

1 铁路——我国现代交通体系的骨干

1.1 铁路是我国现代化交通体系的骨干

1.1.1 铁路过去是我国综合运输体系的骨干

在我国已有的现代化民用运输方式（铁路、公路、水运、航空和管道）中，1980年以前，铁路大体处于垄断地位（只有局部路段上运力紧张），1980年起国民经济迅猛发展，但其时路网数量少（营业里程仅49940 km）运输负荷直线上升（运输荷载1995年全路平均是1980年的2.1倍多；1996年略有下降为2868万换算 $t \cdot km/km$ ，是美国铁路的3倍，日本和俄罗斯的2倍，为世界最高。京沪、京广、哈大、京沈、陇海五大干线平均运输密度为9660万换算 $t \cdot km/km$ ，为全路平均负荷的3.4倍，能力利用率已达80%以上）路网的机动和应变能力差，客、货运输因而全面紧张。加之铁路装备落后，运输质量不高，路网结构不合理，中西部尤为薄弱，从而使铁路客货运量在现代化运输中的比重迅速下降，特别是客货混行的我国铁路是以承担国民经济发展所必需的货运为主的（1980~1995年，铁路行车密度中客车在30%左右，其中1995年为31.1%），客车车次少、超员现象严重。虽然1989年9月5日和1995年10月1日客票两次上调（分别调112.8%和51.8%），使客车超员现象略有减轻。但由于低等级公路投资少，建设速度快，使公路网发展速度快，加上高速公路与民航的高速发展（从1988年10月31日上海—嘉定间18.5 km高速公路通车起到1999年底总里程11000 km、年均建成1000 km；1999年底，公路网总长138万 km基本上实现了乡乡通公路，从1988年底起至今的11年间年均建成3.5万 km）公路路况普遍改善、经营方式灵活以及经济发展导致节约旅行时间的重要性日益增大等原因，铁路客运量在现代化运输中的比重进一步下降了。而且，1996年起在铁路客运总量没有很大变化，且旅客平均行程近7倍于公路的情况下，客运周转量开始了少于公路客运周转量（占全国的53.7%）的历程。

1.1.2 铁路今后仍然是我国综合运输体系的骨干

我国大陆辽阔（南北长约5500 km，东西宽约5200 km），内河和海运条件有限，而且资源分布和工业布局不平衡，决定了北煤南运、西煤东运、北粮南运、西棉东运的格局。人口众多，分布不匀（如西部十省市国土面积占全国71.7%，人口仅占28.2%，全国百万人以上的大城市30个、200万以上人口的城市15个，西部分别只7个、3个）随着西部开发、南水北调工程的展开，大量劳动力长距离流动务工的状况会继续。在市场经济全面发展的促进下，商务旅行亦更增多。人民生活水平提高，使国内自费旅游、探亲、求职、求学的队伍逐渐加大，出行次数和旅行距离增加。对外开放，加入世贸，加上我国文化传统独特、旅游

资源丰富，会吸引越来越多的国外客商和旅游者……。因此，虽然随着输油管道的建设，炼焦、发电（如我国有独创性的受控核裂变发电），高压输电及各种工业技术的发展，使单位产品的能耗下降等，可以使石油、煤炭等大宗货物的铁路运量增长减缓，但是在经济发展需要资源开发和今天铁路人均乘车率仅约 0.8 次的情况下，铁路运输总量肯定将不断增长，特别是在运量集中的干线上。参照发达国家 GDP 的增长与客运量的增长密切相关的经验，预计未来会类似“八五”期间（客、货运周转量分别增长了 36%、20%），铁路仍将保持客运增长大于货运增长的趋势。

另一方面，我国需以仅占世界 7% 的可耕地，供养超过世界五分之一的人口，为了实现现代化建设的可持续发展，交通建设必须最大限度地发挥土地资源的效能；我国能源结构是以煤炭资源为主，石油少，而且石油资源全世界都紧缺，交通建设必须发展能有效利用多种能源的交通方式。而在同等运量下，铁路占地省、能耗低、污染少、运能大、全天候的技术经济优势符合我国长距离、大运量运输的需要。特别是随着市场经济的发展，人们的时间价值也随之增加，对旅行速度的要求也日益提高。如东京大学井口雄一教授认为，对于现代人来说旅行距离扩大 10 倍，消耗时间增加 4 倍是适当的，以人在没有阻碍的情况下，用 5 min 走完 0.4 km 路程为基点，加上等待、换乘时间，对于铁路希望的旅行速度是：近距离 300 km 以内约为 160 km/h、中距离（500~600 km）约为 250 km/h，长距离 1 000 km 及以上则为 400~500 km/h。现代铁路（含磁浮铁路）完全有能力满足这种要求。另外，若从旅客旅行时间 t 与旅客到达交通工具的往返时间加等待时间 t_1 、旅行距离 L 和旅行速度 v 的关系 $t=t_1+L/v$ ，来对比火车（设 $t_1=1$ h, $v=200\sim 500$ km/h）、汽车（ $t_1=0$, $v=80\sim 120$ km/h），民航（ $t_1=2.5$ h, $v=700\sim 900$ km/h）则加上经济、舒适和方便等条件铁路可在 200~2 500 km 范围内与公路和民航竞争。

所有这些决定了，铁路今后必然还是我国现代化交通体系的骨干。

1.1.3 未来的中国铁路

1.1.3.1 2002 年的中国铁路

为了使铁路能真正负起运输骨干的责任，当好国民经济的先行官，考虑到我国铁路网长度不足，结构不合理（西部尤为薄弱），且我国既不同于地广人稀，有相当发达的高速公路和航空网的美国、加拿大等国的铁路可以货运为主，又不能像有方便海运条件的日本、法国铁路可以客运为主，中国铁路既要货运重载，又要客运高速且加大行车密度，需要形成一种重量、密度、速度兼容的运输网，以巩固铁路在综合运输体系中的骨干地位。1998 年初铁道部根据党中央加快铁路建设的决策，决定在 1998~2002 年，按照“决战西南，强攻煤运，建设高速，扩展路网，突破七万”的总体部署，遵循以市场需求为导向，依靠科技进步，扩展西部地区路网、完善路网布局，打通限制口（1999 年 12 月 26 日，随着广元—阳平关复线电化通车，铁路运输的最后一个限制口——广元口悄然消失），建设大能力干线，改善装备水平、建设必要的客运专线，满足客运快速和货运重载的需要，提高铁路运输的应变能力、机动能力和现代化水平，提高路网质量和综合运输能力等建设原则。计划建设新线 5 340 km 既有复线 2 580 km，既有线电气化 4 400 km 地方铁路 1 000 km。使 2002 年我国铁路进出西南的通道能力翻一番，西部路网骨架基本形成（如建设遂宁—重庆线路 147 km，可与达成线形成成一渝间 320 km 的新通道，以后新通道以客运为主，成渝线以货

运为主；内昆通车后，为“黔煤入川”提供了便捷通道），中部路网有较大拓展，东部路网进一步完善；陕西、山西、内蒙古西部的“三西”煤炭外运总能力达到 3.5 亿吨，基本适应外运需要；客车速度明显提高，三大运输繁忙干线基本实现客货分线（建设 422 km 秦（皇岛）沈（阳）客运专线，与改造过的 299 km 京秦线共同形成 721 km 京沈快速客运通道；京广线以客运为主，京九线以货运为主；积极做好京沪高速铁路前期工作，力争开工建设）；营业里程可突破 7 万公里，其中复线里程可达 2.1 万公里，电气化里程 1.5 万公里，主要通道基本适应国民经济发展和进步的要求，客货运输紧张状况有明显缓解；路网综合能力、整体功能和现代化水平显著提高。

1.1.3.2 2050 年的铁路网

党的十五大在展望下世纪时指出，我国“到世纪中叶建国一百年时，基本实现现代化，建成富强民主文明的社会主义国家”。那么 2050 年时作为经济平稳、健康发展所需的基础设施，铁路网的情况应如何？

铁道部经济规划研究院路网规划研究所，在考虑铁路网与人口、生产力布局、区域经济、社会发展、国防建设及外贸等关系的基础上，采用国土结点法，用 9 个 200 万以上人口、东中部的重要省会城市及交通枢纽共 20 个作为节点，考虑了他们所在地域面积的影响，预测得我国需要的客运专线网的规模为 0.9 万 km，如图 1.1。选择东部经济带、中部经济带和西部经济带中现有人口 20 万以上的所有城市、港口、大资源开发地、主要旅游景点及边境口岸和有战略意义的城镇 625 个作为节点，预测的客货混跑路网总规模为 10.8 万 km，再加上枢纽内各种走行线和一些里程较短的支线约 3 000 km，总计 2050 年我国需要的路网规模约 12.2 万 km。到那时东、中、西三个经济带中路网在全国路网的比重分别为 27.2%、35.8% 和 37%；东、中、西部每 10⁴ km² 国土的铁路网密度的比是 3 : 1.8 :

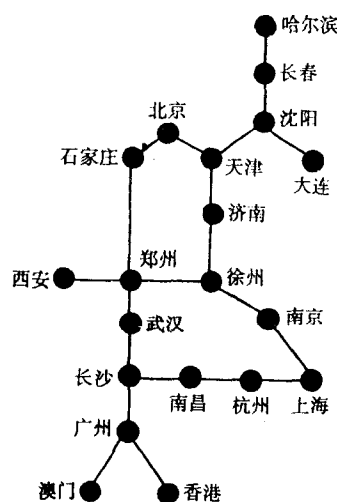


图 1.1 客运专线网示意力

1, 比现在的比值 5.4 : 3.8 : 1 显著缩小。全国平均每 100 km² 国土面积人的路网密度为 1.25 km，比 1995 年扩大了近 1 倍，虽仍低于发达国家和印度目前的水平（是德国的 1/10，英国、日本的 1/6，美国、印度的 1/2），但在同时提高技术装备水平（复线率、电化率等）的情况下，是可以满足我国国民经济发展需要的。

用铁路网发展规模系统动力学模型法预测的 2050 年铁路网规模也大致如此。

未来铁路网的特点之一是有客运专线网。专线网除有一般铁路的优点外，一个显著的特点就是列车旅行速度高。提高旅行速度又可以增加客运量，法国、英国、日本等的经验都是如此。日本铁道技术研究所提出的考虑人口数量和分布的变化及通过提高速度等运输条件，导致诱发客运量的“引力模型”可供参考。引力模型是说，两城市间的客运量和两城市人口的乘积成正比，与输送阻力的 β 次方成反比，可用下式表示

$$q_{ij} = q_{j0} \times \frac{P_i \cdot P_j}{P_{i0} \cdot P_{j0}} \times \frac{1}{(R_{ij} / R_{j0})^\beta}$$

$$R_{ij} = \frac{U_{ij}}{W} + T_{ij}$$

式中： q_{ij} 是*i*、*j*城间的客运量； P_i 、 P_j 是*i*、*j*城的将来人口； R_{ij} 是*i*、*j*城间的输送阻力； U_{ij} 是*i*、*j*间的运价； W 是时间价值； T_{ij} 是*i*、*j*间的旅行时间。

上式下标中的“0”表示现状，下标没有“0”表示将来。使用时可先求出各种运输工具的交通阻力，再用引力模型来分别求得客运量。

3.3 2050 年的铁路勘测设计

2050 年的铁路勘测设计，将实现以专家系统为主要手段的铁路可行性研究，以进一步优化国家铁路网；使用先进测绘手段采集地质、地貌等地理信息；建成铁路设计信息管理数据库；实现以总体设计（或线路设计）为主线的计算机集成设计系统。即各专业（线路、路基、桥涵、隧道、车站、房建、给排水、概预算等）子系统模块，具有对本专业内容分析、优化设计、输出数字成果或设计图纸的功能，并在与主系统联网交换信息过程中推进铁路总体设计，达到最优化成果。在工程结构物（如桁架等）的建造上，实现计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System 简称 CIMS）其过程为用计算机辅助设计（CAD）总图和零部件，在计算机中组装、模拟结构物的真实受力状态，分析并优化设计有关构件，再将设计成果传输到数控机床，用计算机辅助制造（CAM）技术控制构件等的加工，并采用产品数据管理系统控制生产的全过程。

1.2 铁路的最高速度将是多少

1.2.1 影响旅行速度的因素

影响旅行速度的因素有两方面，一是以车辆、地面设备的性能、养护水平等为基础的列车速度，即物理能力；二是考虑营业政策、运输设备等条件而编制的列车运行图，即软技术能力，如图 1.2 所示。

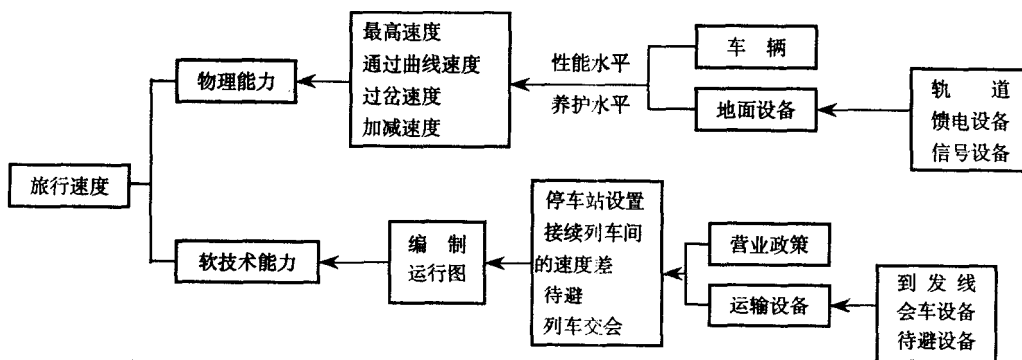


图 1.2 旅行速度的决定因素

在编制列车运行图时调整的重点是 富余时间的调整 停车车站的调整 待避和会车间隔时间的缩短；列车排列的调整。这些都与营业政策、运输设备有关。他们在有关专业中研究。

1.2.2 制约提速的技术因素及解决途径

为了提高旅行速度，必须努力提高其物理能力，但是对不同线路必须确定重点放在提高最高速度（一般是对新建铁路）、曲线限速或者加速和减速性能（后两者一般是对既有线）中的哪一个上效果好。另一方面，影响上述速度的是多种因素，又可分为硬性制约因素、软性制约因素，他们与铁路基础设施之间关系错综复杂，可表示为如图 1.3，分述如下：

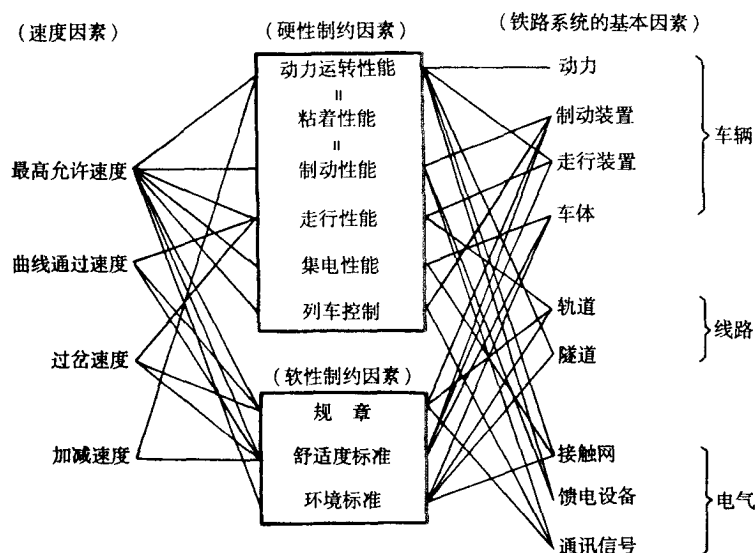


图 1.3 速度与铁路基本因素间的关系

1.2.2.1 动力运转性能

当克服走行阻力（空气、滚动和坡道阻力等）的动力不足时，速度就难以提高。车辆的功率（驱动力 × 速度）增加，不仅涉及成本问题，而且还有动力装置的单位（每台电机）、功率和安装空间的制约问题，及粘着限度问题。由于粘着系数（ μ ）具有随速度提高反而降低的趋势；另一方面走行阻力是随速度提高而增大的（空气阻力与速度平方成正比增加），因此从粘着力和走行阻力要达到平衡的粘着性能来看，存在一个速度限界。铁路轮轨干燥时 μ 约为 0.3，潮湿时降到 0.1 以下；而用橡胶轮胎的汽车，在干燥的混凝土路面上， μ 为 0.8，潮湿路面上为 0.5。在结冰的雪地上，汽车的 μ 值恰好相当于铁路轮轨间潮湿时的 μ 值。因此轮轨铁路车辆的加减速速度要比汽车的小得多。

改善轨轮粘着条件、提高 μ 的方法有两种：一是控制作用于轮上的力，以获得稳定、高值的粘着系数，如使用交流电机，因他们空转时扭矩显著减少，容易实现再粘着；二是加强轮轨接触面的状态管理，如对车轮可采用车轮清扫器、研磨器等，对钢轨则采用钢轨打磨等保持轨面形状。日本新干线在制动时把清扫车轮踏面的研磨器压到车轮上，在清除轮踏面污染膜的同时，利用轮踏面的粗糙化，使轨面污染膜破坏，以提高 μ 值。

1.2.2.2 制动性能和安全

速度问题是以能使列车安全停止为前提的。因为列车的动能和速度的平方成正比，万一相撞受害程度也会随速度平方成正比增加。从安全角度出发，希望制动距离尽可能地短，但

是迫使车轮停止转动的力超过钢轨和车轮间的粘着限制时，车轮将打滑，不但无法产生减速度，且使车轮踏面产生扁疤，轮轨间因而会发生较大冲击，造成双方损伤。可以说，依靠轮轨间粘着来实现制动的情况中，提高粘着性是提高制动性能的关键。制动性能是构成一条铁路上的所有列车安全运行所必须的控制列车间隔和速度的信号安全系统的基础。若想提高速度，在提高制动性能的同时，必须千方百计地改善运输安全系统，如规定的制动距离、车内信号和列车自动控制（ATC）等，加强列车控制方面的安全度。

解决制动性能的办法有三种：一是有效利用粘着力，即控制制动力，使之随粘着特性曲线变化。但因轨面情况不同，有时 μ 会在粘着特性曲线以下，使车轮发生滑行，故必须有防止滑行的机构，一旦检知（根据车轮圆周速度异常降低或大异于其他车轮）某轴滑行，立即暂时缓解其制动力，待再粘着时重新强化制动力（日本新干线已经在每根轴上采用了这种装置）。二是用增粘研磨器，使车轮踏面粗糙化，但这同时也增加了磨耗（故开发不致异常磨耗轮踏面的增粘制动研磨器是重要的研究课题）。日本的使用情况已如前述，法国 TGV 则合并使用附挂车的踏面制动器（仅在 $v < 200 \text{ km/h}$ 时）和盘式制动器，结合清扫车轮踏面来承担部分制动力。第三是采用非粘着的制动系统，使用电磁吸附制动和涡流制动。电磁吸附制动还会磨耗钢轨等，一般情况下不太使用。涡流钢轨制动机（简称 ECB），由于制造和安装上都给予了充分的考虑，日本新干线 951 型试验车试验的结果是钢轨温度升高 $4.5^\circ\text{C} \sim 6.0^\circ\text{C}$ （当 $v = 140 \text{ km/h}$ 时，钢轨和 ECB 间的间隙为 $10 \sim 15 \text{ mm}$ ），避免了“电磁力会使钢轨变形”的担心。

1.2.2.3 运行的平稳性

车辆和线路之间的相互关系决定着运行的平稳性。作为车辆特性，当运行速度达到某一程度时，车辆会突然发生左右方向的自激振动，这种现象称为蛇行运动。为了不发生蛇行运动，需要选择和确定运行装置的各项技术参数（轴箱支撑刚度、转向架转动阻力、踏面形状等）；即使不发生蛇行运动，如果达到高速运行时，由于车辆和轨道不平顺之间的相互作用，也会使车轮作用在钢轨上的力发生变化，有时轮重和横压明显增加，有时轮重明显减少，发生“轮重减载”现象，这样不仅加剧了轨道的破坏，甚至还有发生脱轨的危险，因为轮重和横压是由车轮和钢轨相互作用而产生的，故在提高速度时，必须同时考虑轨道构造和车辆构造。在车辆方面，要减少转向架的转动阻力，适应小半径曲线中的运行条件，要设计减少轨道负担的车辆构造（如延长转向架中心距，采用径向转向架，延长转向架固定轴距，减轻轮重、簧下质量和簧间质量，加大车轮直径，减小轮踏面坡度、车体惯性半径和转向架惯性半径等）。

在轨道构造方面，与走行安全和平稳性有关的要素有：

（1）轨道承载力

提高行车速度会因轮重的附加冲击随列车速度按比例加大而增加钢轨、轨枕、道床等的负担，主要是钢轨的弯曲应力或路基面动应力。现代的理论实际上就是关于速度和轨道参数最佳选择的理论，因此如需提高速度，则应采取以下对策：使用重型钢轨以减小钢轨弯曲应力，或降低轮重、缩小轨枕间距以减小钢轨弯曲力矩与路基面动压应力，还可以用增加道床厚度的办法减少路基面应力（法国国铁认为，有道碴轨道也可以运行 300 km/h ，故 TGV 大西洋线是按有道碴轨道建设的；日本由于地形和社会条件的关系，在新干线中采用了许多隧道和高架桥，也正式采用了板式轨道）。

(2) 轨道破坏

轨道破坏是指虽然列车荷载在轨道承载力限度之内，轨道各部分也会发生变位，及随之而来的轨道不平顺——高低不平顺（占主要）和方向、轨距不平顺。对策是采用重型钢轨、PC 轨枕、增加轨枕数、加厚道床等以强化轨道，减小车辆轮重、簧下质量以减小对高低不平顺的车辆系数和对轨距、方向不平顺的车辆横压。

(3) 养护和维修轨道几何状态

一般地说，列车速度愈高，轨道不平顺应该愈小。从宏观上考虑，其关系可由 Birman 公式 $f=400/v$ 表示，式中 f 为轨道不平顺的容许限度 (mm)； v 为列车速度(km/h)。另外，根据日本研究结果，提高列车速度后，必须严格监控长波长轨道的不平顺。如车辆保持不变，对波长为 25~50 m 的长波长方向不平顺来说，在 300 km/h 时的管理值必须比在 200 km/h 时严格 2 倍以上。在小山试验线进行超过 210 km/h 的高速试验（最高速度记录为 319 km/h）时，轨道养护目标值和营业线的管理值如表 1.1 所示。

表 1.1 日本小山试验线轨道养护目标值

养护目标	轨距 (mm)	水平 (mm)	方向 (mm/10m)	高低 (mm/10m)	三角坑 (mm/2.5m)	上下振动 (g*)	左右振动 (g)
营业线	+6 -4	±5	±4	±6	±4	0.25	0.20
试验线	+5 -3	±4	±4	±5	±4	0.35	0.30

g 是重力加速度， $1g=9.8\text{ m/s}^2$ 。

法国 TGV 在进行 380 km/h 高速运行试验时，铺设轨道的标准为：方向 $\pm 2\text{ mm}$ ，高低 5 mm（在 18 m 内），当轨道稳定以后，高低不平顺标准是用 10 m 平均弦测量为 3 mm（成为 10 m 弦正矢的 1/2）；用 31 m 弦测量为 8.5 mm（半振幅为 6 mm）。方向不平顺的标准是：用 10 m 弦测量为 4 mm，用 33 m 弦测量为 7 mm（半振幅 5 mm）。后来巴黎东南线长波轨道不平顺标准与此几乎相同，10 m 左右弦长的标准前者为后者的 60%。

为了保持轨道良好的技术状态，还实行以舒适度为主的振动加速度的管理。管理目标值（全振幅加速度值）是：新干线中，以安全性为主的提高速度判定标准值是上下振动为 0.5 g，左右振动为 0.4 g，把判定标准的一半作为管理目标值，如表 1.1。

(4) 钢轨踏面管理

由于当最高速度提高到 210 km/h 以上时，钢轨踏面微小的凹凸都会影响轮重的变化、噪音和振动，据小山试验线以 300 km/h 左右速度的综合试验结果，明确了检测钢轨踏面的滤波器及其限度特性，包括 10 cm 左右的波长在内，验收值为 0.3 mm/m，管理值为 0.6 mm/m。TGV 钢轨踏面的验收标准为 0.5 mm/1.5 m 以下，用轴箱振动加速度计进行检测，必要时进行钢轨打磨作业。

(5) 提高曲线的通过速度

限制通过曲线的速度，理由大致有三：一是防止未被平衡的离心力，加上受风或振动的影响，可能发生颠覆事故；二是未被平衡的离心力虽还不致发生颠覆，但加大了轮重和横压，促进了轨道的磨损和破坏；三是未被平衡的离心力变大，会使舒适度恶化，故为保证列车平稳、舒适地高速通过曲线，必须处理好超高、欠超高和缓和曲线长度间的关系。

(正号为向外侧倾覆,负号为向内侧倾覆)

式中: h_G^* 为 $1.25 h_G$; h_G 为车辆重心高 (m); S_1 为轨距 (m); v 为通过曲线速度 (m/s); R 为曲线半径 (m); g 为重力加速度 (9.8 m/s^2); h 为超高 (m); μ 为 W_T / W_B ; W_T 为转向架质量 (kg); W_B 为车体质量 (kg); h_{CT} 为转向架重心高 (m); a_r 为重心位置的横向振动加速度 (当 $v \leq 80 \text{ km/h}$ 时, $a_r = 0.00125 v$, 当 $v \geq 80 \text{ km/h}$ 时 $a_r = 0.1$); h_{BC}^* 为 $1.25 h_{BC}$; h_{BC} 为风压中心高度 (m); ρ 为空气密度 ($0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$); U 为风速 (m/s); S 为车体横向受风面积 (m^2); C_r 为车体受风系数; W 为车辆总质量 (kg)。

如新干线 0 系车辆通过 $R = 2500 \text{ m}$ 的曲线且 $D = 1$ 时, 当最低运行速度为 80 km/h 时, 向内侧倾覆的限界风速为 35 m/s , 实际上, 列车由于风力影响而停止运行的限界风速是 30 m/s 。

⑤ 使用摆式车辆提高通过曲线速度

摆式车辆通过曲线时, 由于车体倾斜, 能使重力和离心力的合力与车体底面大致垂直, 使旅客几乎感觉不到未被平衡离心加速度的存在。另外, 由于摆式车体可以在满足旅客舒适度的前提下, 充分利用超高的安全限值, 故在通过曲线时, 可以比一般列车速度快。当然也会产生更大的轨道作用力、增加外轨磨损和增加转向架的年维修费用。摆式车辆因车体倾斜方式不同而有自然倾斜式和强制倾斜式之分。

i 自然倾斜摆式车

自然倾斜摆式车直接利用离心力使车体倾斜, 倾摆结构简单, 可靠度较高。但因车辆重心向曲线外侧偏移, 重力和离心力合力指向轨面的位置要比普通车辆更靠外轨侧, 故从向外倾覆分析是不利的。其次倾斜装置的阻力大, 进入和驶出曲线时, 车体倾斜滞后, 加上车辆重心上移 (和回落), 舒适性差。另外, 车辆下部的变位较大, 会影响车辆限界, 因此一般车体摆角较小, 过曲线速度的提高也少 (日本 381 系摆式车的摆动角为 5°) 自然摆式车的欠超高与作用在旅客身上的未被平衡离心加速度 a' 的关系可根据图 1.5 说明如下:

$$a' = a - h/s_1 - \phi = v^2 / (R \cdot g) - h/s_1 - \phi$$

又
$$v^2 / (R \cdot g) = (h + h_Q) / S_1$$

代入上式得
$$a' = h_Q / S_1 - \phi$$

$$\therefore h_Q = S_1 (a' + \phi)$$

式中: a' 、 a 分别为对旅客、车体的未被平衡离心加速度 (g); h 、 h_Q 是超高、欠超高 (mm); S_1 是轨中心距 (mm); ϕ 是倾斜角 (弧度); v 是通过曲线的速度 (m/s); R 是曲线半径 (m); g 是重力加速度 (9.8 m/s^2)。

ii 强制倾斜摆式车

强制倾斜摆式车是利用气压或油压使车体倾斜, 要先检知车辆的未被平衡离心加速度, 然后再使气压或油压作用, 机构较复杂, 可靠度也容易降低。但是, 这种车车体倾斜时重心是向曲线内侧移动的 (与自然摆式车相反, 参看图 1.6), 因此对于对外侧倾覆来说, 强制式倾斜更有利, 故其车体倾斜角可以更大 (意大利的 ETR401 电动车组, 倾斜角达 10°) 能更好利用欠超高的安全限值, 因而列车通过曲线的速度可比一般列车高 30% 左右。

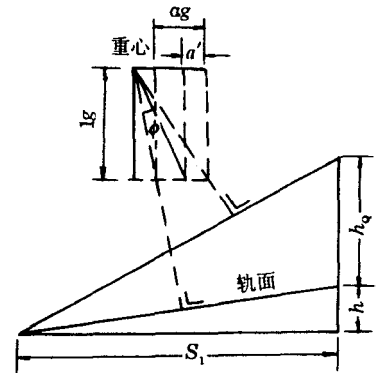


图 1.5

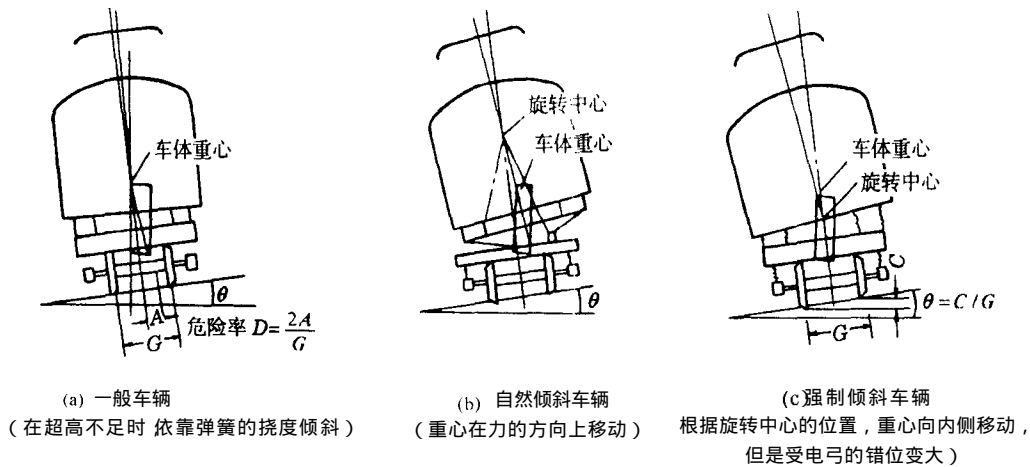


图 1.6 通过曲线时车体倾斜形式的比较

另外, 强制倾斜摆式电力机车的受电弓和接触导线的错位现象也比自然倾斜式大(如图 1.6 所示), 所以采用强制倾斜式时必须考虑接触网和受电弓间的相对关系, 意大利、西班牙等一些欧洲国家采用把集电装置装在转向架与连杆联动的台上, 而瑞典的 X2000(在广深准高速铁路上已引入)则采取机车无车体倾斜方式。

iii 关于摆式车中站立旅客舒适度的对策

虽然在运行的摆式车中日本测得的左右方向稳定加速度明显低于标准值 $0.08g$ (0.8 m/s^2), 但关于舒适度的意见仍然普遍存在, 尤其是站立着的旅客反映更大。分析表明, 因为若在完全平衡了离心加速度的摆式车厢里, 乘客耳内的平衡机构给出的信号告诉大脑身体是直立的, 皮肤感受到的压力也提示身体处于垂直位置, 然而乘客的眼睛从看到窗外的景象(通过与水平或垂直物体对比)而感到的是他们正在通过曲线, 车厢有 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的偏转, 这几种混乱的信息一起传入大脑, 将导致一定程度的晕眩或晕车。研究表明让摆式车补偿 70% 的欠超高, 让旅客感到约 $0.1g$ (他们曾经体验过和可接受的)的横向加速度是合适的。

日本从实车试验的结果总结出, 为消除站立旅客不舒适的感觉, 应做到:

在曲线出入口处, 车体的倾斜角速度(也可称为横摆角速度)要小(目标为 $5^\circ/\text{s}$ 以下)角速度的波形要前后对称, 且是正弦波; 在曲线出入口处, 车体的倾斜角加速度要小(目标为 $15^\circ/\text{s}^2$ 以下)车体左右加速度不出现冲击波形

(6) 超高和缓和曲线设置的关系

缓和曲线一般采用三次抛物线, 京沪高速铁路“暂行规定”中规定, 当曲线半径和缓和曲线长均采用困难标准时, 在缓和曲线超高的起终点处插入长度为 40 m 的竖向圆曲线顺坡(即所谓改善型三次抛物线)。缓和曲线长一般应考虑安全(保证车轮不脱轨)和舒适这两方面, 客运专线的缓和曲线长 L 则受舒适度控制, 即要从限制缓和曲线的超高时变率 $[f]$ (则 $L_1 = \frac{v_{\max}}{3.6} \cdot \frac{h}{[f]}$), 与欠超高时变率 $[\beta]$ 则 $L_2 = \frac{v_{\max}}{3.6} \cdot \frac{h_g}{[\beta]}$)所限定的 L 中选用其长者, “暂行规定”按前者简化后得: 一般情况用 $L = 0.011v_{\max}h$, 困难情况用 $L = 0.009v_{\max}h$, 式中 h 为超高 mm ; v_{\max} 为设计最高速度 km/h 。

日本根据摆式电车的试验发现，如考虑舒适度，横摆角速度的限度为 $5^\circ/\text{s}$ 。根据试验结果，由超高引起的容许横摆角速度的变化率 $[V_a]$ 必须低于 $3^\circ/\text{s}$ ，即 $[V_a] \leq 3^\circ/\text{s}$ 。由 $[V_a] = 0.011v_{\max}h/L$ ($^\circ/\text{s}$) 看，在“暂行规定”的一般情况下， $[V_a] = 1^\circ/\text{s}$ ；在取困难情况的缓和曲线长时 $[V_a] = 1.22$ ($^\circ/\text{s}$)。

(7) 竖曲线的通过速度

当列车高速通过圆曲线型竖曲线时，由于垂直离心加速度及来自前后车辆的拉（或压）力作用，车辆可能浮起。竖曲线半径和列车速度、离心加速度的关系可用下式表示

$$a = 1/(R \cdot g) \times v/3.6)^2 = v^2/127R \quad \text{或} \quad v = \sqrt{127 \cdot Ra}$$

式中： a 是加速度 (g)； v 是列车速度 (km/h)； R 是竖曲线半径 (m)； g 是重力加速度 (9.8 m/s^2)。

从舒适度方面考虑，世界主要国家铁路中规定的垂直方向加速度的限度值为 $0.02 \sim 0.04 g$ 。法国 TGV 在巴黎东南线建设前，以飞机中已实行的标准进行行走模拟实验，结果是凸部加速度为 $0.045 g$ 、凹部加速度为 $0.06 g$ 以上时，最敏感的人会感到不舒适。日本东海道新干线建设标准中，以容许垂直加速度为 $0.05 g$ 来决定最小竖曲线，在 $R = 10\,000 \text{ m}$ 时 $v = 252 \text{ km/h}$ ，在 $R = 15\,000 \text{ m}$ 时 $v = 308 \text{ km/h}$ 。我国“暂行规定”的竖曲线半径标准见表 1.2，还规定竖曲线与竖曲线、缓和曲线、道岔均不得重叠设置。竖曲线与平面圆曲线不宜重叠设置，困难条件下，半径不小于 $7\,000 \text{ m}$ 的圆曲线与半径不小于 $25\,000 \text{ m}$ 的竖曲线可重叠设置。特别困难条件下，半径小于 $7\,000 \text{ m}$ 的圆曲线与相应速度的竖曲线也可重叠设置，但缓和曲线长度不应采用困难值。

表 1.2 竖曲线半径采用标准

v_{\max} (km/h)	≥ 300	< 300 ≥ 250	< 250 ≥ 160	< 160
R_{sh} (m)	25 000	20 000	15 000	10 000

1.2.2.4 改善动力方式和提高集电性能

200 km/h 以上高速列车的动力方式有：内燃机运转（英国的 HST）、燃气轮机运转（法国制造的美国列车）和电机运转等三种。内燃机功率有限，只能用在较平坦、不太需要加速性能的线区；燃气轮机车虽比内燃机车输出功率大，但存在噪音问题；多数国家采用电机运转，以获得高速运行所需的大功率，且可能回收能量。

(1) 动力配置

日本传统上是采用动力分散方式，认为其比动力集中方式有以下优点：① 由于动轴数多，能获得较大的加减速度，不仅适用于包括新干线在内的停车站间距离较短的线区，也适于限速多的既有线；② 可以减轻轴重，适用于路基条件不良的日本铁道线路；③ 可以有效地利用车体空间，适于大运量需要；④ 电气制动轴较多，不仅有利于制动装置的维修养护，也可能回收能量；⑤ 受电弓多，容易实现大容量集电。但是，动力分散方式有下列缺点：

① 制造和维修养护费用比较昂贵；② 舒适度（含噪音和振动）稍差；③ 受电弓多，使接触网的磨损严重，集电噪音也大。

欧洲由于：① 路基条件较日本好，能容许运行大轴重车辆；② 站间距离较长，线形也较好，使用制动的频度较低；③ 在用机车牵引的高速运行技术方面积累了较多经验，因而多采用欧洲传统的动力集中方式。法国巴黎东南线中，除了二辆动力车以外，随动车中尚

有 2 个动力转向架，使动轴占总轴数的 46%，接近动力分散方式。这样做的原因可能是为避免高速运行时在输出功率和粘着等方面受到限制。

为进一步提高性能和降低成本，把逆变控制的交流电机驱动应用于高速列车将是今后的发展趋势。理由是：在同样的空间中，用交流电机可以获得更大的输出功率，因而可减少动轴数、降低成本；采用交流电机能提高机车的粘着特性；③交流电机可以在低速到高速范围内发挥其性能，使高速运行和爬陡坡的能力同时存在；④逆变方式可以使主回路大幅度实现无节点化，而交流电机没有整流器，更便于养护维修。机车中大输出功率的电机型式用同步型为好。

(2) 集电性能

为了避免受电弓集中磨损一处，接触网与轨道的平面关系示意如图 1.7，列车运行时受电弓相对接触网作横向往复运动。在高速运行时，由于空气动力学的原因，受电弓的舟体向上提升，加大了弓对接触网的上压力（超过一定限度时，可使弓挤进接触网的交叉部，冲击接触网的吊链钩），使压在接触网上的受电弓像“琴弓”在“琴弦”上重重地来回拉动，不但会加剧“弓”和“网”的磨损，还会因此（还有风力等）使受电弓后方的接触网产生复杂的多层横波，使后面的受电弓难以追随处于振荡中的接触导线，与之保持紧密、连续的接触，产生“离线”现象，离线越多，接触网和受电弓间的损耗也愈大，离线加大甚至会发生电流中断和熔化损伤等问题。另外，网和弓之间火花变大，也会产生噪音和电波障害等环境保护方面的问题。

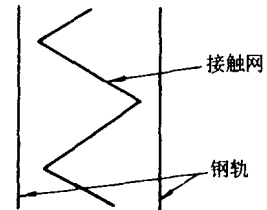


图 1.7

试验表明，离线率随着行车速度增高而上升，当列车速度接近接触网波动传播速度 C (m/s) 时 ($C = \sqrt{T/\rho}$ 式中, T 是接触网张力 单位是 N; ρ 是接触网线密度 单位是 kg/m), 受电弓后方的接触网上形成大波, 使受电弓与接触网接触处导线被强烈弯折, 导致接触导线应力增大, 后续受电弓离线现象增多。一般地说, 列车的实用速度限度应为波动传播速度的 70%。要提高列车速度, 就要使接触导线的 ρ 减小, 或者使 T 加大 (如法国 TGV 接触网的 $C = 440$ km/h, 最高营运速度 270 km/h, 是其 70% 以下) 此外, 受电弓的间隔变大, 接触网的振动影响会减小, 离线现象也会减少。为此, 日本东北新干线 240 km/h 运行时, 受电弓数由 6 个减为 3 个, 并且用特高压母线把受电弓联结起来, 使电火花减少了, 不仅降低了损耗, 而且噪声、电波障害也降低了, 参看图 1.10。

1.2.2.5 提速时控制成本增加和保护环境

(1) 提高速度时控制成本增加

随着速度提高, 除了动力费、车辆和地面设备维修养护费增加外, 还要加上因提高速度而对车辆和地面设备追加的必要投资。若把高速列车在其整个寿命周期中所耗费的费用总和称为其寿命周期费用 (Life Cycle Cost, 缩写为 LCC), 根据瑞典铁路的经验, 高速列车的购置费 (除机车车辆外, 还有备件、维修设备的购置费)、运营费及维修费在 LCC 中的比例大致各占 1/3。且近代运营及维修费用所占比例还以每年 30% 的速度增长。图 1.8 是对这种现象的形象比喻, 采购费只是冰山露出水面的一部分, 所占比例较小, 而水面下的运营维修费却大得多。当然, 提高速度以后, 提高了乘务员和车辆的周转率, 这样也会降低成本。可以说, 提高速度在经营上能成立的必要条件是: 随提高速度而增加的收入 (或者是避免了不

提高速度而不可避免的减少收入)和降低的成本之和,要超过由于提高速度而增加的成本。因此,必须努力控制因提高速度而引起的成本(比重较大的是动力费、车辆和地面设备的维修保养费)增加。

控制动力费的增加

动力费用以克服列车走行阻力,在运营费中所占的比例以高速铁路为最大,日本新干线约为 20%。列车的走行阻力大致可以分为三部分:

○ 机械阻力 R_1 , $R_1 = (A + B \cdot v) \cdot M_0$

式中, A 、 B 为常数; v 是速度; M 是列车质量。

○ 空气阻力 R_2 , $R_2 = (C \cdot F + D \cdot L \cdot L_1) \cdot v^2$ 。式中, C 、 D 是常数; v 是速度; F 是车辆断面积; L 是列车长度; L_1 是车辆断面周长。

○ 坡道阻力 R_3 , $R_3 = iM_0$ 。式中, i 是坡度。

可见降低走行阻力的重要途径,首先是努力降低列车的重量和空气阻力公式 v^2 前面的系数。法国 TGV-PSE(东南线)的 1/20 车辆模型的风洞试验表明,在占全部走行阻力 75% 的空气阻力中,外围表面积(车辆的断面周长 × 列车长度)占 66.2%,影响最大。另外,表面光滑度(连结部位的豁口、窗和门的凹凸、车顶与车底设备的凹凸等)也是非常重要的,

风洞试验中装在车轴上的自然通风型盘式制动器的阻力占 2.1%,实车试验时,约占全部空气阻力的 3%。TGV 列车与有同样性能、用机车牵引的旅客列车(BB22200 × 2 + 6 辆客车)相比较,走行阻力降低 33%。故如使用过去型号的列车把运行速度由 200 km/h 提高到 260 km/h 在平坦区间中需要 1.6 倍的动力,而用 TGV 车辆时,则几乎能控制住动力的增加。图 1.9 中介绍了英国国铁在研究开发 APT 时对空气阻力的分析。可以看到,为降低高速运行时的走行阻力,必须使车体侧面有良好的光滑度。

日本由于改进了车辆头部形状、下部光滑程度和主电机的冷却方式,使 100 系特别是 200 系车辆在 200 km/h 以上速度运行时走行阻力比 0 系车辆下降了许多,这可以从单位走行阻力公式中看出来

0 系 $r = 1.60 + 0.0350v + 0.000060v^2$ (kg/t) 车辆数 $n = 16$, 总质量 $M = 970$ t

100 系 $r = 1.273 + 0.00501v + 0.0001381v^2$ $n = 16$, $M = 925$ t (在隧道外)

$= 1.273 + 0.001v + 0.0002569v^2$ n 、 M 同上 (在隧道内)

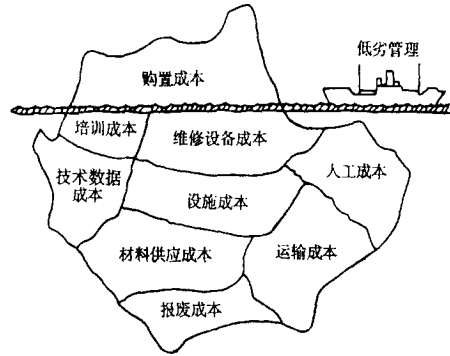


图 1.8 LCC 冰山图

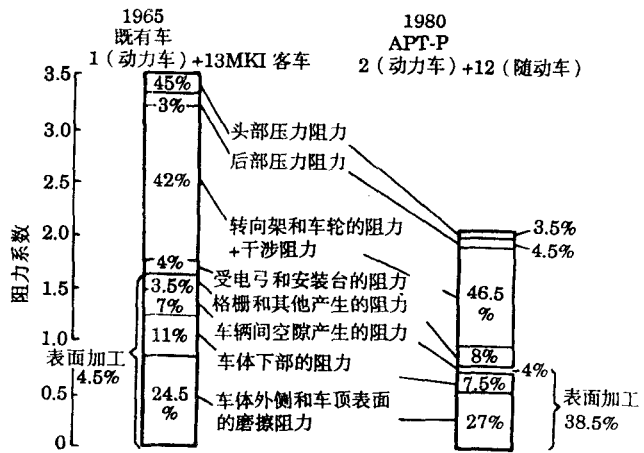


图 1.9 走行阻力分类

$$200 \text{ 系} \quad r = 1.21 + 0.0143v + 0.0000955v^2 \quad n = 12 \quad M = 763 \text{ t (在隧道外)}$$

$$\quad \quad \quad = 1.35 + 0.00832v + 0.0002258v \quad n, M \text{ 同上 (在隧道内)}$$

隧道内的空气阻力与隧道长度、隧道和列车的断面比、列车长度等因素有关,对于 0 系列车在 5 km 左右的隧道内约为隧道外的 1.3 倍,在长大隧道内约为 1.7 倍。在隧道多的区段中,为控制提高速度而引起的动力费增加,有效的办法是扩大隧道和车辆的断面比(简称隧车比)

控制车辆维修养护费用

随着速度的提高,车辆维修养护费用会在下列方面有所增加:

○ 疲劳部分——走行装置和驱动装置。日本东北新干线把最高速度提高到 240 km/h 时,进行了约 30 万 km 的疲劳耐久试验,试验结束后进行解体检查,没有发现特别的问题。

○ 摩耗部分——车轮的轮缘、受电弓的滑板、车轮轴承、主电机整流器的轴承、机械制动装置等。在东北新干线中,随着提高速度,受电弓滑板的摩耗也增加(其中有因减少受电弓数量带来的影响)。为了更好地跟踪接触网,采取了扩大受电弓滑板宽度的办法,同时开发新材料。提高通过曲线的速度后轮缘的磨耗也会增加。采用圆弧形轮踏面和使用轴箱支撑刚度最优化等,可以提高通过曲线的性能,合理确定超高、曲线轨距加宽量等,也能一定程度地缓解磨耗问题。

控制地面设备的维修养护费用

提高速度以后,增加了对轨道的破坏,破坏增加量可以用下列公式来表示:

$$\Delta' = \alpha \left\{ \left(\frac{K'}{K} \right) \cdot \left(\frac{M'}{M} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{v'}{v} \right)^{n_2} \right\} \Delta + (1 - \alpha) \Delta$$

式中: Δ 为轨道破坏量; M 为列车质量(t); α 为提高速度的列车占全部列车的比例; K 为车辆系数, $K = 1/(1 + \phi \times \varepsilon)$ 其中, ϕ 是车辆弹簧特性决定的系数,电车一般取 0.9, $\varepsilon =$ 簧上质量/簧下质量; v 为列车速度区间平均 (km/h); n_1 、 n_2 为幂指数。角标“'”表示提高速度后的状态。

例:485 系列车以 $v = 120$ km/h 运行($M = 46$ t 每轴簧下质量 1.6 t 车辆系数 $K = 0.154$) 和轻量化的新特快列车以 $v = 160$ km/h 运行($M = 40$ t, 每轴簧下质量 1.0 t, $K = 0.110$), 假设在 $\alpha = 1$ (全部列车都提高速度) 平均速度和最高速度成比例, $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 2$ 的条件下, 求两种车辆对轨道破坏量的增加率。

$$\text{解:} \quad \frac{\Delta'}{\Delta} = \left(\frac{0.110}{0.154} \right) \times \left(\frac{40}{46} \right) \times \left(\frac{160}{120} \right)^2 = 1.10$$

即速度提高 1.33 倍,若其他条件全部不变(前两项均为 1),则轨道破坏增加 1.78 倍,采取了轻量化等措施,可将轨道破坏控制为 1.1 倍。当然,实际上不提高速度的列车占多数时,这个倍数还会更小。

在轨道方面,改善轨道的薄弱环节,有效地管理轨道不平顺状态,可以有效地降低维修养护费用。另外,要把接触网和受电弓看作一个系统,来考虑控制其成本增加的对策。

(2) 提高速度时的环境保护

铁路的噪声

铁路噪声有以下几种:车轮在钢轨上转动发出的“转动噪声”;构造物振动时发出的“构造物噪声”;从受电弓和接触网系统传出的“集电系统噪声”;列车运行中冲击空气发生的“车体空力噪声。”

列车速度由 v_1 提高到 v_2 时，噪声水平的增量 ΔL 可用式 $\Delta L = 10 \log(v_2 / v_1)^n$ 表示，式中， n 是由各种噪声源决定的常数，当速度在 200~250 km/h 时，标准点（离开上下行中心线的距离 25 m 距地面高 1.2 m 的点。这里，假定路基面高度为 7~9 m 的高架构造物）的噪声水平与速度的 3~5 次方成正比（即 $n=3\sim 5$ ）。一般，在低速域时转动噪声占支配地位，当速度为 200 km/h，且钢轨状态良好，并对转动噪声采取了措施后，在标准点测得的车体空力噪声几乎与转动噪声相同，速度再高则空力噪声（含受电弓的）急剧增大，如再加上打火花声，则成为高速域中噪声的主要成分。

噪声的对策

大致可分二种：一是降低音源发射功率，另一种是遮挡噪声。日本新干线（包括研究中的）有关对策可参看图 1.10。

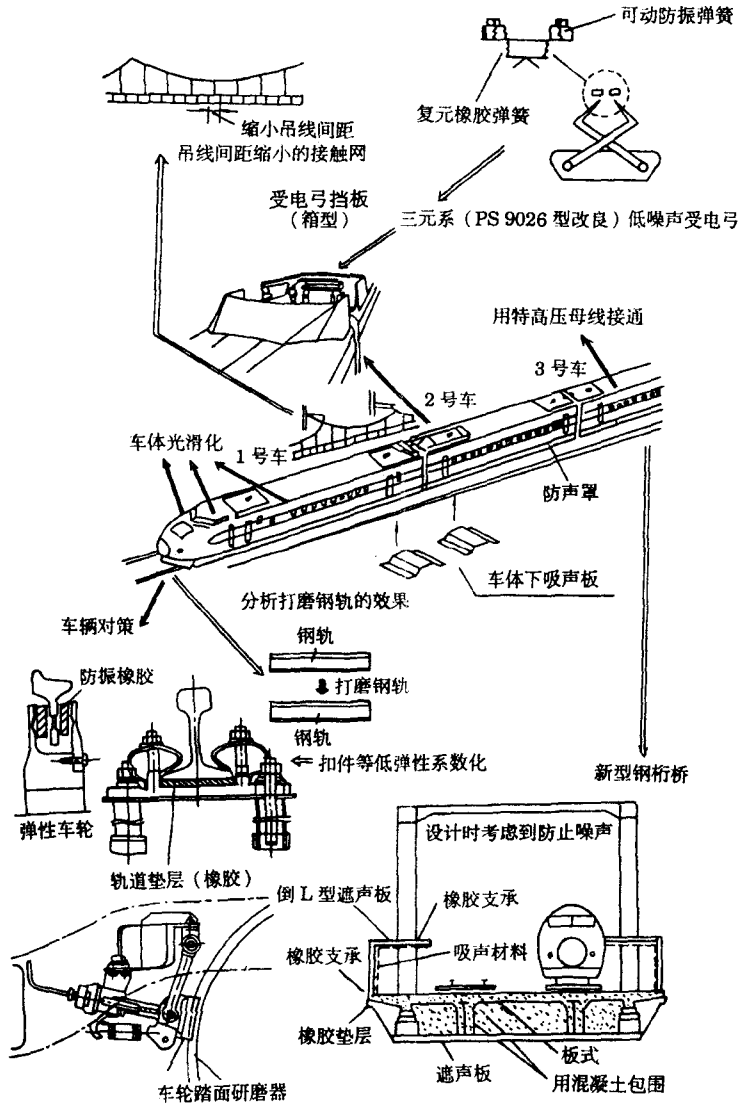


图 1.10 日本新干线噪声对策

隧道微气压波和车内、站台上压力变化的对策

i 隧道微气压波

“隧道微气压波”是被高速冲入隧道的列车压缩的隧道中的空气，以波的形式传到隧道出口处向洞外放射的空气脉冲，大小与到达隧道出口的压力波前侧的坡度成正比。

在较长的板式轨道隧道内传播时，波面前侧是陡立的、高速冲出隧道口后迅速扩散且伴有破裂声(俗称隧道炮)从而引起附近居民的不满。解决办法是在列车进口端设置缓冲墙(如日本山阳新干线等对于 240 km/h 的列车，设缓冲墙长 17 m)，墙的长度应随列车速度提高而增加。另外，对于一定长的缓冲墙，加大隧车比(如用小断面车辆)，也可提高限制速度。

ii 车内压力

过隧道时，作用在列车侧面的压力几乎与列车速度的平方成比例地增加(会车时，侧压力约为单行车时的 2 倍 加大隧车比有助于减少这种压力)为避免这种压力变化侵入车厢内，车体应予密封。日本现用的由吸、排气送风机构成的给压方式的连续换气系统，经 40 s 可使车内、外压力差从 4 kPa 降到 3 kPa。对于更高速(如 300 km/h)日本铁道技术研究报告，提出了如图 1.11 所示的往复换气装置。

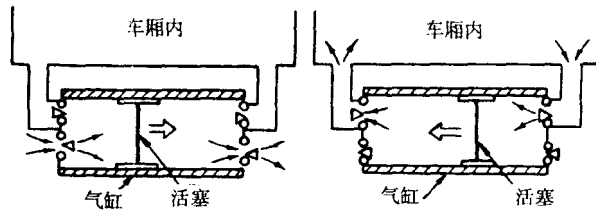


图 1.11 往复式换气装置的原理

iii 站台上的风压

高速通过站台的列车，其头、尾部在站台上产生较大风压，且最大风压(速)多数产生在列车尾部通过时，其风向在列车头部通过时是吹向站台，然后又变成吸进列车侧。其平均风速可表示为：

$$u = v \left\{ 1 - [y / (a \cdot x^m)]^{\frac{1}{n}} \right\}$$
。式中： u 是平均风速 m/s)， v 是列车速度 m/s)；

x 是自列车头部到测点的距离(m)； y 是站台边缘到测点、与线路垂直方向的距离(m)； a 、 m 、 n 是系数，对于日本新干线它们分别是 1.0、0.3、5.0。为了旅客安全，日本新干线在列车直接通过的车站站台侧设置了安全栅栏，只有在旅客上、下车时才打开相应的安全栅栏门。

1.2.2.6 规章制度

在技规、规范、部令等中有许多规定，如牵引计算规程关于制动距离的规定。在考虑提高既有线最高速度时就要考虑修改这项规定，同时还要全面改进行车保安系统。此外，限制速度的规定将随技术水平的提高和列车运行条件的变化而修改，特别是车辆质量(轮重、簧下质量等)和轨道破坏间的研究正在深化，有可能使现行有关速度和轨道结构的规定向着更安全、经济、高速方向修改。

1.2.2.7 舒适度

过去，通过曲线时舒适度标准定为左、右方向状态加速度值不超过规定的允许值。近年出现的陀螺式测定器，可以在车内正确测定车体旋转的角速度。从舒适角度出发，日本取车体旋转角速度的目标值为 5°/s 以下。根据这个标准可以修改有关缓和曲线长度的规定等。

在现行规定中容许的未被平衡的离心加速度，是根据舒适度标准算得的，其中考虑了车辆弹簧的挠度，还留有若干余量。随着技术水平的提高和人们对加速度的感觉随时代共同

变化，这些规定应有进一步修改的余地。

1.2.2.8 环境标准

如果说，达到环境标准已成为提高铁路最高允许速度的最大课题之一，那是一点也不过分的。例如，日本在高速铁路隧道入口处设置缓冲墙等，以缓和高速列车进隧道时，在隧道出口发生的冲击声（俗称隧道炮）。但是，在进一步提高速度时，这仍旧是一个制约因素。

1.2.3 标准轨距铁路的速度限界

1.2.3.1 从粘着性能来考虑速度限界

过去根据随着速度升高轮轨间的粘着力下降和走行阻力上升将达到平衡的观点，一般认为铁路的物理性速度限界是 300 km/h 左右。但是，近年来，世界各国的各项试验说明：在高速域中，粘着系数不会像过去认为的那样下降的说法比较占了上风。如日本铁道技术研究报告（NQ 1202）认为，虽然利用新干线 0 系车辆）的走行阻力和粘着系数的计算式求得在平坦地区平衡点速度为 388 km/h，但因不能确认上述计算式是否适用于这样的高速域，所以这个值只能是大体上的目标。高速域的粘着系数完全有可能比现在利用新干线计算公式引伸求得的高速域的值还要高。因此，均衡速度还可能提高。

2.3.2 从走行平稳性来考虑速度限界

在日本小山试验线进行新干线车辆（100 系）319 km/h 走行试验时，并没有发现蛇行运动的迹象，以计算机仿真计算得发生蛇行运动的临界速度是 640 km/h。在德国，把蠕变控制轴安在试验转向架上，在车辆试验台上试验，即使达到 500 km/h，也能平稳地运行。

根据各国的看法，仅从蛇行运行方面考虑，即使超过 400 km/h，列车也能平稳地运行。

2.3.3 从集电性能看速度限界

列车速度接近接触网的波动传播速度时，接触导线会发生大的波动，从而产生大的离线现象，也会引起接触网和受电弓的破损。因此要千方百计提高接触网的波动传播速度 $C(=\sqrt{T/\rho})$ 。日本专家指出 假如使用铝铁组合的接触导线 使导线密度 ρ 降为原来的 $3/4$ ，张力 T 提高 40% 则日本的波动传播速度会由 20 世纪 80 年代末的 360 km/h 提高约 1.4 倍，达 490 km/h（法国 TGV 巴黎东南线的 $C=440$ km/h）。因此，从集电性能方面考虑，临界速度也可以定在 400 km/h 以上。

1.2.3.4 实用的速度限界

综合粘着性能、走行平稳性、集电性能等方面考虑，标准轨铁路的物理性速度限界为 400 km/h 左右，但是作为实用速度，还必须保留某种程度的余地。例如：考虑集电性能方面（实用最高速度应为 C 值的 70% 以下）运营方面（如 1998 年 2 月 26 日 法国 TGV 是以专门改造过的 7 节列车才在长大下坡道末端达到 380 km/h 的试验记录；日本运输省的统计表明，新干线从 1996 年 4 月 ~ 1999 年 9 月，在隧道压力和飞起道碴作用下，因车厢玻璃破损等事故，虽未伤人，却使列车多次停运、影响全线运行之事时有发生，当从速度快的“希望号”变成较慢的“光号”后，玻璃破损事故数大大下降）及舒适度、经济性等。从欧洲的实例看，当前把实用速度限界定在 350 km/h 范围内较为适宜。