

工頻單相電氣化鐵路

A. C. 阿瓦特科夫 著

工頻单相电气化鐵路

A. C. 阿 瓦 特 科 夫 著

鐵道部电气化工程局专家工作室譯

人 民 鐵 道 出 版 社

一九六〇年 • 北京

本書敘述工頻單相電力牽引理論的基本原理，各種電力機車、摩托車輛、牽引變電所、接觸網的電路和結構，以及工頻單相電氣化區段的工作情況，並將這種牽引方式與其他牽引方式作經濟比較。

本書可供從事電氣化工作的工程技術人員作參考，亦可作為有關學校的教學參考資料。

本書由鐵道部電氣化工程局專家工作室劉曾怡、馮金柱、盧鶴亭、孫集群、張泰斗、陳世海、曹春溥等同志翻譯。

工頻單相電氣化鐵路
ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

蘇聯 А. С. АВАТКОВ 著

蘇聯國家鐵路運輸出版社（1958年莫斯科俄文版）

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ

Москва 1958

鐵道部電氣化工程局專家工作室譯

人民鐵道出版社出版

（北京市霞公府17號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印

書號 1697 開本 787×1092 1/32 印張 15 7/8 字數 361千

1960年5月第1版

1960年5月第1版第1次印刷

印數 0,001—1,800 冊 定價（7）1.35 元

目 录

序言.....	1
第一章 电力牵引制及其比較.....	2
第一节 电力牵引制.....	2
第二节 工頻交流电气化鉄路的发展.....	9
第二章 电力机車車輛設計的主要問題.....	20
第三节 牵引电动机.....	20
第四节 旋转变流机.....	37
第五节 单相直流靜止变流机.....	59
第六节 頻率50赫的单相交流电力机車的輔助电路.....	65
第七节 机械部分設計中的特殊問題.....	66
第三章 电力机車.....	68
第八节 国产电力机車.....	68
第九节 整流子单相电动机直接供电的电力机車.....	82
第十节 单相-三相变流机电力机車.....	108
第十一节 单相-直流旋转变流机电力机車.....	130
第十二节 靜止变流机单相-直流电力机車.....	153
第四章 摩托車輛.....	184
第十三节 单相整流子电动机直接供电电动車輛.....	184
第十四节 单相-直流摩托車輛.....	195
第五章 供电設備.....	202
第十五节 一次供电.....	202
第十六节 牵引变电所.....	204
第十七节 接触網.....	211
第十八节 直流制与交流制的銜接.....	215
第六章 工頻单相交流电气化区段.....	219
第十九节 苏联鉄路的經驗.....	219
第二十节 匈牙利人民共和国的鉄路.....	283
第二十一节 法国的鉄路.....	238
第二十二节 下剛果的鉄路（近赤道非洲）.....	250
第二十三节 葡萄牙的鉄路.....	253

第二十四节	土耳其的铁路	254
第二十五节	日本的铁路	255
第二十六节	英国的铁路	256
第二十七节	德国的铁路	259
第七章	实现工频单相交流电力牵引后的通信线路 及信号集中闭塞设备	262
第二十八节	接触网的单相电流对通信线路和信号集中闭塞设备的影响 及其防护	262
第二十九节	通信线路电缆化的经济效果	264
第八章	工频单相交流制的技术经济特性	264
第三十节	我国所进行的工频单相交流制与其它电流制的 技术经济比较	265
第三十一节	各国所进行的工频单相交流制与其它电流制的 技术经济比较	271
参考文献		278

序 言

根据苏联共产党第二十次代表大会的決議和苏联共产党中央委员会所通过的铁路电气化总计划，現在正进行着推广电力牵引的巨大工作。

仅在第六个五年计划的过去两年內，就有2400公里的貨运最繁忙的綫路实行了电气化。

与其它牵引种类相比，电力牵引是最完善和最有发展前途的一种牵引方式。电力牵引有很高的效率：在由旧式的热电站供电时，等于16~18%；在由新式的热电站供电时，为26~30%；在由水电站供电时，达到60~65%。而蒸汽牵引的平均效率却只有4~5%。

預期在将来，水电站供电的比重增长后，高压电網由热电站和水电站混合供电，将使电力牵引制的效率至少为40~45%，这是任何其它一种牵引方式所达不到的。

原子能的应用对解决国家动力供应問題提供了完全新的可能性；同时并扩大了铁路电气化的发展远景，因为在使用水电站的同时，使用原子能发电站来供給电力牵引所需的电能便可完全解决供电問題。

我国和外国在鉄路上使用电力牵引的多年經驗証明，电力牵引所有最重要的技术经济指标都比蒸汽牵引有很大的改进。例如：机車車輛的平均日走行公里增加30~50%；列車重量提高40~60%；通过能力增加30~70%；运送能力增加70~150%；运输成本降低 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{3}{8}$ ；维护人員数量减少等。

因此，投入电力牵引固定设备的資金，在5~6年乃至更短的期間就可以收回。

与采用它种牵引不同，采用电力牵引是促进铁路邻近区域工农业发展的一项综合性的国民經济措施，它的意义早在按照 В. И. 列宁的指示，并在他的指导下所拟定的俄罗斯国家电气化計劃中就指出来了。

电力牵引唯一最大的缺点是它的最初设备費用高和耗銅量大。

如果接触網采用50赫的工頻（或一般常說的标准頻率）单相电流供电，便可以在很大程度上消除这些缺点。

在工頻单相电流制中，由于接触網的电压不用直流制的3仟伏，而用25仟伏的高压，因此可以使牵引变电所之間的距离由20~30公里增加到60~80公里，并且可以縮減接触網的截面，而减少接触網的用銅量。供电设备的初步費用亦减少約二分之一，并由于运营費用的降低，这些費用在3~4年內就可以收回。

因此，就材料和費用來說，用同样数目的投資所能修建的工頻单相电流制电气化鉄路綫路的长度，要比直流制的长得多。

在我国莫斯科-庫尔斯克-頓巴斯鉄路的奥热列里耶——帕維列茲区段上使用离子变流机电力机車和供电设备运营的經驗，象国外的类似經驗一样，充分証明了工頻单相电力牵引制的高度經济效果和工作能力。

第一章 电力牵引制及其比较

第一节 电力牵引制

目前电气化铁路根据电流制分有直流、三相交流、低频单相电流和工频单相电流几种。

每种牵引制又按接触网电压的大小，交流电频率的高低有各种不同的分类。

现根据大约1957年年底的情况，将各个国家的电气化铁路按电流制和电压的大小分布情形列于表1。

国外电气化铁路长度表（公里）

表1

国 名	直 流			单 相 电 流			三 相 电 流	合 计	
	3 千伏	1.5 千伏	2.4, 1.2 千伏及 1.2 千伏以下	50赫; 16.20 和 25 千伏	25赫; 6.5和 11 千伏	16% 赫; 12和15 千伏	16% 赫; 3.7 千伏	公里	占铁路 网长度的 %数
I、欧 洲									
比利时.....	794	14	—	—	—	—	—	808	15.7
匈牙利.....	—	—	100	257	—	—	—	357	4.5
意大利（国营）.....	5385	—	15	—	—	—	1325	6725	40.0
波兰.....	457	—	77	—	—	—	—	534	2.1
捷克.....	165	29	23	—	—	—	—	217	1.6
南斯拉夫.....	122	—	—	—	—	7	—	129	1.0
英国.....	—	222	1415	15	—	—	—	1652	5.0
荷兰.....	—	1400	—	—	—	—	—	1400	4.4
丹麦.....	—	60	—	—	—	—	—	60	2.0
西班牙（国营）.....	597	832	—	—	—	—	31	1460	11.1
法国.....	—	4239	214	1233	—	57	—	5743	14.5
奥地利.....	—	—	—	—	91	1563	—	1654	27.4
德意志民主共和国.....	—	—	331	—	—	88	—	419	—
挪威.....	—	—	—	—	—	1337	—	1337	30.5
卢森堡.....	18	—	—	16	—	—	—	34	9.0
德意志联邦共和国.....	—	—	65	56	—	2449	—	2571	8.5
葡萄牙.....	—	27	—	70	—	—	—	97	2.7
土耳其.....	—	—	—	28	—	—	—	28	—
瑞士（国营）.....	—	15	—	4	—	2884	—	2903	97.6
瑞士（私营）.....	—	136	805	—	—	1100	22	2063	95.0
瑞典（国营）.....	—	—	—	—	—	6800	—	6800	45.0
欧洲部分合计.....	7538	6974	3046	1679	91	16285	1378	36991	11*

續上表

国 名	直 流			单 相 电 流				三 相 电 流	合 計	
	3 千伏	1.5 千伏	2.4; 1.2 千伏及 1.2 千伏以下	50赫; 16.20 和 25 千伏	25赫; 6.5 和 11 千伏	16%赫; 12 和 15 千伏	16%赫; 3.7 千伏		公里	占铁路網长度的 % 数
I、北 美										
美国.....	1200	57	885	—	1885	—	—		4027	1.1
加拿大.....	—	—	60	—	—	—	—		60	0.1
北美部分合計.....	1200	57	945	—	1885	—	—		4087	1.0*
II、中 南 美										
墨西哥.....	96	—	—	—	—	—	—		96	0.4
巴西.....	1476	74	—	—	—	—	—		1550	4.1
智利.....	267	39	45	—	—	—	—		351	3.6
阿根廷.....	—	—	112	—	—	—	—		112	0.3
古巴.....	—	—	249	—	—	—	—		249	5.0
委内瑞拉.....	—	50	—	—	—	—	—		50	5.0
危地馬拉.....	—	44	—	—	—	—	—		44	5.0
哥斯达黎加.....	—	—	—	—	—	138	—		138	19.0
中南美部分合計.....	1839	207	406	—	—	138	—		2590	1.8*
IV、非 洲										
阿尔及利亚.....	295	—	—	—	—	—	—		295	7.0
摩洛哥.....	725	—	—	—	—	—	—		725	42.0
下刚果.....	—	—	—	342	—	—	—		342	12.0
南非联邦.....	1410	71	—	—	—	—	—		1481	6.8
非洲部分合計.....	2430	71	—	342	—	—	—		2843	3.8*
V、亚 洲										
印度尼西亚.....	—	112	—	—	—	—	—		112	1.7
印度.....	142	384	—	—	—	—	—		526	1.0
朝鲜民主主义人民共和国.....	51	—	—	—	—	—	—		51	—
日本(国营).....	—	2227	151	76	—	—	—		2454	11.2
亚洲部分合計.....	193	2723	151	76	—	—	—		3143	1.6*
VI、澳 洲										
澳大利亚.....	—	639	—	—	—	—	—		639	1.3
新西兰.....	—	108	—	—	—	—	—		108	1.9
澳洲部分合計.....	—	747	—	—	—	—	—		747	1.2*
总 計.....	13200	10779	4548	2097	1976	16423	1378		50401	5*

* 表示占該洲全部铁路網长度的近似百分数，其中包括未列入表内的国家。

上表所示的分布情况，在某种程度上是偶然性的，因为对个别国家来说，在许多情况下，并不是根据精确的技术经济比较的结果，而是在各种不同的因素影响下来选择某种电流制的，在这些因素中，个别的电器公司和机车制造厂的利益占据了相当的位置。

此外，许多国家在二十年代就走上了广泛实行铁路电气化的道路，现在再要这

些国家将已经选定的电流制改为另一种电流制，即使这种电流制具有显著的优点，但无论从技术方面或是从经济方面来说，都是不适宜的。

直流制。直流制是最流行的电流制，在直流制中，接触网和牵引电动机的电流种类是一样的。

直流电气化铁路占世界电气化铁路全长的57%。

直流制所用的电压在600~3000伏之间。

根据铁路的用途，采用各种不同的电压，这些电压可以规定为三种：‘低压、中压和高压。

低压（600、650、750和800伏）用于市内铁路（电车、地下铁道）和深入市区的引入线，偶尔也用于市郊线路。采用低压时，机车车辆通常用接触轨（第三轨）供电。在市郊运输繁忙的干线上，只有英国的南方铁路和在个别情况下的其它国家（法国、美国）的市郊铁路区段采用低压。低压电气化铁路占全部电气化铁路长度的9.3%，或者占直流电气化铁路长度的16%（不包括地下铁道和电车）。

中压（1000、1200和1500伏）用于由架空电网供电的市郊铁路、地区铁路和铁路干线。

在占电气化铁路总长度21.8%，或占直流电气铁路长度37%的中压直流电气化铁路中，大部分区段是采用1500伏的电压。

采用1500伏电压的有法国一部分电气化铁路，西班牙一部分铁路，澳大利亚、荷兰和亚洲国家的全部铁路。

在苏联，只有在1955年以前实行电气化的铁路才允许用1500伏的电压，并且主要是用在那些使用电动车辆牵引的繁忙的市郊运输铁路上。

高压（2400和3000伏）用于由架空电网供电的市郊运输、地区运输和远程运输铁路。

在高压组中，主要是3000伏电压，占全部直流电气化铁路的46.2%，占世界电气化铁路的26.2%。波兰、捷克、意大利、比利时、摩洛哥、阿尔及利亚、南非联邦等国的铁路均属于高压电气化铁路。

在苏联，主要是采用3000伏的电压，目前实行电气化的铁路干线和市郊铁路都采用这种电压。全部电气化铁路，约有90%均采用3000伏的直流电。

2400伏的电压应用于美国和加拿大的几个铁路区段。法国有一个区段原来采用这种电压，后来改成了1500伏。

4000伏的电压仅在1921年意大利的一条私营铁路（都灵——兰綽——切列斯，42公里）曾经采用。由于机车车辆在运营中发生的困难，限制了这种电压的继续使用，所以到后来降低到3000伏。

直流电气化铁路的供电原理图如图1所示。

直流制的主要优点是具有可靠的经过多年实际运用得到验证的串激牵引电动机，这种电动机具有适合牵引用的自动特性，可以广泛而平稳地调整速度，并可以进行再生制动或变阻制动。

由于串激直流电动机的牵引质量很高，在起动次数很多的市郊铁路、电车和地下铁道，差不多全都用直流。

直流的另一优点，是电力机车可以按《多单元制》工作，并且不致使电路特别复杂。

直流制的缺点是：

电力机车的构造比较复杂，里面装有起动变阻器；

起动时能量损失大；

牵引变电所的设备价值昂贵，构造复杂。

对经济地送电和配电来讲，接触网的电压太低，另一方面，对设计构造良好而又可靠的牵引电动机和设备来讲，又感到电压太高。对于满载列车以高速运行的货流大的区段，必须大大加大接触网导线的截面和缩小牵引变电所之间的距离，这样就会增加供电设备的费用。

苏联和外国 的多年经验和多次试图将电压提高到4000~5000伏来改进直流制的效率，都证明了由于运用中产生的一些实际困难，特别是控制设备和辅助设备工作不够可靠，不得不放弃提高电压所能得到的接触网导线截面稍微减小的好处。

直流的另一缺点是出现所谓《迷流》的漏电现象，由于这种电流，使得地下的金属设备受到电蚀，并且在许多情形下，连地面上的金属设备也会受到这种电蚀。为了保护这些设备，需要有专门的措施。

整流电流由于有谐波成分，故对有线通信设备产生感应干扰；因此需要在牵引变电所安装平滑装置，平衡电话电路，使通信线路部分地离开铁路线，使通信线路电缆化。

设有自动闭塞装置时，需要将直流轨道电路改为交流轨道电路，并安装轨道抗流线圈。

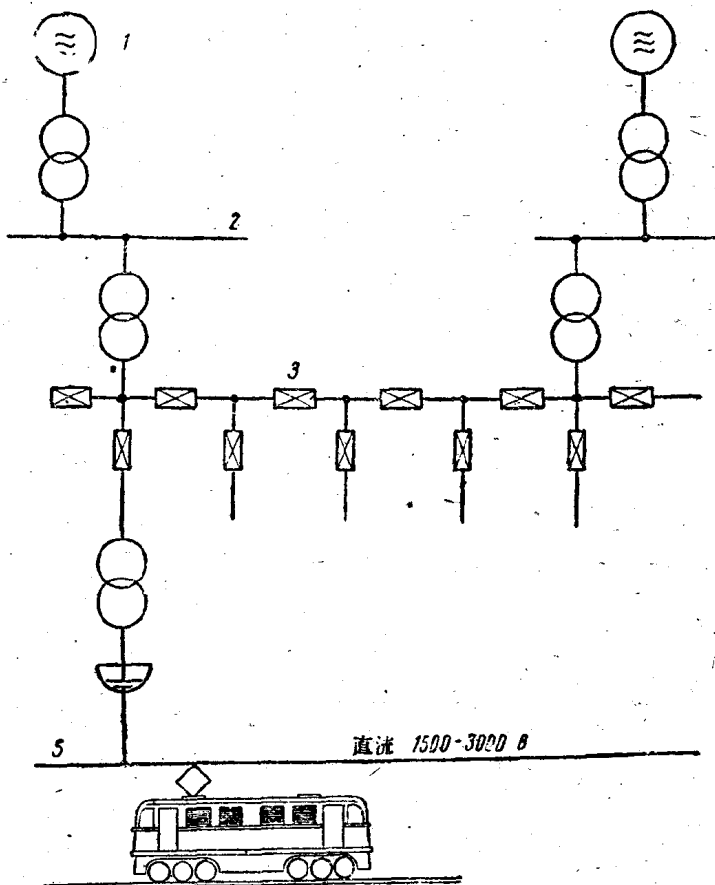


图1. 直流电气化铁路供电原理图：

1——50赫三相电流区域公用发电站；2——100~220千伏、50赫三相电流公用输电线；3——35~110千伏、50赫三相电流牵引变电所供电用输电线；4——水银整流器牵引变电所；5——1500~3000伏的直流接触网

三相电流制。三相电流制是过了时的现在最不流行的电流制；在全部电气铁路中，采用这种电流制的线路总共只有2.7%。

在意大利、西班牙和瑞士铁路的个别山区线路区段，过去和现在都采用由各种频率和电压配合的三相电流：3~3.3千伏、15赫；3.6~3.7千伏、 $16\frac{2}{3}$ 赫；5.5千伏、25赫；10千伏、42赫。现有的三相电流区段中，最长的部分是电压3.7千伏、频率 $16\frac{2}{3}$ 赫的线路，因为采用较高的电压会在修建双接触网中引起困难。

三相电流制的优点是：牵引变电所简单，没有复杂的变流机，电力机车的构造简单。

例如，当电压为3.6~3.7千伏时，而在个别情形下在5.5千伏时，接触网的电压不用变压器就直接送到牵引电动机。

三相异步牵引电动机具有很高的效率和简单而牢固的结构。电动机在自己的牵引性能方面无论牵引力如何变化，均能保证固定速度。采用三相异步电动机，在超过同步速度时，就自动转为发电机，从而容易实现再生制动。三相电力机车具有很高的单位功率。

三相电流制的缺点是：

双接触网的构造复杂，特别是在站场上；

在低频时(实际上有采用低频的)，除牵引变电所外，尚须有专用的发电站或特设的变电所。在这种情况下，唯一的收获是可以采用成组传动的低速牵引电动机。然而在旋转力均匀地传到车轮和对线路的作用方面，成组传动都远逊于齿轮传动；

三相电流电力机车的走行速度有限，起动不经济，速度变换不平稳，致装有这种电动机的系统不适于电动车组牵引；

个别车轴的电动机之间的负载分配不合要求，例如，由于动轮的直径不同，使负载分配不均。

由于这些缺点，三相电流制正被淘汰，在采用三相电流制的地方，都代之以更完善的电流制。新的三相电流电力机车现在哪里也不设计和制造了。

低频单相电流制。低频单相电流制在流行范围方面居第二位。低频单相电气化铁路占世界电气化铁路全长的36.5%。

欧洲的电气化铁路(德国、奥地利、瑞士、挪威、瑞典)大约有一半(长约16000公里)采用 $16\frac{2}{3}$ 赫、15千伏的单相电流。

低频单相电流采用下列各种电压和频率：10~15千伏、15赫；6千伏、 $16\frac{2}{3}$ 赫；15千伏、 $16\frac{2}{3}$ 赫；15千伏、20赫；3~6千伏、25赫；6~10千伏、25赫；11千伏、25赫；16千伏、25赫。

使用最普遍的是频率 $16\frac{2}{3}$ 赫、电压10~15千伏和频率25赫，电压10~25千伏的单相电流。采用这两种电流制的低频单相电气化铁路的长度分别为16423和1976公里，占低频单相电流制所有区段长度的83%和7.5%。

频率 $16\frac{2}{3}$ 赫的单相电流铁路所用的电源为专用发电站(图2, a)或公用供电网。在后一情况下，牵引变电所装有变三相电流为低频单相电流的旋转变流机(图

具有笨重的需要仔細維護的电刷裝置和整流子，使用起來不經濟；

对通信綫路的干扰很大。有綫通信綫路中的感应电压很高，故不得不采取專門的防护措施。在各种防护措施中，最有效的办法是将架空通信綫路改为電纜綫路并使通信綫路离开电气化鐵路路基1.5公里以上。

工頻单相电流制。工頻单相电流制与其它一切的电流制都不一样：在这种电流制的供电設備中，不变換电流种类，因此接触網可以直接由工业和民用电源供电（图3），这就保证了动力系统的一致。

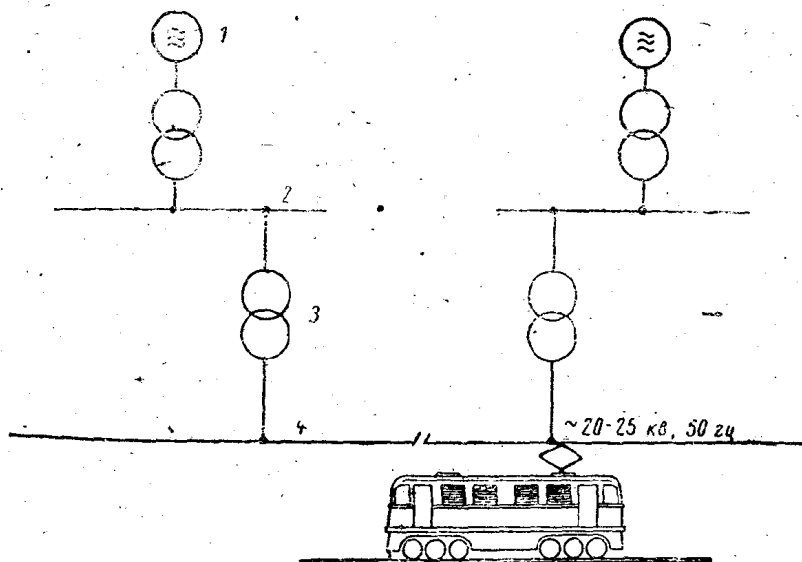


图3. 由50赫高压区域电力網供电的50赫单相电流电气化鐵路供电示意图：
1——高压520赫三相电流公用区域发电站；2——50赫高压配电網；3——50赫降压变电所；4——50赫、20~25千伏单相电流接触網

这一主要优点使得工頻单相电流制成了現在最經濟和最有发展前景的电流制。

工頻单相电流制的其它优点是：

接触網的电压高；

牵引变电所构造簡單，造价低；

高压接触網与电力機車上的低压直流或交流牵引电动机的优点能够結合起来。

当接触导綫的电压为20~25千伏时，变电所之間的距离可以达到75公里。变电所之間的距离既如此之長，所以在許多情况下可以把变电所設在現有的供电網区域变电所的附近，因此高压綫的长度大为縮短。变电所本身成了純粹的变压所。

高压接触網的銅綫截面，可减小到100~150毫米²，而在直流1500伏时为400~800毫米²，3000伏时为300~500毫米²。

在大多数情况下，截面决定于接触悬挂的机械强度或短路电流的大小。

象在低頻交流时一样，不需要采取專門防止电蝕的措施。

特別重要的是可以降低修建接触網的用銅量。减少銅的消耗在国民經济上的意义可以用下面的一个例子來說明。在接触網的截面为400毫米²时（应当认为这是适

于貨运繁忙区段的最小截面)，1公里长的3000伏直流双綫区段的耗銅量約为10.3吨，超过了制造一台电力机車所需的用銅量（一台 H0 型电力机車的用銅量为8.26吨）。因此，如果单相电流接触綫的用銅量减少三分之二，則每三公里綫路所节省下来的銅就可以制造一台电力机車。

工頻单相电流制电力牵引对于工业运输有很大的而現在还利用得很少的潛力，所以它的发展前景是广闊的。

由于截面小，所以修建接触綫比較容易，这使得新的电流制对于在露天开采有用矿物的地区修建电气化鉄路特别适宜。

工頻单相电流制的缺点是：

制造一台工作可靠的頻率50赫用的牵引电动机比較困难。因换向的困难随着頻率的增加而增加；

单相負荷可造成三相供电綫的不平衡，在供电电源的功率很小时，这种不平衡特别显著；

牵引电流对通信綫路产生感应干扰，为了防止这种干扰，需使通信綫路電纜化（采用專門的電纜保护包皮或不用保护包皮），或需把架空通信綫路迁离鉄路路基1.5公里以上。在将来，还可以用微波接力通信代替有綫通信；

必須将自动閉塞軌道电路及其設備改装为非标准頻率，或改用直流供电；

为了保证信号、集中和閉塞装置正常工作，需要将軌道电路供电用的交流改为非标准頻率（41、60、73、83赫），为此，需要設專門的变頻机。这样信集閉的一些設備就应当改为新的頻率；

必須在半自动閉塞綫路、电气路签閉塞綫路以及站內閉塞和集中綫路上一律敷設電纜。

第二节 工頻交流电气化鉄路的发展

工頻交流在电气化鉄路方面的应用，从出現电力牵引的初期就已經开始。在电能实际用于鉄路牵引的最初年代里，亦即在十九世紀末和二十世紀初，其它經濟部門的电气化还处在很低的水平，还难談到什么交流标准頻率和标准电压等等。每个用戶本身都在关心能源問題，因电能还没有成为由專門的企业来生产的《产品》。

当时各鉄路的一些电气化区段的用电，一般均由《私用的》小型发电站来发电（单相、三相、直流）供給电力机車車輛使用。

因此，在这个时期出現了頻率接近現代标准頻率的交流电气化区段。

例如，1895年在瑞士的卢加諾开办了长4.9公里的第一条400伏、40赫三相电流的市区鉄路。車輛的三相电动机的功率为20馬力。1892年，在德国的利赫滕費爾德的一条試驗区段上，一些电器公司試驗用10000伏、25赫的三相电流进行牵引。在这些試驗以前，还試驗了一台三相电流牵引电动机，这台电动机后来（1893年）在芝加哥世界展覽会上作了展覽（图4）。

匈牙利的甘茲公司的一些工厂曾在阿尔托夫勒尔綫路上用3000伏电压的三相电

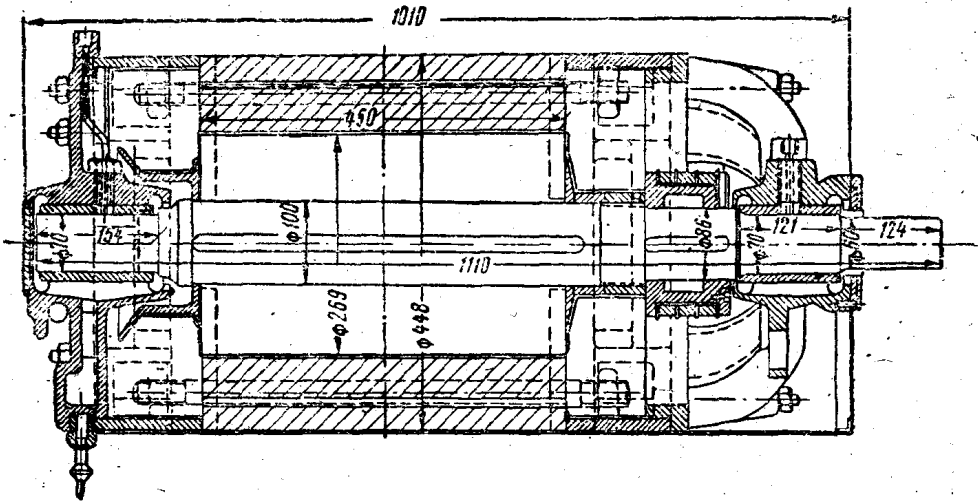


图4. 第一台三相牵引电动机

流和500伏电压的单相电流进行电力牵引试验。

1898年，西门子公司工厂根据三相电流区段试验的良好成果，在施坦施塔德——恩格尔堡铁路区段修建了一条三相电流电气化铁路。

此后不久，在布尔格道尔夫和吐恩（瑞士）之间修建了长40公里的欧洲第一条电压750伏、频率40赫的三相交流电气化铁路干线。1899年，第一辆三相电力机车开始在这条线路上运用，这辆电力机车的功率为300马力，装有两台或并联或串联的电动机，速度为36和18公里/小时。当时重32吨的四轴电动车辆也都只有一个行走速度——36公里/小时。

在1901~1903年间，德国铁路借助于西门子公司和德国电气公司的工厂，在马里安费尔德——綽威区段修建了一条14000伏、45赫（后改为10000伏、50赫）的三相电流电气化铁路。电流的频率和电压在发电站调整。区段内的接触网为三线接触网。

在这一区段上所用的电力机车的功率为500和1000马力，摩托车辆的功率为1000马力。

1902年对一辆重97吨的0-2——2-0式电力机车进行了长时间的速度试验，速度达到200公里/小时。1903年，按200公里/小时速度设计的一辆重77吨的、装有四台牵引电动机的六轴摩托车，在试验中达到210公里/小时。

1900年，在巴伐利亚的穆尔纳乌——奥柏拉麦高铁路区段修建了一条三相电流电气化铁路。后来这一区段在1904~1905年间改成了5000伏。

意大利的瓦尔特林电气化铁路（160公里）于1902年开始了运营，该电气化铁路采用的是3700伏、 $16\frac{2}{3}$ 赫的三相电流。使用接触网满电压工作的鼠笼式感应电动机电力机车证明效果良好，这成了三相电流制以后在意大利广泛发展的基础。

1905年，在与意大利铁路邻接的辛普朗隧道区段（瑞士），为使列车直通，用同一电流制（3700伏、 $16\frac{2}{3}$ 赫）实行了电气化。

1909年，美国北方大铁路的卡斯卡德隧道区段实行了电气化，原亦采用三相电

流(6600伏、25赫),后在1927年改为11000伏、25赫的单相电流。

由于降低频率不便,意大利铁路决定试验当时在意大利为标准频率的42赫的三相电流电力机车车辆。频率增加使接触网的电阻亦增大,因此接触网的电压提高到10000伏。

1926~1928年间,在长173.7公里的罗马——提沃利——苏耳莫纳线路上,修建了一条10000伏、42赫的三相电流电气化铁路。为这条铁路制造了18辆电力机车;其中4辆为E570型0-5-0式的双速位货运电力机车,其余14辆为E470和E472型1-4-1式的客运电力机车。E472型电力机车在速度为75公里/小时下,其小时功率达到2500马力。

这些电力机车比低频电力机车复杂。为了将电压从10000伏降到牵引电动机所需的900伏,需要安装变压器。电动机采用齿轮传动。电动机的结构没有频率 $16\frac{2}{3}$ 赫的电动机完善,因为要达到同样的转数需要多两倍的磁极。

在两种电压(10000和3700伏)和两种频率(42和 $16\frac{2}{3}$ 赫)的交界站,两种形式的电力机车应当都使用电压3700伏、频率 $16\frac{2}{3}$ 赫的电流;而原来使用电压10000伏、频率42赫电流的电力机车的速度,则应当为其正常速度的 $\frac{1}{3}$ 左右。

罗马——苏耳莫纳线路的运用经验表明,双线接触网的缺点当机车在平原区段以高速行驶时特别显著。

在第二次世界大战期间,罗马——苏耳莫纳线路大部分遭到破坏,以后利用恢复时期将这条线路改成了3000伏的直流。

采用频率25赫单相电流牵引的历史也是颇有兴趣的。

频率25赫单相电流牵引在美国颇为流行,有41%的电气化铁路采用这种电流制。

在大多数情况下,这些铁路均由25赫的三相电力网供电,在这种情况下,低频电流电气牵引由公用电力网供电,而不采用变频器。部分的25赫单相电流铁路,由于在所经过的区域内没有25赫频率的电力网,或者由于25赫电源的功率不足,则由60赫的电力网供电,同时并采用旋转变频机。

在欧洲国家,使用25赫单相电流牵引的非常有限。个别这样的区段通常由专门建立的发电站供电。

采用这种频率时,产生了制造可靠的牵引电动机的困难;必须在功率、转数、极数、磁通量和变压电动势之间选定一个最好的比例,并应找出降低变压电动势和改进整流的方法特别是在起动时是如此。

在25赫的单相电流中,曾使用对电动机直接供电电路和在电力机车上变单相电流为直流或三相电流的电路。

1903年,初次在长4公里的尼德尔绍涅氏依德——施平、德列尔斯费尔德(德国)区段上用6000伏、25赫的单相电流进行了试验,结果效果不佳。

1906年,第一辆单相整流子电动机电力机车开始在美国的斯波坎——英兰德区段运营。同年,在纽约——纽黑文和哈特弗德的11千伏、25赫的单相电流电气化铁

路上，有42辆整流子电动机电力机车开始运用。

1907年，在伊利铁路长55公里的罗契斯特——纽约区段，修建了一条11000伏、25赫的单相电流电气化铁路。1934年，这条铁路停止了运用。

自1907至1929年间，在纽约——纽黑文和哈特弗德铁路上修建了一条长229公里的11000伏、25赫的单相电流电气化线路。

1926~1928年，为这条铁路制造了五辆单相-直流变流机电力机车(两种型式)，其中包括功率1120马力的0112-0116型1-2+2-1式电力机车(图5)。

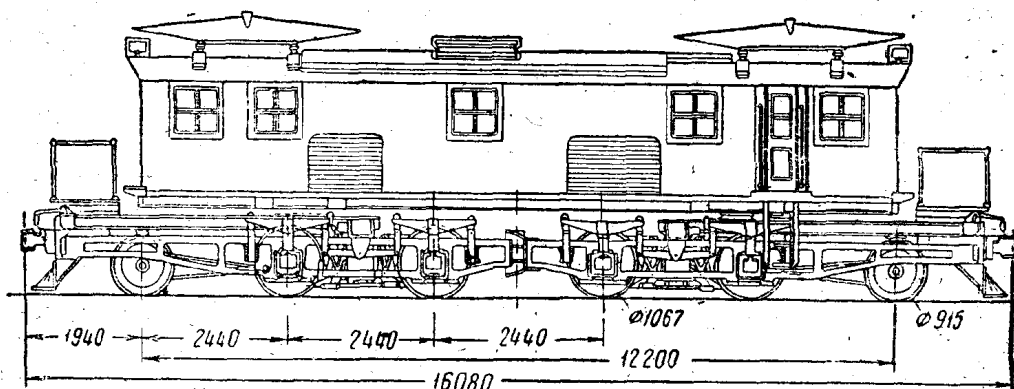


图5. 纽约——纽黑文和哈特弗德铁路的0112-0116型1-2+2-1式
单相直流变流机电力机车

变流机电力机车用于在不适于使用整流子电动机电力机车的山岳地段牵引慢行超轴列车和供改进接触网和高压线路的功率因数之用。

1914年，为这条铁路制造了世界第一辆利用多阳极水银整流器变单相电流为直流用的电动车，但试验的效果不佳。

只是在1952年，纽约——纽黑文和哈特弗德铁路才吸取其他铁路使用离子(水银和引燃管)变流机的成功经验，向通用电气公司的工厂订制了10辆功率6000马力的0-3₀——3₀-0式电力机车和向西屋公司的工厂订制了100辆引燃管式摩托车组(适用于两种电流制)。

1915~1935年间，宾夕法尼亚铁路在长618公里的纽约——华盛顿线路上修建了一条11千伏、25赫的单相电流铁路。1938~1939年间，这条铁路的长410.5公里的哈里斯伯格线路也实行了电气化。

沟通各大城市的宾夕法尼亚铁路是美国客货运输最密的电气化铁路之一。这条铁路一年内消耗于牵引的电能超过十亿千瓦小时；电能取自25赫的三相电流发电站以及60赫的三相电力网。为了将后一种电流变为25赫的单相电流，采用电动发电机。

该铁路的主要电力机车车辆由单相整流子电动机摩托车和电力机车配备而成，另外还有变流机电车。

第一辆装有同步变相机的25赫单相电流试验电力机车早在1917年就已制成。这辆重236吨的1-3+3-1式电力机车在当时是功率最大的电力机车之一。现在这条铁路在运用中使用装有引燃管整流器的大型单相-直流变流机电力机车，这种电力机