

目 录

第一章 电气化铁道概述.....	1
§ 1—1 电气化铁道供电的概念.....	1
§ 1—2 电气化铁道发展概况.....	3
§ 1—3 电气化铁道的优越性.....	14
§ 1—4 电气化铁道的电流制及电压制	21
第二章 牵引变电所.....	28
§ 2—1 一次供电系统对牵引变电所的 供电方式.....	28
§ 2—2 牵引变电所的类型和原理结构.....	31
§ 2—3 高压开关设备.....	37
§ 2—4 牵引变电所电气主接线与 配电装置.....	47
§ 2—5 接地装置与防雷装置.....	60
§ 2—6 牵引变电所的控制、监视与信号.....	70
§ 2—7 自用电力系统.....	76
第三章 接触网.....	81
§ 3—1 接触网的分类.....	82
§ 3—2 接触网的组成及部件.....	94
§ 3—3 接触网上部结构.....	105
§ 3—4 接触网支持装置.....	115

§ 3—5	接触网的支柱与基础·····	121
§ 3—6	接触网的供电与分段·····	124
§ 3—7	接触网受流状态·····	129
第四章 牵引供电系统的工作状态·····		137
§ 4—1	牵引变电所对牵引网的供电方式·····	137
§ 4—2	牵引网负荷特点及电压状态·····	141
§ 4—3	单相牵引负荷对电力系统的影响 及其改善措施·····	151
§ 4—4	单相牵引负荷对沿线弱电线路的 影响及其防护·····	162
§ 4—5	提高供电系统的功率因数及改善牵引 网电压状态·····	178
§ 4—6	中电流·····	186

第一章 电气化铁道概述

在铁路运输中，目前存在三种主要牵引形式：蒸汽牵引，内燃牵引和电力牵引。随着科学技术的发展，目前蒸汽牵引已趋于淘汰。内燃牵引和电力牵引是相辅相成的两种较先进的牵引形式。这两种牵引形式比较起来，电力牵引又具有较大的优越性。

§ 1—1 电气化铁道供电的概念

电气化铁道是应用电能作为牵引动力的一种现代化交通运输工具。由于牵引动力是电能，所以又称为电力牵引。电力牵引的特点是在轨道上运行的电力机车或电动车组本身没有原动力，而是依靠外部供应电力，并通过机车上的牵引电动机，驱动列车前进。电力牵引的经济性高，因此在干线铁路、城郊铁路、地下铁道，以及工厂、矿山的运输中，得到广泛应用。

电气化铁道供电系统的组成如图1.1.1所示。它分为两个部分：

1. 一次供电系统 包括发电厂1、区域变电所2和传输线3。

2. 牵引供电系统 包括牵引变电所4和牵引网。而牵引网又由馈电线、接触网、轨道回路和回流线组成。

发电厂一般建设在动力资源的所在地（如煤矿或水力枢纽），

它是产生电能的中心。在铁道电气化初期，由于尚未出现强大的电力系统，少量较短的电气化区段由专用电厂供电。发电厂根据动力类型的不同，可分为水电站、火电站和原子能电站等。

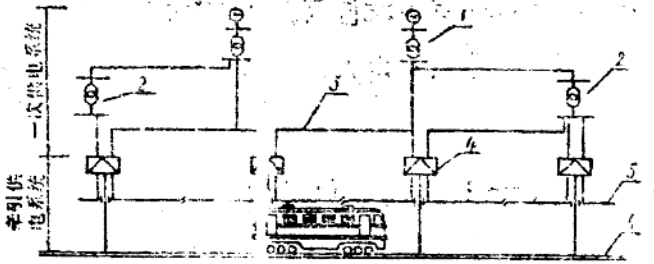


图 1.1.1 电气化铁道供电系统

- 1 — 发电厂；2 — 区域变电所；3 — 传输线；
4 — 牵引变电所；5 — 接触线；6 — 轨道回路。

区域变电所 2 设在负荷的中心。发电厂首先把电能输送到区域变电所，然后再由它把电能馈送出去。为了保证输送电能的经济性，在发电厂先经过升压，变成高压或超高压电后输到区域变电所。传输线（又称输电线）3，它的任务是传递电能，同时，又把发电厂、区域变电所联成一个电力系统。强大的电力系统可以保证供电的最大可靠性、灵活性和经济性。

沿铁路线路建设的专供电力机车电能的变电所，称为牵引变电所。牵引变电所由电气化铁道的一次供电系统（即电力系统）供应电能，它的原边电压通常为 110kV 或 220kV。牵引变电所的作用一是变压，即将电力系统送来的高压电变成电力牵引所需

要的电压；二是变相，即将电力系统送来的三相电变成与电力牵引相适应的单相电。在采用低频交流制时，还要实现变频。对于直流电气化铁道而言，同时还要实现整流。为保证供电的可靠性，牵引变电所通常应由两个电源（区域变电所或发电厂）供电，或者由一个电源经两个回路输电线供电。

牵引网的任务是质量良好地向电力机车供应电能。由图1.1.1可以清楚地看到，电能从牵引变电所4经馈电线送至接触线5，流过电力机车再经轨道回路6和回流线，流回牵引变电所。应该指出，由于轨道和大地之间是不绝缘的，在电力机车的电流流到轨道以后，并非全部电流都沿着轨道流回牵引变电所。实际上有部分电流进入大地并在地中流回牵引变电所。这种由大地中流经的电流称为地中电流（又叫泄漏电流或杂散电流）。

综上所述，完成对电力机车或电动车组供电的全部供电装置以及它们互相联系成的供电整体，称为电气化铁道供电系统。电气化铁道供电系统的职能是优质、可靠和经济地向牵引负荷供电。下面将逐章地阐述电气化铁道供电的线路、原理、装置性能及其工作状态。

§ 1—2 电气化铁道发展概况

自1825年在英国建成了世界上第一条铁路以来，已有150多年的历史，铁路本身发生了巨大的变化。最早出现的蒸汽牵引在历史发展过程中，对工业的发展、人类的文明、科学的

进步发挥了难以估价的作用。随着工业的兴起，内燃机的发展和廉价石油的开发，内燃牵引的形式开始出现。第二次世界大战以后，由于战争的刺激，内燃机的技术条件和使用条件日趋完善，因而它被利用到铁路上来。内燃牵引发展比较快比较多的国家是英国、美国和加拿大等国。

在1879年5月在柏林贸易展览会上展出的第一条电气化铁道。这是一条长约300m的椭圆形线路，轨距为1m，由150V的外部直流电源经第三轨供电，以两条运行轨作为轨道回路；电力机车重只有954 kg。这条电气化铁路虽然很短，但却显示了电力牵引的强大生命力。1881年，在法国巴黎开始出现了第一条由架空导线供电的有轨电车线路，这就为提高电压，采用大功率的牵引电动机创造了条件。在十九世纪，处于初期的电力牵引，只是采用低压直流供电，且限于市内电车和工矿铁路的交通运输。本世纪初，随着电力工业的发展，电力牵引开始用到干线铁路上。列车的重量加大，速度提高，要求采用大功率的电力机车。因此，直流供电的电压也由最初的150V提高到750V、1500V和3000V。与此同时，人们开始探索采用交流电源供电。1903年，开始出现三相交流电力机车；接触网也很复杂，由架空的三根导线供电。

1933年，匈牙利首先试验成功在电气化铁道上采用工业频率的单相交流电，即现在所称的单相工频交流制。法国经过调查研究，于1951年修建了单相工频试验线，并于1954年把单相交流25kV、50Hz电流制用于东南部干线上，收到了良

好效果。

在第二次世界大战以后，各工业发达的资本主义国家，开始大规模的牵引动力现代化，即用电力牵引和内燃牵引取代蒸汽牵引，以适应经济和工业发展的需要。下面简略地介绍一下几个主要国家的发展情况。

联邦德国是电气化铁道发展最早的国家，被称电力牵引的故乡。1879年建造了世界第一条电气化铁道和第一台电力机车。1903年制造了三相交流电动车。但是因限于当时的技术条件，其电气化线路主要采用单相交流15kV、16 $\frac{2}{3}$ Hz系统。1983年电气化铁道里程达11545km，占全国营业里程的37.0%，完成铁路运量的80%以上。根据1977~1985年铁路电气化发展规划，电气化铁道将增加到目前营业里程的一半，预计承担90%以上的运量。同时正在兴建高速路网。

联邦德国的电力机车制造工业比较发达，技术比较先进。在70年代初批量生产的E103型电力机车，时速为200km，持续功率为7440kW，是当时世界上最大功率的客运电力机车。同时，还研制了装有无整流子牵引电动机的E120型变频机车，牵引电动机采用三相交流异步电动机，因而它在创新电力机车方面作出了贡献。

法国是最早在电气化铁道上采用工业频率的单相交流电，即单相工频电流制的国家。电压为25kV的工频单相交流制，具有可以延长牵引变电所间的距离、减小接触网的截面、减少投资、改善电力机车的运营性能等优点，因而得到法国和其它国家的广

泛应用。目前法国约有45%的电气化铁道采用这种电流制。法国现有电气化铁道10,663km,占营业里程的28.8%,完成77.1%的运量。主要干线都已经电气化,并将内燃牵引的次要线路也正在改为电力牵引。在1974年能源危机之后,法国对电力牵引和内燃牵引又重新进行了经济技术比较,确认“电气化铁道在现在和将来都是现代化铁路的主要标志”。因此,计划到2000年电气化铁道再增加4000km,并完成88%以上的货运量,82%的客运量。与此同时法国目前又在积极实现高速路网规划。从巴黎至里昂的高速新干线,全长432km,已以每小时260km的速度于1981年9月投入运营。最高时速达300km,试验速度创380km/h的世界纪录。

日本的第一条电气化铁道开始运行于1895年,到1945年国营电气化铁道的里程为1102km。在1958年,国有铁路专门成立了“动力现代化调查委员会”,并提出“日本国有铁路最迟要在15年内将5000km主要干线实现电气化,其他线路实现内燃化,停止使用蒸汽机车”。从此开始了大规模的推进牵引动力现代化的工作。1975年停止使用蒸汽机车,标志着全面实现了牵引动力的现代化。1982年有电气化铁道13768km,其中包括私营电气化铁道4923km,电化率为51%。电力牵引承担货运量的76.1%,客运量的69.2%。

近年来,在实现了牵引动力现代化的基础上,又大力修建高速电气化铁道,从而引起了世界各国的注意。时速210km的东海道新干线,自1964年投入运营以来,显示了铁路运输高速

安全、运量大的优点。东京至大阪 515.4 km ，运行3小时10分。新建山阳新干线，设计最高速度为 260 km/h 。而且提出了发展 7000 km 新干线的计划，即要实现使日本列岛主要干线建成高速路网的目标。

苏联是世界上电气化铁道最多的国家。1926年建成第一条直流电气化铁道，1955年建成了 85 km 的单相工频交流试验区段。苏联在五十年代确定了大力发展电力牵引的技术对策，1953年提出“铁路电气化总规划”，规定在15年内电气化 $40,000\text{ km}$ 铁路，而且将运输繁忙的主要干线列为电气化的重点。因而从1956~1960年平均每年电气化约 1200 km ，1961~1970年平均每年电气化约 2000 km ，1971~1977年平均每年电气化约 1200 km 。现有电气化铁道 44800 km ，约占全路的31.4%，承担52%以上的运量。在主要客货运繁忙的五大干线和一些大的铁路枢纽已经实现电气化。并以莫斯科为中心，形成铁道电气化网。

苏联直流电气化铁道为 $25,945\text{ km}$ ，占整个电气化铁路里程的61.2%。近年来，主要发展单相工频 25 kV 的电气化铁道。另外，苏联外高加索、西伯利亚等货运特别繁忙的电气化区段，运量早已大大超过原设计能力，因此，确定将一些线路的供电系统进行技术改造，将直流 3 kV 的电压提高到 6 kV ，将单相工频 25 kV 的电气化线路改为带有自耦变压器的 $2\times 25\text{ kV}$ AT供电方式，从而提高了经济技术效果。

英国本来是以内燃牵引为主的国家，对于铁路牵引动力的改

革速度较快。1950年有蒸汽机车19603台，占全部机车的99%以上，而到1968年即全部实现了内燃化和电气化，停止使用蒸汽机车。近年来，也开始研究由内燃化改为电气化的问题，特别是在1973年以后，受到世界性石油危机的影响，更加重视电气化铁道的发展。1974年已使连结南北两大中心城市的伦敦~格拉斯哥铁路大干线由内燃改为全线电气化，全程645km，行车速度为160km/h，并计划把速度提高到250km/h。到1983年电气化铁路已达3765km，占路网的20.4%。英国运输部正在拟定一项长期（20年）大规模发展铁道电气化的计划，到2000年将电化5000km，并准备逐步过渡到全盘电气化。

美国是发展电力牵引较早的国家之一，1886年首次将电力牵引用于巴尔的摩~俄亥俄长隧道地段。到四十年代初电气化里程达到4500km左右。

二次世界大战以后，因战时发展起来的内燃机工业为铁路大规模地采用内燃牵引打下良好基础，同时大量开采和掠夺中东石油又为大力发展内燃牵引创造了条件。因而电力牵引受到排挤。到了1960年（大约用了15年），基本完成了牵引动力的内燃化。美国一级铁路营业里程占世界第一位，为352,964km，而一级铁路的电气化线路约为3000km，不到路网的0.6%。在战后，由于内燃机工业的大规模发展，以及由电力牵引带来的一些问题，诸如电气化投资大、电流制不统一、内电混合牵引不经济，再加上经济危机的冲击、货运量剧烈的波动以及汽车和航空的竞

世界主要国家输电电气化状况

表1.2.1

序 号	国 名	电压			单 相					交 流					三相交流方式不明	电化 里程 (km)	运营里程 (km)
		1500V 以下	1500V ~3000V	3000V 以上	60Hz			50Hz		50Hz		25Hz	10 2/3Hz				
					20kV	25kV	50kV	66kV	20kV	25kV	50kV	11kV	11kV	15kV			
1	苏联			26,190						18,760					18	44,800	142,800
2	日本	1,149	9,062		1,372	(1,177)				2,172	(809)					15,768	27,017
	国民铁	1,148	3,777		1,372	(1,177)				2,172	(809)					8,830	21,387
																4,938	5,830
3	联邦德国	286	50													11,091	31,174
4	法国	138	5,581							4,815						116	10,668
5	意大利	32	171	d. 9,738						3,677						5,318	9,941
6	印度		303													7,504	11,895
7	瑞典															7,100	24,304
8	波兰			7,100						700	800					7,060	23,548
9	南非			5,500												5,785	15,790
10	西班牙	78	771	4,890												3,713	5,129
11	瑞士	677	313							1,762						3,765	18,450
12	美国	1,829	114													3,328	6,435
13	奥地利	172	21													3,174	9,762
14	南斯拉夫			729						2,445						2,614	13,131
15	捷克斯洛伐克		87	1,497						1,024						2,458	4,267
16	挪威															2,277	29,717
17	巴西	62		2,211						2,100						2,100	52,000
18	中国															4,455	1,267
19	英国	271	175	106												2,045	352,384
20	罗马尼亚									2,046						2,045	11,127
21	奥地利		1,759							1,850						1,752	3,061
22	比利时	200		1,413						1,550						1,613	4,184
23	匈牙利															1,550	7,704
24	民主德国															1,259	14,345
25	智利		57	892												940	7,302
26	芬兰									922						922	6,592
27	扎伊尔									858						352	5,150
28	菲律宾			708						104						708	1,768
29	澳大利亚		489							590						590	4,460
30	民主朝鲜									400						432	5,604
31	葡萄牙		20							428						428	2,088
32	土耳其									393						393	8,387
33										335						335	3,364
34	巴基斯坦									290						290	8,815
35	阿尔及利亚			256												256	3,890
36	哥斯达黎加															228	978
37	古巴	199														199	5,196
38	卢森堡			19						143						143	27,06
39	伊朗									145						145	4,597
40	丹麦		135													135	2,553
41	阿根廷	116														116	35,791
42	新西兰		99													99	4,418
43	加拿大		63													63	68,801
44	安哥拉		65													65	6,877
45	蒙古		23													23	5,995
46	希腊															19	19
47	希腊															19	5,995
小计		5,155	19,360	61,159	1,372	595	126	77	2,179	45,232	860	1,393	392	29,153	87	5,628	172,787
总计			85,854							50,441	(61.9%)			36,983	(40.5%)	(3.8%)	(100%)
			(49.6%)							81,424	(47.1%)			81,424	(47.1%)		

注：1. 在第二项下，() 内的数字为输干线路电气化里程。

2. 在第三项下，数字标有 * 号者，系表示中国台湾的数据。

3. 表内 a=50Hz, 600V, b=11kV, c=3kV, d=其中有43km
1=600V60Hz, j=20Hz, k=2700V

1000V, e=25Hz 6kV, f=725V, 1125V, g=3kV, A=5.5kV.

争，使电气化铁路不仅没有发展，而且日益缩减。到1977年美国仅有电气化铁道2052km，占营业里程的1%。近年来，由于能源危机以及环境污染，对运量最大的铁路干线进行电气化的技术改造受到重视。1978年决定将沿大西洋海岸由华盛顿至波士顿的大干线进行电气化改造。全长730km，并将列车最高速度由现在的165km/h，提高到200km/h。最近又有不少铁路公司对某些区段和线路的电气化进行了经济研究工作，并提出到1990年将运量最大的干线32,000km实现电气化。

近二十年来，电气化铁道在世界范围内得到迅速发展，如瑞士已经全部实现铁道电气化。线路电气化里程占路网长度一半以上的国家有瑞士、奥地利、苏丹、挪威、荷兰、意大利等。除此外，还有相当多的发展中国家，这些国家基本上是蒸汽牵引、内燃牵引和电力牵引并存，而往往又以蒸汽或内燃牵引为主。如印度，在现有的11000多台机车中，蒸汽机车占78%，内燃机车占15%，电力机车占7%，电力牵引的比重虽小，但却分别完成了货、客运量的26%和22%。其它一些国家的铁道电气化的情况见表1.2.1。

从上述可知，由五十年代起，世界各主要工业发达国家大体都用了十五到二十年的时间，完成或基本完成了铁路牵引动力现代化的工作，即用电力牵引和内燃牵引取代了蒸汽牵引。显然，完成牵引动力现代化的主要标志是停止制造和使用蒸汽机车。几个主要国家停止使用蒸汽机车的年代见表1.2.2。

停止使用蒸汽机车的主要国家及时间 表1.2.2

国别	美国	苏联	英国	联邦德国	法国	日本	印度
停止制造年代	1953	1957	1961	1959	1957	1952	1971
停止使用年代	1960	1977	1972	1977	1972	1975	~

电力牵引和内燃牵引有着适合各自特点的使用范围，是彼此相辅相成的牵引动力。在大多数国家中，如日本、联邦德国、法国、意大利、瑞士和苏联等国都是实行以电力牵引为主的牵引动力现代化的技术政策。美国、加拿大和英国则走上另一条发展牵引动力的道路。美国、加拿大基本上全部内燃化，英国以发展内燃牵引为主。而水力资源丰富和多山之国的瑞士，其铁路已全盘电气化。进入七十年代以后，石油价格暴涨并出现了世界性能源危机，这就使得原来一些以内燃牵引为主的国家，又进行第二次改造，即将内燃牵引逐步改为以电力牵引为主。

根据1983年初的资料，全世界有电气化线路172,787 km，约占现有世界铁路总长度的4.1%，完成约35%的世界总运量。经济分析家认为，鉴于能源情况和电气化铁道所表现出的巨大优越性，电气化铁道还会继续得到发展，其发展速度，估计平均每年5000 km，最少也不低于3000 km。因此，到本世纪末，世界电气化线路里程将达到22~25万 km，约占世界铁路总长度的20%，承担世界总运量的一半左右。

我国铁路干线采用电力牵引起始于1958年，一开始就采用

技术先进的电压为25 kV的单相工频交流制，这就为大规模发展优越的电气化铁道事业奠定了良好的技术基础。我国电气化铁道的试验区段选择在丛山峻岭的宝（鸡）—凤（州）段，它是由西安入四川，穿越秦岭主山脉的一个区段。这段线路地势险要，坡度大（30.3‰），桥梁隧道多，地形条件复杂。宝—凤段虽然只有91.3 km，但它的建成通车，不仅已在运输上收到显著效果，更重要的是它作为铁道电气化的试验区段，既培训了技术队伍，又积累了经验，为进一步推动铁路的技术改造创造了条件。目前通车的电气化线路有宝（鸡）—咸（都）线、阳（平关）—安（康）线、石（家庄）—太（原）线、襄（樊）—渝（重庆）线的襄—安（康）段、宝（鸡）—兰（州）线等，总计2000多km。近几年，电气化铁道虽有一定发展，但与我国的社会主义经济发展不相适应。而且我国已经电化的线路大多分布在山区，这固然可以改善这些线路的运营条件，但是，电力牵引的优势得不到充分发挥。电力机车功率大、速度高、过载能力强，特别适宜于客、货运输繁忙、车速高、车流密度大的主要铁路干线。

如上所述，国外铁路进行牵引动力现代化工作的实质内容，是用电力牵引和内燃牵引取代蒸汽牵引。已经实现了牵引动力现代化的国家的运行实践表明，无论在提高运输能力上，还是在节省能源上都有显著效果。因此，综观国外的成熟经验和我国的实际需要，目前确定“大力发展电力牵引和内燃牵引”的技术政策是完全正确的，既符合我国的国情，又合乎世界科学技术的发展方向。

在发展电气化铁道方面，我国有优越的条件。我国水力资源的总储量达 $5.8 \times 10^3 \text{ kW}$ 。其中可以开发利用的约 $3.7 \times 10^3 \text{ kW}$ 。而目前已开发的只占可开发量的4.3%。在进行牵引动力现代化时，也应根据我国实际情况，扬长避短，发挥廉价水力资源的优势。并且越是在能源紧张和建设资金有限的情况下，越是应优先发展电力牵引，以便尽早发挥电力牵引的经济效益。

从1981年起，我国开始了八大巨型水电站的建设工程，见表1.2.3。这些水电站的建成和投入运营，对于铁道电气化事业的发展无疑是一个有力的促进。

新建八大水电站表

表1.2.3

名称	地点	容量 (10^4 kW)	名称	地点	容量 (10^4 kW)
葛洲坝	长江宜昌	271.5	鲁布格	云南	60
龙羊峡	黄河上游	128	铜街子	四川	60
白山	东北	90	东江	湖南	50
安康	陕西	80	大化	广西	40

在推进我国牵引动力现代化时，还应吸取世界各国的有益经验，适当考虑我国电气化铁道的布局，优先规划运输繁忙的铁道干线，适时的把电气化铁道连成线布成网，以便更充分发挥速度高、运量大、周转快的特点。

我们的技术政策是以电力牵引为主。所谓为主，就是电力牵

引所承担的运量应不少于铁路总运量的60%，这是国家现代化的需要，也是我们在本世纪内争取达到的目标。只要我们全面安排、作好规划，在20年内，平均每年建设800~1000km的电气化线路是可以实现的。在一定意义上说，这也是我们铁道电气化工作者的责任。

§ 1—3 电气化铁道的优越性

铁路牵引动力现代化是铁路运输现代化的中心环节。伴随着国民经济的迅速发展，铁路运量相继上升，运能与运量之间的矛盾更为突出。蒸汽机车由于热效率低、牵引交路短、劳动强度大等弱点，已远远不能适应运输量日益增长的需要。对铁路进行现代化技术改造是势在必行的。

牵引动力向电气化发展，是世界各国公认的方向。它既适应重载、高速的需要，又能利用多种能源，是成本最低的牵引方式。国外电气化铁路的运营实践说明了一个事实，就是约占30~40%左右的电气化线路，约完成75~80%的总运量，见表1.3.1。

我国的运营实践也说明电力牵引具有多拉、快跑和高效率的优越性。下面就其经济技术指标加以比较。

1. 电力牵引可以大大提高通过能力和输送能力。

线路的通过能力是指在一昼夜内，铁路所通过的最大列车对数。采用电力牵引大大提高了线路的通过能力，见表1.3.2。表

表1.3.1

项目 国别	电气化铁路占全国铁路 营业里程 (%)	电力牵引完成总运量的比 重 (%)
联邦德国	38.4	81.0
日本*	38.8	76.1
法国	28.6	77.1
意大利	58.1	84.9
苏联	29.3	52.0

注：日本只统计了国有铁路数据。

半自动闭塞通过能力(对)

表1.3.2

限坡 牵引形式	4 ‰	6 ‰	9 ‰	12 ‰
电力牵引	54.7	53.7	52.8	52.0
内燃牵引	44.9	41.5	39.0	38
蒸汽牵引	45.4	42.7	41.5	39.8

注：电力机车车型为韶山I型，内燃机车车型为东风型，蒸汽机车车型为前进型。

中计算数据表明，在单线自动闭塞的条件下，区间通过能力：电力牵引比蒸汽牵引高20~40%。

结合我国宝凤区段的运营实践，则效果就更为显著。电气化