**超高速列车气动增阻制动方法及对策**

**Method and Measurement of Aerodynamic Braking for Super High-speed Trains**

**1 科学问题概述**

2020年8月中国铁路集团总公司颁布《新时代交通强国铁路先行规划纲要》，进一步提出“加强可实现工程化、产业化的前沿技术研究，自主创新建立时速400公里及以上高速铁路技术标准等成套关键技术体系”。然而高速列车运行速度的提升势必导致列车制动距离的延长，对现有铁路信号制式、高速铁路运输效率、列车碰撞事故安全以及突发自然灾害应对措施产生显著影响。

更高速度列车制动距离延长问题实质上是由列车制动动能提升所致。车辆的制动动能（），最终需要车辆制动力（）在制动距离（*S*）上做功来耗散，即。车辆的制动力在设计阶段就充分利用了车辆轮轨的黏着，后续提升空间有限，可将车辆制动力视为常数。当车辆速度从350公里增加到400或450公里时，车辆制动动能分别增加了31%或65%，即在制动力不变的情况下，制动距离则相应提升31%或65%。

以350km/h速度等级高速列车提速至400km/h为例，考虑列车编组数量为八车且单根轴重为14t，当列车运行速度为400km/h时，其制动动能，采用现有350公里高速列车制动方式可以产生的制动动能为。基于现有现有350公里高速列车制动技术，若保证400km/h高速列车可以在6.5km内停车，其制动动能仍旧短缺648兆焦，即。因此，需要在现有350km/h高速列车制动技术的基础上引入新型制动方式，填补列车提速造成的制动动能短缺，进而实现超高速列车的快速短距制动。

**2 科学问题背景**

从工程角度而言，更高速度速度等级轮轨列车只能在已经建设好的高速线路上运行，即必须满足于现有高速铁路的信号制式。现行《铁路技术管理规程》（高速铁路部分）规定我国现有350km/h速度等级“复兴号”高速列车的制动距离为6.5公里，400km/h高速列车的制动距离也仅有6.5公里，如果不能在6.5公里的范围内制动停车，铁路的信号制式就必须发生改变，这便丧失了高速列车在既有高速线路上行驶的初衷。此外，若制动距离增加，列车之间的间隔必须增大，导致区间上列车密度大幅降低，进而导致高速铁路运力下降。只有保持制动距离不变，才能在提速的前提下增加发车密度。列车制动距离过长还会引发列车碰撞事故，因此，必须研究气动增阻耗能技术，使列车在较长的距离外快速制动，降低列车在碰撞时的初速度。另外，当列车在遇到地震、洪水以及塌方等突发自然灾害时，制动距离过长亦将严重威胁高速列车行车安全。因此，必须开展高速列车短距快速制动技术研究，进而实现对列车制动距离的有效控制。

**3 科学问题的研究进展**

列车制动力，即轮轨之间的相互作用力可分为两类：一类以钢轨与车轮间摩擦力形式作用的制动方式，称为黏着制动（或摩擦制动）。黏着制动方式可分为摩擦制动和动力制动。其中摩擦制动主要分为闸瓦制动与盘形制动；动力制动包括电阻制动和再生制动。随着列车运行速度的不断提高，黏着系数反而越小，列车高速运行时轮轨间的低黏着系数限制高速列车制动力的进一步提高。当列车平均减速度为0.94m/s2时，黏着系数理应在0.095以上，但是由于车辆的运行品质、自然条件、线路状态等因素的变化，导致黏着系数离散度比较大而达不到快速制动要求。近年来，国内外针对闸瓦制动、盘形制动、电阻制动以及再生制动开展了优化研究。一方面通过优化制动摩擦材料以改善闸瓦的摩擦磨损性能，优化摩擦宽度以降低摩擦面温度和结构热应力分布范围；另一方面，优化电路控制方案，提高列车动能转化为发电机电能的效率，促进电能回收再利用。通常列车黏着制动方式将摩擦制动与动力制动协同使用，不但极大减少空气制动装置使用频率、减轻闸瓦和车轮踏面磨耗，而且能够保证列车下长大坡道时的匀速安全运行，提高列车运行速度和安全性。以上优化研究在一定程度上提升并发展了列车黏着制动技术，但效果仍旧有限。此外，就理论而言，黏着制动的制动力受轮轨间黏着系数的限制，其最大制动力无法超过黏着力，致使黏着制动方式无法作为骤增制动动能的合理耗散方式。

为突破黏着系数的限制，近年来许多国家已经投入巨资研究设计各类非黏着制动系统。非黏着制动工况下，钢轨作用在机车、车辆上的制动力，无需通过车轮与钢轨的滚动接触点（黏着点）进行制动，且其制动力不受轮轨间黏着力的限制。非黏着制动技术主要由轨道电磁制动和轨道涡流制动组成。在轨道电磁制动技术中，由于电磁铁对钢轨具有打磨作用，使得轮轨间的黏着状态明显改变，虽然一定程度上增加了盘形制动和再生制动所产生的制动力，但磁轨制动对钢轨磨耗较大，且会显著增加整列车自重，使得整列车需轻量化至少12吨，对车辆结构的设计提出更高要求。轨道涡流制动产生的强大制动力，可以解决紧急制动时黏着不足、热负荷过大等问题，如果在同一线路区段频繁制动，可能引起钢轨发热，产生较大内应力，有胀轨甚至破坏轨道的风险，为列车行车安全造成隐患。国内外研究人员为了解决上述问题，不断优化非黏着制动技术的工程适用性。一方面，通过参数化有限元数值仿真分析，优化磁场分布，提高制动效率，从概念提出、方案设计、原理验证、样机研制、装车试验及优化设计等工作链进行工程样机研制和试验；另一方面，通过耦合空气制动、电制动和涡流制动方案，提高高速区段的制动力，解决黏着利用和基础制动热负荷问题。但上述研究成果无法改变非黏着制动对轨道的损伤问题，轨道电磁制动和轨道涡流制动技术不能完美适用于超高速列车在既有线路上的快速短距制动场景。

相比于列车现有黏着和非黏着制定方式，列车风阻制动在轻量化、制动力量级以及运维成本方面具备独特优势。风阻制动装置通常是在列车车厢顶部安装风阻制动板，正常运行时收拢于车身，于制动时迎风撑开，制动板表面承受风载荷。铁路相关研究学者为了保证风阻制动板在制动过程中的安全可靠性，通过数值仿真和风洞试验等研究手段，首先针对风阻制动板的结构外形、安装位置、数量、组合排布间隔、角度等进行结构优化设计，分析不同类型风阻制动板对列车制动过程的效果，并结合高强度冲击性能仿真和实验，分析制动板冲击波特征，以保证制动板本身的结构强度，提供充足的风阻制动力；其次，分析在不同列车运行速度、横风、隧道等复杂多样的运行环境中，风阻制动板周围的流场特性与列车的气动性能，保证风阻制动板的功能适应性和列车运行安全性。但当前关于列车风阻制动技术的研究主要局限于列车等截面车身位置，在列车流线型头尾风阻制动技术的研究仍处于空白阶段。

当列车运行速度达到400km/h或450km/h时，已经超过飞机起飞速度。因此，高速列车的气动外形设计均采用流线型外形，从而降低高速列车受到的空气阻力。若能够破坏列车的流线型外形，则列车受到的气动阻力会急剧增大。此外，相比等截面车身位置，流线型头尾风阻制动具备显著优势：（1）流线型头部和尾部的截面较小，风阻制动装置的外形设计受铁路限界约束较小，其迎风面积可选择空间更大，进而产生更好的制动效果；（2）流线型头部和尾部的加速效应使其周围气流速度高于等截面车身周围空气流速，使得流线型头部和尾部位置单位迎风面积制动装置的空气制动效率更高；（3）等截面车身位置的空气制动装置仅可在列车局部位置增加列车运行阻力，然而流线型位置的风阻制动装置可同时增加头车和尾车鼻尖附近的正压和负压分布以提升整车压差阻力，进而显著提升列车空气制动效率。因此，在截面较小的车头或车尾流线型位置变形是有效的途径，且流线型头尾风阻制动增加的阻力与列车运行速度的平方成正比，在制动力提升量级上远大于黏着制动方式，可有效填补列车提速带来的制动动能短缺，是解决超高速列车短距快速制动难题的研究方向之一。另外，我国交通强国建设纲要明确指出：强化前沿关键科技研发，加强对可能引发交通产业变革的前瞻性、颠覆性技术研究。提出的采用列车流线型头尾变形增加空气阻力的颠覆性技术，契合我国的发展战略，必将显著提升我国轨道交通技术的国际竞争力和影响力。

虽然列车流线型头尾增阻技术可以有效解决超高速列车制动距离过长的难题，但此变革性技术仍旧存在以下难点需逐渐攻克：

**（1）列车头尾部外形动态变化与列车周围流场、气动载荷之间的映射关系及相互作用机制。**列车头尾流线型增阻变形过程将引发周围空气流动特性以及列车气动载荷的动态演变，如何获取增阻变形过程中列车气动载荷动态演变特性、建立超高速列车气动载荷动态评估方法，并剖析流线型外形变化与空气流动特性和列车气动载荷多环映射关系，是超高速列车流线型头尾风阻制动变革性技术的难点之一。

**（2）列车外形变化、动态气动载荷综合作用下列车关键部件及整车动力学响应特性与评估方法。**高速列车外形结构以及气动载荷均对列车系统动力学特性产生明显影响，尤其在列车渐变外形以及动态气动载荷综合作用下，列车动力学响应特性以及列车失稳的物理机制将发生显著变化，如何构建列车关键部件及整车动力学动态响应特性评估方法，进而获取高速列车头尾流线型变形过程中列车系统动力学指标的响应规律，是超高速列车流线型头尾风阻制动变革性技术的难点之一。

**（3）多运行场景和制动需求下列车变形增阻效果与运行安全性、乘员舒适性之间的多目标优化匹配方案及最优变形策略。**超高速列车空气增阻变形过程涉及制动效率、结构可靠性、列车安全性以及乘员舒适性等，且超高速列车复杂的运行场景以及多变的制动需求，对空气制动装置的增阻效率提出了不同要求。因此，构建复杂运行场景和多变制动需求耦合条件下的列车变形增阻效果与运行安全性、乘员舒适性之间的多目标优化匹配方案，以及实现复杂运行场景和多变制动需求下的列车增阻变形方案的多维寻优和智能控制，是超高速列车流线型头尾风阻制动变革性技术的难点之一。

**（4）超高速列车头尾部动态变形的工程实现技术。**当超高速列车紧急空气制动时，对流线型头尾部的空气制动装置的响应速度和精准程度提出了严苛要求，如何实现流线型头尾部动态变形的高可靠度运动学设计，是超高速列车流线型头尾风阻制动变革性技术的难点之一。此外，流线型头尾部的空气制动装置在工作状态下将承受极高的气动载荷，进而引发结构疲劳、断裂等。因此，如何实现流线型头尾部风阻制动装置的耐疲劳设计及其工程实现技术，是超高速列车流线型头尾风阻制动变革性技术的难点之一。

**重要参考文献**

1. 张旺狮. 车辆制动装置(普通高等教育"十一五"国家级规划教材)[M]. 中国铁道出版社, 2007.
2. Osenin Y I, Krivosheya Y, Chesnokov A, et al. Influence of the Mutual Overlapping Coefficient on the Process of a Disc Brake Squealing during Braking[J]. Journal of Friction and Wear, 2021, 42(1): 38-43.
3. 孙国斌. 日本直线电机制动技术的研究进展综述[J]. 铁道车辆, 2020, 58(01): 16-20.
4. 田春, 吴萌岭, 朱洋永, 等. 空气动力制动风翼在车上布置数值仿真研究[J].中国铁道科学, 2012, 33(3): 100-103.
5. Gao L Q, Xi Y, Fu Q, et al. Performance Analysis of a New Type of Wind Resistance Brake Mechanism Based on FLUENT and ANSYS[J]. Advanced Materials Research, 2012, 562-564:1099-1102.
6. Yoshimura M, 周贤全, 初明玲. 山梨试验线车辆空气动力制动[J]. 国外铁道车辆, 2001, (03): 34-37.
7. Hiroshi Arai, 牛爱成. 日本新干线提速用制动系统[J]. 国外铁道车辆, 2012, 49(3): 34-37.
8. 高立强, 胡雄, 孙德建, 等.空气动力制动前排风翼板制动力影响规律[J].铁道学报, 2018, 40(1): 31-37.
9. Niu J Q, Wang Y M, Feng L, et al. Comparative study on the effect of aerodynamic braking plates mounted at the inter-carriage region of a high-speed train with pantograph and air-conditioning unit for enhanced braking [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 206.
10. Niu J Q, Wang Y M, Liu F, et al. Aerodynamic behavior of a high-speed train with a braking plate mounted in the region of inter-car gap or uniform-car body: A comparative numerical study[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2020:095440972096582.