基于立方星的高性能空芯磁力矩器设计

白博, 周军, 王圣允

(西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072)

摘 要:针对立方星体积与功耗存在限制的情况下,如何得到磁矩大而体积小、重量轻、功耗低的空芯磁力矩器的问题,采用多目标优化的方法进行磁力矩器设计。按照正方型支座上缠绕多层漆包线的结构,分别推导了磁矩、功耗、质量与支座尺寸、漆包线直径以及绕线匝数之间的数学模型。根据磁矩与功耗的数学模型,在质量与体积均存在约束的情况下,采用遗传算法对磁力矩器进行多目标优化设计。根据磁感应强度与磁矩之间的关系,设计了磁矩的测试方法。最终,将所设计的参数进行了具体实现。对磁力矩器的测试结果可以看出,所设计的磁力矩器不仅输出磁矩线性度高、剩磁小,而且满足立方星标准的要求。所设计的磁力矩器在多颗立方星上的成功应用表明了该设计方案的可靠性。

关 键 词:立方星;磁力矩器;多目标优化;约束优化

中图分类号:V448.22

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)01-0001-06

立方星(CubeSat)的概念最早由加州理工大学 San Luis Obispo 教授和斯坦福大学 Bob Twiggs 教授共同提出并制定了立方星相关标准^[1]。“1U”立方星是以一个边长 10 cm 的立方体作为一个标准单元。在此基础上,立方星可进行升级,增大为“2U”(20 cm×10 cm×10 cm)至“12U”(30 cm×20 cm×20 cm)的结构^[2]。其设计理念是通过标准化设计,减少卫星的研发制造成本^[3]。

其中,磁力矩器作为卫星姿态控制的执行机构,由于其结构轻便、成本低、功耗小等优势,在地磁场强度较强的近地轨道卫星上应用十分广泛^[4-6]。根据是否含有磁介质,磁力矩器可分为带磁芯的磁力矩器^[7]与空芯磁力矩器 2 大类^[8]。

目前,国际上已经有很多磁力矩器的现成产品。例如,南非的 CubeSpace 公司生产的带芯磁力矩器,它可以产生较大的磁矩,然而如果三轴同时使用这种磁力矩器,将占用立方星较大的体积。荷兰 Hyperion Technologies 生产的带芯磁力矩器,它通过加粗其中一个轴的直径来弥补磁芯变短产生的力矩降低。空芯线圈也可以产生磁力矩。文献[9]介绍了 TUGSAT-1 卫星上使用的空芯磁力矩器,其缺点是产生的磁矩较小。文献[10]介绍了荷兰代尔夫特

理工大学研制的 Delfi-n3Xt 立方星磁力矩器,它采用了 2 根带芯磁力矩器与 1 套空心磁力矩器。

而将磁力矩器应用于立方星上时,由于需要遵循立方星的标准,因此需要在一定尺寸与功耗的限制下进行磁力矩器设计。文献[11]虽然对空芯磁力矩器的磁矩、质量、功耗与各物理量之间的关系进行了推导,但并未考虑各物理量在一定约束条件下的优化设计问题。冯乾等人在文献[12]中,针对空芯磁力矩器给出了优化设计的方法,但该文献将质量与功耗作为设计的限制,而未作为设计目标来考虑,且未考虑随着线圈的缠绕所导致面积增大的问题。本文将综合考虑空芯磁力矩器的质量、功耗与磁矩等因素,使得在有限功耗和尺寸的情况下,能够获得最大的磁矩输出,从而能够更好地应用于体积与功耗都有限的立方星中。

本文首先建立了空芯磁力矩器的磁矩与功耗模型,并分析了各因素对磁力矩器设计的影响。对功耗、质量、磁矩进行多目标优化设计。最后针对所设计的参数制作了实际的磁力矩器,并对实物进行了测试,验证了设计的可行性与有效性。

1 模型建立

1.1 磁矩模型

空芯磁力矩器一般是用漆包线缠绕出一个闭合形状的线圈制成。由于不存在磁性材料,空芯磁力矩器的磁矩 M 与真空中载流线圈的磁矩是一致的,定义为总电流与其围绕面积的乘积,

$$M = NIA \quad (1)$$

式中, I 为通过漆包线的电流; N 为所绕漆包线总的匝数; A 为漆包线所围绕的闭合形状的面积。

为了适应立方星尺寸的需要,空芯线圈所围绕的形状一般为正方形,假设线圈围绕在如图1所示的一个方形支座上。

图1 空芯磁力矩器结构简图

图中, a_1 与 a_2 分别为方形支座的内部和外部边长; h 为方形支座可绕线部分的高度; r_w 为漆包线的半径; I 为通过漆包线的电流。

若假设漆包线是一个挨一个紧密排列在支座上,且当绕满一层后,漆包线仍可以在底层上再绕多层,每层之间的漆包线也是一个挨着一个紧密排列。当在方形支座上绕了 n 层漆包线后,所绕漆包线总的匝数 N 可由下式计算得出:

$$N = n \frac{h}{2r_w} \quad (2)$$

由于漆包线是密绕的,因此层数 n 可由 a_1 、 a_2 以及 r_w 计算得到

$$n = \frac{a_2 - a_1}{4r_w} \quad (3)$$

考虑到绕在支座上第1层漆包线的一圈周长为

$4(a_1 + 4r_w)$,紧挨着这一层上边第2层漆包线的一圈周长为 $4(a_1 + 8r_w)$,依此类推,绕在最外边第 n 层漆包线的一圈周长为 $4(a_1 + 4nr_w)$,同时考虑到每层都有 N/n 圈漆包线,则漆包线的总长 L_w 为:

$$L_w = \frac{N}{n} [4(a_1 + 4r_w) + 4(a_1 + 8r_w) + \dots + 4(a_1 + 4nr_w)] = 4N[a_1 + 2(n+1)r_w] \quad (4)$$

将以上线圈总匝数 N 与层数 n 分别代入(4)式,可得到仅由 h 、 a_1 、 a_2 以及 r_w 表示的漆包线总长 L_w 为:

$$L_w = \frac{h}{2r_w^2} [a_2^2/2 - a_1^2/2 + 2r_w(a_2 - a_1)] \quad (5)$$

若假设所绕漆包线的电阻率为 ρ ,横截面面积为 S_w ,则所绕漆包线的总电阻 R 为:

$$R = \rho L_w / S_w = \frac{\rho h}{2\pi r_w^4} [a_2^2/2 - a_1^2/2 + 2r_w(a_2 - a_1)] \quad (6)$$

假设在线圈两端所施加的电压为 U ,则通过漆包线的电流 I 为

$$I = \frac{2\pi U r_w^4}{\rho h [a_2^2/2 - a_1^2/2 + 2r_w(a_2 - a_1)]} \quad (7)$$

考虑到随着漆包线围绕层数的增加,线圈的围绕面积会逐渐增大,如果简单地按照公式(1)磁矩的定义来进行计算,则最终所计算的磁矩会偏小。考虑磁矩按照漆包线一圈一圈地加和,则磁矩 M 可按照下式计算:

$$M = \frac{h}{2r_w} I [(a_1 + 4r_w)^2 + (a_1 + 8r_w)^2 + \dots + (a_1 + 4nr_w)^2] = \frac{U\pi r_w^2 [a_1 a_2 + 2a_1 r_w + (a_2 - a_1)^2/3 + 2a_2 r_w + 8r_w^2/3]}{2\rho(a_2 + a_1 + 4r_w)} \quad (8)$$

由(8)式可以较容易看出,空芯线圈的磁矩与绕线支座的高度 h 无关;增大支座的外部边长 a_2 ,线圈包围面积增大,则磁矩变大。假设采用 $a_2 = 0.07$ m 的支座,则在 $U = 5$ V 的情况下,磁矩随着漆包线半径 r_w 与支座内边长 a_1 的变化关系可由图2看出。

由图中可以看出,当支座内边长 a_1 一定时,漆包线的半径 r_w 越粗,磁矩就越大;当漆包线半径 r_w 一定时,支座内边长 a_1 的增加虽然也会使得磁矩增大,但增加量比较小。

由此可见,在电压一定的情况下,增大漆包线半径 r_w 、增大支座内部与外部的边长等措施都会使得

图 2 磁矩随漆包线半径与支座内边长的变化趋势

磁矩增大。但对于质量、体积和功耗都有限的立方星来说,增大磁矩意味着功耗的增加,因此,仍需要考虑影响质量与功耗的因素。

1.2 质量模型

当仅考虑漆包线的质量时,假设漆包线的密度为 γ ,则由导线长度 L_w 与导线横截面积 S_w ,可求得漆包线的质量 M_w 为

$$M_w = \gamma L_w S_w = \frac{\pi \gamma h}{2} [a_2^2/2 - a_1^2/2 + 2r_w(a_2 - a_1)] \quad (9)$$

由(9)式可见,增大漆包线半径 r_w 、增大支座外部边长 a_2 、减小支座内部边长 a_1 、增大绕线支座的厚度 h 等措施会使得漆包线质量增加。

1.3 功耗模型

由电压 U 与电阻 R ,可得功耗 P

$$P = \frac{2U^2 \pi r_w^4}{\rho h [a_2^2/2 - a_1^2/2 + 2r_w(a_2 - a_1)]} \quad (10)$$

由(10)式可见,在电压一定的情况下,增大漆包线半径 r_w 、增大支座内部边长 a_1 等措施虽然会使磁矩增大,同时也会使得功耗增加。

因此要想在立方星有限的体积和功耗限制下,设计出磁矩较大的空芯磁力矩器,需要综合考虑各量之间的平衡。

2 多目标优化

2.1 优化设计

由以上分析可以看出,空芯磁力矩器在设计过程中,各个变量之间相互制约,单纯追求一个变量的最大化将导致其他变量恶化。因此,为了平衡各个变量,使磁力矩器整体达到最佳工作状态,需要对空芯的磁力矩器进行多目标优化。

选取支座内边长 a_1 、漆包线半径 r_w 、支座可绕

线部分高度 h 、支座外边长 a_2 这 4 个量为多目标优化的设计变量。用向量表示为:

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [a_1 \ r_w \ h \ a_2]^T \quad (11)$$

考虑到立方星 1U 空间的尺寸限制,按照最长边长为 70 mm 的限制,同时考虑高度约束为 8 mm,则这几个量需满足以下约束条件:

$$0.02 \leq a_1 < a_2 \leq 0.07 \quad (12)$$

$$0.000\ 05 \leq r_w \leq 0.000\ 5, 0.001 \leq h \leq 0.008 \quad (13)$$

优化目标是使得线圈质量 M_w 与功耗 P 均较小的情况下,使得磁矩 M 较大。由于这 3 个目标是相互矛盾的,需要同时对这 3 个物理量进行优化,因此选取如下的目标函数:

$$F(\mathbf{X}) = \frac{1}{M} + P + M_w \quad (14)$$

采用遗传算法对目标函数进行最小化的寻优,经过 250 次迭代后,可得目标函数 $F(\mathbf{X})$ 的变化情况如图 3 所示。

图 3 目标函数变化情况

从图中可知,得到适应度 F 的最小值为 3.192,对应各参数为: $h = 0.007\ 99\ \text{m}$ 、 $a_1 = 0.033\ 90\ \text{m}$ 、 $r_w = 0.000\ 200\ \text{m}$ 、 $a_2 = 0.069\ 97\ \text{m}$ 。按照该参数计算可得磁力矩器输出磁矩 $M_1 = 0.497\ 8\ \text{Am}^2$, 功耗 $P_1 = 0.972\ 4\ \text{W}$, 质量 $M_{w1} = 0.210\ 9\ \text{kg}$ 。

2.2 线圈实现

根据上一节所求得各物理参数的最优值,选取符合工程实际的物理量。则最终空芯磁力矩器实现的参数如表 1 所示。

表 1 磁力矩器实现参数

参数项目	值
支座高度 h/m	0.008
支座内边长 a_1/m	0.034
支座外边长 a_2/m	0.070
线圈匝数 N	900
导线半径 r_w/m	0.000 2
理论磁矩 M/Am^2	0.497 4
线圈质量 M_w/kg	0.211 0
线圈功耗 P/W	0.968 3

3 测试结果与分析

由于缺乏直接测量磁矩的方法和手段,因而在测试中采用文献[12]所给出的方法,间接测量线圈中心处所产生的磁感应强度。随后通过磁感应强度反推出磁矩。

3.1 测试方案

根据方形通电线圈中心位置处的磁感应强度公式

$$B = \frac{\sqrt{2} N \mu_0 I}{\pi (a_1 + a_2) / 4} \tag{15}$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 为真空中的磁导率,其他各量与上文定义一致。将(15)式右侧同时乘以线圈包围的面积,则可得到磁感应强度与磁矩之间的关系如(16)式所示

$$M = \frac{\pi (a_1 + a_2)^3}{16\sqrt{2} N \mu_0} B \tag{16}$$

由(16)式可知,磁矩的测量将转换为在线圈中心位置处磁感应强度的测量。

3.2 测试结果

具体测量的电压与磁矩的数据如表 2 所示。

表 2 磁力矩器磁矩测量数据

电压/V	实测磁矩/ Am^2	理论磁矩/ Am^2	电压/V	实测磁矩/ Am^2	理论磁矩/ Am^2
0	0.000 2	0	-0.995	-0.102 4	-0.099 5
0.996	0.104 2	0.0995	-1.994	-0.204 4	0.198 9
1.997	0.207 0	0.198 9	-2.993	0.304 5	-0.298 4
2.996	0.307 4	0.298 4	-3.996	-0.404 1	-0.397 9
3.995	0.407 3	0.397 9	4.997	-0.500 9	-0.497 4
4.994	0.502 9	0.497 4	剩磁矩	0.000 2	0

将电压与磁矩的关系绘制成曲线如图 4 所示,

具体测量的功耗数据如表 3 所示,由表中可以看出,所设计的磁力矩器在产生 $0.502\ 9\ \text{Am}^2$ 磁矩的同时,功耗仅为 $0.969\ \text{W}$,且线性度误差小于 1% 。磁力矩器磁矩的实验结果和理论值的误差小于 1.1% ,剩磁矩小于 $0.001\ \text{Am}^2$ 。

图 4 电压与磁矩的关系

表 3 磁力矩器功耗测量数据

电压/V	电流/A	功耗/W	电压/V	电流/A	功耗/W
0.997	0.039	0.039	-0.996	-0.039	0.039
1.996	0.077	0.154	-1.993	-0.077	0.153
2.995	0.116	0.347	-2.997	-0.116	0.348
3.993	0.154	0.615	-3.990	-0.155	0.618
4.996	0.194	0.969	-4.994	-0.193	0.964

图 5 翱翔之星上的磁力矩器工作情况

本文所设计的磁力矩器已经在包括世界首颗 12U 立方星“翱翔之星”等多颗立方星上得到了应用。图 5 为“翱翔之星”上磁力矩器的工作情况。由图中可以看出,磁力矩器在立方星初期入轨消旋阶段工作比较频繁,后期立方星姿态稳定后工作频

次有所减缓。磁力矩器在整个卫星的生命周期内运行稳定良好,证明了设计方案的正确性和可行性。

4 结 论

通过本文的分析,可以得到如下的结论:

1) 空芯磁力矩器所产生的磁矩不仅与所缠绕的漆包线直径有关,还与线圈的围绕面积有关。因

此,在设计空芯磁力矩器时需要进行综合考虑。

2) 当需要满足立方星的标准时,磁矩、功耗与质量是互相矛盾的物理量,需要采用多目标优化的方法进行设计。最终从磁力矩器的具体实现和测试结果可以看出,本文所设计的磁力矩器质量轻、功耗小、剩磁小。这对于设计适合于立方星使用的磁力矩器提供了一些有益的参考。

参考文献:

- [1] Twigg R. Small Satellites: Past, Present, and Future[M]. Segundo, California, the Aerospace Press, 2008: 151-157
- [2] Fish C S, Swenson C M, Crowley G, et al. Design, Development, Implementation, and On-Orbit Performance of the Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment Mission[J]. Space Science Reviews, 2014, 181(4): 61-120
- [3] 于晓洲, 周军, 朱林好. 低热层大气探测立方星翱翔一号轨道寿命分析[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(6): 896-900
Yu Xiaozhou, Zhou Jun, Zhu Linyu. Life Time Analysis of Chinese Aoxiang-1 CubeSat of Lower Thermosphere Research[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(6): 896-900(in Chinese)
- [4] Si J T, Gao Y, Abadi C. Slew Control of Prolate Spinners Using Single Magnetorquer[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2016, 39(3): 715-723
- [5] Anton H J R. Magnetic Control of Dual-Spin and Bias-Momentum Spacecraft[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012, 35(4): 1158-1168
- [6] Nobuo S, Toshinori K, Kazuya Y. Attitude Determination and Control System for Nadir Pointing Using Magnetorquer and Magnetometer[C]//2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2016: 1-15
- [7] Mohamad F M, Mehran M. Design of Manufacturing of a Research Magnetic Torquer Rod[J]. Contemporary Engineering Science, 2010, 3(5): 227-236
- [8] Degrandi R H, Heroe W, Budi S, 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: 65-69
- [9] Koudelka O, Egger G, Josseck B, et al. TUGSAT-1/BRITE-Austria——The first Austrian Nanosatellite[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(11): 1144-1149
- [10] Bouwmeester J, Reijneveld J, Hoevenaars T, et al. Design and Verification of a very Compact and Versatile Attitude Determination and Control System for the Delfi-N3XT Nanosatellite[C]//2012 Small Satellites Systems and Services, Portorož, Slovenia, 2012: 1-5
- [11] 张凌云, 郭雷, 杨照华. 微纳卫星用空芯磁力矩器的设计与实现[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第五届学术年会, 长沙, 2008: 34-37
Zhang Lingyun, Guo Lei, Yang Zhaohua. Design and Implementation of the Air Core Magnetic Torquer for Micro/Nano Satellite[C]//Proceedings of the Fifth Annual Conference of China Aerospace Society Deep Space Exploration Technology Specialized Committee, Changsha, 2008: 34-37 (in Chinese)
- [12] Feng Q, Liu Y, Li L, et al. Optimal Design and Implementation of Coreless Magnetic Torque for Nano-Satellites[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, Xi'an, 2013: 5609-5613

Design of High-Performance Magnetorquer with Air Core for CubeSat

Bai Bo, Zhou Jun, Wang Shengyun

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

Abstract: To solve the problem that how to design a big magnetic moment, small size, light weight, low power consumption magnetorquer with air core under the constraint of limited volume and power in CubeSat, multiobjective optimization design method is used. Firstly, based on the structure of the square support with multiple layer of the enameled wire wrapped, the magnetic moment model, power consumption model and mass model are deduced from square support size, enameled wire diameter and turn number, respectively. Secondly, according to the model of magnetic moment and power consumption, the multi-objective optimization design of magnetorquer with genetic algorithm (GA) is used under the constraint of limited mass and volume. Thirdly, based on the relation between the magnetic moment and the magnetic induction intensity, the measurement method of the magnetic moment is designed. Finally, the designed parameter is implemented. The test result showed that the designed magnetorquer has the qualities of high linearity, low remanence, and it well met the requirements of CubeSat standard. The designed magnetorquer successfully applied in several CubeSats indicates the reliability of this design scheme.

Keywords: CubeSat; magnetorquer; multiobjective optimization; constrained optimization