

# 第1篇

## 综 述

---



## 铁路机械发展历程和现状

铁路是用于火车等交通工具行驶的轨道线路。我国的铁路按照线路设计速度的标准,分为高速铁路(250 km/h 以上)、快速铁路(200 km/h 左右)和普通铁路(160 km/h 以内);按照运输对象,分为客运专线铁路、货运专线铁路和客货共线铁路。

1825年,英国达林顿(Darlington)到斯托克顿(Stockton)间的世界上第一条铁路成功通车,宣告了世界铁路运输时代的到来。

世界铁路的发展可分为4个时期。

(1) 萌芽期(1825—1900年): 欧美各国率先开始兴建铁路,1830年,美国修建了第一条铁路;1832年,法国修建了第一条铁路;1835年,德国修建了第一条铁路,并于1879年修建了世界上第一条电气化铁路。

(2) 蓬勃发展期(1900—1945年): 铁路规模和技术有了快速发展,40多年间,全世界修建的铁路总长度达到约126万 km。1903年,德国研制了第一台电力机车;1920年,美国开始修建重载铁路;1925年,美国研制了第一台内燃机车。内燃机车和电力机车逐渐代替蒸汽机车。

(3) 衰退期(1946—1964年): 随着公路运输和航空运输的发展,公路运输短距离运输的方便和航空运输长距离运输的快速等优势日益凸显,铁路运输客货比重不断下降,逐渐出现萧条景象,以美国为首的欧美国家纷纷开始

拆除一些标准低、运量小、盲目建设的铁路,仅美国就减少了20余万 km 铁路。

(4) 复苏期(1964年至今): 随着客货运输需求的变化,以及高速铁路技术、信息技术等各种新技术的采用,铁路的经济效益有了新的提高,世界各国铁路建设又掀起新的高潮,并呈现出“客运快速化、货运重载化、管理集成化和信息化”的发展趋势。1964年,日本东海道新干线时速210 km 铁路建成通车,成为世界上第一条高速铁路;1965年以后,铁路重载运输开始取得实质性进展,其中,1967年,美国重载线路的牵引总质量达到2万多吨。

我国是继日本及印度之后第三个修建铁路的亚洲国家,以1875年吴淞铁路为开端,已经有近150年的历史。我国铁路的发展经历了两个时期,即清朝和中华民国时期、新中国时期。清朝和中华民国时期,我国铁路发展缓慢,1905年才刚刚迈出自主设计施工的第一步,修建了京张铁路。京张铁路由铁路工程专家詹天佑主持设计建造,创造性地运用了“人”字形铁路,使火车能在山区陡坡运行,成为我国铁路建设的里程碑;1937年,在我国铁路修建史上,又一里程碑工程——钱塘江大桥建成,它是我国自行设计、建造的第一座双层铁路、公路两用桥。新中国时期,我国铁路有了高速发展。1950年年初,为了解决西南地区铁路空白的问题,我国建设了成都到重庆的成渝

铁路,1950年6月开始施工,1952年6月建成通车,成为新中国成立后修建的第一条铁路;1958年,我国第一条电气化铁路——宝成铁路建成通车;1992年,我国第一条开行重载单元列车的双线电气化铁路——大秦铁路建成通车;2008年,我国第一条时速超过300 km的高速铁路——京津城际铁路通车;2012年,世界运营里程最长的高速铁路——京广高铁全线通车;2017年,世界高铁商业运营速度最快的京沪高铁“复兴号”实现时速350 km。截至2020年年底,全国铁路运营里程达14.6万 km,其中高铁近3.8万 km,铁路建设取得历史性成就,在社会发展中发挥了重要的支撑作用。

19世纪30年代,铁路建设初期,施工以人力为主;19世纪70年代,随着铁路的快速发展,工程机械开始进入铁路施工;20世纪50年代,我国铁路施工中使用的机械大部分从国外进口,国内仅能生产简易的小型工程机械;20世纪60年代,国内开始加大研制铁路施工机械,运用液压技术生产出了液压履带式挖掘机、液压式装载机等;20世纪80年代,我国不断加强工程机械技术的引进和消化,铁路施工机械数量和种类增多,施工机械开始逐渐综合配套使用;21世纪以后,铁路施工机械逐渐由机械化、自动化向信息化、智能化发展。

铁路建设工程主要分为路基工程、桥梁工程、隧道工程、轨道工程和电气化工程等。铁路机械是指用于铁路施工的工程机械,根据铁路建设工程分类,可分为路基施工机械、桥涵施工机械、隧道施工机械、轨道施工机械和电气化施工机械;根据在铁路施工中的用途,可分为专用施工机械和通用施工机械。

## 1.1 路基施工机械

路基施工机械是针对路基本体、路基排水设施和路基防护及加固建筑物等作业对象使用的施工机械,主要采用的是土石方施工机械和运输车辆等。

19世纪后期,伴随着世界铁路的大规模建

设,蒸汽挖掘机、蒸汽压路机、拖式平地机在欧美各国广泛应用于铁路路基施工。20世纪初期,美国研制了履带式推土机、电动机驱动的履带式挖掘机和内燃机驱动的压路机等;英国研制了电气驱动的汽车起重机和自行式平地机,在美国大北铁路等施工中得到应用。20世纪50年代,美国、德国、瑞典等相继研制了液压装载机、全液压回转挖掘机和轮胎驱动自行式振动压路机,在加拿大、澳大利亚等铁路施工中得到应用。20世纪90年代以来,伴随着微电子技术和信息技术的发展,欧美各国路基施工机械从提高整机可靠性,转为向增加产品的电子信息技术和智能化程度的方向发展,例如美国、日本等国路基施工机械的计算机管理及诊断系统、远程监控系统等。

20世纪初,我国铁路路基施工以人力施工为主,借助简单的工机具。20世纪50年代,我国铁路路基施工逐渐使用机械作业,在成渝铁路、黎湛铁路、鹰厦铁路等采用了推土机、平地机等机械。20世纪80年代,重载铁路建设对路基密实度的要求较高,施工采用了综合机械化作业,挖掘机、推土机、铲运机、自卸车、压路机等配套联合使用。21世纪初期,高速铁路建设对路基沉降的标准要求提高,常规软基处理的方法已无法满足高速铁路平顺性要求,路基设计采用了桩基加固地基的方式,施工使用了长螺旋钻机、振动沉拔管桩机、打桩机等设备。2015年以来,为进一步解决铁路路基不均匀沉降的问题,路基压实施工使用卫星定位系统技术采集压路机的空间位置信息,并与路基建信息模型(building information modeling, BIM)空间位置进行匹配,以分段、分层的方式将压实信息与模型检测单元对应展示,实现了有针对性的压实作业,行驶轨迹得到追溯与监管,并且实现了多台压路机在同一区段内协同作业。

铁路路基施工已经实现机械的综合配套,挖掘机、装载机、推土机等机械采用了网络技术、信息技术及智能化技术等,实现了故障诊断、远程遥控、无人驾驶等作业。路基施工机械如图1-1~图1-3所示。



蒸汽挖掘机

运输车 and 装载机

平地机



推土机



蒸汽压路机

图 1-1 20 世纪路基施工机械示例



钻机

挖掘机

自卸车

推土机

平地机

碎石摊铺机

压路机

强夯机

图 1-2 路基施工综合配套机械示例

MG-A1 GNSS天线 MC-R3接收机控制盒 TS-1转角传感器



GX-60显示控制器

智能挖掘机



定位定向天线

TJ2210北斗终端

压实度采集仪

压实度传感器

智能压路机

图 1-3 典型智能路基施工机械示例

## 1.2 桥涵施工机械

铁路桥涵施工机械是针对桥梁和涵洞等作业对象使用的施工机械,其中桥梁施工机械主要指基础、墩台、制梁及架梁等的施工机械,涵洞施工机械主要是挖掘机、推土机、装载机 etc 等通用机械。

19 世纪 40 年代,铁路桥梁施工开始采用机械作业。1845 年,英国研制了蒸汽打桩机,用于铁路桥梁基础施工。19 世纪 80 年代,桥梁开始采用悬臂施工,英国研制了杆件悬拼吊机,用于福思湾铁路桥梁施工。20 世纪 50 年,桥梁施工开始采用现场浇筑技术,欧洲研制了移动模架造桥机,在阿尔卑斯山区修建铁路桥梁中得到应用。20 世纪 80 年代后期,铁路桥梁梁体开始采用 32 m 预制箱梁,针对梁体的运输和架设,意大利先后研制了 900 t 级的架桥机和运梁车,在罗马至佛罗伦萨高速铁路桥梁中得到应用。

我国铁路桥梁施工从 19 世纪 90 年代开始逐步使用机械作业。随着铁路桥梁设计、施工等技术的发展,桥梁施工机械也有针对性地得到了研究和发展。

**基础施工机械。**我国铁路桥梁基础早期以沉入桩为主,采用的机械是打桩机;1934 年,研制了 140 t 的打桩船,用于浙赣铁路钱塘江桥施工。20 世纪 60 年代,钻孔灌注桩出现,由于其工艺和设备比较简单,在我国得到迅速推广。1993 年,研制了钻孔直径为 2.5 m、钻孔深度为 50 m 的反循环旋转钻机,用于北京至九龙铁路九江长江大桥基础施工;1999 年,研制了适应于高原施工的旋挖钻机,用于青藏铁路桥梁基础施工;2009 年,研制了钻孔直径为 4 m 的全液压力头钻机,用于武广线武汉天兴洲长江大桥施工。

**墩台施工机械。**1949 年以前,我国铁路多在平原或丘陵地区修建,一般桥墩高度多在 10~30 m,30 m 以上的高墩极少,一般采用固定式模板施工;20 世纪 60 年代,空心桥墩出现,1966 年研制了滑升钢模板,在成昆线安宁河 3 号桥空心墩施工中得到成功应用;随着高

桥墩的发展,20 世纪 80 年代后期,研制了爬升模板;20 世纪 90 年代初,研制了翻升模板;2001 年,研制了液压提升平台翻模,在内昆线花土坡大桥 110 m 圆端形空心墩施工中得到成功应用。

**梁体施工机械。**1953 年,我国研制了 65 t 的悬臂梁式架桥机,用于集宁至二连浩特铁路桥梁架设;1966 年,研制了简支梁式 66 型架桥机,用于成都至昆明铁路桥梁架设。1992 年,研制了用于跨度 32~56 m 梁的移动模架造桥机,并于 1993 年投入灵武支线杨家滩黄河特大桥施工。1993 年,研制了起重质量为 300 t 的架桥机,用于北京至九龙铁路九江长江大桥施工。1999 年,针对 24 m/600 t 级箱梁架设,研制了整套起重、运输、架设设备,有 450 t 轮轨式提梁机、16 轴线 64 轮的轮轨式运梁车、24 m/600 t 导梁式定点起吊架桥机,用于秦沈客运专线施工。2002 年,为了满足先架梁后铺轨工法的作业要求,研发了轮胎式运梁车。2003 年,引进了意大利 Nicola 等公司 900 t 级 16~17 轴线运梁车,用于铁路 32 m/900 t 预应力钢筋混凝土箱梁的运输。2006 年,针对 32 m/900 t 级箱梁架设,研发了 900 t 步履式架桥机,该架桥机在合宁客运专线襄滁河特大桥实现了我国铁路客运专线 900 t 箱梁的首架,并在北京至滨海、武汉至合肥、北京至广州、哈尔滨至大连、北京至上海等后续建设的高铁工程中得到应用。随后又在 900 t 步履式架桥机的基础上研发出 900 t 全轮胎走行的架桥机。同时,为适应较小曲线架梁,研发了一系列 900 t 导梁式架桥机,用于武广、京沪线施工。2012 年,研制了 900 t 复合导梁多支腿过隧架桥机和 900 t 低位过隧运梁车。其中,900 t 复合导梁多支腿过隧架桥机解决了隧道口架梁的问题,900 t 低位过隧运梁车解决了驮运梁片过隧道、驮运架桥机过隧转场的问题;两者相配合,还可以实现隧道口零距离及负距离架梁。该运架设备先后用于沪昆线、京福线、桂广线、成贵线和郑万线等铁路桥梁施工。2014 年,研发了 900 t 隧道内外通用箱梁架桥机和隧道内箱梁运梁车。该架桥机适用于铁

路客运专线双线整孔混凝土箱梁的架设,包含进出隧道口、隧道内外工况箱梁的架设,并可实现隧道内外一致的架梁作业;该运梁车可作为架桥机架梁后支承和降低驮梁高度,配合架桥机满足隧道口、隧道内架梁要求,能够满足250~350 km高速铁路多种规格梁型、20~32 m梁的运输。该运架设备用于郑徐线、皖赣线等铁路桥梁施工。2019年,为了满足40 m箱梁的施工,研发了1000 t搬梁机、提梁机、运架分体设备(运梁车、架桥机)及运架一体机,并使用了基于“设备管理云平台”的架桥机安全监控管理系统,通过设置高度、压力、水平等

系列传感器,可以通过手机实时监控各处吊点质量、小车走行距离、起升高度及水平姿态等参数,实现实时监控和管理,用于福厦铁路沿海地区高速铁路跨海大桥施工。

铁路桥梁的施工实现了机械化作业,基础施工机械采用钻机、混凝土施工机械、钢筋施工机械等,桥墩施工采用塔式起重机、客货电梯及模板等,梁体施工采用搬梁机、运梁车、架桥机、移动模架等。同时,微电子技术、信息技术、人工智能技术等也在桥涵施工机械中得到应用,使桥梁施工质量、安全更有保障。桥涵施工机械如图1-4~图1-7所示。



20世纪50年代悬臂式架桥机



20世纪60年代筒支梁式架桥机

图 1-4 20世纪中期桥涵主要施工机械示例



24 m/600 t架桥机



24 m/600 t运梁车

图 1-5 2000年典型的桥涵施工机械示例



打桩机



钻机



爬模



翻模



塔式起重机



臂架式混凝土泵车



施工升降机



箱梁模板



32 m/900 t导梁式架桥机

图 1-6 桥梁主要施工机械示例



32 m/900 t箱梁架桥机



32 m/900 t箱梁运梁车



32 m/900 t箱梁运架一体机



32 m/180 t T型梁架桥机



桥面吊机



箱梁阶段拼装造桥机



下行式移动模架造桥机



挂篮

图 1-6 (续)



40 m/1000 t箱梁搬梁机



500 t提梁机



40 m/1000 t箱梁运架一体机



40 m/1000 t箱梁架桥机和运梁车

图 1-7 最新典型桥梁施工机械示例

### 1.3 隧道施工机械

隧道施工机械是针对隧道的洞身衬砌、洞门、明洞及附属构造物等作业对象使用的施工机械,有钻爆法施工机械和掘进机法施工机械等。钻爆法施工机械主要有凿岩机械、装砵与出砵机械、衬砌机械等;掘进机法施工机械主要有全断面硬岩隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)、盾构机等,配套机械有有轨内燃机车、无轨胶轮车等。

19世纪20—50年代,欧美国家修建隧道主要采用人工凿孔和爆破施工方法。

钻爆法施工机械从19世纪60年代在欧洲铁路隧道施工中开始应用。1861年修建穿越阿尔卑斯山脉的仙尼斯峰铁路隧道时,采用风

动凿岩机替代人工凿孔。20世纪50年代,欧洲研制了液压机械臂的凿岩钻车,美国研制了湿式混凝土喷射机。21世纪以来,欧洲隧道施工机械逐渐向机械化、自动化综合作业发展。我国铁路隧道施工从20世纪50年代开始采用钻爆法施工机械作业,以宝成铁路秦岭隧道施工为代表,使用了风动凿岩机和轨行式矿车,标志着隧道施工从“人力开挖”走向“半机械开挖”;60年代中期,我国采用了以轻型机具为主的小型机械化施工和有轨运输,修建速度达到了单线每月“百米成洞”的水平,以成昆铁路的关村坝隧道和沙马拉达隧道为代表;80年代初期,铁路隧道施工开始应用液压凿岩台车、衬砌钢模板台车和无轨运输机械等,并实行全断面开挖,创造了单月成洞双线100 m的成绩,以大瑶山隧道为代表。21世纪以后,针

对超前支护、钻爆开挖、初期支护、二次衬砌等施工作业场景进行了更加深入的研究,钻爆法施工机械形成了综合作业配套机械,并逐步采用了智能化技术。

19世纪20年代掘进机法施工机械在欧洲出现。1825年,英国研制出了盾构机,但直到1946年盾构机才开始用于铁路施工,应用于法意之间穿越阿尔卑斯山的隧道。1946年,英国研制出了TBM,计划应用于一条连接法国和意大利的铁路,由于资金链断裂,未能经过实践检验。1952年,美国研制出了软岩TBM,又在1953年研制出了硬岩TBM。1987年,TBM用于英吉利海峡铁路隧道施工。1999年,TBM用于瑞士戈特哈德铁路隧道施工。之后,TBM在世界铁路隧道施工中得到了广泛应用。

我国于20世纪90年代开始研究掘进机法铁路隧道施工。1996年,我国引进了两台德国敞开式TBM,用于18.45 km的西康铁路秦岭隧道施工,之后这两台TBM于2001年用于西合铁路桃花铺1号隧道和磨沟岭隧道施工,于2007年用于南疆铁路吐库二线的中天山隧道施工。2007年,我国开始部署项目支持TBM设计施工中的基础科学问题研究。2008年,我国引进美国TBM,用于28.236 km的兰渝铁路西秦岭隧道施工。2017年,我国研制出了敞开式TBM,用于34.538 km的大瑞铁路高黎贡山隧道施工。2021年,我国研制出了用于高原高寒铁路的大直径TBM,该TBM采用了加强型刀盘和主轴承设计,能够满足TBM在极端条件下的长距离掘进;安装了集成岩爆检测系统,能够

对隧道进行24 h不间断监测;建设了智能建造中心,能够进行地面远程操控、智能掘进、故障自诊断、环境健康监测等,在川藏线得到成功应用。21世纪初期,我国铁路隧道开始采用盾构机施工。2006年,我国采用德国直径13.17 m的气垫加压复合式泥水平衡盾构机用于广深港高速铁路狮子洋隧道施工,填补了国内盾构隧道在洞内探测、加固地层、穿越水下及溶洞区施工领域的技术空白。2008年,盾构机国产化被纳入国家“863计划”。2012年,我国研制了直径为9.34 m的土压平衡盾构机,应用于长株潭城际铁路湘江隧道施工;2016年,研制了直径为10.8 m的泥水平衡盾构机,应用于京沈客运专线的望京隧道,同年,研制了马蹄形土压平衡盾构机,应用于蒙华铁路白城隧道。随着传感技术、控制技术和信息化技术的发展,盾构机应用了全过程可视化监控平台,实现了盾构机掘进过程中的数字化模拟、盾构机施工引起的地层及邻近建筑物或构筑物沉降实时预测预报技术、盾构机隧道施工全过程的可视化动态管理技术,以京张高速铁路清华园隧道盾构机为代表。2021年,深江铁路珠江口隧道、渝黔铁路长江隧道、广湛高铁湛江湾海底隧道、成自铁路锦绣隧道相继使用盾构机施工,我国盾构机在铁路施工中迎来蓬勃发展。

目前,隧道施工实现了机械化配套,并对部分机械进行了智能化改造,如智能衬砌台车、掘进机的智能掘进等,以实现隧道施工的安全、快速、高质量。隧道施工机械如图1-8、图1-9所示。



图 1-8 钻爆法主要施工机械示例



图 1-9 掘进机法主要施工机械示例

## 1.4 轨道施工机械

轨道施工机械是针对铁路线路的道床、轨枕、钢轨、道岔等作业对象进行施工和养护的机械，有无砟轨道施工机械和有砟轨道施工机械之分。

无砟轨道施工机械是对无砟道床、轨枕、钢轨和道岔等进行施工的机械。道床施工机械由轨道板生产线及铺设机械组成。其中：轨道板生产线采用轨道板模板、预应力张拉设备、翻转机、数控磨床、平板运输车等机械；轨道板铺设机械有铺板龙门起重安装机、悬臂式龙门起重安装机、轨道板运输车、水泥乳化沥青砂浆搅拌车等。轨枕施工机械由双块式轨枕生产线及铺设机械组成。其中：轨枕生产线采用轨枕模具、布料机等机械；轨枕铺设机械有散枕器、模板安装机等。钢轨施工机械用于钢轨铺运、钢轨焊接、钢轨精调整理及打磨、轨道检测等。其中：钢轨铺运机械有铺运轨车；钢轨焊接设备有移动式闪光焊轨车、铝热焊接机具、焊轨作业车、热处理作业车、外形精整作业车等；钢轨精调整理及打磨机械有打磨列车、钢轨打磨机、起拨道机等；轨道检测机械有轨道检测车。道岔施工机械有道岔组装平台、

起拨道机、铝热焊接机具等。

有砟轨道施工机械是对有砟道床、轨枕、钢轨和道岔等进行施工的机械。道床施工机械用于道砟生产、铺砟、上砟整道、道砟清筛等作业。其中：道砟生产采用碎石生产线，主要使用给料机、破碎机、振动筛等机械；铺砟机械有推土机、装载机、压路机等；轨道铺运机械有铺轨机组、换轨车等；上砟整道机械有捣固车、配砟整形车、动力稳定车等；道砟清筛机械有全断面道砟清筛车。有砟轨枕施工机械由轨枕生产线及铺设机械组成。其中：轨枕生产线采用轨枕模具、混凝土生产机械等；轨枕铺设机械有散枕机，轨枕铺设采用铺轨机组铺设。钢轨施工机械用于钢轨铺运、钢轨焊接、钢轨精调整理及打磨、轨道检测等。其中：钢轨铺运机械有单枕铺轨机组、群枕铺轨机组等；钢轨焊接机械、钢轨精调整理及打磨机械、轨道检测机械与无砟轨道相关施工机械基本一致。道岔施工机械有道岔铺轨机、道岔捣固车、铝热焊接设备、道岔打磨车等。

19世纪50年代，有砟轨道施工开始使用机械，道床施工机械有生产道砟的破碎机、铺砟的推土机和压路机等；轨枕是木枕，钢轨是短钢轨，线路通过夹板连接，轨枕和钢轨的施工以人力为主。20世纪初至60年代中期，随着有砟轨