

# 高边坡砼护栏设计参数的估计

丁桦 黄婉莉

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要:** 本文从冲击动力学的角度对高边坡砼护栏的设计中的一些主要参数给出了相应的偏于保守的、易于检验的估计。这些估计对于砼护栏的安全性能的评估具有一定的指导意义。

**关键词:** 公路, 高边坡, 砼护栏, 安全性能。

## 1 引言

高边坡路段, 常见于地势起伏较大的地段。特别是山区公路, 有很大一部分的路段都是高边坡路段。我国地域辽阔, 地形千奇百态, 已建成和在建的公路中存在很多高边坡路段。从某种角度上说, 在高边坡路段上设置护栏会带来比在一般路段上设置护栏更好的效果。但目前, 我国在这方面的标准单一<sup>[1]</sup>, 且基本上是沿用国外的早期标准, 远不能满足具有各种不同交通、施工等条件的我国公路建设的需要。近年来, 这类路段上重大恶性事故连续不断。因此有必要结合我国国情对高边坡护栏设计中与高边坡有关的一些设计参数给出必要的估计, 为设计提供必要的依据。

我们的目的是对高边坡护栏的设计中的一些主要参数给出保守的、易于检验的估计。这样我们就可以利用这些估计对我们的护栏设计进行有效性检验。

在本文中, 我们将对失控车辆与砼护栏碰撞时的相互作用冲量和相互作用力、护栏的位移及基础的变形给出估计。并通过失控客车的例子加以说明。

## 2 作用冲量和作用力的估计

为给出失控车辆与砼护栏碰撞时的相互作用冲量的估计, 我们作出如下假设:

1. 砼护栏为一刚性墙。
2. 在碰撞主要过程中车体基本上是作平面运动。
3. 车体与护栏的碰撞是完全弹性碰撞。

丁桦, 男, 1960.3 出生, 数学博士, 副研究员。

在这些假设之下，我们得到的是一个关于碰撞冲量的一个偏于保守的估计。这是因为这些假设忽略了护栏在碰撞过程中对动量和能量的吸收、忽略了垂直方向上的动量和能量的分配、忽略了护栏和车体的塑性变形。这时利用动量和能量方程我们有

$$\begin{cases} m \cdot (u - u_0) = -I \\ m \cdot (v - v_0) = -I_f \\ J \cdot \omega = Dy_{IP} \cdot I - Dx_{IP} \cdot I_f \\ \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (u^2 + v^2) + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 + W \end{cases} \quad (1)$$

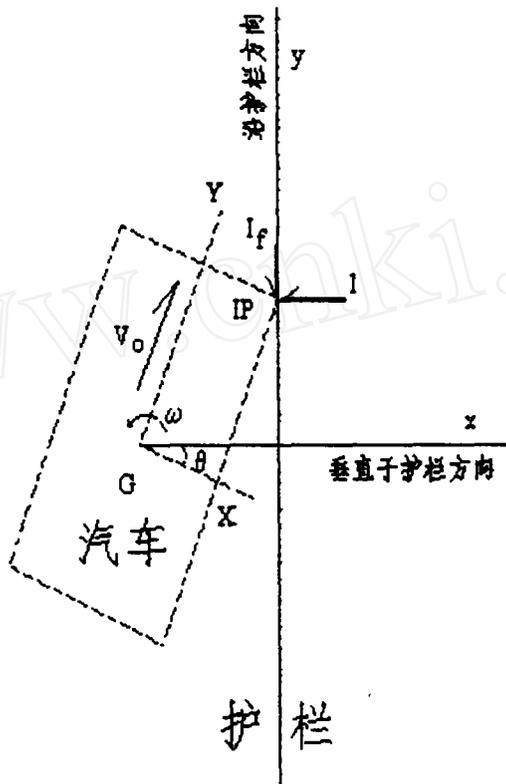
这里  $m$ 、 $J$  分别为汽车的质量和绕质心水平转动的转动惯量， $I$ 、 $I_f$  分别为护栏作用于汽车的垂直于护栏方向和平行于护栏方向上的冲量。  
 $u_0 = -V_0 \cdot \sin(\theta)$  和  $v_0 = V_0 \cdot \cos(\theta)$

(注意这里  $\theta \leq 0$ ) 分别为汽车在碰撞前的垂直于护栏方向和平行于护栏方向上的初始速度。 $u$ 、 $v$  和  $\omega$  分别为汽车在初始碰撞后垂直于护栏方向和平行于护栏方向上的速度和在水平面上转动的角速度， $W$  为摩擦冲量  $I_f$  所做的功。设接触点为  $IP$  点，它在随体坐标系中的坐标为  $(X_{IP}, Y_{IP})$ ，则我们有

$$\begin{cases} Dx_{IP} = X_{IP} \cdot \cos(\theta) - Y_{IP} \cdot \sin(\theta) \\ Dy_{IP} = X_{IP} \cdot \sin(\theta) + Y_{IP} \cdot \cos(\theta) \end{cases}$$

若我们再假设：

4. 车体与护栏间的动摩擦系数小于 1，且初始碰撞角度小于 30 度。  
 我们有<sup>[3]</sup>  $I_f = \mu \cdot I$  和



$$W = v_0 \cdot I_f + \frac{Dx_{IP} \cdot Dy_{IP}}{J} \cdot \frac{I \cdot I_f}{2} - \left( \frac{1}{m} + \frac{Dx_{IP}^2}{J} \right) \cdot \frac{I_f^2}{2}$$

求解方程, 我们得到

$$I_{弹性} = \frac{2 \cdot m \cdot J \cdot u_0}{J + m \cdot (Dy_{IP}^2 - \mu \cdot Dx_{IP} \cdot Dy_{IP})} \quad (2)$$

对于完全塑性碰撞, 其作用冲量是同等条件下的弹性碰撞的作用冲量的二分之一。这样, 我们有

$$I_{塑性} = \frac{m \cdot J \cdot u_0}{J + m \cdot (Dy_{IP}^2 - \mu \cdot Dx_{IP} \cdot Dy_{IP})} \quad (3)$$

当碰撞中车轮与护栏接触时, 碰撞基本上是弹性的。而当碰撞中车厢与护栏接触时, 碰撞基本上属于塑性碰撞。

根据 NCHRP Report 153, 对于 10 吨左右的车与护栏碰撞加速度的第一个波峰的持续时间约为 50ms。对于小汽车, 从实验曲线看, 这个持续时间在 20-30ms 之间。对于 18 吨左右的车 (一般大客车), 这个持续时间将大于 50ms, 但是我们没有可依据的数据。作为保守的估计我们认为这个持续时间为 50ms。这样车对护栏的平均作用力为

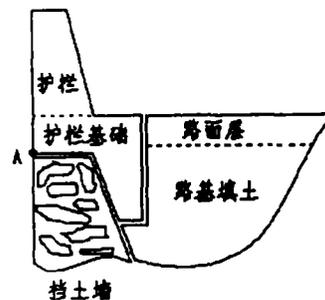
$$\begin{cases} F_{弹性} = \frac{I_{弹性}}{\bar{\tau}} \\ F_{塑性} = \frac{I_{塑性}}{\bar{\tau}} \end{cases} \quad (4)$$

这里我们取

$$\bar{\tau} = \begin{cases} 25ms & m < 2 \text{吨} \\ 50ms & m \geq 8 \text{吨} \end{cases} \quad (5)$$

### 3 护栏基础变形的估计

现在我们来对护栏基础的变形作一保守的估计。护栏的设置见示意图。在这里我们主要考虑在碰撞过程中由于护栏绕 A 点的转动所引起的路基的变形。为了简化问题我们将忽略护栏的变形所消耗的能量和车体在垂直与路面方向上的运动能量, 并假设挡土墙是刚性的。同时我们用路基填土的被动土压力系数来代替路面层的被动土压力系数 (一般



来说路基层的被动土压力系数要大于路基填土的被动土压力系数)。最后我们假设车与护栏的碰撞点在护栏的顶部。所有这些假设将使我们给出护栏绕 A 点的转动所引起的路基的变形的一个保守的估计。

在上述假设下我们有

$$\begin{cases} J_H \cdot \dot{\omega}_H = R \cdot Q - M_g - M_s \\ m \cdot \dot{u} = -Q \\ m \cdot \dot{v} = -\mu \cdot Q \\ J \cdot \dot{\omega} = (Dy_{IP} - \mu \cdot Dx_{IP}) \cdot Q \\ u - Dy_{IP} \cdot \omega = R \cdot \omega_H \end{cases} \quad (6)$$

其中  $m, u, v, J, \omega$  和  $Dy_{IP}, Dx_{IP}, \mu$  的定义与第一节相同,  $J_H, \omega_H$  为护栏绕 A 点的转动惯量和角速度,  $R$  为护栏顶到 A 点的距离,  $Q$  为护栏与车体间的作用力,  $M_g, M_s$  分别为护栏重力和路基被动土压力对 A 点的力矩。

根据动量和角动量守恒, 我们可以得到求解上述方程组的初始条件:

$$\omega_{H0} = \frac{\alpha}{R} \cdot I$$

$$u_0 = V \cdot \sin(|\theta|) - \frac{I}{m}$$

$$v_0 = V \cdot \cos(|\theta|) - \mu \cdot \frac{I}{m}$$

$$\omega_0 = \beta \cdot I$$

其中:

$$H = \frac{1}{m} + Dy_{IP} \cdot (Dy_{IP} - Dx_{IP} \cdot \mu)$$

$$\alpha = \frac{R^2}{J_H}$$

$$\beta = \frac{1}{J} \cdot (Dy_{IP} - \mu \cdot Dx_{IP})$$

$$I = \frac{V \cdot \sin(|\theta|)}{H + \alpha}$$

$V, \theta$  分别为碰撞速度和角度. 这样我们就可以求出护栏基础根部的水平位移

$$s = \frac{r}{R} \cdot \left( (u_0 - Dy_0 \cdot \omega_0) \cdot t_0 - H \cdot \left( A \cdot t_0 - \frac{1}{2} \cdot B \cdot t_0^2 \right) \right) \quad (7)$$

其中

$$A = \frac{V \cdot \sin(\theta) - R \cdot \omega_{H0} - Dy_{IP} \cdot \omega_0}{H + \alpha}$$

$$B = -\frac{R \cdot (M_g + M_s)}{(H + \alpha) \cdot J_H}$$

$$t_0 = \frac{R \cdot A + J_H \cdot \omega_{H0}}{R \cdot B + M_g + M_s}$$

#### 4 例子及讨论

以云南昆石路的高边坡护栏为例, 利用我们的估计来判断一下在 55 座大客车以 20 度角、每小时 50 公里时速撞向护栏时, 护栏的安全性。

设汽车的质心在车的水平面的中心位置, 对于 50 座的大型客车我们有  $(X_{IP}, Y_{IP}) = (1.25, 6)$ 。若认为车体质量在水平面内是均匀分布的则车体的转动惯量为

$$J = \frac{1}{3}(Y_{IP}^2 + X_{IP}^2)m$$

此时, 车与护栏的碰撞时的作用冲量为

$$I_{弹性} = 6.183 \times 10^4 \text{ 牛顿} \times \text{秒}$$

$$I_{塑性} = \frac{1}{2} I_{弹性} = 3.092 \times 10^4 \text{ 牛顿} \times \text{秒}$$

当碰撞中车轮与护栏接触时, 碰撞基本上是弹性的。而当碰撞中车厢与护栏接触时, 碰撞基本上属于塑性碰撞。

根据 (4) 和 (5) 式, 车对护栏的平均作用力为

$$F_{弹性} = 1.237 \times 10^6 \text{ 牛顿}$$

$$F_{塑性} = 6.118 \times 10^5 \text{ 牛顿}$$

利用云南昆石路的高边坡护栏设计资料我们计算得出

$$M_g = 6.8 \times 10^3 L \text{ (所有量都取公斤、米、秒制的量纲)}$$

$$M_s = 1.147 \times 10^4 L$$

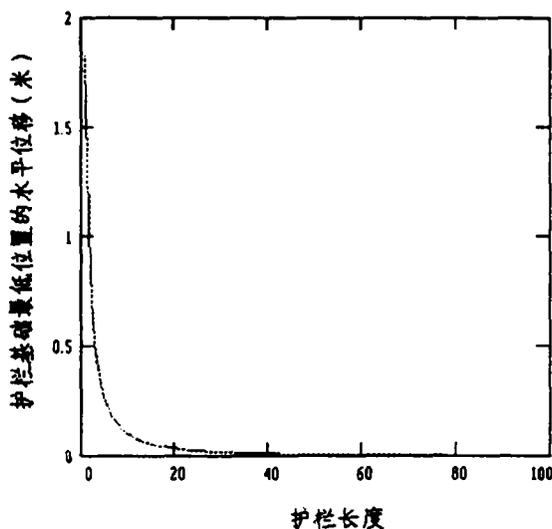
$$J_H = 1.05 \times 10^3 L$$

其中  $L$  为护栏的连续长度。护栏底部水平位移随护栏长度的变化见下图。从图中我们可以看出, 护栏底部水平位移随护栏长度的变化在护栏长度小于 10 米时非常剧烈, 但当护栏长度大于 20 米时护栏底部水平位移随护栏长度的增加变化越来越缓。当护栏长度为 70 米时, 护栏底部水平位移为

$$s_{70} = 0.004 \text{ 米}$$

通过验算我们可以知道云南昆石路的高边坡护栏若用 300 号混凝土是可以抵抗车对护栏的冲击力的。在保证护栏不倾覆的前提下, 护栏长度应大于

4 米。但要保证路基变形不大于 1 厘米时，护栏长度应大于 40 米。



护栏底部水平位移随护栏长度的变化规律。

由于我们在分析中忽略了很多减缓冲击作用的因素，我们给出的是一个偏于保守的估计。即，给出了车与护栏碰撞时的平均作用力和护栏位移及路基变形的上限值。

### 参 考 文 献

- 1 中华人民共和国行业标准 高速公路交通安全设施设计及施工技术规范. 人民交通出版社 1994, 北京.
- 2 Bonstad, M. E., and Michie, J. D. . Recommended procedures for vehicle crash testing of highway appurtenances. NCHRP Report 153, Transportation Research Board, Washington D. C., 1974.
- 3 ZHENG Zh. M., DING H., HUANG W. l., Impact of a rigid body to a rigid wall with friction. 中国科学院力学研究所预印本, IMCAS STR-96052, 1996.