

稳健设计方法及其在包装印刷机械设计中的应用

李艳¹, 袁英才^{1,2}

(1. 北京印刷学院, 北京 102600; 2. 中南大学, 长沙 410083)

摘要: 简要介绍了稳健设计方法及其在机械、机构设计中的基本模型, 以卷筒纸印刷机折页机构设计为例, 对稳健设计方法在包装印刷机械行业的应用进行研究和探讨。

关键词: 稳健设计; 包装印刷; 机械设计

中图分类号: TS851⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2007)06-0052-03

Robust Design and Its Application in Packaging & Printing Machinery Design

LI Yang¹, YUAN Ying-cai^{1,2}

(1. Beijing institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2. Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The general theory of robust design and its basal model in machinery design was introduced.

AS an example of the design of foldout mechanism in rotary press, the application of robust design in packaging and printing was studied and discussed.

Key words: robust design; packaging and printing; machinery design

稳健设计方法作为一种降低生产成本提高产品质量的现代设计手段, 在电子、化工、钢铁、纺织、汽车等行业广泛应用, 产生了巨大的经济效益。然而, 在作为我国机械工业中 10 大行业之一的包装印刷机械行业, 稳健设计方法却还没有得到有效的应用。结合包装印刷机械发展趋势, 分析包装印刷机械特点, 积极推广稳健设计方法在包装印刷机械行业的应用, 对我国包装印刷机械的进一步发展具有非常现实的意义。

1 稳健设计方法

稳健设计方法的研究与使用始于第 2 次世界大战后的日本, 田口玄一博士(Dr. Genichi Taguchi)于上世纪 70 年代创立了以试验设计和信噪比设计为核心的 3 次设计方法, 确立了稳健设计方法的基本原理。3 次设计法的内容是: 系统设计(又称第一次设计), 提出初始设计方案; 参数设计(又称第 2 次设计), 寻求参数的最佳搭配, 提高产品性能的稳定性, 它是 3 次设计的核心; 容差设计(又称第 3 次设计), 利用损失函数给关键件以合适的容差(公差)范围。近年来, 随着计算机技术、优化设计和 CAD 技术的发展, 为以 3 次设计法为代表的传统的稳健设计方法注入了许多新的内容, 逐渐形成了现代的稳健设计方法。

目前有关机械稳健设计的方法大体上可分为两类: 一类是以经验或半经验设计为基础的传统的稳健设计方法, 主要有田

口稳健设计法、响应曲面法、双响应曲面法、广义线性模型法等。另一类是以机械工程模型为基础与优化技术结合的机械稳健优化设计方法, 主要有容差多面体法、灵敏度法、变差传递法、随机模型法等^[1-3]。

2 机械稳健设计的基本模型

机械产品的性能和质量受许多因素影响, 而消除这些影响因素实际上很难做到, 即使能做到也要花费很大力气和很高的费用。稳健设计方法通过调整设计变量及控制其容差(公差), 使产品性能对影响因素变化的敏感性最小。

影响因素主要来自机械、机构在设计、制造和使用过程 3 个方面, 一般分为可控因素和不可控因素两类。可控因素是指那些在设计和制造中可以控制的因素, 即设计变量, 一般表示为:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

每一个可控因素 x_i 都是随机的, 在设计时应控制其容差 Δx^- , Δx^+ , 即偏差 δx_i 的最大允许范围为: $\Delta x^- \leq \delta x \leq \Delta x^+$ 。定义以均值 \bar{x}_i 为中心, 以容差 $\Delta x = |\Delta x^-| + |\Delta x^+|$ 为边长的 n 维多面体:

$$T(x, \Delta x) = \{x \mid \Delta x_i^- \leq x_i - \bar{x}_i \leq \Delta x_i^+ \} \in R^n \quad (2)$$

称为可控因素设计空间。

不可控因素是指那些在机构设计和制造过程中难于控制的因素, 即为“噪声因素”。主要包括 3 种类型: 外噪声(如环

收稿日期: 2007-02-01

基金项目: 北京市教委资助项目(KM200510015005)

作者简介: 李艳(1965-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 北京印刷学院副教授, 主要从事印刷机械现代设计理论及方法的研究。

境、工况)、物间噪声(如加工误差)和内噪声(如老化或磨损)一般表示为:

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_n)' \quad (3)$$

不可控因素也具有随机性,在设计时一般应已知其分布类型和分布参数(或特征值),这样每个不可控因素都可表示分布参数 α_i, β_i 和 γ_i 的函数:

$$z_i = \varphi(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

式(4)中, $\varphi(\cdot)$ 为分布函数; α_i, β_i 和 γ_i 分别为概率密度函数的位置参数、形状参数和尺寸参数。

机构的性能质量指标 y 受可控因素和不可控因素的影响,因此, y 可以表示成 x, z 的函数,即:

$$y = y(x, z) \quad (5)$$

约束函数的一般表示为:

$$g_u(x, z) \leq 0 \quad (u=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

考虑约束函数的随机性,式(6)可以用概率约束表示:

$$P \{ g_u(x, z) \leq 0 \} \geq \lambda_u \quad (u=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

或当随机约束相关时,

$$P \{ (g_1(x, z) \leq 0) \cap (g_2(x, z) \leq 0) \cap \dots \cap (g_m(x, z) \leq 0) \} \geq \lambda \quad (8)$$

式(7)、(8)中, λ_n 与 λ 为约束函数需要满足的概率值,根据实际设计要求取值。由此,机构稳健设计约束可行域即为概率约束条件组成的约束空间。

机构稳健设计既要保证机构的运动精度,又要保证机构运动质量的稳健性,因而有 2 个设计准则:

1) 优质性准则。机构的质量特性有望目特性、望大特性、望小特性等。以机构的质量特性是望目特性为例,考虑质量特性的随机性,质量特性 $y_i (i=1, 2, \dots, q)$ 的统计平均值 \bar{y}_i 与目标值 y_0 之差的加权平方和越小,质量越优。

$$L_1(\bar{y}) = \sum_{i=1}^q \kappa_i (\bar{y}_i - y_0)^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

式(9)中, κ_i 为加权系数。

2) 稳健准则。质量特性稳健性准则,应使每一项质量特性的波动尽可能小,即

$$L_2(y) = \sum_{i=1}^q v_i S_{y_i}^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

式(10)中, v_i 为加权系数; $S_{y_i}^2$ 为统计方差。显然 $L_2(y)$ 值越小,质量特性的稳健性越强。

综合以上两项准则,可以建立如下目标函数:

$$L(y) = \omega_1 L_1(y) + \omega_2 L_2(y) \rightarrow \min \quad (11)$$

式(11)中, ω_1, ω_2 为加权系数。

综上所述,基于随机概率的机构稳健数学模型建立如下:

$$\left. \begin{aligned} x &= (x_1, x_2, \dots, x_n)' \in R^n \\ L(y) &= \omega_1 L_1(y) + \omega_2 L_2(y) \rightarrow \min \\ \text{st } P \{ g_u(x, z) \leq 0 \} &\geq \lambda_u \quad u=1, 2, \dots \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U \quad \Delta x_i^L \leq \Delta x_i \leq \Delta x_i^U \\ x, z &\in (\Omega, T, P) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)中,上标 U 和 L 分别表示上、下界限值; $\lambda_u (u=1, 2, \dots, m)$ 为 m 个随机约束条件应满足的概率值; (Ω, T, P) 为概率空间, Ω 为随机事件, T 为事件全体, P 为事件发生的概率^[3]。

3 稳健设计方法在包装印刷机械行业的应用

随着人民生活水平的提高,人们对产品包装的需求量不断加大,也对产品的包装提出了更高的要求,这为我国包装及包装印刷机械行业提供了广阔的发展空间,也提出了新的挑战。我国包装印刷机械行业经过 50 多年的发展,无论是在产品产量方面,还是在品种种类方面都取得了令人瞩目的成就。面对新的发展形势,包装印刷机械行业未来重点发展方向是,通过各种高新技术、新设计理论和手段、新的控制方法不断应用,使机器高速、高效、高质量^[5]。新的包装印刷机械应当具有质量和性能稳定可靠、节能降耗环保、自动化程度高、人性化设计等特点。

稳健设计方法与包装印刷机械发展方向相适应,它在包装机械行业的应用将有利于提高包装印刷机械的质量和稳定性,同时又能降低产品的成本。四杆机构是包装印刷机械中常见的机构,卷筒纸印刷机折页机构就是利用四杆机构来实现折刀运动,运用稳健设计方法对其进行设计。

3.1 折页机构稳健设计

卷筒纸印刷机折页机构折刀运动简图见图 1。折刀安装在折刀杆 l_5 上,折刀杆 l_5 与摇杆 l_3 固接在一起,在折纸过程中,其运动轨迹与两传纸辊中心连线的垂线的偏差越小越好。同时,通过调整曲柄 l_1 的长度可以调节折刀向下运动的极限位置。

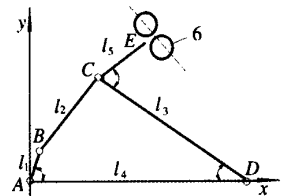


图 1 折页机构运动简图
Fig. 1 The kinematic sketch of foldout mechanism

取各构件尺寸 l_i 及摇杆 l_3 与折刀杆 l_5 的夹角 β 作为设计变量:

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (l_1, l_2, l_3, l_4, \beta) \quad (13)$$

对于不可控因素,主要考虑尺寸加工误差。由于大多数机构的结构尺寸误差呈正态分布且大小随名义值增大而增大,设计时引入离散系数的概念将公差和设计变量联系起来,即

$$\delta_i = \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (14)$$

利用 3σ 原则,得到:

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \Delta x_i = \frac{1}{3} \delta_i x_i \quad (15)$$

该四杆机构的稳健设计模型以机构输出精度为目标。目标函数可表示为:

$$L(x) = L_1(x) + \omega L_2(x) \rightarrow \min \quad (16)$$

式(16)中, $L_1(x) = \sum_{k=1}^n (E(u_k) - u_{k0})^2$, 代表机构结构误差, $E(u_k)$ 为输出变量在 k 位置的均值, u_{k0} 为输出变量在 k 位置的理想值; $L_2(x) = \sum_{k=1}^n Vu_k$, 代表机构机械误差, Vu_k 为输出变量在 k 位置的方差; ω 为加权系数, 控制均值与方差的关系。

曲柄约束条件为:

$$x_1 + x_4 - x_2 - x_3 - \omega \sqrt{V_{x_1} + V_{x_2} + V_{x_3} + V_{x_4}} \leq 0 \quad (17)$$

式(17)中, $V_{x_1}, V_{x_2}, V_{x_3}, V_{x_4}$ 为各杆长的方差。

传动角计算公式为:

$$\gamma_i = \arccos\left(\frac{x_3^2 + x_4^2 - x_2^2 - x_1^2 + 2x_1x_2\cos\alpha_i}{2x_3x_4}\right) \quad (18)$$

机构传动角约束:

$$\gamma_i - [\gamma]_{\min} - k \sqrt{V_{\gamma_i}} \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

式(19)中, $[\gamma]_{\min}$ 为传动角最小值, V_{γ_i} 第 i 个位置处传动角的方差^[6]。

3.2 计算结果分析

原设计方案, 设计变量见表 1, $\Delta l_i = \pm 0.3 \text{ mm}$, $\Delta \beta = \pm 0.5^\circ$ 。

表 1 原设计方案各参数数值

Tab. 1 Reference values of original design

曲柄 l_1	连杆 l_2	摇杆 l_3	机架 l_4	支臂 l_5	支臂角 β
/ mm	/ mm	/ mm	/ mm	/ mm	/ ($^\circ$)
66	158	424	484	184	80

稳健设计中, 取目标函数和约束条件满足概率为 99.73%, $\omega = 3$, $\Delta l_i = \pm 0.5 \text{ mm}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), $\Delta \beta = \pm 0.5^\circ$, 计算结果见表 2。

表 2 稳健设计方案各参数数值

Tab. 2 Results of robust design parameters

曲柄 l_1	连杆 l_2	摇杆 l_3	机架 l_4	支臂 l_5	支臂角 β
/ mm	/ mm	/ mm	/ mm	/ mm	/ ($^\circ$)
53.24	160.75	422.24	470.18	195.87	77

稳健设计与原设计折刀工作运动轨迹见图 2, 实线表示的是折刀理想的运动轨迹; “+”表示稳健设计折刀工作运动轨迹; “*”表示原设计方案折刀工作运动轨迹。

原设计方案与稳健设计方法结果比较, 稳健设计方法放宽了各杆长的容差(公差)。由图 2 可见, 运用稳健设计方法, 虽然各杆长的容差(公差)范围加大, 而折刀的运动轨迹与理想轨迹的偏差值比原设计方案更小。这说明, 运用稳健设计方法对折刀机构进行设计, 折刀的运动轨迹对各杆长变化量有更好的稳健性, 因而, 稳健设计结果具有更强的实用性与经济性。

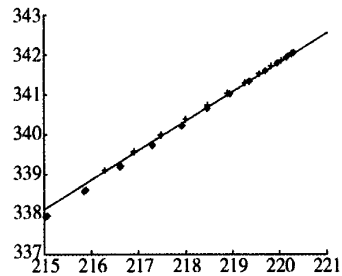


图 2 计算结果分析图

Fig. 2 Analytical sketch based on calculation results

4 结 语

机械稳健设计方法不仅考虑可控因素(设计变量), 还考虑了不可控因素(加工误差)及其随机性对产品质量的影响。综合考虑容差与质量的关系, 既能保证产品的质量, 又可降低产品的成本。在追求高速、高效、高质量包装印刷机械行业中积极推广机械稳健设计, 对提高我国包装印刷机档次, 降低生产成本具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 郭惠昕. 稳健设计研究现状与模糊稳健设计研究进展[J]. 机械设计, 2005, (2).
- [3] 陈入领, 等. 稳健设计研究现状[J]. 机械设计, 2003, (8).
- [4] 谭晓兰, 等. 连杆机构稳健设计一般原理与方法的研究[J]. 机械设计与研究, 2006, (4).
- [5] 邱显焱, 等. ADAMS 及其在包装机械设计领域的应用[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 42-44.
- [6] 张雪雁, 等. 连杆机构稳健性优化设计[J]. 河北理工学院学报, 2005, (4).

稳健设计方法及其在包装印刷机械设计中的应用

作者: [李艳](#), [袁英才](#), [LI Yang](#), [YUAN Ying-cai](#)
作者单位: [李艳, LI Yang \(北京印刷学院, 北京, 102600\)](#), [袁英才, YUAN Ying-cai \(北京印刷学院, 北京, 102600; 中南大学, 长沙, 410083\)](#)
刊名: [包装工程](#) PKU
英文刊名: [PACKAGING ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2007, 28 (6)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. [陈立周](#) [稳健设计](#) 2000
2. [张雪雁](#) [连杆机构稳健性优化设计](#)[期刊论文]-[河北理工学院学报](#) 2005 (04)
3. [邱显焱](#) [ADAMS及其在包装机械设计领域的应用](#)[期刊论文]-[包装工程](#) 2004 (05)
4. [谭晓兰](#) [连杆机构稳健设计一般原理与方法的研究](#)[期刊论文]-[机械设计与研究](#) 2006 (04)
5. [陈入领](#) [稳健设计研究现状](#)[期刊论文]-[机械设计](#) 2003 (08)
6. [郭惠听](#) [稳健设计研究现状与模糊稳健设计研究进展](#)[期刊论文]-[机械设计](#) 2005 (02)

引证文献(2条)

1. [黄海洋](#), [李艳](#), [袁英才](#) [轮转机刀式折页机构运动规律及精度分析](#)[期刊论文]-[中国印刷与包装研究](#) 2010 (6)
2. [黄海洋](#), [李艳](#), [袁英才](#) [轮转机刀式折页机构运动规律及精度分析](#)[期刊论文]-[中国印刷与包装研究](#) 2010 (6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_bzgc200706019.aspx