

电动汽车用电机控制器的 设计方法与实践



内容提要

1. 电动汽车用电机控制系统的构成与设计认证流程
 2. 电动汽车应用对电机及其控制器的特殊要求
 3. 电机驱动系统设计要点
 4. 电力电子控制器的设计要点
 5. 电力电子控制器的发展趋势
 6. 结语
-

中国电动汽车的发展前景

- 历史性机遇
 - 汽车动力电气化已成为汽车技术发展的趋势
 - “节能减排”的国策鼓励电动汽车及混合动力汽车的大发展
 - 电动汽车发展所面临的挑战 Challenges for EV/HEV
 - 电动汽车技术仍有待于完善，尤其是关键零部件如电池和电机制约了电动汽车的发展进程；
 - 电动汽车市场受到产品可靠性、成本等因素的制约，需要一段成长周期
 - 油价下降影响消费者对新能源汽车的积极性
 - 市场将在未来3-5年逐步上量
-
-

电动汽车/混合动力用电机系统举例

曲轴集成启动发电机
(CISG) ~15 kW

皮带驱动启动发电机
(BISG) 3~6 kW

电动空调 ~6 kW

电动油泵 ~80W

电池冷却风扇
~40 W

冷却水泵
~40 W



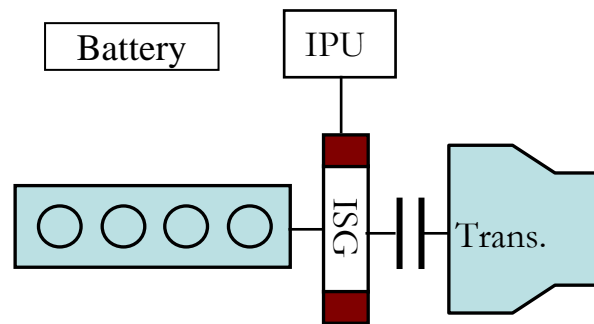
Figure1: TOYOTA NEW PRIUS

牵引电机 60~147 kW

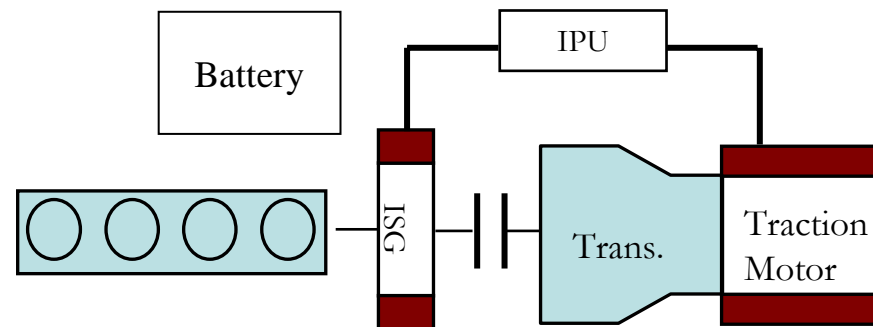
HEV 发电机 40~105 kW



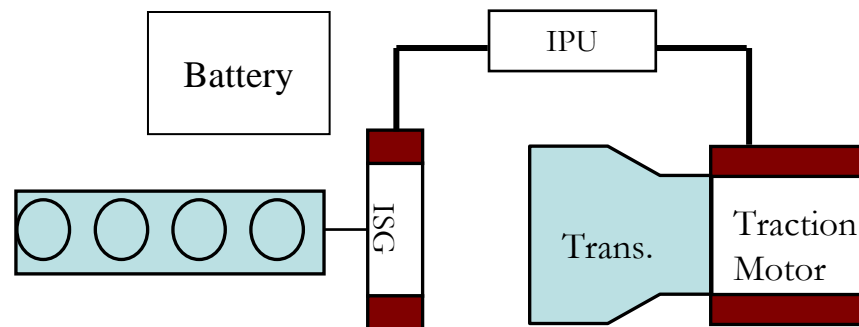
混合动力系统实现方案



Mild HEV



Parallel HEV/Plug-in

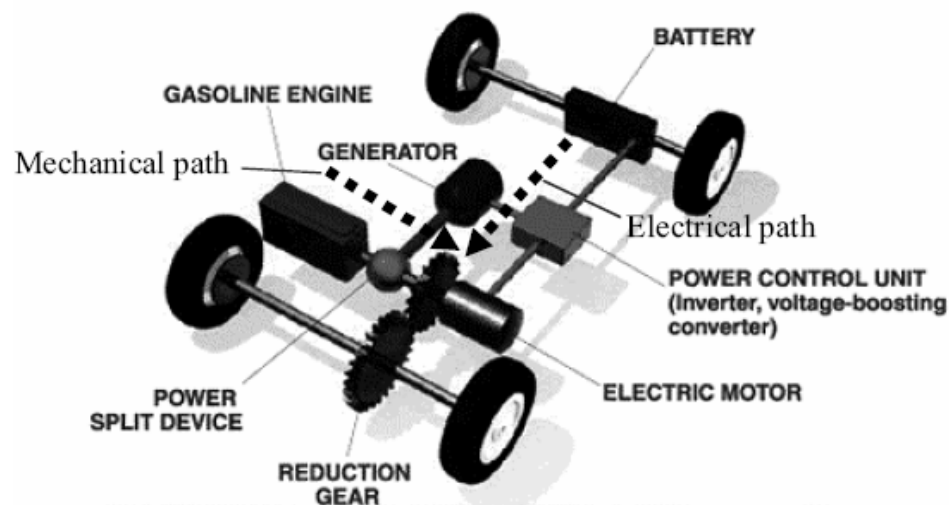


Series HEV/Plug-in

中国电动/混合动力系统发展趋势

- 近期内ISG系统是主打产品
- 随着电池技术（特别是锂离子电池）的快速发展，纯电动和Plug-in系统将得到重点关注和快速发展
- 鉴于电池发展的不确定性，采用双电机系统的强混合动力汽车将占据一定的比例，并根据电池成熟程度，往Plug-in靠拢

电动汽车/混合动力汽车用电机系统举例

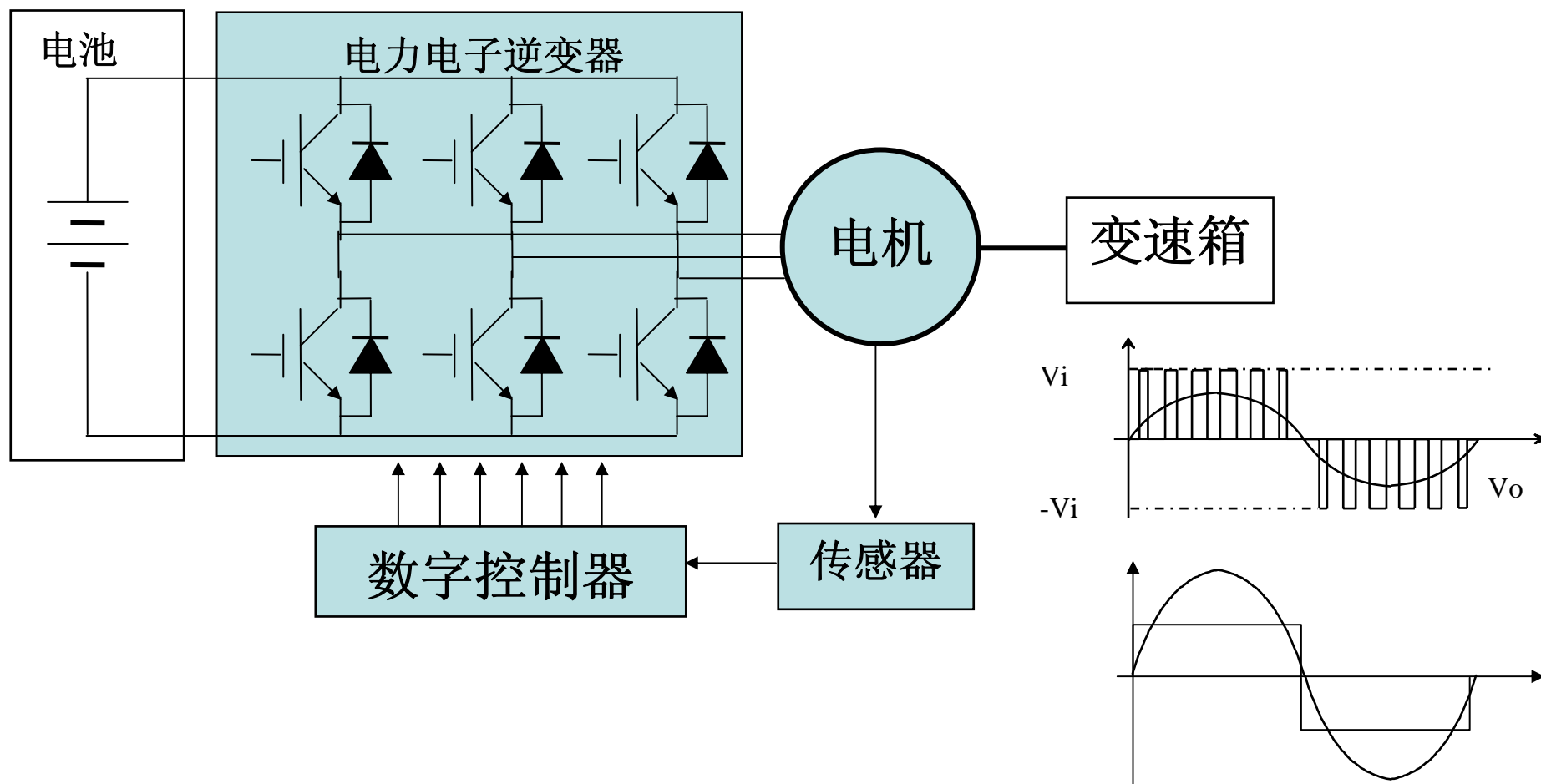


强混合动力双电机系统示意图

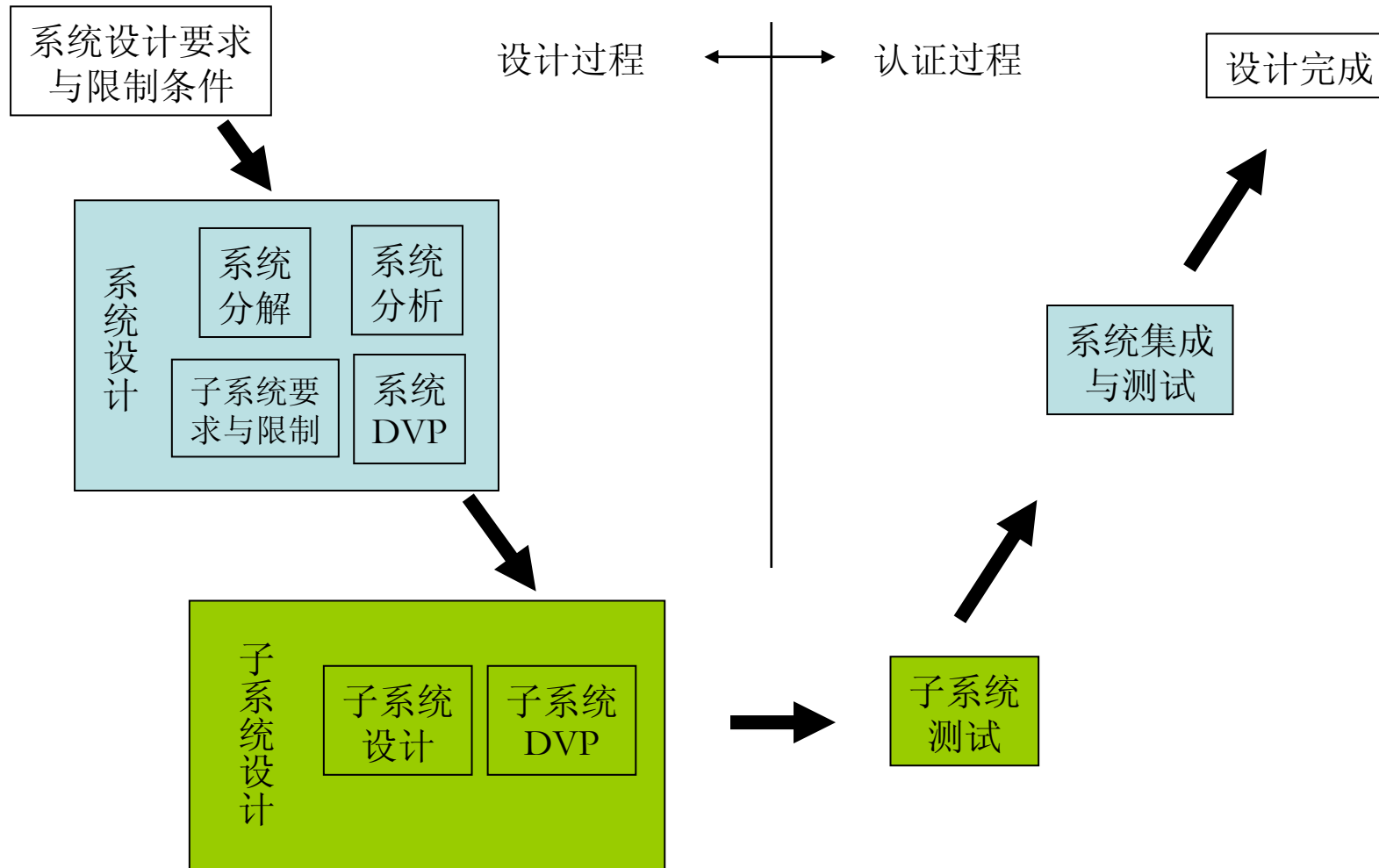


中度混合集成启动发电机
ISG系统 (Honda)



电动汽车用电机驱动系统典型结构



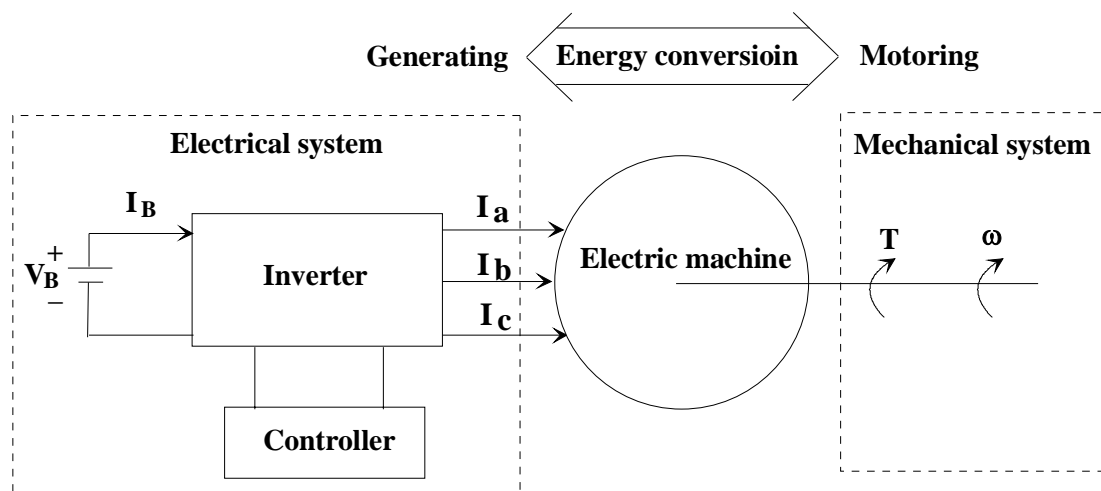
汽车产品设计方法：复杂系统的分解设计与验证



汽车电机与普通工业电机之比较

项目	工业应用	汽车应用
		
封装尺寸	空间不受限制，可用标准封装配套各种应用	布置空间有限，必须根据具体产品进行特殊设计
工作环境	环境温度适中（-20~+40℃）； 静止应用，震动较小	温度变化大（-40 ~ +105℃）； 震动剧烈；
可靠性要求	较高以保证生产效率	很高以保障乘车者安全
冷却方式	通常为风冷（体积大）	通常为水冷（体积小）
控制性能	多为变频调速控制，动态性能较差	需要精确的力矩控制，动态性能较好
功率密度	较低（0.2kW/kg）	较高（1 – 1.5kW/kg）
总体性价比	一般	极高：既要性能好，又要价格便宜

汽车电机驱动系统

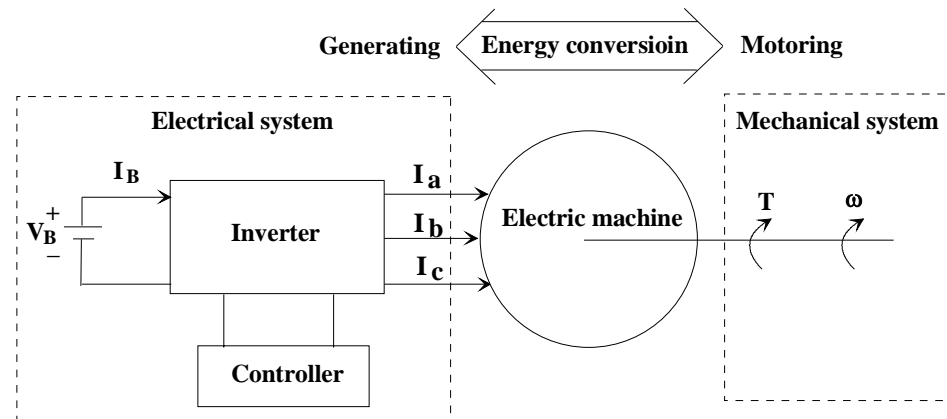


系统功能：机电能量转换

关键子系统：

- 电池作为电源或负载（储电装置）
- 汽车/发动机作为机械负载或机械能量源
- 电机作为双向机电能量转换装置
- 逆变器作为交直流电能转换装置
- 控制器作为上述能量转换的控制装置

工作模态



电机可兼作电动和发电运行

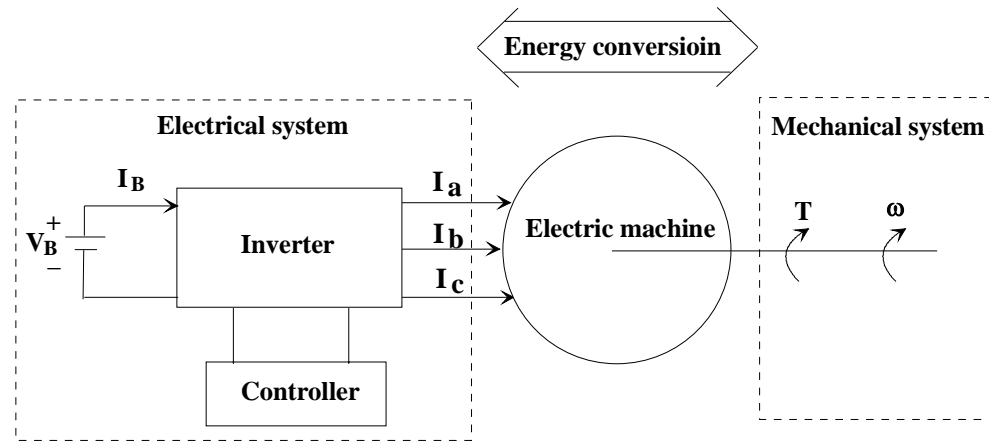
电动模态 – 电机将电能转换成机械能：

- 逆变器从电池获取功率，电池放电： $P_B = V_B \cdot I_B > 0$;
- 电机从逆变器获取电功率： $P_{em} = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(q) = K_i \cdot P_B > 0$
- 电机输出机械能： $P_{me} = T \cdot \omega = K_m \cdot P_{em} = K_i \cdot K_m \cdot P_B > 0$ ，电机扭矩与转速同向，电机推动车辆

发电模态 – 电机将机械能转换成电能：

- 车辆带动电机，电机力矩与转速反向，轴上输入机械能： $P_{me} = T \cdot \omega < 0$
- 电机输出电能： $P_{em} = K_m \cdot P_{me} = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(q) < 0$
- 逆变器输出直流电： $P_B = K_i \cdot P_{em} = K_i \cdot K_m \cdot P_{me} < 0$ ，电池充电

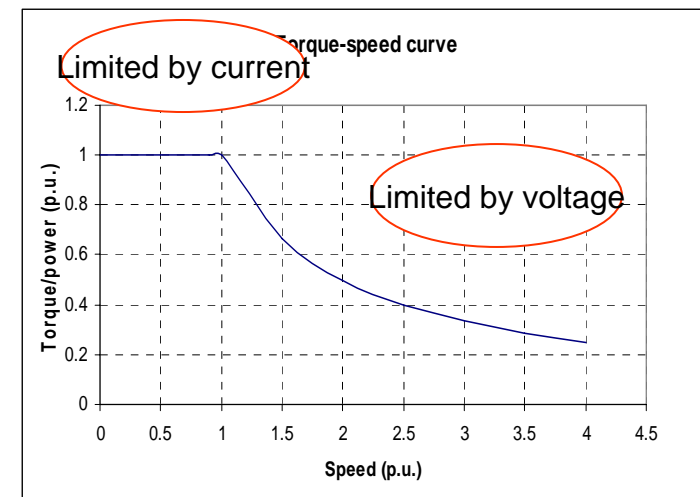
电机驱动系统的功率限制因素



- 整个机电系统的功率转换以串联的形式实现
- 系统功率有转换过程中功率最小的环节决定
 - 电池功率由电池的电压和电流能力决定
 - 逆变器的功率由功率半导体器件（IGBT或MOSFET）的电压和电流能力以及散热能力决定
 - 电机的功率由电机散热能力决定

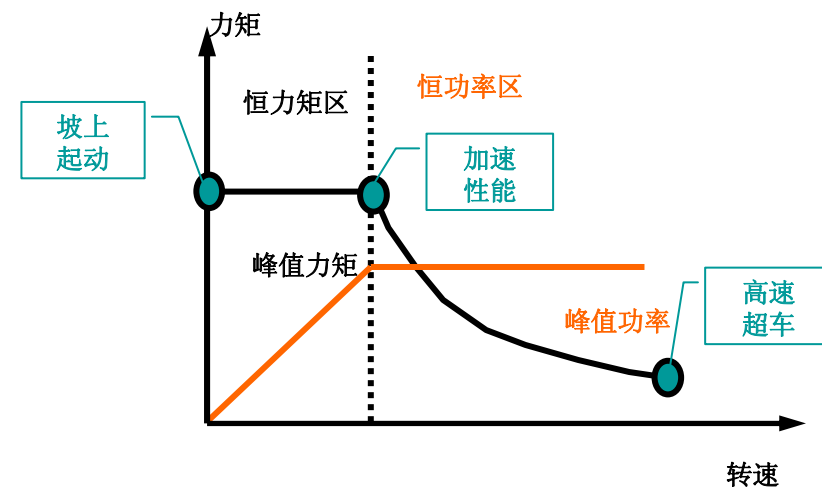
电机驱动系统特性

- 电机大小取决于输出力矩（而不是功率）以及散热能力
- 就一给定电机而言，在不考虑散热限制的前提下：
 - 电机的低速下最大力矩输出取决于逆变器的电流能力
 - 高速下输出力矩能力受制于逆变器的电压
 - 最大输出功率由逆变器的KVA决定
- 评估一个电机驱动系统的指标：
 - 最大输出力矩与转速的曲线（外特性）：
 - 恒功率调速范围
 - 效率分布图（Efficiency map）而非某一点最高效率
 - 电机输出功率kW与逆变器KVA之比
 - 力矩密度 $(Nm / (A \cdot T) / m^3)$

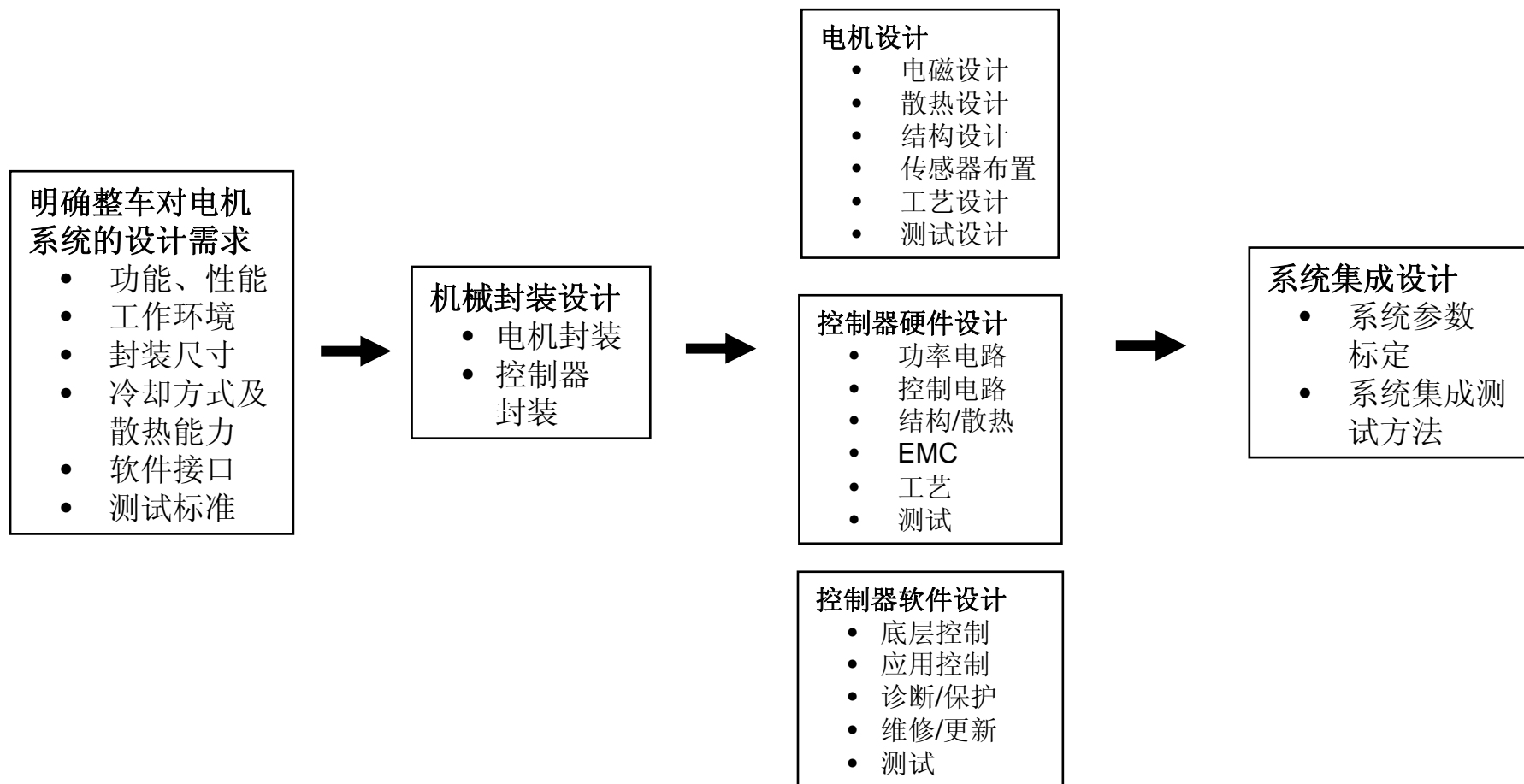


电动汽车应用对电机系统的要求

- 结构紧凑、尺寸小
- 重量轻
- 可靠性高、失效模式可控
- 效率高
- 成本低
- 低噪声、低震动
- 恒功率调速范围宽



电机系统设计过程

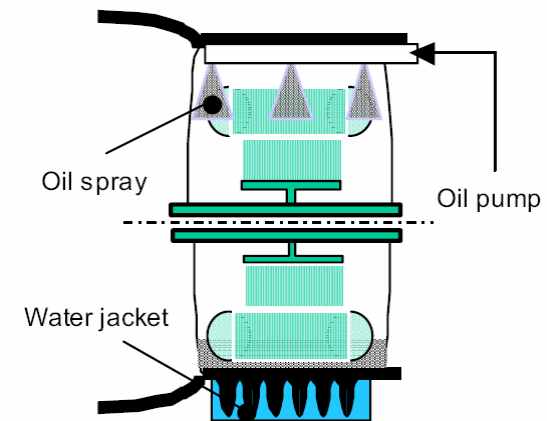


系统设计难点与选择

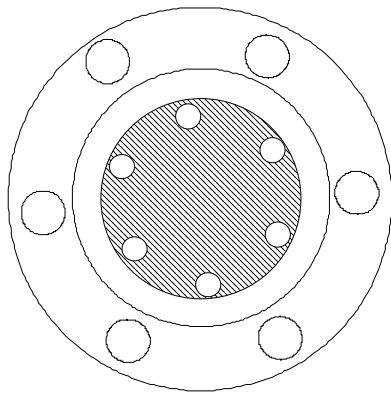
- 封装设计（机械安装结构、散热安排）
 - 电机类型的选择与比较
 - 电机与减速机/变速箱的集成
 - 直流母线电压的影响
 - 成本的挑战
-

封装设计

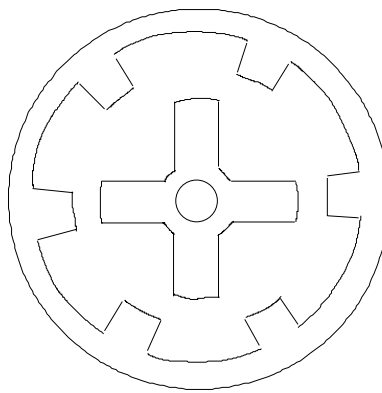
- 机械结构趋势：提高集成度
 - 电机与减速机构集成
 - 控制器集成
- 散热选择
 - 风冷
 - 水冷
 - 油冷+水冷



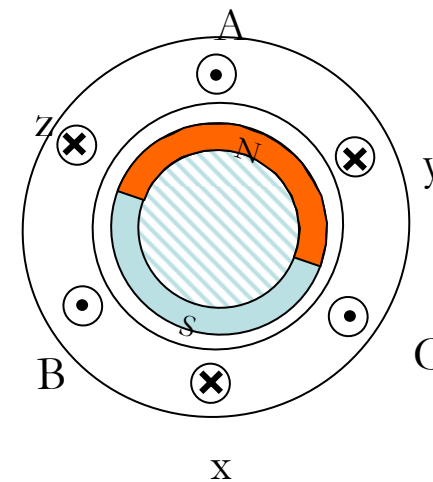
电机的选择：常用交流无刷电机类型



感应电机



开关磁阻电机



永磁电机

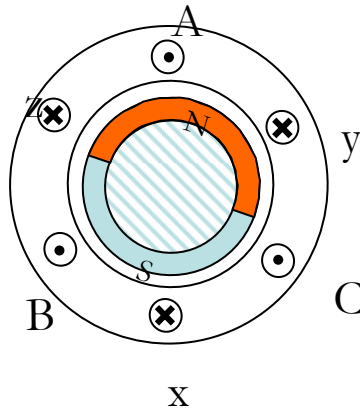
永磁电机是电动汽车尤其是乘用车的主流技术

- 尺寸小
- 效率高

表贴式永磁同步电机的特点

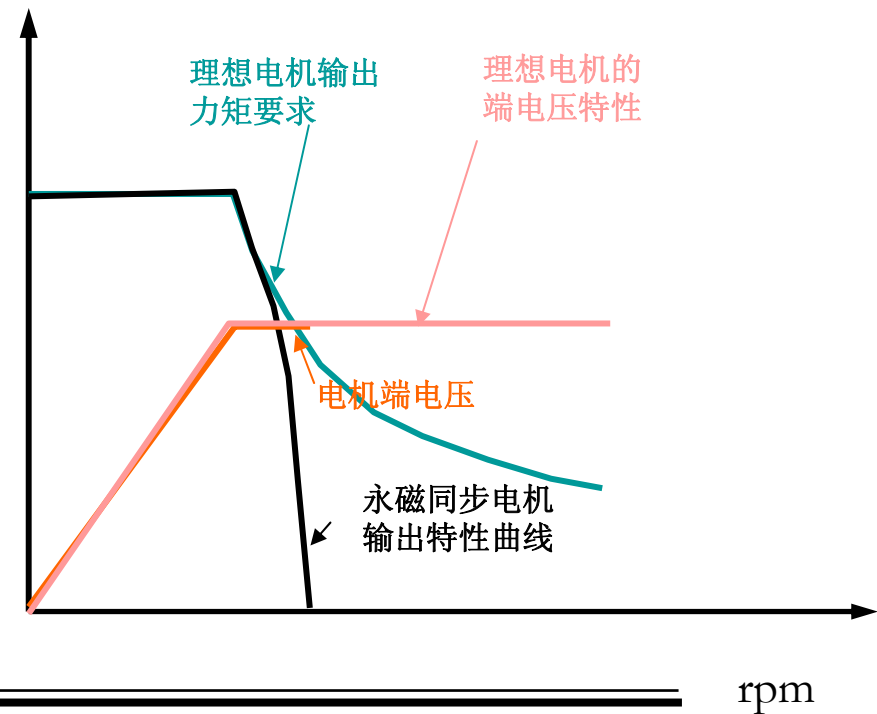
优缺点：

- 力矩密度高
- 效率较高
- 弱磁困难－恒功率调速范围窄



$$T = \vec{\lambda}_r \times \vec{\lambda}_s = K_T \lambda_r I_s \sin(\gamma) = K_T \lambda_r I_s$$

$$V_s \approx \omega_r I_s + \omega_r K_e \lambda_r$$



拓展恒功率调速区域：降低磁场强度

好处：

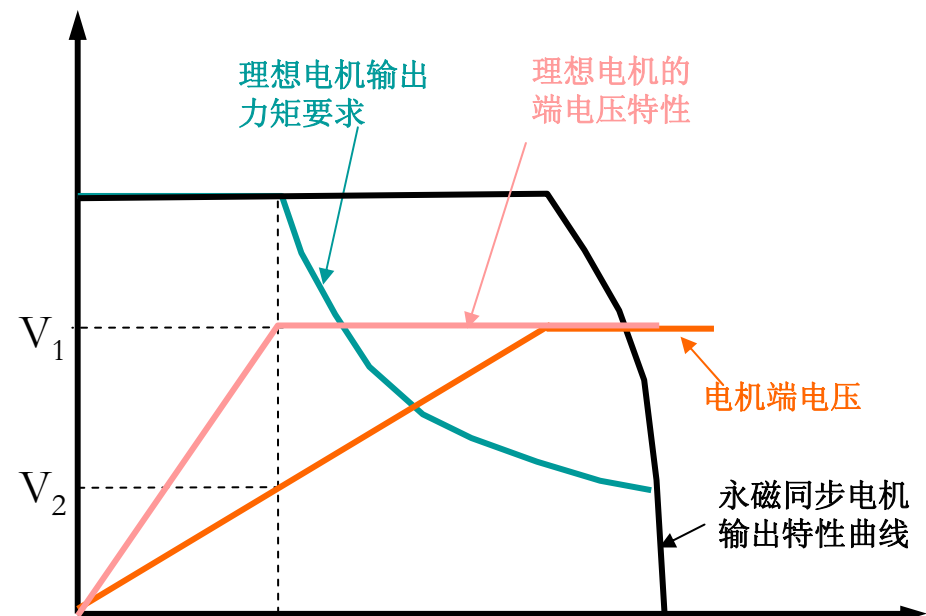
- 可以达到调速要求
- 最高转速下反电势不高，失效模式比较安全

坏处：

- 要求较大容量的逆变器（超载系数=V1/V2）
- 系统成本较高

$$T = \vec{\lambda}_r \times \vec{\lambda}_s = K_T \lambda_r I_s \sin(\gamma) = K_T \lambda_r I_s$$

$$V_s \approx \omega_r I_s + \omega_r K_e \lambda_r$$



拓展恒功率调速区域：增加电机电感

好处：

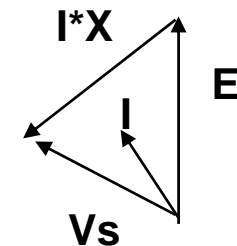
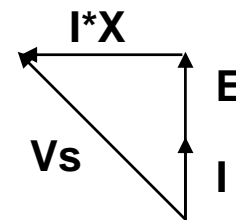
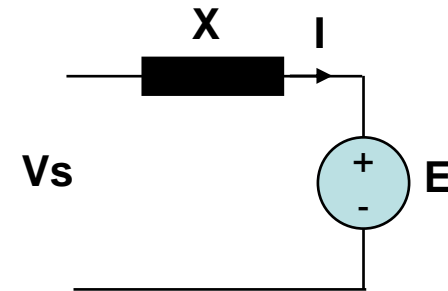
- 可以达到调速要求

坏处：

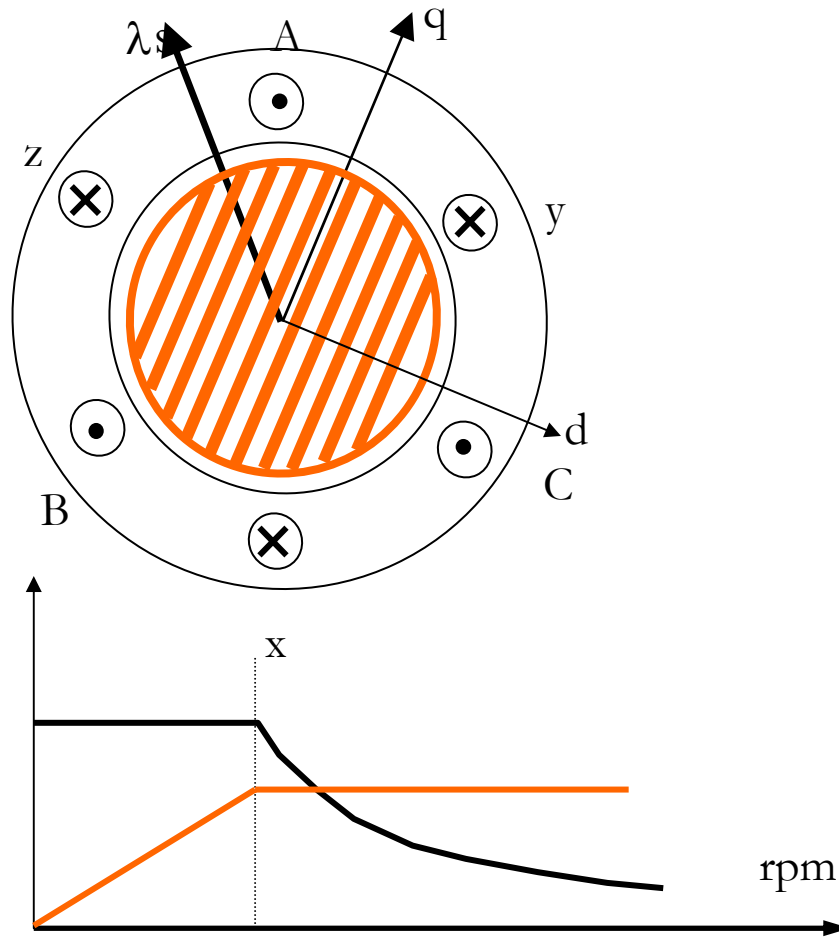
- 降低了功率因素，增加了逆变器的KVA
- 系统成本较高
- 最高转速下反电势很高，故障时失效模式不安全

$$T = \vec{\lambda}_r \times \vec{\lambda}_s = K_T \lambda_r I_s \sin(\gamma) = K_T \lambda_r I_s$$

$$\bar{V}_s \approx \omega_r L_s \bar{I}_s + \omega_r K_e \bar{\lambda}_r$$



磁阻同步电机工作原理及特性



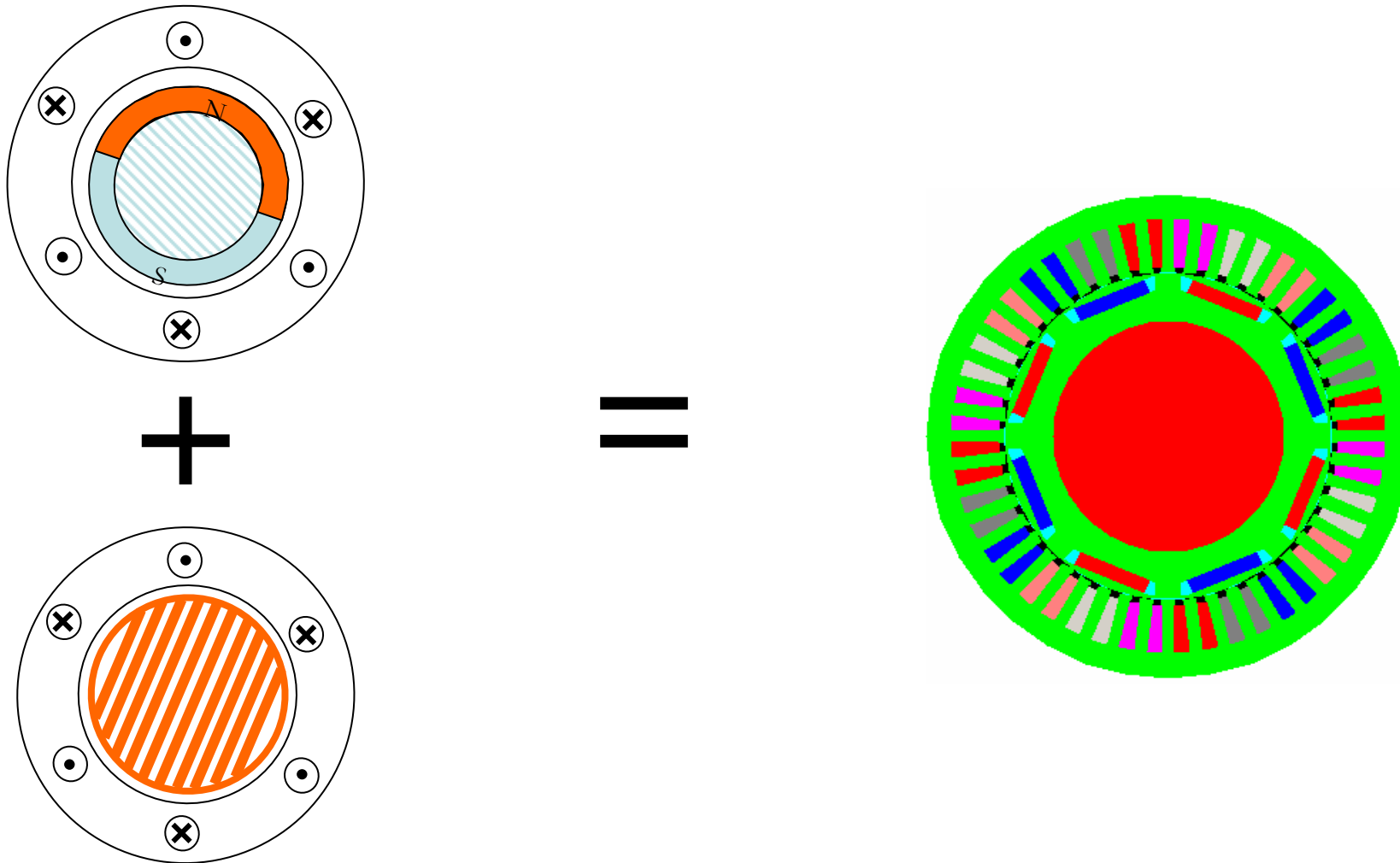
$$T = K(L_d - L_q)I_d I_q$$

$$V \approx K\omega_r(L_d I_d + L_q I_q)$$

优缺点：

- 弱磁容易
- 效率较高
- 力矩密度不易做大
- 由于饱和非线性，控制复杂

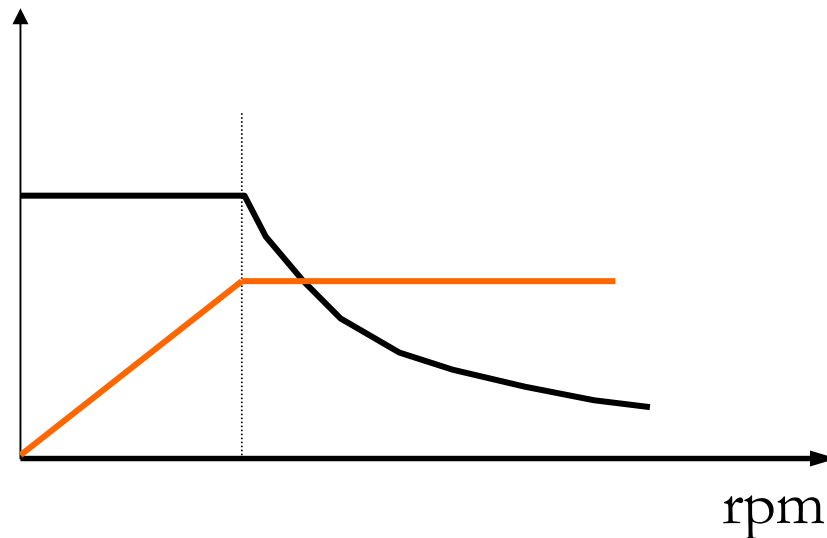
永磁-磁阻同步电机



永磁-磁阻同步电机的特性

Characteristics of PMRS Motor

$$T = K_1 \lambda_{PM} I_q + K_2 (L_d - L_q) I_d I_q$$
$$V \approx \omega_r \left[K_3 (L_d I_d + L_q I_q) + K_4 \lambda_{PM} \right]$$



永磁-磁阻同步电机的特点:

- 弱磁容易，调速范围宽
- 效率较高
- 力矩密度较高
- 结构复杂，优化设计较难
- 由于饱和非线性，控制复杂

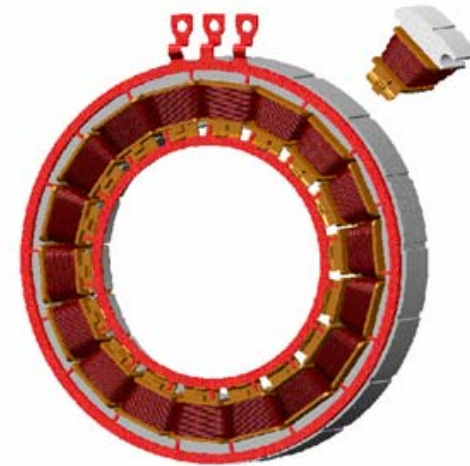
表贴式永磁电机与永磁磁阻电机之比较

	表贴式	永磁-磁阻
力矩密度	+	-
恒功率调速区	-	+
失效模式	-	+
效率	-	+
永磁体固定方式	-	+
整体充磁能力	0	0
永磁体的涡流损失	-	+
永磁体的特殊形状要求	-	+

表贴式永磁电机不适用于电动汽车应用

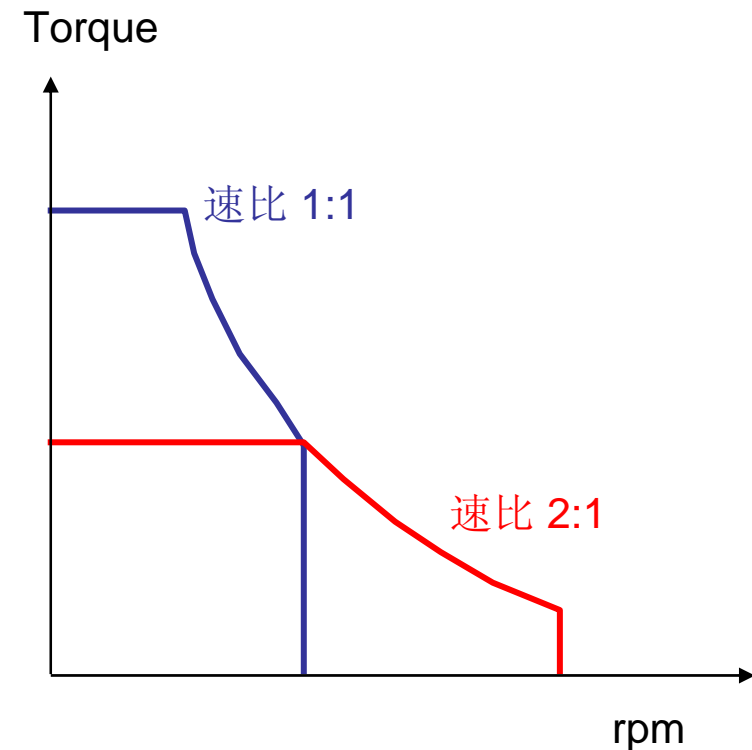
本田混合动力汽车用电机

- 表贴式永磁电机曾用于本田 EV Plus 纯电动汽车和 Insight 混合动力汽车
- 本田第二代系统则采用永磁磁阻电机（内置式永磁电机 IPM），与第一代相比：
 - 力矩密度提高15% ；
 - 功率密度提高 64%
 - 效率提高3%
 - 最高转速提高25%



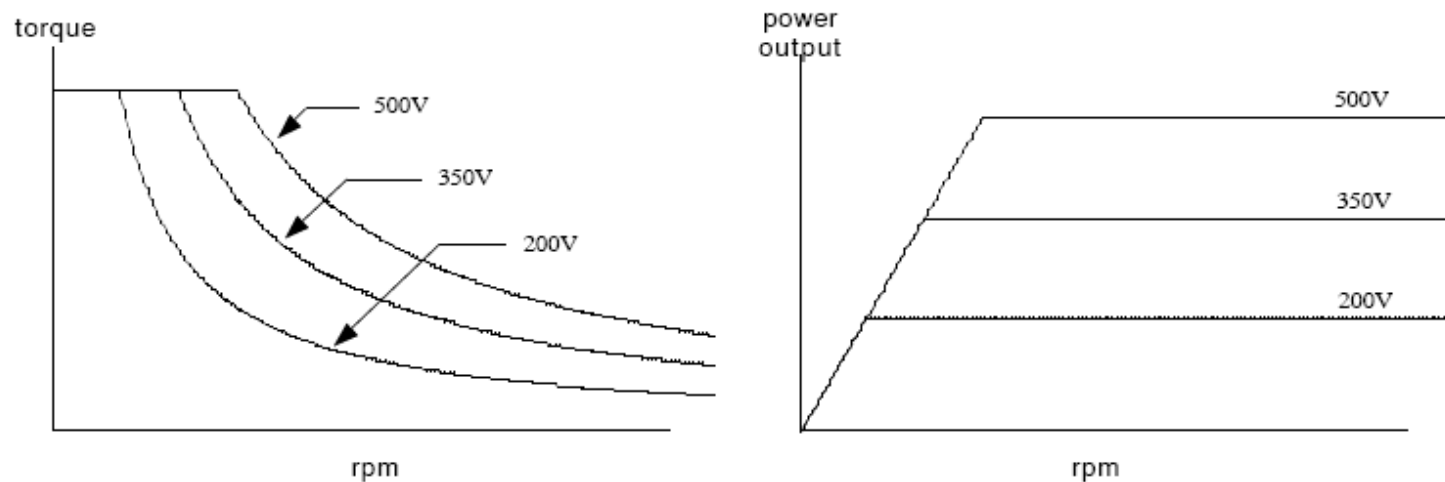
电机与变速箱的优化组合

- 电机尺寸取决于峰值力矩
- 采用减速机可以在不改变功率的前提下大大降低峰值力矩从而降低电机的体积和成本
- 根据实际应用需要优化配置电机与变速箱（减速机）组合

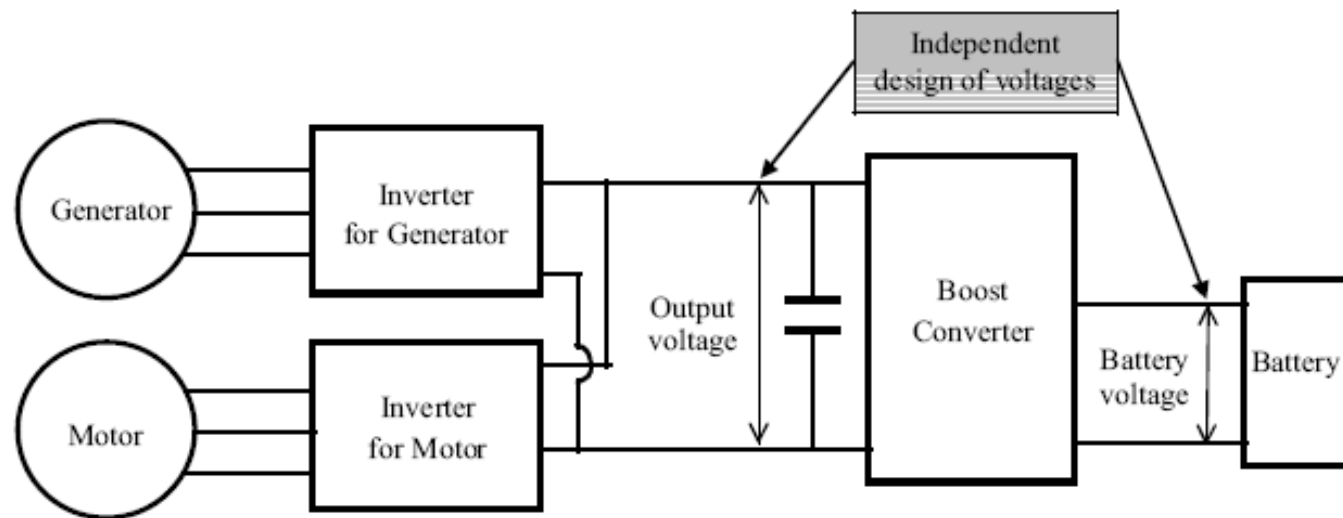


直流母线电压的考虑

- 在电流不变的前提下，升高母线电压可以增加逆变器的功率能力。因此，只要电机散热允许，电机系统的输出功率与母线电压成正比。
- 但升高电压意味着更多的电池相串联，电池可靠性下降



匹配电池与电机电压：引入高压DC-DC Converter



好处:

- 在不改变电池电压的前提下提高电机的控制电压，从而提高电机的输出功率
- 利用大功率DCDC实现直流母线电压动态调节，提高系统效率及可靠性
- 大功率DC/DC可用于匹配控制两种不同的电源（如电池+燃料电池，电池+超级电容器等），实现电-电混合

成本挑战

- 电机系统成本是电动汽车/混合动力汽车市场化的重要障碍之一
- EV/HEV 动力系统成本构成；
 - 电池或燃料电池
 - 电力电子；
 - 电机；
 - 减速器/变速箱；
- 需采用系统方法削减成本

削减成本的途径

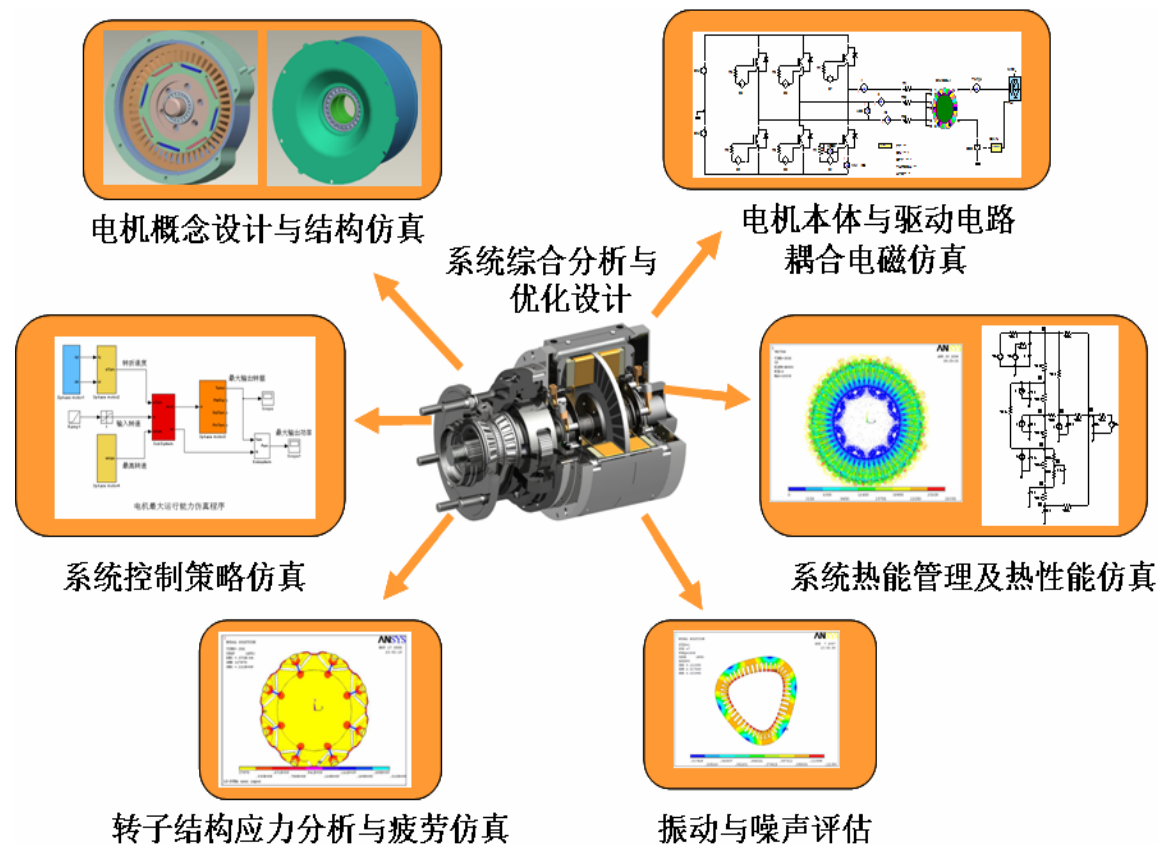
- 系统优化设计；
 - 避免过设计；
 - 提高集成度；
- 制造；
 - 借用汽车制造能力提高电机及电力电子系统的制造效率
- 增加产量；
 - 整车客户之间分享共同的供应商资源
 - 与工业应该分享零部件资源
 - 政府在市场起步时提供资助

整车客户与电机系统供应商通力合作

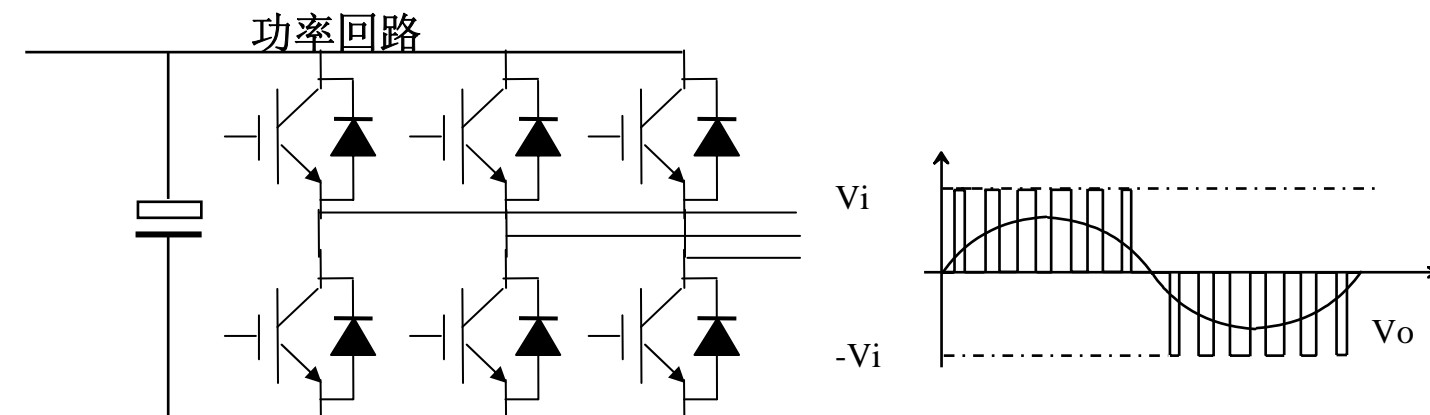
- 适当定义系统设计需求，特别是最差工况
- 集成、同步设计：
 - 发动机、变速箱、电机总成设计
 - 机电一体优化封装设计；
 - 一体化热管理设计；
 - 功能优化设计；
- 恰当地设计认证测试方法
 - 以最差工况为基础设计可靠性耐久性试验；
 - 软件可靠性测试；
 - 不同层级的电磁兼容测试（部件、总成、整车）

系统设计是关键

- 电机与机械动力装置优化组合
 - 电机与发动机一体集成成为混合动力发动机总成
 - 电机与变速箱一体集成成为混合动力变速箱总成
- 电机、电力电子、电池优化组合



电力电子控制器的硬件构成



DSP电机控制器

- 接受整车控制器的指令并反馈信息
- 检测电机系统内传感器信息
- 根据指令及传感器信息产生逆变器开关信号

IGBT驱动电路

- 接收DSP的开关信号并反馈相关信息
- 放大开关信号并驱动IGBT
- 提供电压隔离和保护功能

控制电源

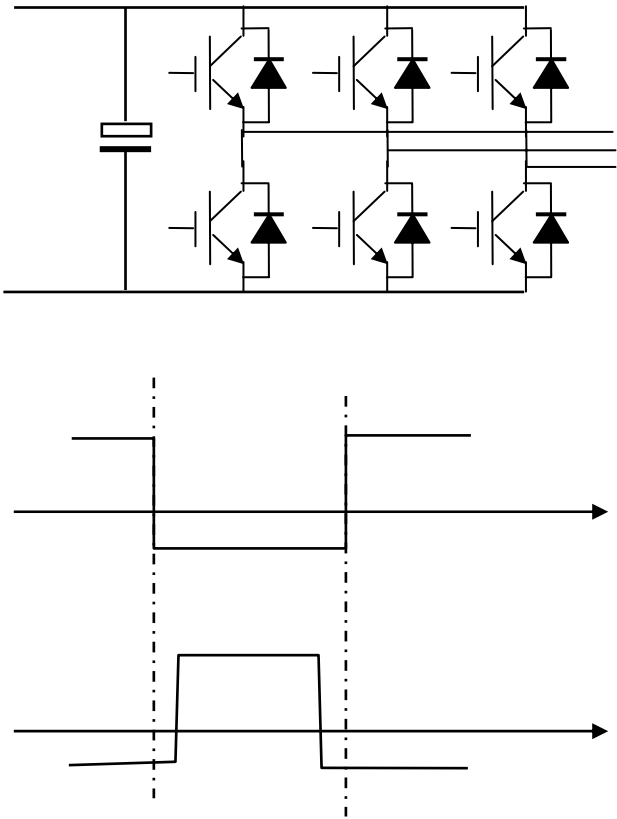
- 为DSP提供电源
- 为驱动电路提供多路相互隔离的电源

结构与散热系统

- 为电力电子模块散热
- 为控制器组件安装提供支撑
- 为控制器提供环境保护

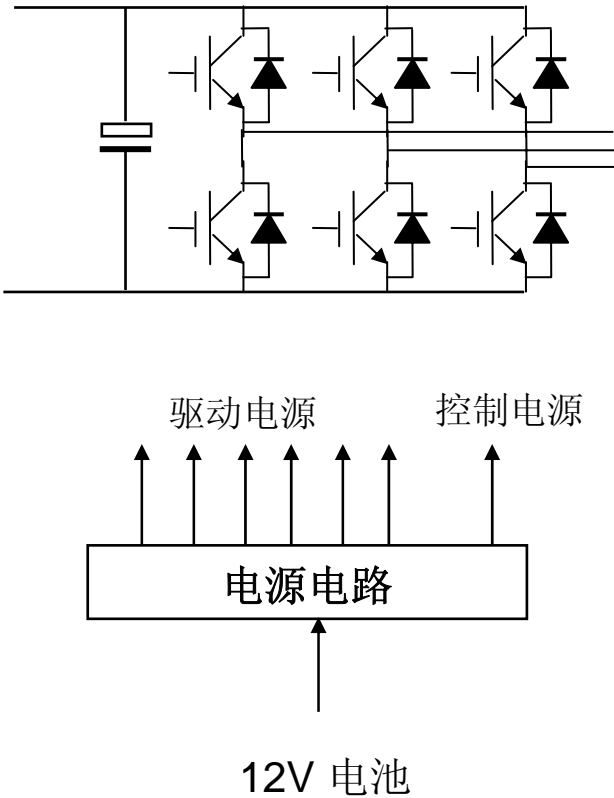
功率模块驱动电路

功能	设计考虑
可靠开关功率器件	<ul style="list-style-type: none">根据功率器件的门极特性匹配驱动能力和驱动电阻提供负电压以确保可靠关断
防止上下管全通（短路）	<ul style="list-style-type: none">设立可靠的死区时间
提供保护功能	<ul style="list-style-type: none">欠电压保护过电压过流保护过温保护短路保护
通讯功能	<ul style="list-style-type: none">将故障信号通过隔离传送给DSP
绝缘功能	<ul style="list-style-type: none">采用耐高压驱动芯片并处理好高压电路的爬电距离
防电磁干扰	<ul style="list-style-type: none">注意把开关电路与敏感的信号电路分开



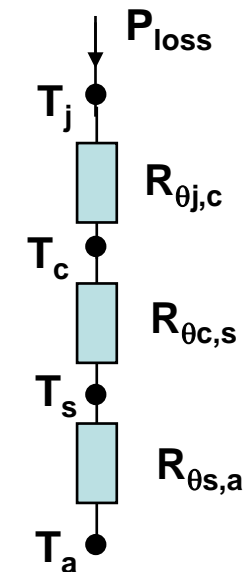
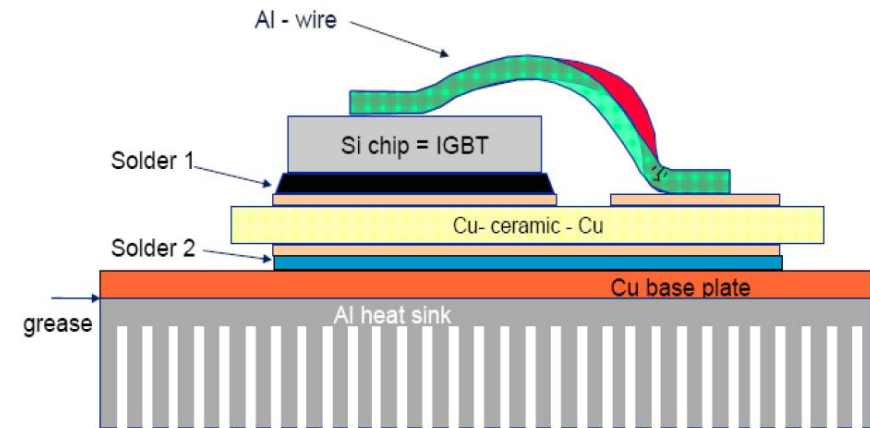
电源电路

功能	设计考虑
为驱动电路和控制电路提供相互隔离的电源	<ul style="list-style-type: none">根据功率器件的门极特性以及开关频率匹配电源的输出功率为每一路驱动电路提供负电压以确保可靠关断
绝缘功能	<ul style="list-style-type: none">设计需要保证足够的“爬电”距离变压器设计
宽范围的输入电压（6-18V）	<ul style="list-style-type: none">采用合适的开关电源拓扑结构和控制
防电磁干扰	<ul style="list-style-type: none">优化滤波电路设计



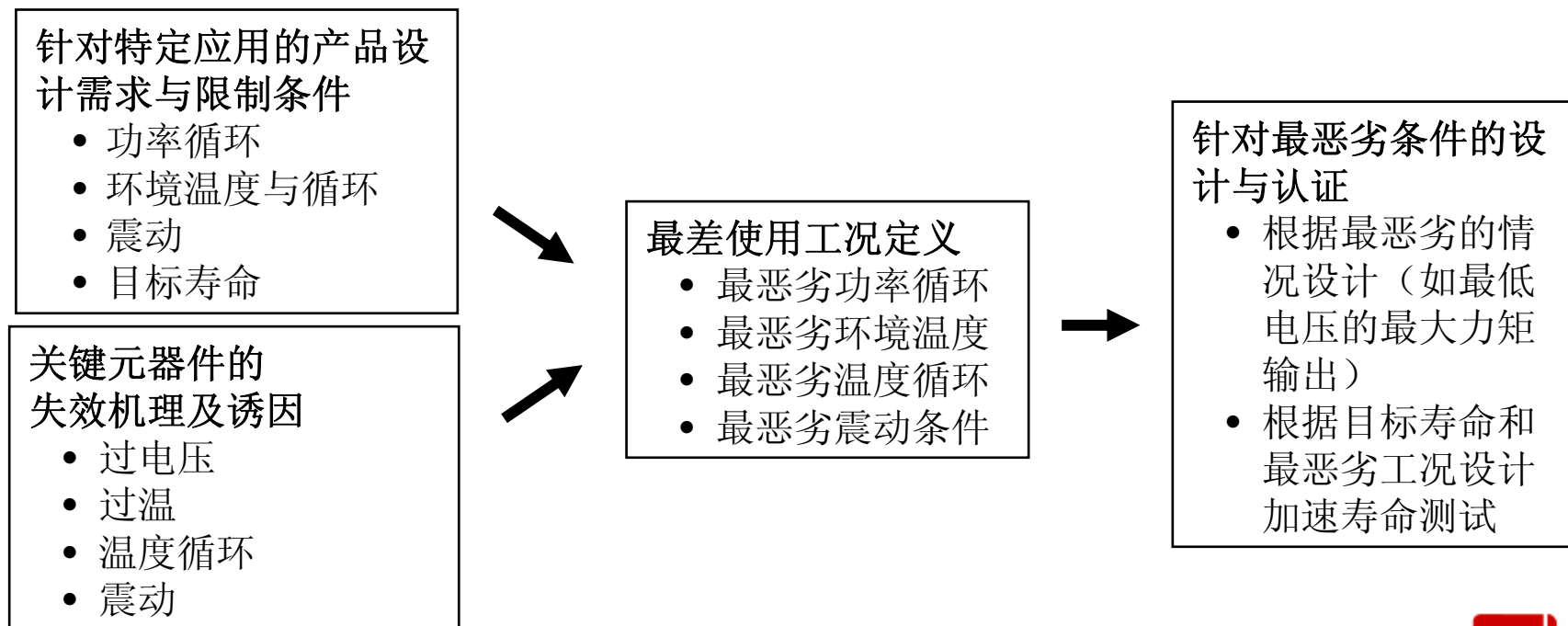
散热设计

- 功率模块在运行中产生损耗 P_{loss}
- 这些功率损耗通过一连串的热阻 R_{θ} 最终散到环境中
- 为保证可靠性，需要保证IGBT芯片的工作温度不超过其允许的限度（150°C）
- 温升模型： $\Delta T = P_{\text{loss}} * R_{\theta}$ 。重要的任务是减少 P_{loss} 和 R_{θ}
- 根据实际要求选择冷却方式（水冷或风冷）



可靠性设计

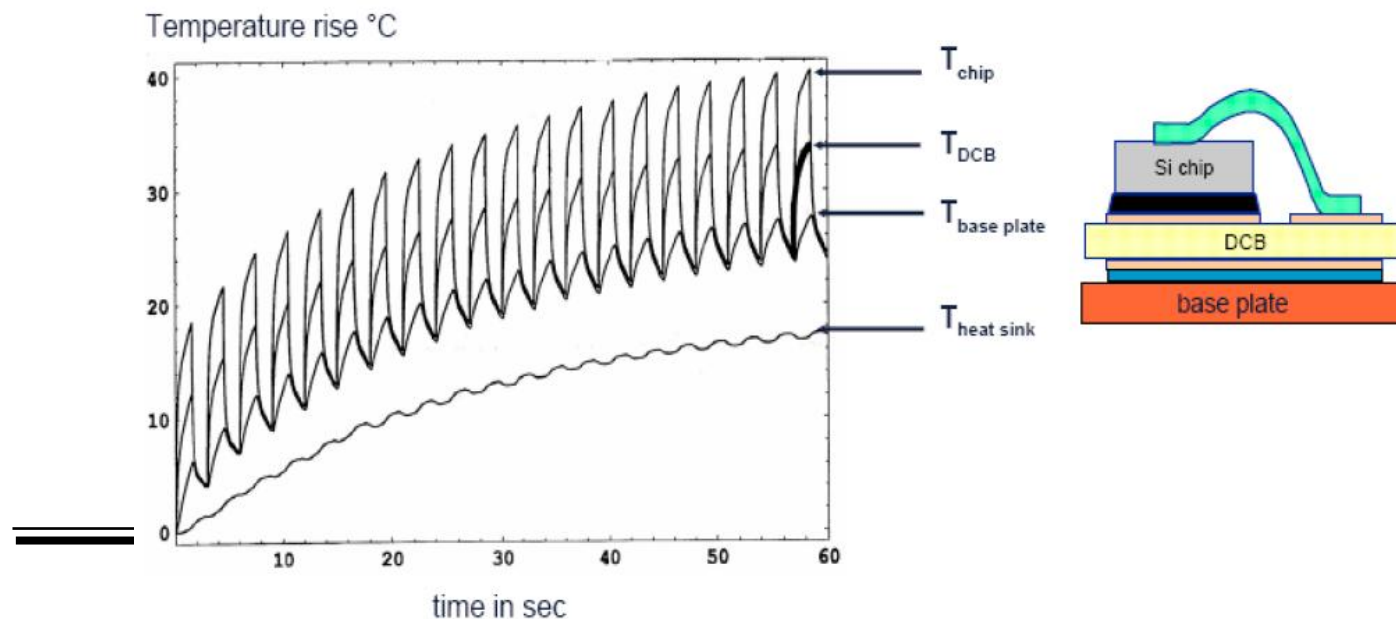
- 目标：保证产品在其预定的应用范围和使用年限内可靠工作
- 系统产品可靠性由最薄弱的关键元器件的可靠性决定
 - IGBT 模块
 - 电解电容



可靠性设计：IGBT的失效机制

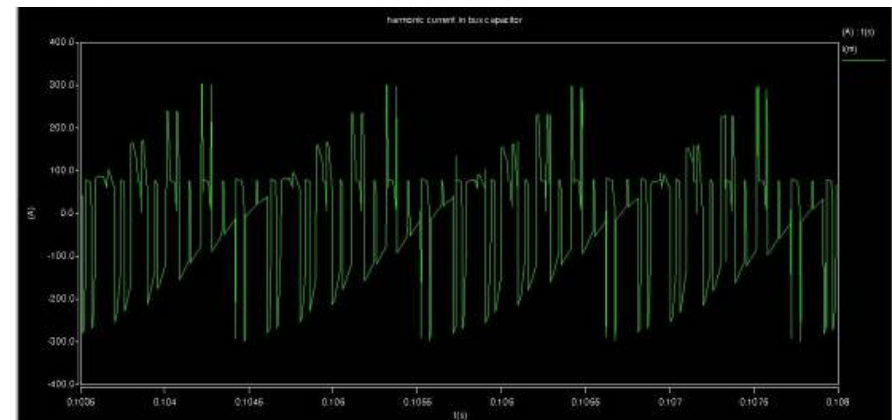
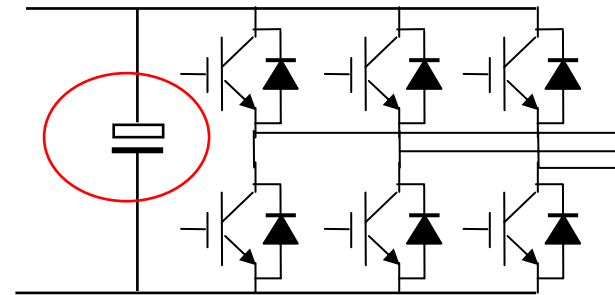
1. MOS绝缘栅结构在高温情况下会失去绝缘能力。
2. 由于硅芯片与铝导线之间热膨胀系数的差异，在输出电流剧烈变化时，铝导线与硅芯片之间的接触面会形成热应力，从而造成裂纹，并会逐步导致铝线断裂。
3. 由于处于芯片和散热铜底板间的陶瓷绝缘/导热片的热膨胀系数和散热铜底板的热膨胀系数不同，在底板温度不断变化时，连接两种材料的焊锡层会形成裂纹，从而导致散热能力下降，进而导致IGBT温度过高而失效。
4. 由于振动，可能造成陶瓷片破裂，从而降低散热能力和绝缘能力。
5. 在混合动力/电动汽车的应用中，上述失效机理将是综合影响并发生的。例如：在IGBT输出大电流时，铝线会受到热应力（机理2）；同时芯片温度会上升，将热传导到底板，造成底板温度上升，从而激发机理3；当温度过高时，会直接导致机理1的发生。再加上汽车运行工况所带来的颠簸振动，导致机理4的发生。

汽车级电力电子模块重点改善功率循环和温度循环（温度冲击）所引起的失效机理



电解电容的作用

- 稳定母线电压，保证 IGBT 正常工作而不受开关时产生的过电压影响。因此，需要一定的电容量；
- 提供脉宽调制（PWM）过程中的脉动电流（如下图所示）。因此，需要相当大的脉动电流承受能力。



电解电容的主要失效机理分析



电力电子控制器的电磁兼容设计

挑战：

- 电力电子控制器产生强大的电磁干扰
- 电磁干扰的问题在汽车中尤其突出
 - 所有电子控制器相距很近
 - 金属车体容易传导电磁噪声
- 电磁干扰的程度与部件的物理位置关系敏感，不容易事先模拟

解决方法：

- 必须从整车、系统总成、部件等层次统筹解决
- 从降低干扰源强度、改变干扰传播途径、减小噪声干扰效应诸方面入手
- 需要大量的实验，积累经验

设计认证测试是关键

- 认证测试是检验设计是否达到设计需求的客观验证手段
- 测试标准决定了产品设计水平
- 目前尚缺乏完整的电动汽车/混合动力汽车用电机系统测试标准

功能及性能试验

- 电机系统外特性
- 系统效率Map
- 力矩控制精度
- 温升试验
- 保护功能试验
- 电气安全试验

电磁兼容试验

- 传导及辐射干扰
- 传导及辐射防护
- 防静电能力ESD

环境适应性试验

- 高温高湿运行试验
- 低温运行试验
- 温度循环运行试验
- 高、低温存储试验
- 防水防尘试验
- 抗震动试验

长期可靠性(寿命)实验

- 最恶劣工况下加速寿命试验
- 高低温冲击试验

电力电子控制器发展趋势

- 新控制器拓扑结构
- 高集成度
 - 子系统集成（如ISG控制器+牵引电机控制器+DC/DC）
 - 物理结构的集成（如：电力电子控制器与电池管理模块集成，丰田第三代PCU封装）
 - 热管理集成设计
- 新器件
 - 高集成度、智能型汽车等级IGBT模块
 - 薄膜电容

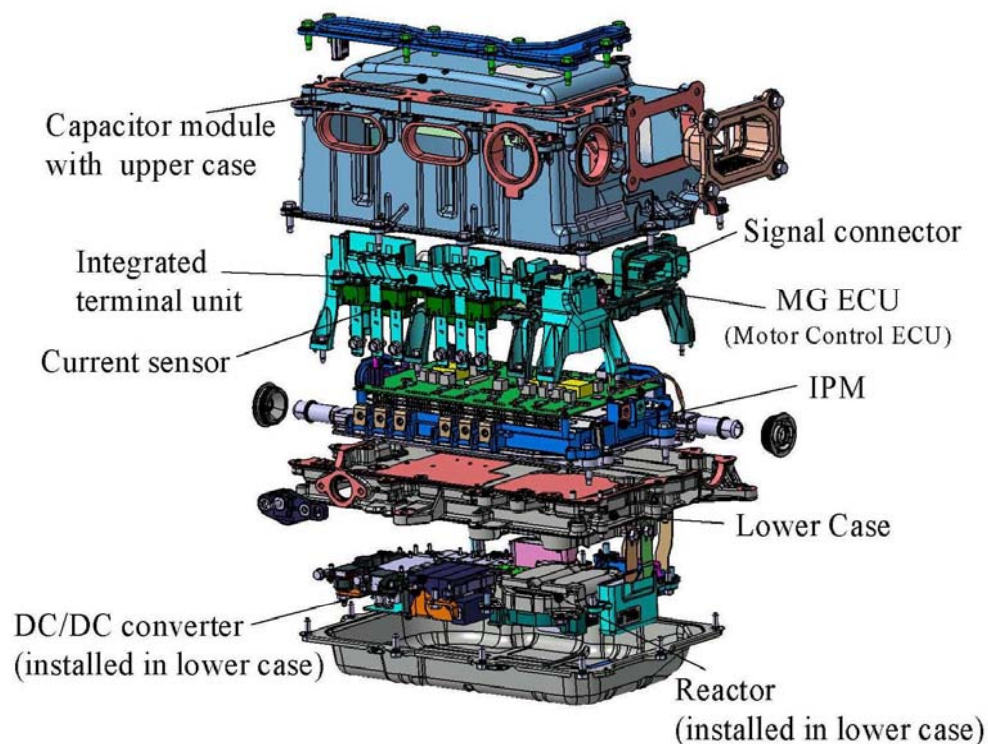


Fig. 5 Structure of the 3rd generation PCU

结语

- 电动汽车/混合动力汽车正在成为汽车工业未来的主流动力系统技术
- 电力电子和电机驱动系统是EV/HEV的关键零部件技术
- 汽车应用对电机及控制器的苛刻要求推动了新型电机及电力电子控制器技术的发展
- 永磁-磁阻电机具有汽车应用的良好前景
- 中国电机系统供应商面临着巨大的挑战，尤其是在可靠性、EMC、轻量化以及成本方面
- 系统设计方法以及主机厂与供应商之间的紧密协作是破解挑战的良策
- 在经过中国电动汽车市场的洗礼后，中国电机系统供应商有机会成为世界电动汽车市场的主要供应商