# 高速列车节能运行策略实验验证方法

**控制并改善列车运行策略、节约运行能耗是铁路运输的传统研究领域，有着广泛的研究成果。为更加有效地比较不同运行策略的节能效果，验证运行策略的传动系统控制可行性，提出了高速列车节能运行策略的实验验证方法。运行策略将在电气传动系统连续负载模拟与运行仿真联合平台上进行验证。对三种列车运行策略进行了仿真和实验对比，仿真分析和实验结果相符合，验证了所提出的基于动态规划原理的固定时分策略优势，说明了实验验证方法的可行性。搭建实际列车等功率负载模拟平台，将有效验证节能运行策略的可行性。**

王　晗　邓小军／中国南车中央研究院　李　珂／北京交通大学电气工程学院

王　晗／高级工程师

*关键词／Keywords*
*节能运行策略·*
*负载模拟平台·*
*实验验证方法·*

在相同的线路条件及运行时分限制下，针对不同的操纵方法，列车运行能耗存在很大的差异。以西安铁路局安康段为例，在安康—达州区段，运行距离276 km，单列车一次运行，好的操纵方法耗电量4 900 kW·h，差的操纵方法耗电量5 800 kW·h，两者相差900 kW·h，节约电量达到了15.5% [1]。研究列车运行优化问题，对得到合理的操纵策略有极大的经济意义。

列车运行过程影响因素较多，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。仿真模型中，列车往往被简化为力学模型，忽略了牵引传动系统的效率问题；仿真结果为力和速度的数列，对应着电动机的转矩和转速，应该考虑如何控制电动机。

## 列车运行策略

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两部分：牵引系统能耗和辅助系统能耗。辅助系统能耗也占有较大比重，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作是一个时间固定、有积分型性能指标以及末端固定的最优控制问题。假设其牵引力及制动力能够正常工作，不考虑空转滑行的影响，并设质量为单位1，列车的状态方程为

$$\begin{aligned} v(s) &= u_t(t) f_t(v) - u_b(t) f_b(v) - w(v) + g(s) \\ t(s) &= 1/v \end{aligned} \tag{1}$$

节能优化目标为

$$J = \int_0^S u_t(t) f_t(v) \mathrm{d}s \tag{2}$$

限制条件为$v(0)=0$，$v(s)=0$，$t(S)-t(0)=0$；控制约束条件为$0 \leqslant u_t(s) \leqslant 1$，$0 \leqslant u_b(s) \leqslant 1$，$v(s) < \bar{v}(s)$。

式中，$v(s)$为列车在$s$处的速度；$\bar{v}(s)$为列车在$s$处的线路限速；$t$为列车当前运行时刻；$S$为区间给定长度；$u_t(s)$、$u_b(s)$分别为列车在$s$处的牵引控制量和制动控制量；$f_t(v)$、$f_b(v)$分别为列车在速度$v$时的最大牵引力、最大制动力；$w(v)$为列车在速度$v$时的基本阻力；$g(s)$为列车在位置$s$时的附加阻力。



中国知网　https://www.cnki.net

### 1. 基于动态规划原理的固定时分策略

南澳大学的调度和控制组（Scheduling and Control Group，SCG）研究所利用最小值原理从理论上证明了最优控制所需要满足的必要条件，在较长线路运行时列车节能控制应该包括四个阶段：最大加速、惰行、匀速运行和最大制动[2]。动态规划原理是求解最优控制的一种方法，它可归结为一个基本的递推关系式，该关系式能够使决策过程连续转移，并将一个多阶段决策过程划分为多个单阶段决策过程，使求解简化[3]。

由于列车限速条件的限制，在惰行阶段结束后制动阶段的运行过程也基本确定，因此可以将惰行阶段与制动阶段合并为一个阶段，即SCG所提出的车运行过程四个阶段简化为三个阶段。对应三个阶段划分的共有四个转移状态，即开始运行时的静止状态A、中间加速转换为匀速运行的状态点为状态B、匀速运行转换为惰行的状态点为状态C以及停止运行的状态点为状态D。列车运行中间状态如图1所示，根据列车运行的特点表征中间状态的变量设定为列车速度$v$，列车位移$S$，其对应的中间状态的数量由选取的间隔决定，间隔越小其计算结果越准确，但相应的中间状态越多，筛选及计算时间越长。本文所采用的速度间隔为1 km/h，距离间隔为1 000 m。

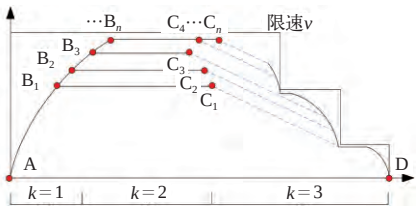



图1 列车运行中间状态

第$k$阶段的状态变量为$S_k$及$v_k$，决策变量为$S_{k+1}$，其状态转移方程为

$$v_{k+1}(s)=v_k(s)+\int_{t_k}^{t_{k+1}}[u_t(s)f_t(v)-u_b(s)f_b(v)-w(v)+g(s)]\mathrm{d}t \tag{3}$$

评价函数为

$$J=\int_{s_k}^{s_{k+1}}u_t(s)f_t(v)\mathrm{d}s \tag{4}$$

基于动态规划原理的固定时分策略，通过阶段划分、状态划分，将节能运行问题转变为如何选择中间状态的问题，使整个阶段转移过程满足时间要求并使能耗最小。根据中间状态的设定，可确定整个过程的状态变量列车运行速度以及列车运行位置。

### 2. 作为对比的运行策略

（1）最小时分运行策略

列车以最大牵引力牵引直至列车速度达到线路限速，在限速区段最大可能地靠近限制速度进行匀速运行。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制动。其典型运行过程如图2所示。

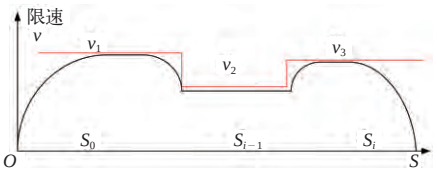



图2 最小时分典型运行过程

（2）分配富裕时间的固定时分策略

实现在给定的时间条件下，模拟司机在运行过程中进行反复惰行的操纵方式。该方法以最小时分运行为基础，将固定时分相较于最小时分的时间富裕分配到各个区段，消耗运行时分。其计算流程如图3所示。

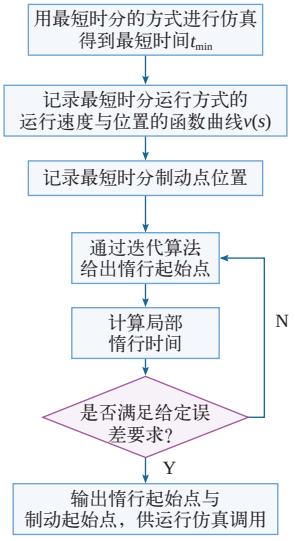



图3 分配富裕时间的固定时分流程



中国知网 https://www.cnki.net

## 列车运行策略实验验证平台

### 1. 负载模拟平台

牵引电动机负载模拟平台，通过负载电动机为牵引电动机加载模拟各种运行工况，以此在实验室条件下构建接近列车实际运行工况下的牵引电动机运行环境，从而进行性能验证[4]。平台描述和公式推导在文献［4］中有详细描述，本文不再赘述。

### 2. 运行策略验证平台

将上述负载模拟平台与开发的列车运行仿真软件进行数据交互，构建列车运行策略验证平台。图4为平台结构框图，图5为平台实物图。针对特定线路以及列车数据，选定运行策略，运行仿真软件将计算出列车牵引力、速度以及运行时间等物理量。分别为牵引电动机和负载电动机提供转矩和转速指令，使平台牵引电动机能够模拟列车牵引电动机运行工况。

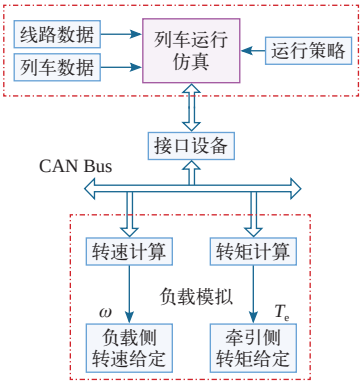



图4　平台数据交互结构框图

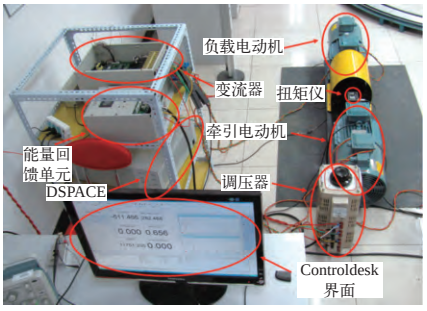



图5　平台实物图

运行仿真系统计算出的数据反映的是列车牵引电动机的运行数据，实验室负载模拟平台为小功率模拟平台，仿真数据不能直接控制平台电动机运行，需进行数据转换。平台牵引电动机转矩指令可表示为

$$T_e = k_T \frac{RF(v)}{N\eta_g i_g} \tag{5}$$

式中，$N$为列车总的电动机台数；$\eta_g$为齿轮效率；$i_g$为齿轮传动比；$R$为轮径；$F(v)$为列车牵引力；$T_e$为牵引电动机转矩；$k_T$为平台转矩缩放系数。

平台转速指令表达式为

$$\omega = k_v \omega_T = \frac{k_v v i_g}{2\pi R} \tag{6}$$

式中，$\omega_T$为列车电动机转速；$R$为车轮半径；$k_v$为平台转速缩放系数。

根据式（5）、式（6）得到列车牵引能耗$J'$和负载平台牵引电动机能耗$J$的关系

$$J' = \int_0^t F(v)v\,\mathrm{d}t = \frac{2\pi N\eta_g}{k_T k_v}\int_0^t T_e\omega\,\mathrm{d}t = \frac{2\pi N\eta_g}{k_T k_v}J \tag{7}$$

由式（7）可知，负载模拟平台牵引电动机输出能耗与实际列车牵引电动机输出能耗成比例关系；若忽略齿轮效率的变化，则成正比。即负载模拟平台跟随运行仿真软件所提供的控制指令完成连续负载模拟，可验证列车运行策略节能效果和传动系统控制的可行性。

## 仿真与实验

本文以CRH2A型动车组为对象展开仿真和实验。具体参数如表1所示。

表1　CRH2A型动车组主要参数

| 车型 | CRH2A |
|---|---|
| 最高运行速度/ km·h$^{-1}$ | 200 |
| 牵引功率/ kW | 4 800 |
| 标准定员质量/ t | 411 |
| 基本阻力/ N·t$^{-1}$ | $8.63v^2+0.072\,95v+0.001\,12$ |
| 电动机数量/台 | 16 |
| 单轴牵引功率/ kW | 285 |
| 齿轮传动效率（%） | 0.95 |
| 齿轮传动比 | 3.036 |
| 新轮直径/mm | 860 |

### 1. 仿真结果

由前文所述，基于动态规划原理的固定时分



中国知网　https://www.cnki.net

策略通过阶段划分和转移状态选择能够得到多种运行方式，不同的中间状态对应不同的总能量消耗。运行仿真可筛选能耗最小的一种作为节能运行策略。针对京沪线徐州—蚌埠段，设定运行时间为50 min 30 s，不同中间状态选取下的运行仿真结果对比如图6所示。

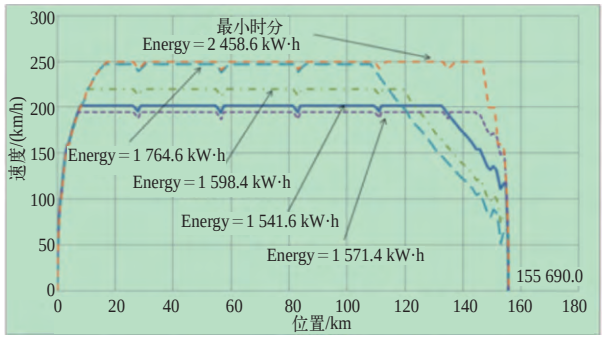



图6　不同中间状态运行仿真结果对比

同一种车型、同一线路条件以及同一运行策略，给定不同的固定十分，能够得到一条时间与运行能耗的对应关系曲线。京沪线徐州—蚌埠段，CRH2A型动车组设定不同的固定时分，对基于动态规划原理的固定时分策略和富裕时间分配的固定时分策略进行仿真对比，如图7所示。当固定时分较小时，两种算法得到的能耗值相近，因为此时两种策略所得结果都相似于最小时分运行结果；另外，基于动态规划原理的能耗普遍小于分配富裕时间的能耗。

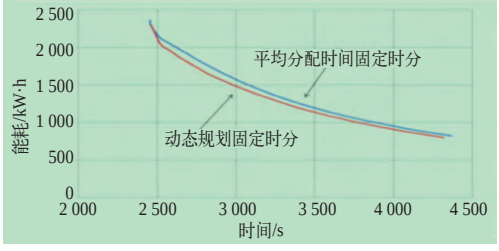



图7　两种固定时分策略能耗对比

### 2. 实验验证

选取京沪线徐州—蚌埠段，采用CRH2A型动车组，设定固定时分为50 min 14 s，转矩缩放系数$k_T$为0.002 631；转速缩放系数$k_v$为2.668 3，分别采用富裕时间分配的固定时分策略和基于动态规划原理的固定时分策略进行实验。实验波形如图8和图9所示，图中转速指令为仿真软件计算的列车运行速度，实测数据为负载模拟平台电动机转速，可以看到电动机转速对指令值跟随良好。

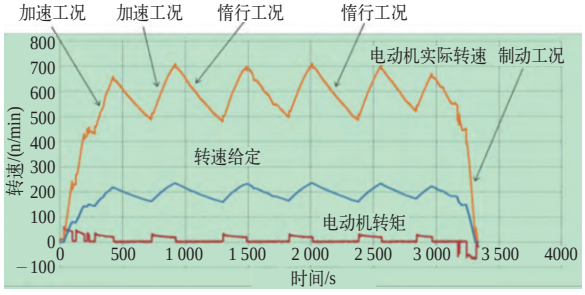



图8　分配富裕时间策略实验波形

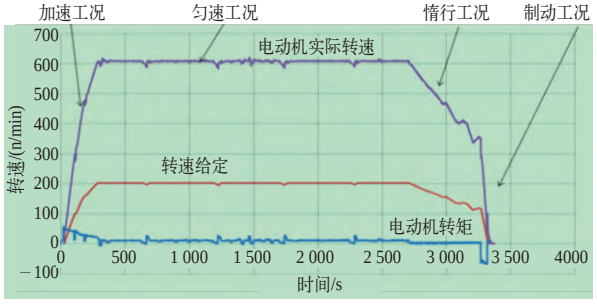



图9　基于动态规划原理策略实验波形

将两种运行策略下的电动机能耗进行对比，如表2所示。基于动态规划原理的能耗比分配富裕时间的能耗低5%左右，而通过运行仿真平台仿真计算出的能耗节约比例也为5%左右，平台运行结果与仿真分析一致。因此能够说明，动态规划策略确实能够更为有效地利用能源。

表2　能耗比较

| | 仿真能耗/kW·h | 平台运行能耗/W·h |
|---|---|---|
| 分配时间策略 | 1 560.2 | 90 |
| 动态规划策略 | 1 470.9 | 85 |
| 节约能耗比值 | 约5.7% | 约5.5% |

根据式（7），将上表实验平台能耗转换成等效列车能耗。在富裕时间分配的固定时分策略下，列车等效能耗为1 223.4 kW·h；基于动态规划原理的固定时分策略等效能耗为1 155.5 kW·h。其与仿真结果有一定的差距，原因有：①负载模拟平台所测能量为逆变器输入端能量，未计及变压器以及整流器的能量损耗，同时缺少了辅助供电



中国知网 https://www.cnki.net

系统能耗。②运行仿真中，忽略了电气设备效率和功率因数的变化，为不变常数。

尽管受限于实验室条件，上述两个原因不易克服，但是借助电气负载模拟平台，列车运行策略方法的可行性得到了验证。

## 结束语

针对列车节能运行策略缺少实验验证其节能效果和控制可行性的问题，本文提出了构建列车运行仿真与传动系统负载模拟综合平台的解决方案，推导了平台牵引电动机能耗与列车牵引电动机能耗的缩放关系。为方便最优控制理论的引入，给出了列车运行过程的状态方程和能耗模型。在最小时分策略和分配富裕时间的固定时分策略作为参照的基础上，研究了基于动态规划原理的固定时分策略。通过仿真结果和实验结果的对比，验证了基于动态规划原理的固定时分策略的节能优势，也证明了所提列车运行策略验证平台的可行性。若能搭建列车等功率负载模拟平台，甚至将牵引传动系统实物平台与运行仿真软件相结合，不但能进行列车运行策略的验证，还能研究列车传动系统在实际工况下的性能，如温升、设备寿命等。

### 参考文献

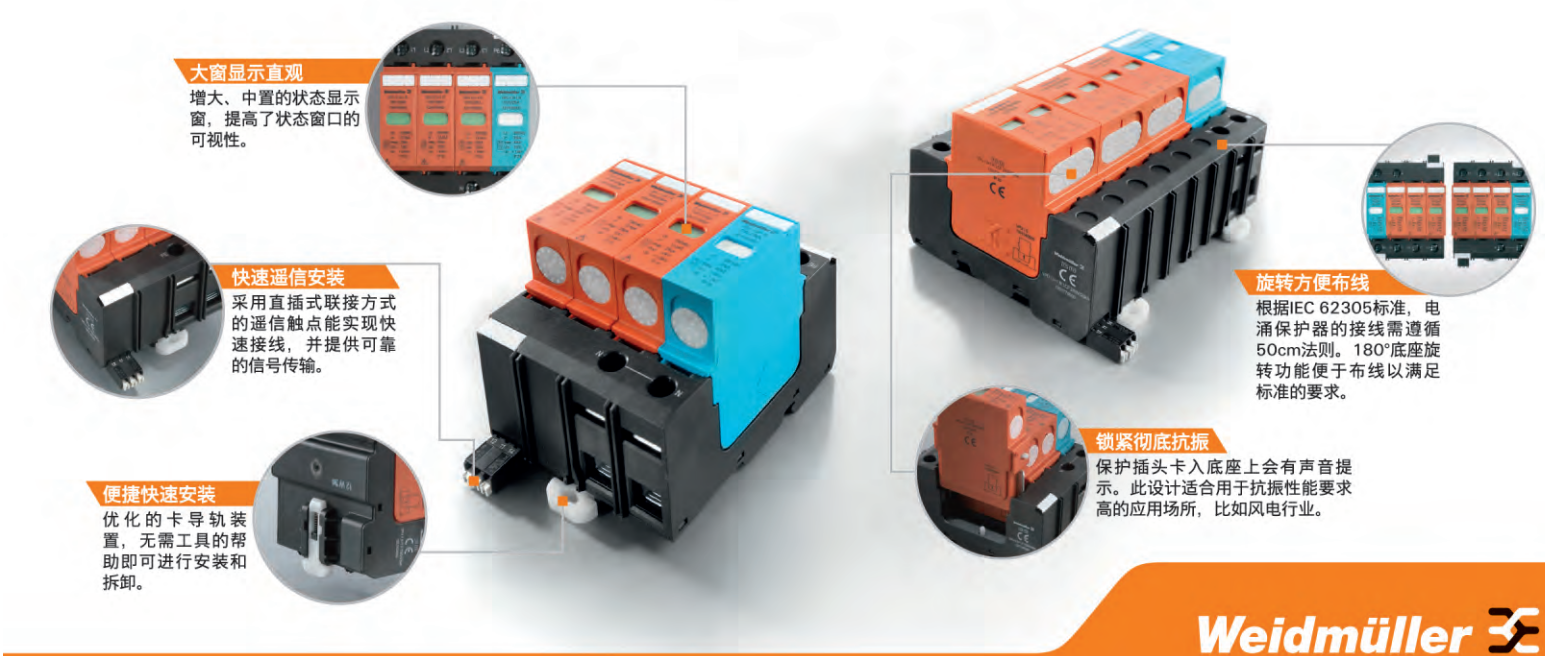
[1] 余进．多目标列车运行过程优化及控制策略研究[D]．成都：西南交通大学，2005.

[2] 曾剑群．动车组牵引计算仿真系统的研究[D]．北京：北京交通大学，2009.

[3] 李珂．固定时分条件下的列车节能运行[D]．北京：北京交通大学，2012.

[4] 李思杰．牵引电机负载模拟系统的转矩控制方法[J]．电气传动，2010（40）：52-60.

（收稿日期：2014－09－15）EA




Weidmüller

魏德米勒VPU系列电涌保护器
—低压供电系统的升级版电涌保护卫士

魏德米勒VPU系列电涌保护器用于低压供电系统，符合2012年IEC/EN 61643-11国际标准，为您提供持久、安全、前瞻性的雷电和浪涌保护解决方案，并简化维修。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话：86-21-22135008 网址：www.weidmueller.com.cn

魏德米勒在华辉煌二十年

中国知网 https://www.cnki.net