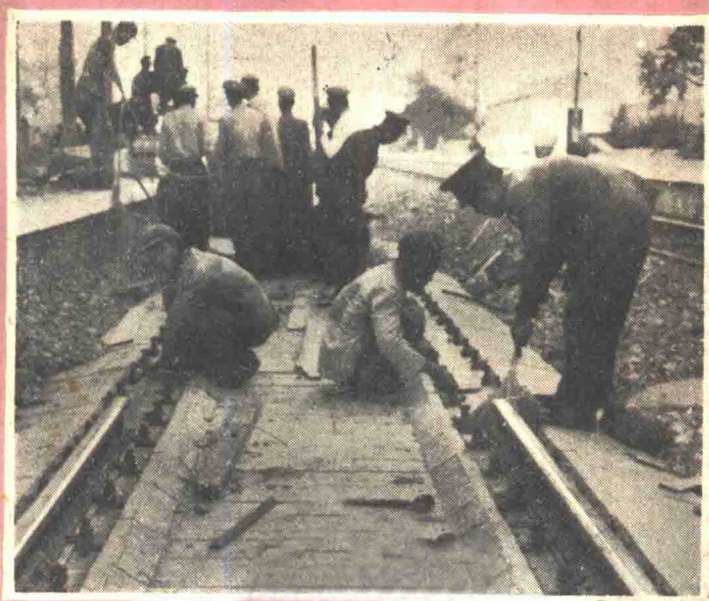


钢轨与钢轨基础的计算

Г. Е. 斯科洛杜莫夫 著



人民铁道出版社

鋼軌与鋼軌基础的計算

Г. Е. 斯科洛杜莫夫 著

王 世 馥 譯

人 民 鐵 道 出 版 社

一九五九年·北京

本書系苏联專家 Г.Е. 斯科洛杜莫夫同志在中國工作期間寫成的。闡述鋼軌及新型鋼軌基礎結構的計算理論，包括：鋼軌的靜力計算，綫路的靜力與動力計算，剛性鋼軌基礎的計算法，以及鋼筋混凝土軌枕、軌枕板、縱向軌枕等新型結構的設計原則和計算方法等，並舉有實例，以方便有關人員的學習和實際工作參考。

本書可作為廣大鐵路工務部門工程技術人員及有關研究人員參考用。

鋼軌與鋼軌基礎的計算

РАСЧЕТ РЕЛЬСОВ И РЕЛЬСОВЫХ ОСНОВАНИЙ

苏联 Г·Е·СКОРОДУМОВ 著

王世馥 譯

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印

書號1417 開本850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張4 $\frac{1}{2}$ 字數118千

1959年6月第1版

1959年6月第1版第1次印刷

印數0,001—2,300冊 定價(8)0.51元

目 录

概 述	1
第一章 鋼軌的靜力計算	2
第二章 綫路的动力計算	9
§ 1. 动力計算的基本理論	10
§ 2. 綫路上部構造各部分的动力計算	14
第三章 綫路上部構造各构件部分中应力計算举例	28
第四章 刚性鋼軌基础的計算方法	36
§ 1. 关于刚性鋼軌基础	36
§ 2. 初始参变数法	38
§ 3. 彈性理論空間問題的方法	44
第五章 钢筋混凝土軌枕(軌枕板)的設計和計算	54
§ 1. 軌枕形式及尺寸的选择	54
§ 2. 靜力計算	58
§ 3. 軌枕的强度、抗裂性及耐久性的驗算	63
§ 4. 軌枕板	71
第六章 縱向軌枕的設計和計算	76
§ 1. 形狀、尺寸及配筋的选择	76
§ 2. 靜力計算	79
附 录:	
1. 感应綫 μ 和 η 的縱座标值	85
2. 道床系数 $C = 4$ 公斤/公分 ³ 时 u, I, w 和 K 的值	90
3. 機車綫路計算資料	94
4. A_x, B_x, C_x, D_x 各函数的数值	96
5. N_1, N_2, N_3, N_4 各函数的数值	111
6. 彈性基础上長梁計算数据表	113
7. 混凝土及鋼筋計算数据表	137

概 述

鐵道綫路不論就作用于其上的力的多样性來說，或就其結構內部變形的多样性來說，都是很複雜的工程結構。

綫路上部構造的整体結構的設計以及其各構件部分的設計，都應根據技術經濟計算來進行。

與任何結構物一樣，對綫路上部構造及其各構件部分也應提出一定的要求。

上部構造應該是：

1) 有足夠的強度，以便當其各構件達到最大磨耗時，仍能完全保證列車以規定的速度安全地運行。

2) 是完全穩定的，在任何時刻，綫路的工作都應保證全部結構以及其個別構件相互之間的穩定性。

3) 要這樣地設計，使能保證沿綫路運行的車輛的穩定性和車輛運行時所消耗的能量為最少。

除上述各項要求外，上部構造的結構還必須經久耐用和造價低廉。設計綫路上部構造時，應使其建築費和維修費為最少。上部構造各零件之間的聯結應保證便於進行修理工作，並應保證當更換個別零件及整個結構時最低限度地中斷列車的正常运行。

儘管任務如此明確，儘管在上部構造設計及計算方面進行了很多研究和著作，但綫路計算的理論還沒有獲得應有的發展，與機車車輛以不同速度沿綫路運行的條件有關的大部分課題，目前還僅限於按綫路強度計算並部分地按綫路穩定計算來解決。

作用在綫路上的各種可變力和變形的複雜綜合，使得對準確地用數學方法來解決許多與綫路計算有關的問題發生困難。因此目前在實踐中，僅限於利用近似的計算方法及一些經驗公式。

第一章 鋼軌的靜力計算

綫路強度計算以下列假設为基础：

1) 將鋼軌看作为置于許多彈性支點上的无限長的梁，或置于連續的等彈性基础上的梁。

鋼軌在綫路上的实际工作情况和所采用的計算图形 略有不同。但以往的計算表明，按上面两种方法計算結果之差数不超过 5 ~ 7 %，因而可以这样假設。

目前，几乎在各国都采用將鋼軌看作为置于連續的等彈性基础上的梁的計算方法。

2) 計算中，假設基础单位面积上的压力和該压力所引起的彈性沉落成正比，即

$$p = Cy$$

式中： p —— 单位面积上彈性基础的反力；

y —— 彈性沉落；

C —— 表示基础彈性的系数。

这种假定不能反映出甚至于在靜力作用下彈性物体中所发生的真实现象，但是由于沒有更好的来代替它，只好采用此种假定。在实际运营条件下所发生的沉落范圍內，其誤差并不大，因而采用这种假定对計算精确度尚无影响。

随着列車运行速度的不断提高，当达到这样的情形，即列車已經通过，而基础还来不及沉落时，則上述假定将会失掉实际意义。此时则需要研究出彈性沉落与作用力之間的新的关系式。

3) 計算是按完整的鋼軌截面进行的，并且不考慮螺栓孔眼的削弱。

4) 由于垂直力及水平力的作用所产生的应力，通常分別进行計算。同时假設垂直力作用在鋼軌的对称面中，且两股軌綫所受

的荷載作用相同。

5) 由于目前对水平力的作用研究得还不充分, 所以, 計算时用引入修正系数及增大安全系数来考虑其影响。

6) 因为获得各可变力的准确的数学公式是很繁杂的, 所以进行动力計算时, 用一些經驗公式来求算这些可变力的数值。

7) 計算是按直綫区段內軌节中間的断面进行的; 并假定機車車輛是处在規定的容許誤差內的完善状态中。

8) 进行綫路强度計算时, 鋼軌、扣件及軌枕的自重忽略不計。

上述假設与綫路的眞实情况有出入, 但是在当前行車的速度下进行实际計算时, 这些出入不大, 可以忽略不計。

进行計算时, 主要系数或原始系数如下:

1) 軌枕的垫床系数 C (公斤/公分³)。系数 C 在数值上等于作用在基础的单位面积上的力, 該力能引起基础的单位彈性沉落。

系数 C 表示軌枕下基础的彈性特征。并假設在力的作用下, 軌枕不改变自己的厚度, 且系数 C 与軌枕的尺寸和质量以及与綫路的其他构件无关。

在綫路計算細則中, 采用下列 C 值:

对于碎石道碴, $C_m = 6$ 公斤/公分³;

对于二等砾石、貝壳及砂質道碴, $C_m = 4$ 公斤/公分³。

事实上, 軌枕的垫床系数不是固定的数值, 它在极大的范围內随道碴的质量和粒徑的大小、温度、湿度以及其他因素而变。

对于碎石道碴和級配砾石道碴, 系数 C 的变化范围为 5 ~ 10 公斤/公分³; 对于細粒道碴, C 值在 2 ~ 15 公斤/公分³之間。

2) 鋼軌基础的彈性系数 D (公斤/公分)。其数值等于在軌下断面处作用于軌枕上的力, 該力能引起軌枕的单位彈性沉落。

若軌枕是絕對剛性的, 則 $2D = C a b$ 。

式中: a —— 軌枕长度; b —— 軌枕底面寬度。

实际上，軌枕在荷載作用下是要撓曲的，其在軌下断面处的彈性沉落 y_p 要比平均沉落 y_c 为大（图1）。

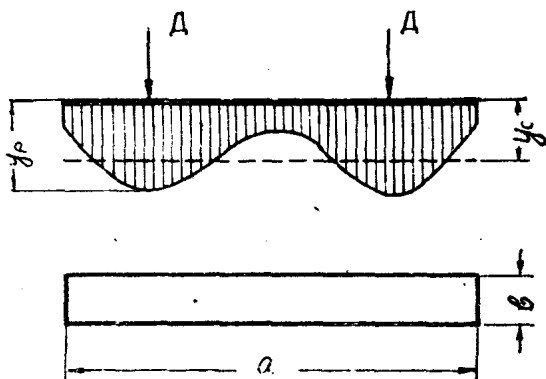


图 1

因此： $2 D = C a b y_c = C a b \alpha y_p$

式中： α ——平均沉落 y_c 与軌下断面內最大沉落的比值。

但是，根据鋼軌基础的彈性系数 D 的定义，其彈性沉落等于1，所以

$$D = C a \frac{a b}{2}$$

$\alpha = \frac{y_c}{y_p}$ ——軌枕撓曲系数，其值可用試驗或計算方法确定。对于木枕， α 值在0.70~0.90之間。

在剛性基础（整体基础，地下鉄道的綫路等）上修建綫路时，系数 C 及 D 的数值应根据实际上被压缩及被撓曲的部分（如減震垫、鑲补短枕及其它設備）的彈性特征近似地确定之。

图2 概略地示出了鋼軌固定在鋪有橡皮垫板的整体基础上的情形，和鋼軌固定在地下鉄道的混凝土基础上的情形（鋼軌底下采用橡皮垫板及埋于剛性基础中的軌枕短块）。

若彈性构件（彈性垫）的厚度为 h ，彈性模量为 E ，并被均匀的力所压缩，使在单位面积上造成的压力为 σ ，则根据虎克定律：

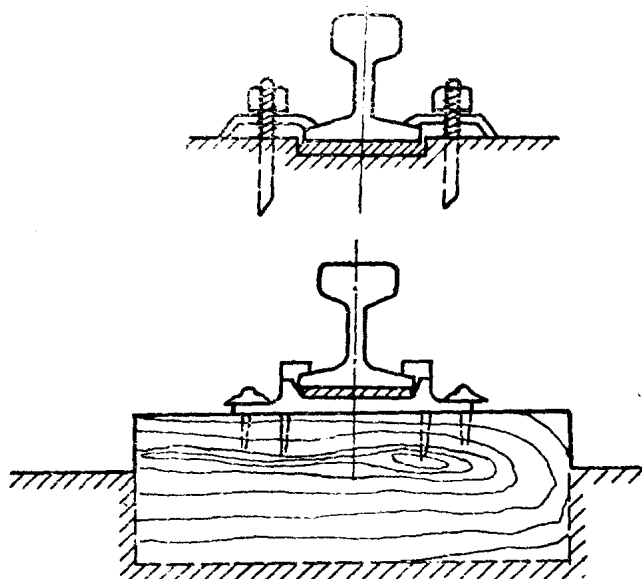


圖 2

$$\sigma = E \varepsilon$$

式中: ε ——彈性構件的相對壓縮量, 等於絕對壓縮量與構件厚度的比。

根據係數 C 的定義, 如果絕對壓縮值 $y = 1$, 則係數 C 將等於單位壓力 σ 。

於是:

$$C = \frac{E}{h}$$

若彈性構件系具有折皺的橡皮墊板, 則係數 C 應用實驗方法確定之。

若軌道的彈性不是由一個, 而是由幾個彈性構件產生的, 並且壓力傳遞到第 i 個構件上時的面積為 ω_i , 則根據沉落與壓力成正比的假定, 作用在受壓部件上的力 P 將會產生壓縮量 y_i 。按虎克定律:

$$\frac{P}{\omega_i} = E_i \frac{y_i}{h_i}$$

由此：
$$y_i = \frac{Ph_i}{\omega_i E_i}$$

根据系数 $\mathcal{D}$ 的定义，如果所有弹性构件的沉落的总和等于 1，则 $\mathcal{D}$ 等于 P ，即：

$$\sum_{i=1}^{i=n} y_i = 1 \quad \text{或} \quad \mathcal{D} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{\omega_i E_i} = 1$$

由此可求得 $\mathcal{D}$ 值：

$$\mathcal{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{\omega_i E_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{c_i \omega_i}}$$

若弹性构件除了压缩之外还发生挠曲，则还应考虑轨下断面内该挠曲的纵坐标之值。

若轨枕发生挠曲，且其挠度等于：

$$y_0 = \frac{2 \mathcal{D}}{C_0 \alpha ab}$$

式中： C_0 ——轨枕下面垫床系数，

则可按以下方程式求 $\mathcal{D}$ 之值：

$$\sum_{i=1}^{i=n} y_i + y_0 = 1$$

由此：
$$\mathcal{D} \left[\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{\omega_i E_i} + \frac{2}{C_0 \alpha ab} \right] = 1$$

所以在一般情况下， $\mathcal{D}$ 的公式具有以下形式：

$$\mathcal{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{\omega_i E_i} + \frac{2}{C_0 \alpha ab}} = \frac{1}{\frac{2}{C_0 \alpha ab} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{C_i \omega_i}}$$

3) 如果把钢轨看作为置于连续等弹性基础上的梁，则认为力 $\mathcal{D}$ 是均匀地作用在轨枕间跨度的全部长度内，即用均匀分布在一个跨孔上的、强度为 u 的匀布荷载（图 3）来代替集中荷载。

$$u = \frac{Caab}{2l} \kappa z / c \kappa^2$$

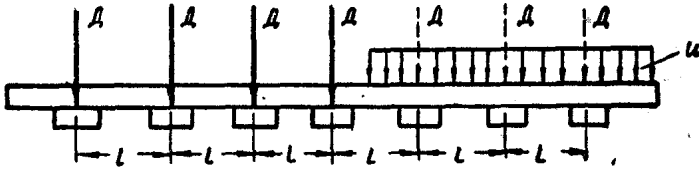


圖 3

勻布荷載的強度，或單位長度鋼軌上的壓力為：

$$u = \frac{P}{l}$$

式中： l ——軌枕間距的大小；

u ——軌道基礎的彈性模量（公斤/公分²）。當將鋼軌看作為置于連續彈性基礎上的梁時， u 為表示軌下基礎彈性特征的數值。 u 在數值上的大小相當於作用在單位長度鋼軌上的力，該力能引起軌下基礎的單位彈性沉落。

軌道基礎彈性模量 u 是按將鋼軌置于連續彈性基礎上計算綫路強度時的主要系數。

彈性模量的數值與軌枕根數、尺寸與狀態，道碴種類與密實程度以及道碴是否處於凍結狀態有關。路基的狀態，特別是當運行速度不大時，也會影響到 u 值的大小。

在搗固良好的綫路上，對於碎石道床可採用 $u = 220 \sim 350$ 公斤/公分²；對於砂質道床可採用 $u = 150 \sim 250$ 公斤/公分²。

在確定彈性模量的實踐中表明，它的實際數值在很大範圍內變動：從非凍結狀態道碴的 $50 \sim 350$ 公斤/公分² 到凍結狀態道碴的 $800 \sim 900$ 公斤/公分²。

因此當需要較高的計算精度時，彈性模量的數值應通過在該區段上的實驗求得。

4) 除了上面所述的以外，當推導各主要計算公式時，還需

要引入一个附加的主要系数 $K \left(= \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \text{ 公分}^{-1} \right)$ ，它是通过弹性模量 u 和鋼軌本身的刚度 EI 来表示基础的刚性的。系数 K 称为鋼軌基础和鋼軌的剛比系数。

解算彈性梁的方程式可以得出求鋼軌断面以及計算軌道基础各构件所需的弯曲力矩 M ，彈性撓度 y ，单位长度抵抗反力 q 及軌枕反力 Q 的各值，其求法如下：

$$M = \frac{P}{4K} \mu$$

$$y = \frac{PK}{2u} \eta$$

$$q = \frac{PK}{2} \eta$$

$$Q = \frac{PKl}{2} \eta$$

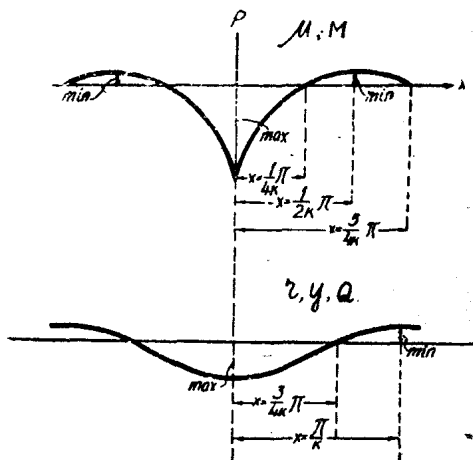


圖 4

式中： P ——作用于鋼軌断面的力，以公斤計；

u ——軌道基础的彈性模量；

K ——剛比系数；

l ——二相邻軌枕中心綫的間距；

$\mu = e^{-Kx}(\cos Kx - \sin Kx)$ ；

$\eta = e^{-Kx}(\cos Kx + \sin Kx)$ ；

e ——自然对数的底；

x ——荷載作用点至所研究的断面的距离。

如給出不同的 x 值，則可繪出 μ 及 η 的图形（圖 4）。

根据单位力相互轉換的原理，圖 4 所示的各图形同时也是 M 、 y 及 Q 的影响綫。

在荷載系的作用下，按下列公式确定計算断面內的 M 、 y 及 Q 各值（圖 5）。

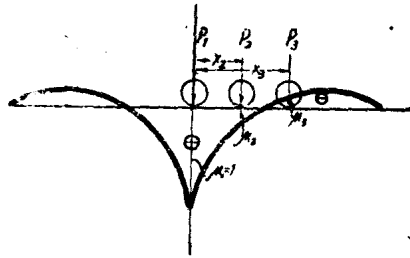


圖 5

$$M = \frac{1}{4} K (p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2 + \dots + p_n \mu_n) = \frac{1}{4} k \sum_{i=1}^{i=n} p_i \mu_i$$

$$y = \frac{K}{2 u} (p_1 \eta_1 + p_2 \eta_2 + \dots + p_n \eta_n) = \frac{k}{2 u} \sum_{i=1}^{i=n} p_i \eta_i$$

$$Q = \frac{K l}{2} (p_1 \eta_1 + p_2 \eta_2 + \dots + p_n \eta_n) = \frac{k l}{2} \sum_{i=1}^{i=n} p_i \eta_i$$

式中： $\sum p_i \mu_i$ 及 $\sum p_i \eta_i$ ——代替荷載系的當量荷載。

鋼軌內的應力按下式確定：

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ 公斤/公分}^2。$$

式中： W ——鋼軌的抵抗矩。

Q 值（作用於軌枕上的壓力，以公斤計）是計算軌枕、道碴及路基內的應力時的原始數據。

第二章 綫路的動力計算

車輛運行時，作用在綫路上的各力不僅在數值上與靜力不同，而且作用的性質也不一样。在車輛沿綫路運行中，其簧上結構和簧下結構作着複雜的空間振動。

振動的原因是綫路及車輪的不平順，汽機（蒸汽機車的）工作中所產生的擾動力、摩擦力等。

簧上結構的振動可分為三個組成部分：1）前進中沿豎直方向的振動（起伏振動）；2）沿車輛橫軸旋轉的振動（縱向搖

动)；3) 沿車輛縱軸旋轉的振動(側向搖動)。

整個車輛的擾動表現為側向搖擺或縱向搖動。

作用在綫路上動力的性質及大小，以及車輛沿綫路運行的穩定性和安全性，皆視車輛的上述各種振動而定。

§1. 動力計算的基本理論

在豎直面內動荷載的平衡條件可用以下公式表示：

$$R + \Sigma I + \Sigma T - Q = 0$$

式中： R ——在變化力 Q 的作用點上鋼軌的動態反力；

ΣI ——由於車輪及上部構造在豎直面內的振動所產生的慣性力的總和；

ΣT ——摩擦力及周圍介質對“車輪—綫路”系在豎直面內振動的阻力的總和。

動力計算中主要的前提是：假定基礎單位面積的沉落與壓力成正比。和進行靜力計算時一樣，視鋼軌為置於連續等彈性基礎上的梁。

在這種情況下，如果用 y 來表示荷載下的動力沉落，則鋼軌的動態反力 R 將為：

$$R = \frac{y}{y_1}$$

式中： $y_1 = \frac{k}{2u}$ (公分/公斤) ——在荷載 $p_{cm} = 1$ 的作用下，鋼軌的彈性沉落。

當具有不平順狀況時，慣性力 ΣI 的總和將為：

$$\Sigma I = m \cdot \frac{d^2(y + \eta)}{dt^2} = m_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + m_0 \frac{d^2 \eta}{dt^2}$$

式中： m_0 ——振動荷載和綫路的換算質量；

$y + \eta$ ——車輪—綫路系重心的垂直位移；

η ——不平順的流動縱座標。

抵抗振動的力的總和可寫成如下形式：

$$\Sigma T = f_0 \left(\frac{dy}{dt} \right)^s$$

式中： f_0 ——抵抗系数；

s ——某一数值（通常取 $s = 1$ ）。

将所求得的数值代入基本平衡方程式，得：

$$\frac{y}{y_1} + m_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + f_0 \frac{dy}{dt} = Q - m_0 \frac{d^2 \eta}{dt^2},$$

$$\text{令： } 2\xi = \frac{f_0}{m_0}; \quad \psi^2 = \frac{1}{m_0 y_1} \text{ 及 } \frac{Q}{m_0} - \frac{d^2 \eta}{dt^2} = f(t)$$

$$\text{则得： } \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi \frac{dy}{dt} + \psi^2 y = f(t)。$$

这样，平衡方程式就是一般的线性微分方程式。当 Q 及其他构件部分为已知时，就不难解算该方程式。

最困难的是求算微分方程式中包含在函数 $f(t)$ 内的可变量 Q 的数值。

在静力计算中，当求钢轨及线路其他构件的应力时，对于作用于线路上的外力通常用换算力来代替整个静荷载系的作用。目前所采用的动力计算法和静力计算相同，但在计算公式中不用静力，而代之以变化的动力值 P_{dyn} 。

当有车辆运行时，其作用在线路上的各力也大得多。这些力在每一瞬间都是许多力的总和。它们是：由于簧上结构和簧下结构的振动而产生的力；机车的某些机械的工作所产生的力；由车轮传至钢轨的力中的车辆自重部分以及其他各力。

为了简化计算，仅计入一些数值上较大的力，对于数值不大的各力则用间接的办法来考虑。

主要的力包括：

- 1) 车轮上过剩的平衡重量所产生的离心力的垂直分力。
- 2) 往复运动体的未被平衡的惯性力的垂直分力。
- 3) 由蒸汽压力所产生的、从连杆传至曲拐销的力的垂直分力。
- 4) 由于簧下部分的振动而产生的惯性力。

5) 由彈簧傳至車輪的力，該力系由簧上部分的振動而產生的。

6) 車輪對鋼軌的垂直壓力的靜止壓力部分。

內燃機車和電力機車作用於綫路上的力較小，因為這些機車的車輪和機器上沒有未被平衡的塊體，所以一部分上述的力是沒有的。

組成垂直動壓力的力，可以分成以下幾類：

1) 不隨時間變化的力。屬於這類力的有車輪對鋼軌的垂直壓力的靜止壓力部分 Π ，和當車輛沿曲綫運行時所產生的垂直力 $P \left(= -\frac{y_p R}{2 S} \right)$ 。

2) 具有嚴格變化規律的可變力。所有這類的力，以及這些力的總和都是同一自變量的函數。當車輛在一定的運行狀態下，這些力就是曲撓銷旋轉角 φ 的函數，即

$$P_o + P_e + P_n = f(\varphi)$$

式中： P_o ——過剩的平衡重量的慣性力的垂直分力；

P_e ——往復運動體的慣性力的垂直分力；

P_n ——蒸汽傳至車輪上的壓力的垂直分力。

3) 彼此之間及與第一、二類力系之間沒有任何聯繫的可變力。這些可變力以偶然的組合形式包括於車輪傳至鋼軌的總的動壓力之中。

屬於這一類的力的有：由於綫路不平順而產生的力 P_{in} ；由於車輪上連續不平順而產生的力 P_{unr} ；由於車輪上個別不平順而產生的力 P_{unr} ；由於彈簧而產生的力 P_p 及由於車輛搖擺而產生的力 P_e 。

根據綫性微分方程式積分的特点，梁（鋼軌）的合成振動可按疊加原理求得。因為在基本平衡方程式中 $y(t)$ 是某些函數 $f_i(t)$ 的代數和，所以有可能分別對每個函數 $f_i(t)$ 求解對於 y 的微分方程式，然後取所得各積分的代數和。

求可變動力 P_{dyn} 的方法就是以這個原理為基礎的。

直至不久以前，在求可變力 P_{dyn} 時，還是按它的各個組成部

分的最大值来计算的。由于简单地用代数方法把各组成力的最大值相加，因此所得出的 P_{dyn} 之值往往偏高。

因为实际的动力等于各组成力的最大值之和的可能性是很小的，所以，为使计算结果和实际的动力数值相接近，曾采用了一些修正系数，这些修正系数大都是通过实验求得的。

1954年以前，苏联在求线路的动应力时，系根据上述理论上的假设和实验研究资料，按1940年苏联交通部中央科学研究所制定的经验公式来进行的。

钢轨受弯曲时的最大边缘应力按下式确定：

$$\sigma_k = \frac{P_{dyn}}{4KW},$$

或写成展开式的形式：

$$\sigma_k = \frac{1}{4KW} \left[\sum \mu P + P_n + 0.02\gamma l \sqrt{\frac{P_p l_p}{d_p}} \cdot V + \sum \mu BV^2 + 0.0095\gamma l \frac{B_p}{d_p} V^3 \right] \leq R_p$$

式中： $l = \sqrt{\frac{4u}{EI}}$ ——钢轨基础与钢轨的刚比系数；

W ——钢轨的抵抗矩（考虑到磨耗）；

$\sum \mu P$ ——代替整个静荷载系的换算力（见静力计算）；

P_n ——通过曲拐销传来的蒸汽力的垂直分力；其值按下表中公式确定：

轴荷重 \ 機車种类	客 运 机 車	貨 运 机 車
$2P > 16\tau$	$P_n = 3000 - 20v$	$P_n = 4000 - 30v$
$2P \leq 16\tau$	$P_n = 2600 - 20v$	$P_n = 3500 - 30v$

只有当计算车轮为主动轮时，才考虑 P_n 之值，

γ ——道碴的动力特性，对碎石和一级砾石， $\gamma = 1$ ；对二级砾石和贝壳道碴 $\gamma = 1.1$ ，对大颗粒砂 $\gamma = 1.2$ ；对中等