

工頻單相電力機車

Л·М·特拉赫曼 編

人民鐵道出版社

序 言

根据苏共二十次代表大会关于第六个五年计划的指示，规定要完成大量生产工频交流电力机车的任务。因此，介绍现代的国外电力机车制造经验，特别是以工频交流运行的电力机车车辆，是很有益处的。

在这本文集中，叙述了在法国铁道瓦伦西恩——齐昂维尔线上运行的50赫单相电力机车，以及美国的具有引燃管的25赫单相电力机车和摩托车辆。

在技术科学候补博士Л.М.特拉赫曼的论文中，陈述了现代工频单相电力机车和摩托车辆的特性。

目 录

序言

現代的工頻交流电力機車和摩托車輛 Л. М. 特拉赫曼	1
瓦倫西恩——齐昂維尔綫路上的单相电力機車 卡尔諾 (M. Garreau)	30
裝置着由单相同步电动机和直流发电机所組成的变流 机組的C ₀ -C ₀ 14100型电力機車 坦尼 (M. Daney)	43
带有单相-三相变流机組的 C ₀ -C ₀ 14000 型电力機車 波德麦尔 (M. C. Bodmer), 萊夫拉茨 (M. P. Leyvraz), 安捷列格 (M. E. Anderegg)	69
具有引燃管整流器的B ₀ -B ₀ 型电力機車 路森奥尔和馬 先菲尔—达新 (M. Rossignol et M. Mechiefert-Tassin)	94
具有单相整流子电动机的B ₀ -B ₀ 型电力機車 赫依德曼 (M. Heidmann)	131
法国东北鉄路上单相电力機車的运用結果	152
在宾夕法尼亚鉄路上的引燃管电力機車 赫阿捷盖尔 (C. C. Whittaker), 赫特契松 (W. M. Hutchison)	153
紐約——紐哈文綫路上具有整流器的电力機車 高恩斯 (F. D. Gowans)	172
应用在紐哈文綫路上的引燃管摩托車輛 埃姆斯 (E. W. Ames), 胡奇生 (W. M. Hutchison), 莫尔 (V. A. Moore)	184
电机工程師們討論电力牽引問題	193

现代的工頻交流电力機車和摩托車輛

技术科学候補博士 Л. М. 特拉赫曼

I、应用50赫交流电力牵引的工作特性

各国铁路干綫的电力牵引曾向二个主要的方向发展：直流制和低频交流制——欧洲为 $16\frac{2}{3}$ 赫，美国为25赫。

世界上电气化铁路总长的60%左右是直流电气化的，而35%左右是低频交流电气化的。

某些国家（意大利、瑞士）也在小范围内采用三相电流制牵引，但未得到广泛的应用，因为需要装設二根接触导綫，既使供电系統复杂化，并且電網的允許电压也受到限制，于是就不可能充分利用交流电的优点。

在欧洲，所有的干綫运输和各种断面的区段上都采用直流制和低频交流制。随着电力機車制造技术的突飞猛进，这两种电流制同时也得到了发展，但是其中任何一种电流制，就各主要的技术经济指标来说，总还没有取得超越另一种电流制的决定性优点。

直流制的主要优点是能采用简单而可靠的整流子式牵引电动机。这种制度的主要缺点是：电压比较低，以致必須修建較多的牵引变电所和重型接触網，同时在电力機車上的牵引电动机須采用变阻启动。

直流接触網的电压值总是一个折衷值，因为这个数值是在两个相互矛盾的意图（一方面希望减少供电費用，而另一方面又希望不致于超出牵引电动机的最佳电压）下相互迁就地规定出来的。

在目前的技术条件下，可以认为干线牵引接触网的直流电压不宜采用高于3000伏的电压，再继续提高电压，例如提高到4500或6000伏，则当直接由电网给电动机供电时，会增加电动机单位功率的重量，而使得电力机车车辆的牵引指标变坏了。

低频交流制的主要优点是接触网可采用高压。这种电流制的显著优点是不但能在宽范围内经济地调节电力机车的速度，并在最大运行速度下发挥持续牵引力。

在采用低频 $16\frac{2}{3}$ 赫交流的各欧洲国家，须建立专门的电站给铁路电气化区段供电，这在电气化的初期，当电力系统的发展比较慢的时候，经济上是合算的。

但是，以后，随着建设大容量电力系统，再建造个别用于牵引的电站就没有利了，因此，便开始采用由迴转变流机将50赫的频率变为 $16\frac{2}{3}$ 赫的专门的牵引变电所。这种变电所比起使用水银整流器的相当进步的三相直流变电所来，较为复杂和昂贵。同时，直到现在，试图制造单相变电所所用的运用上可靠的离子变流器（从50赫变为25赫）的试验还没有获得成功。

由于必须采用变流器的牵引变电所，低频交流制牵引胜过直流制的主要优点在一定程度上也就丧失了。同时，运用经验指出，直流牵引电动机，在整流的稳定和维修费用方面比起低频交流整流子电动机来是有着决定性的优点的。

同时运用经验也指出， $16\frac{2}{3}$ 赫单相整流子电动机在低速范围内增大的变压器感应电动势的危险后果，在一定程度上与起动的持续时间有关。根据统计资料，德国的货运电力机车（E-90型）的整流子电动机，平均检修间的走行公里为320000公里，其实际走行公里数在很大范围内波动（从10000到625000公里），这是由于持久的起动而引起整流子

故障的緣故^①。

同时，用最小的加速度可以大大地提高列車重量，尤其是在縱断面平坦的鉄路上：例如在5%的限制坡度上，加速度从8减小到2.5公分/秒²，粘着系数分别为0.2和0.3时，列車重量可以增加0.7和1.6倍。

一方面，由于从区域发电厂饋电，必須修建变流器的变电所，并且还要保护架空通信綫路免受交流电影响；而另一方面，也由于单相整流子电动机的缺点——因之就促使許多欧洲国家和后来进行鉄路电气化的其他国家选用了直流制，其中包括苏联和法国。

在意大利亦采用了3000伏直流制，并已把以前許多三相电流的电气化鉄路改成了或繼續在改为直流制。

从1932年起，苏联电气化鉄路干綫所采用的3300伏直流制，保証使得电力牵引比蒸汽牵引有着更高的牵引技术-經濟指标。

有关摩托車輛牵引采用3000伏电压的困难，近年来已經克服了，現在，苏联的市郊鉄路正在此电压下进行电气化。

但是，在大量消耗有色金属的供电系統中，直流制須要較大的投資，这也是使鉄路电气化发生困难的因素之一，尤其是在貨运繁忙的区段。

由于上述两种主要牵引制的缺点，近25年来在苏联和国外进行了交流50赫制的研究工作，这种牵引制所需要的供电装置及建筑費用是最小的，而且像以后还要指出的那样，可以制造出在牵引性能方面优于前两种主要牵引制的电力機車。

第一条用50赫交流进行电气化的綫路是匈牙利的布达佩

① Electricité。1953, 6月№195—重刊，專門附录，第6頁。

斯——赫捷亚什哈尔区段，它在1934年开始运用。

1936年，德国赫林塔利山区铁路的試驗区段，亦以50赫交流来电气化。

苏联在1938年制造了具有水銀整流器的OP型50赫的交流电力機車。

1932年~1938年的技术水平，还不可能創造出足够简单且运用可靠的50赫交流电力機車，那时也不可能作出这种制度在运用中的优点的决定性結論。仅在最近几年，在电机制造、变压器制造和整流器制造方面有了很大的进步，才允許重新开展50赫交流牵引制的工作。

苏联現在已用50赫交流制将奥热列里——帕維列茨的試驗运行区段电气化。制造并試驗了第一台本国出品的具有离子变流器的单相直流电力機車。

在国外，近年来在这方面的的工作是有很意义的。特别是法国，在他們那里具有了很大的規模。如按照电網电压为1500伏的直流制来发展法国的电力鐵道，在电網和变电所修建方面需要很多的投資，故虽多次拟定了广泛进行铁路电气化的計劃都沒有实现。因此，法国在第二次世界大战后，便开展了50赫交流牵引制的研究和运行工作。

这些工作是从研究赫林塔利铁路（西德）的运行經驗开始的。

1950年薩沃依（法国）的埃克斯-列-班——拉罗什-維尔-佛朗铁路的試驗区段进行了电气化，这区段具有20%的坡度，长约78公里，在1954年还延长了18公里，并且电压从20千伏改变为25千伏。由于这个区段成功的运行經驗，于是便决定电气化法国最繁忙的长363公里的瓦倫西恩——齐昂維尔铁路区段（位于法国东北部）；为了該区段的电气化，首先訂制了105台电力機車。

瓦倫西恩——齊昂維爾區段的第一个运行阶段，显示出了这样良好的效果，因而採納了以50赫交流制广泛使法国铁道电气化的计划。

在法国铁道的經驗基础上，英国亦採納了50赫单相电流制的铁道电气化计划。

1952年，以50赫交流电气化了长94公里的雅多特維利——秦克区段（比属剛果）：今后电气化的铁道拟增至340公里。

選擇电力機車車輛的型式，首先是电力機車的型式，是运用50赫交流最复杂的問題之一。

匈牙利鉄路的50赫交流电力機車是按照肯都·卡尔曼工程师系統做成帶有单相-三相变流机的电力機車。因采用了在同一机組中将变压器和換相器結合在一起的明智的結構設計，創造出了具有适当重量指数的变流机电力機車。

但是在匈牙利的第一批电力機車中，装备有轉換极数和組合傳动的沉重的低速异步电动机，現在这种电力機車在技术上已是过时的了。1950年干茨公司出品的一批电力機車已作了显著的改善，装設了变频机和沒有轉換极数且帶有个別傳动的牵引电动机^①。

五軸电力機車的重量是80吨，速度50公里/小时时的牵引力为13.5吨。这种电力機車一吨重的单位容量和法国鉄路上的具有单相-三相变流机的电力機車（在本文集中另有記載）相近。但是和法国电力機車不同之处是它有着繞綫式轉子的电动机，电阻起動（借助于液体电阻和換极时損失牽引力的分級調節速度）。肯都型的換相机像在第一批电力機車上的一样，具有油冷却的定子和水冷却的轉子，这就使得电力

^① 見B. H. 齊赫明和Л. М. 特拉赫曼所著的电力機車車輛第Ⅱ卷467頁，鉄道運輸出版社1951年（人民鉄道出版社已出版中文譯本）。

機車的構造大為複雜化了。

具有肯都型換相机的電力機車，由於其在應用上的複雜化沒有得到普遍的应用（除匈牙利以外，均未被採用）。

當以50赫交流電氣化赫林塔利鐵路區段時，製造了四台不同型式的電力機車：一台是具有整流子電動機的，一台是具有中間轉子的單相異步電動機的和二台具有真空管的陽極水銀整流器的單相-直流電力機車。可是在這些型式中，無論哪一種，在運行中都沒有得到足夠好的效果，主要是因為在1930年~1935年製造這些電力機車的時候，整流器製造和電機製造的技術水平還比較低。

在1944年，德國的專家們認為《遺憾的是；在電力機車改進方面雖作了很大的努力，八年的運行經驗在這方面還沒有能夠作出任何樂觀的結論》^①。

因此，以後在1945年~1950年期間，公認為最有前途的和能適合於現代要求的50赫交流電力機車的型式還沒有出現。

在雅多特維利——秦克區段上，使用了具有成雙單相整流子電動機（容量為 2×154 千瓦）的B₀-B₀型電力機車。

在埃克斯-列班鐵路試驗區段上，創造了四台電力機車，其中二台是埃利康和阿尔斯頓公司的標準頻率整流子電動機的六軸電力機車，一台是阿尔斯頓公司的具有水銀整流器的四軸電力機車，另一台是史奈特爾——西屋公司的具有異步電動機的單相-直流電動發電機六軸電力機車。

除了整流器電力機車外，所有的電力機車都可由1500伏直流饋電。

這些電力機車的主要數據載於表1中。

① Elektrische Bahn n. 1944, 3月-4月, 50頁。

法国铁路埃克斯-列-班——拉罗什-修尔-佛朗試驗 区段的50赫交流电力机车的技术数据

表 1

数据名称	电 力 机 车 的 型 式			
	具有电动机-发电机的单相-直流电力机车	具有整流器的单相-直流电力机车	具有可由 15000 伏直流馈电的整流子电动机的电力机车	
輪軸排列型式	$B_0-B_0-B_0$	B_0-B_0	C_0-C_0 ①	C_0-C_0
电力机车的重量(吨)	114	79	104	118
其中电气设备的重量(吨)	—	33.5	42.2	62.2
变流机重量(吨)	18	—	—	—
变流机型式	一台 1485 轉/分的异步电动机, 三台 800 伏的直流发电机	空气冷却的勃氮管型式的水銀整流器	—	—
由 1500 伏直流馈电的方法	变流机組的三部发电机作为牵引电动机的分压器	沒有措施	由直流电动机和单相 30—50 赫发电机組(容量为 367 千乏)的專門成專門的变流的直流电压变机組(容量为 984 千乏安)	
持續容量(千瓦)	2550	2000	3000	2700
小时容量(千瓦)	2810 (电压为 675 伏)	2090	—	2980
变压器容量(千伏安)	2900	—	2450	—
变压器的冷却	空气	—	油	—
最大速度(公里/小时)	120	105	90	100
起動調节的数目	42	29	16	22
电力机车單位容量的重量(公斤/千瓦)	44.8	39.5	34.8	43.8
电气制动	再生制动	沒有	埃利康商標獨立繼磁机的再生制动	变阻制动
輔助机器系統	—	由輔助相起動接入电阻的异步电动机	阿尔諾变換机和三相异步电动机	—

①现在运用 9 台这样的机车。

圖表 1

数据名称	电 力 机 車 的 型 式			
	具有电动机发电机的单相-直流电力機車	具有整流器的单相-直流电力機車	具有可由 15000 伏直流输电的整流子电动机的电力機車	
牵引电动机数目	6	4	6	6
整流子上的电压	900	675	250	2 × 218①
持续容量 (千瓦)	—	497	510	450
小时容量 (千瓦)	585	523	530	495
悬挂	支轴式		支架式	
电气设备制造公司	史奈特爾—西恩	阿尔斯頓	埃利康—文德爾	阿尔斯頓

①在电力機車中采用成双电动机 (串行的)。

埃克斯-列-班线路上的电力機車的技术指标均优于早先制造的50赫电力機車，但是在其运行方面，尚未得出作为定型的足够根据。

因此，在法国起初电化瓦倫西恩——齐昂维尔区間时，訂制了四种不同型式的电力機車，法国和其他国家的大公司参加了这些电力機車的设计和制造工作：(1) 具有电动机发电机的单相-直流电力機車 60 台；(2) 具有单相三相变流机的电力機車 25 台②；(3) 具有 50 赫整流子电动机的电力機車 15 台；(4) 具有引燃管变流器的电力機車 5 台。这些电力機車的主要数据載于表 2 和表 3 中。

在本文集的第一部分詳述了这四种电力機車。

法国制造的电力機車的研究工作和运行經驗指出，50 赫交流牵引制非但能节省供电的投资，还为制造有适当重量指数的变流器电力機車提供了可能性。这种电力機車比起直流电力機車和低頻交流电力机来有着很多的优越性。

单相-直流变流器的电力機車的牵引电动机可选用最适

②根据已有的消息报道，这种訂貨完全没有銷售。

宜的較低电压,这样可提高它們的运行可靠性,容許降低其重量,并可以和內燃機車的电动机統一起来。

瓦倫西恩——齐昂維尔綫路 (法国) 上电力機車的 主 要 数 据^①

表 2

数 据 名 称	电 力 机 車 型 式			
	具有电动-发 电机的單相直 流CC14100电 力機車	單 相-三 相 CC14000 电 力 机 車	具有整流子电 动机的BB13 000 电力機車	具有水銀整流 器的單相-直 流BB12000 电力機車
輪軸排列型式	C ₀ -C ₀	C ₀ -C ₀	B ₀ -B ₀	B ₀ -B ₀
粘着重量 (吨)	126	124	84	84
最大速度 (公里/小 时)	60	60	120	140/120
車輪直徑 (公厘)	1100	1100	1250	1250
电力機車持續功率 (千瓦)	1830	2520	2000	2470
持續情况的速率 (輪 箍半磨損時) (公 里/小时)	28	40	53	53/47.5
輪緣上的持續牽引力 (公斤)	23200	23200	13500	17000/19000
最大牽引力 (公斤)	40000	40000	24000	27500/30500 ^②
电动机电压 (伏)	600	930	250	775
电动机电流 (安)	550	333	3200	1000

①根据 Revue Générale des Chemins de Fer (RGCF)。1955
第1, 3, 5, 和 7 頁。

②曾达到41000公斤。

变流器电力機車的电动机不同于直流电力機車,它是接在变压器次級繞組的,且在具有变流机的电力機車上是完全和电網隔开的,在第一种情况下可以减少电網电压波动时由于瞬变現象所引起的整流限制,而在第二种情况下就可以完全消除整流限制。因此,变流器电力機車的牵引电动机,其指标非但优于交流整流子电动机,而且亦优于直接連于电網

瓦倫西恩——齐昂維尔綫路 (法国) 上电力機車 电气设备的重量指标

表 3

数 据 名 称	电 力 机 車 型 式			
	具有电动-发电机的单相直流 CC14100 电力機車	单相-三相 CC14000 电力機車	具有整流子电动机的 BB13000 电力機車	具有水銀整流器的单相-直流 BB120 电力機車
电力機車重量 (吨)	126 ~	134	84	84
电气部分的重量 (吨)	—	54	38.1	37.6
变压器的重量 (吨)	6.3	5.9	10.7	12.3
变流裝置的重量 (吨)	20.5	26.6	—	—
其中				
变频机的重量 (吨)	—	12.2	—	—
换相机的重量 (吨)	—	14.4	—	—
平滑电抗器的重量 (吨)	—	—	—	2.0
具有冷却系統的引燃管裝置的重量 (吨)	—	—	—	1.8
电动机重量 (吨) (沒有傳动)	9.9	10.3	14.4	12.12
一部电动机的重量 (吨) (沒有傳动)	1.65	1.72	4.35	3.03
器械和輔助机器的重量 (吨)	—	11.2	10.0	9.3
电力機車單位容量的重量 (公斤/千瓦)	68.8	49.0①	42.0	41.0
單位粘着重量的容量 (千瓦/公斤)	14.5	20.3	23.8	29.5

①按照牽引電動機的容量。

电压的直流电动机。

具有单相-三相变流机的电力機車的鼠籠式异步电动机，有着简单而可靠的特点。

在具有电动-发电机和水銀整流器的单相-直流电力機車上，由于牽引电动机采用了固定并联連接且沒有变阻起动，故第一起动級的特性是非常硬的；因此任何輪軸損失了粘着力而空轉时，不致会引起飞速逸轉，但随着牽引力的急剧降

低，很快的便会使粘着力恢复。在瓦倫西恩——齐昂維尔綫路上运行的交流电力機車，都表現有这种特性，因之粘着重量的利用大大地提高了。

50赫变流机组的变压器和电动机的重量，比起低频交流时要小得多。

不必改变牵引电动机的組合而能經濟和寬范围地調节速度，是所有各种交流电力機車胜过直流电力機車的优点，故从一級轉換到另一級时沒有牵引力的損失。

50赫交流电力機車比直流电力機車和低频交流电力機車有着更高的牵引指标，在很大程度上，促使了法国鐵路今后专以50赫交流制来进行电气化的决定。

II、瓦倫西恩——齐昂維尔綫路上各种型式

50赫交流电力機車的比較指标^①

法国鐵道电气化决定采用50赫交流牵引制的關鍵是在于：电力機車制造方面的技术大大地进步了，特别是变流器电力機車的制造。

如果在1920~1930年，美国新制造的电动发电机电力機車的单位容量的重量为120~180公斤/千瓦（25赫时），則瓦倫西恩——齐昂維尔綫路上的現代电动发电机电力機車的单位容量的重量为68.8~49公斤/千瓦。法国电力機車的直流牵引电动机的重量从1936年的5.7公斤/馬力降到1954年的3.6公斤/馬力。

由于近年来整流器制造上的进步，从而生产了可靠、輕便而价廉的单阳极密封式离子变流器。

利用了新的設計原理，可以制造出整流性能优于 $16\frac{2}{3}$

① 根据刊登在《Revue Générale des Chemins de Fer》(RGCF)杂志第1, 3, 4, 7, 和9号的材料。

赫整流子电动机的50赫单相整流子电动机。

这种技术的进步大大地促进了各种型式电力机车实际制造的可能性。

前面已经说过，在瓦倫西恩——齐昂维尔电气化线路上是采用四种型式的电力机车，选用这些型式电力机车的根据载于加罗的论文中。

对这些电力机车的指标进行比较分析是很有意义的，但是由于其构造的各异，牵引和动力特性、粘着重量利用程度的不同，比较分析是有着很多困难的。

根据上述的理由，用通常所采用的标准，如单位容量的重量或价格来评比所讲的各种电力机车并不都是合适的。在不同的情况下，用电力机车在一定线路上运行时的生产率作为比较指标较为合适。电力机车的生产率系指在同一平均技术速度下以每吨电力机车重量计算的最大列车重量，即是在同一列车重量下的平均技术速度值。

下面根据一些已刊载过的资料，对四种型式的电力机车在某些主要的指标方面进行比较。

1. 具有单相-直流和单相-三相交流机的 O-O型电力机车

牵引电动机。在具有单相-三相交流机的电力机车上，牵引电动机是异步鼠笼式电动机，而在具有电动-发电机的电力机车上，牵引电动机是低压直流电动机。鼠笼式电动机的重量为1.72吨，而直流电动机的重量为1.65吨。鼠笼式电动机的转矩比直流电动机大60%，但持续牵引力和电力机车的生产率两者差不多相同。

直流电动机基本上是和内燃机车的电动机是统一的，这样就可以降低其价格，而异步电动机是需要专门制造的。

电动-发电电力機車的直流電動机的运营費用为电力機車总运营費用的 7%。鼠籠式异步电动机没有这样的資料。但是評比这两种型式的电动机时，可以认为鼠籠式电动机机械損伤所造成的运营費用是主要的部分，特别是在 C_0 、 C_1 电力機車中采用支軸式悬挂时。在电的方面，如前所說过的那样，变流机电力機車上的直流电动机比直接接于电网的直流电力機車的电动机来，其工作条件要好得多。关于这点可以由引燃管电力機車电动机的运营費用很低（为总运营費用的 4.2%）来証实，这种电力機車的电动机有空心軸而不易受到机械損害。

因此可以預料，进行比較的这两种电动机，其运营費用的差別，对評比來說是不会起决定性作用的。

粘着重量的利用。两种型式的电力機車均具有《电气耦合》的特性，在低速范围内，由于电动-发电电力機車的牵引电动机采用了变激（以他激为主），故在开始空轉过程中，牵引力的下降比鼠籠式异步电动机还要快。

应当指出，当其他条件相同时，起动过程中牵引力的摆动愈少，变化过程愈慢^①，則实现的粘着系数也愈高。按这方面來說，起动过程用机器調节的系統（如单相-三相电力機車）和器械調节的系統相比較，精細級的調节系統和不精細級調节系統相比較，前者都具有一定的优点。虽然这种效果在数值方面还没有确定，但是这一点却是完全可能的，即它在很大的程度上补偿了由于异步电动机的硬特性，可能使得牵引力按軸分配不平衡，而需采用較低牵引力的缺点。

再生制動。两种电力機車均可容易地过渡到再生制動状态，甚至单相-三相电力機車在再生制動时，可以發揮出不

① 見RGCF.1955第7号，7月，637頁。

小于牵引时的力；完全停止以前的再生沒有任何困难。

由于货运列车的运行速度小，即使在不大的坡度上（3～4%左右），两种型式的电力机车亦可采用再生制动，在运行中根本可不采用空气制动。

$\cos \varphi$ 。两种型式的电力机车：具有电动机-发电机的单相-直流电力机车和具有变流机的单相-三相电力机车，由于采用了同步原动机，能保持高的 $\cos \varphi$ ，当电压低于额定值时是导前的，当电压高于额定值时是滞后的。这就可以容许增加变电所间的距离以及减少给电气化区段馈电的电力系统的电抗负荷^①。

在具有各个集中坡道的瓦倫西恩——齐昂維尔綫路上运行时，电动-发电机电力机车有着很有价值的特性——所取用的功率为一常数，这样就可以减少变压器的装置容量和改善电网及供电系统的负荷情况。

单相-三相电力机车的特性恰好相反，在自动调节的情况下，在很大的范围内，其牵引力和制动力几乎是常数，这对控制电力机车来说是很方便的，但是不能像具有电动-发电机的电力机车那样能保证所取用的功率为一常数。

效率和能量消耗。在额定情况下，单相-三相电力机车的效率比电动-发电机电力机车略为高些，因为单相-三相电力机车仅有一半的变换能量经过变流机组。

两种型式电力机车间的能量消耗差别比起效率的差别来更小，因为电动-发电机电力机车总是在效率最好的范围内工作的，而单相-三相电力机车则不然。

价格。表4上的单相-三相电力机车的总价格比具有电动-发电机的价格高出13%，而单位容量的价格乃是电动-发

^①这时可以得出的经济估价，在刊载的材料中没有。