

应用六西格玛降低吨钢用电成本研究

刘建忠¹ 胡尚举¹ 孙郁瑶²

(1 山西太钢不锈钢精密带钢有限公司 山西 太原 030006; 2 中国工业报社 北京 100041)

摘要: 通过六西格玛改进流程,对内部和外部的需求进行收集,针对影响光亮设备开动率的关键因子烧嘴,通过对车间照明、能源动力介质、催化转化装置进行改善,降低了宏观意义上的能源浪费;在分析改善阶段,运用数学工具构建数学模型,使用Excel 电子表格提供的规划求解器,优化轧制工艺,起到节能降耗的作用,项目整体提高电气和机械方面设备运行的稳定性,保证设备完善的功能精度,有效实现了吨钢用电成本的降低。

关键词: 六西格玛; 开动率; 因子; 质量控制

1 背景

国内某钢铁生产企业能源管理处于粗放式阶段,对能源的使用情况缺乏统一监控与管理,无法从全局的角度设计出完整的能量优化和决策管理解决方案,造成企业能源管理水平低下,严重制约着企业经济效益的提高。图1所示为该钢铁企业2016年逐月吨钢用电成本平均值。

由于能源是我国经济和社会发展的长远战略目标,优化能源管理、降低能源成本至关重要,结合市场需求和集团公司战略目标以及企业对电能的管理目标,降低吨钢用电成本刻不容缓。

2 定义阶段

项目的定义阶段,先了解一下客户的声言。外部顾客为国家电网,其要求降低企业的大量非线性负载和冲击性负荷给电力系统带来电压偏低、波动等电能质量问题。这些问题影响到周围居民用电,居民要求提高供配电网的电能质量。内部顾客为企业内部的各生产工序。设备电能利用率较低,电能浪费严重,从而限制了企业生产和电能使用的一体化管控,使单位产品能耗增加,不利于经济效益的提高。吨钢用电成本是项目的关键质量特性,目的是提高效率和提升品质,满足内外部顾客的需求。

国家电网对于电能的使用分为峰、谷、平3个不同的时段,这三个时段收费不同,所以对于项目的Y选择为每生产1吨钢消

耗的电能费用,而不是消耗的电量。

对于Y的分解主要有三种缺陷形式:

Y1: 能源使用效率低(粗放式的能源使用模式);

Y2: 能源浪费高(非正常使用,可以节省而未节省的部分);

Y3: 能源介质管理不当(未合理考虑用电峰谷平)。

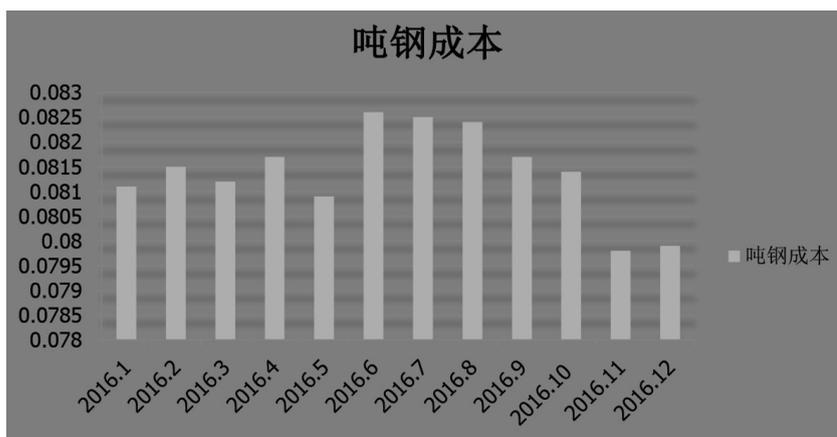


图1 2016年逐月吨钢用电成本平均值

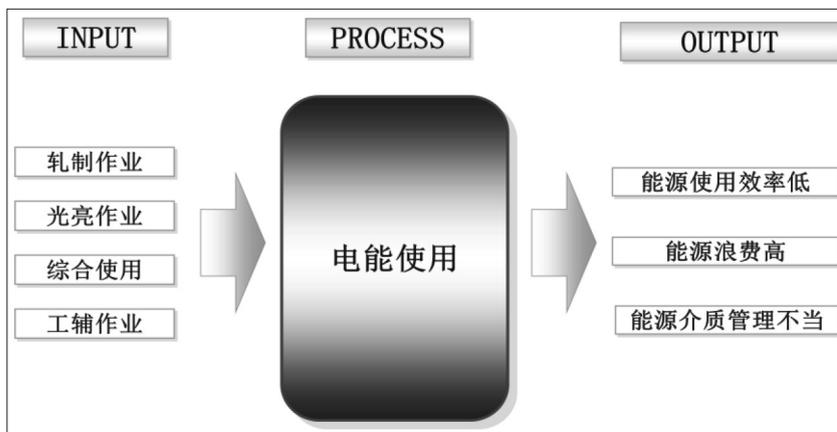


图2 SIPOC流程图

3 测量阶段

在测量阶段，首先评价测量系统是否可靠，收集数据，结合流程图找出Y的各个影响因子，然后通过因果矩阵和FMEA分析，筛选出主要因子，并对部分因子采取快速改善措施。

团队成员共同讨论，通过绘制SIPOC流程图分析查找输入因子，见图2。

共分析了4个环节，找出27个输入因子，通过因果矩阵对输入因子进行筛选，见表1。

通过做pareto图(图3)，对27个与吨钢用电成本有关的输入因子进行分析，从中筛选出对结果影响80%以

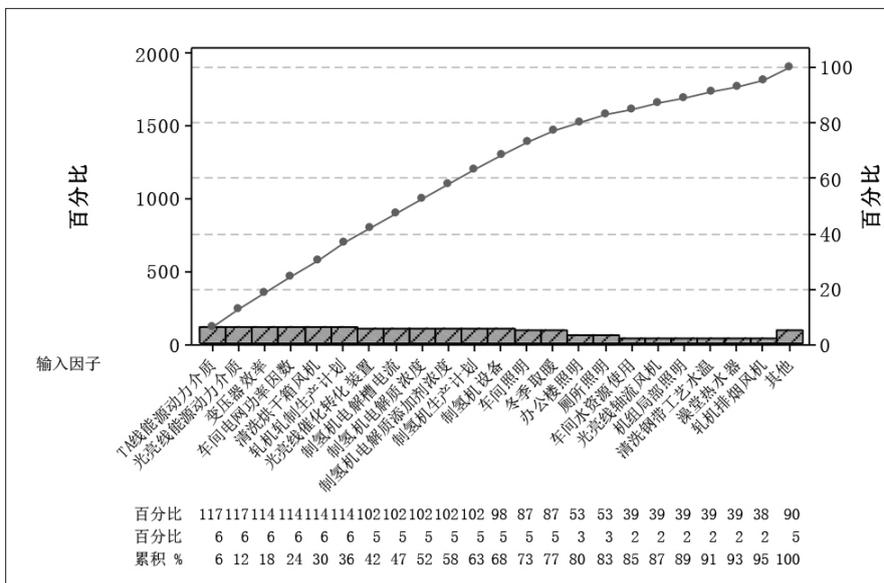


图3 电能利用效率的pareto图

表1 因果矩阵分析

rating of importance (1-10)			10	8	5	Total
Key Requirements			能源使用效率低	能源浪费高	能源介质管理不当	
NO.	process step	process inputs	rating: 0, 1, 3, 9			
1	轧制作业	轧机排烟风机	3	1	0	38
2	轧制作业	准备重卷能源动力介质	0	1	1	13
3	轧制作业	轧机轧制规程	9	3	0	114
4	光亮作业	光亮线轴流风机	0	3	3	39
5	光亮作业	清洗烘干箱风机	9	3	0	114
6	光亮作业	光亮线催化转化装置	3	9	0	102
7	光亮作业	光亮线能源动力介质	0	9	9	117
8	光亮作业	清洗钢带工艺水温	0	3	3	39
9	光亮作业	机组纠偏灯光源	0	1	0	8
10	光亮作业	TA线能源动力介质	0	9	9	117
11	综合管理科	车间照明	0	9	3	87
12	综合使用	办公楼照明	0	1	9	53
13	综合使用	厕所照明	0	1	9	53
14	综合使用	冬季取暖	0	9	3	87
15	综合使用	办公人员电脑	0	1	3	23
16	综合使用	空调温度	0	1	3	23
17	综合使用	机组局部照明	0	3	3	39
18	综合使用	办公室照明	0	1	3	23
19	综合使用	澡堂热水器	0	3	3	39
20	工辅作业	制氢机生产计划	3	9	0	102
21	工辅作业	车间电网功率因数	9	3	0	114
22	工辅作业	变压器效率	9	3	0	114
23	工辅作业	制氢机设备	9	1	0	98
24	工辅作业	制氢机电解液温度	3	9	0	102
25	工辅作业	制氢机电解质 KOH 浓度	3	9	0	102
26	工辅作业	电解质添加剂 K 2Cr 2O7	3	9	0	102
27	工辅作业	车间水资源使用	0	3	3	39

上的、与吨钢用电成本关系最密切的14个因子作为关键输入（用红色字体标注），进行表2所示的失效模式分析。

结合每个因子的潜在失效模式、潜在失效后果、潜在失效原因，对每个因子的严重度、频度和不可探测度进行打分。对于能立即进行改善的因子，实行快速改善。快速改善阶段的改善计划如表3所示。

为了进一步确认改善效果，针对快速改善的结果再次进行了FMEA，发生频度较改善前有所降低，RPN有所下降，如图4所示。

结论：从过程能力分析看，数据具有正态性，Cpk值为0.96，Ppk值为0.93。过程能力偏低，均值0.0779（目标值0.075），均值偏高。过程能力不够充分，需要继续改善。

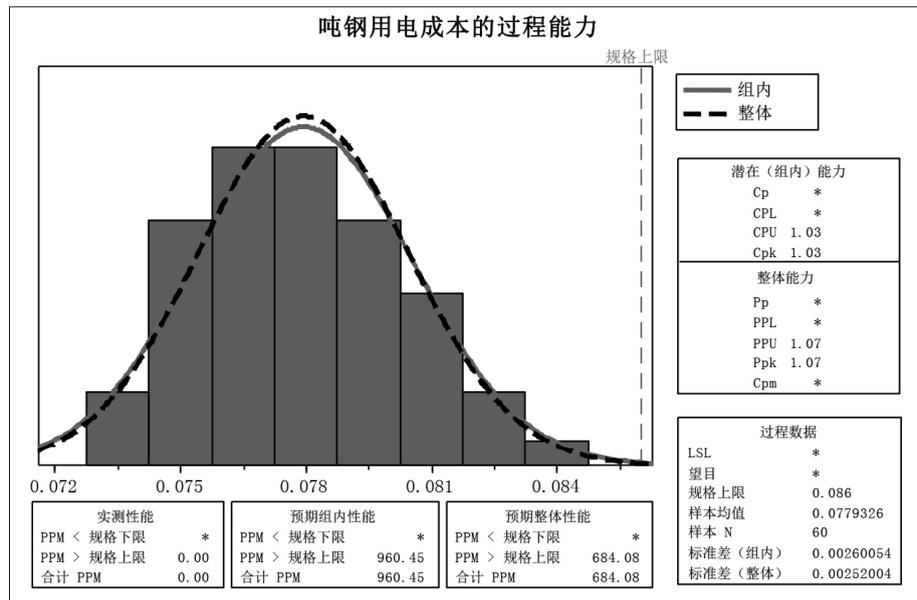


图4 快速改善过程能力分析

4 分析阶段

从测量阶段我们得出，重要的X因子有：

- X1：轧机轧制规程；
- X2：制氢机生产计划；

- X3：制氢机电解液温度；
- X4：制氢机电解质 KOH 浓度；
- X5：制氢机电解质添加剂 K₂Cr₂O₇ 浓度。

我们将在A阶段分析这5个X因子是否确实对Y有影响。

4.1 轧机轧制规程对Y的影响分析

20 辊可逆轧机电能消耗占据全厂电能总消耗的

表2 失效模式分析

序号	工序输入	关键因子输入	潜在失效模式	潜在失效后果	严重度 SEV	潜在失效原因	频度 OCC	现行过程控制	不可探测度 DET	RPN
1	轧制作业	轧机轧制规程	轧制工艺不合理	能源浪费大	8	工艺人员不熟悉最优控制	6	人工安排生产工艺	4	192
2	光亮作业	烘干箱风机	风机全速运转	能源利用效率低	2	风机转速不能调节	10	调节阀门	9	180
3	光亮作业	催化转化装置	催化转化装置没有投用	制氢站需制造的氢气增加，最终导致吨钢用电量增加	3	操作人员未及时投用	5	管理制度约束操作工	8	120
			催化转化装置没有投用	制氢站需制造的氢气增加，最终导致吨钢用电量增加	3	催化转化装置故障	8	机器坏了以后进行修理	7	168
...

表3 快速改善计划

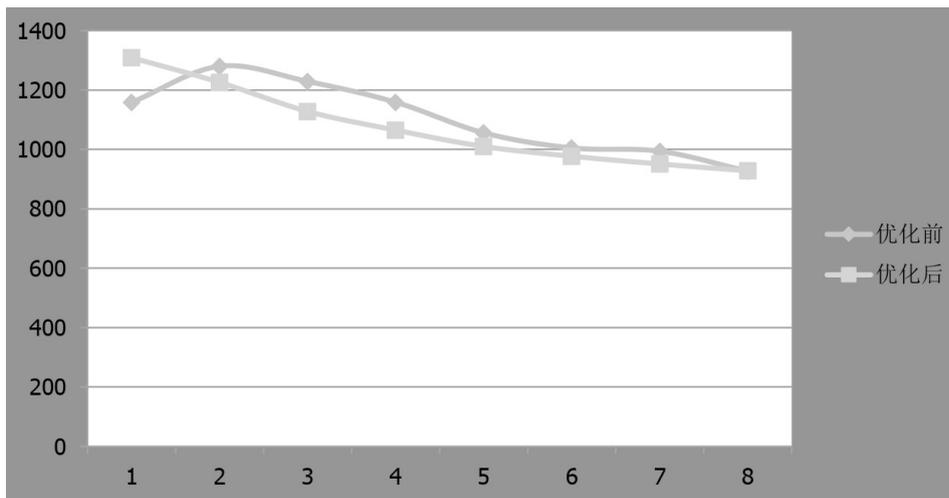
NO.	改善项目	RPN	改善前状况	对策实施	负责人	完成日期
1	烘干箱风机转速不能调节	180	烘干箱风机处于全速运转，浪费电能	更改控制模式，增加变频器，需要大风量时提升电机转速，不需要大风量时降低风机转速	胡尚举	4.12
2	光亮线催化转化装置运行不稳定	168	催化转化装置运行不稳定	更换新的分子筛，定期清洁过滤器管道，定期更换纸过滤滤芯	刘建忠	4.25
3	光亮线能源动力介质浪费	168	停车状态下仍然保持高温状态	停车超过 30min，则自动进行降温处理，同时脱脂段电源关闭	刘建忠	4.25

表4 改善前轧制道次表

道次号	厚度	压下量百分数	轧制力 /kN	功率损耗 /kW
1	0.75	25	1158	109
2	0.615	18	1280	123
3	0.519	15.587	1229	119
4	0.442	14.849	1159	116
5	0.377	14.8	1056	113
6	0.322	14.6	1005	112
7	0.278	13.637	994	110
8	0.25	10	927	83

表5 改善后轧制道次表

道次号	厚度 / mm	压下量百分数 /%	轧制力 / kN	功率损耗 / kW
1	0.75	30	1309	126
2	0.586	17	1226	118
3	0.503	15.215	1128	117
4	0.416	15	1065	113
5	0.358	14.8	1010	112
6	0.307	14.5	977	106
7	0.269	13.568	951	90
8	0.25	10.1	928	83



28%，以往的轧制规程完全按照经验，并没有充分考虑到节能。通过使用 Excel 电子表格提供的规划求解器，在表格上直接处理，构建轧制规程的数学模型，检验优化后是否对提高电能利用效率起到作用。表4和表5所示分别为改善前和改善后的轧制道次表，图5所示为改善前后的对比图，图6所示为吨钢成本等方差检验图。

上述数据为轧制规程优

图5 改善前后的对比图

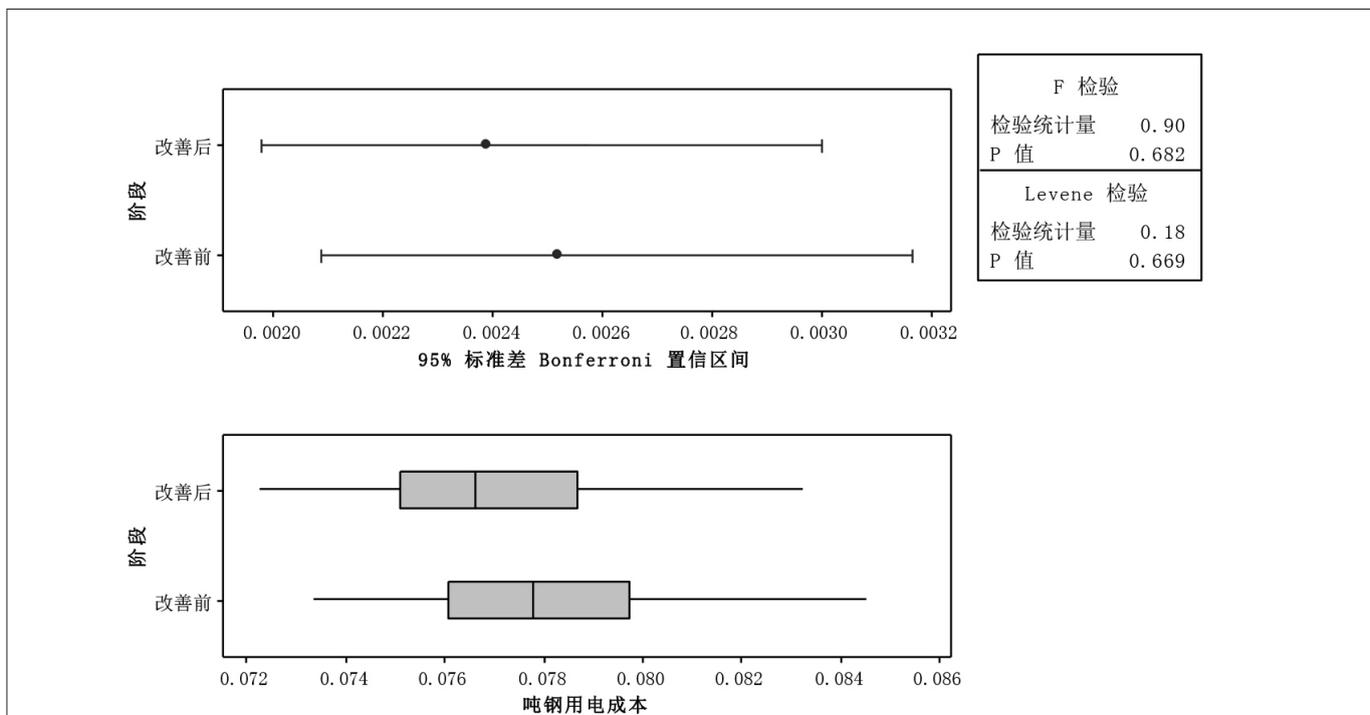


图6 吨钢成本等方差检验图

表6 改善阶段计划

NO.	改善项目	RPN	改善前状况	对策实施	负责人	完成日期
1	烘干箱风机转速不能调节	180	烘干箱风机处于全速运转, 浪费电能	更改控制模式, 增加变频器, 需要大风量时提升电机转速, 不需要大风量时降低风机转速	胡尚举	4.12
2	光亮线催化转化装置运行不稳定	168	催化转化装置运行不稳定	更换新的分子筛, 定期清洁过滤器管道, 定期更换纸过滤滤芯	刘建忠	4.25
3	光亮线能源动力介质浪费	168	停车状态下仍然保持高温状况	停车超过30min, 则自动进行降温处理, 同时脱脂段电源关闭	邓洪斌	4.25
4	TA线能源动力介质浪费	168	停车状态下仍然保持高温状况	停车超过31min, 则自动进行降温处理	胡尚举	4.28
5	车间照明使用不当	160	白天能见度满足生产需求时, 机组人员忘记关闭照明	照明实行动态管理, 每天的开启和关闭时间根据定时器要求自行控制	胡尚举	5.1
6	冬季取暖能源浪费	160	冬季车间全部区域进行供暖	车间供暖改为局部供暖, 对于晚上部分机组不开车, 则停止该区域的供暖	张材	5.15
7	车间电网功率因数偏低	240	车间所有设备全部投入运行时导致功率因数下降	补偿电容器, 满足机组的需求, 同时降低无功损耗	胡尚举	5.15
8	提升变压器运行效率	280	变压器运行效率低	根据变压器负荷的实际情况, 提升变压器的运行效率, 降低铁损耗	胡尚举	5.18
9	制氢机设备稳定运行	288	制氢设备运行不稳定, 不能保证避峰就谷运行	定期清洁加热器, 校验氧含量传感器等相关仪表, 更换熔断器, 分子筛等易损件	刘建忠	5.20

表7 吨钢用电成本按月统计表

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
吨钢用电 / 万元	0.0812	0.081	0.0811	0.0805	0.07985	0.0792	0.07852	0.07709	0.07535	0.07448	0.07455	0.07452

化后与优化前的对比, 改善前后数据均为正态, 且稳定受控, 可通过双 T 检验验证轧制规程是否对降低吨钢用电成本, 提升电能利用效率有显著影响。

双 T 检验:

Y 值: P (吨钢用电成本);

X 值: 轧制规程改善前, 轧制规程改善后;

H0: P1=P2;

H1: P1 ≠ P2。

目的: 验证轧制规程改善后对降低吨钢用电成本提升电能利用率的影响。

双样本 T 检验和置信区间:

样本 1: 均值 60、标准差 0.07793、均值 0.00252、标准误差 0.00033;

样本 2: 均值 60、标准差 0.07690、均值 0.00239、标准误差 0.00031。

差值 = $\mu(1) - \mu(2)$

差值估计值: 0.001030

差值的 95% 置信区间: (0.000142, 0.001918)

差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 2.30、P 值 = 0.023、

自由度 = 117。

结论: $P = 0.023 < 0.05$, 原假设不成立, 轧制规程对降低吨钢用电成本提升电能利用效率有显著影响。

4.2 其余因子分析

其余因子的分析与轧制规程对 Y 的影响分析均采用统计分析工具, 从而反映出关键因子和 Y 的关系, 在此不再赘述。

5 改善阶段

通过 A 阶段的验证与因子分析, 分析阶段的 5 个因子均对结果 Y 有显著影响, 改善阶段将对其进行逐个改善。表 6 所示为改善阶段计划。

6 效果验证

从 4 月份开始, 吨钢用电成本出现明显下降, 从 10 月份开始, 吨钢用电成本控制在 0.075 万元以下, 项目取得了显著的成果, 已经实现目标。表 7 所示为吨钢用电成本按月统计表, 图 7 所示为吨钢用电成本的统计图。

7 结语

通过本次项目,降低了吨钢用电成本,改进了生产工艺,使员工的节能降耗意识得到提高;扩大了六西格玛项目的影响力,传播六西格玛管理的方法及理念,推进六西格玛管理工作的开展。

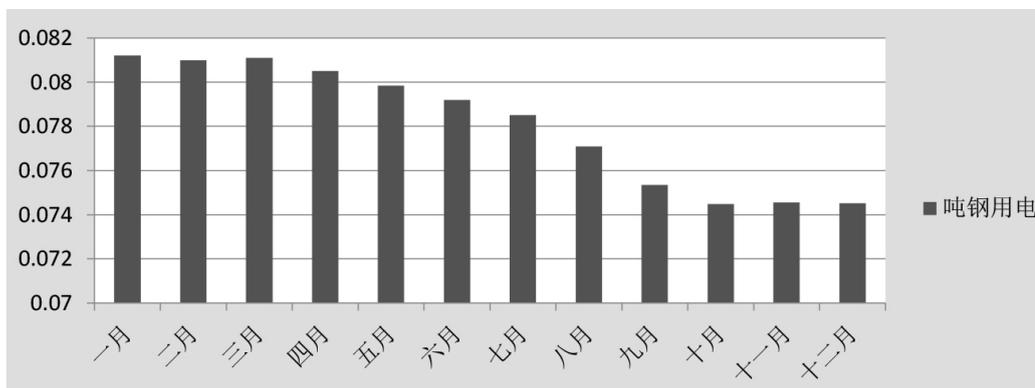


图7 吨钢用电成本的统计图

参考文献:

- [1] 胡尚举,戴秀东,牛博. 响应曲面法优化电解水制氢工艺条件[J]. 制造业自动化,2018(5):69-72.
- [2] 胡尚举,吕坚. 应用六西格玛提高光亮退火线的设备开动率[J]. 现代制造工程,2018(6):114-126.
- [3] 胡尚举,王乐,戴秀东. 应用六西格玛提高手撕钢冷轧板形控制水平[J]. 中国质量,2020(7):44-53.
- [4] 马林,何桢. 六西格玛管理[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006.

[5] 王帅,陶凤和,贾长治,等. 精益六西格玛在机械修理装配质量控制中的应用[J]. 现代制造工程,2012(5):126-130.

[6] 严晓凤,孔庆华. 六西格玛在生产线上产量提高中的应用[J]. 现代制造工程,2010(2):17-22.

作者简介: 刘建忠(1975-),男,汉族,本科,工程师,研究方向:机械与能源管理。

