

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.012

面向低功率低成本小预制件的辊子设计优化^①

甘镇瑜¹, 刘继伟², 李丽¹, 王慧娟², 李婷²

1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆市长征重工有限公司, 重庆 400083

摘要: 针对混凝土小预制件生产线的辊推系统, 本文进行了辊子的优化设计. 首先, 基于辊式输送机的基础选型, 设计了辊子的有效宽度和间距; 其次, 建立了以辊式输送机的输送宽度、辊子间距、直径及辊子厚度为决策变量、以辊子成本和驱动功率为优化目标的多目标优化模型; 然后, 利用序列二次规划算法对优化模型进行求解, 得到了最小功率和最低成本下的辊子最优设计参数; 最后, 综合案例分析表明, 本文的设计在成本、功率及综合指标方面较行业标准分别优化了 9.74%、2.27% 及 5.70%, 由此验证了本文优化设计的有效性.

关键词: 辊子设计; 功率; 混凝土小预制件; 多目标优化

中图分类号: TH223

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)12-0082-07

Design Optimization of Rollers for Low-Power and Low-Cost Small Concrete Precast Parts

GAN Zhenyu¹, LIU Jiwei², LI Li¹, WANG Huijuan², LI Ting²

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Changzheng Heavy Industry Co., Ltd., Chongqing 400083, China

Abstract: Aiming at the roller pushing system of the small concrete precast part production line, this paper has carried out the optimized design of the roller. First, based on the basic selection of roller conveyors, the effective width and spacing of the rollers are designed. Secondly, a multi-objective optimization model with roller conveyor width, roller spacing, diameter and roller thickness as decision-making variables and roller cost and driving power as the optimization targets was established. Then, using sequential quadratic programming algorithm to solve the optimization model, the optimal design parameters of the roller under the minimum power and the minimum cost are obtained. Finally, the comprehensive case analysis shows that the cost, power and comprehensive indicators are optimized by 9.74%, 2.27% and 5.70% compared with the industry standard, which verifies the effectiveness of the method in this paper.

Key words: roll design; power; small concrete precast parts; multi-objective optimization

混凝土预制技术是实现住宅工业化的途径之一, 通过预制技术可以实现建筑的高效率、高品质、低资源消耗和低环境影响。《中国制造 2025》文件提出了“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、以人为

① 收稿日期: 2021-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875480), 重庆市技术创新与应用发展项目(cstc2019jcsx-mbdx0118)。

作者简介: 甘镇瑜, 硕士研究生, 主要从事能耗效率优化, 绿色制造研究。

通信作者: 李丽, 教授, 博士。

本”的方针, 高效、节能、高质量是目前关注的热点问题. 随着现代化工业的发展, 输送机械在每个生产环节的使用越来越广泛, 是流水作业生产线的重要组成部分^[1]. 通过技术创新、技术优化对现有装备进行改进, 符合绿色生产的需要^[2]. 辊子输送机用于输送成件物品, 具有结构简单、整机寿命长、安装维修方便、能够适应复杂工况环境的特点^[3-4], 因而成为小型预制件生产线中首选的输送设备. 研究低功率、低成本的混凝土小预制件辊推系统已成为预制技术领域亟需解决的关键问题.

Kunne. B 等^[5]通过分析辊道输送机中各零部件之间的受力关系, 对优化输送机的设计进行了研究; 出口智^[6]对辊子输送机的类型、特点做了详细的说明, 介绍了辊子输送机的选用设计注意事项; ZHAO 等^[7]针对辊式输送机体积大、结构复杂等问题, 采用三相交流直线电机技术, 研制了一种新型辊式输送机; 邱卫东^[8]针对 GZT 型辊子输送机, 对其设计选型进行了阐述, 为辊子输送机的合理选用提供了指导方法; 江淮安凯福田曙光车桥有限公司研发了一种新型无动力辊筒输送轨道总成结构, 为辊道的低成本化提供了新思路^[9]. 上述这些研究均与辊子输送机的结构设计相关, 但研究内容不够深入, 且目前尚未有面向低功率、低成本混凝土小预制件自动生产装备——辊子输送机的研究, 有的仅仅是针对其中单一目标进行的优化.

为研究低功率、低成本的混凝土小预制件辊推系统, 本文从结构参数角度出发, 提出了一种多目标优化方法, 确定辊式输送机的输送宽度、辊子间距、直径及辊子厚度为决策变量, 以辊子成本及其驱动功率为优化目标, 在无缝钢管转角条件、强度、刚度等约束条件下, 建立了面向辊子成本及其驱动功率的多目标优化模型, 然后采用序列二次规划算法对多目标优化模型进行求解, 得到最小功率和最低成本下的辊子参数, 用于辊子的优化设计. 本文所提出的方法也可适用于其他双链传动类型的辊子输送机辊子参数设计.

1 辊子输送机设计

辊子输送机的输送物件为装载混凝土小预制件的模具(混凝土密度: $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$). 一般模具尺寸: $L \times W_1 \times H = 650 \text{ mm} \times 650 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. 本文选型按照输送线满载输送计算, 传送距离为 6 m, 输送物件速度初步定为 0.2~0.3 m/s.

对于输送线中的料盒辊推系统, 采用双链传动, 其结构如图 1 所示. 驱动装置选用 R 系列减速电机, 将其布置在整条输送线全长的中间处, 以减小链条所受的张力.

1.1 有效输送宽度设计

输送机的输送宽度由输送物件的宽度进行确定, 如图 2 所示. 若以 3 个物件进行放置, 则有效输送宽度 B 为

$$B = W' + \Delta B = 3W_1 + \Delta B \quad (1)$$

式中, W' 为小预制件模具的总宽度, mm; ΔB 为宽度裕量; W_1 为单个混凝土小预制件模具宽度.

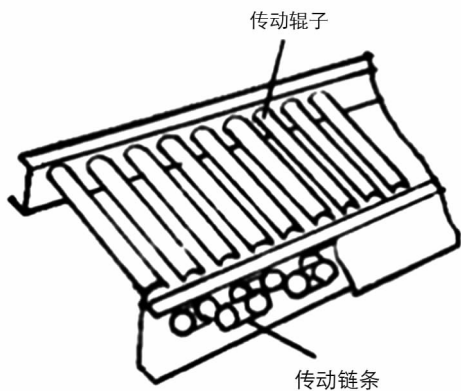


图 1 辊子双链传动示意图

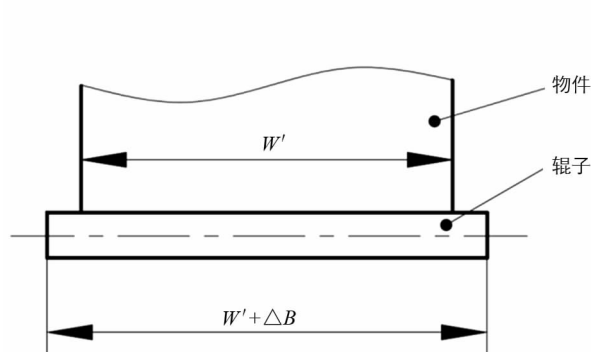


图 2 辊子输送机的有效输送宽度设计

1.2 辊子间距设计

辊子间距通过物件尺寸确定, 其条件是物件底面至少要有 3 个辊子支承, 物件底面也必须有一定的硬度和平面度, 以保证物件输送的平稳性. 一般物件在相应辊子上的支承情况如图 3 所示.

在确定辊子间距时,一般情况下按下式计算:

$$p = \frac{1}{3}L \quad (2)$$

对于有特殊运输要求,如稳定性优良等,按下式计算

$$p = \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5}\right)L \quad (3)$$

式中, p 为辊子的间距, mm; L 为物件的长度, mm.

对于上述计算所得的结果应该圆整为标准值,进一步根据运输物件的质量、运输物件与辊子之间的摩擦力和单个辊子所拥有的承载能力进行间距的校核. 当辊子装载的物品有较大冲击载荷时,该输送线的辊子间距应当减小.

1.3 辊子直径设计

辊子直径主要是由物件对于单个辊子的有效作用力 F 与单个辊子自身所拥有的承载能力 $[F]$ 确定,其需要满足 $F \leq [F]$.

其中物件施加在单个辊子上的作用力 F 与物件的质量和承受该物件的辊子数有关,作用力 F 按下式计算^[10]:

$$F = \frac{mg}{K_1 K_2 n} \quad (4)$$

式中, m 为物件的总质量, kg; K_1 为单个辊子的有效承载系数,该系数与物件底面的特性有关,一般取 $K_1 = 0.7$; K_2 为多列辊子不均衡载荷系数^[5],对于单列辊子而言,取 $K_2 = 1$; n 为物件的承载辊子数目; g 为重力加速度.

1.4 输送功率计算

对于采用双链传动方式的输送机,其链条的牵引力为^[8]

$$F_n = \frac{fWQDg}{D_s} \quad (5)$$

式中, f 为摩擦系数; D 为传动辊子的直径, mm; D_s 为传动辊子上相应链轮的分度圆直径, mm; Q 为传动系数; W 为单个驱动辊子驱动总质量, kg,其计算公式如式(6)、式(7)所示^[8].

$$Q = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (6)$$

$$W = \frac{6+a}{a}m_d + \frac{6+a}{a}m_r + \frac{6}{a}m_e \quad (7)$$

$$m_d = \frac{7.85 \times 10^3 \pi}{4} [D^2 - (D-2t)^2] B \quad (8)$$

式中, i 为单个驱动辊子相应的链轮传动效率的损失系数; a 为相邻辊子的轴间距, m; m_d 为单个驱动辊子相应转动部分的质量, kg; t 为辊筒壁厚, m; m_r 为运输物件施加在单个辊子上的质量, kg; m_e 为单圈链条的质量, 约 0.6 kg.

辊子输送机的计算功率按下式计算:

$$P_0 = F_n \cdot v \cdot (D_s/D) \quad (9)$$

式中, P_0 为辊子驱动轴的计算功率, W; v 为物件的输送速度, m/s.

2 面向低功率低成本优化模型

2.1 优化变量

在辊子输送过程中,影响辊子输送机功率以及成本的主要因素有辊子中心轴间距 a 、辊子直径 D 、辊子壁厚 t 、辊子输送有效宽度 B 、驱动总质量 W 、输送速度 v . 针对不同输送物件,设计采用的参数不同,以及

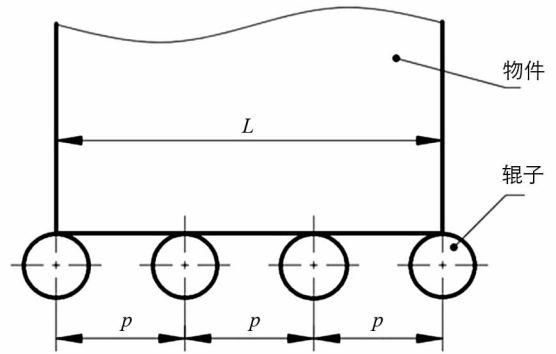


图 3 物件在辊子上的支承

对应的约束条件存在差异. 本文以混凝土小预制件为输送物件进行设计, 输送速度 v 根据经验进行选择确定, 驱动总质量 W 视为已知量. 因此选取辊子中心轴间距 a 、辊子直径 D 、辊子壁厚 t 、辊子输送有效宽度 B 作为决策变量.

2.2 目标函数

在满足辊子输送机工作要求的前提下, 为实现输送机的低功率、低成本的要求, 对输送机驱动功率与生产成本进行优化. 本文采用线性加权求和法, 将辊子输送机驱动功率和辊子成本多目标转换为单目标进行优化, 其转换后如下式所示:

$$\min F(a, D, t, B) = \omega_1 P(a, D, t, B) + \omega_2 C(a, D, t, B) \quad (10)$$

式中, ω_1, ω_2 是辊子输送机驱动功率与辊子成本的影响权重, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$. 其具体的权重设置, 在生产上根据个体目标的重要性进行人为设定, 本文以 $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.5$ 为例进行优化计算.

2.2.1 辊子驱动功率函数

由式(9)可得辊子驱动总功率为

$$P = fWQgv \quad (11)$$

2.2.2 辊子成本函数

对于无缝钢管的质量, 一般采用下式计算:

$$m_{\text{钢管}} = \pi \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D-2t}{2} \right)^2 \right] B \rho_{\text{钢}} = \pi (D-t)tB\rho_{\text{钢}}$$

目前市场上一般无缝钢管的单价约为 $C_0 = 4$ 元/kg. 按该单价计算, 则输送线钢管价格目标函数为

$$C = nC_0 m_{\text{钢管}} = 4\pi \frac{6+a}{a} (D-t)tB\rho_{\text{钢}} \quad (12)$$

式中, n 为辊子数量, a 为轴间距, m; D 为辊子直径, m; t 为辊筒壁厚, m; B 为辊式输送宽度, m; $\rho_{\text{钢}} = 7.85 \text{ g/cm}^3$.

2.3 优化模型

上述两个目标函数需满足一定的约束条件, 具体的约束条件可描述为:

1) 无缝钢管的工作直径. 无缝钢管直径 D 的大小与辊子所需的驱动功率成反比, 为避免辊子所需驱动功率过大, 在一般情况下设计时, 应该保证无缝钢管的直径满足如下条件.

$$0.025 - D \leq 0 \quad (13)$$

2) 无缝钢管间的最小空隙. 为保证无缝钢管正常排列, 其最小间隙应满足一定条件, 取 $\Delta = 5 \text{ mm}$, $a - D \geq \Delta$, 则

$$D + 0.005 - a \leq 0 \quad (14)$$

3) 无缝钢管的长度 B

在本文设计选型中有效输送宽度 $B = W' + \Delta B = 3W_1 + \Delta B$, 其中 ΔB 为 $50 \sim 150 \text{ mm}$, 则

$$2 \leq B \leq 2.1 \quad (15)$$

4) 输送线的平稳性. 为满足输送线的平稳性要求, 在输送线上进行输送物件时, 物件下面最少需要 3 根辊子进行支承, 对很高平稳性要求的物件, 应该保证物件底面至少有 4 根及以上辊子数进行支承, 故一般平稳性约束为 $0.6/a \geq 3$, 则:

$$a - 0.2 \leq 0 \quad (16)$$

5) 无缝钢管的壁厚. 无缝钢管的壁厚是满足钢管正常使用的重要条件. t 应该大于 1.2 mm , 则

$$0.0012 - t \leq 0 \quad (17)$$

6) 无缝钢管的转角要求. 在不考虑物件刚性的前提下, 一般无缝钢管的受力简图如图 4 所示.

筒体在轴承处的转角为 θ , 一般取 $\theta \leq 1^\circ$. 无

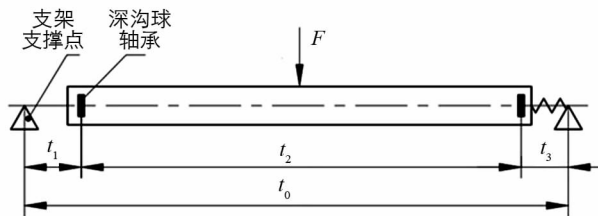


图 4 无缝钢管受力简图

缝钢管的材料为 45 钢, 按照简支梁转角的一般计算公式, 可进行如下计算:

$$\theta = \frac{qB^3}{24EI} = \frac{FB^2}{24EI} = \frac{\frac{3\rho(LW_1H)gB^2}{K_1K_2L/a}}{24EI} \leq 1^\circ = \frac{2\pi}{360} \quad (18)$$

式中, E 为无缝钢管的弹性模量; I 为无缝钢管的惯性矩; q 为均布载荷.

7) 无缝钢管的强度要求. 选用 45 钢为无缝钢管的材料, 中心点最大应力为 σ , $\sigma \leq [\sigma] = 245 \text{ MPa}$, 即

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{\frac{FB}{4}}{\frac{\pi}{32}[D^3 - (D - 2t)^3]} \leq [\sigma] \quad (19)$$

式中, $[\sigma]$ 为无缝钢管的许用应力.

8) 无缝钢管的筒体刚度要求. 刚度是钢管使用时抵抗变形的重要条件, 其中心点最大挠度 f 应满足 $f \leq [f] = B/300$, 即

$$f = \frac{5FB^3}{384EI} \leq [f] = \frac{B}{300} \quad (20)$$

综上所述, 在满足所有的约束条件下, 面向低功率低成本的小预制件的辊子设计优化模型可表达如下:

$$\begin{aligned} \min F(a, D, t, B) &= \omega_1 P(a, D, t, B) + \omega_2 C(a, D, t, B) \\ s. t. & \begin{cases} D \geq 0.025 \\ D + 0.005 - a \leq 0 \\ 2 \leq B \leq 2.1 \\ a \leq 0.2 \\ t \geq 0.0012 \\ \theta \leq \frac{2\pi}{360} \\ \sigma \leq [\sigma] \\ f \leq [f] \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

3 优化算法

基于上述多目标优化模型, 选择遗传算法、多目标粒子群优化算法以及序列二次规划算法进行优化求解, 运用遗传算法和多目标粒子群优化算法求解后得到的迭代过程图分别如图 5 和图 6 所示.

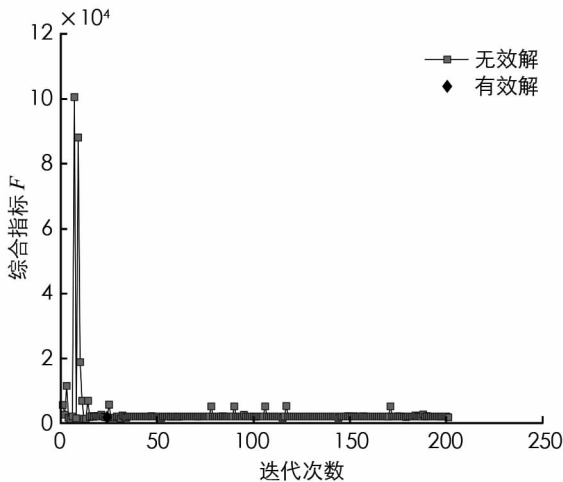


图 5 遗传算法迭代过程

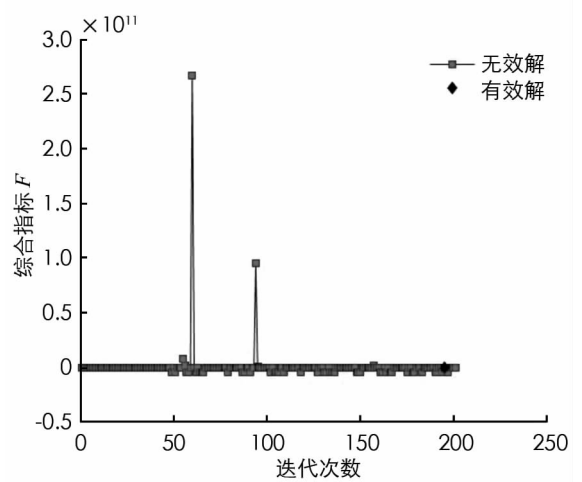


图 6 多目标粒子群优化算法迭代过程

由图 5 和图 6 可知, 算法优化后得到的有效解很少, 基本均是无效解, 不满足优化设计需求. 而在求解该模型时, 序列二次规划算法具有收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强的优点, 因此, 本文运用序列二次规划算法进行多目标优化求解^[11]. 该算法在求解约束优化问题时, 在每一初始迭代点构造一个二次规划子问题, 以该子问题的解作为迭代搜索的方向, 并选取相应的效益函数确定迭代搜索的步长. 通过上述子问题的解来修正得到下一迭代点, 直到二次规划的结果逼近原非线性规划问题的解. 该算法具体的求解步骤表达如下, 求解流程如图 7 所示.

Step0: 给定初始值 $X^0(a, D, t, B)$, 收敛精度 ϵ , $H^0(\text{矩阵}) = I(\text{单位矩阵})$, $k = 0$;

Step1: 将原问题在迭代点 X^k 处简化为二次规划问题;

Step2: 求解该二次规划问题, 得有效解 $S^k = S^*$;

Step3: 在方向 S^k 上对原目标函数进行搜索, 得到下一迭代点 X^{k+1} ;

Step4: 判断 X^{k+1} 在精度范围内是否逼近原目标函数的解: 是, 终止计算; 否, 转下一步;

Step5: 按照秩 2 拟牛顿法 (Davidon-Fletcher-Powell algorithm, DFP) 或拟牛顿法 (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, BFGS) 重新修正 H^{k+1} , 令 $k = k + 1$, 转 Step1 重新计算.

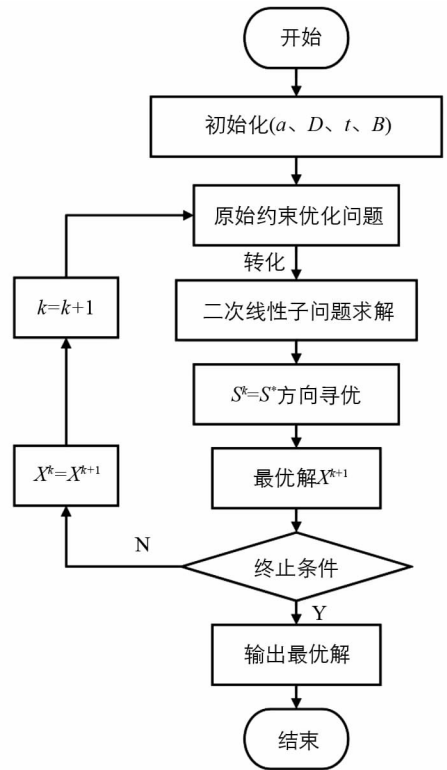


图 7 算法求解流程图

4 优化结果分析

根据所建优化模型和求解算法要求, 本文相应参数设置为: 收敛精度 10^{-6} 、步长 0.001. 通过算法数次迭代来寻求目标最优解, 迭代过程如图 8、图 9 和图 10 所示. 图 8 为成本函数迭代过程的函数值, 图 9 为功率函数迭代过程的函数值, 图 10 为目标函数迭代过程的函数值. 各图中圆形点为迭代之后得到的最优解, 方形点为超出了约束范围的无效值, 菱形点为约束范围内的有效值, 但不是整个寻优过程的最优解. 优化结果如表 1 所示.

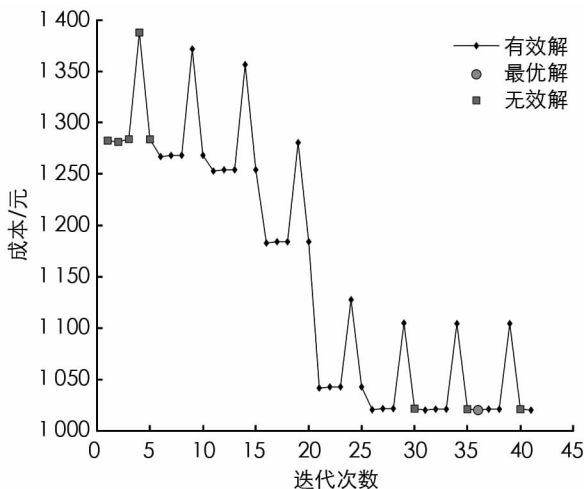


图 8 成本函数优化

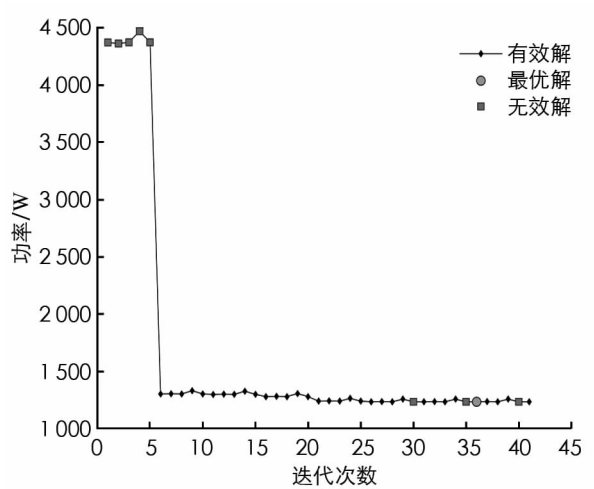


图 9 功率函数优化

表 1 优化结果

案例	轴间距 (a)/mm	辊子直径 (D)/mm	辊子厚度 (t)/mm	输送宽度 (B)/m	成本 /元	功率 (P)/W	综合指标 F
行业标准值	200	159	1.2	2	1 158.07	1 273.35	1 215.71
优化理论值	200	140.2	1.2	2	1 020.03	1 235.3	1 127.67
实际生产值	200	145	1.2	2	1 055.32	1 245.03	1 150.18

优化计算得到轴间距 a 、辊子直径 D 、辊子厚度 t 、输送宽度 B 分别为 200 mm, 140.2 mm, 1.2 mm, 2 m, 圆整后结果分别为 200 mm, 145 mm, 1.2 mm, 2 m. 查行业标准^[12]可知, a, B, t 与本文一致, 辊子直径设计 D 为 133 mm, 159 mm, 其中直径 133 mm 不满足约束条件, 仅直径 159 mm 满足约束条件, 经过计算得到成本、功率 P 、综合指标 F 分别为 1 158.07 元, 1 273.35 W, 1 215.71. 由表 1 可知, 对比行业标准, 在成本方面, 本文方法较行业标准设计节约 9.74%; 在功率方面, 本文方法较行业标准减少了 2.27%; 在综合指标方面, 本文方法较行业标准减少了 5.70%.

综上所述, 通过对成本、功率及综合优化模型优化计算得到了辊子最优设计参数, 进而找到了在特定约束条件下辊子输送机参数设计的最优解.

5 结 论

本文针对混凝土小预制件自动生产线的辊推系统, 设计了辊子的有效输送宽度、辊子间距等. 在此基础上, 建立了面向辊子成本及其驱动功率的多目标优化模型, 并利用二序列规划算法进行了模型的优化求解, 得到了最小功率和最低成本下的最优解, 由此获得了优化的辊子设计参数, 该模型可为辊推系统制造企业设计制造辊子输送机提供理论依据.

参考文献:

- [1] 王嘉星, 王林兴. 浅谈运输机械及输送机械的分类 [J]. 物流技术, 2001, 20(5): 5-6.
- [2] 韩红蕾. 可持续绿色经济发展的影响因素和转化路径 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 74-79.
- [3] 郎 桐. 输送机的分类及选型与设计 [J]. 砖瓦, 2011(5): 15-19.
- [4] 杨志远, 王惠源, 张鹏军, 等. 基于 ADAMS 的航炮供弹箱改进设计 [J]. 包装工程, 2016, 37(7): 80-84.
- [5] KUNNE B, WIECZOREK D. Research to Optimize the Embodiment Design of Modules and Components Used in Roller Conveyors [C]//2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 16-20, 2010, Hong Kong, China. IEEE, 2010: 495-500.
- [6] 出口智. 辊子输送机的类型及其选用 [J]. 物流技术与应用, 1998, 3(1): 10-16.
- [7] ZHAO H S, WU Y Z. A New Roller Conveyor Driven by Linear Motor [J]. Advanced Materials Research, 2011, 201-203: 1517-1520.
- [8] 邱卫东. 常用辊子输送机的设计与计算 [J]. 机械研究与应用, 2010, 23(4): 69-70.
- [9] 聂巧丽, 周建胜. 车桥主减速器壳总成输送轨道优化设计 [J]. 现代零部件, 2014(1): 79-80.
- [10] 吴云珍. 新型滚道输送机的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [11] 唐 承, 郭书祥, 莫延斌, 等. 应用粒子群-序列二次规划算法的结构可靠性优化 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(2): 107-111.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 辊子输送机: JB/T 7012—2008 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

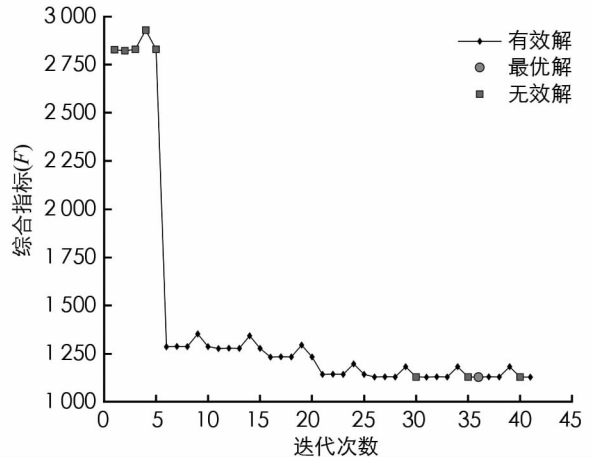


图 10 多目标函数优化