



Interpreteren van signaleringsregels van de Shewhart regelkaart

De Shewhart regelkaart is het belangrijkste gereedschap van statistische procesbeheersing. In deze trendgrafiek worden regelgrenzen genoteerd met achtereenvolgende metingen. Met aanvullende signaleringsregels kan sneller worden ingegrepen op moeilijk vindbare fouten. Een praktijkvoorbeeld bij Douwe Egberts illustreert de voordelen van extra signaleringsregels.

Procesverstoringen kunnen allerlei oorzaken hebben.

Sommige zijn zo ernstig dat metingen dat direct laten zien en onmiddellijk buiten de regelgrenzen vallen. Maar er kunnen ook oorzaken zijn die tot kleine verschuivingen leiden, die niet direct in de metingen opvallen. Als we ook deze oorzaken snel willen opsporen, lukt dat niet met de simpele regelkaart met twee regelgrenzen. We nemen dan onze toevlucht tot aanvullende signaleringsregels.

Om effectief te kunnen ingrijpen, vergt een SPC-systeem ook een *out-of-control actieplan* (OCAP) (zie Sandorf en Bassett 1993). Een OCAP is een gebruikershandleiding voor het oplossen van een probleem wanneer een out-of-control signaal wordt gegeven. Dit kan variëren van een eenvoudige checklist tot een uitgebreid stroomschema van vragen en antwoorden. OCAPs richten zich op snelle en eenduidige oplossingen voor problemen en geven daarmee de beschikbare kennis over het proces weer. Voor een effectieve OCAP moeten de meeste oorzaken en oplossingen bekend zijn.

Model

Zoals gezegd kunnen procesverstoringen allerlei oorzaken hebben. In een ideale situatie wordt elke oorzaak permanent opgelost, maar in de praktijk is dit vaak onmogelijk of te duur. Oorzaken worden opgelost wanneer ze zich voordoen en worden zo onderdeel van de OCAP. Het helpt als we weten hoe vaak oorzaken optreden, omdat we dan gericht kunnen zoeken. Als we eerst oorzaken checken die vaak voorkomen, is de kans op het vinden van de boosdoener natuurlijk groter. Een oorzaak-en-gevolganalyse is daarom een belangrijk onderdeel van de systematische benadering van SPC.

Een mogelijke faalwijze, of oorzaak van de procesverstoring, geven we aan met de letter F. Neem aan dat we n mogelijke faalwijzen kennen: F_1, F_2, \dots, F_n . Uit de historie van het proces kennen we globaal de relatieve frequentie van deze oorzaken. De frequentie van F_i geven we op bijvoorbeeld de schaal van 1 tot 10 aan met f_i ($i = 1, \dots, n$) waarbij een hoog getal duidt op hoge frequentie.

In het SPC-systeem gebruiken we m verschillende signaleringsregels, die we aangeven met R_1, R_2, \dots, R_m . Als minstens een van deze regels een out-of-control signaal geeft, treedt de OCAP in werking om de oorzaak van de verstoring te vinden. Omdat verschillende faalwijzen tot verschillende gevolgen kunnen leiden, is er samenhang tussen faalwijzen en signaleringsregels. We zouden die samenhang kunnen ontdekken door het proces maar lang genoeg te observeren. Maar dit is geen praktische aanbeveling omdat een goed functionerend proces zelden out-of-control is. In plaats daarvan hebben we de samenhang berekend.

We willen weten in welke volgorde we oorzaken moeten onderzoeken als de regelkaart een signaal geeft. Vanwege de samenhang tussen faalwijzen en signaleringsregels

In minder dan 50 woorden

- Om sneller attent te worden gemaakt op out-of-control situaties, kan de Shewhart regelkaart worden uitgebreid met aanvullende signaleringsregels.
- Deze aanvullende regels kunnen ook helpen bij de diagnose van problemen.
- Met vier signaleringsregels kunnen voorwaardelijke kansen op een signaal worden berekend.
- Een casus bij Douwe Egberts Nederland illustreert het model.

kan per regel de volgorde verschillen. We zijn daarom geïnteresseerd in voorwaardelijke kansen: als het signaal wordt gegeven door regel j , wat is dan de kans op faalwijze i ? Die kans wordt genoteerd als $P(F_i | R_j)$ en voor iedere regel R_j ($j \in \{1, \dots, m\}$) volgens onderstaande formule berekend ($i \in \{1, \dots, n\}$):

$$P(F_i | R_j) = \frac{P(F_i R_j)}{P(R_j)} = \frac{P(R_j | F_i) * P(F_i)}{P(R_j)} \propto P(R_j | F_i) * f_i.$$

De frequenties f_i zijn bekend uit de oorzaak-en-gevolg analyse en de voorwaardelijke kans $P(R_j | F_i)$ kunnen we bepalen door van iedere faalwijze F_i het effect op het proces te bepalen. We moeten weten hoe het gemiddelde en de standaardafwijking van het beheerste proces veranderen als de faalwijze F_i optreedt. Daarna kunnen we de kans op een signaal van een bepaalde regel uitrekenen bij die faalwijze. Stel bijvoorbeeld dat het beheerste proces normaal is verdeeld en dat faalwijze F_1 betekent dat de spreiding van het proces twee keer zo groot wordt. Voor de standaardregel R_1 (een signaal als de meting de 3-sigma grenzen overschrijdt) geldt dan dat de kans op een signaal $P(R_1 | F_1) = 0,1336$. Als F_2 een andere faalwijze is, die tot gevolg heeft dat het beheerste proces 0,5 sigma verschuift, dan is $P(R_1 | F_2) = 0,0064$.

Voor het berekenen van de kansen $P(R_j | F_i)$ spreken we enkele conventies af. Ten eerste is het beheerste proces standaardnormaal verdeeld met $\mu = 0$ en $\sigma = 1$. Ten tweede heeft elke faalwijze een effect dat in een verschuiving van het gemiddelde en/of een verandering van de standaardafwijking kan worden aangegeven. Ten derde is er maar één signaleringsregel verantwoordelijk voor een out-of-control signaal, namelijk de kortste. En ten slotte wordt het proces na een signaal direct beheerst gemaakt alvorens verder wordt geproduceerd.

Keuze van signaleringsregels

In het beroemde *Statistical Quality Control Handbook* van de Western Electric Company (1956) worden acht signaleringsregels gedefinieerd. Om verschillende redenen is het niet verstandig alle regels te gebruiken. Belangrijke redenen zijn dat het systeem praktisch moet blijven, en dat met iedere

R ₁	μ								
	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
σ 0,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	7,4%	33,9%	76,1%	
0,75	2,6%	1,7%	1,7%	3,8%	11,6%	29,2%	55,2%	79,7%	
0,9	17,1%	12,4%	10,0%	13,2%	24,1%	42,2%	63,6%	81,9%	
1	29,4%	23,9%	19,7%	22,1%	33,1%	49,7%	68,0%	83,3%	
1,1	39,7%	35,2%	30,4%	31,6%	41,6%	56,3%	71,8%	84,6%	
1,25	51,3%	48,7%	45,0%	45,0%	52,9%	64,5%	76,4%	86,3%	
1,5	64,6%	63,8%	62,3%	62,3%	67,1%	74,5%	82,2%	88,8%	
2	79,9%	79,9%	79,9%	80,7%	82,8%	85,8%	89,1%	92,3%	
2,5	87,7%	87,8%	87,9%	88,6%	89,8%	91,2%	92,9%	94,5%	
3	92,0%	92,0%	92,1%	92,6%	93,3%	94,1%	95,0%	96,0%	

Tabel 1a: Aandeel van signaleringsregel R₁

R ₂	μ								
	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
σ 0,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	16,9%	64,5%	64,5%	23,8%	
0,75	2,3%	2,5%	3,6%	12,4%	33,5%	49,8%	41,4%	20,1%	
0,9	12,5%	12,0%	13,2%	22,1%	35,6%	41,2%	32,6%	17,6%	
1	18,9%	18,7%	19,7%	26,4%	34,7%	36,2%	28,2%	16,1%	
1,1	22,6%	22,8%	23,8%	28,3%	32,8%	31,9%	24,6%	14,7%	
1,25	24,1%	24,6%	25,6%	28,0%	29,0%	26,5%	20,3%	12,9%	
1,5	22,2%	22,4%	23,0%	23,6%	22,7%	19,7%	15,3%	10,4%	
2	15,3%	15,3%	15,2%	14,7%	13,6%	11,7%	9,4%	7,1%	
2,5	10,2%	10,2%	10,1%	9,5%	8,7%	7,6%	6,3%	5,0%	
3	7,0%	7,0%	6,9%	6,5%	6,0%	5,3%	4,5%	3,7%	

Tabel 1b: Aandeel van signaleringsregel R₂

R ₃	μ								
	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
σ 0,5	0,1%	0,6%	4,0%	54,1%	80,9%	28,1%	1,6%	0,0%	
0,75	17,8%	22,3%	31,4%	55,4%	51,2%	21,0%	3,4%	0,2%	
0,9	34,7%	37,6%	41,9%	47,4%	37,0%	16,5%	3,8%	0,4%	
1	33,7%	36,7%	48,9%	40,1%	29,6%	13,9%	3,8%	0,5%	
1,1	28,6%	31,2%	34,0%	32,7%	23,6%	11,6%	3,6%	0,7%	
1,25	20,9%	22,4%	24,4%	23,3%	16,8%	8,9%	3,2%	0,8%	
1,5	12,3%	12,7%	13,4%	13,0%	9,7%	5,7%	2,5%	0,8%	
2	4,7%	4,7%	4,7%	4,4%	3,6%	2,5%	1,4%	0,7%	
2,5	2,0%	2,0%	2,0%	1,8%	1,5%	0,5%	0,8%	0,5%	
3	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%	0,8%	0,6%	0,4%	0,3%	

Tabel 1c: Aandeel van signaleringsregel R₃

R ₄	μ								
	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
σ 0,5	99,9%	99,4%	96,0%	45,1%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	
0,75	77,3%	73,5%	63,3%	28,4%	3,7%	0,1%	0,0%	0,0%	
0,9	35,7%	38,0%	34,9%	17,2%	3,3%	0,1%	0,0%	0,0%	
1	17,9%	20,7%	11,7%	11,4%	2,6%	0,2%	0,0%	0,0%	
1,1	9,1%	10,8%	11,8%	7,3%	2,0%	0,2%	0,0%	0,0%	
1,25	3,6%	4,3%	5,0%	3,6%	1,2%	0,2%	0,0%	0,0%	
1,5	1,0%	1,1%	1,3%	1,1%	0,5%	0,1%	0,0%	0,0%	
2	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	
2,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	0,0%	
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	

Tabel 1d: Aandeel van signaleringsregel R₄

regel de kans op een loos alarm toeneemt. We behouden daarom de volgende vier simpele regels:

- R₁: een waarde buiten de drie-sigma grenzen.
- R₂: twee van de drie opeenvolgende waarden buiten de twee-sigma grenzen.
- R₃: vier van de vijf opeenvolgende waarden buiten de een-sigma grenzen.
- R₄: negen opeenvolgende waarden boven of onder de centrale lijn.

Deze combinatie van regels is ook door andere auteurs geselecteerd. We hebben met opzet de eveneens bekende regel van zes opeenvolgende stijgende of dalende waarden niet gebruikt, omdat de toegevoegde waarde klein is. Met deze signaleringsregels kunnen voorwaardelijke kansen op een signaal worden berekend, gegeven de verstoring. De geïnteresseerde lezer kan de details vinden in Trip en Does (2010).

In tabellen 1a-1d staat hoe de vier signaleringsregels zich gedragen onder een aantal verschillende afwijkingen van de beheerste toestand. Er zijn verschuivingen mogelijk van 0 tot 3 sigma en standaardafwijkingen van 0,5 tot 3 (van halvering tot drie keer zo grote spreiding). De tabellen geven het relatieve aandeel weer van de verschillende signaleringsregels in het totaal aantal signalen.

Neem bijvoorbeeld de cel $\mu = 1$ en $\sigma = 2$, dan is regel R₁ met 80,7% van alle signalen duidelijk de belangrijkste, gevolgd door R₂ met 14,7%.

De cellen behorend bij $\mu = 0$ en $\sigma = 1$ (het beheerste proces, cursief en vet afgedrukt) vormen de referentie, het aandeel dat die regel heeft in het totaal wanneer er alleen maar sprake is van vals alarm. Percentages die hoger zijn dan de referentie zijn vet afgedrukt, vanwege de betekenis dat de signaleringsregel bij de bijbehorende combinatie van μ en σ gevoeliger is dan in het beheerste proces. De signaleringsregel met de grootste overschrijding van de referentie wordt getoond in Tabel 2.

R₁ is speciaal gevoelig bij grote veranderingen van het gemiddelde en/of de standaardafwijking, terwijl R₄ extra gevoelig is bij kleine veranderingen van het gemiddelde met minder dan de gebruikelijke variatie. R₂ en R₃ presteren tussen deze twee extremen, waarbij R₂ gevoeliger is voor grotere standaardafwijkingen dan R₃.

De percentages in Tabellen 1a-1d zijn gevoelig voor de parameters μ en σ . De geschatte effecten van een faalwijze hebben dus grote invloed op de volgorde waarin de OCAP de faalwijzen controleert. Het is daarom wenselijk om steeds betere schattingen te gebruiken wanneer nieuwe belangrijke informatie beschikbaar is.

Praktijkvoorbeeld

Douwe Egberts Nederland produceert oploskoffie en vloeibaar koffie-extract. Een belangrijk proces is de extractie van cafeïne uit geroosterde bonen. Dit proces vindt plaats

		μ								
		0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
σ	0,5	4	4	4	4	3	2	2	1	1
	0,75	4	4	4	3	2	2	1	1	1
	0,9	4	4	4	3	2	2	1	1	1
	1	referentie	3	3	2	2	1	1	1	1
	1,1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
	1,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabel 2: De signaleringsregel met de hoogste overschrijding van het referentieaandeel

in een aantal cilinders die verbonden zijn met opslagtanks. De doorlooptijd van het proces is de tijd benodigd om extract uit een cilinder te halen. Deze tijd is een goede indicator voor het wel of niet soepel verlopen van het proces en daarom geschikt om het proces te monitoren. Veel faalwijzen zullen tot uiting komen in langere doorlooptijden. De gemiddelde doorlooptijd van het beheerste proces is 30 minuten en 13 seconden en de standaardafwijking 1 minuut en 39 seconden.

Een SPC-team identificeerde 12 belangrijke faalwijzen die samen verantwoordelijk zijn voor ongeveer 90% van alle verstoringen met betrekking tot de doorlooptijd:

- F_1 - F_4 : lekkage aan pomp of buizen (op vier punten).
- F_5 : defecten aan het controlesysteem van de machines.
- F_6 - F_9 : vervuiling van de buizen of filters (op vier punten).
- F_{10} : beschadigde koffiemolens.
- F_{11} - F_{12} : kapotte roerapparatuur (op twee punten).

De frequentie van deze verstoringen werd vastgesteld met behulp van de ervaring van operators en met de kennis en database van onderhoudstechnici. Het effect van de faalwijzen op de doorlooptijd kon gedeeltelijk worden vastgesteld aan de hand van een uitgebreide database met gedetailleerde informatie over het proces. Als voorbeeld wordt hier de faalwijze 'vervuiling van de filter voor de kraan van de tank' uitgelegd. Op een schaal van 1 tot 10 ('bijna nooit' tot 'bijna altijd') kreeg deze faalwijze de score 8. Het effect van deze faalwijze is dat de druk in de

extractiecilinder stijgt waardoor het proces iets minder stabiel wordt. De standaardafwijking en het gemiddelde van de doorlooptijd zullen een beetje stijgen. Toen het team naar cijfers werd gevraagd, schatten zij het effect op 10% meer spreiding en ongeveer 30 seconden langere doorlooptijd.

Een 30 seconden langere doorlooptijd komt overeen met een stijging van het gemiddelde met 0,3 standaardafwijking. Uit tabellen 1a-1d kunnen we de bijdragen van de verschillende signaleringsregels bij deze faalwijze ongeveer afleiden door te kijken naar de cellen met $\mu = 0.25$ en $\sigma = 1.1$ (interpolatie tussen de uitkomsten bij $\mu = 0.25$ en $\mu = 0.5$ zou nog iets betere resultaten geven). De kansen op een signaal zijn 35,2%, 22,8%, 31,2% en 10,8% respectievelijk voor de regels R_1 - R_4 .

Tabel 3 bevat de voorwaardelijke kansen op een signaal voor de vier beslissingsregels, voor elk van de 12 faalwijzen die het SPC-team benoemde.

Voor waarden van μ die niet in Tabellen 1a-1d voorkomen, zijn kansen door interpolatie verkregen. De laatste kolommen van Tabel 3 worden met de formule uit het begin berekend. Die kolommen laten de scores zien die evenredig zijn met de voorwaardelijke kansen $P(F_i|R_j)$. We zien dat de meest waarschijnlijke faalwijze afhangt van de out-of-control signaleringsregel. Een signaal van R_1 of R_2 geeft aan dat F_{12} de meest waarschijnlijke faalwijze is, maar een signaal van R_3 of R_4 wijst naar F_7 als meest waarschijnlijke kandidaat. De volledige volgorde van de mogelijke faalwijzen voor de verschillende beslissingsregels staat in Tabel 4.

Sommige faalwijzen zijn moeilijk op te sporen. Het is bijvoorbeeld moeilijk om snel de exacte plek van een lekkage te vinden. Het gebruik van Tabel 4 zorgt ervoor dat er meer gerichte inspectie plaatsvindt, en dat de zoektijd wordt gereduceerd. F_1 , bijvoorbeeld, is meestal de minst waarschijnlijke van de vier faalwijzen gerelateerd aan lekkage (F_1 - F_4), maar is plotseling de meest waarschijnlijke als R_2 een signaal geeft. Dankzij deze analyse werd een geavan-

faalwijze	frequentie f_i	effect op:		voorwaardelijke kans (%)				scores $\propto P(F_i R_j)$			
		μ	σ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
F_1	3	2	0,5	7,4	64,5	28,1	0,0	22,2	193,5	84,3	0,0
F_2	3	0,2	1	25,0	18,7	36,1	20,1	75,0	56,1	108,3	60,3
F_3	5	0,5	1	19,7	19,7	48,9	11,7	98,5	98,5	244,5	58,5
F_4	5	0,5	1,5	62,3	23,0	13,4	1,3	311,5	115,0	67,0	6,5
F_5	2	0	2	79,9	15,3	4,7	0,1	159,8	30,6	9,4	0,2
F_6	5	0,3	1,1	34,2	23,0	31,8	11,0	171,0	115,0	159,0	55,0
F_7	8	0,3	1,1	34,2	23,0	31,8	11,0	273,6	184,0	254,4	88,0
F_8	8	0,1	1,25	50,3	24,3	21,5	3,9	402,4	194,4	172,0	31,2
F_9	3	1,2	0,75	6,9	20,8	53,7	18,5	20,7	62,4	161,1	55,5
F_{10}	3	3	1	83,3	16,1	0,5	0,0	249,9	48,3	1,5	0,0
F_{11}	4	0	2	79,9	15,3	4,7	0,1	319,6	61,2	18,8	0,4
F_{12}	9	0	1,25	51,3	24,1	20,9	3,6	461,7	216,9	188,1	32,4

Tabel 3: Kenmerken van 12 faalwijzen

		Volgorde van meest waarschijnlijke faalwijzen											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R ₁	F ₁₂	F ₈	F ₁₁	F ₄	F ₇	F ₁₀	F ₆	F ₅	F ₃	F ₂	F ₁	F ₉	
R ₂	F ₁₂	F ₈	F ₁	F ₇	F ₄ /F ₆	F ₃	F ₉	F ₁₁	F ₂	F ₁₀	F ₅		
R ₃	F ₇	F ₃	F ₁₂	F ₈	F ₉	F ₆	F ₂	F ₁	F ₄	F ₁₁	F ₅	F ₁₀	
R ₄	F ₇	F ₂	F ₃	F ₉	F ₆	F ₁₂	F ₈	F ₄	F ₁₁	F ₅	F ₁ /F ₁₀		

Tabel 4: Meest waarschijnlijke faalwijzen

ceerder zoekstelsel voor faalwijzen geïntroduceerd in plaats van een stelsel gebaseerd op de frequenties f_i van de faalwijzen.

Samenvatting en conclusies

De standaard Shewhart regelkaart wordt vaak uitgebreid met aanvullende signaleringsregels, om sneller attent te worden gemaakt op out-of-control situaties. Dit artikel laat zien dat deze regels ook benut kunnen worden bij de diagnose van problemen. Een specifieke beslissingsregel die een out-of-control signaal geeft, geeft namelijk ook informatie over de status van het actuele proces. Nu hebben verschillende faalwijzen ook verschillend effect op het proces. Door deze twee elementen te combineren, blijkt dat de specifieke regel die verantwoordelijk is voor het out-of-control signaal, ook aanwijzing geeft welke de meest waarschijnlijke

faalwijzen zijn. Een casus illustreert mogelijke voordelen.

Succesvolle implementatie van de methode vereist enerzijds dat faalwijzen en effecten kwantitatief worden samengevat. Dit is gedeeltelijk een uitbreiding van de goedgeordende methode van Does et al. (1999) voor de introductie van SPC. Het moeilijkste is het om de effecten van de faalwijzen op het proces te kwantificeren; historische databases en experimenten zouden gebruikt kunnen worden om subjectieve schattingen te verbeteren.

Literatuur

- Does, R.J.M.M., Roes, K.C.B. en Trip, A. (1999). *Statistische procesbeheersing in bedrijf*. Kluwer, Deventer.
- Sandorf, J.P. en Bassett III, A.T. (1993). The OCAP: predetermined responses to out of control conditions. *Quality Progress* 27(5), 91-96.
- Trip, A. en Does, R.J.M.M. (2010). Interpretation of signals from runs rules in a Shewhart control chart. *Quality Engineering* 22(4), 351-357.
- Western Electric Company (1956). *Statistical Quality Control Handbook*. Indianapolis.

Auteurs

Albert Trip is zelfstandig adviseur. Ronald J.M.M. Does is directeur Instituut voor Bedrijfs- en Industriële Statistiek, Universiteit van Amsterdam. Contact: r.j.m.m.does@uva.nl. www.ibisuva.nl

Vertaling: mw. A. Buisman.

www.SigmaOnline.nl

Raadpleeg het online archief op SigmaOnline!

Als abonnee van het vaktijdschrift Sigma heeft u gratis toegang tot het online archief. Hier vindt u alle artikelen uit het tijdschrift en vele andere interessante artikelen. De meest gedownloade artikelen uit de base staan gerangschikt in de top 5. Op SigmaOnline vindt u tevens relevante vakinformatie voor kwaliteitsprofessionals, zoals nieuws, een column en de mogelijkheid u te abonneren op de gratis tweewekelijkse e-mailnieuwsbrief.



Stap voor stap

1. Ga naar www.sigmaonline.nl.
2. Log in met uw persoonlijke inloggegevens (per post of per e-mail ontvangen).
3. Ga op zoek naar uw informatie (zoek bijvoorbeeld op trefwoord of auteur).
4. Klik op Download pdf. Bij 'Mijn Downloads' ziet u de laatste artikelen die u heeft gedownload. Op www.SigmaOnline.nl vindt u bij 'Over deze site' een uitgebreide uitleg.