

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.016

基于抖动和时间的码垛食品机器人 轨迹优化算法研究

Research on trajectory optimization algorithm of
palletizing robot based on jitter and time

赖 啸

LAI Xiao

(宜宾职业技术学院现代制造系, 四川 宜宾 644003)

(The Department of Modern Manufacturing, Yibin Vocational and
Technical College, Yibin, Sichuan 644003, China)

摘要:对码垛食品机器人结构进行分析,构建其运动学模型并将模型进行函数表达;并在此基础上结合机器人的工作工况采用三次样条函数进行合理的轨迹规划,建立了以时间和抖动为最优目标的优化模型,再利用粒子群算法对目标模型进行优化。进一步通过实验验证,结果该方法能够在保证稳定性的前提下提高码垛食品机器人的执行效率。

关键词:码垛机器人;轨迹规划;抖动;运行时间;粒子群算法

Abstract: The palletizing robot was analyzed through its con-structure, and constructed its kinematics model and expressed the function of the model. On this basis, used the cubic spline function to carry out reasonable trajectory planning according to the working conditions of the robot, and established the time and jitter as the most optimization model of optimal target. And then used particle swarm optimization to optimize the target model. Through further experimental verification, the results show that the trajectory planning method proposed in this paper can improve the efficiency of the palletizing robot while ensuring stability.

Keywords: palletizing robot; trajectory planning; jitter; running time; particle swarm optimization

随着智能制造的有效实施,工业机器人是实现各行业自动化的有效手段。在对各行业的工业机器人研究中,轨迹规划是提高机器人工作效率的重要部分,使机器人在生产作业中保持高速、平稳、精确的运行状态是其研究重点。

在机器人的轨迹规划和优化方面,张程等^[1]对码垛机器人进行了运动学分析及空间轨迹规划研究,提出了一种轨迹规划的设计思路;刘一均^[2]提出基于RBF神经网络的码垛机器人轨迹优化,提升了机器人运行轨迹圆滑度;方健等^[3]提出基于时间最优的码垛机器人轨迹规划,提高了码垛机器人的工作效率;Su等^[4]对码垛机器人应用到禽蛋搬运中,但未解决拌匀冲击造成的产品破坏问题;Voltz等^[5]对工业机器人在智能仿形示教系统中抖动问题进行了分析与研究。关于码垛机器人轨迹规划进行了很多研究,但在生产作业中,对于机器人的工作效率与稳定性平衡方面仍需深入研究。

试验拟以搬运玻璃灌装食品的码垛食品机器人为研究对象,提出以抖动和效率为优化目标模型,并采用粒子群算法对所构建的码垛机器人数学模型进行优化,以期实现提升作业效率的同时,提升运行设备的稳定性。

1 机器人工作空间轨迹设计

1.1 码垛机器人结构分析

某食品生产企业所使用的码垛机器人如图1所示。考虑该机器人在使用上要求定位精确、执行手臂刚度大、响应迅速、驱动负载大等因素,试验研究的玻璃灌装食品码垛机器人分别采用由4个伺服电机驱动的4自由度设计方案,具有2个移动副和2个旋转副。机座上方为腰部机构,该机构执行目标动作是带动机器人自身旋转;机器人手部机构的执行目标动作是绕轴旋转,以便调整待码玻璃灌装食品的方位。机器人手部机构的水平运动和垂直运动均由电机作为动力源,并由带轮和丝杠机构执行实现。为进一步分析,根据机器人原型图并结合各关节运动关系将其简化为如图2所示的机构运动关系模型,其D-H参数如表1所示。

基金项目:四川省教育厅科研项目(编号:17ZB0501,17ZB0500)
作者简介:赖啸(1986—),男,宜宾职业技术学院副教授,工程师。
E-mail: xiao8302_lai@sina.com
收稿日期:2020-07-14



图 1 码垛机器人原型图

Figure 1 Prototype of palletizing robot

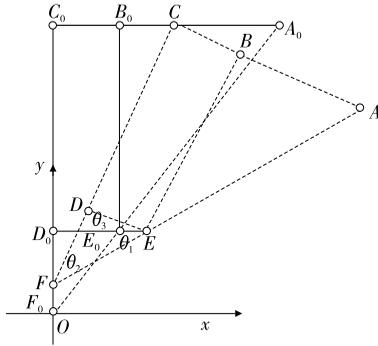


图 2 机器人各机构运动关系模型图

Figure 2 Model diagram of the motion relationship of each robot mechanism

表 1 D-H 参数表

Table 1 D-H parameter table

关节数 l	X 轴旋转 α_{i-1}	X 轴旋转 平移 a_{i-1}	Z 轴平移 d_i	Z 轴旋转 θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	$-\pi/2$	a_1	0	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	0	a_3	0	θ_4
5	0	0	0	θ_5
6	$-\pi/2$	a_5	d_6	θ_6

1.2 模型运动学分析

1.2.1 伺服电机与末端执行器的数学关系 根据几何关系建立角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的坐标函数表达式, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \angle D_0EF = \arctan\left(\frac{DF-y}{DE+x}\right) \\ \theta_2 = \angle DFE = \arccos\left(\frac{DF^2+EF^2-DE^2}{2DE \times EF}\right) \\ \theta_3 = \angle EDF = \arccos\left(\frac{DE^2+DF^2-EF^2}{2DE \times EF}\right) \end{cases} \quad (1)$$

利用模型图结构关系, 得出执行点 A、C 坐标的函数表达式, 如式(2)、(3)所示。

$$\begin{cases} x_A = x_C + AC \times \cos(\pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3) \\ y_A = y_C - AC \times \sin(\pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_C = FC \times \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_C = y + FC \times \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

根据机器人的执行情况, 码垛食品机器人机械臂应满足条件如式(4)所示。

$$\frac{AB}{BC}(CD - CF) + CF = 0 \quad (4)$$

综上可将末端执行器 A 点的运动方程表示为:

$$\begin{cases} x_A = \left(\frac{AB}{BC} + 1\right)x = 6x \\ y_A = -\frac{AB}{BC}y = -5y \end{cases} \quad (5)$$

联合求解, 得出末端执行点 A 的运动方程, 如式(6)所示, 进一步对其求导, 即可求得各伺服电机与末端执行器之间的数学关系。

$$\begin{cases} x'_A = \left(\frac{AB}{BC} + 1\right)x' = 6x' \\ y'_A = -\frac{AB}{BC}y' = -5y' \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知, 机器人执行器 A 点的运动方程与 x, y 的坐标值呈线性关系。

1.2.2 执行端的关键位置点设计及轨迹模型 在码垛机器人的实际工作过程中, 执行端的动作可拆解为提起、稳定转向过渡、放下 3 个阶段。因此, 结合所分析的码垛机器人工作空间尺寸以及执行端的工作路径, 设计执行端的关键位置点, 如图 3 所示。

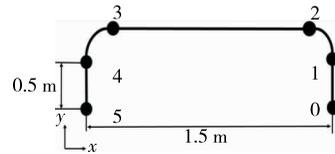


图 3 工作空间关键点设计

Figure 3 Design of key points in the workspace

由于三次样条曲线可以得到连续的角位移、角速度和角加速度, 而且在每相邻 2 个转角值间的三次样条曲线的极值只可能出现在 3 个位置, 便于计算出极值使其满足约束条件^[6-8]。而在码垛机器人工作范围内, 基于 6 个关键点, 因此利用三次样条函数方法对码垛机器人的轨迹进行规划。三次样条函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \\ \dot{f}(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \\ \ddot{f}(x) = 2a_2 + 6a_3x \end{cases} \quad (7)$$

式中:

x ——时间, s;

$f(x)$ ——码垛机器人的末端执行位移, m;

$\dot{f}(x)$ ——码垛机器人的执行速度, m/s;

$\ddot{f}(x)$ ——码垛机器人的执行加速度, m/s²。

为了使相邻 x 方向和 y 方向的运动轨迹在位移、速

度的相邻连接位置保持连续可导,结合机器人的实际运动情况,建立如式(8)~(11)所示的工作空间边界条件。

$$\begin{cases} f_0(t_0) = p_0 \\ f_0(t_1) = p_1 \\ \dot{f}_0(t_0) = v_0 \\ \dot{f}_0(t_1) = v_1 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{f}_0(t_1) = \dot{f}_1(t_1) \\ \ddot{f}_0(t_1) = \ddot{f}_1(t_1) \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_1(t_1) = p_1 \\ f_2(t_1) = p_2 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_n(t_{n-1}) = p_{n-1} \\ f_n(t_n) = p_n \\ \dot{f}_n(t_n) = v_n \\ \ddot{f}_n(t_n) = a_n \end{cases}. \quad (11)$$

图 3 中在 x 方向的输出量包括 12, 23, 34 段, 利用式(8)~(11)可得到从关键点 1 到关键点 4 的关于时间的线性方程组, 即矩阵 $B_x = K_x A_x$, B_x 是 15×1 的矩阵; A_x 为待求系数; 且上述矩阵满足 $v_{x1} = 0, a_{x1} = 0, v_{x4} = 0, a_{x4} = 0$ 。

y 方向的输出量包括 01, 12 段和 34, 45 段, 因为 34, 45 段的求解方法同 01, 12 段, 故只对 01, 12 段进行阐述。01, 12 段利用式(8)~(11)求解得到关键点 0 到关键点 2 的关于时间的线性方程组, 即矩阵 $B_{y1} = K_{y1} A_{y1}$, 其中 K_{y1} 是 12×12 的时间矩阵; B_{y1} 是 12×1 的矩阵; A_{y1} 为待求系数; 且上述矩阵满足 $v_{y0} = 0, a_{y0} = 0, v_{y2} = 0, a_{y2} = 0$ 。

2 考虑抖动和时间的轨迹优化模型

2.1 抖动和时间模型

玻璃属于易碎物, 搬运和码垛玻璃不仅需要考虑效率问题, 同时搬运过程中冲击过大会造成损坏。因此, 以搬运时间和搬运过程抖动作为优化目标, 并采用权重系数法对时间和抖动进行赋权。依据轨迹规划的设计要求将码垛机器人的运动时间划分为每一段行程的时间的总和, 则关于时间的码垛机器人优化模型可以表达为:

$$T = \min \sum_{i=1}^n h_i, \quad (12)$$

式中:

T ——一次分拣工作总时间, s;

h_i ——第 i 段轨迹运行时间, $s^{[9-10]}$ 。

码垛机器人在运行过程中的抖动一般由加速度的变化率表示, 即 $J = \frac{da}{dt}$ 。以抖动为目标的码垛机器人的优化模型可表达为 $\min \sum_{i=1}^n \max |J_i(t)|$ 。根据上述描述, 基于抖动和时间的码垛机器人轨迹优化的数学模型可表达为:

$$F = K_T N \sum_{i=1}^n h_i +$$

$$K_J \sum_{j=1}^N \max \{ |\ddot{Q}_{j,1}|, |\ddot{Q}_{j,2}|, \dots, |\ddot{Q}_{j,n-1}| \}, \quad (13)$$

式中:

K_T ——时间权重值;

K_J ——抖动权重值;

N ——关节数量;

h ——每段轨迹时间, s;

$|\ddot{Q}_{j,n-1}|$ ——抖动值, m/s^3 。

2.2 粒子群优化模型

在建立时间—抖动最优轨迹规划数学模型后, 利用粒子群优化算法进行优化^[11-12]。评价模型中的轨迹时间和抖动值组成种群中每个粒子, 其编码方式表示为:

$$p_i = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN}, \dots, \ddot{Q}_{i1}, \ddot{Q}_{i2}, \dots, \ddot{Q}_{iN})。 \quad (14)$$

粒子的适应度函数表示为:

$FIN =$

$$\begin{cases} 1 / \left(K_T N \sum_{i=1}^n h_i + K_J \sum_{i=1}^N \max \left\{ \left| \frac{a_{j,2} - a_{j,1}}{h_1} \right|, \right. \right. \\ \left. \left. \left| \frac{a_{j,3} - a_{j,2}}{h_2} \right|, \dots, \left| \frac{a_{j,n} - a_{j,n-1}}{h_{n-1}} \right| \right\} \right), C > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad (15)$$

式中:

$$C = K_T N \sum_{i=1}^n h_i + K_J \sum_{i=1}^N \max \left\{ \left| \frac{a_{j,2} - a_{j,1}}{h_1} \right|, \left| \frac{a_{j,3} - a_{j,2}}{h_2} \right|, \dots, \left| \frac{a_{j,n} - a_{j,n-1}}{h_{n-1}} \right| \right\}。$$

粒子群优化隐含层神经元数的步骤参照文献^[9-11], 具体包括: 初始种群的产生, 然后通过将个体的历史最优值和适应度值进行比较和评价, 进而对其进行优化迭代, 使其误差最小。所设置的参数为: 优化的初始种群 20, 最大的迭代次数 500, 惯性权值 1, 学习因子 2, 粒子的初始速度 $[-3, 3]$, 粒子的初始位置 $[-1, 1]$ 。

3 实验验证

3.1 试验步骤

采用的硬件系统示意图如图 4 所示, 通过硬件接口读取试验实测数据。硬件系统主要包括两台伺服驱动器、一台工控机以及一些辅助设备。其中依据经验设置约束条件为机器人最大速度的 70%, 详细见表 2。具体方法: ① 将 3 次样条曲线拟合曲线拆分成离散点, 再通过文中所述的运动学关系模型求解出各个关节的角度; ② 进一步将各个关节角度数据导入到控制器, 使得整个机械臂按照关节角度数据执行作业; ③ 读取各驱动电机的实际运行角度数据并与规划得出的关节的角度数据进

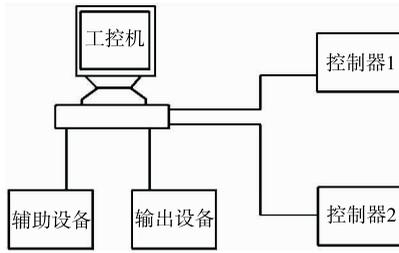


图 4 硬件系统

Figure 4 Hardware system

表 2 各关节约束条件

Table 2 Constraint conditions of each joint

关节	速度/ (rad · s ⁻¹)	加速度/ (rad · s ⁻²)	加加速度/ (rad · s ⁻³)
关节 1	3.32	5.53	4
关节 2	3.56	9.80	10
关节 3	3.35	5.80	4

行对比分析找出差异;④ 对比规划末端行程轨迹与实际运行末端轨迹。

3.2 结果与分析

在上述约束条件下得出了不同权重下机器人的运行时间及抖动量化关系,如表 3 所示。从表 3 可以看出,随着权重的变化,工作效率和稳定性之间存在相互影响:效率越高其抖动值越大,稳定性越差,这与机器人实际工作状态也相吻合。因此,进行搬运玻璃作业时应优先考虑玻璃的抗震能力,再提升搬运效率。

根据该食品生产企业给出的玻璃抗震指数,冲击低于 23 rad/s³的搬运过程不会出现玻璃破碎的情况,所以选择 $K_J/K_T=0.5$ 时的优化方法并与未进行优化的运动进行对比。码垛机器人优化后的运行轨迹如图 5 所示。未采用模式搜索优化方法时,运行的总时间为 6.352 s,而优化后的运行总时间为 4.907 s,效率提升了 22.75%。可以看出,运行总时间明显减少,效率得到提高。

为了保证轨迹规划的有效性,将规划参数与实际运行轨迹进行对比,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,与试验方法得到的运动轨迹相比电机实际速度曲线稍有抖

表 3 不同权重下运行时间及抖动关系

Table 3 Relationship between operation time and jitter under different weights

K_J/K_T	h_1/s	h_2/s	h_3/s	h_4/s	h_5/s	$\ddot{Q} /$ (rad · s ⁻³)
0.1	0.819	0.361	2.013	0.369	0.927	32.71
0.3	0.831	0.382	2.025	0.373	1.087	26.82
0.5	0.843	0.403	2.037	0.377	1.247	22.17
0.7	0.855	0.424	2.049	0.381	1.407	15.07
0.9	0.867	0.445	2.061	0.385	1.567	11.21

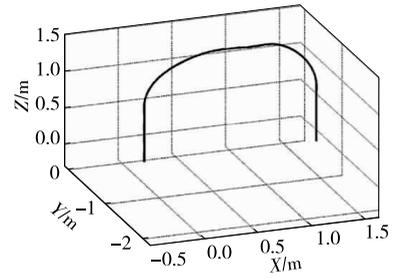
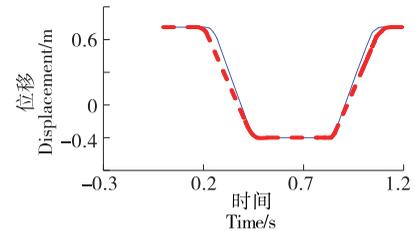


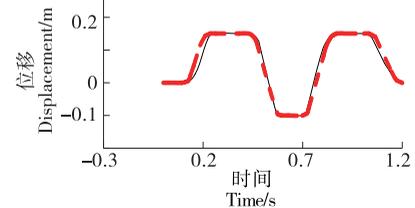
图 5 码垛机器人运行轨迹图

Figure 5 Running track of the palletizing robot

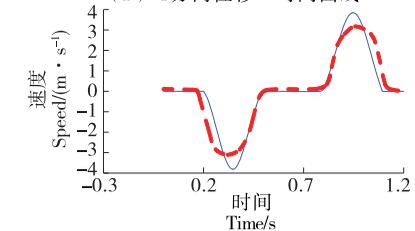
动,与指令曲线之间虽有一定误差,但已经比较接近。由于码垛机器人在搬运玻璃的上升和下降的精准程度会对工作的安全产生影响,考虑到码垛机器人在搬运玻璃过程存在系统误差,进一步通过仿真得到如图 7 所示轨迹误差曲线,结果显示,末端轨迹在 X 轴和 Y 轴方向轨迹误差均在 1 mm 以内,满足工作要求。



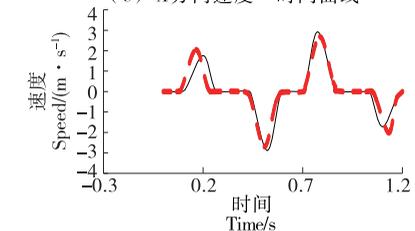
(a) X方向位移—时间曲线



(b) Y方向位移—时间曲线



(c) X方向速度—时间曲线



(d) Y方向速度—时间曲线

实线为电机实际运行轨迹曲线,虚线为运动规划轨迹曲线

图 6 末端运动规划轨迹与实际轨迹对比图

Figure 6 Comparison of the end motion planning trajectory with the actual trajectory

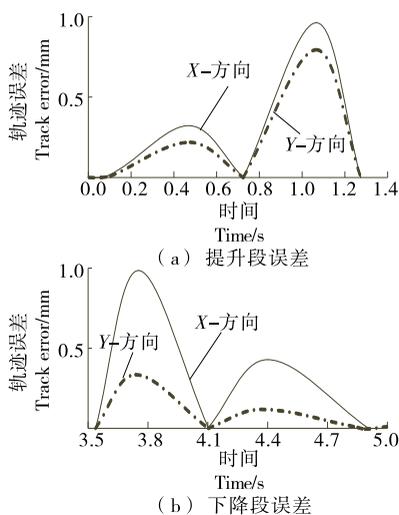


图 7 轨迹误差

Figure 7 Trajectory error

综上所述,整个运动过程中关节的速度和加速度具有连续性,速度曲线光滑、变化比较平稳,可以确保机器人运动的稳定性。而且该算法计算过程比较简单、运算速度快,能够满足约束条件,可以进行运行效率的最优化设计。

4 结论

研究表明,试验提出的轨迹规划方法能够在保证稳定性的前提下提高码垛食品机器人执行效率。通过分析前人^[1-6]提出的以时间为优化目标和以抖动为优化目标,构建了以时间—抖动为优化目标,将粒子群算法引入到码垛食品机器人的轨迹优化中,使所研究的码垛食品机器人的效率和冲击达到了很好的平衡效果,并通过对机器人运动轨迹仿真和试验进行了验证。

虽然试验同时考虑时间和抖动,但在优化算法方面仍缺乏深入研究,尤其在优化过程中出现的局部最优问题,在未来工作中需作进一步研究和验证。

参考文献

[1] 张程, 张卓. 码垛机器人运动学分析及关节空间轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2): 19-21, 25.

[2] 刘一均. 基于 RBF 神经网络的码垛机器人轨迹优化[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(2): 62-65.

[3] 方健, 宋宇, 朱茂飞, 等. 基于时间最优的码垛机器人轨迹规划[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 93-99.

[4] SU Ting-ting, ZHANG Hao-jian, WANG Yun-kuan, et al. Deleta robot dynamic target grab algorithm based on ferrari method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 46(6): 128-132.

[5] VOLTZ M, WEBSTER R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 473-490.

[6] ZHANLAV T, MIJIDDORJ R. A comparative analysis of local cubic splines[J]. Computational & Applied Mathematics, 2018, 31(5): 1-11.

[7] 于洋, 周佳伟, 冯迎宾, 等. 基于三次 B 样条曲线的无人车轨迹优化方法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(5): 71-75.

[8] ENRICO Bertolazzi, MARCO Frego, FRANCESCO Biral. Point data reconstruction and smoothing using cubic splines and clusterization[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 176: 36-56.

[9] 何建成, 李林升, 林国湘. 基于自适应粒子群算法的 FS20N 机器人时间最优轨迹规划[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(1): 192-195.

[10] 王鹏, 曹现刚, 马宏伟, 等. 基于余弦定理-PID 的煤矸石分拣机器人动态目标稳准抓取算法研究[J/OL]. 煤炭学报. [2020-05-01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.1565>.

[11] PENG You, DENG Wan-ling, WU Wei-jing, et al. Hybrid modelling routine for metal-oxide TFTs based on particle swarm optimisation and artificial neural network[J]. Electronics Letters, 2020, 56(9): 453-456.

[12] MOSA Mohamed Atef. A novel hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-objective optimization of text mining [J]. Applied Soft Computing, 2020, 90: 106189.

(上接第 11 页)

[19] 邢贝贝, 张亭亭, 赵强, 等. 高压微射流处理对米谷蛋白热聚集性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 109-115.

[20] HU Chun, XIONG Zhou-yi, XIONG Han-guo, et al. Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment on the functional and structural properties of potato protein isolate and its complex with chitosan[J]. Food Research International, 2020, DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109868.

[21] LI Su-yun, YANG Xue, ZHANG Yan-yan, et al. Effects of ultrasound and ultrasound assisted alkaline pretreatments

on the enzymolysis and structural characteristics of rice protein[J]. Ultrason Sonochem, 2016, 31: 20-28.

[22] WANG Tao, WANG Li, WANG Ren, et al. Effects of freeze-milling on the physicochemical properties of rice protein isolates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 832-839.

[23] 胥伟, 代钰, 王宏勋, 等. 冷冻处理对蛋清液起泡性与凝胶性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 96-98.

[24] 石嘉怿, 张太, 梁富强, 等. 大米谷蛋白储藏过程中结构与功能性质变化的研究[J/OL]. 食品工业科技. [2020-12-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100061>.