

文章编号: 1674—8247(2022)01—0028—11
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.01.006

南京枢纽新建南京北动车所的必要性及 整体布局方案研究

谢红太^{1,2} 王 伟¹ 李 祥³ 马敬武¹ 武振锋²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 南京 210014; 2. 兰州交通大学, 兰州 730070;
3. 西安铁路信号有限责任公司, 西安 710100)

摘 要:针对国内在新建高速铁路枢纽内,动车组配属及承担动车段(所)动车组检修工作量、检修设施规模的测算结果中表现出的不统一、不协调及不匹配等问题,本文以新建南京枢纽南京北动车所工程项目为依托,研究确定枢纽内动车组配属规模设计、承担动车段(所)动车组检修工作量及检修设施规模测算理论,提出了以全周转时间及日车公里法为指标的 2 种枢纽内动车组配属规模测算方法。研究表明:采用日车公里法测算,当枢纽内动车组平均日走行公里指标取常见经验计算值 2 000 km 时,在不考虑检修动车组数量前提下计算的运用动车组数量及备用动车组数量比全周转时间测算法计算结果偏大约 41%,配属动车组数计算结果偏大约 20%,动车组存车线数及检查库线数计算结果偏大约 35%,计算枢纽内动车组配属、承担动车段(所)动车组检修工作量及检修设施规模测算裕量较为充足。

关键词:动车段(所);全周转时间;日车公里;动车组配属;南京枢纽;南京北动车所
中图分类号:U279.4 **文献标志码:**A

28

Study on Necessity and Overall Layout of Nanjing North Multiple Units Depot at Nanjing Hub

XIE Hongtai^{1,2} WANG Wei¹ LI Xiang³ MA Jingwu¹ WU Zhenfeng²

(1. China Design Group Co., Ltd. Nanjing 210014, China;
2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Xi'an Railway Signal Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the disunity, disharmony, and mismatch in the calculation of EMU assignment and maintenance workload and maintenance facilities scale in newly-built high-speed railway hubs in China, this paper, based on the newly-built Nanjing North Multiple Units Depot at Nanjing Hub, studies and determines the design of multiple units assignment scale at hubs, the calculation theory of multiple units maintenance workload and maintenance facilities scales, and puts forward two calculation methods of multiple units assignment scale at hubs with total turnover time and daily car running length method as indicators. The results show that when the average daily car running length of multiple units in the hub is 2 000 km calculated by common experience, the number of the used multiple units and spare multiple units calculated without considering the number of overhauled multiple units is about 41% higher than that calculated by the total turnover time calculation method, the number of assigned multiple units are about 20% higher, and the number of storage lines and inspection lines of multiple units is about 35% higher. The number of assigned

收稿日期:2021-06-15

作者简介:谢红太(1993-),男,工程师。

基金项目:兰州交通大学青年科学基金项目(2019015);华设设计集团股份有限公司科技项目(KY2021075,KY2021078)

引文格式:谢红太,王伟,李祥,等. 南京枢纽新建南京北动车所的必要性及整体布局方案研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(1):28-38.

XIE Hongtai, WANG Wei, LI Xiang, et al. Study on Necessity and Overall Layout of Nanjing North Multiple Units Depot at Nanjing Hub[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1):28-38.

multiple units in the hub is calculated.

Key words: multiple units depot (station); total turnaround time; daily vehicle kilometers; multiple units assignment; Nanjing Hub; Nanjing North Multiple Units Depot

截止 2020 年底,我国高速铁路网已基本成型,“八纵八横”铁路网正逐步完善,随着社会经济的进一步发展和铁路运输服务品质的快速提升,动车组已逐渐取代传统客运列车成为担当国内铁路客运任务的新一代主力产品,但在运用维护方面国铁集团和国内七大动车组检修基地的统计数据显示,国内动车组标准不统一、车型种类较多、运转效率较低、运用动车组检备率较高、动车组检修能力紧张、检修资源不足、失修及过修问题突出^[1-3]。因此,结合实际运输需求提高全路动车组一体化运转整备任务是当前亟待解决的问题之一。

新建南京至淮安城际铁路位于我国长三角区域江苏省和安徽省境内,线路自北向南由江苏省淮安市淮安东站引出,向南经淮安市洪泽区(设洪泽站)、金湖县(设金湖站),进入安徽省天长市(设天长站),出站后向南跨苏皖省界,经南京市六合区(设六合站)、浦口区,引入新建的南京枢纽第三客站南京北站,线路全长约 220 km。宁淮城际铁路作为长三角城际铁路网的重要组成部分,北接连淮扬镇、徐宿淮盐铁路,南连宁杭、宁安、宁宣铁路,进一步加强淮安、滁州、连云港等长三角北部地区与南京、杭州、芜湖、宣城等长三角南部地区交通联系,有利于长三角“1~2 小时交通圈”的实现,同时也将进一步加强长江三角洲地区南北联系,充分发挥城际铁路网效益,实现长江三角洲地区人员、产业资源的有效互动和合理配置,对进一步加快长三角区域经济均衡一体化发展有着重要意义^[4-5]。

根据南京枢纽总图规划,南京枢纽基本形成南京、南京南、南京北“三大客站”格局。就目前来看,南京铁路枢纽主要存在现状客运系统布局不尽合理,既有客运站能力不能满足规划新线引入要求,枢纽过江通道能力不能适应研究年度线路引入及货运增长需求,同时随着远期动车组线路密度的逐渐增大,既有动车组运维设施不能满足近期南京枢纽动车组运用检修任务^[6-7]。因此,科学合理布局宁淮城际铁路及沿江高铁南京北站近远期规划建设是非常有必要的,同时南京北动车运用所作为附属工程建设对于铁路安全运输及动车组设施设备维修是必不可少的。

1 国内动车组配属现状及市场需求

近年来,随着我国高速铁路网系统的迅速完善,

2020 年底我国高速铁路运营总里程达 3.79 万 km,根据我国高速铁路建设项目周期一般控制在 4~5 年,在经济增速下行压力下,2014 年以来迎来了铁路建设高峰期,对应 2018 年后迎来了新投入运营高速铁路里程的高峰期。根据近几年新开工及规划设计高速铁路项目规模预测未来新增高速铁路铁路里程将呈现一定程度的下滑趋势。其中 2012-2020 年中国高速铁路运营里程及增长率如图 1 所示。

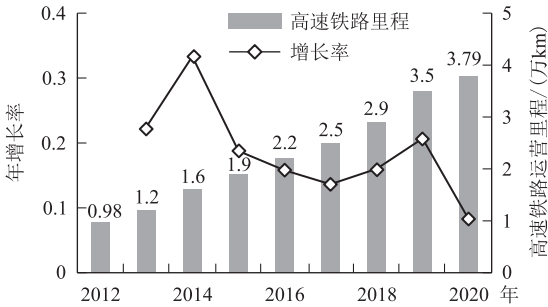


图 1 2012-2020 年中国高速铁路运营里程及增长率图

截至 2020 年底,我国拥有动车组约 3 885 组,其中本年度新增配属动车组 220 组。2011-2020 年中国高速铁路运营里程及动车组保有量年新增趋势如图 2 所示,宏观来看二者走向趋势保持同步,随着年高速铁路运营里程的逐渐增加,配属动车组数量随之增加,动车组年新增配属数量自 2011-2015 年呈迅速增加的趋势,2015-2020 年随着全国建设高峰期高速铁路集中投入运营,动车组的新增量变化相对于高速铁路新增里程变化趋势较为平缓。

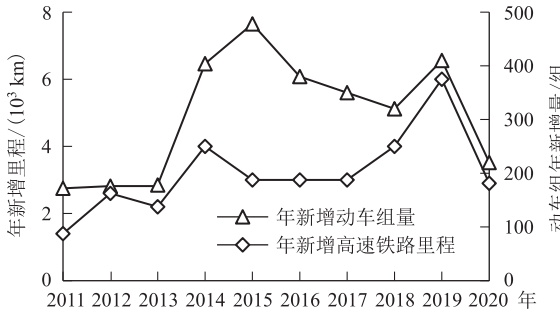


图 2 2011-2020 年中国高速铁路运营里程及动车组保有量年新增趋势图

计算 2011-2020 年中国高速铁路动车组线路密度如表 1 所示,在 2016-2020 年随着高速铁路运营里程的增加,动车组线路密度从 2016 年的 0.118 组/km

降低到 2020 年 0.103 组/km,意味在近几年来在我国高速铁路网迅速完善的大背景下,新建线路整体上客流密度逐渐降低,同时也与全国高速铁路列车运行图的重新优化及动车组运维设施得到进一步可靠保障有

着密切关系。但在高密度高速铁路线网的快速形成中,随着远期客流量的逐步增加,同时在我国采用节能、高效便捷的动车组列车趋势的引领下,国内动车组线路密度有望逐步提升,带动动车组的新增需求。

表 1 2011 – 2020 年中国高速铁路动车组线路密度表(组/km)

年度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
动车组线路密度	0.115	0.117	0.110	0.108	0.116	0.118	0.117	0.112	0.105	0.103

2 南京枢纽动车组配属及检修规模测算

2.1 相邻线既有动车组设备的分布、性质和规模

宁淮城际铁路属于沿江铁路网的一部分,相邻铁

路有关的动车组设施包括上海动车段、上海南动车运用所、上海虹桥动车运用所、上海东动车运用所、南京动车运用所、南京南动车运用所、合肥南动车运用所、合肥动车运用所、南通动车运用所,本线相邻铁路既有及规划动车组设备规模如表 2 所示。

表 2 本线相邻线既有及规划动车组设备规模表

名称	既有及在建规模		远期规模		附注
	存车线 /条	检查库线 /条	存车线 /条	检查库线 /条	
动车段/所					
上海动车段 南翔动车所	40	8	40	8	既有,承担沪宁城际铁路、京沪高速铁路动车组检查、存车任务。华东区域动车组检修任务
上海南 动车运用所	8	4	8	4	既有,承担沪宁、沪杭、沪深、金山铁路动车组检查、存车任务
上海虹桥 动车运用所	71	14	71	14	既有,承担京沪、沪昆、沪汉蓉铁路动车组检查、存车任务
上海东动车所	24	6	40	10	规划新建,沪通铁路二期工程,预留 4 线,16 条线存车线
南京动车运用所	14	4	14	4	既有,主要承担沪宁城际铁路动车组检查、存车任务
南京南 动车运用所	45	8	45	8	既有,承担京沪高速铁路、沪蓉客运专线、宁杭客运专线、宁安城际铁路动车组的检查、存车任务
合肥南 动车运用所	35	10	35	10	既有,承担沪蓉客运专线、商合杭(杭州方向)铁路、京福客运专线、部分合安九客运专线动车组的检查、存车任务
合肥动车运用所	24	6	36	10	在建,合安客运专线配套工程已批复,承担合蚌(蚌埠方向)、合安九客运专线动车组的检查、存车任务
南通动车运用所	20	6	36	10	既有,盐通铁路配套工程,承担沪通、盐通、北沿江、通苏嘉等铁路动车组检查、存车任务,预留 4 线,16 条线存车线

南京动车运用所既有规模为动车组存车线 14 条,动车组检查库线 4 条,主要承担沪宁城际铁路动车组检查、存车任务;南京南动车运用所既有规模为动车组存车线 45 条,动车组检查库线 8 条,承担京沪高速铁路、沪蓉客运专线、宁杭客运专线、宁安城际铁路动车组的检查、存车任务。其中南京动车运用所主要承担 CRH2 系动车组运维任务,南京南动车运用所主要承担 CR400 系平台动车组运维任务。截止 2020 年底,南京枢纽南京动车运用所配属动车组 53 组,南京南动车运用所配属动车组 95 组,共计 148 组,配属动车组类型及数量如表 3 所示。

表 3 南京枢纽配属动车组类型及数量表

南京枢纽	南京动车运用所			南京南动车运用所	
	CRH2C 一阶段	CRH2C 二阶段	CRH2B	CR400BF	CR400 BF-A
配属量/组	30	18	5	65	30

2.2 南京枢纽近、远期客流预测及运输组织分析

2.2.1 南京枢纽现状

既有南京铁路枢纽分布于南京市长江两岸,衔接京沪、宁启、宁芜 3 条干线铁路以及京沪、沪宁、宁杭、宁安、合宁 5 条高速(城际)铁路,承担华东北部地区与苏南、上海、浙江及皖赣的客货交流。南京东站为枢纽主要编组站,浦口东(原南京北)站为辅助技术作业站,南京站、南京南站为主要客运站,其他为中间站。

南京站:枢纽内的主要客运站,位于江南玄武区,设于京沪铁路和沪宁城际铁路线上,分普速和城际两个车场,普速车场设客车到发线 8 条(不含正线 2 条),城际车场设到发线 6 条。

南京南站:南京南站是枢纽内的主要客运站,位于江南的栖霞区,设于京沪高速铁路、沪汉蓉铁路和宁安城际铁路线上,分京沪、沪汉蓉和宁安 3 个车场,正线均靠站台通过。南京南站共设到发线 28 条(含正

线),基本站台 2 座、中间站台 13 座,其中京沪车场设到发线 10 条、沪汉蓉车场设到发线 12 条、宁安车场设到发线 6 条。

2.2.2 枢纽内现阶段存在的主要问题

(1) 现状客运系统布局不尽合理,既有客运站能力不能满足规划新线引入要求

南京枢纽既有两大客运站南京站和南京南站均位于江南地区,江北无客运站,但研究年度规划的沿江高铁、宁淮、宁蚌城际铁路均位于江北地区,从客运布局上来看,如客运作业全部集中于江南地区,则江北地区车流均需绕行至江南,运输径路明显不合理。因此,现状客运系统布局不尽合理,江北地区需要新设 1 个客运站,满足规划新线引入要求。

此外,随着规划沿江高铁、宁淮、宁蚌城际等铁路引入,既有南京站及南京南站 2 站共计 23 台 42 线的规模,不能满足规划年度近期 897 对/日、远期 1 091 对/日的客车接发车的需求。

(2) 枢纽过江通道能力不能适应研究年度线路引入及货运增长需求

现状南京枢纽过江通道为 2 桥 6 线格局,分别是南京长江大桥京沪铁路双线、大胜关长江大桥京沪高速铁路和沪汉蓉铁路 4 线桥。南京长江大桥主要承担京沪、宁启铁路过江客车和货物列车,现状行车量 135 对(客车 90 对,货车 45 对),区间通过能力已经饱和。大胜关长江大桥京沪高速铁路和沪汉蓉铁路四线桥行车量 220 对,其中京沪高铁桥 126 对,区间通过能力已经饱和,沪汉蓉铁路桥 94 对,区间通过能力略有紧张。沿江、宁淮、宁蚌等铁路过江需求远期至少为 110 对,枢纽过江通道能力不能适应研究年度沿江、宁淮、宁蚌等铁路引入枢纽的需要。

随着规划年度宁芜、合宁、宁启、京沪等铁路货运量的增长,南京长江大桥已不能满足运输需求。

2.2.3 开行列车对数及通过能力分析

(1) 各研究年度旅客列车对数

根据江苏省内城际、长三角城际、连云港与淮安对外、胶东半岛至南京及以远、京津及鲁中至南京及以远路网客流调查及行车组织分析,淮安至南京北旅客列车对数为初期、近期及远期分别为 60 对/日、73 对/日及 90 对/日,研究年度内本线列车对数如表 4 所示。

表 4 本线区段客车对数表(对/日)

区段	初期	近期	远期
淮安—南京北	60	73	90
南京北—南京	87	105	128

(2) 设计能力及分期扩能措施

① 列车编组方案

本线列车暂推荐采用 CRH380 系列动车组,其中短编组列车按 8 辆编组、定员 600 人/列计,长编组列车按 16 辆编组、定员 1 200 人/列计。

② 列车通过能力计算方法

依据 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》本线列车通过能力可表示为^[8]:

$$N = \frac{1}{I} \left(1\,440 - T_w - \frac{60S}{V} \right) \tag{1}$$

$$N_G = \frac{N}{\varepsilon_G} \tag{2}$$

$$N_G^u = N_G K_s \tag{3}$$

式中: N ——平行运行图通过能力(对/日);
 T_w ——综合维修天窗时间(min),本线设计取
 $T_w = 240\text{ min}$;
 I ——列车追踪间隔时间(min),本线计算能力近、远期按 $I = 5\text{ min}$ 设计计算;
 S ——客运区段长度(km);
 N_G ——全高速列车的区段最大通过能力(对/日);
 N_G^u ——全高速列车的区段使用能力(对/日);
 ε_G ——高速列车使用扣除系数,本线设计计算取 1.5;
 K_s ——区间通过能力使用系数,本线设计计算取 0.8;
1 440——日分钟数(min)。

③ 本线通过能力及利用率

根据本线列车研究年度内旅客列车开行对数 N_k 及全高速列车的区段最大通过能力 N_G^u 计算,列车通过能力利用率 κ 可表示为:

$$\kappa = \frac{N_k}{N_G^u} \tag{4}$$

计算淮安至南京北旅客列车初期、近期及远期对数计算本线列车通过能力及能力利用率如表 5 所示。

表 5 本线列车通过能力及能力利用率表

年度	区段	列车对数	通过能力(对/日)			能力利用率/%
			N	N_G	N_G^u	
初期	淮安—南京北	60	231	154	123	49
	南京北—南京	87	238	158	126	69
近期	淮安—南京北	73	231	154	123	59
	南京北—南京	105	238	158	126	83
远期	淮安—南京北	90	289	192	153	59
	南京北—南京	128	298	198	158	81

从表 5 中可以看出,本线列车研究年度内淮安至南京北旅客列车通过能力利用率初期、近期及远期分别为 49%、59% 及 59%,通过能力富余量充足,研究年度满足铁路运输需求。

④旅客运输需求的适应性分析

本线研究年度旅客运输需求适应情况如表6所示。从表6可以看出,本线设计能力满足近、远期运输需要,且有一定的富余。

表6 研究年度旅客运需求适应情况表

年度	区段	列车对数/对	输送能力/(万人/年)	预测客运量/(万人/年)	能力富余/(万人/年)
初期	淮安—南京北	60	3 412	1 207	+2 205
近期	淮安—南京北	73	3 412	1 486	+1 926
远期	淮安—南京北	90	4 244	1 889	+2 355

⑤进一步提高运输能力的措施

本线设计能力满足研究年度运输需要,且有一定的富余,各区段均能够满足本线建议的远景年输送能力客运量单向3 500万人/年的要求。若运量进一步增长,可采取增开长编组列车等方式,提高输送能力,远期以后随着移动设备的发展也可缩短追踪间隔来增加输送能力。

3 南京枢纽动车组配属及检修规模测算

影响动车段(所)整体布局及规模大小的两个重要因素是枢纽内配属动车组数量、动车组检修工艺方式及配套设备实施。因此,在枢纽内铁路规划及铁路设计时期能够相对科学合理的进行预测和设计是非常有必要的,尤其国内在面临经济增速下行压力下,铁路投资明确的“保增长”措施及在高密度高速铁路网的快速形成中随着远期客流量的逐步增加,国内动车组线路密度及新增需求的逐步提升,科学规划布局动车段(所)工艺设计及配属动车组数量是有效确保铁路高效运输及科学运维的首要保障^[9-10]。

3.1 枢纽内动车组配属测算分析

动车组作为国内旅客运输的主要载运工具,枢纽内动车组配属数量直接关系着能否满足铁路运输需求及运维实施的配套规模。现阶段铁路开通运营后承担动车段(所)配属动车组数量主要根据实际列车运行图来准确计数确定,但在枢纽内铁路规划及铁路设计时期动车组配属规模测算时,往往面临列车运行图绘制复杂困难及预测准确性差等问题。因此,结合目前各铁路设计单位在动车组配属规模测算方面的设计经验及传统理论计算方法,本文总结提出了基于动车组日车公里数及全周转时间的两种承担动车段(所)动车组配属数量测算方法^[11-13]。

3.1.1 全周转时间测算法

根据动车组全周转时间分析计算,动车组枢纽内配属动车组数量包括运用动车组数量、检修动车组数

量及备用动车组数量之和,表示为:

$$N_{\text{配属}} = N_{\text{运用}} + N_{\text{检修}} + N_{\text{备用}} \quad (5)$$

式中: $N_{\text{配属}}$ ——动车组检修基地配属动车组数量(列);

$N_{\text{运用}}$ ——运用动车组数量(列);

$N_{\text{检修}}$ ——动车组二、三、四及五级修在检动车组数量和(列);

$N_{\text{备用}}$ ——备用动车组数量(列)。

(1)运用动车组列数 $N_{\text{运用}}$

根据动车组运行全周转时间计算枢纽内运用动车组数量,动车组日运行时间按18 h取值,则枢纽内运用动车组数量可表示为:

$$N_{\text{运用}} = \frac{T_{\text{总}}}{18} \quad (6)$$

$$T_{\text{总}} = T_{\text{h}} + (T_{\text{s}} + T_{\text{z}}) \times (1 + \alpha) \quad (7)$$

$$T_{\text{h}} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \left[\left(\frac{C_j}{D_1} - \frac{C_j}{D_2} \right) T_1 + \frac{C_j}{D_2} T_2 \right]}{3} \quad (8)$$

式中: $T_{\text{总}}$ ——枢纽内运用动车组全周转时间和(h);

18——动车组日运行时间(h);

T_{s} ——枢纽内全部开行动车组日旅行时间之和(h);

T_{h} ——动车组一、二级检修作业时间和(h);

T_{z} ——动车组在站停留时间(h);

D_1, D_2 ——动车组一、二级修定检公里数(km);

T_1, T_2 ——动车组一、二级修检修停时(h);

C_j ——对应交路内动车组日走行公里数(km);

j ——动车组交路编号。

其中,对于动车组在站停留时间 T_{z} ,向航鹰^[14]等人结合铁路客运专线及提速线路设计工作经验,根据动车组运用交路长度 L_j 的范围,给出如下参考取值:

$$T_{\text{z}}(L_j) = \begin{cases} 0.5 \text{ h} & (L_j < 500 \text{ km}) \\ 1.0 \text{ h} & (500 \text{ km} \leq L_j \leq 1\,000 \text{ km}) \\ 1.5 \text{ h} & (L_j > 1\,000 \text{ km}) \end{cases} \quad (9)$$

(2)检修动车组列数 $N_{\text{检修}}$

考虑到现阶段铁路部门进行日常一、二级检修是采用分时作业,其中一级修主要集中在夜间(21:00~8:00)时间段进行作业,二级修主要集中在白天进行作业。结合目前TB 10028-2016《铁路动车组设备设计规范》及动车组检修规程,一、二级修检停时较短,因此检修动车组列数主要包括三、四及五级修在修动车组数量和,即:

$$N_{\text{检修}} = N_1 + N_2 + N_3 \quad (10)$$

根据各级修程定检公里数与对应检修停时系数,动车组一至五级修在修动车组数量可分别表示为:

$$N_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\beta R_i}{365} \times \frac{S_j}{D_5} & (i = 1, 2) \\ \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\beta R_i}{250} \times \frac{S_j}{D_5} & (i = 3, 4, 5) \end{cases} \quad (11)$$

式中: β ——动车组检修不平衡系数(或称为波动系数),根据 TB 10028-2016《铁路动车组设备设计规范》取值范围为 $1.0 \leq \beta \leq 1.4$,一般根据不同修程检修波动情况可参考取值^[14-15],一、二级修时取 $\beta = 1.2$,三、四级修时取 $\beta = 1.1$,五级修时取 $\beta = 1.0$;

S_j ——枢纽内对应交路动车组年走行公里数(km);

$D_{\text{五级}}$ ——动车组五级修定检公里数(km);

250——动车组大修(三、四、五级修)年检修工作天数(d);

R_3 、 R_4 、 R_5 ——动车组三、四及五级修修程检修停时系数。

检修停时系数 R 表示为检修次数 k_i 与检修停时 t_i 的乘积,即;

$$R = k_i t_i \quad (i = 1, 2 \cdots 5) \quad (12)$$

其中检修次数 k_i 以一个五级修定检公里为计算循环周期,分别计算各检修等级检修次数 k_i 为:

$$k_i = \begin{cases} 1 & (i = 5) \\ \frac{D_5}{D_i} - \sum_i k_{i+1} & (i = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (13)$$

结合文献[14]国内动车组检修周期可分别根据配属车型进行检修停时参数计算,其中 CR400AF/BF 平台动车组根据国铁集团 2020 年 2 月发布的三级检修规程中规定三级修周期暂以运行 (120 ± 12) 万 km 或运行 3 年以先到为准,同时根据指导意见,高级修检修里程周期上限将分阶段逐步延长至 165 万 km^[16]。本文计算以 CRH3 及 CR400AF/BF 平台动车组定检公里指标进行计算,各检修等级检修停时参数如表 7 所示。

表 7 CRH3 及 CR400AF/BF 平台动车组
各修程检修停时参数表

检修等级	定检公里数	检修停时	检修次数/次	检修停时系数 R
一级检修	4 000 km	4.0 h	960	3 840 h
二级检修	2 万 km	4.5 h	236	1 062 h
三级检修	120 万 km	30 d	2	60 d
四级检修	240 万 km	45 d	1	45 d
五级检修	480 万 km	50 d	1	50 d

(3) 备用动车组数量 $N_{\text{备用}}$
枢纽内备用动车组数量一般可按运用动车组数量

乘备用率进行计算:

$$N_{\text{备用}} = N_{\text{运用}} \times \zeta \quad (14)$$

式中: ζ ——动车组备用率(或称预留率),新线设计中一般取 $\zeta = 0.06$ 。

根据文献[15]设计规定,结合目前国内铁路部门备用动车组配属情况及分布规模,全路备用动车组数量很少,备用率总体小于 0.06,个别铁路局动车组备用率略高于 0.06。

3.1.2 日车公里测算法

一般在新建高速铁路设计中结合枢纽内客流及行车组织情况,由于动车组平均日走行公里指标保守取值,因此不考虑检修动车组数量。根据动车组日走行公里数计算新建铁路本线枢纽内新增配属动车组数量表示为运用动车组数量与备用动车组数量之和:

$$N'_{\text{配属}} = N'_{\text{运用}} + N_{\text{备用}} \quad (15)$$

其中,运用动车组数量 $N'_{\text{运用}}$ 可表示为:

$$N'_{\text{运用}} = S_{\text{运}} / C \quad (16)$$

式中: $N'_{\text{运用}}$ ——运用动车组数量;
 $S_{\text{运}}$ ——本线枢纽内新增配属动车组日走行公里数(km);
 C ——本线枢纽内动车组平均日走行公里指标(km)。

该测算方法称为“日车公里法”,其中最为重要的一个参数为新建线枢纽内动车组平均日走行公里指标 C 的确定,直接关系着近、远期动车组配属及检修运维设施的布局 and 规模,需结合新建线枢纽内铁路技术标准、动车组乘务交路长度、配属动车组类型、设计及运维经验数据综合分析确定合适的平均日走行公里指标。

3.2 枢纽内动车段(所)检修规模测算

动车段(所)动车组检修工作量主要包括动车组存车任务、日常维修及高级修三部分主要内容,其中配属动车组存车任务主要设施包括动车组存车股道及配套洗车检测监测设备等,动车组日常维修及高级修任务分别由对应一至五级修程动车组检修库及配套设备设施承担。动车段(所)检修规模测算需结合枢纽内动车组运输组织方案及动车组检修定检标准计算检修工作量,从而科学合理的确定动车组存车场、日常维修和高级修检修厂房布置及配套设备设施。

根据国内动车组各修程定检公里及枢纽内对应交路动车组日走行公里数,则动车组一至五级对应修程年检修工作量可表示为:

$$H_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{C_j}{D_i} & (i = 5) \\ \sum_{j=1}^{j=n} \frac{C_j}{D_i} - \sum_i H_{i+1} & (i = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (17)$$

3.2.1 动车组检修库线数测算

枢纽内动车段(所)动车组检修库线数 n_j 分别为一、二、三、四及五级修对应检修库线数 n_{ji} 和:

$$n_j = \sum_{i=1}^{i=5} n_{ji} \quad (i = 1, 2 \cdots 5) \tag{18}$$

其中:

$$n_{ji} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{R_i}{\alpha \times 365 \times 12} \times \frac{S_j}{D_5} & (i = 1, 2) \\ \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\beta R_i}{\alpha 250} \times \frac{S_j}{D_5} & (i = 3, 4, 5) \end{cases} \tag{19}$$

式中: β ——动车组检修不平衡系数,取值参考式(11);

α ——动车组检修库线的设备利用率系数,经验取值 $\alpha=0.85$ 。

另外,根据国铁集团铁总运[2015]《关于明确动车组运用检修设施及设备配置标准的通知》中对于动车段(所)动车组运用维护管理经验数据显示:10列标准8辆短编组动车组,配置1条检查库线(满足2列标准8编组或1列16编组动车组停放)设施及配套检修设备,可用于动车段(所)一、二级修检查库线经验测算。

3.2.2 动车组存车线数测算

动车段(所)存车场一般有占地面积广、存车线族数量多及走行线长等特点,因此动车组存车线规模确定及布置形式直接关系着整个动车段(所)平面布局。存车线数 n_c 主要由枢纽内除去一至五级修各修程检

修动车组数($N_{检修} + n_{j1} + n_{j2}$)之外的所有配属动车组数 $N_{配属}$ 决定,包括运用动车组数量 $N_{运用}$ 及备用动车组数量 $N_{备用}$,表示为:

$$n_c = N_{运用} + N_{备用} - n_{j1} - n_{j2} \tag{20}$$

取一级修检查库线数 n_{j1} 作为整个日常一、二级检修库列位数,同时应考虑除去本枢纽内动车组是否存在外段(所)过夜的动车组数量 $N_{外}$ 及备用动车组 $N_{备用}$ 存车线数 n_0 ($n_0 = N_{备用}$),因此在设计中上式动车段(所)存车线数 n_c 可修正为:

$$n_c = N_{运用} + N_{备用} - n_{j1} - N_{外} + n_0 \tag{21}$$

3.3 南京枢纽测算分析

3.3.1 南京枢纽动车组配属量测算

根据南京枢纽近期(2035年)及远期(2045年)动车组开行方案,参照附录C,分别采用动车组配属数量全周转时间测算法计算南京枢纽动车组配属情况如表8所示,近期配属动车组数为64.39组,远期配属动车组数为78.95组,其中近期运用动车组数为52.87组,远期运用动车组数为64.72组。结合枢纽内动车组配属规模日车公里测算法,同时分析计算两种测算方法结果的误差百分比:

$$\Delta = \frac{N_{全周转时间测算法} - N_{日车公里测算法}}{N_{全周转时间测算法}} \times 100\% \tag{22}$$

式中: $N_{日车公里测算法}$ ——采用日车公里测算法;
 $N_{全周转时间测算法}$ ——全周转时间测算法计算的枢纽内动车段(所)配属、运用、备用及检修动车组数量。

表8 南京枢纽近、远期配属动车组规模表(组)

项目		配属动车组数 $N_{配属}$	运用动车组数 $N_{运用}$	备用动车组数 $N_{备用}$	检修动车组数 $N_{检修}$
全周转时间测算法	近期/远期	64.36 / 78.91	52.87 / 64.72	3.17 / 3.88	8.35 / 10.34
	近期/远期	78.25 / 96.87	73.82 / 91.39	4.43 / 5.48	-
误差百分比 $\Delta/\%$		-22	-41	-41	-

针对南京枢纽近、远期动车组开行方案,分别根据全周转时间测算法及日车公里测算法两种方法计算分析可知,日车公里测算法在不考虑检修动车组数量前提下计算的运用动车组数量及备用动车组数量比全周转时间测算法计算结果偏大约41%,配属动车组数计算结果偏大约20%,鉴于此,推荐采用日车公里测算法时在新建高速铁路动车组配属设计及枢纽内客流预测中适当调整枢纽内动车组平均日走行公里指标。本文计算对于南京枢纽近配属动车组测算以全周转时间测算法结果进行后续理论计算与说明。

3.3.2 动车组运用设施检修能力分析

根据南京枢纽路网规划及开行动车组的实际需求,随着南沿江、北沿江、宁淮、宁滁蚌等铁路的引入,南京枢纽动车运维需求将不断增加,分析计算南京枢

纽内始发终到动车组近期及远期动车组一至五级对应修程年检修工作量如表9所示。

表9 南京枢纽近、远期动车组年检修工作量表(组/年)

	一级检修 $H_{一级}$	二级检修 $H_{二级}$	三级检修 $H_{三级}$	四级检修 $H_{四级}$	五级检修 $H_{五级}$
初期	10 777.06	2 649.36	22.45	11.23	11.23
远期	13 344.33	3 280.48	27.80	13.90	13.90

利用全周转时间测算法南京枢纽配属动车组规模计算枢纽内近、远期动车组检修及存车列位数如表10所示,从表10可知,枢纽内远期(2045年)动车组一级修列位及存车列位数分别为14.34及72.04。

分别采用全周转时间测算法、日车公里结合经验测算法,根据南京枢纽近(2035年)、远期(2045年)动车组开行方案,分析计算南京枢纽内近、远期运维检修

表 10 南京枢纽近、远期动车组检修及存车
列位数表(以长编组计算)

	一级修 列位数 n_{j1}	二级修 列位数 n_{j2}	三级修 列位数 n_{j3}	四级修 列位数 n_{j4}	五级修 列位数 n_{j5}	存车 列位数 n_c
初期	11.58	3.20	3.49	2.62	2.64	58.84
远期	14.34	3.97	4.71	3.53	3.92	72.04

需求,动车组检查列位、检修列位及存车列位等运维检修设施如表 11 所示。

由表 11 可知,枢纽内近、远期动车组检查需求分别为 11.58 列位及 14.34 列位,根据南京枢纽既有设施现状 12 检查列位,计算南京枢纽初期动车组运用检

表 11 南京枢纽近、远期动车组检查、检修及存车列位数表(以长编组计算)

项目			配属动车组 数量	动车组检查列位 一、二级修列位	动车组检修列位 三级修列位 四级修列位 五级修列位			动车组存 车列位
全周转时间 测算法	运维检修需求	初期	64.36	11.58	3.49	2.62	2.64	58.84
		远期	78.91	14.34	4.71	3.53	3.92	72.04
	运维检修缺口	初期	-24.64	-0.42	3.49	2.62	2.64	-0.16
		远期	-10.09	2.34	4.71	3.53	3.92	13.04
日车公里及 经验测算法	运维检修需求	初期	78.25	15.65	-	-	-	78.25
		远期	96.87	19.37	-	-	-	96.87
	运维检修缺口	初期	-10.75	3.65	-	-	-	19.25
		远期	7.87	7.37	-	-	-	37.87

综上分析,既有南京枢纽内近、远期动车组检查及存车能力设施逐渐趋于饱和,远期动车组检查设施能力紧张,检修设施能力严重短缺,存车停车场地不足。同时考虑到南京枢纽已基本形成南京、南京南、南京北“三大客站”格局,就目前来看南京铁路枢纽主要存在现状客运系统布局不尽合理,既有客运站能力不能满足规划新线引入要求,枢纽过江通道能力不能适应研究年度线路引入及客货运增长需求,本文在枢纽动车组配属及运维资源能力测算方面采用统筹考虑的方式,在实际“三大客站”配套运维检修设施布局中并不能实现理想资源共享,因此实际南京枢纽内局部检修资源缺口更大,新建动车组检查、检修设施的扩能需求更迫切。

本次研究分析根据南京枢纽列车开行对数预测、行车方案及运输组织安排,在南京北动车所规模设计中采用全周转时间测算法、日车公里及经验测算法相结合的测算方式,但在现阶段实际设计中主要参照设计规范、经验数据及国内设计经典案例执行,本文中利用枢纽内动车组全周转时间对配属动车组规模及检修工作量进行的分析计算在本工程实施中暂作辅助参考。

基于此,根据表 11 动车组检查、检修及存车列位数,以远期枢纽建设考虑,南京枢纽内新建南京北动车

查施能力已趋于饱和,检查列位缺口为 -0.42 列位,远期枢纽内动车组检查列位缺口为 2.34 列位,动车组检查列位缺口较大,既有检查设施能力紧张。动车组检修列位数包括三、四及五级修列位数和,近、远期枢纽内动车组检修需求分别为 8.74 列位及 10.83 列位,既有南京枢纽内暂无配套动车组检修设施,根据动车组检修远期缺口 10.83 列位分析,远期南京枢纽动车组检修能力严重短缺,同时枢纽内动车组存车设施近期缺口为 -0.16 列位,现阶段已逐渐趋于饱和,远期缺口为 13.04 列位,缺口较大。其中动车组检查列位规模参照一级修列位数进行计算。

所近期设存车线 48 条(本工程实施 24 条,北沿江高铁工程实施 24 条),另预留 12 条。动车所内检查库近期设 8 条检查库线,本工程实施 4 线检查库,北沿江高铁工程实施 4 线检查库,远期另预留 4 线检查库,此外,动车所南侧预留扩建高级修条件。具体南京北动车所主要运维检修设施实施规模如表 12 所示。

表 12 南京北动车所主要运维检修设施实施规模表(条)

	动车组 检查线数	三级 修线数	四级 修线数	五级 修线数	动车组 存车线数
设计规模	8	-	-	-	48
预留	4	4+4(静调)	4	4	12

4 南京北动车所总平面布置及工艺设计

新建南京北站位位于南京市江北新区直管区内舟桥旅地块,G40 沪陕高速以东,104 国道(浦泗路)以北,朱家山河以南。新建南京北站为高架站,按三场分场布置,自北向南依次为沿江高铁车场和宁淮—宁蚌车场、普速车场。车站总规模为 16 台 30 线(含正线 6 条),其中沿江高铁车场规模为 5 台 9 线(含正线),宁淮—宁蚌车场规模为 6 台 12 线(含正线),规划普速车场规模为 5 台 9 线(含正线)。考虑规划七乡河过江通道实施,京沪铁路客车外绕后,南京北站规划普

速场东咽喉需增加与宁启铁路联络线。为充分利用京沪铁路外绕后既有长江大桥能力,宁淮—宁蚌场东咽喉增加与既有长江大桥联络线,按接上元门过江通道与接京沪长江大桥,双接方案布置。

南京北动车所位于新建南京北站西南方向约 5.5 km 处,京沪铁路北侧,西埂莲乡东侧,与综合维修工区、物流基地及培训基地合建,总计占地 3 589 亩,其中近期开工建设动车组存车场、检查场、综合维修工区及其它附属生产生活房屋共计 1 533 亩。主要承担沿江高铁以及宁淮城际铁路在南京北站办理的始发终到动车组的一、二级维修、整备和存车任务,在动车所东南侧设维修工区,动车所北侧预留三、四及五级修维修设施。动车组走行线自南京北站后西咽喉引出后下穿宁淮城际铁路及北沿江高速铁路正线引入动车运用所。

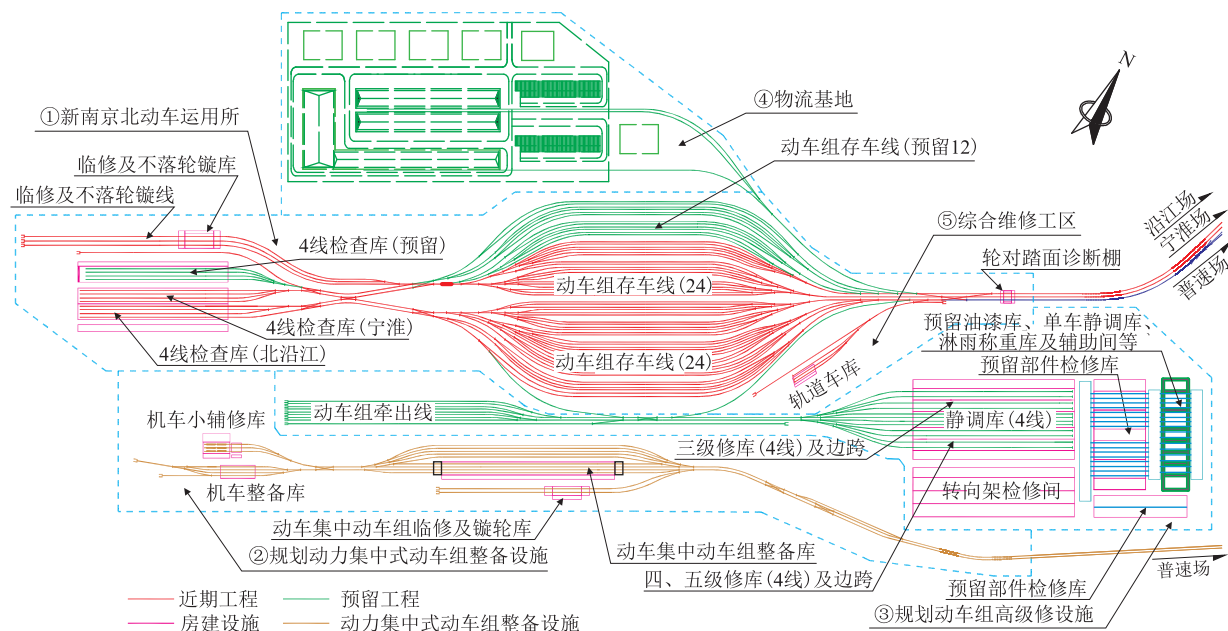
动车走行线自南京北站西咽喉引出后下穿宁淮及沿江正线引入动车所。新建动车运用所整体呈东西向布置,自东向西依此为出入段线、动车存车场、洗车库、检查库。

新建动车所出入段线上设跨 3 线动态检测棚 1 座,近期设存车线 48 条(本工程实施 24 条,北沿江

工程实施 24 条),另预留 12 条。存车场旁设不落轮镟库线 2 条,临修及不落轮镟修库 1 座。存车场与检查库间咽喉区设通过式洗车机(2 套),动车所内检查库近期设 8 条检查库线(本工程实施 4 线检查库,北沿江工程实施 4 线检查库),远期另预留 4 线检查库,检查库旁设 2 条人工清洗线兼牵出线。配套设有乘务员公寓、食堂、浴室、门卫等生产、生活房屋。此外,动车所南侧预留扩建高级修条件。

新建维修工区与宁淮城际合设,规模为大型杨路机械停放线 1 条,有效长满足 300 m,供电抢修列停留线 1 条,接触网作业车停留线 2 条,轨道车停留线 1 条。

南京北动车所总平面布置推荐方案为宁淮工程与北沿江工程共用南京北动车所,统筹考虑^[17-19]。本工程近期实施 24 条存车线、4 条检查库线,宁淮工程近期实施 24 条存车线、4 条检查库线,另预留 12 条存车线、4 条检查库线及高级修设施。动车运用所存车场与检查库线由东向西按纵列式二级场布置,由东向西依次布置轮对踏面诊断设备、存车场、中部咽喉及洗车机、检查库,不落轮镟库及临修库置于检查库北侧。如图 3 所示。



车组数量及备用动车组数量比全周转时间测算法计算结果偏大约41%,配属动车组数计算结果偏大约20%,动车组存车线数及检查库线数计算结果偏大约35%,计算枢纽内动车组配属、承担动车段(所)动车组检修工作量及检修设施规模测算裕量较为充足。

(2) 建议

在新建高速铁路枢纽内动车组配属设计及承担动车段(所)动车组检修工作量及检修设施规模测算中,采用日车公里测算法时,需结合枢纽内铁路主要技术标准、客流及行车方案等,合理调整枢纽内动车组平均日走行公里指标。该测算方法分析计算较为方便,适用于远期铁路枢纽规划投资及动车组车辆投产规模控制等方面。在新建高速铁路枢纽内动车组配属设计及承担动车段(所)动车组检修工作量及检修设施规模测算时,采用全周转时间测算法结果较为科学,能有效提高动车组使用率及运转效率,同时在运维检修方面可有效降低检修资源的浪费,减少投资。

在新建高速铁路枢纽内动车组配属设计及承担动车段(所)动车组检修工作量检修设施规模测算中,现阶段根据我国动车组检修技术管理规程,动车组一、二级检修作业采用分时作业的方式,其中一级修主要集中在夜间(21:00~8:00)时间段进行作业,二级修主要集中在白天进行作业。鉴于此,本文研究测算中对动车段(所)检查场检查库线数按动车组一、二级检修工作量较大的一级修对应规模进行布置设计,由此造成动车段(所)白天二级修作业列位空缺较大、检修设施设备及人力资源浪费较为严重,夜间人力投入负荷较大。就国内目前动车组检修运维现状分析,从“以人为本”角度考虑,建议适当增大配属动车组规模或对全路动车组运维检修设施作进一步扩能建设,尽可能调整动车组一、二级修作业分时点或统筹同时作业。

动车组作为多种高新技术结合的产物,其检修内容是多系统的,对于我们来说,从某种程度上说是全新事物,必须充分利用科学合理的规划设计方法和现代化的大数据手段做好运用故障统计分析,摸索掌握规律,不断积累经验,同时要吸取和借鉴国外先进的技术和宝贵经验,建立和完善符合中国铁路实际的运维机制,细化和改进各级修程的检修范围和内容,为动车组的安全运行提供可靠保证。

参考文献:

[1] 汤友富. 国内外铁路能源消耗现状比较与分析[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(1): 93-99.
TANG Youfu. Comparison and Analysis of Domestic and Foreign

Railway Energy Consumption[J]. Railway Transport and Economy, 2018, 40(1): 93-99.

[2] 王利军, 王利锋, 张雄. 中国高速铁路动车段及运用所设计技术发展[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 36-42.

WANG Lijun, WANG Lifeng, ZHANG Xiong. Study on Design Technology Development of EMU Depot and Workshop of China's High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 36-42.

[3] 李鹏. 基于路网互换的客运专线动车组检修计划的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

LI Peng. Research on the Routing Interchangeable-Based Motor Train Maintenance Plan of Passenger-Dedicated Line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[4] 中铁二院集团有限责任公司, 华设计集团股份有限公司. 新建宁淮城际铁路工程可行性研究文件[R]. 成都: 中铁二院集团有限责任公司, 南京: 华设计集团股份有限公司, 2019.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Design Group Co., Ltd. Feasibility Study Report for Newly-built Nanjing-Huai'an Intercity Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Nanjing: China Design Group Co., Ltd., 2019.

[5] 中铁二院集团有限责任公司, 华设计集团股份有限公司. 新建宁淮城际铁路工程初步设计文件[R]. 成都: 中铁二院集团有限责任公司, 南京: 华设计集团股份有限公司, 2020.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Design Group Co., Ltd. Preliminary Design of Newly-built Nanjing-Huai'an Intercity Railway[R]. Chengdu: China Eryuan Academy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing: China Design Group Co., Ltd., 2019.

[6] 董入凯. 苏南沿江城际引入南京铁路枢纽方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(S2): 65-68.

DONG Rukai. Study on the Linking Interurban Railway of South Jiangsu Riverside to Nanjing Railway Hub[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(S2): 65-68.

[7] 中国铁路设计集团有限公司, 华设计集团股份有限公司, 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 新建铁路苏南沿江铁路施工图设计文件[R]. 天津: 中国铁路设计集团有限公司, 南京: 华设计集团股份有限公司, 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2018.

China Railway Design Corporation, China Design Group Co., Ltd., China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Detailed Design of Nanjing-Taicang Intercity Railway[R]. Tianjing: China Railway Design Corporation, Nanjing: China Design Group Co., Ltd., Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2018.

[8] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

[9] 李佳洁. 动车组维修基地布局及规模研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

LI Jiajie. Research on Layout and Scale of EMU Maintenance Base[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[10] 曹克非, 向航鹰. 新建成都动车组检修基地必要性研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(1): 40-45.

CAO Kefei, XIANG Hangying. Necessity of New Construction of EMU Maintenance Base in Chengdu [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(1): 40-45.

[11] 安琪. 动车组运用计划的优化方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.

AN Qi. The Research on Optimization Method of EMUs Plan[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013.

[12] ALFIERI A, GROOT R, KROON L, et al. Efficient Circulation of Railway Rolling Stock[J]. Transportation Science, 2006, 40(3): 378-391.

[13] ZHOU Wenliang, XIE Jin, DENG Lianbo. Sequencing Optimization Method for Drawing Train Operation Diagram of High-speed Railway[J]. Journal of Multimedia, 2013, 8(1): 16-23.

[14] 向航鹰. 高速动车段规模的计算方法研究[J]. 中国铁路, 2005(6): 45-46.

XIANG Hangying. Research on the Calculation Method of the Scale of High-speed EMU Depot[J]. Chinese Railways, 2005(6): 45-46.

[15] TB 10028-2016 铁路动车组设备设计规范[S].

TB 10028-2016 Code for Design of Electric Multiple Unit Facility [S].

[16] TG/CL156-2020 CR400AF/BF 平台动车组三级检修规程[S].

TG/CL156-2020 Regulations on Level 3 Maintenance of CR400AF/BF Multiple Units[S].

[17] 谢红太. 新建宁淮城际铁路南京北动车所整体布局方案研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.

XIE Hongtai. Research on the Overall Layout and Technological Scheme of Nanjing North EMU for the New Ninghuai Intercity[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[18] 谢红太, 王伟, 武振锋. 铁路枢纽内动车组运维检修规模测算分析研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 90-100.

Xie Hongtai, Wang Wei, Wu Zhenfeng. Analysis and Research on the Scale of Operation Maintenance and Repair of EMUs in Railway Hub[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 90-100.

[19] 王伟, 谢红太, 雒沛丰, 等. 国内动车段(所)高级修厂房布局及检修工艺设计研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(6): 52-60.

WANG Wei, XIE Hongtai, LUO Peifeng, et al. A Study on the Design of Layout of Advanced Maintenance Workshops of Multiple Unit Depot (Section) and Maintenance Processes[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6): 52-60.

(上接第 11 页)

[2] 沈通, 马志文, 杜晓洁, 等. 世界高速磁悬浮铁路发展现状与趋势分析[J]. 中国铁路, 2020(11): 94-99.

SHEN Tong, MA Zhiwen, DU Xiaojie, et al. Development Status and Trend Analysis of High Speed Maglev Railways Worldwide[J]. China Railway, 2020(11): 94-99.

[3] 张炳民. 高速磁悬浮铁路车站布置图型研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(S2): 36-40.

ZHANG Bingmin. Study on Layout Pattern of High-speed Maglev Railway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(S2): 36-40.

[4] 孙玉玲, 秦阿宁, 董璐. 全球磁浮交通发展态势、前景展望及对中国的建议[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2): 109-119.

SUN Yuling, QIN Aning, DONG Lu. Research on Development and Prospects of Maglev Transportation and Suggestions to China [J]. World Sci-Tech R & D, 2019, 41(2): 109-119.

[5] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.

ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and Challenges of Sciences and Technologies in Modern Railway Engineering [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.

[6] 刘孜学, 杨捷, 虞凯, 等. 城市轨道交通行车环境安全监测系统技术方案研究[J]. 通信与信息技术, 2017(2): 69-72.

LIU Zixue, YANG Jie, YU Kai, et al. Research on Technical Scheme of Safety Monitoring System for Urban Rail Transit Operating Environment [J]. Communication & Information Technology, 2017(2): 69-72.

[7] 刘孜学, 曾永平, 周帅, 等. 川藏铁路峡谷风特性监测系统的方案研究及实现[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(2): 29-34.

LIU Zixue, ZENG Yongping, ZHOU Shuai, et al. Research and Implementation of Canyon Wind Characteristics Monitoring System along Sichuan-Tibet Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(2): 29-34.

[8] 虞凯, 刘孜学, 韦道准. 川藏铁路基础设施实时监测预警系统架构及功能研究[J]. 高速铁路技术. 2015, 6(2): 41-44.

YU Kai, LIU Zixue, Wei Daozhun. The Architecture and Function Research on the Real-Time Monitoring and Early Warning System of the Infrastructure along the Sichuan-Tibet Railway [J]. High Speed Railway Technology. 2015, 6(2): 41-44.

[9] CJJ/T 310-2021 高速磁浮交通设计标准[S].

CJJ/T 310-2021 Standard for Design of High-speed Maglev Transit [S].