https://doi.org/10.1051/jnwpu/202543509 94

约束条件下微小卫星磁力矩器关联分析方法

罗怀金, 白博, 周军

(西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072)

摘 要:磁力矩器作为微小卫星姿态控制系统的重要组成部分,肩负着卫星姿态稳定、姿控系统卸载等任务。应用于微小卫星的磁力矩器影响因素较多以及现阶段工程精度的限制,导致实际工程制造的产品难以达到理论上的最优设计结果。通过数据挖掘中关联规则挖掘的方法,探究不同因素对于产品指标影响程度的大小,进而为实际产品制造给出决策建议。研究单个因素对磁力矩器输出的影响模式,揭示了不同参数对输出磁矩的影响规律;运用机器学习算法中的 Apriori 算法研究不同因素对最终指标结果的影响程度,对导致指标变化的不同影响因素进行评价;通过仿真实验分析验证了方法的可行性,得到了对产品性能影响最大的因素。从数据出发,抽象出了有利于对后续优化设计进行比较和判断的参考经验,为未来磁力矩器设计与制造提供了新的研究思路与技术支撑。

关 键 词:微小卫星;磁力矩器;Apriori;关联分析

中图分类号:V448.22 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2025)05-0994-09

由于微小卫星具有成本低、研制周期短、质量和体积小等诸多优点[1],微小卫星技术迅猛发展,是当前空间技术发展的重要方向之一[2-4]。磁力矩器作为微小卫星姿控系统的主要执行机构[5],广泛应用于低轨道微小卫星的姿态控制和动量管理[6],也常用于星上飞轮的角动量卸载[7]。相比于姿态控制系统的其他执行机构,磁力矩器具有简单可靠、成本相对较低等优点。但是由于磁力矩器多应用于微小卫星,而微小卫星在设计时要考虑自身体积小、质量轻和功耗低的条件限制,所以磁力矩器在设计时,需要在满足上述约束条件的前提下,实现更高的输出力矩。

一方面,针对有约束条件的磁力矩器设计,文献[8-9]根据技术要求先确定磁矩,再由磁矩公式反推出设计尺寸;文献[10]针对空芯磁力矩器,利用穷举法得到一种最优方案;文献[11-12]分别就空芯磁力矩器建立了优化模型,并采用多目标优化算法得到了一种可行的优化方案;文献[13-14]针对带磁芯的磁力矩器,分别建立了不同的物理模型和目标函数,并都进行了多目标优化以得到最优设计方案;文献[15]分析了影响带磁芯磁力矩器磁矩的各项参数,并同样给出了一种设计方案。

上述研究虽然给出了在各自指标要求下的设计方案,但是并没有深究哪一设计因素对磁力矩器的性能影响最大,优化后的结果均是在理论意义上的最优值,得到的某些参数精度在工程上难以达到,如果将其直接用于工程中,会出现一定的偏差,从而导致实际产品和设计结果不相符。并且对于磁力矩器设计与研制过程中的大量数据,包括仿真数据和实验数据,对其研究随着满足指标要求而终止,其中蕴含的深层次信息没有得到充分挖掘和利用。

另一方面,大数据已经产生于人们生活中的诸多领域,数据挖掘也成为大数据处理研究领域的重点之一[16]。关联分析也即关联规则挖掘作为数据挖掘最为重要的分支之一,最早由 Agrawal 等[17]提出,是一种分析数据库中案例之间关联性的方法,该方法通过检测事件中频繁出现的元素来确定多个序列之间是否存在关联性。通过适当的指标来衡量不同属性序列之间的相关性强度,其中应用最为广泛的就是 Apriori 算法[17],例如:文献[18]用它来分析造成铁路事故的风险因素;文献[19]利用它来进行气旋强度预测;文献[20]采用 Apriori 算法对飞机冲偏出跑道数据集开展关联分析,挖掘出不同诱发因

收稿日期:2024-09-18

作者简介:罗怀金(1999—),硕士研究生

通信作者:白博(1982—),副教授 e-mail:wuxian4683@nwpu.edu.cn

素之间的关联规则。相比于其他算法,Apriori 算法更适合稀疏的数据集,更易于实现,没有针对性特别强的应用场景,可以用于各种类型的数据集。这恰恰契合本文中磁力矩器设计过程中的仿真数据特点,并且目前来看,Apriori 算法在电商、金融经济、生物医学、故障诊断等多种领域已经有了广泛的应用,是一种最有影响力的挖掘关联规则算法。

因此通过数据挖掘技术对磁力矩器设计所产生的仿真数据和实验数据进行研究,通过关联规则挖掘算法建立磁力矩器性能和各设计参数之间的关联描述,对于进一步优化磁力矩器设计、充分发挥微小卫星姿控系统内部潜力具有重要意义。

本研究以关联分析为核心,通过 Apriori 算法挖掘关键设计参数对磁力矩器性能的影响程度,然后以一项优化设计过程为例,验证了关联分析结果的准确性,为指导实际工程应用,提高磁力矩器的性能指标指明了方向。

1　关联规则及算法原理

1.1　关联规则

关联规则分析是数据挖掘中最活跃的研究方法之一,目的是在一个数据集中找到各项之间的关联关系,而这种关系并没有在数据中直接体现出来,需要进行进一步挖掘。

这种关系可以通过关联规则来发掘。当 A,B 分别是一事务的真子集,且 $A \cap B = \varnothing$ 时,$A \rightarrow B$ 就是一条关联规则,关联规则能反映出 A 中的项目在事务中出现时,B 中的项目也跟着出现的规律。可以通过计算关联规则的支持度与置信度来衡量相应规则在事务集中出现的频繁程度。支持度可以衡量 A 和 B 同时出现的频率,置信度是 A 导致 B 出现的概率。计算方法如(1)~(2)式所示。

$$\sup(A \rightarrow B) = P(A \cup B) = \frac{c(A \cup B)}{c(C)} \tag{1}$$

$$\mathrm{conf}(A \rightarrow B) = P(B \mid A) = \frac{P(A \cup B)}{P(A)} \tag{2}$$

式中:$\sup(A \rightarrow B)$ 为关联规则 $A \rightarrow B$ 的支持度;$\mathrm{conf}(A \rightarrow B)$ 为置信度;$c(A \cup B)$ 为事务集 A 和 B 同时出现的计数;$c(C)$ 为事务集 C 的总计数。

因此,关联规则挖掘就是从事务集 C 中,找出其所有的支持度和置信度分别大于最小支持度及置信度的关联规则,支持度和置信度越高,就表示该关联规则越强。

而对于两序列间的关联规则,假设有 X,Y 两变量的数据序列,通过滑动窗口对其进行切割,分别得到 N 个子序列,对这些子序列进行相应计算,如果其中有 n 条规则满足最小支持度,则两序列之间关联度和置信度为

$$\mathrm{cor}(X \rightarrow Y) = \sum_{i=1}^{n} \sup(X_i \rightarrow Y_i) \tag{3}$$

$$\mathrm{conf}(X \rightarrow Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \mathrm{conf}(X_i \rightarrow Y_i) \tag{4}$$

1.2　Apriori 算法

Apriori 是一种经典的关联规则挖掘算法,其主要思想是通过不断迭代的方式获取每一层级的频繁项集,直到不能产生新的频繁项集为止,使得到的频繁项集与预先设定的最小支持度阈值生成强关联规则。其主要步骤如图 1 所示。

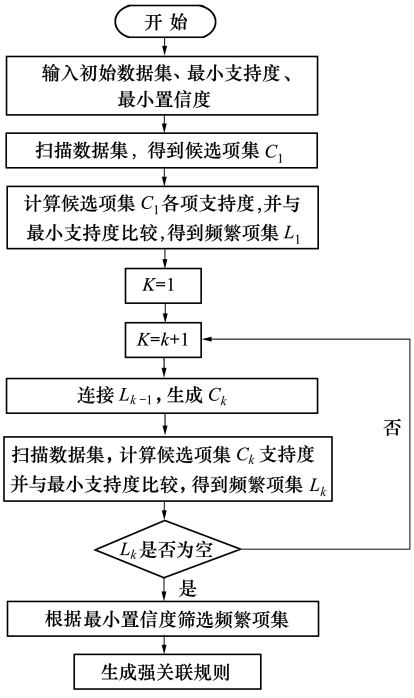

图 1　Apriori 算法流程图

利用 Apriori 算法,可以实现快速挖掘出频繁项集,进而快速找到关联规则。

2　微小卫星磁力矩器建模与初步分析

2.1　磁棒模型

作为卫星磁控系统的主要部件,带磁芯的磁力

矩器一般是在圆柱形磁芯上绕制导线制成的,其具体结构简图如图 2 所示,其中 l 为磁芯长度,r_1 为磁芯半径,r_w 为导线半径,r_2 为在磁芯上绕制导线之后的半径,I 为通过导线的电流,A 为磁芯的横截面积。

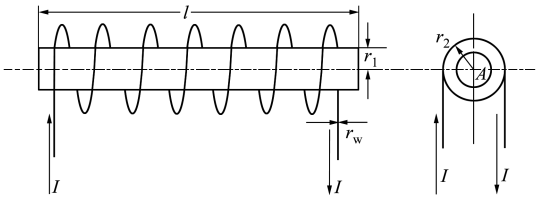

图 2 磁力矩器结构简图

假设导线在绕制时,每一根之间都是紧密贴合的,并且当在磁芯上绕满第一层时,可以在其上没有空隙地绕制下一层。这样,当在磁芯上绕了 n 层导线后,所绕制的总匝数可以表示为

$$N = n\frac{l}{2r_w} \tag{5}$$

由于导线之间是没有空隙的,绕线层数 n 可以表示为

$$n = \frac{r_2 - r_1}{2r_w} \tag{6}$$

绕在磁芯上的第一层导线的某一圈周长为 $2\pi(r_1 + 2r_w)$,紧挨着这一层上面一层导线的一圈周长为 $2\pi(r_1 + 2r_w + 2r_w)$,以此类推,那么第 n 层的导线一圈周长为 $2\pi(r_1 + 2nr_w)$,考虑到每层都有 N/n 匝导线,那么所用导线的总长就可以表示为

$$L_w = \frac{N}{n}[2\pi(r_1 + 2r_w) + 2\pi(r_1 + 4r_w) + \cdots + 2\pi(r_1 + 2nr_w)] = 2\pi N[r_1 + (n+1)r_w] \tag{7}$$

记导线的电阻率为 ρ,则导线的总电阻为

$$R = \rho L_w/S_w = \rho\frac{l}{4r_w^4}[r_2^2 - r_1^2 + 2r_w(r_2 - r_1)] \tag{8}$$

若假设在漆包线两端所施加的电压为 U,那么通过漆包线的电流 I 就可以表示为

$$I = \frac{4Ur_w^4}{\rho l[r_2^2 - r_1^2 + 2r_w(r_2 - r_1)]} \tag{9}$$

根据文献[21]的结论,磁芯所产生的磁矩为

$$M = NIA/k_1 \tag{10}$$

式中,k_1 为与磁芯材料有关的参数,其具体形式可以表示为

$$k_1 = \frac{1}{\mu_r} + \frac{4[\ln(l/r_1) - 1]}{(l/r_1)^2 - 4\ln(l/r_1)} \tag{11}$$

式中,μ_r 为磁芯材料的相对磁导率。(11) 式只有在 $r_1 \ll l$ 的时候才成立。

将(5) 式、(9) 式及(11) 式都代入到(10) 式中,得到磁矩的一般表达式

$$M = n\frac{l}{2r_w}\frac{4Ur_w^4}{\rho l[r_2^2 - r_1^2 + 2r_w(r_2 - r_1)]}\pi r_1^2/k_1 \tag{12}$$

经过化简,可得到带磁芯磁力矩器的磁矩公式

$$M = \frac{Ur_w^2\pi r_1^2}{\rho[r_2 + r_1 + 2r_w]k_1} \tag{13}$$

根据电压 U 以及(9) 式,可以得到功耗公式

$$P = \frac{4U^2r_w^4}{\rho l[r_2^2 - r_1^2 + 2r_w(r_2 - r_1)]} \tag{14}$$

由(13)式可以看出,在电压一定的情况下,增大导线半径、磁芯半径、磁芯长度,减少绕线匝数,选用较小电阻率的导线材料,选用较大相对磁导率的磁芯材料,都可以在一定程度上增大磁矩。但是由于各因素的数量级与量纲不同,只能得到大致影响方向,无法得出到底是哪一设计参数对磁矩的性能影响程度最大。

此外,由于立方星内磁力矩器在设计时会受到尺寸和功耗的约束,需要在尽可能低的功耗下实现尽可能大的磁矩,只追求某一变量的最优必然导致另一变量的恶化,因此在进行设计时要充分考虑到两者之间的关系,寻找平衡点。根据遗传算法求解多目标优化问题的思路,可以定义一个目标函数,使得求解多个变量最优的问题转为求解某一变量最优,并且这个新的变量在一定程度上就代表了磁力矩器的整体性能。因此可以令

$$f = \frac{0.5}{M} + 0.5P \tag{15}$$

式中,f 在一定程度上就代表了磁力矩器的性能,f 越小,代表一定程度下磁矩越大,同时功耗越小,即磁力矩器的性能越好。

因此本文选用磁芯长度、磁芯半径、磁芯材料相对磁导率、绕线用导线半径、绕线匝数、导线电阻率为输入变量,目标函数 f 为输出变量,进一步分析哪一设计因素的影响程度是最大的,探索关联分析对磁力矩器设计的参考作用。

2.2 数据转换

按 Apriori 算法流程,需要输入某一数据集,但

是算法所要求的数据类型为布尔型，而微小卫星磁力矩器设计所得参数均为数值型，无法直接应用。为了满足 Apriori 算法对输入数据的类型要求，本文采用数据转换的方法。

1）取长度为 l 的滑动窗口，对长度为 L 的原始数据进行切割，得到 N 个子序列；

2）对每一个子序列采用最小二乘法进行数据拟合得到每一子序列的斜率；

3）对斜率进行标准化处理，使其映射在[- 1，1] 区间内；

4）按表 1 所示的符号转化规则，根据每一子序列斜率与符号对应关系进行转化。

表 1　子序列符号化规则

范围	磁矩 M	功耗 P	目标函数 f	设计参数 x_i
[-1，-0.6)	ma	pa	fa	ia
[-0.6，0.2)	mb	pb	fb	ib
[-0.2，0.2)	mc	pc	fc	ic
[0.2，0.6)	md	pd	fd	id
[0.6，1]	me	pe	fe	ie

这样就将数值型数据转化为符号类数据，进而采用 Apriori 算法进行关联规则挖掘，此时其计算流程如图 3 所示。

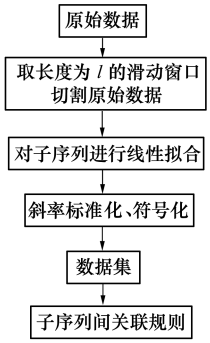

图 3　关联分析流程图

3　基于磁力矩器设计数据的关联分析

为了获取仿真数据，在 COMSOL 软件中进行磁力矩器的建模，通过改变不同设计参数值，得到不同情况下的磁力矩器设计情况，并通过 COMSOL 软件进行相应的模拟计算得到磁矩值和功耗值，进而计算得出对应的目标函数值。

假设各序列按以下规则编号：目标函数序列为 F，磁芯长度为 X_1，磁芯半径为 X_2，绕线用导线半径为 X_3，绕线后磁棒半径为 X_4，导线电阻率为 X_5，磁芯相对磁导率为 X_6。通过随机改变 6 种设计参数的取值，得到 7 720 组原始数据，其部分原始数据可视化如图 4 所示。

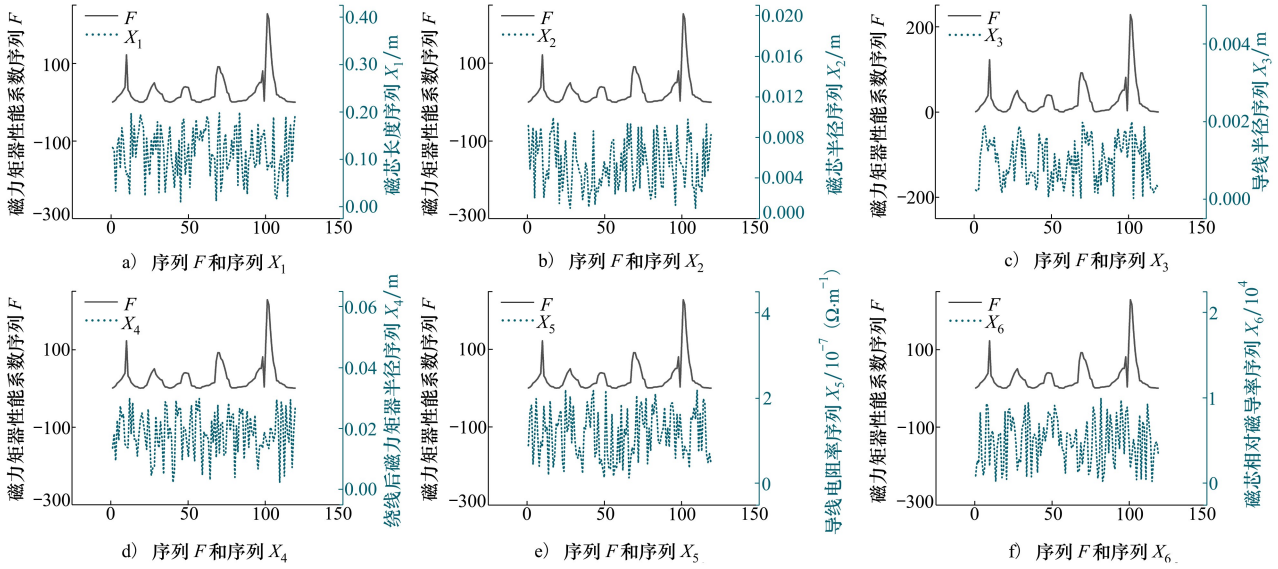

图 4　磁矩序列和各设计参数序列部分原始数据比较

由图 4a) ~4f) 可以看出，序列 F 和序列 X_i 变化趋势均大致相同，当 X_i 序列发生变化时，F 序列也会相应发生变化。在采样点 100 附近时，6 种 X_i 序列变化趋势明显，波动剧烈，对应采样点的 F 序列，也在 0 ~ 200 之间波动剧烈，变化明显，并且序列 X_i 的峰值区域和序列 F 的峰值区域基本一一对应，例如在图 4c) 中采样点 10，30，40，75，100 附近，当 X_3 序列出现较大峰值时，F 序列也会出现较大峰值。但是还可以看到，在大部分范围内，当 X 序列发生变化时，F 序列反而没有较大变化，变化较为平稳。

初步认为代表磁力矩器性能的目标函数值和以上 6 种影响因素之间均存在着某种关联，但是这种关联关系相对来说较为模糊，关联关系比较薄弱，所以采用 Apriori 算法对目标函数和 6 种影响因素分别进行关联分析。

设滑动窗口为 10，数据集长度为 7 720，可将各参考序列截为 772 个子序列，根据符号转换规则对不同序列进行拟合和符号化，考虑到研究磁力矩器性能和其不同设计参数的关联度时所用方法相同，故只列出目标函数和磁芯长度两参考序列在进行拟合和符号化后所得结果，如图 5 所示。

从图 5 中可以看到，虽然经过了一定处理，但是符号化结果与原始数据整体趋势之间十分吻合，未破坏原始数据的特点，并且经过处理后的数据能够

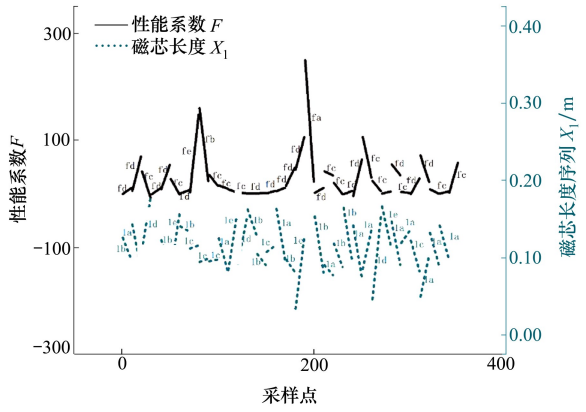

图 5 F 和 X_1 子序列符号化结果

更直观地展现出两序列之间的共同特点。图 5 中一部分数据点，参考序列和各比较序列之间的符号化后数据斜率基本一致，但是另一部分情况仍然较为杂乱。

因此采用 Apriori 算法通过寻找序列之间的频繁项集，挖掘出相应的关联规则，计算出子序列之间的支持度和置信度，然后由(3) ~ (4)式可得两序列之间的关联度和置信度。

在本文中，设定子序列间规则的最小支持度为 0.2，最小置信度为 0.5，序列之间的最小关联度为 0.5，通过计算得出结果如表 2 所示。

表 2 子序列支持度和置信度以及序列间关联度和置信度

设计参数序列	强关联规则	支持度	置信度	F 和 X_i 关联度	F 和 X_i 置信度
X_1	1b→fb	0.227 9	0.983 2	0.897 8	0.975 7
	1d→fb	0.262 9	0.971 2		
	1c→fb	0.407 0	0.972 8		
X_2	2d→fb	0.287 5	0.965 2	0.721 4	0.972 4
	2c→fb	0.433 9	0.979 5		
X_3	3c→fb	0.435 2	0.973 9	0.915 7	0.972 4
	3d→fb	0.246 1	0.974 3		
	3b→fb	0.234 4	0.983 6		
X_4	4c→fb	0.446 8	0.988 5	0.894 9	0.977 6
	4b→fb	0.202 0	0.975 0		
	4d→fb	0.246 1	0.974 3		
X_5	5b→fb	0.270 7	0.976 6	0.885 9	0.978 7
	5d→fb	0.220 2	0.988 3		
	5c→fb	0.395 0	0.971 3		
X_6	6b→fb	0.235 7	0.994 5	0.874 2	0.977 5
	6c→fb	0.387 3	0.958 3		
	6d→fb	0.251 2	0.979 7		

表 2 中 F 和 $X_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 的关联度表示不同设计参数与磁力矩器性能的关联度大小,即不同因素对磁力矩器性能的影响程度。通过表 2 给出的结果可以看出,F 和 X_i 之间的关联度均大于最小关联度阈值 0.5,即 6 种因素与磁力矩器的性能都有着强关联性。其中,磁力矩器性能系数序列和导线半径序列之间的关联度最大,为 0.915 7,这表示绕线用导线半径对于磁力矩器性能的影响程度最大;其次就是关联度为 0.897 8 的磁芯长度序列,这表示磁芯长度对于磁力矩器性能的影响程度次之;其他设计因素的关联度大致相当,这表明其他设计因素的影响程度相对均衡,并且要小于导线半径和磁芯长度的影响。因此可以得出结论,在影响磁力矩器性能的种种因素中,导线半径起着关键性的作用,导线半径微小的变化都会使得磁矩发生非常大的改变。

以上分析结果对于从理论设计到实际产品制造提供良好的决策建议,能够更加明确影响指标的主要因素,从而为提高磁力矩器的性能指标指明方向。

4　基于关联分析结果的优化验证实验

为验证关联分析结果的准确性,基于上述关联规则,将以 1 项从理论优化到实际生产全过程的例子出发,通过构建遗传算法优化模型以验证关联规则的实际指导价值。并通过理论最优解与实际应用偏差的对比,检验关联规则的工程适用性。以某设计要求为例进行相应验证。已知给定部分技术指标如表 3 所示。

表 3　磁力矩器部分设计技术指标

磁矩/A·m²	尺寸	功耗/mW	供电/V
>0.45	80 mm×20 mm×15 mm	<300	3.3

在本文考虑的设计参数中,由于导线电阻率和磁芯材料的相对磁导率值取决于所用材料的材质,一般情况下只有当两者材料发生改变时,两参数的值才会发生改变,实物分析时若考虑全部参数所用材料将会很多,成本较大;另外改变后的值相对固定,在连续性优化过程中难以取值;并且根据表 2 的分析结果,两参数即序列 X_5,X_6 对于磁矩大小的影响并不是最大的。故选取磁芯长度 l、磁芯半径 r_1、导线半径 r_w、绕线后磁力矩器半径 r_2 4 个设计参数为优化变量,即

$$\boldsymbol{x}=[x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^{\mathrm{T}}=[l \quad r_1 \quad r_w \quad r_2]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

将(16)式代入到(13)~(14)式中,并令 $f_1(\boldsymbol{x})=M$,$f_2(\boldsymbol{x})=P$,那么优化目标为

$$\begin{cases}\max f_1(\boldsymbol{x})\\ \min f_2(\boldsymbol{x})\end{cases} \tag{17}$$

目标函数就可以表示为

$$F(x)=\frac{0.5}{f_1(\boldsymbol{x})}+0.5f_2(\boldsymbol{x}) \tag{18}$$

根据表 3 指标要求,优化问题需满足以下约束条件

$$\begin{cases}0.001\ \mathrm{m}<r_1<r_2\\ r_1<r_2<0.075\ \mathrm{m}\\ 0.000\ 01\ \mathrm{m}<r_w<0.000\ 5\ \mathrm{m}\\ 0.01\ \mathrm{m}<l<0.08\ \mathrm{m}\\ P<0.33\ \mathrm{W}\end{cases} \tag{19}$$

初始化种群个体时,通过 Matlab 中 rand 函数在以上变量范围内随机生成满足约束的初始个体,进而将其转为二进制编码形式来进行接下来的选择、交叉、变异等操作。并设定初始种群数量为 200,变异率为 0.04,迭代次数为 100,对其进行最小化的寻优,可以得到最优值与迭代次数的关系如图 6 所示。

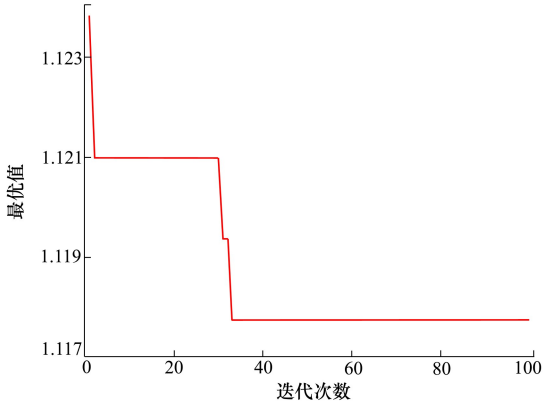

图 6　迭代次数与最优值关系图

由图 6 可得当迭代次数为 32 时趋于稳定,此时对应理论最优设计结果为 $l=0.082\ 3$ m,$r_1=0.003\ 1$ m,$r_w=1.143\times10^{-4}$ m,$r_2=0.005\ 3$ m,$M=0.510\ 5$ A·m²,$P=0.276\ 7$ W,$f=1.117\ 7$。由于所求得的理论设计值在实际工程制造中达不到相应精度,因此需要进行取舍。

根据得出的关联分析结果,在影响磁力矩器性

能的多种因素中,绕线用导线半径对其影响最大,磁芯长度对其影响程度次之。因此,为了使工程制造产品尽可能贴合理论上最优设计结果,初步认为导线半径在 1% 范围内变化,磁芯长度在 3% 左右变化,其他几种因素采用最接近的可用实际规格时,磁矩大小仍可满足指标要求。此时磁力矩器实现的具体参数为:$l=0.08$ m,$r_1=0.003$ m,$r_w=1.15\times10^{-4}$ m,$r_2=0.005\ 76$ m,$M=0.467\ 1$ A · m^2,$P=0.223\ 1$ W,$f=1.182\ 1$。

本文因设备有限,采用文献[21]提到的磁矩测量方法,通过测量磁棒周围的磁感应强度反算出磁棒磁矩大小。为了简便计算,将磁棒与磁强计探头放置于同一水平面,保证两者在轴向夹角为 0,并为了保证精度,确保两者之间距离为 2 倍的磁棒长度,如图 7 所示。

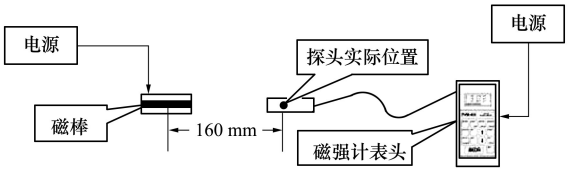

图 7 磁棒的磁矩测试方案示意图

此时,磁矩与磁感应强度之间的关系如(20)式所示

$$M = 4\pi B_r \cdot \mu_0^{-1} \cdot \left(\frac{\frac{R}{L}-\frac{1}{2}}{(R^2 - RL + L^2/4)^{3/2}} - \frac{\frac{R}{L}+\frac{1}{2}}{(R^2 + RL + L^2/4)^{3/2}} \right)^{-1} \tag{20}$$

式中:B_r 表示磁棒在轴向产生的磁感应强度大小;R 为磁强计探头位置与磁棒几何中心位置间的距离;L 为磁棒长度;$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2 为真空中的磁导率。

根据具体实现参数进行磁棒的绕制,并通过上述实验流程进行测量磁矩的测量,得到实际磁矩 $M=0.452$ A · m^2,同时测得实际功耗 $P=0.231\ 1$ W,实际目标函数值为 $f=1.221\ 7$。通过分析实际测值与理论设计值,当磁芯长度变化为 2.79%,磁芯半径变化为 3.33%,绕线用导线半径变化为 0.61%,绕线后磁棒半径变化为 7.98%时,代表磁力矩器性能的目标函数值变化为 9.3%。这表明实验结果不仅与表 2 分析结果符合,即导线半径是对磁力矩器磁矩影响最大的因素,并且与上述最初设想吻合,即对于优化设计的理论值,当导线半径在 1%范围内变化,而其他几种因素可取范围相对宽泛,在采用最接近的可用实际规格时,磁力矩器性能仍可满足指标要求。

5 结 论

本文将数据挖掘与微小卫星磁力矩器设计结合起来,进行了基于机器学习算法的微小卫星磁力矩器关联分析研究。本文首先通过 Apriori 算法挖掘磁力矩器性能与影响因素的关联规则,然后构建遗传算法优化模型生成理论最优解,最后通过实际参数偏离实验验证关联规则的指导价值,揭示了磁力矩器性能与不同参数之间的影响规律。总的来说,运用关联分析方法研究了不同因素对最终指标结果的影响程度,对导致指标变化的不同影响因素进行了评价。从大量的数据中挖掘关联规则,探究不同因素对于产品指标影响程度的大小,抽象出了有利于进行比较和判断的设计经验,进而为实际产品制造给出决策建议。本文研究结果对在一定程度上提高磁力矩器的性能起到了较好的参考意义,使得能够充分发挥微小卫星内磁力矩器的潜在能力,为未来磁力矩器的设计与制造提供新的研究思路与技术支撑。

参考文献:

[1] 刘莹莹, 周军, 刘光辉, 等. 翱翔系列立方星的发展和展望[J]. 宇航学报, 2019, 40(10): 1115-1124
LIU Yingying, ZHOU Jun, LIU Guanghui, et al. Development and prospect of "Aoxiang" series cubesats[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(10): 1115-1124 (in Chinese)

[2] ALKATHEERI A, KAMALALDIN K, OKASHA M, et al. Design and implementation of attitude control system for GNSSAS 6U cubesat[C]//2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, 2023

[3] 张科, 韩治国, 杨天社, 等. 微小卫星姿态控制系统鲁棒自适应故障估计[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(5):

798-804
ZHANG Ke, HAN Zhiguo, YANG Tianshe, et al. Robust adaptive fault estimation for microsatellite attitude control systems[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(5): 798-804 (in Chinese)

[4] 吴晗玲, 范书群, 邓梦然, 等. 立方星发射技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(增刊 1): 7-15
WU Hanling, FAN Shuqun, DENG Mengran, et al. Research on cubesat launch technology[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(suppl.1): 7-15 (in Chinese)

[5] MONTALVO M M C, SPENCER E. Using only two magnetorquers to de-tumble a 2U cubesat[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(11): 3086-3094

[6] HARYADI D R, WIJANTO H, SYIHABUDDIN B, et al. Design of attitude determination and control system using microstrip magnetorquer for nanosatellite[C]//2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications, Bandung, Indonesia, 2016

[7] 韩冬, 郭建新, 郭廷荣, 等. 基于磁力矩器的 GEO 卫星角动量卸载方法[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(3): 17-22
HAN Dong, GUO Jianxin, GUO Tingrong, et al. Angular momentum unloading method for GEO satellite based on magnetorquer [J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(3): 17-22 (in Chinese)

[8] 孔庆松. 低轨小卫星高性能磁力矩器的设计与实现[D]. 北京:空间科学与应用研究中心, 2006
KONG Qingsong. Design and implementation of the high-performance magnetic torquers for low earth orbit small satellites[D]. Beijing: Space Science and Application Research Centre, 2006 (in Chinese)

[9] 周美丽, 戴路, 徐开, 等. 针对微小卫星的磁力矩器设计及测试[C]//中国空间科学学会 2013 年空间光学与机电技术研讨会, 2015
ZHOU Meili, DAI Lu, XU Kai, et al. Design and test of magnetorquer for small microsatellites[C]//The 2013 Symposium on Space Optics and Electromechanical Technology of the Chinese Society of Space Science, 2015 (in Chinese)

[10] 冯乾, 刘勇, 李立哲, 等. 纳卫星空芯磁力矩器的最优化设计与实现[C]//第三十二届中国控制会议, 2013
FENG Qian, LIU Yong, LI Lizhe, et al. Optimal design and implementation of coreless magnetic torque for nano-satellites[C]//Proceedings of the 32nd China Control Conference, 2013 (in Chinese)

[11] INDIR I, SEVER K, VNUCEC I, et al. Design and optimization of air core magnetorquers for attitude control of LEO nanosatellites[C]//2021 International Symposium ELMAR, Zadar, Croatia, 2021

[12] 白博, 周军, 王圣允. 基于立方星的高性能空芯磁力矩器设计[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 1-6
BAI Bo, ZHOU Jun, WANG Shengyun. Design of high-performance magnetorquer with air core for cubesat[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 1-6 (in Chinese)

[13] 刘剑, 陈茂胜, 孔令波, 等. 微小卫星磁力矩器多目标优化设计与实现[J]. 导航定位学报, 2020, 8(4): 100-105
LIU Jian, CHEN Maosheng, KONG Lingbo. et al. Multi-objective optimization design and implementation of a magnetorquer for microsatellite[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(4): 100-105 (in Chinese)

[14] 白博, 周军, 王圣允. 立方星带芯磁力矩器多目标优化设计与实现[J]. 宇航学报, 2017, 38(7): 766-771
BAI Bo, ZHOU Jun, WANG Shengyun. Multi-objective optimization design and implementation of a magnetorquer with magnetic core for cubesat[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(7): 766-771 (in Chinese)

[15] ALI H, MUGHAL M R, ULIALAM Q, et al. Parametric optimization and analysis of power efficient magnetorquer rod actuator for nanosatellite[J]. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, 2022, 3(2): 30-35

[16] 许谦, 胡刚, 李冰, 等. 基于机器学习算法的飞行器控制系统仿真试验数据关联分析[C]//2021 年全国仿真技术学术会议, 2021
XU Qian, HU Gang, LI Bing, et al. Data association analysis of aircraft control system simulation experiment based on machine learning algorithm[C]//Proceedings of the 2021 National Academic Conference on Simulation Technology, 2021 (in Chinese)

[17] AGRAWAL R, IMIELINSKI T, SWAMI A N. Mining association rules between sets of items in large databases[C]//Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1993

[18] 王宁, 昌锡铭, 杨欣, 等. 基于改进的 Apriori 算法的铁路事故风险源关联分析方法[J]. 山东科学, 2023, 36(5): 67-74
WANG Ning, CHANG Ximing, YANG Xin, et al. Association analysis method of railway accident hazards based on the improved Apriori algorithm[J]. Shandong Science, 2023, 36(5): 67-74 (in Chinese)

[19] 刘健, 江天乐. 基于改进遗传算法和 Apriori 算法的气旋强度预测方法[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(1): 99-104

LIU Jian, JIANG Tianle. Cyclone intensity prediction method based on improved genetic algorithm and Apriori algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2024, 52(1): 99-104 (in Chinese)

[20] 赵赶超, 雷晶晶, 刘志强, 等. 基于 Apriori 算法的飞机冲偏出跑道诱因挖掘[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 44-50
ZHAO Ganchao, LEI Jingjing, LIU Zhiqiang, et al. Mining of inducement for aircraft runway overrun based on Apriori algorithm [J]. Computer Simulation, 2024, 41(2): 44-50 (in Chinese)

[21] JAMES L, NG A, JOBANPUTRA R. On determining dipole moments of a magnetic torquer rod-experiments and discussion[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2002, 48(1): 61-67

Correlation analysis method of micro-satellite magnetic torquers under constraint conditions

LUO Huaijin, BAI Bo, ZHOU Jun

(Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As an important part of the attitude control system of micro satellite, the magnetic torquer shoulders the tasks of satellite attitude stabilization and attitude control system offloading. Due to the large number of influencing factors and unclear influencing mechanism, it is difficult for the practical engineering products to achieve the theoretical optimal design results. Through the method of association rule mining in data mining, the influence degree of different factors on product indicators is explored, and then the decision-making suggestions for actual product manufacturing are given. Firstly, the influence mode of a single factor on the output of the magnetic torquer is studied, and the influence rule between the output magnetic moment and different parameters is revealed. Secondly, the Apriori algorithm in the machine learning algorithm is used to study the influence degree of different factors on the final index results, and the different influencing factors leading to the change of the index are evaluated. Finally, the feasibility of the method is analyzed by simulation experiments and the applicability of the method is verified by examples, and the factors that have the greatest influence on the product performance are obtained. Starting from the data, this paper abstracts the reference experience that is beneficial to the comparison and judgment of the subsequent optimization design, and provides new research ideas and technical support for the design and manufacture of the future magnetic torquer.

Keywords: micro-satellite; magnetorquer; Apriori; association analysis

引用格式: *罗怀金, 白博, 周军. 约束条件下微小卫星磁力矩器关联分析方法[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(5): 994-1002*

LUO Huaijin, BAI Bo, ZHOU Jun. Correlation analysis method of micro-satellite magnetic torquers under constraint conditions[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(5): 994-1002 (in Chinese)