

2型高速动车组的制动力分配和可靠性建模

王孝延¹, 吴萌岭¹, 赵惠祥²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200331; 2. 《同济大学学报(自然科学版)》编辑部, 上海 200092)

摘要: 电制动力和空气制动力配合是当今高速动车组和新型城市轨道交通车辆制动系统的主要制动方式. 2型高速动车组(CRH2)的电制动力和空气制动力以一动一拖的编组为单位进行协调配合, 不同制动工况下电制动力和摩擦制动力的组成方式多样. 通过分析其结构和制动力构成的特点, 运用旁联结构建立了编组制动系统的可靠性模型. 根据相似产品可靠性数据, 对所建立的可靠性模型进行了定量计算.

关键词: 中国高速铁路; 动车组; 制动系统; 制动力分配; 可靠性建模

中图分类号: U 270.35

文献标识码: A

Braking Force Distribution of CRH2 and Its Reliability Modeling

WANG Xiaoyan¹, WU Mengling¹, ZHAO Huixiang²

(1. Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 200331, China; 2. Editorial Department of Journal of Tongji University (Natural Science), Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Electro-pneumatic braking system is becoming more and more popular. Electric braking cooperates with pneumatic braking in a unit of CRH2 composed of one motor car and one trail car. There are various configurations for electric braking force and pneumatic braking force. So it gives difficulty in setting up the reliability model. This paper, presents an analysis for the configuration of CRH2 braking force. And the reliability model is set up with standby structure. After that, quantitative calculation is carried out by using reliability model mentioned.

Key words: China railway highspeed; electric multiple units; braking system; distribution of the braking force; reliability modeling

干线铁路速度和城市轨道交通停站精度要求的提高, 促使轨道交通车辆制动系统技术不断向前发展. 作为制动系统主控机构的制动机由最初的手制动机、空气制动机、真空制动机发展为现在普遍采用的电空制动机^[1]. 微机控制电空制动机作为电空制动机的一种, 与空气制动机相比, 由于采用了电信号传递制动指令, 提高了列车前后车辆制动动作的一致性. 同时, 与其他电空制动机相比, 由于采用微机对制动力进行计算和分配, 不仅提高了制动力控制的准确性和响应速度, 而且便于多种制动方式的协调控制, 因此成为当前高速列车和新型城市轨道交通制动系统的主要制动方式.

轨道交通是大运量的载运工具, 对高速列车来说, 关乎乘客安全的制动系统的可靠性尤为重要, 必须对其进行系统的可靠性评估. 与传统的空气制动机以单节车为单位进行制动力控制不同, 微机控制电空制动机的制动力多以若干节车组成的制动控制单元为单位进行制动力分配, 对电制动力和空气制动力在单元内各车之间进行协调配合, 不同的工况电制动力和气制动力的构成各异, 这为制动系统的可靠性建模提出了新的挑战. 目前, 国内尚无针对电空配合制动系统以制动控制单元为研究对象的可靠性建模方面的文献. 本文拟以 China Railway High-speed 中的 2 型动车组(CRH2)的微机控制直通电空制动系统为对象, 提出一种可靠性建模方法.

1 CRH2 的制动力分配

传统的干线铁路通常采用动力集中的方式, 即列车的头尾两节车是具有牵引能力的动车, 中间各车为没有牵引能力的拖车. 动车组和新型城市轨道交通车辆较多采用动力分散结构, 动车和拖车互相

收稿日期: 2009-06-05

基金项目: 铁道部动车组引进技术消化吸收再创新项目(20070923)

作者简介: 王孝延(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通制动系统可靠性与动态评估技术.

E-mail: wangxiaoyan_sh@foxmail.com

吴萌岭(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通制动技术. E-mail: wuml_sh@163.com

搭配形成编组,CRH2 动车组为 8 节编组,1 辆动车和 1 辆拖车组成一个制动控制单元,如图 1 所示^[2].

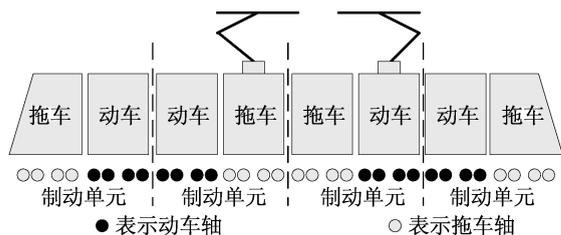


图 1 CRH2 动车组编组结构

Fig.1 Configuration for braking unit of CRH2

CRH2 动车组采用再生制动和空气制动联合作用的复合制动模式,由于再生制动具有能量利用率高,无机械磨损的优点,因此在单元内实行再生制动优先,摩擦制动延迟控制的制动力控制模式.每个单元的制动力由再生制动力和摩擦制动力两部分构成,制动力大小的运算以及两种制动力的协调配合由制动控制单元(BCU)完成,它含有微处理模块,是制动控制的运算中心.再生制动是由动车上的牵引电机实现的,制动时电机转变为发电机,将列车的动能转换为电能反馈回电网,因此再生制动力只能由动车产生;而动车和拖车各有一套独立的摩擦制动系统,故动车和拖车均可产生摩擦制动力.制动单元的工作原理如图 2 所示.

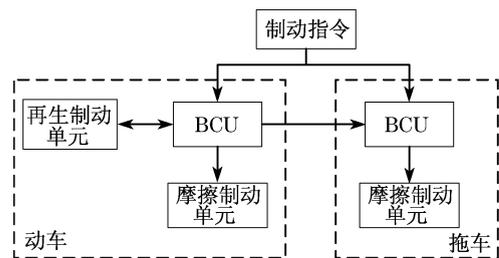


图 2 CRH2 动车组制动单元工作原理

Fig.2 Operational principle for braking unit of CRH2

由于高速时再生制动具有良好的特性,而在低速时却难于提供稳定的再生制动力,因此在列车速度低于 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 或再生制动出现故障时,动车和拖车只用其摩擦制动完成制动作用.而在其他工况,则是优先采用动车的再生制动力,不足的制动力先由拖车的摩擦制动力补充,再由动车的摩擦制动力补充.根据动车再生制动力大小的不同,将 CRH2 的制动分为工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4,不同工况单元的制动力分配情况如表 1 所示,其中 B_M 为动车所需制动力, B_T 为拖车所需制动力, B_m 为动车所提供的再生制动力.工况 1 表示低速或再生制动系统

故障,动车无法提供再生制动力,此时动车和拖车各自用摩擦制动承担自身所需的制动力;工况 2 表示有再生制动力,但数值较低,不能满足动车所需制动力,此时动车再生制动全部发挥,动车摩擦制动补足自身不足的制动力,拖车摩擦制动补足自身所需制动力;工况 3 表示再生制动力已超过动车所需制动力,但小于单元所需总制动力数值,此时动车再生制动力全部发挥,除负担自身所需的制动力外,负担拖车所需部分制动力,拖车的摩擦制动力补足余下的制动力需求,动车的摩擦制动力不起作用;工况 4 表示再生制动力数值足够大,已超过单元所需的总制动力,此时动车再生制动力负担单元所需总制动力,动车和拖车的摩擦制动均不起作用.

表 1 CRH2 各制动工况制动力分配

Tab.1 Braking force distribution for CRH2 under various conditions

工况	制动力分配			
	B_m	动车再生制动力	动车摩擦制动力	拖车摩擦制动力
1	0	0	B_M	B_T
2	$(0, B_M]$	B_m	$B_M - B_m$	B_T
3	$(B_M, B_M + B_T]$	B_m	0	$B_T + B_M - B_m$
4	$(B_M + B_T, \infty)$	$B_M + B_T$	0	0

以上单元内制动力的计算和分配由动车 BCU 和拖车 BCU 协调配合完成.动车 BCU 除计算自身所需制动力外,还要计算单元所需总制动力,并将电制动不足部分的信息传递给拖车 BCU.拖车 BCU 计算自身需要的制动力数值,并接收动车 BCU 的协作信号,对不足的制动力进行补充.因此,制动力的优先级由高到低分别为动车的再生制动力、拖车的摩擦制动力和动车的摩擦制动力.

2 CRH2 制动系统的可靠性建模

为了对产品的可靠性进行预计和估算所建立的模型就是产品的可靠性模型,它描述了系统及其组成单元之间的故障逻辑关系^[3].系统的可靠性模型来源于系统的功能模型,一个好的可靠性模型应能较好地反映系统的工作原理.

典型的可靠性模型有串联模型、并联模型、旁联模型和表决模型等.旁联模型表示冷储备的逻辑关系,构成模型的各个通路具有一定的优先级,初始工作通路故障时切换至第一备用通路,第一备用通路故障时切换至第二备用通路,以此类推,如图 3 所示.

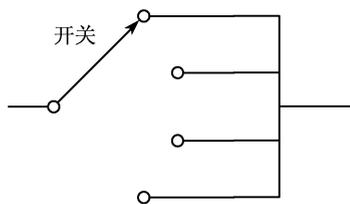


图3 旁联模型原理

Fig.3 Operational principle for standby model

根据 CRH2 动车组制动力分配的方式和特点, 通过对该型动车组制动力分配原理的分析, 采用旁联模型进行可靠性建模. 现将制动力分配过程假设为以下 3 个步骤: 首先, 动车 BCU 根据与再生制动

单元的通讯, 确定再生制动是否可用; 其次, 再生制动判定有效后, 动车 BCU 根据再生制动力的数值和编组所需制动力的计算结果确定制动工况, 并对是否需要拖车摩擦制动补足做出判断. 最后, 动车 BCU 计算再生制动力和拖车能够提供的摩擦制动力之和, 并与单元需要的总制动力比较, 对是否需要动车摩擦制动力做出判断. 在这里, 动车和拖车的 BCU 起了开关的作用.

据此, 本文用含有 3 个开关的旁联模型来建立 CRH2 制动系统的可靠性模型, 所建立的系统可靠性框图如图 4 所示.

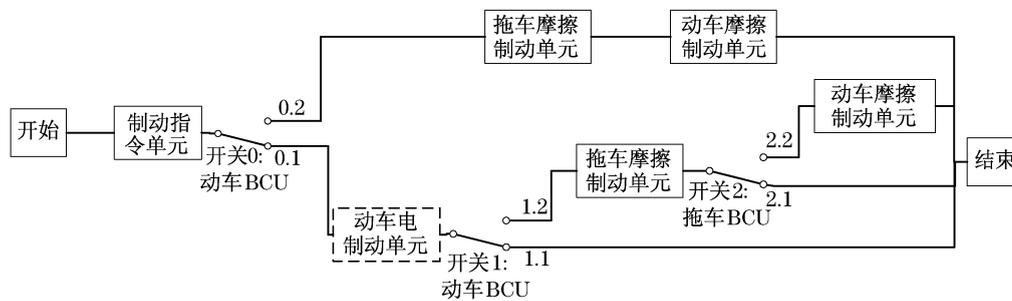


图4 制动系统可靠性模型

Fig.4 Reliability model for braking system

由图 4 可得, 4 种制动工况可分别由图中的 3 个旁联开关 0, 1, 2 的不同位置组合实现. 设 $M.N$ 表示开关 M 位于第 N 个位置, 则开关位置组合 0.2 可实现工况 1; 组合 0.1, 1.2 和 2.2 可实现工况 2; 组合 0.1, 1.2 和 2.1 可实现工况 3; 组合 0.1 和 1.1 可实现工况 4. 因此图 4 所建的可靠性模型能够较好地反映 CRH2 动车组的电空配合制动力分配情况, 而模型中充当“开关”的转换装置即为动车 BCU 和拖车 BCU. 由于旁联模型的工作单元代表了旁联开关的初始状态, 而 CRH2 动车组默认状态为电制动力充足, 因此图 4 中开关 0, 1, 2 的初始状态也较好地反映了制动系统制动力分配的初始状态.

由于旁联模型在计算上的复杂性, 在此需要寻找一种适合工程计算的模型简化解. 根据可靠性旁联模型的含义, 工作单元故障时, 由转换装置转接到另一个单元继续工作. 而可靠性模型中的开关 1、开关 2 的工作单元无具体部件, 也即该分支可靠度为 1. 因此从可靠性理论的角度, 这两个开关相当于被“短路”, 如图 5 所示. 从制动系统的角度理解, 图 5 的含义是将动车、拖车的摩擦制动作为动车再生制动的冗余冷备份. 该简化模型忽略了再生制动和摩擦制动同时作用的情况(即工况 2 和工况 3), 当再生

制动失效后在动车 BCU 的控制下, 动车组的相应单元切换到摩擦制动模式. 根据制动系统的实际情况, 工况 2 和工况 3 在实际运用中发生的概率远小于工况 1 和工况 4, 忽略后对计算结果影响不大. 因此可将图 5 所示的可靠性简化模型作为 CRH2 制动系统可靠性的工程化模型, 据此进行可靠性预计.

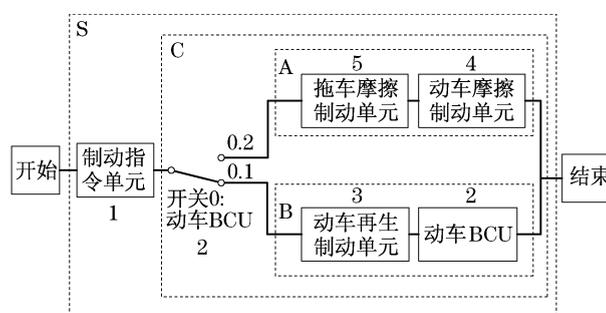


图5 制动系统可靠性简化模型

Fig.5 Simplified reliability model for braking system

3 可靠性模型的应用

根据相似产品法, 以同类型某制动系统可靠性数据估算本文所研究制动系统各部分的平均无故障工作时间 T , 如表 2 所示.

表2 制动系统各部分平均无故障工作时间
Tab.2 Mean time between failure for parts of braking system

代号	名称	T/h
1	制动指令单元	22 357.86
2	动车 BCU	166 666.7
3	动车再生制动单元	201 694.2
4	动车摩擦制动单元	58 068.64
5	拖车摩擦制动单元	22 144.96

为运用前述模型对制动系统可靠性进行定量计算,将图5中制动系统各组成部分用表2中的代号表示,并划分虚单元A,B,C,S^[3],如图5所示.

为了计算方便,在此假设制动系统各部件的寿命服从指数分布,依照可靠性理论中关于串联、旁联以及虚单元可靠性计算式,将表2中数据代入,则虚单元A和B平均无故障工作时间为

$$T_A = \frac{T_4 T_5}{T_4 + T_5} = 16\ 031.3\ \text{h} \quad (1)$$

$$T_B = \frac{T_2 T_3}{T_2 + T_3} = 91\ 257.5\ \text{h} \quad (2)$$

根据可靠性理论中旁联模型的含义^[4],虚单元C的平均无故障工作时间为

$$T_C = T_A + \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) T_B = 16\ 031.3 + 91\ 257.5 \exp\left(-\frac{t}{166\ 666.7}\right) \quad (3)$$

由此得制动系统的平均无故障工作时间表达式为

$$T_S = \frac{T_1 T_C}{T_1 + T_C} = \frac{16\ 031.3 + 91\ 257.5 \exp\left(-\frac{t}{166\ 666.7}\right)}{1.717 + 4 \exp\left(-\frac{t}{166\ 666.7}\right)} \quad (4)$$

根据指数分布系统的可靠度与平均无故障工作时间之间的关系得制动系统的可靠度为

$$R_S(t) = \exp\left[-\frac{1.717t + 4t \exp\left(-\frac{t}{166\ 666.7}\right)}{16\ 031.3 + 91\ 257.5 \exp\left(-\frac{t}{166\ 666.7}\right)}\right] \quad (5)$$

制动系统的可靠度 $R_S(t)$ 随运营时间变化的曲

线如图6所示.

由图6曲线可以看出制动系统完成制动任务的可靠度随时间变化的趋势,运营部门可以据此制定相应的维护保养计划,以使制动系统具有良好的可用性.

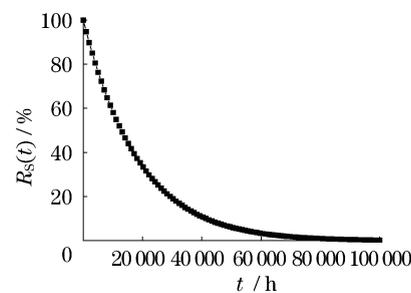


图6 制动系统的可靠度曲线

Fig.6 Reliability figure for braking system

4 结语

CRH2 动车组的制动力在 1 辆动车和 1 辆拖车组成的制动控制单元内采取电制动和空气制动相结合的复合制动方式;动车组制动时,制动控制单元内 3 种制动力投入使用的优先级由高到低依次为:再生制动力、拖车的摩擦制动力和动车的摩擦制动力.

利用旁联模型建立的 CRH2 高速动车组制动控制单元的可靠性模型不仅适用于 CRH2 型动车组的制动系统,同时也适用于电空配合的其他型动车组或城市轨道交通车辆的制动系统,具有普遍性.

参考文献:

- [1] 饶忠. 列车制动[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
RAO Zhong. Train brake[M]. Beijing: China Railway Publishing House,2006.
- [2] 彭俊彬. 动车组牵引与制动[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
PENG Junbin. Traction and braking for EMU[M]. Beijing: China Railway Publishing House,2007.
- [3] 曾声奎,赵廷弟,张建国,等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
ZENG Shengkui, ZHAO Tingdi, ZHANG Jianguo, et al. Tutorial for system reliability analysis and design[M]. Beijing: BUAA Press,2001.
- [4] 王少萍. 工程可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.
WANG Shaoping. Engineering reliability [M]. Beijing: BUAA Press,2000.