

文章编号: 1002-0268 (2007) 11-0143-05

底盘测功机机械惯量电模拟方法的研究和实现

闵永军, 甘英俊, 左付山, 杨风和

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为开发汽车排气污染物简易瞬态工况法测试系统, 研究了底盘测功机机械惯量电模拟的相关理论和方法。通过汽车在底盘测功机上运行状态的动力学分析, 基于汽车驱动轮转动动态特性相同的原理, 建立了汽车底盘测功机机械惯量的电模拟模型。分析了简易瞬态测试工况控制要求和风冷电涡流测功器的性能特点, 构建了 VMAS 测试工况控制系统, 应用预测控制和解耦控制理论和技术, 设计了底盘测功机机械惯量电模拟控制方案, 开发了基于 DMC, 具有模型增益自校正和解耦功能的 VMAS 测试扭矩控制器和简易瞬态工况控制试验系统。运行试验结果表明, 该系统可以较好地模拟汽车加速运动惯量。

关键词: 汽车工程; 惯量电模拟; 动态矩阵控制; 底盘测功机; 电涡流测功器; 解耦控制

中图分类号: U472.9

文献标识码: A

Research and Realization of Electric Simulation for Mechanical Inertia in Chassis Dynamometer

MIN Yong-jun, GAN Ying-jun, ZUO Fu-shan, YANG Feng-he

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forest University, Jiangsu Nanjing 210037, China)

Abstract: The theory and method of electric simulation for mechanical inertia in chassis dynamometer are researched to develop the vehicles exhaust pollutants testing system under simple transient driving mode condition. By means of dynamic analyzing for the vehicles running on road and on the chassis dynamometer, the mathematical model of electric simulation for mechanical inertia in chassis dynamometer is established based on the principle of driving wheels dynamic rotation characteristics equivalent. The driving control requirement of simple transient tests and characteristics of air-cooled eddy current dynamometer are analyzed and the working mode control system of VMAS is constructed. The control scheme of electric simulation for mechanical inertia in chassis dynamometer is designed based on forecast control and decoupling control. The VMAS torque test controller based on DMC with fuzzy self-correcting gain and decoupling function is proposed. The testing result of the inertia simulation control system shows that this method can obtain satisfying accelerating simulation result for automotive inertia.

Key words: automobile engineering; inertia electric simulation; DMC; chassis dynamometer; eddy current dynamometer; decoupling control

0 引言

根据实施 I/M 制度的需要, 我国在用汽车排气污染物检测正从怠速法向工况法方向发展。简易瞬态工况法汽车排气污染物测试, 不仅要求底盘测功机能模拟汽车等速行驶时的道路阻力, 而且至少能模拟汽车

加速行驶时的惯性力^[1]。目前国内在用汽车动力性、经济性检测用底盘测功机, 汽车惯量用飞轮组来模拟, 存在结构复杂, 体积庞大, 特别是不能实现无级调整, 模拟精度差等不足^[2,3]。汽车排气污染物型式论证试验用底盘测功机, 普遍采用机械惯量电模拟技术, 有较好的综合性能, 但其加载装置使用交流或直

收稿日期: 2006-08-15

基金项目: 江苏省交通厅科技基金资助项目 (991121)

作者简介: 闵永军 (1963 -), 男, 江苏宜兴人, 教授, 研究方向为汽车检测诊断技术、计算机测控技术。(minlujin@njfu.com.cn)

流电机，价格昂贵，且基本依赖进口。为降低设备投资和使用成本，简易瞬态工况法排气污染物测试普遍使用风冷电涡流双滚筒底盘测功机^[1]。与交、直流电机相比，风冷电涡流测功器存在扭矩响应速度慢，扭矩与励磁电流、转子转速关系复杂、测功器参数时变显著和没有反拖能力等不足，对惯量电模拟控制系统性能提出了很高的要求^[4,5]。

本文根据汽车排气污染物简易瞬态工况法测试的需要，建立了基于驱动轮转动动态特性相同的汽车惯量电模拟模型，针对风冷电涡流测功器的性能特点，用模糊校正预测控制方法控制测功器的加载力矩，实现机械惯量的电模拟，简化了测功机结构和调整操作；模糊校正预测控制方法克服了风冷电涡流测功器的性能不足，试验表明开发的系统能满足现行国标规定的简易瞬态工况法测试工况控制要求。

1 汽车惯量电模拟数学模型

1.1 汽车道路行驶驱动轮角加速度

根据汽车理论^[6]，汽车在平坦道路上等速行驶时，若发动机输出扭矩发生变化引起驱动力变化 F_t ，则驱动轮的瞬时角加速度 $d \omega_w/dt$ 为：

$$\frac{d \omega_w}{dt} = \frac{F_t}{MR} \tag{1}$$

式中， M 为汽车旋转质量换算系数，对单轴驱动汽车 $M = 1 + (I_{w1} + I_{w2})/MR^2$ ； I_{w1} 为发动机、传动系和驱动轮折算到驱动轮的当量惯量； I_{w2} 为从动轮的惯量； M 为汽车总质量； R 为驱动轮滚动半径。

1.2 汽车在底盘测功机上运行的动力学分析

在双滚筒底盘测功机上运行时，单轴后轮驱动汽车的动力学模型如图 1 所示。

图 1 中主要符号的含义是： T_t 、 T_{r1} 、 T_{r2} 和 T_e 分别为驱动轮驱动力矩、驱动轮在前、后滚筒上的滚动阻力矩和测功器对前滚筒的加载力矩； N_f 、 F_f 、 N_r 和 F_r 分别是前、后滚筒对驱动轮的法向和切向作用力； T_f 和 T_r 是前、后滚筒机械摩擦和空气摩擦阻力矩； Z_1 和 Z_2 是驱动轮和从动轮的垂直负荷； N_2 和 X_2 分别是地面

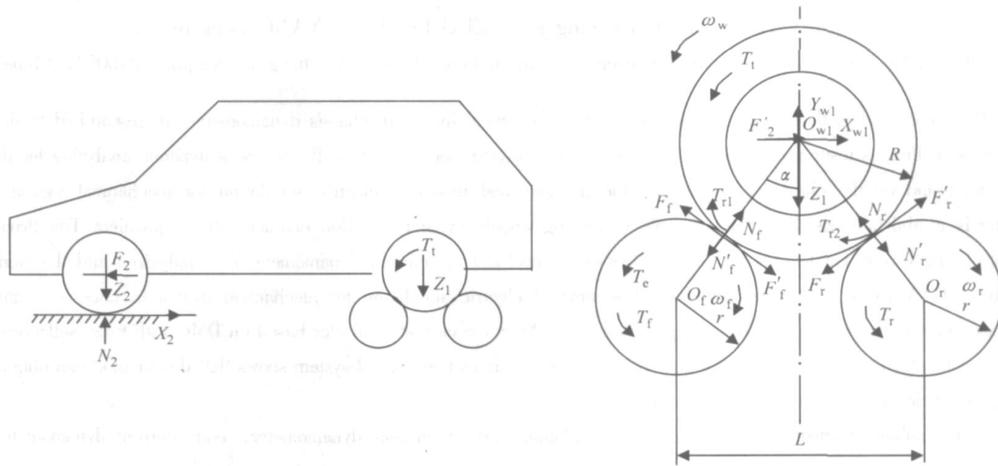


图 1 双滚筒底盘测功机上汽车动力学模型

Fig. 1 The dynamic model of vehicles running on double-roll chassis dynamometer

对从动轮的切向作用力； F_2 是经车身传递的驱动轮对从动轮水平方向的作用力； r 为滚筒半径； ω_w 、 ω_f 和 ω_r 分别是驱动轮转速、前滚筒转速和后滚筒转速； L 是前后滚筒中心距； α 为驱动轮在测功机上的安置角。

设测功器转子、飞轮和前滚筒折算到前滚筒的当量转动惯量为 I_f ，后滚筒的转动惯量为 I_r 。以驱动轮为研究对象，根据力与力矩平衡有方程组：

$$\begin{cases} T_t - T_{r1} - T_{r2} - F_f R - F_r R = I_{w1} \frac{d \omega_w}{dt}, \\ N_f \sin \alpha - N_r \sin \alpha - F_f \cos \alpha - F_r \cos \alpha + F_2 = 0, \\ N_f \cos \alpha + N_r \cos \alpha + F_f \sin \alpha - F_r \sin \alpha - Z_1 = 0, \\ I_f r - T_f - T_e = I_f \frac{d \omega_f}{dt}, \\ I_r r - T_r = I_r \frac{d \omega_r}{dt}, \end{cases} \tag{2}$$

式中， $d \omega_w/dt$ 、 $d \omega_f/dt$ 和 $d \omega_r/dt$ 分别为驱动轮、前滚筒和后滚筒的角加速度。

根据汽车理论^[6], 定义轮胎在滚筒上的滚动阻力系数 f_r 。通常, $f_r = 0.015 \sim 0.025$, $R = 0.25 \text{ m}$, $r = 0.10 \sim 0.25 \text{ m}$, $\alpha = 30 \sim 35^\circ$, 忽略次要因素, 并令试验台折算到前滚筒的总模拟惯量 $I_B = I_f + I_r$, 试验台内部摩擦总阻力矩 $T_B = T_f + T_r$, 轮胎在试验台上的滚动阻力

$$F_{WBR} = \frac{f_r}{\cos \alpha} Z_1, \text{ 解方程组 (2), 可得:}$$

$$T_e = \frac{r}{R} \left(T_i - I_{wl} \frac{d \omega}{dt} \right) - r F_{WBR} - \left(I_B \frac{d \omega}{dt} + T_B \right)。(3)$$

1.3 机械惯量电模拟方法分析

机械惯量电模拟方法是基于驱动轮转动动态特性相同的原理, 即当发动机节气门开度发生变化(转速与输出扭矩同时变化)时, 在底盘测功机上运行汽车的驱动轮转速变化与道路上行驶汽车的驱动轮转速变化规律相同, 从而体现惯量相等^[7]。

根据式(3), 若驱动轮与滚筒之间不打滑, 在某一测试速度下, 若因发动机输出扭矩发生变化导致驱动力产生相同增量 F_i , T_e 同时产生一增量 T_e , 则测功机上驱动轮的瞬时角加速度 $d \omega / dt$ 为:

$$\frac{d \omega}{dt} = \frac{r F_i - T_e}{R I_{wl} + \frac{R}{r} I_{BM}}, \quad (4)$$

由于 $I_{w2} = MR^2$, 若 T_e 满足:

$$T_e = \frac{Mr^2 - I_{BM}}{Mr} F_i, \quad (5)$$

就可保证式(1)和(4)两式中 $\frac{d \omega_{WR}}{dt} = \frac{d \omega}{dt}$, 从而体现惯量相等, 式(5)即为汽车惯量电模拟模型。

2 测试工况控制要求与控制系统构成

2.1 测试工况控制要求

文献 [1] 规定, 简易瞬态工况法汽车排气污染物测试时, 汽车按 GB18352 中的一个市区运转循环单元要求运行, 每一循环有 6 次加速操作、4 次减速操作、4 次换挡操作, 试验车速与测功机加载扭矩变化频繁。测功机不仅要能模拟汽车等速行驶时的道路阻力, 至少还要能模拟在 $800 \sim 2500 \text{ kg}$ 范围内以加速度 1.47 m/s^2 进行加速时的惯性力, 实现加速运动机械惯量模拟, 允许减速运行时汽车惯量由试验台基本机械惯量模拟。测试工况控制要求是: 车速允许公差为 $\pm 2 \text{ km/h}$, 工况改变的时间允许公差为 $\pm 1.0 \text{ s}$; 测功机加载扭矩稳态误差范围为设定值的 $\pm 2\%$, 惯量模拟响应要求在测功机控制系统发出命令后, 200 ms 内扭矩响应应达到指定值的 90% , 并且在 300 ms 内达到指定扭矩, 最大扭矩冲击值不得超过扭矩指定值

的 25% 。

2.2 测试工况控制系统构成

简易瞬态工况法汽车排气污染物测试工况控制系统, 主要由汽车底盘测功机、系统主控装置和司机助组成。底盘测功机加载装置普遍采用结构简单、价格低廉的低速大扭矩风冷电涡流测功器, 测功机上装有加载扭矩和转速测量装置。系统主控装置以工控机为核心, 测量运行参数并根据工况控制要求自动调节测功器的励磁电压。司机助显示被测汽车要求的运行工况、实际运行工况和必要的操作提示, 引导驾驶员操作。测试过程中, 试验工况的控制由测试驾驶员和计算机测控系统协作完成: 驾驶员从司机助获取信息, 以试验车速为目标, 控制发动机油门开度; 工控机以试验设定的加载扭矩为目标, 通过调节整流调压模块的输出电压, 自动控制测功器的励磁电压。

2.3 风冷电涡流测功器的特点

忽略涡电流的电枢反映和励磁线圈磁滞, 假设线圈和转盘材料的导电和导磁系数为常数, 根据异步电机电磁理论, 电涡流测功器吸收扭矩的稳态模型可以表示为^[8]:

$$T_{ed} = \frac{k_1 I^2}{k_2^2 \sqrt{n} + \frac{1}{\sqrt{n}} + 1.04 k_2}, \quad (6)$$

式中, T_{ed} 、 I 和 n 分别为电涡流测功器吸收扭矩、励磁电流强度和转盘转速; k_1 、 k_2 为系数, 与测功器的结构、材料和工作温度等有关, 实际工作过程中, 风冷电涡流测功器参数非线性和时变性特点明显, 工程上可通过改变式(6)中 k_1 来反映^[8]。

在动态过程中, 电涡流测功器励磁电流对控制电压的阶跃响应为:

$$I(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) / R_a, \quad (7)$$

式中, $I(t)$ 为瞬态励磁电流强度; U 为测功器的阶跃输入电压; t 为响应时间; τ 为励磁电路时间常数, $\tau = L/R_a$, L 和 R_a 分别为励磁电路等效电感和电阻。测功器普遍具有电感较大、电阻较小的特点, 时间常数较大, 其吸收扭矩响应存在明显的时滞。

在 2.2 的论述中, 系统控制的基本思想是将双输入双输出系统简化为两个单输入单输出回路, 但从式(6)知, T_{ed} 受 I 和 n 的综合影响, 因此两回路之间存在较强的耦合。

3 机械惯量电模拟控制方案

3.1 系统控制总体结构

由 2.1 和 2.2 知,具有机械惯量电模拟功能的汽车排气污染物测试简易瞬态工况控制系统是一随动(跟踪)系统,要求测功器阻力矩响应速度快,精度高。针对电涡流测功器吸收扭矩响应速度慢、系统存在非线性、时变和紧耦合的特点,研究中综合应用预测控制、模糊控制和解耦控制理论,设计了反馈预测补偿解耦、增益系数模糊自校正、动态矩阵控制的底盘测功机控制方案,总体结构如图 2 所示。

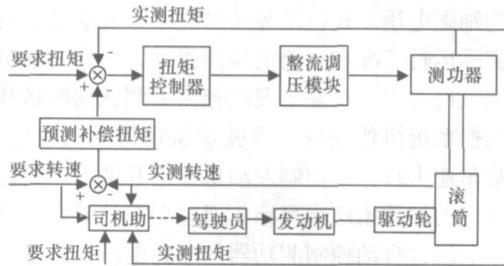


图 2 控制系统结构框图

Fig. 2 The structure diagram of control system

3.2 基本的动态矩阵预测控制^[9]

动态矩阵控制是一种重要的预测控制算法,它以从生产现场检测到的对象阶跃响应作为动态模型,能根据预测出的偏差,滚动优化确定当前的输入,在偏差发生前就对其进行有效的补偿,有较好的瞬态跟踪性能和对模型失配的鲁棒性。

以采样周期 T 测定测功器典型工况下测功器的单位阶跃响应,得模型向量 $a = \{ a_1, a_2, \dots, a_N \}$, N 为模型时域长度,构建描述系统动态特性的动态矩阵 A 和过去控制量矩阵 A_0 。假设系统参考输入轨迹为 y_r ,优化时域长度为 P ,控制时域长度为 M ,误差矩阵为 Q ,控制权矩阵为 U ,预测模型输出误差为 $e(k)$ 和误差校正向量为 h 。以输出预测误差和控制量加权的二次型性能指标作为优化性能指标,则最优控制律为:

$$U(k) = (A^T Q A + U^{-1})^{-1} A^T Q [Y_r(k+1) - A_0 U(k-1) - h e(k)] \quad (8)$$

3.3 预测模型增益的模糊自校正

据 2.3 中分析,测功器参数时变和非线性影响可通过调节式(6)中增益系数来 k_1 反映。设系统工作过程中的实时模型向量 $a_k = k \{ a_1, a_2, \dots, a_N \}$,此时,最优控制律为:

$$U(k) = k(k^2 A^T Q A + U^{-1})^{-1} A^T Q [Y_r(k+1) - k A_0 U(k-1) - h e(k)] \quad (9)$$

模型增益系数 k 用带有自调整因子的模糊调节器进行调整。设模糊调节器的输入变量——模型预测相对误差 E 、相对误差的变化率 EC 和输出变量 k 的变

化 k 的等级值论域为 $\{ E \} = \{ EC \} = \{ K \} = \{ -L, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, L \}$,则模糊控制规则可表示为:

$$\begin{cases} K = E + (1 - s) EC, \\ = \frac{1}{L} (s - 0) | E | + 0, \\ 0 < 0 < s < 1, \quad [0, s], \end{cases} \quad (10)$$

式中, 0 和 s 用 ITAE 积分性能指标寻优确定^[10]。

3.4 反馈预测补偿解耦

为降低转速变化对测功器吸收力矩控制的干扰,在测试工况的加速工况阶段,系统采用反馈预测补偿解耦控制。根据式(6),预测补偿扭矩模型为:

$$T_k = \frac{T_k (1 - k_2^2 n_k)}{2(k_2^2 n_k^2 + n_k + 1.04 n_k^3)} n, \quad (11)$$

式中, T_k 是 k 时刻的实测扭矩; n 可综合考虑 k 时刻的转速误差和未来时刻转速变化预测值,实现预测解耦控制。

4 试验结果与分析

针对 AHS-ELP300 型风冷电涡流双滚筒底盘测功机,开发了机械惯量电模拟控制试验系统。该测功机滚筒直径为 318 mm,机械惯量相当于汽车平动质量 310 kg。经调试寻优,动态矩阵控制主要参数为: $T = 25$ ms,典型工况(测功器温度 70 ~ 80 °C,车速 (25 ± 1) km/h,励磁电压 (35 ± 1) V)下模型向量 $a = \{ 0, 11.58, 29.93, 47.04, 61.24, 72.66, 79.85, 84.12, 87.38, 89.68, 90.99, 92.15, 93.23, 94.42, 94.99, 95.26, 95.46, 95.82, 95.98, 96.12 \}$;系统参考输入轨迹采用 1 阶指数形式,其时间常数为 20 ms; $P = 8, M = 2, Q = [1], U = [0], h = [1]$;模型增益系数模糊自校正调节器变量等级值论域为 $\{ \tilde{E} \} = \{ \tilde{EC} \} = \{ \tilde{K} \} = \{ -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \}$,量化因子 $k_e = 20, k_{ec} = 20$,比例因子 $k_k = 0.05$,自调整因子式中 $0 = 0.2, s = 0.9$;解耦调整扭矩模型中 $k_2 = 0.045, n_1 = e n_1 + 0.8(n_{l+1} - n_1) + 0.5(n_{l+2} - n_{l+1})$ 。

某基准质量 $RM = 990$ kg 的乘用车,等速运行时,驱动轮测功机吸收负荷按推荐的方法设定^[11],电模拟的机械惯量为 680 kg,只模拟汽车加速惯性力;测功机内耗阻力矩按试验结果 $T_m = 0.00048V^2 + 0.05546V + 3.643$ 确定;将理论加载力矩轨迹前移 60 ms 作为给定输入;简易瞬态工况法车速和测功器加载试验结果分别如图 3 (a) 和 3 (b) 所示。从试验结果可看出,电涡流测功器实际加载轨迹能较好地跟踪理论轨迹,测功机加载扭矩稳态误差小于设定值的 \pm

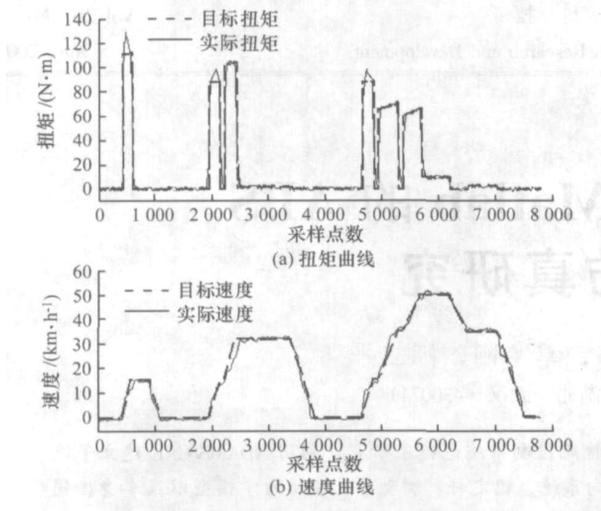


图 3 简易瞬态工况控制试验结果

Fig. 3 The testing result of simple transient driving mode control 1.4%, 惯量模拟响应在理论设定时刻的 100 ms 内即可达到指定值的 90%、最大扭矩冲击值不超过扭矩指定值的 15%; 虽然测功器不能模拟减速惯性力, 但能实现换挡和减速试验车速的控制。

5 结论

(1) 基于驱动轮转动动态特性相同的原理, 通过控制电涡流测功器的加载力矩, 可以实现汽车加速惯量的电模拟, 简化工况法排放测试用底盘测功机飞轮组的结构, 提高加速工况模拟控制精度。

(2) 采用模型增益模糊自校正的动态矩阵预测控

制方法, 可克服风冷电涡流测功器性能不足; 采用反馈预测补偿解耦可降低试验车速变化对加载力矩控制的影响; 两者结合能实现模拟载荷对理论轨迹的良好跟踪控制, 满足现行国标的要求。

(3) 由于电涡流测功器不能模拟减速惯性力, 从换挡与减速试验工况的车速控制角度, 汽车排放测试用底盘测功机电模拟的机械惯量不宜过大。

参考文献:

- [1] GB 18285-2005, 点燃式发动机汽车排气污染物限值及测量方法(双怠速法及简易工况法) [S].
- [2] 张学利, 何勇, 田国华. 汽车底盘测功机 [J]. 中国汽车保修设备, 2001 (6): 25 - 35.
- [3] 任有, 许洪国, 李显生, 等. 汽车底盘测功机惯性系统开发研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (3): 141 - 143.
- [4] 盛金东, 何仁, 李强. 车用涡流缓速器试验台的研制 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (7): 143 - 146.
- [5] 曾贤波, 金振华, 田颖, 等. 电涡流测功机控制器 n/M 模式控制算法研究 [J]. 内燃机工程, 2007, 27 (3): 82 - 84.
- [6] 余志生. 汽车理论 [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2001: 7 - 11.
- [7] ZHILLER P. A Highly Dynamic Engine Test Bed with Vehicle and Driver Simulation [J]. Automobile Industry, 1988, 35 (1): 65 - 73.
- [8] 闵永军. 车辆排气污染物测试技术研究与工程实现 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [9] 舒迪前. 预测控制系统及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [10] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.

《中国公路学报》2008 年征订通知

《中国公路学报》(双月刊) 是中国公路学会主办的公路交通行业最权威的学术性刊物, 主要刊载道路工程、桥隧工程、交通工程、筑路机械工程、汽车与汽车运用工程、公路运输经济与工程经济等专业的应用技术及理论性文章, 并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设及科技动态信息等。《中国公路学报》网络版——中国公路网延伸了《中国公路学报》的信息传播功能, 为读者提供全方位的公路交通信息服务。中国公路网的网址为: www.highway-china.com。

《中国公路学报》(大 16 开本) 读者对象为: 公路交通界的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。《中国公路学报》每期定价 12.00 元, 2008 年 6 期共 72.00 元。

收款单位: 长安大学学报 (西安市南二环路中段)

邮编: 710064

开户行: 中行西安翠华路支行

账号: 307034148598091001

联系人: 高 炜

电话: (029) 82334387