

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.01.018

# 电动汽车胶粘型电机铁芯加工装备效能优化\*

崔海龙<sup>1,2,3</sup>, 杜冰<sup>1,2,3</sup>, 黄秀东<sup>4</sup>, 刘凤华<sup>1,2,3</sup>, 刘雪东<sup>1,2,3</sup>, 周茂伟<sup>4</sup>

(1. 燕山大学, 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066000;

2. 燕山大学, 先进制造成形技术及装备国家地方联合工程研究中心, 秦皇岛 066000;

3. 河北省金属精密塑性加工工程技术研究中心, 秦皇岛 066000; 4. 宁波震裕科技股份有限公司, 宁波 315613)

**[摘要]** 随着我国“双碳”战略的深入实施, 电动汽车迅速发展。生产驱动电机铁芯的胶粘工艺受到了越来越多的关注。本研究针对胶粘型铁芯生产流程各工序节拍匹配不协调导致生产效率受到限制这一问题, 通过解决胶粘型电机铁芯加工装备——回转叠压机构的驱动装置选择与参数设置等问题, 达到了降低生产成本并提高生产效率的目的。本研究基于灰色理论, 形成了一种综合性的多目标优化方法, 旨在提高电机铁芯加工装备驱动装置选择的准确性、参数设置的精确性。

**关键词:** 胶粘型铁芯; 灰色理论; 效能优化; 电动汽车

## Efficiency Optimization of Iron Core Processing Equipment for Adhesive Motor of Electric Vehicle

Cui Hailong<sup>1,2,3</sup>, Du Bing<sup>1,2,3</sup>, Huang Xiudong<sup>4</sup>, Liu Fenghua<sup>1,2,3</sup>,  
Liu Xuedong<sup>1,2,3</sup> & Zhou Maowei<sup>4</sup>

1. Yanshan University, Key Laboratory of Advanced Forging &amp; Stamping Technology and Science, Ministry of Education of China,

Qinhuangdao 066000; 2. Yanshan University, National-Local Joint Engineering Research Center for

Advanced Manufacturing, Forming Technology and Equipment, Qinhuangdao 066000;

3. Hebei Engineering Technology Research Center of Metal Precision Plastic Processing, Qinhuangdao 066000;

4. Ningbo Zhenyu Technology Co., Ltd., Ningbo 315613

**[Abstract]** With the in-depth implementation of China's 'carbon peaking and carbon neutrality' strategy, electric vehicles have developed rapidly. The bonding process of producing drive motor core has attracted more and more attention. In this study, for the problem that the production efficiency is limited due to the uncoordinated rhythm matching of each process in the production process of adhesive iron core, the purpose of reducing production cost and improving production efficiency is achieved by solving the problems of driving device selection and parameter setting of rotary lamination mechanism of adhesive motor core processing equipment. Based on the grey theory, a comprehensive multi-objective optimization method is put forward in this paper, which aims to improve the accuracy of driving device selection and parameter setting of motor core processing equipment.

**Keywords:** adhesive motor core; gray theory; performance optimization; electric vehicle

## 前言

作为重要的战略新兴产业, 电动汽车对于实现

“双碳”目标具有举足轻重的地位, 也是推动汽车产业实现可持续发展的重要手段<sup>[1]</sup>。目前投入市场的电动汽车主要为纯电动汽车和插电式混合动力汽车<sup>[2]</sup>。而作为电动汽车“心脏”的驱动电机受到了越

\* 新能源汽车驱动电机铁芯模内精准胶接高速冲压关键技术研究项目(x2020229)资助。

原稿收到日期为 2024 年 05 月 20 日, 修改稿收到日期为 2024 年 06 月 18 日。

通信作者: 杜冰, 副教授, 博士, E-mail: pangpang115@ysu.edu.cn。

来越多的关注<sup>[3]</sup>。

针对电动汽车领域电机产品的巨大市场开发潜力,需要研发出更高性能的电动汽车驱动电机产品。而电机能量损耗中,占比最多的就是电机铁芯所产生的损耗<sup>[4]</sup>。为了降低铁芯损耗,目前常规铁芯产品主要由数百片无取向电工钢片叠装连接而成<sup>[5]</sup>。传统叠装方式主要为铆接和焊接,由于这两种方式均为局部点固定,叠压不够紧密,会导致铁芯有效面积减小,电机磁路磁导降低,空载电流升高,功率因数降低,电机输出转矩能力降低<sup>[6-7]</sup>,电工钢片间存在涡流通路导致铁损较高,难以满足电动汽车领域电机轻量化和高功率密度的需求。因而亟需开发一种更加优异的叠压技术以解决此问题,故胶粘型铁芯加工制造技术应运而生。

胶粘型铁芯加工制造技术是一种利用喷胶机构在电工钢片表面喷涂胶粘剂,同时施加沿厚度方向的压装力进行压装,冷却到室温后,即可实现电工钢片连接的叠压技术<sup>[8]</sup>。由于胶层厚度较薄且具有良好的绝缘性能,使得电工钢片叠压相对紧密,同时电工钢片间由于绝缘胶层的存在无法通过涡流,从而缩短了涡流的路径,降低了铁芯涡流损耗,提高了电机功率密度<sup>[9]</sup>。然而由于目前胶粘型铁芯生产设备的生产效率相比传统铁芯低很多,严重限制了其市场推广及应用。限制设备生产效率的主要原因是胶粘型铁芯加工装备——回转叠压机构的驱动装置选型与参数设置环节显著影响生产效率,实际生产往往使用“试错法”,未采用科学的选型方法,使得生产效率受到极大限制。

为了进一步提高胶粘型铁芯加工装备运行效能,降低胶粘型铁芯的生产成本,本研究基于灰色理论,形成了一种综合性的多目标优化方法并将方法程序化,以实现提高胶粘型电机铁芯加工装备生产效率的目的。

## 1 电机铁芯回转叠压机构介绍

随着汽车电机铁芯生产制造技术的不断发展,其制造模具也越来越多地采用回转叠压技术<sup>[10]</sup>。电机铁芯回转叠压机构(简称回转叠压机构)是对级进模具冲裁下来的电工钢冲片进行回转和叠压,兼具凹模落料、铁芯回转和冲片叠压等功能。

图1是一款投入使用的胶粘型电机铁芯冲裁叠压一体式级进模具。该级进模能够一次性完成铁芯

的定、转子冲片点胶、落料和回转叠压动作。然而在实际中模具使用效果并不理想,由于回转叠压机构驱动装置选择不合理、参数设置不恰当等问题,显著影响到了汽车电机铁芯的产品质量和生产效率,导致该产品的市场投放进程严重受阻。故回转叠压机构驱动装置的快速选择与参数的精确设置成为提高胶粘型电机铁芯加工装备加工效能的关键途径。

本研究以图1所示的某型号电动汽车电机转子铁芯回转叠压机构为例进行伺服电机的选型。图2所示为电机转子回转叠压机构的详细结构。

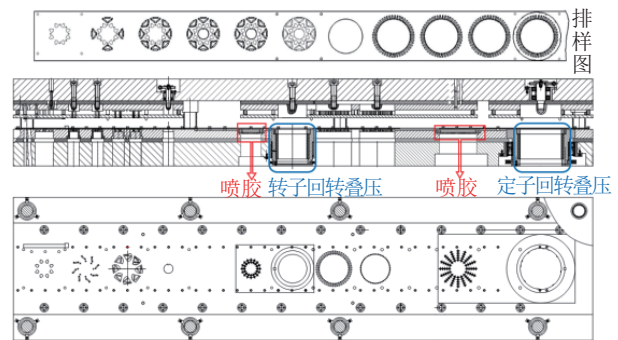


图1 冲裁叠压一体式级进模结构图

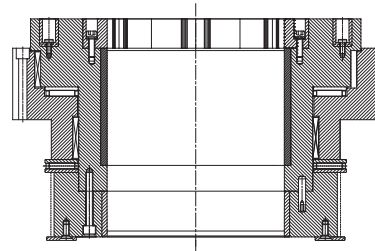


图2 电机铁芯回转叠压机构装配图

回转叠压驱动装置选择的主要流程为:确定传动机构;确定负载惯量匹配;确定机构回转时间;确定回转叠压驱动装置运行参数;回转叠压驱动装置参数的可行性验证。

## 2 传动机构的确定

### 2.1 同步齿形带传动

回转叠压机构驱动装置通常为精度更高、动态性能更好的伺服电机,故驱动装置选择就是在选择合适的伺服电机。伺服电机与回转叠压机构的联接一般为联轴器、齿轮或同步带联接。相比联轴器和齿轮联接而言,同步带没有传动间隙,传动距离较

大,工作中没有冲击,成本较低,因此在实际工作中应用的更为广泛,故在本研究中采取同步齿形带传动。

### 2.2 齿轮减速器传动

齿轮减速器既可增加电机输出转矩,又能降低负载惯量,但相比于单一的同步带传动却降低了机构的传动效率,增加了电机铁芯制造成本。当同步带能够满足要求时,则不采用减速器传动,但当现有电机不能满足要求时须考虑使用减速器。回转叠压机构常用减速器型号为PLN115系列,其常用传动比为:3、4、5、7、8、10,其转动惯量范围为 $1.933 \times 10^{-4} \sim 3.256 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

## 3 负载参数的确定

确定回转叠压机构冲次  $m$ , 回转角度  $\alpha$ , 同步带传动效率  $\eta_1$ , 减速器传动效率  $\eta_2$ , 同步带传动比为  $i_1$ , 减速器传动比为  $i_2$  (当不采用减速器时  $\eta_2=1$  且  $i_2=1$ )。

回转叠压机构总传动比为

$$i = i_1 i_2 \quad (1)$$

回转叠压机构总机械效率为

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \quad (2)$$

回转叠压机构回转周期包含单次回转时间  $t$  和机构停止运行时间  $t_0$ , 其计算公式为

$$t_0 = \frac{60}{m} \quad (3)$$

单次回转时间

$$t' = \frac{60}{m} \cdot \frac{1}{f} \quad (4)$$

式中  $f$  为时间系数, 用其倒数来反映回转时间占回转周期的比例, 根据生产经验确定其取值范围为 1~4, 本研究取 4。

回转叠压机构的运动模式有三角形、矩形和梯形动作模式。图 3(a) 所示为三角形运动模式, 运转时电机会受到较大冲击, 不推荐使用; 图 3(b) 所示为矩形运动模式, 运转时无须加速, 以最高转速运转, 不符合实际; 图 3(c) 所示为梯形运动模式, 运转时先匀加速至某一转速, 之后以此转速运转, 最后匀减速制动, 此模式运转时间适中, 对电机冲击较小, 是回转叠压机构常用的运动模式。

三角形模式运转时, 具有最高临界回转速度:

$$n_{\max} = \frac{60\alpha}{\pi t'} \quad (5)$$

矩形模式运转时, 具有最低临界回转速度:

$$n_{\min} = \frac{30\alpha}{\pi t'} \quad (6)$$

伺服电机最高转速为

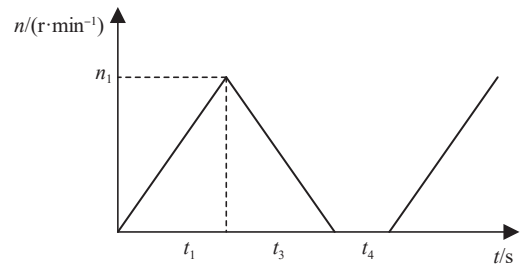
$$n_{2\max} = n_{\max} i_{\max} \quad (7)$$

式中  $i_{\max}$  为最大传动比。

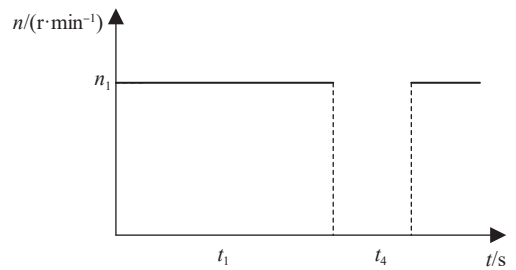
伺服电机最低转速为

$$n_{2\min} = n_{\min} i_{\min} \quad (8)$$

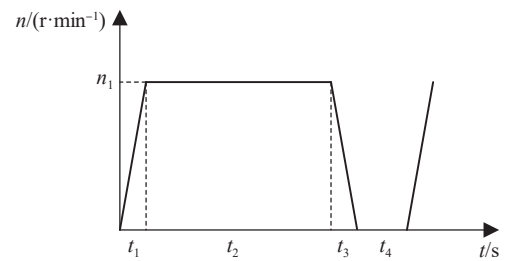
式中  $i_{\min}$  为最小传动比。



(a) 三角形工作模式



(b) 矩形工作模式



(c) 梯形工作模式

图 3 回转叠压机构工作模式

伺服电机最长加速时间为

$$t'_{\max} = \left\lfloor \frac{t'}{2} \right\rfloor \quad (9)$$

本研究初定同步带传动比  $i_1$  范围为 1~3, 既可最大限度满足负载转矩的要求, 也可降低传动比以增加同步带寿命。

回转叠压机构负载计算时的参数如表1所示。

表1 回转叠压机构负载计算参数

参数	数值
冲次 $m/\text{spm}$	180
回转角度 $\alpha$	$\pi/3$
同步带机械效率 $\eta_1$	0.98
减速器机械效率 $\eta_2$	1
最小传动比 $i_{\min}$	1
最大传动比 $i_{\max}$	3
减速器传动比 $i_2$	1
回转周期 $t_0/s$	1/3
理论回转时间 $t'/s$	1/12
最低转速 $n_{2\min}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	120
最高转速 $n_{2\max}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	720
最大加速时间 $t'_{\max}/s$	41

## 4 转子惯量的确定

### 4.1 负载转动惯量的惯量匹配原则

伺服电机需要将输入的电功率快速转换为机械功率输出,功率转换越快,伺服电机的快速性越好。伺服电机的有负载功率变化率<sup>[11]</sup>为

$$\frac{dP}{dt} = J_{\omega} \frac{(T_M - T_{\omega})^2}{(J_M + J_{\omega})^2} \quad (10)$$

式中:  $T_M$  为伺服电机的输出转矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $T_{\omega}$  为负载转矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $J_M$  为电机转子惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;  $J_{\omega}$  为负载惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

选定伺服电机、确定负载参数后,电机输出转矩  $T_M$  为定值。当电机转速小于额定转速时,伺服电机为恒转矩调速,则  $(T_M - T_{\omega})$  不变。由式(10)可知,当  $J_M = J_{\omega}$  时,  $dP/dt$  最大,此时伺服电机具有最大负载功率变化率,伺服电机处于最佳工作状态,即伺服电机负载转动惯量匹配。

但生产实践中很难做到  $J_M = J_{\omega}$ 。由文献[12]可知,一般情况下,当  $J_{\omega} \leq J_M$  时,电机的可控性好,系统的动态特性好;当  $J_M < J_{\omega} \leq 3J_M$  时,电机的可控性降低,系统的动态特性较好;当  $J_{\omega} > 3J_M$  时,电机的可控性明显下降,系统的动态特性一般。为了保证电机铁芯回转叠压机构的动态特性良好,快速性良好,可控性较强,应使  $J_{\omega} \leq 3J_M$ ,故在本研究中暂定  $J_{\omega} = J_M$ 。定义负载惯量  $J_M$  与电机转子惯量  $J_{\omega}$  的比值为负载惯量比  $M$ ,即  $M = J_M/J_{\omega}$ ,应使  $M \leq 3$ ,暂取  $M = 1$ 。

### 4.2 伺服电机转子惯量的确定

负载转动惯量  $J_{\omega}$  是指负载的转动惯量和质量折

算到电机输出轴上的等效转动惯量。

在考虑机构机械效率的前提下,回转叠压机构的负载惯量为

$$J_{\omega} = \frac{J_1}{\eta_i^2} + J_2 + J_r \quad (11)$$

式中:  $J_1$  为回转叠压机构转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;  $J_2$  为小带轮转动惯量,其值较小取  $J_2 = 0$ ;  $J_r$  为减速器转动惯量,当使用减速器时其值为  $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,否则为0。

利用式(10)计算所有零件的负载转动惯量,其中主要零件的转动惯量如表2所示。

表2 主要零件的转动惯量

编号	名称	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
2	带轮	0.048
9	回转轴套	0.257
12	凹模	0.028
15	收紧圈	0.023
	转子铁芯	0.016

回转叠压机构的负载转动惯量为  $J_1 = 3943.5235 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

考虑到未计算小带轮和回转叠压机构连接附件(如轴承结构、垫片等)转动惯量,故对负载惯量进行适当扩大,则最终负载惯量为

$$J_{\omega 0} = k_1 J_{\omega} \quad (12)$$

式中  $k_1$  为惯量放大系数,取值范围为 1.0~1.3,本研究取 1.1。

伺服电机转子惯量为

$$J_M = J_{\omega 0} \quad (13)$$

回转叠压机构总转动惯量为

$$J_{\omega 1} = J_{\omega 0} + J_M = 2k_1 \frac{J_1}{\eta_i^2} + 2J_r \quad (14)$$

## 5 驱动装置参数的确定

### 5.1 回转时间的确定

回转叠压机构的速度-时间曲线如图4所示。

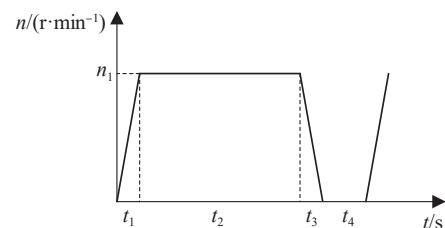


图4 回转叠压机构运动速度时间曲线

回转叠压机构完成一次回转动作的时间为

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \quad (15)$$

式中:  $t_1$  为加速时间, s;  $t_2$  为稳定运转时间, s;  $t_3$  为制动时间, s。

回转叠压机构启动角加速度为  $a_1$  (rad/s<sup>2</sup>), 制动角加速度为  $a_2$  (rad/s<sup>2</sup>), 加速时间为

$$t_1 = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_1}{a_1} \quad (16)$$

式中:  $n_1$  为回转叠压机构稳定运转转速, r/min;  $a_1$  为回转叠压机构启动加速度, rad/s<sup>2</sup>。

回转叠压机构启动加速度  $a_1$  与制动加速度  $a_2$  大小相等, 故  $t_1 = t_3$ 。单次回转总时间为

$$t = \frac{900\alpha a_1 + \pi^2 n_1^2}{30a_1 \pi n_1} \quad (17)$$

式中  $\alpha$  为回转叠压机构回转角度, rad。

伺服电机稳定运转转速为

$$n_2 = n_1 i_0 \quad (18)$$

伺服电机的启动角加速度为

$$a_{10} = \frac{\pi n_2}{30 t_1} \quad (19)$$

回转叠压机构回转总时间为

$$t = \frac{30\alpha i}{\pi n_2} + t_1 \quad (20)$$

## 5.2 伺服电机参数的确定

### (1) 匀速转矩

在回转叠压机构稳定运转阶段电机转速恒定, 其输出转矩最小, 因回转叠压机构采用轴承与机架相配合, 其摩擦因数较小, 故可认为匀速转矩  $T_f = 0$ 。

### (2) 加速转矩

加速转矩为

$$T_{a1} = J_{\omega 1} a_{10} = \left( 2k_1 \frac{J_1}{\eta i^2} + 2J_r \right) \frac{\pi n_2}{30 t_1} \quad (21)$$

### (3) 电机转矩均方根值

回转叠压机构在运行过程中会频繁启动、制动, 因此必须检查伺服电机在运动过程中是否会过热, 故须计算电机转矩均方根值, 并使此值小于额定转矩, 图5所示为电机转矩-时间曲线。电机转矩均方根值为

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{(T_{a1} + T_f)^2 t_1 + T_f^2 t_2 + (T_{a1} - T_f)^2 t_3}{t_0}} = \sqrt{\frac{2T_{a1}^2 t_1}{t_0}} \quad (22)$$

式中  $t_0$  为回转叠压机构的回转周期, s,  $t_0 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 。

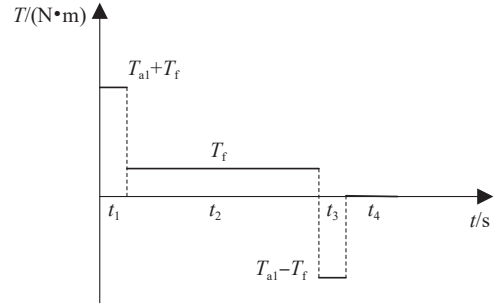


图5 电机转矩-时间曲线

### (4) 伺服电机最大转矩

最大输出转矩为

$$T_{a2} = T_{a1} + T_f \quad (23)$$

### (5) 伺服电机最大功率

最大输出功率为

$$P = \frac{T_{a2} n_2}{9550} = \left( 2k_1 \frac{J_1}{\eta i^2} + 2J_r \right) \frac{\pi n_2^2}{30 \times 9550 t_1} \quad (24)$$

## 6 驱动装置运行参数的初步选择

### 6.1 驱动装置运行参数选取流程

对于回转叠压机构来说, 伺服电机实际回转时间要趋于理论回转时间, 最大输出转矩和最大输出功率在能够满足回转时间要求的前提下, 尽量小, 以防止电机性能过剩、成本过高, 电机转矩均方根要小于电机额定转矩。根据上述要求, 确定电机转速、机构传动比和伺服电机加速时间。

根据表1中的数据, 确定电机转速  $n_2$  的范围为 120~720 r/min (取值间隔 10 r/min), 依据参考文献 [13], 确定同步带传动比  $i_1$  的范围为 1~3 (取值间隔 0.1), 出于成本考虑, 本研究在初次计算时暂不采用减速器传动 (即  $i_2 = 1$ , 总传动比  $i = i_1 i_2 = i_1$ , 当初次计算完成后, 计算结果均不能满足使用要求时, 采用减速器传动重复进行计算, 即  $i_2 = 3, 4, 5, 7, 8, 10$ ); 确定加速时间  $t_1$  的范围为 1~41 ms (取值间隔 1 ms), 理论回转时间为  $t' = 1/12$  s。计算所有参数组合的回转时间、转矩均方根、最大转矩和最大功率, 并规定回转时间在  $(0.99 \sim 1.01)t'$  范围内的参数组合均可完成回转动作, 其参数组合共有 847 组, 部分参数如表 3 所示。

### 6.2 驱动装置运行参数的确定

#### 6.2.1 参数确定流程

本研究引入灰色理论对参数组合进行分析, 并

表3 部分参数组合

电机转速 $n_2/(r \cdot \min^{-1})$	总传动比 $i$	加速时间 $t_a/s$	回转时间 $t/s$	最大转矩 $T_{a2}/(N \cdot m)$	最大功率 $P/kW$	转矩均方根 $T_{rms}/(N \cdot m)$
240	1.1	0.037	0.082 8	497.790 3	12.509 9	234.543 3
240	1.1	0.038	0.083 8	484.690 6	12.180 7	231.436 6
240	1.2	0.033	0.083 0	468.983 0	11.786 0	208.684 3
240	1.2	0.034	0.084 0	455.189 4	11.439 3	205.592 5
260	1.2	0.037	0.083 2	453.139 0	12.336 8	213.504 9

确定最优参数组合。以最大输出转矩、电机转矩均方根值、最大输出功率最小为优化目标,确定电机最大功率、最大转矩、额定转速等参数。

灰色理论数据处理的基本步骤:确定原始数据序列;数据量纲化处理;计算差值序列;计算关联系数;计算灰关联度;进行优势分析。

### 6.2.2 数据处理

#### (1)确定原始数据序列

表3中每行数据组成一组原始数据序列,即 $x_j(g)$ 分别代表 $T_{a2}$ 、 $P$ 和 $T_{rms}$ 的原始数据序列,其中 $j=1,2,3;g=1,2,\dots,847$ 。

#### (2)量纲化处理

原始数据量纲化,便于量化分析<sup>[14]</sup>。利用式(25)对 $T_{a2}$ 、 $P$ 和 $T_{rms}$ 进行量纲化处理,部分结果如表4所示。

$$y_j(g) = \frac{x_j(g) - \min_g x_j(g)}{\max_g x_j(g) - \min_g x_j(g)} \quad (25)$$

表4 原始数据量纲化

最大转矩 $T_{a2}/(N \cdot m)$	最大功率 $P/kW$	转矩均方根 $T_{rms}/(N \cdot m)$
0.068 0	0.011 1	0.511 5
0.065 3	0.008 7	0.501 1
0.061 9	0.005 7	0.425 1
0.059 0	0.003 1	0.414 7
0.058 6	0.009 8	0.441 2

#### (3)计算差值序列

计算公式为

$$\Delta_j(g) = |y_j^0(g) - y_j(g)| \quad (26)$$

式中: $y_j^0(g)$ 为参数的理想值,本研究选择原始数据中各参数的最小值作为参数的理想值; $\Delta_j(g)$ 为差值序列。灰关联系数如表5所示。

#### (4)计算关联系数

关联系数为

$$\gamma_{jg} = \frac{\min_j \min_g \Delta_j(g) + \rho \max_j \max_g \Delta_j(g)}{\Delta_j(g) + \rho \max_j \max_g \Delta_j(g)} \quad (27)$$

式中 $\rho$ 为分辨系数, $0 \leq \rho \leq 1$ ,取0.5。

#### (5)计算灰关联度

灰关联度为

$$\gamma_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{ig} \quad (28)$$

式中: $n$ 为目标个数,本研究为3; $\gamma_g$ 反映矢量序列与目标序列的关联程度,越接近1,关联程度越高。灰关联度如表5所示。

表5 灰关联系数及灰关联度

灰关联系数			灰关联度
最大转矩 $T_{a2}/(N \cdot m)$	最大功率 $P/kW$	转矩均方根 $T_{rms}/(N \cdot m)$	
0.880 2	0.978 2	0.494 3	0.784 3
0.884 6	0.983 0	0.499 5	0.789 0
0.889 8	0.988 7	0.540 5	0.806 3
0.894 4	0.993 9	0.546 6	0.811 6
0.895 1	0.980 7	0.531 3	0.802 4

### 6.2.3 驱动装置运行参数的选取

最优参数组合为:转速560 r/min、传动比3、加速时间30 ms。对应的电机转子惯量 $0.049 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、最大转矩 $193.085 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、电机转矩均方根 $81.92 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、所需功率 $11.322 3 \text{ kW}$ 、回转时间为 $83.571 4 \text{ ms}$ 。考虑到运转的安全性和长远实用性,最终选取额定功率为 $15 \text{ kW}$ 的伺服电机,选型结果与“试错法”选用的电机型号一致。其具体参数值如表6所示。

表6 电机参数值

电机型号	额定功率 $P_e/kW$	额定转矩 $T_e/(N \cdot m)$	最大转矩 $T_m/(N \cdot m)$	额定转速 $n_e/(r \cdot \min^{-1})$	电机转动惯量 $J_M/(kg \cdot m^2)$
15K1M(B)	15	95.5	286	1500	0.031 5

## 7 可行性验证

### 7.1 惯量匹配

伺服电机转子惯量为 $J_M=0.0315 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

负载惯量为 $J_{w0}=0.0494 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

负载惯量比  $M=1.57 \leq 3$ , 选择的伺服电机符合惯量匹配原则。

### 7.2 转矩校核

计算可知实际回转时间大于理论时间, 需要对最优参数进行调整, 保证电机稳定运转转速为 560 r/min, 传动比为 3, 依据式(20)计算电机加速时间为  $t_p=29.76 \text{ ms}$ 。

转矩校核公式为

$$T'_{a2} = \frac{\pi n_2}{30 t_1} (J_M + k_1 \frac{J_1}{\eta_1 i^2}) \quad (29)$$

$T'_{a2}=159.383 \text{ N} \cdot \text{m} < T_m=286 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电机转矩符合要求。

### 7.3 功率校核

功率校核公式为

$$P' = \frac{T'_{a2} n_2}{9550} = k_2 \frac{\pi n_2^2}{30 \times 9550 t_1} (J_M + k_1 \frac{J_1}{\eta_1 i^2}) \quad (30)$$

由文献[14]可知, 输出功率应符合  $P' \leq (1 \sim 2) P_e$ , 则  $P'=9.35 \text{ kW} \leq (15 \sim 30) \text{ kW}$ , 电机输出功率符合要求。

### 7.4 电机转矩均方根值校核

电机转矩均方根校核公式为

$$T'_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{2 T_{a1}^2 t_1}{t_0}} \quad (31)$$

电机转矩均方根  $T'_{\text{rms}}=67.35 \text{ N} \cdot \text{m} < T_e=95.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电机转矩均方根符合要求。

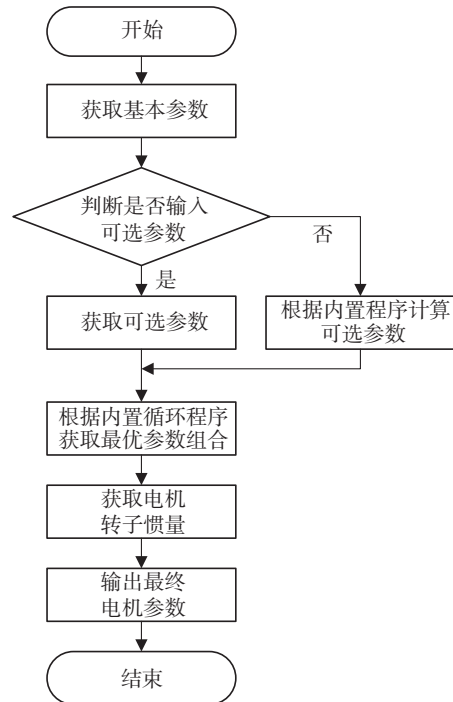
### 7.5 流程程序化

基于上文的计算方法, 将其程序化处理, 以提高选取效率, 软件界面如图 6(a)所示, 软件运行流程如图 6(b)所示。

根据电机参数校核结果可知, 所选电机性能与实际需求性能相差较大, 15 kW 电机虽能完成回转叠压任务, 但性能过剩, 因此利用回转叠压机构伺服电机选取软件, 对电机性能输出进行优化, 调整回转叠压机构冲次至 200 spm, 计算可知电机转速为 580 r/min, 传动比为 3, 加速时间为 23.3 ms, 电机最大输出转矩  $T'_{a2}=211.075 \text{ N} \cdot \text{m} < 286 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电机最大功率  $P'=12.8192 \text{ kW} < 15 \text{ kW}$ , 电机转矩均方根  $T'_{\text{rms}}=83.146 \text{ N} \cdot \text{m} < 95.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 故提高冲次后电机依然能够满足使用要求, 同时也提高了产品制造效率, 依据此方法在不更换电机的前提下, 将回转叠压冲次由 180 提高至 200 spm, 效率提升 11.1%, 提高了生产效率, 降低了制造成本。



(a) 软件界面



(b) 运行流程

图6 回转叠压机构伺服电机选取软件界面

### 7.6 选型方法的适用性验证

为了验证上述理论的适用性, 本研究选取其他两种已经投入生产的定子铁芯回转叠压机构进行伺服电机选型, 定子铁芯回转叠压机构负载参数如表 7 所示。计算结果与电机参数如表 8 所示, 最终电机设定参数如表 9 所示, 与“试错法”选择的电机型号参数一致, 证明本方法具有一定的适用性。

表7 定子铁芯回转叠压机构负载参数

定子型号	冲次 $m/\text{spm}$	回转角度 $\alpha$	同步带机械效率 $\eta_1$	减速器机械效率 $\eta_2$	机构转动惯量 $J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
1	210	$\pi/2$	0.98	0.98	0.334
2	170	$\pi$	0.98	0.98	0.412

表8 计算结果与电机参数

定子型号	参数	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	最大扭矩 $T_m/(N \cdot m)$	额定转矩 $T_e/(N \cdot m)$	负载 惯量比	最大/额定 功率 $P/kW$	电机 型号
1	计算结果	2 788	37.8	20.3	1.34	10	HG-JR 703(B)
	电机参数	3 000	66.8	22.3		7	
2	计算结果	2 350	46.1	27.2	1.07	11	HG-JR 903(B)
	电机参数	3 000	85.8	28.6		9	

表9 最终电机设定参数

定子型号	转速 $n_1/(r \cdot \min^{-1})$	同步带 传动比 $i_1$	减速器 传动比 $i_2$	加速时间 $t_1/ms$
1	2 788	2.5	7	48.7
2	2 350	1.8	5	61.6

## 8 胶粘型电机铁芯加工实验平台

为了进一步验证上述理论的可行性,本研究搭建了胶粘型电机铁芯加工实验平台。实验平台由液压机、级进模、伺服电机等组成,如图7和图8所示。

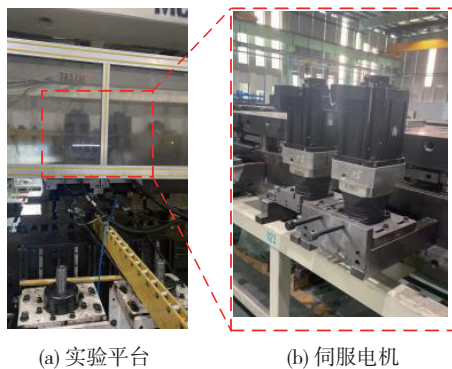


图7 胶粘型电机铁芯加工实验平台及伺服电机

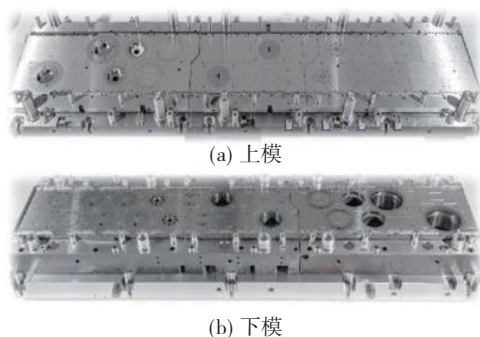
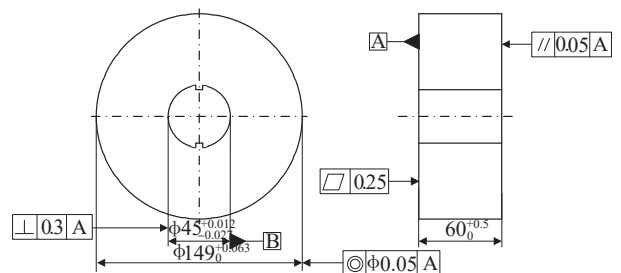


图8 电机定转子铁芯级进模

利用上述实验平台,生产制造电机铁芯,转子铁芯成品如图9(a)所示,并使用相关设备进行测试。转子铁芯简化示意图及部分测量指标如图9(b)所示,部分测试结果如表10所示。测试结果显示,铁芯的主要指标如外径、内径、厚度等尺寸指标均在允许范围内,能够保证铁芯后续的顺利安装;肉眼观察铁芯表面,其表面光洁、不存在划痕,侧壁胶液未溢出,无须对胶液进行人工清除;铁芯形状参数公差均小于0.1 mm,表明不同位置测量的尺寸差别较小,能够保证尺寸的均匀性,保证较高的安装与尺寸精度;然而厚度方向的标准差为0.140 54 mm,其值较高,这是由于电工钢板材本身会存在一定的厚度差别(简称同板差)<sup>[16]</sup>,即使回转叠压行为能够降低其同板差,但并不能完全消除。综上所述,依据本实验平台生产出来的铁芯符合产品要求,各项指标均在允许范围内,可以投入使用。



(a) 铁芯成品



(b) 转子铁芯部分测量指标

图9 转子铁芯实物图及部分测量指标

表10 铁芯质量参数部分测试结果

mm

测试指标	名义值	测试点1	测试点2	测试点3	平均值	标准差	是否合格
外径	149 <sup>+0.063</sup> <sub>0</sub>	149.025 6	149.052 2	149.042 4	149.040 1	0.013 45	是
内径	45 <sup>+0.012</sup> <sub>-0.027</sub>	45.002	44.986	44.979 2	44.989 1	0.011 71	是
厚度	60 <sup>+0.5</sup> <sub>0</sub>	60.303 5	60.489 1	60.213 5	60.335 4	0.140 54	是
位置度	≤0.05	0.023 5	0.032 5	0.015 9	0.024 0	0.008 31	是
垂直度	≤0.3	0.259 6	0.125 7	0.235 1	0.206 8	0.071 29	是
平面度	≤0.25	0.125 3	0.163 5	0.174 6	0.154 5	0.025 86	是
平行度	≤0.05	0.026 3	0.036 1	0.012 5	0.025 0	0.011 86	是

## 9 结论

(1)基于灰色理论通过多目标优化选择手段,提高了电机铁芯加工装备驱动装置选择的准确性、参数设置的精确性,避免了传统“试错法”带来的高成本问题,并通过该手段精准选择和设置驱动装置相关参数,使胶粘型电机铁芯生产效率提高了11.1%,降低了其制造成本。

(2)制定了电机铁芯加工装备驱动装置的选择、参数设置和校核流程,形成了伺服电机选型计算-校核软件,为提高胶粘型电机铁芯加工装备加工效能提供了理论支撑和技术支持。

(3)搭建了胶粘型电机铁芯加工实验平台,验证了本研究的准确性,为电动汽车胶粘型电机铁芯加工装备效能优化提供了一种可靠有效的新思路。

### 参考文献

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.  
China Society of Automotive Engineers. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles 2.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [2] 李致远, 鲁锐华, 余庆华, 等. 动力电池热失控特征及防控技术研究分析[J]. 汽车工程, 2024, 46(1): 139-150.  
LI Z Y, LU R H, YU Q H, et al. Research and analysis of thermal runaway characteristics and prevention and control technology of power battery[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(1): 139-150.
- [3] 肖家锴, 郑高峰, 刘朋熙, 等. 高速电机发展现状以及关键技术综述[J]. 电气传动, 2020, 50(10): 3-9, 15.  
XIAO J K, ZHENG G F, LIU P X, et al. Overview for the development and key technologies of high speed motors[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 3-9, 15.
- [4] 陈爽, 胡明辉, 赵佳伟. 系统损耗最小的双电机纯电动汽车实时转矩分配策略[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 411-423.  
CHEN S, HU M H, ZHAO J W. Real-time torque distribution strategy for dual-motor pure electric vehicle with minimum sys-

tem loss[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 411-423.

- [5] SCHOPPA A, SCHNEIDER J, WUPPERMANN C D, et al. Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254-255: 367-369.
- [6] 黄安怡, 禹雷. 叠压系数对车用永磁同步电机铁耗的影响[J]. 数字制造科学, 2021, 19(3): 218-222.  
HUANG A Y, YU L. Influence of the lamination coefficient on the core loss of permanent magnet synchronous motor for vehicle[J]. Digital Manufacture Science, 2021, 19(3): 218-222.
- [7] 张洪彬, 徐志科, 金龙, 等. 混合叠压圆筒型永磁直线振荡电机电磁特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5090-5100, 5140.  
ZHANG H B, XU Z K, JIN L, et al. Electromagnetic characteristics analysis of tubular permanent magnet linear oscillation actuator with hybrid lamination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5090-5100, 5140.
- [8] NAKAYAMA T, KOJIMA H. Interlocking performances on non-oriented electrical steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(1): 7-11.
- [9] 杜冰, 崔海龙, 刘凤华, 等. 电机转子铁芯剥离模型建立与径向磁密分析[J]. 汽车工程, 2022, 44(8): 1226-1236.  
DU B, CUI H L, LIU F H, et al. Peeling model establishment and radial magnetic density analysis of motor rotor core[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(8): 1226-1236.
- [10] 叶丹茜. 汽车摇窗电机转子多工位连续模设计研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.  
YE D X. Research on multi-station progressive die of car window motor rotor[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.
- [11] 肖潇, 杨金堂, 全芳成, 等. 伺服电机的选型原则与计算[J]. 机床与液压, 2014, 42(22): 44-46, 49.  
XIAO X, YANG J T, QUAN F C, et al. Servo motor selection principle and calculation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(22): 44-46, 49.
- [12] 王军锋, 唐宏. 伺服电机选型的原则和注意事项[J]. 装备制造技术, 2009(11): 129-131, 133.  
WANG J F, TANG H. Servo motor selection principles and precautions[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(11): 129-131, 133.

(下转第177页)

- noise in automobile side window area [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [23] BREMNER P, TODTER C, CLIFTON S. Sideglass turbulence and wind noise sources measured with a high resolution surface pressure array [J]. SAE International Journal of Passenger Cars—mechanical Systems, 2015, 8(2015-01-2325): 1063-1074.
- [24] 王俊,陈如意,杨健国,等.汽车后视镜气动噪声仿真与实验研究[J].汽车工程,2018,40(12):1480-1487.  
WANG J, CHEN R Y, YANG J G, et al. Simulation and experimental study on aerodynamic noise of automotive rear-view mirror [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(12): 1480-1487.
- [25] 贺银芝,卢春阳,吴宇,等.汽车车内气动噪声客观评价分析[J].汽车工程,2018,40(10):1179-1184.  
HE Y Z, LU C Y, WU Y, et al. Objective evaluation of vehicle interior aerodynamic noise [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(10): 1179-1184.
- [26] LEE Sangkwon, LEE Hwajin, BACK Jiseon, et al. Prediction of tire pattern noise in early design stage based on convolutional neural network [J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107617.
- [27] PARK H E, JUNG H, LEE M S, et al. Interior wind noise prediction and visual explanation system for exterior vehicle design using combined convolution neural networks [J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(4): 1013-1021.
- [28] HOU W, DARAKANANDA D, ELDRIDGE J D. Machine-learning-based detection of aerodynamic disturbances using surface pressure measurements [J]. AIAA Journal, 2019, 57(12): 5079-5093.
- [29] YUAN Haidong, YANG Zhigang, WANG Yigang, et al. Experimental analysis of hydrodynamic and acoustic pressure on automotive front side window [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 476: 115296.
- [30] 孙浩,汪怡平,张成才,等.基于机器学习的汽车后视镜气动噪声预测方法[J].汽车工程学报,2021,11(2):142-148.  
SUN H, WANG Y P, ZHANG C C, et al. Prediction of aerodynamic noise generated by automobile rearview mirror based on machine learning [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(2): 142-148.
- [31] LIU Ningning, SUN Yuedong, WANG Yansong, et al. Mechanism of interior noise generation in high-speed vehicle based on anti-noise operational transfer path analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(1): 273-287.
- [32] HE Yinzi, SCHRÖDER Simon, SHI Zihao, et al. Wind noise source filtering and transmission study through a side glass of DriveAer model [J]. Applied Acoustics, 2020, 160: 107161.
- [33] FENG Tao, SUN Guohua, LI Mingfeng, et al. Multi-reference time-frequency active control of vehicle interior road noise [C]. Springer International Publishing, 2016: 121-128.
- [34] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [35] DIXIT S, NAGARIA D. LMS adaptive filters for noise cancellation: a review [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2017, 7: 2520.

~~~~~

(上接第186页)

- [13] 成大先.机械设计手册(第3卷)[M].北京:化学工业出版社,2016:843-860.  
CHENG D X. Mechanical design manual (vol. 3) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 843-860.
- [14] DU J, LIU S, LIU Y. A novel grey multi-criteria three-way decisions model and its application [J/OL]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 107405-107405.
- [15] 蔺二权. NNS-16数控冲槽交流伺服电机的选择[J].上海大中型电机,2009(1):45-46.  
LIN E Q. Selection of AC servo motor for NNS-16 CNC slotting [J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2009(1): 45-46.
- [16] 刘雪东.胶粘型电机铁芯点胶喷射装置研发及胶点力学性能探究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.  
LIU X D. Research and development of adhesive motor core dispensing injection device and research on mechanical properties of adhesive points [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.