

第一章 绪 论

磁浮列车 (Maglev Train) 是一种现代高科技轨道交通工具, 它通过电磁力实现列车与轨道之间的无接触悬浮和导向, 再利用直线电机产生的电磁力牵引列车运行。

1922 年, 德国工程师赫尔曼·肯佩尔 (Hermann Kemper) 提出了电磁悬浮原理, 继而申请了专利。20 世纪 70 年代以后, 随着工业化国家经济实力不断增强, 为提高交通运输能力以适应其经济发展和民生的需要, 德国、日本、美国等国家相继开展了磁浮运输系统的研发。

目前有三种典型的磁浮技术: 第一种是德国发明的电磁悬浮技术, 我国上海磁浮列车、长沙磁浮列车和北京磁浮列车均采用该技术; 第二种是日本发明的低温超导磁浮技术, 如日本在建的中央新干线磁浮线路; 第三种是高温超导磁浮技术, 与低温超导磁浮技术的液氮冷却 ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) 不同, 高温超导磁浮技术采用液氮冷却 ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), 工作温度得到了提高。日本的超导磁浮 (ML)、德国的常导磁浮 (TR) 和日本航空的常导磁浮 (HSST) 都是典型磁浮技术的代表。

本章主要介绍磁浮铁路的分类、作用以及上述磁浮铁路的发展。为此先定义铁路的类型和磁浮铁路的类型。

第一节 铁路分类

日本的超导磁浮线路和德国的常导磁浮线路属于超高速铁路。超高速铁路是相对高速铁路而言的，是由列车的最高运行速度决定的。根据列车的最高运行速度的不同，铁路可以划分为低速、快速、高速和超高速铁路等类型。

一、低速铁路

列车最高运行速度不大于 120 km/h 的铁路称为低速铁路，即通常意义上的铁路，也称普速铁路、普通铁路、常速铁路或简称为铁路。这种铁路大部分为客货混线运输的铁路，目前世界上绝大部分铁路都属于这种铁路。

根据《铁路主要技术政策》的划分，低速铁路一般包括特别繁忙干线、繁忙干线、干线、支线及城际铁路。

1. 特别繁忙干线

在国家重要的交通运输大通道中担当客货运输主力，在路网中起极重要的骨干作用，且客货行车量达到或超过 100 对的线路称为特别繁忙干线。

2. 繁忙干线

连接经济发达地区或经济大区，在路网中起重要的骨干作用，且客货行车量单线达到或超过 30 对和双线达到或超过 60 对的线路称为繁忙干线。

3. 干 线

连接大中城市，在路网中起骨干作用，且客货行车量超过 15 对的线路称为干线。

4. 支 线

连接中小城市，在路网中起辅助、联络作用，或为地区经济交通运输服务，或客货行车量不超过 15 对的线路称为支线。

5. 城际铁路

长度在 500 km 以下、客货运输繁忙、相邻两大城市间的铁路称为城际铁路。

二、快速铁路

列车最高运行速度为 120 ~ 200 km/h 的铁路称为快速铁路，其中以客运为主的铁路，列车的最高运行速度不低于 160 km/h。快速铁路有时也称为中速铁路。我国铁路大提速的速度目标值大部分都是由低速铁路的速度范围提高到快速铁路的速度范围。目前，我国的主要干线铁路已由低速铁路升级为快速铁路。未来的铁路大提速将在规定范围内将低速铁路改造为快速铁路。

原先曾经将列车最高运行速度为 160 ~ 200 km/h 的铁路称为准高速铁路。2000 年，原铁道部颁布的《铁路主要技术政策》已将准高速铁路归为快速铁路。

三、高速铁路

高速铁路，简称高铁，在不同国家、不同时代有不同规定。一般将列车最高运行速度为 200 ~ 350 km/h 的铁路称为高速铁路。日本 1970 年在《全国新干线铁路整備法》中规定：在主要区间能以 200 km/h 以上速度运行的干线铁道为新干线（即最高速度）。在欧洲，新建铁路的列车最高运行速度为 250 ~ 300 km/h，既有线达到 200 km/h 的铁

路称为高速铁路。目前，国际上一般认为列车最高运行速度达到 200 km/h 及以上的铁
路才能称为高速铁路。中国国家铁路局将高速铁路定义为：新建设计开行 250 km/h (含
预留) 及以上动车组列车、初期运营速度不小于 200 km/h 的客运专线铁路。

世界上第一条高速铁路是日本的东海道新干线，于 1964 年 10 月建成通车。

我国第一条客运专线——秦沈客运专线已于 2003 年 10 月 12 日开通运营，其最
高速度为 200 ~ 250 km/h。

低速、快速、高速铁路有一个共同的特点：列车依靠轮轨接触方式驱动，即列车
车轮紧贴钢轨运行，钢轨为车轮提供支承、牵引及导向三大功能。

四、超高速铁路——磁浮铁路

为了与轮轨接触的高速铁路相区别，我们建议将列车最高运行速度超过 350 km/h
的铁路称为超高速铁路。

目前，一般认为轮轨接触型铁路的实用最高速度为 350 km/h 左右，故欲使列车达
到更高的运行速度，难以依靠传统的轮轨接触方式，而要依靠其他的牵引方式来降低
列车的运行阻力，尤其是轮轨摩擦阻力。为此国际上曾研制过气垫列车、磁浮列车等
新型的铁路运输工具，但目前比较成熟的超高速铁路技术仍然为磁浮铁路技术。

磁浮铁路目前分为低速、中速、高速和超高速几种类型，列车最高运行速度超过
350 km/h 的磁浮铁路为超高速磁浮铁路。目前，中美两国正在准备研制磁浮飞机，其
最高运行速度为 500 km/h，这种磁浮飞机也应归入超高速磁浮铁路的范畴。

五、高速、超高速铁路的发展阶段

高速铁路和超高速铁路一般统称为高速铁路，可以将其按最高运行速度及其发展阶段进一步分类。考虑到将来的发展，高速及超高速铁路可以划分为五代。

1. 第一代

第一代属于高速铁路的范畴，列车最高运行速度为 200 ~ 250 km/h。它采用传统的轮轨接触形式。这一代高速铁路的典型代表是世界上第一条高速铁路——日本东海道新干线，1964 年 10 月 1 日建成通车，当时列车最高运行速度为 210 km/h。我国的秦沈客运专线全线设计速度达到 200 km/h 或以上，基础设施预留 250 km/h 的提速条件，故该条线路应属于第一代高速铁路。

2. 第二代

第二代属于高速铁路的范畴，列车最高运行速度为 250 ~ 350 km/h。它也采用传统的轮轨接触方式。目前新建的高速铁路大多属于这种类型。日本后来建设的北陆新干线（最高运行速度 260 km/h）、法国的东南线（最高运行速度 270 km/h）及大西洋线（最高运行速度 300 km/h）、中国的京沪高速铁路（设计最高运行速度 300 km/h，运营速度 250 ~ 300 km/h）均属于第二代高速铁路。

3. 第三代

第三代属于超高速铁路的范畴，列车最高运行速度为 350 ~ 550 km/h，主要依靠磁浮方式实现线路与列车之间的无接触运行。其主要特点是线路修建在地面上并且列车在普通的大气环境中运行。目前能实现这一运行速度的磁浮方式只有日本的 ML 方

式（最高运行速度 500 km/h）和德国的运捷（最高运行速度 440 km/h）。我国于 2002 年 12 月开始试运营的上海磁浮示范线（最高运行速度 430 km/h）也属于第三代高速铁路范畴。

4. 第四代

第四代属于超高速铁路的范畴，其主要特点是线路采用高架低真空管道形式。管道内保留 10%~20% 的空气，即将常温时的空气密度（ 1.2 kg/m^3 ）降为低真空密度（ $0.12 \sim 0.24 \text{ kg/m}^3$ ）。列车最高运行速度可达 2 000~3 000 km/h，大约为两倍的音速。目前这种交通方式只是处于前期构想和试验阶段，预计 10 年左右时间，这种超高速铁路可能成为现实。

5. 第五代

第五代属于超高速铁路的范畴，其主要特点是线路采用地下真空管道磁浮形式。20 世纪 70 年代末，美国一家咨询公司设计了一种“行星号”的未来地下铁道，理论速度可达 22 500 km/h，纽约至洛杉矶只需半小时即可到达。这种超高速列车不但可以获得极高的运行速度，而且其运营费比普通铁路便宜 90%，比飞机便宜 95%。这是一种理想型、科幻型的超高速铁路。限于现代科技水平及经济方面的原因，这种高速铁路目前还难以实现。

从上面的分析可以看出，将来高速、超高速铁路的发展方向是磁浮铁路。

第二节 磁浮铁路分类

根据不同的划分方式，磁浮铁路可以划分为多种类型。

一、按应用范围划分

应用范围主要体现在线路长度、在路网中的作用、最高运行速度及所属管理部门等方面。据此磁浮铁路可以划分为干线磁浮、城际磁浮和城市磁浮。

1. 干线磁浮

这里的干线包括前述的特别繁忙干线、繁忙干线和干线，线路长度一般超过 500 km，在国家重要的交通运输大通道担当客运主力，连接经济发达地区、经济大区或大中城市，在路网中起重要的骨干作用。该铁路的最高运行速度一般要达到高速或超高速铁路的速度范围，一般归铁路部门或交通部门经营管理。

2. 城际磁浮

其线路长度在 500 km 以下，连接客运繁忙的相邻两大城市。运行速度一般达到中高速铁路的速度范围，一般归铁路部门或交通部门经营管理。

3. 城市磁浮

其线路长度不超过 100 km，承担市内交通、机场内交通或机场与市区间交通的任务。由于运行距离较短，列车的运行速度一般是在中低速的速度范围内，一般归市政部门或民航部门管理。

二、按运行速度划分

根据前述划分标准，按照列车的最高运行速度，磁浮铁路可分为低速（常速）磁

浮、中速磁浮、高速磁浮和超高速磁浮铁路。一般将低速和中速磁浮统称为中低速磁浮，而将高速和超高速磁浮统称为高速磁浮。中低速磁浮主要适用于城市轨道交通（含机场内交通），高速磁浮主要适用于干线和城际交通。

三、按导体材料划分

根据直线电机线圈绕组是否使用超导体材料，磁浮铁路可以划分为超导磁浮和常导磁浮。

1. 超导磁浮

超导磁浮的线圈使用超导材料。超导材料在周围环境温度低于其临界温度后就处于超导状态，即超导绕组内的电阻几乎为零。超导电磁铁能产生强大的磁场，具有极高的工作效率，因此可以使列车获得较大的悬浮高度和更快的运行速度。其缺点主要为超导磁铁结构复杂，体积庞大，并且为了使超导绕组始终处于超导状态，在列车上还要配备制冷装置。日本的 ML 技术属于超导磁浮技术。

2. 常导磁浮

常导磁浮使用普通材料制成线圈绕组，采用普通导体通电励磁，产生电磁悬浮力和导向力。这种直线电机具有结构简单、养护维修方便等优点。其主要缺点是线圈绕组中电阻较大。因此这种直线电机的功率损失较大，并且线圈绕组容易发热，列车的运行速度也会受到一定限制。德国的运捷（TR）、日本的 HSST 及我国的大部分磁浮研究都属于常导磁浮技术。

四、按制冷剂及工作温度划分

超导磁浮铁路依靠制冷剂使超导绕组维持在超导状态。目前，超导磁浮常用的制冷剂为液氮和液氦。根据两者工作温度的不同，磁浮铁路又可划分为高温超导磁浮和低温超导磁浮两类。

1. 高温超导磁浮

液氮的工作温度为 77 K (- 196 °C)。采用适合于该工作温度的超导材料制作的磁浮绕组的磁浮称为高温超导磁浮,目前一般采用液氮作为高温超导线圈绕组制冷剂。我国西南交通大学研制出了高温超导磁浮系统,超导材料使用以钇(Y)为主的钇钡铜氧(YBaCuO)高温超导体块材。

值得注意的是,高温超导磁浮的工作温度未必是固定的。随着超导技术的发展,磁浮铁路所使用的高温超导工作温度可能会升高。将来也有可能使用常温超导磁浮材料,到那时还可能会出现常温超导磁浮铁路。

2. 低温超导磁浮

液氦的工作温度为 4.2 K (- 269 °C)。采用适合该工作温度的超导材料制作绕组并且采用液氦作为超导绕组制冷剂的磁浮称为低温超导磁浮,简称超导磁浮。日本的 ML 磁浮系统是低温超导磁浮系统,超导绕组使用铌钛合金制造。

【拓展：超导磁浮】

超导磁浮,利用超导体的抗磁性实现磁浮。人们把在实现超导的过程中处于超导

状态的导体称为“超导体”。超导体的直流电阻率在一定的低温下突然消失，称作零电阻效应。导体没有了电阻，电流流经超导体时就不发生热损耗，电流可以毫无阻力地在导线中形成强大的电流，从而产生超强磁场。

超导磁浮是主要利用低温超导材料和高温超导材料实现悬浮的一种方式。低温超导技术采用在列车车轮旁边安装小型超导磁体，在列车向前行驶时，超导磁体则向轨道产生强大的磁场，并和安装在轨道两旁的铝环相互作用，产生一种向上的浮力，消除车轮与钢轨的摩擦力，起到加快车速的作用。高温超导磁浮是一项利用高温超导块材磁通钉扎特性，而不需要主动控制就能实现稳定悬浮的技术。超导在运载上的其他应用还有用作轮船动力的超导电机、电磁空间发射工具及飞机悬浮跑道。

超导磁浮原理：把一块磁铁放在超导盘上，由于超导盘把磁感应线排斥出去，超导盘与磁铁之间有排斥力，结果磁铁悬浮在超导盘的上方。这种超导悬浮在工程技术中可以被大大利用，超导悬浮列车就是一例。使列车悬浮起来，与轨道脱离接触，这样列车在运行时的阻力降低很多，沿轨道“飞行”的速度可达 500 km/h。

日本所研制的低温超导磁浮在 2015 年 4 月 21 日创造了地面轨道交通工具载人速度的世界新纪录（603 km/h），并计划于 2027 年修建中央新干线磁浮线。这条低温超导磁浮商业运营线旨在连接东京、名古屋和大阪三大城市，全程 498 km，运行速度为 505 km/h。

与普通磁浮相比，利用超导磁体实现磁浮具有以下优点：悬浮的间隙大，一般可