



清华大学

Tsinghua University

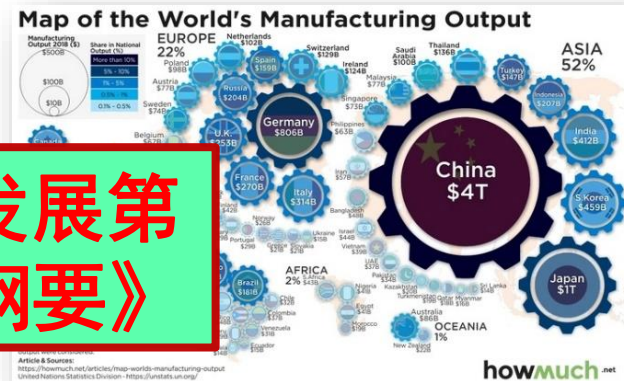
智能制造优化调度及展望

王凌 教授

清华大学自动化系

wangling@tsinghua.edu.cn

中国是唯一拥有联合国产业分类当中全部工业门类的国家



《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》

制造业是国民经济的主体

体现国家

- 以促进制造业创新发展为主题，以提质增效为中心，以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。
- 需要推动制造业优化升级、实施制造业的降本减负，强调深入推进实施智能制造，推动制造业高端化、智能化、绿色化。

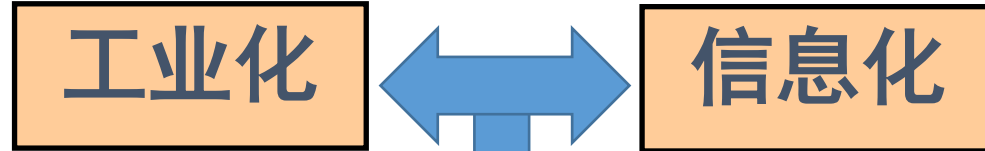
质量效益低下

能源危机和环境污染加剧

碳中和、碳达峰

经济全球化大背景

深度融合



国家战略 重大需求

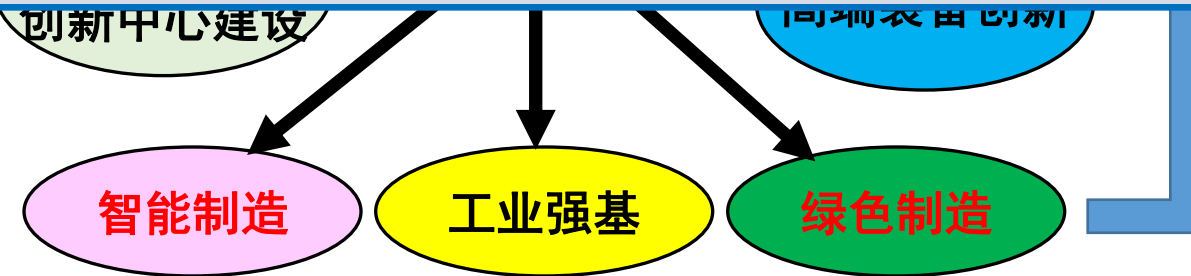
- 缩短开发周期
- 改善产品质量
- 降低生产成本
- 减少资源消耗
- 提高效率
- 提升企业竞争力

- 强调经济指标
- 强调降低环境影响
- 生态制造
- 社会形象
- 持续发展力

- 智能化、绿色化、服务化是制造业的发展方向
- 智能制造（离散）：数字化柔性制造
- 智能优化制造（流程）：全流程整体优化制造
- 制造系统由集中式向分布式转变

加快信息技术在制造业集成应用

综合考虑社会环境影响资源效益



制造即服务(MAAS, Manufacture as a Service)



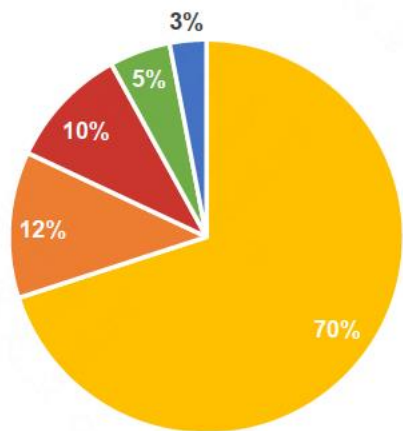
响应国家号召：推动智慧物流发展，完善现代物流体系

- 十四五规划建议：构建现代物流体系，发挥物流业对国民经济的基础性、战略性、先导性作用
- 习近平：要大力发展智慧交通和智慧物流，推动大数据、人工智能等新技术与交通行业深度融合，使人享其行、物畅其流

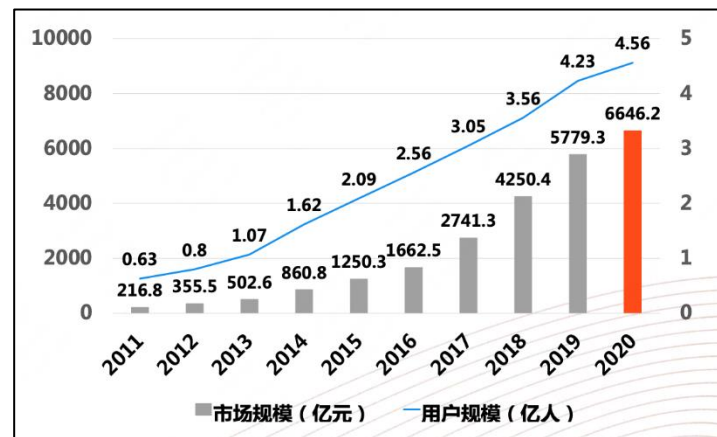


面向社会需求：满足增长的消费需求，保障及改善社会生活

- 满足消费需求：人们需求日益增长且多元化，消费品类拓宽（餐饮、买菜、买药、商超等）
- 保障社会生活：疫情期间将食品、药品快速安全地送至人们手中，保障社会生产生活

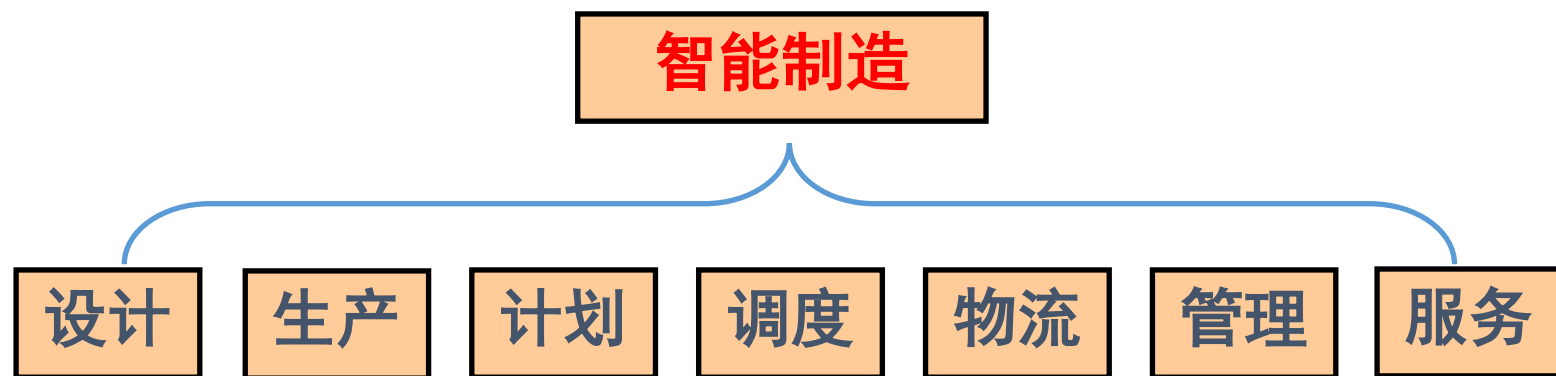


■ 餐饮外卖 ■ 生鲜果蔬 ■ 零售便利 ■ 鲜花蛋糕 ■ 其它



2011-2020年中国在线外卖行业发展情况

- 智能制造
- 智能机器
- 智能物流
- 智能交通
- 智能教育
- 智能农业
- 智能医疗
- 智能旅游
- 智能电力
- 智能矿山
- 智能水利
- 智能环保
- 智能仓储
- 智能商务
- 智能通讯
- 智能材料
- 智能车辆
- 智能搜索
- 智能仪表
- 智能维护
- 智能规划
- 智能监控
- 智能楼宇
- 智能传感
- 智能家居
- 智能服饰
- 智能消防
- 智能政务
- ...



- 不同类型和功能的生产设备的有机互联组成智能生产线
- 不同智能生产线的互联组成智能车间
- 智能车间的互联组成智能工厂
- 不同区域、行业、企业的智能工厂的互联才组成智能制造系统

分布式网络化的智能制造系统必须充分利用多个企业或工厂或车间的资源，利用新一代信息技术和先进管理理念，采用合理的分工和协作方式，通过资源的合理配置、优化组合及共享，力争低成本、低风险实现高效率高效益的产品制造。

首页 · 工学 · 控制科学与工程 · 控制系统性能 · 智能控制 · 能控与能观性 · 智能控制 · 能控性 · 模糊控制 · 运筹学

调度模型 /scheduling model/

条目作者
王凌

🕒 最后更新 2022-07-31

👁️ 浏览 2次

A+ A-

调度问题的表征方式，在满足工艺以及人力、资金、设备等资源约束的前提下，通过合理分配资源、安排操作顺序与执行时间，使得某些时间、经济、环境等方面的指标最优化。

英文名称

scheduling model

所属学科

控制科学与工程

通常采用数学语言的表征方式，即定义决策变量，定量或定性描述决策变量之间、决策变量与目标函数之间、决策变量与约束条件之间的相互或因果关系，譬如[线性规划](#)、[整数规划](#)、[混合整数规划](#)、[非线性规划](#)等模型。随着智能优化的发展及其在调度问题上的推广应用，调度模型扩充出基于计算智能的特征模型，通过调度方案的编码、调度指标的解码评价、调度问题的特征分析、调度方案的调整策略等，描述调度问题的特性，并设计调度问题的求解方法。基于特征模型的调度方法，譬如[遗传算法](#)，为复杂调度问题的求解提供了新的思路和途径。合理的调度模型有利于快速地以及高质量地解决调度问题。

- 在满足工艺以及人力、资金、设备等资源**约束**的前提下，通过**合理设置运作模式、分配有限的资源、安排活动的顺序与执行时间**，使得某些时间、产量、经济、质量、能耗、排放、回收等指标**最优化**。



优化调度是制造系统的核心环节，是增效、节能、减排、降耗、提升竞争力的关键！

即时配送

物流仓储

无人商店

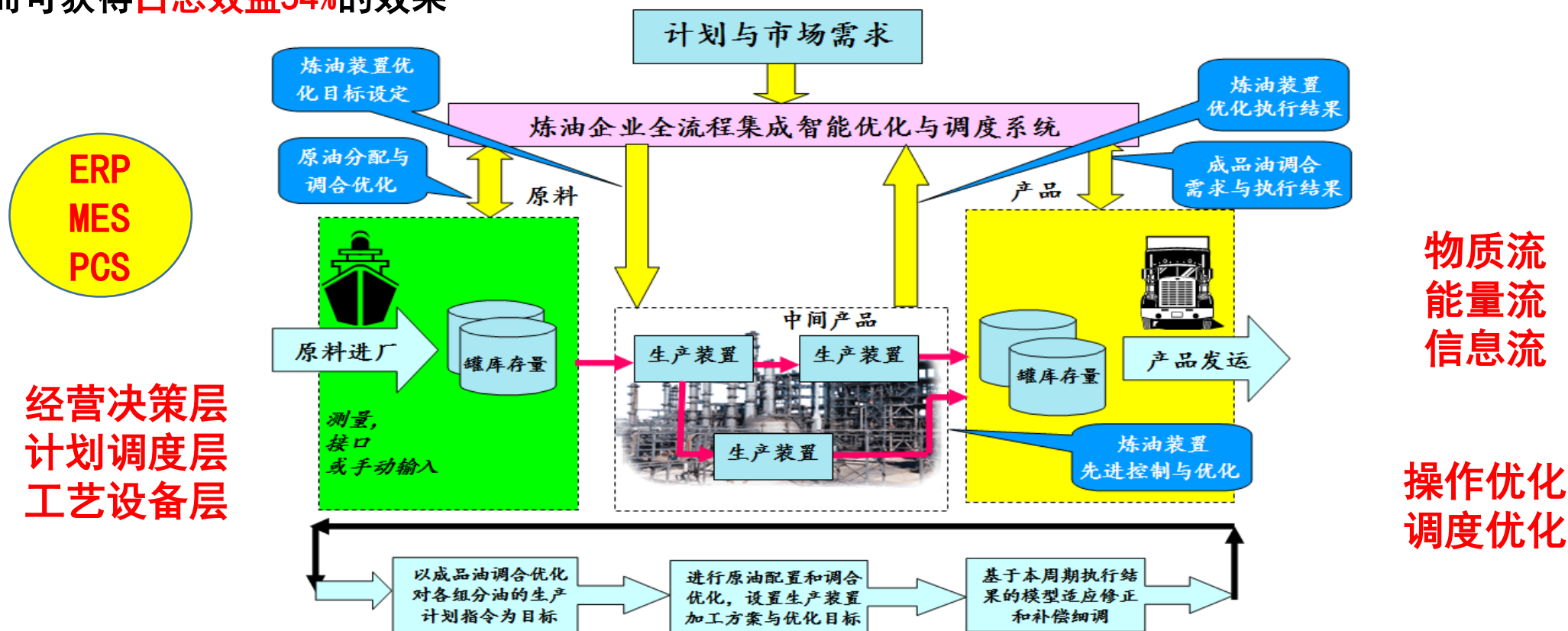
神州专车

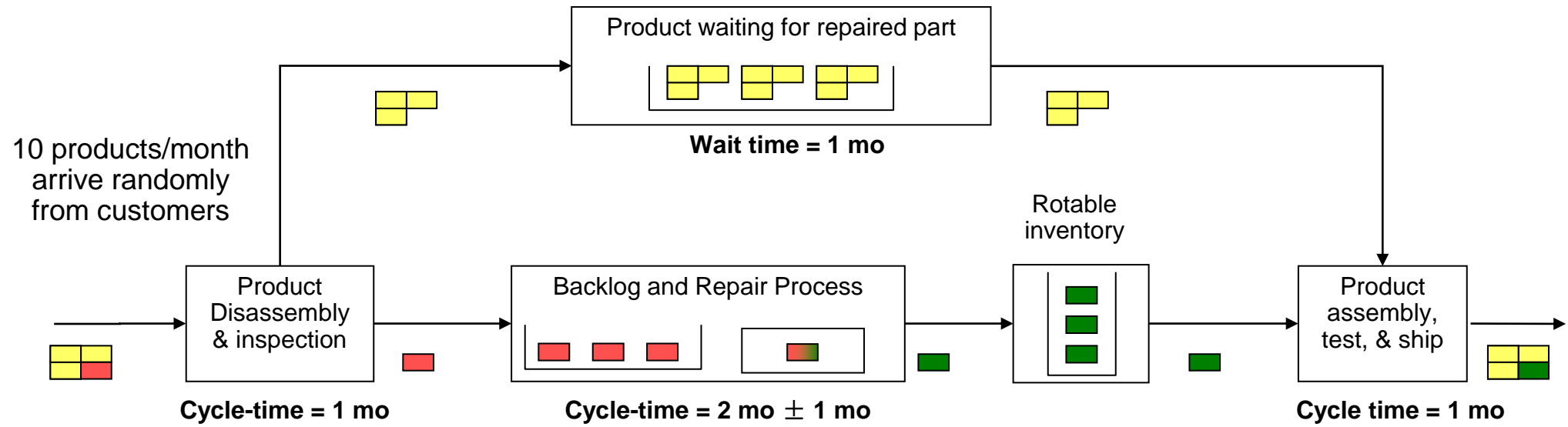
- 物流调度
- 交通调度
- 能源调度
- 护理调度

• 京东无人商店

■ 优化调度是制造系统的核心环节，是提高效率、增大效益、提升企业竞争力的关键

- 中国是世界第一大制造业国家，2018年流程工业总产值占全国规上企业总产值的49.94%
- SIMCON公司在炼油厂计算机应用和效益比例的分析报告中指出，实现在线优化和先进控制占总投资的21%，而可获得占总效益54%的效果





飞机智能维护过程



半导体制造

(Re-entry, batch, multi-processor)



炼钢

(No-wait, batch)



纺织

(Parallel, multi-stage)



玻璃制造

(No-idle)



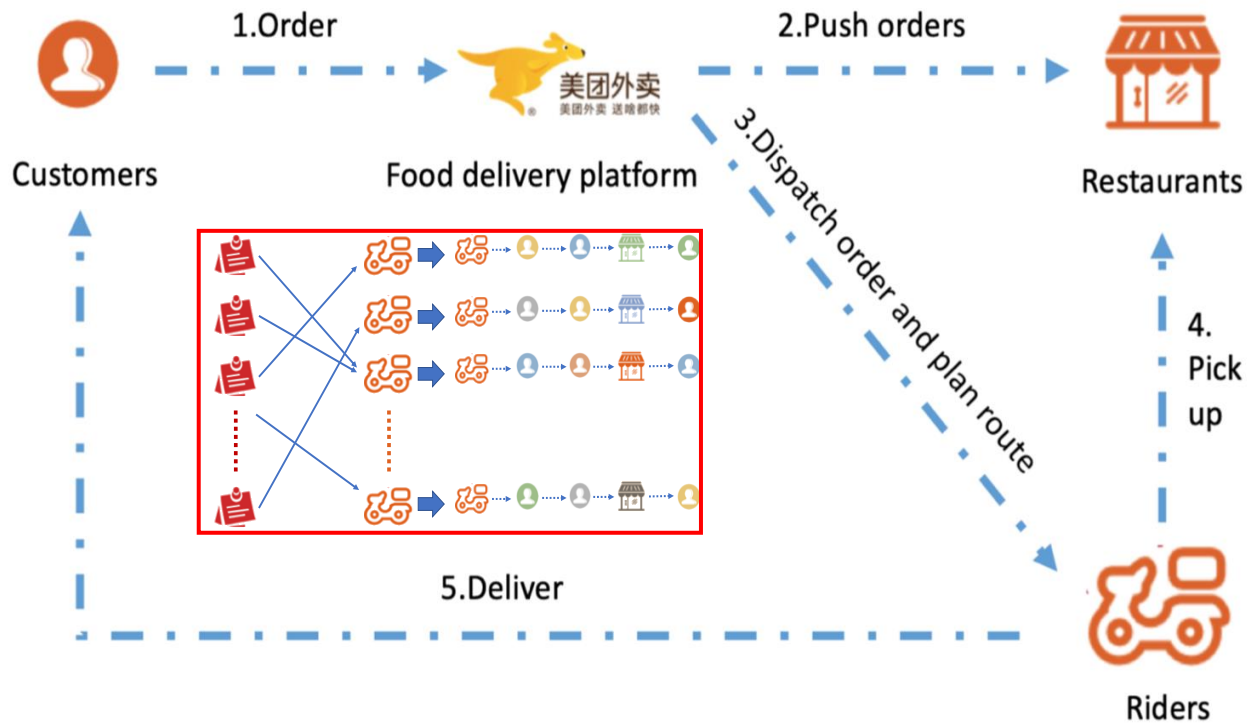
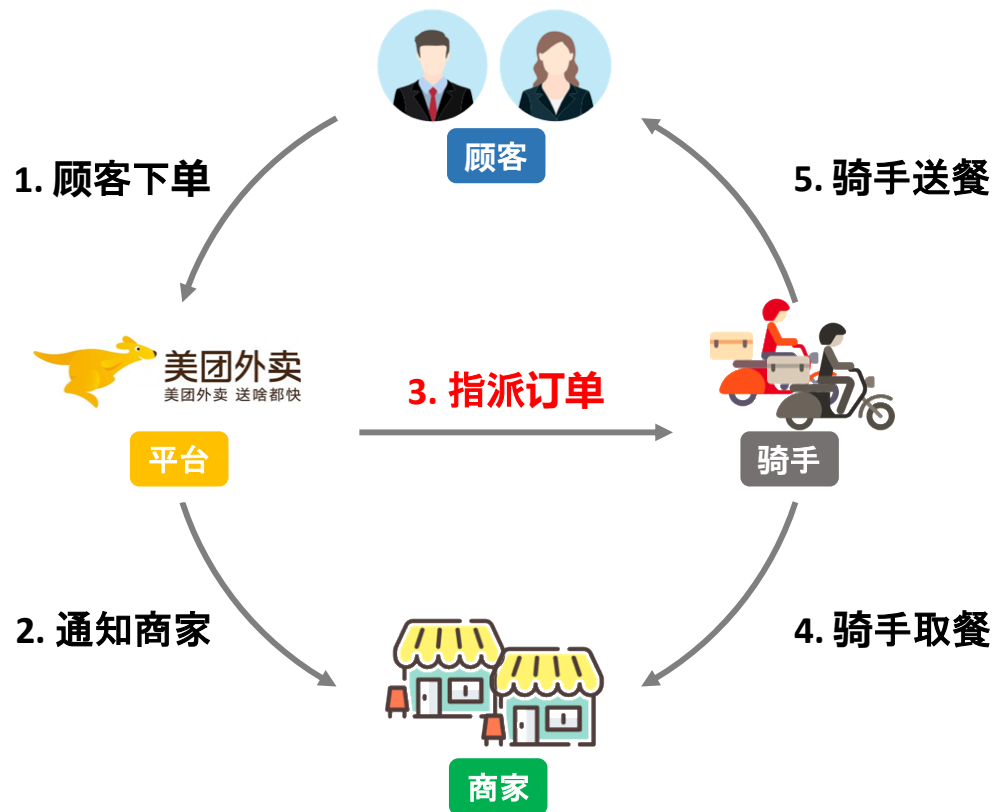
石化生产

(Mixed, batch)



机械加工

(Precedence constraints)



配送单量
不断提升

日均订单
超过5000万

业务复杂

派单、抢单、推单
专送&快送

资源紧张
计算压力高

秒级处理
不确定性

配送效率
用户体验

准时率
配送时长

强动态



实时决策、信息动态变化

高时效

美团外卖智能调度 **28分钟**内送达

网络营销掌中... 12-18 08:44

饿了么-外卖美食 **30分钟**准时送达
点咖啡下午茶夜宵,24小时配送

分钟级配送+秒级决策

大规模



问题求解规模大

即时配送调度的问题建模和算法设计挑战巨大，是提升配送质量、提高配送效率和改善用户体验的关键！

奇手

多约束



诸多约束下易产生不可行解

- 问题约束：时间窗、容量约束等
- 业务约束：快送&专送、接单上限等

多目标



多个优化目标可能存在冲突

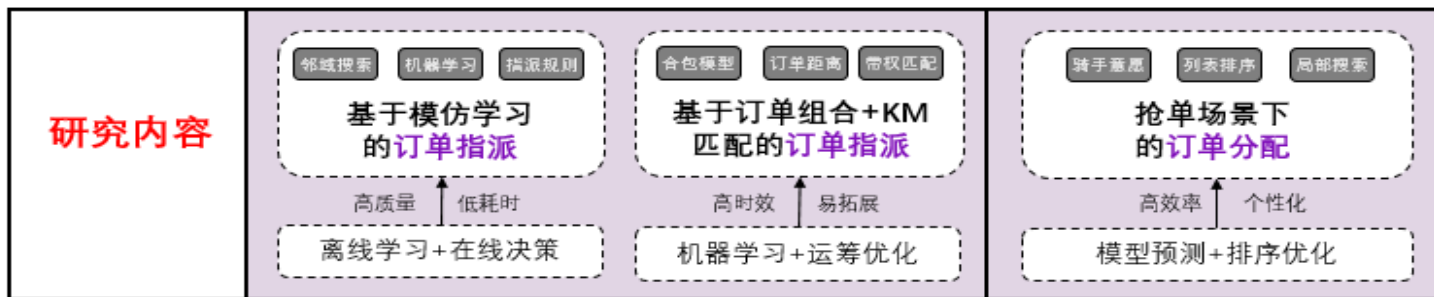
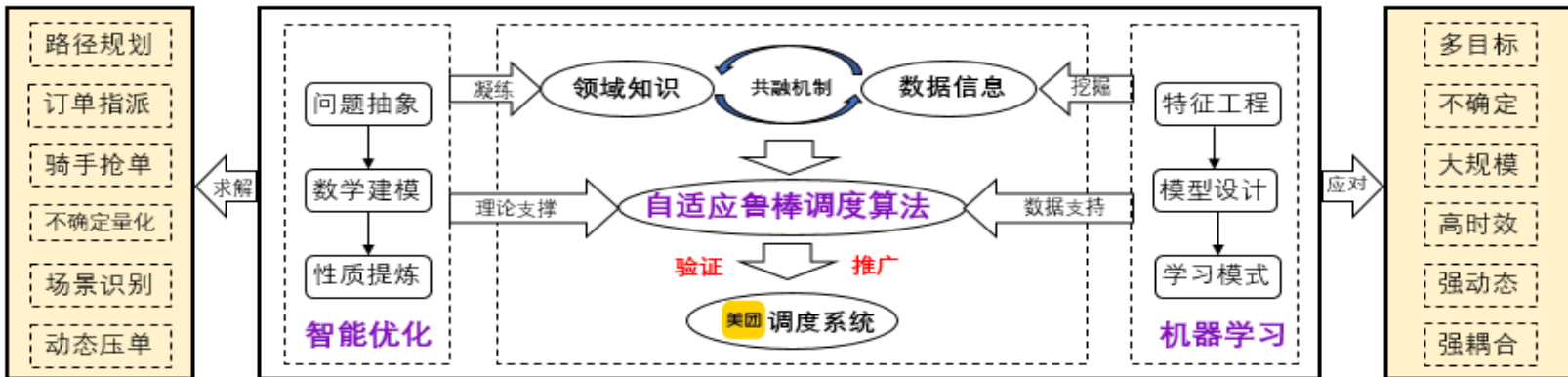
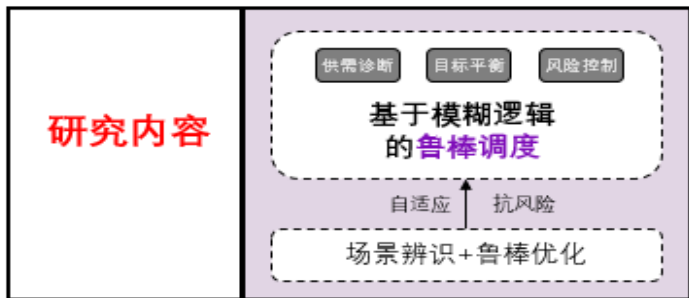
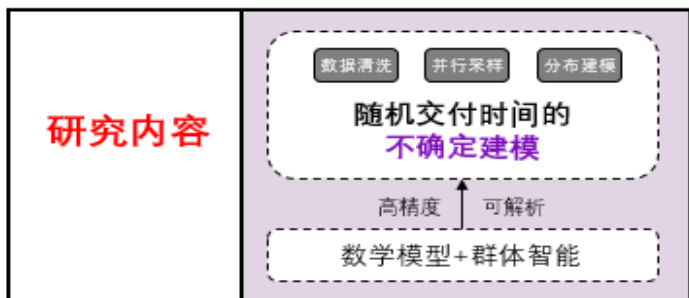
- 顾客体验、骑手意愿、商家诉求

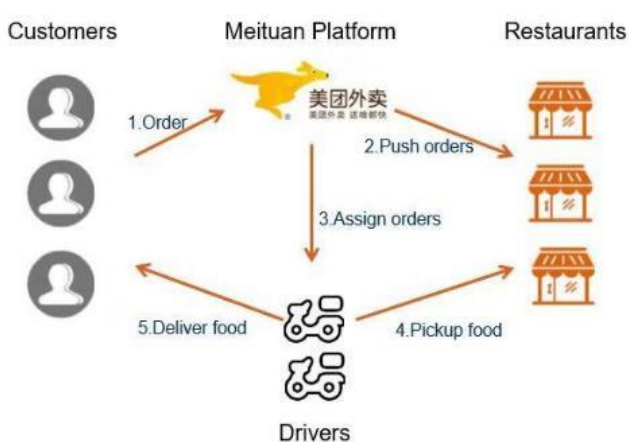
强耦合



耦合子问题互相影响

- 订单指派、路径规划
- 子问题需协同评价





全球最大的一站式生活服务电商平台

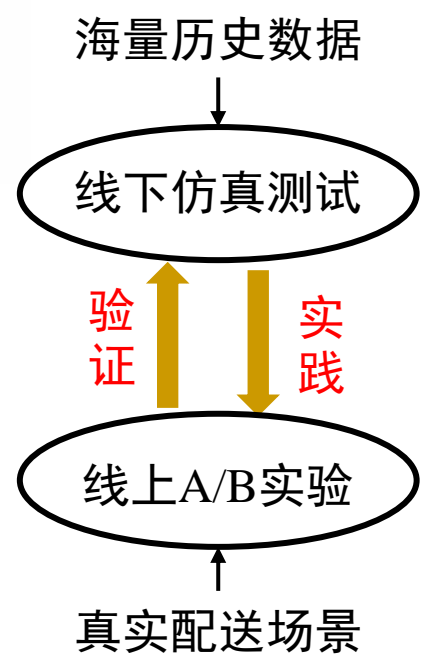


顾客体验

- 相对准时率 **提升 0.14%-1.16%**
- 超55分钟运单占比 **下降 0.17%-2.72%**
- 15分钟超时率 **降低 0.09%-0.88%**

配送效率

- 单均行驶距离 **降低 0.37pp-4.16pp**
- 单均配送时长 **下降 0.10min-0.70min**
- 5分钟接单率 **提升 0.16%-2.00%**



最佳科研合作奖



全球运筹与管理科学最高奖项 1972-

2023' 弗兰兹·厄德曼奖入围名单



Home > News Room > INFORMS Releases > Awards Releases >
Finalists Selected for the World's Leading Operations Research and Analytics Award: 2023 INFORMS
Franz Edelman Award Competition Elevates Research...

IN THIS SECTION

Finalists Selected for the World's Leading Operations Research and Analytics Award: 2023 INFORMS Franz Edelman Award Competition Elevates Research that is Saving Lives, Saving Money and Solving Problems

美团“智能决策平台”

DHL Supply Chain. A new software system, “The Transport Network Optimizer,” has been developed with The Ohio State University Department of Integrated Systems Engineering that supports bidding on projects and positioning. It solves large-scale routing and is saving more than \$98.6 million/year with a total past savings of \$116.5 million.

Huawei Cloud. To minimize bandwidth cost while ensuring high-quality B2B live-streaming services in 60 countries, Huawei Cloud developed the GSCO system, integrating forecasting, network planning and sequential offline-online traffic allocation. GSCO has helped reduce 30% in bandwidth cost, or \$49.6 million, while supporting a tenfold increase in traffic volume within two years.

JD.com, Inc. China's leading e-retailer operates a vast in-house logistics network of approximately 1,400 warehouses. They have developed three novel technologies: end-to-end optimization, intelligent risk management and C2M (consumer-to-manufacturer). These technologies facilitate JD.com to achieve three levels of superior performances, including daily operational excellence, resiliency under disruption and value creation for the ecosystem.

Lyft, Inc. During the height of the COVID-19 pandemic, Lyft changed the algorithm that matches passengers and drivers. The new approach uses online reinforcement learning to constantly self-improve, allowing drivers to serve millions of additional rides each year. The innovation benefited drivers, passengers and the platform, and generated more than \$30 million in incremental annual revenue.

Meituan. As a tech-driven retail company, they have a strategic focus on “Retail + Technology.” Every day, more than 60 million on-demand orders are delivered through its leading minute-level delivery network. This relies on assigning massive orders to appropriate couriers in seconds. An intelligent dispatch system is built to continuously improve the assignment quality for couriers and consumers.

Walmart. The world's leading retailer used advanced optimization models to build a transformation roadmap for long-term supply chain capital investments as well as an application supporting daily decisions of truck routing and loading. The application avoided 72 million pounds of CO2 and resulted in a savings of \$75 million during fiscal year 2023.

- 优化技术是一种**以数学为基础**，用于求解各种工程问题优化的**应用技术**。任何控制与决策问题本质上都是优化问题！

- 函数优化
- 组合优化

$$\begin{aligned} \min f(x), x \in R^n \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0, 1 \leq i \leq l \\ h_i(x) = 0, l+1 \leq i \leq m \\ lb \leq x \leq ub \end{aligned}$$

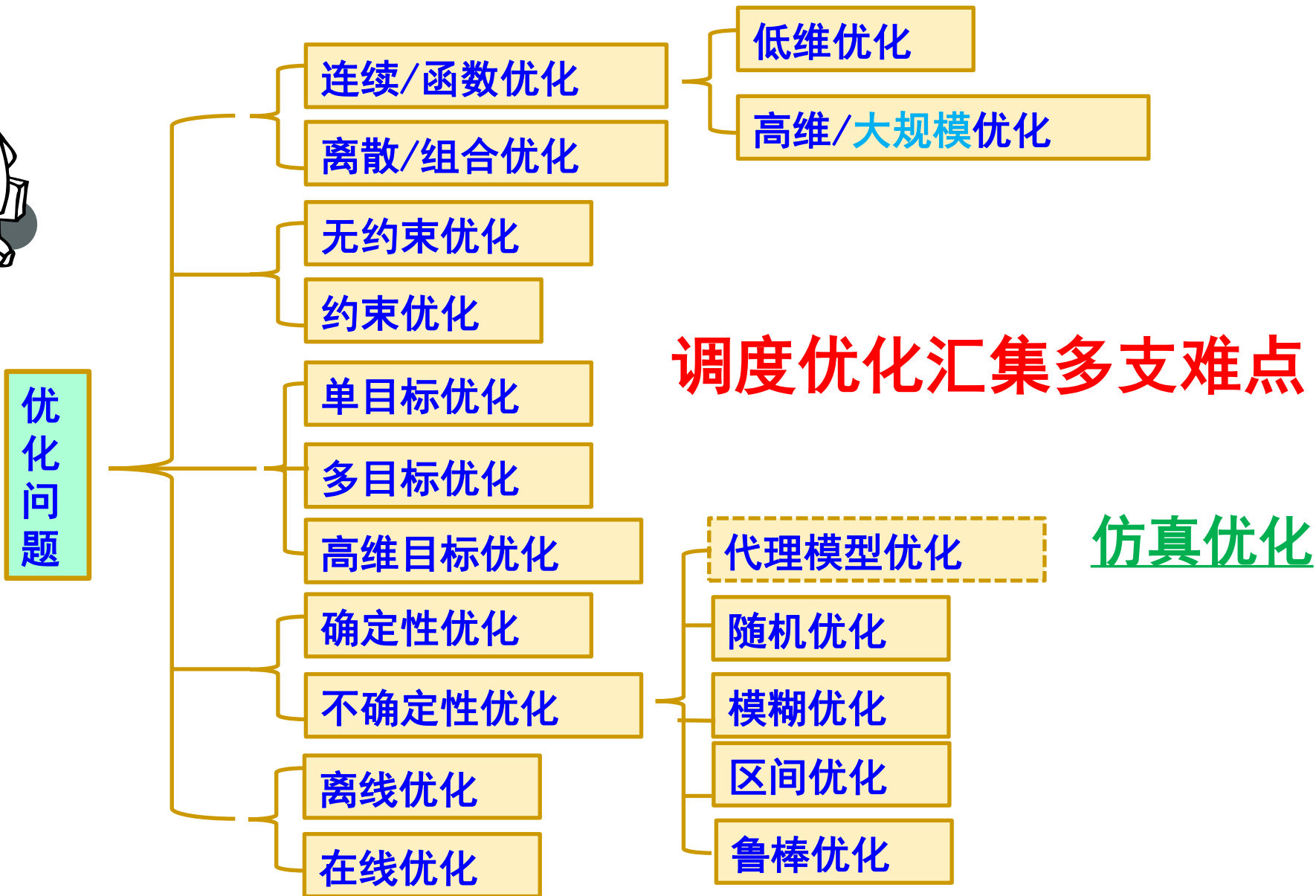
结构设计

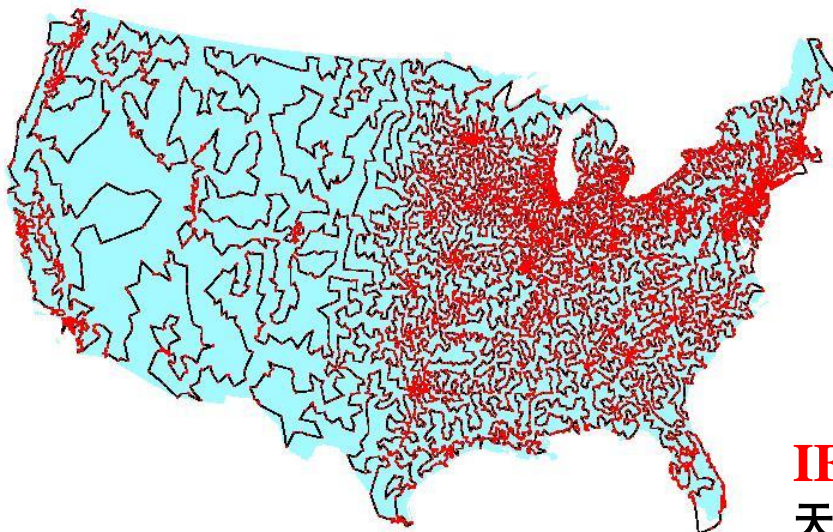
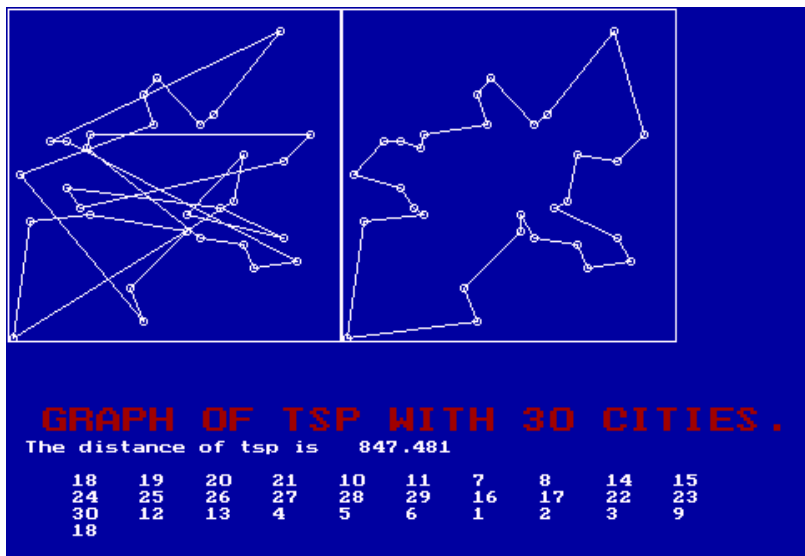
□ 优化问题的三要素

- 决策变量
- 约束条件
- 目标函数

$$\text{Find } s^*, \forall s \in \Omega, C(s^*) = \min C(s), \quad \Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

物流、背包





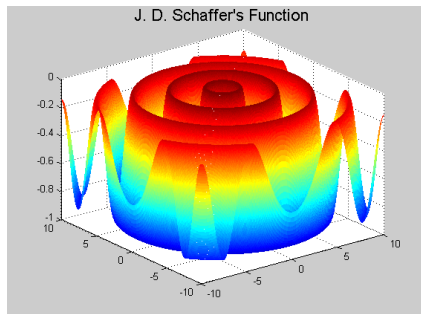
IF每秒列举24! $\approx 6.2 \times 10^{23}$
天河二号超级计算机系统峰值计算速度仅每秒 5.49×10^{16}

$$30! > 2.65 \times 10^{32}$$

从30!个解中寻找最优解，若计算机1秒列举100亿个解，则穷举需要约 8.4×10^{14} 年！
若穷举20! 个解也需要7.7年多时间！

城市数	24	25	26	27	28	29	30	31
计算时间	1 sec	24 sec	10 min	4.3 hour	4.9 day	136.5 day	10.8 year	325 year

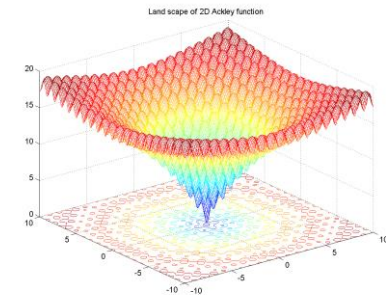
M1	2	9	1	7	4	5 10	8	6	3					
M2	4	6	7	10	9	5	3	8	1	2				
M3	6	4	5	8	2	7	10	9	1	3				
M4		6	7	9	5		3	1	2	4	10	8		
M5			4	2	5	6	8	1		7	9	10	3	
M6		6		5	9	7	8		1	10	3	2	4	
M7			7	4		6		9	8	1	2	3	5	
M8				4	6	5	9	7	3	1	8	2	10	
M9		6		4	10	5	7	3	8		9	1	2	
M10			6		7	2	9	10	5		8	4	3	1

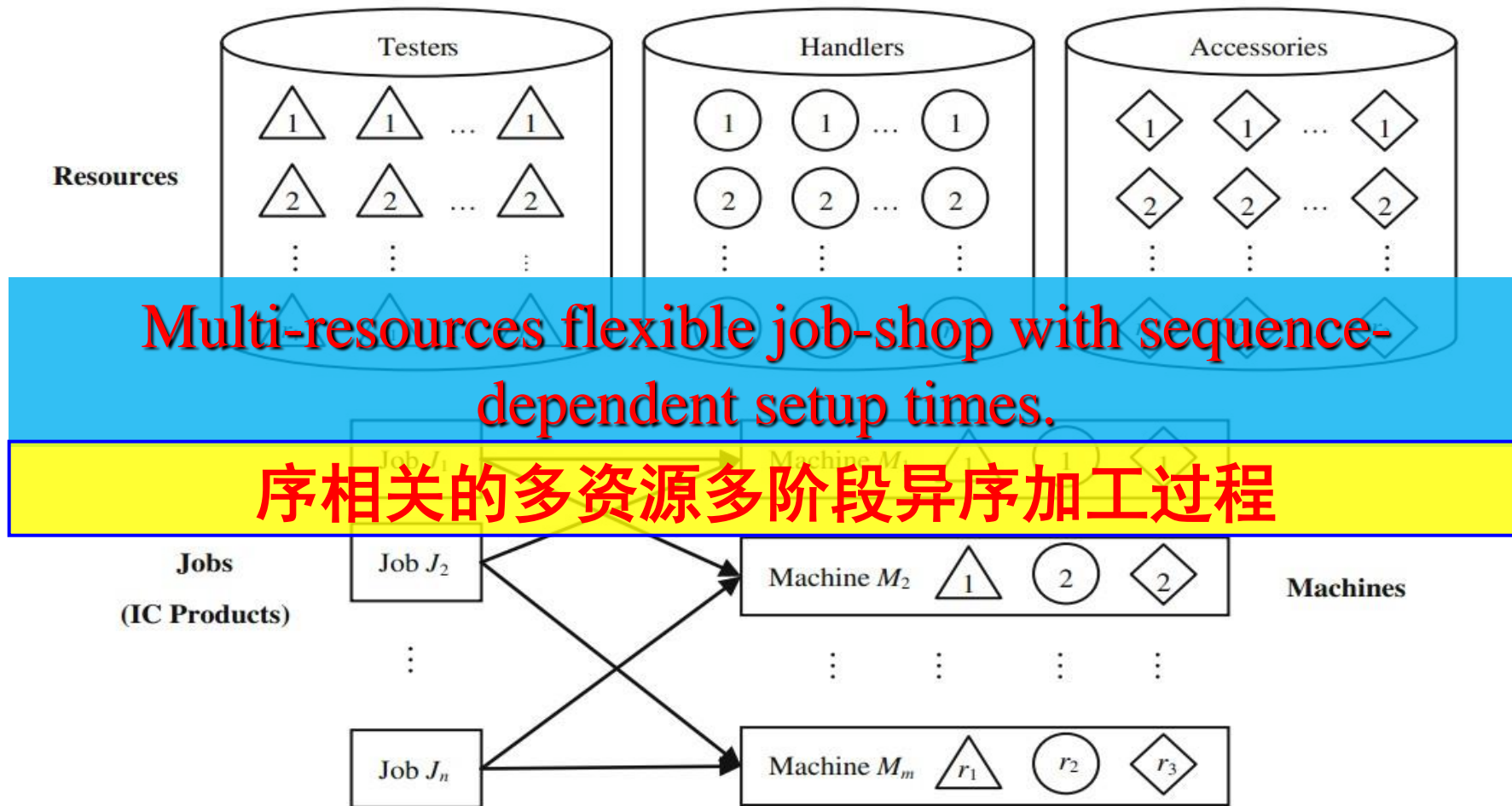


$$(10!)^{10} > 3.959 * 10^{65}$$

10工件10机器的Job-shop调度结果

巨大的搜索空间 $(10!)^{10}$ 工艺约束多且耦合 缺乏结构信息





功能测试、预烧、扫描、烘烤、卷带包装与加载, ...

Mathematical formulation

建模难、评模难、解模难，CPLEX求解规模有限

$$\text{Minimize } \mathbf{c}_{\max} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} a_{omt} - p_{om} b_{om} - s_m \sigma_{om} - \sum_{(p,l) \in \mathbf{V}_{om}} s_{lm} \sigma_{plom} = 0, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (3)$$

$$\sum_{m \in \mathbf{M}_o} b_{om} = 1, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j \quad (4)$$

$$\sum_{(p,l) \in \mathbf{V}_{om}} \sigma_{plom} + \sigma_{om} = b_{om}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (5)$$

$$\sum_{(p,l) \in \mathbf{W}_{om}} \sigma_{ompl} \leq b_{om}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (6)$$

$$\sum_{m \in \mathbf{M}^r, o \in \mathbf{O}^m} a_{omt} \leq Q_{rt}, \quad \forall t \in \mathbf{T}, n \in \{1, 2, \dots, N\}, r \in \mathbf{R}^n \quad (7)$$

$$a_{omt} - a_{om,t-1} = \alpha_{omt} - \beta_{om,t-1}, \quad \forall t \in \mathbf{T} \setminus \{1\}, j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (8)$$

$$a_{om1} = a_{om1}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (9)$$

$$a_{omT} = \beta_{omT}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (10)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \alpha_{omt} = b_{om}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (11)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \beta_{omt} = b_{om}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (12)$$

$$c_p + 1 \leq e_o + T \left(1 - \sum_{m \in \mathbf{M}_o, r \in \mathbf{R}_m, l \in \mathbf{M}^r} \sigma_{plom} \right), \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, p \in \mathbf{V}_o \quad (13)$$

$$c_p + 1 \leq e_o, \quad \forall j \in \mathbf{J}, p, o \in \mathbf{O}_j, p \rightarrow o \quad (14)$$

$$c_o = \sum_{t \in \mathbf{T}, m \in \mathbf{M}_o} t \beta_{omt}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j \quad (15)$$

$$e_o = \sum_{t \in \mathbf{T}, m \in \mathbf{M}_o} t \alpha_{omt}, \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j \quad (16)$$

$$\tau_j \geq c_{\wedge_j} - D_j, \quad \forall j \in \mathbf{J} \quad (17)$$

$$\tau_j \geq 0, \quad \forall j \in \mathbf{J} \quad (18)$$

$$C_{\max} \geq c_{\wedge_j}, \quad \forall j \in \mathbf{J} \quad (19)$$

$$a_{omt} \in [0, 1], \quad \forall t \in \mathbf{T}, j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (20)$$

$$b_{om} \in [0, 1], \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (21)$$

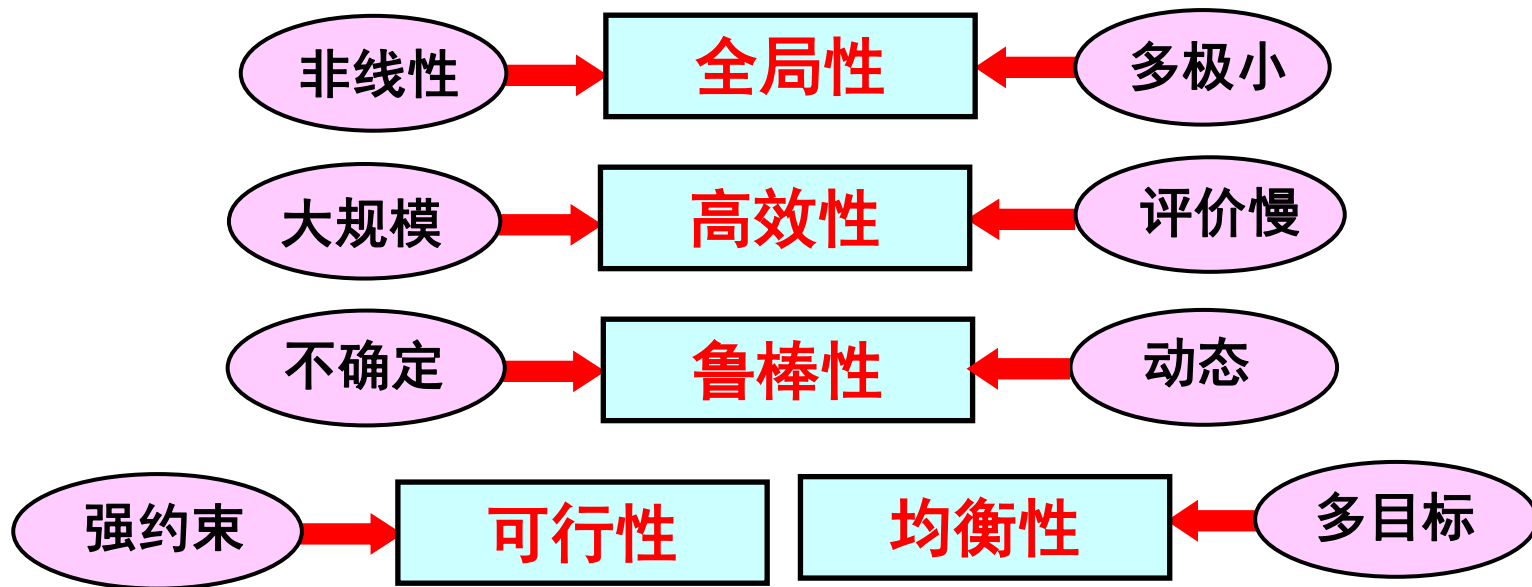
$$\sigma_{plom} \in [0, 1], \quad \forall j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o, (p, l) \in \mathbf{V}_{om} \quad (22)$$

$$\sigma_{om} \in [0, 1], \quad \forall t \in \mathbf{J}, j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (23)$$

$$0 \leq \alpha_{omt}, \beta_{omt} \leq 1, \quad \forall t \in \mathbf{T}, j \in \mathbf{J}, o \in \mathbf{O}_j, m \in \mathbf{M}_o \quad (24)$$

- 工程问题存在诸多复杂性，**调度优化面临巨大挑战**
- 传统方法优化质量差、效率低、对初值依赖性强

- 互联网 +: **数据为王**
- 智能 +: **场景为王**



建模难、评模难、解模难

- **注重多学科交叉，加强智能技术与领域知识融合**
- **综合基于数学的理论分析与基于数据的智能解析**

实现全局、高效、鲁棒优化极其困难！



Massively distributed manufacturing

Science, 2021, 372(6540): 341-342.

INSIGHTS | PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

ENGINEERING
Distrib
for an
Networked
public can

By Chinedum E. O.
Harsha V. Madhya

Cyber-physical-operational systems will thus allow the collaboration of large, autonomous, heterogeneous, and geographically dispersed networks of manufacturers to rapidly respond to production demands and disruptions with agility and flexibility, while ensuring the high quality, productivity, and cost effectiveness of MDM.

Distribution represents the...
ing atten...
Distribute...
allows for...
production, often...
the end user...
large populations...
to engage in manufac...
ing. Massively distributed manufacturing (MDM), which combines these paradigms, is performed on demand by a large network of people located anywhere. Rather than rely on mass production in centralized factories, MDM promises to improve the...

companies engaged in 200, such as 3D Printing, 3Diligent, Fast Radius, and Xometry, have sprouted. Xometry, for example, enables its customers to access the manufacturing capacity of a network of >5000 carefully...

the globe, similar to what companies like Uber and Lyft have achieved with transportation. The latent potential of MDM was evident during the early days of the COVID-19 pandemic, when personal pro...

provide consumers with personalized products..."

The First, Second, and Third Industrial Revolutions, driven by mechanization, electrification plus assembly lines, and digital...

works of manufacturers to rapidly respond to production demands and disruptions with agility and flexibility, while ensuring the high quality, productivity, and cost effectiveness of MDM. ■

GENOMICS

Expanding cell-to-cell interactions

A new single-cell sequencing approach reveals astrocyte and microglia cross-talk during inflammation

By Aymeric Silvain¹ and Florent Ginhoux^{1,2,4}

High-dimensional single-cell technologies have revolutionized the study of cell biology by unraveling the cellular heterogeneity and molecular complexity that underlies human health and disease. Most recently, these techniques have been used to answer intriguing questions about the cells of the central nervous system (CNS). For example, this approach was used to describe a protective type of microglia present in the brains of patients with Alzheimer's disease (1) and an astrocyte population that...
ative antioxidant and anti-transcriptional programs in a mouse model and in MS patients (2). On this issue, Clark *et al.* (3) take cell technologies to the next cell-to-cell cross-talk in the immune system in an unprecedented single-cell approach. Single-cell RNA-sequencing, however, has generated new challenges. Among these is the need to precisely map between newly identified in vivo in real time and to their relative locations within the homeostatic and disease...
ing these key phenomena...
level will be critical to our understanding of molecular disease pathophysiology and will likely underpin the de-

Downloaded from https://www.science.org at Tsinghua University on November 05, 2021

第31卷 第1期 控制与决策 2016年1月
Vol. 31 No. 1 Control and Decision Jan. 2016

文章编号: 1001-0920(2016)01-0001-11 DOI: 10.13195/j.kzjc.2014.1949

分布式车间调度优化算法研究综述

王凌, 邓瑾, 王圣尧
(清华大学自动化系, 北京 100084)

北京地区 广受关注学术论文

论文题目: 分布式车间调度优化算法研究综述

发表期刊: 控制与决策

发表年份: 2016

论文作者: 王凌, 邓瑾, 王圣尧

荣誉证书

王凌 邓瑾 王圣尧 同志:

您发表于《控制与决策》2016年第31卷第1期的文章《分布式车间调度优化算法研究综述》, 经评审委员会评定, 被评为《控制与决策》2017年度优秀论文。

特此发证, 以资鼓励!

《控制与决策》编委会
2016年5月7日

分布式生产调度考虑多个工厂、车间或生产线的协作生产, 研究工件在多条生产线上的分配以及各生产线上的加工调度, 实现生产指标的最优化, 是全球化背景下协同制造模式的必然趋势。

However, in the face of urgent demands or disruptions, it lacks flexibility, agility, and resilience and cannot readily provide consumers with personalized products in small quantities (mass customization) (1). Moreover, its environmental footprint is large, mainly because it often requires raw...

Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA. Email: oikwad@umich.edu

SCIENCE sciencemag.org



23 APRIL 2021 • VOL 372 ISSUE 6540 341

Published by AAAS

controllers are being developed to improve the quality and productivity of the machines (14). These advances in technology and automation can converge into a cloud-based CPOS for MDM.

An inspiration for CPOSs is the central coordinator used in distributed computing to automate the allocation and execution of large-scale computing tasks on distributed networks of computers. The central

- 13. T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens, K. D. Thoben, *Prod. Manuf. Res.* **4**, 23 (2016).
- 14. C. E. Oikwad, X. Lu, G. Kumaravelu, H. Madhyastha, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **62**, 103880 (2020).
- 15. Folding at Home, <https://foldingathome.org/>.

ACKNOWLEDGMENTS
C.E.O. is a founder of Uleno, which has licensed research in advanced cloud-based 3D printer control algorithms.

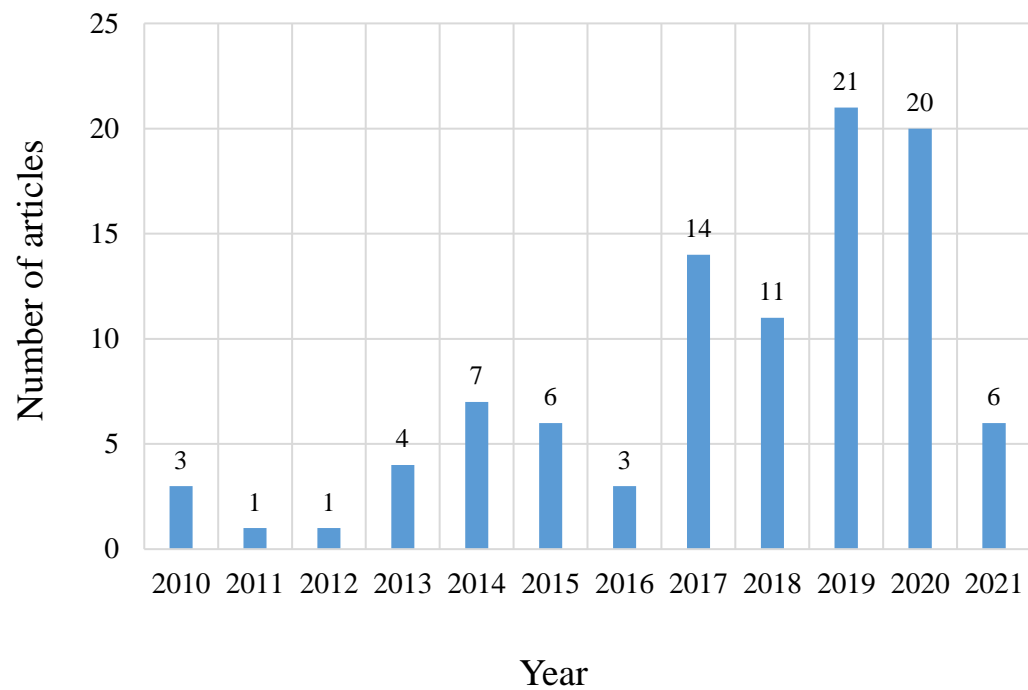
10.1126/science.abg4924

342 23 APRIL 2021 • VOL 372 ISSUE 6540

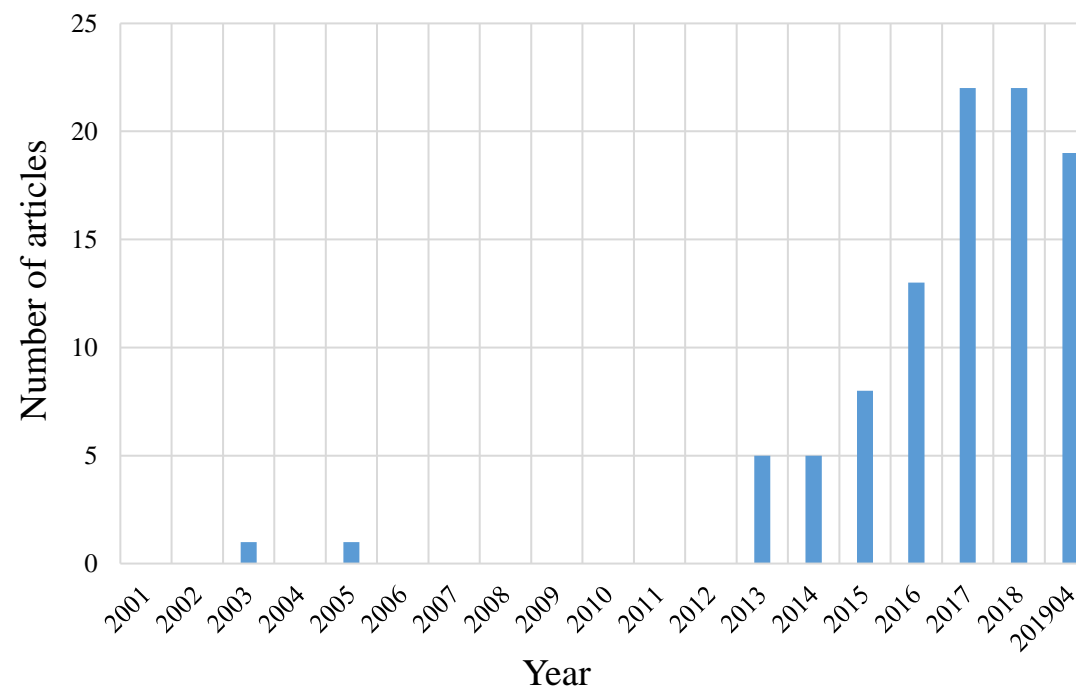
Published by AAAS

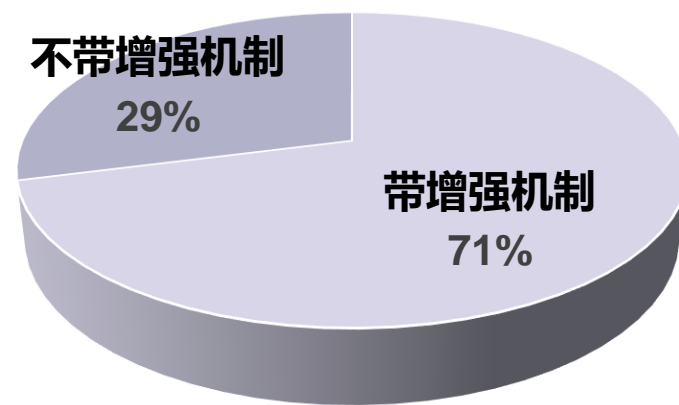
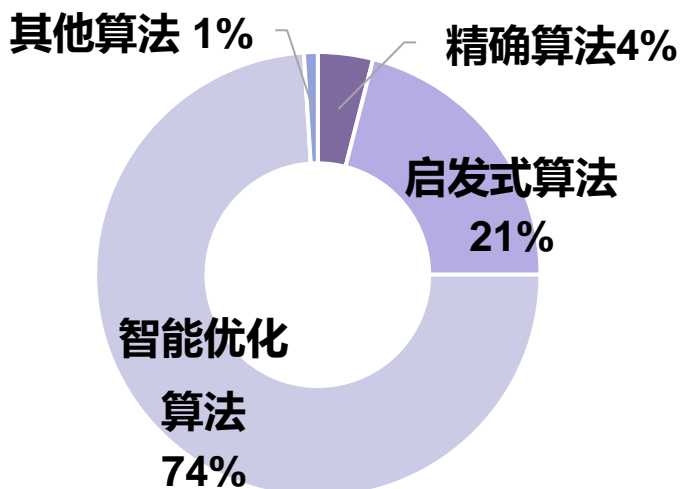
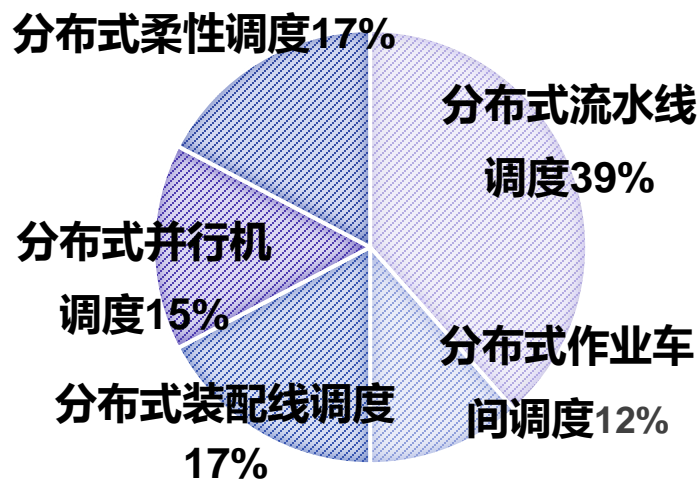
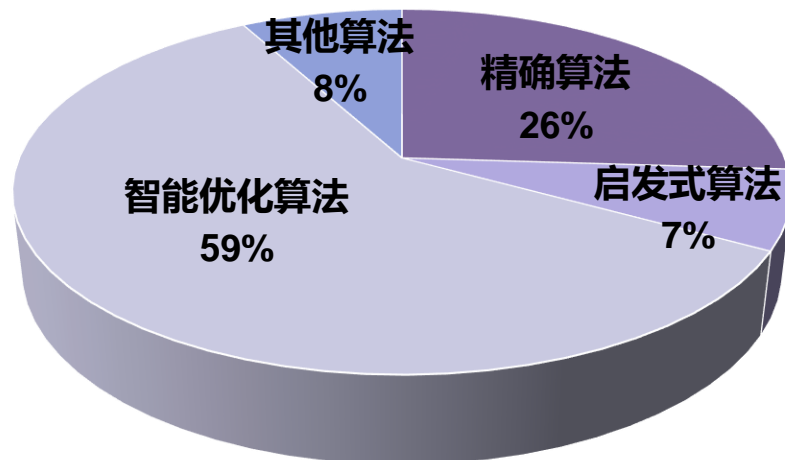
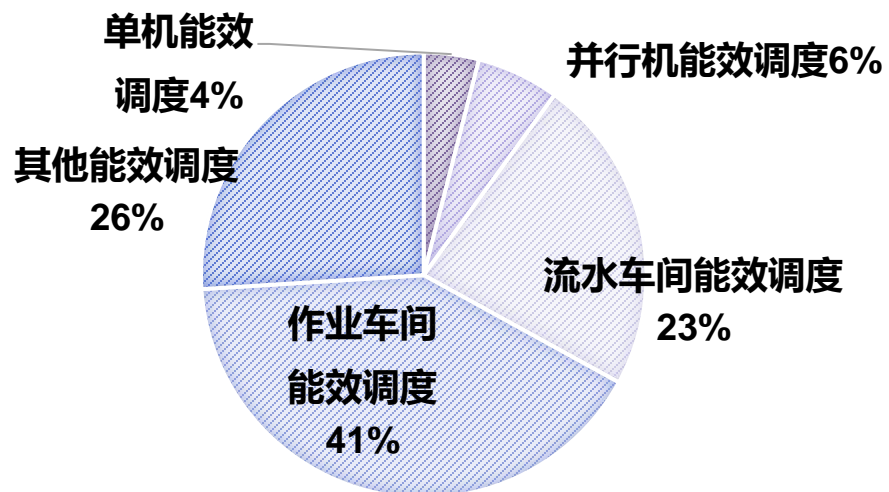
sciencemag.org SCIENCE

分布式调度研究论文情况



绿色调度研究论文情况

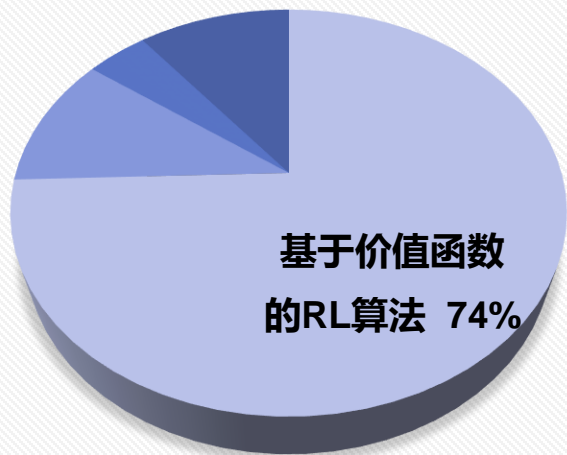




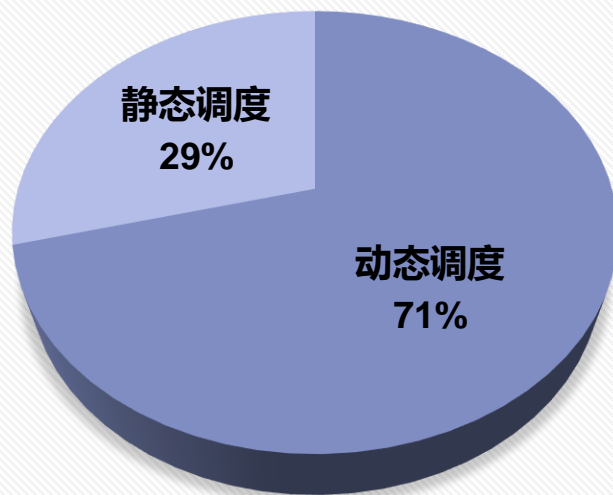
分布式调度问题分类

分布式调度算法分类

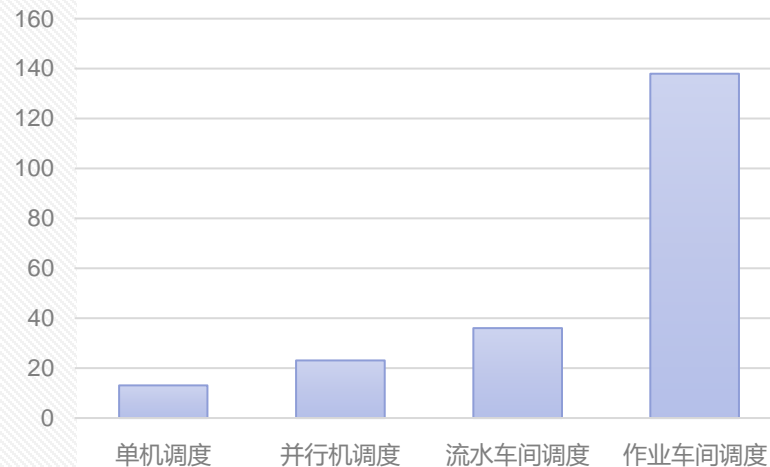
分布式调度算法设计



调度优化中强化学习算法应用情况



调度优化中强化学习算法的应用场景I



调度优化中强化学习算法的应用场景II

- 普适性不足：** 主要采用RL求解单目标、动态调度，少量考虑经济、时间或能耗指标的融合
- 创新性不足：** 端到端的调度优化研究较少，RL与智能优化的融合机制不够丰富
- 高效性不足：** RL在调度问题上的优化性能有待提高，缺乏理论指导

- 现有研究大多假设同构车间环境，即生产线之间不存在差异，而实际生产中各生产线的加工能力、环境都可能不同，**异构系统和联动生产的研究需加强。**
- 现有研究大多针对理想化提炼后的调度问题，而实际生产往往需满足特殊工艺约束，并存在有限资源约束和诸多不确定因素，**复杂工况、资源约束和不确定过程的研究需拓展。**
- 现有研究大多以最小化完工时间为指标，少量多目标优化大多只考虑经济或时间指标组合，**绿色制造目标的优化需重视。**
- 现有生产调度模型的商业软件大多只限于小规模问题，难以处理大规模问题，**调度理论的研究与智能算法的研发均需加强。**

需求

分布式和绿色生产过程在各领域的**制造与服务企业**中越来越普遍。物流配送是明显的分布式调度优化过程。

不足

目前分布式和绿色生产调度的研究大多位于学术层面，相关理论和方法仅在一些特定问题上得到初步应用。

目标

加强对实际生产过程的理解和提炼，强调问题建模、性能分析、算法设计、系统开发等工作的实用性；拓展现有应用研究的范畴，从分布式和绿色调度角度理解不同领域的实际优化问题，进而将分布式生产调度和绿色的研究成果得以应用和推广。

分布式调度——是全球化进程中网络化制造的必然趋势

绿色调度——是和谐发展道路上生态制造的必然途径

分布式绿色调度是制造系统调度优化的前沿研究课题

Gao KZ, ..., & Wang L. A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. *Complex & Intelligent Systems* (2020) 6:237–249. (ESI)

61525304, 智能优化调度理论与方法
清华大学

62273193, 面向车间能效调度的增强智能优化理论与方法
清华大学 / 自动化系

70871065, 基于学习机制的群智能调度理论与方法研究
清华大学 / 自动化系

国家杰出青年科学基金, 2016-01-01 至 2020-12-31

61873328, 分布式生产调度的协同群智能优化理论与方法
清华大学 / 自动化系

60774082, 复杂生产系统基于差分进化和量子进化的优化调度.....
清华大学

60204008, 复杂系统基于计算智能的混合优化理论与方法
清华大学

61174189, 复杂资源受限项目调度问题及其混合智能算法研究
清华大学 / 自动化系

60374060, 复杂生产系统的智能仿真优化理论与方法研究
清华大学

智能优化算法 /intelligent optimization algorithms/

条目作者
王凌

最后更新 2022-11-09 浏览 4次

A+ A-

基于计算智能的机制求解复杂优化问题最优解或满意解的方法。

英文名称	所属学科
intelligent optimization algorithms	系统科学

智能优化通过对生物、物理、化学、社会、艺术等系统或领域中的相关行为、功能、经验、规则、作用机理的认知，揭示优化算法的设计原理，在特定问题特征的引导下提炼相应的特征模型，设计智能化的迭代搜索型优化算法。

复杂优化问题，尤其是实际工程优化问题，通常具有高维、非线性、大规模、多极小、强约束、不确定、多目标、离散与连续变量共存等复杂性。优化方法要对问题的非线性和多极小性，具有克服搜索过程陷入局部极小的能力；要对问题的高维和大规模性，具有一定优化质量意义下的高效搜索能力；要对问题的多目标性，具有综合考虑多个目标的能力；要对问题强约束性，具有高效处理约束的能力；要对问题的不确定性和算法本身参数的设置，具有良好的鲁棒性；要对复杂问题的建模，具有较好的近似性和合理性；要对复杂过程的性能评价，具有快速性和准确性；要对连续变量与离散变量的共存性，具有搜索操作的灵活性和有效性。鉴于此，智能优化算法通过智能化的搜索方式，力争取得优化性能的“稳、快、准”，即实现优化结果的一致性、优化效率的快速性、优化质量的全局性。

区别于数学优化算法，智能优化算法并不依赖于问题的数学模型，譬如目标函数的连续性、可导性、可分解性等，因此智能优化算法的通用性很强。对于具体的优化问题，智能优化算法的设计首先要提炼问题的特征模型，即设计问题的解的编码方式、性能指标的解码策略、解的邻域结构，然后分析解空间的特征、解的调整与性能变化的关系、参数设置对搜索行为的影响，进而在问题层面和算法层面提炼有用的知识，并设计知识利用的策略，融合对不确定性、多目标、强约束等复杂因素的有效处理技术，最终提出针对具体问题的高效求解方法。

智能优化算法大体分为以下3类：①串行优化算法。如模拟退火算法、禁忌搜索算法等。②群体优化算法。如遗传算法、蚁群算法、微粒群优化算法、差分进化算法、分布估计算法等。③混合智能算法。包括不同智能算法的混合、智能优化与数学优化算法的混合、智能算法与基于问题信息的局部搜索操作的混合等。

智能优化算法的主要研究内容包括算法的设计与实现、算法的性能评价和算法的推广与应用。①算法的设计与实现。包括算法原理、框架、参数、操作的设计。②算法的性能评价。包括收敛性、收敛速度、有限时间性能、计算复杂性、鲁棒性、算法比较等。③算法的推广与应用。智能优化领域的国际权威期刊是 *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*。智能优化算法的研究大多位于算法设计与应用层面，但基础理论还很薄弱，体系尚不完善，算法的有效性设计与分析缺乏理论指导。

智能优化算法的研究涉及控制、信息、系统、计算机、物理、数学、生物、管理、工程等学科，学科交叉的特色很强。研究先进的智能优化理论和设计高效的智能优化算法，具有重要的学术价值，有助于推动计算智能、最优化和诸多工程学科的发展与融合。智能优化算法已在机械制造、化工生产、钢铁生产、半导体制造、物流调度、交通运输、电力电子、人工智能、建筑等诸多领域得到了深入的研究与广泛的应用，对于改善企业的管理水平、提高生产效率与效益、节省资源、减少碳排放具有十分重要的意义。

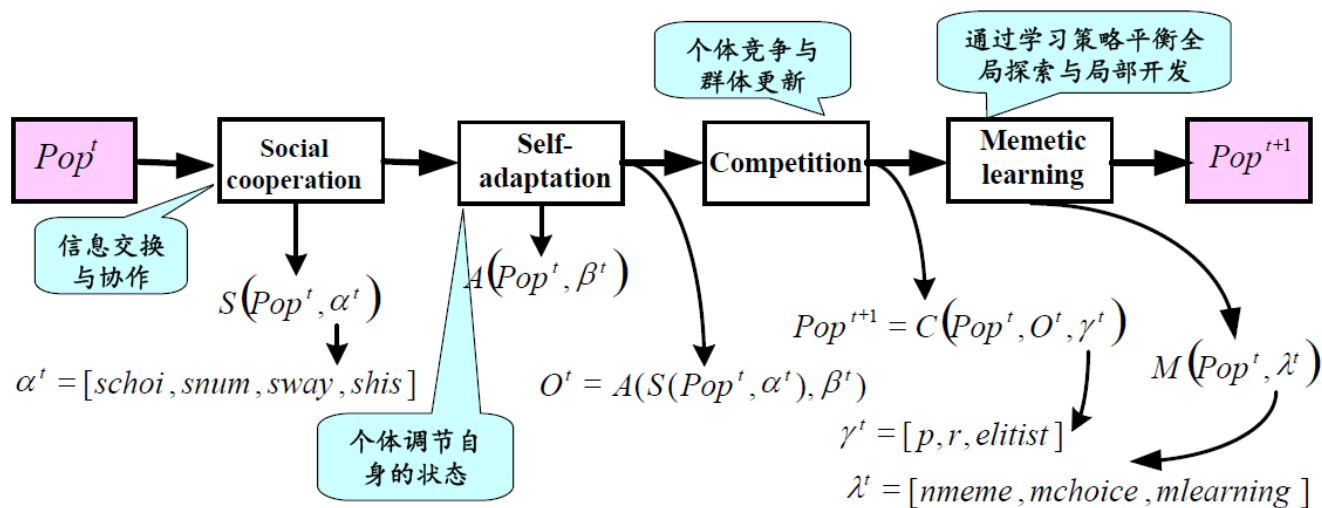
- 智能优化算法是基于计算智能的机制求解复杂优化问题最优解或满意解的方法，学术界也称之为meta-heuristics。
- **原理**：智能优化通过对生物、物理、化学、社会、艺术等系统或领域中的相关行为、功能、经验、规则、作用机理的认知，揭示优化算法的设计原理，**在特定问题特征的导引下**提炼相应的特征模型，设计智能化的迭代搜索型优化算法。
- **目标**：通过智能化的搜索方式，力争取得优化性能的“**稳、快、准**”，即优化结果的一致性、优化效率的快速性、优化质量的全局性。

普适的机理

创新的机制

高效的机能

- 从系统理论的角度，是否可建立**统一性的智能优化算法框架及理论体系**？



Metaphor exposed!

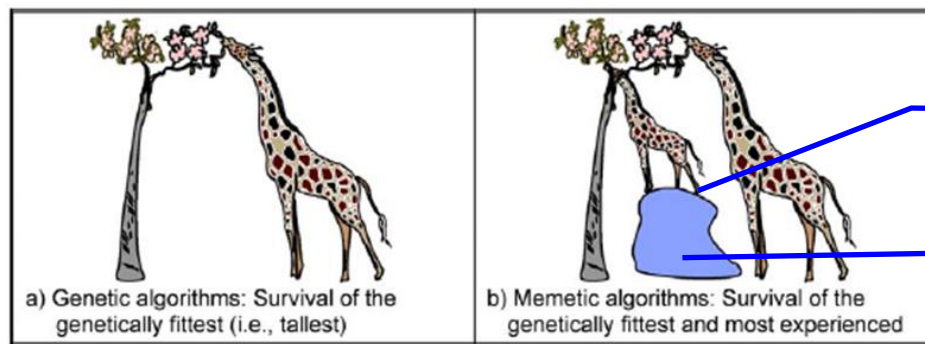
机制创新

名字创作

- 从问题求解的角度，如何**针对特定问题设计高效算法**？

- 优化的无免费午餐定理 (No free lunch theorem for optimization)
- 混合智能优化MA = Population-based exploration + problem-dependent exploitation
- 引入问题信息和领域知识的重要性
- 引入学习机制，反馈与动态调整策略的重要性

- 智能优化理论/体系
- 算法设计机制/原理
- 学习/知识型算法
- 算法设计自动化



知识利用

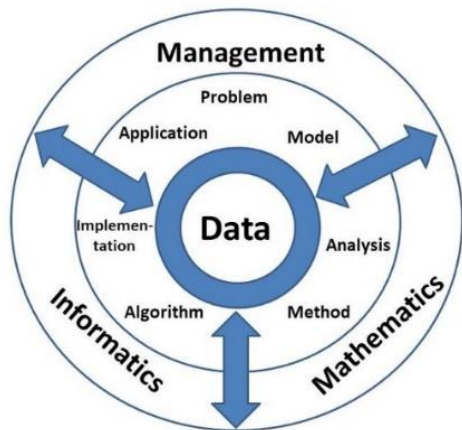
知识发现

智能优化衡两E
 学习策略成利器
 控制反馈讲时机
 自我进化乃真谛

Metaphor exploded!

机制创新

名字创作



Interdisciplinary, data-driven research approach

• 算法波
 • 增强波
 • 自主波

➔

决策的自动化

优化算法设计，应考虑策略的设计与利用，
 让算法具有决策的自动化能力！

- **理论方面**：发展新的数学分析和建模工具，完善优化算法的收敛性、收敛速度和鲁棒性分析以及参数设计理论
- **算法方面**：基于新的优化与学习思想、机制和技术开发高效的新方法，或将不同类型方法综合使用来开发混合优化方法，尤其强调方法的高效性和鲁棒性
- **性能评价**：研究减少性能评价的计算量来加速仿真；提高仿真速度，譬如基于并行计算技术和并行计算机开发设计并行仿真方法；对于有限的计算资源，高效并动态分配计算量
- **建模方面**：在保证一定精度的前提下，通过模型简化技术或效率增强机制建立代理或近似模型，简化和加速性能评价过程；鉴于模型的不精确性和不确定性，研究优化方法的有效性，尤其是鲁棒性



- **智能方面**：探讨不同优化方法和评价模型的适用域，建立经验或规则或知识库，有利于针对不同问题选择合适的方法或针对不同方法建立合适的模型
- **系统方面**：基于集成框架，基于现有软件进一步开发高度集成化的、平台化的、可扩展的智能优化系统，并具有良好的系统—用户接口以及各域间的接口与数据处理
- **应用方面**：理论联系实际，实践指导理论与方法的发展和完善，拓宽优化应用领域，尝试各种新方法的实际应用效果，开发先进、实效、通用和具有友好用户界面的集各种相关技术的软件

□ 问题层面的扩展

- 分布式网络化场景
- 绿色技术协同场景
- 不确定性与动态场景

□ 算法层面的深入

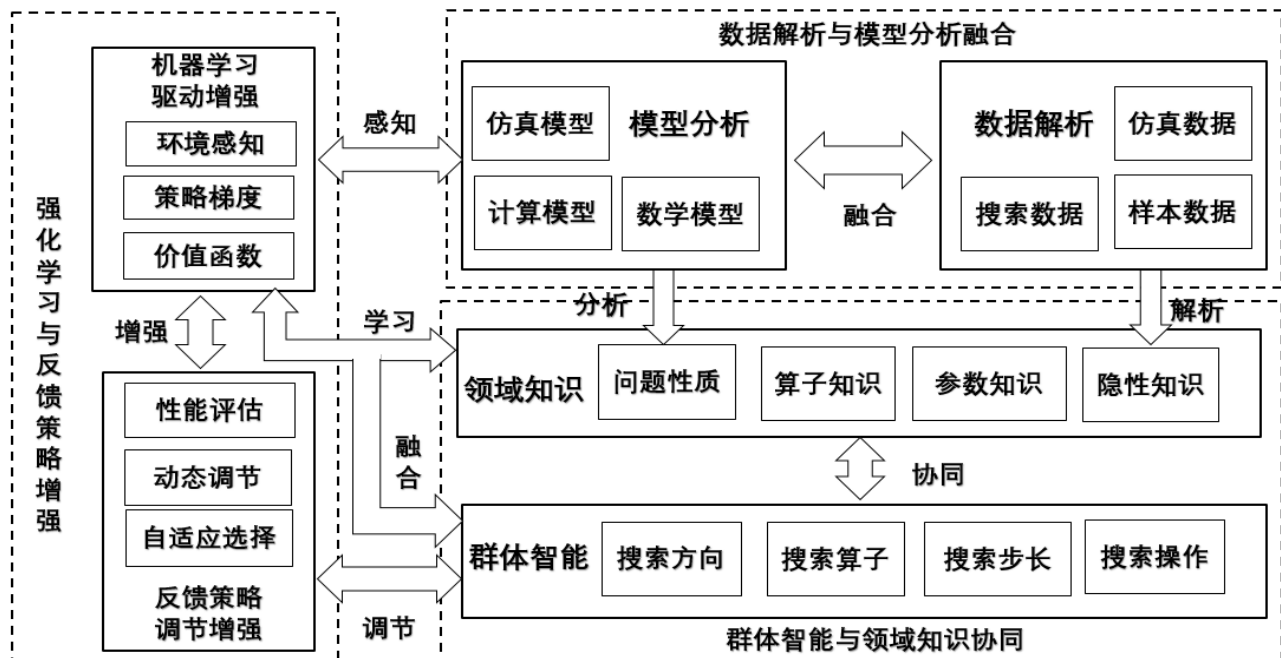
- 模型与数据的融合
- 智能与知识的协同
- 机器学习与反馈策略的增强
- 仿真对优化控制决策的助力
- 控制论与信息论的指导

□ 应用层面的推进

- DT/MES/APS/WES
- 创新链、产业链、供应链、价值链的协同发展模式

预测是智能的基础，更是决策的前提。基于模型的规律属于机理分析，基于数据的预测属于经验归纳。**优化是动态决策的过程**，离不开基于模型/数据的预测或仿真评价。只有**融合机理分析和数据解析**，才能实现合理**预测与仿真下的复杂过程智能优化、控制与决策**。

机制：**数据解析与模型分析融合、群体智能与领域知识协同、强化学习与反馈策略增强**





清华大学
Tsinghua University

OPTIMIZATION – A many splendored thing!

调度优化难征服 数模共融互相辅
知识群智齐协助 机器学习创新途