

基于 Simulink 和 VC++混合编程的 高速列车牵引传动系统仿真软件*

董继维, 汪 斌, 卢琴芬*, 张进高, 谢 舸
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决 Simulink 环境下开发的仿真模型受限于 Matlab 的运行环境及输入/输出界面不够友好等问题,使高速列车牵引传动系统具有良好可操作性和在任何一台计算机上都可以独立运行。开展了 Simulink 和 VC++ 在编程建模方面各自优缺点的分析,建立了仿真界面和仿真内核之间的关系,提出了仿真界面和仿真内核通过数据接口实现数据传递,以及基于 Simulink 和 VC++ 进行混合编程的研究方法。在一台未安装 Matlab 的计算机上运行牵引传动系统仿真软件,并将运行结果与 Simulink 仿真结果进行了对比分析。研究表明:脱离了 Matlab 的运行环境,软件运行结果与仿真结果一致,充分验证了软件的有效性和正确性。

关键词: 高速列车;牵引传动系统;仿真软件;混合编程

中图分类号:U22;TM921;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)12-1519-04

Research on EMU traction driver system of combined programming method based on Simulink and VC

DONG Ji-wei, WANG Bin, LU Qin-fen, ZHANG Jin-gao, XIE Ge
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of the model developed with Simulink can only be run under Matlab environment and the interface of the model is not amiable enough to operate, the Simulink and VC++ hybrid programming method was investigated in developing software used for electrical multiple unit (EMU) traction drive system. After the analysis of the advantages and disadvantages of the Simulink and VC++ at programming and developing simulation model, the relationship between the simulation window and simulation kernel was established. A method that simulation window and simulation kernel exchange data through data interface was presented to the hybrid programming method. The traction drive simulation software was run on one computer without Matlab installed. The result is fully consistent with the result of Simulink. The result shows that not only the software can be run independent of Matlab environment, but also it is valid and useful.

Key words: electrical multiple unit(EMU); traction driver system; simulation software; hybrid programming

0 引 言

近年来,随着中国高速铁路建设的快速发展,与高速铁路相关的基础理论研究也在不断深入。目前,应用于高速铁路牵引传动系统研究的仿真软件主要

是 MathWorks 公司推出的一款数学计算软件 Matlab/Simulink。Simulink 提供了 GUI 界面交互窗口和丰富的元件库,不仅减少了牵引传动仿真软件的开发工作量,缩短了开发周期,而且系统开发更加灵活、快捷^[1-4]。该牵引传动系统仿真软件的主要缺点是只能在 Matlab

收稿日期:2011-06-20

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01-A04-2);国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA110301);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QNA4016)

作者简介:董继维(1985-),男,山东菏泽人,主要从事高速铁路牵引传动系统方面的研究。E-mail:dddcomeon@163.com

通信联系人:卢琴芬,女,副教授,硕士生导师。E-mail:yyy@zju.edu.cn

单一工作环境下运行,而且仿真系统界面不够友好,如欲对其中的一些参数如电机电感等进行修改,则需要熟练掌握 Matlab,并了解仿真系统模型,从而限制了该牵引仿真系统的推广及应用。VC++是一款面向对象的程序设计软件,为程序员提供了丰富的编程策略。用户可以从实际出发,根据自己的需要,设计出非常友好实用的软件。但是 VC++不具备强大的数学计算功能。如果完全依靠 VC++来开发一套牵引传动系统仿真软件,一则开发周期长,工作量大;二则难以保证运行结果的稳定性与可靠性。在 Simulink 的基础上,结合 VC++进行二次开发,就能够充分发挥 VC++与 Simulink 的优点,从而开发出可以独立运行且具有友好人机对话界面的牵引传动系统仿真软件^[5-7]。

本研究基于 Simulink 与 VC++的混合编程技术开发了高速铁路牵引传动系统仿真软件,充分利用两者的优势。软件采用 VC++开发主程序界面,以 Matlab 的 RTW 功能把基于 Simulink 开发环境建立的高速列车牵引传动系统仿真模型转换成 VC++程序代码,封装后作为仿真内核。该软件完全采用 VC++语言,脱离了 Matlab 的运行环境,能够独立运行,同时,其具有友好的参数输入界面与结果输出界面。软件不仅可以做到实时动态地显示原有的基本量(如各个环节的电压、电流、牵引电机转速等),而且也加入了运行结果数据的后处理功能,扩展了仿真系统的功能,实时计算功率因数、效率、各个环节的发热量等,并动态显示。该牵引传动系统仿真软件使得用户可以方便快捷地去研究牵引传动系统的性能。

1 仿真模型

高速列车牵引传动系统的功能是实现电能与机械能之间的转换,即在牵引状态时将电网电能转换成电机机械能,从而驱动列车运行^[8-10];在制动状态时则将电机机械能转换成电能,回馈到电网。目前高速列车有两种牵引传动方式,一种为用于 CRH2 型高速列车的三电平方式;一种为用于 CRH3 型高速列车的两电平方式^[11]。软件针对这两种不同方式,采用 Simulink 建立了各自的牵引传动仿真模型,且每种方式都包括 1 台电机模型与 4 台电机模型。其中的三电平一电机仿真系统模型示意图如图 1 所示,4 台电机模型的结

构及参数与一台电机模型大体相同。

建立的牵引传动系统仿真模型主要由以下模块组成:单相交流电源、牵引变压器、三电平整流器、三电平逆变器、矢量控制系统、牵引制动判定系统、异步牵引电机等,各部分的主要仿真参数如下:

弓网电压有效值 $U=25\text{ kV}$, 牵引变压器变比 $K=25\ 000/1\ 500$ 。

整流器:输入单相电压 $U_n=1\ 500\text{ V}$,载波频率 $f_c=1\ 250\text{ Hz}$ 。

直流环节:直流电压 $U_{dc}=2\ 600\text{ V}$ (牵引)/ $3\ 000\text{ V}$ (逆变),电容 $C_1=C_2=16\text{ mF}$ 。

逆变器:SVPWM 调制频率为 10 kHz 。

牵引电机:额定功率 $P_N=300\text{ kW}$,额定线电压 $U_N=2\ 000\text{ V}$,额定频率 $f_N=140\text{ Hz}$,极对数 $p=2$ 。

2 仿真内核子程序

基于 Simulink 建立的牵引传动系统仿真模型需要在 Matlab 环境下才能运行,不能封装成仿真内核为开发的仿真软件所调用,需要把模型转化为 C 代码程序,因此采用 Matlab 的 RTW(Real-time Workshop)工具来完成这个转换。RTW 支持离散时间系统、连续时间系统和混合系统的代码生成。该仿真模型转换的具体步骤如下:

(1) 在 Matlab/Simulink 下打开建立的牵引传动系统仿真模型,在 configuration parameter 选项卡中进行设置,求解器(solver)设置为固定运行步长(fixed-step),解法器类型为 ode5(domain-prince);步长大小(fixed-stepsize)为 0.05 或更小。

(2) 在 Real-time Workshop 选项卡栏中选择目标文件(system target file)为 grt.tlc,且在 VC++工程文件选项(visual c/c++ project makefile only for the grt target)选择转换后的语言为 C++语言。

(3) 通过转换(build)命令把仿真模型转换成 C++代码工程,位于与模型文件名同名的文件夹中,包括模型程序(模型名.cpp)、初始化赋值程序(模型名_data.cpp)、支持运行所需的 3 个文件(Grt_main.c,rt_logging.c,rt_sim.c)。模型程序包含了仿真模型中牵引变压器、牵引整流器、牵引变流器与牵引电机的 C 语言代码。

通过上述步骤,本研究建立的 4 个仿真模型都转换为 C++代码程序,编译成执行文件后就可以脱离 Matlab 环境独立运行,生成 mat 格式的数据文件。但 mat 数据文件只有在 Matlab 环境才可以被读取,无法被 C 语言程序调用结果数据进行分析处理,还是没有真正脱离 Matlab 运行环境。而且, Rtw 转换生成的代码也没有输入接口,无法在程序外部修改参数。因此直接

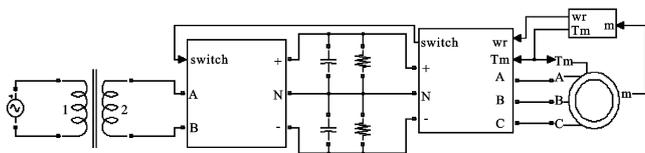


图 1 三电平一电机牵引传动仿真系统模型(CRH2 型)

转换得到的模型程序只能够完成计算功能,还不能作为仿真内核调用,需要对转换后的程序代码进行二次开发,增加输入/输出接口程序,完成参数输入与结果输出功能。解决办法是在模型主程序(模型名.cpp)中增加外部接口函数体,同时在入口主函数(Grt_main.c)中进行声明调用,修改后的代码程序编译成执行文件,作为牵引传动系统仿真软件的仿真内核。

3 仿真软件

高速列车牵引传动系统仿真软件的开发过程如图 2 所示。基于 VC++ 编制程序主程序,完成参数输入、数据处理、结果显示及仿真内核调用的功能。仿真软件界面如图 3 所示。仿真软件包括不同的仿真类型:两电平 1 台电机,两电平 4 台电机(1 节动车),三电平 1 台电机,三电平 8 台电机(2 节动车)。

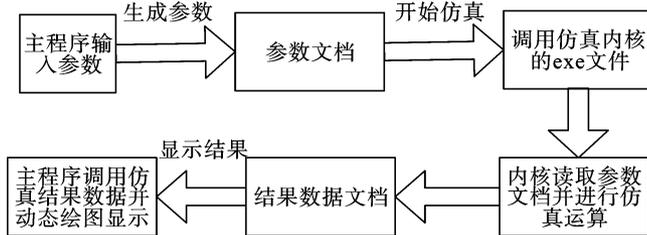


图 2 仿真软件开发过程框图

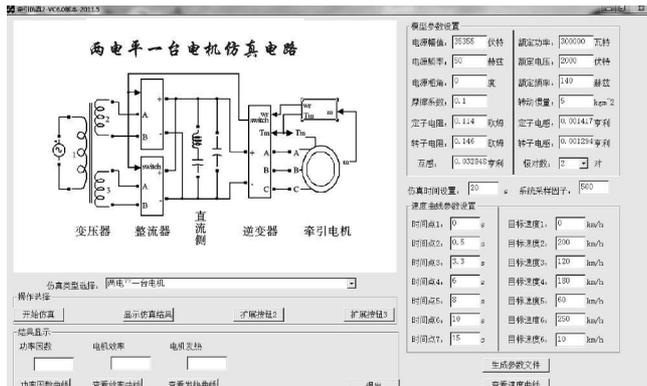


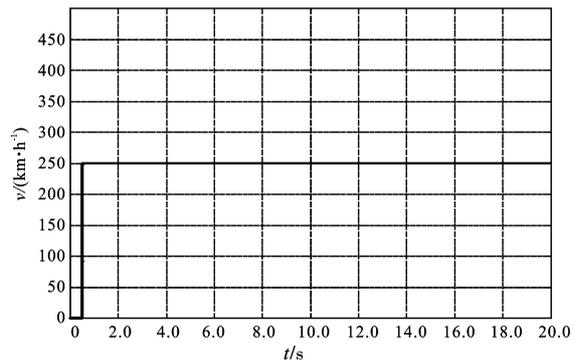
图 3 高速列车牵引传动系统仿真软件主界面

仿真软件从主界面接收模型参数设置,包括电网电压与电网频率,牵引电机的定子电阻、定子电感、转子电阻、转子电感、定转子之间互感、极对数以及列车速度设定曲线等。速度设定通过输入对应时间所要求的目标速度,可输入 1~7 个目标速度。待接收到参数后进行计算处理,获得仿真内核所需要的相关参数,并形成参数文件。进行仿真时,仿真软件调用仿真内核,同时以文件方式把相关参数传递给仿真内核中的输入接口子程序,接着开始牵引传动系统的仿真计算。在计算过程中,输出接口实时获得所需的计算结果,包括牵引电机的电压、电流、转速与转矩,牵引变

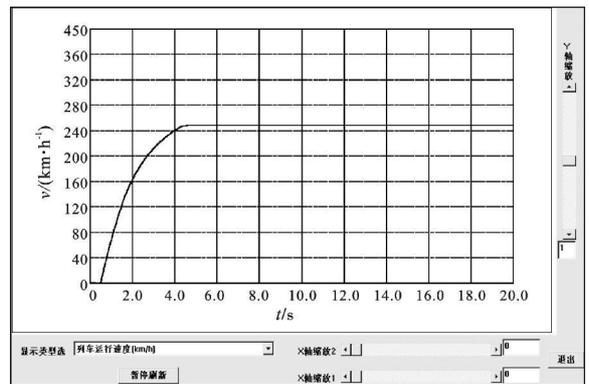
流器直流环节的电压与电流,电网侧的电压与电流等,并把它们写入到结果文件。仿真程序实时读取,一方面绘图动态显示电压、电流、转矩与转速等基本量,另一方面进行结果后处理,包括对电压与电流进行 FFT 分析,获取电压与电流的基波与各次谐波值、电网侧功率因数与系统效率、电机的功率因数与效率、各个环节的发热量等。

4 仿真计算实例

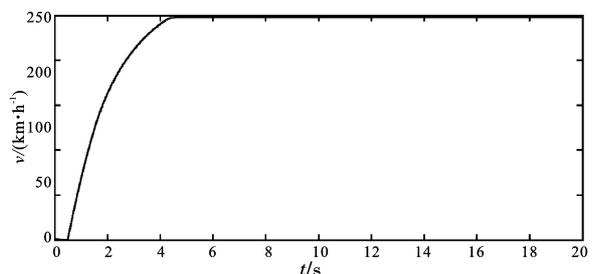
牵引传动系统仿真软件能够仿真不同工况下牵引传动系统的性能,包括正常运行与故障情况。选择如图 1 所示的仿真模型,在主界面输入只包含一个目标速度的列车运行速度曲线,如图 4(a)所示,通过仿真分析后,得到速度仿真结果,如图 4(b)所示。设定值与仿真值相比,仿真值考虑了系统的惯性,在一定的加速时间后达到稳定速度,稳速时两者速度相一致。



(a) 速度 v 设定值



(b) 仿真软件的结果

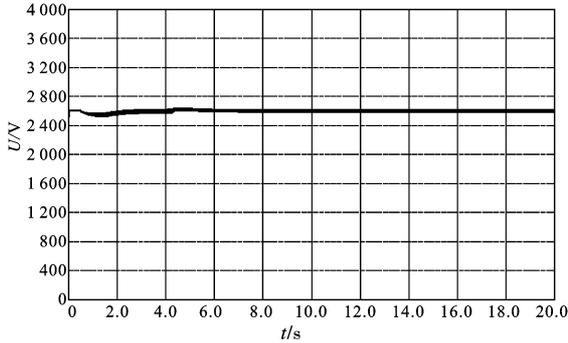


(c) Simulink 仿真结果

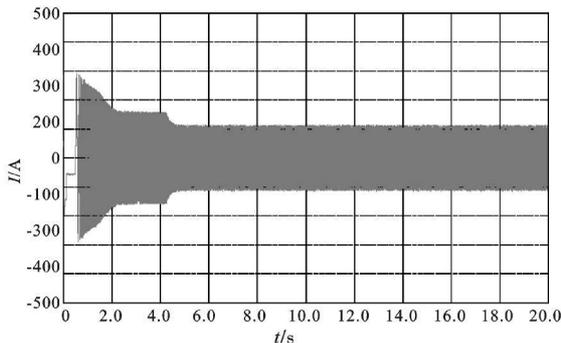
图 4 列车运行速度曲线

Simulink 模型直接计算结果如图 4(c)所示,显然,开发的牵引传动仿真系统的运行结果与 Matlab/Simulink 环境下的运行结果一致,充分验证了程序的有效性和正确性。

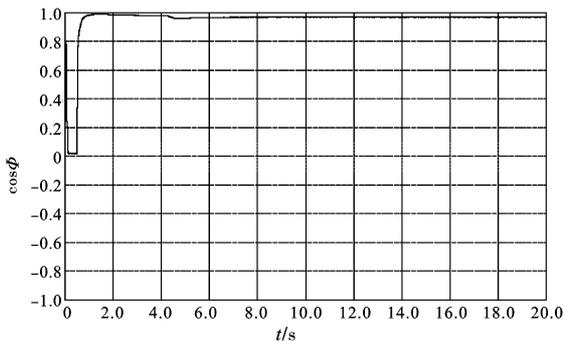
仿真得到电网侧电压、牵引电机的与电流、变压器



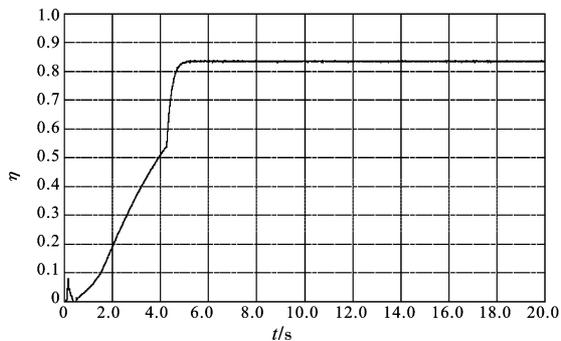
(a) 电网侧电压 U



(b) 牵引电机电流 I



(c) 变压器二次侧功率因数 $\cos \phi$



(d) 牵引效率 η

图 5 仿真电压与电流波形

二次侧功率因数、牵引效率如图 5 所示。牵引效率在加速段时低,而在达到稳定速度较高;变压器二次侧功率因数基本接近于 1。随着目标速度的增加,牵引效率将增加,因此仿真结果与实际结果相符合。可见,仿真软件有利于分析牵引传动系统的动态性能及故障特性。

5 结束语

本研究基于 Simulink 和 VC++混合编程开发的高速铁路牵引仿真系统,集成了三电平与两电平两种不同的牵引传动方式,可以根据实际情况输入仿真参数,实时显示仿真结果并进行后处理,获得牵引传动系统的功率因数、效率与谐波分量。仿真软件具有友好的人机交互界面,可以很方便地修改各个环节的参数,为用户提供全面的、动态可视化运行结果。

该研究结果可为牵引传动系统的优化设计与故障分析提供有利的帮助,具有重要的理论意义与实用价值。

参考文献(References):

- [1] 张长军,孟 朔,刘建政,等. 异步电机矢量控制系统动态仿真方法[J]. 北京科技大学学报,2004,26(4):434-437.
- [2] 叶万富,胡育文. C++ Builder 与 MATLAB/SIMULINK 的接口[J].计算机仿真,2004,21(10):185-188.
- [3] 田 伟,熊晋魁. Simulink 模型的 C/C++ 代码实现[J]. 应用科技,2004,31(11):16-18.
- [4] 王 巍,罗隆福. 地铁车辆三电平逆变器主传动系统仿真[J]. 科学技术与工程,2007,7(6):72-76.
- [5] 邵 杰. 基于 Matlab/Simulink 异步电机矢量控制系统仿真[J]. 自动化技术与应用,2009,28(3):73-76.
- [6] 严国斌,方攸同,张 帆. 高速列车混合励磁涡流制动系统的设计与分析[J]. 机电工程,2010,27(8):19-21.
- [7] BU Le-ping,LIU Kai-pei,CAI Lun. A Simulated Training System of Power Based on Interaction between C# Programs and Simulink[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2011:128-133.
- [8] MU S, LAISNE M. Mixed-signal modeling using Simulink based-C, Behavioral Modeling and Simulation Workshop[C] //Proceedings of the 2005 IEEE International,2005:1-3.
- [9] 李 强,王敏钢,杨 尧. 快速原型中 Simulink 模型的代码自动生成[J]. 电子测量技术,2009,32(2):28-31.
- [10] ZHENG L H, JIN J X. Investigation of HTS bulk magnet linear synchronous motors[C] //Proceeding of IEEE on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices,2009: 17-21.
- [11] 余丹萍,周 盛,江全元. CRH3 型动车组牵引传动系统的直接转矩控制研究[J]. 机电工程,2010,27(10):62-67.

[编辑:张 翔]