文章编号:1674-2974(2019)11-0164-08

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2019.11.019

强电、强磁场对钢箱梁跨越磁浮快线轨道 顶推落梁施工的影响

姜早龙^{1,2,4+},刘晓君¹,金波²,张志军³,刘正波²,赵嘉祺²,李园² (1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 3. 中铁七局集团第三工程有限公司,陕西 西安 710032;4. 湖南湖大建设监理有限公司,湖南 长沙 410082)

摘要:中低速磁浮快线轨道通电时会使周围的电场和磁场发生强烈的变化,形成强电、 强磁场效应,是上跨磁浮快线轨道钢箱梁顶推及落梁施工的重大安全隐患.以长沙黄花国际 机场大道工程为案例,研究强电、强磁场对钢箱梁跨越磁浮快线轨道顶推落梁施工的影响.采 用大型有限元分析软件 ANSOFT,对磁浮快线轨道产生的强电、强磁场进行有限元分析及数 值计算,假定钢箱梁推进过程中磁浮轨道电流保持不变,通过改变钢箱梁相对于轨道的位置, 研究不同工况下强电、强磁场对钢箱梁顶推落梁产生的影响,并对每一个工况进行静态分析 及计算,得出相应的施工安全范围,为今后类似工程提供具有参考价值的理论和经验.

关键词:钢箱梁;顶推施工;有限元;电场;磁场 中图分类号:F407.9 文献标志码:A

Influence of Steel Electromagnetic Field on Pushing and Falling Construction of Steel Box Girder over Maglev Track

JIANG Zaolong^{1,2,4†}, LIU Xiaojun¹, JIN Bo², ZHANG Zhijun³, LIU Zhengbo², ZHAO Jiaqi², LI Yuan²

(1. College of Civil Engineering, Xi' an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. The Third Engineering Co Ltd of China Railway Seventh Group, Xi'an 710032, China;

4. Hunan Huda Construction Supervision Co Ltd, Changsha 410082, China)

Abstract: The surrounding electromagnetic fields will be changed greatly when the track of medium and low speed maglev is electrified. The generated effect of strong electromagnetic field has a great impact on the safety of the pushing and falling of the steel box girder over the maglev track. Therefore, taking the construction of Changsha Huanghua International Airport Avenue Project as a practical case, the impact of electromagnetic field on the pushing and falling of the steel box girder over the maglev track is studied. The large finite element analysis software ANSOFT is used to perform finite element analysis and numerical calculation on the strong electromagnetic field of the maglev track. It is assumed that the current of the maglev track remains constant during the advancement of the steel box girder. By changing the position of the steel box girder relative to the track, the impact of the strong electron

* 收稿日期:2019-01-19
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308204), National Natural Science Foundation of China(51308204)
 作者简介:姜早龙(1971-),男,湖南临湘人,湖南大学副教授,西安建筑科技大学博士研究生
 †通讯联系人, E-mail: jiangzaolong70@163.com

magnetic field generated by the maglev track on the launching and falling of the steel box girder under the different working conditions is studied. After performing the static analysis and calculation for each working condition, the corresponding construction safety scope is obtained. The conclusion of the study provides references and suggestions for similar projects in the future.

Key words: steel box girder; pushing construction; finite element; electric field; magnetic field

随着世界桥梁建设领域的快速发展,桥梁的结 构形式与受力特性日益复杂",交叉跨越、临水临 电、跨山跨河等现象不断增多,增加了桥梁施工与管 理的难度.顶推落梁、BIM、快速施工、静力拆除等技 术持续创新、相互融合,逐渐突破桥梁施工的局限 性,施工工艺不断改进,监管效率不断提高12-41.顶推 法构思源于钢箱梁纵向拖拉法,采用若干个千斤顶 替代卷扬机滑车组,板式滑动设备替代滚筒,将梁体 顶推向¹⁹,具有快速、安全、经济、优质、受外界干扰较 小和占用场地少等优势.当桥梁施工需要跨越深谷、 且有交通线路(铁路、公路、河道)或难以拆迁的既有 建筑物(名胜古迹、地下设施等)时,采用顶推施工法 从空中完成跨越作业,是一种比较理想的方法.自 1959年在奥地利阿革尔桥中成功应用后,顶推施工 工艺不断创新,在国内外各类大跨径桥梁施工中相 继运用⁶¹,建成了多座预应力混凝土连续梁桥,得到 了快速的发展[7-8]. 1977 年,我国首次采用单点顶推 法施工建成了预应力混凝土连续梁桥——狄家河 桥[9-11]. 目前,全世界采用顶推法施工的大型桥梁已 经超过 300 座[12].

采用顶推法在城市内部修建桥梁时,常常会遇 到跨越既有城市公路及桥梁的施工环境^[13].对于跨 越既有线路的顶推施工方法,国内外学者已进行了 大量的研究^[14],近年来关于跨越多条线路及铁路电 气化接触网等难点问题的顶推施工屡见不鲜,但跨 越磁浮快线桥梁工程的施工方式在国内并无先例. 钢箱梁跨越磁浮快线轨道工程具有涉及专业众多、 磁浮安全隐患大、周围管线复杂、施工难度大、磁浮 快线公司管控严格等难点,对顶推施工的要求很高. 既要按时完成项目建设,又要保证现场施工的安全 性与磁浮快线列车的正常运营,是工程的关键.在顶 推落梁施工前对磁浮快线轨道产生的强电、强磁场 进行分析,预测安全距离,形成重难点专项施工方 案,具有一定的价值.本文以长沙黄花国际机场大道 工程(以下简称"机场大道工程")为案例,研究强电、 强磁场对钢箱梁跨越磁浮快线轨道顶推落梁施工的 影响.

1 工程概况

长沙黄花国际机场大道工程主线高架桥 II 段 (pm048~pm051 段)为等高等宽的连续钢箱梁,位于 主线路高架桥的第 17 联处,跨越长沙磁浮快线,与 磁浮快线所在高架桥平面斜交 40°,孔跨布置为 (23.85+39.15+27)m,全长 89.9 m,梁高 2 m,梁面宽 度 17.8 m.主跨段钢箱梁采用双导梁顶推法进行架 设,顶推长度 50.4 m,顶推距离 75 m;顶推到位后, 采用高位落梁技术将钢箱梁下落至设计标高,落梁 高度 3.3 m,落梁结束后,钢箱梁底部距磁浮快线轨 道高度约 4.2 m.

本项目高架桥平均墩身高度 16 m,距磁浮快线 外轨最小距离仅 1.1 m,磁浮快线外轨通有 1 500 V 直流电,属于强电、强磁场施工环境,安全隐患大.施 工期间若既要保证磁浮快线正常运营,又不耽误工 期,就需要在接触轨道通电时有强电、强磁场情况下 进行钢箱梁顶推及高位落梁施工,一旦施工人员跌 落,可能造成人员伤亡等意外事故;施工材料和工具 掉落,可能造成磁浮快线轨道损坏或运行事故.

2 仿真模型参数计算

2.1 模型构建

采用 Maxwell/AANSOFT 建立箱梁、桥墩及磁浮 快线轨道的有限元 3D 仿真模型,如图 1 所示. 将磁 浮快线轨道的材料属性设置为钢材(steel-10),由于 钢箱梁和导梁材质相同,因此将箱梁、导梁作为一个 整体进行建模. 桥墩选取离轨道最近的 4 个进行 建模. 模型分析主要分为3个阶段:第1阶段为顶推 刚开始时,即箱梁在最左侧桥墩处;第2阶段为顶推 过程中,箱梁向右顶推40m时;第3阶段为顶推结 束时,箱梁向右顶推75m,并准备进行高位落梁.



图 1 箱梁、桥墩及磁浮轨道的有限元仿真模型 Fig.1 Finite element simulation model of box girder, pier and maglev track

2.2 参数设置

建立仿真模型,在磁浮快线轨道中添加电流激励,如图 2(a)所示.由于接触轨电压为 DC1 000 V~1 800 V,最大持续载流量为 3 000 A,而实际运行过程中磁浮快线轨道电流一般小于 DC2 000 A.因此,考虑最不利情况,仿真设置磁浮快线正常运行时的最大电流激励为 DC2 000 A,电流方向如图 2(b)所示.





 (b)带电流激励的仿真模型
 图 2 顶推开始时磁浮轨道激励设置模型
 Fig.2 Excitation setting model of maglev orbit at the beginning of incremental launching

将有限元仿真求解器设置为静磁场,对仿真模型添加110%的求解域进行网格剖分求解,网格剖分示意结果如图3所示,计算结果如表1所示.可发现仿真在第10次迭代计算后,模型能量损耗已经小于10%;对求解域内进行网格剖分后,轨道处剖分尺寸较小,说明计算精度较高.



图 3 仿真模型剖分图 Fig.3 Split diagram of simulation model

表1 仿真收敛计算结果

Tab.1 Simulation convergence calculation result

迭代	四面体求解域	总能量	能量损耗	能量误差
次数	能量/J	/J	1%	1%
1	3 424	77 249	32.9	N/A
2	4 457	71 072	28.8	8.0
3	5 808	70 204	28.1	1.2
4	7 570	66 257	22.5	5.6
5	9 859	64 142	17.5	3.2
6	12 855	59 267	14.1	7.6
7	16 743	54 382	11.8	8.2
8	21 765	53 011	11.4	2.5
9	28 327	48 254	10.0	9.0
10	36 870	47 150	8.2	2.3

3 磁浮轨道产生的磁场研究

3.1 各工况下磁场云图

仿真结束后,对整体模型进行磁场云图求解,可 得箱梁、桥墩及磁浮快线轨道周围的磁感应强度,如 图 4 所示.以3条直线为例,分别建立3条线上磁场 强度分布曲线图,3条直线位置及最不利情况分析 如表2所示.



(a)工况1:初始拼装完成,准备顶推



(b)工况 2:向前顶推 40 m



(c)工况 3:顶推 75 m,顶推落梁结束
 图 4 箱梁、桥墩及磁浮快线轨道的磁感应强度分布图
 Fig.4 Magnetic induction intensity distribution of box girders, bridge piers and magnetic levitation track

表 2 磁场分析直线位置及最不利情况 Tab.2 Magnetic field analysis of line position and the most unfavorable situation

序号	坐标及位置	研究内容	最不利情况分析
直线 1	 (-10,10,0)→ (-50,40,0) 位置:横穿4条 磁浮快线轨道 	 1)磁浮快线轨道 处磁场强度变化 2)不同工况下钢 箱梁对轨道磁场 影响 	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁下表面距轨道 4.2 m,为整个施工过 程中钢箱梁最接近轨 道位置
直线 2	 (-30,10,0)→ (-30,10,25) 位置:磁浮快线 轨道向上延伸 25 m 	磁浮快线轨道上 方磁场强度变化	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁下表面距轨道 4.2 m,为整个施工过 程中施工人员最接近 轨道位置
直线 3	 (10,10,9.5)→ (-70,10,9.5) 位置:橫穿钢箱 梁表面 	箱梁上表面磁场 强度变化	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁上表面距轨道 6.2 m,为整个施工过 程中最接近轨道位置

3.2 各工况下磁场强度分析

各工况下第1条直线磁场强度分布曲线,如图 5(a)(b)(c)所示.第1条直线上磁场强度有4个峰

值,每个峰值位置都位于4条轨道附近,磁场强度由 4条轨道向外递减.对其大小与相应距离进行分析, 列出各工况下第1条直线上磁感应强度与对应距离 的关系,如表3所示.可以发现离两条外侧轨道大约 3.5 m 附近磁感应强度小于国家安全标准值(≤100 μT);对比3个工况可知,工况2及工况3整体磁感 应强度均小于工况1,说明当钢箱梁通过磁浮快线 轨道上方时,对轨道附近磁场有一定影响.







12 3	ক	1 未且线上磁急应强度与对应距离农
Tab	.3	The first line of magnetic induction

and	oorroch	onding	dictorea	tabla	
ana	corresp	onaing	distance	table	

距离/m		磁感应强度/μT	
	工况 1	工况 2	工况 3
10.5	95.6	100.6	100.6
14.0	681.9	625.2	663.2
25.0	768.6	552.3	637.6
36.0	666.2	624.8	512.0
42.0	627.7	583.2	522.1
45.5	97.5	98.4	99.3

第2条直线磁场强度分布曲线,如图 5(d)(e) (f)所示.第2条直线磁场强度随距离变化较为规 律,磁浮快线轨道中磁场强度最大,从轨道向箱梁表 面磁场强度逐渐递减.第2条直线上磁感应强度与 对应距离的关系如表4所示,可以发现纵向距离只 有离轨道大于2.5m时,磁感应强度才小于国家安 全磁感应强度标准值(≤100 μT).

表 4 第 2 条直线上磁感应强度与对应距离表
Tab.4 The second line of magnetic induction
and corresponding distance table

距离/	磁感应强度/µT		
此芮/m	工况 1	工况 2	工况 3
0	40.6	98.8	106.2
0.75	254.9	121.7	95.1
2.5	99.9	106.2	98.3
4.2	55.3	70.3	70.4
7.5	38.9	44.5	32.5
9.5	25.3	32.3	22.7

各工况下第3条直线磁场强度分布曲线如图5 (g)所示,发现箱梁表面上的磁场强度几乎为0.由 此可见,磁场分布对箱梁表面的影响很小,施工人员 可正常施工.

3.3 磁浮轨道产生的磁场实测

现场采用 LZT-1160 磁场强度测试仪对钢箱梁 顶推落梁施工范围内的磁场强度进行实测,实测结 果如表 5 所示.对比表 4 可知,实测磁感应强度均小 于理论分析结果(磁浮公司采取了相应的防护措施 所致).可以发现纵向距离只有离轨道大于 0.7 m 时,磁感应强度才小于国家安全磁感应强度标准值 (≤100 μT).

表 5 磁感应强度实测值

Tab.5 Magnetic induction measured value

距轨道		磁感应强度/μT	
距离/m	顶推 30 m 时	顶推 45 m 时	顶推 75 m 时
0.7	98.6	99.8	95.2
2.5	32.8	41.1	39.9
7.5	7.7	10.2	9.9
0.2	0.2	0.3	0.2

注:国家标准值 100 µT.

4 磁浮轨道产生的电场研究

4.1 各工况下电流密度云图

仿真结束后,对整体模型进行电流密度云图求 解,可得箱梁、桥墩及磁浮快线轨道周围的磁感应强 度,如图 6 所示.以 3 条直线为例,分别建立 3 条线 上电流密度云图分布曲线图,3 条直线位置及最不 利情况分析见表 6.



(a)工况1:初始拼装完成,准备顶推



(b)工况 2:向前顶推 40 m



(c)工况 3:顶推 75 m,顶推落梁结束
 图 6 箱梁、桥墩及磁浮快线轨道的电流密度分布云图
 Fig.6 Current density distribution of box girders, bridge piers and magnetic levitation track

4.2 各工况下电流密度分析

3种工况下第1条直线电流密度分布曲线如图 7(a)(b)(c)所示.第1条直线上电流密度有4个峰 值,每个峰值位置都位于4条轨道附近,电流密度由 4条轨道向外递减.对其大小与相应距离进行分析, 第1条直线上电流密度峰值与对应距离的关系如表 7所示,可以发现离两条外侧轨道大约0.7 m 附近电 流密度小于人体安全限值(≤10 mA/m²).对比3个 工况可知,3工况下轨道附近电流密度大小无明显 差异,说明当钢箱梁通过磁浮快线轨道上方时,对轨 道附近电场无影响.

表 6 电场分析直线位置及最不利情况 Tab.6 Electric field analysis of line position and the most unfavorable situation

序号	坐标及位置	研究内容	最不利情况分析
直 线 1	 (-10,10,0)→ (-50,40,0) 位置:横穿4条磁 浮快线轨道 	 1) 磁浮快线轨道 处电流密度变化 2) 不同工况下钢 箱梁对轨道电场 影响 	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁下表面距轨 道 4.2 m,为整个施 工过程中钢箱梁最 接近轨道位置
直 线 2	 (-30,10,0)→ (-30,10,25) 位置:磁浮快线轨 道向上延伸 25 m 	磁浮快线轨道上 方电流密度变化	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁下表面距轨 道 4.2 m,为整个施 工过
直 线 3	 (10,10,9.5)→ (-70,10,9.5) 位置:横穿钢箱梁 表面 	箱梁上表面电流 密度变化	工况 3:落梁结束时, 钢箱梁上表面距轨 道 6.2 m,为整个施 工过程中最接近轨 道位置



2 215.0

2 503.0



Fig.7 Curves of current density distribution on three lines

表 7 第 1 条直线上电流密度与对应距离表					
Tab.7 The first line of current density					
	and corresponding distance table				
旺卤/		电流密度/(µA·m ⁻²)		
叱芮/m	工况 1	工况 2	工况 3		
13.3	0.0	0.0	0.0		

2 215.0

2 503.0

850.1

839.7

14.0

24.0

36.0	2 000.0	—	—
42.0	1 900.0	_	—
42.3	0.0	0.0	0.0
第2条	直线电流密	度分布曲线,	如图 7(d)(e)
(f) 所示.箩	第2条直线电	流密度随距	离变化较为规
律,磁浮快约	线轨道内部电	流密度最大,	从轨道向箱梁
表面电流密	。度逐渐递减.	第2条直线	上电流密度与
对应距离的	关系如表 8 原	沂示,可以发	现只有磁浮快
线轨道内部	8电流密度较大	大.因此,只要	施工人员不触
碰磁浮快线	轨道,轨道	电场就不会对	施工人员的安

全产生影响. 表 8 第 2 条直线上电流密度与对应距离表 Tab.8 The second line of current density

and corresponding distance table

距す	E	も流密度/(μA・m [−]	2)
距离/m	工况 1	工况 2	工况 3
0	2.78	1.46	1.51
1.4	6.64	6.98	2.12
2.5	1.22	0.72	4.81
4.2	0.12	0.05	4.81
7.5	0.18	0.08	4.81
9.5	0.07	0.08	4.81

第3条直线电流密度分布曲线,如图7(g)所示,通过数据显示,发现箱梁表面上的电流密度几乎为0,可见电场分布对箱梁表面的影响很小,施工人员可正常施工.

5 电磁场仿真结论

5.1 磁场研究结论

1)系统磁场分布主要集中在磁浮快线轨道位
 置,距离磁浮快线轨道越远磁场强度越小且磁场衰

减越快.

2)距离磁浮快线两条外轨 3.5 m 以内,磁感应 强度超过国家安全标准值(≤100 μT). 为保证安全, 距离两条外轨附近 3.5 m 的施工人员应配备绝缘工 器具.

3)距离磁浮快线轨道正上方 2.5 m 以内,磁感 应强度超过国家安全标准值 (≤100 μT). 但当落梁 完成时,梁底附近施工人员离轨道大约 4.2 m,为最 接近轨道的情况,且磁浮公司采取了相应的防护措 施,导致磁场强度实测值小于理论值.因此,施工人 员受磁场影响较小.

4)磁浮快线轨道在箱梁表面产生的磁场强度几 乎为0,故箱梁表面施工人员可以正常施工.

5)现场施工时应严格避免金属物品掉落到轨道 附近,防止造成磁浮快线轨道损坏或磁浮快线运行 事故.

5.2 电场研究结论

1)系统电场分布主要集中在磁浮快线轨道内以 及各轨道之间,最大电流密度高达 2 500 A/m²,极易 造成触电死亡等意外事故.因此,在列车通电运行时 磁浮快线轨道附近严禁施工人员靠近.

2)距离磁浮快线两条外轨 0.7 m 以内,电流密 度超过人体电流密度安全限值(≤10 mA/m²),为保 证安全,两条外轨附近 0.7 m 以内严禁施工人员 靠近.

3)磁浮快线轨道在箱梁表面产生的电场几乎为 0.因此,箱梁表面施工人员可以正常施工.

参考文献

 [1] 张建,王永光,孔祥韶,等.九堡大桥主桥顶推施工模型试验研 究[J].中外公路,2017,37(5):94—99.

ZHANG J, WANG Y G, KONG X S, *et al.* Experimental study on the push construction model of the main bridge of Jiubao bridge [J]. Sino-foreign Highway, 2017, 37(5):94–99. (In Chinese)

[2] 杜亚江, 宗海. 曲线钢箱梁桥顶推施工新方法[C]//2010 年全国 桥梁学术会议论文集. 北京:中国公路学会桥梁和结构工程分 会, 2010: 425-430.

DU Y J,ZONG H. New construction method of curved steel box girder bridge jacking [C]//Proceedings of 2010 National Bridge Academic Conference. Beijing: Bridge and Atructural Engineering Branch, China Highway Society, 2010: 425–430. (In Chinese)

[3] 姜早龙,李园,张志军,等. BIM 技术在跨越磁悬浮轨道桥梁工 程施工中的应用研究[J].施工技术,2018(24):58—63. JIANG Z L, LI Y, ZHANG Z J, *et al.* Research on the application of BIM technology in the construction of trans-maglev railway bridge [J]. Construction Technology, 2018(24): 58–63. (In Chinese)

- [4] 张志军,万钰,姜早龙,等.承插型键槽式钢管支架在城市高架 桥施工中的应用研究[J].公路工程,2018,43(6):15-21.
 ZHANG Z J, WAN Y, JIANG Z L, *et al.* Research on application of spigot type steel pipe support in urban viaduct construction [J].
 Highway Engineering, 2008, 43(6):15-21. (In Chinese)
- [5] 苏魁. 钢箱梁斜拉桥顶推施工关键问题研究[D]. 上海:同济大
 学土木工程学院,2006:2.
 SU K. Research on key problems of steel box girder cable-stayed bridge jacking construction [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2006:2. (In Chinese)
- [6] ZELLNER W, SVENSSON H. Incremental launching of structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(2): 520-537.
- [7] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国 公路学报,2016,29(2):32—43.
 ZHAOR D,ZHANG S Y. Research status and development trend of bridge jacking construction [J]. China Highway Journal,2016,29 (2):32—43. (In Chinese)
- [8] 张晓东. 桥梁顶推施工技术[J]. 公路,2003(9):45-51. ZHANG X D. Construction technology of bridge jacking [J]. Highway,2003(9):45-51. (In Chinese)
- [9] 汤俊生. PC 梁顶推施工技术的回顾与展望[J]. 桥梁建设,1996 (1):11-14.
 TANG J S. Review and prospect of PC beam jacking construction technology [J]. Bridge Construction,1996(1):11-14. (In Chinese)
- [10] 邵厚坤,周以诚.用顶推法施工的狄家河连续梁桥设计[J]. 铁道标准设计,1979(8):7-14.
 SHAO H K,ZHOU Y C. Design of Dijiahe continuous girder bridge constructed by push method [J]. Railway Standard Design,1979 (8):7-14. (In Chinese)
- [11] 陈青. 连续梁桥的顶推施工技术 [J]. 中外公路, 1998(1):22-25.

CHEN Q. Jacking construction technology of continuous beam bridge [J]. Sino-foreign Highway, 1998(1):22-25. (In Chinese)

 [12] 陈勤.桥梁钢箱梁顶推施工过程受力分析及施工对策 [D].重 庆:重庆大学土木工程学院,2013:1.
 CHEN Q. Force analysis and construction countermeasures in the process of bridge steel box girder jacking construction [D].
 Chongqing:College of Civil Engineering,Chongqing University,

2013:1. (In Chinese) [13] 马如岭. 跨铁路线 78m 钢桁梁顶推施工 [J]. 铁道建筑,2006 (2):15-16.

MA R L. Jacking construction of 78m steel truss beam across railway line [J]. Railway Construction, 2006(2): 15–16. (In Chinese)

[14] MARTINKOVIĆ B, IVANKOVIĆ A M, ILIĆ K. Competitiveness and progress in application of incremental bridge launching [C]// Proceedings of IABSE Symposium. Madrid, 2014: 823-830.