

# 基于 ADAMS 的含间隙酒瓶装箱机构优化设计

席晓燕

(唐山学院, 唐山 063000)

**摘要:** 利用 ADAMS 分析软件,对酒瓶装箱机构的建模仿真、优化进行了分析和探讨。在此基础上,基于间隙矢量模型,建立了考虑铰接处两构件由于制造和装配误差引起的间隙运动副模型,描述了间隙运动副两构件间的相对运动关系和基于非线性碰撞接触模式的动力学约束关系,分析了运动副间隙对系统运动学及动力学特性的影响。结果表明利用 ADAMS 进行仿真,是研究含间隙运动副机构的一种有效方法,可为多体机构设计及动力学行为描述提供精确预测,对其他含间隙运动副机构的动力学研究具有普遍意义。

**关键词:** ADAMS; 酒瓶装箱机构; 优化; 间隙; 碰撞

**中图分类号:** TB486+.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)01-0069-06

## Optimal Design of Wine Bottle Packaging Machine with Clearance Based on ADAMS

XI Xiao-yan

(Tangshan College, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Model of wine bottle packaging mechanism was established and optimization was carried out based on ADAMS. Motion pair model of linkage with clearance caused by manufacturing and assembling error was established based on clearance vector model. The kinetic relationship between two linked bodies was obtained, and the dynamic relationship based on the model of nonlinear contact force was also presented. The influence of clearance of motion pair on kinetic and dynamic characteristics of the system was analyzed. The result showed that ADAMS simulation is a kind of effective method to study motion pair with clearance, which can provide accurate prediction for design and dynamic description of multi body mechanism; It has universal significance for analysis of other mechanism with clearance.

**Key words:** ADAMS; wine bottle packing mechanism; optimization; clearance; contact

在自动包装流水线中,酒瓶装箱机是系统运行的核心。它用于将酒瓶按一定排列方式定量装入箱中。传动装置中抓头抓牢瓶子后带着提升、前移、下降把酒瓶放入箱中,由双四杆机构实现<sup>[1]</sup>。酒瓶装箱机的机械传动部分是由曲柄摇杆和双摇杆 2 个四杆机构,辅以其它若干构件通过铰链组合而成的。酒瓶装箱机要求人工操作简单,过程平稳可靠,起步和终止均匀缓慢以防止碰撞而造成酒瓶破裂。应用虚拟样机技术进行包装机械的设计,在设计阶段可以完整、有效地预测整机的性能,使产品在投入生产之前进行优化以提高其质量,从而减少试验样机的数量,缩短产品开发周期,进而降低开发成本,提高市场竞争力<sup>[2]</sup>。文献[3]应用 ADAMS 软件对酒瓶装箱机构进行仿真

分析和对抓头加速度进行了优化设计。

由于制造、装配技术的限制以及后期机器工作造成的磨损,各个杆件链接处的运动副会产生大小不等的间隙。间隙会导致机构的运动精度降低,加剧机器的振动。随着对虚拟样机仿真精度与可靠性要求的不断提高,必须考虑铰接间隙以及由此而引起的内碰撞和摩擦、润滑等非线性因素对机构动力学特性的影响。国内外学者针对铰间隙模型、接触力模型、摩擦力模型以及润滑处理等方面引起的动力学现象开展了深入的研究工作<sup>[4-7]</sup>。

笔者应用 ADAMS 软件建立酒瓶装箱机构的参数化模型并对其进行动力学仿真和测试分析,测试每一个设计变量的灵敏度,挑选灵敏度较高的设计变量进

收稿日期: 2012-10-23

作者简介: 席晓燕(1979-),女,河北人,硕士,唐山学院讲师,主要从事机械动力学方向的教学和研究。

行结构优化,根据优化结果确定酒瓶装箱机构的最终结构尺寸。基于间隙矢量模型,建立了考虑铰接处两构件由于制造和装配误差引起的间隙运动副模型,描述了间隙运动副两构件间的相对运动关系和基于非线性碰撞接触模式的动力学约束关系,分析了运动副间隙对系统运动学及动力学特性的影响。

## 1 酒瓶装箱机参数化建模仿真与优化

### 1.1 建模<sup>[8-9]</sup>

研究的酒瓶装箱机为连杆式装箱机,其结构外形见图 1,这是酒瓶装箱机一侧的外形结构,在它的另

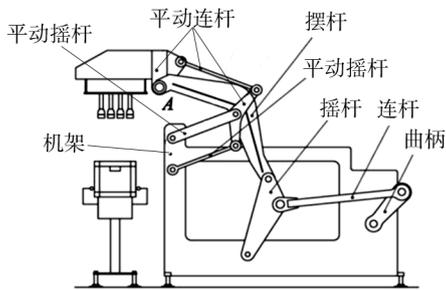


图 1 酒瓶装箱机结构

Fig. 1 Structure diagram of wine bottle packaging machine

一侧有与其完全对称的另一半。结构简图见图 2。

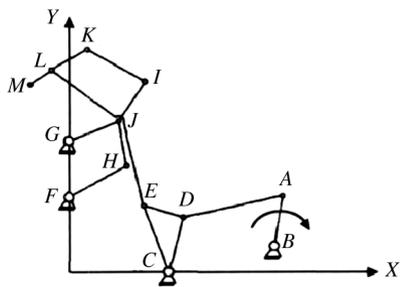


图 2 酒瓶装箱机构简图

Fig. 2 Schematic diagram of wine bottle packaging machine

#### 1.1.1 参数化点

酒瓶装箱机构中各铰接点的位置是创建杆件的关键参数,利用建模工具创建参数化点,各关键点的坐标见表 1。

#### 1.1.2 添加约束与驱动

完成酒瓶装箱机构几何实体模型后,通过约束副将它们依照特定的顺序连接起来,以定义物体之间的相对运动。从图 2 可知:  $B, C, F, G$  这 4 个点和地面

表 1 各关键参数化点坐标值

Tab. 1 Coordinate values of parameterized points

机构简图	参数化模型	X	Y
A	POINT_2	290	95
B	POINT_1	260	45
C	POINT_3	100	0
D	POINT_4	135	75
E	POINT_5	100	105
F	POINT_6	0	115
G	POINT_7	0	160
H	POINT_8	70	150
I	POINT_10	0	160
J	POINT_9	70	195
K	POINT_11	15	280
L	POINT_12	-30	250
M	POINT_13	-100	235

(因为现实中机架固定不动,其和地面类似,故在模型中以地面出现)以转动副铰接; $A, D, E, H, I, K, L$  7 个点每 2 个构件以旋转副铰接; $J$  点处  $GJ, HJI, KIL$  3 个构件由 2 个转动副相互铰接。为了观察仿真方便,并根据实际情况给曲柄  $AB$  施加一个运动。建立虚拟样机模型,见图 3,对机构进行仿真,得到抓头  $M$  的各个运动特性见图 4。

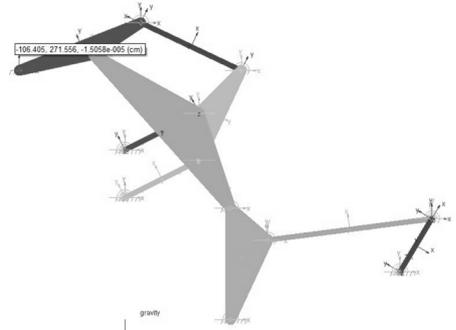
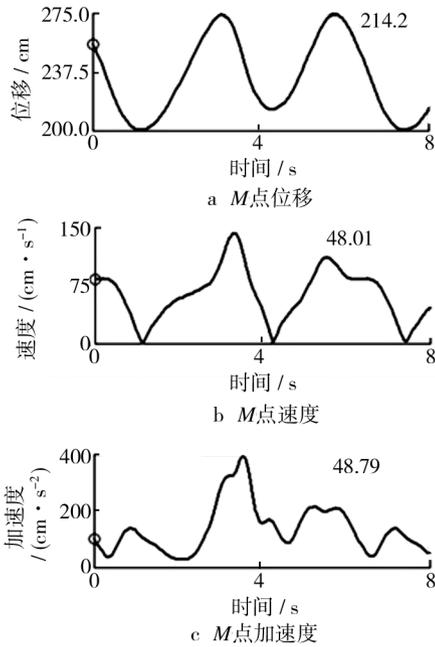


图 3 ADAMS 中酒瓶装箱机构模型

Fig. 3 Wine bottle packaging machine model in ADAMS

由图 4 所示,在一个工作循环中,样机模型的工作周期为 6.32 s,其中搬运酒瓶的工作行程用时 3.12 s,空载回程用时 3.2 s,这点很不利于提高工作效率。在搬运瓶当中速度和加速度值很大,由此可能造成酒瓶碰撞破裂而产生损失。另外酒瓶装箱机工作要尽量保证起步和终止均要稳定缓慢,即在装瓶和放瓶的时候速度不能突变也就是说加速度不能太大,可见目前建立酒瓶装箱机的模型参数并不是很合适,这就需要进一步的优化设计。

图4  $M$ 点的运动特性Fig. 4 Motion characteristic of point  $M$ 

## 1.2 酒瓶装箱机构优化

优化设计是根据对虚拟样机模型目标函数影响较大的某些设计变量进行优化分析,以达到产品性能优化的目的。

1) 确定目标函数。酒瓶装箱机构要求起步和终止均匀缓慢,因此以抓头  $M$  点的加速度达到最小为目标函数。

2) 参数化设计变量。将 12 个关键点的坐标值依次参数化,生成 24 个设计变量,并确定每个变量的合适的取值范围。

3) 设计变量的敏感度分析。在 ADAMS 中,针对  $M$  点加速度受各个关键点影响进行设计变量敏感度分析,找出对  $M$  点加速度影响最大的设计变量进行优化,得到的结构见表 2。

由表 2 看出 8 个灵敏度最高,对机构影响度最大的设计变量在优化时作为一个设计变量整体。在这里可以表示为: $X=[DV_1, DV_2, DV_3, DV_4, DV_5,$

表 2 设计变量及敏感度

Tab. 2 Design variable and sensitivity

设计变量	结构点位置	初始坐标	取值百分比	在初始值处灵敏度	最优值	为最优值时最大
		/cm	范围/%	/ $s^{-2}$	/cm	加速度/( $cm \cdot s^{-2}$ )
DV_1	POINT_1X	260	-5 ~ 2	-21.146	265.20	301.491
DV_2	POINT_1Y	45	-7 ~ 10	-19.832	48.15	334.653
DV_3	POINT_2X	290	-2 ~ 5	19.466	284.20	299.321
DV_4	POINT_2Y	95	-10 ~ 4	19.769	91.20	327.996
DV_5	POINT_3X	100	-10 ~ 10	10.369	90.00	313.603
DV_6	POINT_3Y	0	-1 ~ 1	4.2492	-1.00	392.103
DV_7	POINT_4X	135	-10 ~ 10	-10.657	148.50	283.453
DV_8	POINT_4Y	75	-10 ~ 10	-10.206	82.50	322.572
DV_9	POINT_5X	100	-10 ~ 10	-0.625 26	110.00	392.103
DV_10	POINT_5Y	105	-10 ~ 5	13.642	99.75	331.712
DV_11	POINT_6X	0	-1 ~ 1	0.107 12	-1.00	396.957
DV_12	POINT_6Y	115	-10 ~ 7	-0.178 62	123.05	391.816
DV_13	POINT_7X	0	-1 ~ 1	3.596 5	-1.00	393.492
DV_14	POINT_7Y	160	-10 ~ 10	-4.587 2	176.00	353.823
DV_15	POINT_8X	70	-10 ~ 10	-0.108 21	73.50	396.814
DV_16	POINT_8Y	150	-7 ~ 10	0.126 82	160.50	391.848
DV_17	POINT_9X	70	-10 ~ 10	1.577 1	63.00	385.258
DV_18	POINT_9Y	195	-2 ~ 10	-2.848 0	198.90	386.139
DV_19	POINT_10X	110	-10 ~ 10	0.289 83	104.50	395.855
DV_20	POINT_10Y	235	-10 ~ 1	0.153 56	232.65	396.808
DV_21	POINT_11X	15	-10 ~ 10	-0.319 04	16.60	396.636
DV_22	POINT_11Y	280	0.1 ~ 10	-0.141 01	280.28	397.014
DV_23	POINT_12X	-30	-10 ~ 10	-1.501 4	-27.00	392.900
DV_24	POINT_12Y	250	-10 ~ 1	1.772 1	247.50	392.892

DV\_7, DV\_8, DV\_10]。

优化的目标是使样机模型运行一周期中的最大加速度取得最小值。则目标函数可以表示为:

$$f(X) = \min \{ \text{Maximum of MARKER\_22\_MEA\_JSD} \} \quad (1)$$

这里分 2 次优化,灵敏度最高的 4 个设计变量 DV\_1, DV\_2, DV\_3, DV\_4 作为第 1 次优化时的设计变量;灵敏度次高的 4 个设计变量 DV\_5, DV\_7, DV\_8, DV\_10 作为第 2 次优化时的设计变量。

优化结果见图 5,显示优化目标抓头 M 点最大加

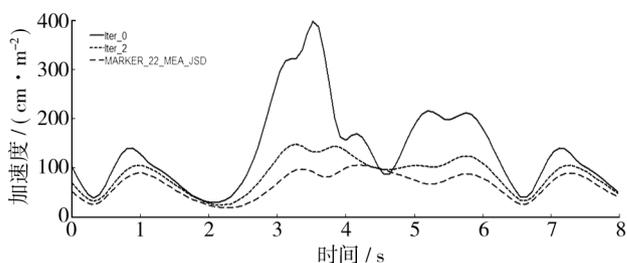


图 5 优化前后抓头 M 的加速度变化曲线

Fig. 5 The curve of M acceleration before and after optimization

速度从初始时的  $397.052 \text{ cm/s}^2$  到第 1 次优化后的  $147.602 \text{ cm/s}^2$ ,又进一步优化到了  $105.662 \text{ cm/s}^2$ ,又优化了  $-28.4\%$ 。优化前与 2 次优化后抓头 M 的加速度变化曲线见图 5,显而易见抓头 M 的加速度峰值不断的降低,进一步趋于平缓这就是运送酒瓶的过程中减少了速度突变,很好地避免了由于可能的碰撞造成的酒瓶破碎。优化后样机模型的工作周期仍为  $6.32 \text{ s}$ ,其中搬运酒瓶的工作行程用时  $3.28 \text{ s}$ ,空载回程用时  $3.04 \text{ s}$ ,提高了工作效率,这说明优化效果很明显。

## 2 酒瓶装箱机构间隙运动副模型

### 2.1 添加工作阻力

对于酒瓶装箱机构样机模型来说,除了运动副摩擦力等较小的力可以忽略不计外,样机模型主要还受到自身重力和周期性出现的酒瓶重力的影响,因此在结构点 POINT\_13 上施加垂直向下的载荷力。在机构样机模型仿真时间  $8 \text{ s}$ ,仿真步数 100 步固定的情况下:  $0 \sim 1.2 \text{ s}$  样机模型空载,抓头 M 只承受抓瓶框架自重;  $1.2 \sim 4.48 \text{ s}$  抓头 M 抓瓶后承受框架的重量和所运酒瓶的重量的双重影响;  $4.48 \sim 7.52 \text{ s}$  抓头 M 放瓶

装箱后空载返回,只承受抓瓶框架自重;  $7.52 \sim 8 \text{ s}$  抓头 M 抓瓶后又受 2 个力,至此完成一次仿真过程。在文中假设该抓瓶框架自重  $500 \text{ N}$ ,所抓酒瓶总重为  $1000 \text{ N}$ 。根据上述工作过程可以设置 IF 函数为:

$$\text{IF}(\text{time}-1.2:0,1000,\text{IF}(\text{time}-4.48:1000,0,\text{IF}(\text{time}-7.52:0,1000,1000)))+500 \quad (2)$$

在本模型中由于转动副 JOINT\_1 被驱动 MOTION\_1 附加其上,这让研究多有不便,同时也添加了其他的影响因素,导致不能单纯的研究转动副因素对整个机构的动力学影响。所以在文中取受力第二大的转动副 JOINT\_5 研究,其所受力的最大值与 JOINT\_1 相差无几,这也是因为整个机构的动力都经过了转动副 JOINT\_5 传动。JOINT\_5 的受力变化曲线见图 6,根据工作阻力测量得到驱动力矩见图 7。

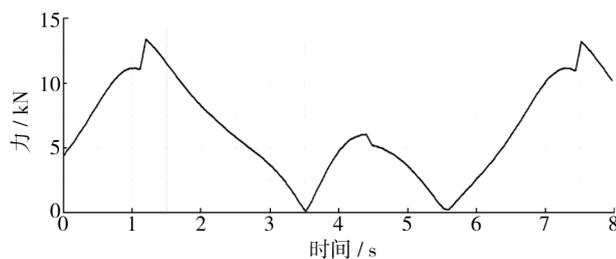


图 6 JOINT\_5 受力曲线

Fig. 6 Force curve of JOINT\_5

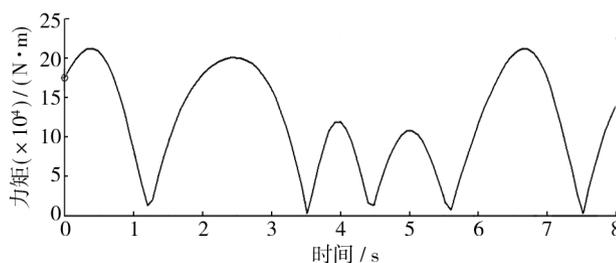


图 7 驱动力矩曲线

Fig. 7 Driving torque curve

### 2.2 间隙运动副模型

转动副实际上是轴销与轴套的联接,即转动副元素间的配合属于孔与轴的配合,而且只考虑在二维空间的情况下运动副间隙的影响,因此可以将这种孔与轴的配合简化成 2 个平面圆的配合,建立转动副间隙模型见图 8。

图 8 中:  $R_1$  为轴销  $O_1$  的半径;  $R_2$  为轴套  $O_2$  的半径;  $e$  为两圆心  $O_1$  和  $O_2$  的中心距。根据轴销与轴套的几何关系可知,半径间隙为  $C = R_2 - R_1$ 。定义  $\delta = e - c$

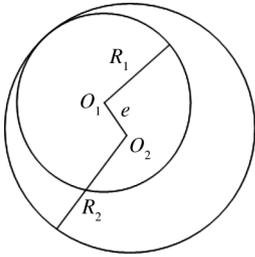


图8 含间隙运动副

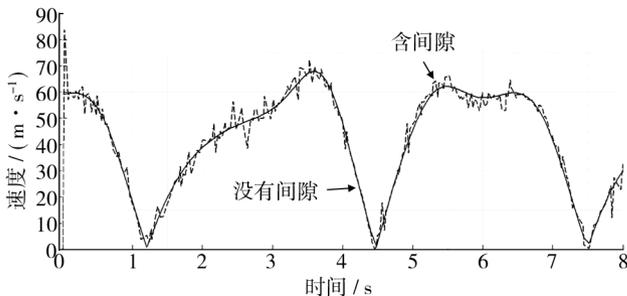
Fig. 8 Motion with clearance

为接触点法向穿透深度。则可以定义轴销与轴套碰撞接触条件为： $\delta < 0$  轴销与轴套未接触； $\delta = 0$  轴销与轴套开始接触或开始分离； $\delta > 0$  轴销与轴套接触变形穿透深度。

通过建立转动副间隙模型，可以清楚的认知含间隙转动副转动过程中的碰撞情况。这其中作用于运动副中的力起到了很重要的作用，在力的作用下，运动副产生了剧烈的振动。因此分析运动副间隙对运动轨迹的影响，必须考虑构件之间的接触力的作用。接触力是2个构件相互接触发生变形时产生的，接触力的大小与变形的大小和变形的速度有关。通过应用 ADAMS 软件来模拟运动副中的接触力，在仿真中，当两个圆弧接触时，ADAMS 软件会自动计算出运动副间的接触力，根据需要改变运动副间隙的大小，从而确定间隙对抓头  $M$  的运动特性的影响。

建立 JOINT\_5 的2个不同间隙半径(选取 0.01 cm 和 0.05 cm)的 CONTACT 力模型，仿真观察其动力学特性以及对目标点抓头  $M$  运动特性的影响，并分别与理想模型作动力学对比分析，并互相对比。

图9中实线为转动副不含间隙时的抓头  $M$  速度

图9 机构转动副含间隙对抓头  $M$  的速度的影响曲线Fig. 9 The correlation curves between  $M$  speed of mechanism without clearance and with clearance

特性，虚线为有间隙时其的特性曲线。从图9可以看

出：无间隙理想状态时抓头  $M$  可以随着原动件曲柄  $AB$  开始旋转而瞬时获得速度而移动，并没有从 0 开始加速到理论速度值的过程；设置转动副间隙后，抓头  $M$  随机构启动速度从 0 突变到理论值，虽然时间极短，但一定程度上与现实情况更为接近；之后含间隙的抓头  $M$  速度在其理论值附近震荡，并伴随仿真整个过程。之所以它速度大小会在理想值附近震荡亦是因为转动副间隙的存在，伴随着轴销与轴孔碰撞、分离再碰撞、再分离，每一次碰撞都会造成速度的突变并实时不衰减地(因为从设置间隙的 JOINT\_5 处往后的运动链均为理想状态)传递给抓头  $M$ 。由于加速度是速度与时间的比值，所以加速度的曲线相比速度曲线其振荡得还要激烈，见图10。

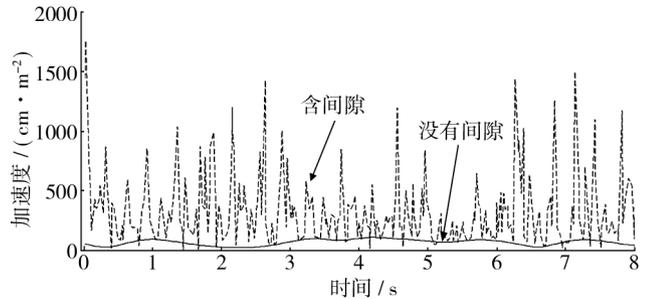
图10 机构转动副含间隙对抓头  $M$  的加速度的影响曲线Fig. 10 The correlation curves between  $M$  acceleration of mechanism without clearance and with clearance

图10中实线为铰链理想状态时抓头  $M$  随仿真进行的加速度特性，虚线为铰链含间隙时的抓头  $M$  加速度变化。以上仿真、分析、对比是当酒瓶装箱机样机模型曲柄  $AB$  和连杆  $AD$  铰接处间隙为 0.01 cm 的分析。将间隙由 0.01 cm 变为 0.05 cm，将样机模型抓头  $M$  的理想速度曲线和铰链间隙分别为 0.01, 0.05 cm 时的速度曲线叠加对比见图11。

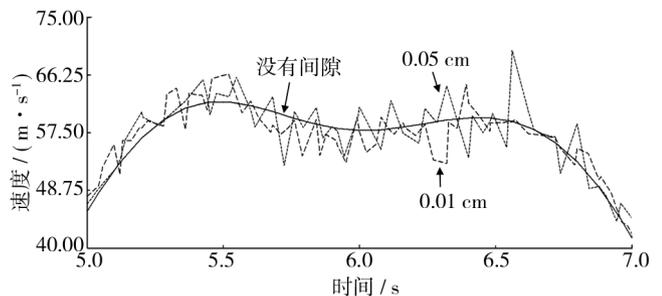
图11 不同转动副间隙与理想状态下的抓头  $M$  速度对比Fig. 11 Comparison of  $M$  speed of motion pair with different rotation clearance and ideal state

图 11 中,实线为理想状态下酒瓶装箱机样机模型抓头  $M$  的速度曲线,长虚线和短虚线分别为转动副间隙为 0.01 cm 和 0.05 cm 情况下其速度特性。可以看出当转动副间隙变大时,抓头  $M$  的速度振荡依旧存在。大间隙对抓头  $M$  速度振荡的最大峰值超出小间隙对其影响的最大峰值,这说明随着转动副间隙的变大,销轴和销孔碰撞时更加激烈,造成的抓头  $M$  突变的值更大。但同时可以发现随着间隙的变大其速度振荡的频率有所降低,即单位时间内出现的速度突变峰值数减少,这是由于在相同的仿真情况下,因为间隙的增大造成销轴与销孔从分离到碰撞的用时增大,进而造成抓头  $M$  的速度振荡周期变长,频率变小。

综上所述,运动副间隙对于酒瓶装箱机构样机模型目标点抓头  $M$  有着不可避免的影响。间隙虽然对抓头  $M$  的位移影响甚小,可以忽略,但对其速度和加速度影响明显。随着间隙的增大,抓头  $M$  的速度突变峰值增大,但其频率却随着间隙的增大而降低。

### 3 结论

基于 ADAMS 软件对酒瓶装箱机构进行了建模仿真,以保证抓头加速度最小为目标函数对机构进行了结构优化,优化结果大大降低了抓头  $M$  的加速度。建立了考虑铰接处两构件由于制造和装配误差引起的间隙矢量模型,得到了间隙大小对系统的影响,间隙对抓头  $M$  的位移影响很小,可以忽略,但对其速度和加速度影响明显。随着间隙的增大,抓头  $M$  的速度突变峰值增大,其频率却随着间隙的增大而降低。

利用 ADAMS 进行仿真是研究含间隙运动副机构的一种有效方法,为多体机构设计及动力学行为描述提供精确预测,对其它含间隙运动副机构的动力学研究具有普遍意义。

#### 参考文献:

- [1] 周春国,童林,刘云霞. 啤酒装箱机的运动分析[J]. 机械科学与技术,2000,19(4):590-591.  
ZHOU Chun-guo,TONG Lin,LIU Yun-xia. Motion Analysis of Beer Bottle Packing Machine [J]. Mechanical Science and Technology,2000,19(4):590-591.
- [2] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程,2008,29(2):47-49.  
HE Bing. Simulation Study of Packing Machine Based on Virtual Prototyping [J]. Packaging Engineering,2008,29(2):47-49.
- [3] 贺兵,刘杨,刘建华. 基于 ADAMS 软件的啤酒装箱机双四杆机构的运动仿真优化[J]. 轻工机械,2008,26(5):34-37.  
HE Bing,LIU Yang,LIU Jian-hua. Kinematics Simulation and Optimization Design of Twion-four-link Mechanism of Beer Bottle Packer Based on ADAMS Software [J]. Light Industry Machinery,2008,26(5):34-37.
- [4] 王国庆,刘宏昭. 含间隙平面连杆机构动态特性研究[J]. 机械传动,2001,25(3):18-21.  
WANG Guo-qing,LIU Hong-shao. Dynamic Response of 4R Four-Bar Mechanism with a Clearance Joint [J]. Journal of Mechanical Transmission,2001,25(3):18-21.
- [5] 时兵,金焯. 面向虚拟样机的机构间隙旋转铰建模与动力学仿真[J]. 机械工程学报,2009,45(4):299-303.  
SHI Bing,JIN Ye. Dynamic Simulation and Modeling of Revolute Clearance Joint for Virtual Prototyping [J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(4):299-303.
- [6] LIU Cai-shan,ZHANG Ke,YANG Rei. The FEM Analysis and Approximate Model for Cylindrical Joints with Clearances [J]. Mechanism and Machine Theory,2007,42:183-197.
- [7] SHI Bing,JIN Ye. A Framework of Virtual Prototyping Environment for the Design and Analysis of Mechanical Mechanism with Clearance [J]. Virtual and Physical Prototyping,2007,2(1):21-28.
- [8] 刘金根. 桶装亚砷酸成品自动捆扎机系统研究与设计 [D]. 南昌:江西理工大学,2009.  
LIU Jin-gen. Research and Design of Bottled Arsenite Finished Automatic Strapping Machine System [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology,2009.
- [9] 刘飞飞,刘金根. 基于 ADAMS 的捆扎机锁紧机构的优化设计 [J]. 包装工程,2009,30(7):19-21.  
LIU Fei-fei,LIU Jin-gen. Optimal Design for Locking Mechanism of Bundling Machine Based on ADAMS [J]. Packaging Engineering,2009,30(7):19-21.