

中低速磁浮区间隧道内轮廓尺寸标准研究

张鹏

中国铁路设计集团有限公司

摘要：中低速磁浮交通系统是我国自主研发的新型轨道交通系统，相较于传统轮轨系统具有噪声低、振动小、转弯半径小、爬坡能力高等优点，目前国内对于中低速磁浮区间隧道的内轮廓尺寸标准研究尚属于空白。本文以国内第一座中低速磁浮系统地下区间隧道工程为背景，通过对车辆限界、设备限界、建筑限界及施工等因素的研究，首次确定了区间隧道结构内轮廓尺寸，为今后类似工程提供借鉴和指导。

关键词：中低速磁浮；隧道；内轮廓；限界

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.07.042

引言

随着国内中低速磁浮交通研究的逐步深入，根据其特点，中低速磁浮系统适用于旅游交通线、对噪声和振动控制有特殊要求的交通线路，大中城市市内的主要公共交通线路。旅游线穿山、市域交通下穿河流情况有时是不可避免的，而目前国内对于中低速磁浮区间隧道的内轮廓尺寸标准研究尚属于空白。

梁海清等^[1]从车辆限界应该计及的因素方面对低速磁浮车辆限界的计算方法进行了研究。孙先锋等^[2]以某型号磁悬浮车辆轮廓及车辆限界为例提出设计磁悬浮设备限界的方法。司恩等^[3]参考现有限界计算标准及方法，针对磁浮车辆的结构、运行特点，对中低速磁浮车辆限界和设备限界进行了研究。重点介绍了限界计算的计及因素、方法、计算截面的确定以及计算公式。路美丽^[4]针对单线隧道衬砌断面进行了二次衬砌结构内力影响因素的深入分析，为衬砌设计及优化提供了参考。马涛等^{[5]~[7]}对内轮廓方案的结构安全性、经济性、施工便利性进行了综合比较，对大机养护要求的铁路隧道内轮廓进行了探讨，确定了新建时速160Km以下电气化铁路、单双线有砟轨道隧道内轮廓型式。

区间隧道结构内轮廓尺寸标准确定涉及车辆限界、设备限界、隧道疏散救援空间、管线和设备安装空间、初期支护结构预留变形量等多个因素。经济合理的确定隧道建筑限界对实现隧道功能、降低工程造价具有重要的经济效益。

本文以国内第一座磁浮系统地下区间隧道——北京市中低速磁浮交通示范线（S1线）西段工程石景山隧道为工程背景，通过调查研究、工程类比、数值模拟分析等多种手段，首次全面、系统的对直线段矿山法区间隧道的内轮廓尺寸标准进行了研究，为后续工程提供指导和借鉴。

一、工程概况

北京市中低速磁浮交通示范线（S1线）是北京西部地区的一条东西方向的轨道交通线，是门头沟区联通中心城区的快速通道。工程西起门头沟区石厂站，东至石景山区苹果园站，线路全长10.21公里，其中四道桥

站~金安桥站区间的石景山隧道长为278.4m，是全线唯一一段地下区间隧道工程。石景山隧道为单洞双线隧道，断面宽12.4m，高9.6m，最大埋深38.4m。隧道内纵坡为单向坡，采用矿山法与明挖法施工。隧道进、出口皆与桥梁对接。

隧道洞身范围内穿过的地层主要包括第四纪残坡积土层、第四纪全新世坡洪积层和中生界三叠系中下统双泉组潭柘寺段凝灰质石英砂岩。围岩较为破碎，围岩分级为IV~VI级。地下水类型为基岩裂隙水。

二、车辆限界

本文以北京中低速磁浮S1线车辆外轮廓^[9]为基础（车辆基本参数详见表1），通过直线地段对最不利工况下（车辆横向位移与侧滚同向）车辆的动态包络计算，确定车辆限界如图2所示。

表1 车辆基本参数 mm

序号	参数名称	参数值
1	车体长度	15000
2	车体宽度	3000
3	车体顶部距轨面高度	3695
4	轨距	2000
5	等效车辆定距	8210
6	地板面高度	950

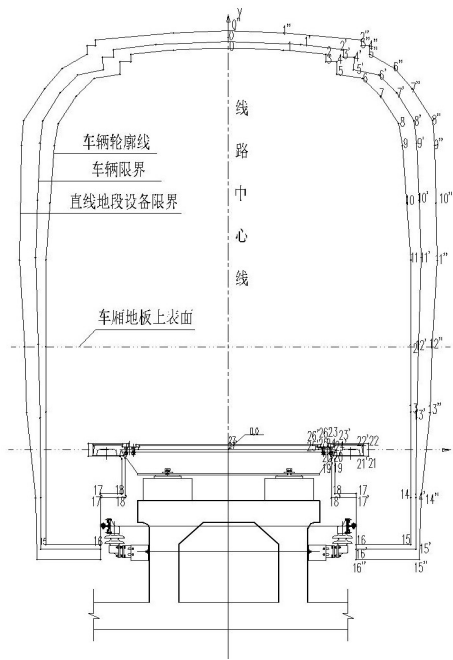


图2 车辆限界及直线地段设备限界

三、设备限界

设备限界是用以限制设备安装的控制线。直线段区间设备限界与车辆限界之间应考虑安全空隙，需要预留的是车体肩部垂向及横向空隙、车体底边梁横向和下向空隙、车体顶部竖向空隙（含竖曲线偏移量）。车辆限界中未考虑的空簧漏气、过充等其他原因引起的车辆附加偏斜是该安全空隙考虑的主要内容。S1线直线地段设备限界^[8]如图2所示。

四、建筑限界

建筑限界是在设备限界基础上，考虑了隧道内股道数目和线间距、疏散救援空间、设备和管线安装、轨道形式及其维修保养方式等多重因素。

（一）隧道内股道数

S1线北侧紧邻北京京能热电厂，同时北侧还要预留规划中的石龙路，为了减少占用首钢的用地、避开冲沟、减小对石景山自然景观的干扰及减小对文物的扰动，故采用单洞双线方案。

（二）救援疏散空间

作为一种市域新型轨道交通型式，磁浮隧道也应考虑以火灾为主的防灾救援设计。根据中低速磁浮车辆和本线路特征，中低速磁浮车辆列车突发故障时，可分以下几种工况的救援方案。

（1）列车自救。运营列车在区间隧道内发生火灾时，优先执行继续运行洞外疏散的基本原则。

（2）救援通道疏散。磁浮线路的左右线之间，设置了救援疏散平台，当火灾发生时，司机将车辆侧门打开，乘客服从列车员指挥，沿着纵向疏散平台疏散至车站。

（3）工程车救援。当区间出现大面积长时间故障停电时，蓄电池动力工程车可以从前（后）方向连接故障磁浮列车，将乘客疏散至临近车站。

（三）线间距

根据CJJT 262-2017《中低速磁浮交通设计规范》5.1.3 当两线间无墙、柱和设备时，两设备限界之间的安全空隙不应小于100mm。

根据CJJT 262-2017《中低速磁浮交通设计规范》5.3.5 有维护通道或人行通道时，通道和设备限界之间的安全空隙不应小于50mm。

根据以上两点，并结合车辆宽度和疏散平台宽度确定区间直线段线间距为4.6m。

（四）设备和管线安装

根据CJJ 96-2003《地铁限界标准》^[9]3.3.10 直线地段车站建筑限界应符合下列规定：4 车站范围内有墙、柱处的建筑限界：当墙、柱上悬挂设备时，应按设备限界加400~500mm空隙确定。

根据CJJT 262-2017《中低速磁浮交通设计规范》5.1.2 安装设备和设备限界之间，宜留出50mm的安全空隙。

当线间距为4.6m时，建筑限界距离设备限界最近的部位为设备限界的左上角或右上角，结合断面拟合取整，该距离取502mm。

（五）轨道结构形式

轨道结构是由导轨、钢轨枕、连接螺栓、扣件、支撑块、承轨台、承轨梁等部件组成。

区间隧道段采用承轨梁型式的轨道结构高度为1.4m。承轨梁的高度为轨道结构高度减去轨道上部结构高度（承轨台及轨排高度）的值，其中轨道上部结构高度为0.47m，因此一般情况下承轨梁的高度为0.93m。

五、隧道结构内轮廓尺寸标准

本文研究矿山法直线地段区间隧道结构内轮廓尺寸，应在建筑限界基础上，考虑施工误差、测量误差、初期支护结构预留变形量、二次衬砌结构受力变形量等影响因素。

（一）施工误差

根据CJJ/T 303-2020《中低速磁浮交通工程施工及验收标准》^[10]7.8.8条，地下结构竣工后，混凝土抗压强度和抗渗压力必须符合设计要求，无露筋、露石，裂缝应修补好，二次衬砌结构允许偏差应符合表2规定。

表2 隧道二次衬砌结构允许偏差值 mm

项目	允许偏差			
	内墙	仰拱	拱部	柱子
平面位置	±10	—	—	±10
垂直度（%）	2	—	—	2
直顺度	—	—	—	—
平整度	15	20	15	5
高程	—	±15	+30 -10	—

综上可知，最大施工误差为±30mm、-15mm。

（二）测量误差

隧道工程的测量内容主要包含：地面测量控制网的建立及复核；施工平面控制网、高程控制网、中线放样及标高控制、贯通测量等。

根据TB10101-2018《铁路工程测量规范》^[11]6.1.4 隧道两相向开挖洞口施工中线在贯通面上的横向和高程贯通允许误差见表3。

表3 隧道贯通允许误差

项目	横向贯通误差限差			高程贯通 误差限差
	L < 4	4 ≤ L < 7	7 ≤ L < 10	
相向开挖隧道长度 (km)				
洞外贯通中误差 (mm)	30	40	45	18
洞内贯通中误差 (mm)	40	50	65	17
洞内外综合贯通中误差 (mm)	50	65	80	25
贯通限差 (mm)	100	130	160	50

测量误差更多的是在施工过程中对施工单位的要求，设计过程中仅酌情考虑。

（三）初期支护结构预留变形量

为充分发挥围岩自承作用，容许初期支护和围岩有一定的变形，而将设计开挖断面作适当扩大的预留量。该量一般根据围岩级别、开挖跨度、埋置深度、施工方法和支护条件，采用工程类比法确定。实际施工过

程中，该量由施工单位考虑，设计不予考虑。

(四) 二次衬砌结构受力变形量

根据二次衬砌内力计算结果，拱顶最大下沉量为3.4mm；拱腰最大内鼓量为3.1mm。

综合考虑施工误差、测量误差、初期支护结构预留变形量、二次衬砌结构受力变形量，隧道结构内轮廓线

在拱顶及拱腰的部位外放取50mm，仰拱部位不外放。

(五) 区间隧道结构内轮廓尺寸

北京S1线石景山隧道结构内轮廓尺寸在车辆限界、设备限界、建筑限界的基础上，考虑隧道结构施工过程中的相关变形和误差，得出直线地段矿山法单洞双线马蹄形断面内轮廓尺寸图，详见图3。

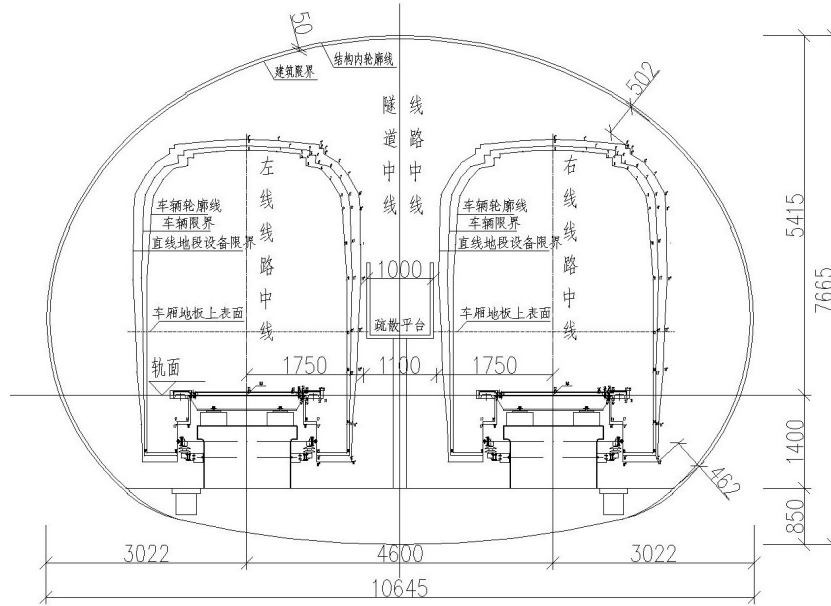


图3 直线地段矿山法单洞双线马蹄形断面内轮廓尺寸图

六、结论

本文通过调查研究、工程类比、数值模拟分析等多种手段，首次全面、系统的对直线段矿山法区间隧道的内轮廓尺寸标准进行了研究。主要结论如下：

(1) 以国内第一座中低速磁浮系统地下区间隧道工程为背景，通过对车辆限界、设备限界、建筑限界及施工等因素的研究，首次确定了区间隧道结构内轮廓尺寸。

(2) 建筑限界需在设备限界基础上，考虑隧道内股道数和线间距、疏散救援空间、设备和管线安装、轨道结构形式及其维护方式等多重影响因素。

(3) 区间隧道结构内轮廓尺寸，应在建筑限界基础上，考虑施工误差、测量误差、初期支护结构预留变形量、二次衬砌结构受力变形量等影响因素。

参考文献

[1] 梁海清, 陆海英, 梁树林, 罗世辉, 曲晶. 低速磁浮车辆限界计算探讨[J]. 内燃机车, 2008 (10): 29-32
 [2] 孙先锋, 薄海青. 中低速磁悬浮设备限界研究[J]. 铁道标准设计, 2011 (9): 24-27.
 [3] 司恩, 胡伟, 佟来生. 中低速磁浮车辆限界及设备限界研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35

(6): 12-16.

[4] 路美丽. 影响铁路隧道衬砌结构内力的因素分析[J]. 隧道建设, 2009, 29 (1): 33-37.
 [5] 马涛, 陈时玉, 韩现民, 龚彦峰. 设计时速160Km以下铁路隧道(普货、有砟轨道)内轮廓标准研究[J]. 隧道建设, 2016, 36 (5): 556-561.
 [6] 李煜川, 李现宾. 时速120Km及以下满足大机养护作业要求的铁路单线隧道内轮廓探讨[J]. 铁道标准设计, 2013, (7): 75-77.
 [7] 马志富, 杨毅秋. 改善时速160Km以下铁路隧道养护维修条件的应对措施初步研究[J]. 铁道标准设计, 2012 (1): 66-69.
 [8] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 北京市中低速磁浮交通示范线(S1)线西段工程限界施工图[R]. 天津: 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 2012.
 [9] 中华人民共和国建设部. CJJ 96-2003地铁限界标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
 [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T 303-2020中低速磁浮交通工程施工及验收标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
 [11] 国家铁路局. TB10101-2018铁路工程测量规范[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.