

基于 RecurDyn 和 Matlab/Simulink 的一种小型轮式平台的联合仿真

张 骞, 李年裕, 杨怀彬, 崔 智, 房 远

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 为了验证后轮为万向轮时平台的转向性能, 提出了一种基于 RecurDyn 与 Simulink 的联合仿真策略; 在 SolidWorks 建立了一种小型轮式平台, 平台前轮为主动轮, 后轮为万向轮, 两个主动轮分别由两个电机独立驱动; 将三维模型导入到 RecurDyn 中, 添加相应的约束, 设定相应的参数, 验证模型的准确性, 建立相应的接口; 在 Simulink 中搭建无刷直流电机的模型, 并且搭建相应的调速系统, 同时验证模型的正确性; 将两个电机的转速作为输出, 通过接口输入到 RecurDyn 中作为两主动轮的驱动, 通过对电机的控制, 从而完成平台的直行、转弯、中心转向等动作; 仿真结果表明这种轮式平台有良好的转向性能, 搭建的电机模型能够实现相应的功能, 电机的控制策略也是可行的; 本研究对平台的实物研制及实验具有重要意义。

关键词: 联合仿真; 调速控制; 转弯

Joint Simulation of Small Wheeled Platform Based on RecurDyn and Matlab/Simulink

Zhang Qian, Li Nianyu, Yang Huaibin, Cui Zhi, Fang Yuan

(Dept. of Control Engineering, Armoured Forces Academy of Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to verify the steering performance of the platform when the rear wheel is a caster, a joint simulation strategy based on RecurDyn and Simulink is proposed. In SolidWorks, a small wheeled platform was established. The front wheels of the platform were the driving wheels and the rear wheels were the caster wheels. The two main wheels were driven independently by two motors. The 3D model is introduced into RecurDyn, add the corresponding constraints, set the corresponding parameters, verify the accuracy of the model, establish the corresponding interface; in Simulink to build brushless DC motor model, and build the corresponding speed control system, Verify the correctness of the model; the speed of the two motors as output, through the interface input to the RecurDyn as a two-wheel drive, through the control of the motor to complete the platform straight, turn, center steering and other actions. The simulation results show that the wheeled platform has good steering performance, and the motor model can realize the corresponding function. The control strategy of the motor is also feasible. This study is of great significance to the physical development and experiment of the platform.

Keywords: joint simulation; speed control; turning

0 引言

RecurDyn 是一款优秀的多体动力学仿真软件, 它采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法, 非常适用于求解大规模及复杂接触的多体系统动力学问题。RecurDyn 的接口模块 (Communicators) 主要包括同其他第三方软件联合仿真的接口, 其中 Control 可以结合 Matlab/Simulink 进行机械—控制系统的联合仿真。

Simulink 是 Matlab 最重要的组件之一, 它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中, 无需书写大量程序, 而只需要通过简单直观的鼠标操作, 就可以构造出复杂的系统。Simulink 支持几乎所有类型的真实动态系统仿真, 同时它是一种图形化的仿真工具, 利用其可视化的建模方式, 可迅速建立动态系统的框图模型; Simulink 允许自定义模块的使用, 也允许将 C、FORTRAN、Ada 代码直接移植到 Simulink 模型当中; Simulink 仿真模拟快速、精准, 具有良好

的分析交互性。

联合仿真能够综合各个软件的优点, 发挥更好的效果。结合 RecurDyn 与 Simulink 的优点, 在 RecurDyn 中建立动力学模型, 通过接口连接到 Simulink, 在 Simulink 中建立控制模型, 通过联合仿真验证模型的性能。联合仿真为模型的实物研制与实验提供了相应的参考。

1 RecurDyn 模型与接口建立

利用 RecurDyn 中的 Control 模块可以与 Matlab/Simulink 实现联合仿真^[1]。

联合仿真的基本流程包括: 构造动力学模型、确定虚拟样机的输入输出、构造控制系统、联合仿真。针对 RecurDyn 与 Simulink, 对应的流程如图 1 所示。

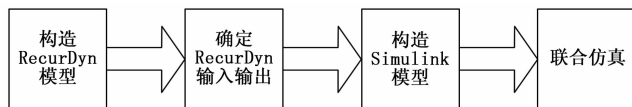


图 1 RecurDyn 与 Simulink 联合仿真流程

收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-08-29。

作者简介: 张 骞 (1992-), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方向的研究。

1.1 建立动力学模型

动力学模型的建立方法主要有两种, 既可以在 RecurDyn

中直接建立模型, 也可以在其他建模软件中建立三维模型然后导入到 RecurDyn 中, 本文采用的就是在 SolidWorks 中建立模型然后导入到 RecurDyn 中^[2], 导入后的模型如图 2 所示。

具体操作为在 SolidWorks 中建立好三维模型, 另存为 .x_t 格式, 然后导入到 RecurDyn 中, 然后在 RecurDyn 中添加约束, 摩擦, 调整仿真参数。

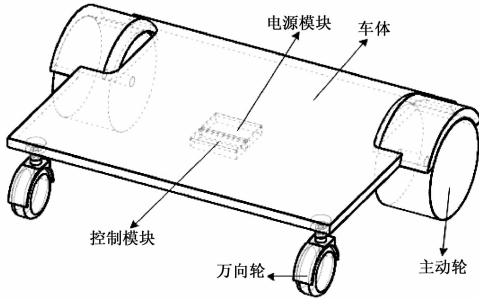


图 2 平台整体

整个平台由车体、主动轮、万向轮、电源模块、控制模块几大部分组成。地面模块可以在 RecurDyn 中建立, 也可以在 SolidWorks 中建立。当路面的路况比较简单时, 在 RecurDyn 中直接建立更加方便快捷, 当路况比较复杂时, 比如有多个上、下坡, 不平路面等, 在 SolidWorks 中建立然后导入更加方便快捷。需要注意的是, 导入的路面模块需要与系统路面一致, 可以用固定副将两者固定。

在 RecurDyn 中设定各个零件的材料, 具体设定为: 车体为铝合金, 主动轮与万向轮为橡胶, 电源模块与控制模块为尼龙。

在 RecurDyn 中设定相应的摩擦系数, 具体设定为主动轮与万向轮间的动摩擦系数 0.7, 最大静摩擦系数 0.75; 各转动副间的动摩擦系数 0.2, 最大静摩擦系数 0.25。

1.2 确定 RecurDyn 的输入输出

在 RecurDyn 的 Control 模块中建立模型的输入与输出, 将平台左、右两轮的速度作为两个输入, 平台质心的速度与位移作为输出。

确定模型的输入时, 首先在 Control 模块中选择与 Simulink 模块连接, 然后新建两个输入, 分别命名为 Rsudu 与 Lsudu, 分别代表右轮与左轮的速度。

建立好模型的输入后, 在平台的左轮与右轮的驱动上建立与输入的联系。将两轮的驱动分别设置为两个 PIN 函数, 均为 PIN (1) 格式, 分别对应 Rsudu 与 Lsudu。

确定模型的输出时, 在 Control 模块中建立两个输出, 分别命名为 sudu 与 weiyi, sudu 对应的函数为 VM (1), weiyi 对应的函数为 DM (1), 两个输出的参考点都选择平台的质心。

确定好模型的输入与输出后, 将模型保存然后输出, 将接口设定为 2.0, 主程序设定为 Simulink, 在 Matlab 中打开保存的文件, 则会自动生成一个可以在 Simulink 中参与仿真的模块, 模块的结构如图 3 所示。模块有两个输入, 即: 右主动轮速度 (Rsudu) 与左主动轮速度 (Lsudu); 有两个输出, 即: 质心的速度 (sudu) 与位移 (weiyi)。

2 Simulink 模型建立

无刷直流电机:

本文选取电机模型为无刷直流电机模型, 调速控制为变频

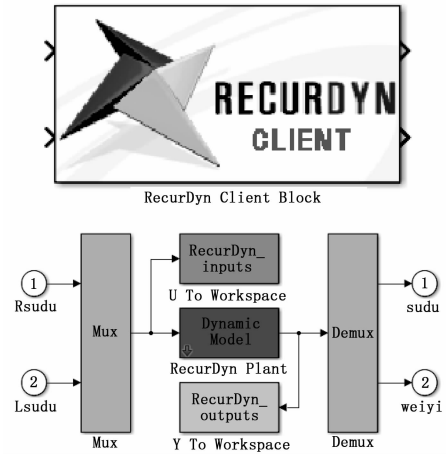


图 3 联合仿真模块

调速。

为了方便分析, 假设:

- 1) 三相绕组使用星形连接且保持对称, 气隙磁场近似为方波, 定子电流产生的磁场和转子磁场都对称;
- 2) 不考虑定子的齿槽、进行的换相和电枢上面的影响;
- 3) 电枢绕组持续平均的分布在定子内表面;
- 4) 不考虑磁路饱和, 不计算涡流、磁滞等损耗^[3]。

则电压平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, u_a 、 u_b 、 u_c 是定子相绕组电压 (V); e_a 、 e_b 、 e_c 是定子相绕组反电动势 (V); i_a 、 i_b 、 i_c 是定子相绕组电流 (A); r 为定子相绕组电阻 (Ω); L 为定子相绕组之间的自感 (H); M 为定子相绕组之间的互感 (H)。

无刷直流电机的转矩方程为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

式中, ω 为电机角速度 (rad/s)。

无刷直流电机的运动方程为:

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中, T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转; B 为阻尼系数; ω 为电机机械角速度; J 为电机的转动惯量。

根据直流无刷电机的数学模型可以建立其 Simulink 模型, 其中电机相关参数参照表 1 设定。

表 1 电机相关参数参照表

电压	300 V
定子电阻 R_s	4.765 Ω
定子电感 L_s	0.0085 H
转动惯量 J	0.008 kg * m ²
励磁磁通	0.1848 Wb
励磁脉冲宽度	120°
极对数 p	2

设定好电机参数后，建立与之匹配的调速系统^[4-5]。调速系统主要包括：直流电源、逆变器、永磁同步电机、转速调节模块、PWM 脉宽调制器、控制单元等部分。整体框图如图 4 所示。

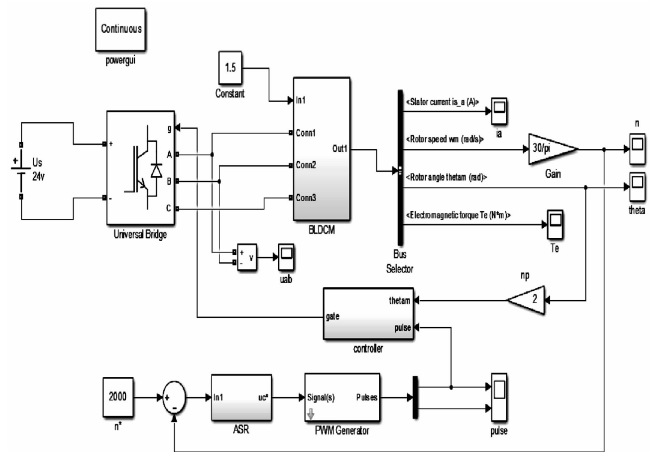


图 4 电机调速系统

系统中的 ASR 模块即为转速调节模块，采用比例积分调节^[6]，其结构如图 5 所示，其中，比例系数 $k_p = 10.7$ ，积分系数 $k_i = 0.15$ 。

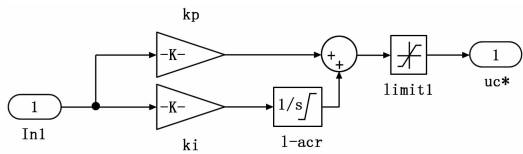


图 5 转速调节模块

系统中的 PWM Generator 模块即为 PWM 脉宽调制器，作用就是调节脉冲宽度，其中载波频率设为 3 000 Hz。

系统中的 Controller 模块即为控制单元，其作用是根据转子磁极位置分配电机三项绕组的通电，即控制逆变器模块 6 个开关器件的开关次序。

各个模块建立好并完成各自封装，然后完成与联合仿真模块的连接，如图 6 所示。

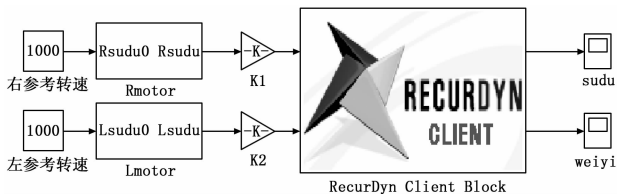


图 6 联合仿真模型

其中，K1 与 K2 是减速比，在实际中相当于齿轮或者减速箱，K1 与 K2 均取 0.2。Rmotor 与 Lmotor 分别代表平台的右侧与左侧电机及其调速机构，右参考速度与左参考速度作为两个输入，速度 (sudu) 与位移 (weiyi) 作为输出，通过观察输出可以验证模型的正确性。

3 联合仿真

设定好参数后就可以进行联合仿真了，为了验证模型的正

确性，本文进行了平台的直行和转弯的仿真。

3.1 理论分析

首先对平台的直行与转弯进行理论分析。当平台直行时，其质心速度与两主动轮的线速度一样，位移为：

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v dt \tag{4}$$

当平台转弯时，速度分析如图 7 所示。

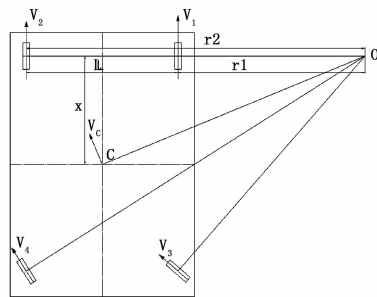


图 7 平台转弯速度分析

O 为转弯时速度瞬心，两前轮间距为 L，右前轮转弯半径为 r_1 ，左前轮转弯半径为 r_2 ，前轮轴线与质心距离为 X，右前轮的速度为 v_1 ，左前轮的速度为 v_2 ，右后轮的速度为 v_3 ，左后轮的速度为 v_4 ，质心的速度为 v_c 。

由运动学理论^[7]有：

$$\frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \omega_r \tag{5}$$

$$v_c = \omega_r \cdot r_c = \omega_r \cdot \sqrt{X^2 + (r_1 + \frac{L}{2})^2} \tag{6}$$

$$r_2 = L + r_1 \tag{7}$$

根据设计可知，前轮为主动轮，直径为 $D=100$ mm，两前轮间距 $L=350$ mm，前轮轴线与质心距离 $X=56$ mm 左右。

3.2 仿真优化

通过仿真实验发现，平台的初始位置即初始化条件对平台的仿真有重要的影响，但是往往在初始状态时，平台的条件并不是完全静止的，为了消除这一不利因素，增加了一个滞后模块，即要求平台正在仿真开始的 0.1 秒时间内，其速度保持不变，而后 0.5 秒时间内加速到预设速度。这一功能具体是在 Matlab/Simulink 中利用 S-function 功能实现的^[8]，具体的函数如下所示：

```
function [sys,x0,str,ts]=nbijiao(t,x,u,flag)
switch flag
case 0,
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
case 3,
sys = mdlOutputs(t,x,u);
case 2,
sys = [];
case 9,
sys = [];
otherwise
error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes()
```

```

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1;
sizes.NumInputs = 2;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [-1 0];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global clock;
global n;
clock=u(1);
n=u(2);
if clock<=0.1
sys=0;
else
sys=n;
end

```

3.3 平台的直行

将左右两电机的参考速度均设定为 2 000 r/min, 仿真后, 平台的速度如图 8 (a) 所示, 位移如图 8 (b) 所示。

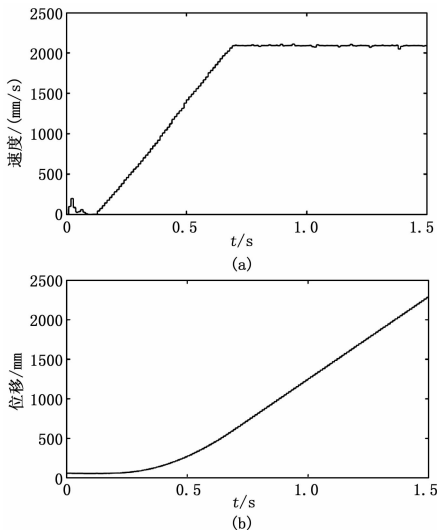


图 8 平台的直行

电机转速为 2 000 r/min 时, 输入到主动轮的转速则为 $\omega = \omega_0 * i = 2\ 000 * 0.2 = 400$ r/min, 整个平台的速度与两主动轮的线速度相同为: $v = r\omega = 2\ 094$ mm/s, 由图 8 (a) 可以看出: 平台在前 0.1 秒内受到控制并不加速, 在 0.1 秒后开始加速, 大约经过 0.5 秒时间后加速到 2 100 mm/s 左右, 仿真结果与理论计算相一致, 同时所用到的控制系统也发挥了相应的作用。

3.4 平台的转弯

当平台的左右两侧电机的转速分别为 2 000 r/min 与 1 000

r/min 时, 平台的两主动轮的线速度为 v_1 与 v_2 , 如图 9 所示, 内侧主动轮速度为: $v_1 = r_1\omega_1 = 1\ 047$ mm/s, 外侧主动轮速度为: $v_2 = r_2\omega_2 = 2\ 094$ mm/s, 将 v_2 与 v_1 带入到式 (5) 至式 (7), 得到: $r_1 = L = 350$ mm, $r_2 = 2L = 700$ mm, $\omega_r = 2.99$ rad/s, $r_c = 527.98$ mm, $v_c = 1\ 578.65$ mm/s。

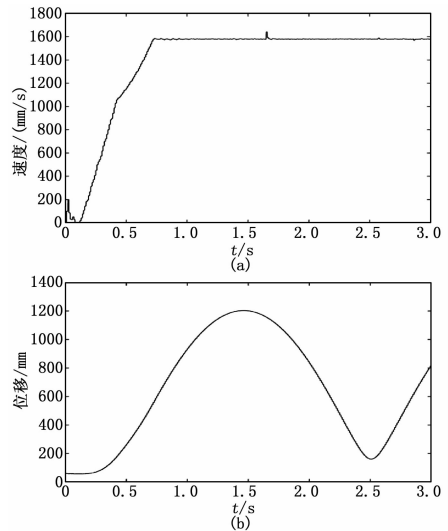


图 9 平台的转弯

由图 9 (a) 可知, 前 0.1 秒平台由于控制系统的存在并不加速, 0.7 秒左右, 平台加速到 1 580 mm/s 左右, 这与理论计算一致; 由图 9 (b) 可知, 平台从 0.5 s 左右开始做圆周运动, 周期为 2 s 左右, 说明平台能够完成转弯, 并且与理论计算一致。

4 结论

通过仿真实验可以看出: 平台能够完成直行、转弯等动作, 建立的电机调速模型能够完成对电机的模拟及其调速, 联合仿真能够为实车研制提供良好的参考, 两电机转速应该满足一定的条件, 在控制时应该遵循。

参考文献:

- [1] 刘 义. RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] 张忠将. SolidWorks 2014 机械设计完全实例教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 杨向宇, 杨 进, 邹利平. 直流无刷电机控制系统的建模与仿真 [J]. 华南理工大学学报, 2005, 33: 28-32.
- [6] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2010.
- [8] 石良臣. MATLAB/Simulink 系统仿真超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.