

接触网悬挂张力与波动传播速度

铁道综合技术研究所 藤井保和

编译者的话

本译文根据日本《铁道与电气技术》1991年第6~12期高速铁路专题讲座内容翻译。该译文原文日方曾作为日本高速铁路技术交流资料提供给我方。是一份难得的高速电气化铁道参考学习资料。

本译文共分七篇：一、接触网悬挂张力与波动传播速度，二、接触网、受电弓系统的共振，既有线接触线波状磨耗，三、新干线接触线波状磨耗，四、既有线离线及其危害，五、受流噪音及其防止对策，六、提高速度的条件及其测量，七、提高速度的对策。本译文系统地阐述了高速电气化铁道接触网的基本受流理论及各种受流现象，各篇既独立成章，又具有相互关联的系统性。特别对受流系统的共振、离线、噪音及接触线的波状磨耗、应力疲劳等问题，进行了比较详尽的介绍与分析，并提出了相应的对策措施。对高速电气化铁道的设计建设和运营管理，都具有较高的参考价值。

目前，我国正起步开始进行高速铁路建设，学习和借鉴外国先进经验具有十分重要的意义。愿本译文对读者和我国的高速铁路建设有所帮助和启发。

由于编译者水平有限，不妥之处恳请读者批评指正。

目 录

1. 前言	(1)
2. TGV500km/h 的受流	(1)
2.1 接触网·受电弓系统比较	(1)
2.2 TGV 和新干线的特点	(2)
3. 接触线波动传播速度	(2)
3.1 振动频率和波动传播速度	(2)
3.2 波动传播速度与受流特性	(3)
3.3 列车大于波动传播速度运行时的现象	(4)
4. 悬挂张力	(4)
5. 张力测量方法	(5)
5.1 原理	(5)
5.2 实际测量方法	(5)

1. 前 言

去年5月,TGV创造了515km/h的高速记录。刷新了日本1980年在小山试验中创下的319km/h、今年3月在上越新干线创下的336km/h的记录。使铁路高速化受到国内外注目。本文作为该讲座第一篇,打算讲述接触网受流系统高速化的有关问题。其中,主要谈谈接触线的张力。

2. TGV500km/h 的受流

TGV 和新干线创下的速度记录有相当大的差距,然而,对接触网·受电弓系统本身也有这么大的差距吗?这里介绍一下两者接触网·受电弓系统的特点,谁优谁劣让读者去评价。

2.1 接触网·受电弓系统比较

TGV 大西洋线和新干线的接触网·受电弓系统的比较,如图-1和表-1、表-2所示。有如下几点:

- (1)TGV、新干线都采用了铜接触线。
- (2)TGV 接触线张力比新干线大。因为其运营速度高,要求接触线波动传播速度也高。

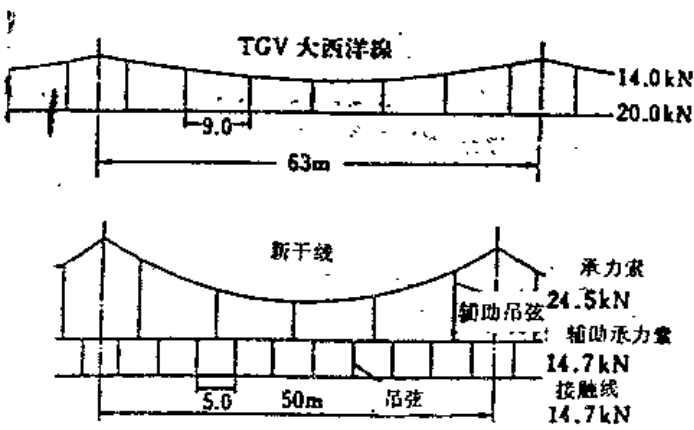


图-1 接触网标准悬挂方式比较

表-1 接触线比较

铁 道	线 型	张 力	线密度	波动传播速度	列车速度	β
新干线	Cu170mm ²	14.7kN	1.51kg/m	355km/h	240km/h	0.68
TGV 大西洋线	Cu150mm ²	20.0kN	1.33kg/m	441(561)	300(515)	0.68(0.92)

单位:km/h ()内为创立的速度记录 β =列车速度/波动传播速度

表-2 受电弓比较

铁道	形式名	方式	抬升力(N)	作用范围(mm)	滑板材质 弓头质量	个 数
新干线	PS200-02	菱形	54+15 (210)	890	烧结合金 7-10kg	8、6、3、2/16、12 辆
TGV 大西洋线	GPU	GPUZ	70+30 (270)	1800	钢 9kg	1/12 辆、2/12 辆

抬升力=静抬升力+动抬升力

(3)TGV 是简单链形悬挂,新干线是复链形悬挂。在跨距一样长的情况下,简单链形悬挂悬挂点与跨距中央抬升量的差比复链形悬挂大。

(4)TGV 的抬升力(包括动抬升力)约是新干线的 2 倍。因此,其接触线抬升量也比新干线大

(5)TGV 受电弓工作高度范围约是新干线的 2 倍。这是 TGV 在既有线上也运行的原因。

(6)TGV 用电力机车牵引列车,因此,在高速区段基本上使用 1 个受电弓。而新干线因采用电动车组方式,故使用了多个受电弓。

2.2 TGV 和新干线的特点

由 2.1 归纳出两者接触网·受电弓系统的特点如下:

(1)两者都使用铜接触线,因此,如果波动传播速度相等,则接触线单位面积上的张力即轴向力也就大致相等。所以,如果将波动传播速度(如 3.2 讲述那样,波动传播速度影响受流性能)设计成一样大,则即使横截面积和张力的不同,从疲劳极限方面来说,两者就基本上没有差别。

(2)对 TGV 和新干线接触网·受电弓系统影响大的是受电弓的个数。其结果产生了后面(3)、(4)的差别。

(3)TGV 使用 1 个受电弓,所以,不必考虑多个受电弓引起的抬升量增大及共振等问题。故在简单链形悬挂跨距比较大时也可以使用这种抬升量大的受电弓。

但是,因为抬升量大,接触线的应变也大。可以推断接触线的振动疲劳就成为严格控制的条件。不过,由于使用 1 个受电弓,并且列车密度小,可以减轻受电弓运行对接触线的振动疲劳影响。

(4)新干线使用多个受电弓,接触网为重型复链形悬挂,因而悬挂的不等率及抬升量都小。并且,受电弓抬升力小,其抬升量就更加小了。这有利于防止反复多次的大振动引起的悬挂零件松动和弓网接触破坏。

另外,因为接触线抬升量小,其应变也小。故即使使用多个受电弓高密度运行,也可延缓接触线达到疲劳极限的时间。

3. 接触线波动传播速度

由表—1 知,TGV 和新干线列车速度对波动传播速度的比值 β 均是 0.68。进一步说,列车按 515km/h 运行时,接触线的波动传播速度就达到了 561km/h。可见接触线波动传播速度比列车速度高。对高速而言,波动传播速度有着重要的意义。

因此,本节打算讲述接触线的波动传播速度及其对受流性能的影响。

3.1 振动频率和波动传播速度

在接触线中传播的波有纵波和横波,通常对受流有影响的是横波。接触线在加上张力后,一般可看作为弦,但是,当振动频率高时,就出现了梁的影响。这里,只介绍弦及加有张力时的梁的波动传播速度方程式。关于这些方程式的推导请参照文献等资料。

(1)弦

假设接触线的张力、线密度分别为 T 、 ρ ,则横波的传播速度 C 为:

$$C=\sqrt{\frac{T}{\rho}}\cdots\cdots(1)$$

(2) 梁

假设接触线的抗弯刚度、线密度、振动频率分别为 EI 、 ρ 、 f ，则横波传播速度 C_{EI} 为：

$$C_{EI} = \sqrt{2\pi f \left(\frac{EI}{\rho} \right)^{1/4}} \dots \dots \dots (2)$$

C_{EI} 与 (1) 式中的 C 不同， C_{EI} 具有大小随频率变化的特点。

(3) 加有张力的梁

采用与 (1)、(2) 式中相同的符号，则横波传播速度 C_{EI} 为：

$$C_{EI} = \frac{2\pi f}{\sqrt{\sqrt{\left(\frac{T}{2EI} \right)^2 + \frac{(2\pi f)^2 \rho}{EI}} - \frac{T}{2EI}}} \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式中， f 大或者 $EI \gg T$ 时， C_{EI} 与 (2) 式中的 C_{EI} 一致。

图-2 所示为 $C_0 170\text{mm}^2$ 接触线的振动频率和波动传播速度的关系曲线。图中波长由速度和振动频率求得。当频率小于 100Hz 时，(1) 式中的 C 成立，频率大于 100Hz 时，(3) 式（频率高时，可用 (2) 式近似表示）成立。

在结合考虑接触线的抬升量等参数大小情况下，振动频率小于 100Hz 时，波动传播速度使用 C 为宜，但是，象波状磨损那样假若在频率达到 270Hz 左右就不准确了时，波动传播速度当然必须使用 C_{EI} 。

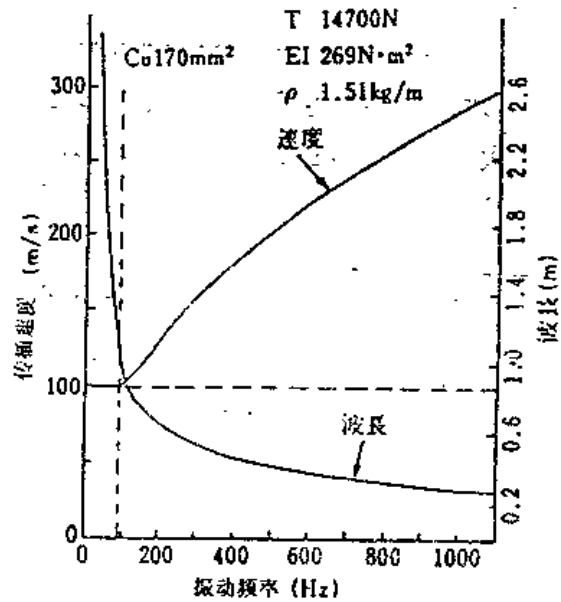


图-2 加有张力的梁的振动频率、速度、波长的关系

3.2 波动传播速度与受流特性

下面谈谈波动传播速度对受流性能的影响。图-3 表示速度系数 β 和离线率的关系。速度系数 β 是受电弓的运行速度对接触线波动传播速度的比值。由图可知，离线率大致为一根上升的曲线，并且，离线率与 β 密切相关。接触线抬升量和应变也亦与 β 密切相关。

目前， β 的取值范围以小于 0.7 为宜。因此，为了实现高速化，有必要也提高接触线波动传播速度。波动传播速度 C 如 (1) 式表述的那样由接触线的张力和线密度决定。因此，为了提高波动传播速度，必须提高接触线张力或减小线密度。

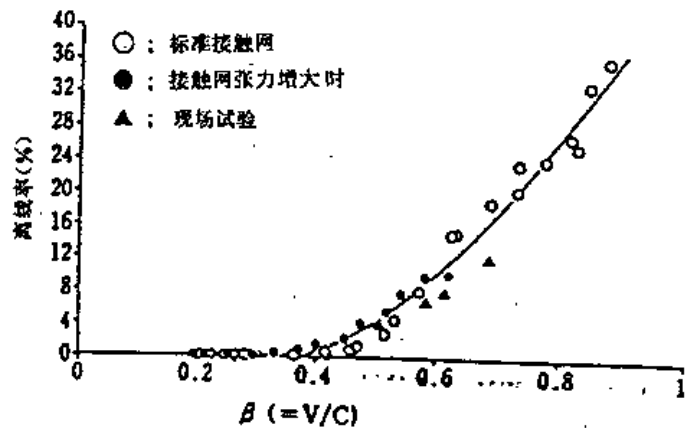


图-3 离线率的速度系数特性

进一步而言，接触网在开通运行一段时间后，会出现终端下锚连板倾斜，张力发生变化的

情况。张力发生变化,波动传播速度也发生变化。因此,为了使受流系统性能维持在设计水平上,张力管理就显得很为重要。

3.3 列车大于波动传播速度运行时的现象

喷气式飞机即使超音速(约 $325\text{m/s}=1170\text{km/h}$)飞行,也不会特别引起损坏。所以,它能够超马赫(速度和音速的比值)飞行。

那么,受电弓如果超过波动传播速度运行,接触网会发生什么变化吗?假若在实际中试运行看看,那还言之过早,决不会轻易那样做。因此,下面进行探讨。

用力在加有张力的梁上运行的模型计算,对于各种 β 值计算的接触线的抬升量如图-4 所示。 β 小时,在着力点抬升量最大; β 增长接近 1 时,抬升量随之也增大,并且,在 β 等于 1 时,抬升量约等于静抬升量的 2.4 倍,同时,在着力点前方,接触线急剧变弯;当力的运行超过波动传播速度 C , β 大于 1 时,着力点后方的变位也变大,且在着力点前方,传播抗弯刚性引起的波动(C_{BU})。

根据以上计算结果,可作如下推断:喷气式飞机在超过马赫飞行时,喷气式飞机产生冲击波,在这种冲击波的波面,空气压力变化非常大,空气被扰乱。但如果冲击波的影响消失,空气就会恢复到原来的状态。

然而,对于接触线情况就不同了,接触线的过量抬升会伴随出现受电弓与接触悬挂金具碰击及引起损坏。接触线的急剧弯曲也可能引起接触线塑性变形和断线。即使运行 1 次闯过去了,但受电弓通过后接触网很可能呈现破坏状态。

4. 悬挂张力

悬挂张力关系到接触线的波动传播速度,是接触网·受电弓系统的重要管理参数。这里讲述一下三角连板和张力、波动传播速度的关系。

复链形悬挂用张力补偿装置调整接触线、辅助承力索、承力索 3 线的张力时,使用 2 个三角连板。第 1 个(叫 1 号连板)锚固接触线和辅助承力索,第 2 个(叫 2 号连板)锚固第 1 个三角连板和承力索。三角连板由于其自身形状特点,使用中一旦倾斜,张力就会发生变化。因此,保持连板垂直和张力在规定值是维持良好受流性能的条件。所以,试求出三角连板倾斜和接触线张力、波动传播速度的关系。

图-5 所示为锚固接触线和辅助承力索的三角连板(1 号连板)的计算模型。假设连板如图

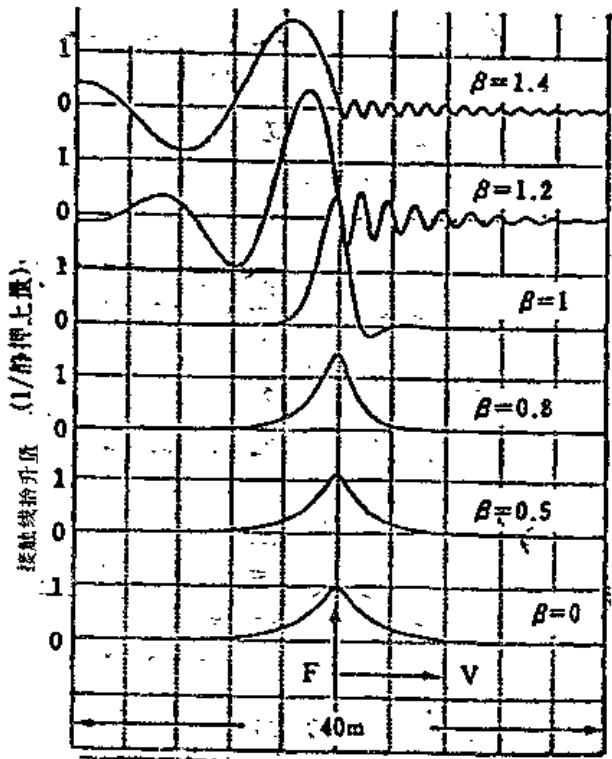


图-4 梁的变形计算实例

中倾斜合张力 T 也不发生变化,则接触线张力为:

$$T_{12} = (T/2)(1 - \tan\theta_2 \cdot \tan\Delta\theta) \dots\dots (4)$$

$$\approx (T/2)(1 - \tan\theta_2 \cdot \Delta\theta) \dots\dots (5)$$

(当 $\Delta\theta$ 小于 16° 时,式(5)计算结果足够精确)

用(4)式计算的新干线接触线张力如图-6 所示。由图可知,当连板如图-5 所示方向倾斜 12° 时,接触线张力约减小 1.46KN ,波动传播速度约降低 18km/h 。

降低 18km/h 看起来好象不大,但是,一旦锚固承力索的 2 号连板也倾斜,致使 T 减小,接触线的张力和波动传播速度将更加减小。实际上,由于承力索和接触线、辅助承力索材质差异,温度变化就会引起连板倾斜使张力 T 发生变化。由此可知,无论是对第 1 号或是第 2 号连板,可以说保证连板经常保持在垂直位置是维持良好受流性能的有利条件。

5. 张力测量方法

在 4 中讲述了三角连板倾斜和

接触线张力变化及其对接触线波动传播速度的影响。那么,实际中为了知道究竟是哪一个张力发生了变化,则必须有一个测量张力的方法。对于试验装置,可以用张力计测量,但是,对于实际设备,使用张力计测量就相当困难。下面介绍一个测量精度比张力计低而不用张力计的测量悬挂张力的简单方法。

5.1 原理

加有张力的线索在二点固定,在线索中部压上一个力时,线索就会产生变形(图-7)这时,有下式成立

$$Y = \frac{SF}{4T} \dots\dots (6)$$

$$\therefore T = \frac{SF}{4Y} \dots\dots (7)$$

因此,为了求得张力 T ,先确定 S 、 F 就行了。

5.2 实际测量方法

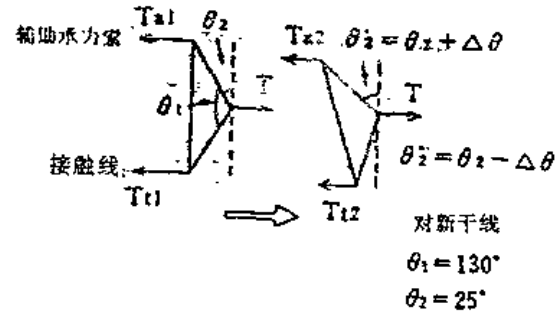


图-5 三角连板倾斜模型

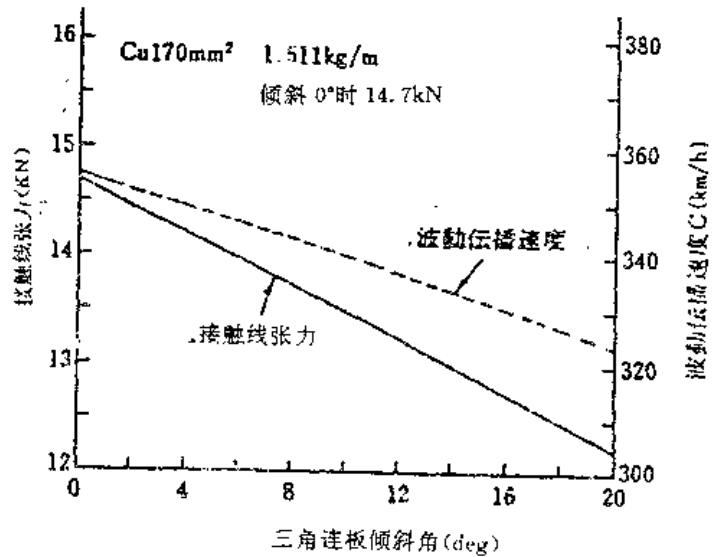


图-6 三角连板倾斜引起的张力、波动传播速度的变化

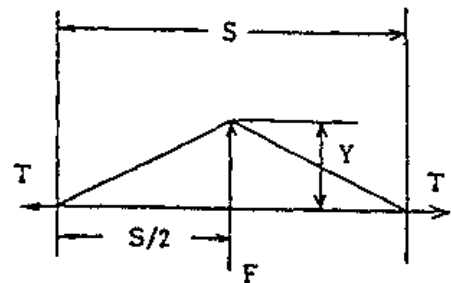


图-7 张力测定法 原理

对于实际的接触网,先测定(7)式中的参数来求张力 T 。如图—8所示,测量的顺序大概如下:

- (1)避开测量跨距中央附近的一根吊弦。
- (2)测量 h_0 、 h_1 、 h_2 、 S 。这里 h_0 等通常是对轨面的高度,若有能够从其它某个基准点精确测量的方法也是可行的。
- (3)在避开的吊弦处挂重物 W 。
- (4)与(2)相同地再测一遍各点的高度 h_0 等值。
- (5)根据以上测量,利用(7)式可求得接触线张力 T 为:

$$y_0 = h_0 - h'_0$$

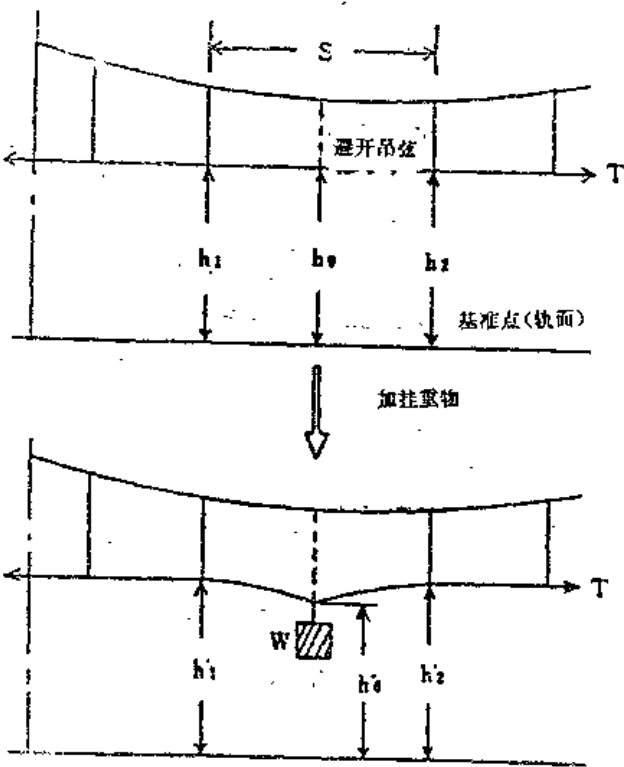
$$y_1 = h_1 - h'_1$$

$$y_2 = h_2 - h'_2$$

$$T = \frac{WS}{4[y_0 - (y_1 + y_2)/2]} \dots\dots\dots(8)$$

- (6)提高测量精度注意事项:
 - a. 准确测量高度。
 - b. 分别采用5kg、10kg两种重物进行测量为宜。

希望进一步努力,开发出简便且精度高的测量方法。以便经常保持张力在一恒定值。



图—8 张力测量顺序

接触网·受电弓系统的共振,

既有线接触线波状磨耗

铁道综合技术研究所 南见务

目 录

1. 多个受电弓运行时的共振	(1)
1.1 共振现象解析	(1)
1.2 共振现象的现场检验	(2)
1.3 防止共振现象发生的对策	(2)
2. 1 个受电弓运行时的共振	(2)
2.1 共振现象解析	(3)
2.2 共振现象的受流试验装置检验	(3)
2.3 防止共振现象发生的对策	(3)
3. 接触线的波状磨耗(既有线)	(4)
3.1 接触线波状磨耗现状	(4)
3.2 波状磨耗的发生机理	(4)
3.3 防止波状磨耗发生的对策	(4)

本篇紧接上篇,继续概述接触网受流理论和受流现象。

在这一篇中,将讲述新干线多个受电弓运行时的共振和既有线接触网短跨距等处1个受电弓运动时的共振,以及接触网和受电弓的共振现象及其防止对策。并且,在后半部还将讲述在既有线受电弓起动区段内存在的接触线波状磨损的发生机理及其防止对策。

1. 多个受电弓运行时的共振

象新干线那样使用多个受电弓运行时,存在着越位于后部的受电弓其与接触网的振动就越严重的现象。其结果会产生图-1 所示的电弧而发生大离线,并会增加受流系统的噪音,引起接触线局部磨损。

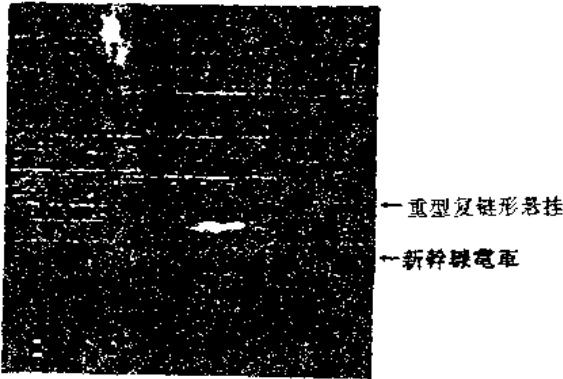


图-1 随共振发生的大离线 (新干线)

1.1 共振现象解析

进行在重型复链形悬挂(50m 跨距)上使用8个受电弓运行的计算机模拟时,受电弓上下振动的振幅如图-2 所示。由图可知,存在

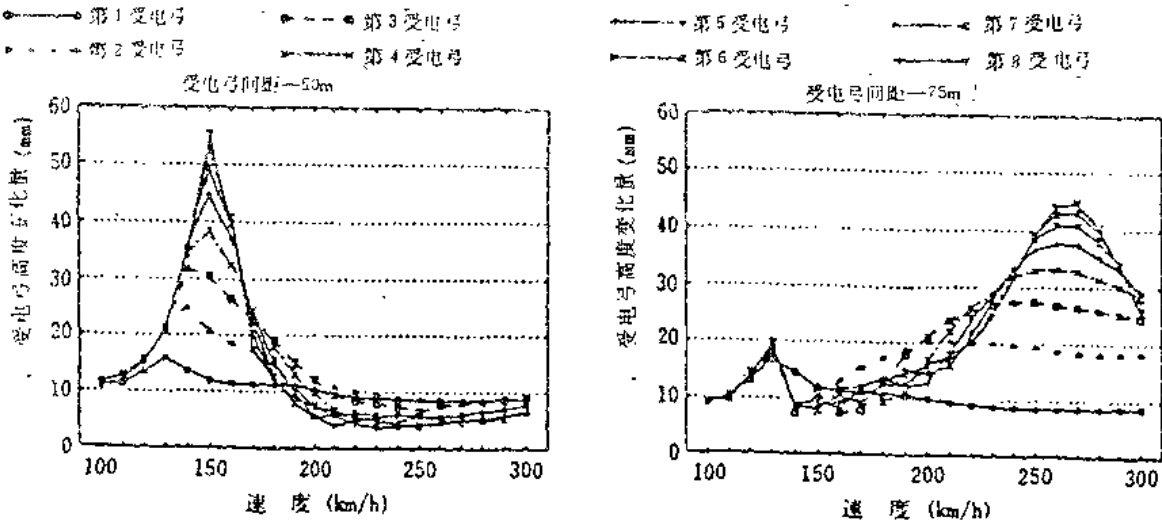


图-2 受电弓上下振动幅度的速度特性实例

一个受电弓越位于后部振幅越大的速度域,其速度大小与受电弓间距有关。求出重型复链形悬挂和重型简单链形悬挂各种受电弓间距时的共振速度和振幅,将其与跨距长度、受电弓间距的关系示于图-3。图中的直线用下式表示

$$V_n = \frac{rI_p}{2nL_s} C_i (n=1, 2, \dots) \dots\dots (1)$$

这里, V_n 、 C_t 、 L_t 、 L_p 分别是共振速度、接触网波动传播速度、跨距长度、受电弓间距, n 是受电弓到达时接触网上下振动的次数, $n=1$ 时将产生最显著的共振, r 是因多个受电弓引起的由接触网悬挂方式决定的参数, 它与接触网结构、参数及 L_p/L_t 有关, 其值小于 1。对于图-3 的直线, r 在重型复链形悬挂时为 0.8, 重型简单链形悬挂时为 0.9。可以断定共振就大致在(1)式所表示的直线附近产生。

1.2 共振现象的现场检验

图-4 为在实际中产生的使用多个受电弓的共振现象实例。这是在东海道新干线新横浜站附近测量的接触网(50m 跨距、3.5m 吊弦间距)振动结果。在 170km/h 时, 与后弓接触的接触线的变位振幅的确显著增加, 第 2 个以后的受电弓在接触线刚开始向上振动时就到达了。所以, 残留振动振幅也大。

1.3 防止共振现象发生的对策

由上可知, 使用多个受电弓在其间距大于接触网跨距时都可能发生共振, 对于高速, 条件具备时也会急剧发生共振。根据计算机模拟结果可以预测, 高速时发生的离线增多了, 其对受流性能的影响也增大了。因此, 可采取下列有效措施防止共振现象发生。

(a) 按在高速的规定运行速度不发生共振来配置受电弓。

(b) 在受电弓和接触网上安装阻尼器。
本研究室的真锅室主任等人员的研究成果对这种现象进行了分析说明, 并提出了采取的对策。详见下面参考文献。

真锅克士、藤井保和: 多个受电弓运行时的共振现象及其对策 铁道总研报告第 2 卷第 12 号 1988 年 12 月 P₃₋₁₄

2. 1 个受电弓运行时的共振

即使使用 1 个受电弓, 也经常出现受电弓振动增大的现象, 这种情况下也会发生大离线。特别在既有线接触网短跨距一类的地方可能发生, 在直流电气化区段, 会造成受电弓熔断和滑板阶梯状磨损, 因此, 必须予以重视。

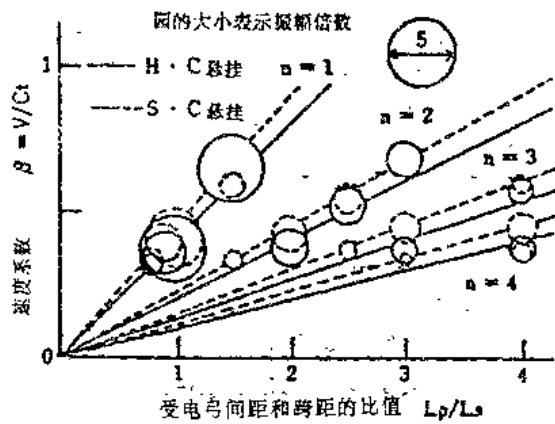


图-3 受电弓间距和共振速度的关系

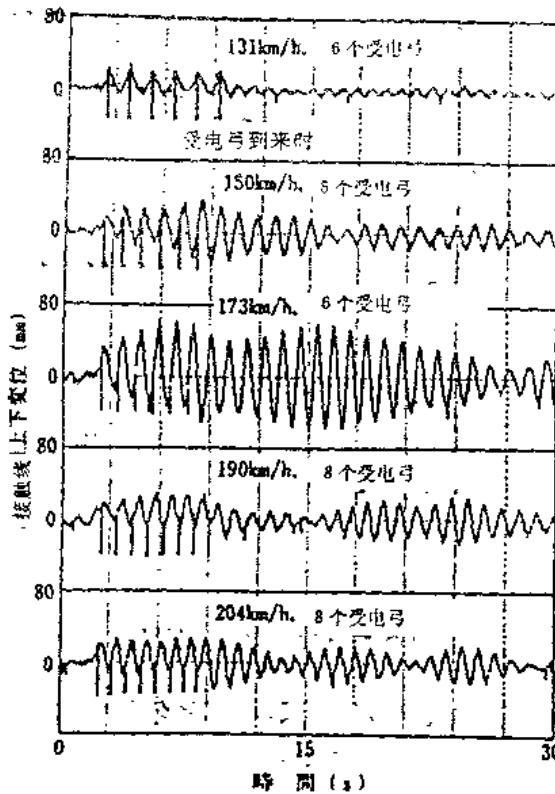


图-4 接触网振动的测量波形

2.1 共振现象解析

接触网的弹性系数如图-5 所示,一般在悬挂点附近大(硬),在跨距中部小(软)。受电弓在这种接触网上运行时,会因跨距内弹性系数变化而增大振动,当运行速度使其振动频率与接触网·受电弓系统固有频率相同时,就会发生这种 1 个受电弓运行的共振。这时的运动模型可用图-6 所示的弹簧—质点系统模型表示。不过,这种模型只适用于接触网的归算质量比受电弓的归算质量小时的情况,例如图-7 所示的短跨距接触网就易发生显著的共振现象,并且,这种接触网的共振速度多与实际运行速度不相上下,因此,必须予以重视。

2.2 共振现象的受流试验装置检验

我们利用铁道总研所的受流试验装置对 1 个受电弓运行的共振现象进行了检验。受流试验装置是一个用线性可控硅电动机驱动的走行转向架,用于测量实际的接触网·受电弓系统的动态特性。其走行距离全长约 500m,在速度大致不变的情行区间进行各种特性的测量。走行距离的速度特性和走行转向架如图-8 所示。

受电弓上下振动及发生离线的状况见图-9,由图可知,受电弓运行速度接近于共振速度时,受电弓发生上下大振动,通过悬挂点后紧接着出现反复大离线。

2.3 防止共振现象发生的对策

为了抑制这种共振现象的发生,改善受流性能。增大振动系统的衰减系数是一种有效方法。图-10 为开发出的衰减系数大的小型弹性吊弦,这种吊弦也适用于悬挂高度低的接触网,其效果已经过验证。图-11 所示为在受流试验装置上进行试验的结果,由于使用了受电弓阻尼装置和弹性吊弦,抑制了共振现象的发生,使受流性能得到了改善。

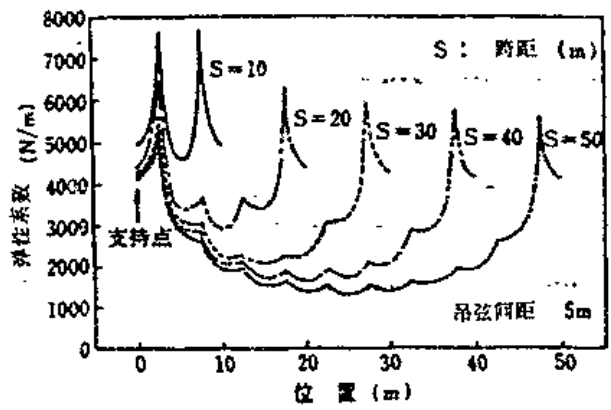


图-5 各种跨距对应的弹性系数
(简单链形悬挂)

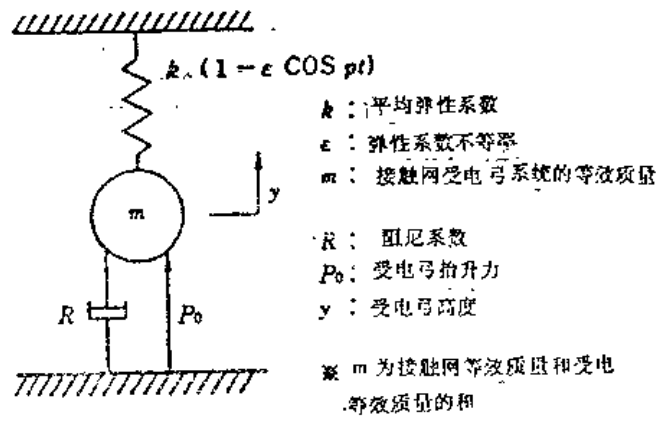


图-6 共振现象解析模型
(弹簧·质点系模型)

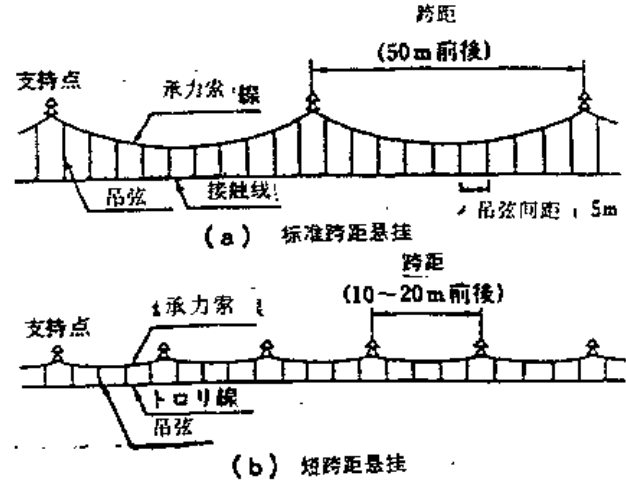


图-7 短跨距悬挂示意图

详细情况请参照下列参考文献。

- (1) 纲千光雄:短跨距接触网的受流性能及其改善方法 铁道总研报告第4卷第12号 1990年12月 P6-16
- (2) 纲千光雄:短跨距双简单链形悬挂的受流性能 平成3年电气学会全国大会演讲论文集(8) 平成3年4月 P8-196~197

3. 接触线的波状磨耗(既有线)

近年来,既有线的直流低速区间发生了接触线的波状磨耗。造成了接触线断线及接触线和受电弓滑板磨耗增加等后果。应尽快查明波状磨耗发生的原因,并尽快开发采取相应的防止对策。

3.1 接触线波状磨耗现状

既有线接触线的波状磨耗如图-12~13所示,波状磨耗形成了约64mm规则长间距的大波齿(严重时波齿深度超过了1mm)磨痕。滑磨面如山谷起伏,波峰部分为铜原色,波谷部分为电弧灼灼后的黑色。图-14所示为在既有线低速区间测量的接触线顺线路方向的残存直径。波状磨耗特别严重的地段发生在从受电弓的停车位置向发车方向数十米的范围内。

3.2 波状磨耗的发生机理

受电弓滑板与接触线因离线产生的电弧对接触线的损伤是既有线产生波状磨耗的主要原因。在受流电流小的交流电化区段和直流电化区段,其惰行区间就没有出现低速区间那样显著的波状磨耗现象。在既有线上,为减轻接触线和受电弓滑板的磨耗而在受电弓上装设的固态润滑剂可认为是电气绝缘物,因此,受电弓在接触线的不规则波齿处最先仅与固态润滑剂接触,故在接触线与受电弓滑板间就产生了电弧。如图-15所示,因在受电弓滑板间距的特定位置反复发生电弧损伤,从而形成了波状磨耗。据此按既有线受电弓滑板的排列情况求得波状磨耗波长的理论值为63.75mm,这与现场实测的波长值基本一致。并且,受电弓运行的计算机模拟的结果也显示形成波状磨耗的波长约为60mm(参照图-16)。

3.3 防止波状磨耗发生的对策

因已弄清了波状磨耗的发生机理,特提出了下面的防止对策,在为减轻接触线和受电弓滑板的磨耗方面开发采用了一种实用的装设固态润滑剂的方法,这种方法就是在计算机模拟(参

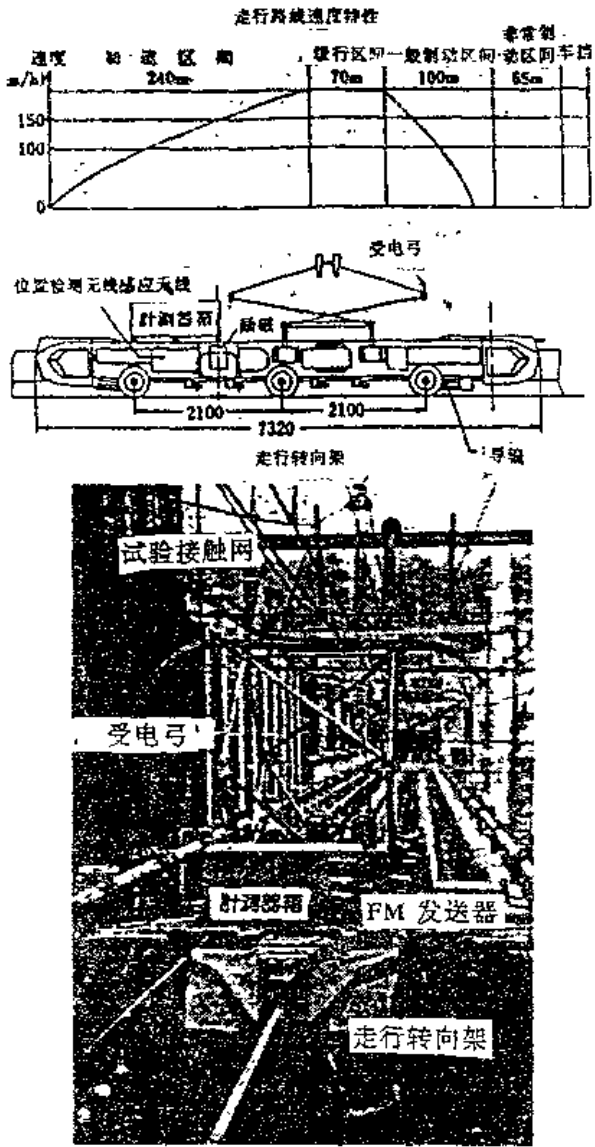


图-8 受流试验装置概要图