

列车仿真控制系统的研究与实现

王 超

摘要: 阐述了地铁列车仿真系统的现实意义, 通过构建数学模型, 搭建了完整的列车超速防护(ATP)和列车自动运行(ATO)的仿真系统, 重点研究了仿真模型的构建、软件架构设计、建模计算等核心问题。

关键词: 列车模拟; 仿真计算; ATP; ATO

Abstract: This paper expounds the practical significance of subway train simulation system. By constructing a mathematical model, a complete simulation system of automatic train protection, or ATP, and automatic train operation, or ATO, is built. We focus the research on the construction of simulation model, design of software architecture, modeling calculation and other core issues.

Key words: Train simulation; Simulation calculation; ATP; ATO

DOI: 10.13879/j.issn1000-7458.2016-04.15451

随着城市化进程的加快, 地铁已经逐渐成为许多城市交通战略中的核心力量。近年来 CBTC 系统研发已经成为国内市场的主流, 同时由于信号系统的高安全性要求, 在既有线进行试验很困难, 因此, 建设实验室列车仿真平台具有很大的现实意义。现依托 CBTC 项目, 重点研究地铁列车在列车超速防护(ATP)和列车自动运行(ATO)模式下的仿真模拟, 并提出了针对这 2 种运行模式的控制算法, 以及解决的关键性技术, 实现在实验室模拟列车的运行。

1 列车仿真系统环境原理

仿真控制系统运行环境主要包括列车仿真系统、车载信号系统、转速系统和轨旁系统。列车仿真系统是控制系统的核心组成部分, 主要分为 ATP 模拟列车控制和 ATO 模拟列车控制二部分。如图 1 所示。

当 ATP 控车时, 车载信号系统对列车仿真系统传输车载控制信息, 列车仿真系统通过接收到的信息, 实时调用列车仿真模拟算法, 模拟列车当前

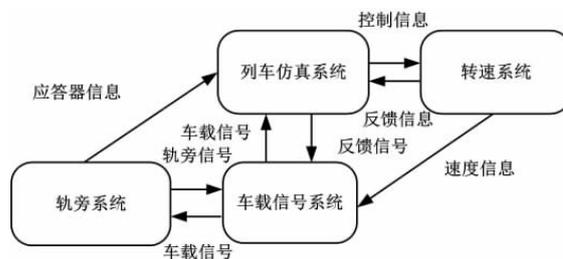


图 1 CBTC 列车仿真系统原理图

的运行状态, 转速系统实时仿真列车的运行速度, 并通过转速系统的反馈调节, 实时传输给车载信号系统, 另一方面车载信号系统实时采集脉冲速度信息。

当 ATO 控车时, 列车仿真系统实时采集车载 ATO 的控制电流信息, 调用列车模拟算法, 并根据列车现在所处的路况, 例如坡度等因素, 综合分析计算出列车的控制电流, 算出列车的当前速度。同时通过转速系统的反馈调节, 实时传输给车载信号系统, 另一方面车载信号系统实时采集脉冲速度信息。

车载信号系统是控制列车的信号设备, 是 CBTC 系统开发和测试的真实设备, 包括: 列车自动保护 ATP 系统和列车自动驾驶 ATO 系统。转速系统的原理是模拟列车的车轮转动, 通过速度传

王 超: 中国铁道科学研究院通信信号研究所 助理研究员
100081 北京
收稿日期: 2015-08-18

传感器读取的脉冲信号，为列车速度的模拟计算提供现实依据，在精度和可靠性保证的前提下，尽可能模拟出列车的速度。轨旁系统利用高性能的计算机服务器，通过模拟软件实现地面信号系统的仿真，为车辆仿真提供可靠的运行环境。

2 列车仿真系统软件设计

采用基于对象的软件架构设计，C++语言和Microsoft Visual Studio的集成开发环境，面向对象程序设计中的类、继承、多态和消息传递的特性，以及采用封装的技术将数据与逻辑分离，实现软件的模块化和可重用性。Microsoft Visual Studio是美国微软公司推出的主流Windows平台应用程序的集成开发环境，提供了高级开发工具、调试、数据库等功能，可以在平台上快速创建最先进的应用程序。

系统通过封装技术和消息机制高效开发出各个系统模块，作为程序的基本单元，将程序和数据封装其中，提高了软件的重用性、灵活性和扩展性。软件流程如图2所示。

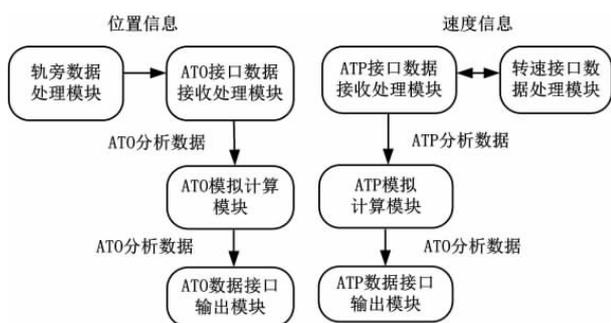


图2 列车仿真系统软件处理流程

3 ATP模式

3.1 ATP人工模拟运行

在ATP人工模式下，以牵引计算理论为基础，采用了等周期模拟算法，针对列车在不同驾驶手柄下的运行情况，进行分级模拟，计算列车在牵引、制动和惰行时的速度曲线。采取等周期模拟算法，系统的处理周期为100ms，由转速台的处理性能决定。因为在 $\Delta(t-1)$ 的时间内， $v_t = v_{t-1} + a \times \Delta(t-1)$ ，而在实际列车运行中，列车速度由 v_{t-1} 到 v_t 是一个连续的过程，所以为了更加精确的模拟列车运行，需要在 $\Delta(t-1)$ 时间内，让列车以

加减速度 a 由 v_{t-1} 逐渐变化为 v_t 。

3.2 ATP自动模拟运行

在ATP模式下，给列车施加牵引或制动需要依靠司机推杆来控制。在模拟控制时，由于需要列车在区间既要以较高速度运行，又不超过列车的保护速度，所以采用了ATP自动模式。列车模拟控制系统通过接收车载通信控制系统提供的车载控制信号，和轨旁模拟系统提供的控制信号，来计算列车运行速度，并实时控制转速台，采用信息反馈调节机制，通过转速台的反馈信息，实时反馈调节车载通信系统对列车的控制。ATP系统仿真逻辑如图3所示。

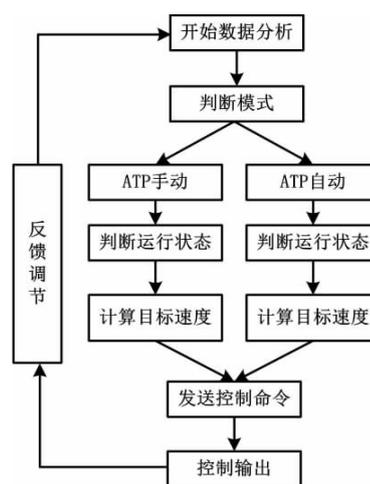


图3 ATP系统仿真逻辑图

4 ATO模式

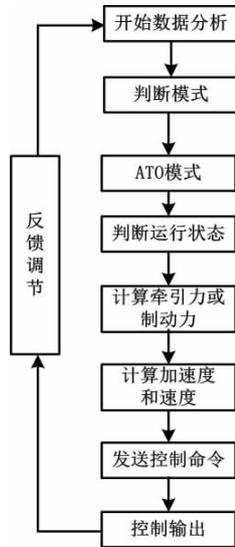
ATO系统是列车控制系统最主要的子系统，它利用车载和地面信息，实现对列车牵引和制动控制。其最主要的功能就是调速运行，在保证准确调速时实现定位停车，在满足舒适性的基础上调整速度，提高运行效率。所以ATO系统性能的好坏对轨道交通的发展起着至关重要的作用。

根据不同条件下列车的输出电流转换为相应的牵引或制动力，按质量带原理计算列车的单位附加阻力，从而得到总阻力，推导出列车在ATO模式下的计算模型为

$$F = \text{Force} + \text{Friction} + \text{BrakeForce}$$

其中：Force是根据ATO输出的牵引电流计算出的牵引力，BrakeForce是根据ATO输出的制动电流计算出的制动力，Friction是总阻力。根据现场的大量真实数据，可以拟合出Friction的修正

公式，例如： $-8.709 \times v \times (v - m) \times (0.006374 + 0.0003291 \times v)$ ， v 为列车的实时速度， m 为列车的总质量。由阻力公式可知，列车速度对阻力的影响成数量级变化。ATO 系统仿真逻辑如图 4 所示。



ATO 系统仿真逻辑图

5 仿真列车技术设计

仿真列车控制系统是根据模拟算法和外部仿真数据，综合模拟出列车的实时运行状况，实现了列车在自动保护模式和自动驾驶模式下的仿真运行。

5.1 仿真列车运行计算

仿真列车处理最重要部分是依靠仿真数据进行列车仿真模拟计算。列车仿真模型需要 2 类数据：仿真地图参数和仿真车载参数。仿真地图参数主要分为仿真运行轨迹的平纵断面、仿真运行途中的各种标记。仿真车载参数主要包括计算需要的各种仿真车辆参数。两种仿真参数需要提前录入到仿真程序中，并可以根据不同的仿真地图进行加载。仿真列车系统通过调用不同仿真车辆参数的数据和仿真地图参数的数据进行计算，如图 5 所示。

5.2 基于对象的架构开发

传统的面向结构的设计方法将功能看作是一系列函数的组合，采用顺序处理方式，这样在处理大规模复杂程序时容易造成效率的降低和结构的混乱。所以采用面向对象的架构设计方法，把功能点划分为对象，程序中包含的对象是相互独立同时也相互调用，每个对象都可以接收、处理和传递数据。通过把程序和数据进行封装，提高了软件的重

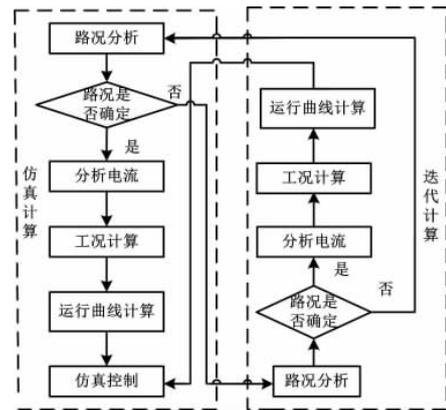


图 5 仿真列车系统计算结构图

用性和扩展性。仿真系统架构图如图 6 所示。

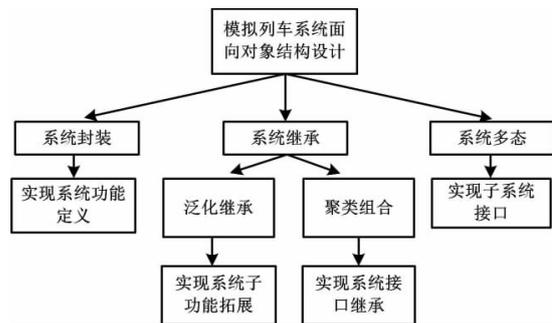


图 6 仿真系统设计架构图

6 结论与展望

本文以列车动力学为理论基础，采用等周期模拟算法，分别在 ATP 和 ATO 模式下构建相应的数学模型，实现了在实验室中对列车运行的模拟控制，并且成功的应用到国内实际工程项目中，取得了很好的调试效果。但也可以看到，对于 ATO 模拟的数学建模，可以考虑更多的影响因素，这也是下一步工作需要深入研究的地方。

参考文献

- [1] 毛保华,何天键,袁振洲等.通用列车运行模拟软件系统研究[J].铁道学报;2000,(01).
- [2] 石红国,彭其渊,郭寒英.城市轨道交通牵引计算算法[J].交通运输工程学报,2004,(09).
- [3] 邵华平,贾利民.基于计算机技术的一体化列车运行智能控制系统[J].中国铁道科学,2000,(04).
- [4] 王勃群,蔺小林,汪宁.基于 Matlab 参数自整定 PID 控制器的设计与仿真[J].自动化技术与应用,2009,(01).

(责任编辑:张利)