Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2025, 14(2), 234-244
Published Online April 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2025.142023

Hans汉斯

马路切割机设计

叶钇权

广州科技职业技术大学自动化工程学院，广东 广州

收稿日期：2025年3月30日；录用日期：2025年4月23日；发布日期：2025年4月30日

摘　要

本文章提出了切割清除损毁马路的技术方法，分析了马路切割机的基本工作原理，并提出使用电动机作为动力源，研究了传动系统和减速器。对锯片材料进行了分析选择。根据整机方案及相关条件确定了马路切割机装置中关键部件轴的技术参数并对设计中主要的零件进行了校核计算。对带轮进行了工艺要求。对于马路切割机的各个部件进行了使用分析。运用控制变量原理对设计进行实验论证并得出实验结论。

关键词

电动机，摆线针轮减速器，锯片，轴，带轮

The Design of the Road Cutting Machine

Yiquan Ye

School of Automation Engineering, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper puts forward the technical method of cutting and removing the damaged road, analyzes the basic working principle of the road cutting machine, puts forward the use of electric motor as the power source, and studies the transmission system and reducer. The material of saw blade was analyzed and selected. According to the scheme of the whole machine and related conditions, the technical parameters of the shaft of the key component in the road cutting machine are determined and the main parts in the design are checked and calculated. The technical requirements of the belt wheel are presented. The application analysis of each component of the road cutting machine is carried out. The control variable principle is used to demonstrate the design and the experimental conclusion is drawn.

Keywords

Motor, Cycloidal Pin Wheel Reducer, Blade, Shaft, Belt Wheel

文章引用: 叶钇权. 马路切割机设计[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 234-244. DOI: 10.12677/met.2025.142023

Copyright © 2025 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

马路切割机作为现代化道路施工的核心设备，专为高效处理混凝土、沥青等硬质路面而设计。其通过机械化切割技术显著提升了道路维修、扩建及新建工程的施工效率与质量。在我国基础设施建设持续扩大的背景下，公路总里程已突破 500 万公里，庞大的路网体系在长期服役中面临不同程度的磨损、开裂及结构性损伤[1]。传统人工破拆方式存在效率低下、切口精度不足等局限性，而马路切割机凭借其模块化刀盘系统与液压控制技术，可实现深度误差 ≤2 mm、线性偏差 ≤5 cm 的精准切割，同时作业效率可达人工操作的 8~10 倍[2]。这一技术不仅降低了施工过程中对既有路面的二次损伤风险，更通过标准化切口为后续摊铺、管线预埋等工序提供了可靠界面。根据交通运输部 2023 年数据，我国城市道路维护工程量年均增长达 8.7%，传统切割设备在能效比、环境适应性等方面已难以满足现代施工需求。

国内马路切割机行业在技术应用和设备性能方面取得了显著进步，但在高端设备和核心技术上仍与国际先进水平存在差距。近年来，随着机械制造、材料科学和自动化技术的发展，马路切割机的切割精度、耐用性和安全性得到了显著提升。当前，随着激光导航定位、数字孪生模拟等智能化技术的融合应用，马路切割机已逐步从单一功能设备向集成化道路维护系统演进，其应用场景正向机场跑道无缝修补、复合式路面分层切割等精细化领域拓展。

在未来，马路切割机将朝着智能化、高效化、环保化、定制化方向发展。通过远程控制和通讯技术实现远程监控、故障和危险预警。机器配套使用高性能刀具和智能控制系统，进一步提升设备的使用寿命和能效比。优化传统开放式除尘方式，机器配套激光切割除尘装置减少对环境的污染和对工作人员身体的危害[3]。随着市场需求的多样化，制造企业将根据施工需求提供定制化的设备和服务。

2. 马路切割机的基本工作原理

马路切割机的基本原理：采用模块化动力传输系统和主动冷却技术[4]实现道路切割作业。动力系统由三相异步电动机驱动，经减速器进行初级降速，通过带轮传动机构，配合选配的传动皮带实现二级动力传递，传动系统配备电子变频调速装置，使切割锯片速度在一定区间内实现无极调节，以满足不同硬度路面的切割需求。

3. 马路切割机的动力系统

3.1. 电机的选择

本次马路切割机基于环保化和高效化的制造理念对马路切割机进行创新设计。

通过施工需求分析，采用图 1 Y132S2-2 型电机作为动力源。

理由如下：电机额定功率 7.5 KW 满足马路切割机在切割混凝土、沥青等材料时所需要的高功率输出。额定转速 2900 r/min，适合高速旋转刀片的需求，保证切割效率和精度。电机采用铸铁外壳，结构紧凑且强度高，能够适应马路切割的恶劣工况。绝缘等级 F，具有较高的耐热性和稳定性，能够在长时间的运行中保持性能，减少故障率。电机配备了高效的散热系统，延长使用寿命。电机设计结构简单，拆装检修方便，减少维修时间成本。

电动机与其他动力源相比，其具有使用方便、运行成本较低，实现降本增效的目的，在运行过程中

无废气排放，结构简单，维护成本低。

综上所述，图 1 1Y132S2-2 型电机具有高性能、高可靠性、结构紧凑以及维护方便的特点，非常适用于马路切割机，能够满足高负载、环境恶劣复杂的工作需要。

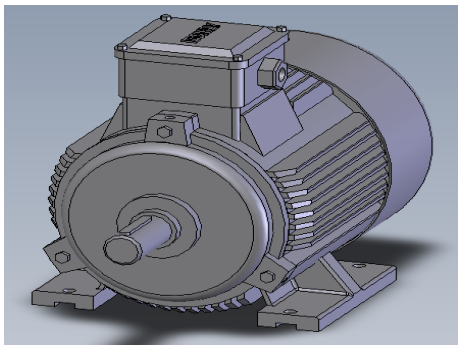

Figure 1. Y132S2-2 type motor
图 1. Y132S2-2 型电机

3.2. 减速器的选择

现在常见的减速器主要分为齿轮减速器、涡轮蜗杆减速器、行星齿轮减速器、谐波减速器、摆线针轮减速器[5]。经过各个减速器的特性比较分析，在众多减速器中，摆线针轮减速器最适用于马路切割机的工作需要。

摆线针轮减速器具有高扭矩密度和强大的承载能力，能够轻松应对马路切割机在复杂工况下产生的高负载。其结构紧凑，体积小巧，重量轻，便于安装在空间有限的马路切割机上。此外，摆线针轮减速器的传动效率高，能够有效减少能量损失，降低运营成本。相比之下，谐波减速器虽然具有高精度和高传动效率的特点，但其承载能力相对较低，且在高负载下容易出现疲劳破坏。因此，摆线针轮减速器凭借其卓越的性能，成为马路切割机的理想选择。

摆线针轮减速器的选择要考虑负载需求、减速比、安装空间和工作环境等因素，以确保马路切割机高效、稳定地运行。

3.3. 摆线针轮减速器的工作原理

见图 2，摆线针轮减速器基于行星传动理论，通过摆线针轮的啮合实现减速。其核心结构包括输入轴、偏心套、摆线轮和针齿轮[6]。当输入轴带动偏心套转动时，摆线轮在针齿轮的限制下，既进行公转，又进行自转。由于摆线轮与针齿轮的齿数差为一齿，因此输入轴每转动一周，摆线轮会反向转动一个齿，从而实现减速[7]。

3.4. 摆线针轮减速器的特性

承载能力强：摆线针轮负载能力强，能够适应高负载和频繁启动的工作条件，适合需要高扭矩和高负载的马路切割工况。

减速效率高：一级传动减速比为 9~87，两级传动减速比为 121~5133。

运行稳定、故障率低、寿命长：针齿啮合是套式滚动摩擦，啮合面无相对滑动，磨损小故一级减速效率达 94% [8]。

结构紧凑、体积小、重量轻：与同功率的其它减速机相比，重量体积小 1/3 以上，由于是行星传动，输入轴和输出轴在同一轴线上，以获得尽可能小的尺寸。

Figure 2. Assembly diagram of motor and cycloidal pin wheel reducer
图 2. 电机与摆线针轮减速器装配示意图

此外，摆线针轮减速器的啮合齿数多，重叠系数大，运转平稳，噪音小，适合在恶劣环境下长期使用[9]。

3.5. 摆线针轮减速器的使用条件

输入轴的转速额定转数为 1500 转/分，在输入功率大于 18.5 kW·h 建议采用 960 r/min 的 6 极电机配套使用。

卧式安装摆线针轮减速机的工作位置均为水平位置。在安装时最大的水平倾斜角一般小于 15˚。在超过 15˚时应采用其他措施保证润滑充足和防止漏油。

摆线针轮减速机的输出轴不能承受较大的轴向力和径向力，在有较大轴向力和径向力时须采取其他措施。

摆线针轮减速机允许使用在连续工作制的场合，同时允许正、反两个方向运转[10]。

4. 马路切割机的锯片

4.1. 锯片种类

锯片在市面上有圆锯片、排锯、绳锯等。圆锯片是最常用的一种锯切工具，其直径跨度大，从φ5mm~φ2800 mm，厚度范围 0.1~15 mm。圆锯片主要有三种：

1) 节块式锯片包括由直接冷压、烧结制造的 φ105~φ450 mm 干切片，和经热压、焊接制造的φ350~φ2200 mm 的大理石、花岗岩切割片，用途最为广泛。

2) 连续周边式锯片一般由冷压、烧结法制造，包括用于玉石切割的玉雕锯片、其他用途的干切片和湿切片。

3) 内圆切割片主要用于单晶硅等贵重材料的切割，为了节约贵重材料，要求其厚度很薄(δ = 0.1~0.5 mm)，一般用电镀法制造，成本较高。

4.2. 锯片材料

马路切割机的锯片可选用金刚石锯片或钨钴类硬质合金锯片。

金刚石锯切工具主要是指各类金刚石切割锯片，包括圆锯片、排锯、绳锯等。主要用于切割大理石、花岗岩和混凝土等非金属材料[11]。金刚石连续齿切割片称为金刚石湿切片。因为金刚石刀头是连续的，排削冷却效果不好，一般在加水或冷却液的条件下切割。这种切割片一般较适合用于切割容易碎边的大理石、瓷砖、玻璃、石英等极脆材料，当然也可用于切割花岗岩混凝土等，适合切割马路混凝土和沥青

材质的路面。金刚石激光焊接专业切割片用于混凝土和沥青马路、耐火砖、建筑砌块等的切割。由于采用激光焊接，其焊缝强度在不加冷却液的切割条件下不会降低，因此适用于野外作业。

硬质合金常用的种类有钨钴类(代号 YG)、钨钛类(代号 YT)。由于钨钴类的硬质合金抗冲击性较好，在机械加工行业中使用更为广泛。马路切割机钨钴硬质合金锯片型号选择范围为 YG8~YG20，钨是合金的硬化成分，钨含量增加会提高锯片硬度，但韧性会有所下降；钴作为合金的粘结剂，钴含量的增加可以提高合金的抗弯强度和韧性[12]。钨钴类硬质合金锯片中含有的钨、钴等稀有元素具有高经济价值和可回收性，通过回收处理实现资源再利用，避免资源浪费。通过添加合理的钨钴含量，可以有效平衡锯片的硬度、韧性、抗腐蚀性和耐磨性，从而提高加工效率和锯片的使用寿命。

金刚石锯片和钨钴类硬质合金锯片各有优缺点，选择哪种锯片取决于具体的切割需求和预算。如果需要切割硬质非金属材料，如石材、混凝土等，金刚石锯片是更好的选择；如果需要切割金属材料，钨钴类硬质合金锯片可能更适合。

5. 轴的设计和校核

5.1. 轴的尺寸设计

材料选择 45 号钢，调质处理，轴各参数如下：

硬度为 HBS = 220，抗拉强度极限 σ_B = 650 MPa，屈服强度极限 σ_s = 360 MPa，弯曲疲劳极限 σ_{Flim} = 320 MPa，剪切疲劳极限 τ^{-1} = 300 MPa，许用弯应力 σ = 240 MPa [13]。

初步估算轴最小直径

由前面的传动装置的参数可知 n = 323.6 r/min；p = 7.5 (KW)；

查表可取 A_0 = 115，

$$A_{\min} = A_0 \sqrt[3]{\frac{p_1}{n_1}} = 115 \times \sqrt[3]{\frac{7.5}{323.6}} = 31.26 \tag{1}$$

5.2. 轴的结构设计

1、拟定轴上零件的装配方案

如图 3 从动轴所示，从左到右依次为轴套、轴承端盖、调整件、轴承、调整件、端盖、轴套、带轮。

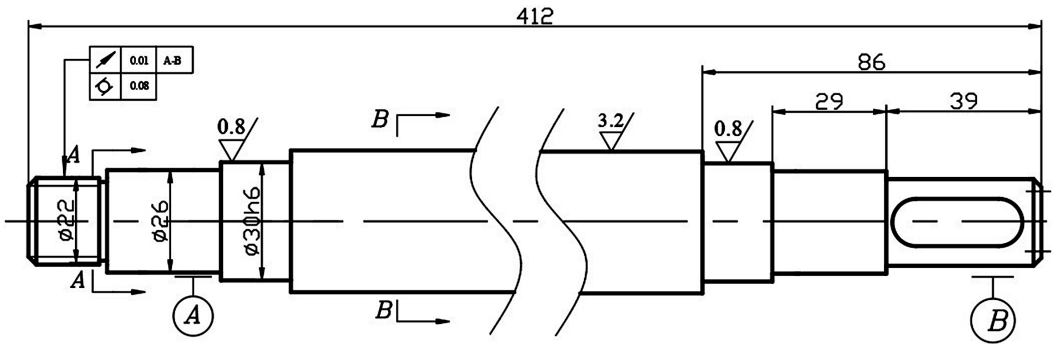

Figure 3. Driven shaft
图 3. 从动轴

2、根据轴向定位的要求确定轴的各段直径和长度

1) 轴的最小直径显然是安装带轮处的直径 d_1，取 d = 32 mm，为了保证轴端挡圈只压在带轮上而不压在轴端面上，故 I 段的长度应比带轮的宽度略短一些，取带轮的宽度为 50 mm，现取 L = 47 mm。

带轮的左端采用轴肩定位，轴肩的高度 $h = 0.07\ d$~$0.1\ d$，取 $h = 2.5$ mm，则 $d = 37$ mm。

轴承端盖的总宽度为 20 mm，根据轴承端盖的拆装及便于对轴承添加润滑脂的要求，取盖端的外端面与带轮的左端面间的距离为 30 mm，故取 $L = 50$ mm。

2) 轴上零件的轴向定位

齿轮、带轮和轴的轴向定位均采用平键联接。

3) 确定轴上的倒角和圆角尺寸

取轴端倒角为 1 × 45˚，各轴肩处的圆角半径 $R = 1.2$ mm。

5.3. 轴的校核

1、按弯扭合成应力校核轴的硬度

根据外力偶矩的公式为：

$$T = 9549 * (p/n) \tag{2}$$

其中，T 是扭矩 N·m，p 是输出功率 kW，n 是转速 r/min。

由平衡公式 $\sum_x = 0$，

根据

$$T - Me = 0$$

即得

$$T = Me$$

所以根据前面的数据：$T = 9549 * (7.5/320) = 228\ \mathrm{N \cdot m}$。

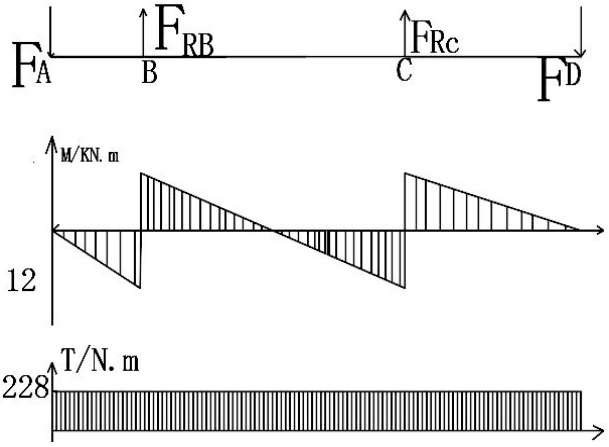

Figure 4. Driven shaft bending moment and torque diagram
图 4. 从动轴弯矩和扭矩图

见图 4，进行校核时，通常只校核轴上承受最大弯距和扭距的截面(即危险截面)的强度[14]。

扭转切应力为脉动循环变应力，取 $\alpha = 0.6$，轴的计算应力

由已知得，

$$M = 9549 * p/n = 204$$

$$T_{\max} = M$$

由刚度条件得，

$$\tau_{\max}=\frac{T_{\max}}{W_t}=\frac{16T_{\max}}{\pi D^3}\le[\tau] \tag{3}$$

得：

$$D\ge\sqrt[3]{\frac{16T_{\max}}{\pi[\tau]}}=0.045\ \text{m}$$

其次，由刚度条件

$$\varphi'=\frac{T_{\max}}{GIp}\times\frac{180^\circ}{\pi}=\frac{T_{\max}}{G\times\frac{\pi}{32}D^4}\times\frac{180^\circ}{\pi}\le[\varphi'] \tag{4}$$

得：

$$D\ge\sqrt[4]{\frac{32T_{\max}\times180^\circ}{G\pi^2[\varphi']}}=0.06\ \text{m}$$

根据以上计算结果，为了同时满足强度和刚度要求，选定轴的直径 $D=45$ mm。

剪力和弯矩的计算

由已知剪力最大值 11.8 kN，

弯矩 $M_{(X)}=F_s(X)_\chi$，

最大弯矩值 $M_{(X)}=11.8\times0.06=0.7\ \text{kN}\cdot\text{m}$，

塑性材料采用第三强度理论：

$$\frac{\sqrt{M^2+T^2}}{W}\le[\sigma] \tag{5}$$

$$W=\frac{\pi d^3}{32} \tag{6}$$

6. 带轮、三角带的设计

带轮的选择

1、对 V 带轮的设计要求

V 带轮材料应能够承受工作条件下的温升、机械应力和摩擦等。常用材料包括铸铁(HT159, HT200)，材料要适于发散传动运动中产生的热量。

带轮结构应便于制造，质量小且分布均匀，避免因铸造产生过大的内应力。轮槽工作面表面粗糙度 Ra 为 3.2 μm，保证较高的表面精度确保载荷分布均匀。轮槽的棱边需要倒圆处理以减少应力集中。

当带轮转速小于其极限速度时需要进行静平衡，大于极限转速时需要进行动平衡[15]。

2、结构设计

带轮的外圈环形部分称为轮缘，轮缘是带轮的工作部分，用以安装传动带，制有梯形轮槽。由于普通 V 带两侧面间的夹角是 40˚，为了适应 V 带在带轮上弯曲时截面变形而使楔角减小，故规定普通 V 带轮槽角为 32˚、34˚、36˚、38˚ (按带的型号及带轮直径确定)，轮槽尺寸和角度应保持一定精度，确保载荷分布均匀，减少振动和磨损，增加带轮和皮带的使用寿命。装在轴上的筒形部分称为轮毂，是带轮与轴的联接部分。中间部分称为轮幅(腹板)，用来联接轮缘与轮毂成一整体[16]。

7. 实验论证

7.1. 实验装置与材料

动力系统：Y132S2-2 型电机；摆线针轮减速器：减速比 1:10，输出转数 n = 290 r/min；变频器；金刚石锯片：直径分档 350 mm、500 mm、600 mm，厚度分档 3 mm、4 mm、5 mm，基体材质 Mn 钢，金刚石粒度 40/50，浓度 25%；混凝土试块：尺寸为 2000 × 300 × 200 − 300 mm，强度等级：C30、C35，骨料类型：花岗岩(粒径 5~20 mm，莫氏硬度 6.5)；功率分析仪(YOKOGAWA WT1800，精度 ± 0.2%)；动态扭矩传感器(HBM T40B，量程 0~500 N·m)；激光转速计(ONO SOKKI HT-5500，分辨率 ± 1 r/min)；红外热像仪(FLIR T540，温度分辨率 0.05℃)；三轴振动传感器(PCB 356A01，带宽 5 kHz)；激光粉尘仪(TSI 8533，量程 0~100 mg/m^3)。

7.2. 实验变量

Table 1. Experimental variables
表 1. 实验变量

变量	参数
锯片直径 D	350、500、600 (单位：mm)
锯片厚度 t	3、4、5 (单位：mm)
混凝土强度 σ_c	C30 (30 MPa)、C35 (35 MPa)
切割深度 d	50、80、100 (单位：mm)

实验变量见表 1。

固定参数：进给速度 V_f = 1.0 m/min，环境温度为 25℃ ± 1℃，冷却水流量为 15 L/min。

7.3. 测试指标与数据采集

切割功率：$P = T_{\text{输出}} * \omega_{\text{锯片}}\ (\omega = 2\pi n/60)$。

单位面积能耗：$E = pt/A\left(\text{kWh}/\text{m}^2\right), A = d * L$(切割面积)。

切割速率：$Q = V_f * d\left(\text{cm}^2/\text{min}\right)$。

振动加速度：GB/T 25629-2010 限值 ≤ 12 m/s^2。

界面温度：金刚石热稳定性阈值 ≤ 800℃。

粉尘浓度：GB 16297-1996，限值 ≤ 10 mg/m^3。

7.4. 实验方法

将混凝土试件固定在试验台上，启动设计好的马路切割机，使其按额定转数和功率运行，对试件进行切割。变量为混凝土强度、切割深度、锯片直径和厚度。通过功率分析仪、扭矩传感器、激光转速计、红外热像仪、三轴振动传感器、激光粉尘仪分别记录马路切割机的功率、扭矩、锯片转速、锯片切割时的工作温度、振动度和粉尘浓度数据[17]。

7.5. 实验结果

由表 2 得出结论：500 mm/4 mm 锯片切割 C30 混凝土时能耗最低，验证了直径与厚度的最优匹配。

由图 5 分析数据得出：500 mm 的金刚石锯片功率利用率最高(92%)，350 mm 直径由于线速度不足导致功率浪费，600 mm 直径因惯性增大导致启动能耗升高。

Table 2. Comparison of unit energy consumption under different parameter combinations
表 2. 不同参数组合下的单位能耗对比

D (mm)	t (mm)	σ_c (MPa)	E (kWh/m^2)
350	3	30	1.05
500	4	30	0.68
600	5	35	0.95

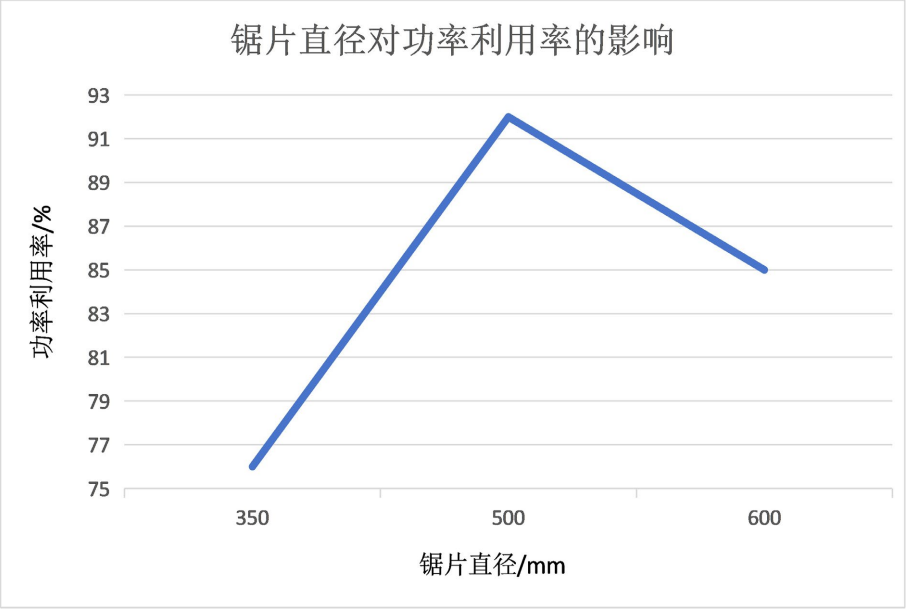

Figure 5. Effect of saw blade diameter on power utilization
图 5. 锯片的直径对功率利用率的影响

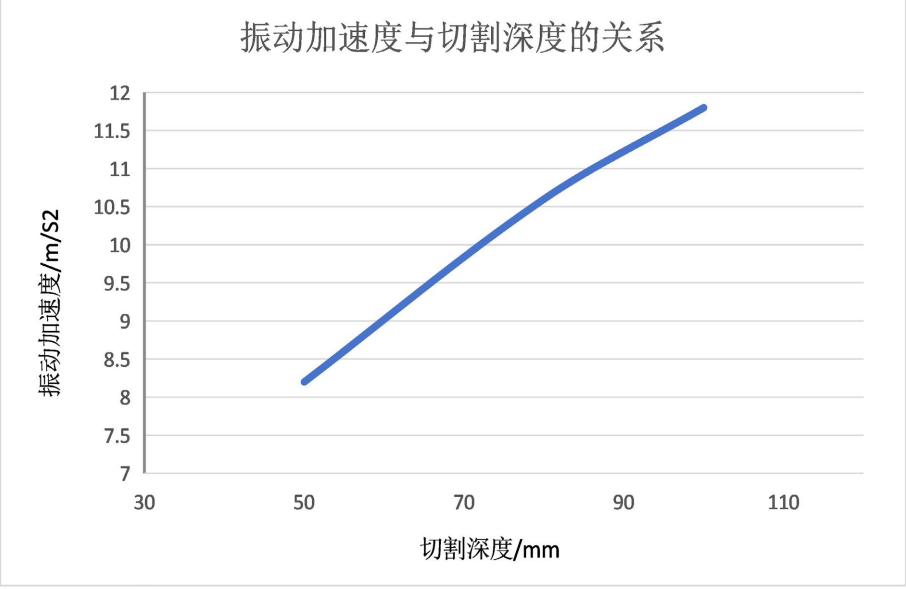

Figure 6. Relationship between vibration acceleration and cutting depth
图 6. 振动加速度与切割深度的关系

根据图 6 振动加速度与切割深度的关系分析可知振动加速度与切割深度呈线性上升关系，$a_{vib} = 0.08d + 4.2$，$R^2 = 0.92$。当 $d = 100$ mm，$D = 600$ mm 时，锯片振动达 11.8 m/s²，快达到安全阈值 12 m/s²。

切割过程中，切割 100 mm 厚强度等级 C35 混凝土时，锯片界面温度达 315℃，水冷下稳定于 80℃，温度从切割中心向边缘递减，温差 $\Delta T = 235$℃。

Table 3. Relationship between dust concentration and saw blade thickness
表 3. 粉尘浓度与锯片厚度的关系

t (mm)	粉尘浓度(mg/m³)
3	14.2
4	9.5
5	6.8

分析表 3 粉尘浓度与锯片厚度关系的实验数据得出结论：5 mm 厚金刚石锯片因刚度高、切缝稳定，粉尘最低，较 $t = 3$ mm 金刚石厚度降低 52%粉尘浓度降低。

7.6. 实验结论

实验证明：采用 7.5 kW 电机搭配摆线针轮减速器(减速比 1:10)及 500 mm 金刚石锯片(厚度 4 mm)，在切割 C30 混凝土(深度 ≤ 90 mm，进给速度 1.2 m/min)时，综合效率与安全性最优(η = 92%，a_{vib} = 8.7 m/s²，粉尘浓度 6.8 mg/m³)。C35 混凝土需限制切割深度 ≤ 70 mm 以平衡热负荷。本实验为马路切割机的工程化设计提供了关键参数依据。

8. 结语

1) 通过对马路切割机的深入研究与分析，系统性地了解其动力系统、执行系统及其工作原理以及实际应用中的关键性技术考量。

2) 通过选择高效环保的切割刀片材料、电动机，优化了马路切割机的切割效率和精度，并降低了能耗，减少了相同工作内容下的劳动力。

3) 本次设计，通过查阅各种资料，深刻地认识了马路切割机内部的重要组成部件、它们的工作原理和操作方法、设计过程和理念，为自己改进设计方法打好了基础。

参考文献

[1] 袁辉, 谢庆, 计明军, 等. 基于 PSO-LSTM 算法的公路桥梁结构损伤识别研究[J]. 公路, 2025, 70(2): 428-434.

[2] 袁帅帅. 装配式水泥混凝土铺面快速修复技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2022.

[3] 蒋利贵. 基于气固两相流的激光切割机除尘技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2023.

[4] 程番, 许晴, 刘艺. 便携式管道切割机在现代建筑施工中的应用及其效率评估[C]//冶金工业教育资源开发中心. 2024 精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集(中册). 南昌: 江西应用科技学院, 2024: 109-112

[5] 曹峻豪. 空间环境高转矩密度摆线减速器的优化与仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023.

[6] 梁顺可, 宋雷, 郑振兴, 等. 基于有限元的双十字滑块摆线针轮减速器关键结构分析[J]. 现代制造工程, 2020(3): 93-98.

[7] 金增宇. 渐开线少齿差行星传动的优化设计与仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023.

[8] 韩留. 2K-V 型摆线针轮减速器的发展与分析[J]. 机械制造, 2024, 62(8): 42-44.

[9] 毛文睿, 王璠, 殷雨田, 等. 沉降槽耙料机驱动方式比较[J]. 化工装备技术, 2022, 43(2): 52-55.

[10] 徐恒才. 新型全方位搬运车及其轮组减速器设计、分析与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2022.

[11] 王宇. 基于金刚石绳锯切割技术在老旧桥梁拆除工程中应用的研究[J]. 科学技术创新, 2025(4): 115-118.

[12] 邓四文. 相同硬度的高钴和低钴含量硬质合金性能比较[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(6): 21-25.

[13] 曾瑞霖, 龙宁华, 肖跃勇, 等. 硬质合金刀具材料主要物理力学性能对钛合金铣削加工的影响[J]. 硬质合金, 2019, 36(1): 75-79.

[14] 翟小艺. 基于 FMECA 与 FTA 的饲草揉碎机可靠性分析[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.

[15] 姜金刚, 王开瑞, 赵燕江, 等. 机器人机构设计及实例解析[M]. 北京: 化学工业出版社: 2022.

[16] 练勇, 姜自莲, 雷芳, 等. 机械工程材料与成形工艺[M]. 重庆: 重庆大学出版社: 2015.

[17] 李峰. 智能制造系统下切割机与工业机器人协同作业的效率与能耗分析[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(2): 58-60.