平流层飞艇螺旋桨相似准则分析与验证

刘沛清 马利川 段中喆 马 蓉

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (中国空间技术研究院 临近空间飞行器研究中心,北京 100094)

摘 要: 根据螺旋桨相似理论,选择等 *Re* 数和等前进比作为一组相似准则. 通过数值模拟验证该相似准则组合的正确性和适用性,着重研究密度对螺旋桨相似性参数的影响,并将螺旋桨数值计算结果与缩比模型地面常规密度风洞试验的有关结果进行了对比分析. 结果表明:数值模拟的不同工作高度下螺旋桨无量纲气动力系数相互重合,螺旋桨数值计算结果和地面风洞试验结果基本吻合,表明在所选择的相似准则下,密度基本不影响螺旋桨相似性参数. 平流层飞艇螺旋桨可以在地面常规密度风洞中按照等 *Re* 和等前进比相似准则进行缩比模型试验,为平流层螺旋桨的试验研究提供参考依据.

关 键 词: 平流层飞艇; 螺旋桨; 相似准则; 数值模拟

中图分类号: O 353

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)07-0957-05

Study and verification on similarity theory for propellers of stratospheric airships

Liu Peiqing Ma Lichuan Duan Zhongzhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Ma Rong

(Near Space Vehicle Research Centre, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: According to similarity theory of propellers, equal Reynolds number and equal advanced ratio similarity was selected as a group of similarity criterion combination. The effect of different density on the propeller similarity criterion was investigated by using numerical simulation. The chosen similarity criterion and correctness of applicability were verified. The relevant test results obtained by using the ground wind tunnel test on the scaled propeller model and the numerical simulation results of the stratosphere propellers were compared and analyzed. The results show that the nondimensional aerodynamic character curves of propellers at different altitudes are nearly agreement with each other. And the experimental results in ground wind tunnel is corresponding to the results of numerical simulations. It means that the air density influences little of propeller similarity parameters. So that, the scaled model experiment of propeller for stratospheric airships in ground wind tunnel is feasible according to equal Reynolds number and advanced ratio similarity, and provides reference basis for the wind tunnel test of propellers in stratosphere.

Key words: stratospheric airships; propeller; similarity theory; numerical simulation

由于平流层大气基本只作水平方向运动,没有大气上下对流,几乎没有水汽凝结和雷雨天气,十分利于飞艇稳定飞行. 平流层飞艇具有可定点或区域巡航、驻空时间长、载重量大、可重复使用、安全性好等优点,在通信中继、对地观测、空中预警等方面具有十分重要的应用价值,是目前世界各国研究的热点领域[1-5]. 平流层飞艇推进系统通常采用电机驱动螺旋桨提供推力,实现定点巡

收稿日期: 2011-06-09; **网络出版时间**: 2012-05-22 15:44

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1544.003.html

作者简介: 刘沛清(1960 -),男,山西忻州人,教授,lpq@buaa.edu.cn.

航和机动飞行.

在螺旋桨试验研究方面,由于平流层大气密度与地面大气密度相差较大,而目前国内还不具备在地面直接模拟平流层低密度大气环境的风洞试验条件,要开展平流层飞艇螺旋桨的相关研究工作,只能借助于地面常规密度风洞来进行螺旋桨缩比模型试验. 而高空与地面空气密度的较大差别是否会对螺旋桨缩比模型地面风洞试验的相似参数和试验结果产生影响,大多文献并没有给出明确说明,需要进行研究探讨.

为了研究密度是否影响平流层飞艇螺旋桨地面风洞试验的相似问题,本文主要通过数值模拟,对采用等 Re 数和等前进比 λ 相似准则的研究方法进行数值验证,并与螺旋桨缩比模型地面常规密度风洞的试验结果进行比较,得到适用于在地面常规风洞进行高空螺旋桨试验研究的相似准则,为平流层飞艇螺旋桨试验研究提供参考.

1 螺旋桨相似准则

所谓相似是指在对应点上对应瞬间所有表征现象的相应物理量保持各自固定的比例关系. 螺旋桨相似理论主要研究两方面的问题:两个几何相似的螺旋桨在什么条件下工作状态是相似的,以及如何将螺旋桨的风洞缩尺模型数据换算到原型上去. 螺旋桨的相似性条件包括几何相似、运动相似和动力相似.

在螺旋桨气动试验中,如果缩尺模型和原型的绕流流场能保证力学相似,则模型的气动力特性就能正确反映实物流场的特性. 几何相似及安装角相同的螺旋桨,如果绝对尺寸、转速或前进速度等参数不同,其拉力和功率就不会相同. 但只要能保持相似参数(如 Re,λ,Ma 等)相同,则不同情况下螺旋桨的拉力系数和功率系数相同,随之效率相同. 这样就可根据模型桨的测试结果推算原型桨气动性能[6].

由于模型与原型均采用同一空气介质,因此要同时满足各个相似准则是很困难的. 所以在风洞试验中只能保证主要的相似准则,而忽略次要准则[7-8]. 对于平流层螺旋桨而言,在几何和运动相似的情况下,由于飞艇飞行速度较小(可忽略 Ma 的影响),则主要的影响因素为 Re 和 λ.

对于两个相似的螺旋桨流动,Re 准则要求对应点处的 Re 数保持相等,即

$$\frac{n_{s1}D_1^2}{v_1} = \frac{n_{s2}D_2^2}{v_2} \tag{1}$$

可得转速比尺为

$$\eta_n = \frac{n_{s1}}{n_{s2}} = \frac{v_1}{v_2}\frac{D_2^2}{D_1^2} = \frac{\eta_\nu}{\eta_L^2} \tag{2}$$

其中,$\eta_L = D_1/D_2$ 为长度比尺;$\eta_\nu = v_1/v_2$ 为空气运动粘性系数比尺.

λ 在螺旋桨气动设计中是一个非常重要的参数,它规定了两个几何相似螺旋桨的工作状态保持运动相似的条件或准则. 由 St 准则,要求原型与模型的 λ 相等,即

$$\lambda = \frac{V_{01}}{n_{s1}D_1} = \frac{V_{02}}{n_{s2}D_2} \tag{3}$$

可得速度比尺为

$$\eta_V = \frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{n_{s1}}{n_{s2}}\frac{D_1}{D_2} = \eta_n\eta_L = \frac{\eta_\nu}{\eta_L} \tag{4}$$

拉力比尺为

$$\eta_T = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_1 D_1^4 n_{s1}^2}{\rho_2 D_2^4 n_{s2}^2} = \eta_\rho\eta_L^4\eta_n^2 = \eta_\rho\eta_\nu^2 \tag{5}$$

螺旋桨功率比尺为

$$\eta_P = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1 n_{s1}^3 D_1^5}{\rho_2 n_{s2}^3 D_2^5} = \eta_\rho\eta_L^5\eta_n^3 = \frac{\eta_\rho\eta_\nu^3}{\eta_L} \tag{6}$$

平流层螺旋桨的各个无量纲气动力系数是在风轴系下定义的,其具体表达式分别为

螺旋桨拉力系数:

$$C_T = \frac{T}{\rho n_s^2 D^4}$$

螺旋桨功率系数:

$$C_P = \frac{P}{\rho n_s^3 D^5}$$

螺旋桨效率:

$$\eta = \frac{TV_0}{P} = \frac{C_T}{C_P}\lambda$$

其中,T 为螺旋桨拉力;P 为螺旋桨需用功率;ρ 为空气密度;V_0 为来流速度;n_s 为螺旋桨转速;D 为螺旋桨直径.

在不同工作高度 H 下,设密度为 ρ_H,所对应的无量纲气动力参数为

$$\left.\begin{aligned} C_T &= \frac{T_H}{\rho_H n_s^2 D^4} = f_T(\lambda, Re) \\ C_P &= \frac{P_H}{\rho_H n_s^3 D^5} = f_P(\lambda, Re) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

在不同密度环境下,保证 Re 和 λ 相似,若得到的螺旋桨无量纲气动力系数变化曲线相互重合,则表明密度不影响螺旋桨试验的运动和动力相似;若无量纲气动力系数变化曲线不重合,则表明密度影响螺旋桨试验的运动和动力相似,这种情况下,在地面常规密度风洞中进行平流层螺旋桨缩比模型试验时,应考虑密度对螺旋桨相似参

数的影响[9].

2　平流层螺旋桨相似准则数值验证

2.1　计算网格

设计螺旋桨的桨叶叶素选用低雷诺数高升力 S1223 翼型. 螺旋桨的设计飞行高度 $H=20$ km,螺旋桨直径 $D=6.5$ m,桨毂直径 $d_0=1.3$ m,桨叶最大宽度 $b_{max}=516$ mm,桨叶数目 $N_B=3$,桨叶效用因子 $A_F=62.3$.

整个流场计算区域采用结构网格. 由于螺旋桨的桨叶扭转角和表面曲率变化较大,为满足 CFD 结构网格连续性、正交性、光顺性的要求,螺旋桨桨叶周围采用 O 型网格,以较好模拟桨叶近壁面的流动. 整体计算域采用 O 型 + H 型网格分布. 螺旋桨上游计算域长度取 10 倍螺旋桨直径,下游计算域长度取 20 倍螺旋桨直径,展向长度取 10 倍螺旋桨直径. 网格总数为 520 万. 计算域整体网格和桨叶周围网格分布见图 1.

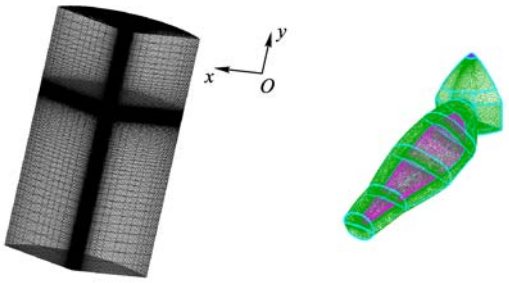


图 1　计算域网格和桨叶周围网格示意图

2.2　计算方法

在地面惯性坐标系下,螺旋桨绕流是非定常的,流场数值求解过程比较复杂;在固连于螺旋桨的旋转坐标系下,螺旋桨绕流可认为定常的,流场数值求解相对简单. 因此本文在旋转坐标下定常求解流动控制方程来模拟螺旋桨绕流流动.

控制方程采用雷诺平均 N-S(Navier-Stokes)方程,采用有限体积法离散控制方程,选择基于压强的隐式求解器,对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式,压力速度耦合采用 Coupled 算法,选用 SST(Shear-Stress Transport) k-ω 湍流模型. 由于绕桨叶流动是周期性转动的,则可取单个桨叶进行网格划分. 为节省计算资源和时间,在子域的起始边界和终止边界上采用周期性边界条件,螺旋桨表面采用无滑移壁面边界,螺旋桨计算域的上游边界设为速度入口边界,其余边界设为压力出口边界.

2.3　计算工况和结果分析

采用 FLUENT 6.3.26 软件对平流层螺旋桨计算模型在 $H=0,10,15,20,25$ km 不同高度高空在不同来流风速和不同螺旋桨转速下的气动特性进行数值模拟计算. 不同高度高空气体的密度、温度、压强、空气运动粘性系数等大气参数见表 1.

表 1　不同高度下的大气参数表

高度/km	温度/K	压强/Pa	密度/(kg·m^{-3})	空气粘性系数 10^{-5}/(kg·m^{-1}·s^{-1})
0	288.15	101 325	1.225 05	1.789 4
10	223.15	26 435.8	0.412 70	1.457 1
15	216.65	12 044.5	0.193 67	1.421 6
20	216.65	5 474.9	0.088 03	1.421 6
25	221.65	2 511	0.039 46	1.449 0

根据表 1 中的各个高度高空的大气参数,由式(2)和式(4)可以得到在等 Re 和等 λ 相似准则下螺旋桨模型的长度比尺、空气密度比尺、空气运动粘性系数比尺、螺旋桨转速比尺以及来流速度比尺,具体各参数相似比尺见表 2.

表 2　不同高度相对于地面($H=0$)的各参数相似比尺表

不同高度 H/km	长度比尺 η_ρ	空气运动粘性系数比尺 η_v	密度比尺 η_p	转速比尺 η_n	速度比尺 η_v
0	1	1	1	1	1
10	1	2.417 1	0.336 9	2.417 1	2.417 1
15	1	5.027 4	0.158 1	5.027 4	5.027 4
20	1	11.027	0.071 9	11.027	11.027
25	1	25.15	0.032 2	25.15	25.15

图 2 ~ 图 4 给出了等 Re 和等 λ 相似准则下通过数值模拟计算得到的不同工作高度下平流层螺旋桨在不同来流速度和不同螺旋桨旋转速度时的拉力系数、功率系数和效率随前进比变化曲线分布. 从图中对比可以看出,按照等 Re 和等 λ 相似准则数值模拟得到的螺旋桨拉力系数、螺旋桨

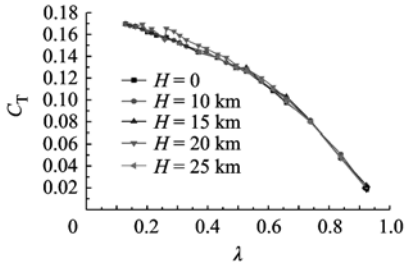


图 2　不同高度螺旋桨拉力系数随 λ 变化曲线

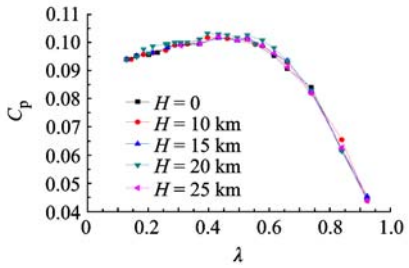


图 3　不同高度螺旋桨功率系数随 λ 变化曲线

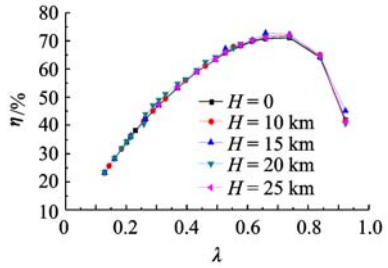
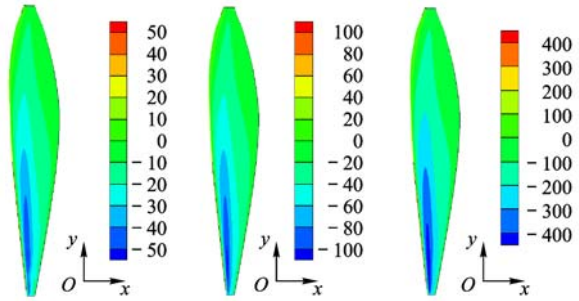


图 4 不同高度螺旋桨效率随 λ 变化曲线

功率系数和螺旋桨效率的气动力无量纲系数在不同高度下变化趋势是基本一致的,各曲线之间相互重合. 可以表明,密度比对螺旋桨相似性参数的影响极小,对螺旋桨的无量纲气动力系数几乎没有影响.

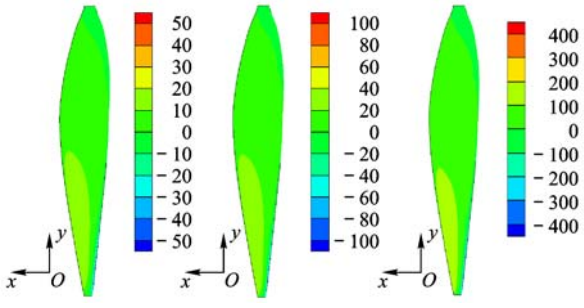
2.4 流场分析

将 3 个高度 $H=0$,10,20 km 下在某对应相似工况下($H=20$ km 时,来流速度 $V=20$ m/s,转速为 300 r/min)的流场特性进行比较分析. 图 5、图 6 分别给出了 3 个高度在相似工况下桨叶迎风面和背风面的压力分布.



a $H=0$ b $H=10$ km c $H=20$ km

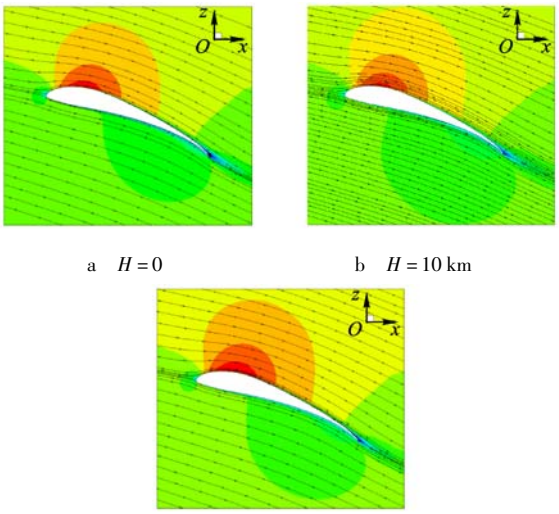
图 5 相似工况下桨叶迎风面压力分布云图(单位:Pa)



a $H=0$ b $H=10$ km c $H=20$ km

图 6 相似工况下桨叶背风面压力分布云图(单位:Pa)

对于两个几何相似的螺旋桨,运动相似要求绕过螺旋桨的气流速度场相似,即在两螺旋桨的绕流场中,对应点上的速度大小成比例,方向相同. 动力相似要求作用于流体质点上的各种作用力大小成比例,方向相同. 通过对比 3 个高度在相似工况下桨叶迎风面和背风面的压力分布云图以及桨叶径向特征面处的流场结构分布(图 7),可以看出,在相似准则下,桨叶迎风面和背风面的压力分布一致,数值模拟得到的对应螺旋桨绕流流场信息也十分相似. 图 8 给出了等 Re 和等 λ 的相似准则下 3 个高度在相似工况下桨叶径向 $r=0.7R$ 翼型剖面(特征面)处沿弦向的压力系数分布曲线. 可明显看出,3 个高度下的剖面翼型压力系数分布相互吻合,没有出现因为密度大小不同导致压力系数分布曲线的差异. 可见,采用等 Re 和等 λ 的相似准则,密度不会对螺旋桨的运动相似和动力相似产生较大影响.



a $H=0$ b $H=10$ km

c $H=20$ km

图 7 相似工况下桨叶径向 $r=0.7R$ 翼型剖面(特征面)流场结构图

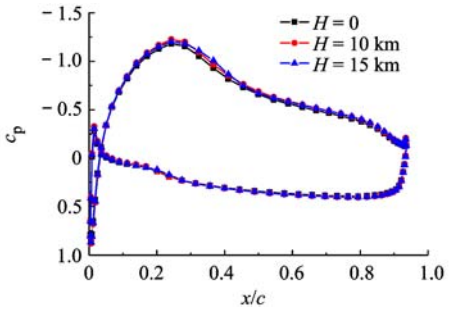


图 8 相似工况下桨叶径向 $r=0.7R$ 翼型剖面(特征面)压力系数分布

3 与缩尺模型地面风洞试验对比

为进一步验证数值计算结果的可靠性和实用性,将原型桨在 $H=20$ km 高空的数值计算结果与螺旋桨缩比模型地面常规密度风洞试验结果进行了比较. 此风洞试验是在北航地面低雷诺数低速吹气试验台上进行的,按照等 Re 和等 λ 相似准则设计试验模型. 利用测力天平测量不同来流速度及螺旋桨转速下螺旋桨的拉力、转矩,并根据相关计算关系式得到螺旋桨拉力系数、功率系数和

效率,具体试验条件与试验数据可参见文献[9 – 10].

图 9 ~ 图 11 给出了螺旋桨缩比模型地面风洞试验的拉力系数、功率系数和效率与螺旋桨 $H = 20$ km 工作高度下数值模拟结果的对比. 如果不考虑风洞试验过程中不确定因素产生的试验误差,按等 Re 和等 λ 相似准则,地面常规密度风洞缩比模型试验的无量纲气动力系数和模拟平流层 20 km 处低密度大气环境的数值计算结果基本吻合. 对于较小前进比下螺旋桨拉力系数的试验结果要比数值模拟计算结果偏低的原因主要是高转速时,迎角处于大迎角范围,拉力系数增大趋势在逐渐减小,而数值计算由于方法本身的局限,不能较好地模拟螺旋桨大迎角下的复杂流动. 另外当螺旋桨前进比小于 0.3 时,受螺旋桨滑流区侧向收缩影响,试验结果略低于数值计算结果. 因此,平流层螺旋桨是可以在地面常规密度风洞中采用等 Re 和等 λ 相似准则进行缩比模型试验来获得其无量纲气动力系数的.

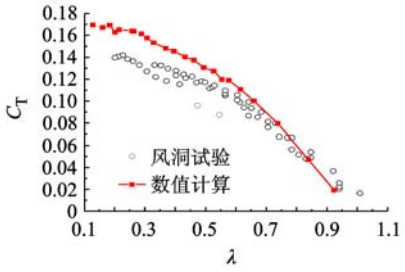


图 9　螺旋桨拉力系数地面风洞试验与数值计算对比

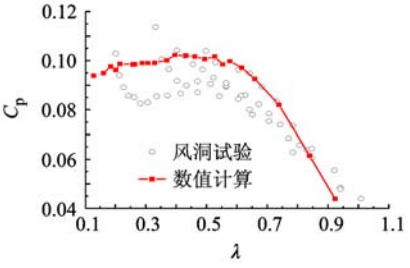


图 10　螺旋桨功率系数地面风洞试验与数值计算对比

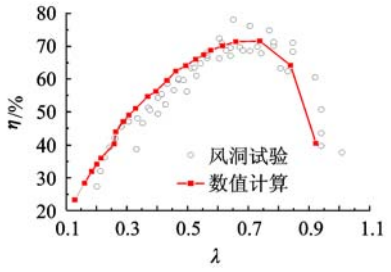


图 11　螺旋桨效率地面风洞试验与数值计算对比

4　结　论

本文主要采用数值方法研究了密度对螺旋桨相似性参数的影响,并利用数值计算结果与相关地面风洞试验对相似准则进行了联合验证. 主要结论有:①利用等 Re 和等 λ 的相似准则开展螺旋桨试验研究是有效可行的,具有一定的理论与工程应用价值;②数值研究表明在所选择的相似准则下密度基本不会对螺旋桨的相似参数产生影响;③地面常规密度风洞有关试验数据和数值模拟结果相比较得出,在地面常规密度风洞中可以按等 Re 和等 λ 相似准则对平流层螺旋桨进行缩比模型试验研究.

参考文献（References）

[1] 郝鹏飞. 平流层大飞艇,拿未来说事儿[J]. 新知容,2006(12):99 – 102
Hao Pengfei. The future stratosperic airships[J]. Chinese Newlore Magzine,2006(12):99 – 102(in Chinese)

[2] Brooke L. High altitude LTA platforms:capabilities and possibilities[R]. AIAA 2005-7319,2005

[3] Colozza A. High altitude propeller design and analysis overview [R]. NASA-CR-1998-208520,1998

[4] Koch L D. Design and performance calculations of a propeller for very high altitude flight[R]. NASA/TM-1998-206637,1998

[5] Colozza A,Dolce J L. High-altitude,long-endurance airships for coastal surveillance[R]. NASA/TM-2005-213427,2005

[6] 赵忠. 螺旋桨特性风洞试验技术研究[D]. 西北工业大学航空学院,2007
Zhao Zhong. Research on wind tunnel test technology of Propeller characteristics [D]. School of Aeronautics,Northwestern Polytechnical University,2007(in Chinese)

[7] 刘沛清. 空气螺旋桨理论与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006
Liu Peiqing. Air propeller theory and application[M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2006(in Chinese)

[8] 聂营. 平流层飞艇高效螺旋桨设计与试验研究[D]. 中国科学院研究生院,2008
Nie Ying. The design and experiments study On high efficient propeller used for stratospheric airship[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2008(in Chinese)

[9] 刘沛清,马蓉,段中喆,等. 平流层飞艇螺旋桨地面风洞试验[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1775 – 1781
Liu Peiqing,Ma Rong,Duan Zhongzhe,et al. Experiment study of light-weight,high-efficiency propeller of stratospheric airships in ground wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(8):1775 – 1781

[10] 马蓉. 平流层低动态飞行器高效螺旋桨设计技术研究[D]. 北京航空航天大学航空科学与工程学院,2010
Ma Rong. Design technology study on the high-efficiency propeller of the low dynamic vehicles in stratosphere[D]. School of Aeronautic Science and Engineering,Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010

(编　辑:李　晶)