

第二十四篇 电气牵引技术

主编 于凤举

执笔 于凤举 赵永安 程泓生

俞尔令 曹东白 周斯祜

审核 王 祯 于凤举 赵景懃

辛成山

目 录

第109章 概述

- 109.1 国内外铁路运输事业的
现状及发展趋势24-3
- 109.2 铁路电气化24-3
- 109.3 电传动机车的分类24-5

第110章 牵引计算

- 110.1 列车运动方程式24-7
- 110.2 列车阻力24-8
- 110.3 粘着力和粘着系数.....24-10
- 110.4 机车牵引力.....24-10
- 110.5 制动及制动力.....24-11
- 110.6 能耗计算.....24-12

第111章 交-直流电力机车

- 111.1 国内外交-直流电力机
车发展的现状及趋势.....24-14
- 111.2 交-直流电力机车的
速度调节.....24-18
- 111.3 交-直流电力机车的
电气制动.....24-29
- 111.4 脉流牵引电动机.....24-39
- 111.5 牵引变压器.....24-47
- 111.6 辅助系统.....24-47
- 111.7 机车保护系统.....24-48

第112章 交-直流电力传动内燃机车

- 112.1 国内外交-直流电力传
动内燃机车发展现状及
趋势.....24-49
- 112.2 电力传动内燃机车的
典型主电路.....24-50
- 112.3 电力传动内燃机车的
恒功率调节.....24-50
- 112.4 速度调节及牵引特性.....24-52
- 112.5 电阻制动及电阻制动
特性.....24-58

- 112.6 主发电机.....24-59
- 112.7 牵引电动机.....24-61
- 112.8 其它电机.....24-61
- 112.9 牵引电器.....24-70
- 112.10 机车水阻试验及试
运行.....24-70
- 112.11 机车的检修24-74

第113章 变频调速交流传动机车

- 113.1 变频调速交流传动机
车的基本概念.....24-75
- 113.2 变频调速交流传动机
车的变流器.....24-76
- 113.3 变频调速交流传动机
车的牵引电动机.....24-82
- 113.4 国外变频调速交流传
动机车.....24-84

第114章 直-直流及其它电牵引车

- 114.1 概述.....24-84
- 114.2 工矿直流电机车.....24-84
- 114.3 城市交通电牵引.....24-88
- 114.4 蓄电池运输车及叉车.....24-91
- 114.5 内燃电动轮自卸车和
内燃电动车组.....24-91
- 114.6 城市新电车(导轨电车).....24-91
- 114.7 直线电机和磁悬浮电
车.....24-91

第115章 电力牵引供电系统

- 115.1 电气化铁道牵引供电
系统.....24-94
- 115.2 电气参数计算.....24-97
- 115.3 牵引变电所、分区所、
开闭所、AT 所.....24-103
- 115.4 接触网24-106

参考文献

第二十四篇 电气牵引技术

主编 于凤举

执笔 于凤举 赵永安 程泓生

俞尔令 曹东白 周斯祜

审核 王 祯 于凤举 赵景懃

辛成山

目 录

第109章 概述

- 109.1 国内外铁路运输事业的
现状及发展趋势24-3
- 109.2 铁路电气化24-3
- 109.3 电传动机车的分类24-5

第110章 牵引计算

- 110.1 列车运动方程式24-7
- 110.2 列车阻力24-8
- 110.3 粘着力和粘着系数.....24-10
- 110.4 机车牵引力.....24-10
- 110.5 制动及制动力.....24-11
- 110.6 能耗计算.....24-12

第111章 交-直流电力机车

- 111.1 国内外交-直流电力机
车发展的现状及趋势.....24-14
- 111.2 交-直流电力机车的
速度调节.....24-18
- 111.3 交-直流电力机车的
电气制动.....24-29
- 111.4 脉流牵引电动机.....24-39
- 111.5 牵引变压器.....24-47
- 111.6 辅助系统.....24-47
- 111.7 机车保护系统.....24-48

第112章 交-直流电力传动内燃机车

- 112.1 国内外交-直流电力传
动内燃机车发展现状及
趋势.....24-49
- 112.2 电力传动内燃机车的
典型主电路.....24-50
- 112.3 电力传动内燃机车的
恒功率调节.....24-50
- 112.4 速度调节及牵引特性.....24-52
- 112.5 电阻制动及电阻制动
特性.....24-58

- 112.6 主发电机.....24-59
- 112.7 牵引电动机.....24-61
- 112.8 其它电机.....24-61
- 112.9 牵引电器.....24-70
- 112.10 机车水阻试验及试
运行.....24-70
- 112.11 机车的检修24-74

第113章 变频调速交流传动机车

- 113.1 变频调速交流传动机
车的基本概念.....24-75
- 113.2 变频调速交流传动机
车的变流器.....24-76
- 113.3 变频调速交流传动机
车的牵引电动机.....24-82
- 113.4 国外变频调速交流传
动机车.....24-84

第114章 直-直流及其它电牵引车

- 114.1 概述.....24-84
- 114.2 工矿直流电机车.....24-84
- 114.3 城市交通电牵引.....24-88
- 114.4 蓄电池运输车及叉车.....24-91
- 114.5 内燃电动轮自卸车和
内燃电动车组.....24-91
- 114.6 城市新电车(导轨电车).....24-91
- 114.7 直线电机和磁悬浮电
车.....24-91

第115章 电力牵引供电系统

- 115.1 电气化铁道牵引供电
系统.....24-94
- 115.2 电气参数计算.....24-97
- 115.3 牵引变电所、分区所、
开闭所、AT 所.....24-103
- 115.4 接触网24-106

参考文献

第109章 概述

109.1 国内外铁路运输事业的现状和发展趋势

交通运输是世界各国国民经济的大动脉,它包括铁路、公路、水路、航空、管道五种运输方式。

铁路运输是由钢质车轮在钢轨上转动运行,它的阻力小,耗能小,各种运输方式的能耗比见表109-1。

表 109-1 各种运输方式能耗比

项目 能耗比	国 别	铁 路	内 河	沿 海	公 路	管 道	航 空
货 运 (万吨公里)	中国	1	1.85	1.35	1.42		
	原苏联	1	1.2		1.65	0.6	
客 运	各国	1			1.5~2.1		7.8~10

可见,除管道运输受被运物资限制外,以铁路运输为最经济。例如,美国以航空、汽车运输为主,运输业能耗占全国总能耗27%以上,原苏联运输网以铁路为骨干,完成客货周转量为美国的1.22倍,而能耗仅为美国的一半;我国则应以铁路运输为主。

铁路与同等运能的高速公路占用土地比为1:2.5左右,而且火车比同等运量汽车排放废气少得多,不会严重污染环境。铁路运载工具的横向移动受钢轨所限制,只需考虑前后方向的交通安全即可,所以它操纵简单、安全可靠。这些都决定了铁路是我国的主要运输方式。

1993年我国铁路年货运量11923亿t·km,客运量3616亿人公里,总换算周转量15539亿t·km。客货运量分别占全国总运量的50%和70%。在煤炭、石油、钢铁、矿石等9个重点物资运输中,铁路承担了其国内总运量的58.9%,周转量的72%。当前铁路运能与运量的需求矛盾十分突出,几条主要干线的运能只能满足30%~70%,承担的运量已饱和,客货超载一般都在40%~50%以上,个别车次甚至达100%,每天客运量约270~300万人次,其中70万人只能站票旅行,解决这些矛盾提高运能的主要办法是在重载、高速和增加车流密度等,并尽快实现铁路现代化,即铁路电气化。

109.2 铁路电气化

铁路电气化首先是牵引动力电气化,世界各国已相继由蒸汽机车牵引,改为电力机车或内燃机车牵引。因为电力牵引节省动力费用,牵引力大,速度快,运转操纵容易,维修费用低,实现无烟化,是一种理想的牵引动力。然而铁路电气化的固定设备投资大,通常把运输密度大的繁忙线路优先电气化,其余线路用内燃机车牵引,这样经济合理些。内燃机车也是由液力传动逐渐为比较节油的电传动所取代。表109-2列出电力机车、电传动内燃机车、蒸汽机车牵引性能比较数据,表109-3列出这三种机车的运输经济性比较。我国内燃、电力承担的铁路运量,1982年为25%,到1993年底增加到82.6%。

表 109-2 牵引性能比较

机车类型	重 量 (t)	粘着重量 (t)	功 率 (kW)	加速度 (m/s ²)	最低计算速度 (km/h)	最大计算牵引力 (kN)	单位功率重量 (kg/kW)
韶山3型电力机车	138	138	4350	0.18~0.35	47.2	356.7	31.7
东风4型电传动内燃机车	138	138	2498.2	0.18~0.35	20	302	55.6
前进型蒸汽机车	200	100.5		0.05~0.15	20	238	

表 109-3 运输经济性比较

机车类型	燃料种类	能耗 (10kt·km)	热效率 (%)	机务燃料成本 [元/(10kt·km)]	货物周转量 (10kt·km/年)
韶山1型电力机车	煤、油、水力、核电等	122.1kW·h	28~53	16.49	5601112
东风4型电传动内燃机车	柴油	33.9kg	27~30	36.41	3702090
前进型蒸汽机车	优质煤	104.7kg	8	23.51	1771035

表 109-4 列出世界主要国家的电气化铁路状况, 据1989年7月统计, 我国现有铁路 53000km, 其中已电气化的为 6200 km, 电气化率 11.7%,

大致相当于1976年世界各国的平均水平。至1992年底, 我国已有铁路 54000km, 其中已电气化的为 8739km, 电气化铁路已达总营业路线的16%。

表 109-4 世界主要国家的电气化铁路状况

项 目	国 别	原苏联	日本	德国	意大利	法国	瑞典	瑞士	波兰	南非
1976年统计	总营业里程 (km)	136294	27016		16079		12104		23573	
				23885		34834		5009		22150
	电气化线路 (km)	36134	12678		9632		7521		4700	
				9778		9606		5009		4639
1988年统计	电气化率 (%)	26.5	46.6		59.9		62.1		19.9	
				33.9		27.6		100.0		20.9
	电气化线路 (km)	49300	14011		9974		7277		9452	
				11882		11644		5139		
1988年统计	电气化率 (%)	33.9	55.6		51.2		62.3		36.9	
				38.8		30.9		99.2		
项 目	国 别	印度	英国	西班牙	挪威	奥地利	中国	其它	合 计	
1976年统计	总营业里程 (km)	60149		16167		6492		805.932		
			18227		4256					1217167
	电气化线路 (km)	4160		3648		2450		20224		
			3988		2456					136623
1988年统计	电气化率 (%)	7.0		22.6						
			21.8		57.7			2.5		11.2
	电气化线路 (km)	6466					5738			
1988年统计	电气化率 (%)	10.7								
							10.8			

109.3 电传动机车的分类

电传动机车是通过电力传动的方式,实现能量变换和传递,并以电动机为动力拖动的机车。根据不同的分类方法,可以分成下列不同的种类。

109.3.1 按机车性能用途分类

可以分为铁路干线机车(又分为货运机车和客运机车)、铁路调车机车、工矿机车、地铁电动车组、公共电车、蓄电池机车等等。

109.3.2 按能源供给方式分类

(1) 能源自给式机车 机车所需要的能量由其本身产生,称为自给式机车。如电传动内燃机车及其动车车组,电传动燃气轮机车及其动车车组;蓄电池机车等。

(2) 能源非自给式机车 所需的能量由外部能源供给的机车,称为非自给式机车。如电力机车及其电动车组;地铁电动车组;城市公共电车(包括有轨电车和无轨电车)等。

109.3.3 按机车电传动装置电源性质及牵引电动机种类分类

所谓机车电传动装置,是指将机车外部输入的能量或者机车本身产生的能量,传递给机车动轮轮对的电能变换和传递的一整套装置。牵引电动机的种类是指直流电动机(包括脉流电动机)、交流电动机(包括异步电动机和同步电动机)。

(1) 直-直流电传动机车 非自给式机车的传动方式是指由直流电网供电,机车采用直流串励牵引电动机,如图109-1所示。由于直流输电没有无功损耗,故传输效率较高,但是改变电压困难,电压又不可能太高,所以只在中小功率等级机车上得到推广应用。如工矿用直流电力机车、地铁电动车组、城市公共电车等。近年来随着变流技术的发展,直流输电得到了新生,直流斩波调压可使直流

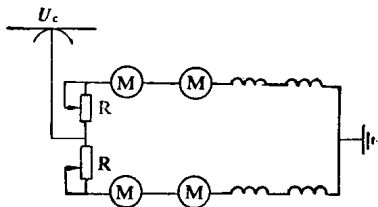


图 109-1 直-直流工矿电力机车电路
传动效率提高,预计这种机车还会得到一定的发展。

对于自给式机车,如我国的东风型、东风2型、东风3型内燃机车,都是由柴油机带动直流发电机,向直流牵引电动机供电,驱动机车,见图109-2。由于直流发电机比交流同步发电机结构复杂、笨重、故障多、发电机容量又受限制,所以这种机车已被逐步淘汰。

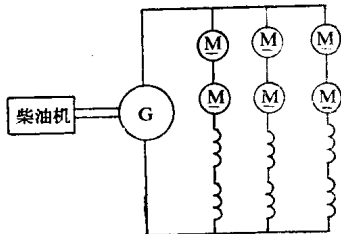


图 109-2 直-直流电传动内燃机车电路

(2) 交-直流电传动机车 这是当前世界上应用最广泛的机车,目前我国的主型机车,无论是电力机车还是内燃机车,都是这种类型。

对于非自给式机车,例如电力机车,从韶山1型到韶山8型(8型正在研制),都采用这种传动方式。它是由单相工频交流25kV高压接触网供电,进入机车后,由牵引变压器降压,整流器将交流电整成直流电,然后经平波电抗器向数台并联直流串励电动机供电,驱动机车,见图109-3。这种机车由于采用单相高压输电,故输电效率高,并且不存在电网电压与牵引电动机电压的互相制约,可以做成大功率。

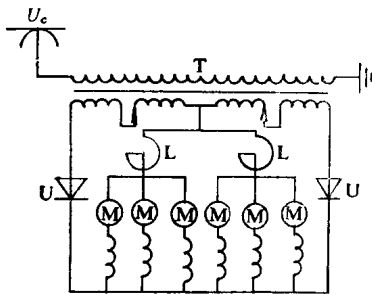


图 109-3 交-直流电力机车电路

对于自给式机车,例如从东风4型到东风11型电传动内燃机车,都是由柴油机驱动一台同步发电机,发出的三相交流电经硅整流器转换成直流电,向数台并联直流串励牵引电动机供电,驱动机车,

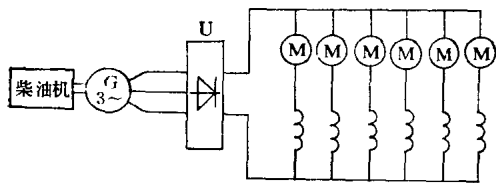


图 109-4 交-直流电传动内燃机车电路

见图 109-4。同步发电机比直流发电机体积小、重量轻，工作可靠，可以在机车有限的空间和重量限制下，做成大功率。

(3) 交-直-交流电传动机车 交流牵引电动机比直流牵引电动机结构简单，运行可靠，体积小，重量轻，造价低，维修方便，在车轮直径受限制的有限空间内，可以制成大功率牵引电动机，即制造更大功率的机车，从而实现高速和重载。近年来由于变频技术的迅速发展，尤其是大功率 GTO 元件的研制成功，用改变供电频率的方法实现交流电机调速，已是可以实现的，所以三相交流牵引电动机传动机车，在全世界已得到迅猛发展，并最终将取代传统的直流牵引电动机传动机车。

在交流电源和交流输出之间，具有直流环节的传动系统，称为交-直-交流电传动机车。

对于非自给式机车，德国的 E120 型、BR120 型电力机车，原苏联的 BJI80A 型电力机车，都是由接触网供单相交流电，经变压器降压后，由四象限变流装置变为直流电，再经中间环节 LC 滤波和储能装置送给逆变器，将直流变换成振幅和频率可调的三相交流电，供给三相异步牵引电动机，驱动机车，如图 109-5 所示。这种机车的功率因数接近于 1，而且可以实现再生制动。

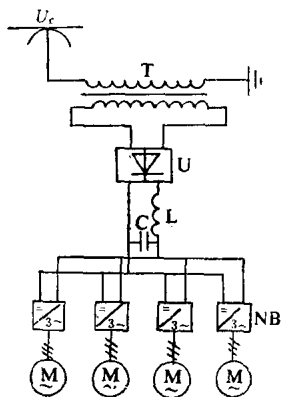


图 109-5 交-直-交流电力机车电路

对于自给式电传动机车，例如德国的 DE2500 型交-直-交流电传动内燃机车，瑞士的 Am6/6 交-直-交流电传动内燃调车机车，都是由同步发电机供交流电，再整流为直流电，经中间环节到逆变器，逆变成交流供异步牵引电动机，驱动机车，如图 109-6 所示。运行实践证明，这种机车节油效果极佳。

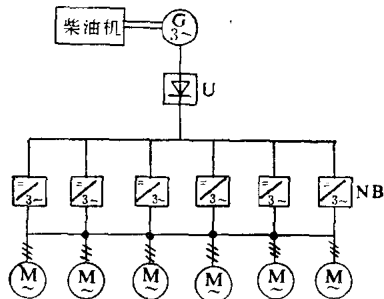


图 109-6 交-直-交流电传动内燃机车电路

(4) 交-交流电传动机车 在交流电源和交流输出之间，没有中间直流环节，直接变为频率可调的三相交流电供给同步或异步牵引电动机的电传动机车，称为交-交流电传动机车。

对于非自给式机车，如原苏联的 BJI80B 型电力机车，BJI83 型电力机车，法国的 BB10004 型电力机车，其电能均是由接触网输入机车牵引变压器降压，由变频器直接变成可变频率的三相交流电，向无换向器的同步型交流牵引电动机定子供电。而电机转子励磁绕组，是由牵引变压器另一付绕组，经整流器或半控桥式整流器整流成直流，通过滑环供电，如图 109-7 所示。这种机车由于用同步牵引电动机，故其结构比异步牵引电动机的复杂，可靠性下降。

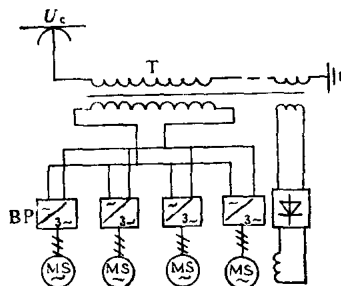


图 109-7 交-交流电力机车电路

对于自给式机车，即交-交流电传动的内燃机车，牵引发电机发出的三相交流电，经过变频装置

后,直接变换成可变频率的三相交流电,向三相交流电动机供电,驱动机车,如图109-8所示。这种机车的输入功率因数较低,且输出的最高频率必须小于输出频率 $1/2$ 或 $1/3$,故不理想。

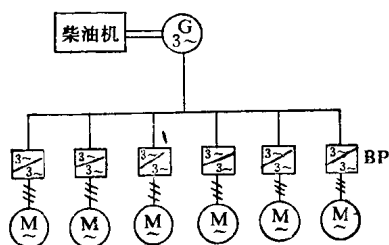


图 109-8 交-交流电传动内燃机车电路

(5) 直-交流电传动机车 这种机车主要是指非自给式的电力机车,如德国的 EDE1000/500 型机车,它由直流电网供电,用直流斩波器调压并保持电压恒定,用逆变器把直流变成可调频的三相交流电,向异步牵引电动机供电,驱动机车,如图109-9所示。这种机车的线路简单、可靠,随着直流供电系统的再兴起,直-交流电力机车是会有生命力的。

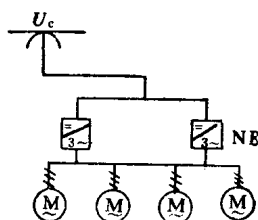


图 109-9 直-交电力机车电路

第110章 牵引计算

通过对不同类型机车,在某设定区间的牵引计算,可以确定该区段的牵引重量、运行速度、最佳运行时间、电能或燃料消耗及绘制运行图等。也可以为新车设计计算机车功率、粘着重量、结构速度等参数提供依据,为计算供电系统提供基础资料等。总之,牵引计算是铁路设计和运营的理论基础。

110.1 列车运动方程式

作用到列车上的外力有三种,牵引力 F 、阻力 W 和制动力 B ,都以 N 为单位。如果机车重量为 P ,牵引重量为 G ,都以 t 为单位,则单位重量的牵引力为

$$f = F / (P + G) \quad (N/t) \quad (110-1)$$

列车单位重量阻力为

$$w = W / (P + G) \quad (N/t) \quad (110-2)$$

列车单位重量制动力为

$$b = B / (P + G) \quad (N/t) \quad (110-3)$$

列车运动方程式是表示作用到列车上的外力与列车速度变化关系的方程式。下面按列车的三种工况进行分析。

110.1.1 牵引工况

根据牛顿力学第二定律,

$$\begin{aligned} F - W &= \frac{1000}{3.6} (P + G) (1 + \gamma) \frac{dV}{dt} \\ &= 277.78 (1 + \gamma) (P + G) \frac{dV}{dt} \quad (N) \end{aligned} \quad (110-4)$$

式中 $\frac{dV}{dt}$ ——列车加速度, $km/(h \cdot s)$;

$1 + \gamma$ ——列车转动部分惯性系数,即列车回转部分质量及列车全部质量 m 之和与 m 之比。它与机车、车辆的类

表 110-1 惯性系数

机车车辆类型	二轴货车		四轴货车		电力机车	客 车	无轨电车	摩托车辆
	空 车	重 车	空 车	重 车				
$1 + \gamma$	1.10~1.12	1.04~1.05	1.07~1.08	1.03~1.04	1.20~1.40	1.04~1.05	1.11	1.10~1.15

型及运行速度有关,一般由试验确定。见表110-1。

公式(110-4)也可表示为

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F - W}{277.78(1+\gamma)(P+G)}$$

$$= \xi(f - w) \quad (\text{km/h} \cdot \text{s}) \quad (110-5)$$

式中 ξ ——加速度系数,其物理意义是1N力作用在1t列车重量上引起的加速度,

$$\xi = 1/277.78(1+\gamma)$$

110.1.2 惰行工况

牵引电机不通电,列车靠惯性前进,叫做惰行工况。此时 $f=0$ 。

根据公式(110-5)

$$\frac{dV}{dt} = -\xi(w_{0d}) \quad (\text{km/h} \cdot \text{s}) \quad (110-6)$$

式中 w_{0d} ——列车惰行的单位基本阻力, (N/t)。

$$w_{0d} = \frac{Pw'_{0d} + Gw''_0}{P+G} \quad (\text{N}) \quad (110-7)$$

式中 w'_{0d} ——机车惰行单位基本阻力, N;

w''_0 ——车辆单位基本阻力, N。

110.1.3 制动工况

$$\frac{dV}{dt} = -\xi(b + w_{0d}) \quad (\text{km/h} \cdot \text{s}) \quad (110-8)$$

式(110-4)~式(110-6)以及式(110-8)就是列车运动方程式,是牵引计算的基础。

110.2 列车阻力

列车在运行时受到阻止列车前进的力称为列车阻力 W ,它一般分为列车基本阻力 W_0 和附加阻力 W_1 ,即

$$W = W_0 + W_1 \quad (\text{N}) \quad (110-9)$$

有时列车总的运动阻力也可以用机车的运动阻力 W' 和列车的运动阻力 W'' 来表示:

$$W = W' + W'' \quad (\text{N}) \quad (110-10)$$

110.2.1 列车运行的基本阻力 W_0 。

列车运行的基本阻力就是列车在平直道上所遇到的阻力,由机车和车辆的运行基本阻力组成,分别表示为 w'_{0d} 和 w''_0 。其产生原因为:

- (1) 轴颈与轴承摩擦产生的阻力;
- (2) 车轮在钢轨上滚动产生的阻力;
- (3) 车轮与钢轨间滑动摩擦产生的阻力;
- (4) 冲击及振动产生的阻力;
- (5) 空气阻力。

列车单位重量运行阻力可用下列一般公式表示:

$$w = \frac{a + bv + cv^2}{P+G} \quad (\text{N/t}) \quad (110-11)$$

式中 v ——机车速度, km/h;

a 、 b 、 c ——常数,对于一定类型机车而言。

我国目前各种电力机车、电传动内燃机车和电动车组牵引运行单位基本阻力 w'_0 及惰行单位基本阻力 w'_{0d} 的计算公式如下。

电力机车:

$$w'_0 = g(1.64 + 0.0140v + 0.000260v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-12)$$

$$w'_{0d} = g(2.25 + 0.0190v + 0.000320v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-13)$$

式中 g ——重力加速度,其值为 9.81 m/s^2 。

电传动内燃机车:

1) 东风及东风3型机车

$$w'_0 = g(2.49 + 0.0053v + 0.000203v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-14)$$

$$w'_{0d} = g(2.93 + 0.0073v + 0.000271v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-15)$$

2) 东风4型(货、客)机车

$$w'_0 = g(1.04 + 0.0162v + 0.000138v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-16)$$

$$w'_{0d} = g(2.28 + 0.0293v + 0.000178v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-17)$$

准轨矿山电力机车:

$$w'_0 = g(2.4 + 0.007P + 0.0013v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-18)$$

$$w'_{0d} = g(5 + 0.007P + 0.0013v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-19)$$

地下铁电动车组:

$$w'_0 = g \left[1.1 + (0.009 + 0.022n) \frac{v^2}{nq} \right] \quad (\text{N/t}) \quad (110-20)$$

$$w'_{0d} = g \left[1.0 + \frac{52}{q} + 0.25v + (0.009 + 0.022n) \frac{v^2}{nq} \right] \quad (\text{N/t}) \quad (110-21)$$

式中 n ——车辆数;

q ——车辆平均重, t。

有轨电车电动车组:

1) 动车单位基本阻力

$$w_0 = g(5 + 0.005v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-22)$$

2) 挂车单位基本阻力

$$w_0 = g(3 + 0.003v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-23)$$

目前我国各种车辆单位基本阻力 w_0'' 计算公式如下:

铁路客车

$$w_0'' = g(1.66 + 0.0075v + 0.000155v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-24)$$

铁路货车

$$\text{空车 } w_0'' = g(1.53 + 0.0244v + 0.000421v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-25)$$

$$\text{重车 } w_0'' = g(1.07 + 0.011v + 0.000236v^2) \quad (\text{N/t}) \quad (110-26)$$

露天矿自翻车:

$$1) \text{ 四轴空车 } w_0'' = g(3 + 0.035v) \quad (\text{N/t}) \quad (110-27)$$

$$2) \text{ 四轴重车 } w_0'' = g(2.9 + 0.026v) \quad (\text{N/t}) \quad (110-28)$$

$$3) \text{ 六轴空车 } w_0'' = g(4.4 + 0.03v) \quad (\text{N/t}) \quad (110-29)$$

$$4) \text{ 六轴重车 } w_0'' = g(3.6 + 0.015v) \quad (\text{N/t}) \quad (110-30)$$

露天窄轨电力机车及车辆运行单位基本阻力 (w_0' 和 w_0'') 数据见表110-2。

110.2.2 附加阻力 w_r

附加阻力包括坡道阻力 w_1 、曲线阻力 w_R 和隧道空气附加阻力 $w_{..}$ 。

(1) 坡道阻力 w_1

表 110-2 运行单位基本阻力

(N/t)

机车、车辆类型			矿 车 容 积 (m³)							电力机车粘着重量 (t)					
			0.75	1.2	2	3.5	4	6	10	1.5	3	7	10	14	20
w_0'' (车辆)	固 定 线	空车	107.9	98.1	88.3	78.5	78.5	63.2	51.0						
		重车	88.3	78.5	68.7	58.9	58.9	49.1	34.3						
	临 时 线	空车	166.8	147.2	137.3	117.7	117.7	98.1	88.3						
		重车	127.5	117.7	107.9	98.1	98.1	68.7	58.9						
w_0' (机车)	固 定 线									117.2	98.1	78.5	68.7	58.9	49.1
	临 时 线									176.6	147.2	117.7	98.1	88.3	68.7

$$W_1 = 1000gG\sin\alpha$$

$$= 1000gGtg\alpha = Ggi \quad (\text{N}) \quad (110-31)$$

式中, $i = 1000tg\alpha$ 称为线路的坡度, 即沿线路水平方向运行 1000m 的距离, 线路标高升高 i 米, 则坡度为 $i\%$ 。那么单位坡道阻力为 (下坡取负值):

$$w_1 = gi \quad (\text{N/t}) \quad (110-32)$$

(2) 曲线阻力 w_R 列车通过曲线时, 比直线所增加的阻力称为曲线阻力, 一般按经验公式计算。当列车长度小于或等于曲线长度时, 单位曲线阻力

$$\text{标准轨: } w_r = \frac{12.2g\alpha^2}{l_r} \quad (\text{N/t})$$

(110-33)

或

$$w_r = \frac{700g}{R} \quad (\text{N/t})$$

(110-34)

$$\text{窄轨: } w_r = \frac{0.35bg}{R} \quad (\text{N/t})$$

(110-35)

式中 l_r ——曲线长度, m;

R ——曲线半径, m;

α ——曲线中心角, 度;

b ——轨距, m。

当列车长度 l_t 大于曲线长度时,

$$w_r' = w_r g \frac{l_r}{l_t} \quad (\text{N/t}) \quad (110-36)$$

(3) 隧道空气附加阻力 $w_{..}$ 当隧道长度大

于 500m 时, 应考虑此阻力, 一般由试验确定, 也可由下列公式粗略取得。

$$w_s = \frac{0.0465 l_s g \left(v - \frac{v}{1 + \sqrt{\frac{1.5 + 0.043(l_s - l_1)}{0.0244 l_1}}} \right)^2}{P + G} \quad (\text{N/t}) \quad (110-37)$$

式中 l_s ——隧道长度, m;

l_1 ——列车长度, m。

(4) 加算附加阻力 w_1 , 机车、车辆的单位加算附加阻力 w_1 为

$$w_1 = w_i + w_r + w_s \quad (\text{N/t}) \quad (110-38)$$

加算附加阻力 w_1 的数值等于坡道的加算坡度 g_1 。

$$w_1 = g_1 = g(i + i_r + i_s) \quad (\text{N/t}) \quad (110-39)$$

限制机车牵引重量的加算上坡度, 称为限制坡度 i_x 。

(5) 起动阻力 w_q , 电力机车、内燃机车单位起动阻力 w_q' 取 49.05N/t。而货车为

$$w_q'' = (3 + 0.4 i_q) \quad (\text{N/t}) \quad (110-40)$$

式中 i_q ——起动地段的加算坡度。

当货车单位起动阻力的计算结果小于 49.05N/t 时, 按 49.05N/t 计算。

对于标准轨矿山机车车辆单位起动阻力,

$$\text{滑动轴承: } w_q = \frac{142g}{7+q} \quad (\text{N/t}), \quad (110-41)$$

$$\text{滚动轴承: } w_q = c g \frac{28}{7+q} \quad (\text{N/t}) \quad (110-42)$$

式中 q ——每轴荷重, t;

c ——计算系数。当车辆数为: 1, 2, 3, 4,

5, 6 和 ≥ 7 时, 相应取 1.8, 1.6, 1.4,

1.3, 1.2, 1.1 和 1.0。

对于窄轨矿山机车车辆,

$$w_q = 0.5 w_q'' \quad (\text{N/t}) \quad (110-43)$$

110.3 粘着力和粘着系数

当外力作用到物体上时, 用来平衡外力的弹性变形力及分子作用力之和称为非全静摩擦力, 它随外力的增大而增大, 而且有一个极限值, 超过此值, 静摩擦破坏而进入滑动阶段。在机车运行中, 阻止动轮与钢轨不能相对滑动而只有弹性位移的非全静摩擦力, 称为粘着力。

弹性位移达到极限值时的非全静摩擦力称为极限粘着力或最大粘着力。机车动轮所能实现的牵引力不能大于动轮与钢轨的极限粘着力。

粘着力与动轮对钢轨的正压力成正比, 最大粘着力 F_μ (N) 与机车粘着重量 P_μ (t) 之比, 称为粘着系数 μ_1 。此最大粘着力 F_μ 就是机车粘着牵引力。

$$\mu_1 = \frac{F_\mu}{1000 g P_\mu} \quad (110-44)$$

影响粘着系数的主要因素有机车的速度和接触面的材料及状态, 轨面上撒砂就是增大粘着系数的方法。实用中是通过实验测出各种机车在不同速度下的粘着平均曲线, 然后用公式表示。我国电力机车的计算粘着系数

$$\mu_1 = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (110-45)$$

我国电传动内燃机车的计算粘着系数

$$\mu_1 = 0.25 + \frac{8}{100 + 20v} \quad (110-46)$$

机车在曲线半径 R 小于 600m 的线路上运行时, 曲线上的计算粘着系数

$$\mu_r = \mu_1 (0.67 + 0.00055R) \quad (110-47)$$

工矿直流电力机车的粘着系数 μ_1 , 见表 110-3。

110.4 机车牵引力

110.4.1 电传动机车牵引特性的限界

图 110-1 所示是电传动机车牵引特性 (曲线 1) 受到的限制, 有如下几个方面,

表 110-3 粘着系数

工矿机车类型		起 动		运 行		制 动
		不 撒 砂	撒 砂	固 定 线	临 时 线	
露 天	标准轨	0.22~0.28	0.30~0.33	0.22	0.20	0.17~0.20
	窄 轨	0.20	0.25~0.27	0.20	0.18	0.17~0.20
井 下		0.20	0.25	0.15~0.20		0.17~0.20

(1) 受粘着条件限制(曲线2), 即曲线1超过曲线2的部分不能实现。

(2) 受牵引电动机允许的最大电流限制(曲线3)。

(3) 受机车构造速度的限制(曲线4)。

(4) 受牵引电动机安全换向限制(曲线5)。

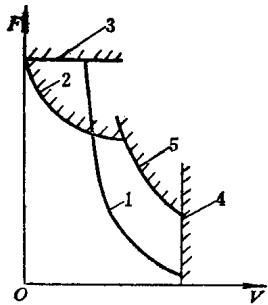


图 110-1 电传动机车牵引特性曲线及其限制曲线

110.4.2 轮周牵引力 F

机车轮周牵引力是作用到机车动轮轮周的牵引力, 在牵引计算中, 各种类型的机车都有实验特性曲线可查, 即 $F=f(v)$, 这是机车最重要的特性曲线, 在以后几章中, 对于各种类型机车的牵引特性曲线, 将分别论述。

110.4.3 机车粘着牵引力 F_{μ}

$$F_{\mu} = 1000gP_{\mu}\mu_j \quad (\text{N}) \quad (110-48)$$

式中 P_{μ} ——机车粘着重量, t;

μ_j ——机车计算粘着系数。

110.4.4 计算速度 v_j 及计算牵引力 F_j

电传动机车最低计算速度 $v_{j\min}$ 和最大计算牵引力 $F_{j\max}$ (最低计算速度相对应的牵引力), 即机车的持续速度和持续牵引力, 如表 110-4 所列。

110.4.5 计算起动牵引力 F_q

机车起动时的牵引力一般是指受牵引电动机电流或粘着牵引力所制约的牵引力。各种类型机车的计算起动牵引力见表 110-5。

表 110-4 $v_{j\min}$ 和 $F_{j\max}$

项 目 \ 机车类型	电 力 机 车				电 传 动 内 燃 机 车			
	韶山 1	韶山 3	韶山 4	韶山 5	东 风	东风 3	东风4(货)	东风4(客)
最低计算速度 $v_{j\min}$ (km/h)	43	48	51.5	80	18	23	20	24
最大计算牵引力 $F_{j\max}$ (kN)	301.2	315.9	431.6	136.7	190.3	148.1	302.1	251.6

表 110-5 计算起动牵引力 F_q

(kN)

项 目 \ 机车类型	电 力 机 车				电 传 动 内 燃 机 车			
	韶山 1	韶山 3	韶山 4	韶山 5	东 风	东风 3	东风4(货)	东风4(客)
计算起动牵引力(kN)	487.6	470.9	627.8	235	301.2	230.5	401.7	346.3
限制条件	粘 着	粘 着	粘 着	起动电流	起动电流	起动电流	粘 着	起动电流

110.5 制动及制动力

制动是列车安全运行的根本保障, 主要制动方式分空气制动和动力制动两种, 而动力制动又分电阻制动、再生制动和液力制动等。根据“铁路技术管理规程”规定, 制动计算时, 不应将动力制动计算在内, 故本章重点讨论空气制动。

110.5.1 制动力 B

$$B = 1000\varphi_b \Sigma K_b \quad (\text{N}) \quad (110-49)$$

式中 ΣK_b ——列车中各闸瓦的换算闸瓦压力 K_b 的总和, kN;

φ_b ——闸瓦换算摩擦系数;

$$\varphi_b = 0.356 \frac{3.6v + 100}{14v + 100}$$

$$+0.006(110-v_0)\frac{v}{6v+100} \quad (110-50)$$

式中 v_0 ——初始速度, km/h。

运用中的机车、车辆, 每辆换算闸瓦压力 K^a 之值如表110-6所列。

表 110-6 机车、车辆每辆

换算闸瓦压力 (N)

列车管空气压力 P_i (kPa)		500	600
机车车辆类型			
货车	标记载重50t以上(包括载重40t的保温车), 装有GK或103型制动机	重车位	24g 27g
		空车位	16g 16g
	标记载重50t上, 装有K2型制动机	16g	19g
	标记载重40t(包括载重25t及不满40t的保温车) 装有K2型制动机	14g	17g
	标记载重30t, 装有K1型制动机	12	14
	守车	4轴	9 11
		2轴	5 6
客车	L3、GL3型制动机开放附加风缸		37
	L3、GL3型制动机关闭附加风缸、104型制动机		33
机车	电力	韶山1	65 65
		东风、东风3	55 55
	内燃	东风4	65 65

110.5.2 列车换算制动力 θ_b

$$\theta_b = \frac{\Sigma K'_h + \Sigma K''_h}{(P+G)g} \quad (110-51)$$

式中 K'_h ——机车每块闸瓦的换算压力, kN;

K''_h ——车辆每块闸瓦的换算压力, kN。

110.5.3 制动时间 t_b

$$t_b = t_k + t_o = t_k + \Sigma \frac{30(v_1 - v_2)g}{1000\theta_b \varphi_b + w_{0d} + i_1 g} \quad (s) \quad (110-52)$$

式中 v_1 、 v_2 ——速度间隔的初速和终速, km/h;

t_k 、 t_o ——列车制动空走时间和制动有效时间, s;

i_1 ——加算坡度;

w_{0d} ——列车惰行车单位基本阻力, N/t;

$$w_{0d} = \frac{Pw'_{0d} + Gw''_0}{P+G} \quad (N/t) \quad (110-53)$$

表 110-7 制动空走时间

 t_b (s) 计算公式

车辆类型	紧急制动	常用制动
客车	$t_k = 3 - 0.7i_1$	$t_k = (2.8 + 3.8r)(1 - 0.03i_1)$
货车	$t_k = (1.5 + 0.18n)(1 - 0.05i_1)$	$t_k = (2.8 + 0.14\frac{r}{g}n)(1 - 0.1i_1)$

注: n ——牵引车辆数;

r ——列车管减压量, N/cm²;

制动空走时间 t_b 按表110-7计算。

110.5.4 制动距离 S_b

$$S_b = S_k + S_o = \frac{v_0 t_k}{3.6} + \Sigma \frac{4.17(v_1^2 - v_2^2)g}{1000\theta_b \varphi_b g + w_{0d} + i_1 g} \quad (m) \quad (110-54)$$

式中 s_k 、 s_o ——制动空走距离和制动有效距离。

各类型机车的规定制动距离如表110-8所列。

110.6 能耗计算

110.6.1 电力机车耗电量

$$Q = Q_r + Q_o + Q_t \quad (kW \cdot h) \quad (110-55)$$

式中 Q_r ——牵引运行耗电量, kW·h;

Q_o ——惰行、制动及停站自用电量, kW·h;

Q_t ——出入段及途中调车作业耗电量, kW·h。

表 110-8 极限制动距离 S_b

机车类型	铁路	矿山露天标准轨及地铁	露天窄轨			井下		城市电车
			600m/m 轨距	762m/m 轨距	900m/m 轨距	载货时	载人时	
距离 S_b (m)	800	400	80	150	150	40	20	35

表 110-9 内燃机车燃油消耗量 e_v

(kg/min)

	n_s	V															
		10	11	14.5	15.3	15.8	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
东风	8	2.20	2.20				2.20	2.20	2.20	2.15	2.00						
	12	3.42	3.42				3.42	3.40	3.37	3.32	3.27	2.88	2.55				
	15	4.70	4.70				4.70	4.70	4.67	4.65	4.47	4.25	3.85	3.53	3.32		
	16	5.15	5.15				5.20	5.25	5.25	5.25	5.18	4.95	4.62	4.13	3.80		
东风 3 型	8	2.20		2.20			2.20	2.20	2.20	2.20	2.17	2.10	1.99				
	12	3.42		3.42			3.42	3.42	3.40	3.38	3.35	3.30	3.24	2.93	2.62		
	15	4.70		4.70			4.70	4.70	4.70	4.67	4.65	4.63	4.50	4.30	4.05		
	16	5.12		5.12			5.20	5.23	5.25	5.25	5.25	5.25	5.15	5.00	4.75		
东风 4 型 (货)	8	3.00				3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.98	2.95	2.90	2.85	2.80		
	12	5.23				5.23	5.23	5.25	5.27	5.28	5.27	5.18	5.08	4.89	4.70		
	15	7.29				7.29	7.29	7.29	7.29	7.28	7.23	7.14	6.80	6.40	5.98		
	16	8.15				8.24	8.28	8.33	8.34	8.33	8.24	7.97	7.55	7.08	6.52		
东风 4 型 (客)	8	3.00			3.00		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.98	2.97	2.92	2.90	2.83	2.83
	12	5.23			5.23		5.23	5.24	5.26	5.27	5.28	5.27	5.20	5.12	4.97	4.87	4.70
	15	7.29			7.29		7.29	7.29	7.29	7.29	7.28	7.25	7.17	6.96	6.65	6.32	5.98
	16	8.14			8.17		8.22	8.29	8.30	8.34	8.33	8.27	8.08	7.76	7.40	6.98	6.52

注: v —机车速度, km/h; n_s —手柄位数。

$$Q_y = \frac{U_w \Sigma [(I_p + I_{p0})t]}{60 \times 10^3} \quad (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (110-56)$$

式中 U_w ——受电弓处网压, V;

I_p ——时间间隔的平均有功电流, A;

I_{p0} ——自用电有功电流, A牵引运行取6A;

t ——相应工况时间, min.

$$Q_o = \frac{U_w I_{p0} \Sigma t}{60 \times 10^3} \quad (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (110-57)$$

I_{p0} 在惰行、空气制动时取2A,电阻制动时取10A。

Q 在电力机车出入段取每小时100kW;途中调车作业取每小时250kW。

110.6.2 电传动内燃机车耗油量

$$E = E_y + E_o + E_t \quad (\text{kg}) \quad (110-58)$$

式中 E_y ——牵引运行耗油量, kg;

E_o ——柴油机空转耗油量, kg;

E_t ——出入段及途中调车作业耗油量。

$$E_y = \Sigma (e_y t) \quad (\text{kg}) \quad (110-59)$$

式中 e_y ——一定工况(手柄位数和速度)时的单位时间耗油量(kg/min),见表110-9。

$$E_o = \Sigma (e_o t) \quad (\text{kg}) \quad (110-60)$$

式中 e_o ——柴油机空转每分钟耗油量, kg/min, 见表110-10和表110-11。

表 110-10 内燃机车柴油机空转燃油消耗量 e_o (kg/min)

机车速度 v (km/h)	10	11	14.5	15.8	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
手柄位数 n_s	0,1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
东风机车	0.39	0.44	0.50	0.55	0.60	0.68	0.74	0.80	0.88	0.96	1.06	1.14	1.25	1.36	1.52	1.70
东风3型机车	0.39	0.44	0.50	0.55	0.60	0.68	0.74	0.80	0.88	0.96	1.06	1.14	1.25	1.36	1.52	1.70
东风4B机车(货)	0.35	0.38	0.41	0.46	0.52	0.58	0.64	0.70	0.77	0.84	0.92	1.01	1.10	1.20	1.34	1.48

表 110-11 东风4B机车(客)柴油机空转燃油消耗量 e_o

机车速度 $v(\text{km/h})$	10	15.3	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120			
手柄位数 n_s	0,1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
燃油消耗量 e_0 (kg/min)	0.35	0.38	0.41	0.46	0.52	0.58	0.64	0.70	0.77	0.84	0.92	1.01	1.10	1.20	1.34	1.48

第 111 章 交-直流电力机车

111.1 国内外交-直流电力机车发展的现状及趋势

111.1.1 交-直流电力机车的优越性

(1) 功率大 蒸汽机车和内燃机车都是机车本身自带能源的自给式机车,它们受到能源设备——锅炉或柴油机容量、体积和重量的限制,机车功率不能过大。电力机车不带一次能源设备,可以单相

工频高压交流接触网供电,不受上述条件的限制,可以制造大功率机车。如韶山3型电力机车,单位重量轴功率为38.4kW/t高于东风4B型客运内燃机车(其单位重量功率仅19.2kW/t),也高于前进型蒸汽机车(其单位重量轴功率仅16.4kW/t)。

直-直流电力机车,由于受电网电压限制,制造大功率机车也比较困难。

(2) 热效率高 见第109章表109-3。

(3) 过载能力强 自给式机车,其过载能力

受到机车上能源装置容量所限制, 过载能力有限。而电力机车是非自给式的, 能量由接触网供给, 其过载能力主要受变压器和牵引电动机等电器设备的限制, 这些电器设备一般短时过载能力是较大的。在实际运行中, 需要过载的地方, 主要是在机车启动和通过限制坡道时, 其时间都不会很长。具有短时过载能力, 就能多拉快跑。

(4) 整备时间少、运用效率高。

(5) 与先进的交-直-交流电力机车比较, 交-直流电力机车的原理比较简单, 技术难度较小, 相对造价也低。

(6) 电力机车司机劳动条件较好, 不污染环境。

111.1.2 我国国产交-直流电力机车的现状

(1) 韶山1(SS1)型电力机车 这是客货两用干线铁道电力机车。机车持续功率3780kW, 接触网的单相工频25kV高压交流电经受电弓通过主断路器, 进入主变压器高压侧(一次侧)绕组, 再经轮对、钢轨回到牵引变电所。主变压器将接触网的高压交流电, 变换为低压交流电, 主变压器的牵引绕组经调压开关与硅整流装置构成单相式全波整流电路, 将交流电变换成电压有级可调的脉流电, 长期运行级位有33个, 再经两台平波电抗器滤波后, 向六台并联直流串励牵引电动机集中供电。

牵引电动机是带补偿绕组的四极脉流电机, 小时制额定功率700kW, 抱轴式悬挂, 电机两端斜齿轮传动, 带动车轮, 当牵引电动机速度改变时, 机车的运行速度也变化, 当牵引电动机反转时, 机车运行方向改变。

利用调压开关改变主变压器牵引绕组输出电压, 即改变牵引电动机端压进行调速。同时还利用改变牵引电动机励磁进行调速: 当励磁绕组与电阻并联时, 流过励磁绕组的电流减小, 磁场被削弱, 电动机转速相应提高; 并联不同的电阻, 磁场削弱的程度不同, 电机转速提高程度也就不同, 可对机车进行辅助调速。SS1型机车有三级磁场削弱。

机车上还装有反向器和牵引制动转换开关, 前者用来改变电机励磁绕组同电枢绕组串联连接方法, 使电机励磁电流反向, 电机就反向旋转。机车便反向运行; 后者则用来将串励牵引电动机改接为他励发电机, 进行电阻制动。电阻制动时, 牵引电机的电枢绕组同制动电阻相连, 六台电机的励磁绕组串联, 由晶闸管励磁电源供电, 调节励磁电流, 便可控制机车的制动力和制动速度。SS1型机车的电

阻制动轮周功率为3500kW。

此外, SS1型电力机车上还有两台劈相机, 将主变压器辅助绕组的单相交流电变为三相交流电, 给三相异步电动机驱动的辅助电气设备供电。如压缩机组、通风机组、油泵机组等。控制电源也是由主变压器辅助绕组的一个抽头供电, 经晶闸管整流机组整流, 并稳压成直流110V, 该电源与蓄电池组并联运用。

韶山1型电力机车于1988年生产出826号车后已停产。

(2) 韶山3(SS3)型电力机车 这是在韶山1型电力机车的基础上, 改进设计制造的新型大功率客、货两用铁路干线电力机车, 它比韶山1型电力机车主要改进的地方是:

1) 采用大功率整流管和晶闸管组成桥式全波整流电路, 调压开关与晶闸管相控相结合进行级间平滑调压, 并采用恒流限压控制, 使机车具有无级加速特性, 启动平稳, 加速度大, 并使调压开关的工作可靠性大为提高。

2) 在牵引电动机的体积重量大致不变的情况下, 增容到小时制功率800kW, 机车小时功率增加到4350kW, 比韶山1型机车提高15.1%, 机车牵引力大大提高。

3) 机车持续速度从43km/h提高到48km/h, 结构速度从90km/h, 提高到100km/h。

4) 采用了立式电阻制动装置, 机车轮周制动功率达4000kW, 比韶山1型机车提高14.3%。还采用两级电阻制动, 使机车具有双峰制动特性, 强化了机车低速工况下的制动力。

5) 机车的机械部分也进行了多项改进。

(3) 韶山4(SS4)型电力机车 这是八轴货运干线电力机车, 由两节可以独立运用的四轴机车重联组成, 它的主要特点是:

1) 采用晶闸管与二极管不对称四段半控桥式整流电路, 相控调压, 由于不用调压开关, 实行无触点调压, 故可靠性增强。

2) 在牵引工况时采用恒压、恒流双重控制方式, 以适应不同线路、不同坡道、快速启动及重载启动等要求。

3) 在电阻制动工况时, 采用恒速控制为主, 恒励磁电流控制为辅的控制方式。并且设计了两级电阻制动, 机车具有双制动特性, 使低速工况也有较大的电制动力。