prod_{k=1}^M e^{-\frac{a}{2}\beta_k^2} \quad (5)$$

其中， M 是隐层节点数。使用一对权值 $(w, 1/w)$ ，记为 (w_1, w_2) ，并对其进行适当的调整，可得到非对称高斯分布贝叶斯网络 ELM

$$p(\boldsymbol{\beta}_1 | \mathbf{t}) = \frac{p(\mathbf{t} | \boldsymbol{\beta}_1, b_1, w_1) p(\boldsymbol{\beta}_1 | a_1)}{p(\mathbf{t})} \quad (6)$$

$$p(\mathbf{t} | a_1, b_1) = \int p(\mathbf{t} | \boldsymbol{\beta}_1, b_1, w_1) p(\boldsymbol{\beta}_1 | a_1) d\boldsymbol{\beta}_1$$

$$p(\boldsymbol{\beta}_2 | \mathbf{t}) = \frac{p(\mathbf{t} | \boldsymbol{\beta}_2, b_2, w_2) p(\boldsymbol{\beta}_2 | a_2)}{p(\mathbf{t})} \quad (7)$$

$$p(\mathbf{t} | a_2, b_2) = \int p(\mathbf{t} | \boldsymbol{\beta}_2, b_2, w_2) p(\boldsymbol{\beta}_2 | a_2) d\boldsymbol{\beta}_2$$

2) , 算法推导

以公式(6)为例进行算法推导,为了简化,省略下标“1”。使用贝叶斯公式,后验分布 $p(\beta | t)$

及边缘似然函数 $p(t | a, b)$ 能用如下表示: \hookleftarrow

$$p(\beta | t) = \frac{p(t | \beta, b, w) p(\beta | a)}{p(t)} = \frac{(w+1)^{-N} 2^{\frac{N-M}{2}} \pi^{-\frac{N+M}{2}} b^{\frac{N}{2}} a^{\frac{M}{2}} e^{-M(\beta)}}{p(t)} \quad (8) \hookleftarrow$$

$$\text{令 } \frac{\partial \ln p(\beta | t)}{\partial \beta} = 0, \text{ 有 } \hookleftarrow$$

$$\hat{\beta} = bC^{-1}(\mathbf{H}_1^T \mathbf{t}_1 + \frac{1}{w^2} \mathbf{H}_2^T \mathbf{t}_2) \quad (9) \hookleftarrow$$

$$\begin{aligned} p(t | a, b) &= \int p(t | \beta, b, w) p(\beta | a) d\beta \\ &= (w+1)^{-N} 2^{\frac{N-M}{2}} \pi^{-\frac{N+M}{2}} b^{\frac{N}{2}} a^{\frac{M}{2}} \times \int e^{-M(\beta)} d\beta \\ &= (w+1)^{-N} 2^{\frac{N-M}{2}} \pi^{-\frac{N+M}{2}} b^{\frac{N}{2}} a^{\frac{M}{2}} \times e^{-M(\hat{\beta})} \int e^{-\frac{1}{2}(\beta - \hat{\beta})^T C(\beta - \hat{\beta})} d\beta \\ &= (w+1)^{-N} 2^{\frac{N-M}{2}} \pi^{-\frac{N+M}{2}} b^{\frac{N}{2}} a^{\frac{M}{2}} \times e^{-M(\hat{\beta})} (2\pi)^{\frac{N}{2}} |C|^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (10) \hookleftarrow$$

$$\begin{aligned}\mathbf{M}(\boldsymbol{\beta}) &= \frac{b}{2}(\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1\boldsymbol{\beta})^T(\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1\boldsymbol{\beta}) + \frac{b}{2w^2}(\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2\boldsymbol{\beta})^T(\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2\boldsymbol{\beta}) + \frac{a}{2}\boldsymbol{\beta}^T\boldsymbol{\beta} \\ &= \mathbf{M}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\beta} - \hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{C}(\boldsymbol{\beta} - \hat{\boldsymbol{\beta}})\end{aligned}\quad (11) \leftarrow$$

$$\mathbf{M}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \frac{b}{2}(\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1\hat{\boldsymbol{\beta}})^T(\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1\hat{\boldsymbol{\beta}}) + \frac{b}{2w^2}(\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2\hat{\boldsymbol{\beta}})^T(\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2\hat{\boldsymbol{\beta}}) + \frac{a}{2}\hat{\boldsymbol{\beta}}^T\hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (12) \leftarrow$$

$$\mathbf{C} = a\mathbf{I} + bH_1^T H_1 + \frac{b}{w^2} H_2^T H_2 \quad (13) \leftarrow$$

$$\ln p(\mathbf{t} | a, b) = \frac{M}{2} \ln a + \frac{N}{2} \ln b - \mathbf{M}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) - \frac{1}{2} \ln |\mathbf{C}| + \text{const} \quad (14) \leftarrow$$

由行列式的求导公式 \leftarrow

$$\frac{\partial}{\partial t} |\mathbf{F}(t)| = |\mathbf{F}(t)| \operatorname{tr} \left(\mathbf{F}(t)^{-1} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{F}(t) \right) \quad (15) \leftarrow$$

得到, \leftarrow

$$\frac{\partial \ln |\mathbf{C}|}{\partial a} = \frac{1}{|\mathbf{C}|} \frac{\partial |\mathbf{C}|}{\partial a} = \frac{1}{|\mathbf{C}|} |\mathbf{C}| \operatorname{tr} \left(\mathbf{C}^{-1} \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial a} \right) = \operatorname{tr}(\mathbf{C}^{-1}) \quad (16) \leftarrow$$

令

$$\frac{\partial \ln p(\mathbf{t} | a, b)}{\partial a} = \frac{M}{2a} + \frac{\|\boldsymbol{\beta}\|^2}{2} - \frac{\text{tr}(\mathbf{C}^{-1})}{2} = 0 \quad (17)$$

解得，

$$a = \frac{M}{\|\boldsymbol{\beta}\|^2 + \text{tr}(\mathbf{C}^{-1})} \quad (18)$$

类似的，令

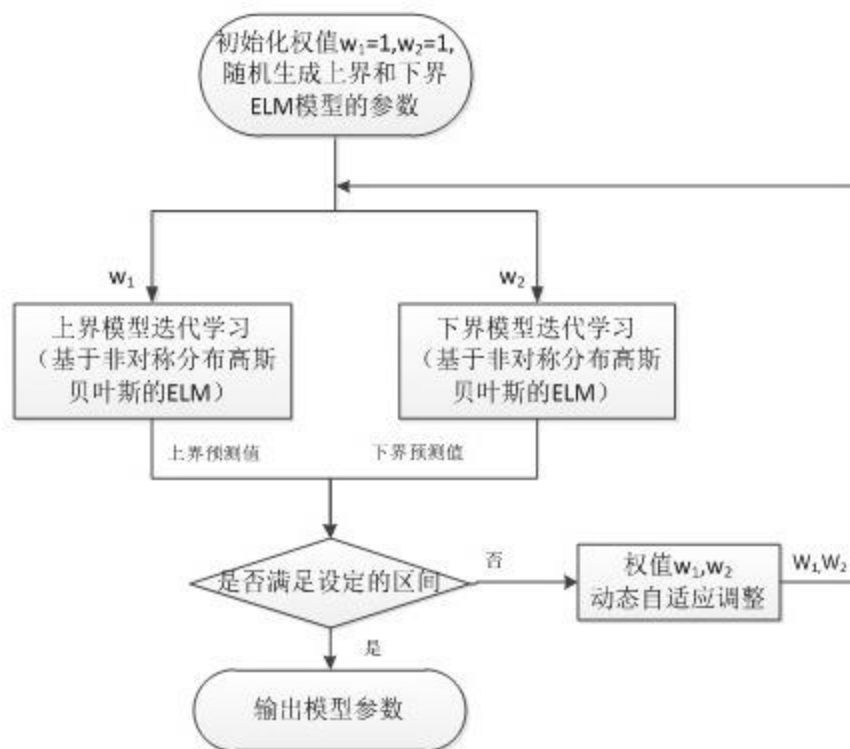
$$\frac{\partial \ln p(\mathbf{t} | a, b)}{\partial b} = \frac{N - \gamma}{2b} - \frac{\|\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\beta}\|^2}{2} - \frac{\|\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\beta}\|^2}{2w^2} = 0 \quad (19)$$

解得，

$$b = \frac{N - \gamma}{\|\mathbf{t}_1 - \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\beta}\|^2 + \|\mathbf{t}_2 - \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\beta}\|^2 / w^2} \quad (20)$$

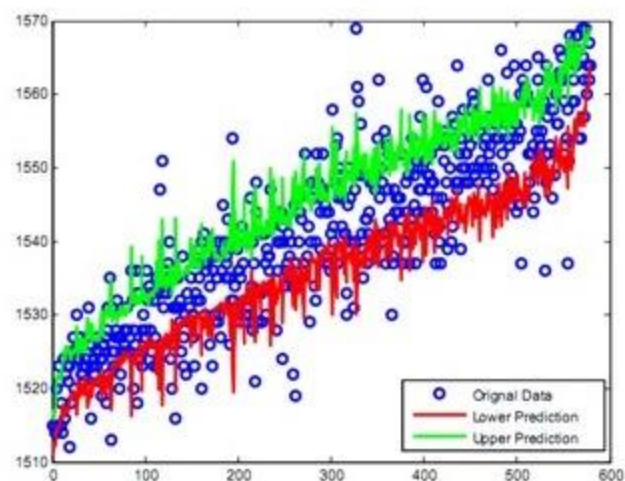
3)， 算法流程

基于上述分析，基于非对称高斯分布贝叶斯网络和 ELM 的区间型指标建模方法的流程如图 1 所示。

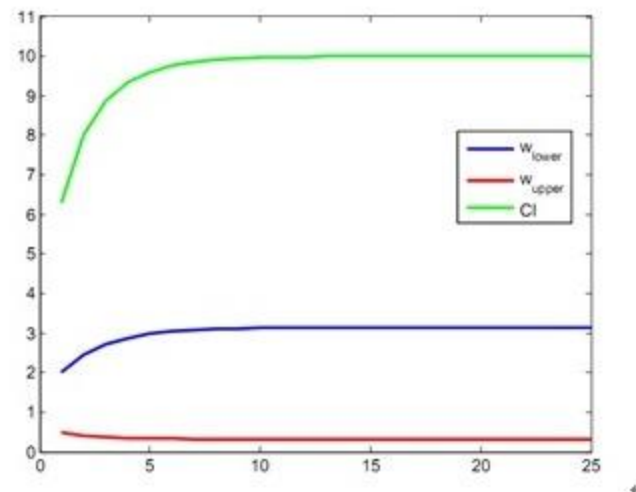


4) 数值仿真

本项目将该建模方法用在某钢厂 LF 生产过程钢水温度指标的预测问题上，其预测结果如图 2 所示。其中，(a)为给定区间 10 度时模型的预测结果，其中红色曲线代表温度预测的下界值，绿色曲线代表温度预测的上界值。(b)为其对应的权值迭代调整过程及其对应的区间变化图。可见，该方法可对钢水温度的变化区间进行准确预测。



(a)区间预测效果图



(b)权值自适应调整图

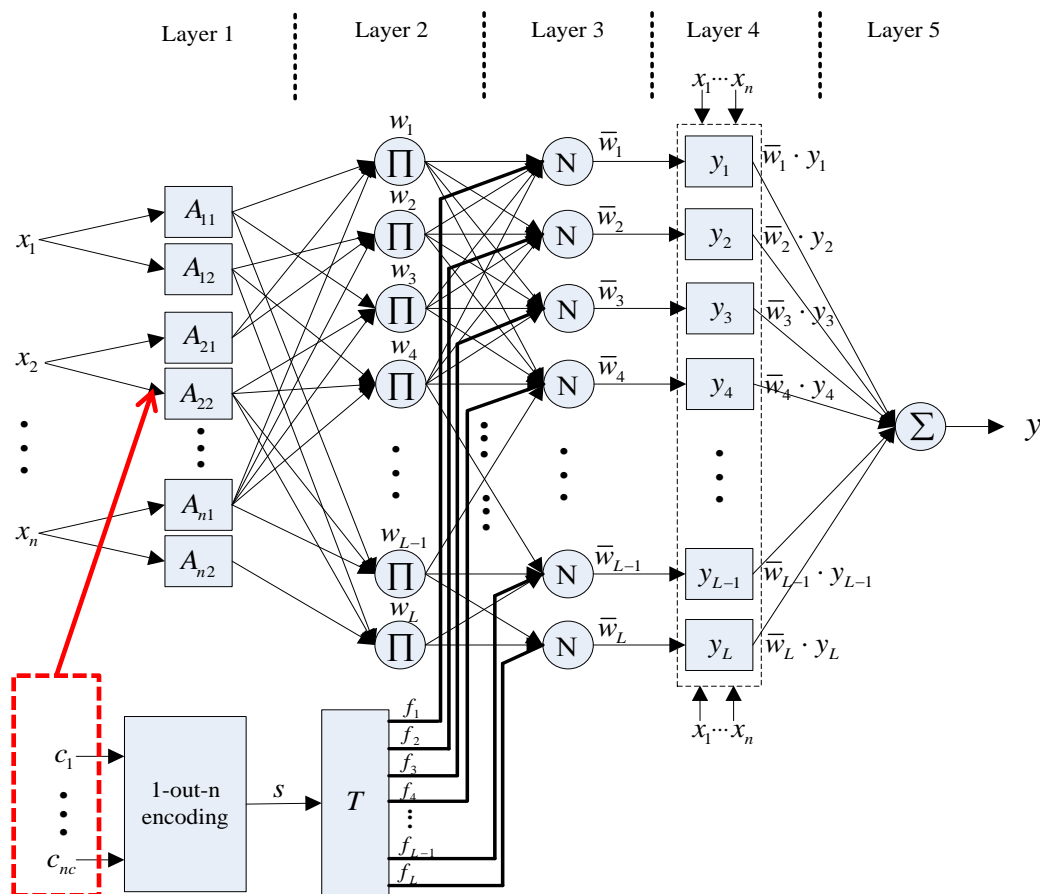
在LF炉钢水温度测试样本集上的预报效果

基于数据的指标预报模型智能建模方法举例（续）

2) 针对符号性数据（如对生产设备上的阀门开度可以用‘大’、‘中’、‘小’来描述）的特点，可使用带符号ANFIS（自适应神经模糊推理系统）的智能建模方法

□ ANFIS—在ANFIS的规则激发强度中引入符号的激发强度转换矩阵

□ 以使ANFIS可处理符号性输入数据

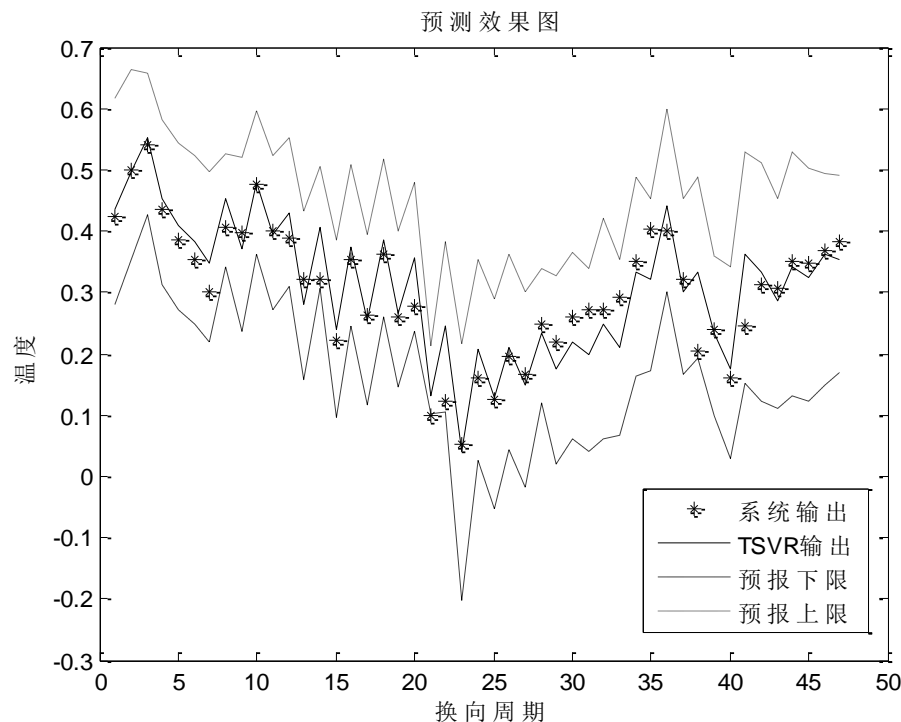


基于数据的指标预报模型智能建模方法举例（续）

3) 针对有些运行指标相关数据少的特点，可使用基于残差熵和分层双支持向量机（TSVR）的指标建模方法

- 以残差熵度量训练误差中的信息残余量，建立分层TSVR模型
- 当有新数据时，采用外层TSVR中二次优化问题KKT条件判断该新数据在模型修正中的作用
 - ✓ 如不满足KKT条件，则将该新数据用于修正外层TSVR
 - ✓ 如满足KKT条件，则将该新数据直接作为外层TSVR的输入
- 在得到外层TSVR训练误差序列后，采用残差熵度量其中所含信息的不确定性程度
 - ✓ 当残差熵较大时，利用误差序列建立较内层TSVR模型
 - ✓ 如内层模型已建立，则用新数据及其外层预报误差步在线修正内层TSVR模型

玻璃熔窑换向周期内温度预测



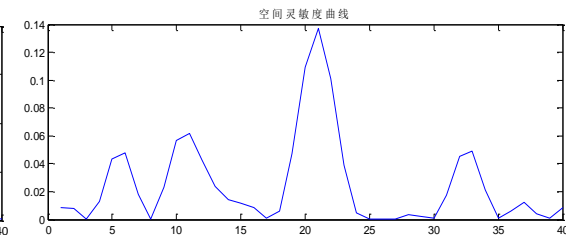
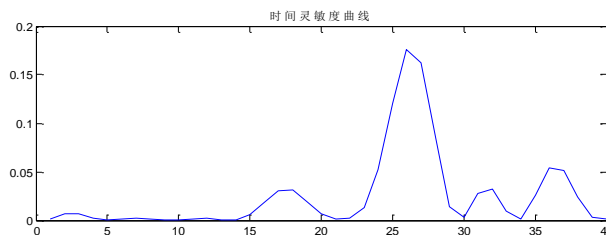
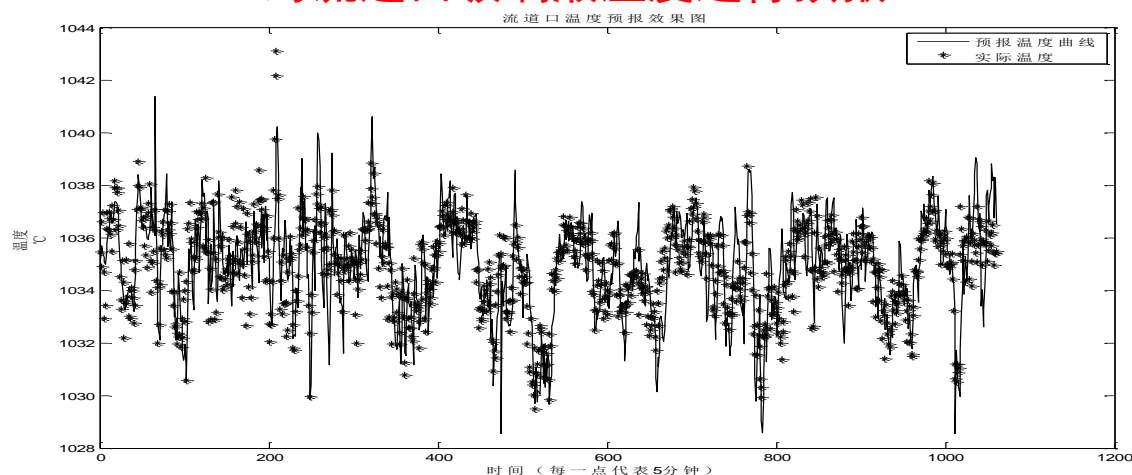
实验结果表明，本方法的预报精度比常规TSVR高很多，平均5.7422%，最好情况14.92%

基于数据的指标预报模型智能建模方法举例（续）

4) 针对有些指标与运行数据存在多重不确定滞后的特点，提出了一种基于过程神经网络和灵敏度分析的不确定多重时滞过程建模方法

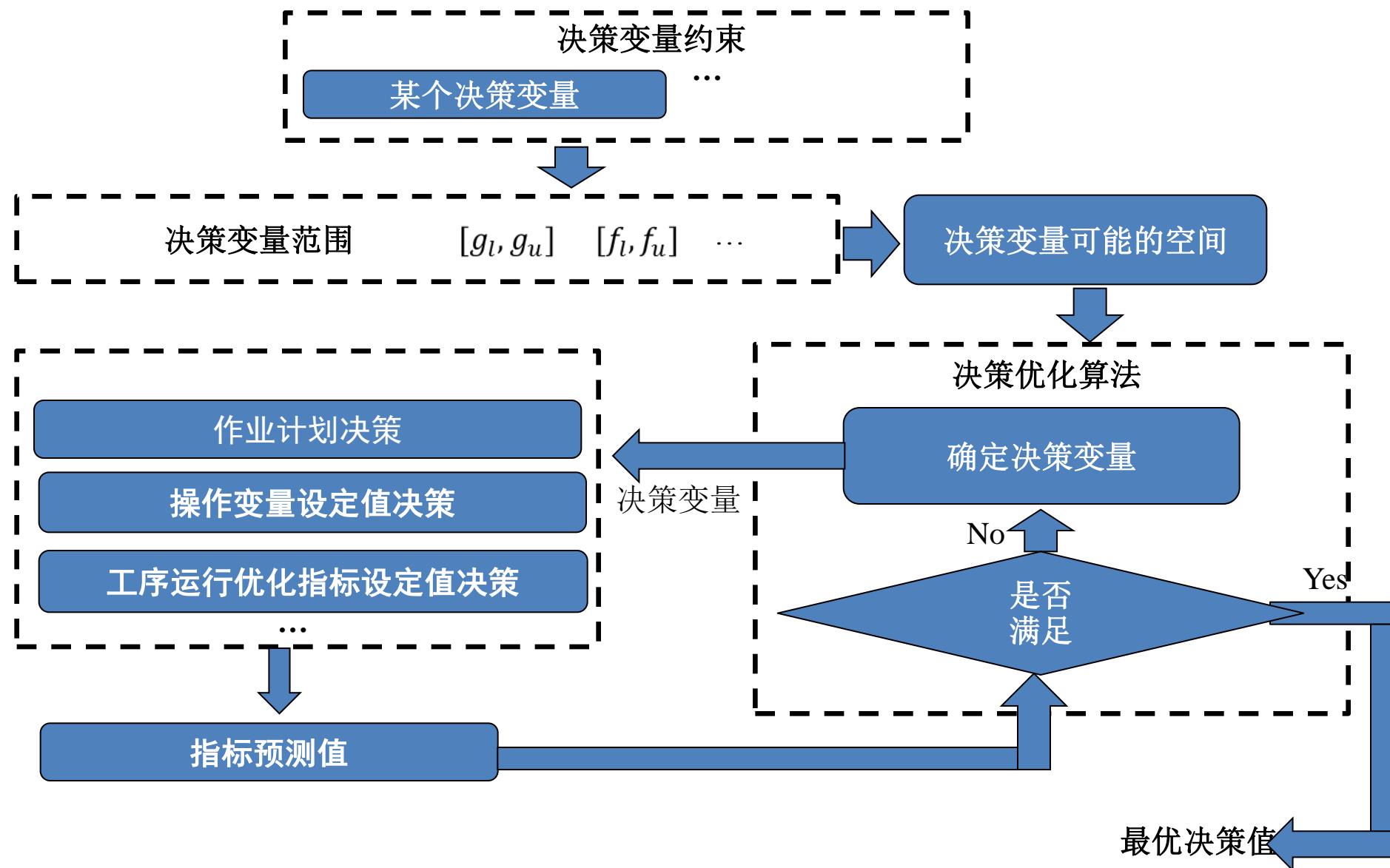
- 对过程神经网络输入层到隐层的过程权值在时间维度上进行灵敏度分析
- 引入多重不确定时滞矩阵，通过该矩阵滤除过程输入中不相关时段，再作为过程神经网络的输入
- 该方法可不对时滞参数进行显式确定，有效解决具有多重不确定时滞的运行指标建模问题

对流道口玻璃液温度进行预报

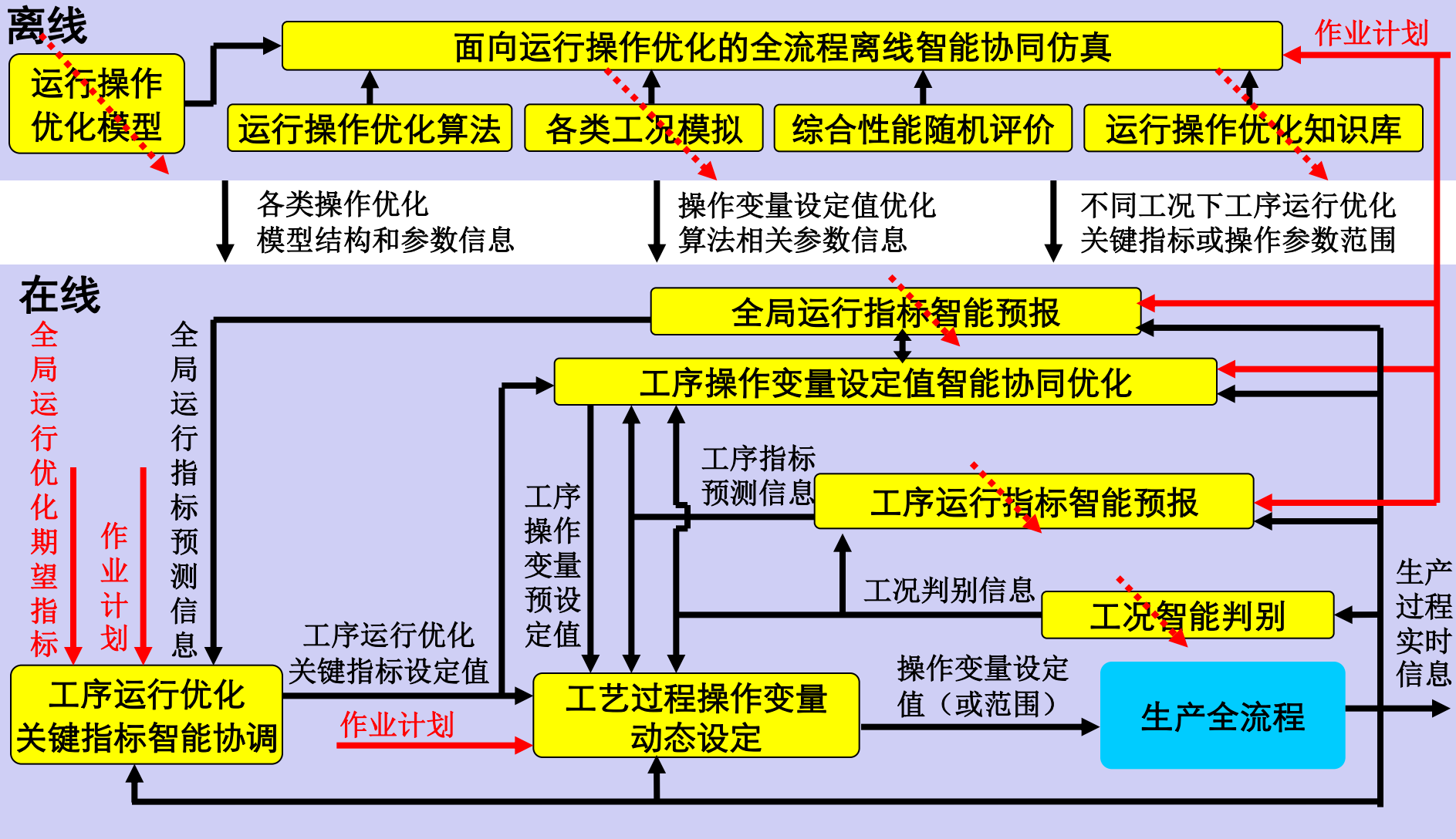


灵敏度分析曲线，灵敏度越大说明该时段对输出的影响越为显著，系统当前的时滞最可能分布在灵敏度大的时段

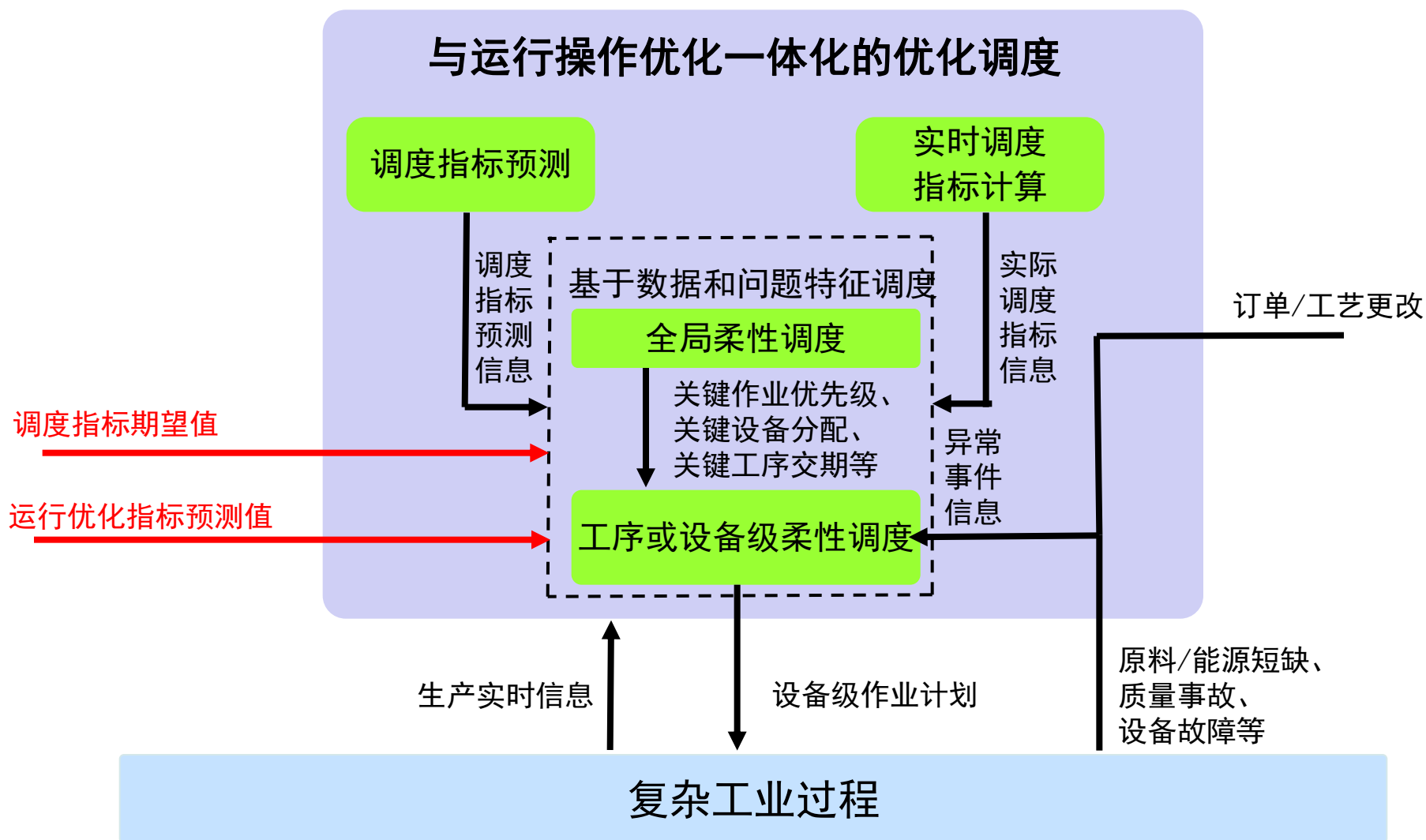
4-4, 决策优化：优化过程框架



复杂生产制造过程运行优化方法整体结构图

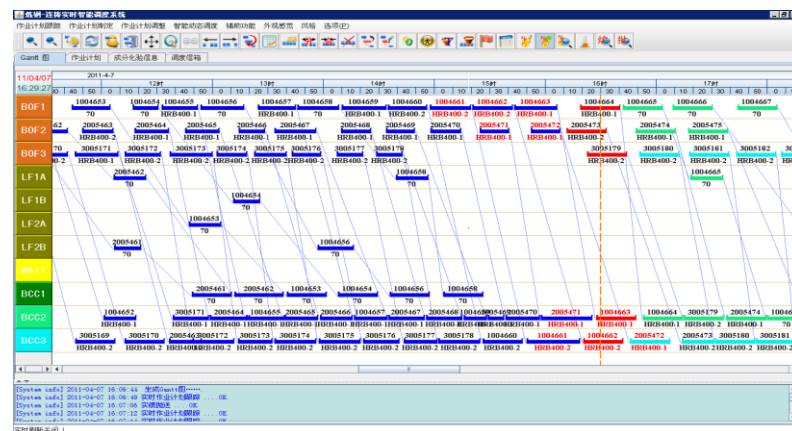
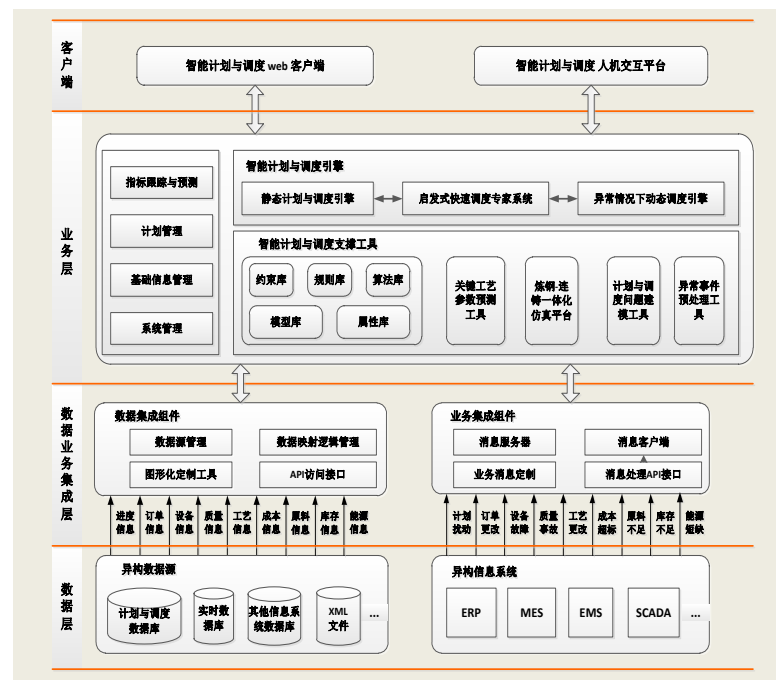


— 复杂生产制造过程运行优化方法整体结构图（续）



4-5)， 算法的应用验证(一) 钢铁企业

- 在钢动态公布的“世界级钢铁企业最具竞争力”排名中，位居国内钢铁企业第2，2011世界500强排名中排名366
- 智能计划与控制系统（包括计划智能制定、指标预报、计划执行与反馈、计划智能动态调整）应用前
 - ✓ 凭人工经验进行计划调度
 - ✓ 生产节奏不顺畅，计划执行率偏低
 - ✓ 精炼前等待时间长、能耗高
 - ✓ 堵流、断流现象多
 - ✓ 钢铁料收得率低
- 该系统应用后取得明显的效果（2011年）
 - ✓ 产量提高4%，新增产值4亿元、利润3700万
 - ✓ 连铸平均设备利用率提高了6.81%
 - ✓ 吨钢精炼电耗降低11.69%
 - ✓ 吨钢能耗下降36%（间接效益）



应用验证（二）：半导体企业

- 国内最大的6英寸芯片制造企业
- 提出了适应于大规模微电子生产线调度与运行操作优化一体化的智能运行优化解决方案及系统体系结构，研发了相应系统
- 在结合推进先进精益生产管理理念基础上，上述系统部分已在该企业扩散区取得了成功应用，效益如下：



比较项目	前9月	后5月
MP达成率	100%	105.50%
NONE DMOS工艺CT	1.91天/layer	1.69天/layer
DMOS工艺CT	4.26天/layer	3.73天/layer

5， 结束语

1)， 未来20年， 还是信息技术将广泛且更加深刻的影响全球。导致社会进步、经济发展， 更高的生活质量。今天的大数据、云计算、移动互联网等都说明了信息技术的引导和带动作用， 而集成、协同和优化仍然是这些热门技术深入的需要。

2)， 所提到的三类信息平台， 是我们从863计划开始以来围绕“集成”的一个逐步发展的过程。都有用， 都可以有水平。重要的是“工业化的需求导向、企业的需求导向、企业的效益导向。”

3)， 无论哪一类平台其深度取决于学科交叉的深度：计算机知识和众多领域知识交叉基础上的创新， 核心问题之一是“系统”：系统的模型、优化和实现。

谢谢，欢迎指正！