

案例 17

应用六西格玛改进 F 半导体公司 BGA 产品质量

来源	教育部博士点基金新教师项目资助（20070056130）；国家自然科学基金资助（No. 70572044）；教育部新世纪人才支持计划 NCET-04-0240 资助	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	张敏 何桢 岳刚 王刘平	关键词	六西格玛；BGA；植球；质量改进
理论知识	DMAIC	适用层次	<input checked="" type="checkbox"/> 本科生 <input type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> MBA

1. 案例背景

BGA(Ball Grid Array 球栅阵列封装)是一项已经被广泛应用的高密度封装技术。该技术的出现成为 CPU、主板南、北桥芯片等高密度、高性能、多引脚封装的最佳选择。对 BGA 产品制造来说，过程中的最容易出现次品的环节是植球工序。植球工序是使用助焊剂，在设定的特殊温度的分段高温炉内，将焊锡球粘焊于焊盘上。BGA 基板上的焊球不论是通过高温焊球（90Pb/10Sn）转换，还是采用球射工艺形成，焊球都有可能掉下丢失，或者成型过大、过小，或者发生焊球连、缺损等情况^[10]。本案例采用六西格玛管理的 DMAIC 流程，针对植球工序设备能力上的缺陷，重点找出哪些设备参数的调整和改善可以使设备能力更能适应新产品的需要。

2. 案例描述

2.1 项目定义阶段

对于 BGA 产品制造过程，最容易出现次品的环节是植球工序。由于此工序主要由半自动设备操作，因此集中在设备能力的检验和改善方面。此项目重点找出哪些设备参数的调整和改善可以使设备能力更能适应新产品的需要。

普通产品的球间距（即材料上每个端子之间的间隙距离，间隙距离越小越要求设备具备更高的能力和精度）为 0.6 至 0.8 毫米，随产品的不断升级，越来越小的球间距被应用到半导体产品上，达到 0.5 至 0.6 毫米，这就要求设备具有更高的能力和精度。现今的植球系统 ZVM-250 无此能力，因此需要进行改进，使其植球成功率（即成功将锡球焊接在半导体材料上的百分率）由现在水平的 92%改善达到要求的 98%以上。

2.2 项目测量阶段

由于调教过程只要设定参数之后，设备可以自动调教至相应位置，设备精度完全可以满足需要，而且日常校对的时候都会检查设备精度，因此自动设备的测量能力可以信任，此过程省略。

2.3 项目分析阶段

首先，使用头脑风暴的方法，列举出可能对此设备能力产生影响的所有方面，用鱼骨图显示出来，并最终确定其中两点对提高植球成功率最有影响的因素，即胶量厚度和植球偏移量。

对于胶量厚度的控制，我们选定两种不同的胶刀形式，如图 1，看看这两种刀型对于胶

量，即胶层厚的控制哪一个更好一些，对于设备精度会有很大影响。

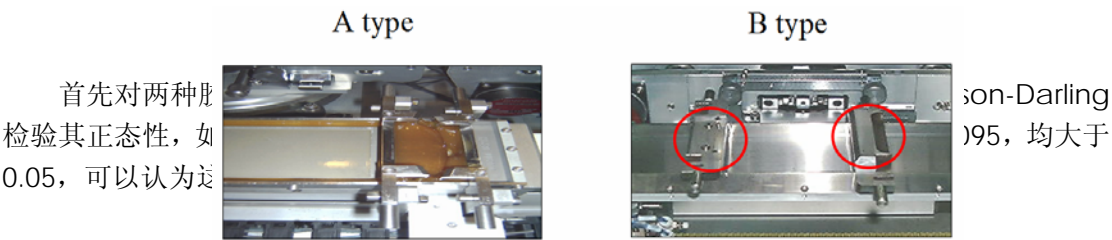


表 1 A 型胶刀的胶量厚度，单位： μm

							图 1 两种不同胶刀形式																
0	6	7	2	5	4	5	6	9	1	5	0	2	7	9	5	4							
5	2	4	0	4	5	3	9	5	8	8	5	2	4	0	9	3							
5	4	1	6	8	8	1	5	3	6	2	2	5	7	3	1								

表 2 B 型胶刀的胶量厚度，单位： μm

胶量厚度																
7	7	7	9	1	5	7	2	5	4	8	8	5	4	0	5	6
6	5	5	5	5	8	0	8	3	1	9	7	9	7	7	8	7
5	3	8	5	8	9	8	9	1	5	9	6	0	2	7	1	

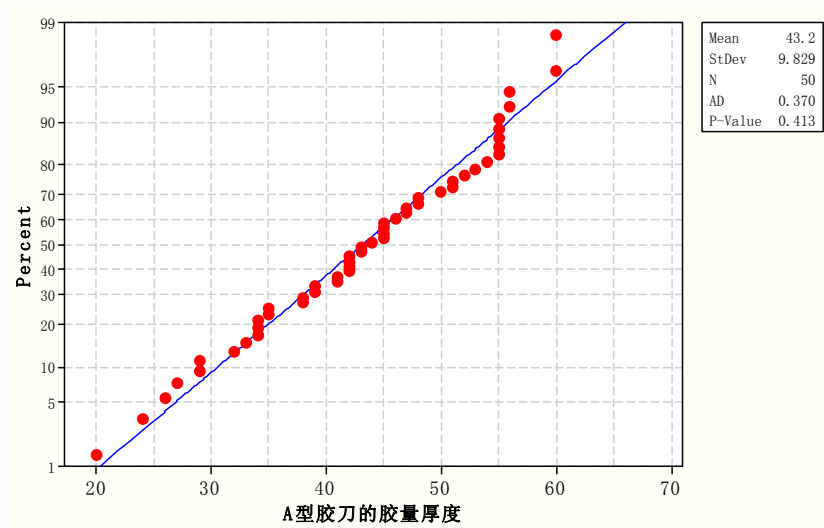


图 2 A 型胶刀胶量厚度的概率图

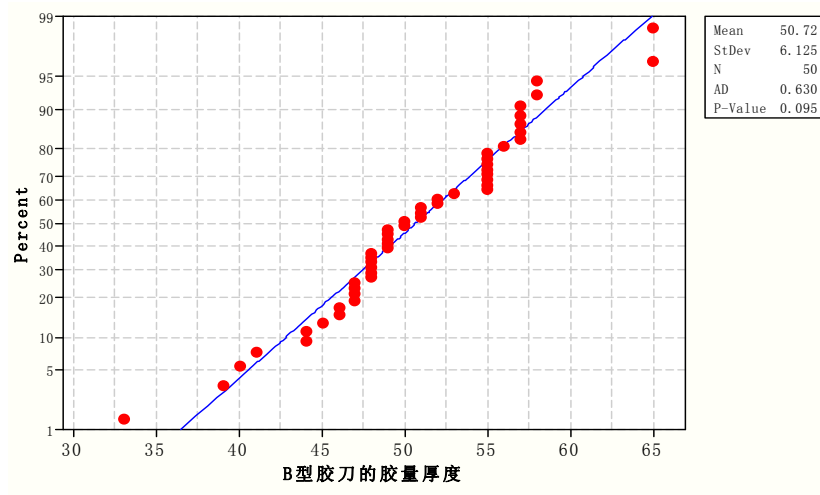


图3 B型胶刀胶量厚度的概率图

为了比较 A 和 B 两种型号胶刀对胶量厚度的控制是否有差异，需要进行双样本 t 检验，分析结果如图 4 所示。由于 P 值为 $0.00 < 0.05$ ，可以认为 A 和 B 两种型号胶刀对胶量厚度的控制有差异。并且，由于 B 型胶刀所控制的胶量厚度标准差为 6.12，小于 A 型胶刀的标准差 9.83，因此，可以认为 B 型胶刀比 A 型胶刀可以更加精密地控制胶量厚度，从而提高植球成功率。得出的结论为：最终选用 B 型改进型胶刀。

Two-Sample T-Test and CI: A型胶刀胶量厚度, B型胶刀胶量厚度

Two-sample T for A型胶刀胶量厚度 vs B型胶刀胶量厚度

	N	Mean	StDev	SE Mean
A型胶刀胶量厚度	50	43.20	9.83	1.4
B型胶刀胶量厚度	50	50.72	6.12	0.87

Difference = μ (A型胶刀胶量厚度) - μ (B型胶刀胶量厚度)
 Estimate for difference: -7.52000
 95% CI for difference: (-10.77816, -4.26184)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -4.59 P-Value = 0.000 DF = 82

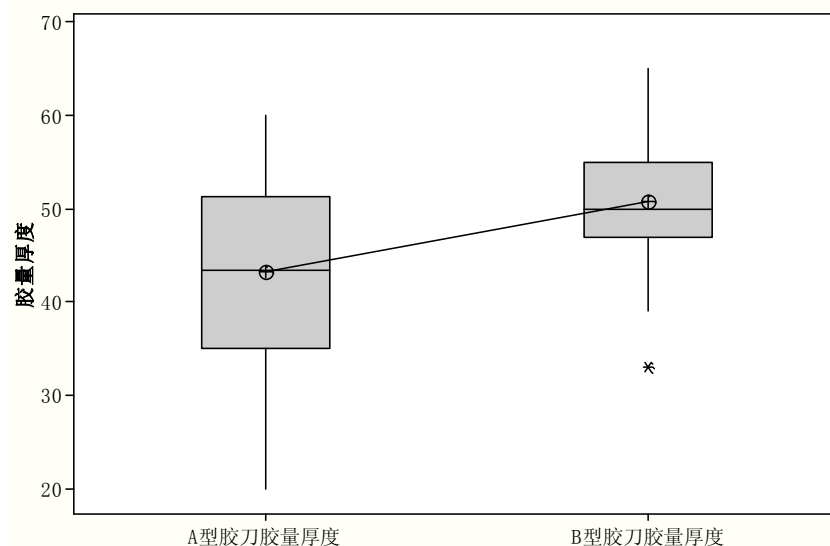


图4 A、B 型胶刀胶量厚度双样本 t 检验结果及箱线图

2.4 项目改善阶段

利用试验设计法改善另一影响植球成功率的关键因素，植球偏移量。首先介绍一下什么是植球偏移量（offset），如图 5 所示，即球体中心偏移开胶点中心的距离。影响植球偏移量的设备参数包括：植球放球高度（Z High），放球震动时间（Vibration-T），植球气压（Pressure），拉丝静止时间（Blow-T）。将这四项目作为因子，实施 $2^{4-1}+3$ 部分因子设计，见表 3。

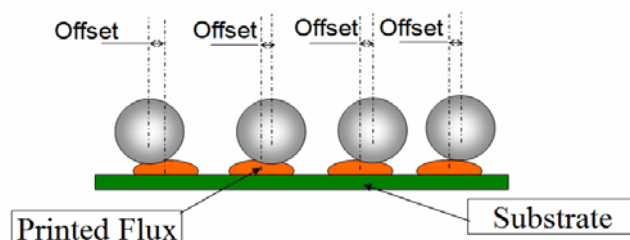


图 5 植球偏移量示意

表 3 $2^{4-1}+3$ 部分因子试验设计数据

序号	设计或中心	因子				植球偏移量 (Offset)
		植球放球高度 (Z high)	放球震动时间 (Vibration-T)	植球气压 (Pressure)	拉丝静止时间 (Blow-T)	
4	1	3	1.0	5.0	0.10	0.17
9	0	2	0.6	7.5	0.25	0.09
3	1	1	1.0	5.0	0.40	0.03
10	0	2	0.6	7.5	0.25	0.10
8	1	3	1.0	10.0	0.40	0.20
5	1	1	0.1	10.0	0.40	0.09
2	1	3	0.1	5.0	0.40	0.15
7	1	1	1.0	10.0	0.10	0.13
1	1	1	0.1	5.0	0.10	0.01
11	0	2	0.6	7.5	0.25	0.10
6	1	3	0.1	10.0	0.10	0.18

采用部分因子设计法（Fractional Factorial Fit Model），得出 ANOVA（方差分析）表和因子正态效应图，见图 6。由于因子植球放球高度（Z High）和植球气压（Pressure）的 P 值均小于 0.05，说明这两个因子效应显著，这一点从因子正态效应图中也可以看出。然而，曲性误差的 P 值为 0.024，小于 0.05，表明该模型线性假设不成立，需要增加二次项。

Factorial Fit: Offset versus Z high, Viration-T, Pressure, Blow-T

* NOTE * This design has some botched runs. It will be analyzed using a regression approach.

Estimated Effects and Coefficients for Offset (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.11325	0.006507	17.41	0.000
Z high	0.11000	0.06500	0.007626	7.21	0.005
Viration-T	0.02351	0.01175	0.007613	1.54	0.220
Pressure	0.06000	0.03000	0.007626	3.93	0.023
Blow-T	-0.00500	-0.00250	0.007626	-0.33	0.765
Z high*Viration-T	-0.00500	-0.00250	0.007626	-0.33	0.765
Z high*Pressure	-0.03000	-0.01500	0.007626	-1.97	0.144
Z high*Blow-T	0.00500	0.00250	0.007626	0.33	0.765

S = 0.0215692 R-Sq = 96.11% R-Sq(adj) = 87.02%

Analysis of Variance for Offset (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.0325589	0.0325589	0.00813971	17.50	0.020
2-Way Interactions	3	0.0019000	0.0019000	0.00063333	1.36	0.403
Residual Error	3	0.0013957	0.0013957	0.00046523		
Curvature	1	0.0013290	0.0013290	0.00132903	39.87	0.024
Pure Error	2	0.0000667	0.0000667	0.00003333		
Total	10	0.0358545				

Normal Probability Plot of the Standardized Effects

(response is Offset, Alpha = .05)

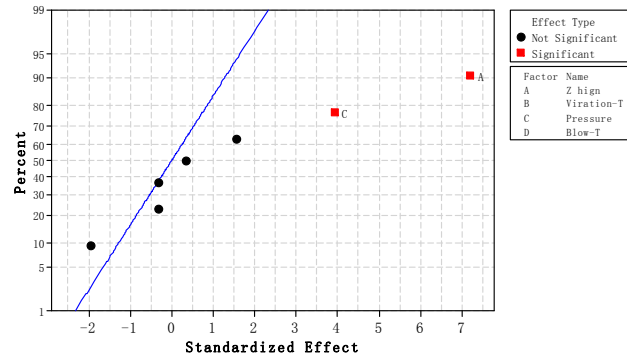


图6 方差分析表和因子正态效应图

因此，在部分因子筛选试验基础上增加4次轴向点试验，试验数据见表4。联合表3的数据，进行响应曲面分析，方差分析表如图7所示。由图7可知，因子植球放球高度(Z High)二次项的P值为0.008，表明其效应显著。同时，植球放球高度(Z High)和植球气压(Pressure)交互作用的P值为0.033，即该二阶交互效应也显著。

表4 增加的4次轴向点试验数据

植球放球高度(Z high)	植球气压(Pressure)	植球偏移量(Offset)
3.414	7.5	0.24
0.586	7.5	0.07
2.0	11.035	0.15
2.0	3.965	0.09

Response Surface Regression: Offset versus Z high, Pressure

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Offset

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.04215	0.07683	-0.549	0.597
Z high	0.03549	0.14084	0.252	0.807
Pressure	0.12498	0.24477	0.511	0.622
Z high*Z high	0.41989	0.12391	3.389	0.008
Pressure*Pressure	0.18648	0.22028	0.847	0.419
Z high*Pressure	-0.35989	0.14305	-2.516	0.033

S = 0.01686 R-Sq = 95.3% R-Sq(adj) = 92.8%

Analysis of Variance for Offset

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.052440	0.052440	0.010488	36.88	0.000
Linear	2	0.047375	0.000076	0.000038	0.13	0.877
Square	2	0.003266	0.003266	0.001633	5.74	0.025
Interaction	1	0.001800	0.001800	0.001800	6.33	0.033
Residual Error	9	0.002560	0.002560	0.000284		
Lack-of-Fit	3	0.001093	0.001093	0.000364	1.49	0.309
Pure Error	6	0.001467	0.001467	0.000244		
Total	14	0.055000				

图 7 响应曲面方差分析表

删除不显著的植球气压（Pressure）二次项，重新进行分析，其方差分析表如图 8 所示。尽管多元全相关系数 R^2 稍微有所降低（由 95.3%降低到 95.0%），但是修正的多元全相关系数 R_{adj}^2 由 92.8%提高到 93.0%，可见删除了不显著的植球气压二次项后，回归的效果更好了。标准差的估计量 s 值由 0.01686 降为 0.01662，再次证明删减模型的回归效果更好。同时，对应失拟项的 P 值为 0.360，大于 0.05，表明该模型没有造成失拟现象。

接着我们进行模型诊断——残差正态性检验、异方差检验和响应独立性检验，如图 9 所示。通过上述检验，没有发现任何不正常情况，我们没有理由去怀疑该模型的正态性假定、方差齐性假定和独立性假定。

由上述分析，可以认为已经选定了最终的模型，其代码化数据的回归方程可写为：

$$\text{offset} = -0.09461 + 0.06020(Z_{\text{high}}) + 0.32280\text{pressure} + 0.39369Z_{\text{high}}^2 - 0.35989Z_{\text{high}} \times \text{pressure}$$

(1)

本问题希望植球偏移量越小越好，从响应变量曲面图和等高线图（见图 10 和图 11）可以清楚地看到，在实验范围内没有最小值，因此利用“响应变量优化器”获得最佳点的设置及最佳值。

Response Surface Regression: Offset versus Z high, Pressure

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Offset

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.09461	0.04476	-2.114	0.061
Z high	0.06020	0.13581	0.443	0.667
Pressure	0.32280	0.07181	4.495	0.001
Z high*Z high	0.39369	0.11827	3.329	0.008
Z high*Pressure	-0.35989	0.14101	-2.552	0.029

S = 0.01662 R-Sq = 95.0% R-Sq(adj) = 93.0%

Analysis of Variance for Offset

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0.052237	0.052237	0.013059	47.26	0.000
Linear	2	0.047375	0.006860	0.003430	12.41	0.002
Square	1	0.003062	0.003062	0.003062	11.08	0.008
Interaction	1	0.001800	0.001800	0.001800	6.51	0.029
Residual Error	10	0.002763	0.002763	0.000276		
Lack-of-Fit	4	0.001297	0.001297	0.000324	1.33	0.360
Pure Error	6	0.001467	0.001467	0.000244		
Total	14	0.055000				

图 8 删减模型响应曲面方差分析表

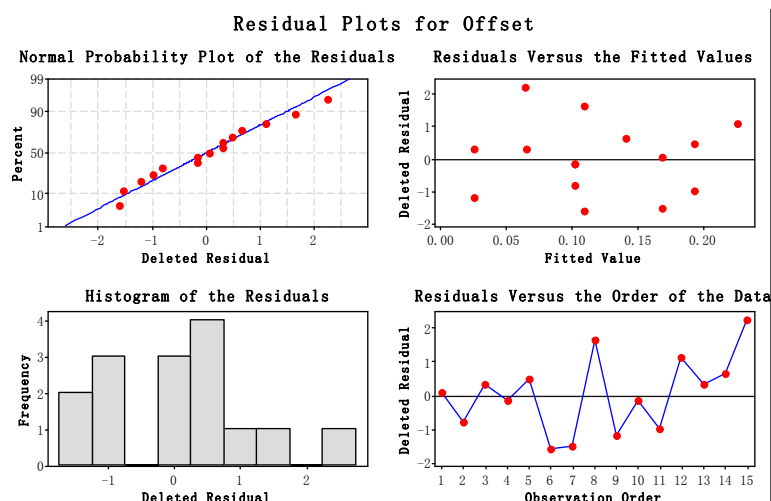


图 9 删减模型残差诊断图

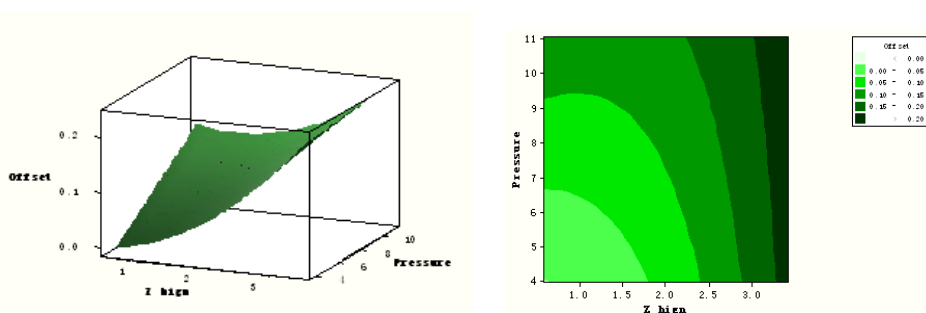


图 10 响应的曲面图

图 11 响应的等高线图

由于本问题要求实际植球偏移量小于 0.16mm，优化目标值为 0.10mm，故响应变量优化结果如图 12 所示，即在植球放球高度 Z-High 取 2mm 及植球气压 Pressure 取 7.2692 psi 时，可使植球偏移量获得目标值 0.10mm。

最后，需要通过验证试验来确保将来按最佳条件生产能获得预期效果。对于最终确定的模型，首先利用回归分析计算最佳点试验的预测值，计算结果表明：在植球放球高度 Z-High 为 2mm，植球气压 Pressure 为 7.3 psi 时，植球偏移量的预测值为 0.10033。在上述条件下运行试验，植球偏移量能够达到预期效果，即确定的最佳点是正确的，最佳参数设置为：植球放球高度 Z-High = 2mm，植球气压 Pressure = 7.3 psi。

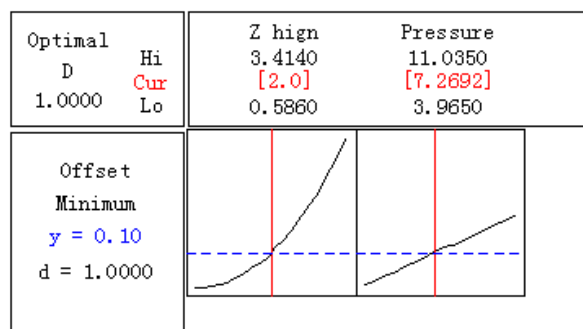


图 12 响应变量优化器输出结果图

2.5 控制阶段

对今后的生产过程控制，要在生产线上设定数据收集方案，并用 p 控制图监控植球成功率，对任何异常点的出现加以报警。

3. 结论与展望

本案例采用六西格玛 DMAIC 流程，对影响 BGA 产品制造过程中植球工序的设备能力进行了改进。首先，使用头脑风暴的方法，用鱼骨图列举出可能对此设备能力产生影响的所有方面，并最终确定其中两点对提高植球成功率最有影响的因素，即胶量厚度和植球偏移量。对于胶量厚度的控制，通过分析，选用 B 型改进型胶刀。然后，将影响植球偏移量的设备参数（植球放球高度（Z High）、放球震动时间（Vibration-T）、植球气压（Pressure）和拉丝静止时间（Blow-T））实施部分因子试验设计，得到优化的设备参数设定值，可以将植球偏移量控制在规格允许范围之内。

4. 参考文献

- [1] 陈春喜，十谈六西格玛，六西格玛管理评论，2007
- [2] Lanyon S. At Raytheon Six Sigma works, too, to improve HR management processes. *Journal of Organizational Excellence*. 2003, 22(4): 29-42
- [3] Knowles G, Johnson M, Warwood S. Medicated sweet variability – a six sigma application at a UK Food Manufacturer. 2004, 16(4): 284-293
- [4] Banuelas R, Antony J, Brace M. An application of Six Sigma to reduce waste. *Quality and Reliability Engineering International*, 2005, 21: 553-570
- [5] Liu EW. Clinical research of the six sigma way. *Journal of the Association for Laboratory Automation*, 2006, 11(1): 42-49
- [6] 宝山钢铁股份有限公司，宝钢股份六西格玛的实践和应用，中国质量，2006，11：10-12
- [7] 中国航空工业第一集团公司，中国一航精益六西格玛推进巡礼，中国质量，2006，11：8-9, 18
- [8] 陈晓华，戴尔视野里的六西格玛，中国质量，2006，5：42-44
- [9] 何桢，韩亚娟，张敏，张凯，企业管理创新、整合与精益六西格玛实施研究，科学与科学技术管理，2008，29（2）：82—85，107
- [10] 王刘平，精益生产和 6sigma 管理理论在 F 半导体公司的应用，天津，硕士论文，2007