



本文以汽车厂焊装车间常见的串联多轴伺服控制机器人为例,从建模要点、模块架构设计、模块的动作的类型归纳与实现来介绍机器人模块的高虚实符合度建模方法,实现仿真敏捷化,降低仿真成本,进而提升仿真精度和效率。

□ 江铃汽车股份有限公司 胡伦

焊装机器人高虚实符合度仿真模块建模方法研究

以西门子 PlantSimulation 为代表的离散系统物料流仿真软件已在国内汽车行业应用多年,随着物流仿真技术的逐渐普及,与此相关的项目的开展也越来越频繁。近年来,不管是仿真模型的开发者还是仿真项目的顾客,都希望该类型的仿真建模能变得越来越敏捷,仿真结果越来越准确可信,由此对模型开发效率与模型、现场符合度水平都有了越来越高的要求。

所以,使用软件提供的基础对象进行组合,加入程序代码打包封装成模块,通过简单的拖拽和数值设置就能够准确模拟现实设备复杂多样的工作过程的“即需即用”的高虚实符合度,高颗粒度模块建模技术应该成为仿真工程师的必备技能。

本文以汽车厂焊装车间常见的串联多轴伺服控制机器人为例,从建模要点、模块架构设计和模块的动作的类型归纳与实现来介绍机器人模块的高虚实符合度建模方法。

建模要点

模块需要具备易用性、通用性和适配性,而建立高虚实符合度的模块,相比以往的简化模块建模方法有了更多的要求,具体来说:

- 1) 模块需要有易用性,对用户友好。例如建模的对象组合越简洁越好,数据输入表,程序封装在对象的自定义用户属性表中,尽量减少使用时拖拽的次数,同时要保证参数设置的便利性。
- 2) 模块需要有泛通用性。例如能够适应现场95%的同类设备仿真建模的需要。在不能够完全满

足的情况下,需要考虑留出接口以便进行功能拓展。

3) 模块需要有强适配性,例如模块需要与其他类型的多种模块直连。

4) 模块需要有高颗粒度,高虚实符合度建模需要对现场设备进行高颗粒度模拟,即一个模块最好和对应的真实设备一模一样(在“物料流仿真”的意义之下“一模一样”,并不是指模块外观也要和真实设备一样)。该机器人模块要忠实地还原现场焊装机器人自身动作与其他设备动作的互锁规则,末端执行器切换和修磨换帽的切换条件和方式等。这些经常被低颗粒度仿真简化甚至直接忽略,这将使得仿真结果欠准确,或者会掩盖一些问题,使得仿真本应体现的效果和价值不能完全实现。

模块架构设计

模块架构设计主要分为两方面:模块基底组合架构(即对象架构)和模块行为架构(即程序架构)。

1. 对象基本架构

对象是模块的“骨骼和肌肉”,如图1所示,模块为兼容模拟六轴和七轴机器人,统一采用1个Track对象为轨道,1个或多个Transporter对象为机器人,数量等于机器人数的SingleProc对象为机器人的过程控制器的建模方式。模拟六轴时,将轨道的长度设置为比机器人多0.1m,机器人创建后并到达唯一的传感器后就不再移动。数据输入都放在Track对象中,仿真开始后由Track对象中创建的Init程序根据输入创建Transporter(长宽,图标等都根据输入自动设置和调节),并将这个

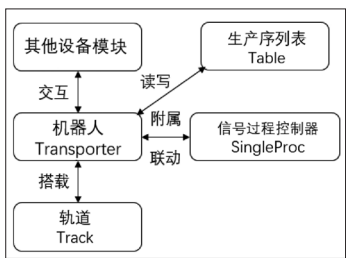


图1 模块对象基本架构

Transporter 需要的数据从 Track 拷贝至 Transporter。

模拟“一轨多机”时，根据编号将对应数据拷贝到不同机器人中，机器人“交通管制”上使用 Table 表来记录各轨道段的当前占用者，只有当前占用者为空的情况下，才允许某个机器人进入。机器人的所有非瞬时完成动作过程的耗时，都以 SingleProc 处理 MU 的方式进行模拟，以替代 Wait 语句进行过程耗时模拟，可以解决 Wait 语句在机器人 Failed 情况下仍然计时的问題，MTTR 和 Avail 数据全部记录在此 SingleProc 中。

2. 程序基本架构

程序是模块的“大脑和神经”，图2为模块程序架构示意，简化地看，模块是在对生产序列表、工作步骤表及工作任务表进行循环往复地读写、判断和执行。

在焊装车间中，生产序列发布节点一般在产线头、产线尾各有一个，有时产线中段也有节点，在节点处会输入新生产序列或从上一条产线接收生产序列或改变生产序列。机器人通过识别“生产序列表”中车型配置码决定读取哪个“工作步骤表”。模型中，线头节点输入生产序列的任务由料架模块或模拟上件工人的机器人模块负责，机器人读取上个节点的生产序列，如果其本身为节点，它需要创建本节点的生产序

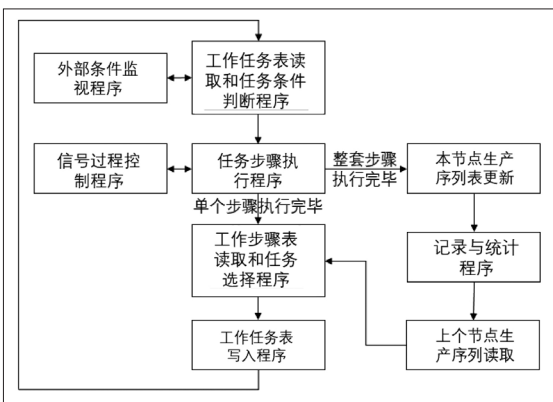


图2 模块程序基本架构

列。特别是对于合流 / 分流线体，要处理好合流 / 分流点上游和下游的生产序列表的关系。

接下来是工作步骤表和工作任务表，工作步骤表为输入表，内容是该设备的全部动作信息，面向用户输入，由用户在仿真前进行编辑，在仿真运行时是“只读”的；工作任务表为执行表，内容是正在执行或等待执行的动作信息，面向模型运行，在仿真前是一张空表，在仿真运行时是动态的。相比于只用一个表同时肩负输入和执行的方式，这种方式可以更好地保存原始的输入不会被修改，又能监控程序正在执行的动作，条理更加清晰，给予了模块更好的可扩展性。

在用户定义属性中创建 Table 作为工作步骤表，该表在模块中有固定的格式，用来输入不同型号零件对应的一整套工作步骤，包括所有可能执行的步骤分支。按照车型配置属性来创建数个本机器人的工作步骤表，分为一般、拉出和拉入步骤表。步骤表的数量要尽量少，不同车型如果步骤相同，能共用的步骤表尽量共用。

机器人识别车型配置码后，还需识别“生产序列表”中记录

的零件状态来判断读取哪个工作步骤表。零件根据拉入拉出状态可分为一般、待拉入、待拉出、已拉入及已拉出五种，根据其状态及机器人本身是否为拉入拉出点选择一般、拉出、拉入的工作步骤表，对于已经拉出的，不进行选择直接跳过该零件。当产线存在零件合并时，还需要识别各零件的状态来决定工作程序，如3个零件在本工位合并，其中1个零件因质量问题在前面的线中已拉出，那么其他2个零件到达后，就都需要执行拉出工作程序。拉出和拉入零件时，有时跟这个零件所属产品的其他零件也需要同步拉出和拉入。

在用户定义属性中创建 Table 作为工作任务表，该表在模块中有固定的格式，用来记录机器人本次执行的步骤动作的信息和下一个可能执行的步骤动作的信息。

工作步骤表读取和选择程序按照“工作步骤表”中步骤的前后关系和条件判断来选择要执行的单个或多个步骤，将其写入工作任务表中并驱动任务步骤执行程序。当一个动作执行完成后，它将从工作任务表中删除。

在工作步骤表的设计中，要考虑不是所有工作步骤结构都是步骤 1-> 步骤 2-> 步骤 3 这种简单的无分支结构，典型的复杂步骤结构如图3所示，如图3(1)，根据判断的结果将选择执行步骤 B 或步骤 C；如图3(2)，步骤 C 需要步骤 A、步骤 B 都完成才能执行，而步骤 C 完成后要执行步骤 D 和 E，D 和 E 中可以先执行 D 也可以先执行 E；如图3(3)，在步骤 A 完成后，还需要



外部条件被满足才能够进行步骤B；如图3(4)，第1个零件的工作步骤和第2个零件的工作步骤是穿插进行的。

为应对这些复杂的步骤结构，可以对单个步骤进行编号，在工作步骤表中记录

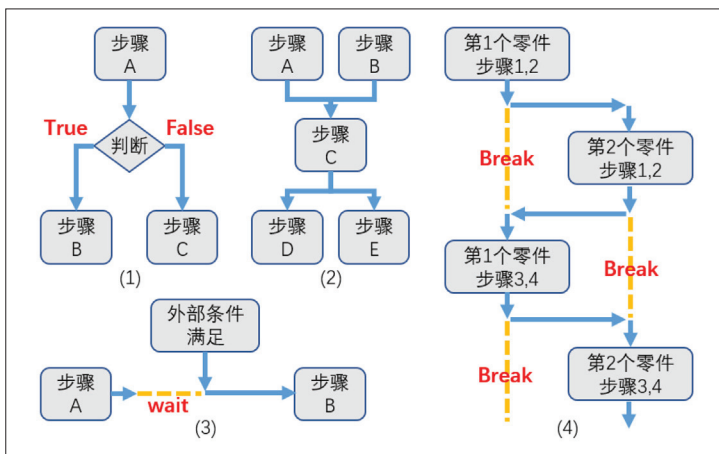


图3 复杂多样的步骤结构

这个步骤的前续步骤编号和后续步骤编号，步骤的执行需要条件时，可以设置2个参数，一个为触发该步骤所需的条件数，另一个是当前已成立的条件数，当已成立条件数 $\geq$ 触发该步骤所需条件数时，执行该步骤，反之则不执行。

注意有时某个条件是“一票否决”型的，不管前面有几个条件成立，只要这个条件不成立，则直接将已成立条件数改为“-1”。特别的，对于图3(4)这种穿插进行的步骤，穿插步骤个数固定的情况下，可在表中添加String格式的“本步骤要求”列，后续步骤写入工作任务表后如果检索到该列值为“N个步骤后执行”且 $N>0$ 时暂不执行该步骤，转而执行下一个零件步骤，每执行一个步骤，值中的“N”就减1，直到该值为0个步骤后执行时，执行该步骤。

如果穿插步骤不是固定的，则需要类似上述“成立条件数”判断方式来实现，将下个零件的穿插步骤完成后使被中断的零件步骤的执行成立条件数+1，但难点在于需要在任务表中体现两个步骤间的关联关系。

模块的动作的类型归纳与实现

一个机器人可以执行很多种操作，要对一个机器人进行高符合度的模拟，要了解其工作流程，将整个流程分解为单个动作，全面分析、归纳该设备能够进行的所有动作类型。动作执行程序应该尽量简洁，在仿真意义上性质相同的动作可以归纳为一类动作类型，为独立的动作类型进行编程。两个动作具有相似部分的，程序可以相互借用，或者相同的部分再根据需要另外进行编程。具有包含关系的动作，程序可以调用被包含的动作程序。要尽量减少程序冗余，降低模块占用容量大小，便于升级维护。有

条件的情况下，可以搜集现场各处的机器人工位的节拍分析表进行辅助分析，如图4所示。焊装车间的机器人承担的主要步骤动作归纳如图5所示。

动作类型的实现思路如下：

1) “姿态转换”动作即机器人前6轴的姿态变换，只需关注转换开始前的姿态和转换结束后的姿态。所有动作类型都可能包含本动作，“动作步骤表”中动作前后的姿态名称不同时，即视为包含本动作。当本动作被包含时，耗时应以整个动作的耗时为准。

2) “七轴移动”动作即机器人底座在水平方向上沿轨道的移动。所有动作类型都可能包含本动作，“动作步骤表”中动作前后的位置名称（即Track上的传感器编号）不同时，即视为包含本动作。当本动作被包含时，“七轴移动”耗时与整个动作的耗时重合。交通管制方式前文已述。

3) “取零件”“放零件”动作涉及与其他设备模块的交互，设备模块间要设置属性来模拟现场PLC的信号识别一个步骤动作是否能够执行，例如机器人在夹具打开后才能放零件，“夹具打开完成”即为1个“信号”，

江铃汽车股份有限公司				节拍分析表				车型代码		CX743MCA										
								工位代码		W6UB100A										
								夹具代码												
零件总成名称:				零件总成图号:																
序号	作业步骤内容说明	备注	数量	单步时间	时间		持续工作时间													
					开始	结束		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	工位节拍																			
	起移动至工位				32.0	34.0	2.0													
	点焊	expin=ole-10009	12	4.0	34.0	82.0	48.0													
	移动至取模位				82.0	84.0	2.0													
	移动至修模位				84.0	86.0	2.0													
	修模换模				0.0	16.0	16.0													
	取零件				88.0	96.0	8.0													
	取移动至Pallet上仓位				96.0	100.0	4.0													
	取点焊				0	10.0	10.0													
	取移动至摆平操作架				10.0	13.0	3.0													
	取切换摆手				13.0	33.0	20.0													
	取移动至BBOX夹具				33.0	36.0	3.0													
	抛夹具																			
	夹头关闭				30.0	32.0	2.0													
	转翻旋转30度				82.0	86.0	4.0													
	夹头打开				86.0	88.0	2.0													
	转翻切抛夹具平摆时间				96.0	97.0	1.0													
	转翻旋转30度				97.0	101.0	4.0													

图4 节拍分析表

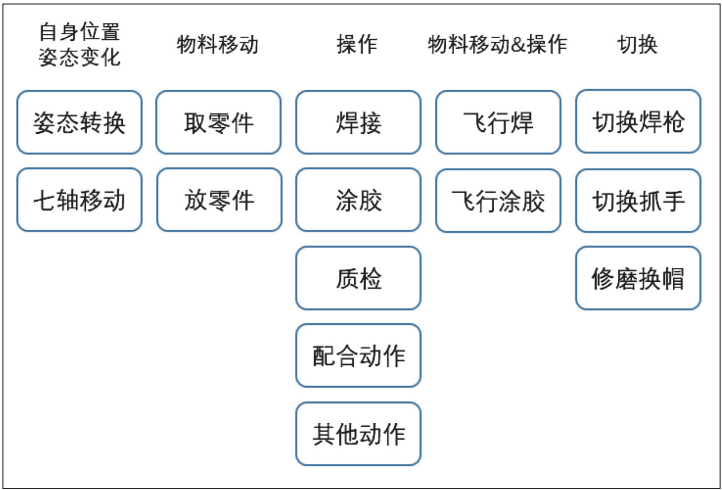


图 5 机器人动作类型归纳

当此属性由 False 变为 True 时，放零件动作满足动作执行条件，可以开始执行，同时将此属性复位。不同意义的属性间要区分开，切勿纯使用“已成立条件数”与“触发该步骤所需条件数”比较的方式，当一个工位有多台机器人共同工作时，将会出错。注意机器人的抓手可能可以同时取多个零件或放多个零件，放零件的个数不一定等于取零件的个数，且取放动作可能是穿插的关系。

4) 焊接、涂胶及质检动作是机器人与物料的交互，和取放动作一样，需要属性识别动作是否允许执行，这些动作影响物料

的状态。其中，焊接影响到焊枪上电极帽的损耗，涂胶影响胶的消耗，质检将改变零件的属性并可能影响零件路由。

5) “配合动作”是为了应对机器人的动作不能自行开始或自行结束，需要等关联其他设备的动作执行开始条件和结束条件都满足之后才能开始或结束这种情况设置，如 2 个抓握零件的机器人需要在同 1 个夹具台上组合零件，必须等 2 个机器人到达相应位置后才能同时开始摆放的情况，又如 GEO 抓手需要留在夹具台上，在焊接中机器人必须等待至焊接完成的情况，都归纳为这种动作类型。

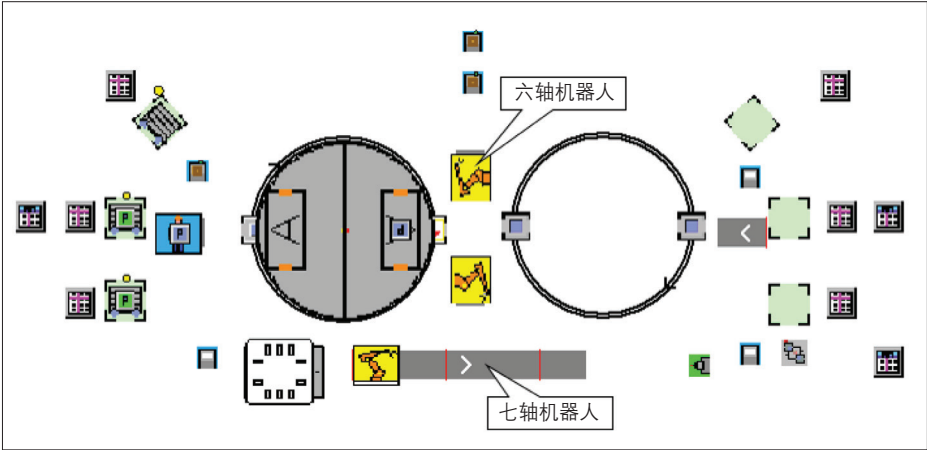


图 6 仿真模型中应用实例

6) “其他动作”是零散动作的集合，这些动作需要消耗时间，可能涉及姿态转换，如程序设定的等待或者零件的翻转动作等，都归类为其他动作。

7) 飞行焊影响固定焊枪的电极帽损耗，飞行涂胶影响固定胶枪中胶的消耗。

8) 切换焊枪、切换抓手动作即字面意思，如果机器人装载了末端执行器，那么本动作还包含机器人现有末端执行器的放回动作。

9) 修磨换帽即焊枪电极帽的工作次数 $\geq$ 设定焊接次数时，进行修磨动作，修磨次数 $\geq$ 设定修磨次数时，执行换帽动作。修磨换帽动作一般需要等机器人的一套动作完成后才会允许进行，电极帽的状态与焊枪是否在机器人上无关，这点在信息记录方式的设计上容易被忽略，需要注意。

成品实例展示

如图 6 所示，六轴、七轴机器人即是模块成品在仿真模型中应用的实例。模块搭建完成后整合入模块库，只需要从模块库中拖拽到工作界面中，设置好数据即可完成该设备的仿真建模。

结语

本文简要介绍了基于 Plant Simulation 的机器人模块高颗粒度建模方法。模块化是实现仿真敏捷化、标准化的必经之路，应用此类仿真软件的各类行业，也应该就本行业的特色去开发和发展符合自身特点和需要的模块库，降低仿真成本，提升仿真精度和效率，不断挖掘仿真的价值。AI