

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.008

基于改进 FFA 算法的柔性制造车间 调度方法

王鸿超, 陈进, 董功云

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:针对某小型精密模具加工企业柔性制造车间离散型生产方式下调度困难的情况,笔者提出了一种改进的启发式算法——改进五因素调度算法(five factors scheduling algorithm, FFA)。算法考虑了可能影响选择排序的5个因素,即当前任务待排工序可能开始加工时间、待排工序工时、可用设备剩余加工时间、本工序完成后本任务剩余加工时间以及本工序之后本任务将要到达的紧后设备上的剩余加工时间,最大化前3个因素,最小化后2个因素,所构造评价指数最小时,该任务优先排序。并对构造的评价指数公式进行了改进,为5个因素选取合适系数,降低了计算复杂度。最后通过试验与遗传算法进行比较,证明了该算法在缩短最大完工时间和提高计算速度方面更有优势。

关键词:生产调度;柔性制造;启发式算法;五因素调度算法(FFA);评价指数公式

中图分类号:TP301.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)05-0032-05

Flexible Manufacturing Workshops Scheduling Methods Based on Modified Five Factors Scheduling Algorithm

WANG Hongchao, CHEN Jin, DONG Gongyun

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: To solve the discrete manufacturing of flexible manufacturing workshop in a small precision mold processing enterprise, a modified heuristic algorithm (five factors scheduling algorithm, FFA) was proposed. This algorithm took into account five factors that may affect the sort of selection, i. e., processing start time of current task procedures, processing working time of current procedure, remaining processing time of current device, the total remaining processing time of the task after current procedure, and the remaining processing time after the task reaching the next device upon the completion of current procedure. When the constructed evaluation index was the smallest through maximizing the first three factors and minimizing the last two factors, the task was prioritized. In addition, the evaluation index formulae was improved to select the appropriate coefficient for five factors, hence reducing the calculation complexity. Finally, compared with the genetic algorithm, it is proved that the modified algorithm has more advantages in shortening maximum completion time and improving calculation speed.

Keywords: production scheduling; flexible manufacturing; heuristic algorithm; FFA (five factors scheduling algorithm); evaluation index formulae

随着市场竞争日益激烈,客户个性化需求不断增加,多品种小批量定制型的生产模式已屡见不鲜,许多企业都选择配置更加灵活的柔性制造车间以满足多变的生产需求^[1],但随之而来的生产调度优化却成为面临的难题。文中以苏州某精密模具加工企业生产车间

为背景,公司采用单件小批量定制型生产模式,车间配备多台柔性数控机床。该公司在完成生产调度时面临的实际问题:订单量大而工艺路线多样,计划人员难以掌握车间实际情况安排合理加工时间,造成许多订单无法按时完成;柔性机床的灵活性使同一道工序可能

收稿日期:2017-01-13;修回日期:2017-03-20

第一作者简介:王鸿超(1990),女,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为企业信息化管理。E-mail:wanghc_sky@163.com

有多台可用设备,难以选择最合适的设备,造成车间整体设备利用率不高;在紧急插单或者个别设备故障时,会打乱原计划,却无法在短时间内安排新的计划,继而出现一方面任务紧急,另一方面部分设备空闲的情况。该企业属于典型的柔性制造车间离散型生产方式,其所遇到的这些问题也是当下很多同类企业面临的难题。解决这些问题的关键,在于掌握生产活动规律同时进行调度优化,选择最好的生产排序方案^[2]。

柔性制造车间调度是有实用性的非多项式困难问题(NP-hard)^[3],目前常用的方法包括遗传算法、线性规划方法、动态规划以及图形理论法等。周维等^[4]为优化离散型制造车间排产提出一种基于约束理论的启发式算法,有效提高了设备整体利用率,但是忽略了多目标优化需求;薛冬娟等^[5]建立了多目标调度模型,并提出了一种改进遗传算法可以得到最优调度方案,但是该算法建立在严格理想状态下,面对实际生产活动中复杂多变的情况缺少一定的灵活性;Zhou 等^[6]针对离散型生产中批处理机调度问题建立了一个混合整数模型,并提出一种混合微分进化算法,可以有效缩短完工时间并提高设备利用率;Gorczyca 等^[7]考虑从资源分配角度解决任务排序问题,使单位时间内资源利用率最高,提出相关算法并证明了有效性,但这种思路忽略了设备利用率的问题。

笔者以计划最大完工时间 W_{\max} 作为调度目标,在满足车间各项约束和标准要求的前提下,搜索一组最优排序方案。该方案应满足实际需要,需在一个计划周期内追求最小化的 W_{\max} 和较高的设备利用率,同时降低计算复杂度,提高计算效率和灵活性。

1 改进 FFA 算法

1.1 FFA 算法介绍

在柔性制造车间中,为了在较短时间内找出一组计划完工时间最短并保证较高设备利用率的生产排序方案,提出了一种五因素调度算法。算法定义一个评价指数 $Q_{i,j,g}$,由 5 个因素构成:当前任务待排工序可能开始加工时间、待排工序工时、可用设备剩余加工时间、本工序完成后本任务剩余加工时间以及本工序之后本任务将要到达的紧后设备上的剩余加工时间。

题设:该柔性制造车间有 m 台设备, n 项待排任务,每个任务有与设备数目相同的 m 道工序且加工顺序各不相同,各道工序有 z 台可用设备,分别有确定的工时定额^[8]。

设定 j 为任务编号, $j = 1, 2, \dots, n$; i 为设备编号, $i = 1, 2, 3, \dots, m$; d 为任务 j 可以在设备 i 上加的工

序数。 $t_{i,j,g}$ 表示任务 j 在设备 i 上完成工序 g 所需的时间。 g 表示任务 j 的加工顺序;需要注意 $t_{i,j,g} = t_{c,j,g}$,即在一项任务 j 中,同一工序可以在不同设备上完成且所需时间相等,其中 i 和 c 是设备编号,且 $i \neq c$ 。构造时间矩阵

$$T = (t_{i,j,g})_{n \times m \times m}$$

$r_{i,j,d}$ 表示根据加工路线得到的任务 j 可以在设备 i 上完成的工序序号。若任务 j 的工序 g 和 f 都可以在设备 i 上完成,则 $d = 1, 2; r_{i,j,1} = g; r_{i,j,2} = f$ 。构造工艺路线矩阵

$$R = (r_{i,j,d})_{n \times m \times m}$$

$e_{g,j,d}$ 表示按照任务 j 的工艺路线,完成工序 g 的设备编号。构造设备矩阵 $E = (e_{g,j,d})_{n \times m \times m}$ 。假设在此题设中 1 台设备可以完成 1 个任务的 z 道工序($d = z$),每道工序有 z 台可选设备,则矩阵 E 和 R 中的元素是逐一对应的,彼此可以相互转换。

$x_{i,j,g}$ 表示计划中任务 j 的工序 g 在设备 i 上开始加工时间,构造状态矩阵

$$X = (x_{i,j,g})_{n \times m \times m}$$

$y_{i,j,g}$ 表示计划中任务 j 的工序 g 在设备 i 上完成时间,构造输出矩阵

$$Y = (y_{i,j,g})_{n \times m \times m}$$

假设按照工艺路线任务 j 有 f 个加工工序,每一道工序可能有多台可用设备(如 μ, γ, δ 等),则可以有多重处理路线。如工序 s 有 γ 台可用设备,可表示为 $(e_{s,j,1}, e_{s,j,2}, \dots, e_{s,j,\gamma})$,则多重处理路线的集合表示为笛卡尔积

$$\begin{pmatrix} e_{1,j,1} \\ e_{1,j,2} \\ \vdots \\ e_{1,j,\mu} \end{pmatrix} \times \dots \times \begin{pmatrix} e_{s,j,1} \\ e_{s,j,2} \\ \vdots \\ e_{s,j,\gamma} \end{pmatrix} \times \dots \times \begin{pmatrix} e_{f,j,1} \\ e_{f,j,2} \\ \vdots \\ e_{f,j,\delta} \end{pmatrix}。$$

定义一个运算符“ $*$ ”,如果 $i = e_{g,j,d}$,那么

$$i * h = e_{g,j,d} * h = e_{g+h,j,d}$$

式中, $h = 1 - g, 2 - g, 3 - g, \dots, m - g, 0 \leq h \leq m$ 。

设定由五因素构成的评价指数

$$Q_{i,j,g} = \max \{ y_{i * (-1),j,g-1}, y_i^\# \} + t_{i,j,g} + (A_i - \sum_{v \in \Phi} t_{i,v,q}) - \sum_{h=1}^{m-g} t_{i * h,j,g+h} - \sum_{k \in \Pi} t_{b,k,l} \quad (1)$$

式中: $y_{i * (-1),j,g-1}$ 是根据工艺路线任务 j 在到达设备 i 前完成上一道工序的时间。 $y_i^\#$ 是设备 i 上已安排的最大完工时间。 $\max \{ y_{i * (-1),j,g-1}, y_i^\# \}$ 是任务 j 的工序 g 可能开始的加工时间,该值越小,相应的任务可以优先进行排序,使计划更加紧凑。 $t_{i,j,g}$ 是任务 j 在设备 i 上加

工时。工时越短,尽快安排计划,可以使生产进度更快,从而减少车间在制品。 A_i 是所有需要在设备 i 上加工的时间总和。 $\sum_{v \in \Phi} t_{i,v,q}$ 是在设备 i 已排工序加工时间总和,其中 Φ 指在设备 i 上所有已排的任务集合, q 指任务 v 在设备 i 上加工的工序号。两者之差反映当前设备剩余可用时间,从一道工序可选的并行设备中选取可用剩余时间最小的设备可以提高设备利用率。 $\sum_{h=1}^{m-g} t_{i * h, j, g+h}$ 是根据工艺路线任务 j 在设备 i 上完工以后剩余计划完成时间的总和(这里不包括设备 i)。剩余加工时间总和越大,应尽快列入计划,以减少本次调度的最大计划完工时间。 $\sum_{k \in \Pi} t_{b,k,l}$ 表示任务 j 在设备 i 上加工完之后,按其加工路线应该到达的紧后设备 b 上所有需要在设备 b 上加工,而尚未列入计划的任务的加工时间总和。 b 是需要工序 g 之后完成任务 j 的 $g+1$ 工序的设备编号, Π 代表还未在设备 b 上安排的任务集合(这里不包括任务 j), l 是任务 k 需要在设备 b 上加工的工序号。安排当前任务当前工序时需要考虑下一道工序所用设备的空闲程度,该值越大,说明设备可用时间越多,按照工艺路线可以更快进入下一道工序,计划越紧凑。考虑 5 个因素,找到最小评价指数对应的任务 j ,就是当前要排的任务,包括其对应的设备编号和工序号。

1.2 算法改进

基于公式(1)中的影响因素,还需要确定各因素的最优系数,通过对大量样本数据进行分析比较,在不违背原算法原则的基础上对公式(1)进行改进,最后得到

$$Q_{i,j,g} = 18(\max \{y_{i * (-1), j, g-1}, y_i^\#\} - 25)^2 + 0.5(t_{i,j,g} - 4)^2 + (A_i - \sum_{v \in \Phi} t_{i,v,q}) - 1.7(\sum_{h=1}^{m-g} t_{i * h, j, g+h} - 10)^2 - 1.1(\sum_{k \in \Pi} t_{b,k,l} - 10)^2. \quad (2)$$

任务 j 当前工序完成调度之后,在下一迭代之前,一部分影响因素会发生变化,任务 j 和部分因素受到影响的评价指数需要更新,而其他未受影响的保持不变。需要更新的评价指数由下面公式计算得到:

- 1) 根据工艺路线矩阵 R 和设备矩阵 E 可知任务 j 的下一道工序对应设备为 α , 即 $i * 1 = \alpha$ 。 Π_1 是所有将要在设备 $\alpha * 1$ 上加工但是还没有安排计划的任务集合。设备 $\alpha * 1$ 是将要在设备 α 之后对任务 j 进行处理的设备。 Φ_1 是所有已经安排在设备 α 上加工的任务集合。则

$$Q_{\alpha,j,g+1} = 18(\max \{y_{i,j,g}, y_\alpha^\#\} - 25)^2 + 0.5(t_{\alpha,j,g+1} - 4)^2 + (A_\alpha - \sum_{v \in \Phi_1} t_{\alpha,v,q}) - 1.7(\sum_{h=1}^{m-g-1} t_{\alpha * h, j, g+1+h} - 10)^2 - 1.1(\sum_{k \in \Pi_1} t_{b,k,l} - 10)^2. \quad (3)$$

2) 根据工艺路线矩阵 R 和设备矩阵 E , w 属于将要在设备 i 上处理但还未安排计划的任务集合, $Q_{i,w,p(w)}$ 是其对应的评价指数,5 个因素中只有第 1 项受到影响,所以该指数按照下面公式进行更新:

$$Q'_{i,w,p(w)} = Q_{i,w,p(w)} - 18(\max \{y_{i * (-1), w, p(w)-1}, y_i^\#\} - 25)^2 + 18(\max \{y_{i * (-1), w, p(w)-1}, y_i^*\} - 25)^2. \quad (4)$$

式中: y_i^* 设备 i 上最新加工完成时间。

3) 根据工艺路线矩阵 R 和设备矩阵 E , u 属于在设备 β 上处理完之后将要在设备 i 上处理,但还未列入计划的任务集合,即 $\beta * 1 = i$ 。 Π_2 是更新后所有将要在设备 i 上加工但还没有安排计划的任务集合, $Q_{\beta,u,p(u)}$ 是其评价指数,5 个因素中只有最后一项受到影响,评价指数更新为:

$$Q'_{\beta,u,p(u)} = Q_{\beta,u,p(u)} + 1.1(\sum_{u \in \Pi} t_{i,u,p(u)} - 10)^2 - 1.1(\sum_{u \in \Pi_2} t_{i,u,p(u)} - t_{i,j,g} - 10)^2. \quad (5)$$

1.3 改进 FFA 算法优化排程步骤

图 1 所示为改进算法的总体图解。

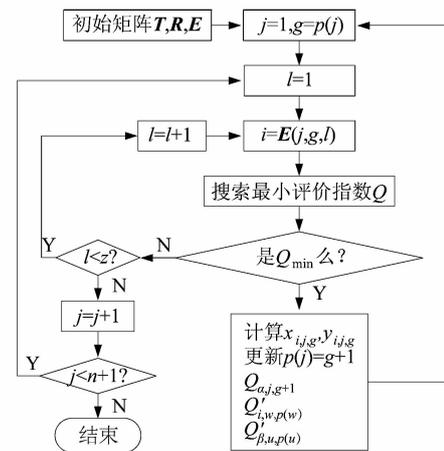


图 1 优化计算流程

Figure 1 Optimization calculation process

当一道工序有 z 台可用设备时,公式(3) ~ (5) 将各计算 z 次。

改进算法后的优化排程步骤:

- 1) 赋值给时间矩阵 T , 工艺路线矩阵 R 以及设备矩阵 E 。
- 2) 通过 i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) 来计算 A_i 。如果设备 i

和其他设备在处理任务 j 时具有相同的功能和相同加工时间,则假设设备 i 和其他并行设备平分总工时,即

$$t_{i,j,g} = t_{\omega,j,g} = \dots = \frac{t_{j,g}}{1 + \rho}$$

式中: ρ 代表除了设备 i 之外与其功能相同的并行设备编号。且有 $A_i = \sum_{j=1}^n \sum_g t'_{i,j,g}$ 。

3) 根据工艺路线,从 $p(j) = g = 1$ 开始,由公式(2)计算出 n 项任务对应的 n 个评价指数。为每一个待排任务保留一个评价指数值,即只计算每个任务当前待排工序对应的评价指数, n 项任务保留 n 个评价指数(若一道工序存在 z 台并行设备,相应就有 z 个评价指数,从中选取最小值作为本轮排序中该任务的评价指数),从 n 个评价指数中选取最小值 $Q_{i,j,g}$,任务 j 即为当前需优先列入计划的任务, $p(j)$ 记录其当前调度位置。将其固定在加工位置后, $p(j) = g + 1$ 。

4) 通过比较搜索步骤 3) 中最小评价指数,记录其对应的任务编号和设备编号,比如 j 和 i 。计算任务 j 安排在设备 i 上时矩阵 X 和矩阵 Y 中所对应的元素值:

$$x_{i,j,g} = \max \{y_{i * (-1),j,g-1}, y_i^\#\}; \quad (6)$$

$$y_{i,j,g} = x_{i,j,g} + t_{i,j,g} \quad (7)$$

式中: $y_i^\#$ 为设备 i 上已排任务的最大完成时间。

5) 根据公式(3) 计算得到任务 j 的新的评价指数。

6) 根据公式(4) 和公式(5) 计算并更新相关任务的评价指数。

7) 返回步骤 4), 直至所有任务及工序都列入计划。

计算复杂性分析:根据改进算法的优化步骤,计算可能出现的复杂性主要来自于步骤 4) 和 5)。初始评价指数需要计算 nz 次。当 $Q_{i,j,g}$ 安排之后, $Q_{\alpha,j,g+1}$, $Q_{i,w,p(w)}$ 和 $Q_{\beta,u,p(u)}$ 一共需要更新 $3 * (0 \sim n)$ 次,平均 $3nz/2$ 。当 mn 道工序完成调度时,更新次数至多可能达到 $3mn^2z$ 次。则计算次数可能为 $nz + 3mn^2z$ 。当 $z = m$ 时,计算次数达到最大值,为 $mn + 3m^2n^2$ 。通过改进算法,使部分评价指数 $Q_{i,w,p(w)}$ 和 $Q_{\beta,u,p(u)}$ 更新时计算复杂度降低。

2 计算实验

实验平台是一台配置为 CPU 2.4 GHz, 安装内存 RAM 4 GB 的个人计算机。实验采用 C++ 语言编写程序。

遗传算法(genetic algorithm, GA) 是以生物进化模型为背景的强大搜索技术,目前已经被很多学者用来

解决柔性作业车间调度问题^[9-10]。文中所描述的实验也采用此算法解决题设问题,并与改进 FFA 算法进行分析比较。

采用正交数组 $L_9(3^4)$ 设计一项 DOE 实验,通过 9 组实验获取 9 组目标值^[11]。实验参数设定如表 1 所示。每组试验的每道工序有 1~5 台可选设备,即 $z = 1, 2, 3, 4, 5$ 。取每组中相同条件下 5 次实验结果的平均值。设定相同初始条件(R 、 T 、 E 矩阵),分别采用改进 FFA 算法和 GA 算法进行实验计算。

表 1 实验参数及级别

Table 1 Levels and factors for experiments

等级	任务数目/项	设备台数/台	平均工时/h
1	10	10	4
2	50	25	6
3	100	50	26

J'_i 表示计算机采用改进 FFA 算法生成一个调度方案所需要的处理时间; J''_i 表示计算机采用 GA 算法生成一个调度方案所需要的处理时间; W'_{\max} 表示通过改进 FFA 算法完成一个调度方案的计划完工时间; W''_{\max} 表示通过 GA 算法完成一个调度方案的计划完工时间。这 n 个数据都可以反映一个算法的性能,定义 2 个计算式

$$V_1 = (W'_{\max} - W''_{\max}) / W''_{\max};$$

$$V_2 = (J'_i - J''_i) / J''_i。$$

自定义参数 V_1 和 V_2 可以体现出改进 FFA 算法和遗传算法的性能,若计算出的值均为负,绝对值越大,则说明改进 FFA 算法越优于遗传算法。实验结果如表 2 所示。

表 2 详细设计方案及结果

Table 2 Detailed scheme and result of experiment

实验序列	等级(任务数目/项)	等级(设备数目/台)	等级(平均工时/h)	参数 $V_1/\%$	参数 $V_2/\%$
1	1(10)	1(10)	1(4)	-0.63	-96.02
2	2(50)	1(10)	2(6)	-1.26	-68.96
3	3(100)	1(10)	3(26)	-7.78	6.21
4	1(10)	2(50)	2(6)	-2.64	-90.20
5	2(50)	2(50)	3(26)	-11.57	-86.54
6	3(100)	2(50)	1(4)	-8.89	-50.55
7	1(10)	3(100)	3(26)	-1.35	-96.40
8	2(50)	3(100)	1(4)	-25.38	-64.94
9	3(100)	3(100)	2(6)	-3.34	-30.12
平均值				-6.99	-64.17

由表 2 可知 V_1, V_2 的平均值为 -6.99% 和 -64.17%。总体来说,相对于遗传算法,可以通过改

进 FFA 算法在更短时间内计算出更早的计划完工时间,如图 2 所示。

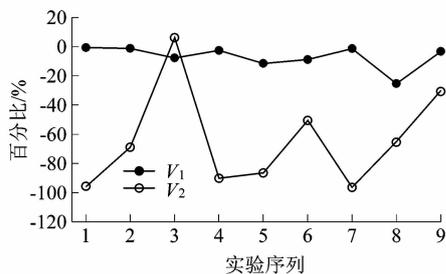


图 2 改进 FFA 与 GA 实验结果

Figure 2 Experiment results of modified FFA compared with GA

3 结语

针对柔性制造车间离散型生产模式下的调度问题,文中描述了一种改进五因素算法,该算法在最复杂的情况下计算次数为 $mn + 3m^2n^2$ 。通过比较计划最大完工时间 W_{\max} 和计算机计算时间 J_i 来评估两种算法的性能。实验结果表明,在设备数目介于 10 ~ 50,任务数目介于 10 ~ 100,平均工时介于 4 ~ 26 的情况下,改进 FFA 算法相对于遗传算法表现出更好的性能。就完成相同调度任务所需要的时间来说,改进 FFA 算法速度更快,提供的结果也更加稳定,算法总体上优于目前常用的遗传算法。但是当任务数远大于设备数时,改进 FFA 算法相对于遗传算法在计算速度方面没有表现出明显的优势,所以该算法还有待于进一步研

究和完善。

参考文献:

- [1] 李秘,周奕. 柔性制造系统技术及其发展[J]. 可编程控制器与工厂自动化,2006(8):11-16.
- [2] 朱钊,连志刚,管在林,等. 离散制造业机械装备企业车间生产调度问题与方法研究——以广东科达机电为例[J]. 华东经济管理,2008,22(7):133-137.
- [3] 江波. 基于动态数据驱动的柔性制造系统调度模型研究[J]. 沿海企业与科技,2010(3):34-38.
- [4] 周维,程娟珠,韩伟. 离散型制造企业基于设备的生产排产优化研究[J]. 现代制造工程,2015(5):43-48.
- [5] 薛冬娟,殷喜龙,潘颖. 基于柔性作业调度的离散制造车间布局优化研究[J]. 制造业自动化,2015,37(16):68-72.
- [6] ZHOU Shengchao, LIU Ming, CHEN Huaping, et al. An effective discrete differential evolution algorithm for scheduling uniform parallel batch processing machines with non-identical capacities and arbitrary job sizes[J]. International journal of production economics, 2016, 179:1-11.
- [7] GORCZYCA M, JANIAK A. Resource level minimization in the discrete-continuous scheduling[J]. European journal of operational research, 2010, 203(1):32-41.
- [8] WANG Changjun, XI Yugeng. Performance analysis of active schedules in identical parallel machine[J]. Journal of control theory and applications, 2007, 5(3):239-243.
- [9] 刘琼,张超勇,饶运清,等. 改进遗传算法解决柔性作业车间调度问题[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(2):59-66.
- [10] 廖珊,翟所霞,鲁玉军. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度方法研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6):729-733.
- [11] 青宏燕,李浩,康文雄. 正交数组技术在面向对象测试中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(7):165-167.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子助力宝钢虚拟远程运维技术及标准研究

西门子与中国宝武钢铁集团有限公司(宝武集团)再次深化合作,在西门子 2017 过程工业峰会上,与宝钢工程技术就其虚拟远程运维技术及标准研究签署合作协议以及一期项目合同。这是 2016 年西门子与宝钢集团正式签署《智慧制造(工业 4.0)战略合作协议》以来,双方合作的深度推进。

根据双方协议,西门子将为宝钢技术基于工业互联网的虚拟远程运维平台项目提供产品、解决方案和相应技术咨询等服务,帮助宝钢建设高效的数字化、可视化运维体系,实现设备运维的全生命周期管理,共同打造流程工业领域的虚拟远程运维样板工程。在此项目过程中,双方还将基于中德智能制造标准对接,展开相应的远程运维标准的研究。宝钢远程运维平台将覆盖其上海宝山、武汉青山、湛江东山和南京梅山等 4 大基地。该项目可以大大节省运行成本,特别是现场运维和后台支持的成本,提高设备运维效率。双方还同意,在项目进展过程中,共同培养智能制造以及远程运维的人才。

(朱建芸)