

文章编号: 1001-0920(2006)03-0271-05

面向虚拟装配的混杂系统建模和控制器设计

程 曙¹, 张 浩²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092; 2 上海电力学院 电力系统与自动化工程学院, 上海 200090)

摘 要: 针对装配的动态过程显著地表现出连续与离散共存的混杂特性, 研究了面向虚拟装配的混杂系统建模以及控制器设计方法. 提出了混杂基本结构对应于单个装配对象的建模方法, 有效地避免了由于装配零部件过多给模型造成的复杂性. 并在此基础上, 运用最小干预安全控制器对装配过程中的不合法结构实施控制. 最后以某汽车底盘总装中两个装配对象为例, 给出了具体的动态描述及其建模和控制器设计, 证明了该方法的可行性和有效性.

关键词: 混杂系统; 虚拟装配; 建模; 最小干预安全控制器

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Modeling and Controller Design of Hybrid Systems Oriented to Virtual Assembly

CHEN G Shu¹, ZHANG H ao²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China. Correspondent: CHEN G Shu, Email: scheng@mail.tongji.edu.cn)

Abstract: Considering the hybrid nature of assembly dynamic process where continuity and discreteness coexist, the problems of modeling and controller design of hybrid system oriented to virtual assembly are researched. Modeling method corresponding hybrid elementary structure to each assembly object is proposed. The complexity of model caused by the plurality of assembly components can be effectively avoided. Based on that minimally interventive legal controller is designed to exert control over the illegal configurations in the assembly process. All possible assembly paths can be minimally constrained. Finally, the feasibility and efficacy of the model and control algorithms are illustrated via an example of two assembly objects in car final assembly.

Key words: Hybrid system; Virtual assembly; Modeling; Minimally interventive legal controller

1 引 言

虚拟装配是虚拟制造的关键技术之一, 是指在数字空间中设计各种算法对零部件装配过程进行详细的模拟, 采用三维可视化的工具进行装配可行性、装配顺序和干涉的分析, 从而避免制造过程中装配方面存在的潜在问题和风险, 有效地提高产品响应市场变化的能力. 由于装配过程本身所具有的高度复杂性, 致使其发展相对薄弱. 已有的很多面向装配的建模方法^[1-4]大多着眼于不同的装配指令, 尤其表现在关注零部件的几何形状和特征描述, 很少从

装配对象的动态特征视角建立模型. 而研究这种基于对象动态特征描述的虚拟制造问题, 将随着自动化生产流水线的发展变得越来越重要.

装配的动态过程显著地表现出混杂特性, 如时间上连续的装配操作, 带有圆盘传送带的控制以及碰撞的发生等离散事件并存, 所以单纯采用连续变量动态系统 (CVDS) 或离散事件动态系统 (DEDS) 的方法, 均不能全面反映系统的特性, 必须采用连续子系统与离散子系统共同存在且相互作用的一类动态系统, 即混杂系统 (Hybrid system) 的理论和方法

收稿日期: 2005-01-24; 修回日期: 2005-05-24

基金项目: 中德政府合作项目 (2002DFG00027).

作者简介: 程曙 (1967—), 女, 上海人, 高级工程师, 博士生, 从事混杂系统理论及其在虚拟制造中应用的研究;
张浩 (1962—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与工程、CMS 等研究

进行分析和解决 本文运用混杂系统理论,研究运用于虚拟装配的建模方法和控制器设计.

2 面向虚拟装配的混杂系统建模

2.1 装配问题描述

装配操作涉及零部件、各类工具、固定装置、操作人员等对象 要产生蜂窝型(Hierarchical)的装配树,首先要对CAD中的设计对象进行编码;然后总是归结为对零件(Parts)和操作人员(Handlers)两个不同对象组合之间进行不同装配指令的操作,最终完成产品装配过程 其中零件是耗损单元,而操作者是工作单元 装配操作在零件与零件、零件与操作人员以及操作人员与操作人员之间进行^[2].

上述两个对象之间的装配问题可分解为以下3个方面:首先设计装配零部件的所有可能动态路径,包括各个装配对象详细的速度大小和方向;然后分析碰撞、距离、内部结构、剖面切割(Section cuts)等问题;最后比较各种解决方案,根据具体的性能指标选择一条最优装配路径

目前,先进的汽车装配流水线采用模块化装配方式 首先将可以放置的模块放在一起;然后连接各模块 如机器人首先将多个部件(如发动机、变速箱)吊运到传送带上有效的准确位置;然后用汽动枪等工具连接变速箱和发动机螺栓

2.2 混杂系统建模

混杂系统内含连续和离散动态,如何描述系统以及如何应用于实际过程已成为混杂系统研究中最困难、最富创造性的活动 混杂系统目前没有统一的建模方法^[5],基于不同背景所提出的模型方法一般都带有一定的领域特征^[6].由上述装配问题的描述可以看出,装配的基本单位是一个具有混杂动态特征的操作对象 本文将这个基本单位对应于一个类似层次结构模型的混杂基本结构,即由离散事件驱动、连续时间驱动以及两者的接口转换3部分组成,如图1所示 图中: d 表示离散状态的有限子集; $x_d(t)$ 表示 d 处的状态变量; $\Sigma_i(G)$, Σ_i 和 Σ_o 分别表示内部离散事件输入(由连续状态迁移结果决定),外部离散事件输入和外部离散事件输出的有限集合; $u_d(t)$, $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示连续系统的内、外部

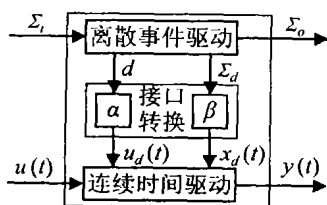


图1 混杂基本结构

输入和输出向量

混杂基本结构的数学模型定义如下:

$$EHS = (D, \Sigma, C, (d_0, x_0)). \quad (1)$$

式中: D 为离散状态的有限集合, $d \in D$; Σ 为动态离散事件,从状态 d 到 d 的动态性可表示为

$$d \xrightarrow{\Sigma_i} d, \Sigma_i \xrightarrow{\Sigma_d} \Sigma_o; \quad (2)$$

C 为连续动态系统,在状态 d 处的动态性可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), u_d(t)), \\ y(t) &= h(x(t), u(t), u_d(t)); \end{aligned} \quad (3)$$

α 和 β 分别为离散空间到连续空间、连续空间到离散空间的映射; d_0 和 x_0 分别为离散、连续系统的初始值

容易看出,当没有 C 和 x_0 时,混杂基本结构变成单纯的离散事件系统

$$EHS = (D, \Sigma, d_0); \quad (4)$$

当没有 D , Σ 和 d_0 时,则变成如下单纯的连续动态系统(下文省略时间 t):

$$EHS = (C, x_0) = (x, y, u, f, h, x_0), \quad (5)$$

即操作对象若为单纯的离散、连续动态,则是上述混杂基本结构的特殊形式

不同的混杂基本结构根据对应的配合关系生成装配顺序,实现产品的装配过程 面向装配的混杂系统可看作由若干个通过公共变量及其信息传输产生的混杂基本结构的合成,即

$$HS = EHS_1 \ EHS_2 \ \dots \ EHS_n. \quad (6)$$

这种建模方法不会随着系统规模的增长(如装配对象数的增长)呈现“爆炸”现象,而且混杂合成主要关注两两对象按照一定顺序不断推进,有效地避免了装配零部件过多给模型造成的复杂性

3 控制器设计

普通混杂系统由于集成了连续动态和离散逻辑两类变量,在控制问题上表现出复杂的本质特征,其可控性是NP-hard的^[7].本文则主要参考文献[8]提出的M LC(最小干预安全控制器,本文对其作了适当改进,以更适应于装配)对虚拟装配中预先定义的不合法结构(如两个装配对象动态操作过程中的碰撞结构)仅仅从安全性方面实施控制 并将M LC看作是与上述装配混杂系统并行运行的一个混杂基本结构,所实施的控制与其中的外部输入事件一致

定义1(最小干预) 若一种合法控制器比其他任何合法控制器对系统实施更少的干预,则称为最小干预

定义2(最小干预安全控制器) 只有当系统进入不合法结构时,M LC才起作用,其余情况下则保

持系统自身的动态性, 控制仅确保系统的安全性, 并满足以下两个条件:

- 1) 与其他任何控制器(如活性、稳定性等, 不论合法与否) 结合, 确保合成的控制器是合法的;
- 2) 与其他任何合法控制器合成, MLC 的存在与否对系统状态迁移没有影响

假设 1 系统进入不合法结构的逻辑变量数没有改变

假设 2 所有谓词 G 成为包含边界的闭区间

从上述系统建模过程不难看出, 系统状态迁移可分成两类: 一类是由不可控的连续动态演化(相当于谓词变真) 引起的迁移, 称为动态迁移(Dynamic transition); 另一类是由可控的外部输入事件产生的迁移, 称为事件迁移(Event transition). MLC 只对动态迁移可能产生的不合法结构实施控制. 若系统在某一离散状态(结构) d 处存在可以使系统进入合法结构的事件迁移, 则 MLC 不起作用. 若系统在 d 处同时存在多个动态迁移(同时有多个谓词变真), 则需为可以使系统进入合法结构的谓词赋予一个优先权

MLC 的基本思想是, 通过叠代将目前(合法)结构 d 将引起的不合法结构 d 的不变集(Invariants) I_d , 不断分解成可以进入合法子结构的不变集 I_{d_1} 和不合法子结构的不变集 I_{d_2} , 直到所有的动态迁移都合法为止. 同时动态迁移 $d \xrightarrow{G} d'$ 必须满足下列条件, 即不合法结构的到达时间必须大于原来合法结构的更改时间:

$$Q \Leftrightarrow \text{con}(d \xrightarrow{G} d') \Leftrightarrow T_{\min}(\text{true}(G)) > T_{\max}(\text{false}(I_d)), \quad (7)$$

由假设 2, 式中 G 由起作用的边界值替代. 则分解后的不变集为

$$I_{d_1} = I_d \cap Q, I_{d_2} = I_d \cap \neg Q. \quad (8)$$

叠代完成后的系统结构对于所有可能的动态迁移都是合法的, 或至少存在一种可以执行的合法

事件迁移. 其中控制器和装配系统的交互仅限于系统安全性违背时的特定状态, 最大限度地保持了系统自身的动态性, 为自动化装配流水线的设计提供了尽可能大的灵活性和变化空间

4 实例分析

以某汽车总装车间机器人将发动机吊运到传送带上准确位置为例, 说明上述混杂系统建模和控制器设计方法. 其中可控的传送带为装配对象 A, 发动机为装配对象 B. 装配过程的状态演变(对应于装配路径) 用两个装配对象之间不同动态组合所形成的不同结构表示

4.1 动态描述

混杂系统中两个装配对象 A 和 B(两个混杂基本结构) 并行运行, 对象 A 的动态性如图 2 所示. 它有 3 种状态: 启动、向前、合适. forward 为(外部) 离散事件输入, 表示使对象 A 从启动转化为向前. 只要满足向前且 $y_A \geq 20$, A 就保持在向前状态; 但当 $y_A \geq 20$ 时, A 从向前转化为合适; 当 $y_A \geq 30$ 时, A 又回到状态启动 ($x_A = 0$); 当启动状态变真时, 在没有外界输入的情况下永远保持这种状态不变. 对象 A 的初始状态为启动.

对象 B 的动态性如图 3 所示, 也具有 3 种状态: 远、近、在. 其速度不是一个定值. 当 $y_B = 0$ 时, B 又回到状态远 ($x_B = -150$). 对象 B 的初始状态为远.

可以看出, 对象 A 和 B 组成的混杂系统共有 9 种结构, 可表示如下:

- $d_1 =$ 启动远, $d_2 =$ 启动近,
- $d_3 =$ 启动在, $d_4 =$ 向前远,
- $d_5 =$ 向前近, $d_6 =$ 向前在,
- $d_7 =$ 合适远, $d_8 =$ 合适近,
- $d_9 =$ 合适在.

系统中不同结构的动态转换形成了上述两个装配对象之间所有可能的装配路径设计, 见图 4

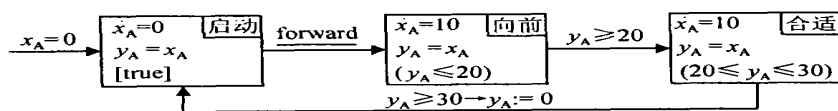


图 2 对象 A 的动态性

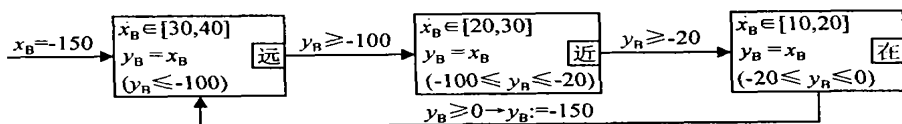


图 3 对象 B 的动态性

表1 前两次叠代的详细结果(MLC控制结果)

	初始值	第1次叠代	第2次叠代
d_1	$[y_B - 100]$	$[y_B - 100]$	$[y_B - 100]$
d_2	$[- 100 \ y_B - 20]$	$[- 100 \ y_B - 20]$	$[- 100 \ y_B < - 50]$
d_4	$[y_A \ 20] \ y_B \ [- 100]$	$[y_A \ 20] \ y_B \ [- 100]$	$[y_A \ 20] \ y_B \ [- 100]$
d_5	$[y_A \ 20] \ [- 100 \ y_B - 20]$	$[y_A \ 20] \ [- 100 \ y_B < 3y_A - 110]$	$[y_A \ 20] \ [- 100 \ y_B \ 3y_A - 110]$
d_7	$[20 \ y_A \ 30] \ [y_B - 100]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [y_B - 100]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [y_B - 100]$
d_8	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 100 \ y_B - 20]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 100 \ y_B - 20]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 100 \ y_B - 20]$
d_9	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 20 \ y_B \ 0]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 20 \ y_B \ 0]$	$[20 \ y_A \ 30] \ [- 20 \ y_B \ 0]$

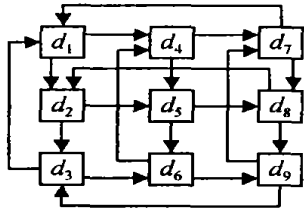


图4 装配路径设计

4.2 混杂控制

对象B处于状态在时,A处于启动或向前是不合法的,即 d_3 和 d_6 是不合法构。第1次叠代对 d_2 没有影响,因为存在合法的事件迁移,只对 d_5 进行分解叠代

$$Q \Leftrightarrow \text{con}(d_5 \xrightarrow{y_B = -20} d_6) \Leftrightarrow T_{\min}(\text{true}([y_B = -20])) > T_{\max}(\text{false}([y_A \ 20] [-100 \ y_B - 20])) \Leftrightarrow -\frac{y_B + 20}{30} > \frac{30 - y_A}{10} \Leftrightarrow y_B < 3y_A - 110; \tag{9}$$

$$I_{d_{51}} = I_{d_5} \quad Q = [y_A \ 20] \ [- 100 \ y_B < 3y_A - 110];$$

$$I_{d_{52}} = I_{d_5} \quad \neg Q = [y_A \ 20] \ [3y_A - 110 < y_B - 20] \tag{10}$$

第2次叠代对 d_5 没有改变,但影响了 d_2

$$I_{d_{21}} = [- 100 \ y_B < - 50],$$

$$I_{d_{22}} = [- 50 \ y_B < - 20] \tag{11}$$

前两次叠代的详细结果如表1所示。装配系统的初始状态可以是任何一种合法结构,表中“初始值”列包含了两个装配对象动态组合过程中所有可能的初始合法结构。根据图4,若目前的合法结构(如 d_2 和 d_5)可能经过动态迁移进入不合法结构,而此时又不存在合法的事件迁移,则MLC发挥作用,即根据是否满足条件 Q 将目前该合法结构不变集分为两部分,从而将这一结构“分解”。如第1次叠代将 I_{d_5} 分解成合法子结构不变集 $I_{d_{51}}$ 和不合法子结构不

变集 $I_{d_{52}}$,MLC就按照 $I_{d_{51}}$ 在边界条件处实施控制。重复这样的过程,直到不可能再产生不合法的结构。经过这些结构“分解”,使表中所有结构或子结构都是合法的。最近的MLC控制如图5所示。从图5可以看出,除了从 d_2 到 d_5 要施加控制(表示机器人吊运的发动机离开传送带50长度单位时,MLC就要控制传送带从启动变为向前状态)外,系统保持原动态性不变,体现了MLC最小干预的特点。

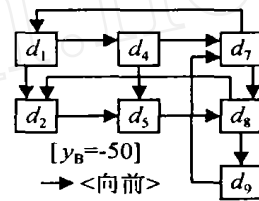


图5 装配路径控制

综上所述,MLC是不连续工作的,仅受装配过程中将产生不合法结构的动态迁移“触发”,即只有在系统不合法结构的动态迁移不可避免(到达边界条件)时才起作用,其余情况下保持系统自身的状态演化不变,从而使虚拟装配系统中两个装配对象之间可能的装配路径设计得到最小的干涉和约束,给嵌入在装配系统中的其他控制器设计提供最大的柔性,同时使合成的控制器不再需要重新检验是否满足系统安全性要求。

5 结 语

本文基于装配过程中连续和离散并存的混杂特性,提出面向单个装配操作单元的混杂基本结构的混杂系统建模方法。该方法可以有效地避免装配零部件过多给模型带来的复杂性。在此基础上研究了最小干预安全控制器设计,对装配系统不可避免要进入预先规定的不合法结构的动态迁移实施控制,其余状态下则保持系统自身的动态性不变,使可能存在的装配路径得到最小的干涉和约束,从而为虚拟装配系统中自动化装配流水线的设计提供了最大限度的灵活性和变化空间。最后以汽车底盘总装中两个操作对象为例,验证了该建模方法和控制器设

计的可行性和有效性 由于混杂系统着眼于连续和离散并存框架下的研究, 将其应用于数字化复杂制造系统领域是一个很有意义的学科前沿问题

参考文献(References)

- [1] Jayaram U, Kim Yougjun, Jayram S, et al Reorganizing CAD Assembly Models (as-designed) for Manufacturing Simulations and Planning (as-built) [J]. *Trans of the ASME J of Computing and Information Science in Engineering*, 2004, 4(2): 98-108
- [2] Mok SM, Wu CH, Lee D T. Modeling Automatic Assembly and Disassembly Operations for Virtual Manufacturing [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics, Part A*, 2001, 31(3): 223-232
- [3] 沈梅, 何小朝, 张铁昌 基于装配特征的装配建模[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(9): 1025-1029
(Shen M, He X Z, Zhang T C. Assembly Modeling Based on Assembly Feature [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(9): 1025-1029.)
- [4] Ahmadi R H, Kouvelis P. Design of Electronic Assembly

Lines: An Analytical Framework and Its Application [J]. *European J of Operational Research*, 1999, 115(1): 113-137.

- [5] 郑刚, 谭民, 宋永华 混杂系统的研究进展[J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 7-11
(Zheng G, Tan M, Song Y H. Research on Hybrid Systems: A Survey [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 7-11.)
- [6] 吴锋, 刘文煌, 郑应平 混杂系统研究综述[J]. *系统工程*, 1997, 15(2): 1-5
(Wu F, Liu W H, Zheng Y P. An Overview on Hybrid System Research [J]. *Systems Engineering*, 1997, 15(2): 1-5.)
- [7] Blondel V D, Tsitsiklis J N. Complexity of Stability and Controllability of Elementary Hybrid Systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 479-489
- [8] Heymann M, Lin F, Meyer G. Synthesis and Viability of Minimally Interventive Legal Controllers for Hybrid Systems [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1998, 8(2): 105-135

(上接第 270 页)

5 结 语

企业危机等级判别具有不确定性, 属于模糊识别问题 为了有效辨别危机状态, 本文建立了模糊环境下的目标判别函数, 提出了求解不同危机等级的最优模糊聚类中心、最优模糊识别矩阵和最优指标权重的算法 研究分析表明, 运用模糊识别与聚类的方法可以有效、准确地判别企业危机 但是, 任何方法都有它的局限性, 影响模型精度的因素可能来源于样本选取、特征指标确定、权重分布和隶属度判断等几个方面

参考文献(References)

- [1] Xu B, Fang C, Watson M D. Clustering Analysis for Cotton Trash Classification [J]. *Textile Research J*, 1999, 69(2): 656-662
- [2] Huang C C, Chen I C. Neural-fuzzy Classification for Fabric Defects [J]. *Textile Research J*, 2001, 71(3): 220-224
- [3] Jeffrey K C, Shih C Y. Automatic Recognition of Fabric Weave Patterns by a Fuzzy C-Means Clustering Method [J]. *Textile Research J*, 2004, 74(2): 107-111
- [4] Derrig Richard A. Fuzzy Techniques of Pattern Recognition in Risk and Claim Classification [J]. *The J of Risk and Insurance*, 1995, 62(9): 447-482
- [5] 胡一朗 模糊模式识别法在金融危机预警中的应用[J].

锦州师范学院学报, 2000, 21(4): 50-53

- (Hu Y L. The Application of Fuzzy Recognition Model for the Early Warning of the Financial Crisis [J]. *J of Jinzhou Teachers College*, 2000, 21(4): 50-53.)
- [6] 刘耀年, 伏祥运, 张文生 基于模糊识别与模糊聚类理论的短期负荷预测[J]. *电工技术学报*, 2002, 17(5): 84-87.
(Liu Y N, Fu X Y, Zhang W S. Short Term Load Forecasting Method Based on Fuzzy Pattern Recognition and Fuzzy Cluster Theory [J]. *J of Electrician Technology*, 2002, 17(5): 84-87.)
- [7] 翁少群, 张红 基于模糊模式识别理论的中国房地产市场发展阶段判别研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(5): 96-100
(Weng S Q, Zhang H. A Study of Determination For the Development Stage of China Real Estate Market Based on the Fuzzy Recognition Theory [J]. *J of Building Engineer*, 2004, 37(5): 96-100.)
- [8] Benzing Cynthia Using Discriminant Analysis to Predict Financial Distress [J]. *Int Advances in Economics Research*, 2000, 6(3): 591-593
- [9] 陈守煜. *工程模糊集理论与应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998
(Cheng S Y. *Engineer Fuzzy Set Theory and Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.)