

递阶控制

刘山

浙江大学控制科学与工程学院

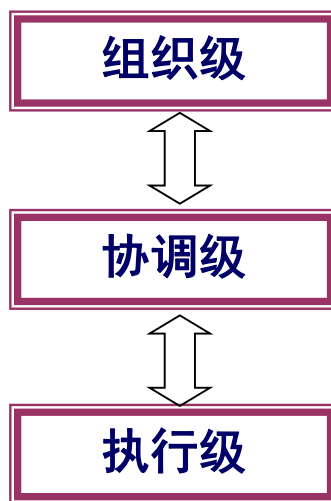
内容

- 1、递阶控制的一般原理
- 2、分级递阶智能控制
- 3、递阶智能控制例子
- 4、集散递阶智能控制

1、递阶控制的一般原理

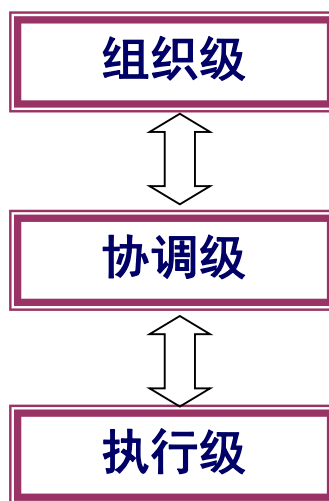
递阶智能控制

- 递阶智能控制（**Hierarchical Intelligent Control**）是在学习控制系统的基础上，从工程控制论角度总结人工智能与自适应控制、自学习控制和自组织控制的关系后逐渐形成的，是智能控制的形式架构。
- 递阶控制系统由按照一定优先级和从属关系安排的子系统组成，这些子系统形成递阶结构，一般分为组织级、协调级和执行级。



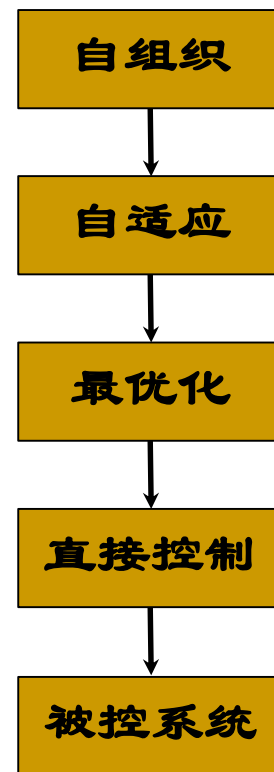
递阶智能控制

- 递阶控制是用多个控制器组成的组合控制。
 - 执行级为直接控制级，其各个控制器分别控制被控对象的一部分；
 - 协调级为监督控制级，其接受组织级的决策指令，协调和优化执行级各控制器的设定值，并向组织级传送执行结果信息；
 - 组织级为决策控制级，其接受控制期望目标和协调级反馈信息，制定最优决策，对协调级下达决策指令。



多层控制结构

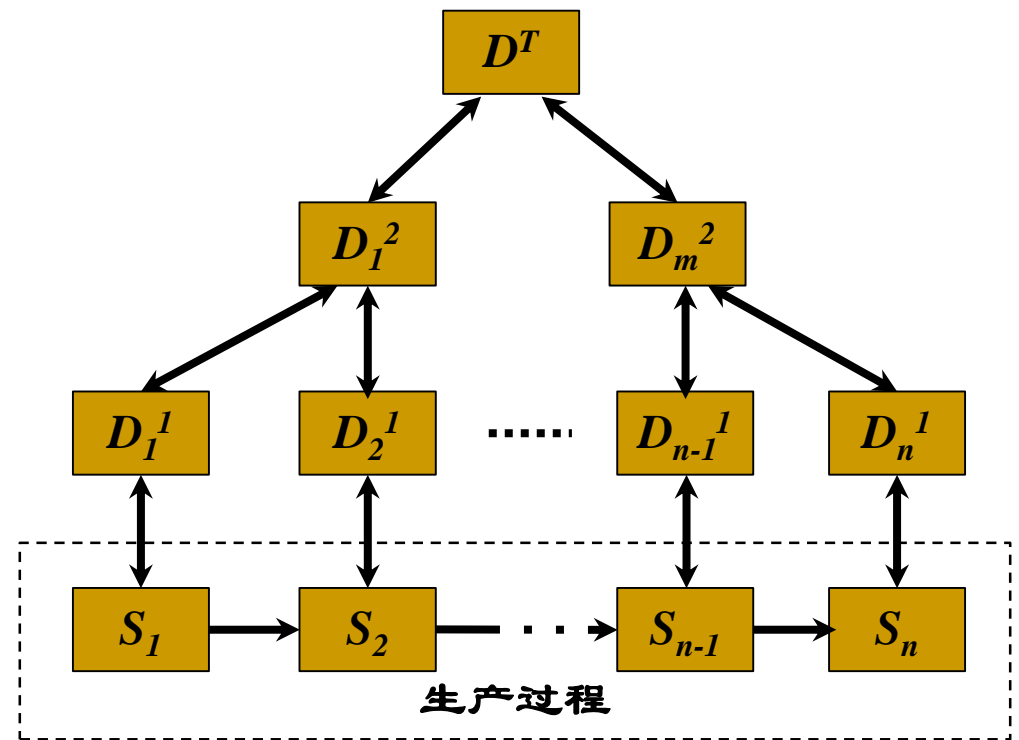
- 按系统中决策的复杂性来分级，是一种含有不确定因素的复杂系统。
- 按控制功能可以分为四个层次：
 - 直接控制层
 - 最优化层（确定控制器的设定值）
 - 自适应层（关于模型和控制规律自适应）
 - 自组织层（自动选择模型结构与控制，以适应环境的改变）



将决策问题纵向分解

多级多目标结构

- 当系统由若干个可分的相互关联的子系统组成时，可按所有决策单元按一定支配关系递阶排列。
- 同一级各单元要受上一级的干预，同时又对下一级决策单元施加影响。
- 同级之间不交换信息，上下级间交换信息。
- 同一级决策单元如有相互冲突的决策目标，由上一级决策单元加以协调。
- 协调的总目标是使全局达到优化或近似优化。
- 多级多目标决策单元在不同级间递阶排列，形成了金字塔式结构。



将决策问题横向分解

智能机器

- 智能机器的高层功能模仿了人类行为，实现控制系统的规划、决策、学习、数据存取和任务协调等功能，进行知识处理与管理。
- 机器知识（Machine Knowledge, K）
 - 用来消除智能机执行任务的不确定性所需的结构性信息。
 - 包括先验知识和经验知识。
 - 先验知识：由设计者或用户给予的初始信息。
 - 经验知识：通过学习和体验取得与积累的信息。
- 机器知识率（Rate of Machine Knowledge, R）
 - 通过智能机的知识流量，即执行任务。
- 事件数据库（Data Base, DB）
 - 与执行任务有关的数据库。
 - 数据库代表任务的复杂性，且取决于任务的执行精度，即该执行精度是与数据库的复杂性相称的。
- 机器智能（Machine Intelligence, MI）
 - 行动或规则的集合，作用于事件数据库DB而产生知识流。
 - 可分析和组织数据，并把数据变换为采用知识执行任务。

递阶智能机器

- 对系统的各级均采用熵（信息熵，Shannon负熵）作为描述和度量系统控制作用的测度。

- 熵（Entropy, H）

- 在信息论中指的是信息源中所包含的平均信息量

$$H = -k \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

其中， P_i 为信息源中各事件发生的概率

- 机器知识K可表示为

$$K = -\alpha - \ln p(K)$$

- 知识流量R是智能机器的主要变量，在一有限时间间隔T上为

$$R = K / T$$

- 机器智能MI、事件数据库DB与知识流量R之间满足关系

$$(MI):(DB) \rightarrow (R)$$

IPDI原理

■ 数学描述

- 由知识率定义: $P(\mathbf{R}) = P(\mathbf{MI} \cap \mathbf{DB})$
- 由条件概率公式: $P(\mathbf{R}) = P(\mathbf{DB})P(\mathbf{MI}|\mathbf{DB})$
- 取自然对数: $\ln P(\mathbf{R}) = \ln P(\mathbf{DB}) + \ln P(\mathbf{MI}|\mathbf{DB})$
- 两边取期望, 并取负号, 得熵方程:

$$H(\mathbf{R}) = H(\mathbf{MI}|\mathbf{DB}) + H(\mathbf{DB})$$

- 若 \mathbf{MI} 独立于 \mathbf{DB} , 则

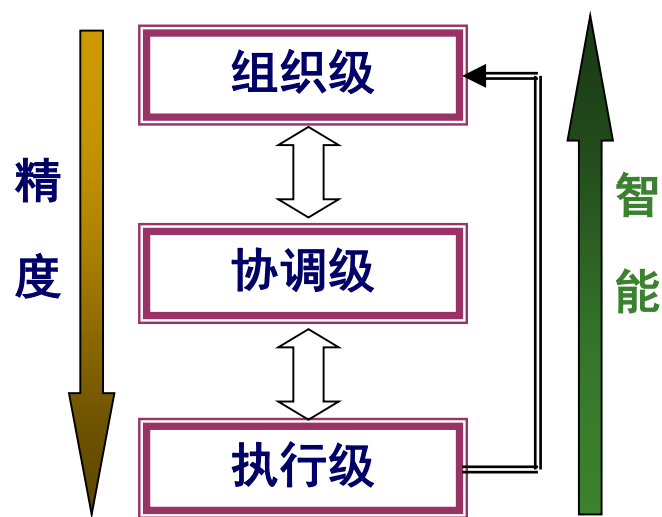
$$H(\mathbf{R}) = H(\mathbf{MI}) + H(\mathbf{DB})$$

- 若知识流量不变, 增大数据库 \mathbf{DB} 的熵将减少机器智能 \mathbf{MI} 的熵。
- 知识流 \mathbf{R} 在信息理论意义上代表系统的工作能力。
- 在建立和执行任务期间, 知识流量一般不变。

IPDI原理

■ IPDI原理：

- 精度递增伴随智能递减(Increasing precision with decreasing intelligence)
- 原理适用于递阶系统的单个层级和多个层级。



■ 递阶智能控制的实质

- 在结构上遵循精度随智能降低而提高（IPDI）的原理，寻求系统的正确决策与控制序列，能够使系统的总熵为最小。

递阶控制的一般原理

- 把一个总体问题 P 分解成有限数量的子问题 P_i
- 总体问题 P 的目标应使复杂系统的总体准则取得极值。
 - 对子问题求解时，不考虑各子问题之间存在关联时的解，则有
$$[P_1, P_2, \dots, P_n] \text{ 的解} \Rightarrow P \text{ 的解}$$
 - 一般各子系统（子问题）间存在关联，因而存在耦合作用（产生冲突），引入干预向量或协调参数，用以解决由于关联而产生的冲突。协调参数 λ ，用 $P_i(\lambda)$ 代替 P_i ，可得
$$[P_1(\lambda), P_2(\lambda), \dots, P_n(\lambda)]_{\lambda=\lambda^*} \text{ 的解} \Rightarrow P \text{ 的解}$$
- 递阶控制中的协调问题就是要选择 λ ，从某个初值 λ^0 经过迭代达到终值 λ^* ，从而使递阶控制达到最优。

协调的基本原则

■ 关联预测协调原则（Interaction Prediction）

□ 直接干预法。

- (1) 协调级预测关联: 协调器要预测各子系统的关联输入输出变量,
- (2) 子系统决策: 下层的各决策单元根据预测的关联变量求解各自的决策问题, 然后把达到的性能指标值送给协调器,
- (3) 协调级修正关联: 协调器再修正关联预测值, 直到总体目标达到最优为止。

□ 优点:

- 可行法（Feasible methods），不必进行迭代搜索，可在线应用。
- 不必增加目标干预变量，物理意义明确。

□ 缺点:

- 子问题可能无解。

协调的基本原则

■ 关联平衡协调原则（Interaction Balance）

□ 目标协调法（Objective Coordination）。

- (1) 协调级预定子系统目标: 协调器预先给出每个子系统的性能目标,
- (2) 子系统决策: 下层的各决策层单元在求解各自的优化问题时, 把关联变量当作独立变量来处理, 即不考虑关联的约束条件,
- (3) 协调级修正子目标: 依靠协调器的干预信号来修正各决策单元的优化指标, 以保证最后关联约束得以满足, 这时目标函数中修正的值应趋于零。

□ 优点:

- 子问题始终有解。

□ 缺点:

- 需要引入目标干预信号, 进行迭代搜索。
- 不可行法（不可在线应用），只能利用迭代的最后结果。

协调的基本原则

例：一个由两条生产线组成的生产系统，每条生产线生产不同的产品，且它们共享资源。目标是在满足资源约束条件下最大化系统的收益。

- 生产线A：生产量为 x_1 时，产品收益为 $a_1(x_1)$ ，产品成本为 $b_1(x_1)$
- 生产线B：生产量为 x_2 时，产品收益为 $a_2(x_2)$ ，产品成本为 $b_2(x_2)$
- 共享资源限制：共享资源的总量为 R ，且生产线A和B对资源的需求量分别为 $d_1(x_1)$ 和 $d_2(x_2)$ ， R_1 和 R_2 是生产线A和B对共享资源的使用限制

目标函数（整体收益）： $P = a_1(x_1) - b_1(x_1) + a_2(x_2) - b_2(x_2)$

约束条件：

- 资源约束： $d_1(x_1) + d_2(x_2) \leq R$
- 生产量非负： $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$

记资源总使用量为 $u = d_1(x_1) + d_2(x_2)$

选择生产线A和B的资源限制使用量 R_1 和 R_2 为协调参数

协调的基本原则

■ 关联预测协调原则

用直接干预法求解前面的例子

1. 协调级预测关联：初始限制资源使用量设定为 $R_1^{(0)}$ 和 $R_2^{(0)}$ ；
2. 子系统决策：求解子系统优化问题
 - (1) 对于生产线A，优化目标函数为： $J_1(x_1) = a_1(x_1) - b_1(x_1)$ ，
约束为： $d_1x_1 \leq R_1^{(i)}$
 - (2) 对于生产线B，优化目标函数为： $J_2(x_2) = a_2(x_2) - b_2(x_2)$ ，
约束为： $d_2x_2 \leq R_2^{(i)}$
3. 协调级修正关联：
 - (1) 计算系统总收益 $P^{(i)}$ ，资源使用量 $u^{(i)} = d_1(x_1^{(i)}) + d_2(x_2^{(i)})$
 - (2) 若总收益未达预期且资源使用量 $u^{(i)}$ 不合理，则根据共享资源限制总量 R ，调整限制资源使用量（协调参数）为 $R_1^{(i+1)}$ 和 $R_2^{(i+1)}$
4. 通过协调迭代，重复上述步骤，直到得到最优生产量 x_1^* 和 x_2^* ，使得整体收益最大化且满足资源约束。

协调的基本原则

■ 关联平衡协调原则

用目标协调法求解前面的例子

1. 协调级预定子系统目标:

(1) 对于生产线A, 设定目标函数为: $J_1(x_1, R_1) = a_1(x_1) - b_1(x_1) + \lambda_1(d_1(x_1) - R_1)$
(其中 λ_1 为权重系数, 也为干预向量)

(2) 对于生产线B, 设定目标函数为: $J_2(x_2, R_2) = a_2(x_2) - b_2(x_2) + \lambda_2(d_2(x_2) - R_2)$
(其中 λ_2 为权重系数, 也为干预向量)

2. 子系统决策: 生产线 A 在求解自身优化问题时, 仅根据目标函数和总资源使用量 R 的限制约束来求解生产量 $x_1^{(i)}$ 和资源的使用限制 R_1 , 不考虑生产线 B 对共享资源的实际影响。生产线 B亦是如此, 求解生产量 $x_2^{(i)}$ 和资源的使用限制 R_2

3. 协调级修正子目标: 协调器检查关联约束, 计算当前共享资源实际使用量 $u^{(i)} = d_1(x_1^{(i)}) + d_2(x_2^{(i)})$, 若发现共享资源使用量不合理, 则调整干预向量, 即修正权重系数 λ_1 和 λ_2 的值。例如, 如果共享资源使用超标, 则增加权重系数的值, 使生产线 A 和 B 在优化目标函数时更重视共享资源的限制。

4. 子系统根据修正后的目标函数重新决策, 通过协调迭代重复上述过程, 直到关联约束得以满足, 并且目标函数中修正的值 $\lambda_1(d_1(x_1) - R_1)$ 和 $\lambda_2(d_2(x_2) - R_2)$ 趋于零, 得到最优生产量 x_1^* 和 x_2^* , 使得整体收益最大化且满足资源约束。

2、分级递阶智能控制

分级递阶智能控制系统的结构

■ 三个层次

□ 组织级

- 推理，规划，决策，记忆，数据存取

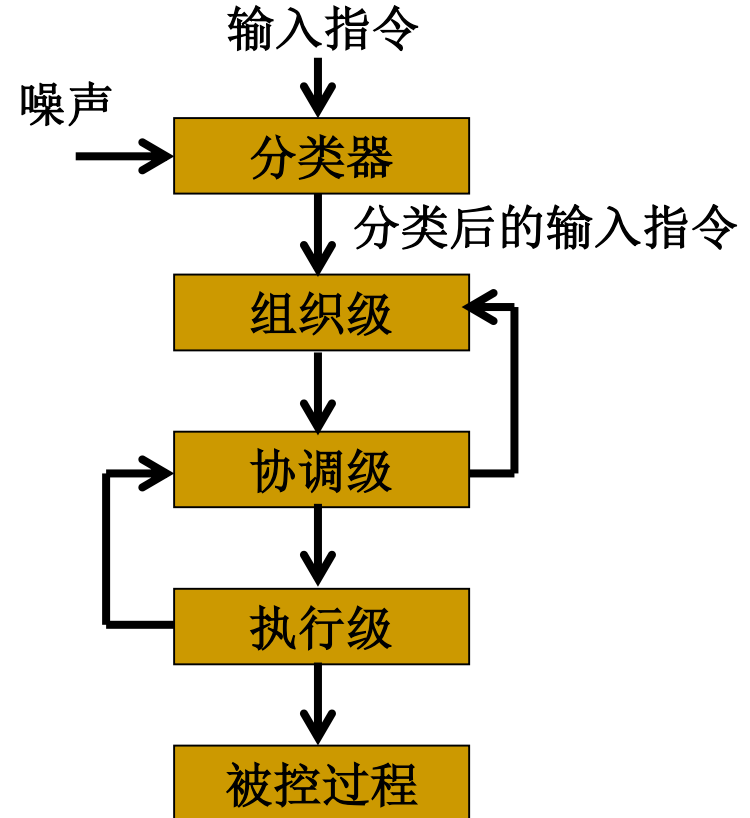
□ 协调级

- 组织级与执行级之间的接口，进行任务协调

□ 执行级

- 一般为常规控制

- 遵循自上而下“精度递增伴随智能递减”的IPDI原则



典型分层递阶结构

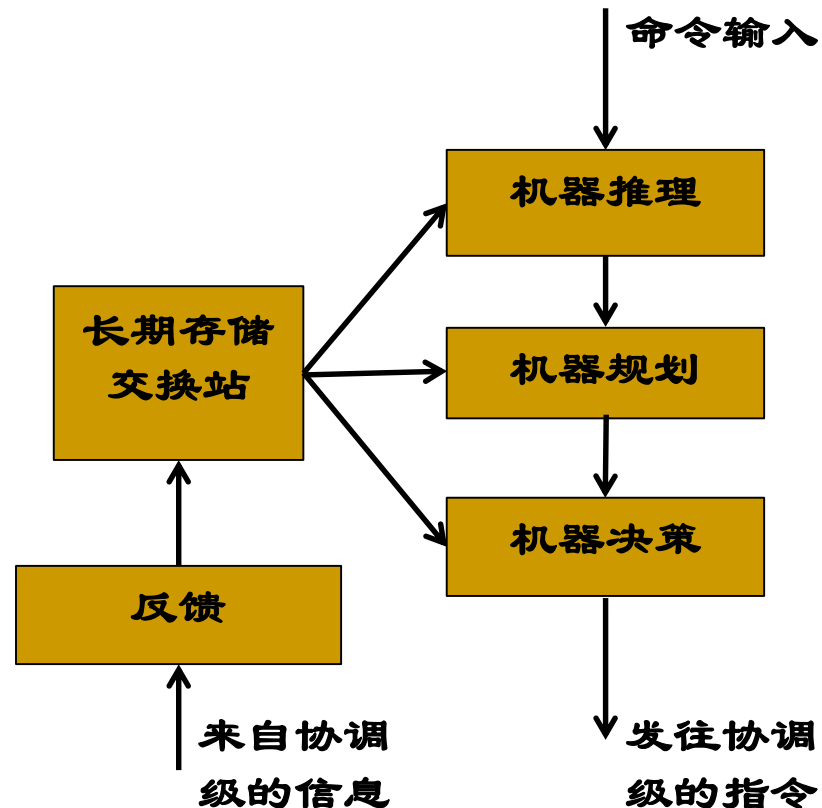
组织级（Organization Level）

■ 组织级

- 位于智能控制系统的最上面一层。
- 通过人机接口和用户进行交互。
- 涉及知识的表示与处理。
- 执行最高决策的控制功能。
- 监视并指导协调级和执行级的所有行为。
- 智能程度最高。

■ 作用：

- 对于给定的外部命令和任务，设法找到能够完成该任务的子任务（或动作）组合。
- 将这些子任务要求送到协调级，通过协调处理，将具体的动作要求送至执行级完成所要求的任务。
- 对任务执行的结果进行性能评价，并将评价结果逐级向上反馈，同时对以前存储的知识信息加以修改，从而起到学习的作用。



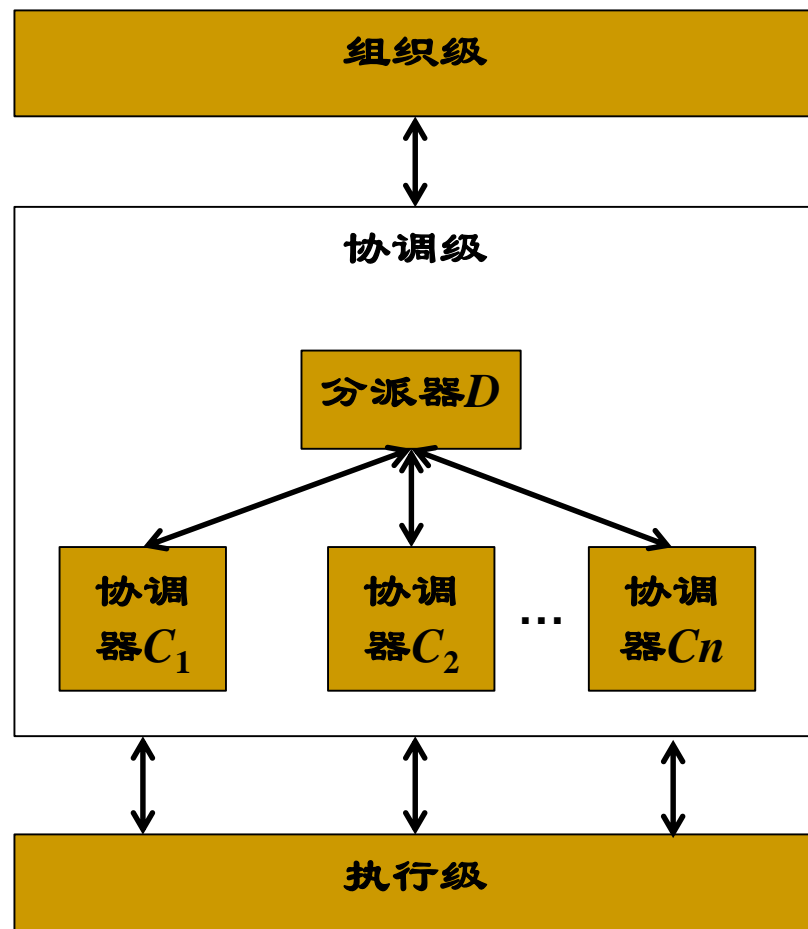
协调级（Coordination Level）

■ 控制管理分层（分派器）

- 基于其下层提供的信息，通过设计和计划，决定如何完成组织级下达的指令或任务，并由此产生下一层所能识别的控制指令。
- 主要负责控制结构和算法的重新设计（离线或在线）、系统性能的全局优化以及有关任务的规划等。
- 能承受较大的不确定性。

■ 控制监督分层（协调器）

- 主要任务是保证和维持执行级中各控制器的正常运行，并进行局部参数整定及性能优化。
- 主要通过自适应整定和调度完成上层指派的控制任务，并给执行级提供适当的算法或算法序列。
- 承受不确定性的能力是有限的。



分派器和协调器的统一结构

■ 数据处理器

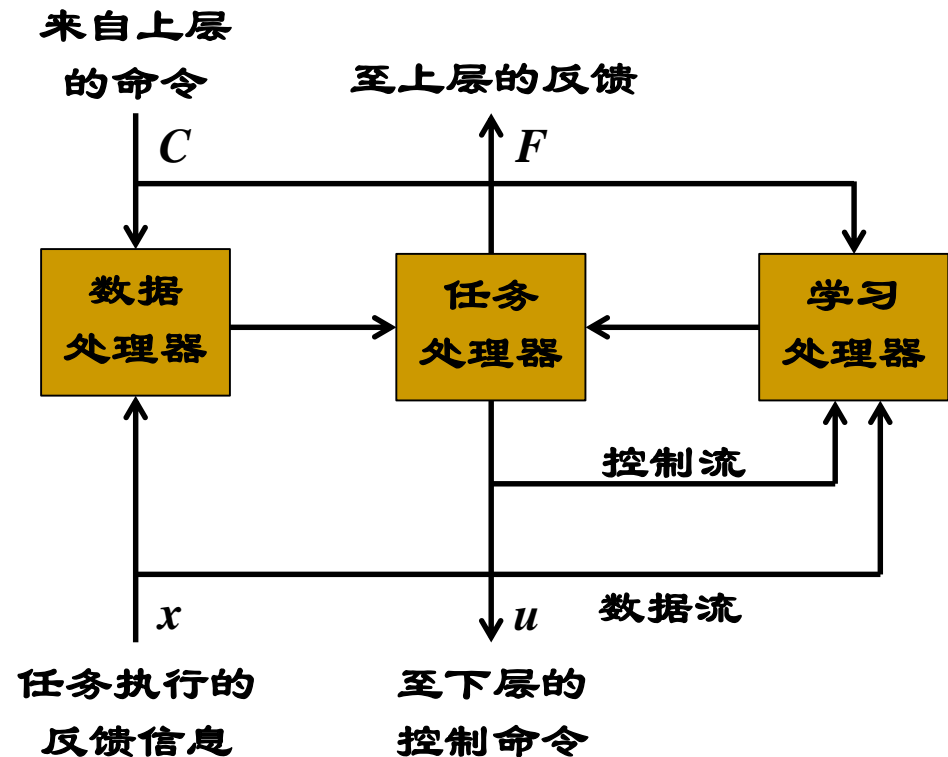
- 任务描述
- 状态描述
- 数据描述
- 监控

■ 任务处理器

- 任务调度
- 任务翻译
- 任务的准确描述
- 监控

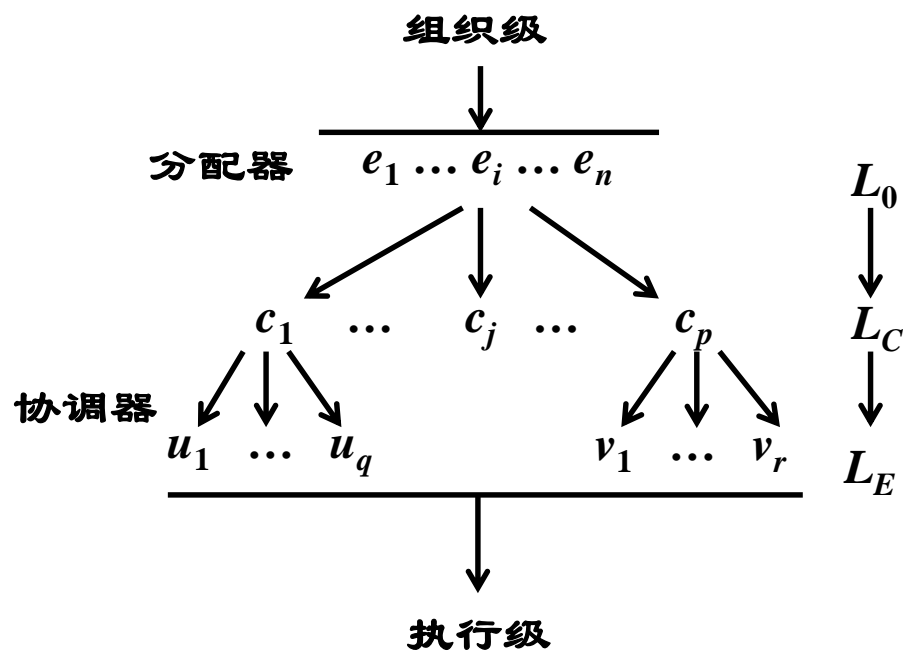
■ 学习处理器

- 改善任务处理器的性能及减小决策和信息的不确定性



协调级的语言翻译

- 分派器和协调器处在树形结构的不同层次上，它们进行语言翻译的时间尺度也不相同。
- 分派器的一步可以变为协调器的许多步。
- 所有协调器必须在分派器的统一管理下协同工作。



执行级（executive level）

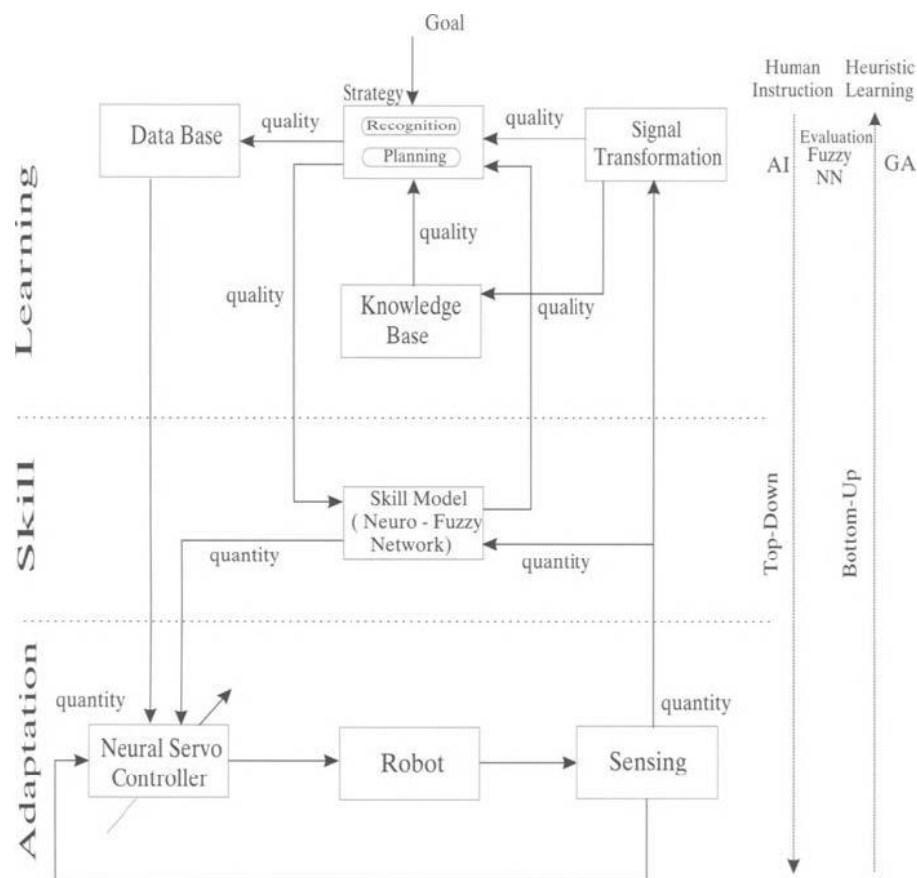
- 运行控制级，直接控制局部过程并完成子任务。
- 智能程度最低，控制精度最高。
- 可采用常规的优化控制，为了用熵进行总体的评估，可将传统的最优控制描述方法转化到用熵进行描述。
- 熵表示系统执行代价，相当于系统所消耗的能量。

递阶智能控制智能的分解

- 智能主要体现在高层次上
- 横向上（控制对象多层次）
 - 把一个复杂系统分解成若干个相互联系的子系统，每个子系统单独配置控制器，便于进行直接控制。
- 纵向上（控制本身多层次）
 - 把整个复杂系统所需的智能从高到低作了一次分解。

3、递阶智能控制例子

例：智能机器人控制系统分级结构



■ 学习级（组织级）

- 基于专家系统
- 识别
- 规划

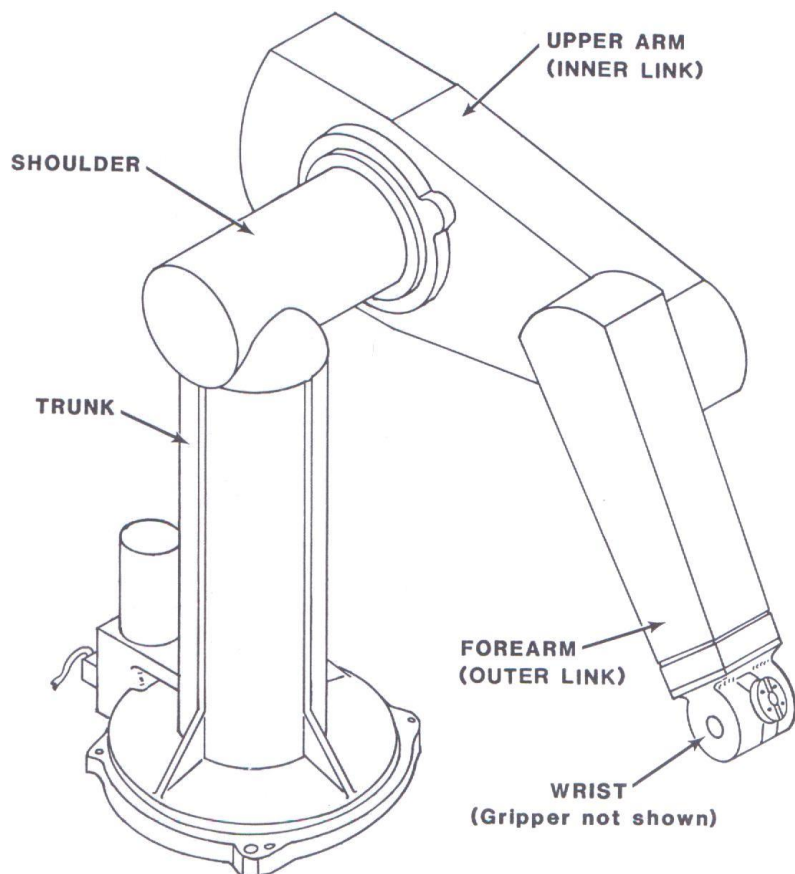
■ 技能级（协调级）

- 神经模糊网络
- 为学习级形成的控制策略生成合适的控制参考信号。

■ 适应级（执行级）

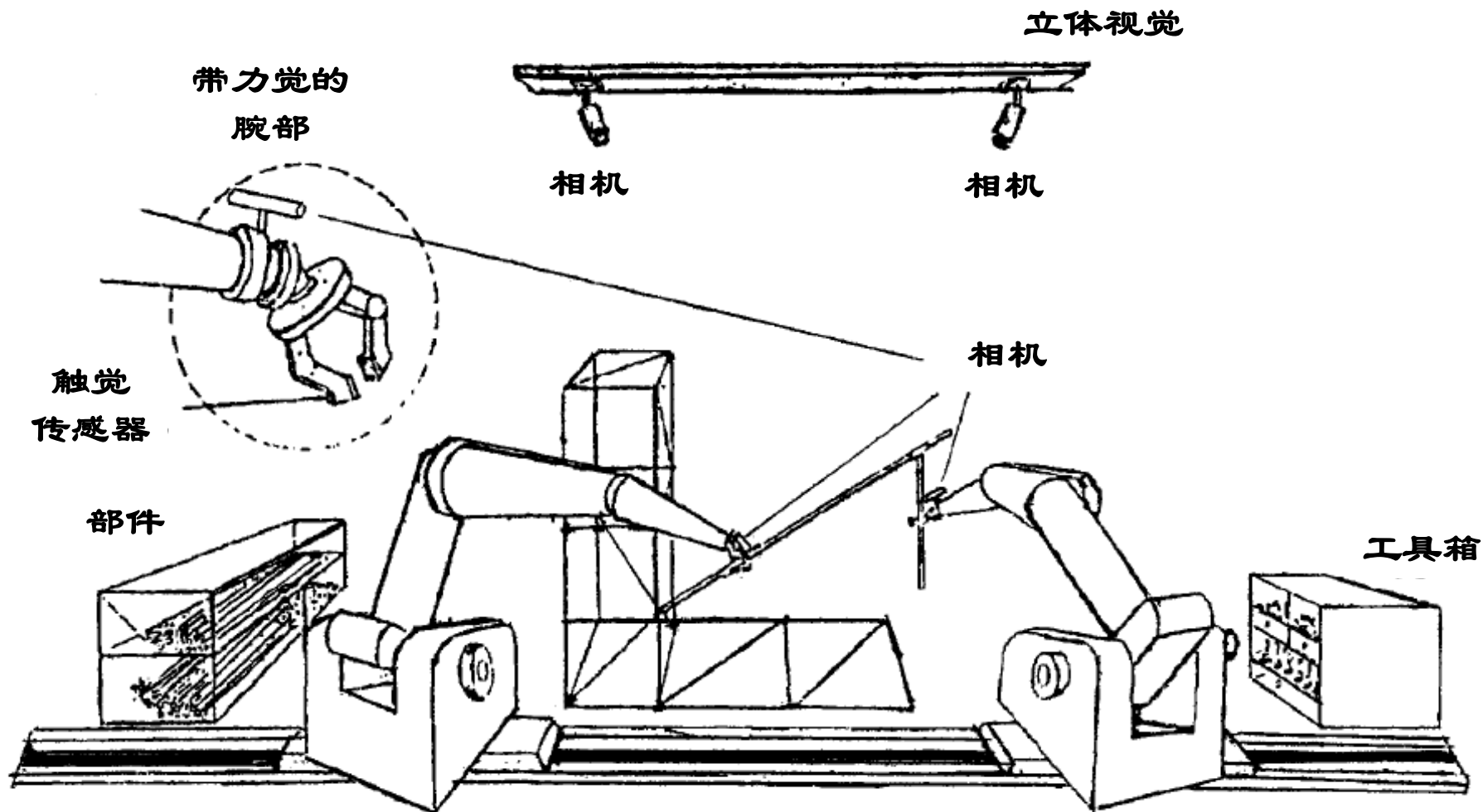
- 神经网络
- 作为机器人的控制器以适应技能级生成的控制参考信号。

机械臂

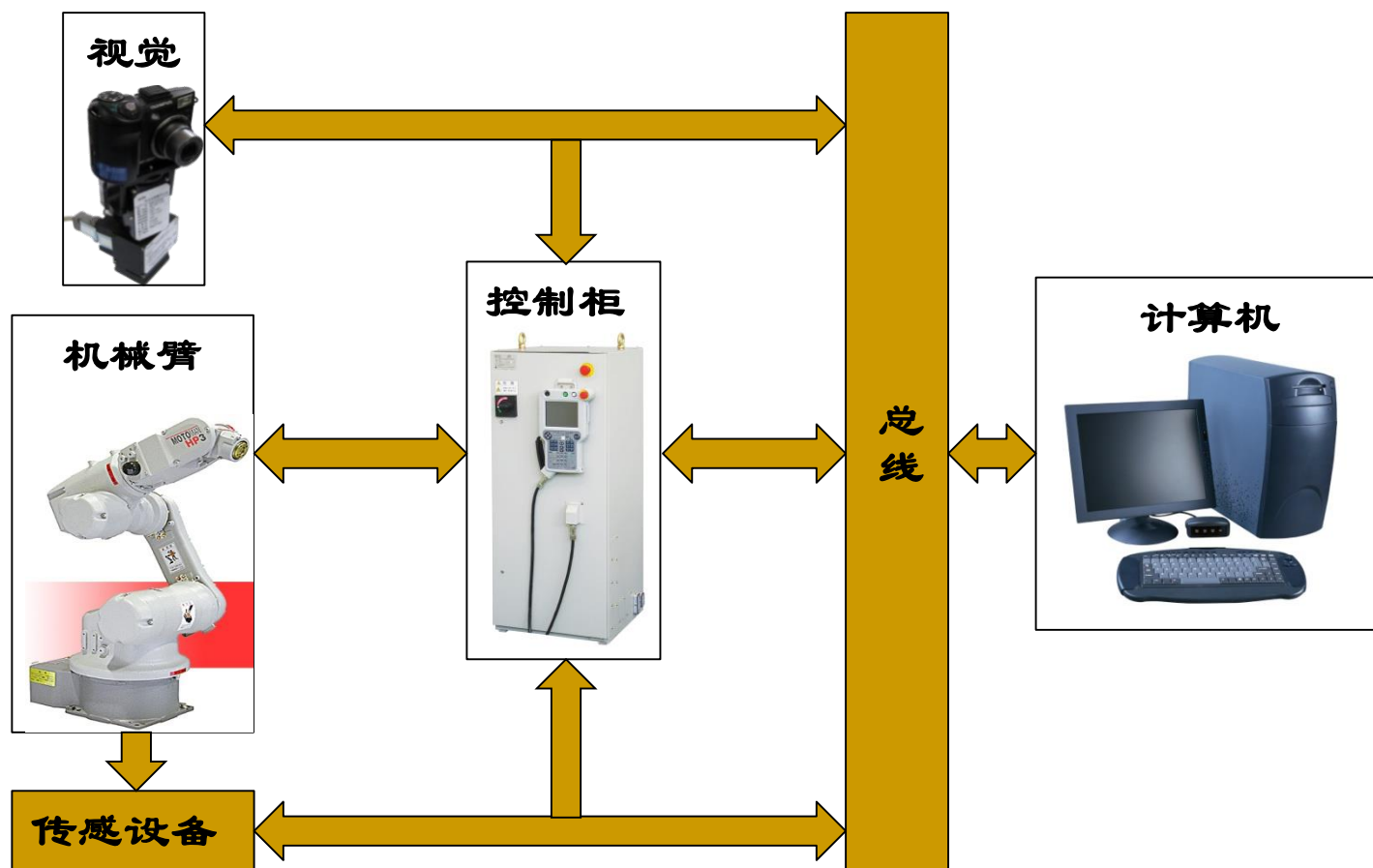


- 腰、肩和肘的三个自由度用于臂关节转动，决定腕部的位置。
- 腕部的三个自由度决定末端执行器的位置和姿态。
- 末端执行器的运动结构。

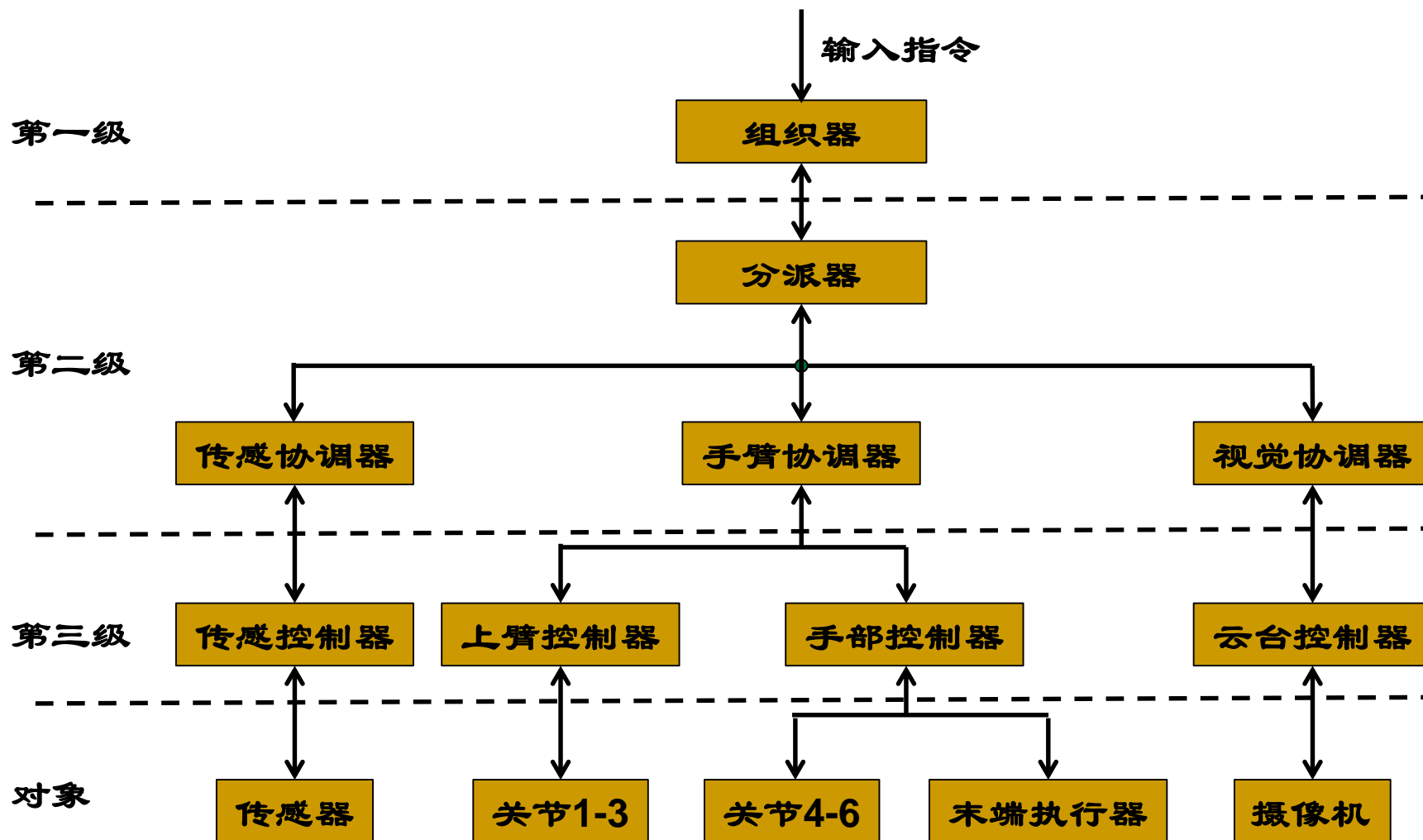
机械臂递阶智能控制系统



机械臂递阶智能控制系统



机械臂递阶控制系统结构



执行级

- 机械臂的近最优控制，执行级的控制单元需要精确的对象模型。
- 机械臂的模型通过对其各子系统进行建模而获得。
- 分为两个子系统
 - 臂关节子系统：一个次最优的控制器用于控制手臂上部三个关节运动的控制和协调，构成了臂关节的定位系统，将手臂从工作空间的初始位置移到一个预定的终止位置。
 - 手关节子系统：手臂下部的三个关节构成了手的定位系统，能够根据物体的状况对准抓握的位置。

协调级

■ 感觉任务

- 处理来自接近传感器，压力传感器以及其他感觉装置的检测信息。

■ 视觉任务

- 处理来自固定摄象机或安装在机械臂上的可移动的摄象机的视觉信息，包括物体的识别与分类、结束点的协调确定、使用三维空间追踪目标物体以及运动控制的视觉信号反馈等。

■ 机械运动任务

- 依据结束点和上臂关节运动所需要的信息（如快、慢等）来选择合适的增益，确定抓握物体时手的定向以及在定向过程中腕关节运动的协调。

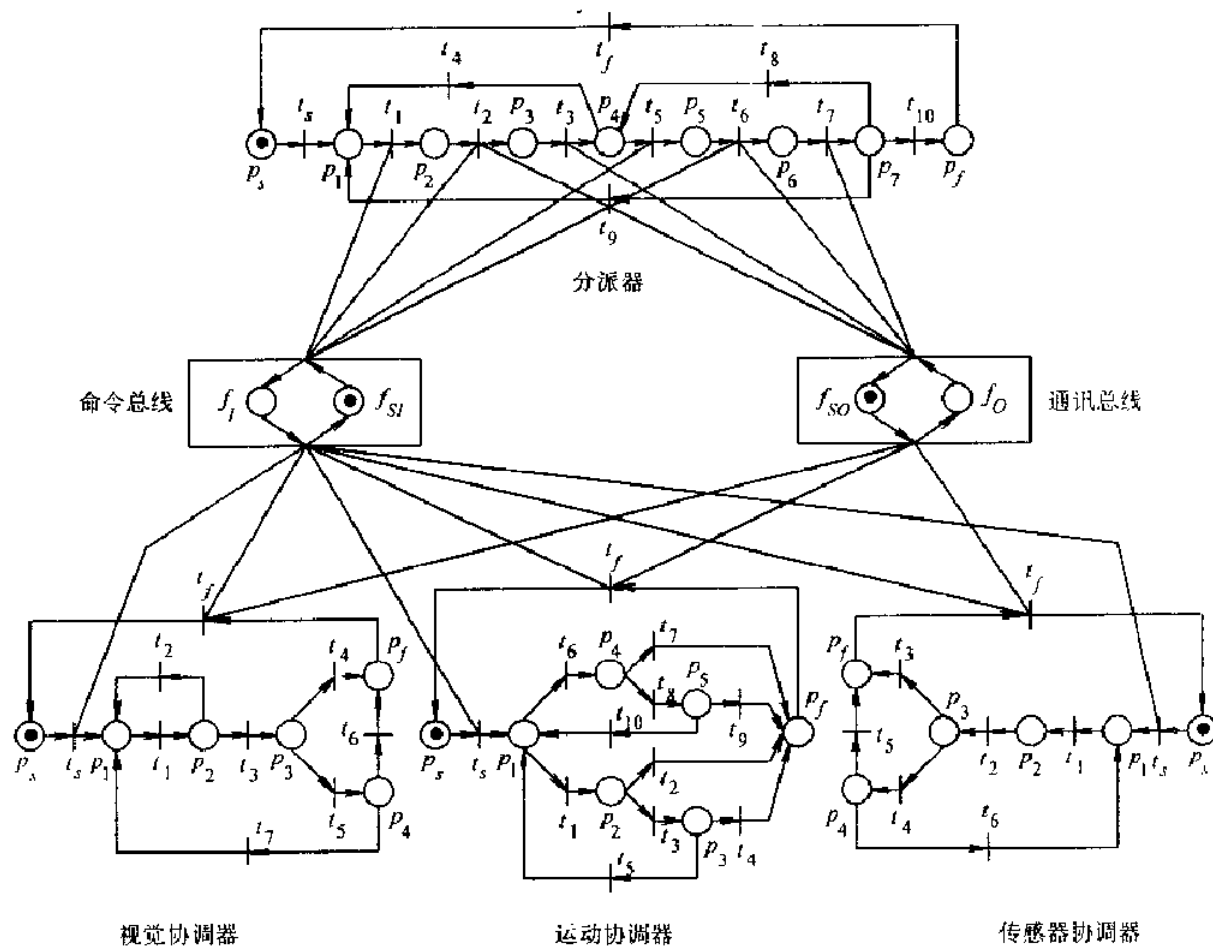
■ 协调级由三个协调控制器组成，分别执行上述三个任务。

- 以准确的次序生成所有精确的子任务

■ 协调级的将组织级指令翻译成执行级的任务的功能可由人工智能实现。

- Petri网翻译器
- 语言决策树

机械臂系统的协调级结构



组织级

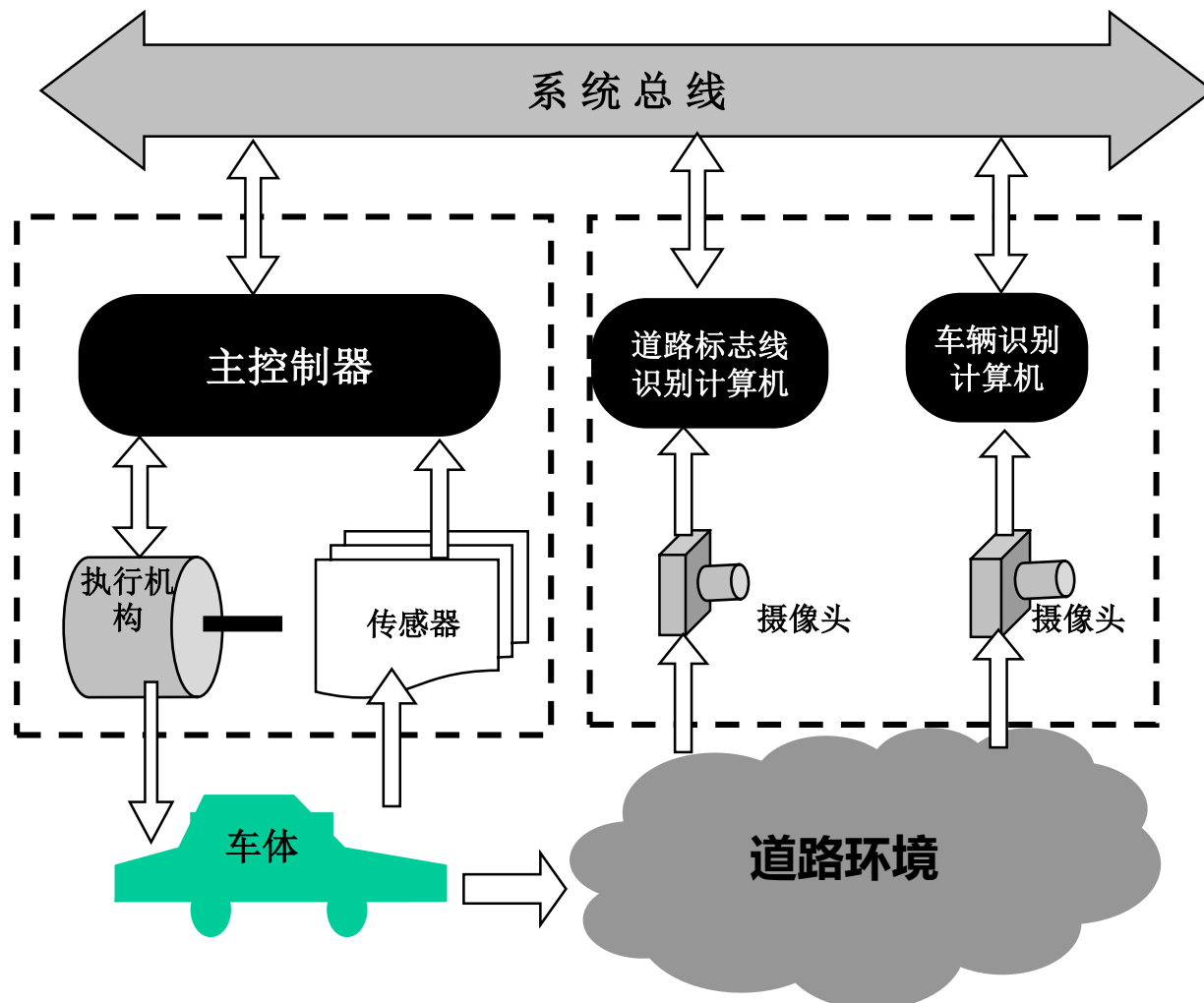
- 两个任务
 - 与操作者交互并接受操作者的指令，
 - 针对不同环境和操作指令组织成各种任务。
- 组织级需进行任务规划，可采用人工智能中的各种问题求解方法。
 - Boltzmann机神经网络
 - 语言决策树
 - 自动机

例：汽车自动驾驶系统

■ 系统总体结构

□ 环境识别子系统

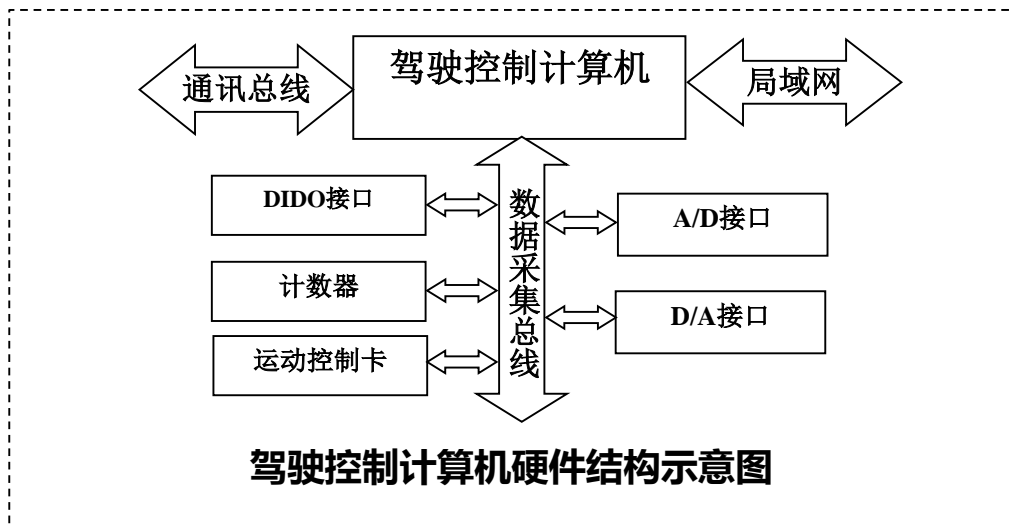
□ 驾驶控制子系统



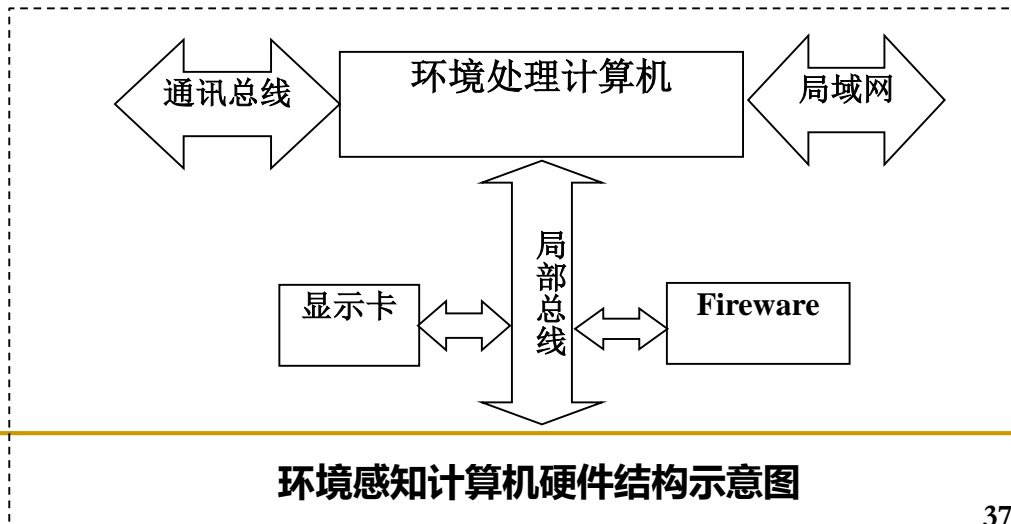
汽车自动驾驶系统结构示意图

自动驾驶系统的硬件结构

■ 驾驶控制子系统



■ 环境识别子系统



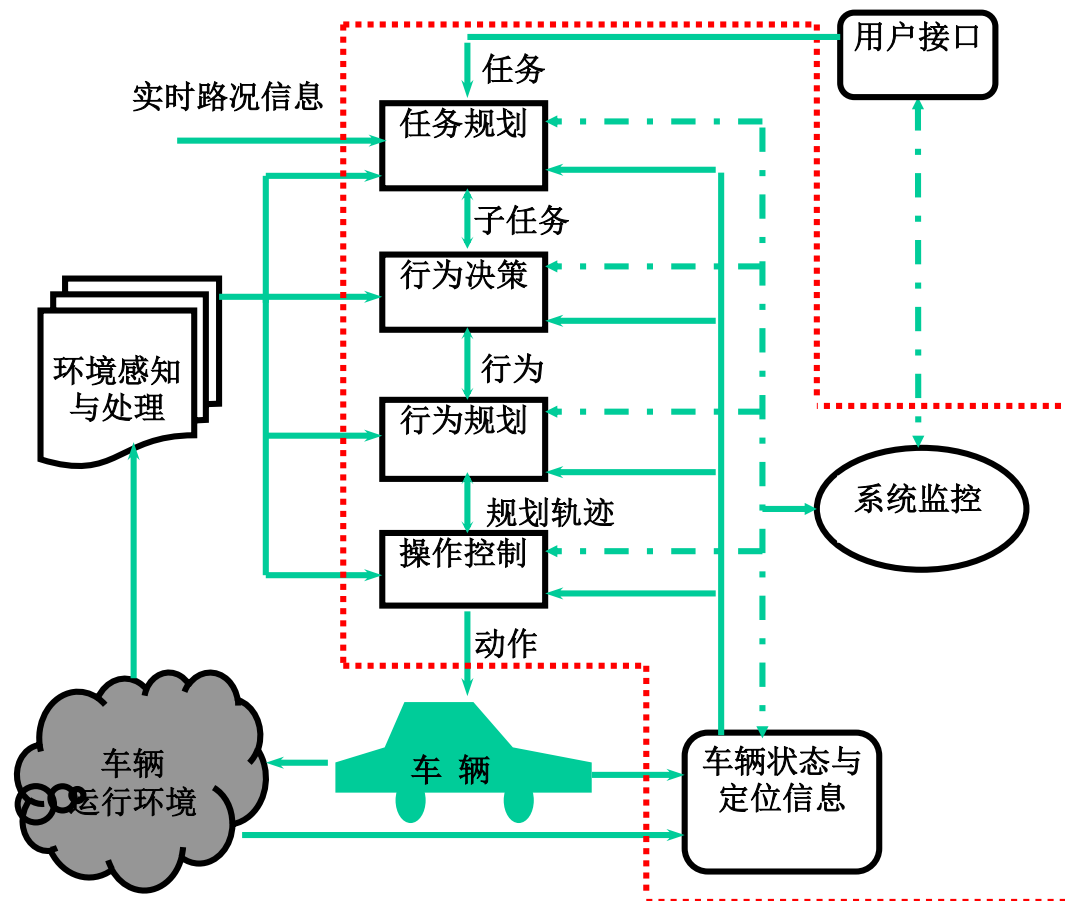
自动驾驶系统的递阶结构

■ 以任务层次分解为基础的 四层模块化结构：

- 任务规划
- 行为决策
- 行为规划
- 操作控制

■ 独立功能模块

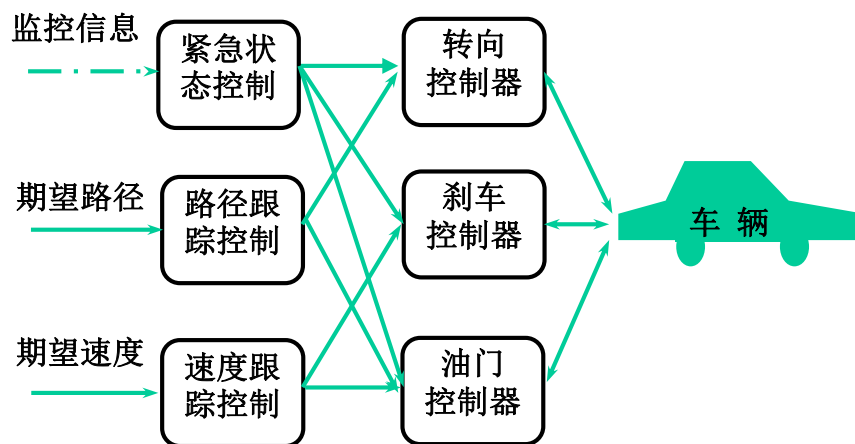
- 车辆状态与定位信息
- 系统监控



汽车自动驾驶控制系统的四层模块化结构

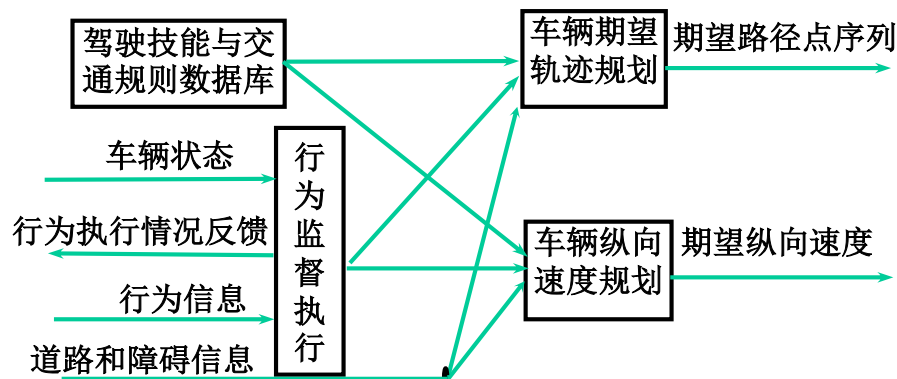
自动驾驶系统的递阶结构

■ 操作控制层



操作控制层主要模块示意图

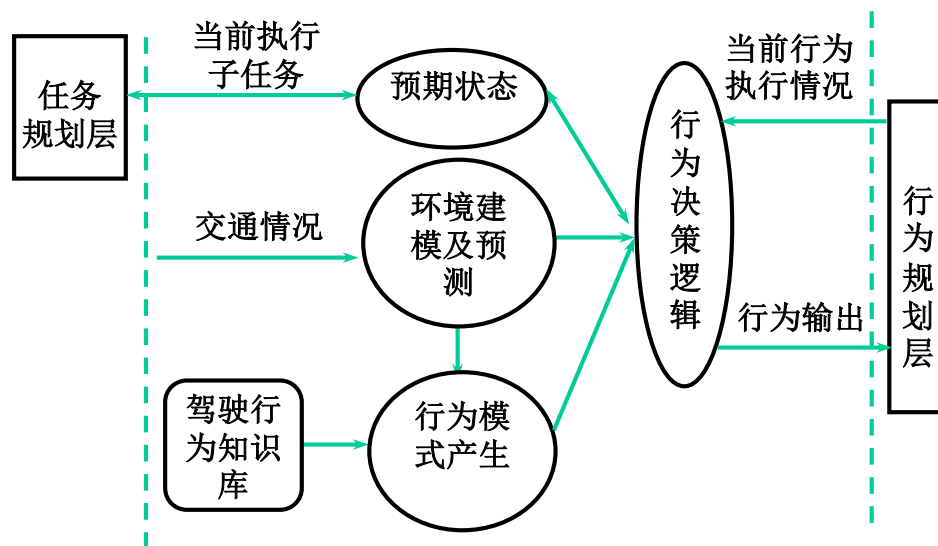
■ 行为规划层



行为规划层主要模块示意图

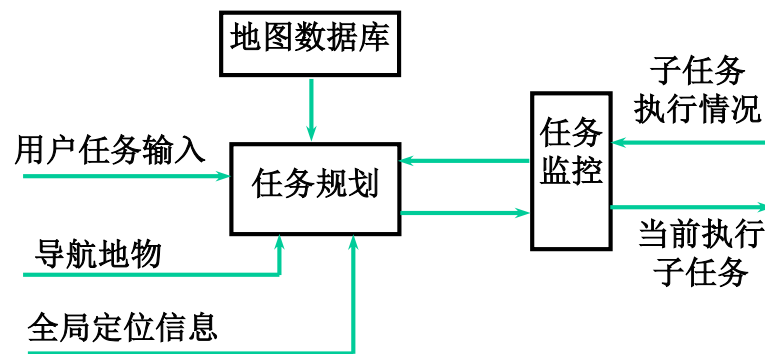
自动驾驶系统的递阶结构

■ 行为决策层



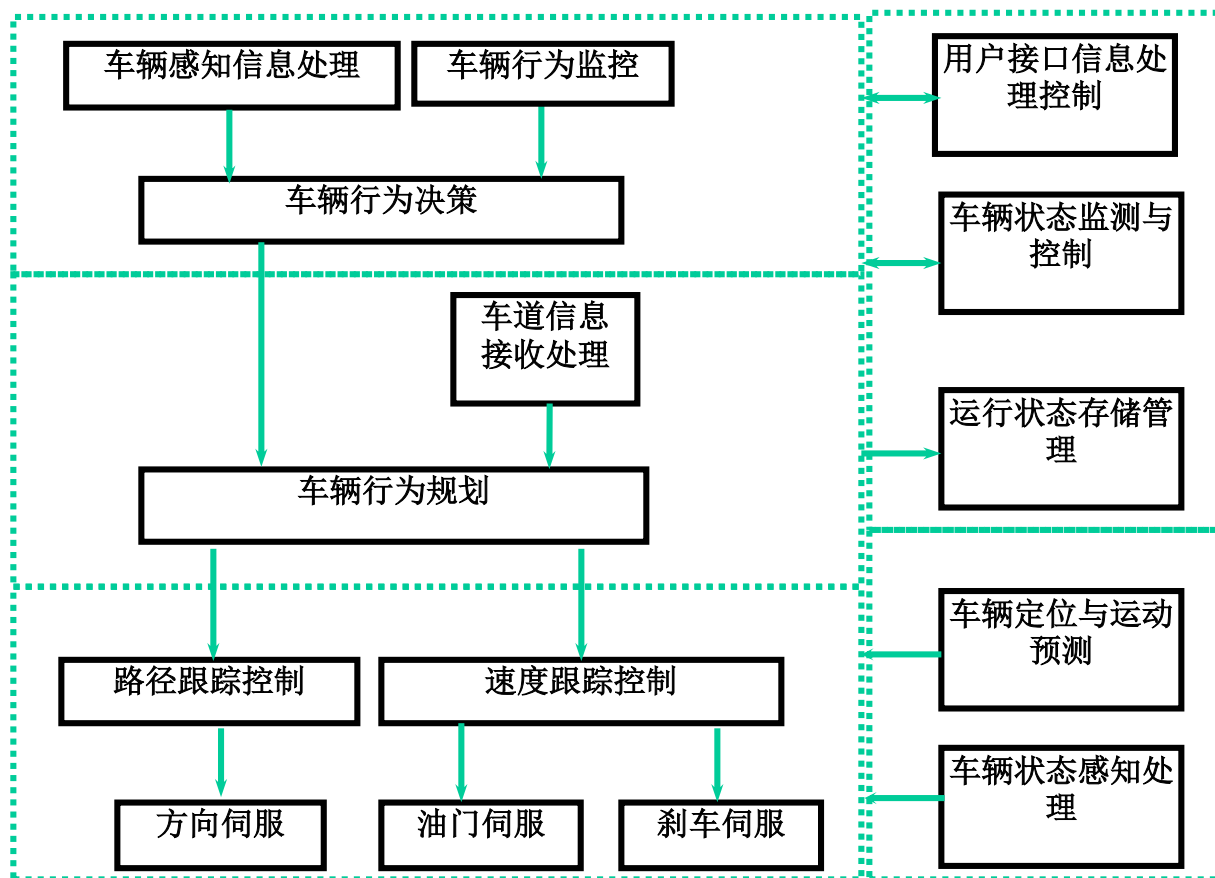
行为决策层主要模块示意图

■ 任务规划层



任务规划层主要模块示意图

驾驶控制系统的软件结构

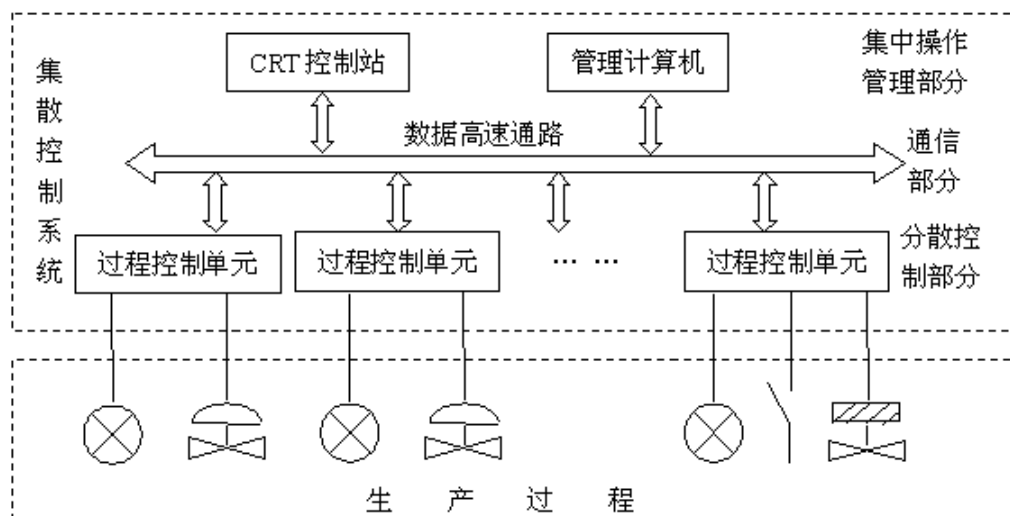


驾驶控制系统软件结构示意图

4、集散递阶智能控制

集散控制系统（DCS）

- 集散控制系统（**Distributed Control Systems**）是计算机技术、控制技术，通信技术和图形显示技术相结合的产物。
- **DCS**特有的结构形式与智能控制的分级递阶结构相吻合，因此，直接将递阶智能控制理论应用于集散控制系统，形成集散递阶智能控制系统，是集散控制系统发展的自然趋势。



DCS系统组成

■ 分散过程监控装置

- 集散控制系统与生产过程的界面，生产过程的各种过程变量或状态信息通过分散过程监控装置转换为操作监视的数据，而各种操作信息则通过分散过程监控装置送到执行机构。
- 在分散过程监控装置内，进行模拟量与数字量的相互转换，完成各种输入、输出的数据处理和控制算法运算。

■ 集中操作管理装置

- 操作管理人员与集散控制系统的界面，生产过程的各种参数集中在操作站上显示，操作管理人员通过操作站了解生产过程的运行状况、操纵生产过程和组态回路、调整回路参数、检测故障和存储过程数据。

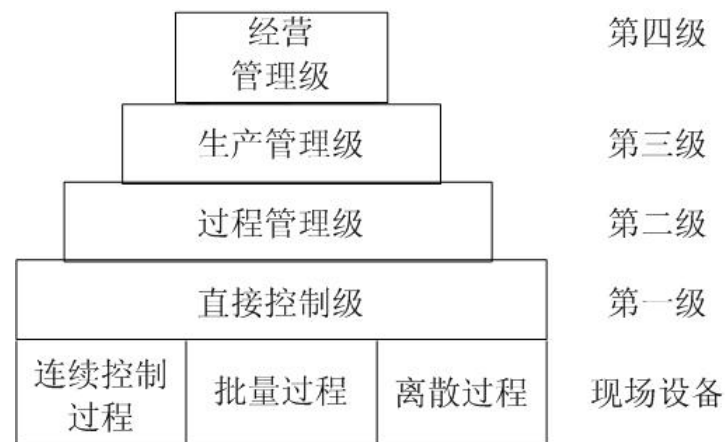
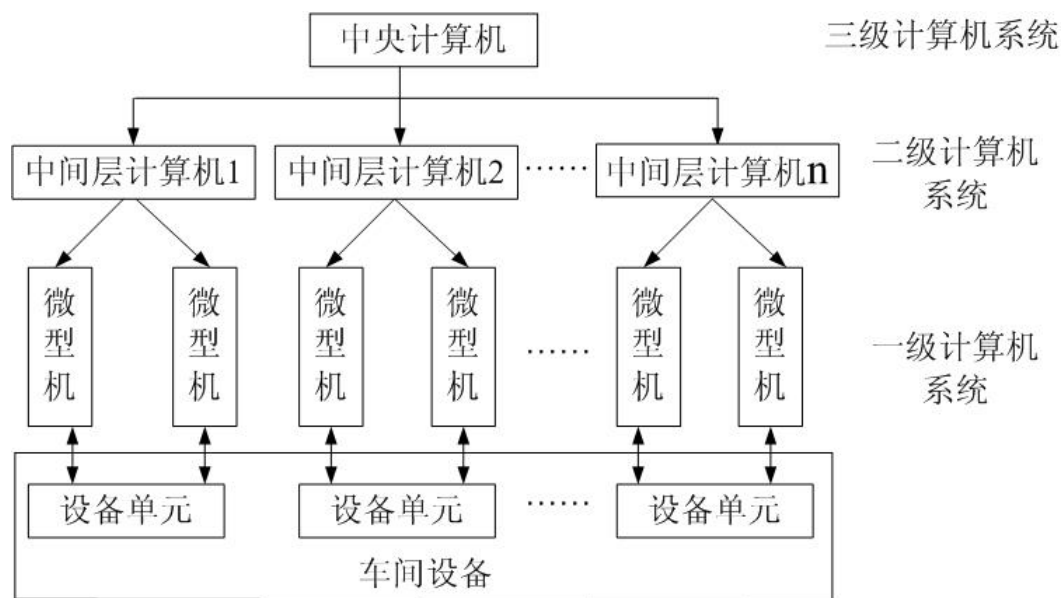
■ 通信系统

- 完成分散过程监控装置与集中操作管理装置之间的数据通信。可通过标准的网络通信手段，与其他的过程控制系统、经营管理系统、生产调度系统互通信息，以完成更加复杂的功能。

DCS部件功能描述

- 基础控制器
 - 完成过程的现场控制任务。
- 数据采集器
 - 用于收集现场控制信息和过程变化信息。
- 高速数据通道
 - 现场总线，连接上下级计算机。
- 操作站
 - 显示操作装置，完成操作者-控制系统-过程的接口任务。
- 监控计算机
 - 通过协调各基础控制器的工作，达到过程的动态在线最优化。
- 管理计算机
 - 完成制定生产计划，产品管理，财务管理，人员管理以及工艺流程管理等功能，以实现生产过程的静态最优化。

集散控制系统的递阶结构



■ 集散控制系统的特点

- ❑ 分级递阶控制
- ❑ 分散控制
- ❑ 自治性与协调性

递阶系统各级功能

■ 第一层：直接控制级

- 进行数据采集、数据检查、数字开环和闭环控制、设备和系统与诊断监测，实施安全性和冗余化。本级为控制的底层，直接对车间生产过程和设备(装置)进行控制。

■ 第二层：过程管理级

- 实施过程操作测试、装置间协调、优化控制过程、自适应控制、错误检测及数据存档。

■ 第三层：生产管理级

- 规划产品结构和规模，进行产品监视、产品报告和工厂生产监视等。

■ 第四层：经营管理级

- 进行市场和用户分析、订货和销售统计、销售计划制订、产品制造协调、合同管理及期限监测等。

递阶系统各级功能

- 执行级：其基本控制器的目标是完成具体的控制任务并达到相当的控制精度，而可编程实现用户特定的控制方案是大多数集散控制系统的基本控制器已经具备的功能。
- 协调级：可通过智能化将监控计算机的协调、优化功能进一步加强，以实现以下功能：
 - 对于来自组织级的控制指令与控制任务，进行规划、设计控制结构和控制算法。
 - 对于来自执行级的过程信息，能够实现过程特性辨识、系统性能评价、对有关任务及各基本控制器进行协调（包括设定值的设定，参数的整定，算法和结构调整等）。
- 组织级：管理计算机可以采用智能决策方法，即由管理计算机模仿专家们的决策技巧，通过综合、推理、规划、记忆交换、反馈等智能行为进行决策。

小结

- 分级递阶的控制结构成为智能控制的一种典型结构。
- 三级递阶智能控制系统由组织级、协调级和执行级组成。
- 在实际应用中，往往采用不同的基于知识的表示和搜索推理技术的组合，这些技术包括状态空间、与或图、谓词逻辑、语义网络、模糊集合、Petri网、规则、过程、黑板和神经网络等。
- 各级按“精度递增伴随智能递减”的原则进行设计。
- 递阶智能控制是基于信息论的智能控制系统。