

田口方法在电磁阻尼器参数设计上的应用

刘慧颖 吴源兵 苑会领 柏合民

(上海宇航系统工程研究所)

摘要 根据对接机构电磁阻尼器的特点和构成,从提高电磁阻尼器输出性能稳定性的角度引入优化设计方法(田口方法),产品测试数据分析取得良好效果。

关键词 对接机构 电磁阻尼器 田口方法 优化设计

分类号 V423.4*3 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2010) 01-0013-04

1 田口方法简介

田口方法(Taguchi method),是由日本著名质量管理专家田口玄一博士从工程、技术、经济的视角,对质量管理的理论与方法进行研究而创立的一种优化设计技术。田口方法也称三次设计法,即系统设计——参数设计——容差设计。田口方法以信噪比(S/N)作为稳定指标进行选优,利用参数的非线性效应,选取最佳参数组合,就可以用三级品的元器件(或公差大的零部件)设计制造出输出特性波动小,稳定可靠的产品。田口方法在航天产品设计中的应用还不多见,本文以电磁阻尼器输出性能为出发点,采用田口方法来提高产品输出性能的稳定性^[1-2]。

2 引言

电磁阻尼器是空间对接机构的耗能部件之一,用于消耗两飞行器对接碰撞过程中产生的动能,其输出力矩的大小及变化量决定着对接过程的平稳与否,直接影响缓冲性能。在以往设计中,通过多次试调个别参数,并提高零件的制造加工精度使输出力矩满足性能指标要求,但试装的几个产品的性能实测结果比较离散。本文采用田口方法对参数进行了优化设计,从而提高电磁阻尼器输出性能的稳定性,降低加工精度要求。

3 电磁阻尼器组成及工作原理

电磁阻尼器为一种特殊的永磁式杯形电枢电机,采用内磁式分立结构,主要由机壳、内定子和转子杯组成,稀土永磁磁钢位于内定子上,转子杯位于磁钢和机壳之间,转子杯由导电性能良好的金属加工而成。当原动机拖动电磁阻尼器旋转时,金属转子杯切割定子磁力线从而在杯中感应出涡流,与磁场相互作用产生阻尼力矩。图 1 为电磁阻尼器结构简图。

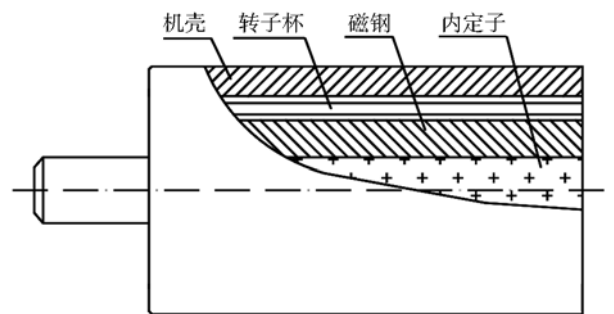


图 1 电磁阻尼器结构简图

4 田口方法的应用设计

4.1 系统设计

通过理论分析和有限元计算,得到电磁阻尼器的转矩计算公式为:

$$M = \frac{\pi}{120\rho} B^2 L D^3 n \cdot \delta \cdot K \quad (1)$$

来稿日期:2008-10-08;修回日期:2009-08-13。

作者简介:刘慧颖(1977.01-)女,硕士,高级工程师,主要从事空间机构与结构研究工作。

式(1)中各参数为:

B :气隙磁感应强度(T)

L :转子杯长度(cm)

D :转子杯平均直径(cm)

n :转子杯转速(r/min)

δ :转子杯厚度(mm)

ρ :转子杯材料导电率($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

K :修正系数

M :转矩(N.cm)

田口方法中的静态特性参数设计,有目标特性参数设计、最小目标特性参数设计、最大目标特性参数设计、计数分类特性参数设计等多种方法。在电磁阻尼器的设计中,我们采用目标特性参数设计法,即存在设计目标值阻尼力矩 M ,希望输出特性越接近目标值 M 越好,用目标特性的 S/N 比来衡量阻尼器输出特性的稳定性。

目标特性 y 的 S/N 比定义如下:

$$\eta = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

式中 $\mu = E(y)$ —— M 的理论平均(数学期望);

$\sigma^2 = D(y)$ —— M 的波动方差。

式(2)是一个理论公式,通常 μ 、 σ^2 真值未知。如果知道 M 的 n 个观测值 M_1, M_2, \dots, M_n ,则可以用下述方法估计 S/N 比,具体步骤如下:

a. 求 σ^2 的估计

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \quad (3)$$

式中 \bar{M} 为 M_1, M_2, \dots, M_n 的平均值

b. 求 μ^2 的估计

$$\hat{\mu}^2 = (\bar{M})^2 - V_e = \frac{1}{n} (S_m - V_e) \quad (4)$$

$$\text{式中 } S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n M_i \right)^2 \quad (5)$$

c. 求 η 的估计

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{\mu}^2}{\hat{\sigma}^2} = \frac{1}{n} \frac{(S_m - V_e)}{V_e} \quad (6)$$

d. 以分贝为单位表示 S/N 比

$$\eta = 10 \lg \frac{1}{n} \frac{(S_m - V_e)}{V_e} \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

4.2 参数设计

4.2.1 建立可控因素水平表及内表

选取转子杯长度 L ,转子杯平均直径 D 和厚度 δ 为可控因素,每个因素选定 3 个水平,优选它们的名

表 1 电磁阻尼器可控因素水平表

因素 \ 水平	L (cm)	D (cm)	δ (cm)
1	$L-0.15$	$D-0.1$	$\delta-0.02$
2	L	D	δ
3	$L+0.15$	$D+0.1$	$\delta+0.02$

义值(或公称值),见表 1。

对于 3 个可控因素的 3 个水平,选用正交表 $L_9(3^4)$ 进行内设计,形成 9 种设计方案,组成内表。

4.2.2 建立误差因素水平表

转子杯长度 L 、转子杯平均直径 D 和厚度 δ 既是可控因素又是误差因素,分别记为 L' 、 D' 和 δ' ;另外,气隙磁感应强度 B 和修正系数 K 也是误差因素,分别记为 B' 和 K' ,这两个误差因素的名义值是固定的,不必优选,见表 2。

4.2.3 外设计及计算分析

选用正交表 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 作为外表,并可以计算输出特性值。通过对输出特性值 M , S/N 比进行计算,并以 S/N 比为指标,对外设计计算结果进行统计分析,可以得到如表 3 所示的结果。

表 2 误差因素水平表

因素 \ 水平	L' (cm)	D' (cm)	δ' (cm)	B' (T)	$K' \times 10^{-4}$
1	名义值-0.15	名义值-0.1	名义值-0.02	名义值-0.03	名义值-0.2
2	名义值	名义值	名义值	名义值	名义值
3	名义值+0.15	名义值+0.1	名义值+0.02	名义值+0.03	名义值+0.2

表 3 内表及 S/N 比数据

No.	L(1)	D(2)	$\delta(3)$	4	μ/dB
1	1(L-0.15)	1(D-0.1)	1(δ -0.02)	1	15.1611
2	1(L-0.15)	2(D)	2(δ)	2	15.5451
3	1(L-0.15)	3(D+0.1)	3(δ +0.02)	3	15.8263
4	2(L)	1(D-0.1)	2(δ)	3	15.4119
5	2(L)	2(D)	3(δ +0.02)	1	15.7133
6	2(L)	3(D+0.1)	1(δ -0.02)	2	15.3780
7	3(L+0.15)	1(D-0.1)	3(δ +0.02)	2	15.5828
8	3(L+0.15)	2(D)	1(δ -0.02)	3	15.2467
9	3(L+0.15)	3(D+0.1)	2(δ)	1	15.6405
\bar{T}_1	15.5108	15.3853	15.2619	15.5050	T=139.5056 \bar{T} =15.5006
\bar{T}_2	15.5011	15.5017	15.5325	15.5019	
\bar{T}_3	15.49	15.6149	15.7075	15.4950	
R	0.0208	0.2296	0.4456	0.01	

表 3 中 $\bar{T}_i(i=1,2,3)$ 为第 i 列水平下的 S/N 比平均值, R 为该列的极值。极差 R 越大, 该因素对 S/N 比的影响就越大, 由表 3 可知, 三个可控因素对 S/N 比的影响主次关系为: $\delta \rightarrow D \rightarrow L$, 其效应图见图 2。

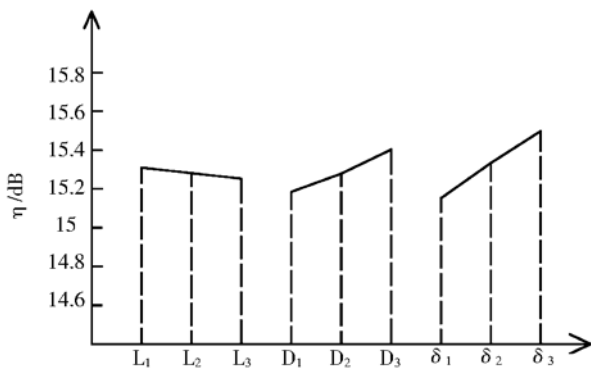


图 2 电磁阻尼器可控因素效果图

4.2.4 初步确定最佳方案

根据 S/N 比越大越好的原则, 选取 L, D 和 δ 的最佳搭配, 得到: $M=35.19N.cm$, 与目标值 $M=35.8N.cm$ 还存在系统偏差, 必须调整。选取对 S/N 比无显著影响的可控因素 L 作为调整因素, 通过力矩计算公式来反向求解 L 值, 最终得到的最佳设计方案为: $L=L(\text{名义值})-0.15, D=D(\text{名义值})+0.1, \delta=\delta(\text{名义值})+0.02$ 。

4.3 容差设计

以参数设计选出的最佳参数为名义值, 按照原误差因素的变化范围, 设计相应于最佳条件的误差因素水平表, 见表 4。选用正交表 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 再次进行外设计, 分别计算各因素引起的波动平方和, 得到如表 5 所示的输出特性方差分析表。

表 4 最佳条件的误差因素

因素 \ 水平	L' (cm)	D' (cm)	δ' (cm)	B' (T)	$K' \times 10^{-4}$
1	$L-0.15$	$D-0.1$	$\delta'-0.02$	名义值-0.03	名义值-0.2
2	L	D	δ'	名义值	名义值
3	$L+0.15$	$D+0.1$	$\delta'+0.02$	名义值+0.03	名义值+0.2

表 5 输出特性的方差分析表

来源	波动平方和 S	自由度 f	方差 V=S/f	纯波动 S'	贡献率 ρ(%)
m	0.2299	1Δ	-	-	-
L'	40.6159	2	20.3079	39.8065	6.95
D'	153.5313	2	76.7657	152.7220	26.67
δ'	62.8740	2	31.4370	62.0646	10.84
B'	286.8492	2	143.4246	286.0400	49.96
K'	24.6176	2	12.3088	23.8082	4.16
e	3.8169	7Δ	-	-	-
(\bar{e})	(4.0468)	(10)Δ	-	-	-
T'	572.5348	18			100

由表 5 可知，对输出波动特性影响最大的误差因素是 B'，约占 50% 的份额。由于电机的生产中加工工艺、热处理等环节存在差异，气隙磁感应强度 B 对于电磁阻尼器来说，是外部干扰，无法加以消除，为进一步减少波动，需从电磁设计和加工上使 B' 波动不至于过大。

若将误差因素 D' 的容差压缩一半，即为 ±0.05，而 L'、δ' 仍保持原来的容差，仍以 L₁₈(2¹×3⁷) 进行外设计，可以算得 $\hat{S}_{D'}=459.0308$ ，则 $\hat{S}_{T'}/\hat{S}_{T'}=459.0308/572.5348=80\%$ ，说明可以将输出特性偏离目标值的波动平方和减小到原来的 80%。

因此，电磁阻尼器的最佳设计方案为：

$$L=L\pm 0.15, D=D\pm 0.05, \delta=\delta\pm 0.02。$$

5 结论

本文提出了用田口方法对电磁阻尼器进行参数优化设计的方法。设计表明，进行优化设计后，获得了比较稳定的输出力矩。在空间机构设计过程中，在找出运动机构的输出特性与相关因素之间关系的基础上，可以尝试用田口方法来进行参数设计，以提高产品输出性能的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 李良巧, 顾唯明, 机械可靠性设计与分析. 北京: 国防工业出版社, 1998
- [2] 陈魁, 试验设计与分析. 北京: 清华大学出版社, 2005

The Application of Taguchi Method in the Design of Electromagnetic Damper

LIU Huiying WU Yuanbing YUAN Huiling BAI Hemin
(Shanghai Institute of Aerospace System Engineering)

Abstract: This paper introduces the character and composition of electromagnetic damper which is used in the docking mechanism. In order to increase the damper's output performance stability, the Taguchi Method has been introduced to modify the design, and proved to be successful according to the products testing data.

Key words: Docking Mechanism; Electromagnetic Damper; Taguchi Method; Optimize Design