

高速铣削铝合金 7055 铣削力和铣削温度的仿真研究^{*}

田荣鑫,姚倡锋,武导侠

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

[摘要] 采用有限元分析软件 AdvantEdge 模拟了航空铝合金 7055 高速铣削过程,获得了单个刀齿高速加工中铣削力变化曲线,预测了不同切削时间下工件及刀具上的温度分布,获得了刀具前刀面和后刀面的温度分布曲线;建立了高速铣削参数对铝合金 7055 铣削力和铣削温度的影响曲线,可辅助优化切削加工参数,有助于减小切削过程中刀具的磨损,改善刀具切削状态,提高刀具使用寿命。

关键词: 铝合金 7055; 高速铣削; 有限元仿真; 铣削力; 铣削温度

Simulation Research on Milling Force and Temperature of Aluminum Alloy 7055 Under High-Speed Milling

TIAN Rongxin, YAO Changfeng, WU Daoxia

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Finite element analysis software AdvantEdge is used to simulate the high speed milling process of aviation aluminum alloy 7055, and milling force change curves in the high speed machining are obtained for the single blade. The temperature distributions on the workpiece and tool are predicted under different cutting time, and the temperature distribution curves of rake face and flank face are investigated. The effect curves of milling parameters on the milling force and milling temperature are established for optimizing machining parameters that could reduce the cutting tool wear and prolong the service life of cutting tools.

Keywords: Aluminum alloy 7055; High-speed milling; Finite element simulation; Milling force; Milling temperature

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.067

高强度铝合金由于其密度低、比强度高、耐磨性好、加工性能好以及焊接性能良好等特点,被广泛应用于航空航天等领域^[1]。但是铝合金材质较软,加工易产生热变形,容易粘刀,形成积屑瘤;线膨胀系数大,装夹和加工时容易引起变形,影响尺寸精度。使用铝合金制造飞机蒙皮、翼梁、隔框、长桁和起落架时,加工量非常大,而且许多精密部件需减小结构上的加工变形,铝合金大型壁板的加工变形问题已成为制约航空业高速发展的一大问题。而加工变形主要是由切削过程中的切削力和切削温度引起的,所以研究切削过程中的切削力和切削温度很有必要。

国内外学者对铝合金高速铣削过程中的铣削力和铣削温度进行了大量的试验研究^[2-4]。然而,随着数值分析方法的发展及其在制造业中应用的推广,Ng 等^[5]运用有限元分析方法研究了刀具磨损对工件的温度和剪应力分布的影响。由 Strenkowski 等^[6]提出的正交切

削的欧拉有限元模型可以对工件、切屑和刀具的温度进行预测。Xie 等^[7]通过 ABAQUS 有限元软件研究了连续切屑的形成过程,进行热量传导分析后,获得了稳定切削状态下的温度分布。成群林等^[8]对 7050-T745 铝合金的高速铣削过程进行了有限元模拟,发现切削力和切削温度的仿真数据和试验数据具有很好的一致性。此外,一些学者通过切削过程的三维仿真研究^[9-10]来解决二维仿真精度较低的问题。赵云峰等^[11]采用有限元分析软件 AdvantEdge 对铝合金 A12024 铣削加工过程中铣削力变化和切削温度的分布情况进行了研究,通过模拟获得了三向铣削力的变化曲线及工件和刀具上的温度分布规律,并进行了试验验证,发现仿真分析获得结果与试验结果吻合良好。成群林等^[12]结合立铣加工的实际情况,建立了面向立铣加工的可用于预测不同切削参数组合下切削力的螺旋齿单刃斜角切削有限元模型。毕运波等^[13]针对螺旋齿立铣刀加工过程,模拟分析了工件温度场的分布和变化,研究发现铣削热只影

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375393)。

响到加工表层附近很薄的一部分材料的温升。

铝合金易发生加工变形影响加工精度,而在高速切削范围内,切削力与切削速度成反比,因此高速铣削是减小铝合金加工变形的有效手段。本文以高速铣削为背景,在使用新型仿真软件 AdvantEdge 的基础上,重点对高速铣削铝合金 7055 的铣削力和铣削温度进行了有限元仿真研究。

1 有限元模型的建立

运用美国 Third Wave Systems 公司开发的 AdvantEdge FEM 有限元仿真软件,仿真分析了 7055 铝合金高速铣削过程中的力和温度,铣削力和铣削温度仿真模型如图 1 所示。

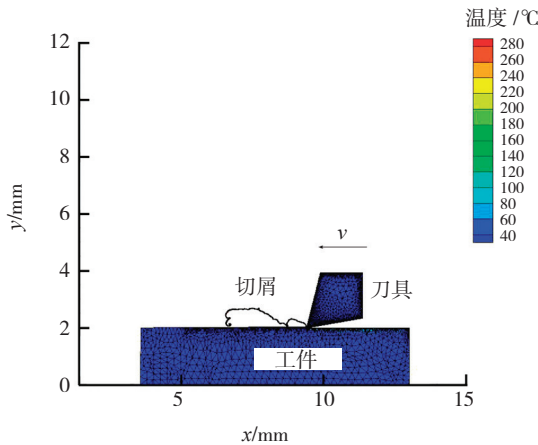


图1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

7055 铝合金假定为可延展的,根据幂强化法则建立的材料本构方程如下^[9,14]:如果 $\dot{e}^p \leq \dot{e}_t$,

$$(1 + \dot{e}^p / \dot{e}_0^p) = (\bar{\sigma} / (g(e^p)))^{m_1}, \quad (1)$$

如果 $\dot{e}^p > \dot{e}_t$,

$$(1 + \dot{e}^p / \dot{e}_0^p)(1 + \dot{e}_t / \dot{e}_0^p)^{\frac{m_1-1}{m_2}} = (\bar{\sigma} / (g(e^p)))^{m_2}, \quad (2)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为等效 Mises 应力, g 为流动应力, e^p 为累积塑性应变, \dot{e}^p 为累积塑性应变率; \dot{e}_0^p 为基准塑性应变率, m_1 为低应变率敏感指数, m_2 为高应变率敏感指数, \dot{e}_t 为塑性应变率分界点。

温度软化方程为:

$$g = (1 - \alpha(T - T_0)) s_0 (1 + e^p / e_0^p)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

式中, n 为强化系数, T 为材料表面温度, T_0 为基准温度, α 为软化系数, s_0 为基准温度 T_0 时的屈服应力, e^p 为累积塑性应变, e_0^p 为基准塑性应变。

2 铣削过程仿真

2.1 模拟参数设定

仿真过程中具体参数设定选择: 工件材料是 7055

铝合金,切削类型为顺铣,刀具选择 $\phi 12\text{mm}$ 的三齿硬质合金刀具,前角 14° ,后角 10° ,螺旋角 40° ,刀尖圆角半径为 0.04mm ,冷却条件为干切削,初始温度 20°C 。铣削参数范围: 铣削速度 $v_c 400\sim 1300\text{m/min}$,每齿进给量 $f_z 0.02\sim 0.2\text{mm/z}$,铣削深度 $a_p 0.1\sim 1.9\text{mm}$,铣削宽度 $a_e 2\sim 11\text{mm}$ 。

2.2 仿真过程分析

铣削时影响切削力的主要因素是切削层的厚度,铣削过程中的切削层厚度直接影响金属弹、塑性变形产生的铣削变形抗力,以及切屑与刀具的摩擦阻力。图 2 为当 $v_c=800\text{m/min}$ 、 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 时,一个刀齿切入材料到切出材料获得的切削力 (F_x 、 F_y) 和切削温度 (T) 随时间 (t) 变化的曲线。在切削开始阶段,切削力随着刀齿切入材料厚度的增加而迅速从 0 开始增大;当刀齿完全切入材料时,切削力达到最大值,随后又逐渐减小,这是由于切削厚度越来越小;当刀齿完全切出材料时,切削力降为 0,切削温度和切削力的变化趋势一致。

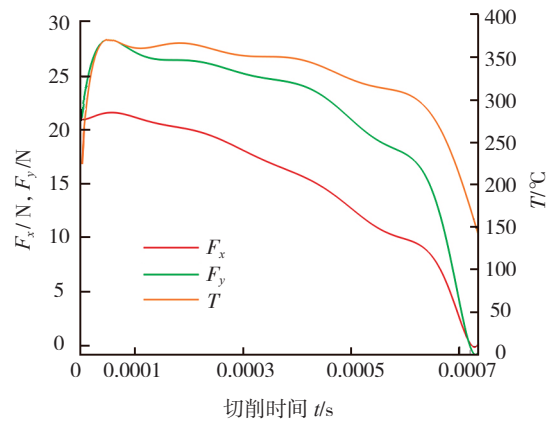


图2 切削力和切削温度随时间变化
Fig.2 Distribution of cutting force and temperature with time change

由于摩擦热沿前刀面逐渐增加的缘故,铣削过程中刀具的最高温度点处于与刀尖一定距离的前刀面处。 $v_c=800\text{m/min}$ 、 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 条件下刀具前刀面和后刀面的温度分布见图 3,可以看出,刀具的最高温度点出现在距离刀尖点 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 的前刀面上。

$v_c=800\text{m/min}$ 、 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 条件下,不同切削阶段工件、刀具和切屑上的温度场分布和变化见图 4,可以看出:(1) 切削的起始阶段,工件和刀具上温度场分布范围较窄,随着切削过程的进行,切削热逐渐由刀尖向刀具内部扩散,刀具的温度场范围逐渐增大,并达到一个稳定的状态。(2) 高速加工过程中,切屑温度明显高于工件和刀具的温度,这是由于切屑带

走的热量远多于传入刀具和工件中的热量。(3)高速加工过程中,工件基体温度变化不大,只有已加工表面的一个薄层温度变化比较明显。这是因为高速切削过程中,刀具和工件间的相对速度很大,刀具会很快离开已加工表面,使得传入工件的热量快速对流散失,工件已加工表面温度场分布快速趋于稳定。因此,针对铝合金切削加工,高速切削是一种通过减小工件温升来抑制工件热变形进而获取良好加工表面质量的方法。

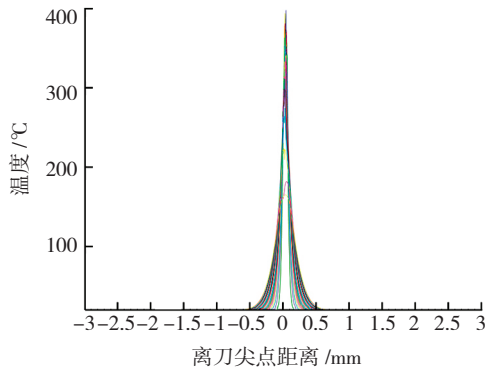


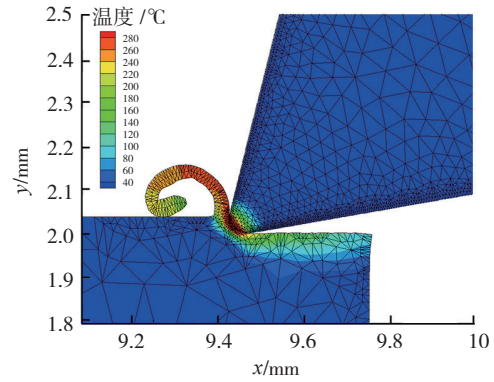
图3 刀尖附近温度分布

Fig.3 Temperature distribution near nose of tool

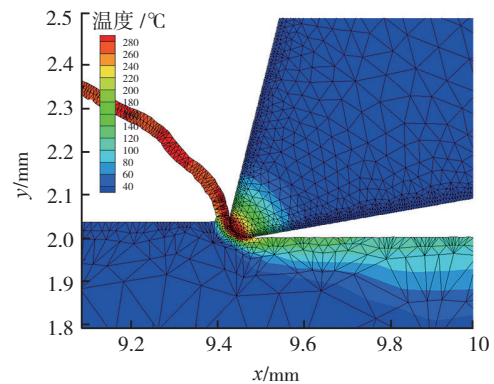
3 铣削参数对铣削力和铣削温度的影响

3.1 铣削参数对铣削力的影响

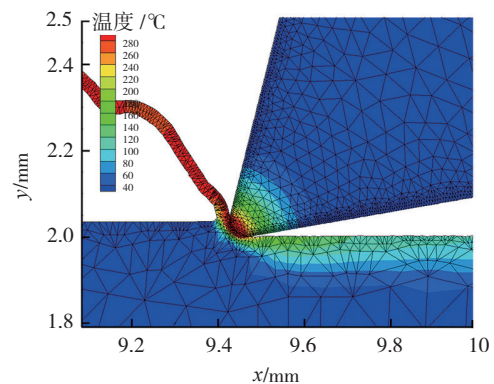
图5为铣削参数对铣削力和铣削温度的影响曲线。 $v_c=900\text{m/min}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 条件下,每齿进给量对铣削力和铣削温度的影响曲线见图5(a)。其中, x 为刀具进给方向, y 为切削宽度方向,可以看出,当每齿进给量小于 0.07mm/z 时, x 方向切削力小于 y 方向;随着每齿进给量的增大, x 、 y 方向切削力呈增大趋势,且 x 方向切削力大于 y 方向。这是由于随着每齿进给量的增加,切削厚度增大,铣削变形抗力、切屑与刀具的摩擦阻力增大,故铣削力增大。 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 条件下,铣削速度对铣削力和铣削温度的影响曲线见图5(b),其中, x 和 y 向的切削力随着切削速度的增大略微减小。这主要是因为:一方面,随着切削速度的提高,剪切区域温度升高,导致材料抗剪强度、摩擦系数和材料变形系数减小,进而使 x 和 y 向的切削力呈减小趋势;另一方面,切削速度的提高使剪切角 ϕ 增大,导致剪切面积减小,变形减小, x 和 y 向的切削力呈减小趋势。同时,切削速度的提高导致高频冲击力逐渐增大,但在本文涉及的仿真切削速度范围内,单位切削面积切削力的减小程度大于高频冲击力的增大程度,所以 x 和 y 向的切削力呈减小趋势。 $v_c=900\text{m/min}$ 、 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 条件下,铣削宽度对铣削力和温度的影响曲线见图5(c)。可以看出, x 、 y 方向切削力



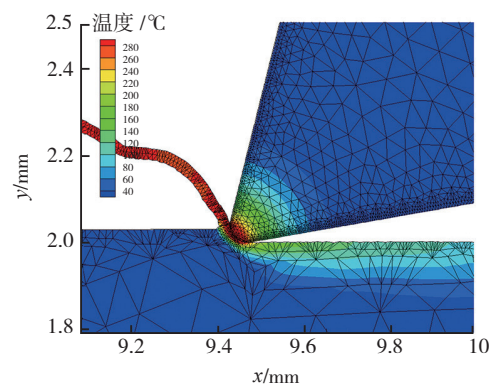
(a) $t=0.00003\text{s}$



(b) $t=0.0001\text{s}$

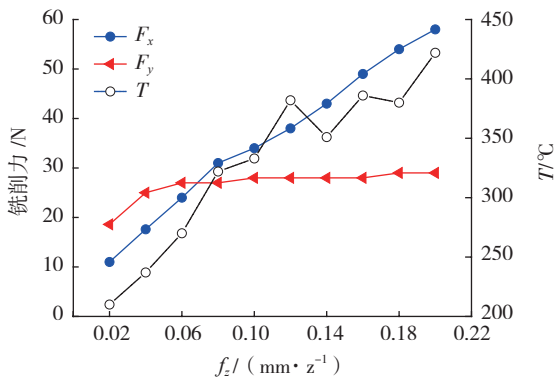


(c) $t=0.0002\text{s}$

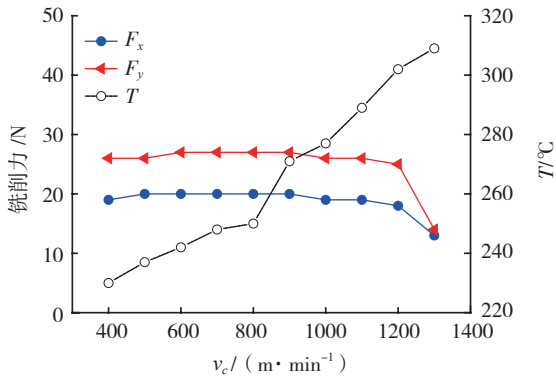


(d) $t=0.0003\text{s}$

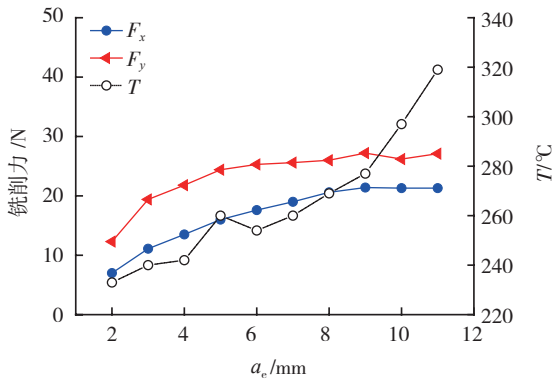
图4 不同时刻工件和刀具上的温度场分布
Fig.4 Temperature field distribution on the tool and workpiece at different time



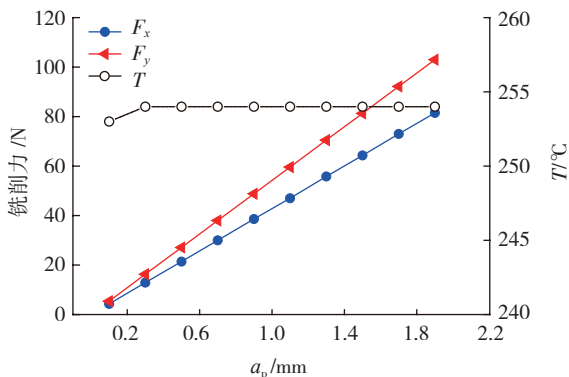
(a) 每齿进给量对铣削力和铣削温度的影响



(b) 铣削速度对铣削力和铣削温度的影响



(c) 铣削宽度对铣削力和铣削温度的影响



(d) 铣削深度对铣削力和铣削温度的影响

图5 铣削参数对铣削力和铣削温度的影响

Fig.5 Effect of cutting parameters on cutting force and temperature

随着铣削宽度的增大而缓慢增大,这是因为当铣削宽度小于刀具半径时,切削长度随着铣削宽度的增加而增大,材料去除总体积增大,从而使工件变形产生的铣削变形抗力及切屑与刀具的摩擦阻力增大,故铣削力增大。 $v_c=900\text{m/min}$ 、 $f_z=0.04\text{mm/z}$ 、 $a_e=6\text{mm}$ 条件下,铣削深度对铣削力和铣削温度的影响曲线见图 5 (d)。可以看出,随着铣削深度的增大, x 、 y 方向切削力线性增大,这是因为随着铣削深度的增加,切削刃接触长度增大,剪切面积增加,因而增大了切削力。

3.2 铣削参数对铣削温度的影响

从图 5 (a) 中可以看出,随着每齿进给量的增大,切削温度变化范围为 210~422℃,铣削进给量的增加会使得温度缓慢上升。这是由于进给量的增加会使得单位时间金属切除量增加,切削热增加,切削温度升高;但与此同时切屑的变形系数随着进给量增加会减小,单位体积材料去除量的切削功降低;此外随着进给量增大,铣刀与切屑接触长度增大,增大了切削热量的传出面积,切屑带走更多的热量,几个因素相互影响,使得温度增加。从图 5 (b) 中可以看出,切削温度变化范围为 230~309℃,切削温度与铣削速度成正相关性,这是由于随着铣削速度提高,单位时间切除的金属量越多,克服金属变形与摩擦所需要的功也越大,产生切削热也越多,故温度上升。从图 5 (c) 中可以看出,切削温度变化范围为 233~319℃,切削温度随着铣削宽度的增加而升高。原因在于铣削宽度增加时,去除的材料体积更大,导致克服切屑变形和摩擦消耗功增加,切削热增加,进而切削温度增大。从图 5 (d) 中可以看出,随着铣削深度的增大切削温度基本不变。虽然随着铣削深度的增大,切削热增大,但是切削刃接触长度增加,提高了散热条件,切削的接触面积增大,散热程度增大,因此铣削温度变化不大。

4 结论

根据模拟铝合金 7055 高速铣削过程中铣削力和铣削温度的结果,得到以下结论: 刀具上的最高温度点位于距离刀尖大约 0.05~0.1mm 的前刀面上; 每齿进给量增大,刀具进给方向上的铣削力显著增大; 铣削深度增大,铣削力显著增大; 铣削速度和铣削宽度对铣削力的影响不明显; 铣削温度随着每齿进给量、铣削速度、铣削宽度的增大而升高,铣削深度对切削温度影响不大。

参考文献

[1] FRIDLANDER I N. Aluminum alloys in aircraft in the periods of 1970–2000 and 2001–2015[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2001,43(1):6–10.

[2] DE LACALLE L N L, LAMIKIZ A, SÁNCHEZ J A, et al. Cutting conditions and tool optimization in the high-speed milling of aluminium alloys[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(9): 1257-1269.

[3] JEONG D K, YOUN H K. High-speed machining of aluminium using diamond endmills[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(8): 1155-1165.

[4] 杨巧凤, 张明贤, 史兴宽, 等. 铝合金高速铣削温度变化规律试验研究[J]. 西北工业大学学报, 1998(3): 439-443.

YANG Qiaofeng, ZHANG Mingxian, SHI Xingkuan, et al. The critical speed for high-speed milling of aluminum alloy[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1998(3): 439-443.

[5] NG E G, SZABLEWSKI D, DUMITRESCU M, et al. High speed face milling of a aluminium silicon alloy casting[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 69-72.

[6] STRENKOWSKI J S, MOON K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(4): 313-318.

[7] XIE L J, SCHMIDTA J, SCHMIDTA C, et al. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation[J]. Wear, 2005, 258(10): 1479-1490.

[8] 成群林, 柯映林, 董辉跃. 航空铝合金高速铣削加工的有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(1): 113-117

CHENG Qunlin, KE Yinglin, DONG Huiyue. Simulation of high-speed milling process of aerospace aluminum alloy[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(1): 113-117.

[9] 路冬, 李剑峰, 融亦鸣, 等. 航空铝合金 7075-T7451 三维铣削过程有限元仿真[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2708-2710.

LU Dong, LI Jianfeng, RONG Yiming, et al. 3D milling process simulation of aero-aluminum alloy 7075-T7451[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2708-2710.

[10] SAFFAR R J, RAZFAR M R, ZAREI O, et al. Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(10): 1677-1688.

[11] 赵云峰, 张建华, 邢栋梁, 等. 铝合金 A12024 铣削仿真分析与实验研究[J]. 制造技术与机床, 2011(1): 101-103.

ZHAO Yunfeng, ZHANG Jianhua, XING Dongliang, et al. Simulation analysis and experimental study on milling of aluminum alloy A12024[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011(1): 101-103.

[12] 成群林, 柯映林, 董辉跃. 航空铝合金铣削加工中切削力的数值模拟研究[J]. 航空学报, 2006, 27(4): 724-727.

CHENG Qunlin, KE Yinglin, DONG Huiyue. Numerical simulation study on milling force for aerospace aluminum alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 724-727.

[13] 毕运波, 方强, 董辉跃, 等. 航空铝合金高速铣削温度场的三维有限元模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 160-165.

BI Yunbo, FANG Qiang, DONG Huiyue, et al. Research on 3D numerical simulation and experiment of cutting temperature for high speed milling of aerospace aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 160-165.

[14] MARUSICH T D, ORTIZ M. Modelling and simulation of high-speed machining[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995, 38(21): 3675-3694.

(责编 大漠)

(上接第66页)

是恒力矩输入, 因此, 其角位移呈抛物线规律增长; 内平衡环和外平衡环由于受到脉冲力矩的影响, 产生摆动运动, 并且随着转子速度的增大, 摆动幅度逐渐减小, 符合陀螺仪转子角速度越大、稳定性越好的规律, 证明本文所建立的键合图模型的正确性。

4 结论

本文建立了双框架陀螺仪的键合图模型, 并采用 20-sim 仿真软件对模型进行了仿真分析, 仿真结果验证了陀螺仪转子角速度越大, 稳定性越好的规律, 证明了本文所建立的键合图模型的正确性, 为进一步建立结构和控制一体化的陀螺仪键合图模型提供了良好的基础。

参考文献

[1] KARNOPP D C, MARGOLIS D L, ROSENBERG R C. System dynamics: modeling and simulation of mechanical systems[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

[2] 崔文峰, 史仪凯, 黄磊, 等. 移动机器人的键合图建模与参数辨识[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1062-1065.

CUI Wenfeng, SHI Yikai, HUANG Lei, et al. Bond graph modeling and parameter identification for mobile robots[J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(7): 1062-1065.

[3] 周丹, 李泽蓉. 基于键图和线图的双摆激振装置动力学研究[J]. 机械设计, 2012, 29(5): 39-42.

ZHOU Dan, LI Zerong. Study on the dynamics of a double pendulum system based on bond graph and line graph[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(5): 39-42.

[4] 宋立军, 胡政, 杨拥民. 热力机械耦合能域的功率键合图建模方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 514-517.

SONG Lijun, HU Zheng, YANG Yongmin. Power bond graph modeling method for thermal mechanical coupling energy domain[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 514-517.

[5] 摆玉龙, 危淑平, 许国威. 基于伪键合图法的电磁泵建模与仿真[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 1222-1229.

BAI Yulong, WEI Shuping, XU Guowei. Modeling and simulation of electromagnetic pump based on pseudo bond graph[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 1222-1229.

[6] MIROVITCH L. Methods of analytical dynamics[M]. New York: Dover Publications Inc, 1998.

[7] 摆玉龙, 杨志民. 基于键合图法的仿真软件 20-sim[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5141-5143.

BAI Yulong, YANG Zhimin. Simulation software based on bond graph method 20-sim[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22): 5141-5143.

(责编 大漠)