

基于气固耦合非定常流动的叶栅颤振分析^{*}

杨青真, 肖 军, 周新海

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 采用二维 N-S 方程/结构振动方程组耦合数值方法, 分析计算了二维非定常气动力强迫振动条件下振动能量及气动力对叶栅所做的功, 分别根据振动能量和气动力做功分析了叶栅的颤振特性。NACA0012 和 PROF 叶栅在不同折合频率下气动参数随时间的变化表明, 折合频率是影响叶栅颤振的重要因素。气固耦合方法得到的 NACA0012 叶栅颤振折合频率比非耦合的结果高, 而对 PROF 叶栅则相反。这表明叶栅结构动力参数对其发生颤振时的折合频率影响很大且很复杂, 要准确预测颤振应该考虑叶栅结构动力与气动力的耦合因素。

关键词: 气固耦合⁺; 振动; 叶栅颤振⁺; 气动功⁺; 折合频率⁺; 能量法

中图分类号: V231.92 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2005)06-0526-05

Cascade flutter investigation based on flow-structure coupling unsteady flow

YANG Qing-zhen, XIAO Jun, ZHOU Xin-hai

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract The vibration energy and aerodynamic work of unsteady aerodynamic force on cascade in forced vibration were investigated using numerical solution of 2-D Navier-Stokes/structure coupled equations, and the flutter characteristic was analyzed according to the vibration energy and aerodynamic work. The variation of aerodynamic parameters of cascade NACA0012 and PROF under different reduced frequency shows that the reduced frequency is an important factor that influences the flutter. The reduced flutter frequency of cascade NACA0012 obtained from flow/structure coupling analysis is higher than that from uncoupling analysis, but it is opposite for cascade PROF. This shows that the structure dynamic parameters of the cascade have large influence on the reduced flutter frequency. Thus structure dynamic factors must be taken into account of flutter analysis.

Key words Flow/structure coupling⁺; Vibration; Cascade flutter⁺; Aerodynamic work⁺; Reduced frequency⁺; Energy method

1 引 言

颤振是一种由流体诱发的振动, 是流体和结构相互作用产生的不稳定现象。对叶片的颤振分析必然涉及流体动力学和结构动力学两个方面。将流体动力学方程与叶片结构动力学方程联立求解的方法称为颤振时域分析法^[1]。它通过计算分析以振动位移、能量等参量为代表的结构响应来判断叶片颤振的

发作, 当结构响应随时间逐步增大, 则预示气弹不稳定的出现。时域分析实际上是流体与结构的直接耦合, 其它假设条件相对较少, 是更接近实际过程的计算方法。目前在风扇/压气机叶片颤振分析中, 二维叶栅的时域分析较为常见^[2-3]。通常时域分析法需要进行较长时间、多个周期的气固耦合非定常流场计算才能确定振动位移是稳定还是发散。另一种颤振分析法为能量法^[4-5], 它通过气动力功评估颤振发作

* 收稿日期: 2005-02-26 修订日期: 2005-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50376053)。

作者简介: 杨青真 (1964—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为飞机空气动力学, 发动机气动热力学。

E-mail: qzyang@nwpu.edu.cn

的几率,具体方法是:在忽略机械阻尼时,以一个振动周期内,叶片从周围气体吸收能量的正负关系来判断叶片颤振是否发作。

本文在气动-结构耦合方程组数值解基础上比较了时域法和能量法分析结果,证明了两者的基本一致,但气动功分布特性有较大差异。

2 数值方法

2.1 流动控制方程和叶片结构动力学方程

流场计算采用二维非定常流时均 N-S 方程有限体积法,所用运动网格条件下的积分-微分方程为^[6]

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Delta} d\mathbf{A} + \oint_{\Delta} \left[\frac{(E - E_v - Q u_{mg})}{(F - F_v - Q v_{mg})} \frac{i}{j} \right] \cdot d\mathbf{S} = K \quad (1)$$

式中 Q 代表气动参数 $(\rho, \rho_u, \rho_t, \rho_e)^T$, E, F 是无粘通量, E_v, F_v 是粘性通量, K 是源项。在计算中使用 B-L 紊流模型作为补充方程。

叶片振动简化为特征截面上周向的弯曲振动和绕扭心的扭转运动。描述这一振型的结构动力方程可表达为^[6]

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dw_h}{dt} + S_a \frac{dw_a}{dt} + D_h \frac{dh}{dt} + K_h h &= L \\ S_a \frac{dw_h}{dt} + I_a \frac{dw_a}{dt} + D_a \frac{d\alpha}{dt} + K_a \alpha &= M \\ \frac{dh}{dt} &= v_h \\ \frac{d\alpha}{dt} &= v_a \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 m 为叶片质量, S_a 为相对于扭心的质量矩, I_a 为转动惯量, D_h 和 D_a 为阻尼系数, K_h 和 K_a 为刚度系数, L 和 M 分别为气体作用于叶片上的周向力和绕叶片扭心的力矩, v_h, v_a, h, α 分别是叶片的弯扭振动速度及振动位移。

2.2 求解格式

气动方程采用四阶 Runge-Kutta 时间推进,并采用双时间方法^[7,8]加速非定常流场计算。在虚拟时间域上还引入多重网格及残差光顺加速措施^[9,10]。

振动叶片在任一时刻的振动位移和速度由结构动力方程求解,在物理时间上采用四步 Runge-Kutta 数值积分求解。

2.3 运动网格和边界条件

本文流场计算采用 H 型网格,为了节省非定常流场计算中网格生成的时间,采用了运动网格技

术^[11]。首先生成初始时刻的 H 型网格,并作为初始条件下的定常流计算网格进行流场计算,然后根据气动力载荷从结构动力方程组求解得出叶片表面各网格节点的振动位移和运动速度,计算域中间网格点的位置和运动速度按对应的初始网格相邻网格间隔稀疏比例关系插值确定。网格运动过程中始终保持上下游边界的轴向位置不变。计算域中间网格的运动速度也按网格间相互比例关系由边界网格运动速度插值获得。在方程中通过网格运动速度体现流场边界的变化。

进口边界上指定来流总温、总压。当来流为亚声速时,给定进口气流角;当来流为超声速时,根据给定的来流马赫数确定进口气流角。出口边界上,如轴向分速为亚声速,则给定出口反压,其它参数用零阶外推;如轴向分速为超声速,所有气动参数均零阶外推。在物面边界采用无滑移条件,即壁面处的流体质点运动速度与壁面的运动速度相等。温度采用绝热壁面条件;压力采用沿壁面法向零阶外插。为简化问题,假定所有叶片同相位振动,采用一般周期性边界条件,对于实际有相差的情形则需用相差周期条件^[12]。

2.4 气动功计算和颤振判定准则

在颤振分析中为了缩短非定常流计算时间,采用一个振动周期内非定常平均积累功作为颤振分析量。非定常平均积累功的定义为^[13]

$$P(\mathbf{x}) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\mathbf{x}, t) \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}, t) dt \quad (3a)$$

$$N(t) = \iint_{\Omega} (\mathbf{x}, t) \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}, t) dS \quad (3b)$$

$$W = \iint_{\Omega} p(\mathbf{x}) dS = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} N(t) dt \quad (4)$$

式中 T 为叶片的振动周期, t_0 为非定常流场完全建立后的任意时刻, $p(\mathbf{x}, t)$ 为静压, $\mathbf{V}(\mathbf{x}, t)$ 为速度矢量, $\mathbf{n}(\mathbf{x}, t)$ 为叶片表面在 $\mathbf{x}$ 处的内法线方向的单位向量, S 代表叶栅表面面积, Ω 代表整个叶栅表面。 $N(t)$ 代表任意时刻气动力对叶片表面做功总功率; $P(\mathbf{x})$ 代表一个振动周期内叶表面单位面积上非定常力平均积累功; W 为一个周期内流体对叶片所做非定常力总功。由于叶栅表面为二维曲面,叶栅表面积计算时叶高方向取单位宽度。

能量法颤振判别准则是:当非定常力总功 W 为正,则颤振会发生;反之则稳定。非定常积累功 $P(\mathbf{x})$ 是位置 $\mathbf{x}$ 的函数,计算可以给出其沿叶栅表面的分

布,通过它还能够分析叶片表面上的“危险区域”。

3 算例及结果分析

3.1 NACA0012叶栅颤振分析

叶型弦长 c 为 20245mm, 安装角 0° 。进口马赫数 0.56 进气角 (进口速度方向与轴向夹角) 22° , 进口总压 267kPa 总温 356.3K, 出口背压 2MPa 稠度 1。叶片做弯扭复合振动, 扭心位于前缘起 38% 弦长处, 忽略阻尼项。结构动力参数和起振条件见表 1。

3.1.1 NACA0012叶片振动能量曲线分析

图 1(a)是情形 1 下采用气固耦合计算方法得到的叶片振动能量 ($E_{\text{total}}/0.5mc^2$) 随时间 (横坐标为无量纲时间 $a_\infty t/c$, a_∞ 代表进口上游声速, 图 4 与此相同) 的变化曲线。实线表示总能量, 虚线表示动能, 点划线则表示位能。可见, 随时间推移, 振动总能量不断减小, 且变化趋势与位能基本一致。叶片振动能量的衰减说明气体对叶片做负功, 振动将随之减弱。图 1(b)对应情形 2 可见总能量随时间不断增加, 气体对叶片做正功, 这时叶片从气体中不断吸取能量, 最终将导致颤振发生。

Table 1 Structure dynamic parameters and two initial vibrations condition of cascade NACA0012

Case 1, 2	Phase diff $\varphi = 0^\circ$	$x_a = \frac{2S_a}{mc} = 0.0974$
	$\frac{h}{c} \Big _{t=0} = 0$	$r_a = \sqrt{\frac{4I_a}{mc^2}} = 0.47$
	$\alpha \Big _{t=0} = 0$	$\frac{\omega_h}{\omega_a} = 0.6$
	$\frac{d}{dt} \left(\frac{h}{c} \right) \Big _{t=0} = 0$	$\mu = \frac{4m}{\pi \rho_\infty c^2} = 100$
Case1	$\frac{dq}{dt} \Big _{t=0} = 1.8630$	$V^* = \frac{2V_\infty}{\omega_a c} = 3.6$
Case2	$\frac{dq}{dt} \Big _{t=0} = 1.5764$	$V^* = \frac{2V_\infty}{\omega_a c} = 4.5$

3.1.2 NACA0012叶片表面气动功分析

叶片在起振条件情形 1 下作自由振动, 取一个振动周期考察气动力功率, 图 2(a)显示叶片表面气动力对叶片做负功 (横坐标为时间与振动周期比值 t/T , 图 5~7 与此相同)。图 2(b)显示在情形 2 下一个振动周期内叶片表面气动力对叶片所做正功大于负功。以能量法分析, 情形 1 下叶片在消耗振动能量, 颤振不会发生; 而情形 2 下叶片振动能量加强, 将导致颤振发生。这一结论与 3.1.1 节得到的结论一致。

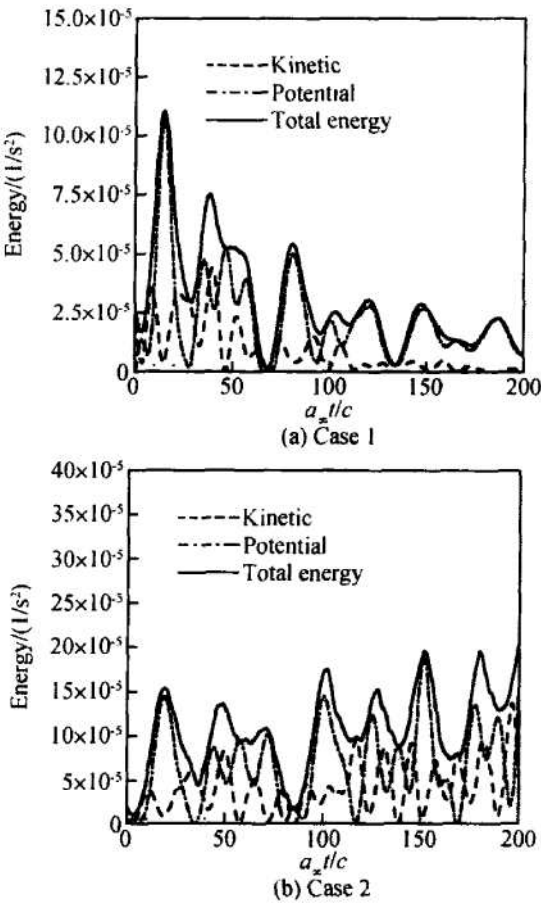


Fig 1 Vibration energy of cascade NACA0012

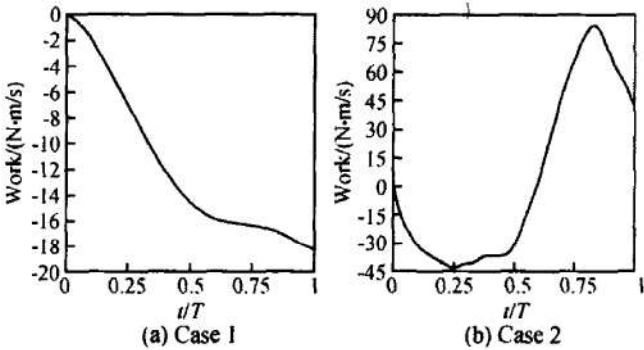


Fig 2 Aerodynamic work on the surface of cascade NACA0012

3.2 PROF叶栅的颤振分析

自行设计的 PROF 可控叶栅几何外形和计算网格如图 3 弦长 c 为 26.4mm, 安装角 32.76° , 最大相对厚度位置在距前缘 32% 弦长处。进口马赫数 0.67, 进气角 51° , 进口总压 2.99MPa 进口总温 414.91K, 出口背压 2.53MPa 稠度 1.15。叶片做弯扭复合振动, 扭心位于前缘起 44% 弦长处, 忽略阻尼项。起振条件见表 2。

3.2.1 PROF叶栅振动能量曲线分析

图 4(a)和 (b)分别为情形 1 和情形 2 下气固耦合时叶片振动能量 ($E_{\text{total}}/0.5mc^2$) 随时间 (同 3.1.1

节)变化曲线。可见,情形 1 振动总能量基本稳定,而情形 2 下振动总能量随时间不断增加,这预示着颤振的发生。

Table 2 Structure dynamic parameters and two initial vibration condition of cascade PROF

Case 1, 2	Phase diff $\varphi = 0^\circ$	$x_a = \frac{2S_a}{mc} = -0.0253$
	$\left. \frac{h}{c} \right _{t=0} = 0$	$r_a = \sqrt{\frac{4I_a}{mc^2}} = 0.493$
	$\alpha _{t=0} = 0$	$\frac{\omega_h}{\omega_a} = 1.25$
	$\left. \frac{d}{dt} \left(\frac{h}{c} \right) \right _{t=0} = 0$	$\mu = \frac{4m}{\pi \rho_\infty c^2} = 200$
Case1	$\left. \frac{d\alpha}{dt} \right _{t=0} = 0.04$	$V^* = \frac{2V_\infty}{\omega_a c} = 4.5$
Case2	$\left. \frac{d\alpha}{dt} \right _{t=0} = 0.0225$	$V^* = \frac{2V_\infty}{\omega_a c} = 6.5$

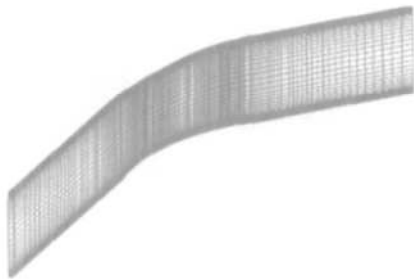


Fig 3 Geometry and computation mesh of PROF

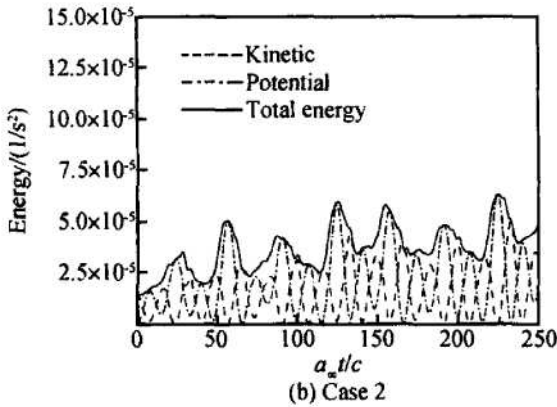
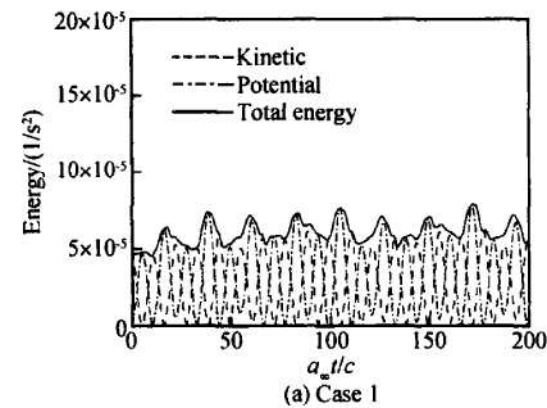


Fig 4 Vibration energy of cascade PROF

3.2.2 PROF叶栅表面气动功分析

图 5(a)显示叶栅在情形 1 下自由振动时叶表气动力在一个振动周期内对叶片所做总功近于零(正功略大于负功)。在情形 2 下一个振动周期内的气动总功为正值(如图 5(b)所示)。从能量观点看,情形 2 下叶片从周围气体中吸取能量,将发生颤振。

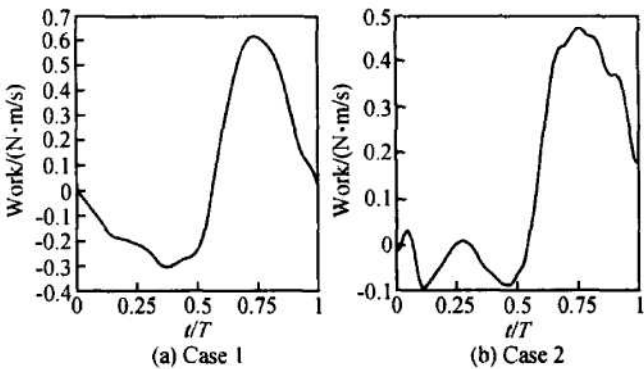


Fig 5 Aerodynamic work on cascade PROF

3.3 气固耦合与非耦合时气动力做功比较

叶片受初始扰动起振后,其振动会改变叶片表面气动力的分布,进而改变叶片振动速度矢量,这样不同时刻气动力做功功率或正或负,加强或抑制叶片振动。若解除耦合约束,令叶片做自由简谐振动,在相同计算条件下叶片表面气动力对其做功的情况与气固耦合时相比有显著差异。

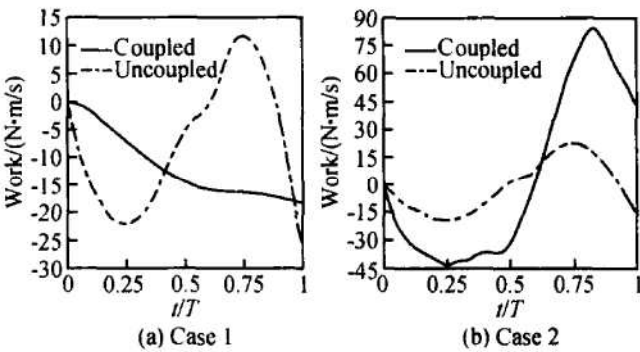


Fig 6 Aerodynamic work on cascade NACA0012

NACA0012叶栅在情形 1 和 2 下一个气固耦合振动周期内气动力总功与非耦合自由振动时的比较如图 6 所示。对于 PROF 叶栅,在情形 1 和 2 下气固耦合与非耦合时气动功的比较如图 7 所示。比较这些图中的实线(耦合)和虚线(非耦合)表明:同一个叶栅在自振条件下和气固耦合条件下的气动功差别较大;比较同一个叶栅在不同折合频率下(图 7(a)和(b))的振动气动功时发现气动力做功受折合频率的影响也很大。

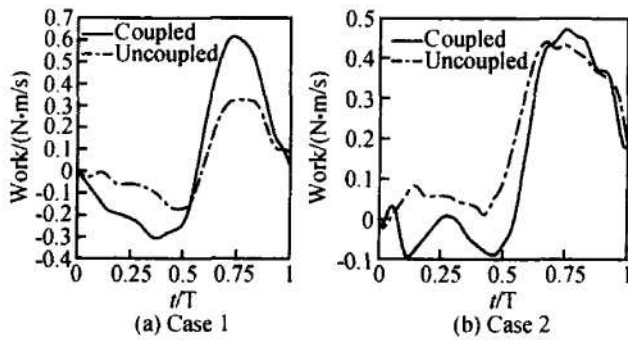


Fig 7 Aerodynamic work on cascade PROF

4 结 论

针对 NACA0012 和 PROF 叶栅采用气动/结构耦合方法和非耦合方法分别分析计算不同折合频率下的颤振特性, 研究结果表明:

(1) 在折合频率较高的情形下两种叶栅振动能量均稳定, 在折合频率较低情形下振动能量发散。

(2) 这两种叶栅在折合频率较高时气动功为负, 无颤振, 折合频率较低时气动功为正, 颤振发生。

(3) 基于气固耦合的“时域法”和基于气固非耦合的“能量法”得出的颤振结论基本一致, 但两种条件下叶栅表面气动力做功情况存在较大差异, 且所对应的颤振折合频率范围不同, 要较准确地判断叶栅颤振应该考虑气动/结构耦合。

参考文献:

- [1] Bakhle M A, Reddy T S R, Keith T G K. Time domain flutter analysis of cascades using a full potential solver [R]. AIAA 90-0984
- [2] Hwang C J, Fang J M. Flutter analysis of cascades using

- an euler/Navier-Stokes solution-adaptive approach [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1999, 15(1).
- [3] Reddy T S R, Bakhle M A, Huff D L, etc. Flutter analysis of cascades using a two dimensional Euler solver [R]. AIAA 91-1681
- [4] Erdos J I, Alzner E. Numerical solution of periodic transonic flow through a fan stage [J]. *AIAA Journal*, 1977, 15(11).
- [5] 周 盛. 叶轮机气动弹性力学引论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989
- [6] He L. Flow-structure coupled approach rotating stall/stall flutter calculation [C]. *WKI Lecture Series Unsteady Flows in Turbomachine*, 11~15 March 1996
- [7] Yang Y, Pahlke K. Implementation of a dualtime stepping method for the numerical solution of N-S equations for rigid airfoils in arbitrary unsteady motion [R]. *IB* 129-95 1995
- [8] 刘前智, 周新海, 胡运聪. 轴流叶轮机三维粘性非定常流动计算的双时间方法 [J]. *工程热物理论*, 2001, 11
- [9] 刘超群. 多重网格法及其在计算流体力学中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993 12
- [10] Liu F, Jameson A. Multigrid Navier-Stokes calculations for three-dimensional cascades [R]. AIAA 92-0190
- [11] 史忠军, 徐 敏, 陈士槽. 动网格生成技术 [J]. *空军工程大学学报*, 2003 4(1).
- [12] 胡运聪. 振动叶栅非定常流场数值模拟与颤振分析 [D]. 西安: 西北工业大学博士论文, 2003 3
- [13] Gerolymos G A. Advances in the numerical integration of the three-dimensional Euler equations in vibrating cascades [R]. *ASME* 92-GT-170

(编辑: 郭振伶)

简 讯

《推进技术》第四度荣获“中国百种杰出学术期刊”称号

2005年12月,《推进技术》第四度荣获“百种中国杰出学术期刊”称号,成为航天类科技期刊中唯一连续四次进入中国百强的科技期刊。此次评选是中国科技信息研究所根据中国科技期刊综合指标评价体系的总被引频次、影响因子、即年指标、基金论文比等指标,对1608种统计源期刊进行综合评定,评选出了第四届(2004年度)中国百种杰出学术期刊。

《推进技术》2004年度的影响因子为0.402,居航空、航天类第1位,总被引频次为356,居航空、航天类第3位。连续15年被美国《工程索引》(EI)的核心数据库收录。

(本刊通讯员)