

「少年学者」

蜂窝结构消除螺旋桨滑流扭转效应的应用验证

陶卓闻*

上海市虹口区民办复兴初级中学 上海

摘要：滑流扭转是螺旋桨飞机的一种拉力的副作用，这对航模初学者有非常大的影响。因此本研究为了降低航模的入门门槛，主要针对利用一种风洞与翼刀的结合体，制作并验证一种利用蜂窝结构消减航模滑流扭转状况的装置。研究过程包括优选不同螺旋桨、测试不同桨叶数量、不同类蜂窝结构对滑流效应的力学特性的影响。本次研究得出以下结论：在机体上安装一种采用直径为 10 mm、数量 60 个重复单元环绕、轻量化的类蜂窝结构。测试结果显示，该装置的螺旋桨拉力为 0.92 N，对原始螺旋桨拉力有副作用，损失拉力 9.17%；侧推力为 0.039 N，对滑流扭转消除 90.7%。该装置能有效改善滑流扭转效应。

关键词：螺旋桨；滑流扭转；蜂窝结构

1 前言

1.1 课题来源

作为一名初中生，我对航模的制作和航天技术充满了好奇和兴趣。在学习过程中，我了解到滑流效应对航模的稳定性和气动特性影响重大。^[1]然而，我也得知传统的机身造型和螺旋桨分布存在一些问题，需要进一步研究和改进。这引发了我对一个新的课题的思考：是否有更简单、更可靠的机身结构可以提高航模飞行时稳定性和安全性？于是，我开始寻找相关信息并进行探索。（图 1）

1.2 研究背景与意义

从首架飞机上天至今，螺旋桨飞机是航空界功臣，涡桨飞机拉力大且省油，仍广泛使用^[3]。但螺旋桨转动产生扭转气流，与机翼气流混合影响飞行

状态^[1]。如右转螺旋桨飞机，滑流会推机头向左，大飞机飞行员可踩舵调整，航模却无法实时抵消影响，新手玩航模易因滑流转偏炸机，影响入门体验。因此，解决航模滑流扭转问题对青少年玩航模和做科创意义重大。

目前，螺旋桨研究多集中于大飞机，科学家用电脑模拟、风洞实验等研究其气动性能和滑流效应^[3,5]。也有学者进行小型螺旋桨实验，分析桨叶数对拉力的影响^[2]，研究桨翼干扰带来的侧推力、振动问题^[4]，但针对航模滑流扭转的实验较少，更缺乏通过调整桨叶数量、加装类蜂窝结构解决问题的研究。



图 1 滑流扭转对飞机的影响

* 通讯作者：陶卓闻；单位：上海市虹口区民办复兴初级中学 上海

收稿日期：2025-12-01 录用日期：2026-02-07

DOI: <https://doi.org/10.58244/jie.263605>

基于此，决定采用实验法研究：搭建测试平台，测试单叶到六叶不同桨叶数、不同参数的类蜂窝结构对航模拉力、侧推力和振动的影响。实验多次测量取平均值以减少误差，最终找出抑制滑流扭转、让航模飞行更稳的最佳配置。

该研究一方面能为航模设计提供简便方法，降低新手入门难度，使航模飞行更稳；另一方面，可为小型螺旋桨飞行器改进提供参考^[2,4]。

1.3 研究目的

本次研究的对象是航模飞行时滑流效应的力学特性，目标是评估类蜂窝结构对削弱滑流效应的可行性和效果。具体目标如下：1. 研究不同桨叶数量对航模滑流效应的力学性质的影响；2. 使用不同类蜂窝结构对航模滑流效应的力学性质的影响；3. 确定类蜂窝结构对削弱滑流效应的适用性，并评估其准确性和稳定性。

2 研究设计

2.1 研究准备

本次研究用实验法探究不同桨叶数量、不同类蜂窝结构对航模螺旋桨拉力、机身侧推力及振动的影响。实验前期，收集弹簧测力计、螺旋桨等器材并逐一调试。动手制作不同叶片的螺旋桨和类蜂窝结构，以5046六桨叶螺旋桨为样本，裁切成五叶、四叶等（单叶不对称螺旋桨灵感来自日本大阪工业大学轻量化飞机）；用 $\phi 5\text{ mm}\times 210\text{ mm}$ 吸管截取20 mm小段为基础单元，做出不同面积、数量的滑流稳定装置，所有自制器材经检查满足测试要求。

搭建的实验平台分三类：螺旋桨拉力测试平台、机身侧推力测试平台和机身振动测试平台。其中，

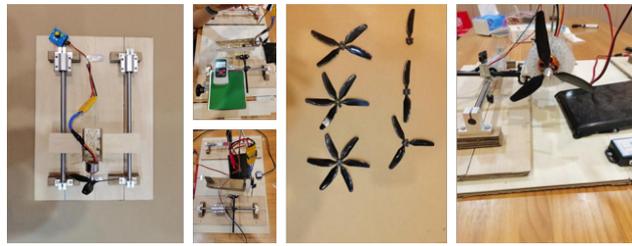


图2 制作装置与实验样本

拉力测试平台由滑轨、推拉力计和无刷电机构成，用推拉力计测螺旋桨最大拉力；侧推力和振动测试平台包含滑轨、推拉力计、陀螺仪等，分别用推拉力计记录机身侧推力最大值、陀螺仪捕捉机身振动最大值。（图2）

2.2 测试方法与过程

本次实验核心是探究不同桨叶数量、不同类蜂窝结构对航模螺旋桨拉力、机身侧推力及振动的影响。首先明确测试核心参数与控制条件，为凸显桨叶差异，全程用电机最大功率测试；将不同叶数螺旋桨样本放实验平台时，保持放置方式和角度一致，确保每次只改一个变量，重点测螺旋桨拉力、机身侧推力和偏转角最大值。

实验用两类测试装置，一是拉力测试台，固定推拉力计测螺旋桨拉力数据；二是侧向推力与偏转角测试台，把机身装立轴上，测垂直尾翼绕立轴侧向力（反映滑流扭转程度），记录平台不同结构测试时最大振动偏转角（体现结构对机身整体振动最大影响）。

选择实验变量时，对比预测试数据、查阅资料，发现机身设计、尾翼形状优化虽能提升航模稳定性和气动效果，但制作精度要求高，不易精准控制变量。所以本次实验重点关注制作和调节简便的类蜂窝结构，结合不同叶数螺旋桨，形成核心测试变量。

实验全程同步记录数据，后续将基于测试结果

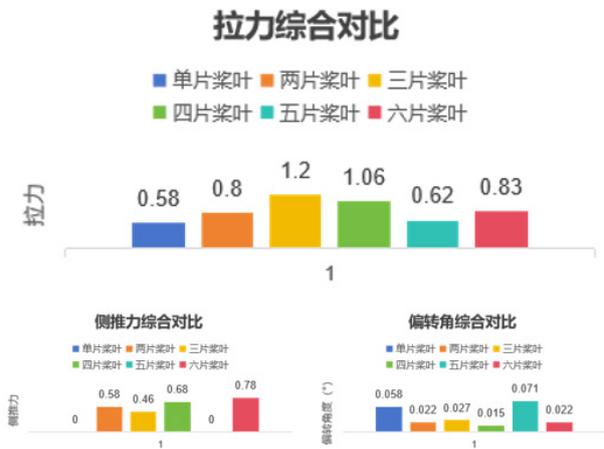


图 3 三项测试结果

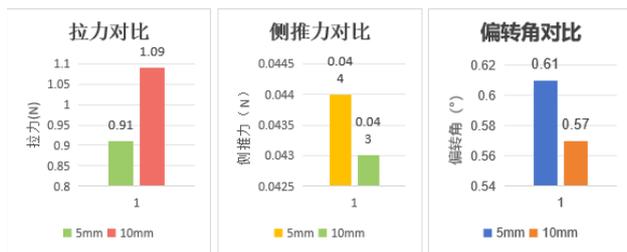


图 4 不同小孔直径拉力对比数据图

系统分析，总结不同叶数螺旋桨、不同类蜂窝结构与拉力、侧推力、振动参数的影响关系，探讨影响因素、实验限制因素及改进方向。

3 过程结果与分析

3.1 螺旋桨不同桨叶数量的测试与优选

基础螺旋桨实验，是为了挑选出更为优秀的螺旋桨作为试验样本，因此会对实验结果进行综合比较，从螺旋桨能提供较大的拉力的角度来考虑。实验过程中存在测试位置的偏差，为了减小实验误差，本课题采用多次测量取平均值法。在测试过程中，发现由于非轴对称桨叶会产生明显的振动，从而导致飞机整体震颤，无法获得准确结果。

对六种基础螺旋桨做了性能对比，还把测试数据做成图表来分析。从六组数据能清楚地看到：单

叶和五叶螺旋桨振动特别明显，能提供的拉力也小；二叶螺旋桨的侧推力和偏转角表现比四叶的好，但拉力比不上四叶螺旋桨；三叶螺旋桨的各项数据都是最好的。为了让后续测试更稳定，我们选了三叶螺旋桨作为后续的测试样本。接下来，分别测试类蜂窝结构的孔径、数量对航模的影响。把类蜂窝结构装在螺旋桨后方的机身上，和发动机保持一定距离，做到和发动机不共轴、不跟着旋转，想要让旋转的气流穿过结构的孔径后，变成直线向前的气流，以此减少滑流扭转的影响。（图 3）

3.2 孔径差异的测试

类蜂窝结构主要由塑料吸管制成，一方面方便加工和制作，一方面可以实现材料的自由取材和轻量化。吸管孔径有两种，一种直径 5 mm，另一种直径 10 mm。

在拉力测试中，类蜂窝结构孔径越小，产生的拉力越小；孔径越大，产生的拉力越大，可见大孔径在提升发动机拉力上更有优势。在侧推力测试中，孔径越小，产生的侧推力越大；孔径越大，产生的侧推力越小，大孔径在减小侧推力方面表现更好。在偏转角测试中，孔径越小，产生的偏转角越大；孔径越大，产生的偏转角越小，大孔径能更好地降低偏转角，提升稳定性。从这三组测试数据的图表中能明显看出，类蜂窝结构的单体孔径对机身拉力、侧推力和偏转角都有显著影响，其中孔径 10 mm 的类蜂窝结构，整体效果要优于 5 mm 的样本。（图 4）

3.3 数量差异的测试

这个实验旨在证实类蜂窝结构数量对机身的影响。控制结构孔径为 5 mm 不变，改变单体结构数量为 30、60、90。拉力测试中，30、60、90 孔洞



图5 不同小孔数量拉力对比数据图

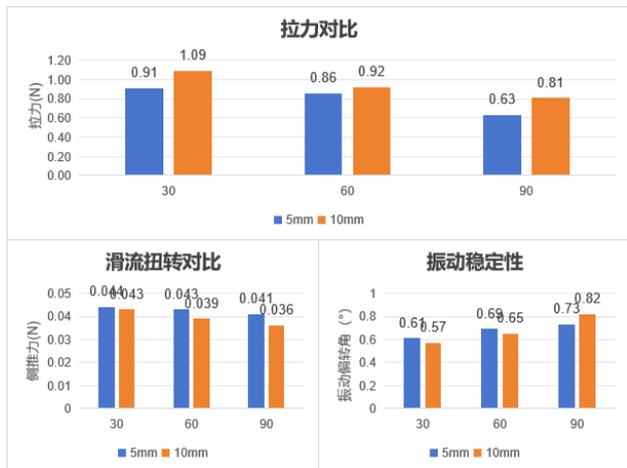


图6 两种结构整体对比

拉力分别为 0.91 N、0.86 N、0.63 N，拉力随孔洞增多下降，30 孔洞表现最好；侧向推力测试中，三者分别为 0.044 N、0.043 N、0.041 N，侧推力随孔洞增多小幅下降，30 孔洞更优；偏转角测试中，三者分别为 0.61 度、0.69 度、0.73 度，偏转角随孔洞增多升高，30 孔洞最佳。整体而言，类蜂窝结构孔洞数量增加，航模拉力降低，机身稳定性下降。虽增多孔洞能小幅降低侧推力，但会使螺旋桨拉力明显下降、加剧机身振动。可见，类蜂窝结构数量显著影响航模拉力和机身振动，并非孔洞越多效果越好。综合三项测试，30 孔洞的类蜂窝结构在拉力、侧向推力和偏转角上表现明显优于 60、90 孔洞。(图 5)

3.4 两种结构对比

从测试图表能清楚看出，航模机身的气动特性有了不一样的变化：直径 10 mm、数量 30 个的类蜂

窝结构，能让螺旋桨产生最大的拉力；直径 10 mm、数量 90 个的类蜂窝结构，对滑流扭转的抑制效果最好；而直径 10 mm、数量 30 个的类蜂窝结构，还能让机身的偏转角达到最小，稳定性最优。(图 6)

类蜂窝结构的单元直径对拉力和偏转角影响比较明显，但对滑流扭转，类蜂窝结构数量在 60 和 90 时的效果差异不大，因此，确定以下结构作为最终的决定：直径为 10mm、蜂窝结构数量为 60。

3.5 与原始数据对比与新结构设计

确定最优的类蜂窝结构（直径 10 mm、数量 30 个）后，我们把它装在机身上，和原来只有三叶螺旋桨的机体数据做了对比。从结果能看到：优化后的螺旋桨拉力从 1.2 N 降到了 1.09 N，下降了 9.17%；但侧向推力从 0.46 N 大幅降到了 0.043 N，下降比例高达 90.7%，这说明这个优化结构对抑制滑流扭转的效果特别明显。不过，偏转角的变化能看出，优化后机身振动的最大偏转角增加了 0.54°，意味着这个优化结构会对机体振动产生一定的影响。(图 7)

根据以上实验结果，我确定了改善机身气动特性的类蜂窝结构的形态。将类蜂窝结构固定在机体的外围，与发动机分离，但保持一定狭窄距离，采用直径为 10 mm、数量 60 个重复单元环绕布置。

3.6 测试回顾与分析

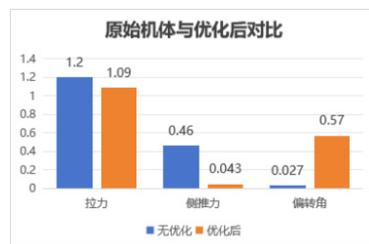


图7 优化对比与新结构设计

非对称桨叶在高转速下虽然能产生拉力，却会让机身出现明显振动，这也能说明网上看到的装非对称桨叶的航模，只能在低转速的特定场景下飞行，要是加大发动机推力，航模的稳定性会受到很大影响。

类蜂窝结构结合了风洞和翼刀的特点，改善滑流扭转的效果很突出。从测试数据能清楚地看到，装上筛选出的最优类蜂窝结构后，机身侧向推力下降了 90.7%，而侧推力的大幅下降，就是滑流扭转的作用被有效抵消的明显表现。不过这次测试中发现，装了类蜂窝结构后，机身振动会变大，我们推测原因是蜂窝结构本身有重量，不仅让航模整体变重，还改变了机身的重心。测试时我们把立轴装在航模中间，重心改变后，和立轴之间的距离就发生了变化，最终导致机身的振动变得明显。

综合所有测试结果，能总结出类蜂窝结构的使用规律：安装类蜂窝结构会影响机身的气动特性，但都能起到改善滑流扭转的作用；不同直径、不同数量的类蜂窝结构，对螺旋桨拉力、机身侧推力和振动偏转角的影响各不相同——螺旋桨拉力会随蜂窝结构直径的变大而变大，随结构数量的增多而变小；侧推力受直径的影响不大，随结构数量的增多而变小；机身振动偏转角会随蜂窝结构直径的变大而变小，随结构数量的增多而变大。

4 结论与反思

4.1 结论

本次研究目前对于不同桨叶数量、不同类蜂窝结构对滑流效应的力学特性，得出以下结论：

可以在机体上安装一种采用直径为 10 mm、数

量 60 个重复单元环绕、轻量化的类蜂窝结构。测试结果显示，该装置的螺旋桨拉力为 0.92N，对原始螺旋桨拉力有副作用，损失拉力 9.17%；侧推力为 0.039 N，对滑溜扭转消除 90.7%。该装置能有效改善滑溜扭转效应。

4.2 反思与展望

本研究目前对于不同桨叶数量、不同类蜂窝结构对航模飞行时滑流效应的力学特性有了初步的效果，但由于实验条件有限，未能设置更多的优化对比与样本，研究仅初步关注了桨叶数量、类蜂窝结构的直径、类蜂窝结构的数量。实验过程中仪器的测量精度、结构直径的细分、制作工艺等因素对实验结果都有影响，下一步可以针对这些影响因素进行实验探究。

参考文献

- [1]. 杨晓玲.航空模型螺旋桨的气动性能分析[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [2]. 解宇霆.小型螺旋桨气动特性实验与数值仿真研究[D].南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [3]. 段中喆,刘沛清.某型螺旋桨滑流对机翼气动性能影响的数值研究[J].应用基础与工程科学学报, 2012,20(3):487-496.
- [4]. 邓双厚.微型飞行器浆翼气动干扰问题的数值模拟研究[D].南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [5]. 陈胜久,杨佑绪,张兴翠,等.一种考虑滑流效应的螺旋桨设计方法及应用[J].北京航空航天大学学报, 2025,51(10):3578-3588.DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0533.

Application and Verification of Honeycomb Structure in Eliminating Propeller Slipstream Torsion Effect

Tao Zhuowen

Abstract: Slipstream torsion is a side effect of thrust in propeller-driven aircraft, which poses a significant challenge for beginners in model aircraft flying. To lower the entry barrier for model aircraft operation, this study focuses on designing and verifying a device that mitigates slipstream torsion in model aircraft by using a honeycomb structure—an integration of wind tunnel and wing fence principles. The research process involves optimizing different propellers and testing the mechanical characteristics of slipstream effect under the conditions of various propeller blade numbers and different honeycomb-like structures. The study draws the following conclusion: a lightweight honeycomb-like structure with a diameter of 10 mm and an arrangement of 60 repeating units is installed on the aircraft body. Test results show that the propeller thrust of the device reaches 0.92 N, which causes a side effect on the original propeller thrust with a thrust loss of 9.17%; the side thrust is 0.039 N, achieving a 90.7% elimination rate of slipstream torsion. This device can effectively improve the slipstream torsion effect.

Keywords: Propeller; Slipstream torsion; Honeycomb structure

导师点评

康永军，天津市滨海新区教师发展中心 选题精准，针对航模螺旋桨滑流扭转这一影响航模飞行稳定性、提高新手入门门槛的关键问题开展研究，选题专业度高、针对性强，精准契合青少年科创的实际需求。改进方向：实验工况覆盖不足，真实飞行场景下的有效性有待进一步验证；同时对机身振动的负面影响未提出进一步思考，方案完整性可提升。可补充与现有滑流抑制方案的对比研究，进一步凸显蜂窝结构方案的优势与创新性。

陈笑，山东省乐陵市花园镇中心小学 针对航模初学者易因“滑流扭转”导致炸机的难题，创新性地设计了一种利用蜂窝结构消减扭矩的装置。利用生活中的吸管制成类蜂窝结构，以极低成本实现了效果。这种化繁为简、在资源有限条件下寻找最优解的“创客”精神是未来卓越工程师的必备素质。

王小雷，上海市黄埔区教育学院附属中山学校 文章结构清晰，有理有据，能有效的说明自己的研究成果，具有一定的创新性。如果能对自己的研究结论进行一定的深入解读就更好了。