

8-19-2021

Hybrid System Simulation Method Based on Quantized State

Zhihua Li

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

Jiang De

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

Hanwu Shen

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

Zhihua Fan

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Hybrid System Simulation Method Based on Quantized State

Abstract

Abstract: Hybrid system simulation and discontinuity processing have always been the difficulties of the time-discretized integration methods, while Quantized State System (QSS) is a new numerical integration method based on state variable discretization. Aiming at the hybrid systems simulation, *a method of QSS+DEVS is proposed. The discrete part of hybrid system is represented as DEVS model, and the continuous part of hybrid system is discretized by QSS, which can also be represented as DEVS model. The simulation model of the whole hybrid system is obtained by coupling the two DEVS models.* The accuracy, efficiency and simplicity of the QSS+DEVS method are verified by the simulation results of two example systems, which provides a new approach for hybrid system simulation.

Keywords

quantized state system, DEVS, hybrid system, simulation, event detection

Recommended Citation

Li Zhihua, Jiang De, Shen Hanwu, Fan Zhihua. Hybrid System Simulation Method Based on Quantized State[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1775-1783.

基于量化状态的混合系统仿真方法

李志华, 江德, 沈汉武, 樊志华

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 混合系统仿真和不连续性处理一直是基于时间离散的积分方法所面临的难题, 而量化状态系统(Quantized State System, QSS)方法是一种新的基于状态变量离散的数值积分方法。针对混合系统仿真问题, 提出一种 QSS+DEVS(Discrete Event System Specification)求解方法。混合系统的离散部分以 DEVS 模型来表示, 采用 QSS 实现混合系统的连续部分离散化, 同样用 DEVS 模型表示, 以两个 DEVS 模型的耦合作为整个混合系统的仿真模型。通过对两个实例系统的仿真求解, 验证了 QSS+DEVS 方法的精确性、高效性和简便性, 为混合系统仿真提供了一条新的途径。

关键词: 量化状态系统; 离散事件系统规范; 混合系统; 仿真; 事件检测

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2021)08-1775-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0309

Hybrid System Simulation Method Based on Quantized State

Li Zhihua, Jiang De, Shen Hanwu, Fan Zhihua

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Hybrid system simulation and discontinuity processing have always been the difficulties of the time-discretized integration methods, while Quantized State System (QSS) is a new numerical integration method based on state variable discretization. Aiming at the hybrid systems simulation, a method of QSS+DEVS is proposed. The discrete part of hybrid system is represented as DEVS model, and the continuous part of hybrid system is discretized by QSS, which can also be represented as DEVS model. The simulation model of the whole hybrid system is obtained by coupling the two DEVS models. The accuracy, efficiency and simplicity of the QSS+DEVS method are verified by the simulation results of two example systems, which provides a new approach for hybrid system simulation.

Keywords: quantized state system; DEVS; hybrid system; simulation; event detection

引言

一般来说, 混合系统是连续时间系统与离散事件系统两者之间相互作用组合而成的一类复杂的系统, 广泛存在于工程技术领域中^[1]。混合系统的高效精确求解是建模仿真、数值计算、高性能计算等领域的重要研究方向之一。长期以来, 其仿真方法几乎都是基于时间离散的数值积分方法^[2-3], 如 Euler 法、Runge-Kutta 法、Gear 法和 Rosenbrock

方法等, 它们对时间离散, 将连续系统转化为离散时间系统, 在各时间点求得状态变量的值, 从而推进积分计算。其中, Euler 法最简单, 精度最低; Runge-Kutta 法最常用的是 ODE45 显式算法, 精度较高; Gear 法是多步法, ODE15s 是其代表, 其优点是计算格式简单, 每步计算量相对较小, 同时具备较高的求解精度, 但是相比于显式算法, 仍有较大的计算量; ODE23s 属于 Rosenbrock 方法, 其求解过程与 ODE15s 类似。这些传统方法在求解混合

收稿日期: 2020-06-05 修回日期: 2020-08-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1301300); 浙江省自然科学基金(LY18E050008, LY19E050013)

第一作者: 李志华(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向为多领域建模与仿真优化、CAD/CAE。E-mail: D98LZH@263.net

系统时会出现以下问题^[4]: ①步长选择困难; ②仿真效率低; ③算法收敛性差。

针对传统时间离散积分方法在仿真求解过程中所存在的问题, Zeigler 等^[5]研究出一种新的系统模型仿真求解方法——量化状态系统(Quantized State System, QSS)方法。不同于传统的时间离散, 该方法通过对系统的状态变量实施量化, 并逐步求解计算下一步变化所需时间, 连续变化的过程被近似为有限次数的状态跃迁, 每一次跃迁构成一个“事件”, 是典型的事件驱动积分。Kofman 等^[6]根据这一思想, 采用具有迟滞效果的离散化函数, 实现了该方法。国外学者后来又陆续提出了 QSS2 和 QSS3, 以及 LIQSS 系列算法, 这些算法被运用于各个工程领域, 且已经获得了不错的效果^[7-9]。目前, 国内学者研究较少, 只有李帛洋等^[10-13]将 QSS 方法应用在电力电子系统的仿真求解中。

本文阐述了离散事件系统规范(Discrete Event System Specification, DEVS)的基本表示形式和 QSS 方法, 揭示了 QSS 方法用 DEVS 表达的机理, 针对混合系统在仿真过程中所存在的问题, 提出一种 QSS+DEVS 的求解方法。

1 DEVS 规范

DEVS 规范是针对系统离散行为的系统化、规范化的描述。因此, DEVS 可以用来构造离散事件系统的仿真模型。此外, 除了离散事件系统, DEVS 还可用于连续状态系统以及离散连续二者结合的混合系统。DEVS 模型一般分为 2 种: 原子模型与耦合模型。其中, 多个原子模型相互连接构成耦合模型。

一般地, 原子模型可通过一个六元组来表示:

$$AtomicDEVS = \langle S, X, Y, \delta, \lambda, ta \rangle$$

式中: S 为状态变量的集合; X 与 Y 分别为输入事件集合与输出事件集合; δ 为由 δ_{int} 和 δ_{ext} 两个部分组成, 其中, $\delta_{int}: S \rightarrow S$, 表示模型内部转移函数; $\delta_{ext}: Q \cdot X \rightarrow S$, 表示模型外部转移函数, $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ 表示该模型在 s 状态

下已经流逝了 e 时间, 这时若有一个外部事件 $x \in X$ 到达, 则此时该模型的外部状态转移函数可以表示为 $\delta_{ext}(s, e, x)$; $\lambda(s)$ 为系统的输出函数, $S \rightarrow Y$; $ta(s)$ 为时间推进函数, $S \rightarrow R_0^+$ 。

上述 *AtomicDEVS* 中简单描述了离散事件系统的表达形式, 在 DEVS 框架下, 不仅可以对离散事件系统进行仿真, 还可以实现对连续状态系统的仿真计算, 这就是将要介绍的量化状态系统算法。

2 量化状态系统(QSS)

QSS 方法以状态变量的量子化取代传统数值积分的时间离散化。

考虑一组由常微分方程表示的状态方程系统(State Equation System, SES):

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(t) \in R^n$ 为系统的状态变量; $\mathbf{u}(t) \in R^m$ 为系统的输入向量, 是已知的分段常函数。QSS 将系统(公式(1))量化为:

$$\dot{\mathbf{q}} = f(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{q}(t)$ 为状态变量 $\mathbf{x}(t)$ 的量化向量, $\mathbf{q}(t)$ 的每个分量都与状态变量有关, 可以通过迟滞量化函数获得:

$$q_i(t) = \begin{cases} q_i(t^-) + \Delta q_i, & x_i(t) - q_i(t^-) \geq \Delta q_i \\ q_i(t^-) - \Delta q_i, & q_i(t^-) - x_i(t) \geq \varepsilon_i \\ q_i(t^-), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $q_i(t)$ 为量化向量的分量; Δq_i 为状态变量的量子; ε_i 为迟滞宽度, 为了在不增加误差的条件下减少模型的振荡, 一般都选取 $\varepsilon_i = \Delta q_i$ 。

公式(4)给出了状态变量各分量想要跃迁需要变化的大小:

$$\Delta x_i = \begin{cases} q_i + \Delta q_i - x_i, & \dot{x}_i > 0 \\ x_i + \Delta q_i - q_i, & \dot{x}_i < 0, x_i > q_i \\ q_i - x_i, & \dot{x}_i < 0, x_i < q_i \\ \Delta q_i, & \dot{x}_i < 0, x_i = q_i \end{cases} \quad (4)$$

根据公式(4)可以计算状态变量变化一个量子大小所需的最小时间, 然后更新 q_i 和仿真时钟, 推动仿真向前运行。

从式(3)可以看出, $q_i(t)$ 遵循分段常数的轨迹, 再结合式(2)可以看出系统状态变量 $x_i(t)$ 也遵循分段常数的轨迹, 两者定义了事件的输入和输出序列之间的关系, 因此可以找到有效的 DEVS 模型表示, 并将其分别称之为静态函数和量化积分器。将静态函数对应的子系统与量化积分器耦合, 可以建立一个合理的 DEVS 模型。之后, 由多个量化积分器、静态函数以及信号源耦合而成的 DEVS 模型可以精确地模拟式(1)所代表的系统。具体如图 1 所示, 第 1 个模型表示的是 DEVS 原子模型, 为系统的线性静态函数 f_i ; 第 2 个原子模型表示系统的积分器; 第 3 个原子模型表示系统的量化器, 即表示状态变量 x 的量化轨迹。积分器和量化器的组合称之为量化积分器, 用来表达 QSS 方法; 实线表示 DEVS 的耦合关系。

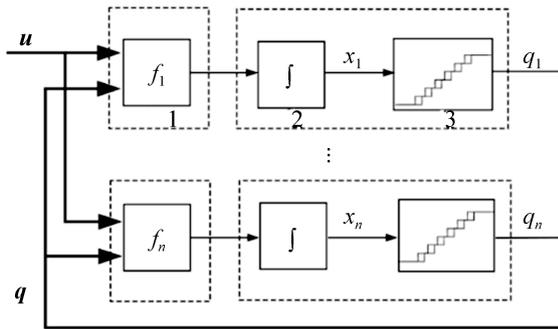


图 1 QSS 方法的 DEVS 表示
Fig. 1 DEVS representation of QSS

3 基于量化状态的混合系统仿真

混合系统因其复杂性而在系统的连续部分中产生不连续性, 需要算法来检测和处理事件^[14-15]。事件根据不同的性质一般可以分成时间事件和状态事件, 时间事件可以直接检测和定位, 而状态事件的检测与定位则是混合系统求解的难点之一, 为此国内外学者提出了一系列解决策略, 其中最主要的是基于零穿越函数的寻根机制策略, 但这种策略可能因穿越插值没有精确定位到事件时刻, 从而导致重复的事件检测, 即不连续性粘滞问题, 也可能

在偶数次越零或相切时因步长过大, 而产生漏根现象。虽然事件检测技术与数值积分相结合的方法一直在改进, 但是在仿真过程中, 它们都需要执行迭代运算, 并且需要修改求解器的工作方式。此外, 离散子系统的事件调度必须同时处理, 而这在含有复杂的离散动态情况下会增加新的问题。

使用量化状态积分的方法, 一方面, 运用 DEVS 模型可以很轻松地解决混合系统的离散部分表示; 另一方面, 通过 QSS 仿真求解所得到的状态变量量化轨迹是一个分段线性函数^[16], 因此状态事件的检测可以在没有迭代的情况下完成。为了实现这一目标, 唯一需要做的就是用 QSS 方法来近似混合系统的连续部分, 同时通过使用 DEVS 模型来模拟混合系统中的离散部分。

3.1 连续子系统仿真

假设连续子系统可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t), m(t)) \\ 0 &= g(\mathbf{x}_r(t), \mathbf{u}_r(t), \mathbf{z}(t), m(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{z}(t)$ 为代数变量向量; $m(t)$ 为一个分段常数, 表示系统的不同模态。对于 $m(t)$ 的每一个值, 都存在一个不同的微分代数方程来代表系统在不同模态下所特有的动态特性, 且假定隐式方程(公式(5))有唯一的解, 因此可以将 $m(t)$ 当作成系统的输入事件从而构建代表连续部分的仿真子模型。 $\mathbf{x}_r(t)$ 和 $\mathbf{u}_r(t)$ 为状态变量的一阶导数为 0 时所对应的状态变量和输入向量。

应用 QSS 方法将连续子系统变换为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= f(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t), m(t)) \\ 0 &= g(\mathbf{q}_r(t), \mathbf{u}_r(t), \mathbf{z}(t), m(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q}_r(t)$ 为方程式中状态变量 $\mathbf{x}_r(t)$ 的量化向量。因此, 混合系统的连续子系统部分可以用如图 2 所示的 DEVS 规范表示, 图中显示了新的耦合方案, 并且在图 1 的基础上增加了一个 DEVS 原子模型用于计算 $\mathbf{z}(t)$ 。

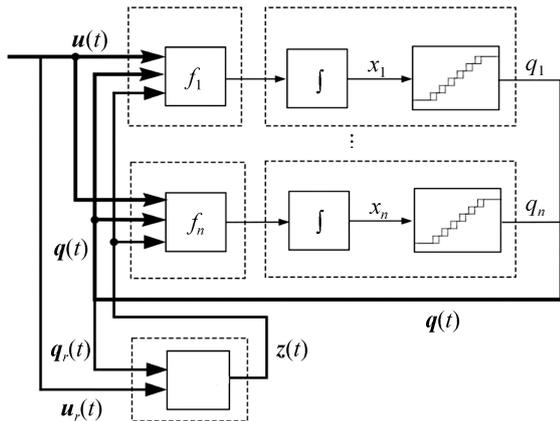


图 2 连续部分的 DEVS 表示

Fig. 2 DEVS representation of continuous part

3.2 混合系统仿真

对于 DEVS 来说,其本身最重要的特性就是可以表示各种离散系统,因此可以用 DEVS 模型来表示系统的离散行为。考虑到,连续子系统可以通过 QSS 方法由 DEVS 模型表示,因此只需要将这两个 DEVS 模型进行耦合就可以表示整个混合系统。

一方面,当只有时间事件存在的情况下,表示离散行为的 DEVS 模型只是一个时间事件发生器,即一个不接收任何输入并在不同时间产生不同输出事件的 DEVS 模型。之后将该事件发生器与连续部分进行模型耦合,对整个混合系统进行仿真。

另一方面,当存在状态事件时,整个系统的离散部分不仅会受到时间推进的控制,同时还会受到输入值和状态变量的影响。而在这种情况下,QSS 方法具有明显的优势:QSS 的状态变量轨迹始终是已知的(分段线性函数),因此,检测事件发生是很容易的。唯一需要做的就是将这些轨迹提供给离散部分,以便其检测事件的发生并计算 $m(t)$ 的轨迹。由于 QSS 方法仿真模拟所求得的状态变量的量化轨迹是分段线性函数,且其积分只涉及到系数的处理,因此其过程很简单,不需要增加额外的计算量。

因此,基于 QSS 的混合系统仿真模型是一个耦合的 DEVS 模型,其基本思想可以通过如图 3 所示的流程图表示。具体的,其结构如图 4 所示,图中的 Discrete 块表示混合系统中的离散子系统部

分,是一个接收状态导数变化事件和输入轨迹变化事件的 DEVS 模型。

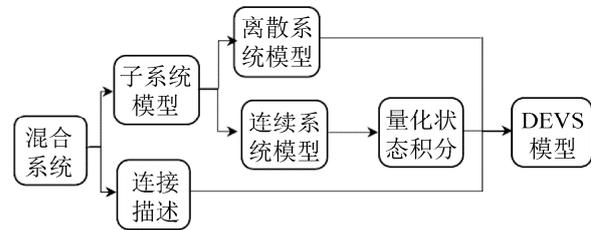


图 3 仿真算法流程图

Fig. 3 Flow chart of simulation algorithm

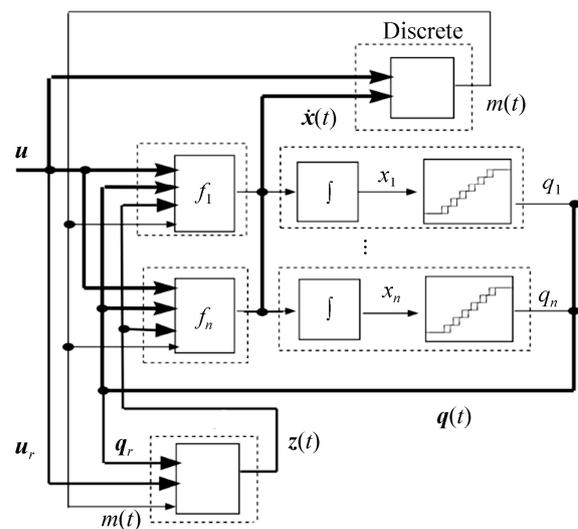


图 4 混合系统表示

Fig. 4 Representation of a hybrid system

由于离散模型在任一有限时间间隔内接收并生成有限数量的事件,因此,无论动态系统有多复杂,都可以用 DEVS 模型来表示。基于此,图 4 的耦合方案能够仿真任何类似于公式(5)的系统与任何离散模型的交互作用。

通常情况下,事件发生的条件是与某些状态变量零穿越有关。在这种情况下,如果使用 QSS 方法仿真,则可以由相应的量化积分器直接检测事件条件^[17-18]。只要量化函数包含给定的固定穿越值的量化级别,就可以很容易地完成这一操作。总之,QSS 方法的使用简化了事件的定位,并允许将每一个不连续作为一个单独的仿真步骤来处理,而不需要重启策略。

4 实例仿真

为展示 QSS+DEVS 方法在混合系统仿真中的优势, 本节将其应用于 2 个实例系统, 第 1 个系统是由时间事件控制, 第 2 个系统则包含状态事件。

4.1 PWM 控制的直流电动机

一个恒定磁场的直流电动机系统, 其连续子系统可以用下面方程表示:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L}[u(t) - R \cdot i_a - k \cdot \omega(t)] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}[k \cdot i_a - b \cdot \omega(t) - \tau(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_a , ω 分别为电动机电枢电流和角速度; $u(t)$, $\tau(t)$ 为电枢电压和负载扭矩; L , R , k , J , b 分别为电枢电感、电阻、电机常数、惯量和摩擦系数。

控制电动机转速的一种典型策略是使用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM), 即将

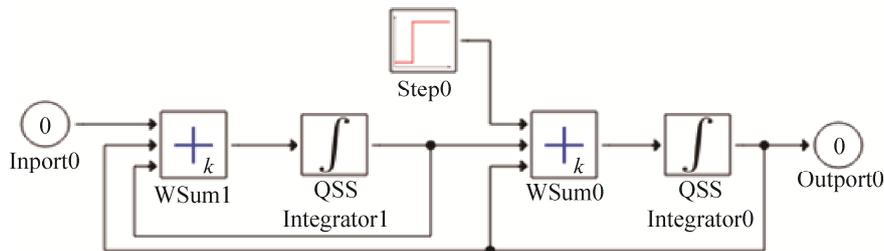


图 5 直流电动机仿真模型

Fig. 5 DC motor model

图 7 为 PWM 控制的直流电动机仿真模型, Ramp 和 Triangular 分别表示斜坡上升控制和三角波控制, 都是简单的 DEVS 生成器; Saturation 为饱和块, 它将输出限制在+1 和-1 之间, 使误差不超过三角波; Switch 为转换器, 用来比较误差和三角波, 当两者相等时, 将会触发+V 和-V 的事件; Coupled 块表示 PWM 控制信号与电动机之间的耦合关系, 耦合块内部包含电动机模型。

使用 QSS+DEVS 的方法对直流电动机系统进行仿真, 得到如图 8 绘制的直流电动机转速仿真曲线。从图中可以看出, 0~2 s 之间, 电动机的转速从 0 增加到约 60 r/s, 2~3 s 之间达到饱和, 转

电机转速与期望基准进行比较, 然后电枢电压从正(+V)切换到负(-V), 由此方法所产生的脉冲持续时间和相对误差之间的关系呈现正比的趋势。假定电动机相关参数为 $L=0.003$ H, $R=0.05$ Ω , $k=6.783$, $J=15$ kg·m², $b=0.005$, PWM 控制的直流电动机系统在仿真中对转速的响应过程: 假设 0~2 s, 转速完成从 0~60 r/s 的变化, 从第 3 s 开始(即时间事件), 给电动机一个三角波信号, 频率为 1 000 Hz, 波动幅值为 1.1。基于 DEVS 仿真平台 powerDEVS^[19]建立的直流电动机仿真模型如图 5 所示, 其中 QSS integrator 与 WSum 分别表示量化积分器和线性静态函数 f_i , 可以看出, QSS+DEVS 方法可以很简洁地描述电动机系统。图 6 为 QSS 算法中量化积分器的 DEVS 表示, 可以更直观的看出两者之间的关系。

速保持不变, 3 s 后转速变化呈现波形, 3.28 s 后波形稳定。

PWM 控制的直流电动机系统是一个仅包含时间事件的混合系统, 通过时间来控制直流电动机的转速状态, 即在 $t=2$ 和 $t=3$ 的时间节点, 电动机的转速由稳定的斜坡上升转变为饱和后的匀速, 然后再转变为三角波形的运动。

采用 QSS+DEVS 方法与传统数值积分方法 (ODE45, ODE15s, ODE23s)对该系统进行仿真, 结果如表 1 所示。可以看出: 对比于 ODE45, QSS+DEVS 方法在求解精度上提高了 622 倍, 仿真效率提高了 19 倍; 对比于 ODE15s, QSS+DEVS

方法精度提高了 26 倍，效率提高了 8 倍；相比于 ODE23s，QSS+DEVS 方法精度提高了 21 倍，效率提高了 6 倍。因此，在仿真求解过程中不管是在仿真精度或者是仿真效率方面，本文的方法都高于传统的数值求解方法。

4.2 弹球问题

包含状态事件的不连续系统的一个典型例子就是弹球问题。一个弹性小球在地面上做弹跳运动，可以通过球的高度 y 和速度 v_y 来描述球的运动。球在碰地之前做连续运动，在碰地时(状态事件发生)，速度方向发生改变。

弹球运动方程可以写为：

$$\begin{cases} \dot{y} = v_y \\ \dot{v}_y = -g - \frac{a}{m} v_y - s(\frac{b}{m} v_y + \frac{k}{m} y) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度； $\alpha=0.1$ 为弹跳过程中的空气摩擦系数； $m=1 \text{ kg}$ 为弹球的质量； $b=30$ 为阻尼常数； $k=10\ 000$ 为弹簧系数； s 为判断条件，当弹球碰地时， $s=1$ ，当弹球在空中时， $s=0$ 。

基于 DEVS 仿真平台 powerDEVS 建立的弹球仿真模型如图 9 所示，其中 Constant2 块表示弹球的加速度 g ，QSS integrator0，QSS integrator1 与 WSum1 为算法量化积分器和线性静态函数，表示弹球速度 v_y 、高度 y 以及时间 t 三者之间的关系，Coupled0 块内包含弹球发生状态事件的判断条件。

```

State Variables and Parameters:
float X, dX, q, sigma; //states
float y; //output
float epsilon, inf; //parameters
Init Function:
va_list parameters;
va_start(parameters, t);
dq = va_arg(parameters, double);
epsilon = va_arg(parameters, double);
X = va_arg(parameters, double);
dX = 0;
q = floor(X/dq) * dq;
inf = 1e10;
sigma = 0;
Time Advance Function:
return sigma;
Internal Transition Function:
X = X + sigma * dX;
if (dX > 0) {
    sigma = dq/dX;
    q = q + dq;
} else {if (dX < 0) {
    sigma = -dq/dX;
    q = q - dq;
} else {sigma = inf;};};
External Transition Function:
float xv;
xv = *(float*)(x.value);
X = X + dX * e;
if (xv > 0) {
    sigma = (q + dq - X)/xv;
} else {
    if (xv < 0) {
        sigma = (q - epsilon - X)/xv;
    } else {sigma = inf;};};
dX = xv;
Output Function:
if (dX == 0) {y = q;}
else {y = q + dq * dX/fabs(dX);};
return Event(&y,0);

```

图 6 量化积分器的 DEVS 表示
Fig. 6 DEVS representation of quantization integrator

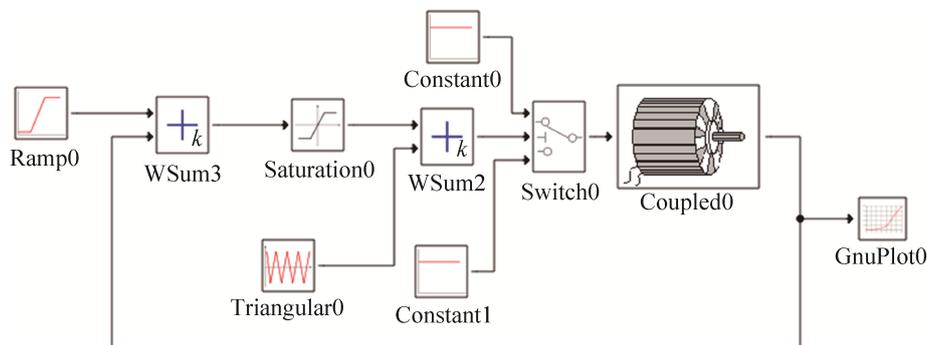


图 7 PWM 控制的直流电动机仿真模型
Fig. 7 PWM controlled DC motor model

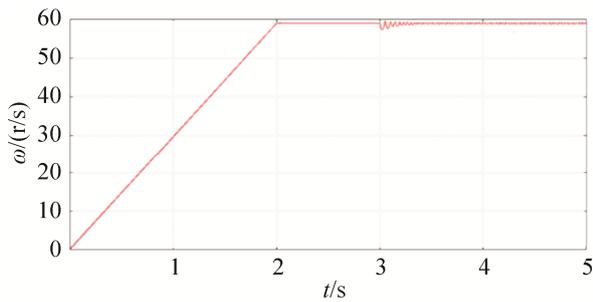


图 8 电动机角速度
Fig. 8 Angular velocity of motor

表 1 各算法仿真结果比较

Tab. 1 Comparison of simulation results of each algorithm

算法	误差容限	相对误差	CPU 时间/s	仿真步数
ODE45	Tol=10 ⁻³	7.254×10 ⁻²	65.25	35 452
ODE23s	Tol=10 ⁻³	3.159×10 ⁻³	28.76	17 395
ODE15s	Tol=10 ⁻³	2.598×10 ⁻³	21.75	15 659
QSS+DEVS	Tol=10 ⁻³ , Δq=1	1.164×10 ⁻⁴	3.18	546

当初始条件设为: $y=1\text{ m}$, $v_y=0$ 时, 采用不同算法(QSS+DEVS, Euler, ODE23s)对弹性小球进行仿真求解, 得到如图 10 所示的结果。以弹球运动解析解为标准曲线, 从图中可以看出, Euler 算法的仿真结果与标准曲线相差最大, 其精度最差; ODE23s 算法的仿真结果与标准曲线较接近; 而 QSS+DEVS 算法的仿真结果与标准曲线最吻合, 其精度最高。另外, 考虑小球与地面发生碰撞时的情况, 从第 2 次和第 4 次碰撞的放大图可以看出, QSS+DEVS 算法可以很准确地检测到碰撞事件的发生, 从而立即反弹; 而 ODE23s 算法和 Euler 算法都不能及时检测到状态事件的发生。因此, 相对于传统算法, QSS+DEVS 算法精度更高, 状态事件(不连续点)检测更加准确。

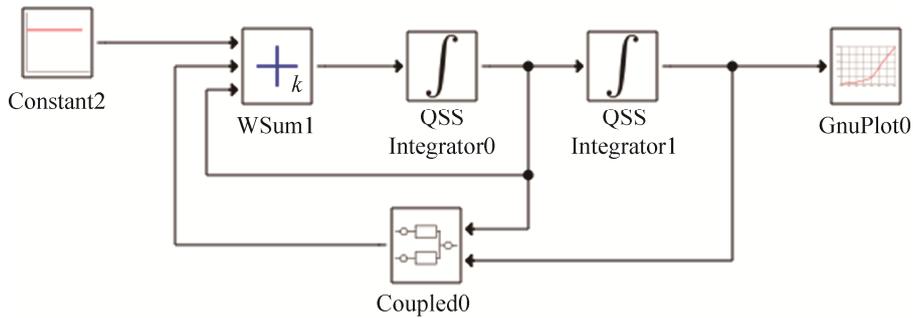


图 9 弹球仿真模型
Fig. 9 Bouncy ball model

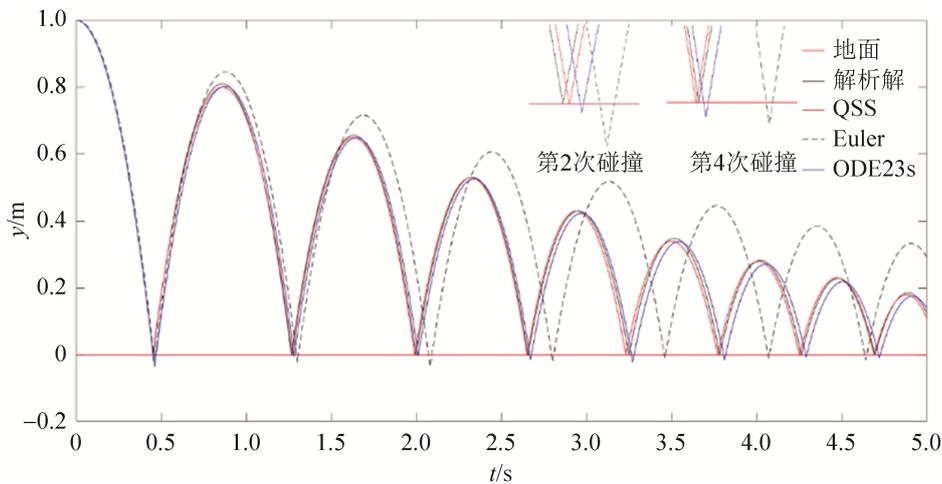


图 10 各算法仿真结果比较
Fig. 10 Comparison of simulation results of algorithms

5 结论

针对传统基于时间离散积分方法在仿真求解混合系统过程中所存在的问题, 基于 QSS 方法和 DEVS 规范, 提出了一种新的混合系统仿真求解方法, 得到如下结论:

(1) QSS+DEVS 方法为混合系统的仿真求解提供了一种简单且有效的途径。相对于传统方法, QSS+DEVS 方法较好地解决了离散部分和连续部分之间的交互问题, 它不需要对积分器进行修改, 同时将系统的不连续性检测转化为一个不需要迭代的简单问题, 较好地解决了传统变步长方法中临界时间点的精确探测问题, 其简便性使得该方法在混合系统的仿真中具有显著的优势。

(2) 相对于传统算法(ODE45, ODE15s, ODE23s 和 Euler), QSS+DEVS 方法不仅具有更高的仿真精度和仿真效率, 而且事件检测更加准确方便。

参考文献:

- [1] 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 Gang, Tan Min, Song Yonghua. Research on Hybrid Systems: A Survey[J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 7-11.
- [2] Cellier F, Kofman E. Continuous System Simulation[M]. New York: Springer, 2006.
- [3] Chatzivasileiadis S, Bonvini M, Matanza J, et al. Cyber-Physical Modeling of Distributed Resources for Distribution System Operations[J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2016, 104(4): 789-806.
- [4] Avinash M, Partha R. A Dynamic Quantized State System Execution Framework for Hybrid Automata[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems (S1751-570X), 2020, 36(1): 1-18.
- [5] Zeigler B P, Lee J S. Theory of Quantized Systems: Formal Basis for DEVS/HLA Distributed Simulation Environment[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering (S1996-756X), 1998, 3369(47): 49-58.
- [6] Kofman E, Junco S. Quantized-State Systems: A DEVS Approach for Continuous System Simulation[J]. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International (S0037-5497), 2001, 18(3): 123-132.
- [7] Migoni G, Bortolotto M, Kofman E, et al. Linearly Implicit Quantization-Based Integration Methods for Stiff Ordinary Differential Equations[J]. Simulation Modelling Practice & Theory (S1569-190X), 2013, 35(6): 118-136.
- [8] Di P F, Migoni G. Improving Linearly Implicit Quantized State System Methods[J]. Simulation (S1741-3133), 2019, 95(2): 127-144.
- [9] Bergero F M, Casella F, Kofman E, et al. On the Efficiency of Quantization-Based Integration Methods for Building Simulation[J]. Building Simulation (S1996-3599), 2017, 11(2): 1-14.
- [10] 李帛洋, 赵争鸣, 檀添, 等. 后向离散状态事件驱动电力电子仿真方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 42-49.
Li Boyang, Zhao Zhengming, Tan Tian, et al. A Backward Discrete State Event Driven Simulation Method for Power Electronics Based on Finite State Machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 42-49.
- [11] 杨祎, 赵争鸣, 檀添, 等. 离散状态事件驱动仿真方法及自适应预估校正算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 33-41.
Yang Yi, Zhao Zhengming, Tan Tian, et al. Discrete State Event Driven Method and Self-Adapted Predictor-Corrector Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 33-41.
- [12] 檀添, 赵争鸣, 李帛洋, 等. 基于离散状态事件驱动的电力电子瞬态过程仿真方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 41-50.
Tan Tian, Zhao Zhengming, Li Boyang, et al. A transient Process Simulation Method for Power Electronics based on Discrete State Event-Driven[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 41-50.
- [13] 秦建, 沈沉, 陈颖, 等. 基于量子化状态驱动的时空自律仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2869-2877.
Qin Jian, Shen Chen, Chen Ying, et al. A Spatio-temporally Self-regulated Simulation Method Based on Quantized State System[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2869-2877.
- [14] 王小捷, 文传源. 一类混合动态系统的仿真方法[J]. 系统仿真学报, 1997, 9(3): 51-55.
Wang Xiaojie, Wen Chuanyuan. A Hybrid Dynamic

- System Simulation Method[J]. Journal of System Simulation, 1997, 9(3): 51-55.
- [15] 陈宗基, 杨振宇. 混合系统的描述、分析与设计[J]. 高技术通讯, 1997, 7(11): 50-55.
Chen Zongji, Yang Zhenyu. Description, Analysis and Design of Hybrid Systems[J]. Chinese High Technology Letters, 1997, 7(11): 50-55.
- [16] Bergero F, Kofman E, Cellier F. A Novel Parallelization Technique for DEVS Simulation of Continuous and Hybrid Systems[J]. Simulation (S1741-3133), 2013, 89(6): 663-683.
- [17] Fernandez J, Kofman E. A Stand-alone Quantized State System Solver for Continuous System Simulation[J]. Simulation (S1741-3133), 2014, 90(7):782-799.
- [18] Fernandez J, Kofman E, Bergero F. A Parallel Quantized State System Solver for ODEs[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing (S0743-7315), 2017, 106(9): 14-30.
- [19] Bergero F, Kofman E. Power DEVS. A Tool for Hybrid System Modeling and Real Time Simulation[M]. Rosario: Society for Computer Simulation International, 2011.