

基于 Simcenter Studio 的装备系统架构设计

蒋爱华^{1,2} 李金华³

(1 上海振道科技有限公司 上海 200030; 2 西门子工业软件有限公司 上海 200082;

3 上海工商外国语职业学院有限公司 上海 201399)

摘要: 机械装备系统架构差异是系统性能差异关键所在,也是国内外装备设计能力的差距所在。系统架构设计是装备正向设计的核心环节。系统架构设计遵循系统工程的 RFLP 流程,Simcenter Studio 是可进行装备多种架构设计的工具,本文介绍基于模型的系统架构设计方法与基于 Simcenter Studio 生成系统架构的具体实施过程,具有系统组成与指标的定义,系统组件数量、接口数量、类型与物理量定义,限制条件的设定,架构生成与计算,架构选择等实施步骤,从而实现架构的自动设计与优化设计。基于 Simcenter Studio 的架构设计在飞机起落架、混动汽车、新型飞行器、传动系统领域等的系统架构设计具有成功的应用。

关键词: MBSE; 数字双胞胎; 系统工程; 架构设计

0 引言

复杂装备的设计需要遵循系统工程方法,具体流程包括需求(Require)、功能(Function)、逻辑(Logic)、物理实现(Physical design)四个阶段。RFLP 分解过程见图 1。

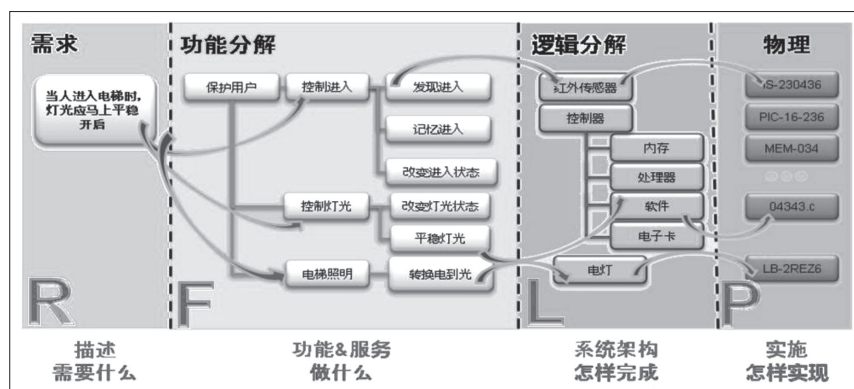


图 1 RFLP 分解过程

逻辑工作过程(Logic)与物理(Product)参数的设计是需要在系统的架构确定之后才能实施的,因此不同系统架构对于所设计产品的成本、性能之间的差异起着决定性的作用,基于不同系统架构下的机械结构、电路等方面的详细设计均是“地球上的高山或河流”“高山上的绿树”或“大海中的漩涡”,系统架构设计是整个装备正向设计中对性能影响最大的环节。

系统架构是装备性能最重要的决定因素。相对于美国、德国等工业发达国家,中国最大的差距是根据系统功能如何设计出具有高性能的装备系统架构。

汽车行业是使用覆盖面最广的复杂装备。由于系统

架构的不同,燃油汽车百公里加速性能天生就无法与电动汽车相比,此外不同混动汽车架构形式续航里程、系统可靠性也会有本质的差别,组成更少的汽车通常情况下更容易获得更高的可靠性,四驱增程式电动汽车具有更高的加速性能,但同时成本也会更高,这些最重要性能的决定因素就是系统架构。图 2 所示为不同架构的混动汽车。

不同架构的总体系统设计也决定着子系统与零部件的设计,例如不同汽车总体架构决定着不同的传动机构,不同齿轮箱架构对应着不同的齿轮箱真实结构。图 3 所示为不同型号汽车采用的不同架构变速箱。

不同的零部件形式则会决定不同的零部件制造过程与不同布局的产线,因此系统架构的设计属于国内体系中方案设计的环节,但是却决定着详细设计与后期生产

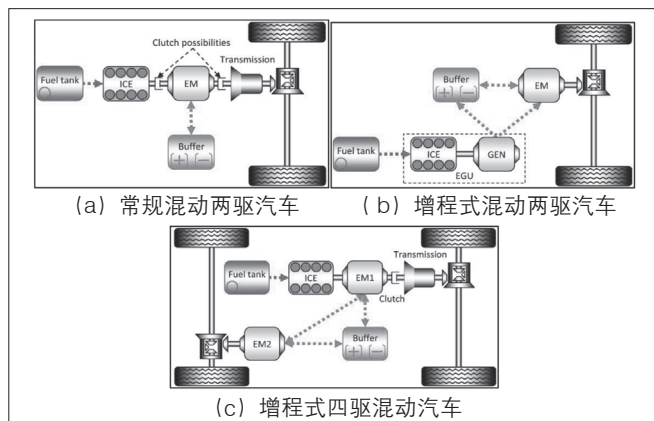


图 2 不同架构的混动汽车

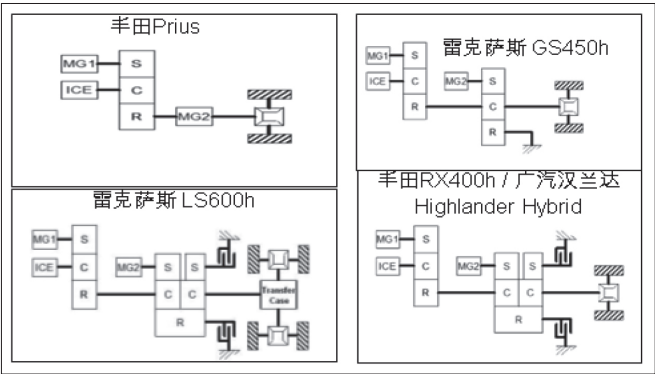


图 3 不同汽车架构下的行星齿轮变速箱

工艺、生产厂房与生产线的设计，也决定着由此而带来的总体成本与总体性能。

其他行业装备的原创性设计也是相同功能需求采用的不同系统架构设计而得到的。例如马斯克的火箭就从最原始的功能需求出发，采用了与 NASA、中国不同的火箭架构，也就是耳熟能详的第一性原理，才实现了火箭本体多次重复利用的功能、载重量大幅度提升的性能；ASML 的极紫外光光刻机也采用了原有光刻机不同的系统架构而达到了 7nm 的精度。

此外航空电子系统、嵌入式系统、飞机热力学循环系统、飞机电力系统、汽车变速箱系统、汽车燃料电池组系统等均可以基于功能需求、系统组成设定与物理量的对应关系设计出不同的系统架构，如图 4 所示。

1 装备系统架构设计

装备的系统架构设计是基于功能确定系统组成之后

进行实施的，功能分解实际上是可以获得各个组成之间传递的物理量，图 5、图 6 所示为系统设计工业软件中已经总结的系统功能分类与能量流的物理量的分类。

系统架构设计则需要根据功能分解确定各个系统组成的具体形式，设定各个系统组成的接口数量、类型、传递的物理量，以及各个系统组成接口之间可能的连接方式。系统架构设计中各系统组成设定与功能分解阶段的接口数量可以是不同的，例如功能分解中某个系统组成需要实现由高速端部件的高转速变为低转速部件的低转速的功能（1 个输入接口、1 个输出接口），系统架构设计中则可以采用单输入单输出的单级减速箱（1 个输入接口、1 个输出接口），也可以采用单输入多输出的减速箱（1 个输入接口、多个输出接口），同时与之对应后端系统组成的接口也需要多个输入接口，但总体上功能分析框图中仍然保持 1 个输入、1 个输出。

确定各个系统组成的具体形式与输入输出接口数量有两种方式：一种是直接通过对于功能的分解后根据工程经验确定具体形式与接口数量，这种具有较高的工程经验要求，需要对现实工业产品的接口有足够的经验，Amesim（系统仿真软件）中已经集成了工程中遇到的各种组件形式，可以作为很好的参考，当然如果仅从已有工程经验确定组件的具体形式与接口数量也会有经验的局限；另外一种方式是组件的具体形式确定以后，直接从数学的角度来设定接口的数量，理论上接口的数量可以设置无穷个，但是过多的接口也就意味着各个系统组成之间的连接组合可以无限多，如图 7 中所示的汽车传动系统，其可能的架构可以达到 1021 种可能。因此好的

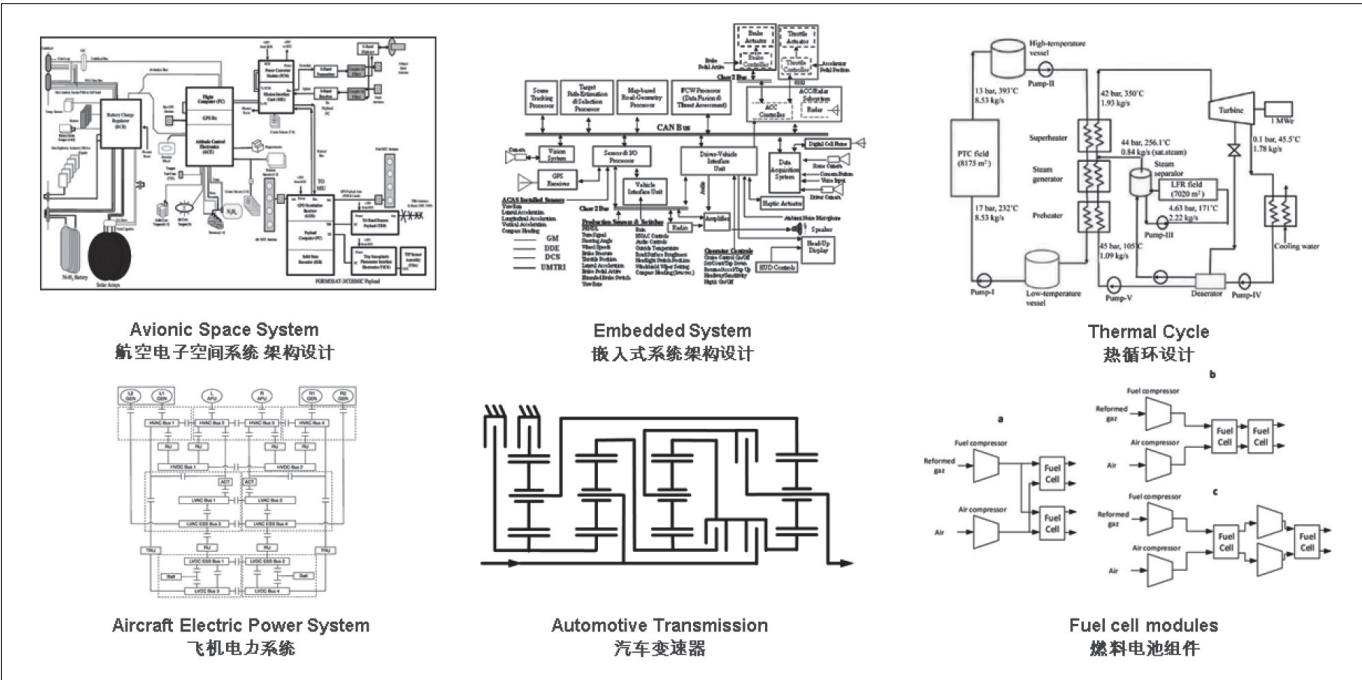


图 4 不同行业系统组成与系统架构设计

Function	Sub-Function	Definition	Examples	Synonyms
Branch		To cause a material or energy to no longer be joined or mixed.		Bifurcate, Detach, Disassemble, Disorder, Diverge, Isolate.
Branch	Distribute	To cause a material or energy to break up, in a way that the individual bits are similar to each other and the undistributed flow.	A fuel injector distributes fuel by spraying it into the combustion chamber.	Diffuse, Dispel, Disperse, Dissipate, Diverge, Resist, Scatter.
Branch	Divide	To split up a flow into parts or to classify distinct parts of a flow.	A coin sorter divides coins of different denominations according to their relative weights.	Detach, Disassemble, Disconnect, Isolate, Release, Rupture, Sort, Split, Subtract.
Branch	Extract	To draw, or forcibly pull out, the desired component of a flow.	A vacuum cleaner extracts debris from the imported mixture and exports clean air to the environment.	Draw, Expose, Obtain, Uncover.
Branch	Refine	To draw or pull out the undesired component of a flow such that only the desired elements remain.	A mesh filter refines fuel by only allowing the liquid, and particles smaller than the mesh size, to pass through it and continue circulating through a system.	Clear, Filter, Purify, Strain.
Branch	Remove	To take away a part of a material from its prefixed place.	A sander removes small pieces of the wood surface to smooth the wood.	Cut, Drill, Eat Away, Eliminate, Lathe, Polish, Sand, Waste.
Branch	Separate	To isolate a material or energy into distinct components, where the separated components are distinct from the flow before separation, as well as each other.	A glass prism separates light into different wavelength components to produce a rainbow.	Break Down, Clean, Disjoin, Isolate, Rip, Sever, Tear.

图 5 部分功能分类截图

Category	Flow	Flow Property	Definition	Example	Units		Responses
					SI	Imperial	
Energy			Any flow that is characterized by the exchange of energy.				
Energy	Acoustic		Work performed in the production and transmission of sound.				
Energy	Acoustic	Sound pressure	The local pressure deviation from the ambient pressure caused by a sound wave.	A microphone measures the acoustic pressure and converts it into a Sound Pressure Level (SPL) signal.	μPa mPa Pa dB	psf psi	High Nominal Low
Energy	Acoustic	Sound velocity	The speed at which sound waves travel through a conducting medium.	A LIDAR utilises electromagnetic velocity to calculate distance.	m/s km/h	ft/s mph	High Nominal Low
Energy	Chemical		Work resulting from the reactions by which substances are produced or converted into other substances.				
Energy	Chemical	Affinity	The force with which atoms are held together in chemical bonds.	An internal combustion engine transforms the chemical affinity of the gas into a mechanical force.	J/mol	J/mol	High Nominal Low
Energy	Chemical	Reaction rate	The speed at which chemical reactants produce products.	Special coatings on automobile panels stop the chemical reaction rate of the metal with the environment.	mol/l/s mol/m³/s	mol/gal/s mol/in³/s	High Nominal Low

图 6 部分物理量流分类截图

建议是结合工程经验选择系统组成的具体形式，同时尝试从数据的角度设置不同的接口数量。

西门子 MBSE 中确定架构的软件模块是 Simcenter Studio。Simcenter Studio 现阶段是以安装于服务器的网

页版来使用的，可实现系统组成的创建、系统接口的确定（包括数量、接口形式、传递的物理量）、架构的自动生成以及不同架构的性能评估等。

Simcenter Studio 采用了输入代码调用命令函数的方式实现上面的功能。输入代码调用函数的方式与 Matlab 类似（当然二者的功能与使用场景有本质区别，Matlab 是实现各种矩阵运算，Simcenter Studio 是实现系统架构的设计）。具体支持的语法包括 Python 与 SCS 两种。Python 使用面比较广，SCS 是 Simcenter Studio 中内置的已经编写好的命令函数。图 8 所示为两种语法的代码输入。

1.1 系统组成与指标的定义

系统组成在 Studio 中可分为系统（System）、部件（Component）、集合（Collection）与零件（Asset），代码编译时需要用到不同的头代码。系统组成分级见图 9。

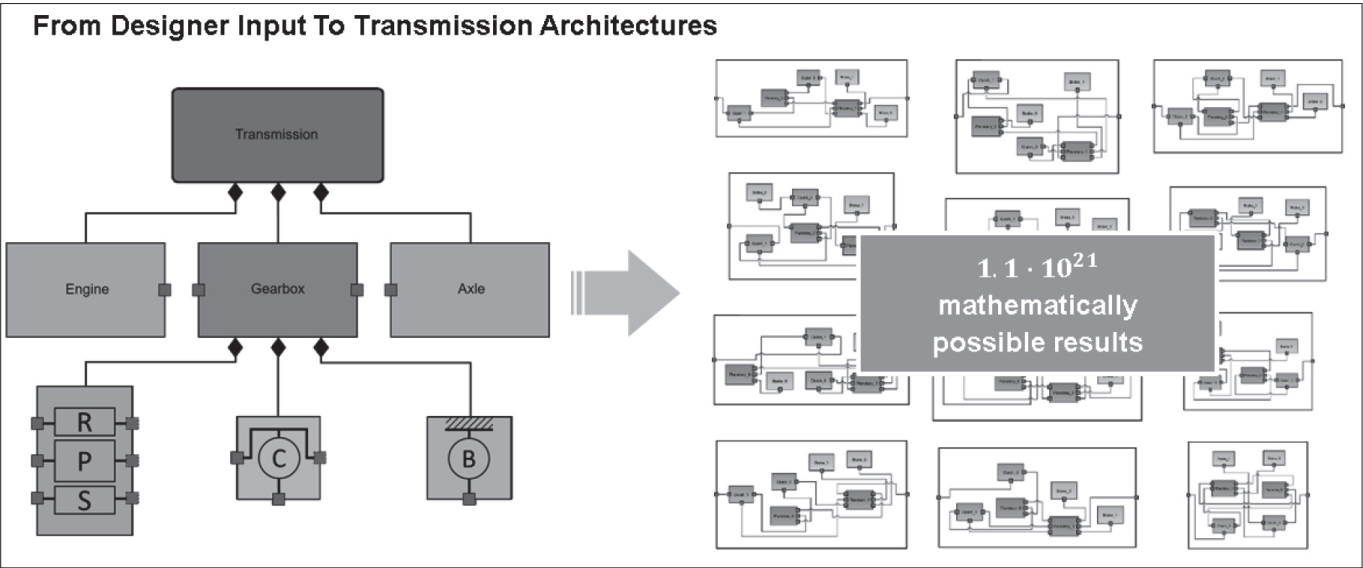


图 7 汽车传动系统可能的架构数量

Working With: SCS

This notebook gives an overview of the basic features of the SCS core language.

As is tradition, the classic hello world:

```
print "Hello World!"
```

Hello World!

But it is not even necessary to add a `print`, the result of the last expression is always shown.

```
"Hello World!"
```

Hello World!

图 8 两种语法的代码输入

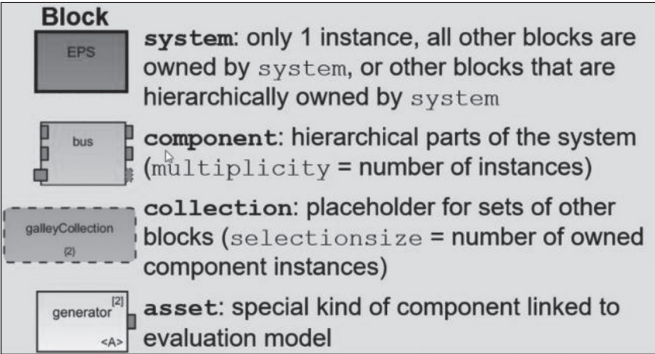


图 9 系统组成分级

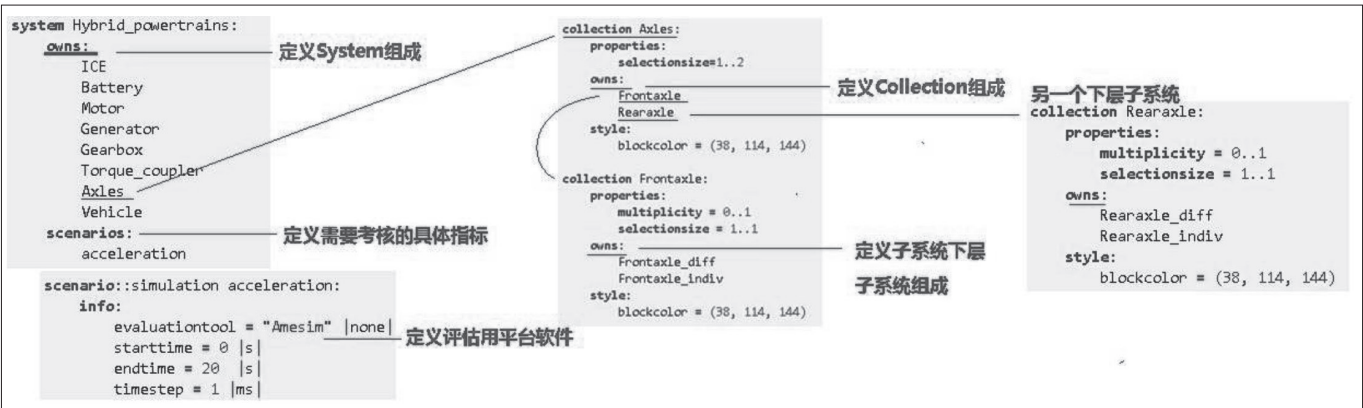


图 10 定义系统组成的代码

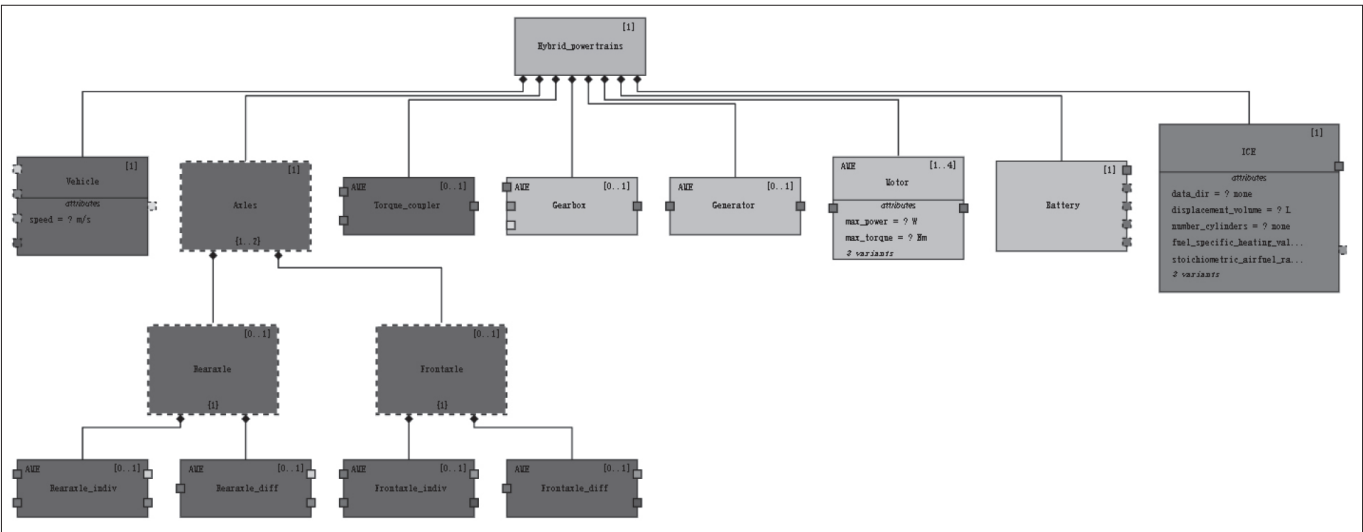


图 11 根据代码生成的系统组成

Motor、Generator、Gearbox、Torque Coupler、Axles 与 Vehicle；并且 Axles 分为前轴 Frontaxle、后轴 Rearaxle，而前、后轴又具有各自的轴系自身 Frontaxle_indiv 与 Rearaxle_indiv 与前后轴差动器 Frontaxle_diff 与 Rearaxle_diff。具体代码与生成的系统如图 10、图 11 所示。

1.2 系统组件数量、接口数量、类型与物理量定义

图 12 所示为生成不同类型与数量的接口图。接口分为只进不出 (in)、只出不进 (out) 以及通用接口 (IO) 三种，物理量则是根据功能定义时的物理量进行确定，如图 13 所示。

Studio 中可以对组件的数量进行控制，例如我们可以选择 1 个、2 个、3 个或 4 个电机对汽车进行驱动，采用 0 或者 1 个齿轮箱来构建系统。如图 13 中代码定义了扭矩输出接口在齿轮箱零件的右侧。

1.3 限制条件的设定

根据工程经验，可以设置某个接口必须与另外一个接口相连接的限制条件或者客观条件，图 14 所示就是

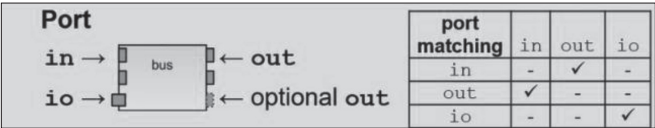


图 12 生成不同类型与数量的接口

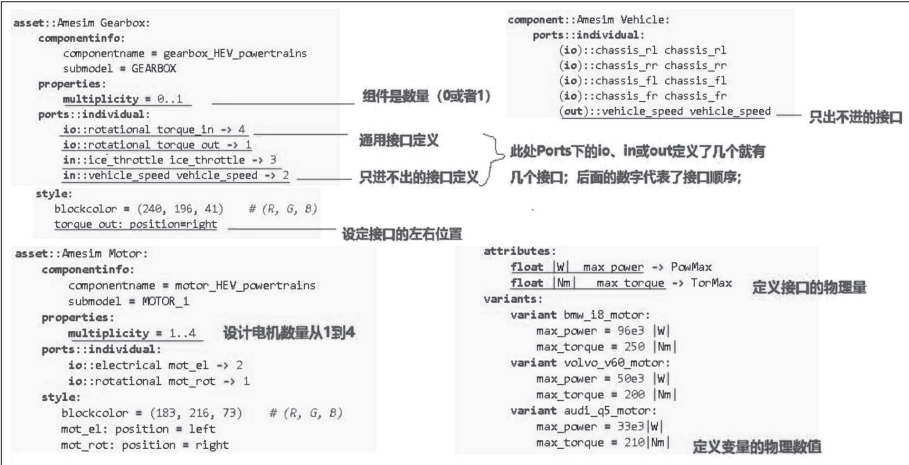


图 13 组件数量、接口数量、类型与物理量的定义



图 14 限制条件的设定

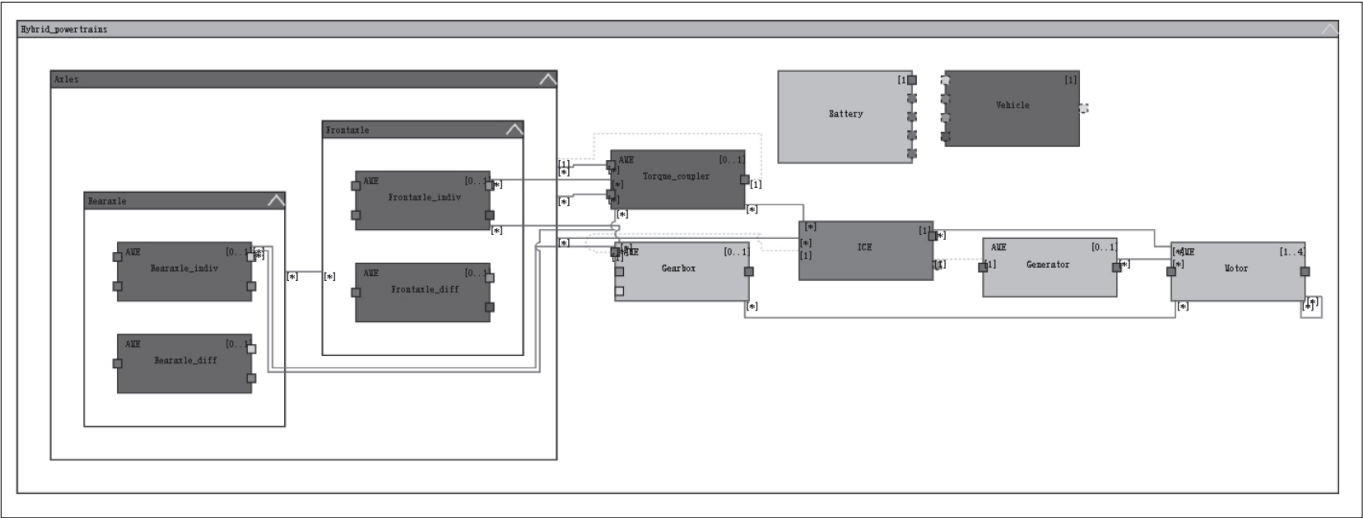


图 15 具有限制条件自动生成的架构

各个限制条件。
1.4 架构生成与计算

基于上面设置的限制条件与组成设置、接口设置要求最终可以自动生成系统架构如图 15 所示。

无限制条件下以上所建立的模型通过计算可以具有 26 个拓扑结构，按照图 16 所示的参数组合，总共有 1566 种配置；通过计算可以获得多种性能的计算结果，图 17 所示为不同架构下基于 Amesim 的计算获得各个混动汽车百公里加速时间，这是汽车动力性能评估主要的指标之一。

1.5 架构的选择

如图 18 所示，Studio 可以生成了除了百公里加速外，其他如油耗、里程等方面的计算结果，结果中包含了所有的架构、不同架构各参数分部图、各种性能的柱状统计结果，我们通过性能的选择，可以获得满足要求的系统架构。

Simcenter Studio 可以基于系统组成、接口数量与类型等生产各种可能的系统架构，Simcenter Studio 与 Amesim 联合仿真获得各个需要评估的性能参数。基于强化学习在多种系统架构中选择最优性能模型正在训练中，不久的将来基于人工智能的系统架构自动设计与选择将成为可能。

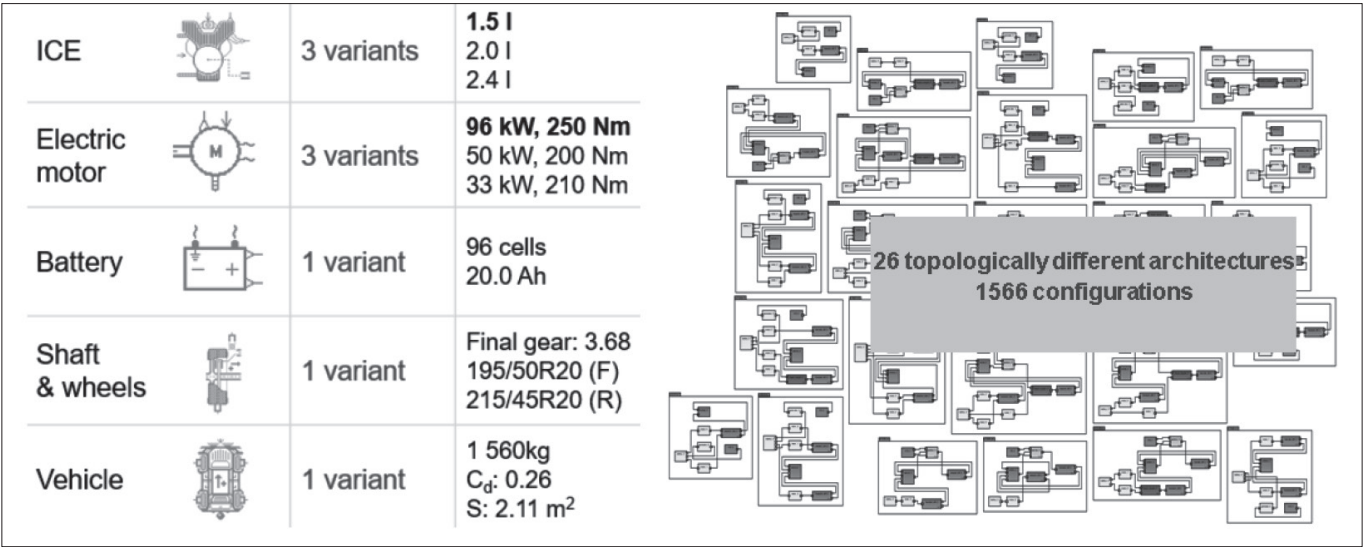


图 16 自动生成的系统架构

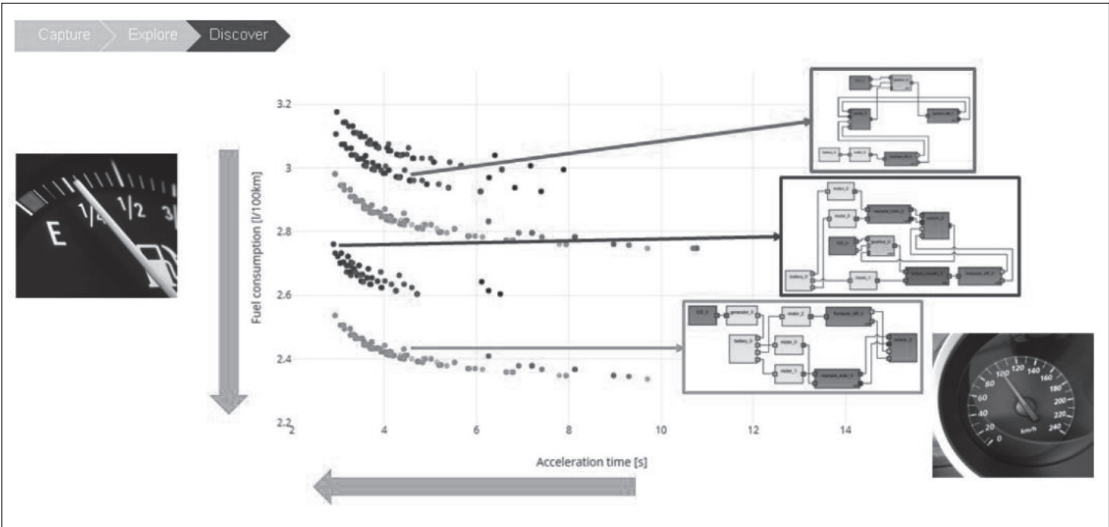


图 17 不同架构所获得的百公里加速时间结果



图 18 多属性选择

2 基于模型系统架构设计的应用案例

基于模型系统架构设计工具 Simcenter Studio，在飞机起落架设计、混动汽车、新型飞行器与动力传动系统已有相应的应用。

飞机起落架的架构设计中，基于飞机不同着陆方式，包括水平着陆、尾降着陆、侧载着陆等的转向工况的功能要求，自动生成了多种飞机起落架的架构，如图 19 所示。

混动汽车的架构设计中，设置混动车不同的动力连接接口，自动生成了多种混动汽车的架构，如图 20 所示。现在的丰田 Puris、广汽汉兰达、雷克萨斯 GS450h 与 LS600h

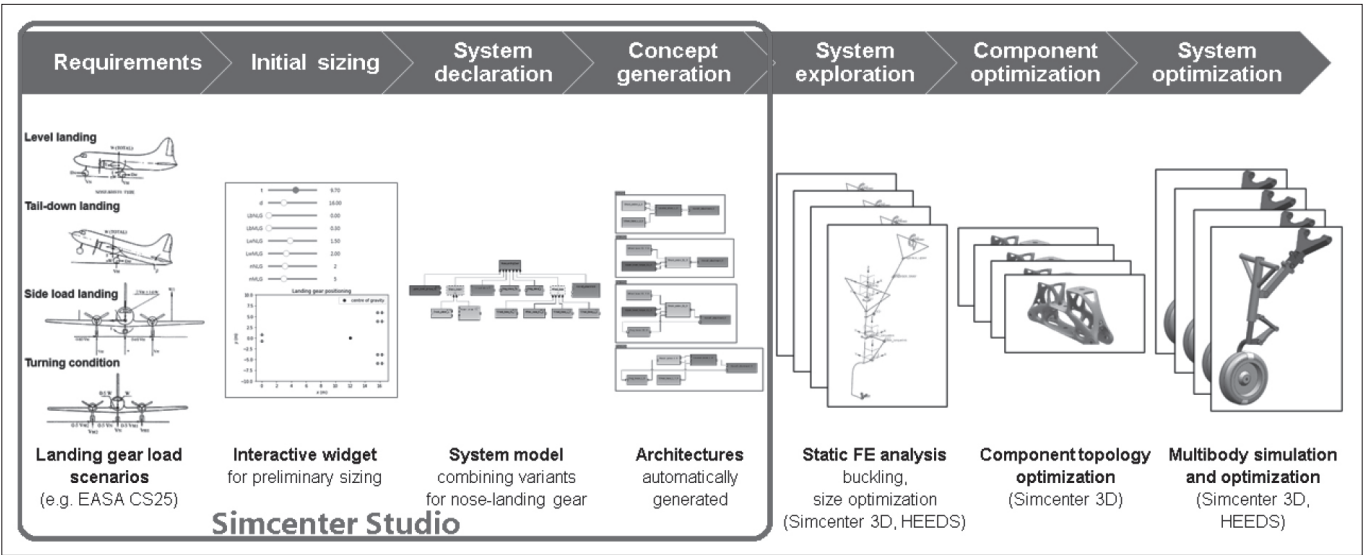


图 19 飞机起落架的架构设计与结构优化设计

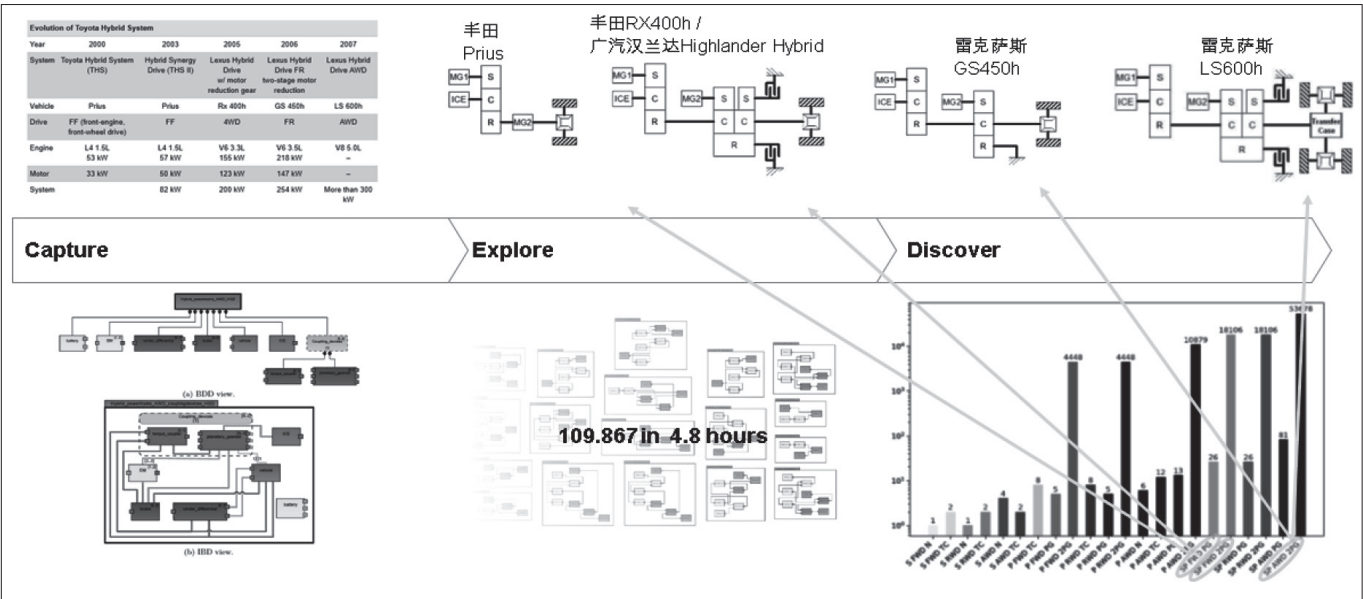


图 20 不同混动汽车架构设计

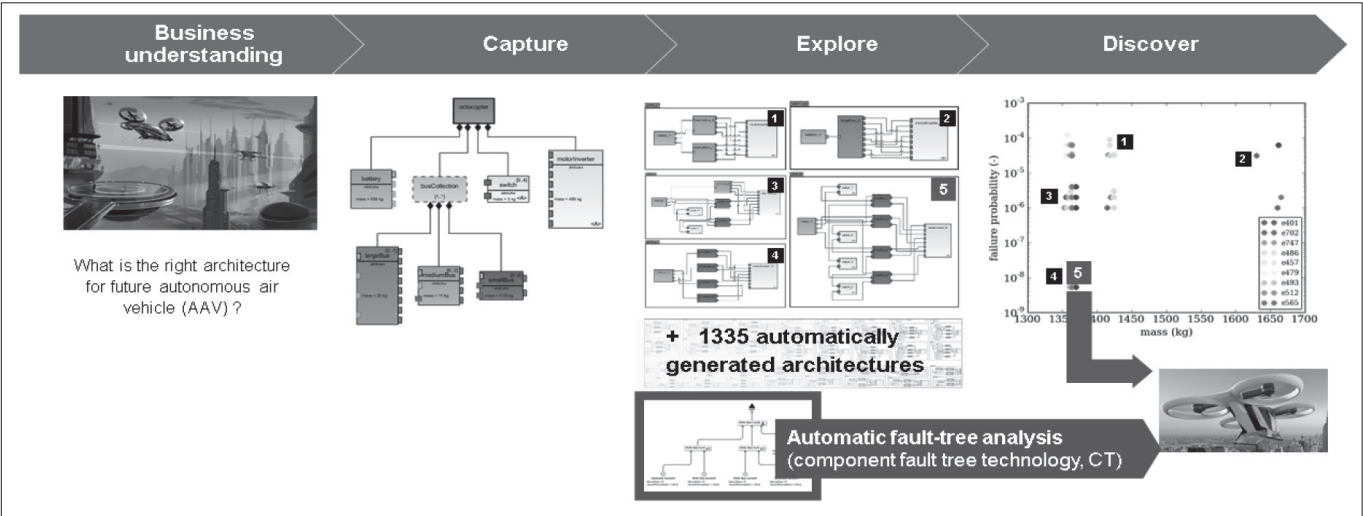


图 21 新型无人机架构设计

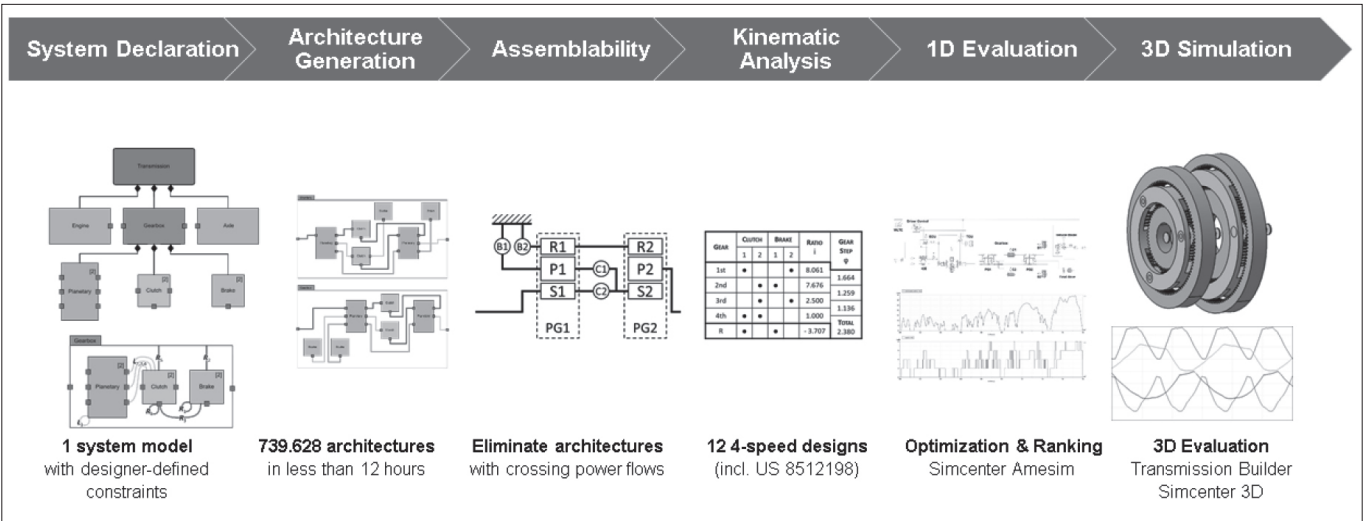


图 22 汽车变速箱的架构设计

的架构均是所生成架构中选择的其中一种架构。

另外两个例子分别是新型无人机、汽车传动系统的架构设计，均可基于模型正向获得更优秀架构形式，如图 21、图 22 所示。

3 结语

(1) 装备性能最大的影响因素是系统的架构，Simcenter Studio 是进行装备系统架构设计的工具；

(2) 系统架构设计需要遵循系统组件名称与数量定义、接口类型与数量定义、限制条件定义、架构生成等四个步骤，从而可从所生成架构中选择满足指标要求的架构；

(3) 基于 Simcenter Studio 的架构设计在飞机、汽车等领域有应用，现有混动汽车是左右架构中的一种。

参考文献：

[1] <https://simcenter-studio.automation.siemens.com>.
[2] 西门子．西门子内部技术资料，2021. 1.

作者简介：蒋爱华（1980.01-）男，汉族，四川达州人，博士，高级工程师，研究方向：装备正向研发设计方法、流激振动、转子动力学、振动信号处理等。

