

专家访谈

# 350 km/h 高速动车组制动技术的最新进展

高速列车作为高速铁路新技术的核心,其技术进展日新月异。在 350 km/h 速度级高速列车中,最难解决的核心技术之一是制动系统的研制。中国铁道科学研究院首席专家钱立新研究员,就 350 km/h 高速动车组制动技术的最新进展这一专题接受了本刊编辑部的专访。钱立新研究员重点介绍了 350 km/h 高速动车组在制动系统设计时,采用强化复合制动的方式,加大动车再生制动功率,提高制动盘的制动功率,用微处理器控制的制动控制器协调各种制动方式的作用。同时指出首次采用电阻制动作为安全制动方式确保安全制动距离,也为减轻制动系统簧下质量创造了条件。



钱立新(1941-),研究员,博士生导师,现为中国铁道科学研究院首席专家。

问:当前世界许多国家都在积极发展高速铁路,请就世界高速铁路发展的基本概况作一介绍。

答:目前世界高速铁路的发展形势可以说是“如火如荼,有条不紊”:欧洲联盟的泛欧高速铁路网计划正在逐步实施;日本新干线网络的建设正在按照“全国新干线铁道基本规划”执行;其他正在修建高速铁路的国家和地区(如韩国、中国台湾省等)进展迅速,欧、美、澳洲很多国家正在规划修建高速铁路。据 2002 年底统计,世界已投入运营的新建高速铁路里程已达 5 435 km,而在 2007 年按计划将建成的高速铁路里程达 3 267 km,具体情况参见表 1。

进入 21 世纪以来,高速列车最具综合性的技术指标——最高运行速度已从 300 km/h 提升到 350 km/h。法国第四代 AGV 绞接型动力分散式高速动车组,最高运行速度就是 350 km/h,已于 2002 年底投入试运行;

表 1 世界高速铁路的发展概况(2002 年)

已投入运营			2007 年计划建成		
序号	国家	长度/km	序号	国家或地区	长度/km
1	日本	2175	1	日本	415
2	法国	1520	2	韩国	426
3	德国	796	3	中国台湾	345
4	西班牙	471	4	德国	171
5	意大利	246	5	法国	302
6	比利时	142	6	法国/意大利	79
7	法国/英国	52	7	意大利	586
8	丹麦/瑞典	18	8	西班牙	651
9	丹麦	15	9	英国	72
			10	比利时	62
			11	比利时/荷兰	158
合计		5435	合计		3267

德国为西班牙设计的 ICE350E 独立型动力分散式高速动车组,最高运行速度也已达到了 350 km/h,样车目前已经问世;Talgo 350 型高速列车是西班牙与庞巴迪公司合作研制的新型高速倾摆式动车组,最高运行速度 350 km/h,2002 年在西班牙高速线路上投入试验;韩国在引进 KTX 高速列车基础上,又自主研究开发了 KHST 新型高速动车组,样车也已问世,最高运行速度 350 km/h。日本 E2-1000 系高速动车组 2002 年经过改进与试验,可以达到最高运行速度 360 km/h 的目标,期望在与航空竞争中处于优势地位。2003 年日本 800 系高速列车也已问世,各项性能

指标有新的进展,将在2004年3月九州新干线开通时投入运营。

各国在研制高速列车,尤其是350 km/h速度级的高速列车中,最难解决的核心技术之一是制动系统的研制。也可以说,制动是高速列车进一步提高速度的制约因素。

问:作为350 km/h高速动车组核心技术之一的制动技术有哪些特征?

答:综合分析起来看,350 km/h高速动车组的制动技术有如下三个方面的特征。

特征之一就是强化复合制动,保持较高的制动减速度。

随着运行速度从300 km/h提高到350 km/h,势必延长列车的制动距离。但为了保持高速铁路必要的运输能力高速列车的运行间隔时分不应过长,因此350 km/h高速列车在设计时必须考虑缩短制动距离,要求保持 $1.0 \text{ m/s}^2$ 左右的紧急制动减速度,为此采用了下列措施:

一是减少列车的制动空走时间。无论采用什么形式的制动控制系统,基本上都是电气指令式的电空制动方式,一般其制动空走时间仅为0.1 s,制动缸的压力上升时间在1.2 s左右,比电磁直通式或自动制动式能有效地缩短制动距离,表2列出了具体数据。

表2 高速列车(16辆编组)空走时间值

	电空制动			空气制动
	电气指令式	电磁直通式	自动制动式	列车管压力控制
空走时间/s	0.1	0.2	1.0	3.5
制动缸压力上升时间/s	1.2	2.2	5.0	9.5

二是强化复合制动方式。一辆轴重为14 t的4轴高速车辆在270 km/h高速下制动,要消散170 MJ的能量;而在350 km/h速度下制动时,能量消散达266 MJ,增加了68%。这些能量足以使670 L水从0℃煮沸。因此,350 km/h高速动车组在设计中必须强化复合制动方式,不仅拖车每轴采用3~4组高制动功率的盘形制动装置,而且动车上加大了再生制动的制动功率。必要时还采用了非黏着制动(涡流轨道制动、磁轨制动),如AGV高速动车组在拖车上就采用了涡流轨道制动。

强化复合制动的控制是高速动车组制动系统的关键技术。高速动车组动车、拖车编组方式及辆数可有不同型式,但整列动车组是一个整体,电气动力制动、空气制动、非黏着制动等是以协调方式起作用的。制动控制系统是以微处理器作为控制中心,优先采用电气动力制动,动力制动力不足时,由制动控制单元发布电气指令,通过EP电空单元,使制动缸动作产生空气制动,补充动力制动不足的部分。在故障时均能导向安全,并与中央诊断系统相连接。图1,图2展示了法国TGV高速动车组及德国ICE高速动车组所采用的复合制动控制系统的框图。

强化复合制动的控制是高速动车组制动系统的关键技术。高速动车组动车、拖车编组方式及辆数可有不同型式,但整列动车组是一个整体,电气动力制动、空气制动、非黏着制动等是以协调方式起作用的。制动控制系统是以微处理器作为控制中心,优先采用电气动力制动,动力制动力不足时,由制动控制单元发布电气指令,通过EP电空单元,使制动缸动作产生空气制动,补充动力制动不足的部分。在故障时均能导向安全,并与中央诊断系统相连接。图1,图2展示了法国TGV高速动车组及德国ICE高速动车组所采用的复合制动控制系统的框图。

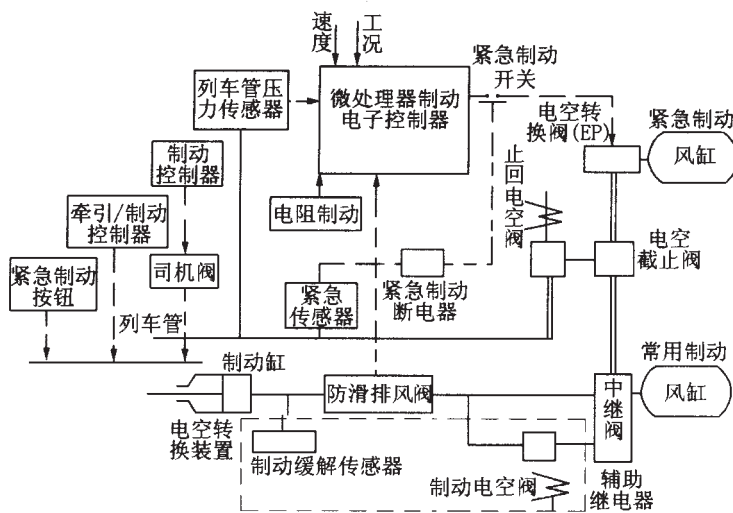


图1 法国TGV高速动车组制动控制系统框图

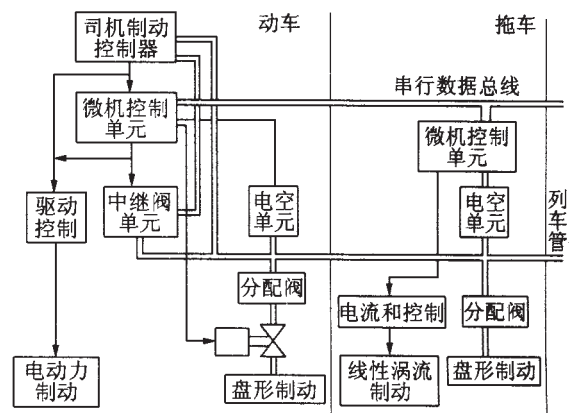


图2 德国ICE高速动车组制动控制系统框图

三是保证高速制动时车轮不滑行。所有高速动车组在设计时几乎都采用了高性能微机控制的防滑器,以提高可利用的制动黏着系数。一般说采用了电子防滑器能提高20%左右的可利用制动黏着系数值。日本在500系高速动车组上还采用了踏面增黏闸瓦,用于提高轮轨间可利用的制动黏着系数值,取得了一定的成效。500系列车在300 km/h速度下,用增黏闸瓦时紧急制动距离为4 000 m,比不用增黏闸瓦时的4 900 m缩短了22.5%,具体参数见表3。增黏闸瓦有可能在新型E2-1000系高速动车组上采用。

表 3 紧急制动距离

	日本		法国	德国			西班牙	意大利	瑞典
	500 系	700 系	TGV-2N	ICE2	ICE3	ICE350E	AVE	ETR500	X2000
紧急制动距离/m	4 000	3 870	3 500	2 900	3 500	3 900	3 600	4 000	1 190
紧急制动平均减速度/ $m \cdot s^{-2}$	0.87	0.73	1.0	1.1	1.2	1.0	0.95	0.87	1.40
初速/ $km \cdot h^{-1}$	300	270	300	280	330	320	300	300	200

特征之二就是采用电阻制动确保安全制动距离。

国际铁路联盟已明确规定,在高速列车无法从接触网正常受流取电的情况下,其紧急制动距离也应保证符合规定的要求。也就是说,对于最高运行速度为 350 km/h 的高速动车组,其受流失效时的安全制动距离应保持与正常的紧急制动距离一致。

对于最高运行速度 300 km/h 的高速动车组,如 ICE3, TGV-2N, 500 系等,在受流失效时都是采用纯空气盘形制动作为安全制动唯一手段,以达到安全制动距离。但是对于 350 km/h 的高速动车组,由于制动盘的制动功率已超出其极限值范围,仅采用空气盘形制动已无法满足安全制动距离的要求。为此,350 km/h 动力分散式电动车组制动系统设计时,在动车上采用了安全电阻制动的新技术,即在受流失效时,采用蓄电池的电能,通过逆变器为牵引电机励磁,让制动能量在电阻带上消散。这种电阻制动方式虽然属于动力制动,但却仅在电网失电时应用,是一种安全制动,并且电阻器的容量可较小,以减轻自重。德国 ICE350E, 西班牙 Talgo350, 及法国 AGV 高速动车组均采用了这种安全制动方式。仅日本 E2-1000 系高速动车组由于轴重较轻,目前安全制动仍采用空气盘形制动方式。几种系统的具体比较见表 4。

表 4 世界上速度 300 km/h 及以上高速列车制动系统比较

车型	500 系	700 系	E2-1000	TGV-2N	AGV	ICE3	ICE350E	Talgo350
最高设计速度/ $km \cdot h^{-1}$	300	(258)300	(270)300	300	350	330	350	350
编组型式	16M	12M4T	6M2T	2L8T	12M <sub>0</sub> 8T <sub>0</sub>	4M4T	4M4T	2L12T
制动控制装置	数字式电气指令直通式	数字式电气指令直通式	数字式电气指令直通式	模拟式电气指令直通式	模拟式电气指令直通式	模拟式电气指令自动式	模拟式电气指令自动式	模拟式电气指令直通式
备用制动	简单电空直通式	简单电空直通式	简单电空直通式	空气制动	空气制动	空气制动	空气制动	空气制动
动车制动	再生+轮盘(2)	再生+轮盘(2)	再生+轮盘(2)	再生+轮盘(2)	再生+电阻+轮盘(2)	再生+轮盘(2)	再生+电阻+轮盘(2)	再生+电阻+轮盘(2)+轴盘(1)
拖车制动	/ (全动车)	轮盘(2)+涡流盘(1)	轮盘(2)+轴盘(2)	轴盘(4)	轴盘(2)+涡流轨(2)	轴盘(2)+涡流轨(2)	轴盘(3)	轴盘(4)

注: M—动车; T—拖车; L—动力车; M<sub>0</sub>—动轴; T<sub>0</sub>—非动轴。

特征之三就是尽可能降低簧下质量。

作为非黏着制动方式的涡流轨道制动,具有对钢轨无磨耗,高速时制动力大,制动力可控制,可在常用制动时使用,结冰时没有任何失效的危险等优点。因此在高速列车上,涡流轨道制动方式比磁轨制动方式得到更多的采用,如德国 300 km/h 的 ICE3 型高速动车组的拖车每台转向架上,就采用了两组涡流轨道制动器及两组轴盘式铸钢盘形制动装置。但是在 ICE350E, Talgo350 等 350 km/h 的高速动车组上,由于采用了电阻制动作为安全制动方式,使整个制动系统降低簧下质量以改善高速运行时的动力学品质具备了条件,就不采用涡流轨道制动,改而采用每轴 3 组(ICE350E)或每轴 4 组(Talgo350)轴盘式制动盘。其原因在于采用涡流轨道制动,每辆车将增加簧下质量 2.4 t。此外,涡流轨道制动功耗较大,1 m 长的涡流轨道制动靴,需耗电 37 kW。

最高运行速度 275 km/h 的日本 300 系高速动车组的拖车上,每轴采用两组轮盘式锻钢盘及两组涡流盘形制动装置。涡流盘形制动属于黏着制动型的动力制动方式,制动功率与动车上的再生制动相近,在高速制动时能发挥很好的作用。但是其质量较大,一组涡流盘形制动装置的质量约为 1 t 左右,因此 700 系高速动车组为了降低簧下质量,每轴改为采用两组轮盘式锻钢盘及一组涡流盘形制动装置,减少了一组涡流盘形制动,加大了动车上再生制动的功率,取得了与 300 系相同的制动距离。而在 E2-1000 系高速动车组的拖车上进而采用两组轮盘式锻钢盘及两组轴盘式锻钢盘,不采用涡流盘形制动,目的也是为了降低簧下质量,保证高速运行时具有更好的动力学品质。