

蛇形机器人蜿蜒运动控制分析

王雪¹, 连晓峰¹, 陈天华¹, 苏中², 高俊¹

(1. 北京工商大学, 北京 100048; 2. 北京信息科技大学, 北京 100085)

摘要: 针对蛇形机器人的蜿蜒运动控制, 首先分析了关节角度约束对运动控制函数参数取值的限制, 确定了满足机械结构的运动控制参数范围; 之后在 Adams 仿真环境下, 建立蛇形机器人的三维虚拟运动模型, 进行蜿蜒运动仿真, 通过分析幅值控制参数对蛇形机器人弯曲度、运动速度和运动轨迹偏移的影响, 提出了调整幅值参数的方法; 实验结果表明, 调整方法的有效性, 从而实现蛇形机器人蜿蜒运动控制的优化。

关键词: 蛇形机器人; 蜿蜒运动; 幅值参数调整

Simulation of Snake-like Robot's Winding Movement

Wang Xue¹, Lian Xiaofeng¹, Chen Tianhua¹, Su Zhong², Gao Jun¹

(1. Beijing Technology And Business University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100085, China)

Abstract: For the motion control of serpentine locomotion of the snake-like robot, based on the analysis of the constraint on parameter values limit of control function of the joint angle of the mechanical structure, firstly to confirm the control parameter which satisfy the requirement of the mechanical structure. Then build the 3D virtual motion model of the snake robot in Adams environment to simulate the serpentine motion. The parameter adjustment method is proposed through analysis of the impact on the bending, velocity and trajectory offset in this paper. Experiment results show that the effectiveness of this method, thus can implement the optimal control for the serpentine locomotion of the snake-like robot.

Keywords: Snake-like robot; Serpentine movement; Amplitude parameter adjustment

0 引言

蛇形机器人可模仿生物蛇的运动步态, 使其在在灾难现场有着广泛的应用前景, 如在地震、塌方等狭小空间中仍可执行任务^[1]。生物蛇的运动方式有很多种, 包括蜿蜒运动, 直线运动, 收缩运动和侧向运动^[2], 其中蜿蜒运动是最典型、最核心的运动方式。

最早的蛇形机器人是由日本教授 Hirose 研制的, 同时 Hirose^[2]提出了一种可以有效的模仿生物蛇蜿蜒运动的 Serpenoid 曲线, 该曲线是通过观察生物蛇的运动特点提出的。Ma^[3]在此基础上提出了 Serpentine 曲线, 并且验证了蜿蜒运动的有效性; Eugen Meister^[4]在此基础上提出了中央方程形式的曲线。近年来 Serpenoid 曲线该曲线广泛的应用于蛇形机器人的运动^[5,6]。左志坚^[7]和庞博^[8]分析了运动控制参数对运动的影响, 但是对运动影响的分析不够全面, 叶长龙^[9]研究了转弯运动时参数的调整方法, 但是没有分析调整参数对运动的优化效果。

本文首先在 Adams 系统下对蛇形机器人的蜿蜒运动控制进行仿真, 然后通过仿真结果分析, 主要研究了幅值控制参数对运动的影响, 并提出一种调整控制参数的方法。

1 蛇形机器人的机械结构

蛇形机器人采用正交关节结构, 如图 1 所示。整个机器人共由 12 节正交关节构成, 每两个正交关节构成一个单元, 即蜿蜒运动时机器人的关节个数为 $n=6$ 。因此, 可将蛇形机器人简化为六连杆的机械结构, 再此基础上详细分析蛇形机器人的运动。由于各关节转角受机械结构的约束限制, 使得任意关节 J_i , 关于 J_{i+1} 的相对转动不能达到 90 度, 机器人的机械结构参数见表 1。

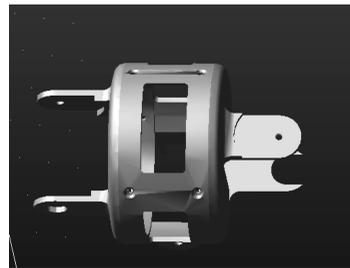


图 1 正交关节结构

表 1 结构参数

机器人总长/m	骨节长/cm	骨节宽/cm	质量/kg	关节水平转角/°
1.2	8	5	4.8	±40

2 蜿蜒运动控制函数

根据 Hirose 等人提出的 Serpenoid 曲线, 在此将其作为机器人的蜿蜒运动控制函数建立运动模型。Serpenoid 曲线是指在 $x-y$ 平面内, 如果存在一条通过坐标原点的曲线, 曲线上任意一点都可以表示为式 (1) 的形式, 那么该曲线就称为蜿

收稿日期:2014-05-10; 修回日期:2014-06-11。

基金项目:国家自然科学基金(61261160497);北京市科技计划项目(Z121100001612007);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(CIT&TCD201304025);大学生科学研究与创业行动计划项目。

作者简介:王雪(1989-),女,北京人,硕士研究生,主要从事研究智能控制与信号处理等方向的研究。

蜒运动曲线。

$$\begin{cases} x(s) = \int_0^s \cos(a\cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \\ y(s) = \int_0^s \sin(a\cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \end{cases} \quad (1)$$

其中： s 表示从起始点到当前点的弧长。

如果使控制参数取不同的值，那么将得到不同形态的 Serpenoid 曲线：参数 a 决定蛇形曲线的单位长度，参数 b 决定单位长度内包含完整波形的个数，参数 c 决定蛇形曲线的方向^[1]。

将式 (1) 离散化之后，计算相邻线段间夹角，得到式 (2)，对其进行化简并写为夹角关于时间的函数，得到式 (3)

$$\varphi_i = -2a\sin\left(\frac{b}{2n}\right)\sin\left(\frac{ib}{n} - \frac{b}{2n}\right) + \frac{c}{n} \quad (2)$$

$$\varphi_i(t) = a\sin(\omega t + i\beta - \frac{\beta}{2}) + \gamma \quad (3)$$

式中， n 为关节数； i 为关节点；

$$a \text{ 为关节转角的幅值 } a = \left| -2a\sin\left(\frac{b}{2n}\right) \right| ;$$

ω 为关节转角频率；

$$\beta \text{ 为相位差 } \beta = \frac{b}{n} ;$$

$$\gamma \text{ 为关节系统的偏差转角 } \gamma = \frac{c}{n} ;$$

3 运动控制参数的选取与分析

在对蜿蜒运动进行仿真时，用整条蛇形机器人拟合一个周期的 Serpenoid 曲线。由于蜿蜒运动时关节个数 $n=6$ ，所以拟合 Serpenoid 曲线的连杆数 $L=6$ 。根据关节夹角的约束条件 $|\varphi_i| < \frac{2\pi}{9}$ ，可以确定满足约束条件的控制参数范围。当蜿蜒运动直行时，参数 c 的取值将为零，如果参数 b 的取值不变，为 $b=2\pi$ ，那么参数 a 满足：

$$\left| -2a\sin\left(\frac{2\pi}{12}\right)\sin\left(\frac{i \times 2\pi}{6} - \frac{2\pi}{12}\right) \right| < \frac{2\pi}{9}, i = 1, 2, \dots, 5$$

由此可解得 $a < \frac{4\pi}{9}$ ，该范围即为满足约束条件的 a 值范围。

对 a 取不同值时的 Serpenoid 曲线进行仿真，用六连杆拟合一个周期的曲线，设仿真参数 a 的值分别为 $\pi/2, \pi/3, \pi/4, \pi/5, \pi/6$ ，其余参数取值不变为， $b=2\pi, c=0$ 。仿真结果如图 2 所示，黑点处为关节连接点。

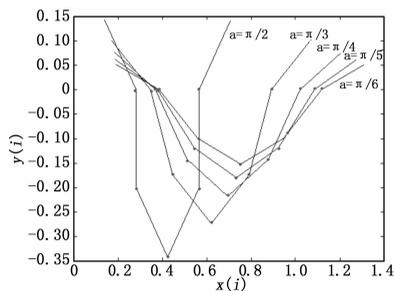


图 2 六连杆拟合一个周期蛇形曲线

分析仿真结果，在 a 取值不同时，相同 i 处的夹角不同。比较 i 相同时， L_{i+1} 相对于 L_i 的转角，当 a 取值越小，转角越小，更容易满足结构要求，与前面分析的结果相同。

4 Adams 仿真分析幅值控制参数

在 Adams 环境下进行蜿蜒运动仿真时，将关节角度与时间的函数作为运动的控制函数。根据前面的分析，蜿蜒直行的临界参数为 $a=4\pi/9, b=2\pi, c=0$ ，那么对应的幅值参数 $a \approx 0.7$ ，相位差 $\beta=\pi/3$ ，偏差转角 $\gamma=0$ 。转角频率 ω 决定曲线的周期，设 $\omega=\pi$ 。对幅值参数 a 取值不同时，蛇形机器人的蜿蜒运动进行仿真，参数 a 分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7，其他参数取值为 $\beta=\pi/3, \gamma=0, \omega=\pi$ ，仿真时设置相同的仿真时间 time 与步长 step，time=16 s，即 8 个完整周期，step=50。分析幅值参数对蜿蜒运动的影响。

4.1 幅值 α 对曲线弯曲度的影响

在进行蜿蜒运动仿真时，蛇形机器人由初始状态即“一条直线”，迅速转变为“s 形”。 a 取值不同时，得到的“s 形”也不同，图 3 是不同 a 取值下，仿真得到的蛇形机器人形态， a 取值从左到右依次递增。分析图 3 可知， a 取值对蛇形机器人弯曲的幅度有影响，随着 a 取值的增大，曲线的幅值增大，同时拟合的“s 形”弯曲度也增大。如果 a 继续增大将超过机械结构的限制。

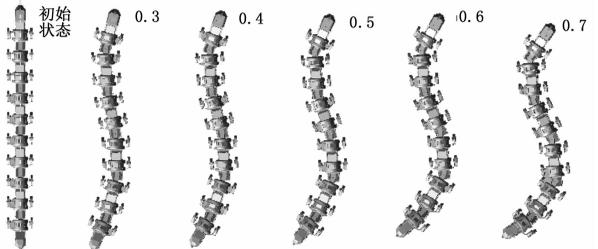


图 3 a 取值不同时运动过程截图

4.2 幅值 α 对运动速度的影响

完成蜿蜒运动的仿真后，可利用 Adams 系统的后处理模块输出各种 body 的特性曲线。因为蛇形机器人的运动过程就是连杆之间状态的传递过程，即经过一定的时间 t ， L_{i+1} 将状态传递给 L_i ，这样就实现了波形的传递，所以本文以蛇头的运动表示蛇形机器人的运动，输出蛇头向前运动的位移与时间的关系曲线，依次计算在 a 取不同值时，对应的运动速度 v ，得到幅值 a 与速度 v 的对应关系为表 2 所示。

表 2 a 与 v 的关系

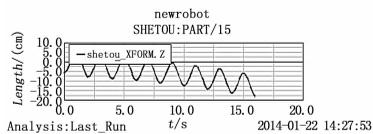
a/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$v/(cm/s)$	3.489	23.716	29.27	30.88	31.897

对表 2 中的数据进行分析，可知，蛇形机器人的运动速度随着幅值 a 的增大而增大。当 $a=0.3$ 时，蛇形机器人移动的距离过小，几乎没有发生移动，所以在实际应用时幅值 a 的取值要根据运动速度的要求来确定，不能过小。

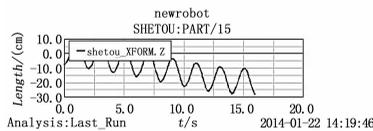
4.3 幅值 α 对轨迹偏移的影响

在后处理模块输出 a 取不同值时，仿真得到的蛇头运动轨迹，如图 4 所示， a 的取值从图 4 (a) 到图 4 (e) 依次增加。

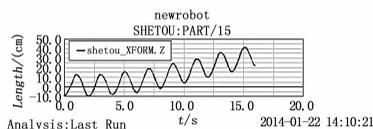
在进行蜿蜒运动仿真时，偏差转角参数设为 $\gamma=0$ ，所以蛇形机器人应该实现蜿蜒直行运动，即不论 a 取何值时，蛇头的期望运动轨迹沿 $y=k$ (k 为常数) 轴对称，但分析图 4 的仿真结果可知，运动轨迹并没有沿 $y=k$ 对称，而是发生了不同



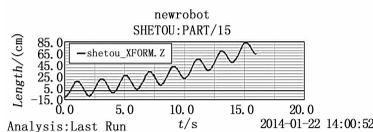
(a) $\alpha=0.3, \beta=\pi/3, \gamma=0$



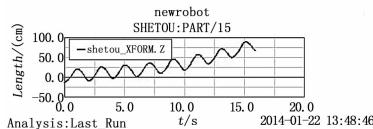
(b) $\alpha=0.4, \beta=\pi/3, \gamma=0$



(c) $\alpha=0.5, \beta=\pi/3, \gamma=0$



(d) $\alpha=0.6, \beta=\pi/3, \gamma=0$



(e) $\alpha=0.7, \beta=\pi/3, \gamma=0$

图 4 α 取值不同时蛇头运动轨迹的仿真结果

程度的偏移。当 α 取值为 0.3 和 0.4 时, 运动轨迹向 y 轴的负半轴偏移, 当 α 取值为 0.5 到 0.7 时, 轨迹向 y 轴的正半轴偏移。为了分析轨迹的偏移与参数 α 的关系, 对仿真结果进行处理。将运动轨迹的仿真结果以数据形式输出, 取波峰数据进行处理, 由于仿真时间为 8 个完整周期, 所以波峰数据记为 $y_i, i=1, 2, \dots, 8$ 。运动轨迹没有发生偏移时, 有 $y_i = y_{i+1}, i=1, 2, \dots, 7$, 因此用相邻波峰处的偏移量 $\Delta_i = y_i - y_{i+1}, i=1, 2, \dots, 7$, 表示运动的过程的偏移, 分析运动轨迹的误差 e , 采用最小二乘法进行处理 $e = \sum_{i=1}^7 (y_i - y_{i+1})^2$ 。运动轨迹的误差 e 越小, 说明运动效果越理想。数据处理后得到幅值 α 与运动误差 e 的关系为表 3 所示。

表 3 α 与 e 的关系

α/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$e/(cm)$	21.3	52.3	144.1	739.9	805.4

分析表 3 结果可知, 随着幅值 α 的增大, 运动轨迹的误差也增大, 即运动产生的偏移量越大。综上所述, 运动速度和轨迹误差都随着幅值的增大而增大。因此进一步分析运动速度与运动误差的关系, 速度 v 和轨迹误差 e 的关系如图 5 所示。

观察图 5 的关系曲线可知, 轨迹误差与速度成正比关系, 即运动速度越大, 产生的轨迹误差越大。所以 α 取值是有限制的, 不能片面的追求运动速度, 而忽略了运动轨迹的偏移。

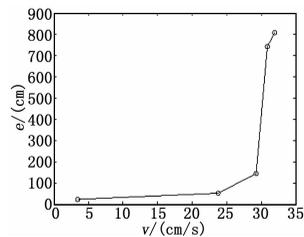


图 5 v 与 e 的关系

5 控制参数的调整

在实际应用中, 期望蛇形机器人的移动速度尽量大, 同时运动偏移在一定范围内, 然而运动速度增大时, 运动轨迹的误差也增大。由图 4 的仿真结果可知, 当 α 为 0.3 和 0.4 时, 轨迹向 y 轴的负半轴偏移, 而 α 为 0.5 到 0.7 时, 轨迹向 y 轴的正半轴偏移, 所以需要找到一个函数使初始阶段的幅值 α 取值较小, 随着时间增加, α 取值逐渐增大, 这样就有效地调整蜿蜒运动时蛇形机器人产生的运动偏移。为此引入调整量 $\Delta\alpha = 1 - e^{-\lambda t}$, 将夹角函数改为

$$\varphi_i(t) = \alpha(1 - e^{-\lambda t}) \sin(\omega t + i\beta - \frac{\beta}{2}) \quad (4)$$

对蜿蜒运动进行仿真, 验证调整量对运动的优化效果, 仿真参数设为 $\alpha=0.7, \beta=\pi/3, \gamma=0, \omega=\pi, \lambda=1, \text{time}=16 \text{ s}, \text{step}=50$, 仿真结果如图 6 所示, 图 6 的上部分为速度曲线, 下部分为蛇头运动轨迹曲线。

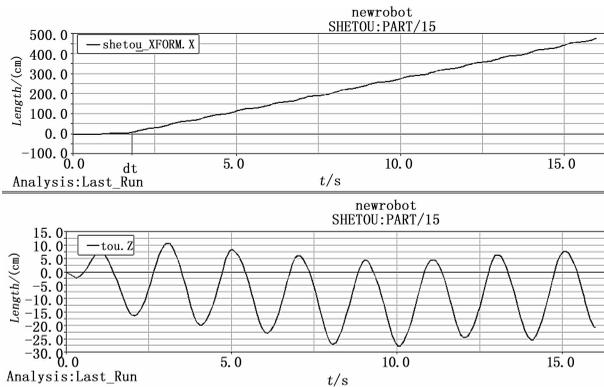


图 6 $\lambda=1$ 仿真结果

分析图 6 的速度曲线可知, 在 $t=dt$ 时, 速度曲线的斜率发生了明显变化; 分析运动轨迹的偏移, 轨迹曲线首先向负半轴偏移, 之后逐渐出现向正半轴的调整, 这种调整是由于加入了调整量。根据图 6 的仿真结果, 计算运动轨迹误差 $e=27.6 \text{ cm}$, 此时的运动误差与 $\alpha=0.3$ 时的误差相近, 比 $\alpha=0.7$ 时的误差要小很多, 所以调整后的幅值参数, 对运动轨迹误差的优化有显著效果。计算运动速度为 $v=27.727 \text{ cm/s}$, 与 $\alpha=0.5$ 时的运动速度相近, 但比 $\alpha=0.7$ 时的速度要小。总之, 加入调整量后, 蜿蜒运动的轨迹误差减小, 同时运动速度也减小。

对 λ 取不同值时的蜿蜒运动进行仿真, 仿真参数为 $\lambda=2$, 其它参数值不变, 仿真结果如图 7 所示。

对图 7 的仿真结果进行分析, 计算运动轨迹误差为 $e=141.2 \text{ cm}$, 运动速度为 $v=30.506 \text{ cm/s}$ 。将此时的仿真结果与 $\lambda=1$ 时的仿真结果进行比较, 得到 $\lambda=2$ 时, 速度曲线斜率转折的时间 dt 较小, 即 $\Delta\alpha$ 的调整对整体幅值的影响时间短, 运

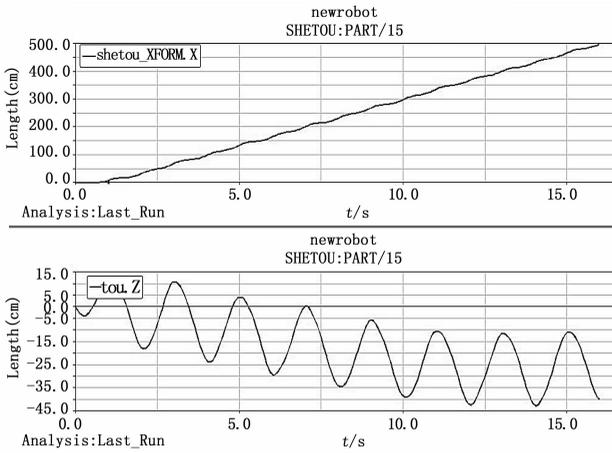


图 7 $\lambda=2$ 仿真结果

动速度较快,但是运动轨迹的调整效果也变差。

6 结论

本文对蛇形机器人在机械结构约束下,对运动控制参数进行分析,确定六连杆拟合下的控制参数取值范围;建立 *Adams* 下蜿蜒运动模型,仿真不同幅值参数取值时的运动;通过对仿真结果的分析,首先确定了幅值控制参数 α 与蛇形机器人弯曲度的关系, α 越大弯曲度越大;其次明确了幅值 α 与运动速度的关系, α 越大 v 越大;之后确定了幅值 α 与运动轨迹误差 e 之间的关系, α 越大 e 越大,同时得到轨迹偏移 e 与运动

速度 v 成正比;最后给出幅值控制参数调整的方法,并且分析调整参数 λ 对蜿蜒运动控制效果的影响, λ 越大, $\Delta\alpha$ 作用的时间越短,对运动速度 v 的影响越小,同时对运动轨迹误差 e 的调整效果越差。

参考文献:

[1] 李 斌. 蛇形机器人的研究及在灾难救援中的应用 [J]. 机器人技术与应用, 2003, 24 (3): 22-26.

[2] Hirose S Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.

[3] Ma S. Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robots [A]. Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on [C]. IEEE, 1999, 4: 3007-3013.

[4] Eugen Meister. Adaptive locomotion of multibody snake-like robot [J/OL]. <http://arxiv.org/abs/1108.6175>, 2011.

[5] 孙 洪, 马培荪, 王光荣. 蛇形机器人一种基于 serpenoid 曲线的蠕动步态 [J]. 机械设计与研究, 2008, 24 (1): 39-42.

[6] 蔡建羨, 于瑞红, 李艳琴. 机器蛇的行波运动控制分析与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 106-107.

[7] 左志坚, 李 斌, 马书根, 等. 蛇形机器人水下蜿蜒运动的仿真研究 [A]. 第六届全国信息获取与处理学术会议论文集 (1) [C]. 2008.

[8] 庞 博, 邓宏彬. 基于 Recurdyn 的蛇形机器人的蜿蜒运动仿真 [J]. 河北工程大学学报, 2013, 30 (1): 96-98.

[9] 叶长龙, 马书根, 李 斌, 等. 蛇形机器人的转弯和侧移运动研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40 (10): 119-123.

(上接第 2783 页)

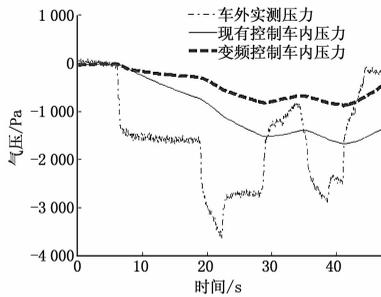


图 7 尾车通过隧道控制与不控制车内压力仿真对比

4 结论

1) 本文根据某型高速列车换气风机特性曲线与车体等效泄露关系,建立了换气风机频率可变的车内外气压传递模型;

2) 本文所研究的高速列车变频控制不仅能更好的抑制车内空气压力波动,同时可以根据列车实际运行状态,不断提供合理的新风量,如当列车低速运行时,车外空气可以通过车体缝隙或其他间隙进入车内,这时不要换气风机提供高速新风量,可以适当降低新风机转速,节约能源。

参考文献:

[1] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed train [J]. Progress in aerospace sciences, 2002, 38: 469

-514.

[2] Fujii K, Ogawa T. Aerodynamics of high speed trains passing by each other [J]. Computer & Fluids, 1995, 24 (8): 469-514.

[3] Ahmen S R, Gawthorpe R G, Mavchrodt P A. Aerodynamics of road and rail vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 1985, 14: 319-392.

[4] 余南阳. 时速 160 km, 200 km 列车通过隧道时产生的压力波动 [J]. 铁道建筑, 2003, (12): 29-30.

[5] 张兴娟, 袁修干, 王长和, 等. 高速列车车厢新型压力控制技术的实验分析 [J]. 北京航空大学学报, 1999, 25 (4): 451-453.

[6] 亢文祥, 陈春棉, 熊小慧. CRH2 动车组新风换气装置对车内压力波动影响试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2011, (5): 84-89.

[7] 李树典. CRH2 型 200 km/h 动车组车内压力波动控制研究 [J]. 机电传动, 2009, (2): 6-7.

[8] 马永娟, 陈小强, 侯 涛. 基于模糊预测控制的高速列车速度控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 96-99.

[9] 阮晓刚, 程怀玉, 于乃功, 等. 一级直线倒立摆匀速行走的模糊控制研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 56-59.

[10] 苏晓峰, 程建峰, 韩增盛. 高速列车气密性研究综述 [J]. 铁道车辆, 2004, 42 (5): 16-20.

[11] 陈春俊, 聂锡城, 唐 猛. 车外空气压力作用下的 CRH2 型动车组车内空气压力传递函数模型 [J]. 中国铁道科学, 2013 (7): 84-88.

[12] 续魁昌. 风机手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[13] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.