

高等学校教科书

电力牵引基础

铁道部教材編輯組选編

人民铁道出版社

一九六一年·北京

目 录

第一章 緒論	1
1-1. 电力牵引課程的内容.....	1
1-2. 电力牵引的优点.....	1
1-3. 电力牵引的电流与电压制.....	2
1-4. 电力牵引簡史、现状及发展.....	3
第二章 列車运动方程式	5
2-1. 作用在列車上的外力.....	5
2-2. 列車运动方程式.....	6
2-3. 列車运行状态与运行曲綫.....	9
第三章 列車的牽引力和制动力	10
3-1. 牽引力和制动力的形成.....	10
3-2. 粘着問題.....	12
3-3. 粘着系数.....	13
3-4. 影响电力機車粘着系数的因素.....	14
3-5. 提高粘着系数的方法.....	17
第四章 列車运动的阻力	17
4-1. 列車运动的阻力.....	17
4-2. 基本阻力.....	18
4-3. 計算基本运动阻力的經驗公式.....	21
4-4. 附加阻力.....	23
4-5. 列車合成阻力.....	24
4-6. 减少列車运动阻力的措施.....	25
第五章 直流电力機車的牽引特性	25
5-1. 牽引特性.....	25
5-2. 各种激磁系統直流牽引電動机的特性.....	28
5-3. 各种激磁系統直流牽引電動机牽引性能的比较.....	30
5-4. 牽引電動机的万用特性.....	34
5-5. 直流牽引電動机的調速.....	36
5-6. 直流牽引電動机在各种运行方式下的特性曲綫.....	39
5-7. 直流电力機車的起动.....	43
第六章 列車的制動系統及制動特性	48
6-1. 概述.....	48
6-2. 机械制動系統.....	48
6-3. 直流串激牽引電動机的变阻制動.....	52
6-4. 复激牽引電動机的变阻制動.....	58
6-5. 再生制動.....	59
6-6. 电磁制動.....	67
第七章 旋轉变流机式单相-直流电力機車車輛的牽引及制動特性	68
7-1. 旋轉变流机.....	68
7-2. 牽引及制動特性.....	68
第八章 靜止变流器式电力機車車輛的牽引及制動特性	71
8-1. 靜止变流器.....	71
8-2. 单相交流整流綫路.....	72
8-3. 整流电压的調节.....	75
8-4. 电气制動.....	78

8-5. 牵引与制动特性	79
8-6. 半导体电力机车	79
第九章 单相整流子牵引电动机电力机车车辆的牵引及制动特性	81
9-1. 单相整流子牵引电动机	81
9-2. 单相整流子电动机电力机车的起动与调速	85
9-3. 变阻制动	87
9-4. 再生制动	88
第十章 异步牵引电动机电力机车的牵引及制动特性	91
10-1. 异步牵引电动机	91
10-2. 异步牵引电动机的非正常工作状态	94
10-3. 单相电容电动机电力机车	96
10-4. 牵引及制动特性	97
10-5. 单相交流电力机车性能比较	98
第十一章 自给式机车的牵引特性	100
11-1. 自给式机车	100
11-2. 飞轮车	100
11-3. 蓄电池机车	101
11-4. 电力传动内燃机车	102
第十二章 运行曲线	105
12-1. 牵引计算	105
12-2. 运行曲线的绘制原理	106
12-3. 线路纵断面的化简	108
12-4. 用图解分析法绘制运行曲线	109
12-5. 图解法绘制运行曲线	111
12-6. 用均衡速度法近似计算运行时间	122
12-7. 列车制动问题	124
第十三章 电流曲线及列车在运行中的能量损耗	127
13-1. 电流曲线	127
13-2. 列车在运行中的能量损耗	128
13-3. 根据电流曲线决定列车在运行中的能量损耗	132
13-4. 用图解法求能耗曲线	134
13-5. 用均衡速度法求能耗	137
13-6. 降低列车运行能耗的方法	138
第十四章 牵引电动机的发热校验	140
14-1. 概述	140
14-2. 均匀发热体的发热规律及实际应用	142
14-3. 牵引电动机的发热校验	144
第十五章 电力牵引基本参数的选择	151
15-1. 概述	151
15-2. 按机车粘着条件选择牵引重量	151
15-3. 按机车起动条件校验牵引重量	153
15-4. 按牵引电动机发热条件选择牵引重量	155
15-5. 机车粘着重量和功率的选择	156
15-6. 列车最有利驾驶方式的选择	156
第十六章 电力牵引试验概述	157
16-1. 概述	157
16-2. 试验车和参数测量方法	158
16-3. 基本运动阻力的决定	159
16-4. 粘着系数的决定	160

第一章 緒 論

1—1. 电力牵引課程的内容

电力牵引是指利用发电站发出的电能，通过接触网，进入电力机车，使机车运行的一种牵引形式。

电力牵引基础是研究下列問題的課程：

1. 铁道干綫、工业运输、城市交通及地下铁道等电力牵引系統；
2. 牵引力、阻力及列車运动的理論以及牵引計算；
3. 各种电力机车車輛的牵引特性及制动特性；
4. 电力牵引参数的試驗方法。

除了研究这些問題以外，电力牵引基础还作为其它专业課（例如，电力机车机械部分、电力机车控制、电力铁道供电等）的理論基础。

1—2. 电力牵引的优点

电力牵引是近代各种陆路运输领域中比較先进的牵引形式。如果以电力牵引的运用范围来分，可进一步分为：

1. 铁道干綫——联接国家的各个地区，大量負担国家运输任务，货运量大，客运距离远；
2. 工业运输——用于工厂厂内、露天矿及地下矿井运输，列車运行速度比干綫铁道低；
3. 城市运输（城市有軌电车、无軌电车、市郊摩托車輛、地下铁道摩托車輛）——主要为客运，站間距离短，速度要求較高。

和蒸汽牵引及內燃牵引比較起来，电力牵引有下列优点：

1. **牵引性能好。**蒸汽机车有鍋炉、汽机、煤水車；內燃机车上有机内燃机，它們本身都有一套能源設備。机车的功率要受到这些能源設備尺寸及重量的限制，功率不能过大。

电力机车上沒有能源設備，所以电力机车单位功率的重量較輕，单位重量所能发出的功率較大，就可能拉得多，跑得快。

为了說明电力牵引的优点，下面将电力机车和蒸汽机车及內燃机车进行比较。

三种机车的功率重量、参数等列在表 1—1 中。

此外，在同样机车粘着重量下，电力机车牵引列車时所产生的加速度比蒸汽机车大。

各种机车所产生的加速度值列于表 1—2。

表1-1

机 車 类 型	軸 式	功 率 (馬力)	重 量 (吨)	单位馬力的 重 量 (公斤/馬力)
单相交流电力机车	3 ₀ —3 ₀	5300	138	26.1
蒸 汽 机 車	1—5—1	2800	133	47.5
內 燃 机 車	2×(3 ₀ —3 ₀)	2×2000	240	60.0

表1-2

机 車 类 型	列車加速度(米/秒 ²)	
	旅客列車	貨物列車
电力机车及內燃机车	0.25~0.45	0.18~0.35
蒸 汽 机 車	0.15~0.30	0.05~0.15

2. **燃料消耗少，效率較高。**在比較几种牵引动力的效率时，应当把效率认为是机车所做的机械功对所消耗自然动力資源（折算成标准热能量）之比。

例如，蒸汽机车每 10000 吨公里大約耗費 350 公斤的煤（指煤水車上的煤，儲运損失不

包括在內)。照算下来,蒸汽牵引的总效率只不过是6%左右。内燃牵引的总效率为25%左右。但它需使用石油作为燃料。

利用火力发电站发出电能时,电力牵引的总效率可达16~18%。在火力发电站中虽然也要烧煤,但这时可以烧低质煤,不象蒸汽机车中一定要烧优质煤。此外,火力发电站还可以建立在煤矿附近,可以避免煤在运输中的耗費。

当电力牵引利用水力发电时,总效率可以高达60%,而且无需消耗任何燃料。

在比較上面三种牵引动力的效率时,还没有把电力机车的再生能量計算在內。只有电力机车才能进行再生制动。所謂再生制动,是指当电力机车沿坡道向下行駛时,机车上的牵引电动机变成发电机运行,把电能反饋到电网去;同时对机车起制动作用,限制列车下坡时运行速度。这种再生制动作用,在一般情况下还可以节约电能20~28%。

3. **运输成本低。**和蒸汽机车及内燃机车上动力设备的修理工作比較起来,电力机车上电器设备修理工作較少而較简单。在两次大修之間,电力机车的走行公里大約比蒸汽机车与内燃机车大一倍。在其它条件都相同时,电力牵引的成本約比蒸汽牵引低25~30%。

4. **电气化投資省。**通常以为电气化投資大,但如考虑到电气化后运输能力增加的效果,则电气化还是比较經濟。特别是貨运十分繁忙的干綫改成电气化,經濟效果还要显著,假設有一单綫的蒸汽牵引綫路感到运输能力不足而必須改建时,通常有两个技术經濟方案可进行比较:一个方案是修建复綫,另一个方案是将原来綫路改成电气化。如令修建复綫的投資为100%,則改建成电气化綫路的投資要省30%左右,而在电力牵引时通过能力还要大一倍多。当綫路电气化时,金属消耗量,包括建筑接触网、牵引变电所和机车在內,要比建筑第二綫少得多。

5. **不受寒冷季节影响。**在气候严寒地区,电力牵引比蒸汽牵引以及内燃牵引更有特殊的优点。在寒冷季节,蒸汽机车和內燃机车的燃料消耗要增加;而电力机车則相反,在低温时牵引电动机的功率还会提高。

6. **改善司机的劳动条件。**同內燃机车一样,电力机车司机可以在視度良好,而温度又可以調节的司机室內,用简单控制器械来駕駛机车。一些与蒸汽机车有关的繁重体力劳动的工作人员(例如,煤場工作人员、煤渣清扫人員、鍋炉工、洗炉人員等)也可节省。

电力牵引除了改善机车乘务人員的劳动条件外,还要求他們有更高的技术水平。这对于逐步消除体力劳动与脑力劳动之間的差別提供了有利的条件。

7. **铁道电气化有利于全国电气化。**在电力铁道經過的地方,例如,城鎮乡村,工农业部門都可以获得电力供应。

1—3. 电力牵引的电流与电压制

电力牵引可以用各种不同的电流及电压制。主要可分为三种,其优缺点如下:

1. **直流牵引制。**在牵引变电所中先用变压器从高压变成低压,再用水銀整流器变成直流,然后送到接触网。

接触网上直流电压大都采用下列数值:

铁道干綫	3300伏
工业运输用铁道	1650或3300伏
地下铁道	825 或1650伏
城市有軌、无軌电车	600伏
矿井井下运输	250伏

直流牵引制是电力牵引早期采用的牵引制,因为沿用关系,目前在世界电力牵引中仍占很大比重(大約60%)。

直流牵引制的优点:

- (1) 直流电力机车結構比較简单,可利用牵引性能良好的直流串激牵引电动机;
- (2) 运行經驗証明直流电力机车运行可靠;

(3) 能实现再生制动。

直流牵引制的缺点：

(1) 由于直流串激牵引电动机端电压有一定限制，接触网电压不能再提高，有色金属的消耗量较多，供电效率低；另一方面，由于接触网电压低，在传输一定功率时电流比较大。为了使接触网上压降不太大，牵引变电所间距离就得比较小，全綫牵引变电所的数量就比较多，因而基本建设的投资要增加。

(2) 起动及调速要用电阻，一方面要有损耗；另一方面，调节不平滑。

2. **低频单相交流牵引制。**这种牵引制出现于二十世紀初期，一方面是由于直流牵引制接触网电压太低，不经济；另一方面，由于当时电机制造水平的限制，还造不出可靠的工频单相交流牵引电动机。因而不得已降低频率。

低频单相交流牵引制的优点：

(1) 接触网可用高压，可以增加牵引变电所间的距离，减少牵引变电所的数量，同时节省有色金属的消耗量；

(2) 可以用改变机车內降压变压器的电压来起动或调速，由此可以省去电阻的装备及损耗；

(3) 无论起动或运行时，所有电机可以接成并联，因而使牵引性能较好。

低频单相交流牵引制的缺点：

(1) 牵引变电所中要安装将工频变为低频的变频机组，或另用低频发电站，这都增加基本建设投资；

(2) 电力铁道供电系统不能与其它供电网连接起来。

3. **工频单相交流牵引制。**根据全面的技术经济比较，目前可以肯定，工频单相交流牵引制是最有发展前途的牵引制，在这种牵引制中，可采用下列三种牵引电动机：

(1) 工频单相整流子电动机；

(2) 直流牵引电动机；

(3) 异步牵引电动机。

用单相整流子电动机的方案，除了直接用工频而不用低频外，其它都与低频单相交流牵引制相同。

用直流牵引电动机时，机车上除降压变压器外，还要安装可以把交流变为直流的变流器。变流器主要有电动—发电机组、离子整流器、半导体等。目前，以离子整流器（引燃管）式的应用最广。

用三相异步牵引电动机时，机车上要安装变相机和其它调速设备。

工频单相交流制的优点：

(1) 供电设备简单而经济；

(2) 有色金属消耗量较少；

(3) 可以提高接触网电压，从而减少牵引变电所数量；

(4) 牵引电动机端电压可以选用最适宜的数值（因为有降低变压器），可以提高电动机工作可靠性，同时降低它的重量；

(5) 牵引变电所可以与其它供电网连接起来统一供电。

工频单相交流牵引制的缺点是对铁道沿綫的通訊綫路干扰很大，但这缺点如用屏蔽电纜或微波通信方式，也可克服和改善。

1—4. 电力牵引簡史、現狀及发展

1843年，俄国伯·斯·雅可比教授制成一台小电动机，虽然它功率很小（0.02馬力），但它是世界上第一台电动机。

经过多次研究改进之后，到1838年，雅可比后来創造的电动机已达到一馬力的功率。他将电动机装在小船上，用电池供电运行。

但是，雅可比和他同时代的人都没有将电力牵引实际应用，这主要是因为当时电力牵引的电源是电池，既不经济又不可靠。随着科学技术的进步，到十九世纪七十年代，人们掌握了发电及输电的技术之后，才为电力牵引的发展创造了条件。

十九世纪八十年代，世界上开始出现小型电气化铁道。最初，电力牵引所用的直流电源由专用的直流牵引发电站供电。

1891年俄国多利沃，道勃洛沃利斯基，实现三相交流远距离输电，才使电力牵引从公用中央发电站获得电能，并采用专门变流的牵引变电所将三相交流变成直流。因此产生了电力牵引所用的各种电流及电压制。

表1-3

洲	名	长 度 (公里)
欧	洲	49331
亚	洲	6702
非	洲	3169
澳	洲	916
美	洲	7010

二十世纪初期，世界各国有些干线铁道逐步采用电力牵引。

到1959年底为止，全世界已经电气化的铁道约有67138公里，占铁道总长的5.3%。在1960年，又有四千多公里铁道电气化。目前世界各大洲电气化铁道分布情况见表1-3①。

一些国家的电气化铁道的公里数见表1-4。

表1-4

国 名	电 气 化 铁 道 长 度		国 名	电 气 化 铁 道 长 度	
	公 里	占该国铁道总长(%)		公 里	占该国铁道总长(%)
苏 联	11573	9.3	刚 果	527	10.0
匈 牙 利	402	5.0	英 国	1831	6.0
德意志民主共和国	581	3.9	法 国	6459	16.4
波 兰	850	3.0	美 国	3943	1.1
捷 克	602	4.5	日 本	2403	12.0
朝 鲜	125	3.3	瑞士 (国家铁道)	2990	100.0
古 巴	136	2.9	瑞典 (国家铁道)	6711	45.3
阿 尔 及 利 亚	295	7.0			

全世界机车数比例列于表1-5中。

表1-5

机 车 类 别	百 分 率 (%)
蒸 汽 机 车	76
内 燃 机 车	14
电 力 机 车	10

一些国家电力牵引每年所消耗的电能见表1-6。

表1-6

国 名	电 能 消 耗 量 (亿度)(1958)	每公里线路平均每 年消耗电能 (万度/公里)	国 名	电 能 消 耗 量 (亿度)(1958)	每公里线路平均每 年消耗电能 (万度/公里)
苏 联	63.0	7.5	法 国	20.0	24.6
波 兰	2.5	37.2	美 国	20.2	51.5
阿尔及利亚	0.39	13.2	日 本	17.1	73.8
刚 果	0.33	7.5	瑞 士	9.8	34.0
英 国	10.2	61.5	瑞 典	17.6	25.4

世界各国电气化铁道中，各国电流与电压制所占比重见表1-7。

① 表1-3、1-4、1-5、1-6及1-7的资料选自苏联 Железнодорожный Транспорт 杂志1960年12期，Л. А. Вислоух 与 Н. А. Ломагин 合著“Электрификация железных дорог стран мира”一文。作者选编这些材料，主要是使读者概括的了解世界各国的电气化铁道的情况。

表1-7

电 流 与 电 压 制		长 度, 公 里	占 总 长 欧 % (1959)
直 流 牵 引 制	3000伏	25417	37.8
	1500伏	12015	17.9
	2400伏、1200伏及其它低压	4604	6.8
低 頻 单 相 交 流 牵 引 制	25赫芝, 6500伏及11000伏	1726	2.5
	16 $\frac{2}{3}$ 赫芝, 11000伏, 12000伏及15000伏	18162	27.1
工 頻 单 相 交 流 牵 引 制	50及60赫芝, 15000, 20000及25000伏	3810	5.7
三 相 交 流 牵 引 制	16 $\frac{2}{3}$ 赫芝、3700伏; 25赫芝, 6000伏	1394	2.2

不論从电气化铁道长度或电力机车总数来说, 电力牵引在世界范围内所占的比重还不大。在几种牵引制中, 先进的工频单相交流牵引制所占的比重也不大。

但从今后发展看来, 很多国家都已决定采用工频单相交流牵引制。根据各国发表的材料来看, 預計在今后10~15年中, 全世界大約将电气化 90000 公里, 而其中准备采用工频单相交流牵引制的就有 65000 公里。

以苏联为首的社会主义国家, 铁道电气化事业正在高速度地发展着, 截至1959年底, 社会主义国家电气化铁道的总长, 已占世界电气化铁道总长的21%。社会主义各国都在大力的发展铁道电气化工作, 并都有比較长远的发展规划, 电气化铁路每年增长速度已超过10%。苏联預計到1970年, 电气化铁路总长将达 45000 公里以上。在资本主义国家中, 铁路运输事业掌握在各个壟断资本家的手中, 一切事业的兴建的目的, 在于资本家追求最大限度的利潤。因此, 在资本主义国家中, 根本没有比較长远的发展规划。近几年来, 资本主义国家电气化铁路的长度, 每年增长只在 5 % 上下。

在旧中国, 根本談不上铁道电气化。中华人民共和国成立以后, 在党和毛主席的正确领导下, 对于铁道电气化工作給予很大的重視。特别是在党提出建設社会主义的总路綫以后, 随着国民經济的大跃进, 我国铁道电气化事业得到很大的发展。目前, 我国已能成批生产車重80吨的工矿电力机车, 并試制成功了車重 138 吨的工频单相交流干綫电力机车, 某些交流电气化区段正在兴建。此外, 我国有丰富的水力資源可以利用, 这为今后铁道电气化事业的飞跃发展提供极为有利的物质条件。

第二章 列車运动方程式

2-1. 作用在列車上的外力

当电力机车牵引車輛行駛时, 在整个列車上作用着很多的力。有些是不直接影响列車运动状态的, 例如与路面垂直的力以及一些相互抵消的内力等。这里所要研究的是直接影响列車运动状态的外力。作用在列車上的外力有牵引力、阻力、制动力三种。

牵引力 F (公斤) ——使列車运动的力, 作用方向与列車运动方向相同。牵引力的大小可以由司机根据需要来控制。

阻力 W (公斤) ——阻止列車运动的力, 作用方向与列車运动方向相反, 是不能由司机控制的外力。

制动力 B (公斤) ——也是阻止列車运动的力, 作用方向也与列車运动方向相反, 但它是能由司机控制的外力, 用来使列車减速和停止。

这些力的单位是用公斤来表示, 为了便于計算, 通常采用根据列車重量 (吨) 的单位值来表示。如果 G 表示列車的重量 (吨), 則

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{F}{G} \cdots \cdots \cdots \text{单位牵引力 (公斤/吨)}; \\ w &= \frac{W}{G} \cdots \cdots \cdots \text{单位阻力 (公斤/吨)}; \\ b &= \frac{B}{G} \cdots \cdots \cdots \text{单位制动力 (公斤/吨)}. \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

2-2. 列車运动方程式

作用在列車上的外力影响着列車的運動状态，也就是，列車速度要改变。所謂列車运动方程式是表示作用在列車上的外力与列車速度变化关系的方程式。

当列車以加速度 $\frac{dv}{dt}$ 前进时，必須有四种力同时作用着：

(1) F_c ——假設列車整体作为一个质点向前运动时的加速力，

$$F_c = m \frac{dv}{dt}, \quad (2-2)$$

式中 m ——列車的实有質量。

(2) F_g ——在列車以 $\frac{dv}{dt}$ 加速度前进时，機車动輪及动輪軸上傳动机构角加速度所要求的力，

$$F_g = \frac{\Sigma J_g \frac{d\omega_g}{dt}}{R_g} = \Sigma \frac{J_g}{R_g^2} \frac{dv}{dt}, \quad (2-3)$$

式中 R_g ——機車动輪滚动圓半径；

J_g, ω_g ——機車动輪对及动輪軸上傳动机构的慣性轉矩和角速度；

(3) F_B ——同样，車輛輪对对角加速度所要求的力，

$$F_B = \frac{\Sigma J_B \frac{d\omega_B}{dt}}{R_B} = \Sigma \frac{J_B}{R_B^2} \frac{dv}{dt},$$

式中 J_B, ω_B ——車輛輪对的慣性轉矩和角速度；

R_B ——車輛輪对滚动圓半径。

(4) F_{π} ——同样，电机轉动部分及电机軸上傳动机构角加速度所要求的力。前面三种力都是作用于輪緣上的力，为了便于总加， F_{π} 也必須归算到輪緣上。則

$$f_{\pi} = \frac{\Sigma J_{\pi} \frac{d\omega_{\pi}}{dt}}{R_{\pi}},$$

式中 J_{π}, ω_{π} ——电枢及电枢軸上傳动机构的慣性轉矩及角速度。

F_{π} 是 f_{π} 归算到动輪上的力，即

$$F_{\pi} = \mu \left(\frac{R_{\pi}}{R_g} \right) f_{\pi} = \Sigma \frac{\mu J_{\pi}}{R_g} \frac{d\omega_{\pi}}{dt},$$

此外，

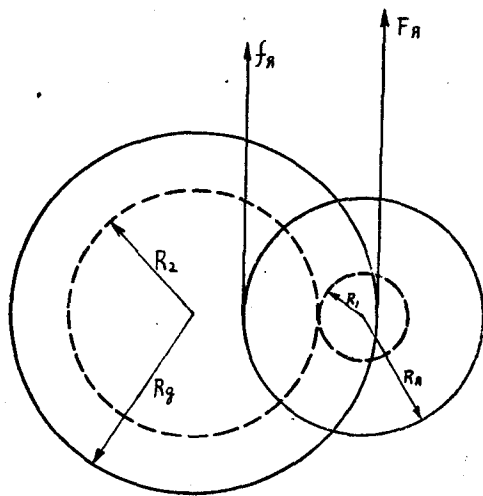


图 2-1 电动机电枢圆周作用力与动輪輪緣作用力，

R_{π} ——电动机电枢半径； R_1 ——小齒輪半径；

R_2 ——大齒輪半径； R_g ——动輪半径；

f_{π} ——作用于电动机电枢周围，使电枢及小齒輪产生角加速度的力。

$$\omega_g = \mu \omega_g = \mu \frac{v}{R_g},$$

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{\mu}{R_g} \frac{dv}{dt},$$

式中 v ——机車速度;

μ ——傳动比 $\frac{R_2}{R_1}$ 。

因此

$$F_g = \Sigma \frac{\mu^2 J_g}{R_g^2} \frac{dv}{dt},$$

总加起来, 得

$$\begin{aligned} F_\partial &= F_c + F_g + F_B + F_g \\ &= m \frac{dv}{dt} + \Sigma \frac{J_g}{R_g^2} \frac{dv}{dt} + \Sigma \frac{J_B}{R_B^2} \frac{dv}{dt} + \Sigma \frac{\mu^2 J_g}{R_g^2} \frac{dv}{dt} \\ &= m \left[1 + \Sigma \frac{J_g}{m R_g^2} + \Sigma \frac{J_B}{m R_B^2} + \Sigma \frac{\mu^2 J_g}{m R_g^2} \right] \cdot \frac{dv}{dt} \end{aligned}$$

$$F_\partial = m(1+\gamma) \frac{dv}{dt} = m_n \frac{dv}{dt}, \quad (2-4)$$

式中 F_∂ ——所有作用于列車上产生加速度的外力之和;

$(1+\gamma)$ ——列車旋轉部分的慣性系数;

m_n ——列車的归算質量。

这就是列車运动方程式的第一种形式。(2-4) 式中的 F_∂ 是所有作用于列車上的各外力的合力。

因为 $dt = \frac{dS}{v}$, 因此可以把运动方程式的第一种形式改写成:

$$F_\partial = m(1+\gamma)v \frac{dv}{dS} = m_n v \frac{dv}{dS}. \quad (2-5)$$

(2-5) 式称为列車运动方程式的第二种形式。

在列車运动方程式的两种形式中, 都包含列車归算質量 (m_n)。但实际上列車都用重量 G (吨) 来表示。为計算方便起见, 可将 $m(1+\gamma)$ 用 σG 表示, 則 (2-4) 及 (2-5) 可分别改写成:

$$F_\partial = \sigma G \frac{dv}{dt}, \quad (2-6)$$

$$F_\partial = \sigma' G v \frac{dv}{dS}. \quad (2-7)$$

如果用单位值表示, 則

$$f_\partial = \sigma \frac{dv}{dt}, \quad (2-8)$$

$$f_\partial = \sigma' v \frac{dv}{dS}. \quad (2-9)$$

这是运动方程式的最简单的形式, 式中 σ 与 σ' 为一系数, 其数值由 F_∂ 、 G 、 v 、 t 、 S 等所用的度量单位来决定。

有时, 系数 σ 也用其倒数表示, 即

$$\frac{1}{\sigma} = \zeta.$$

这时运动方程式变为:

$$\zeta f_\partial = \frac{dv}{dt}, \quad (2-10)$$

$$\zeta' f_{\partial} = v \frac{dv}{dS}. \quad (2-11)$$

从上式可见， ζ 的物理意义就是1公斤的力作用在1吨的列车重量上所引起的加速度值。 ζ 的值愈大，单位作用力所引起的速度变化也愈大。

我们可以很容易地根据 $m(1+\gamma) = \sigma G$ 的关系求出 σ 与 ζ 的数值。例如，如果列车重量 G 用吨表示，则列车质量

$$m = \frac{1000}{g} G = \frac{1000}{9.81} G \text{ (公斤} \cdot \text{秒}^2/\text{米)}。$$

如果列车的速度用公里/时表示，则可化成米/秒的单位

$$1 \text{ 公里/时} = \frac{1000}{3600} = \frac{1}{3.6} \text{ 米/秒}。$$

如果时间的单位为分，则可得

$$\sigma = \frac{1000(1+\gamma)}{9.81 \times 3.6 \times 60} = 0.472(1+\gamma)。$$

σ 与 ζ 的数值如表 2-1 所列。

表2-1

运动方程式	度量单位					σ	ζ
	力 ($F\partial$)	列车重量 (G)	速度 (V)	走行距离 (S)	时间 (T)		
第一形式	公斤	吨	公里/时	—	秒	28.3 (1+ γ)	0.0354/(1+ γ)
	公斤	吨	公里/时	—	分	0.472 (1+ γ)	2.12/(1+ γ)
	公斤	吨	公里/时	—	时	0.00787 (1+ γ)	127/(1+ γ)
	公斤	吨	米/秒	—	秒	102 (1+ γ)	0.0098/(1+ γ)
						σ'	ζ'
第二形式	公斤	吨	公里/时	公里	—	0.00787 (1+ γ)	127/(1+ γ)
	公斤	吨	公里/时	米	—	7.87 (1+ γ)	0.127/(1+ γ)
	公斤	吨	米/秒	米	—	102 (1+ γ)	0.0098(1+ γ)

旋轉部分的慣性系数 $(1+\gamma)$ 可由 (2-4) 式求得，即

$$1+\gamma = 1 + \frac{\sum \frac{J_B}{R_B^2} + \sum \frac{J_g}{R_g^2} + \sum \frac{J_{\pi u^2}}{R_g^2}}{m}。$$

但这样计算很麻烦，通常是用试验方法来决定，表 2-2 列出一些数据，可供计算时参考。

表2-2

机车车辆类型	$1+\gamma$	机车车辆类型	$1+\gamma$
四轴货车		摩托車輛	1.10~1.15
(1) 空車	1.07~1.08	电力機車	1.20~1.40
(2) 重車	1.03~1.04	无軌電車	1.11
客車	1.04~1.05		

如果列车是由机车与同一类型的車輛所組成，则整个列车的旋轉部分的慣性系数 $(1+\gamma)_n$ 可用下式来计算

$$(1+\gamma)_n = \frac{(1+\gamma)_g P + (1+\gamma)_B Q}{P+Q}, \quad (2-12)$$

式中 $(1+\gamma)_g$ ——机车的旋轉部分的慣性系数；

P ——机车重量 (吨)；

$(1+\gamma)_B$ ——車輛的旋轉部分的慣性系数；

Q ——車輛总重 (吨)。

如果車列是由各种車輛編組而成,則总的旋轉部分的慣性系数 $(1+\gamma)_B$ 可以由平均值决定

$$(1+\gamma)_B = \frac{G_1(1+\gamma)_1 + G_2(1+\gamma)_2 + \dots + G_n(1+\gamma)_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}, \quad (2-18)$$

式中

$G_1, G_2, \dots, G_n$ ——各种車輛的重量;

$(1+\gamma)_1, (1+\gamma)_2, \dots, (1+\gamma)_n$ ——对应的旋轉部分的慣性系数。

在实际計算貨物列車时,可以采用 $\zeta = 120$ 公里·吨/时²·公斤的数值,也就是近似地認為貨物列車的旋轉部分的慣性系数 $(1+\gamma) = \frac{137}{120} = 1.06$ (計算中其他数值的单位为 F_ϕ ——公斤, G ——吨, v ——公里/时, t ——时)。

这时,以单位值表示的近似运动方程式的第一种形式就可写成为:

$$\frac{dv}{dt} = 120f_\phi \text{ 公里/时}^2. \quad (2-14)$$

2—3. 列車运行状态与运行曲綫

在电力牵引中,列車有三种运行状态:

(1) **牵引状态**——牵引电动机通电轉动,将接触网供給的电能变为机械能,驱动機車,使機車牵引車輛前进的运动;

(2) **惰行状态**——牵引电动机不通电,列車靠慣性前进的运动;

(3) **制动状态**——在列車上加制动力,使列車减速的运动。

这几种运行状态都可以用运动方程式来分析。

在**牵引状态**下,在列車上作用的外力只有牵引力 F 与阻力 W ,因此,运动方程式可写成为:

$$F - W = \sigma G \frac{dv}{dt}. \quad (2-15)$$

如用单位值表示則可写成为:

$$f - w = \sigma \frac{dv}{dt}. \quad (2-16)$$

如果 $F > W$,則 $\frac{dv}{dt} > 0$,說明列車在加速。如果 $F < W$,則 $\frac{dv}{dt} < 0$,說明列車在减速,在列車上坡时是会发生这种运行状态的。

当 $F = W$,則 $\frac{dv}{dt} = 0$,說明列車在等速运行或是停止不动。

在**惰行状态**下,牵引电动机不通电,在列車上作用的外力只有阻力 W ,

$$-W = \sigma G \frac{dv}{dt} \quad (2-17)$$

或

$$-w = \sigma \frac{dv}{dt}. \quad (2-18)$$

在一般情况下, W 的絕對值都是正值,也就是阻力 W 永远要阻止列車运动。这时 $W > 0$, $\frac{dv}{dt} < 0$,列車减速。

但当列車在一个較大的下坡道上向下惰行时,也可能 $W < 0$,这时 $\frac{dv}{dt} > 0$,列車在加速。此外,在下坡道上向下惰行时,也会发生 $W = 0$ 的情况,这时 $\frac{dv}{dt} = 0$,列車等速惰行。

在**制动状态**下,除阻力 W 而外,还有制动力 B 作用在列車上,

$$-(W + B) = \sigma G \frac{dv}{dt} \quad (2-19)$$

或

$$-(w+b) = \sigma \frac{dv}{dt} \quad (2-20)$$

在一般情况下 $W+B > 0$, $\frac{dv}{dt} < 0$, 列車減速。

當列車在大的下坡道上向下行駛時, 可以設想也許會發生 $W+B < 0$ 的情況, 這時 $\frac{dv}{dt} > 0$, 列車在加速。當然這種情況事實上是不能容許的, 因為在加上制動力以後, 列車仍加速向下惰行, 那就很可能造成危險事故。

如果 $W+B=0$, 則 $\frac{dv}{dt}=0$, 說明列車等速向下惰行。

除了用運動方程式來分析外, 列車運行狀態也可以根據運動方程式畫出一些曲線來說明。這些曲線就稱為列車的運行曲線:

- (1) $v=f(S)$ ——說明速度與走行距離的關係;
- (2) $v=f(t)$ ——說明速度與運行時間的關係;
- (3) $t=f(S)$ ——說明走行距離與時間的關係。

圖 2-1 表示簡單的列車運行曲線。

圖 2-2 表示列車從起動到制動的運行過程。圖的右邊的曲線是 $v=f(S)$; oa ——起動, ab ——加速, bc ——等速運行, cd ——惰行, de ——制動。

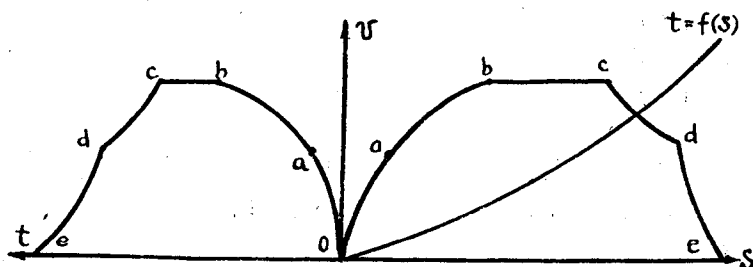


圖 2-2 列車的運行曲線

圖左邊的曲線是 $v=f(t)$ 。曲線形式與右邊相同, 只是坐標與比例不同, 這是因為在每個瞬間, 距離 S 、速度 v 、與時間 t 有着一定的關係 $\left(dt = \frac{dS}{v} \right)$ 。

另一根曲線 $t=f(S)$ 通常與 $v=f(S)$ 畫在一起。

從這三條曲線可以看出列車在運行途中每一點處的速度和運行時間。這是我們今後分析列車運行問題的一個重要依據。

第三章 列車的牽引力和制動力

3-1. 牽引力和制动力的形成

1. **牽引力的形成。**牽引力是使列車產生前進運動, 並可以由司機根據需要來控制的外力。

從力學的基本定律知道, 任何物體如果不受到外力的作用, 則永遠不會改變自己的運動狀態, 對列車來說也是一樣。

作用在列車上, 使列車前進的外力通常可有以下二種:

- (1) 重力;
- (2) 鋼軌對機車動輪的作用力。

只有當列車下坡時, 列車重力沿地面的分力才能使列車前進, 但它不能根據司機需要來控制, 所以不能滿足我們的需要。

實際上, 目前所利用的外力只有鋼軌對機車動輪的作用力。

下面我們來分析電力機車動輪輪緣上牽引力的形成過程。圖 3-1, a 只示出了機車的一

个动輪——即通过传动机构与电动机相联的車輪。

機車通过輪对以其整个重量(包括輪对自重)压在轨道上,每一动輪对于轨道的正压力是 $2G_k$, 而每一个动輪对于轨道的正压力为 G_k 。由于这个正压力的关系,使动輪与轨道表面紧压在一起,形成了輪軌表面間的“粘着”。这一“粘着点”(图3—1,a中的 O 点)也就是車輪沿轨道滚动的瞬时中心——瞬时支点。这样,車輪在沿轨道滚动时就有两个支点:一个是車輪軸的支点 O' (軸承),另一个則是瞬时支点 O 。牵引电动机通过传动机构以力矩 M_k 作用在动輪上,此力矩可以用作用在 O 点与 O' 点的力偶来代替,偶力的大小为 F'_k 及 F_k ($F'_k = F_k$),其作用臂为动輪半径 R_k 。力 F'_k 作用于輪軸的軸承上;而力 F_k 作用于輪、軌接触点,企图推鋼軌。由力学原理可知,在支点 O 与 O' 必定产生一反力矩,其大小与 M_k 相等,方向如图3—1a所示。力 T'_k 为支点 O' ,即軸承作用于車輪輪軸的反力,力 T_k 为支点 O ,即軌道作用于动輪輪緣的反力。显然,就整个機車來說,力 T'_k 为內力,軸承以力 T'_k 作用于动輪軸,而軸也以大小相等方向相反的力 F'_k 反作用于軸承,它們彼此相互抵消。力 T_k 是作用于機車上的唯一的外力,正是这一外力使機車向前运动。

牵引力 T_k 与作用在車輪上的力矩 M_k 的关系很容易从力矩平衡方程式中得到。在一般情况下,列車作变速运动,且軸承中有摩擦时,

$$T_k = F_k - \frac{J'_g}{R_k} \cdot \frac{d\omega_k}{dt} - W_n,$$

式中 $\frac{d\omega_k}{dt}$ ——动輪的轉动加速度;

J'_g ——动輪及与之相联的整个旋轉部分的轉动慣量;

R_k ——动輪半径;

W_n ——軸箱摩擦阻力。

当列車作等速运动,且动輪軸与軸承之間无摩擦时,牵引力 T_k 将为:

$$T_k = \frac{M_k}{R_k} = F_k。$$

2. 制动力的形成。制动力的形成过程可以和牵引力的形成过程完全类似地来研究。如图3—1,b所示,設機車正以速度 v 惰行,輪压仍为 G_k 。制动力矩 M_k 可以用具有作用臂 R_k 的力偶 B 和 B' 来代替。 B' 引起了軸承对輪軸的反力 B'' (对整个機車來說它們是內力),力 B 企图向前推鋼軌。这样,在点 O 便引起了粘着力 T_k ——阻止列車前进的反作用力。

同理,在列車作变速运动,而軸箱內有摩擦时, T_k 与 B 有下面的关系:

$$T_k = B + \frac{J'_g}{R_k} \frac{d\omega_k}{dt} + W_n。$$

这里 $\frac{J'_g}{R_k} \frac{d\omega_k}{dt}$ 与 W_n 前面都用“+”号,这是因为慣性力与軸箱摩擦力都是阻止列車前进运动的。

当列車以均衡速度运动,且軸箱內无摩擦时,則粘着力 T_k 等于制动力 B 。

应该注意,在应用列車运动方程式时,“ $\frac{J'_g}{R_k} \frac{d\omega_k}{dt}$ ”已經归入旋轉部分的归算質量中,而 W_n 則已算入列車运动阻力当中。所以牵引状态下仍可取 $T_k = F_k$ 。制动状态下則为 $T_k = B$ 。以后就以 F_k 和 B 分别表示牵引力和制动力。

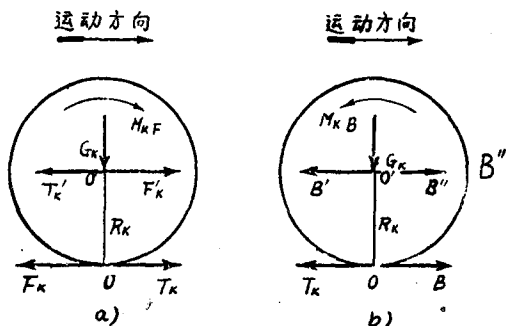


图3—1 牵引力和制动力形成的示意图:
a——牵引力; b——制动力。

3-2. 粘着問題

前面已談到，产生牵引力的关键是动輪与鋼軌間的粘着現象，那么粘着現象到底是怎么产生的呢？

在一般物理学中我們研究的是靜止与滑动，靜摩擦与滑动摩擦等現象。我們知道，当一个靜止的物体受到外力的作用时，随着外力的加大，靜摩擦力也加大，直到外力超过靜摩擦力的最大值时，物体才移动。物体移动以后，就变成滑动現象了。

这个过程可以认为是經過两个阶段，即：

1. 滑动前的**彈性位移阶段**；
2. **滑动阶段**。

可以設想，物体的表面是有些高低不平的，同时当两物体接触时，由于距离很近，彼此分子之間可能会产生相互作用力。所以当物体上加有外力时，首先外力是被物体表面高低不平处的彈性变形力及分子間的相互作用力所平衡。因此，在外力的作用下，虽然从表面上看来物体是靜止不动的，但实际上却有着很小的位移。当外力除去后，位移即消失而等于零。我們称这个位移为彈性位移，把这一阶段称为滑动前的**彈性位移阶段**。在这一阶段中用来平衡外力的彈性变形力和分子作用力則称为**非全靜摩擦力**。

随着外力的增加，彈性位移与非全靜摩擦力也加大。但彈性位移的增加有一极限值，达到此极限值时，物体所受的反作用力为最大。这一反作用力的极限值也就是两接触面間的最大靜摩擦力。非全靜摩擦力則是一变值，它随着物体所受外力的大小而改变。

当外力再加大，彈性位移超过极限值时，靜摩擦被破坏而进入**滑动阶段**。这时，物体产生硬性位移，所受的反作用力即为滑动摩擦力。

機車动輪与鋼軌的情况基本上也可以分成彈性位移阶段与滑动阶段。当牵引电动机通电后，动輪对鋼軌有一作用力 T_k (图3—1, a)。力 T_k 的作用是要使动輪与鋼軌产生相对滑动。和前面分析的一样，在彈性位移阶段也将产生非全靜摩擦力。由于非全靜摩擦力的作用使动輪与鋼軌不能产生滑动，而只产生彈性位移。

这种阻止动輪对鋼軌不能相对滑动（只有彈性位移）的非全靜摩擦力，称为**粘着力**。

当电动机电流繼續加大，一定有这样一個瞬間，力 T_k 能使动輪与鋼軌間彈性位移达到极限值，也就是說动輪与鋼軌間的彈性变形力和分子作用力——非全靜摩擦力——都达到极限值，如力 T_k 再加大，动輪与鋼軌間就要发生硬性位移而进入滑动阶段。这时接触点 O 相对滑动，动輪在鋼軌上不是純滚动而带有些滑动。这种現象称为**打滑**。

彈性位移达极限值时的非全靜摩擦力称为**极限粘着力**或**最大粘着力**。

总的來說，要使动輪能滚动前进，动輪与鋼軌間所作用的水平方向的力，一定要小于非全靜摩擦力的极限值，也就是一定要小于极限粘着力。換句話說，**动輪所能实现的牵引力不可能大于动輪与鋼軌間的极限粘着力**。

由于粘着力的大小与动輪对鋼軌的正压力有关，而且在彈性位移阶段可以认为是成正比的，所以可以写成

$$F \leq \psi G, \quad (3-1)$$

式中 F ——动輪所能实现的牵引力；

G ——动輪对鋼軌的正压力（軸重）；

ψ ——粘着力与軸重之間的比例常数，因为它说明在彈性位移阶段的粘着情况称之为**粘着系数**。

因为在电力機車上，动輪数不止一个，所以对整台機車來說

$$F_k \leq \psi \rho, \quad (3-2)$$

式中 $F_k = \sum F$ ——機車所能实现的总牵引力；

$\rho = \sum G$ ——機車动輪軸重总和，也称为機車的粘着重量。

(3-2) 式也可以用一句話来表达，即機車所能实现的牵引力，就数值上來說，不能大

于機車粘着重量的某一分數（因為粘着係數 ψ 永遠小於1）。

從前面的說明中已知，動輪與鋼軌間的粘着力是彈性位移階段的非全靜摩擦力。但是這非全靜摩擦力大小是多少？同時它決定於哪些因素？這個問題還是一個沒有徹底解決而有爭論的問題。

在這問題上有三種不同的觀點：

(1) 非全靜摩擦力是由於鋼軌與動輪輪箍表面高低不平而在表面層引起彈性變形的結果；

(2) 非全靜摩擦力是由於接觸面分子相互作用力所引起；

(3) 非全靜摩擦力是由於彈性變形力以及分子的相互作用力所引起。

看來，第三種觀點比較全面，因為它能很好地解釋鐵道工作中大家所熟悉的那些事實：即無論是鋼軌及動輪輪箍表面處於非常光滑而清潔的狀況下，或是接觸面粗糙（撒砂）的狀況下，粘着情況都很好（前者可能是由於分子作用所引起，後者可能是由於彈性變形力的效應）。

在研究粘着問題時，應注意掌握下列幾個概念：

(1) 在討論形成牽引力的粘着問題時，所談到的車輪都是機車的**動輪**，而不是一般車輛的車輪。因為動輪對是與牽引電動機用齒輪聯系着的，只有動輪的輪緣才有水平方向的力量傳給鋼軌，才產生粘着問題。

(2) 粘着力是彈性位移階段的非全靜摩擦力，而極限粘着力則是彈性位移達極限值時的非全靜摩擦力——最大靜摩擦力。因此，從物理觀點來看，粘着係數接近於兩接觸面間的靜摩擦係數。但只能說是接近，而不能認為就等於靜摩擦係數。因為在壓力與接觸表面狀況一定時，靜摩擦係數就是一定數值，而粘着係數還與很多其他因素有關。

(3) 粘着與滾動摩擦毫無關係。當任何車輪（包括所有機車車輛的車輪）向某一方向滾動前進時，由於鋼軌變形而對車輪所施加的阻力稱為滾動摩擦力。當然，對動輪來說，也有滾動摩擦力，但重要的是，牽引力卻絕對不是由滾動摩擦力所產生的。

有一種設想，認為動輪由於軸壓力 G_k 而發生彈性變形（假定鋼軌不變形），因而形成橢圓形的接觸面（圖3—2），動輪表面纖維在進入接觸面前，由於轉矩作用沿圓周受壓縮，這部分纖維在進入接觸面後，仍舊維持壓縮狀態，這部分接觸面稱為滾動區域。在接觸面的後面部分的纖維有些延伸，因而使這部分輪緣與鋼軌之間有微量的滑動，這部分稱為滑動區域。儘管動輪在不斷地滾動，接觸面在不斷地替換，這現象的實質並不改變。當轉矩較小時，微量滑動極為微細，滑動區域占整個接觸面也很小。當轉矩逐漸增加時，滑動區域逐漸增加，直到轉動力增加到使輪子與鋼軌整個接觸面相對滑動，這就是打滑的開始。

隨著轉矩的增加，滾動區域的壓強逐漸增大，而滑動區域的壓強逐漸減小，滑動區域的摩擦係數及摩擦力逐漸減小，而滾動區域的非全靜摩擦係數及非全靜摩擦力逐漸增大，增加得多，減小得少，總的粘着力還是增加的。等到打滑之後，全部接觸面的摩擦係數均為滑動摩擦係數，其數值大為減小，這時粘着力也變為滑動摩擦力，其數值也大為降低。

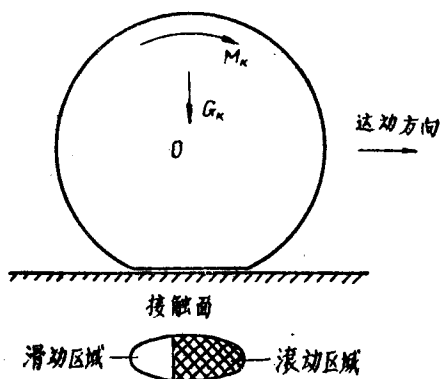


圖3—2

3-3. 粘着係數

在前一節中已知，在一定機車粘着重量下，實際可能得到的最大牽引力決定於粘着係數 ψ （也稱為物理粘着係數），但影響 ψ 的因素很多。在實際計算中，我們用的是所謂**計算粘着係數 ψ_k** 。我們認為

$$\psi_k = \frac{F_k}{P} \quad (3-3)$$

也就是說，計算粘着系数是在不空轉的运行条件下，所能得到的最大牽引力与机車粘着重量之比。

計算粘着系数是用實驗方法求出的。

以后所談到的粘着系数都是計算粘着系数。

影响粘着系数的因素如下：

(1) 材料：当动輪与鋼軌的材料性質、硬度不同时，粘着系数也不同。

当材料硬度越大时，由于透入力小，所以粘着系数越大。当两种不同硬度的材料相接触时，在接触点处，硬度大的材料易将硬度小的材料的凸峰削去，因此降低了机械彈性变形力的数值，粘着系数也就减小了。

(2) 接触表面的状态：实际运行經驗表明，天气对粘着系数有很大影响。潮湿有雾的天气或是微雨的时候，粘着系数降低；相反地，在下大雨鋼軌被彻底清洗之后，粘着系数却加大。

鋼軌上有薄锈或是軌面上撒砂后，粘着系数加大。

軌面有冰冻时，粘着系数减小。具体数据見表3—1。

表3-1

綫路状态	市内電車	干綫铁道	綫路状态	市内電車	干綫铁道
撒砂的干燥鋼軌	0.29	0.35	微雨及雾中的鋼軌	0.12	0.13
大雨后的鋼軌	0.25	—	表面结水的鋼軌	0.10	—
普通干燥鋼軌	0.16	0.22	撒砂的结水鋼軌	0.18	—

这許多現象現在只能用两接触面間机械变形力及分子作用力来解釋。

(3) 輪压（軸重）及輪徑：从理論上来講，輪压加大，接触点面积也加大，但由于面积并不随軸重成正比地增加，而是要增加得少一些，也就是粘着力要比輪压增加得少一些，所以从 $\psi_k = \frac{F}{G}$ 的式中可以看出来：当分母 G 相对地增加得比分子 F 多一些时，粘着系数要降低些。

同理可以看出，在同样輪压的条件下輪徑越大，粘着系数也减小。

但实际上，在目前所采用的輪压（20～23吨）及輪徑（1100～1250毫米）的範圍內，还看不出对粘着系数有什么影响。

(4) 速度：速度越小，相对地來說接触点接触的持續時間越长，因此粘着系数越大。

除上述因素外，粘着系数还与車輪与鋼軌的形状及温度等有关。

以上这些分析只不过是物理概念上来討論，由于缺少特殊的試驗数据，同时对这方面的問題研究得也較少，因此很多問題只不过是初步的概念，还有待繼續深入研究。

3-4. 影响电力机車粘着系数的因素

由于綫路状态及运行条件的关系，整台机車的粘着系数与单触动輪对的粘着系数并不相同。机車的粘着系数受到更多因素的影响。

(1) 各輪对牽引力及軸重分配不均对机車粘着系数的影响：根据(3-3)式 $\psi_k = \frac{F_k}{P}$ 可知，机車計算粘着系数决定于各个动輪对牽引力之和（ $F_k = \sum F$ ）及軸重之和（ $P = \sum G$ ）。

首先从牽引力方面来看，由于同一台机車中各电动机的特性和动輪直徑不可能完全相同，因此各动輪輪緣处的牽引力也不会一样。关于這個問題将在第五章內詳細討論。

这时可能出現这样一种情况：在其他动輪对都沒有达到极限粘着力时，某一个动輪对却已达到极限粘着力。因此，整台机車所能实现的最大牽引力将小于理想計算值（即在各輪对