

基于 Matlab 与 Adams 的瓦楞辊辊齿优化设计分析

魏效玲¹, 李波¹, 王朋宇², 王泽仁¹, 陈蕊¹

(1. 河北工程大学 机电工程学院, 邯郸 056038; 2. 邯郸市康创电气有限公司, 邯郸 056038)

摘要: 以瓦楞辊的运动特性建立了数学模型, 以上下辊齿啮合过程中中心距变动方程为目标函数, 以辊齿的参数(r_1, r_2, R_1, R_2)为设计变量, 运用 Matlab 优化工具箱进行了优化, 得出了满足纸芯成形的最优齿形参数。并利用 Adams 进行了运动学仿真, 验证了优化后参数的合理性, 为进一步研究瓦楞辊的动力学分析提供数据支持。

关键词: 瓦楞辊; 运动学特性; Matlab 优化工具箱; Adams

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)23-0080-04

Optimization Design and Analysis of Corrugated Roller Based on Matlab and Adams

WEI Xiao-ling¹, LI Bo¹, WANG Peng-yu², WANG Ze-ren¹, CHEN Rui¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Handan Kangchuang Elec. Co. Ltd., Handan 056038, China)

Abstract: Mathematical model of corrugated roller movement was established. Variation equation of the roller tooth center distance was used as the objective function and the parameters of the roller gear (r_1, r_2, R_1, R_2) as the design variables. Optimization was carried out using Matlab optimization toolbox and the optimal tooth shape parameters were obtained, which satisfy paper core forming. Kinematics simulation was carried out using Adams and the rationality of optimized parameters was validated. The purpose was to provide data support for further research of corrugated roller dynamics analysis.

Key words: corrugated roller; kinematics characteristic; Matlab optimization toolbox; Adams

瓦楞纸板是由瓦楞原纸经过瓦楞辊的轧压形成波纹状, 然后经面纸上下粘贴而成, 无污染、可再生, 并具有一定的强度和缓冲性能绿色环保材料。其制造的瓦楞纸箱, 质量轻、吸收振动性能良好, 因此在包装行业中得到广泛的应用。特别是进入 21 世纪以后, 全球贸易迅速发展, 各个国家对进口的物品包装材料的检疫更加严格, 传统的包装材料木材的防疫成本更高, 瓦楞纸板包装材料逐渐成为了全球最主要的包装材料。

瓦楞纸板抗压性能的大小主要取决于瓦楞纸芯成形质量的好坏, 因此瓦楞纸芯的质量对纸板的性能起着关键的作用。瓦楞辊是生产瓦楞纸芯的核心部件, 从表面上观察, 瓦楞辊辊齿的形状相似于齿轮

的齿廓, 但又不同于齿轮, 辊齿的齿顶和齿沟都是圆弧形, 中间用平滑的曲线连接。此外瓦楞辊的辊身比齿轮的厚度大出许多, 由于其特殊的结构类型, 导致瓦楞辊啮合时, 会出现振动、噪声大、辊齿啮合不完全等现象, 直接导致瓦楞辊的使用寿命偏低, 生产出的纸芯瓦楞高度参差不齐, 影响纸板的抗压性能^[1]。文中基于以上因素, 对瓦楞辊辊齿的一些关键参数进行分析、优化, 目的是使瓦楞辊的啮合过程更加稳定, 延长瓦楞辊的使用寿命, 提高纸芯的成形质量。

1 瓦楞辊辊齿参数分析

瓦楞辊辊齿的主要参数包括: 齿数 z 、外径 R_1 、分

收稿日期: 2013-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61240050)

作者简介: 魏效玲(1963-), 女, 山西河津市人, 河北工程大学教授, 主要研究方向为机械设计理论及方法。

度角 θ 、楞高 H 、顶圆半径 r_1 、楞型角 α 、周节 P 、楞数 $N/300$ mm、齿根圆弧半径 r_2 、底圆半径 R_2 、分度圆半径 $R_{分}$ 等,见图 1。

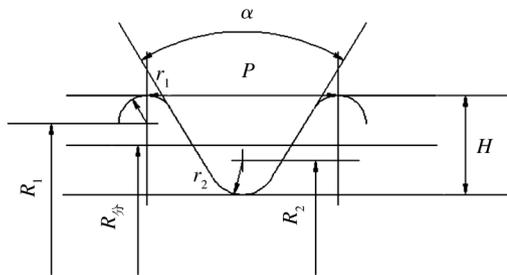


图 1 瓦楞辊齿形及其参数

Fig. 1 Corrugated roller tooth profile and its parameter

目前瓦楞辊辊齿的优化一般从 2 个方面考虑,即从运动学和动力学入手。运动学主要考虑中心距的变动曲线、变动速度、变动加速度等,动力学考虑的主要是优化壁厚和中凸度等。这些都与参数 r_1, r_2, R_1, R_2 有关,文中从纸芯成形的关键要素出发,以辊的运动参数为目标函数进行优化分析。

2 基于 Matlab 的瓦楞辊辊齿参数优化

2.1 目标函数的建立

以上、下瓦楞辊工作过程中中心距的变动方程为目标函数,以辊齿的参数 r_1, r_2, R_1, R_2 为设计变量进行数学建模,即:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [r_1, r_2, R_1, R_2]^T \quad (1)$$

目标函数为中心距变动方程,由文献[2-3]得:

$$a_{\text{中心距}} = R_1 \cos \theta + \frac{\sqrt{R_2^2 - R_1^2 \sin^2 \theta}}{R_2} [R_2 - (r_2 - r_1 - B)] \quad (2)$$

式中: B 为纸芯的厚度,一般取 $B = 0.2286$ mm; ω 为瓦楞辊工作时的转动角速度, $T = 2\pi/\omega z$; φ 为分度角, $\varphi = \omega T = z\pi/2$; θ 为转角, $\theta \in (0, \frac{\varphi}{4})$ 。

文中数据采用某包装机械厂生产出来的楞型为 UV 偏 V 型、齿形为 A 型的瓦楞辊,参数:辊长为 1850 mm、齿数 $Z = 111$ 、齿顶外径 $R_1 = 155.425$ mm、分度角 $\theta = 3.24^\circ$ 、楞高 $H = 4.8$ mm、齿顶圆弧半径 $r_1 = 1.3$ mm、楞型角 $\alpha = 62.97^\circ$ 、周节 $P = 8.73$ mm、楞数为 33.86、齿根圆弧半径 $r_2 = 1.6$ mm、底圆半径 $R_2 = 153.525$ mm、

分度圆半径 $R_{分} = 154.375$ mm、壁厚为 52.2 mm。

2.2 约束条件的建立

2.2.1 齿顶半径对原纸张力的影响

瓦楞辊齿顶原纸内部张力公式为:

$$T_2 = T_1 e^{f \cdot \Delta\theta} \quad (3)$$

式中: T_1, T_2 为瓦楞纸的初始张力和最终张力; f 为原纸与瓦楞辊的摩擦系数; $\Delta\theta$ 为原纸绕过瓦楞辊的总包角,单位为 rad。

总包角的大小与 r_1 有关,且随着 r_1 的增大而增大。 r_1 的大小对瓦楞原纸内部的张力参数 T_2 有一极限值 T_{max} ,否则在瓦楞辊高速啮合过程中易出现瓦楞断裂现象^[4],即 $T_2 - T_{max} \leq 0$ 。

2.2.2 进纸速度 v

随着瓦楞纸板生产的速度越来越快,原纸的送纸速度 v 不小于最低速度 v_{min} ,因 $v = 2\pi(R_1 + r_1) \cdot n \cdot 10^{-3}$,则 $v_{min} - 2\pi(R_1 + r_1) \cdot n \cdot 10^{-3} \leq 0$ 。

2.2.3 折楞率 K

折楞率是指瓦楞原纸成形前后长度量的比值。折楞率的大小决定原纸的消耗量,是企业经济效益方面的一个关键要素。对于一个年产量 1×10^7 m² 瓦楞纸板的纸箱厂来说,若折楞率减小 1%,则可节省瓦楞原纸十余万平方米(假设为 3 层纸板)。这对于提高中小纸箱厂的公司效益是个不错的办法,因此折楞率应尽量小。如果不考虑纸张的弹性变形和厚度,折楞率由齿形决定^[5]。用公式表示为:

$$k = \frac{\text{齿数} \times \text{单个齿的齿廓曲线长度}}{\text{齿数} \times \text{单个齿的节距弧长}} = \frac{L}{T}$$

为保证原纸消耗不致过量,那么折楞率不大于一定的值 $k_0 = 1.55$,即 $k - k_0 \leq 0$ 。

2.2.4 齿数

齿数 Z 为了便于设计和生产,齿数 Z 应满足一定的范围,即 $Z_1 \leq Z \leq Z_2$,通常 $Z_1 = 100, Z_2 = 120$ 。

2.2.5 齿形角 q

齿形角 $q = \pi - \theta_2$,根据生产实际经验,齿形角在 $50^\circ \sim 58^\circ$ 之间最佳,即 $50\pi/180 \leq q \leq 58\pi/180$ 。

2.2.6 齿顶圆弧半径和齿根圆弧半径

由瓦楞辊啮合的特性可知,齿根圆弧半径应大于齿顶圆弧半径,其差值约等于瓦楞纸厚度 B ,即 $r_2 = r_1 + B \geq 0$ 。

2.2.7 楞高 H

GB 6544—86 规定,对于 UV 型楞齿中的 A 型齿,楞高 H 为 4.5 ~ 5 mm,其中 $H = (R_1 + r_1) - (R_2 - r_2)$,则

有 $4.5 \text{ mm} \leq H = R_1 + r_1 - R_2 + r_2 \leq 5 \text{ mm}$ 。

2.2.8 瓦楞辊外径 D

瓦楞辊外径的确定需要综合考虑生产装配、加工制造等因素。它的取值需要与单面机的装配参数相匹配,设计时可以预先限定。令 $D_{\max} = 313.05 \text{ mm}$, 则 $r_1 + R_1 \leq D_{\max}/2 = 156.525 \text{ mm}$ 。

2.2.9 瓦楞辊壁厚

由结构要求和生产实践经验可知,壁厚不应小于 20 mm , 则

$$R_0 + 20 - R = R_0 + 20 - \frac{R_1 + r_1 + R_2 - r_2}{2} \leq 0。$$

2.2.10 顶圆圆心所在半径 R_1 和底圆圆心所在半径 R_2

根据结构要求,顶圆圆心所在半径 R_1 应大于底圆圆心所在半径 R_2 , 即 $R_2 - R_1 < 0$ 。

2.3 建立数学模型求解

优化参数设计变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [r_1, r_2, R_1, R_2]^T$, 以中心距的变动方程为目标的优化设计问题数学模型, 目标函数为

$$\min f(x) = x_3 \cos \theta_1 + \frac{\sqrt{x_4^2 - x_3^2 \sin^2 \theta_1}}{x_4} [x_4 - x_2 + x_1 +$$

0.2286]

约束条件:

$$g_1(x) = T_2 - T_{\max} = T_1 e^{f \cdot \Delta \theta} - T_{\max} \leq 0$$

$$g_2(x) = v_0 - 2\pi(x_1 + x_3) \cdot n \cdot 10^{-3} \leq 0$$

$$g_3(x) = k - k_0 \leq 0$$

$$g_4(x) = Z_1 - \text{int} \frac{2\pi(R_1 + r_1)}{300/N} \leq 0$$

$$g_5(x) = \text{int} \frac{2\pi(R_1 + r_1)}{300/N} - Z_2 \leq 0$$

$$g_6(x) = 50\pi/180 - q \leq 0$$

$$g_7(x) = q - 58\pi/180 \leq 0$$

$$g_8(x) = x_2 - (x_1 + B) = 0$$

$$g_9(x) = 4.5 - (x_1 + x_3 - x_4 + x_2) \leq 0$$

$$g_{10}(x) = (x_1 + x_3 - x_4 + x_2) \leq 0$$

$$g_{11}(x) = (x_1 + x_3) - D_{\max}/2 \leq 0$$

$$g_{12}(x) = R_0 + 20 - \frac{(x_1 + x_3) + (x_4 - x_2)}{2} \leq 0$$

已知数学模型中的 4 个初始变量

$\mathbf{X} = [r_1, r_2, R_1, R_2]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [1.3, 1.6, 155.4251, 153.525]^T$, 打开 Matlab 软件编辑 M 文件, 目标函数见图 2。

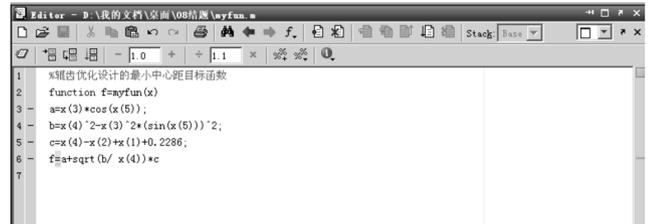


图 2 目标函数的编写

Fig. 2 The preparation of the objective function

约束函数的编写见图 3。

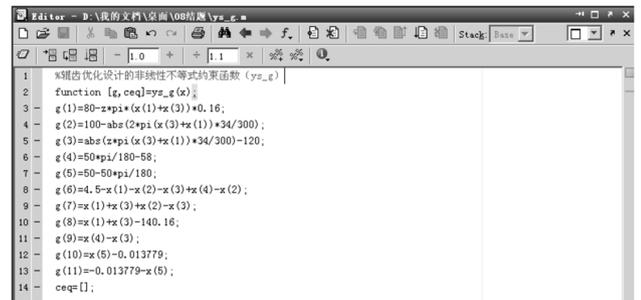


图 3 约束函数的编写

Fig. 3 The preparation of the constraint functions

最后编写调用函数 fmincon, 运行得:

$$\mathbf{X}^* = \begin{bmatrix} 1.4754 \\ 1.704 \\ 124.216 \\ 122.698 \end{bmatrix}, \min f(x) = 246.8946 \text{ mm}$$

2.4 优化结果分析

r_1, r_2, R_1, R_2 参数优化后, 瓦楞辊其他重要参数取值见表 1。

表 1 优化前后辊齿参数的比较

Tab. 1 The comparison of roller gear parameters before and after optimization

参数	r_1	r_2	R_1	R_2	a_{\min}	D_{\max}	壁厚	楞高	辊重
优化前	1.3	1.6	155.225	153.525	308.72	313.05	52.2	4.8	467.5564
优化后	1.4754	1.7040	124.22	122.698	246.5946	251.38	36.703	4.6972	311.61
修正数据	1.48	1.70	124.22	122.70	246.60	251.38	36.70	4.70	311.61

注: 瓦楞辊辊长为 1850 mm ; 密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ 。

从表 1 对比结果可知,优化后瓦楞辊的外径减小导致中心距的最小值由 308.72 mm 降到 246.60 mm,同时,瓦楞辊的质量由 467.5564 kg 降到 311.61 kg,从而使瓦楞辊的惯性力大大降低。这样在瓦楞辊辊齿啮合过程中减小了碰撞,不但降低了噪声还保证了辊齿的使用寿命。此外齿顶圆弧半径和齿根圆弧半径增大,提高了纸芯抗压强度。

3 基于 Adams 的瓦楞辊运动学仿真

Adams 是一款优秀的运动学分析软件,但是建模功能不够强大,因此运用 SolidWorks 进行三维建模,然后导入 Adams 进行仿真见图 4。

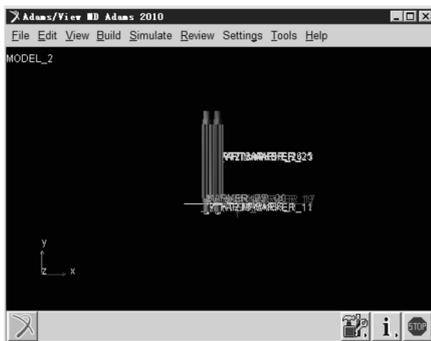


图 4 瓦楞辊样机模型

Fig. 4 Corrugated roller prototype model

在 Adams 环境中,设置瓦楞辊的材料为 45CrMo 钢,以下瓦楞辊为主动辊,上瓦楞辊为从动辊,在两者之间添加旋转副。因为辊齿啮合曲线不是共轭曲线,所以上下辊之间不能添加齿轮副。为了模拟辊齿间的啮合运动,需要添加接触载荷,保证辊齿运动过程中保持接触,此外辅助辊齿运动一个活动构件也要添加相应的约束^[6]。仿真条件:主动辊输入转速为 30 rad/s;从动辊施加负载转矩为 250 000 N·mm。由于直接施加这么大的负载容易产生陡变,所以借助于 Step 函数,使负载在 0.2 s 达到规定值,能起到一定的平缓作用,即 $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.2, 250\ 000)$,仿真时间 $t=1\ \text{s}$, $\text{step}=300$,进行仿真计算。得到的中心距变动曲线见图 5。

从仿真结果中可以看出,瓦楞辊的中心距变动曲线规律可循,在一定的范围内波动(246.60 ~ 246.65 mm)。2.4 小节中得出优化后中心距的最小值为 246.60 mm,说明仿真的结果是合理的,在微小的范围内波动可以保证纸芯的成形是稳定的。从图 5 中也

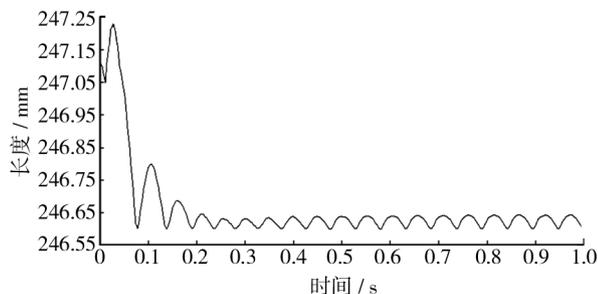


图 5 中心距变动曲线

Fig. 5 The centre distance change curve

可以看出曲线开始时陡变,这是因为上、下瓦楞辊之间存在有阻尼的碰撞力,因此开始阶段瓦楞辊的啮合不稳定,生产出来的纸芯也是不符合要求的,这是正常的、无法避免的现象。由于时间间隔短,因此生产的纸芯个数少不影响整体的生产质量。

4 结语

结合现代机械设计理论方法,运用 Matlab 和 Adams 2 个优秀的机械分析软件,对瓦楞辊辊齿参数进行优化设计,旨在使瓦楞辊在运动过程中啮合更加平稳,保证纸芯成形的质量。研究过程中得出如下结论。

1) 通过对比优化前、后辊齿的齿形分析,得出齿顶圆弧半径 R_1 、齿根圆弧半径 R_2 和楞高 H 增大,表明生产出来的纸芯抗压性能比以前更好,而且辊的质量也减少了很多,这样减小了瓦楞辊的振动和冲击,为下一步研究瓦楞辊的动力学提供数据的支持。

2) 最后利用 Adams 软件对瓦楞辊进行了仿真分析,验证优化结果是否合理,分析结果表明,辊齿的主要参数都得到了不同程度的改善,证明了优化的可行性和合理性。

参考文献:

- [1] 高德,李军,王锦岩. 瓦楞形状及参数对瓦楞纸板性能的影响[J]. 佳木斯工学院学报,1997(3):258-262.
GAO De, LI Jun, WANG Jin-yan. Corrugated Shape and Parameters Affect the Performance of Corrugated Board[J]. Journal of Jiamusi Institute of Technology, 1997(3):258-262.
- [2] 熊桂超,杜群贵. 单面机瓦楞机的瓦楞辊机构中心距变动方程[J]. 科技技术与工程,2011,11(22):91-94.

(下转第 91 页)

- [2] 郝喜海,胡协方,林益平,等. 蜂窝纸板成型机理及工艺的研究与探讨[J]. 包装工程,2003,24(3):13-15.
HAO Xi-hai, HU Xie-fang, LIN Yi-ping, et al. The Study of the Moulding Mechanism and Process of Honeycomb Fibre-board[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(3): 13-15.
- [3] 张颖. 关于计算机图像处理技术的应用的研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2011(20): 161.
ZHANG Ying. The Application of Computer Image Processing Technology Research [J]. Computer CD Software and Applications, 2011(20): 161.
- [4] 叶婷,王莉. 蜂窝纸芯加工技术及关键参数[J]. 轻工机械, 2010, 28(2): 52-54, 60.
YE Ting, WANG Li. Processing Technique and Key Parameter in Honeycomb Paper Manufacture [J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(2): 52-54, 60.
- [5] BB/T 0016—2006, 包装材料蜂窝纸板[S].
BB/T 0016—2006, Packaging Material Honeycomb Fibre-board[S].
- [6] MOORE H. MATLAB 使用教程(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
MOORE H. MATLAB for Engineers (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [7] 马晓路. MATLAB 图像处理从入门到精通[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
MA Xiao-lu. MATLAB Image Processing from Entry to the
- Master[M]. Beijing: China Railway Press, 2013.
- [8] GONZALEZ R C. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
GONZALEZ R C. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [9] 刘刚. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
LIU Gang. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [10] JACKMAN P, SUN Da-wen. Recent Advances in Image Processing Using Image Texture Features for Food Quality Assessment[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 29(1): 35-43.
- [11] 马东, 韩其睿. 基于 MATLAB 的汽车牌照识别的研究[J]. 电子世界, 2011(10): 13-15.
MA Dong, HAN Qi-rui. Research on Vehicle License Plate Recognition Based on MATLAB [J]. Electronics World, 2011(10): 13-15.
- [12] 陈玮, 曹志广, 李剑平. 改进的模板匹配方法在车牌识别中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(5): 1808-1811.
CHEN Wei, CAO Zhi-guang, LI Jian-ping. Application of Improved Templates Matching Method on License Plate Recognition [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(5): 1808-1811.

(上接第 83 页)

- XIONG Gui-chao, DU Qun-gui. Single-sided Corrugated Machine Centre Distance Variation Equation of the Corrugated Roller Mechanism[J]. Technology and Engineering, 2011, 11(22): 91-94.
- [3] 龚发云,张哲,魏春梅,等. 高速单面瓦楞机瓦楞辊机构的中心距方程[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 43-45.
GONG Fa-yun, ZHANG Zhe, WEI Chun-mei, et al. High-speed Single-side Corrugated Corrugated Roller Center Distance Equation of The Organization [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 43-45.
- [4] 柯晖,周世荣. 单面机高速瓦楞辊齿形参数的优化设计[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 30-33.
KE Hui, ZHOU Shi-rong. Single Machine High Speed Corrugated Roller Tooth Shape Parameters Optimization Design [J]. Packaging Engineering, 2000, 21(2): 30-33.
- [5] 孟建新. 以折楞率为设计目标的瓦楞辊齿形几何参数的设计程序[J]. 包装与食品机械, 1996, 14(1): 15-18.
MENG Jian-yin. In Order to Fold the Going Rate for Design
- Goal of the Corrugated Roller Tooth Geometry Parameters Design Program[J]. Packaging and Food Machinery, 1996, 14(1): 15-18.
- [6] 魏效玲,李波,陈蕊,等. 基于 SOLIDWORKS 与 ADAMS 的瓦楞辊动力学仿真[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 77-79.
WEI Xiao-ling, LI Bo, et al. Dynamic Simulation of Corrugating Roll Based on SOLIDWORKS and ADAMS [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 77-79.
- [7] 高会生,李新叶. MATLAB 原理与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
GAO Hui-sheng, LI Xin-ye, et al. MATLAB Principle and Engineering Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006.
- [8] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
LI Zeng-gang. ADAMS Introductory Explanation and Examples [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.