

Számítógéppel segített kísérlettervezés

A mérés célja: A számítógéppel segített kísérlettervezés labor célja, hogy a résztvevők lehetőséget kapjanak gyakorlati tapasztalat szerzésére a kísérlet tervezés terén, miközben kihasználják a számítógépes eszközök előnyeit a tervezési folyamat során.

A mérési feladat: Egyszerű, többváltozós kísérlet vizsgálatán és elvégzésén keresztül megismerkedni olyan eszközökkel és módszerekkel, amelyek lehetővé teszik a kísérleti tervek és a kísérleti paraméterek könnyebb kezelését.

A mérés elvégzésével megszerezhető képességek: a résztvevők megtanulhatják, hogy a kísérlettervezésnek létezik szisztematikus módja. Valamint példákat láthatnak rá, hogy milyen hatékony szoftverek léteznek a folyamat segítésére.

A mérés során felmerülő fogalmak rövid meghatározása

Kísérlet

A kísérlet a tudományos megismerés egyik módszere, melynek során egy ellenőrzött környezetben általában ismételhető módon tesztelünk egy hipotézist vagy elméletet. A kísérlet célja, hogy segítségével adatokat gyűjtsünk, és az ezek közötti összefüggések feltárásával jobban megismerhető legyen egy jelenség vagy folyamat. A kísérletek során adott feltételek mellett változtatjuk meg egy vagy több változó értékét (pl. egy folyamat bemeneti paraméterei), és megfigyeljük, hogy ezek a változások hogyan befolyásolják a függő változókat (pl. egy folyamat kimeneti paraméterei).

Kísérlettervezés

A kísérlettervezés (DOE – Design of Experiments) olyan módszertan, melynek célja, hogy rendszerezett és hatékony módon segítse a kísérletek tervezését és végrehajtását, lehetővé téve ezáltal a megbízható és hasznos információk gyűjtését a független változók (faktorok) függvényében. A DOE segít minimalizálni a kísérletek számát, így kevesebb időt és erőforrást igényel a kísérletek végrehajtása.

Tekintve, hogy a folyamat során statisztikai módszereket (melyek ismertetése nem célja a labornak) használva figyelembe vesszük a külső forrásból származó zajt és a mérési eredmények természetes változásait, a szisztematikus tervezett kísérletek pontosabb és megbízhatóbb eredményeket hozhatnak.

A DOE további előnye, hogy lehetővé teszi a bemeneti változók közötti interakciók elemzését. Alkalmazásával képesek lehetünk a különböző faktorok közötti összetett hatások azonosítására, mely fontos lehet a valósághű modellalkotás és a javasolt változtatások megalapozásához.

A hagyományos próbálkozások módszerével szemben a DOE strukturált és tudományos megközelítést alkalmaz, amely segít elkerülni a találgatást és a felesleges próbálkozásokat.

A DOE módszertana szinte bármely olyan területen hasznos lehet, ahol kísérleteket hajtanak végre a változók hatásának megértése és optimalizálása érdekében. Például a gyártás és minőség-ellenőrzés terén, a gyártási folyamatok optimalizálásához és a termékek minőségének javításához használják. Az elektronikai termékeknél például az áramkörök tervezésekor a komponensek és paraméterek optimális kombinációjának meghatározására használhatják. Telekommunikációban a hálózatok és kommunikációs rendszerek tervezésénél a DOE segít a sávzsélesség, a jelminőség és a szolgáltatásbiztonság optimalizálásában. Új anyagok fejlesztésekor segítségével az anyagi tulajdonságok optimalizálásával és a gyártási folyamatok hatékonyságának növelésével időt és pénzt spórolhatunk.

Kísérlettervezés alapjai

A DOE módszertana jól körülhatárolt fogalmak szisztematikus és módszeres használatán alapul és statisztikai eszközöket használ a háttérben. Az alábbiakban felsoroljuk a leggyakrabban használt (a módszerre sajátosan jellemző) fogalmakat és röviden ismertetjük azok jellemzőit.

Faktorok és szintek definíciója

A faktorok (optimalizációs paraméterek - factor) olyan mérhető vagy minősíthető független változók vagy tényezők, amelyeket a kísérletben szándékosan változtathatunk annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, hogyan befolyásolják a folyamatunk kimeneteiként azonosított egyéb mennyiségeket. Például egy gépesített forrasztási folyamatnál faktorok lehetnek a forrasztókemence hőmérséklete, a szállítószalag sebessége, a fűtés teljesítménye vagy az alkalmazott forrasztószer összetétele. Minden faktornak több szintje (level) lehet. A szintek az adott faktor értékeinek konkrét beállításai vagy értékei. Például a szállítószalag sebessége faktornak lehet alacsony, közepes és magas szintje, vagy konkrét mm/s dimenziójú értékei.

Az adott vizsgált folyamat során számtalan faktort azonosíthatunk, ám ezek nem mindegyike szükségszerűen bizonyul lényeges faktornak. (Vagy azért, mert nem az általunk választott kimeneti paraméterre gyakorolnak hatást, vagy egyáltalán nincs érdemi hatásuk). Ezért a lényegtelen faktorok kiszűrése és a fő faktorok azonosítása az irányított kísérlettervezés egyik fő feladata. A faktorok figyelmen kívül hagyása növeli a kísérlet hibáját, és egy rosszul azonosított rendszerben esetleg nem a valódi optimális munkapont beállítását eredményezheti. A faktorokkal szemben számos fontos követelményt kell támasztani.

1. **Mérhetőség és ellenőrizhetőség:** célszerű olyan változókat választani, melyek értékeit objektív módon tudjuk mérni vagy rögzíteni (lehetőség szerint jól kiforrott és ismert mérési módszer segítségével). Például ha a faktor egy anyag típusa, akkor annak összetétele vagy fizikai tulajdonságai legyenek mérhetők.
2. **Kontrollálhatóság:** képesnek kell lennünk a választott faktor egyes értékeinek reprodukálható beállítására a kísérletek során.
3. **Relevancia:** legjobb tudásunk szerint igyekeznünk kell relevánsnak gondolt faktorokat választani. Ha olyan mennyiség hatását vizsgáljuk, melynek csekély szerepe van a folyamat szempontjából, akkor feleslegesen növeljük az elvégzendő kísérletek számát.
4. **Függetlenség:** ha két faktor között erős kölcsönhatás vagy korreláció van, akkor nehezebb lehet megérteni az egyes faktorok hatását a rendszerre, hatásukat nehéz lesz szétválasztani.
5. **Megfelelő szintek száma:** az egyes faktoroknak több szintet kell tartalmazniuk a hatások pontosabb felméréséhez. Az optimális szintek számát a kísérleti cél és a rendelkezésre álló erőforrások határozzák meg; a szintek számának helyes megválasztása szintén fontos célja a kísérlettervezésnek.
6. **Stabilitás:** a faktoroknak stabilnak kell lenniük a kísérlet teljes időtartama alatt. Ha a bementi változók időfüggő zajjal terhelték, vagy instabilak, az torzíthatja az eredményeket.
7. **Egyértelműség:** a faktorok és szintek definíciója és elnevezése egyértelmű kell, hogy legyen, hogy a kísérlettervezés és az eredmények értelmezése során ne legyenek félreértések.
8. **Rendszerezés és dokumentáció:** fontos, hogy a faktorokat rendszeresen dokumentáljuk és rögzítsük. A faktorok módosításait és a szintek beállításait pontosan rögzíteni kell, hogy reprodukálható legyen a kísérleti folyamat.

Kísérleti faktor

Az a függő változó, amelynek az optimalizálásában érdekeltek vagyunk (pl. egy precíziós ellenállás értékbeállításánál maga az ellenállás értéke). Ahogy a neve is mutatja, ez is egyfajta faktor, tehát a fenti tulajdonságok erre a mennyiségre is értendők.

Kísérleti egység

A kísérleti egység azon elem vagy alany, amelyre a kísérletet alkalmazzuk vagy vizsgáljuk. Például egy autógyárban a kísérleti egységek lehetnek az egyes autók, és azokon végzett mérések vagy tesztek, de egy több bemeneti paraméterrel rendelkező mérőberendezés is lehet maga a vizsgálati egység.

Véletlenszerű mintavétel

A véletlenszerű mintavétel azt jelenti, hogy a kísérleti egységek kiválasztása és/vagy a faktorszintek sorrendje véletlenszerű. Ez az elv segít minimalizálni a torzításokat vagy a mintavételi hibákat a kísérletben, és lehetővé teszi a statisztikai analízis objektív és megbízhatóbb eredményeinek elérését.

A DOE-ra jellemző terminológia

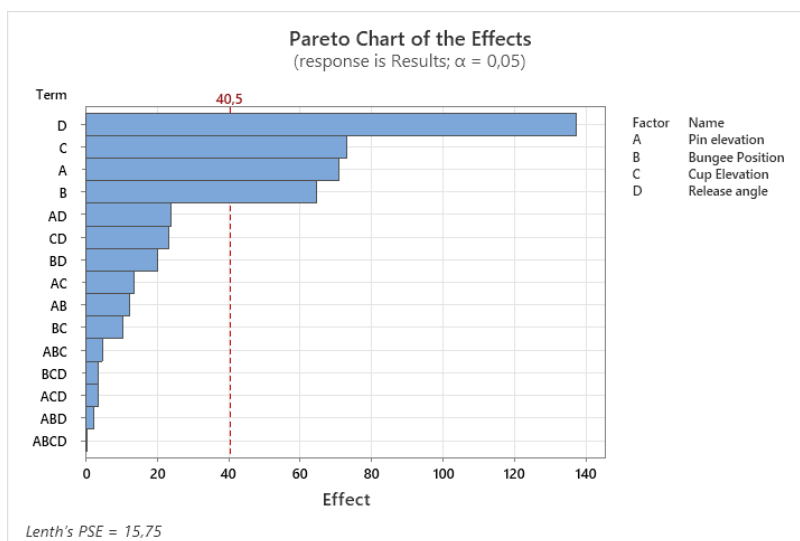
Tekintve, hogy a konkrét mérnöki területen az egyes kísérleti egységek jellemzően nagyon hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek a tipikus faktor és szintszámok jelölésére az I-es táblázatban található hatványszámokat használják. Ezért ennek a gyakorlatban kialakult egy sajátos terminológiája, melyet az alábbi táblázatban ismertetünk.

I. táblázat. DOE tanulmányok jellemző elnevezése

DOE tanulmány elnevezése	Faktor szám	Szint szám
2^2	2	2
2^4	4	2
3^4	4	3

Pareto-diagram

A Pareto-diagram egy gyakori eszköz a kísérlettervezés eredményeinek ábrázolására. Segítségével azonosítani tudjuk a legfontosabb faktorokat. A Pareto-diagram egy olyan oszlopdiagram, amely az egyes faktorokat és azok hatásait mutatja be csökkenő sorrendben. Az oszlopok magassága az adott faktor hatásának mértékét vagy fontosságát jelzi. A diagramon határértéket is ábrázolnak. Azok a faktorok, amelyek hatása meghaladja ezt a határértéket, lényegesnek tekintik. A faktorok hatásait különböző statisztikai számításokkal tudjuk meghatározni. (Pl. Variancia analízis (ANOVA), lineáris regresszió stb.).



1. ábra. Pareto-diagram, melyen látható, hogy jelen példánál valamennyi faktor szignifikáns

Szórás

A szórás (standard deviation) a statisztikában egy mérték, amely az adatok „szóródásának” vagy változékonyságának mértékét mutatja. A szórás azt jelzi, hogy az adatok mennyire térnek el az átlagtól. Minél nagyobb a szórás, annál nagyobb a változékonyság az adathalmazban. A szórás mértékegysége megegyezik az eredeti adatok mértékegységével, és pozitív valós szám.

A szórás meghatározáshoz első lépésben Kiszámítjuk az adatok átlagát (átlagos értéket). Kiszámítjuk az egyes adatpontok és az átlag közötti különbségek négyzetét. Az egyes eltéréseket négyzeteinek átlagát számoljuk ki, majd négyzetgyököt vonunk az eredményéből.

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}},$$

ahol σ a szórás X_i az egyes adatpontok a mérési sorban, \bar{X} : az adatok átlaga, N pedig a mérési pontok száma

A képletben a szórás (σ vagy s) a következőképpen írható le:

Variancia analízis (ANOVA)

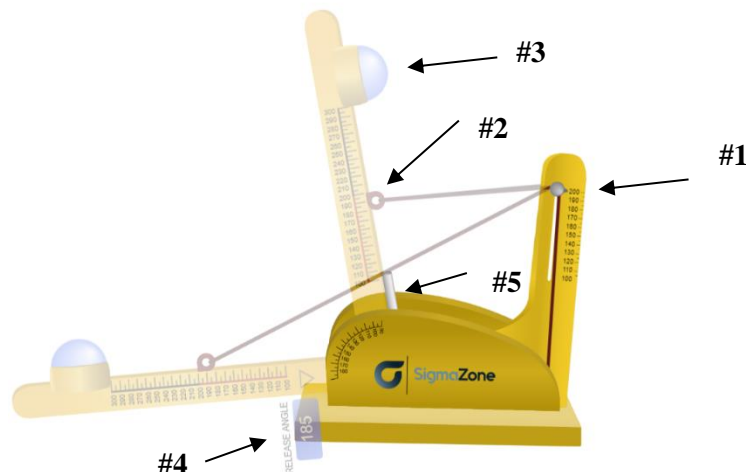
Ez egy olyan statisztikai módszer, ami különböző csoportok átlagának összehasonlítására alkalmas. Nagyon leegyszerűsítve azt vizsgálja, hogy a különböző csoportba sorolt mért értékek szórása mennyire tér el egymástól. Az elemzés során az adatokat az átlagos értékek és a variancia alapján vizsgáljuk, hogy lássuk, a csoportok közötti különbségek statisztikailag szignifikánsak-e. Az ANOVA statisztikai próbával dönt arról, hogy a csoportok közötti különbségek szignifikánsak-e a nulla hipotézishez képest. (A nulla hipotézis azt állítja, hogy nincs szignifikáns különbség a csoportok között, míg az alternatív hipotézis azt állítja, hogy van szignifikáns különbség). Ehhez az f- vagy t-próba nevű eljárást használja.

A statisztikai szignifikancia referenciavonala a szignifikancia-szinttől függ (α jelöli). Hacsak nem adott egy olyan lépésenkénti kiválasztási módszer, amely meghatározza alfa értéket, akkor a szignifikancia-szint az 1 mínusz az elemzés megbízhatósági szintje (pl. 1-99%=0.01).

A mérés menete

1. A kísérleti egység megismerése

Tekintve, hogy a DOE módszertana univerzálisan bármilyen több bemeneti paraméterrel és jól mérhető kimeneti változókkal rendelkező rendszer vizsgálatára alkalmas, tulajdonképpen bármilyen kísérleti eszközt viselkedését vizsgálhatnánk segítségével. Illeszkedve az ipari gyakorlathoz a laborfoglalkozáson is, a témával kapcsolatban legáltalánosabban használt eszközt, egy kaptapultot vizsgálunk. Egy virtuális, 5 faktorral és egy kimenettel rendelkező kísérleti egységgel fogunk dolgozni.



2. ábra. Virtuális kaptapult, mint kísérleti egység képe

3. ábra.

II. táblázat. A kísérleti rendszer faktorjainak ismertetése

#		Magyarázat	Ajánlott szintek	
1	Pin Elevation	A katapult karját mozgató elasztikus szalag rögzített végpontja.	120	180
2	Bungee Position	A katapult karját mozgató elasztikus szalag mozgó végpontja.	120	180
3	Cup Elevation	A lövedék hajítókaron található pozíciója	220	280
4	Release Angle	A hajítókar hátsó feszített pozíciója	140	180
5	Firing Angle	A lövedék elengedésének szögállása	110	

A gyakorlat során az #5 jelű faktort nem fogjuk állítani, annak értékét állítsuk fixen 110-re. A többi négy faktort két szint között fogjuk állítani, így a DOE modellünk 2^4 faktoriális modell lesz.

2. A kísérleti egység megismerése

Minden valóságos mérőberendezés által szolgáltatott eredménynek van egy természetes szórása. Ez általában az eszköz tökéletlenségéből, esetleg a folyamat vagy az operátor hibájából származtatható. Folyamatoptimalizálást csak olyan eszközön érdemes elvégezni, ami által szolgáltatott eredmények hitelességéről meg vagyunk győződve. Ehhez egy sor előzetes vizsgálatra van szükség, hogy lássuk milyen az eszköz pontossága és a mérés reprodukálhatósága. Az első feladat éppen ennek a vizsgálata.

Próbálgatás útján határozzuk meg először az elérhető legnagyobb hajítási távolságot az #1–4 faktorok értékeinek állításával! Először beállítjuk a Pin és Cup Elevation-t, aztán a Bungee position-t és végül a Release angle pozícióba állításával, majd elengedésével kilőjük a lövedéket. A mérőszalagról olvassuk le a távolságot és jegyezzük fel valamennyi lövés után.

Jegyezzük fel, hogy hány kísérlet volt szükséges a maximális távolság meghatározásához!

Ha megvan a maximális hajítási távolság, akkor az ahhoz szükséges beállítások mellett elvégezzünk 10 kísérletet és Excel táblázatba rögzítjük a leolvasott távolság értékeket. Grafikusan ábrázoljuk az értékeket és azok szórását. Vizsgáljuk meg az ismétlés hibáját!

Vizsgáljuk meg közösen, hogy a mi lehet az eredmények szórásának az oka és hogy hogyan lehetne javítani a folyamaton!

3. Teljes faktoriális kísérletek lefolytatása

Minden, ún. teljes faktoriális tanulmány esetén a faktorok és a szintek által meghatározott hatvány mondja meg, hogy hány darab kísérletet kell lefolytatni a rendszer vizsgálatához. Jelen esetben $2^4 = 16$ különböző beállítások mellett elvégzett hajításra van szükségünk, melyekhez a vonatkozó

paraméterhalmazt szisztematikusan legenerálhatjuk.

Végezzük el a hajítási kísérleteket a fenti táblázat alapján. Olvassuk le a kapott távolságokat a mérőszalagról és az értékeket jegyezzük fel Excel táblázatba! A csoport összes mérési eredményét összegezzük egy közös táblázatba, hogy jelentősen növelni tudjuk az elvégzett kísérletek számát, megbízhatóbb statisztikát generálva ezzel. A közös táblázat alapján célszoftver segítségével közösen kiértékeljük a kísérletet. Első lépésben egy Pareto-diagramot készítünk, melyen megvizsgáljuk, hogy a konkrét esetben mely bemeneti paraméterek bizonyulnak szignifikánsnak. A lényeges változók hatását közösen kiértékeljük.

III. táblázat. A teljes faktoriális kísérlet paraméterei.

Kísérlet sorszáma	Pin Elevation	Bungee Position	Cup Elevation	Release Angle
1	120	120	220	140
2	180	120	220	140
3	120	180	220	140
4	180	180	220	140
5	120	120	280	140
6	180	120	280	140
7	120	180	280	140
8	180	180	280	140
9	120	120	220	180
10	180	120	220	180
11	120	180	220	180
12	180	180	220	180
13	120	120	280	180
14	180	120	280	180
15	120	180	280	180
16	180	180	280	180

4. Céltértekre optimalizálás

Ha egy teljes faktoriális kísérletet elvégeztünk akkor a rendszerünk viselkedése kiszámítható. Gyakran előfordul, hogy a kimeneti változó értékét egy konkrét céltértekre kell állítani, mert az a megrendelői követelménye. (pl. egy egyenirányító dióda nyitófeszültsége legyen pontosan 1,2V). Ez sok bementi változóval és komplex egymásra hatás mellett sokszor nem egyszerű feladat. Vizsgáljuk meg a katapult esetében mennyire megy ez intuitív utón! Szisztematikus próbálgatás útján próbáljunk meg egy előre rögzített célt eltalálni és jegyezzük fel az ehhez szükséges próbálkozások számát és távolság értékeit.

A teljes faktoriális kísérletek elvégzése során előállt eredmények alapján, célszoftver segítségével határozzuk meg a faktoroknak azon beállításait, melyek az előre rögzített cél eléréshez szükségesek! Állítsuk be a program által javasolt bemeneti paramétereket és végezzük el a hajtást legalább 10-szer. Nézzük meg, hogy a javasolt beállítások mellett milyen szórással vagyunk képesek a cél eltalálására.

Hasonlítsuk össze a módszer hatékonyságát az próbálgatáson alapuló módszer hatékonyságával!

Ellenőrző kérdések

1. Milyen esetekben előnyös a kísérlettervezési módszertanát használni?
2. Mit nevezünk faktornak és milyen jellemzőkkel kell ideális esetben bírnia?
3. Mit nevezünk szintnek?
4. Mitől függ az elvégzendő kísérletek száma DOE módszertan alapján?
5. Mit ábrázolunk Pareto-diagramban és mi olvasható ki belőle?