

中国磁浮交通
基础理论与关键技术丛书

常导高速磁浮 轨道结构

Guideway Structure of High Speed
Maglev System

曾国锋 叶丰 · 编著



上海科学技术出版社



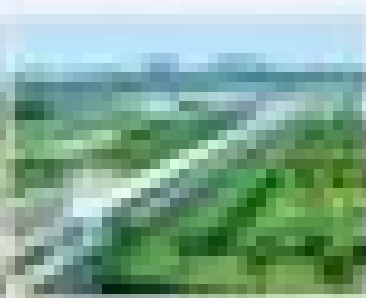
常导高速磁浮

轨道结构

主编：王秉刚

副主编：王秉刚

中国铁道出版社



中国铁道出版社

内 容 提 要

本书以常导高速磁浮轨道结构系统为研究对象,研究领域涉及常导高速磁浮线路轨道系统的设计、制造、现场施工和运维。在分析轨道结构系统特点的基础上,主要阐述了系统构成、设计技术要求、轨道梁型式、结构设计、车-轨动力学、轨道梁的制造和现场施工工艺以及运维中的轨道系统状态监测和评估等方面的内容。

本书是对多年来广大工程技术人员在上海高速磁浮示范运营线建设和“十五”至“十三五”四个五年计划中,通过不懈努力获得的建设、科研和运维经验,以及国家磁浮交通工程技术中心多年来研究成果的梳理和总结。应用范围为常导高速电磁悬浮轨道系统,中速和中低速磁浮等其他磁浮制式亦可借鉴。对正在努力和即将投入高速磁浮系统技术研究事业的设计、建造和科研人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

常导高速磁浮轨道结构 / 曾国锋, 叶丰编著. -- 上海: 上海科学技术出版社, 2024. 1
(中国磁浮交通基础理论与先进技术丛书)
ISBN 978-7-5478-6268-1

I. ①常… II. ①曾… ②叶… III. ①磁浮铁路—轨道(铁路) IV. ①U237

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第134314号

常导高速磁浮轨道结构
曾国锋 叶丰 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)
邮政编码 201101 www.sstp.cn
上海颀辉印刷厂有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 18.5
字数 390千字
2024年1月第1版 2024年1月第1次印刷
ISBN 978-7-5478-6268-1/U·143
定价: 170.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

编委会

中国磁浮交通
基础理论与先进技术丛书

主任

陈小鸿

副主任

(以姓氏笔画为序)

丁叁叁 王 平 周晓明 盛雄伟

委员

(以姓氏笔画为序)

万建军 龙志强 刘万明 闫晓言

李耀华 佟来生 张昆仑 徐洪泽

梁 潇 翟 鸣

序

常导高速磁浮轨道结构

作为一名土木工程师,我有幸参与了许多重大工程的建设,磁浮项目是我凝聚了许多感情和心力的“收官之作”。从 62 岁受命建设上海磁浮示范运营线,到获得国家两个五年计划项目科研支持,至 74 岁退休,我仍保持对磁浮技术的持续关注,常学常新,体会颇深。

在常导高速磁浮交通系统中,轨道结构子系统投资占比最高,也是当初上海磁浮示范运营线中中方主要负责和攻关的核心技术。我们在轨道梁选型、直线拟合、变形和精度控制、成套施工工艺、新材料开发等方面突破了许多技术难点,最终在最短的时间内实现了这项“满足机电产品要求的精密土木工程”,确保上海磁浮示范运营线安全稳定运行至今。在这 20 余年中,我们在轨道结构设计、施工、制造、安装和维护技术方面都有了许多积累,对这些积累加以总结,是有重要现实意义的。

本书作者是我的老同事,自风华正茂之年起加入磁浮队伍,坚持奋战在磁浮技术研发第一线至今,从事磁浮线路轨道技术的研究工作已逾 20 年之久。本书以上海磁浮示范运营线轨道结构系统以及多年来轨道结构研究成果为依托,全面介绍了常导高速磁浮系统轨道结构设计要求、结构的动力性能、结构型式、施工工艺以及运维技术,既包括了对上海高速磁浮线建设过程中所获经验的总结,也涵盖了近些年来的高速磁浮轨道结构技术研究中取得的新成果,对磁浮技术的发展大有裨益。

回顾历史是为了更好地发展未来,希望本书能给业内外相关人士提供有价值的参考。



2023 年 9 月

2002年12月31日,上海高速磁浮示范运营线投入单线试运行,是常导高速磁浮技术发展史上的标志性事件。上海磁浮线持续以最高430 km/h的速度运营至今已超过20年,目前仍是世界上商业运营的最快的地面交通线。

轨道结构是常导高速磁浮直线电机系统的重要组成部分,因而相较于传统的轨道交通结构有着较高的变形和几何精度要求。高速磁浮轨道结构设计和建造中需要解决的问题,本质上是土建结构的应用边界问题。土建在整个高速磁浮工程项目中约占整个系统成本的45%,其中绝大部分是轨道结构的投入。因此,轨道结构成本控制的好坏严重制约着系统的推广应用。为了进一步推动高速磁浮系统工程应用,轨道结构的优化至关重要。在上海磁浮线的建设过程中,我国广大工程技术人员已经系统地掌握了相关技术,实现了轨道结构国产化。此后,在国家的大力支持下,相关研究单位持续组织了“十五”至“十三五”四个五年计划的研究。与此同时,对轨道结构的运维经验也在不断积累,这些都对轨道结构的进一步发展起到了重要的作用。目前,我国的常导高速磁浮轨道结构技术已经处于世界领先地位。

作为常导高速磁浮轨道结构研究和运维的参与者,很荣幸能够借此次编撰“中国磁浮交通基础理论与先进技术丛书”的机会,在众多工程技术人员不懈努力获得的上海磁浮线建设、后续科研和多年运维的经验基础上,通过梳理和总结,并结合作者多年研究的体会撰写本书,希望能够为正在努力和即将投入高速磁浮系统技术研究事业的技术人员提供参考。

本书共分为9章。

第1章简要介绍了常导高速磁浮线路轨道系统的构成、国内外的研究进展,以及线路轨道系统技术的主要研究范畴。

第2章介绍了轨道结构设计的技术要求,主要包括系统参数、设计荷载和设计控制

条件。

第3章介绍了主要的轨道梁型式,包括复合式轨道梁、整体式轨道梁、板梁、叠合式轨道梁和桥上梁结构,以及各种轨道梁结构的特点。

第4章基于上海磁浮线的经验,着重阐述了梁跨布置和轨道梁设计中的变形控制,以及线路线形的拟合等问题。

第5章基于作者多年以来对磁浮车轨振动的研究,阐述了磁浮车-轨动力问题,包括车-轨-悬浮控制系统动力学模型、轨道不平顺模拟及分析过程和求解方法,并结合实例对车-轨和车-岔动力问题进行了分析。

第6章介绍了轨道梁的制造工艺,包括复合式轨道梁、整体式轨道梁和轨道板的制造。

第7章介绍了现场施工工艺,包括施工测量、复合式和整体式轨道梁的运输、吊装和精调,以及叠合式轨道梁的现场施工。

第8章介绍了下部结构。以高架标准跨度轨道结构为对象,介绍了常导高速磁浮轨道结构中的支座、墩柱和基础结构及其需满足变形控制要求。

第9章结合作者多年以来关于上海磁浮线轨道结构运维技术支持和相关研究实践,阐述了精密测量和线形调整,以及系统状态评估等问题。

感谢国家磁浮交通工程技术研究中心陈小鸿主任一直以来的鼓励和支持,感谢吴祥明老主任在写作过程中提出详尽、中肯的意见和建议。感谢参与轨道结构研究工作、付出辛勤汗水的广大科技工作者。感谢王国强、朱志伟、袁亦竑等同事多年以来在研究工作中的支持。感谢刘鸣博、彭龙、黄诗华、王楷同学协助整理书稿。感谢韩紫平博士对全书进行了校核。

感谢多年以来在科研、设计、施工和运维领域的合作单位上海磁浮交通发展有限公

司、上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司、上海建工(集团)总公司及所属子公司——上海市建筑构件制品有限公司、上海市安装工程有限公司、上海市机械施工有限公司、上海市第七建筑有限公司、上海建工(集团)总公司总承包部和上海建工(集团)总公司技术中心等一直以来对研究工作的支持。在本书的撰写过程中,参考借鉴了大量的高水平研究成果和国内外参考文献,在此由衷地表示感谢!

限于作者能力,书中必有许多错漏之处,恳请各位同行、专家及广大读者批评指正。

作者

2023年10月

第 1 章	绪论	1
1.1	系统构成及特点	5
1.2	国外研究概况	7
1.3	国内研究进展	14
第 2 章	常导高速磁浮轨道结构技术要求	17
2.1	限界	19
2.1.1	正线	19
2.1.2	停车状态	23
2.2	荷载	24
2.2.1	荷载分类	24
2.2.2	荷载取值	25
2.3	刚度控制条件	38
2.4	变形控制与几何精度要求	39
第 3 章	常用跨度轨道梁型式	43
3.1	复合式轨道梁	46
3.1.1	预应力混凝土复合式轨道梁	46
3.1.2	钢复合式轨道梁	47
3.2	整体式轨道梁	47
3.3	叠合式轨道梁	49
3.3.1	支承梁	51
3.3.2	轨道板	53
3.3.3	连接机构	55
3.4	组合梁	56

3.5	桥上梁结构	56
3.5.1	基本结构型式.....	56
3.5.2	轨道梁与支承桥梁的结合.....	59
3.5.3	轨道梁安装和精调.....	61
3.6	隧道内轨道结构	63
3.7	道岔和移车台	64
第4章	轨道梁设计	67
4.1	轨道结构选型	69
4.2	梁跨布置	71
4.2.1	梁跨布置方法.....	72
4.2.2	上海磁浮线布跨情况.....	72
4.3	轨道梁变形控制	73
4.3.1	预应力混凝土轨道梁的时效变形控制.....	73
4.3.2	“简支-连续”变形控制	91
4.4	轨道功能区设计	103
4.4.1	磁浮系统对功能件的要求.....	104
4.4.2	功能件结构型式.....	105
4.4.3	安装连接方式.....	108
4.4.4	功能件的制造公差要求.....	108
4.5	线路多级拟合技术	109
4.5.1	德国 TVE 试验线的线路实现方案	110
4.5.2	多级拟合方法.....	111
4.5.3	拟合误差分析.....	114
4.5.4	误差分配.....	116
第5章	轨道梁设计中的动力问题	119
5.1	轨道结构模型	122
5.2	车辆模型	124
5.2.1	车体.....	127
5.2.2	悬浮架.....	128
5.2.3	悬浮磁铁.....	130
5.3	悬浮控制模型	132
5.4	车辆垂向运动方程	134
5.5	轨道不平顺的分析和模拟	135
5.6	系统方程及求解	138
5.7	列车通过复合式轨道梁的过程分析	139
5.8	单节车低速通过道岔的过程分析	143

5.9	5 节编组列车通过道岔的过程分析	146
5.10	关于车-轨动力学研究的思考	148
第 6 章	轨道梁工厂制造	151
6.1	复合式轨道梁工厂制造	153
6.1.1	磁浮轨道梁制梁基地工艺布置	154
6.1.2	高精度可调节钢模板体系	155
6.1.3	预应力施工技术	158
6.1.4	功能件制造技术	163
6.1.5	轨道梁整体机加工	164
6.1.6	轨道梁出厂前的线形检测	170
6.2	整体式轨道梁工厂制造	173
6.2.1	高精度钢模板体系和混凝土浇筑工艺	174
6.2.2	定子预埋件和导向板预埋件的定位	177
6.2.3	机加工前预检	178
6.2.4	机加工工艺	178
6.2.5	滑行面磨削和涂装	180
6.2.6	后加工镗后平面工艺技术	180
6.2.7	定子安装	181
6.2.8	导向板制作和安装	182
6.2.9	总装检测技术	182
6.2.10	整体式轨道梁机加工应急预案	184
6.3	混凝土轨道板工厂制造	184
6.3.1	制造工艺	184
6.3.2	机加工工艺	187
第 7 章	轨道梁现场施工	191
7.1	磁浮线路施工测量	193
7.1.1	测量系统精度要求	193
7.1.2	各施工阶段控制网的精度要求	194
7.1.3	精密水平控制网布设	194
7.1.4	测量设备选择	195
7.1.5	精密高程控制网布设	195
7.2	复合式轨道梁现场施工	198
7.2.1	轨道梁运输	199
7.2.2	轨道梁吊装	200
7.2.3	轨道梁精调	202
7.3	叠合式轨道梁现场施工	204

7.3.1	预应力混凝土支承梁生产工艺.....	204
7.3.2	叠合式轨道梁现场安装工艺.....	205
第8章	下部结构.....	217
8.1	无级可调支座.....	219
8.1.1	磁浮轨道梁专用支座的技术要求.....	220
8.1.2	支座的摩擦副.....	221
8.1.3	支座力学性能试验.....	223
8.1.4	支座的调节和安装.....	224
8.1.5	支座的防腐.....	225
8.1.6	支座与轨道梁的精调.....	225
8.2	墩柱和基础.....	227
8.2.1	墩柱.....	227
8.2.2	基础.....	228
第9章	轨道结构运维技术.....	231
9.1	轨道高精度检测.....	233
9.1.1	动态检测.....	233
9.1.2	静态检测.....	239
9.2	轨道结构状态与长期服役性能评估.....	249
9.2.1	线形状态评估.....	252
9.2.2	轨道结构状态.....	254
9.3	线形维护与调整.....	260
9.3.1	轨道调整量的计算.....	260
9.3.2	支座调整量的计算.....	261
9.3.3	现场实施.....	265
9.4	磁浮轨道智能运维.....	267
9.4.1	磁浮轨道运维现状.....	268
9.4.2	磁浮轨道结构智慧监测系统.....	268
9.4.3	初步探索与实践.....	271
9.4.4	后续工作展望.....	273
参考文献	276
致谢	279

第 1 章

绪 论

常导高速磁浮技术起源于德国。1922年, Hermann Kemper 提出了磁浮的原理,并于1934年申请了磁浮相关技术专利。自20世纪60年代末开始,德国因环境和能源问题迫切需要新的高速交通体系,开始了对磁浮技术的工程化研究。高速磁浮交通系统利用电磁力无接触地实现列车的支承和导向,利用直线电机实现列车的牵引和制动,避免了传统铁路中车轮和轨道之间的机械接触,克服了传统列车轮轨黏着这一提高速度的主要障碍。目前,高速磁浮交通是世界上唯一实现了以400 km以上时速商业运营的大运量轨道交通系统。

常导高速磁浮系统利用长定子直线同步电机驱动,电机的定子沿线路敷设,转子安装在车辆上,通过沿线地面固定设备调节频率、电压、电流和相位角,实现列车的牵引和制动控制。

德国的常导高速磁浮系统 Transrapid 采用的是长定子同步直线电机牵引的电磁悬浮技术。1987年,在埃姆斯兰(Emsland)建成总长为31.5 km的TVE试验线(图1-1)。1989年,面向工程应用的TR07磁浮列车投入试验运行。经过近两年的评价和鉴定,系统的各项技术经济指标得到了检验。德国交通部于1991年宣布TR07技术已经成熟,可以投入商业运营。1993年,TR07在载人试验运行中达到了450 km/h的速度。此后,德国为柏林—汉堡线开发了TR08系统,并于1999年10月在TVE线上进行了试验。2001年,TR08系统经改进后应用于上海高速磁浮示范运营线。



图1-1 德国TVE常导高速磁浮试验线

常导高速磁浮列车利用同步直线电机驱动,其工作原理与一般的旋转式感应电机相似,可以看成是将旋转电机沿半径方向剖开展平,展开的定子部分沿线路纵向敷设在轨道梁上,转子部分则支承在车辆的悬浮架上,如图1-2所示。定子产生移动磁场,如图1-3

所示。定子沿线路敷设,定子段长度一般为 800~1 200 m,因此常导高速磁浮列车的定子部分又称为长定子。

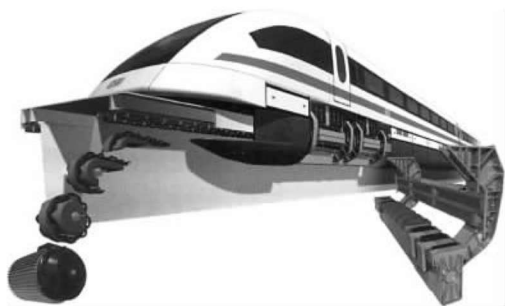


图 1-2 磁浮列车的直线电机

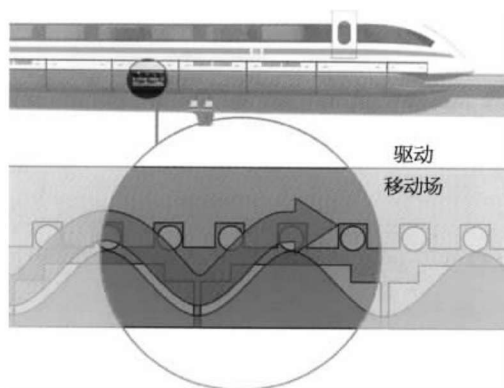


图 1-3 磁浮列车的移动磁场



图 1-4 轨道的长定子和线圈

长定子由众多定子铁心及叠绕其上的三相线圈构成,如图 1-4 所示。定子铁心由硅钢片叠合而成。在定子铁心的顶部有 3 个用于固定的燕尾键,每个燕尾键上有 2 个螺栓孔,定子铁心底部为用于缠绕定子线圈的齿槽,标准槽/齿周期宽度为 86 mm。定子铁心先通过燕尾键插在功能件下翼缘板的燕尾槽内,然后通过燕尾键的螺孔采用高强螺栓固定在功能件的下翼缘板(π 型钢)上,如图 1-5 和图 1-6 所示。

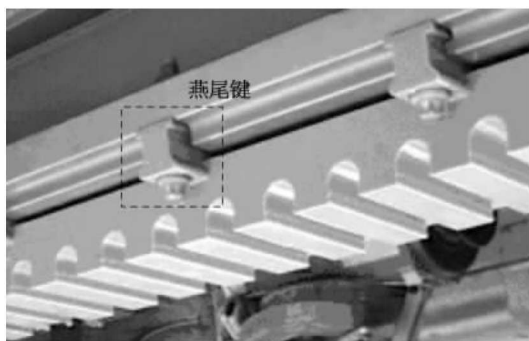


图 1-5 定子铁心的固定



图 1-6 定子铁心在功能件上的位置

常导高速磁浮轨道不仅对运行中的列车具有驱动和导向作用,还在列车停车时提供竖向支承。在典型的复合式轨道梁上,这些作用是通过集成为一体的功能件实现的。功能件是由腹板、顶板、侧面导向板、下翼缘板、竖向加劲板、横向加劲板等焊接而成的钢结构。顶板用作滑行板,侧板用作导向板,下翼缘板(π 型钢)用来固定定子,腹板提供与连接件的连接面,如图 1-7 所示。功能件通过连接件固定在轨道梁上,承受磁浮列车荷载并将其通过连接件传递到轨道梁上。

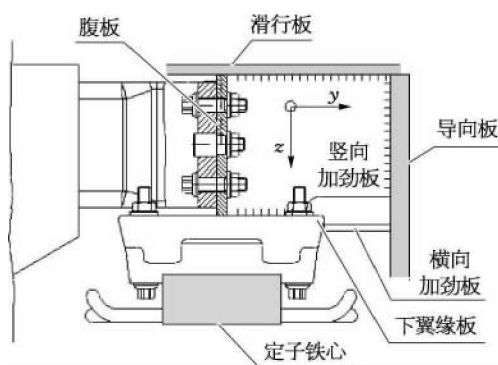


图 1-7 功能件

1.1 系统构成及特点

常导高速磁浮列车依靠电磁力实现列车的悬浮、导向和驱动,轨道结构是列车直线电机驱动系统的重要组成部分。在轨道梁顶部的轨道功能区与列车运行过程中悬浮和导向直接相关,并在列车停车时提供支承。轨道功能区有三个工作面,包括顶板滑行面、两侧导向面及定子铁心底面(图 1-8)。常导高速磁浮与轮轨系统支承导向的比较如图 1-9 所示。

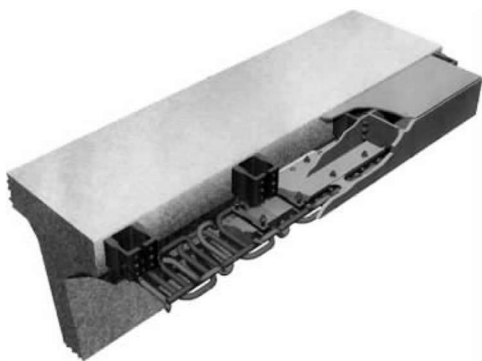


图 1-8 功能件和连接件

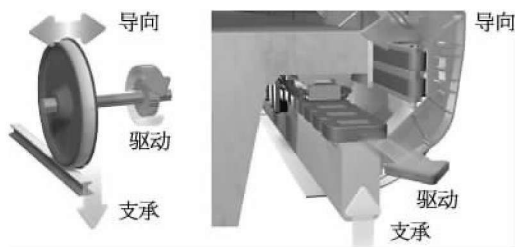


图 1-9 常导高速磁浮与轮轨系统支承导向的比较

轨道结构主要由上部结构和下部结构两部分组成(图 1-10)。上部结构主要包括轨道