

高速列车节能运行策略和仿真软件的研究

访中国中车中央研究院的教授级高级工程师王晗博士

■ 胡 颖/本刊记者



王 晗 教授级高工、博士
中国中车中央研究院

利用运行仿真来计算运行过程，并构建一个节能的运行策略，成为解决节能运行问题的有效手段。

列车运行过程影响因素较多且求解复杂，在考虑多种线路条件及运行工况的情况下，仅采用数学推导的方式难以求解，因此利用运行仿真来计算运行过程，并构建一个节能的运行策略，成为解决节能运行问题的有效手段。研究列车运行的优化问题，并得出合理的操纵策略，具有极大的经济意义。为了对高速列车的节能运行策略及其未来发展有更多的了解，本刊记者特约采访了中国中车中央研究院的教授级高级工程师王晗博士，请他就相关问题给予解答。

高速列车的发展历程

电气应用：您好！非常感谢您在百忙之中接受我刊的采访！近年来，高速列车获得了蓬勃发展，请您首先介绍一下我国铁路的发展历程及应用情况。

王晗：我国铁路发展经历了六次大提速：1997年4月我国铁路第一次大面积提速，拉开了铁路提速的序幕，列车最高运行时速达到140 km。1998年10月第二次提速，列车最高运行时速为160 km。2000年10月第三次提速，初步形成了覆盖全国主要地区的“四纵四横”提速网络，全国旅客列车平均时速达到60.3 km。2001年第四次提速，铁路提速里程达到13 000 km，全国旅客列车平均时速达到61.6 km。2004年4月第五次大提速，全国旅客列车平均时速为65.7 km，并且开行了19对直达特快列车，最高时速达到160 km。2007年4月全国铁路第六次提速，新增“D”字头动车组，如北京、上海和广州开行了“D”字头动车组城际快车；2008年8月京津城际高速铁路投入使用，最高速度达350 km/h；2009年12月武广客运专线开通运行，运行速度达350 km/h；2010年2月和10月郑西高速铁路和沪杭城际高速铁路正式通车运营，最高时速达到350 km；2011年6月京沪高速铁路开始运营，设计时速接近400 km，实际运行速度为300 km/h。

改善运行策略 节约运行能耗

电气应用：在相同的线路条件及运行时分限制下，不同的操纵方法，会使列车运行能耗存在很大的差异。因此，控制并改善列车运行策略，节约运行能耗是铁路运输领域的研究重点。请您介绍一下列车优化控制的目标是什么？运行的策略有哪些？

王喆：列车运行优化控制的目标有两个：运行时间和运行能耗。节能运行控制的研究是在固定时分条件下进行的，否则讨论无意义，因为随着运行时间的增加，运行能耗呈逐渐下降趋势。

列车的运行能耗主要分为牵引系统能耗和辅助系统能耗两部分。辅助系统能耗占有较大比重，不能忽略，可按总能耗的10%进行简化估算。从能量守恒的角度来看，牵引力做功主要用于克服运行阻力、增加列车的动能及克服重力势能差。列车节能运行控制的理论基础是最优控制，节能运行求解过程可以看做是一个时间固定、有积分型性能指标以及末端固定的最优控制问题。

(1) 最小时分运行策略

列车运行过程计算是一个复杂的过程，因为有大量约束条件需要满足，其中有些是具有较强动态特性的约束，难以在计算过程中充分并迅速兼顾，这也使得难以建立一般解释性的优化模型。

为提高计算效率，避免传统模拟算法中经常发生“退回重算”，在初始化过程中应利用已有信息，充分考虑各种设置方案，将各处限速尽量计算清楚，从而可大大加快模拟的速度。

列车最小时分的基本运行模式为：以最大牵引力牵引到第一限速区，即牵引直至列车速度达到线路限速；接着在任意限速路线段，最大可能地采用限制曲线的匀速运行，若遇到低限速区段，则采用最大制动实现速度的过渡，若遇到高限速区段，则在出限速段后用最大牵引过渡到高限速段；在停车点前，采用最大制动力进行反推。其典型运行过程如图1所示。

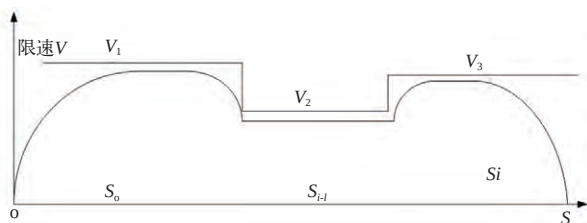


图1 最小时分典型运行曲线

(2) 固定时分运行策略

针对固定时分运行策略，需将整段线路进行分段处理，这样可以大大减少计算的工作量。因此，可转化为如何求局部段落固定时分运行、如何进行局部段落划分，以及如何确定局部段落限制条件的问题。实际线路中有很多可供分段的节点，这里选择限速及过分相的节点作为分段的节点，这样做的优点是有助于算法的构建以及数据的查找。

固定时分运行时，还需确定每个分段区间的运行时间。而每个分段采用固定的时间，会导致一定的误差，最终无法满足准确度的要求，可以利用时间和距离的关系，每到一个分段的开始节点就对分段时间进行计算。

这种策略采用的是距离分配整个线路段的富裕时间，单个分段的给定时间为该分段最短时分的运行时间与该分段根据距离分配出的时间之和，需要注意的是富裕时间一定为正，否则按照最短时间运行。采用该种策略可以很好地保证列车固定时分的运行。

电气应用：高速列车是个庞大复杂的现代化系统工程，面对如此复杂的系统，开发优化设计仿真平台至关重要。那么用于仿真平台的仿真软件包含哪些内容？各部分具有哪些功能？

王喆：限于高速列车的系统复杂性，仿真平台很难一蹴而就，需要足够大的时间跨度，仿真平台必须具备良好的可扩展性和兼容性。在开发初期，专注于熟悉的子系统建模和有能力实现的仿真模块搭建，并以此为主线，为其他功能模块规划拓展接口，构建其整体框架。

目前国内外关于高速列车综合仿真软件的研究比较少，而一套整体的电气综合仿真软件确实有着一定的难度，浙江大学曾就高速列车的牵引传动系统建立了基于Simulink和VC++的混合编程仿真软件，但是由于需要两者之间的数据交互和仿真，且仿真周期较长，同时它只针对牵引传动系统进行了仿真，并没有结合列车实际的运行状态，因而仿真距离列车实际运行依然存在着一定的差异。

优化设计仿真软件结构框架如图2所示。仿真软件主要包括基本数据设定、列车内部子系统建模、综合仿真、接口以及结果分析五部分。各部分的具体情况如下：

1) 基本数据设定。定义列车名称和基本编组信息，并对优化设计列车的顶层目标值进行设定。

2) 列车内部子系统建模。通过参数设计完成列车子系统的搭建，包括牵引传动子系统和制动系统；其他子系统随着仿真的深入将逐步搭建。牵引传动子系统建模

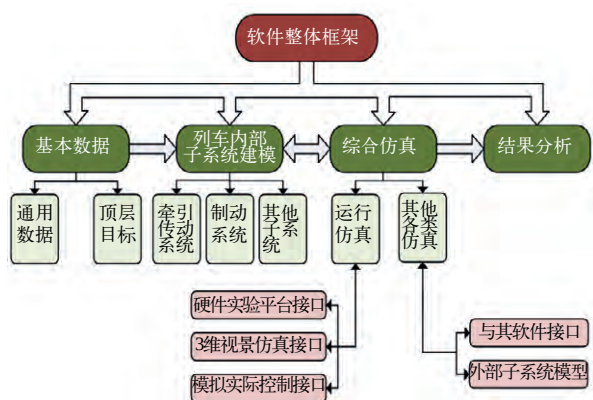


图2 优化设计仿真软件结构框架

包括列车牵引与制动特性曲线设计、牵引电动机电气特性与机械特性匹配、传动系统容量计算与匹配、变流器控制模型搭建以及热仿真模型搭建；制动系统建模包括制动力的分配和复合制动模拟。

3) 综合仿真。针对建立的列车模型进行多样化仿真，并验证列车性能，根据仿真结果优化列车模型。随着平台的完善，可进行的仿真逐渐增加，如轮轨关系动力学仿真、车体与空气的流固耦合仿真等。

4) 接口。为实现与硬件实验平台、三维视景仿真、司机模拟控制台、外部系统模型以及其他软件平台的数据交互和联合仿真，在综合仿真部分留有系列接口。

5) 结果分析。以实时展示、设计报告等多种形式对仿真结果进行分析，并对设计结果进行总结。

电气应用：目前线上运行的高速列车都是电力驱动的，您能简单介绍一下列车运行时电能是怎样传输，并最终驱动列车高速运行的么？

王喆：在高速列车中，列车电能传输并最终转化为牵引列车运行机械能的系统叫做牵引传动系统。其传递途径为：高速列车接触网高压交流电→受电弓→机车变压器（低压交流电）→整流器（直流电）→逆变器（VVVF）→牵引电动机→齿轮→旋转力矩→轮轨间粘着作用→机车牵引力。而再生制动时，轮轨间粘着作用提供给动车组制动力，其能量转化和传递途径与牵引时相反。动车组牵引传动系统简图如图3所示。

高速列车牵引网为列车提供25 kV的单相交流电，以南车CRH2型动车组为例，列车牵引时，受电弓的主要作用将25 kV的交流电可靠高效地传递到牵引变压器一次绕组；牵引变压器将单相25 kV的交流电转变为单相1 500 V的交流电（为列车驱动能量）和单相400 V的交流电（为列车照明、空调系统等提供能量）；接

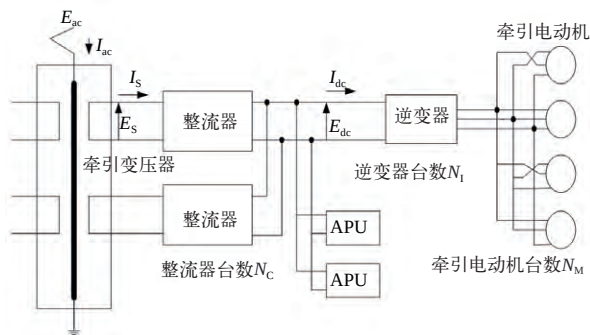


图3 牵引传动系统

着1 500 V的单相交流电经过整流器转化为直流3 000 V；随后通过合理的电动机控制策略，逆变器将直流3 000 V转化为幅值和频率均可以调节的三相交流电，用于调整电动机的转速和转矩，进而将电能转化为机械能；最后牵引电动机通过齿轮传动等装置驱动车轮转动，车轮与轨道相互作用，进而驱动列车高速运行。

在这个过程中，电能变换装置最终实现了由单相25 kV的交流电到幅值和频率均可以调节的三相交流电能的转换。之后通过电动机将电能转化为机械能，进而驱动列车运行。

高速列车未来的发展方向

电气应用：我们了解到，高速列车是一个大的系统平台，能否给我们简要介绍一下高速列车未来的主要技术发展方向？

王喆：正像您所说的，高速列车是一个大的系统平台，应该说没有其他的系统平台能够像高速列车那样几乎包含了所有的工科技术门类，甚至还包括内装、车体外形这些涉及工业设计的艺术门类。而且由于高速列车运行工况的恶劣性，这些工学技术在高速列车的应用中均需要具备非常高的技术标准。因此，高速列车的技术发展可以分成两个大致的方向：一是它依赖并促进各个工学学科各自的发展，从而支持高速列车的技术发展；另一点是大系统集成，也就是说如何以最优化的方式将这些技术结合在一起，形成一个最优化的系统。比如中车目前在和美国杜邦公司进行战略合作，共同开发强度更高、重量更轻的内装材料，这些材料技术能够使高速列车“瘦身”，进一步减少能耗；再比如为了满足高速列车乘客上网需求，需要开发基于380 km时速的车地高速通信系统，在车地通信距离如此之短、通信终端相对移动如此之快的极端情况下，在工程类通信项目中几乎很少看到。EA