



吉林大学
JILIN UNIVERSITY



吉林大学汽车工程学院
College of Automotive Engineering, Jilin university

智能化驱动的汽车线控制动系统发展 与EMB电子电气架构

吴坚 吉林大学汽车工程学院



2024 MathWorks
中国汽车年会

内容纲要

- **大数据赋能下的汽车底盘技术发展**
 - 汽车底盘发展与机遇
 - 多传感器融合在底盘算法开发的应用
 - 基于驾驶数据的个性化底盘控制策略
 - 面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计
- **汽车线控制动系统更新与演进**
 - 从EHB迈向EMB的线控制动系统
 - EMB构型与控制算法开发
- **中央集中式电子电气架构**
 - 汽车电子电气架构
 - EMB电子电气架构

内容纲要

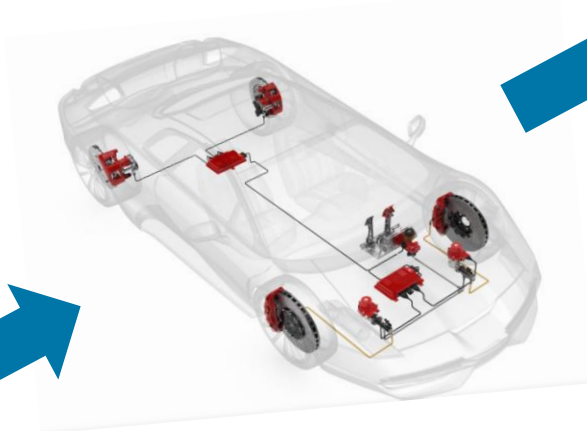
- 大数据赋能下的汽车底盘技术发展
 - 汽车底盘发展与机遇
 - 多传感器融合在底盘算法开发的应用
 - 基于驾驶数据的个性化底盘控制策略
 - 面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计
- 汽车线控制动系统更新与演进
 - 从EHB迈向EMB的线控制动系统
 - EMB构型与控制算法开发
- 中央集中式电子电气架构
 - 汽车电子电气架构
 - EMB电子电气架构

大数据赋能下的汽车底盘技术发展

伴随着自动驾驶汽车、中央集中EEA架构、大数据和5.5G的发展，汽车底盘经历了传统机械底盘到线控底盘再到智能底盘的转变。



电动化



智能化



支持自动驾驶，符合驾驶员意图，整车性能再次提升

减少机械连接，具有电控单元；操纵稳定性、舒适性、安全性大幅提升

以液压元件和机械连接为主，承担驱制动等基础功能；操纵稳定性、舒适性较差

汽车底盘发展与机遇



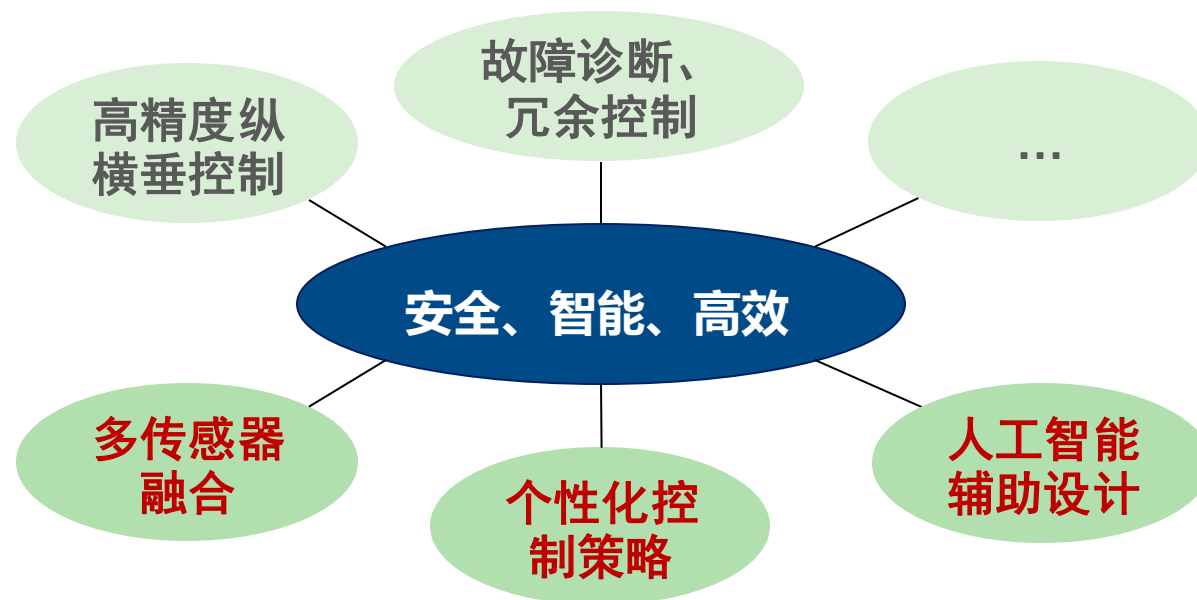
丰富多维的驾驶数据



日益增多的驾驶员需求



计算机学科快速发展

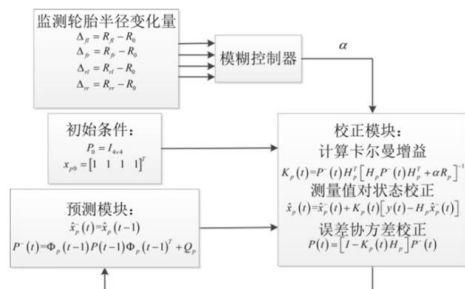


多传感器融合在底盘算法开发的应用

路面附着系数融合估计

基于动力学的附着估计

精度高，但在滑移率小的情况下估计困难



基于图像数据的附着估计

全工况可用，不依赖于动力学，但只能获取范围值



干燥沥青

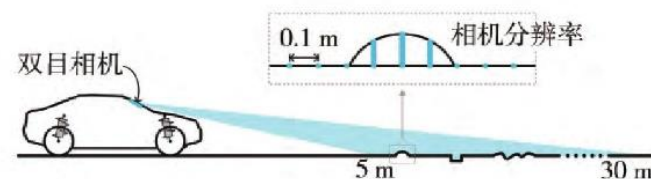
潮湿沥青

冰雪路面

预瞄式悬架控制

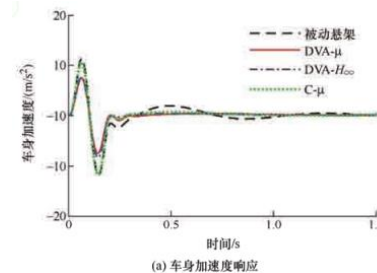
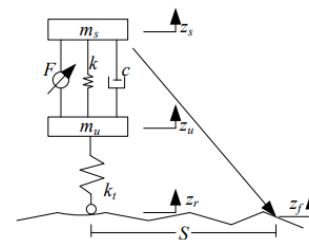
获取路面激励

通过视觉/激光雷达对前方道路扫描



刚度/阻尼主动调节

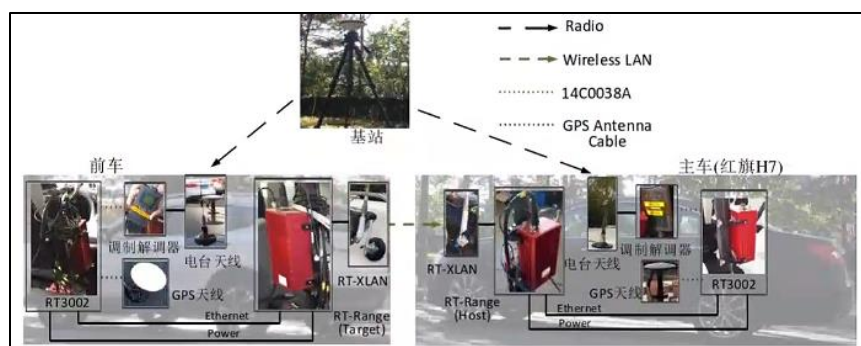
以舒适性、操纵稳定性、控制器能耗等为目标的最优控制



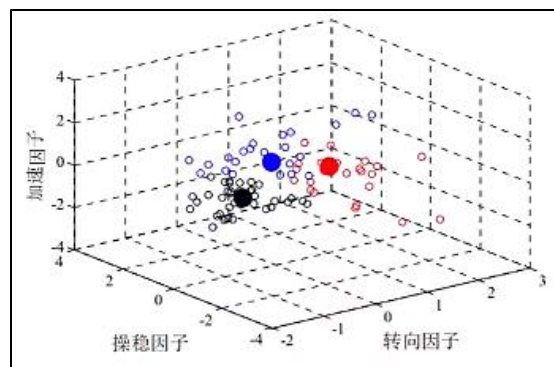
更多的信息使算法具有预测性，底盘安全性与舒适性得到提升

基于驾驶数据的个性化底盘控制策略

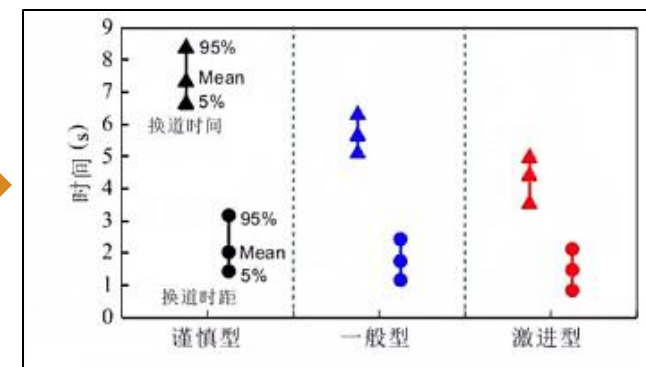
通过对驾驶数据的聚类与分析，可以对驾驶员风格进行辨识，获取驾驶员偏好，进而指定个性化的控制策略（例如个性化的自动驾驶换道策略、AEB紧急制动策略）



数据采集



聚类分析



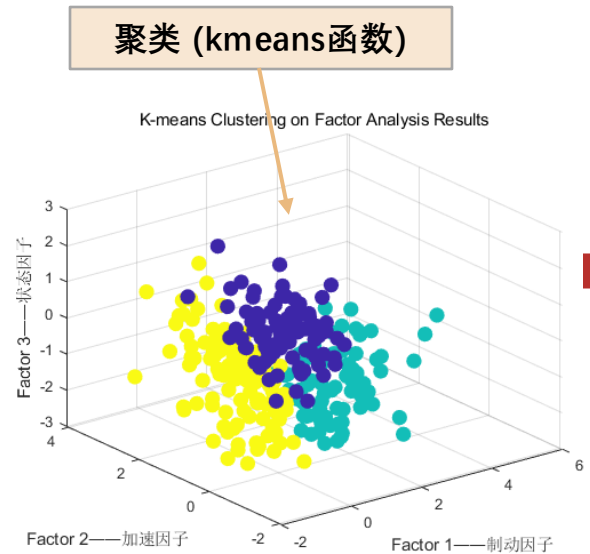
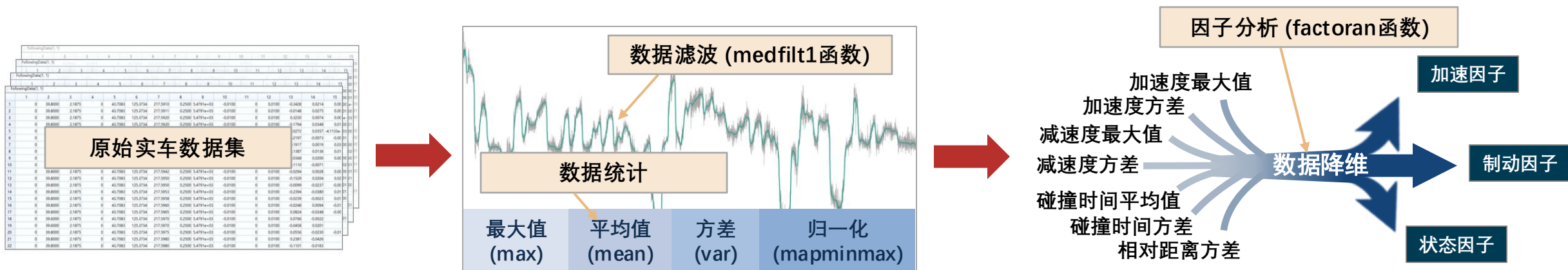
换道偏好



谨慎型驾驶员：距离前车2.5s时换道，换道用时7s
 一般型驾驶员：距离前车2.0s时换道，换道用时6s
 激进型驾驶员：距离前车1.5s时换道，换道用时5s

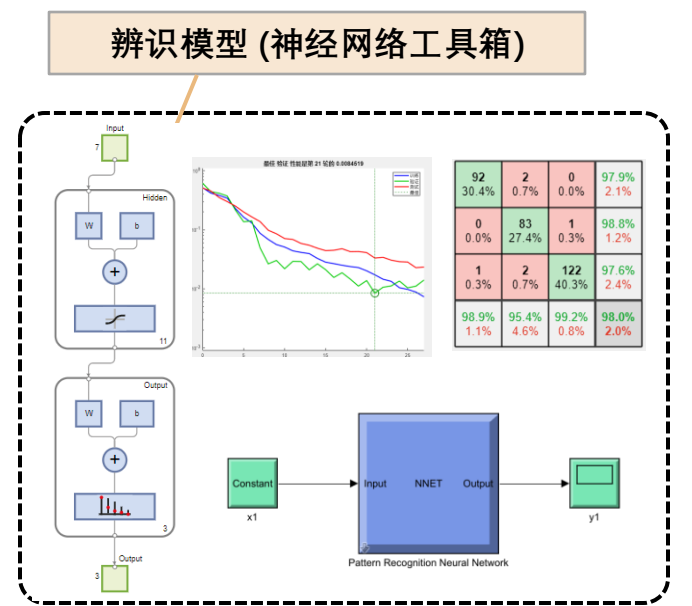
个性化自动换道参数，更符合驾驶员心理期望与习惯

依托MATLAB完成驾驶员风格识别，助力底盘控制算法开发



类别	第1类(保守)	第2类(激进)	第3类(正常)
数目	93	87	123
平均TTC	15.326	9.287	10.575
平均减速度	-0.3978	-0.4821	-0.4240

- 1类 保守 加速因子和制动因子较小，状态因子大
- 2类 激进 加速因子一般，制动因子大，状态因子小
- 3类 正常 制动因子一般，加速因子大，状态因子散布



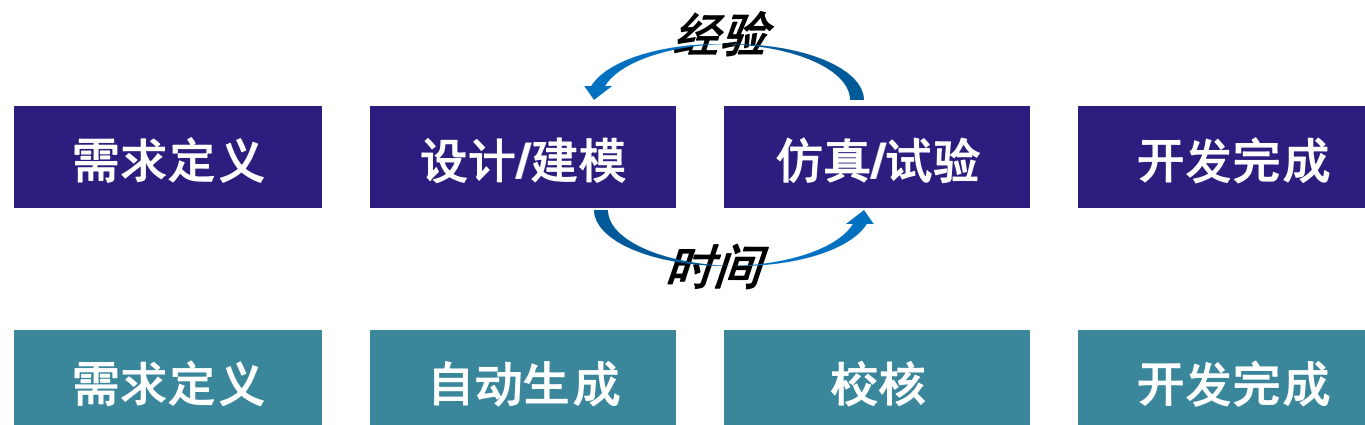
面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计

生成式AI从大量的数据集中提取经验，已经在对话、视频的应用取得了巨大的成功



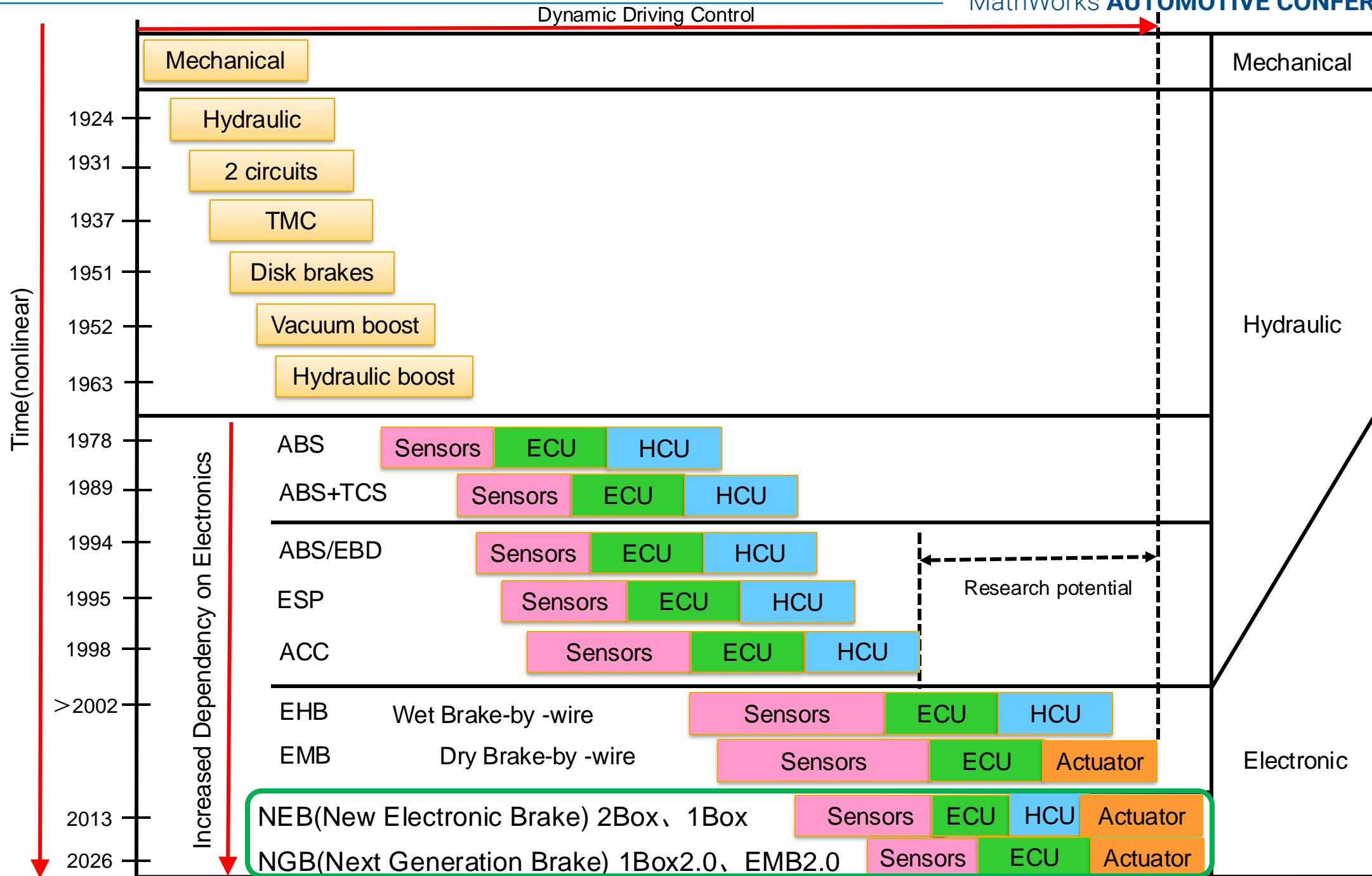
Command: A Chinese Lunar New Year celebration video with Chinese Dragon **By OpenAI**

基于生成式AI的汽车底盘设计与零部件拓扑优化，**将减少时间消耗与经验依赖，辅助与加速产品初期设计迭代**



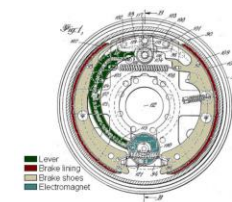
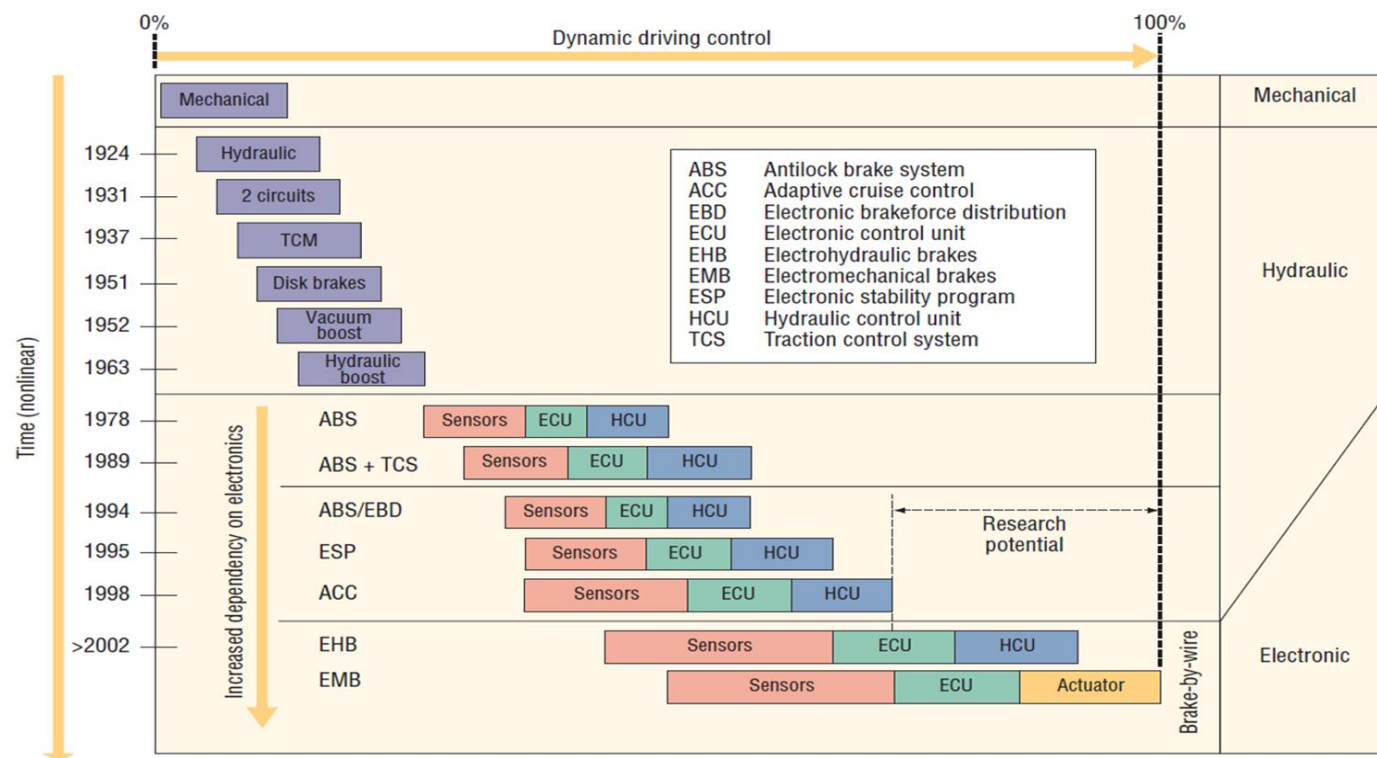
内容纲要

- 大数据赋能下的汽车底盘技术发展
 - 汽车底盘发展与机遇
 - 多传感器融合在底盘算法开发的应用
 - 基于驾驶数据的个性化底盘控制策略
 - 面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计
- 汽车线控制动系统更新与演进
 - 从EHB迈向EMB的线控制动系统
 - EMB构型与控制算法开发
- 中央集中式电子电气架构
 - 汽车电子电气架构
 - EMB电子电气架构



汽车线控制动系统更新与演进

随着汽车电动化、智能化的迅速发展，汽车制动系统由传统的机械式制动过渡到如今的**线控制动系统 BBW(Brake by Wire)**，在制动安全性、舒适性提升的同时，使执行器布局也更为简便。



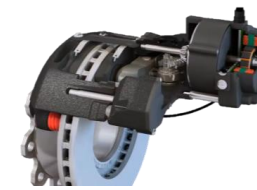
传统机械制动



液压制动（真空助力）



电子液压制动
EHB



电子机械制动
EMB

从EHB迈向EMB的线控制动系统

电子液压制动系统EHB，以博世、大陆等公司推出的iBooster、IPB、MK-C2为主流方案，具有**集成度高、建压迅速**的特点，并具有**踏板解耦、多路冗余**的功能，**支持自动驾驶与能量回收**。



博世 iBooster



博世 Integrated Power Brake



大陆 MK-C2

尽管EHB发展成熟，具有一定的优点，但仍然没有解决液压制动的根本上的缺陷：



- 需要制动液和制动管路，有泄露风险
- 依赖复杂的电磁阀控制各管路压力
- 算法复杂，难度大

从EHB迈向EMB的线控制动系统

电子机械制动系统EMB，依靠电机和传动机构，直接推动制动衬片压紧制动盘，具有**具有体积小，质量轻，响应快，无液压泄露的优点，是线控制动的未来趋势**

众多国、内外零部件供应商、整车厂对EMB开展研究，部分企业已进行至**样件生产与冬测阶段**

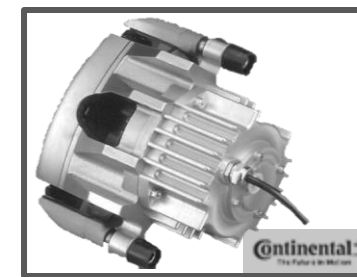
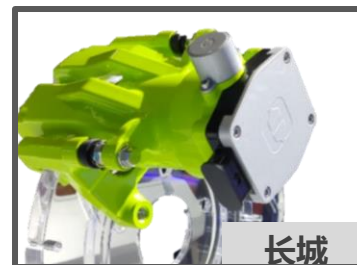


SIEMENS

DELPHI



HYUNDAI



从EHB迈向EMB的线控制动系统

由于EMB建立制动力时与制动踏板完全解耦，难以设计失效冗余，不符合现行法规，围绕EMB的政策、法规讨论近年来不断开展



Documentation: ECE/TRANS/WP.29/GRVA/2023/10

中国SAE 中国汽车工程学会 China Society of Automotive Engineers		电动汽车产业技术创新战略联盟 China Industry Technology Innovation Strategic Alliance For Electric Vehicle	
线控制动系统目标			
	2025年	2030年	
产品目标	线控液压、气压制动产品满足L3级别自动驾驶安全需求；EMB完成样机研制	线控液压、气压产品满足L4安全需求和冗余需求；EMB批量应用；高电压线控产品完成研制	
技术目标	响应、精度、一致性、部件可靠性等关键性能达国际一流水平；电制动力学控制、状态估计、传感部分算法集成应用	寿命、可靠性达到国际一流水平；算法集成到域控或中央控制，实现软硬分离	
企业目标	自主线控制动企业初步形成品牌效应	培育有国际竞争力的线控制动企业	
市场目标	电液（onebox、two-box）、电气（EES、ABS+ESC等）线控制动在电动及混动乘用车型实现批量应用	电助力线控制动系统在新能源车、智能汽车大规模应用	
产业链目标	关键部件产业链实现自主可控	完整的自主可控产业链	

线控制动系统路径		
	2025年	2030年
液 压	<ul style="list-style-type: none"> 液控液压线控 辅助制动、ESC和EPB多层次冗余系统 (L3) 	<ul style="list-style-type: none"> 液控液压线控 EPB、全功能RBU和EPB多层次冗余系统 (L4)
气 压	<ul style="list-style-type: none"> 液控气压线控 HEBS、ABS和EPB多层次冗余系统 (L3) 	<ul style="list-style-type: none"> 液控气压线控 HEBS、气电全功能RBU和EPB多层次冗余系统 (L4)
电 液	<ul style="list-style-type: none"> EMB在商用车搭载 摩擦制动、EMB分别在非轴上组成冗余系统 (L3) 	<ul style="list-style-type: none"> EMB在商用车规模搭载 EMB、与EMB集成的线控液压/气压余切制RBU、EPB组成冗余系统 (L4)
电 气	<ul style="list-style-type: none"> EMB在商用车搭载 线制电机、EMB、EPB组成冗余系统 (L3) 	<ul style="list-style-type: none"> EMB在商用车规模搭载 线制电机、EMB、电液全功能RBU与EPB多层次冗余系统 (L4)

UNECE拟修订R13法案

- UNECE-WP.29-GRVA（自动化/自动驾驶和联网车辆工作队）于2023年3月讨论了**为电子机械制动修订R13法案的提议**。

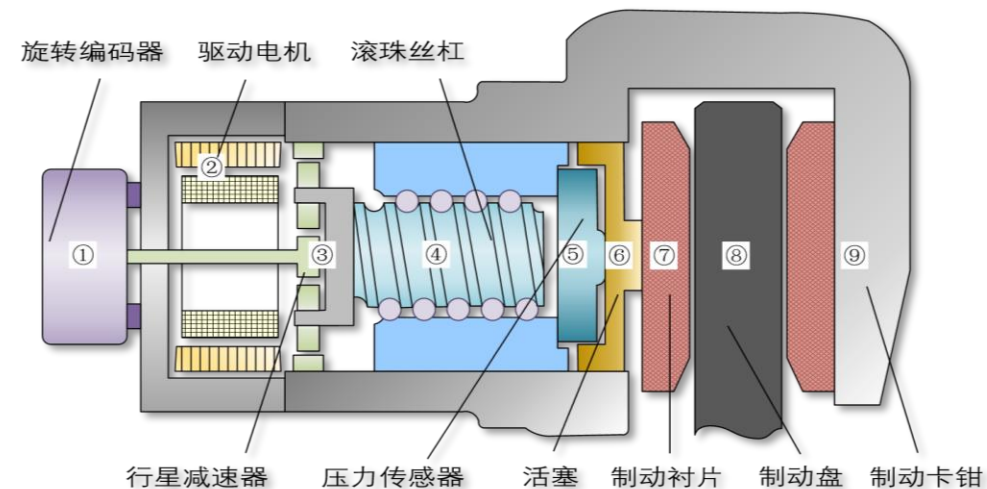
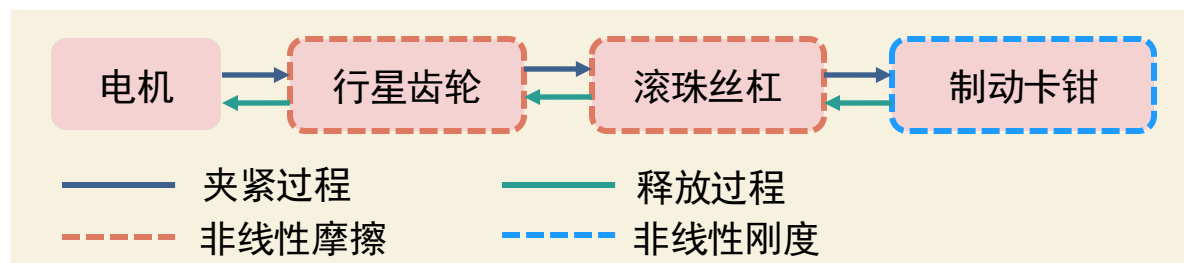
中国SAE发布智能底盘技术路线框架

- 中国汽车工程学会电动汽车产业技术创新战略联盟发布《智能底盘技术路线框架》，规划于**2025年完成EMB样机研制与商用车搭载，2030年完成EMB量产与规模化应用**。

国内外对EMB的法规修订、技术路线的讨论，象征着EMB的实际应用迎来曙光

EMB构型与控制算法开发

➤ EMB原理示意图



➤ EMB工作机理与控制挑战

1、高精度、快响应的夹紧力控制算法开发

非线性摩擦与刚度对控制算法的精度与响应速度带来干扰

2、传感器故障诊断算法开发

制动系统直接关系到车辆行驶安全，故障诊断功能是冗余安全的基础

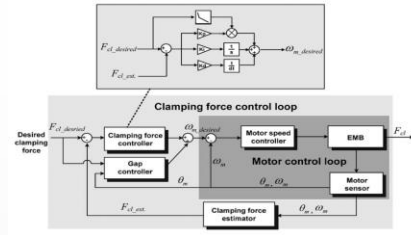
3、无压力传感器的夹紧力控制算法开发

压力传感器成本高，布置困难，无压力传感器的夹紧力控制算法对推动量产具有重要意义

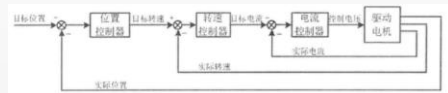
EMB构型与控制算法开发

■ EMB夹紧力控制算法

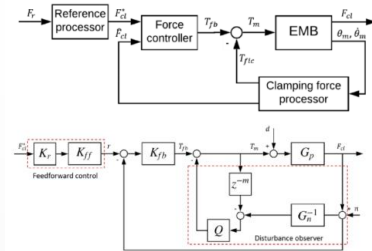
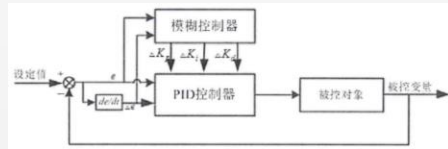
级联式PID控制算法



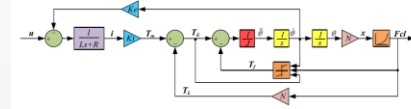
自适应PID控制



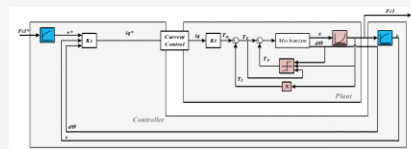
基于卡尔曼滤波理论的电流滤波与模糊PID控制



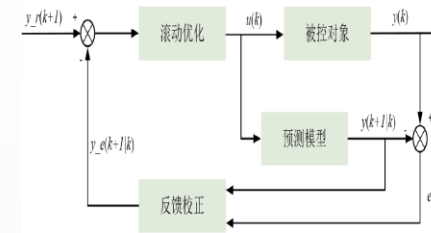
基于DOB与PI反馈控制



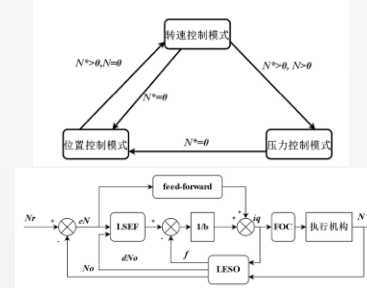
基于刚度线性化与摩擦补偿的级联PI控制



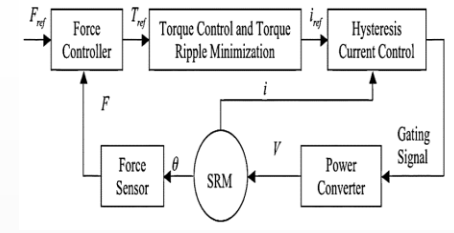
其他控制算法



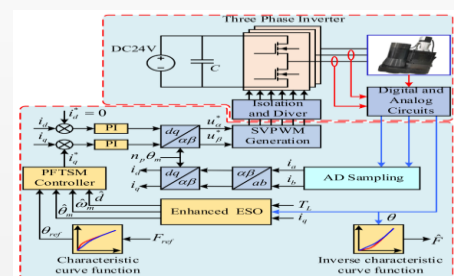
基于线性无约束的自适应MPC控制



基于前馈-二阶LADRC的控制



基于反步设计法与非线性鲁棒控制



基于改进扩张状态观测器与快速终端滑模控制

EMB构型与控制算法开发

■ 传感器故障诊断算法

现代控制

奉献观测器法

等价空间算法

智能控制

Fig. 2. Fault-tolerant control architecture model.

Fig. 3. Fault detection and diagnosis architecture model for EMB actuator.

SVR预测模型的建立 残差序列产生

采集样本 → 数据处理 → SVM训练 → 残差产生 → 故障诊断

支持向量机回归算法+遗传算法

T-S模糊控制

粒子滤波算法

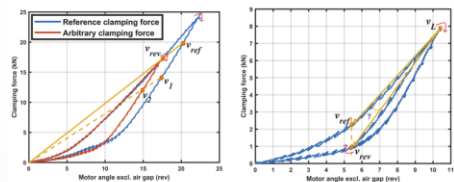
Fig. 4. Sensor adaptive fault-tolerant control model for EMB actuator.

克隆选择算法+支持向量机回归算法

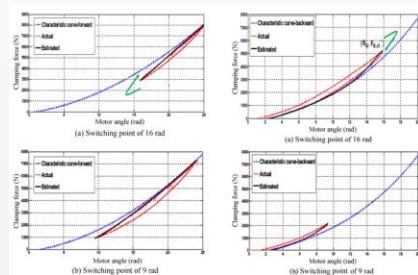
EMB构型与控制算法开发

■ 夹紧力估计算法

刚度特性法

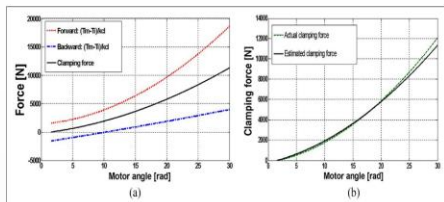


基于两个多项式函数的线性变换的新型系统刚度模型

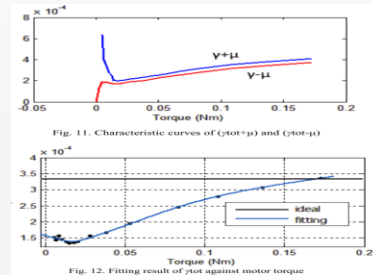


基于滞回效应修正刚度特性曲线法

力矩平衡法

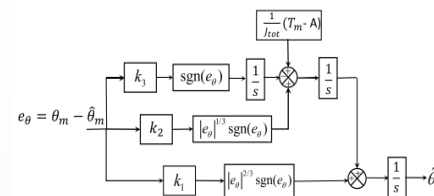


摩擦抵消的力矩平衡

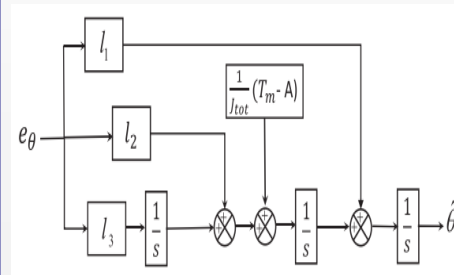


实验修正力矩平衡方程中负载转矩的放大系数

状态观测器法

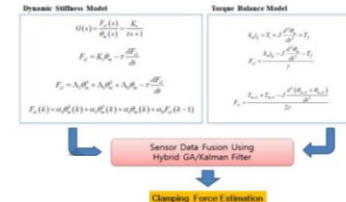


超螺旋观测器



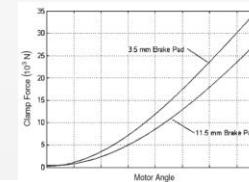
龙伯格观测器

融合方法



刚度特性曲线与力矩平衡模型+遗传算法与卡尔曼滤波融合

$$T_m(k) \approx \gamma_{tot} F_{cl}^*(k) + \frac{J_{tot}}{I_2^2} (\theta_m(k) - 2\theta_m(k-1) + \theta_m(k-2)) + (\mu F_{cl}^*(k) + A) \operatorname{sgn}(\theta_m(k) - \theta_m(k-1)) \quad (10)$$



$$\hat{F}_{cl}(k) = F_{ds}^*(k) + \frac{\sigma_{ds}^2}{\sigma_{ds}^2 + \sigma_{tb}^2} (F_{tb}^*(k) - F_{ds}^*(k))$$

最大似然估计融合

基于Simulink的自适应EMB夹紧力控制算法开发

挑战

由于复杂的非线性摩擦阻碍，传统的PI控制算法难以快速而准确的夹紧力控制

控制器基础——三层级联闭环PI控制器

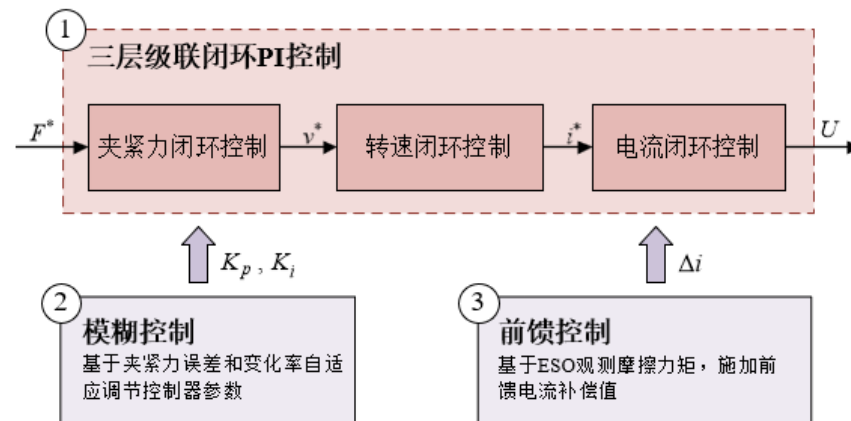
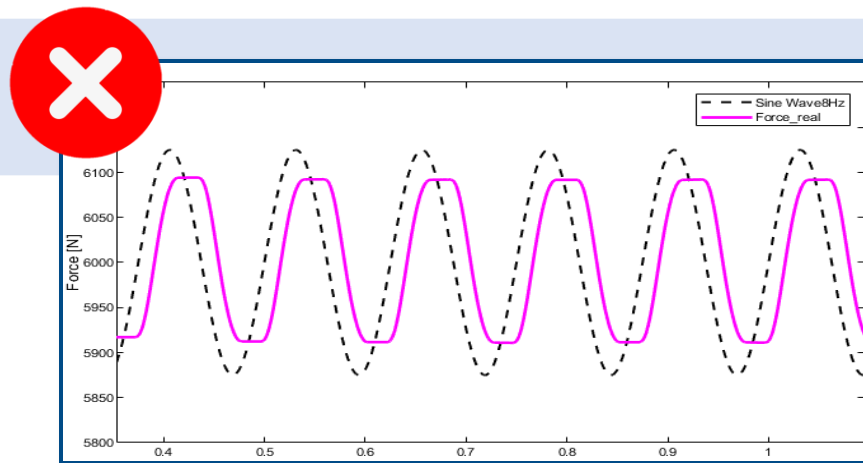
由夹紧力闭环、转速闭环和电流闭环组成，能够完成大部分的控制目标，除了高频工况

自适应调整——模糊控制

通过模糊控制，夹紧力闭环的PI控制参数得到调节，可以跟随夹紧力误差和误差变化率做出针对性的变化

缩小误差——基于摩擦力矩观测的前馈控制

在电流闭环开展前馈控制，提高EMB的响应速度，从而缩小误差。根据扩展状态观测器ESO观测的摩擦力矩计算电流补偿值



基于Simulink的自适应EMB夹紧力控制算法开发

- 利用**模糊控制工具箱**生成模糊模块，并转化为离线查表

模糊控制 (Fuzzy Logic Designer)

The screenshot shows the Fuzzy Logic Designer interface. On the left, there are membership function plots for inputs E and EC, and outputs KP and KI. The main window displays a list of 10 fuzzy rules. Below the rules is a rule editor table with columns for 'If' conditions (E is, EC is, Then KP is, and KI is) and 'and'/'or' operators. At the bottom, there are 3D surface plots for the output variables Kp and Ki, showing their dependence on the input variables Perr and (dPerr)/dt.

- 使用**MATLAB Function**快速实现观测器离散微分方程

Three-order system state equation
The complex relationships in the system can be represented by $f(x_1, x_2, x_3, u)$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f(x_1, x_2, x_3, u) + bu \\ y = x_1 \end{cases}$$

Creating the unknown item as the expanded state z_4

Observer with expanded state
Using special forms of $g(e)$ to make the observer converge, which has been proved by Han[1]

$$\begin{cases} e = \hat{y} - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g_1(e) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g_2(e) \\ \dot{z}_3 = z_4 + bu - \beta_3 g_3(e) \\ \dot{z}_4 = -\beta_4 g_4(e) \\ \hat{y} = z_1 \end{cases}$$

Observer (Discrete)

$$\begin{cases} fal(e, \alpha, \delta) = \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} + |e|^\alpha \text{sign}(e)(1-s) \\ s = \frac{\text{sign}(e + \delta) - \text{sign}(e - \delta)}{2} \\ e = \hat{y} - y \\ z_1(t) = z_1(t-1) + h(a_1 z_1 - \beta_1 fal(e, \alpha_1, \delta)) \\ z_2(t) = z_2(t-1) + a_2 h(z_2 - \beta_2 fal(e, \alpha_2, \delta)) \\ z_3(t) = z_3(t-1) + h(a_3 z_3 + bu - \beta_3 fal(e, \alpha_3, \delta)) \\ z_4(t) = z_4(t-1) + h(-\beta_4 fal(e, \alpha_4, \delta)) \\ \hat{y} = z_1 \end{cases}$$

ESO观测器 (MATLAB Function)

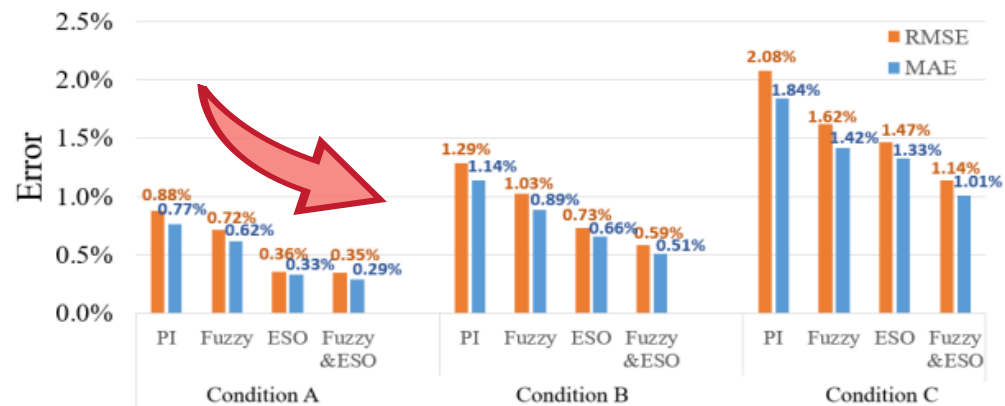
The diagram shows a MATLAB Function block with inputs y, z1, z2, z3, z4 and outputs z1out, z2out, z3out, z4out. The code inside the block is as follows:

```

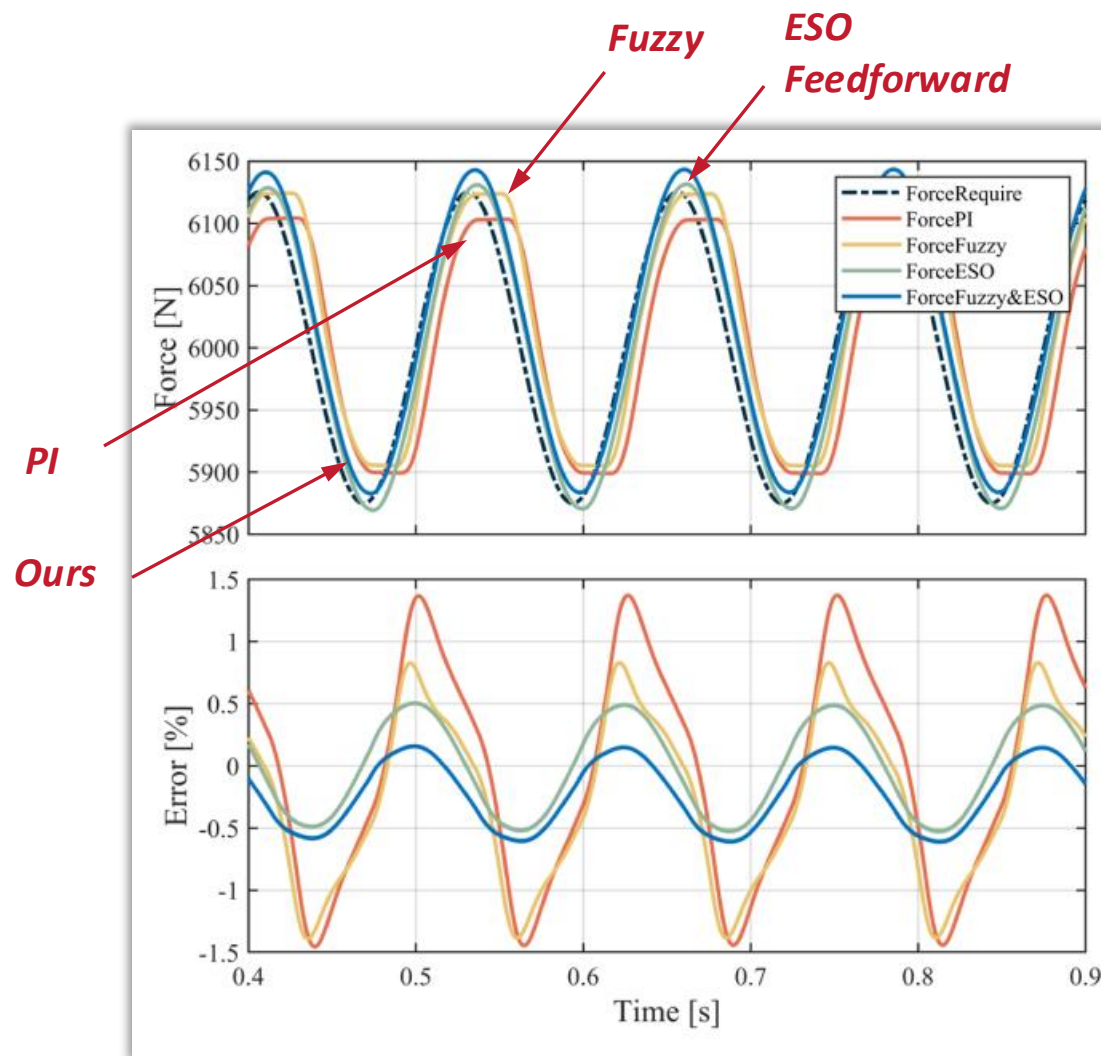
1 function [z1out, z2out, z3out, z4out] = threestepESO(y, z1, z2, z3, z4, b)
2 function fal = fal(e, a, delta)
3     if abs(e) <= delta
4         fal = e / (delta^(1-a));
5     else
6         fal = (abs(e)^a) * sign(e);
7     end
8
9     e = z1 - y;
10    z1out = z1 + h * (0.01 * z2 - b01 * e);
11    z2out = z2 + 300 * h * (z3 - b02 * fal(e, 0.5, delta));
12    z3out = z3 + 1 * h * (1 * z4 - b03 * fal(e, 0.25, delta) + u);
13    z4out = z4 + h * (-b04 * fal(e, 0.125, delta));
14    end
    
```

基于Simulink的自适应EMB夹紧力控制算法开发

工况	幅值	偏移	频率
Condition A	125N	6000N	8Hz
Condition B	250N	6000N	8Hz
Condition C	500N	6000N	8Hz



相较于传统PI控制，所提出的控制误差减少了45-60%，并具有更小的响应迟滞



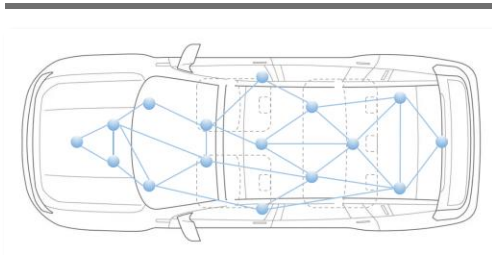
内容纲要

- **大数据赋能下的汽车底盘技术发展**
 - 汽车底盘发展与机遇
 - 多传感器融合在底盘算法开发的应用
 - 基于驾驶数据的个性化底盘控制策略
 - 面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计
- **汽车线控制动系统更新与演进**
 - 从EHB迈向EMB的线控制动系统
 - EMB构型与控制算法开发
- **中央集中式电子电气架构**
 - 汽车电子电气架构
 - EMB电子电气架构

中央集中式电子电气架构

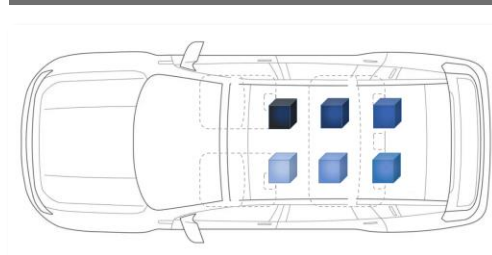
随着线控底盘功能的增多和安全冗余要求的提高，分布式电子电气架构逐渐显得复杂而累赘，按功能划分的域集中式架构成为主流，**中央集中式电子电气架构成为趋势。**

分布式架构



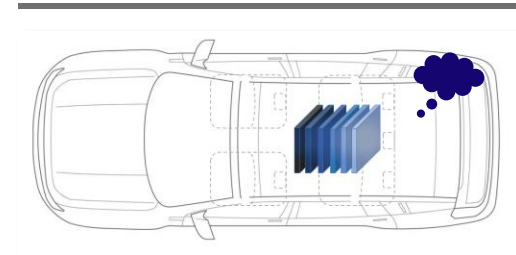
ECU对应单一需求
数量多，线束长，重量大
软件开发环境不一致
算力独立，存在资源浪费

域控架构



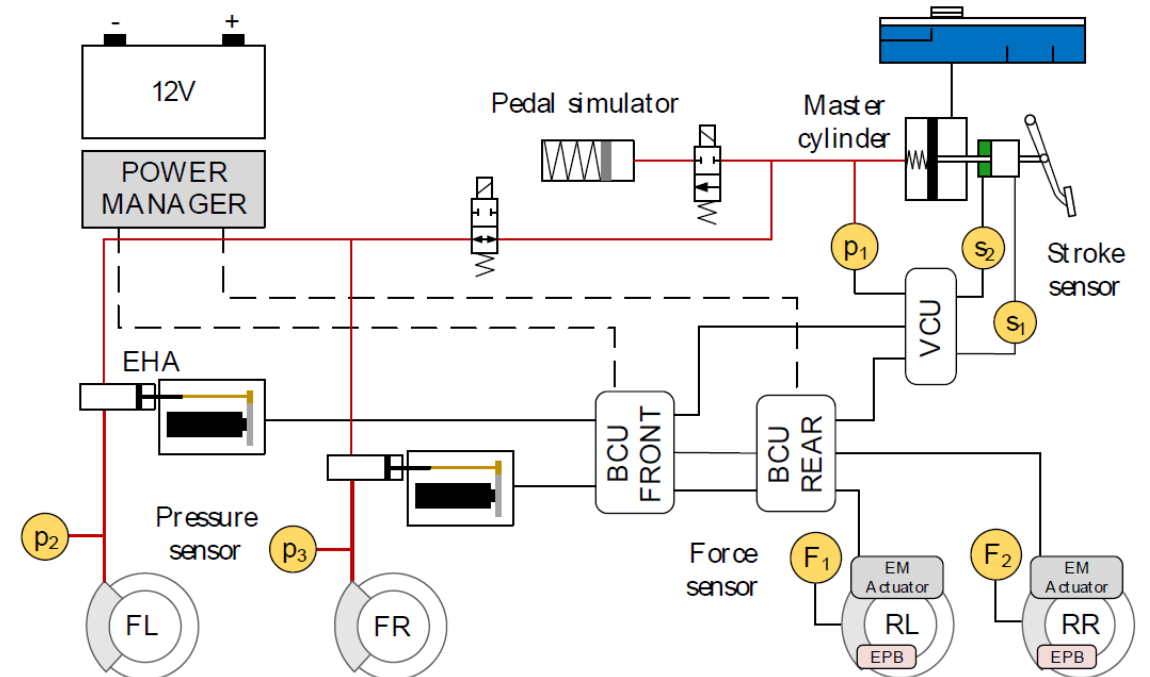
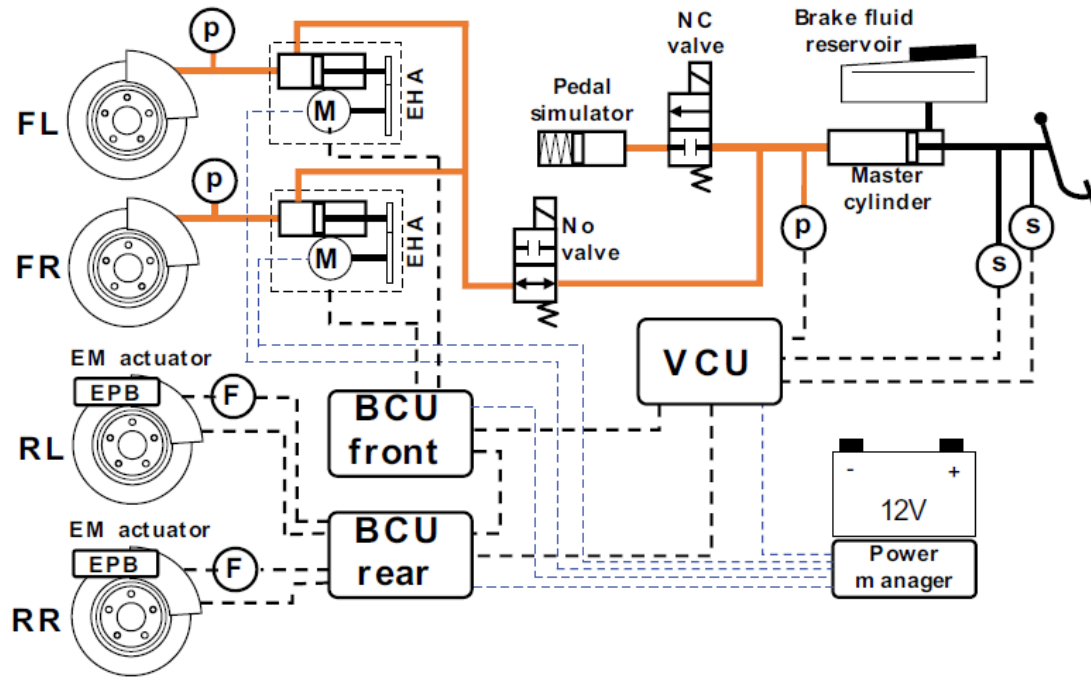
按照功能分域控制
资源有所整合
减少线束长度和重量
加速软硬件分离

中央集中式架构



中央一层一区架构
开放式软件平台
资源池化
云计算、单车计算

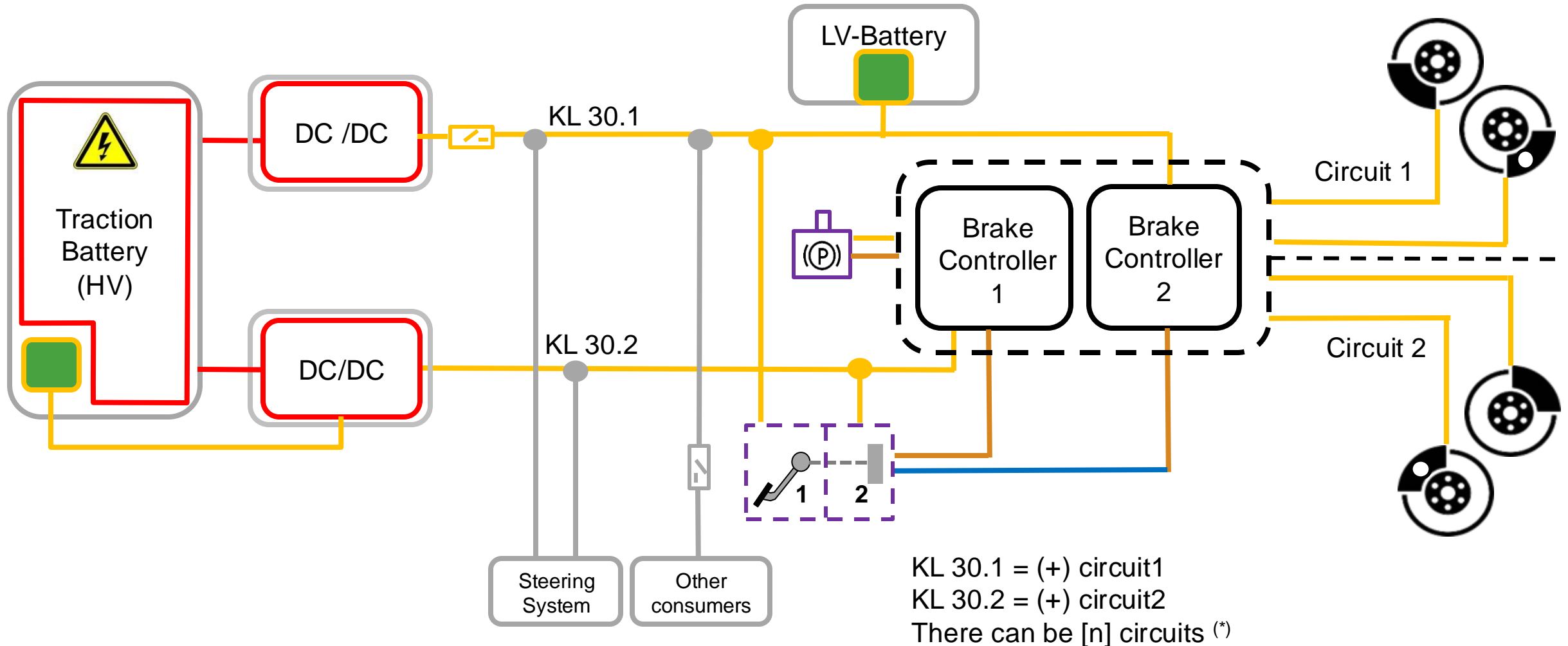
EMB电子电气架构



Simplified scheme of the used brake-by-wire system

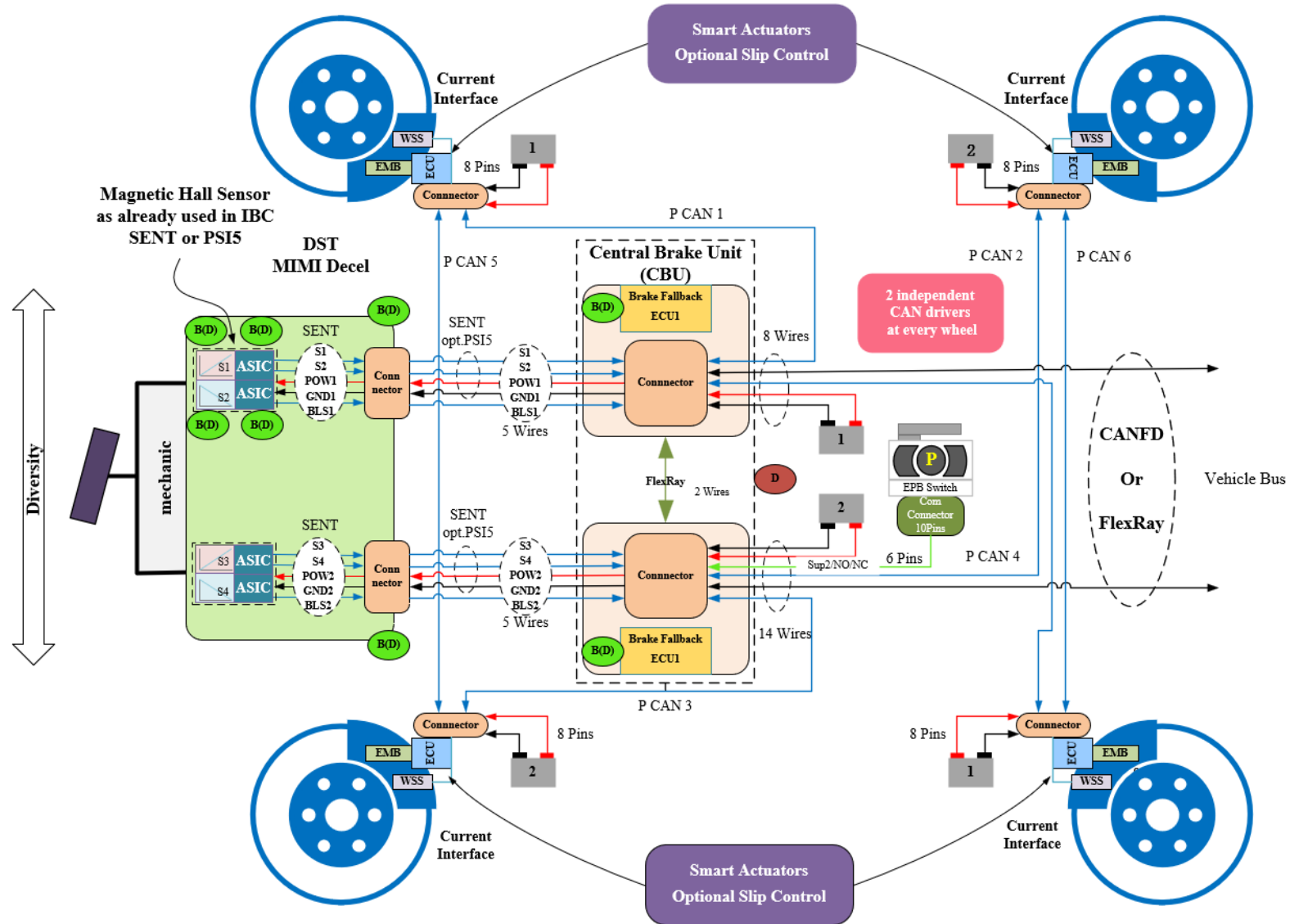
EMB电子电气架构

R13H Targeted layout – layout 1a # (electro-mechanical-brake)

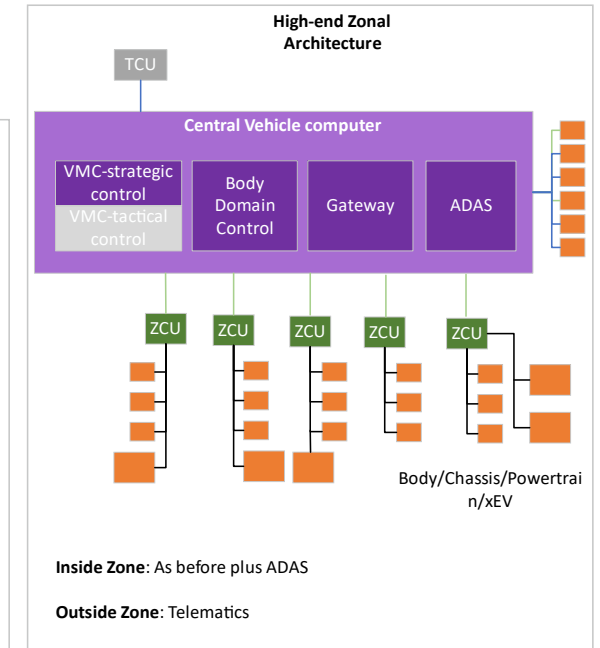
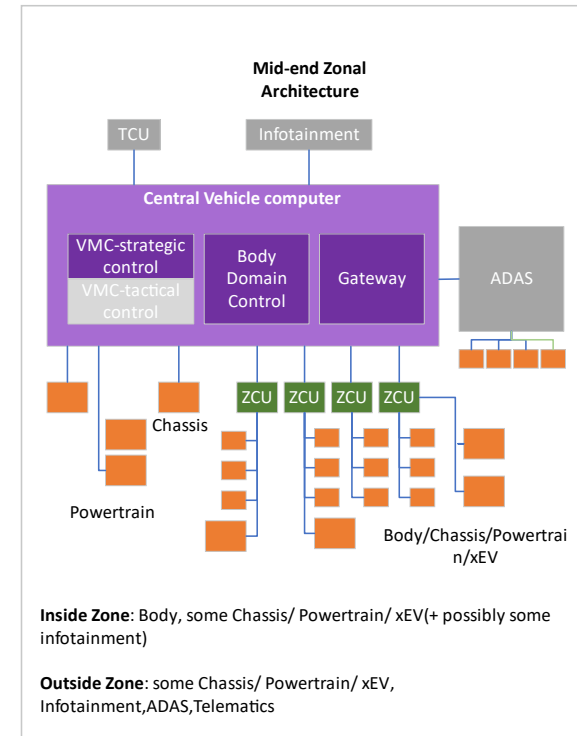
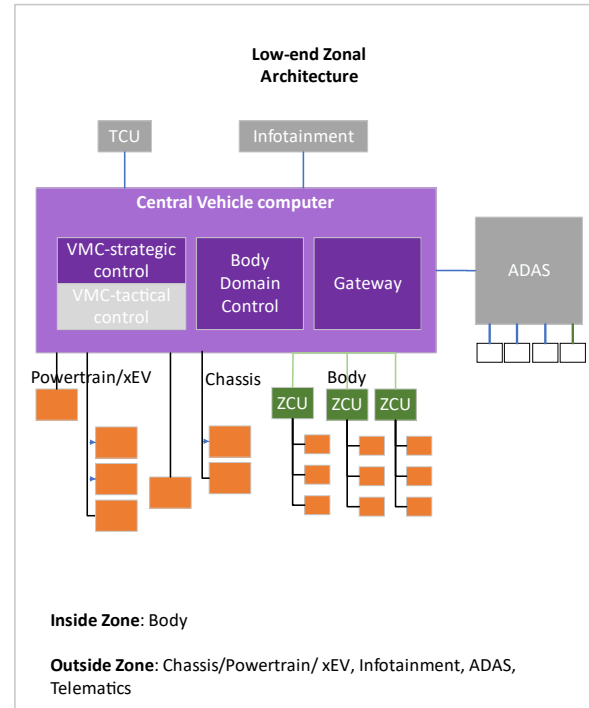
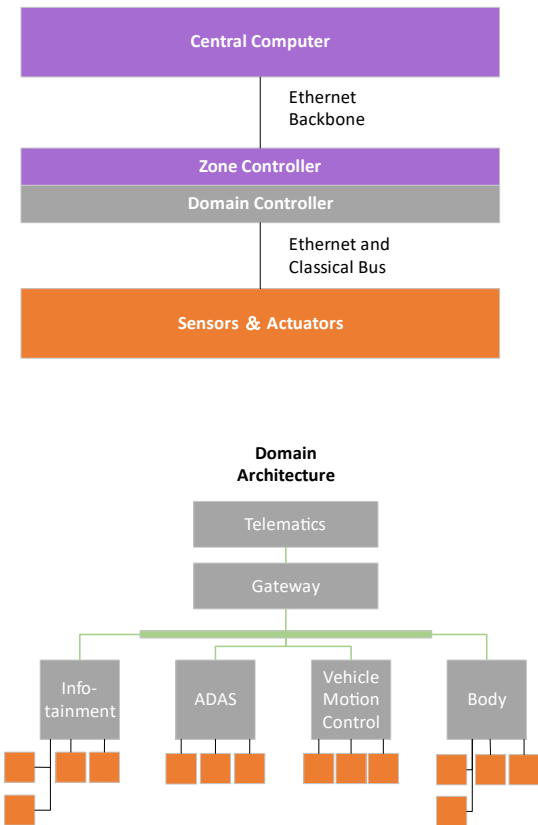


(*) 5.2.8. The action of the service braking system shall be distributed between the wheels of one and the same axle symmetrically in relation to the longitudinal median plane of the vehicle.

EMB电子电气架构



EMB电子电气架构



- Inside Zone: As before plus ADAS
- Outside Zone: Telematics, EMB

内容总结

- **大数据赋能下的汽车底盘技术发展**
 - 汽车底盘发展与机遇
 - 多传感器融合在底盘算法开发的应用
 - 基于驾驶数据的个性化底盘控制策略
 - 面向未来：生成式AI加速汽车底盘设计
- **汽车线控制动系统更新与演进**
 - 从EHB迈向EMB的线控制动系统
 - EMB构型与控制算法开发
- **中央集中式电子电气架构**
 - 汽车电子电气架构
 - EMB电子电气架构

2024 MathWorks 中国汽车年会

Thank you

