

齿轮风阻损失仿真及其实际应用

梁作斌, 杜佳佳, 郭梅
(中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所
航空发动机动力传输航空科技重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要: 对多种齿形大小相似但种类不同的齿轮进行了仿真研究,对轮齿周围的空气流场以及齿面压力场进行了分析,并对某型航空发动机中央传动锥齿轮的风阻损失进行了评估.结果表明,齿轮的风阻损失由压力损失和黏性力损失构成,其中黏性力损失占比为 4%~17%.由于壁面作用,斜齿轮轮齿旋向不同也引入了约 60%的风阻损失差异.航空发动机中央传动锥齿轮的风阻损失则在总损失中占比约为 49%.
关 键 词: 风阻损失; 圆柱齿轮; 锥齿轮; 计算流体动力学 (CFD); 航空发动机
中图分类号: V232.8 **文献标志码:** A

Simulation of gear windage losses and its application
LIANG Zuobin, DU Jiajia, GUO Mei
(Key Laboratory for Power Transmission Technology of Aero-Engine,
Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Several different types of gears, yet with similar size, were simulated. The air flow around gear teeth and the pressure distribution on gear teeth surfaces were studied. The windage losses of a specific internal bevel gear adopted in an aero engine was calculated. Result showed that, gear windage losses were consist of pressure loss and viscous force loss, and viscous force loss occupied ratio of 4%—17%. 60% difference in windage losses of helical gears with opposite hand of helix suggests the effect of wall. Windage losses for internal bevel gear in aero engine occupied about 49% of total transmission losses.
Key words: windage losses; cylindrical gear; bevel gear; computation fluid dynamics (CFD); aero engine

航空发动机是一种十分复杂的机械产品,航空发动机附件向飞机提供电能和液压能,其能量从发动机主轴提取,通过中央传动齿轮箱(IGB)和附件传动齿轮箱(AGB)传递至各附件.由于齿轮齿面间的相互摩擦、轴承滚子和跑道间的摩擦、齿轮搅动润滑油、轴承搅动润滑油、齿轮搅动空气等等,齿轮传动系统都有能量损失,损失的能量变成热能进入冷却介质.简单来说,航空发动机的齿轮传动功率在不考虑损失时基本等于涡轮功与压气机功的差值,其能量损失直接影响发动机的性能,所以世界上大型航空发动机制造商均在此领域投入必要资源研究提高传动效率的方法,同时也开展损失机理方面的研究.

齿轮的风阻损失在齿轮传动总能量损失中占有相当比例,为追求航空发动机性能的提升,普惠、罗罗、洛克希德马丁等大型航空发动机制造商

和诺丁汉大学、萨里大学等高校都对齿轮风阻损失进行了研究^[1-3]. 本文对多种轮齿大小相似但不同种类的齿轮进行了仿真研究,对轮齿周围的流场以及齿面压力分布进行了分析,对风阻损失机理进行了探讨,并利用仿真方法对某型航空发动机中央传动锥齿轮的风阻损失进行了评估.

1 齿轮风阻损失简介

任何旋转机械搅动周围空气,都存在风阻损失. 早期科研人员对盘在空气中自由旋转进行了试验研究,并提出了盘的风阻损失计算公式(式(1))如下^[3]:

$$P = 0.0311 \left(\frac{s}{r} \right)^{-0.25} \mu^{0.25} \rho^{0.75} \omega^{2.75} r^{4.5} \quad (1)$$

Dawson, Heingartner 等^[4-5]根据大量的齿轮旋转试验,提出了直齿轮风阻损失计算公式(式(2)),后续又提出了斜齿轮风阻损失计算公式(式(3)). 指出轮齿对齿轮风阻损失的贡献最大,同时指出当轮齿线速度超过 50 m/s 时,风阻损失不可忽略.

$$P = N^{2.9} (0.16 D^{3.9} + D^{2.9} F^{0.75} M^{1.15}) \times 10^{-20} \phi \lambda \quad (2)$$

$$P = 1.12 \times 10^{-8} C' \rho N^{2.85} D^{4.7} \nu^{0.15} \lambda \quad (3)$$

Diab 等^[6]也在试验基础上提出了计算齿轮风阻损失的经验公式(式(4))如下:

$$P = 0.5 C_i \rho \omega^3 R^5 \quad (4)$$

Anderson 和 Loewenthal^[7]也提出了齿轮风阻计算经验公式(式(5))如下:

$$P = C_1 \left(1 + 2.3 \frac{F}{R} \right) \rho^{0.8} N^{2.8} R'^{4.6} \mu^{0.2} \quad (5)$$

式(1)~式(5)中 P 为风阻损失; s 为盘与周围壁面间距; r 为盘半径; μ 为动力黏度; ρ 为空气密度; ω 为角速度; N 为转速; D 为齿根圆直径; F 为齿宽; M 为模数; ϕ 代表油气混合系数($\phi=1$ 表示空气); λ 代表齿轮封闭形式($\lambda=1$ 表示不封闭), ν 为运动黏度; R 为分度圆半径; R' 为节圆半径; C', C_i 和 C_1 为系数.

近期诺丁汉大学与罗罗公司合作开展了一系列航空锥齿轮风阻损失的研究^[8-11],利用试验配合使用 CFD 数值仿真技术,对高速齿轮风阻损失进行评估,并研究减小损失的可行方法. 同时也有关于齿轮风阻损失的仿真方法的研究^[12-13],以及针对在役航空发动机齿轮风阻损失的研究^[14-15]. 上述研究偏重寻找控制齿轮风阻损失的方法,本文重点应用 CFD 方法研究齿轮风阻损失的机理,

并对此方法在工程上的应用进行了探讨.

2 计算模型

2.1 研究对象

为了对比不同种齿轮在相同转速下的风阻损失,以多种具备相似尺寸轮齿但是不同种类的齿轮作为研究对象,为了方便对比,使各齿轮直径大小相似. 为了确定轮齿对齿轮风阻损失的贡献大小,同时对一个与齿轮大小相近的盘进行研究.

盘与齿轮结构参数见表 1.

表 1 盘与齿轮的参数
Table 1 Parameters of disc and gears

对象	宽度/ mm	大端模数/ mm	外径/ mm	螺旋角/ (°)	旋向
盘	30		300		
直齿轮	30	4	296	0	
斜齿轮 1	30	4	296	30	左
斜齿轮 2	30	4	296	30	右
锥齿轮 1(直齿)	30	4	296	0	
锥齿轮 2(弧齿)	30	4	296	30	左
锥齿轮 3(弧齿)	30	4	296	30	右

2.2 仿真模型

为了计算齿轮风阻损失,仅需对稳态进行计算. 使用 Fluent 流体仿真软件对齿轮在空气中自由转动的情况进行三维仿真,示意图见图 1.

作为初步仿真研究,仅对表 1 中所列的各齿轮与盘在空气中自由转动的情况进行研究,不考虑箱体、润滑、啮合以及其他结构件的影响. 为了方便对比,令仿真边界条件相同. 压力入口压力出口(图 1),入口位于齿轮左侧 100 mm,出口距离旋转中心 300 mm,右侧为静止壁面. 空气从入口进入控制体,受旋转齿轮搅动以及静止壁面的作用后由压力出口流出控制体. 齿轮旋转速度为 3 180 r/min,轮齿处线速度约为 50 m/s,远小于马赫数为 0.3 时的速度,可以认定空气为不可压缩流体.

为了降低网格数量和计算时间以提高效率,由于齿轮是旋转对称结构,可以采用旋转周期边界利用 1 个轮齿代替整个齿轮,如图 1 楔形框所示,对轮齿、齿轮壁面和轴表面附近的网格加密,单个计算模型网格数量均在 40 万左右. 计算时应用旋转参考坐标系,齿轮和轴相对于旋转坐标系静止,而壁面旋转. 湍流模型选择 $k-\epsilon$ 模型,在壁面处应用 enhanced wall treatment(EWT),以更

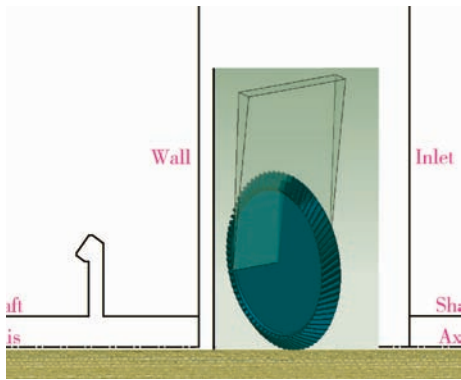


图 1 计算模型示意图

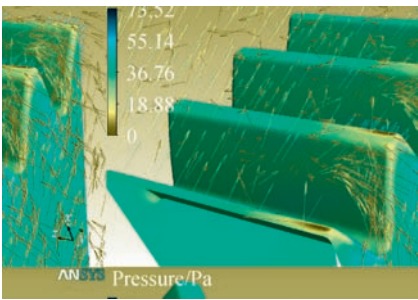


图 2 直齿轮周围速度矢量图

Fig. 2 Velocity vector diagram around spur gear

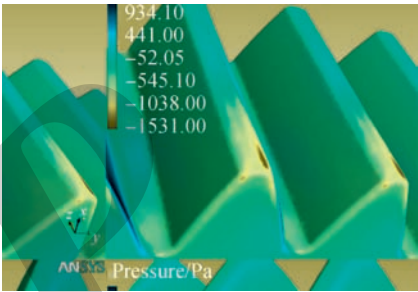


图 3 吸力面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of suction surface

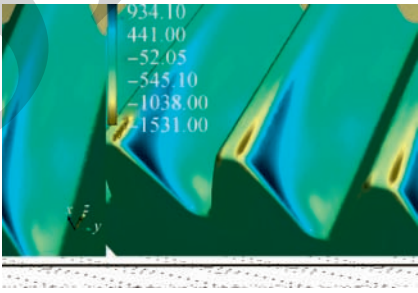


图 4 压力面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pressure surface

Fig. 1 Schematic diagram of computational model

好的适应壁面部分较低的 y^+ 值.

3 计算结果

3.1 轮齿周围流场

通过对轮齿周围空气流场的分析,可以直观的了解轮齿周围空气的流动情况,齿面的压力分布情况,有利于理解齿轮风阻损失的机理,对于准确计算齿轮风阻和后续工程设计中控制齿轮风阻损失有重要意义.

早期 Dawson^[4]对直齿轮风阻损失的试验研究指出,对于在开放空间中自由旋转的直齿轮,空气会从轮齿两侧被吸入两轮齿中的空隙,而后在大约齿宽中部位置被甩出.

图 2 所示为表 1 中的直齿轮轮齿周围空气流场的速度矢量示意图. 可以看到控制体入口侧轮齿周围的空气被吸入两齿间的空隙,而后逐渐沿齿长方向被甩出,这与 Dawson 的结论不同,产生此种现象的原因是齿轮另一侧的静止壁面作用,空气在齿轮与静止壁面间形成了涡流. 由于空气被吸入齿间,可以想象构成轮齿间隙的两个齿面,一个齿面将表现为吸力面,而另一个齿面将表现为压力面,正如在气流中工作的机翼的上下两表面,如图 3、图 4 所示.

图 3、图 4 说明旋转齿轮的相对齿面间存在压差,压差将引入与齿轮旋转方向相反的力矩,为了保持齿轮恒速转动,需要消耗相应功率,表现为齿轮旋转工作时的风阻损失. 除了轮齿齿面压差引入了功率损失外,空气与旋转表面间的黏性力作用也会引入反向力矩,消耗功率,它构成了齿轮风阻损失的另一部分.

对于不同类型的齿轮,比如斜齿轮、锥齿轮等,轮齿与周围空气的相互作用与上述内容相似,但存在损失数值大小的差别.

3.2 齿轮风阻损失计算

为了校验仿真计算的合理性,利用文中第 2.2 节的流体仿真计算模型对表 1 中直齿轮在不同转速下的风阻损失与 Dawson 经验公式以及 Anderson-Loewenthal 经验公式的计算结果进行对比,结果如图 5 所示. 可以明显看出,仿真结果与经验公式计算结果符合性很好,最大差值为 13.5%.

由于表 1 中的直齿轮参数与 Diab 风阻试验^[6]中的 1 号齿轮相同,将仿真结果与 Diab 的试验数据进行对比,见图 6,可以看出两者符合性良好.

通过对比,仿真结果与经验公式及试验符合性良好,说明 CFD 仿真方法有效可靠.

在完成仿真与经验公式计算结果以及试验数

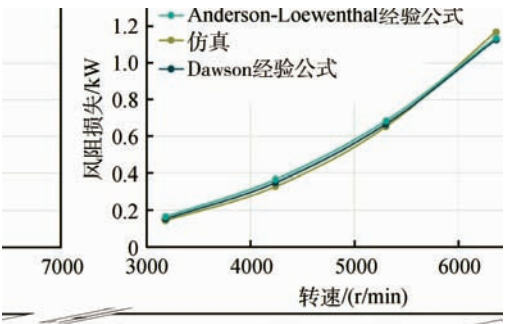


图 5 经验公式与 CFD 结果对比

Fig. 5 Comparison results of CFD and empirical equations

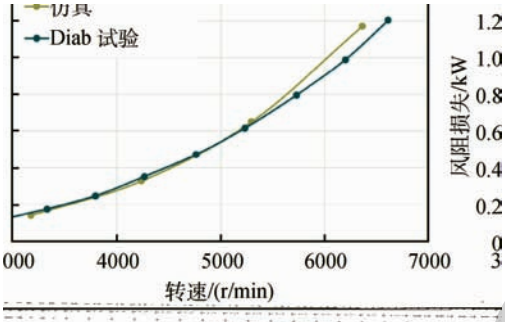


图 6 CFD 计算与 Diab 试验结果对比

Fig. 6 Comparison results of CFD and Diab's experiments

据的对比后,对表 1 中全部的盘和齿轮的风阻损失进行仿真计算,结果见图 7.

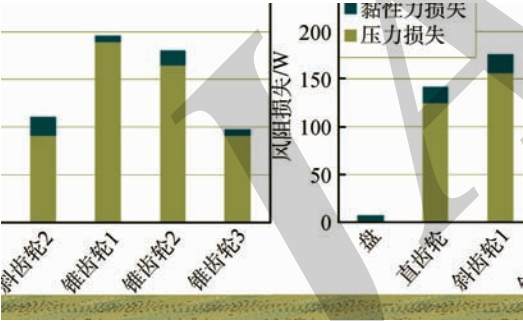


图 7 CFD 计算的风阻损失

Fig. 7 Windage losses of CFD computation

图 7 指出盘的风阻损失全部由黏性力带来. 由盘与直齿轮的对比可以看出,齿轮风阻损失主要来自于轮齿. 齿轮的风阻损失一部分由齿面上的压力差带来,另一部分损失由黏性力带来,并且起主导作用的是压力差引起的损失,而粘性力损失仅占全部风阻损失的 4%~17%,这一点与 Dawson 的研究结论一致.

图 7 指出锥齿轮的压力损失分别略大于同类型的直齿轮,例如左旋弧齿锥齿轮与左旋斜齿轮. 这是因锥齿轮结构与直齿轮不同,除因吸力齿面的作用外,锥齿轮轮齿下方的一部分空气受离心力作用进入了齿间,见图 8.

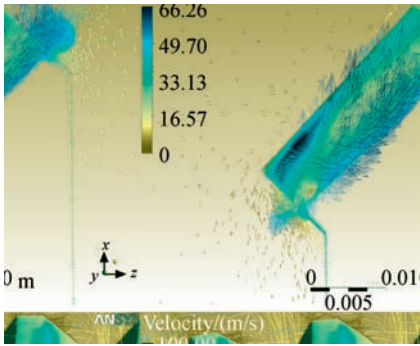


图 8 锥齿轮周围速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector diagram around bevel gear

对于尺寸大小相似的斜齿轮,由于轮齿旋向不同,风阻损失的大小存在很大差异,表 1 中左旋斜齿轮 1 的风阻损失超出右旋斜齿轮 2 约 60%,而两者的黏性力损失数值接近,说明风阻损失数值大小差异是由两齿轮齿面间压力差值不同引起的. 而对于在空气中自由旋转的斜齿轮,当螺旋角大小相同时,即使旋向不同,其风阻损失也应当是一致的,因为其结构对称. 而表 1 中斜齿轮 1 和 2 的风阻损失不同是因为齿轮后布置的壁面的作用(图 1),当齿轮一侧布置壁面,而齿轮旋向与旋转方向相反时,齿轮的风阻损失更大. 相同的情况也表现在表 1 中的螺旋锥齿轮 2 和 3 上,螺旋方向不同引起了两者风阻损失的数值差异.

从图 7 可以看出,直齿锥齿轮的风阻损失大于弧齿锥齿轮,同时也大于直齿轮. 这是由于幅板与轮齿的作用,在直齿锥齿轮小端两齿间形成了相对较强的涡流,吸入较多空气,引起较大的压力损失(图 9),而因轮齿与幅板形成一定斜角,此现象在弧齿锥齿轮中未出现.

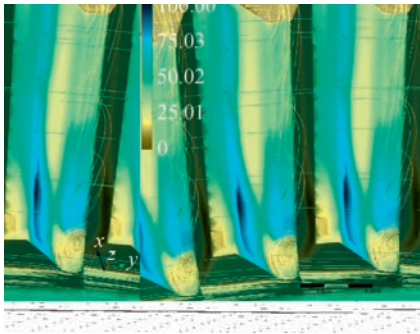


图 9 直齿锥齿轮流线图

Fig. 9 Velocity streamline diagram around straight bevel gear

4 工程应用

航空发动机 IGB 一般布置在发动机高压转

子轴上,负责将运动传递至发动机外部安装的泵和发电机等附件,由于是航空应用,为降低对涡轮轴功率的消耗,要求齿轮传动效率很高.某大涵道比涡轮风扇发动机的中央传动齿轮箱内包含两个螺旋锥齿轮,大齿轮即主动齿轮布置在高压转子轴上带动小齿轮即从动齿轮旋转,利用 CFD 三维仿真对其风阻损失进行评估.

仅对其中大齿轮在发动机最大转速工作状态下在空气中旋转的风阻损失进行评估,仿真模型边界条件见图 1,此时齿轮转速约为 14 000 r/min,轮齿线速度超过马赫数为 0.3 时的速度,可以认为空气为可压缩流体.齿轮结构参数见表 2.

表 2 齿轮参数
Table 2 Parameters of gear

宽度/mm	大端模数/mm	外径/mm	螺旋角/(°)	旋向
21	3.875	185	35	左

CFD 仿真计算得出的齿轮风阻损失见表 3,可以看到其风阻损失远大于图 7 中所示螺旋锥齿轮,这是由于其转速远高于后者.此中央传动齿轮箱传递功率约为 307 kW,按一般高精度航空齿轮箱齿轮传动效率水平为 99% 计算,齿轮传动总功率损失为 3.07 kW.而其中风阻损失占比约 49%,可见高速旋转齿轮的风阻损失在齿轮传动总损失中占比很高,在齿轮箱设计中,尤其航空应用齿轮箱设计要求传动效率很高时,需要采取措施对齿轮风阻损失进行控制.

表 3 CFD 计算结果
Table 3 Computational result results of CFD

压力损失/kW	黏性力损失/kW	风阻损失/kW
1.43	0.086	1.516

需要指出,齿轮实际工况很复杂,在计算齿轮风阻时应同时考虑齿轮对空气和对润滑油的搅拌,并且需考虑齿轮啮合对风阻的影响,以及齿轮箱其他结构的影响,比如壳体等的影响.

5 结 论

本文对齿轮风阻损失的重要性以及齿轮风阻损失经验计算公式进行了介绍,所介绍的齿轮风阻经验计算公式均在试验基础上提出,其应用势必受一定限制,如当研究对象的尺寸或者结构超出试验对象范围时,会引入较大误差,且齿轮的实际工作状况一般较试验时复杂,此时简单应用经验公式也是不准确的,采用 CFD 仿真方法则可以

最大限度的模拟齿轮实际工作情况,如建立齿轮箱整体模型,包括箱体细节等,可以提供较经验公式更可靠的结果,所以提出应用 CFD 方法对齿轮风阻损失进行评估.作为初步研究,仅对较简单情况进行研究,介绍了仿真模型,同时也指出为降低计算量所做的简化和假设,具体如下:

1) 齿轮在空气中自由旋转,不考虑其他结构以及润滑等的影响.

2) 以单个轮齿周期边界模拟整个齿轮,不考虑各轮齿间的影响.

在建立模型后,应用 CFD 方法对齿轮风阻损失进行计算,得出如下结论:

1) 对直齿轮在不同转速下的风阻损失利用 CFD 和 Dawson 以及 Anderson-Loewenthal 经验公式进行评估,同时与 Diab 试验数据对比,仿真结果与经验公式计算结果以及试验数据符合性良好,说明仿真方法有效可靠.

2) 由盘与齿轮风阻损失的对比看出,轮齿对风阻损失的贡献很大.

3) 以直齿轮空气流场为例分析了齿轮风阻损失机理,可以认为齿轮风阻损失由两部分构成.

4) 风阻损失一部分由于齿轮旋转会将周围空气吸入轮齿间的空隙,在齿轮两相对齿面间形成压力差,表现为对齿轮施加阻力矩,消耗功率.此时两相对齿面,面向旋转方向的齿面表现为压力面,而背对旋转方向的齿面表现为吸力面.

5) 风阻损失另一部分则来自于黏性力损失,当齿轮线速度在 50 m/s 左右时,黏性力损失在总风阻损失中占比约为 4%~17%,占比较小.

6) 对斜齿轮的风阻损失分析,由于齿轮后布置的壁面作用,轮齿旋向不同也引入了约 60% 的风阻损失差异,当对风阻损失控制要求较高时,可参考图 7 所示仿真结果,合理综合齿轮旋向、旋转方向以及与箱体壁面间的相互影响,以降低风阻损失.

7) 在适当简化后对某型发动机中央传动主动锥齿轮的风阻损失进行评估,其在齿轮传动总损失中约占 49%,说明在高转速齿轮传动中风阻损失不可忽略,必要时应采取措施控制风阻损失,将其降至可接受范围,例如在齿轮驱动风扇发动机的主动减速齿轮箱中应用齿轮罩板,限制空气流量以降低风阻.

作为初步研究,本文对多种齿形大小相似但种类不同的齿轮及盘在空气中自由转动时的风阻进行了仿真研究,并对各自特点进行总结,摸索齿

轮风阻损失机理,为后续在工程应用中控制风阻提供一定理论支持. 下一步工作将依据此次研究结论开展在实际齿轮传动中减小风阻损失方法的研究,例如如何布置导流板及最优结构等.

参考文献:

[1] JOHNSON G, CHANDRA B, FOORD C, et al. Windage power losses from spiral bevel gears with varying oil flows and shroud configurations [R]. ASME Paper GT2008-50424, 2008.

[2] SUN Zixiang, CHEW J W, FOMISON N. Numerical simulation of complex air flow in an aeroengine gear box [R]. ASME Paper GT2009-59530, 2009.

[3] FARRALL M, SIMMONS K, HIBBERD S, et al. Computational investigation of the airflow through a shrouded bevel gear [R]. ASME Paper GT2005-68879, 2005.

[4] DAWSON P H. Windage loss in larger high-speed gears [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 1984, 198 (1) : 51-59.

[5] HEINGARTNER P, MBA D. Determining power losses in the helical gear mesh [J]. Gear Technology, 2005, 22 (5) : 32-37.

[6] DIAB Y, VILLE F, VELEX P, et al. Windage losses in high speed gears: preliminary experimental and theoretical results [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126 (9) : 903-908.

[7] ANDERSON N E, LOEWENTHAL S H. Spur-gear system efficiency at part and full load [R]. NASA-TP 1622, 1979.

[8] JOHNSON G, SIMMONS K, FOORD C, et al. Experimental investigation into windage power loss from a shrouded spiral bevel gear [R]. ASME Paper GT2007-27885, 2007.

[9] SIMMONS K, JOHNSON G, WIEDEMANN N. Effect of pressure and oil mist on windage power loss of a shrouded spiral bevel gear [R]. ASME Paper GT2011-46426, 2011.

[10] RAPLEY S, EASTWICK C, SIMMONS K. Effect of variations in shrouded geometry on single phase flow over a shrouded single spiral gear [R]. ASME Paper GT2008-50633, 2008.

[11] RAPLEY S, EASTWICK C, SIMMONS K. The application of CFD to model windage power loss from a spiral bevel gear [R]. ASME Paper GT2007-27879, 2007.

[12] HILL M J, KUNZ R F, NOACK R W, et al. Application and validation of unstructured overset CFD technology for rotorcraft gearbox windage aerodynamics simulation [R]. Montreal, Canada: American Helicopter Society 64th Annual Forum, 2008.

[13] HILL M J. A computational investigation of gear windage [D]. Philadelphia, CA: The Pennsylvania University, 2010.

[14] ARISAWA H, NISHIMURA M, IMAI H, et al. CFD Simulation for reduction of oil churning loss and windage loss on aeroengine transmission gears [R]. ASME Paper GT2009-59226, 2009.

[15] WINFREE D. Reducing gear windage losses from high speed gears and applying these principles to actual running hardware [R]. ASME Paper DETC2013-13039, 2013.

(编辑:王碧琚)