

轨道交通 弓网系统电接触 ——理论与应用

高国强 吴广宁
魏文赋 杨泽锋 编著

GUIDAO JIAOTONG
GONGWANG XITONG DIAN JIECHU
——LILUN YU YINGYONG

西南交通大学出版社

轨道交通弓网系统电接触

——理论与应用

高国强 吴广宁
魏文赋 杨泽锋 编著

西南交通大学出版社
· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

轨道交通弓网系统电接触：理论与应用 / 高国强等
编著. —成都：西南交通大学出版社，2018.9
ISBN 978-7-5643-6173-0

I. ①轨… II. ①高… III. ①轨道交通—弓网系统—
电触头 IV. ①U225

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 100716 号

轨道交通弓网系统电接触
——理论与应用

高国强 吴广宁
魏文赋 杨泽锋

编著

责任编辑 黄淑文
助理编辑 梁志敏
封面设计 何东琳设计工作室

印张 17.75 字数 264千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版次 2018年9月第1版

印次 2018年9月第1次

印刷 四川煤田地质制图印刷厂

书号 ISBN 978-7-5643-6173-0

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价 96.00元

课件咨询电话：028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前 言

Preface

弓网是轨道交通的受流系统，由接触网和受电弓组成，列车的电力输送靠接触网与受电弓带电滑动接触完成。弓网电接触包括了接触网与受电弓两界面间发生的物理化学过程，涉及电气、机械、材料、计算技术等诸多领域，其研究最终目的是在满足一定经济效益的前提下，提高弓网电接触的可靠性及弓网材料的工作寿命。

本书聚焦于弓网滑动电接触问题，主要涉及电接触、载流摩擦磨损以及电弧理论。书中详细介绍了弓网系统相关理论、装置、测试及试验方法，探明了弓网电接触温升效应及其影响，论述了不同运行工况下弓网摩擦磨损的机制，阐明了弓网电弧对弓网材料的侵蚀作用。结合工程应用，分析了弓网材料对弓网摩擦磨损特性的影响，提出了弓网服役性能的相关检测技术。

本书基于工程实际问题，结合工程与实验室广泛应用的研究经验和方法，从基础理论、研究方法、工程设计与应用等方面深入探讨了弓网系统运行过程中所涉及的电气机械问题，通过分析提出了相关工程问题的解决思路或方法。全书（或部分章节）可以用作研究生及高年级本科生的教材或参考书。

本书提供了弓网运行参数、电弧参数、材料参数的相关图表，可作为专业研究人员、设计和开发工程师的实用工具。

限于时间和水平，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2018年1月

目 录

Contents

1	高速列车受流方式——弓网系统	1
1.1	弓网系统	1
1.2	弓网系统性能要求	12
1.3	弓网系统核心问题	15
	参考文献	16
2	弓网电接触	17
2.1	电接触理论与应用	17
2.2	弓网电接触试验装置及方法	30
2.3	弓网接触电阻及其影响因素	44
2.4	弓网电接触温升	56
2.5	小结	64
	参考文献	65
3	弓网载流摩擦磨损	69
3.1	摩擦与磨损	69
3.2	载流摩擦磨损	73
3.3	弓网载流摩擦磨损特性分析	82
3.4	小结	102
	参考文献	103
4	弓网电弧	107
4.1	电弧基本概念	107
4.2	弓网电弧产生的原因	112



4.3	弓网电弧电路模型	117
4.4	弓网电弧磁流体动力学 (MHD) 模型	139
4.5	弓网电弧对系统的影响	163
4.6	小 结	192
	参考文献	193
5	弓网电接触材料	196
5.1	接触网导线材料发展	196
5.2	受电弓滑板材料发展	203
5.3	弓网摩擦副的材料匹配	213
5.4	小 结	219
	参考文献	220
6	弓网服役性能的诊断与检测	221
6.1	弓网检测技术的发展	221
6.2	接触线检测	230
6.3	受电弓滑板检测	240
6.4	弓网动态性能检测	252
6.5	小 结	275
	参考文献	277

1 高速列车受流方式——弓网系统

1.1 弓网系统

1.1.1 概 述

目前,高速电气列车获取电能的方式是弓网系统,即受电弓和接触网组成的二元电能传输系统,高速电气列车均采用了这种电能传输方式^[1]。因此,受电弓和接触网系统的运营质量是影响和制约电气列车高速运行的核心要素之一,也是制约高速电气化铁路发展的关键要素之一。

在电气化铁路上运行的列车(包含电力机车与动车组),其所需的电能均来自固定电源——发电厂。电能经过牵引变电所和架空输电线向电气列车传输。电能传输是限制列车实现最高速度的一个因素,当电气列车由普通速度提高到高速运行时,受电弓与接触网的相互作用显得极为重要^[2]。在受流过程中,受电弓和接触网在机械和电气上密切相关,只要其中之一出现问题,就会破坏正常的受流特性,甚至导致弓网事故的发生。

电气列车的动力及辅助设备的电源所需电力都是由地面上供给,高速列车依靠电力牵引运行,规定电力牵引为 I 级负荷。牵引变电所分布在铁路沿线,将电能转换成符合电气列车要求的电压等级,再通过受电弓与接触网组成的系统(以下简称弓网系统)给电气列车供电^[3]。列车负载电流从受电弓与架空接触网的接触点流入,从车轮与轨道的接触点流出,并经过回流电路返回牵引变电所,完成电能传输的过程(见图 1.1)。

受电弓安装在电气列车车顶,电气列车通过受电弓滑板与接触线接触获取电能。弓网系统是电气列车的受流方式之一,是固定设备和移动能量消耗设备之间联系的纽带^[4]。接触网是输电线路,是受电弓



的滑道，需要尽可能长的使用寿命，而弓网接触点是电能传输的瓶颈。电气列车运行时，受电弓的滑板与接触网的接触线滑动接触，不仅使电能的传输易于实现，而且弓网接触点的不断变换能减缓滑板和接触线的温度升高。

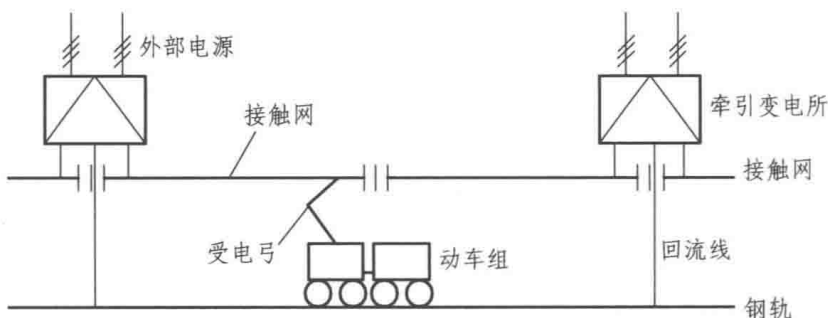


图 1.1 牵引供电系统示意图

1.1.2 接触网系统

接触网是沿铁路线上空架设的一条特殊形式的输电线路，属于固定在地面的供电设备^[5]。其作用是将牵引变电所的电能输送给电气列车。接触线既是牵引电流的主要承载者又是受电弓的滑道，接触线的质量是决定接触网性能的重要因素之一。

1. 分类

接触网的主要结构形式分为两种（见图 1.2）：一是架空式，即输电线路架设在线路的正上方，通过车顶部的受电弓与接触线的滑动摩擦而获得电能，此种形式应用非常广泛；二是第三轨形式，即导电轨设置在地面走行钢轨的侧面，通过车辆转向架上的受电靴与导电轨的滑动接触而获得电能，此种形式应用在地铁与轻轨系统中。

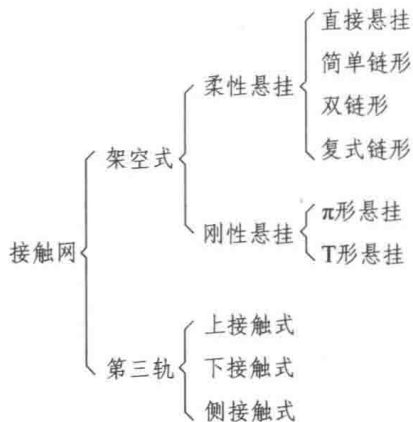


图 1.2 接触网的分类

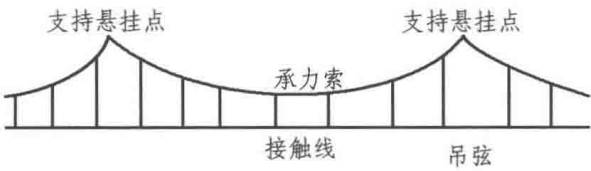



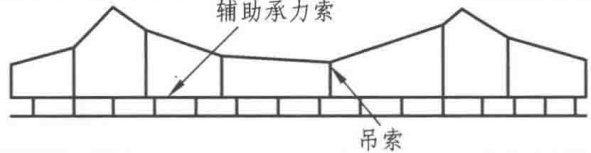
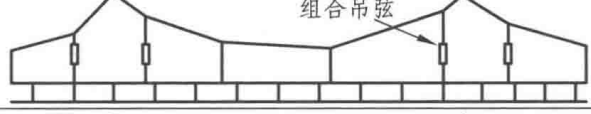


1) 架空式

架空式接触网的悬挂形式，按悬

挂架设的方式不同，分为柔性悬挂和刚性悬挂。

柔性悬挂按其形态的构成分为链形悬挂和直接悬挂。其中链形悬挂又分为简单链形悬挂、双链形悬挂和复链形悬挂等，如表 1.1 所示。

表 1.1 架空式接触网的悬挂形式

悬挂形式	分类	悬挂的构成	悬挂形式示例
柔性悬挂	链形悬挂形式		简单悬挂； 重型简单悬挂； CS简单悬挂； 馈电与承力索合一的悬挂形式； 斜悬挂形式等
			变“Y”形简单链形悬挂
			带组合弹性吊弦的简单链式悬挂
	双链形悬挂系列		双简单链式悬挂
	复链形悬挂系列		复链式悬挂 重型复链形悬挂
			组合弹性吊弦的复链形悬挂
直接悬挂形式			
刚性悬挂形式			

刚性悬挂按其汇流排的不同，分为 π 形悬挂和T形悬挂，如图 1.3 所示。

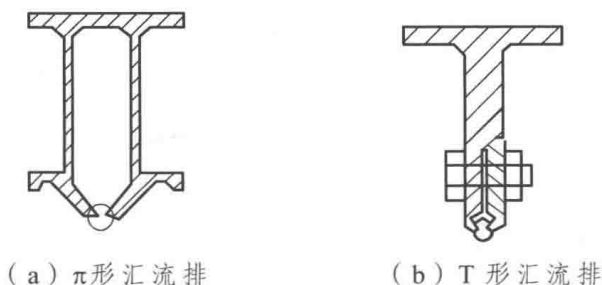


图 1.3 刚性悬挂形式

2) 第三轨

一般，采用轨道供电系统的铁路只设一条带电路轨。这条带电路轨称为“第三轨”。从第三轨取得的电能由电力机车的车轮经由路轨传回牵引变电所。第三轨按接触面的不同，分为上接触式、下接触式 and 侧接触式，如图 1.4 所示。

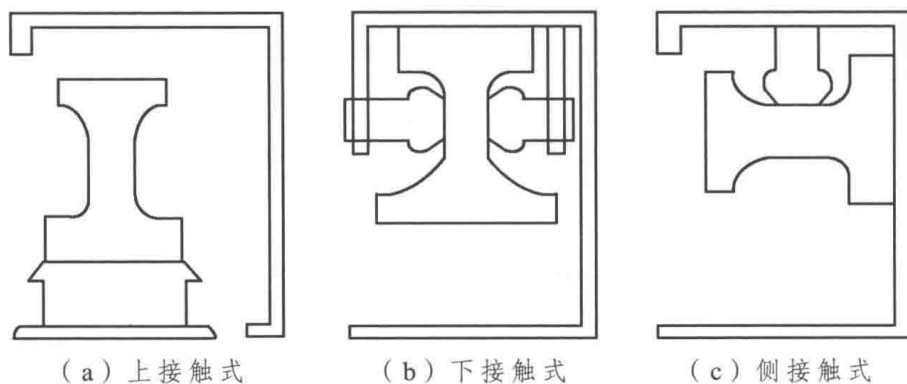


图 1.4 第三轨

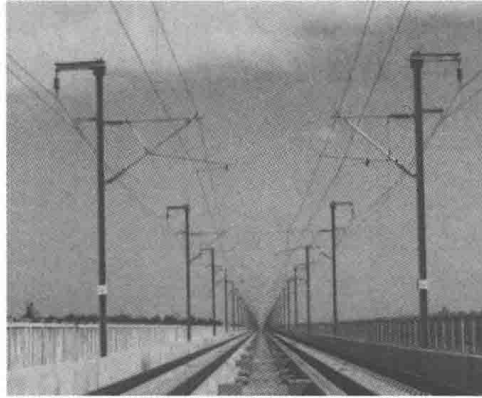
有一些使用橡胶车轮的列车并不能让电力经路轨传回牵引变电所，因此在这些列车行走的路段一般都会再增加一条额外的带电轨道（亦即“第四轨”）以作回传电力之用。基于第四轨的一些优点（例如较高的可靠性以及降低了信号系统的复杂性），一些使用普通金属车轮列车的铁路系统也会装设第四轨，使供电用和行走用的路轨完全分开^[6]。伦敦地铁是最大的第四轨铁路系统。

2. 结 构

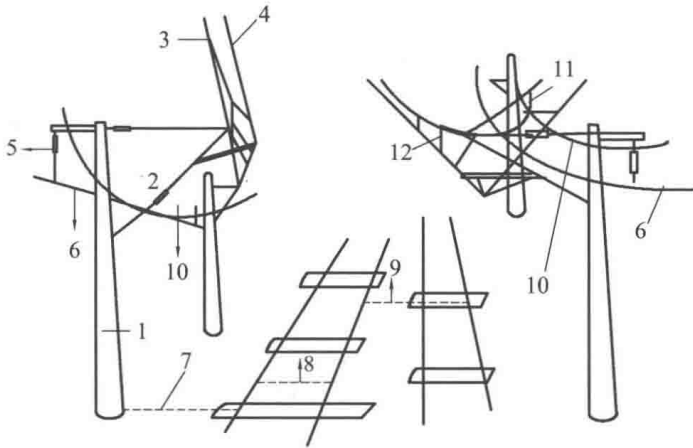
架空链式接触网在电气化铁道上应用最广。根据其用途和性能不

同可选用各式各样的悬挂形式。

接触网由支持装置、馈电线、接触悬挂（承力索、吊弦、零部件等）、接触线、回流线、补偿器等组成，如图 1.5 所示。



(a) 运营现场



(b) 结构示意图

图 1.5 链形悬挂接触网

1—支柱；2—腕臂；3—承力索；4—接触线；5—绝缘子；6—馈线；7—支柱基础；
8—钢轨连线；9—上下行钢轨连线；10—回流线；11—弹性吊索；12—吊弦

1) 支持装置

用支柱支持接触悬挂的间隔跨距约为 50 m，一组接触悬挂的标准架设总长度约为 1 500 m（称为一个下锚区段）。腕臂支持装置则是安装在支柱上端用于支持定位接触悬挂的结构，由绝缘子及相关连接零部件组成。



2) 馈电线

馈电线又称供电线，是变电所、分区亭、开闭所与接触网之间的电气连接线，安设在变电所或开闭所馈线出口至接触网电分相两侧，将牵引电能由牵引变电所馈送到接触网上^[7]。供电线应能承受最大牵引电流的长期作用和接触网近端短路电流的瞬时作用。一般选用 300 mm^2 左右的铜绞线作为供电线。

3) 接触悬挂

这种接触悬挂从上至下由承力索、辅助承力索、接触线三条线组成。各条线索上的张力为 $14.7\sim 24.5\text{ kN}$ ，接触悬挂的总张力为 53.9 kN 。

承力索一般采用比铜的强度更高、更耐损伤、抗拉强度更高的镀锌钢绞线，而兼有馈电线作用的馈电承力索式接触网的承力索采用的是硬铜绞线（PH）和铝包钢芯铝合金绞线（ACSR），由于辅助承力索兼有承力索及馈电线的部分作用，所以要求其具有十分可靠的电气机械性能。

吊弦是从承力索或辅助承力索上悬吊接触线的部件，吊弦间隔的标准一般为 5 m ，为了防止离线，在新干线上也有 3.5 m 间隔的区段。在需要接触线与承力索绝缘处所，应在承力索上安装吊弦绝缘罩或采用带有绝缘子的绝缘吊弦。

4) 接触线

受电弓与接触悬挂最下方的接触线接触滑行。接触线用间隔 5 m 的吊弦来悬挂，尽量保持接触线自轨道面上方约 5 m 的架设高度。为了避免受电弓滑板形成沟状磨损面，接触线调整为与线路呈水平的“Z”字形。

接触线是接触网中重要的组成部分，是受流的主要通道。接触线一般制成两侧带沟槽的圆柱状，是与受电弓直接滑动的导体，因此必须具有较高的电导率、较大的抗张力^[8]。沟槽是为了便于安装线夹并悬吊固定接触线而又不影响受电弓滑板的滑行取流。接触线下面与受电弓滑板接触的部分呈圆弧状，称为接触线的工作面。接触线通过与电力机车上的受电弓滑板滑动摩擦直接向电力机车输送电流，其性能直接影响电力机车的受流质量和机车的安全运行。

接触线是所有供电类导线中工作环境最恶劣的一种，正常工作时需要承受冲击、振动、温差变化、环境腐蚀、磨耗、电火花烧蚀和极

大的工作张力，因此其性能直接影响到高速列车的安全运行。接触线的材质主要是铜、铜银合金、高强度铜银合金、铜锡合金、铜镁合金、高强度铜镁合金等，满足电气化铁道接触网需要。

带沟槽的硬铜接触线的横断面形状如图 1.6 所示。

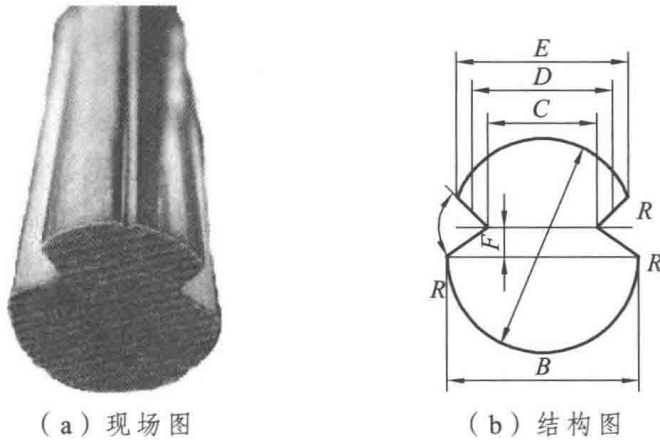


图 1.6 接触线的横断面形状

设计规范规定：铜及铜合金线在最大允许磨耗面积（标称截面面积的 20%）时，其机械安全系数不应小于 2.0；当局部磨耗超出最大允许磨耗时应局部补强；当局部磨耗达 35%时应将接触线切断，用接触线接头线夹连接，并保证接头处过渡平滑，必要时安装吊弦使该处接触线高于相邻吊弦点 0~10 mm。对运行速度在 200 km/h 以上的接触网，一个锚段内不允许有两个以上接触线接头。

常用的接触线标称截面参数见表 1.2。

表 1.2 常用的接触线标称截面参数

标称截面 /mm ²	A /mm	B /mm	C /mm	D /mm	
85	11.00	11.00	5.70	6.12	
110	12.34	12.34	6.85	7.27	
170	15.49	15.49	7.32	7.74	
标称截面 /mm ²	E /mm	F /mm	R /mm	G /deg	H /deg
88	8.50	1.5	0.38	27	51
110	9.75	1.7	0.38	27	51
170	11.43	2.4	0.38	27	51

接触线残存高度和磨耗面积之间的对应关系与接触线横断面形状有关，对于横断面为圆的铜系接触线，磨耗面积 S 与残存高度 h 之间存在以下关系：

$$S = \pi \cdot R^2 \cdot \theta / 180 - [R - (A - h)] \cdot R \sin \theta$$

其中： $\theta = \arccos(1 - (A - h) / R)$ ；

式中 S —— 接触线磨损部分面积 (mm^2)；

R —— 接触线横截面的圆半径 (mm)；

A —— 新接触线厚度 (mm)；

h —— 接触线残存厚度 (mm)。

5) 回流线

在变电所附近，连接钢轨和变电所接地网，将牵引电流引回变电所的导线也称作回流线。

6) 补偿器

为了保持接触线张力的恒定，在接触悬挂两端的下锚处，设置了自动张力补偿装置，沿线路方向旋转的旋转腕臂固定在支持悬挂点处。

接触线由于外部气温变化及负荷电流发热而引起伸缩，如果不进行调整，接触线的张力就会变化，随之接触悬挂的结构就会变坏，其波动传播速度就会降低，进而受电状态就会恶化^[9]。过高的张力会使接触线断裂。张力补偿装置有滑轮式与弹簧式两种，可以自动地调整接触线因温度变化而造成的张力变化。

7) 连接零件

为了避免接触线因风压及曲线区段与受电弓的接触出现脱离现象，安装了定位部件和曲线定位装置，以及电连接线接头等接触悬挂零部件。

曲线定位装置是对应曲线区段内接触线的横向张力与保持接触线的偏移而安装的部件，它由线夹和定位管组成，考虑到受电弓的倾斜，定位管的形状一般采用弓形的比较多。定位器是在直线区段对于风压造成的接触线横摆保持其正确偏移的部件，为了防止受电弓滑板的局部磨损，还具有使接触线呈“Z”字偏移的作用。在新干线的直线和



曲线区段安装的都是曲线定位装置。

电连接装置是馈电线向接触线供电的装置,使用馈电线夹与接触线连接。连接接头是接触线相互间,承力索与接触线之间电气连接的部件。

1.1.3 受电弓系统

受电弓是安装在电气列车车顶的专用受流设备,升起后与接触线滑动接触取得列车运行所需的电能。受电弓的设计与特性对弓网系统的运行质量具有举足轻重的影响。如果接触网与不适合的受电弓匹配,就不会产生所期望的结果;相反,也不可能利用适合高速的受电弓实现普通接触网的最高速度进一步提升。

1. 分 类

弓网系统是在构成电气回路的同时,运行中必须保持有一定接触压力的机械装置。电力牵引机车从接触网取得电能的电气设备,安装在机车或动车车顶上。

受电弓的形式繁多,按照传动系统的工作方式可分为弹簧操作式受电弓和非弹簧操作式受电弓;按照臂杆的结构形式可分为单臂受电弓和双臂受电弓,双臂受电弓又可细分为四腕菱形双臂受电弓、二腕菱形双臂受电弓和四腕交叉形双臂受电弓;按照运行的速度可分为高速受电弓和普速受电弓;按使用的场合可分为直流受电弓和交流受电弓;按受电弓框架的层数可分为单层受电弓和双层受电弓等。

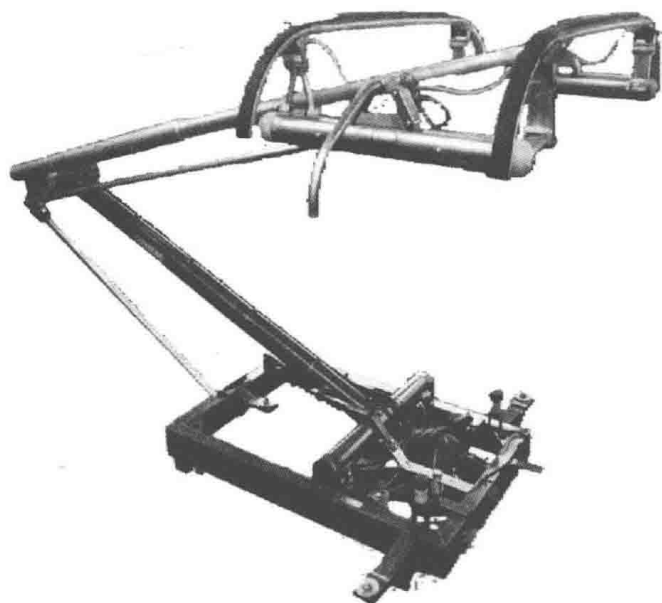
弓网系统要求通过连续的、不间断的电气和机械接触给电气列车供电,与此同时,要使接触线和滑板的磨耗保持尽可能低的程度。因此,受电弓与接触网的相互作用决定了弓网系统向电气列车供电的可靠性、供电质量以及运行寿命,依赖于一定经济、技术条件下受电弓和接触网的设计、制造装配、维护方案的确定及大量参数的选取。

2. 结 构

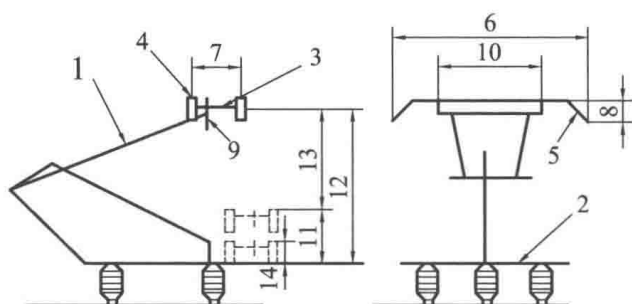
受电弓的结构依赖于电气列车的运行速度、负荷大小、接触网的状况,并因各个国家的制造经验和习惯不同而有所不同,但都包括框架、底架、弓头和传动系统等四个基本部分。



近年来多采用单臂弓（见图 1.7）。



(a) 现场图



(b) 结构图

图 1.7 受电弓示意图

- 1—框架；2—底架；3—弓头；4—滑板；5—弓角；6—弓头长度；7—弓头宽度；
8—弓头高度；9—固定支承轴；10—滑板长度；11—下部工作位置高度；
12—上部工作位置高度；13—受电弓的工作范围；14—落弓高度

1) 框 架

框架一般分成上、下两部分，中间用铰链连接。在铰链上方的部分称为上框架，在铰链下方的部分称为下框架。框架是能使弓头相对于受电弓底架在垂直方向运动的铰接结构，用来支持弓头重量和传递

受电弓的静态接触力。框架尺寸主要由要求的受电弓工作范围决定。

2) 底 架

底架是固定受电弓框架的底座，即支持框架的固定部分，安装在受电弓支持绝缘子上。通常要求底架有较强的刚性，以免在搬运和安装过程中使框架歪扭，进而影响受电弓的性能。通常用三个或四个支持绝缘子将底架固定在车顶。受电弓的支持绝缘子是电气列车电气设备中工作环境最为恶劣的绝缘子，除承受日晒、风吹、雨淋和滑板粉末的侵袭外，发生弓网事故时还可能受到很大的冲击力。

3) 弓 头

弓头安装在框架的顶端，靠框架支撑，由滑板（也称接触板）和弓角组成，还可能包含一个悬架（弓头支持装置）。沿车辆横向所测得的滑板总长度称为滑板长度。向下翻转的弓角位于弓头的两端，以确保受电弓能平稳通过接触网的线岔。弓头借助于框架的伸缩可以上下运动，并能绕自身的固定支承轴做少量转动。沿车辆横向所测得的弓头水平尺寸称为弓头长度，沿车辆纵向所测得的弓头尺寸则称为弓头宽度，而弓头高度指的是弓角最低点与滑板最高点之间的垂直距离。

弓头一般通过圆弹簧、板簧或橡胶与框架相连。

4) 滑 板

受电弓滑板的详细结构如图 1.8 所示。



图 1.8 滑板结构图

受电弓与接触线直接接触的部件称为滑板，容易磨损，是受电弓可以替换的集流元件，滑板与接触线需要保持一定的接触力，以维持两者不间断的电接触。受电弓通常使用整体双滑板、分体双滑板或单