

# 滚筒式振动搅拌机激振器支撑方案设计及有限元分析

赵 悟<sup>1\*</sup>, 李文涛<sup>2#</sup>, 田 军<sup>3</sup>, 王树林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长安大学工程机械学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 陕西 西安

<sup>3</sup>陕西西阎城际铁路有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月30日; 录用日期: 2023年6月8日; 发布日期: 2023年6月15日

## 摘 要

本文借助冲量 - 动量模型对滚筒式振动搅拌机内振动器所受冲击载荷进行估算, 依此设计了振动器支架(由支撑结构及橡胶弹簧柔性元件等构成), 然后对其进行有限元静力学分析, 得到了支架的应力应变图以及振型图。结果表明, 支架的强度和刚度满足使用要求, 其固有频率与振动器设计工作频率差异大, 不会发生共振现象。

## 关键词

埋式混凝土振动器, 冲击载荷, 支撑结构, 有限元仿真, 模态分析

# Drum Vibratory Mixer Exciter Support Scheme Design and Finite Element Analysis

Wu Zhao<sup>1\*</sup>, Wentao Li<sup>2#</sup>, Jun Tian<sup>3</sup>, Shulin Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Shaanxi Xiyan Intercity Railway Company, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通信作者。

文章引用: 赵悟, 李文涛, 田军, 王树林. 滚筒式振动搅拌机激振器支撑方案设计及有限元分析[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(3): 270-280. DOI: 10.12677/met.2023.123031

## Abstract

In this paper, the impulse momentum model is used to estimate the impact load on the vibrator in the drum vibration mixer. According to this, the vibrator support (composed of support structure and rubber spring flexible elements) is designed. Then the finite element static analysis is carried out, and the stress-strain diagram and vibration mode diagram of the support are obtained. The results show that the strength and stiffness of the support meet the application requirements, its natural frequency is greatly different from the design working frequency of the vibrator, and there will be no resonance.

## Keywords

Flat Buried Concrete Vibrator, Impact Load, Supporting Structure, Finite Element Simulation, Modal Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

混凝土是一种非均质多相复合材料, 当其应用于工程实际时, 至少需要满足施工和易性、达到设计要求的强度等级以及具备工程实际环境所必需的耐久性这三个基本条件[1]。目前国内外用于混凝土生产的普通拌合主机有强制式和自落式两大类, 都可以在短时间内实现拌合料的宏观均匀。但是研究发现, 它们在微观下并不均匀, 堆聚在一起的水泥颗粒外层会发生水化反应, 产生黏性水化硅酸钙将内层水泥颗粒包裹, 进而形成水泥颗粒的团聚现象, 这种被包裹的未发生水化反应的水泥颗粒占比最高可达到30%, 极大地影响了混凝土的和易性和强度的提高[2] [3]。针对该问题, 长安大学工程机械学院冯忠绪教授研究团队进行了20余年不懈的努力, 提出在混凝土拌合设备中加入机械振动装置来提高搅拌设备的拌合强度, 打破水泥颗粒的团聚现象, 使混凝土的拌合尽可能达到微观均匀状态[4] [5]。

自落式滚筒搅拌主机有结构简单, 制造成本低, 后续维修与保养方便等优点, 但因其滚筒转速受限, 搅拌强度不足, 混凝土的生产效率较低等缺点, 使其不能适应我国当前对混凝土高质量、高效率的生产需求。本文结合振动搅拌技术的理论研究及实践应用成果, 通过在滚筒式搅拌装置中加入机械振动装置来强化物料宏观与微观两方面的运动。一方面来提高设备的搅拌强度和工作性能, 提高效率, 缩短拌合时间; 另外一方面提高水泥的利用率, 充分发挥水泥的水化反应, 水泥砂浆与集料之间的粘结更充分, 硬化后的水泥石与骨料之间的界面粘结强度得到增强, 提高新拌混凝土的工作性和匀质性等。以60 L滚筒式振动搅拌机的振动器支架为研究对象, 通过分析和计算滚筒式振动搅拌机工作过程中物料对其振动器的冲击载荷, 设计了振动器支撑方案, 对支撑结构进行静力学有限元分析及振动模态分析, 验证了支撑结构的可靠性。

## 2. 平埋式混凝土振动器

### 2.1. 内置式振动器对混凝土的振动密实机理

工程实际中通过插入或者平埋的方式, 将混凝土振动器用于对现场浇筑的建筑构造物或者预制构件

生产时进行填充密实。在空载状态下其运动表现为正弦波式的简谐振动[6]，运动方程见式(1.1)为：

$$x = A \sin \sin(2\pi ft) \quad (1.1)$$

式中， $A$ ——空载时振幅，m； $f$ ——振动器的频率，Hz； $t$ ——时间，s。

在施工时，振动器置于新拌混凝土内部后产生高频振动，振动能量以正弦压力波的形式传递给周围物料[7]，能量传递表达式见式(1.2)：

$$W = C_1 mA^2 f^3 t \quad (1.2)$$

式中， $W$ ——振动能量，J；

$C_1$ ——无量纲数，和混凝土稠度及阻尼性质有关；

$A$ ——振幅，mm；

$f$ ——振动频率，Hz；

$t$ ——时间，s。

物料受迫振动的强弱与振动器的作用距离有关，越靠近振动源，受迫的振动强度越高。P.F.G. Banfill [8]和 Zhuguo Li [9]等人认为最接近振动器的混凝土因受迫振动而产生的剪切应力高于其屈服应力，随着距离的增加，受迫振动的强度逐渐降低，到达某一距离  $r$  时，使剪切应力低于屈服应力。由混凝土的流变特性可知，在距离振动器为  $r$  的范围内，混凝土表现为液体的性质，而在该范围外混凝土仍表现为 Binham 粘塑性体，如图 1 所示。而根据 Jeremy [10]等人的研究，振动破坏了构成混凝土颗粒骨架的力链，使混凝土失去了屈服应力，呈现处液体的性质。在液化区域内，混合料的粘聚力和内摩擦力急剧降低，流动性得到极大的提高，粗骨料下沉和气泡上浮的阻力降低。因此，粗骨料更容易向下方空隙位置沉降，气泡更容易逸出，使混凝土实现密实。

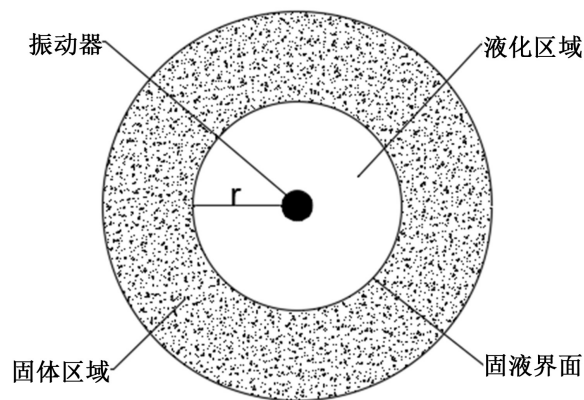
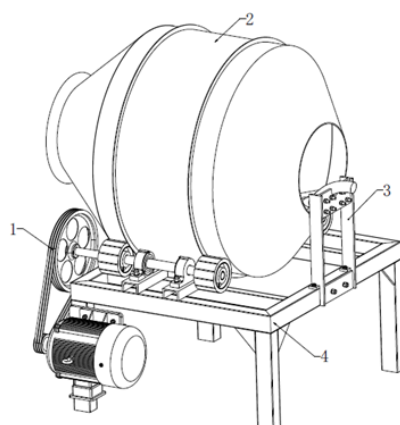


Figure 1. Concrete state distribution during vibrator operation

图 1. 振动器工作时的混凝土状态分布

## 2.2. 平埋式振动器作为激振源的振动搅拌机

当前主流的双卧轴振动搅拌设备，大都采用专用式振动器，需要根据设备的类型和规格进行专门的定制。用于对新拌混凝土的振动液化密实的内置式振动器结构简单，振动效率高、工艺成熟，成本较低，产品线覆盖了低频至高频。传动依赖专用软轴，不需要再对传动系统进行设计。因此，本文中滚筒式振动搅拌机(如图 2 所示)拟采用内置式混凝土振动器作为激振装置，通过一定的支撑结构水平浅埋于滚筒内部，为搅拌过程中的物料施加振动作用来提高滚筒搅拌机的工作性能和混凝土的拌合质量。



1. 传动系统, 2. 搅拌滚筒, 3. 振动器外支架, 4. 底座

Figure 2. 60 L drum vibrating mixing device

图 2. 60 L 滚筒式振动搅拌装置

平埋于滚筒内的振动器为悬臂式单端振动, 无外加载荷时远端与旋转轴心偏转  $\varphi$  角, 运动形式为圆锥式的旋转振动; 远端振幅最大, 近端与传动软轴连接, 振幅几乎为零, 其运动形式和能量传播如图 3 中的(a)和(b)所示。

振动能量能否有效利用与其放置位置密切相关, 若不考虑物料流动方向对振动能量传播带来的影响, 振动器安装在物料堆积形状的对称中心处时, 振动器“迎料处”与“背料处”的物料体积大致相等, 有利于振动能量的均衡传播。而振动器的淹没深度和搅拌叶片的高度有关, 为了避免振动器与叶片之间发生卡料现象, 淹没深度的可调空间并不大。如图 3(c)所示在进行搅拌工作时, 搅拌叶片带动下的物料在滚筒内部形成自然斜坡, 其液面与水平面形成锐角  $\Phi$ ,  $\Phi$  应与  $\theta$  相等。而振动器的旋振中心轴线应与滚筒旋转中心轴线平行。

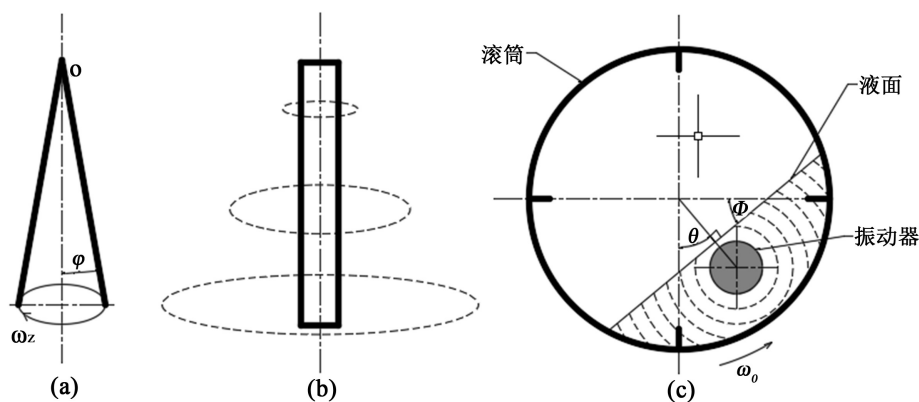


Figure 3. Schematic diagram of vibrator motion form and energy propagation

图 3. 振动器运动形式及能量传播示意图

平埋式混凝土振动器对于滚筒搅拌机工作性能的提升在于:

- (1) 将机械振动引入滚筒搅拌过程中, 产生振动搅拌的作用;
- (2) 振动器的安装位置使其壳体对物料可以剪切、分割, 具有强制搅拌的作用;
- (3) 从物料运动轨迹来看, 振动器的引入扰乱了常规滚筒搅拌的颗粒运动路线, 使其变得更为复杂, 提高了物料单元运动次数与轨迹交叉频率。

### 3. 支撑载荷的确定

滚筒式振动搅拌机不仅能够实现物料常规式的自落式拌合，又因混凝土振动器对物料运动的干扰，会产生更为复杂的运动轨迹，增大颗粒碰撞的几率；同时物料流经振动器时将以一定的频率振动，粘结成团的混合料内部各组分由于其质量不同，强迫振动的频率也不尽相同，组分间的粘聚力下降，因而与周围物料发生碰撞时更容易散开并混合，实现物料均匀混合。为了使振动能量充分得到利用，需要对振动器进行柔性支撑设计，以减少传递给支撑结构的振动能量浪费。从工作可靠性考虑，还需对支撑结构进行简化设计，使其既能够满足强度、刚度和振动稳定性要求，又不至于体积过大和结构复杂。

因此，设计支撑结构时需要首先确定物料对振动器的冲击载荷及支架的支撑载荷，然后进行柔性支撑点的结构设计和弹性材料的选用，最后再根据载荷对支撑方案进行有限元分析。在强制式搅拌中，搅拌臂及其叶片所受的力主要来源于其推动物料运动及对物料进行强剪切和分割而产生的作用力。而在通过自落原理实现拌合作用的设备中，物料的流动、剪切和分割是由滚筒内壁及其上的叶片来实现的，在不考虑振动器振动的情况下，振动器是静止的，物料是运动的，它们两者之间作用力应该是物料对振动器的冲击力。所以不能按照强制式搅拌中搅拌臂受力计算方式来进行。

关于混凝土搅拌过程中如何计算物料冲击力的相关文献未见报道，根据相似相近原理，可借鉴泥石流对建筑物的冲击力研究成果，因此本文拟采用泥石流冲击力的计算方法来分析、确定混凝土物料对振动器冲击力。

从组成成分上看，泥石流由水、土、砂、石组成的多相复合物，它兼具水体的流动性和土体的结构特性。根据各组分含量的不同，泥石流通常可用 Binham 粘塑性模型、Bagnold 颗粒流模型或 Coulomb 颗粒流模型来表征[11]。其中，Binham 模型适用于固体物质以土为主的黏性泥石流，属于均匀细颗粒物质占主体的泥石流[12]。泥石流冲击作用包括泥石流整体冲击力和泥石流大块石头冲击力两部分[11]。因此可以认为，用 Binham 模型来表征的黏性泥石流计算其冲击作用时仅考虑整体冲击力即可。

新拌混凝土的组成成分及流变特性与均质黏性泥石流相近，两者对比见表 1。

**Table 1.** Comparison of homogeneous viscous debris flow with ordinary freshly mixed concrete

**表 1.** 均质黏性泥石流与普通新拌混凝土对比

	均质黏性泥石流	新拌混凝土
成分	水、土、砂、石	水、砂、石、胶凝材料
	$\tau = \tau_y + \mu \frac{d\mu}{dy}$	$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dt}$
表征模型	式中： $\tau$ ——泥石流的实际剪应力； $\tau_y$ ——泥石流的屈服应力； $\frac{d\mu}{dy}$ ——泥石流的剪切变形速率。	式中： $\tau$ ——混凝土的实际剪应力； $\tau_0$ ——泥石流的屈服应力； $\frac{dv}{dt}$ ——泥石流的剪切变形速率。

普通混凝土粗骨料中大石子粒径范围为 16~31.5 mm，粒径远远小于泥石流中的大块石。因此，可以考虑利用泥石流整体冲击力的计算方法来求解搅拌过程中物料对混凝土振动器的冲击力问题。

搅拌时各组分从分别堆积到相互交融最后变成融粘塑性流体的过程中，物料的状态发生了变化，对振动器的冲击形态也在变化。所以采用泥石流整体冲击力的计算方案计算的是搅拌过程中黏性成分形成以后的状态。张宇[13]认为在黏性泥石流中，阵性运动是其主要的运动表现，通过将泥石流分割成若干个流动单元体，依据动量守恒原理，推导出整体的泥石流冲击力，计算见式(2.1)：

$$P_{动} = \frac{\gamma_c}{g} v^2 \quad (2.1)$$

式中:  $P_{动}$ ——流体的冲击动压强,  $\text{kN/m}^2$ ;

$\gamma_c$ ——流体的容重,  $\text{kN/m}^3$ ;

$v$ ——流体的流速,  $\text{m/s}$ 。

由搅拌机公称容积  $C$  为 60 L 根据公式(2.2)得出滚筒体积  $V$  为 460 L, 进而结合滚筒式振动搅拌机的其他相关参数, 由式(2.1)得物料的最大冲击动压强为  $3.87 \text{ kN/m}^2$ 。

$$V_{\min} = 3.5 * C + 250 \quad (2.2)$$

振动器的固定采用双支点支撑, 一支点刚性固定振动器的振动零点——在振动器壳体与传动软轴连接处, 另一支点柔性支撑振动器壳体。本文中柔性支撑选在壳体五分之一位置, 靠近传动软轴与壳体连接处。不考虑柔性传动轴的影响时, 柔性支撑点视为滑动支座, 刚性支撑点视为固定铰支座, 远端伸出柔性支撑点, 可将振动器受力模型简化为外伸梁, 如图 4。

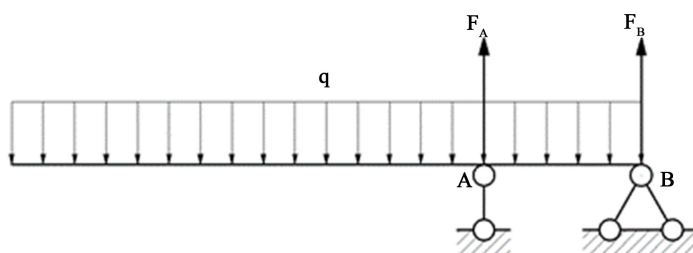


Figure 4. Simplified force diagram of vibrator  
图 4. 振动器简化受力图

根据振动器所受冲击压强及振动器棒体直径为 50 mm 可知, 均布载荷  $q$  为 193.5 N/m。由平衡方程  $\sum M_A = 0$  和  $\sum M_B = 0$  分别算得支反力  $F_A$  (2.3) 和  $F_B$  (2.4):

$$F_A = 266 \text{ N} \quad (2.3)$$

$$F_B = -159.6 \text{ N} \quad (2.4)$$

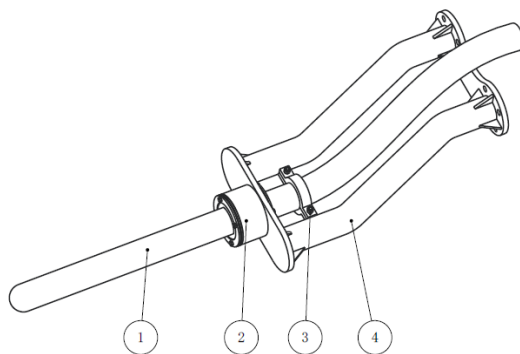
## 4. 支撑结构的设计

振动器的支撑结构的设计思路是从滚筒的进料口引入支架, 支撑结构可相应地划分为滚筒内支撑和外支撑。对于外支撑结构而言, 滚筒的外部有着很大的结构设计空间和安装空间, 既可以将外支撑安装在搅拌机底座, 也可以将其安装在与搅拌机无关联的其它结构上。本文选择将外支撑固定在搅拌机底座上。虽然外支撑结构可能造成上料的不便, 但是可以通过设计专门的上料机构予以解决。

### 4.1. 振动器滚筒内支撑结构设计

在搅拌过程中混凝土振动器能否有效施加振动能量, 达成振动搅拌目的主要取决于其内支撑结构的设计是否合理。筒内支撑结构设计需要考虑以下几个方面: 首先, 对振动器进行柔性支撑设计; 其次, 支撑结构比较简单, 以降低或者避免对料流的负面影响; 最后, 支撑结构应当稳定可靠, 满足强度、刚度和振动稳定性等要求。

本文中振动器的滚筒内支撑组件由振动器支架、刚性支撑模块及柔性支撑模块组成。振动器支架由各杆件的焊接而成, 在进料口与外支撑通过螺栓连接。刚性支点装夹于振动器传动轴与壳体连接处, 主要用于避免振动器沿滚筒轴向脱出。为了减小支撑对振动的约束, 柔性支撑点需要远离振动器头部。本文支撑结构如图 5 所示:



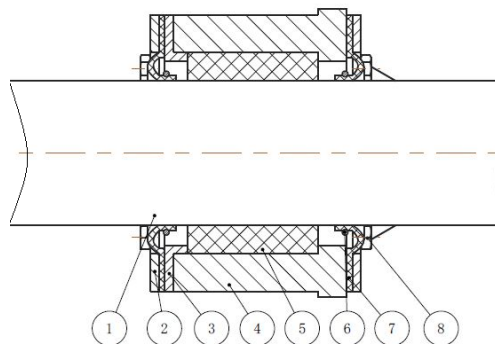
1. 混凝土振动器, 2. 柔性支撑组件, 3. 刚性夹持点, 4. 支架

Figure 5. Vibrator support scheme in drum

图 5. 滚筒内振动器支撑方案

#### 4.2. 柔性支点的结构设计

本文选用橡胶弹簧作为柔性支撑材料, 柔性支撑结构如图 6 所示: 橡胶弹簧套筒与支架焊接为一体, 内部安装橡胶弹簧; 为了防止弹簧被挤出, 左边设有挡环; 两边都设有橡胶密封片, 密封片外缘通过端盖装夹在套筒端部, 内缘弹性紧缩于振动器外壳, 再以箍丝紧固, 为橡胶弹簧形成一个封闭的端部可变的



1. 混凝土振动器, 2. 端盖, 3. 挡环, 4. 橡胶弹簧套筒, 5. 橡胶弹簧, 6. 箍丝, 7. 橡胶密封片, 8. 螺钉

Figure 6. Flexible support

图 6. 柔性支撑

该结构具有以下特点:

(1) 由于搅拌过程中工况恶劣, 物料的冲刷很容易使橡胶弹簧磨损, 混合料中较细小的颗粒也容易塞入振动器与弹簧中, 当塞入的物料过多时, 弹簧将失去弹性, 柔性支撑成为刚性支撑, 而且混凝土物料呈碱性, 对橡胶弹簧具有一定的腐蚀性, 加速弹簧的老化。将橡胶弹簧与物料隔离开来, 避免了上述现象的发生;

(2) 橡胶密封片起到隔离和密封作用, 其硬度小于弹簧硬度, 它被作为易损件, 需要定期检测和更换;

(3) 柔性支撑结构简单, 易于制造和组装, 后期维护方便。

#### 4.3. 橡胶弹簧的参数计算

工程中实际使用的橡胶弹簧是一种粘弹性材料, 很难计算它的弹性特性。橡胶的剪切弹性模量主要

和硬度有关，同一硬度不同组分或类型的橡胶，弹性模量相差很小。工程应用中硬度和剪切模量之间的关系常用公式(3.1)表示：

$$G = 0.117e^{0.03HS} \quad (3.1)$$

式中， $G$ ——橡胶的剪切弹性模量，MPa； $HS$ ——橡胶的邵氏硬度， $ha$ 。

为简化橡胶弹簧的计算，可将其视为矩形弹簧受载。橡胶的材料、外形和几何参数决定了承受压缩载荷弹簧的表观弹性模量，通常用公式(3.2)表示：

$$E_a = i \cdot G \quad (3.2)$$

式中， $i$ ——外观形状影响因子，当形状为矩形时(长为 $a$ ，宽为 $b$ )，见式(3.3)

$$i = 3.6 + 1.998 \left( \frac{a \cdot b}{(a+b) \cdot h} \right)^2 \quad (3.3)$$

当橡胶弹簧压缩变形不超过 15%时才近似服从胡克定律。工程应用中考虑到疲劳破坏，静载时须使其相对变形小于 15%，动载时小于 5%。一般情况下，变形与载荷之间的关系用公式(3.4)近似表示：

$$P = E_a \cdot A_L \cdot \frac{f}{h} \quad (3.4)$$

式中： $P$ ——载荷，N；

$E_a$ ——表观弹性模量，MPa；

$A_L$ ——承载面积， $mm^2$ ；

$F$ ——变形，mm；

$H$ ——弹簧高(厚)度。

根据设计要求，振动器的全振幅 1 mm。在考虑冲击负载对振幅影响的情况下，橡胶弹簧的压缩量 $f$ 为 0.2 mm。在载荷不断变动的情况下，橡胶弹簧允许的变形不超过 5%，因此弹簧的高度应 $h \geq 4$  mm。

根据设计要求，需要确定橡胶弹簧的参数主要包括橡胶硬度 $HS$ 、结构参数长度 $a$ 、宽度 $b$ 、高度 $h$ 。通过前面的分析和计算已经确定橡胶弹簧的绝大部分参数，现将橡胶弹簧参数计算的初始条件列出如表 2：

**Table 2.** Initial conditions of rubber spring calculation

**表 2.** 橡胶弹簧计算初始条件

已知参数	载荷 $P$ (N)	变形 $f$ (mm)	长 $a$ (mm)
	266	0.20	50

将以上数据带入公式(3.1)~(3.4)即可得出橡胶弹簧硬度 $HS$ 与结构参数 $h$ 、 $b$ 之间的关系。本文拟采用的橡胶弹簧相关参数如表 3 所示。

**Table 3.** Rubber spring parameters

**表 3.** 橡胶弹簧参数

邵氏硬度 (HS)	剪切模量 (MPa)	表观弹性模量 (MPa)	长(mm)	宽(mm)	高(mm)	变形 $f$ (mm)	刚度 $K$ (N/mm)
40	0.39	5.75	50	45	10	0.21	1295

## 5. 有限元分析

利用有限元分析软件对振动器支架进行了静力学和模态分析。振动器支架的负荷变化比较复杂。如



果支架的强度和刚度不能满足使用要求，将降低其使用寿命和可靠性。同时，由于存在振动，需要对支撑架进行模态分析，研究其固有频率，并判断是否与激振器产生共振。

### 5.1. 支架的静力学分析

通过前面的分析可知振动器所受的冲击载荷以及支架的支撑载荷。为了确保支架能够满足设计要求，需要对支架的强度和刚度进行校核。调用 Static-Structural 模块进行静力学分析。首先为了便于网格划分，需要对模型进行细节处理，优化忽略因装配需要而产生的螺钉孔，模型中的倒角与圆角也一并忽略；为了避免网格共节点而产生的麻烦，建模时将所有零件组成的装配体当作一个零件来处理。然后设置工程材料及相关参数，支架所选用材料为 45 钢，工程材料设置为结构钢，密度  $7850 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 0.3，弹性模量  $7.80 \text{ e} + 10$ ，屈服强度 360 MPa。在前处理中设置好固定支撑及载荷，然后求解其总的变形、应力及应变。

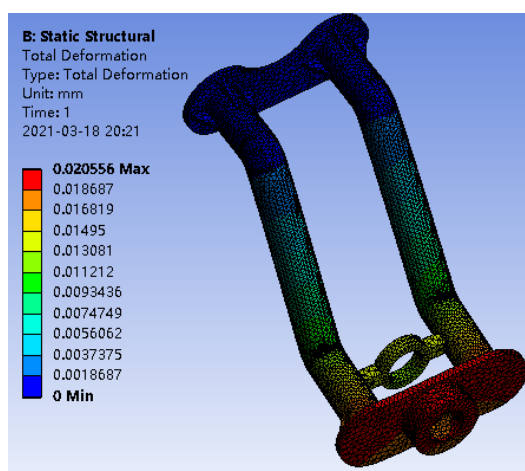


Figure 7. Deformed cloud diagram when loaded  
图 7. 受载时变形云图

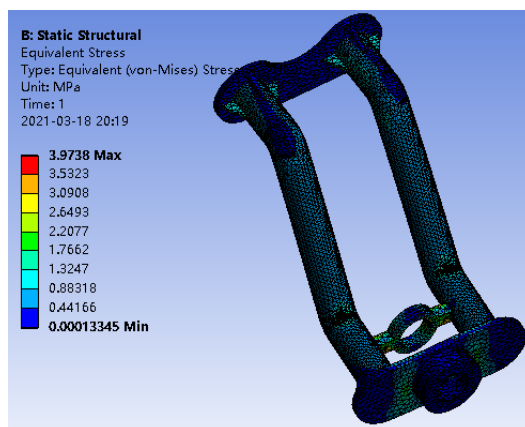


Figure 8. Stress cloud under load  
图 8. 受载时应力云图

从图 7 中可以看出，最大变形量 0.02 mm，发生在橡胶弹簧套筒处，变形量非常小，满足使用要求；从应力云图 8 中可以看到最大应力发生在振动器的刚性支撑处，最大应力 3 MPa，强度满足要求。

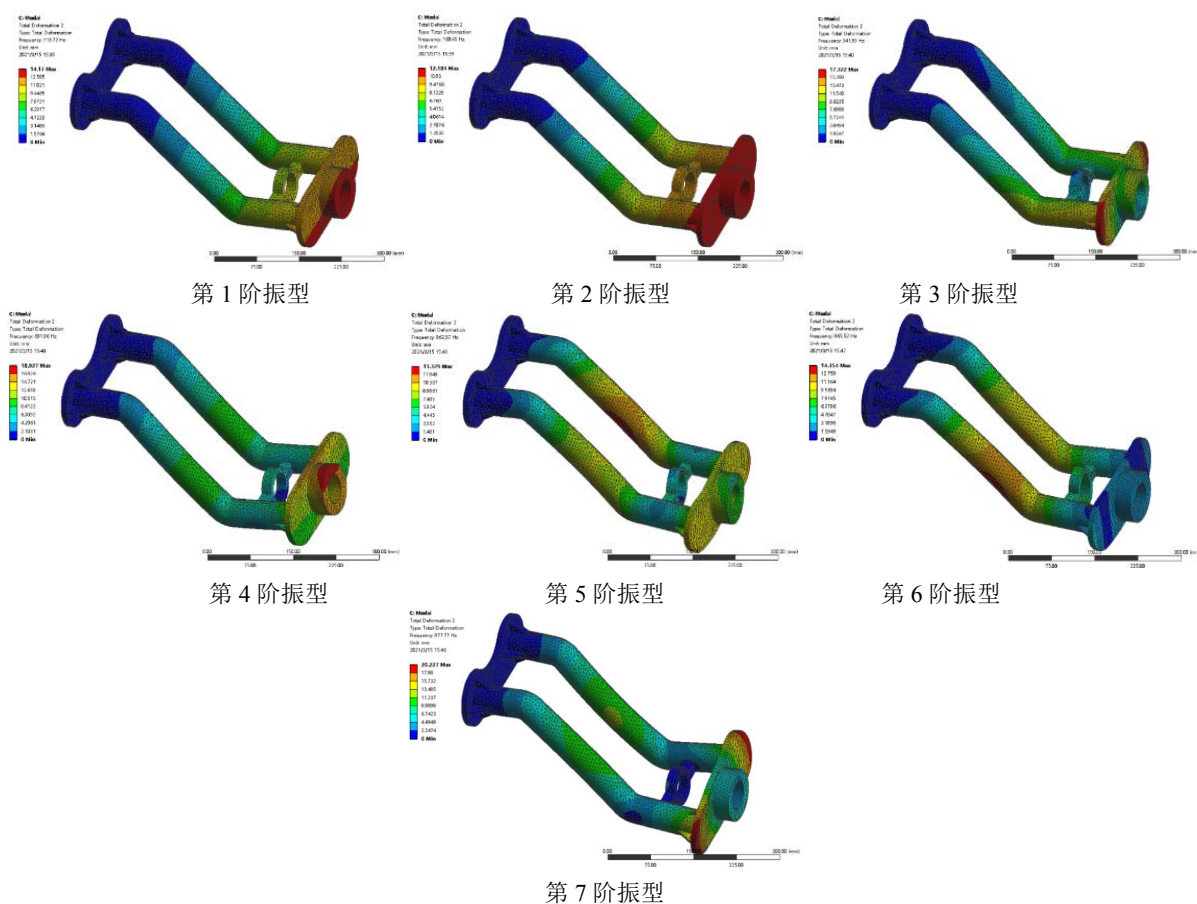
## 5.2. 支架的模态分析

为了更好地利用振动能量，避免振动器工作过程中与支架发生共振现象，需要对支架的固有振动特性进行分析，求解出无阻尼系统的振动频率以及相应的振型。导入模型后，选择振动器与外支撑连接面为固定支撑，不添加外载荷，求解其前 7 阶模态。支架的固有频率如表 4:

**Table 4.** Natural frequencies and mode shapes of brackets

**表 4.** 支架的固有频率及振型

阶数	固有频率/Hz	最大相对变形/mm
1	119.72	14.17
2	160.45	12.184
3	341.89	17.322
4	691.96	18.927
5	862.97	13.329
6	865.52	14.354
7	977.77	20.227



**Figure 9.** The first 7th mode shape of the bracket

**图 9.** 支架的前 7 阶振型

支架的前 7 阶振型如图 9 所示。

滚筒式振动搅拌装置的工作振频为 30 Hz~60 Hz。从表 4 可以看出支撑结构的前 7 阶固有频率在 120 Hz~977 Hz, 最低固有频率是搅拌时振动器工作频率的 2 倍以上。因而, 振动器与支架之间不会发生共振现象。然而, 从前 4 阶振型可以看到, 当研究高频激振时, 柔性支撑部位容易与振动器产生共振现象, 届时该部位结构有待加强。

## 6. 结论

本文主要通过冲量 - 动量模型对滚筒式混凝土振动搅拌机振动器所受的冲击载荷进行估算, 然后据此设计了筒内振动器支撑结构和橡胶弹簧, 并对支架进行模态分析和静力学分析, 验证了支架工作的可靠性。得出以下结论:

(1) 有限元静力学分析表明, 最大应力发生在振动器的刚性支撑处, 最大应力 3 MPa, 强度满足要求。最大变形量 0.02 mm, 发生在橡胶弹簧套筒处, 变形量非常小, 刚度满足使用要求。此外, 模态分析表明, 振动器与支架之间不会发生共振现象。

(2) 本文中振动器支撑架强度、刚度和固有频率均满足工作要求。

本文提出的研究方法合理有效, 为滚筒式振动搅拌机振动器的支撑结构设计提供了参考, 也为实际工程应用提供了支持。

## 基金项目

陕西省交通运输厅科技项目: 水泥混凝土振动搅拌技术在铁路工程中的应用(编号: 17-28K/211825180109)。

## 参考文献

- [1] 武文永. 水泥混凝土在交通工程建设中的应用技术研究[J]. 绿色环保建材, 2021(2): 9-10.
- [2] 黄天勇, 陈旭峰, 李胜, 谌凡. 振动搅拌对混凝土性能的影响与机理分析[J]. 混凝土世界, 2018(11): 56-60.
- [3] 冯忠绪, 王卫中, 姚运仕. 搅拌设备设计(第四讲)搅拌机合理转速的确定[J]. 工程机械, 2005(4): 60-64.
- [4] 马继超. 混凝土振动搅拌试验研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(3): 197-200.
- [5] 冯忠绪, 赵利军, 赵凯音, 杨发. 搅拌设备设计讲座(第二十七讲)搅拌过程中混凝土结构状态与搅拌功率的变化[J]. 工程机械, 2022, 53(10): 149-152.
- [6] 陈达刚, 梁锦萱. 流变学与混凝土振捣原理[J]. 建筑机械, 1989(8): 13-17.
- [7] 李道稜. 混凝土的振动密实(一)[J]. 建筑机械, 1983(1): 14-23.
- [8] Banfill, P.F.G., Teixeira, M.A.O.M. and Craik, R.J.M. (2011) Rheology and Vibration of Fresh Concrete: Predicting the Radius of Action of Poker Vibrators from Wave Propagation. *Cement and Concrete Research*, **41**, 932-941. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011>
- [9] Li, Z. and Cao, G. (2019) Rheological Behaviors and Model of Fresh Concrete in Vibrated State. *Cement and Concrete Research*, **120**, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
- [10] Koch, J.A., Castaneda, D.I., Ewoldt, R.H. and Lange, D.A. (2019) Vibration of Fresh Concrete Understood through the Paradigm of Granular Physics. *Cement and Concrete Research*, **115**, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.005>
- [11] 王友彪. 泥石流对桥墩冲击力研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [12] 马宗源, 廖红建, 张骏. Bingham 型黏性泥石流流体的三维数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2008(9): 1146-1150.
- [13] 张宇, 韦方强, 王青. 基于动量守恒的粘性泥石流冲击力计算[J]. 泥沙研究, 2006(3): 23-26.