

多编组重联机车同步控制方法设计与实现

文/中车株洲电力机车有限公司产品研发中心 叶 锋 颜 昱 赵东旭 吴俊博

机车运行的安全性和平稳性非常重要。提出了一种基于TCMS的同步控制方法，通过主控单元CCU计算级位大小、输出力大小、运行工况和整车输出力大小等，从控单元的CCU结合本单元相关状态执行主控单元指令，保证了不同单元间控制的一致性，有效地提升了机车运行的安全性和平稳性。

目前电力机车为了灵活应用于不同运行环境、不同载客或载货量需求，基本都采用多单元灵活编组的方式运行，比如神华机车就有两单元（8轴）编组、三单元（12轴）编组、四单元（两个8轴外重联或无线重联方式）编组和六单元（24轴）的编组方式，各单元间采用WTB总线进行有线重联或者采用LTE进行远程无线重联。而重联机车不同机车单元间，控制功能的同步性对机车的安全性和平稳性等性能指标尤为重要，由于各机车单元间的速度差异、网络延时等各种原因，主控单元（即司机操作的单元）与从控单元（非司机操作的单元）控制的同步性存在或多或少的的问题，本文设计出了一种多编组重联机车同步牵引电制动控制的方法，保证了重联机车不同单元间良好的控制同步性和一致性，大大提升机车驾驶的舒适性。

系统功能说明

列车控制与管理系统（简称TCMS）作为机车的控制大脑，负责整车级所有控制功能，其采用列车级（不同单元/车辆间）控制和车辆级（单元内部）控制，列车控制级采用绞线式列车总线WTB进行通信，车辆控制级采用多功能车辆总线MVB进行通信，TCMS采用分布式控制技术，即分布采集及执行，中央集中控制与管理的模式。由WTB/MVB 网关模块 GWM（也是中央处理模块CCU）、事件记录存储模块 ERM、数字量输入输出模块 DXM、数字量输入模块 DIM、模拟量输入输出模块 AXM 和微机显示屏 HMI 等组成，通过MVB 与传动控制单元TCU、制动控制单元 BCU和制动显示屏 LCDM 等进行通信。网络控制系统拓扑结构如图1所示，每个单元内部，由各自的CCU

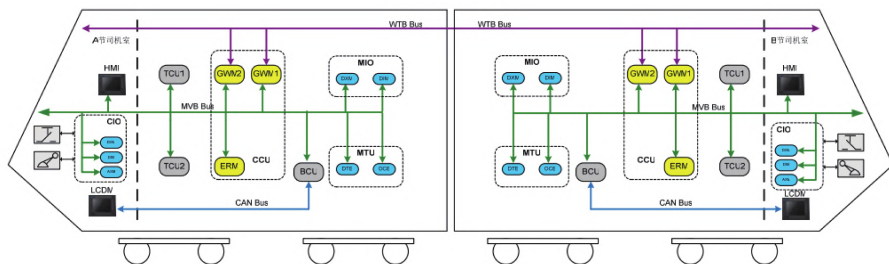


图1 两单元（8轴）编组TCMS网络拓扑图

负责自身的控制，整个重联编组机车，又由主控单元的CCU统一管理控制。

同步控制方案设计

TCMS采集主控司机室司机的操作指令，并结合整车的状态，通过CCU计算出机车当前需要发挥的级位大小、牵引制动工况以及加减速斜率等，最终输出给终端执行机构（TCU、BCU和硬线电路等），从而控制编组机车执行的一致性，在此控制过程中，有几个关键控制项点，分别是：级位控制、输出目标力控制和整车输出实时力控制，另外就是不同控制单元间的指令传输延时。针对以上几个关键控制点，具体实现方式如下。

1. 级位控制

重联电力机车由多个重联单元组成，各个重联单元又都是由自身主控CCU进行控制。重联机车的输出力是由机车所处的工况、级位信号和封锁条件等多种因素决定。重联机车在正常运行条件下，只有一个单元有司机操作，称之为重联机车的主控单元，重联机车的各种操作信号都是来自于主控单元（通过IO采集或者MVB网络获得信号），主控单元CCU根据司机的实际操作指令，包括司控器手柄、大闸和BCU通信状态等信号，来判断实际应该输出的级位信号。

1) 电制动级位判断

司控器手柄输出牵引级位和电制级位信号，大闸输出空气制动或者电制动申请级位，其中司控器手柄输出的是纯电制动级位请求，对应的100%级位信号等于TCU电制动特性曲线的外包络线值，而大闸输出的则是空电联合请求的电制动级位，其所对应的100%级位信号等于最大常用的空气制动力，大闸信号通过BCU判断后，将对应电制动级位信号和电制动有效信号发送给CCU，当司控器电制动级位信号和BCU发送的电制动级位信号同时有效时，CCU取两者较大者作为整车电制动力级位申请值。

机车的制动力由空气制动力和电制动力共同组成，为了避免空气制动力与电制动力的异常叠加，在施加电制动力时，必须知道空气制动力的状态，因此如果制动控制单元BCU通信不正常，为了安全起见，机车需要禁止电制动力的发挥，由空气制动来承担机车的制动力。

大闸申请的电制力计算

$$F_B = F_{air} L_B \quad (1)$$

式中， F_B 表示BCU申请电制力，单位kN； F_{air} 表示机车最大常用空气制动力，单位kN； L_B 表示BCU申请的电制动级位信号，百分比。

由于多编组机车采用统一级位信号进行控制，为便于控制的一致性，将大闸申请的电制力换算成司控器对应的级位信号

$$L_{CB} = \frac{F_{air}}{F_{tcu}} L_B \quad (2)$$

式中， L_{CB} 表示转换后的BCU级位信号； F_{tcu} 表示电制动特性曲线外包络线。

电制动特性曲线外包络线为（以某一车型为例）

$$F_{tcu} = \begin{cases} 0 & 0 \sim 2 \text{ km/h} \\ \frac{691 v - 1382}{3} & 2 \sim 5 \text{ km/h} \\ 691 & 5 \sim 75 \text{ km/h} \\ \frac{14400 \times 6.3}{v} & 75 \sim 120 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3)$$

当司控器电制动级位 L_{MH} 和BCU制动级位 L_{CB} 同时有效时，取两者较大者为最终电制动级位信号 L_{EB} ，即

$$L_{EB} = \max(L_{CB}, L_{MH}) \quad (4)$$

(2) 牵引级位判断

牵引级位只由司控器控制，因此只要牵引手柄在牵引位，机车没有施加大闸制动，则司控器输出的级位信号就等于机车输出的牵引级位信号。

综上所述，机车级位信号判断方法如图2所示。

2. 输出目标力控制

级位计算完成后，需要根据最终级位来确定机车发挥的目标力大小。而数据协议中级位信号一般采用无符整形数据类型，在进行实际需要发挥力时，就需要首先判定级位信号的正负，级位为正，表示牵引级位，级位为负，表示电制级位，然后根据当前机车运行模式来判定输出力的取值，级位模式下（对应的定速模式下，实际输出力与级位无关，由控制器根据目标速度与实际速度之差来自动调节）只有主控单元进行计算，从控单元不需要计算，直接执行主控单元的指令即可。

主控车判定如下：

机车处于空电联合模式或者电制动模式下，则

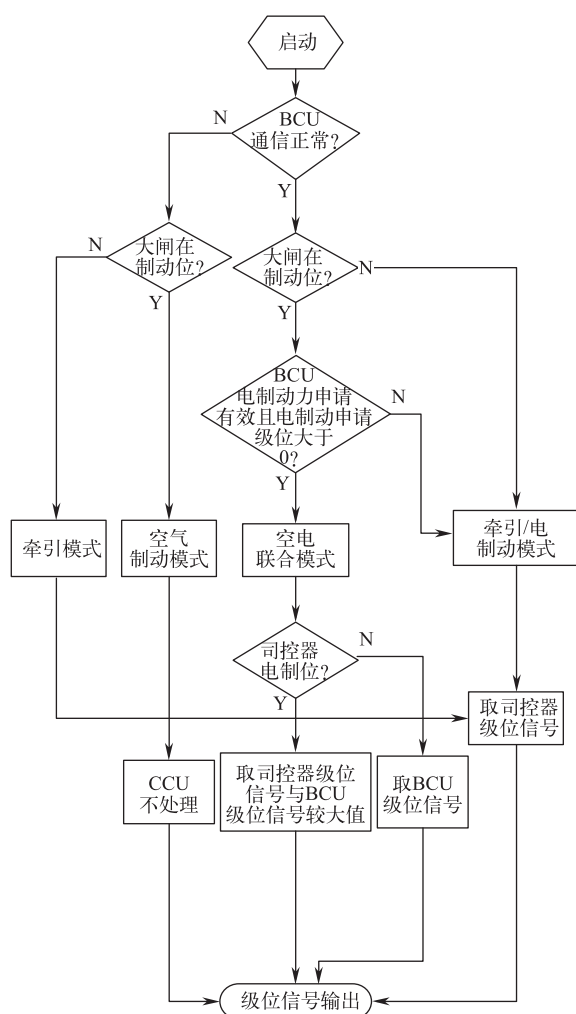


图2 级位信号判断

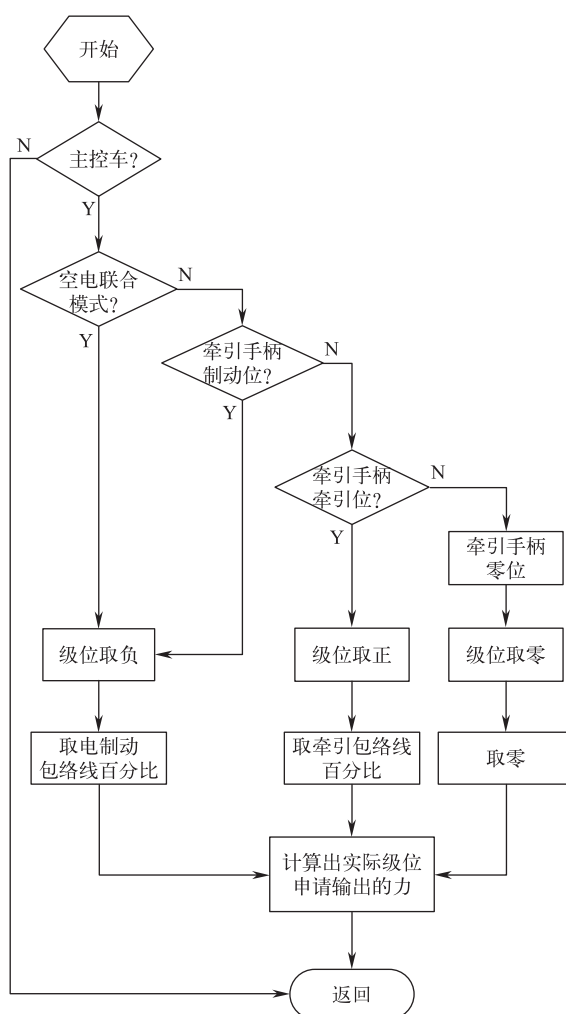


图3 级位模式下的输出力计算

判定级位信号为负。

如果主控车判定机车处于牵引工况下，则判定级位信号为正。

如果司机手柄在大零位，则级位为0。

判定牵引工况或者制动工况后，根据实时采集的机车速度和牵引特性曲线，就可以计算出需要输出的目标设定力，具体控制流程如图3所示。

3. 整车输出实时力控制

机车可以运行手动驾驶模式或者定速模式，在手动驾驶模式运行时，输出目标力的大小由司机控和大闸级位大小来决定，并通过斜率控制后输出实时发挥的力，当在定速模式运行时，输出实时力的大小及正负由设定速度与实际速度之差来决定，通过PID算法来实时自动调节输出力的大小，与当前司机控级位信号大小无关，整车最终输出实时力判断方法如图4所示。

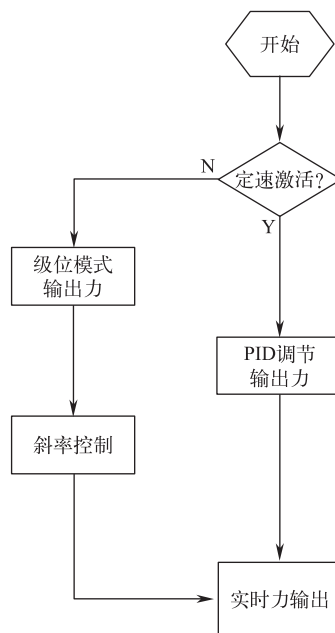


图4 整车输出力计算

下面对上述控制过程中两个关键点进行说明。

(1) PID控制器设计

在定速控制模式下，输出力根据目标速度与实时速度之差，实时自动调节，根据控制对象的特征，这里采用增量PID算法，具体算法为

$$\begin{aligned} \text{add} = & K_p[e_{(k)} - e_{(k-1)}] + \\ & K_i e_{(k)} + K_d[e_{(k)} - 2e_{(k-1)} + \\ & e_{(k-2)}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $e^{(k)}$ 代表本次偏差； $e^{(k-1)}$ 代表上一次的偏差，以此类推；add代表每周期输出增量。

为了防止过度调节导致牵引电制频繁切换，设置一定的调节死区，此处以1 km/h为例，当实时速度与目标速度相差在1 km/h以内时，输出力保持不变，即周期增量为0。

为了满足控制器对机车复杂运用环境的适应性，对P、I、D参数进行模糊化处理，设定多组调节参数。

(2) 斜率控制

对于手动驾驶模式下，由于司机设定的目标力变化很快，考虑到机车平稳性及设备的安全性因素，将目标力进行了斜率限制，斜率控制输出后的力作为机车当前实际需要发挥的实时力，斜率控制主要分为以下几种。

非过分相的正常工况，整台车以50 kN/s斜率加载减载。

手动过分相工况，整台车以75 kN/s斜率加载减载。

自动过分相非分相强迫工况，整台车依据牵引电制力、速度和分相距离计算后得出。

自动过分相分相强迫工况或者封锁工况，整台车以200 kN/s斜率加载减载。

经过PID调节或者斜率控制之后，当实时力大于0时，则判定机车处于牵引设定工况；当实时力小于0时，则判定机车处于制动设定工况。主控单元将此工况设定指令发送给从控单元，从控单元依据此指令来控制本单元处于牵引工况或者是制动工况，从而保证主控单元和从控单元工况的同步性。

主控车将当前时刻需要发挥的力（斜率控制后的输出力）通过机车牵引/电制动特性曲线换算成当前时刻实际应该发挥的级位百分比信号，并将此信

号发给从控单元，从控单元收到该信号后，又通过牵引/电制动特性曲线换算成当前时刻需要发挥的力，使得从控单元能够发挥与主控机车一样的力，从而保证了主控车与从控车输出力大小的一致性。

4. 不同编组间延时补偿控制

通过上述方法，已经实现控制指令及控制力大小的一致性，但实际项目中，不同编组间及主控车间和从控车间，由于网络传输的时延，也会导致影响整车控制的同步性，依据IEC61375标准，网络传输延时计算如下：

对于MVB+WTB的网络，传输延时计算公式为

$$\begin{aligned} T_{\text{delay}}[\mu\text{s}] = & 6.0 \times L + T_{\text{repeat_max}} \times \\ & N_{\text{rep}} + T_{\text{source_max}} + \\ & 2.0 \times T_{\text{gateway_max}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中，6.0 $\mu\text{s}/\text{km}$ 是最坏情况下的一条传输线上每公里的延时；L是线路的电气长度，单位为km（大于物理距离）； $T_{\text{repeat_max}}$ 是中继器可能引入的最大延时（每个方向为3.0 μs ）； N_{rep} 是中继器的数目； $T_{\text{source_max}}$ 是源设备的最大延时6.0 μs ； $T_{\text{gateway_max}}$ 是网关设备的最大延时100.0 ms。

对于MVB网络，典型应用的特征周期为32 ms，按10%的周期抖动计算，存在3.2 ms的时间抖动。对于WTB网络，典型应用的特征周期为25 ms，按10%的周期抖动计算，存在2.5 ms的时间抖动。因此，采用MVB+WTB网络的传输时间偏差在几百ms。根据实际项目测试，延时大约为400 ms（不同编组长度及总线，延时不一样）。

所以，为了保证多编组机车各单元控制的同步性，主控车在计算出最终控制指令并发送往从控车后，延时400 ms，主控车再执行控制指令，从而就可以最大程度的保证主控车与个从控车指令执行的同步性。

结束语

本设计方法已通过多个项目长期试验验证及优化，目前能够很好地保证重联机车主控单元与从控单元间牵引电制动控制的同步性和一致性，极大改善不同控制单元间不协调造成的对机车的冲击，提升重联机车整体的安全性和平稳性。EA