



中国磁浮交通  
基础理论与先进技术丛书


# 磁浮列车

## 状态监测、故障诊断与容错控制

Condition Monitoring, Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control  
of the Maglev Train

龙志强 翟明达 王志强 · 等 著



 上海科学技术出版社



# 磁浮列车

状态监测、故障诊断与容错控制

State Monitoring, Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of High-Speed Maglev Train

刘志博 曹明达 王浩博 等 著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 提 要

随着磁浮交通技术走向工程化和商业化应用,人们对磁浮交通系统的安全性和可靠性提出了更高的要求,状态监测、故障诊断与容错控制是实现上述需求的有效途径之一。本书将中低速磁浮列车和时速 600 公里高速磁浮列车作为研究对象,以解决工程实际问题为目标,对磁浮列车的状态监测、异常检测、故障诊断以及磁浮控制系统的故障诊断与容错问题进行了分析和论述。

本书是国防科技大学磁浮团队承担北京和长沙等中低速磁浮工程项目、“十五”863、“十一五”、“十二五”科技支撑计划以及“十三五”重点研发计划高速磁浮课题相关研究工作的总结。国防科技大学磁浮团队历经 40 多年的技术攻关,完成了电磁悬浮原理研究、集成试验、整车验证、运营线建设与维护的研制历程。全书以准确的数据、大量的仿真和现场试验为基础,深入浅出地全面介绍了中低速磁浮列车和高速磁浮列车的状态监测、故障诊断与容错控制关键技术,可为磁浮技术在运载工具、旋转机械、军事装备研发中的应用提供参考。

本书对磁浮交通领域的系统设计、研究和运用维护的工程技术人员,以及高等院校相关专业教师、学生等具有较高的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

磁浮列车状态监测、故障诊断与容错控制 / 龙志强等著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2023. 7  
(中国磁浮交通基础理论与先进技术丛书)  
ISBN 978-7-5478-6221-6

I. ①磁… II. ①龙… III. ①磁悬浮列车—设备状态监测②磁悬浮列车—故障诊断③磁悬浮列车—控制系统—容错技术 IV. ①U292.91

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第107488号

磁浮列车状态监测、故障诊断与容错控制  
龙志强 翟明达 王志强 等著

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

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.5  
字数 330 千字  
2023 年 7 月第 1 版 2023 年 7 月第 1 次印刷  
ISBN 978-7-5478-6221-6/U·142  
定价: 138.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 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

当代轨道交通发展日益繁荣,尤其是城市轨道交通已成为人们关注的焦点,但是地铁造价昂贵,城市轻轨噪声又大。磁浮列车系统利用电磁力实现列车的无接触悬浮和导向,避免了传统铁路中车轮和轨道间的机械接触,克服了轮轨列车提高速度的主要障碍,减小了轮轨噪声,对改善交通运行状况将起到积极的作用。

国防科技大学从1980年开始磁浮技术的研发,以常文森教授为代表的老一辈专家学者率领团队进行了40多年的技术攻关,使我国的磁浮列车技术从原理探索走向了工程化应用。近10年来,中国依靠自身的技术,先后建设了长沙磁浮快线、北京中低速磁浮运营示范线、湖南凤凰磁浮旅游线以及广东清远磁浮旅游线等。2019年9月,中国提出“交通强国”战略,《交通强国建设纲要》指出要强化前沿关键技术研发,合理统筹安排时速600公里级高速磁浮系统等技术的储备研发。2021年7月20日,中国自主研发的时速600公里高速磁浮交通系统成套装备正式面世。上述研究与应用为磁浮交通技术发展提供了坚实的技术基础和政策指引。

磁浮列车根据悬浮原理可分为常导电磁悬浮型、超导电动悬浮型、超导钉扎悬浮型、永磁斥力悬浮型和永磁电动悬浮型等类型。这些类型国内外均有研究,但目前实现商业运行的只有常导电磁悬浮型磁浮交通系统。常导电磁悬浮型磁浮交通系统根据运行速度的不同,分为中低速和高速磁浮系统,中低速型磁浮列车最高速度为120~160 km/h,主要解决城市内部的交通运输问题,造价与轻轨相当;高速磁浮列车最高速度为400~600 km/h,适合作为大城市间的交通工具。虽然常导电磁悬浮型的中低速和高速磁浮列车在牵引、导向、供电以及运行控制方面存在较大差异,但两者的悬浮原理非常相似,均采用主动式的电磁悬浮原理,利用在车体底部的可控悬浮电磁铁和安装在导轨底面的铁磁反应轨之间的吸引力使列车悬浮。因此,常导电磁悬浮型的中低速和高速磁浮列车在悬浮控制系统的设计方面有许多相似之处,这也是常导电磁悬浮型磁浮列车的专有系统。本

书所研究的常导电磁悬浮型磁浮列车,由于其为主动式悬浮控制,实现了车辆与轨道的非接触运行,因此带来了许多工程方面的优势。然而,这也导致每辆车的电气系统变得相对复杂。此外,大多数磁浮列车都采用多编组,这无疑加剧了状态监测、故障诊断和容错控制的任务负担及复杂性。

故而,本书以中低速磁浮列车和时速 600 公里高速磁浮列车为对象,针对磁浮列车的状态监测、异常检测、故障综合评估以及磁浮控制系统的故障诊断与容错问题进行了分析和论述。全书共分为 8 章,具体内容如下:

第 1 章介绍磁浮交通发展概况,给出磁浮列车状态监测、故障诊断与容错控制研究概况,设计磁浮列车状态监测与故障诊断平台。

第 2 章针对磁浮列车悬浮状态异常检测问题,介绍基于单维时间序列数据、基于多维时间序列数据异常检测算法和基于长短期记忆网络的磁浮列车悬浮异常在线检测方法,给出磁浮列车运行试验验证结果。

第 3 章介绍一种新型的稳定性监测指标,通过将监测到的稳定性能分为四个等级进行性能评估,为悬浮系统提供一种控制器评估方法。

第 4 章以磁浮列车悬浮系统为对象,研究其故障诊断问题,介绍悬浮系统执行器、传感器和控制器的故障诊断方法,为系统级故障诊断提供依据。

第 5 章采用模糊综合评估方法对系统级故障进行综合评估,建立模糊综合评估模型,结合中低速磁浮列车的运行数据进行试验验证。

第 6 章介绍基于分布估计算法的模糊参数优化方法,通过使用分布估计算法对评估模型进行逼近建模,实现模糊评估模型参数自动学习和优化,给出测试结果。

第 7 章针对中低速磁浮列车悬浮系统的容错设计问题开展研究,介绍悬浮传感器、悬浮控制计算机、悬浮斩波器以及悬浮系统级的容错设计方案。

第 8 章针对高速磁浮列车悬浮系统的容错控制问题进行研究,给出高速磁浮列车悬浮系统的分级容错控制方案,并针对微小故障、传感器故障、单悬浮点故障分别给出对应的容错控制方案,仿真和试验验证给出方案可行性。

本书由国防科技大学龙志强主编并统稿。具体编写分工如下:第 1、4、5、6 章由龙志强撰写,第 2 章由王平、梅子撰写,第 3、第 7 章由翟明达撰写,第 8 章由龙志强撰写。许云淞博士为第 3 章撰写提供了基础资料,吕治国、胡海林博士等参与了前期研究工作,杨彪、梅子等做了大量细致的整理校对工作。在项目研究和书稿撰写的过程中,作者参考和借鉴了大量的国内外高水平参考文献资料,在此也由衷地对文献作者表示感谢。

感谢合作单位北京控股磁悬浮技术发展有限公司、国家磁浮交通工程技术研究中心、中国中车股份有限公司等一直以来对本书研究工作的支持。国防科技大学中低速和高速磁浮技术的研究是在常文森教授亲自带领下,克服重重困难发展起来的,同时国防科技大学磁浮研究中心李杰、吴峻、李晓龙、窦峰山、刘耀宗、周丹峰、戴春辉等 20 多位专家教授也一直参与本书相关的研究工作,在此一并表示衷心感谢。

由于作者的能力有限,本书中的不足及错误之处在所难免,欢迎各位同行专家、学者及广大读者批评指正。

龙志强  
2023 年 3 月

第 1 章	绪论 .....	1
1.1	概述 .....	3
1.2	磁浮列车发展现状 .....	5
1.2.1	国外磁浮列车的发展现状.....	5
1.2.2	国内磁浮列车的发展现状.....	11
1.3	磁浮列车状态监测、故障诊断与容错控制研究概况 .....	21
1.3.1	状态监测研究概况.....	21
1.3.2	故障诊断研究概况.....	23
1.3.3	容错控制研究概况.....	25
1.4	磁浮列车状态监测与故障诊断系统设计 .....	26
1.4.1	车载状态监测与故障诊断系统.....	28
1.4.2	地面状态监测与故障诊断系统.....	31
第 2 章	基于数据的磁浮列车悬浮异常状态检测 .....	33
2.1	概述 .....	35
2.2	基于单维时间序列数据的异常状态检测 .....	37
2.2.1	基于快速沃尔什变换的特征提取.....	37
2.2.2	基于超球体思想的特征选择.....	39
2.2.3	基于高斯分布的异常阈值设定.....	40
2.3	基于相关分析的多维时间序列数据的异常状态检测 .....	42
2.3.1	传统的典型相关分析方法.....	43
2.3.2	基于 Box - Cox 变换的异常阈值设定 .....	44
2.3.3	异常检测算法流程.....	45
2.4	基于加权相关系数的多维时间序列数据的异常状态检测 .....	47

2.4.1	基于自相关长度的数据长度选择.....	47
2.4.2	基于加权相关系数的异常检测.....	48
2.4.3	异常检测算法流程.....	49
2.4.4	磁浮列车悬浮状态异常检测试验.....	51
2.5	基于长短时记忆神经网络的异常状态在线检测 .....	57
2.5.1	基于 LSTM 神经网络异常检测基础 .....	57
2.5.2	基于 LSTM 神经网络的悬浮状态异常检测 .....	61
2.5.3	磁浮列车悬浮状态异常检测试验.....	62
第 3 章	磁浮列车悬浮稳定性的状态监测与评估 .....	69
3.1	概述 .....	71
3.2	悬浮系统的数据结构与稳定性指标 .....	71
3.2.1	悬浮系统的数据结构.....	72
3.2.2	悬浮系统的稳定性指标.....	73
3.3	基于数据驱动的悬浮系统稳定性监测 .....	74
3.3.1	稳定性指标的实时数据实现.....	75
3.3.2	数据驱动的稳定性监测.....	76
3.3.3	稳定性指标的适用性分析.....	79
3.4	磁浮列车悬浮系统稳定性评估 .....	80
3.5	仿真分析与验证 .....	81
第 4 章	磁浮列车悬浮控制系统的故障诊断 .....	83
4.1	概述 .....	85
4.2	基于 Kalman 滤波器的悬浮系统故障诊断 .....	86
4.2.1	基于 Kalman 滤波器的故障检测方法 .....	86
4.2.2	基于 Kalman 滤波器组的故障诊断方法 .....	88
4.2.3	基于 Kalman 滤波器的故障诊断仿真 .....	90
4.2.4	基于 Kalman 滤波器的故障检测试验 .....	96
4.3	基于强跟踪滤波器的悬浮系统故障诊断 .....	97
4.3.1	基于强跟踪滤波器的状态与参数联合估计方法.....	98
4.3.2	基于强跟踪滤波器的悬浮系统故障诊断及仿真.....	100
4.3.3	基于强跟踪滤波器的悬浮系统故障诊断试验.....	101
4.4	基于全维状态观测器的执行器故障诊断 .....	102
4.4.1	系统参数变化故障的等效模型.....	102
4.4.2	基于状态观测的故障诊断算法.....	104
4.4.3	执行器模拟故障分析与诊断.....	104
4.4.4	执行器故障对悬浮系统的影响.....	106
4.4.5	执行器的故障诊断仿真和试验.....	107

4.5	基于信号比较的加速度传感器故障诊断 .....	110
4.5.1	加速度传感器故障诊断.....	110
4.5.2	故障诊断仿真分析.....	114
4.5.3	加速度传感器故障诊断试验.....	119
第5章	磁浮列车的故障模糊综合评估 .....	121
5.1	概述 .....	123
5.2	故障模糊综合评估方法与模型分析 .....	124
5.2.1	故障模糊综合评估方法.....	124
5.2.2	故障模糊综合评估模型分析.....	126
5.3	故障模糊综合评估模型 .....	128
5.3.1	中低速磁浮列车系统组成.....	128
5.3.2	评价集与因素集层次的划分.....	130
5.3.3	模糊综合评估模型的建立.....	133
5.3.4	因素隶属度和因素权重值的分配确定.....	134
5.4	故障模糊综合评估流程与试验 .....	138
5.4.1	故障模糊综合评估流程框架.....	138
5.4.2	故障模糊综合评估试验分析.....	140
第6章	基于分布估计的模糊综合评估参数优化 .....	143
6.1	概述 .....	145
6.2	分布估计算法的设计思想与特点分析 .....	146
6.2.1	分布估计算法的基本思想.....	146
6.2.2	分布估计算法的特点分析.....	147
6.3	分布估计算法的参数优化方法 .....	148
6.3.1	参数编码及初始化参数.....	148
6.3.2	适应度的计算.....	149
6.3.3	概率估计模型的构建.....	150
6.3.4	训练和测试模型.....	151
6.4	分布估计算法的性能测试与比较 .....	152
6.4.1	分布估计算法的参数影响分析.....	152
6.4.2	分布估计算法与遗传算法的效果比较.....	156
6.4.3	分布估计算法与其他机器学习算法的效果比较.....	156
6.5	基于分布估计的模糊综合评估参数优化设计与实现 .....	158
第7章	中低速磁浮列车悬浮系统的容错设计 .....	161
7.1	概述 .....	163
7.2	中低速磁浮列车悬浮系统控制架构 .....	164
7.3	悬浮传感器的容错设计 .....	166

7.3.1	悬浮传感器的冗余设计	167
7.3.2	悬浮传感器的可靠性设计	170
7.3.3	考虑悬浮传感器故障的主动容错控制	172
7.4	悬浮控制计算机的冗余设计	178
7.4.1	控制计算机的冗余设计方法	180
7.4.2	基于双机热备的悬浮控制计算机的冗余设计	182
7.5	悬浮斩波器的可靠性设计	186
7.5.1	基于 IGBT 模块的悬浮斩波器分析	186
7.5.2	基于 SiC MOSFET 模块的悬浮斩波器优化设计	188
7.6	悬浮控制系统的容错方案设计	191
7.6.1	基于搭接结构的悬浮系统冗余设计	191
7.6.2	基于端部电磁铁加长的悬浮系统冗余设计	194
7.6.3	一种分布式悬浮系统容错控制方案	196
第 8 章	高速磁浮列车悬浮系统容错控制	199
8.1	概述	201
8.2	高速磁浮列车悬浮系统容错控制方案	202
8.2.1	高速磁浮列车悬浮系统基本结构	202
8.2.2	高速磁浮列车悬浮系统分级容错控制结构	203
8.3	基于 Youla 参数化的容错控制方法分析	205
8.3.1	控制器 Youla 参数化分析	205
8.3.2	控制器 Youla 参数化的两种实现形式	207
8.3.3	基于 Youla 参数化的悬浮系统分级容错控制结构	208
8.4	考虑微小故障的单悬浮系统容错控制	212
8.4.1	基于梯度下降法的 Youla 参数在线更新	212
8.4.2	微小故障条件下悬浮控制系统容错控制仿真分析	217
8.5	基于信号重构的单悬浮系统主动容错控制	218
8.5.1	加速度传感器故障情况下间隙微分信号重构方法	219
8.5.2	单间隙传感器故障情况下悬浮间隙信号重构方法	220
8.5.3	基于信号重构的传感器故障容错控制仿真	221
8.6	基于搭接悬浮结构的主动容错控制	224
8.6.1	悬浮搭接结构单点故障时的数学模型	225
8.6.2	容错控制器设计	226
8.6.3	搭接结构故障仿真与试验	227
参考文献		232

# 第 1 章

## 绪 论



当代轨道交通发展非常活跃,最受人瞩目的就是城市轨道交通的发展。我国城市轨道交通拥挤不堪,交通状况亟须改善,但地铁造价惊人,城市轻轨噪声又大。磁浮列车系统利用电磁力实现列车的无接触支撑和导向,避免了传统轮轨列车的车轮和轨道间的机械接触,克服了轮轨列车提高速度的主要障碍,减少了轮轨噪声。随着磁浮交通技术走向工程应用,特别是随着时速 600 公里高速磁浮技术的研发与运用,人们对磁浮交通系统的安全性和可靠性提出了更高的要求,状态监测、故障诊断与容错控制技术则是实现上述需求的有效途径。本章在介绍电磁悬浮型磁浮列车技术特点与发展概况的基础上,论述了磁浮列车状态监测、故障诊断以及悬浮系统容错控制研究概况,介绍了磁浮列车状态监测与故障诊断系统。

## 1.1 概 述

根据悬浮原理,磁浮列车可被划为电磁悬浮型、超导电动悬浮型、超导钉扎悬浮型、永磁斥力悬浮型和永磁电动悬浮型等。超导电动悬浮型磁浮交通系统主要应用于高速环境,日本对超导电动悬浮系统的研究较深入;超导钉扎悬浮型、永磁斥力悬浮型和永磁电动悬浮型系统均处于探索研究或原理研究阶段;电磁悬浮型磁浮系统较成熟,根据运行速度不同又分为中低速和高速磁浮交通系统。中低速磁浮交通系统最高速度为 120~160 km/h,主要解决城市内部的交通运输问题,造价与轻轨相当,最大优点为绿色环保。高速磁浮交通的最高速度为 400~600 km/h,适合作为城市间的交通工具。本书主要以实现了商业运营的电磁悬浮型磁浮列车(简称“磁浮列车”)为对象进行介绍。磁浮列车采用非接触运行方式,与普通轮轨系统相比,它具有振动小、噪声低、线路铺设条件宽松、易于实施、易于维护和绿色环保等特点,具体如下:

1) 振动小、噪声低,有利于环境保护,且乘坐平稳、舒适

中低速磁浮列车采用电磁引力使车辆悬浮在轨道上面,不存在车轮和轨道接触产生的噪声或振动,车辆运行噪声很低;据测定,在距离轨道 10 m 处的峰值噪声为 64 dB。同时,由于没有车轮磨损,也不会运行中产生粉尘等空气污染,有利于环境保护;列车运行时处于悬浮状态,车身与轨道之间无接触,运行平稳,舒适性好。

2) 转弯半径小,爬坡能力强,线路适应性好

磁浮列车的行驶和制动不再依赖轮轨间的黏着力,而是靠直线电机产生的电磁牵引力,因而车辆具有很好的加减速性能及爬坡能力,正线上的最大坡度可达 7%。中低速磁浮列车的转弯半径可以很小,正线上的最小转弯半径为 75 m,在城市大的道路交叉路口

即可完成转弯。因此,中低速磁浮列车轨道交通线路在狭窄地域,特别是建筑密集的城市区域,有较强的线路适应能力。

### 3) 建造和维护成本低

磁浮列车爬坡能力强、转弯半径小,适合复杂地形和密集城市空间,可以做到不拆迁或少拆迁,不征地或少征地,从而可降低建造成本;磁浮列车车体重量轻并均匀地分布在轨道上,因此可以使桥梁结构轻量化,从而降低土建结构的投资。

此外,磁浮列车与轨道没有接触摩擦,可以降低车辆和轨道的维护费用。车载计算机系统可对车辆进行自动监测和诊断,且该系统采用模块化维修,节省了维修工作量、降低了维护成本。

### 4) 列车“抱轨”运行,行驶安全性好,运营速度高

高速磁浮列车最高运行时速可达 600 公里,列车“抱轨”运行,车轨一体,不会发生脱轨和翻车事故;即使停电,有车载电源维持悬浮,直到安全停车;冗余部件设计等使得高速磁浮列车具有很好的安全性能;此外,线路设计方面,中低速和高速磁浮线路适合高架,相比地下线路具有更高的安全性。

磁浮交通系统主要由磁浮列车、线路轨道、牵引与供电、运行控制四大系统组成,其中,除磁浮列车外的三大系统与传统轮轨系统的原理相似。磁浮列车除了悬浮系统外,其车辆结构和车载电气都与传统轮轨的结构类似,具有很好的技术继承性。因此,我国发展磁浮交通产业,在关键技术攻关、装备制造和工程实施等方面具有雄厚的技术储备。

中低速磁浮列车和高速磁浮列车的悬浮原理也非常相似,均采用主动式的电磁悬浮原理,利用车体底部的可控悬浮电磁铁和导轨底面铁磁轨之间的吸引力使列车浮起。因此,高速和中低速磁浮列车在悬浮控制系统的设计方面有许多相似之处。

虽然磁浮列车主动式的悬浮控制使得车辆与轨道脱离接触而带来许多工程方面的优点,但也使得每辆车的电气系统变得比较复杂,且运营的磁浮列车大多由多编组组成,因而进一步加重了状态监测、故障诊断的任务量和复杂性。此外,磁浮交通系统中的运行控制、牵引与供电、线路轨道等系统的部件或设备发生故障时,也会影响列车系统的运行。

以我国研制成功的北京中低速磁浮示范线和长沙磁浮快线的磁浮列车为例,每辆车共有车载电气设备 40 多台(大部件),可能发生的主要故障有 400 多种。因此,当列车的电气部件发生故障时,对故障的严重程度迅速给予准确评价是故障诊断系统的一项重要功能,其评价结果的准确性直接关系到列车能否继续安全行驶和维护检修的工作量。对一列磁浮列车而言,各个部件或设备故障等级并不等同于列车的故障等级,如多个低等级的部件或设备故障可能会引起一个严重等级的列车故障,并且轨道的随机不平顺、运行控制设备故障也会影响列车的运行。因此,需要各车辆级诊断计算机采集本车的部件或设备故障信息,并通过列车总线传送到列车级诊断计算机,列车级诊断计算机在综合各车辆级诊断数据和其他相关系统(主要包括车载运行控制系统和轨道随机不平顺)的诊断数据

基础上,根据所建立的故障综合评估模型,迅速对列车安全运行的影响程度进行评估,确定列车系统的故障等级,提示驾驶员或列车自动驾驶系统采取相应的措施,以避免事故发生。

以中低速磁浮列车为例,一辆5转向架中低速磁浮列车的悬浮导向功能由20套相同的悬浮控制器独立实现。单台悬浮控制系统出现异常,将影响车辆的悬浮性能,因此需要对悬浮状态进行在线和离线判定,对其稳定性能进行实时监测。此外,如果某套悬浮控制器出现故障,不仅要确定设备故障位置,还要确定设备故障等级,最终为磁浮列车故障综合评估提供基础数据。根据国内外磁浮列车的实际运行经验和对磁浮列车系统的综合评估结果分析可知,悬浮控制器是磁浮列车中十分关键的子系统。如果其中某辆车的个别悬浮点出现传感器或执行器故障而不进行处理,将可能引起对应的悬浮点失稳或失效,进而影响磁浮列车的正常运行。在高速磁浮列车中采用搭接结构方式实现车辆的悬浮与导向,通过悬浮控制器的硬件冗余提高系统可靠性。目前,考虑在城市内运行时小转弯半径的需求,中低速磁浮列车采用独立模块式结构实现车辆的悬浮与导向,该类磁浮列车结构简单且没有硬件冗余。由于悬浮控制器中传感器和执行器故障是导致控制系统失效的主要原因,因此在磁浮列车悬浮系统传感器和执行器故障诊断的基础上,进行了加速度传感器故障和部分执行器失效时的主动容错控制研究。

## 1.2 磁浮列车发展现状

当前世界上只有电磁悬浮型高速磁浮列车和中低速磁浮列车实现了商业示范运营,超导电动悬浮型的高速磁浮交通系统接近应用的水平,日本正在建设其运营线。其他类型的磁浮交通系统如超导钉扎悬浮型、永磁斥力悬浮型和永磁电动悬浮型的磁浮交通系统也都在积极探索研究中。

### 1.2.1 国外磁浮列车的发展现状

世界上最早的磁浮列车结构是德国工程师 Kamper 在 1922 年提出的,并申请了专利。20 世纪 70 年代,联邦德国开始实施 Transrapid(简称“TR”)高速磁浮交通计划,最初的 TR01、TR02、TR04 列车也是这种结构,支撑采用电磁悬浮主动控制,推进采用短定子异步电机进行牵引,但这种结构方案只适合于中低速运行,德国后来放弃了 Kamper 的短定子和倒 U 型轨道的方案,而转向长定子同步电机牵引的高速磁浮技术的研究并大力发展,目前在上海运营的高速磁浮列车则是从德国引进的高速磁浮系统(TR08)。

### 1) 中低速磁浮交通领域

1969年,在联邦德国政府支持下,德国克劳斯-马菲公司(KM公司)采用 Kamper 的方案,研制了一台重 80 kg 试验小车,后来将其列入 Transrapid 计划,称为 Transrapid 01,简称 TR01;1971年,克劳斯-马菲公司研制出的 TR02 型磁浮试验车也投入使用,该试验车重 11.3 t,可乘坐 8 人,试验速度达到 164 km/h,如图 1-1 所示。与此同时,德国 MBB 公司成功研制了一台磁浮试验车,如图 1-2 所示,该试验车重 4.8 t,设 4 个座位,在 660 m 试验线上的试验速度达到 90 km/h,其悬浮与牵引原理与 TR02 类似,但增加了有源电磁导向控制功能。1974年,克劳斯-马菲公司又研制出了 TR04 型磁浮试验车,该试



图 1-1 德国 TR02 型磁浮试验车(1971 年)



图 1-2 德国 MBB 磁浮试验车(1971 年)