倒锥面高层玻璃幕墙清洗机器人设计

王 巍 唐伯雁

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100022)

摘 要: 为满足倒锥面高层玻璃幕墙清洗机器人对小质量、高可靠性、高安全性的要求,提出了运动驱动分散配置、主运动与辅助运动一体化、主运动柔性驱动的机器人结构设计原则;针对具体建筑结构设计了完备的清洗机器人系统,讨论了机器人对作业对象遍历运动和吸附、清洗功能的实现方法;分析了机器人系统对建筑结构误差的适应能力,证明了柔性驱动结构的可行性. 在上述基础上开发了倒锥面高层玻璃幕墙清洗机器人系统,并进行了现场试验,证明了系统的实用性和可靠性. 该系统已成功应用于机场指挥塔幕墙的清洗作业.

关 键 词: 机器人; 玻璃幕墙; 误差

中图分类号: TP 206^{+}. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0738-04

Cleaning robot design for cone high-rise glass-curtain wall

Wang Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Tang Boyan

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing, 100022, China)

Abstract: To fulfill the demand for the lightness, high reliability and safety, three structure design principles were proposed for a cone high-rise glass-curtain wall cleaning robot. The whole cleaning robot structure was designed based on the principles which were described as the motion driver dispersed configuration, the main and secondary motion integrative drive and the soft drive structure for the main motion. The methods adopted by the robot to go through, attach and clean the glass-curtain wall were detailed consequently. The architecture dimension error's infection to the robot was analyzed to testify the feasibility of the soft drive structure and the adaptability of the robot to the error. The cleaning robot for an airport control tower was developed according to the principles discussed. The practicability and reliability of the robot were testified by the fieldwork. The cleaning robot system proposed is now used for the airport control tower's daily cleaning service.

Key words: robot; glass-curtain wall; error

幕墙清洗机器人是壁面移动机器人在建筑物清洗服务中的应用实例. 常规壁面移动机器人的结构设计总是试图利用机器人的运动机构来适应壁面条件的变化,从而增加了机器人移动体结构设计的难度,导致机器人本体重量增加,造成工作时危险性增大,安全保护系统成本增加及操作方便性降低. 所以,如何解决幕墙清洗机器人移动体重量与适应能力的矛盾一直是阻碍幕墙清洗机器人实用化的一个关键问题.

由于以上原因,目前已有的幕墙清洗机器人大多数只能在有限的高度内对平面幕墙进行清洗作业. 如文献[1-4]中涉及的机器人,只能在平面或接近平面的壁面上运动. 文献[5]中的机器人虽然能够实现沿球面的运动,但由于采用了 23 个自由度来驱动机器人机构,造成了机器人结构庞大,重量激增(120 kg),直接影响了系统的实用

收稿日期: 2005-07-07

作者简介: 王 巍(1973-),男,湖北宜昌人,副教授, wangweilab@buaa.edu.cn.

性.

针对上述问题,本文结合某机场指挥塔玻璃幕墙的结构,提出了运动驱动分散配置、主运动与辅助运动一体化、主运动柔性驱动的机器人结构设计原则,设计并研制了一种适用于倒锥面高层玻璃幕墙的清洗机器人系统. 文中论述了简化机器人结构和轻型化的方法,讨论了柔性驱动装置对建筑结构误差的补偿作用. 现场试验证明该系统操作方便,工作可靠,取得了很好的应用效果.

1　机器人结构设计原则

1.1　玻璃幕墙的结构特点

机场指挥塔玻璃幕墙为全隐框形式,位于指挥塔顶部的控制台部分,是控制台的外墙面,如图 1 所示. 需要机器人进行清洗的幕墙是倒锥体的外表面. 倒圆锥体底部的最小直径为 13. 8 m,建筑标高为 74 m;顶部最大直径为 26. 8 m,建筑标高为 91 m. 外墙由装饰环分隔成 4 层,幕墙负倾角自下而上依层增大. 倒锥面由 416 块平面玻璃拼接而成,水平相邻的 2 块玻璃之间存在 11°的夹角.



图 1　机场指挥塔玻璃幕墙

1.2　机器人运动系统的设计原则

指挥塔玻璃幕墙结构具有大曲率、倒斜面、面积小、外部障碍突出、整体高度大及作业环境危险的特点. 它对清洗机器人结构提出了如下要求:

1) 应具有较高的安全性和可靠性;

2) 适应能力强,对施工误差不敏感,能满足多种锥度要求;

3) 吸附力强,可跨越凹陷障碍;

4) 轻量化.

如果利用机器人移动体机构去适应幕墙结构,则移动体至少应具备 5 个自由度:全向移动驱动(2 个)、曲面过渡(2 个)和刷头升降(1 个). 这样,势必使移动体的驱动和传动装置复杂化. 如果再考虑安全保护系统与机器人的协调机构,则机器人的复杂程度将进一步增加,直接导致机器人重量的增加,不利于高空操作的便利和安全.

为了满足上述结构设计要求,本文提出如下设计原则:

1) 机器人移动体对玻璃幕墙遍历运动的驱动分散配置原则. 移动体的作用是带动刷头运动并为刷头提供附着力. 机器人移动体自身的驱动系统仅提供相对壁面的附着运动和吸附动力及刷头与壁面的相对运动. 考虑到作业对象面积小的特点,可以将移动体的大行程遍历运动的驱动分离到移动体之外,使其与保护装置的驱动一体化,以避免运动功能的重复,简化系统总体结构.

2) 移动体相对玻璃幕墙遍历运动的驱动装置应采用柔性结构,以适应玻璃幕墙形状的变化,克服建筑施工误差的影响.

3) 安全保护装置应能在无动力条件下维持与壁面的相对位置,保证意外情况下机器人移动体不会跌落或被甩出.

4) 针对指挥塔玻璃幕墙 4 层结构的特点,清洗机器人系统实行分层布置,避免系统跨越突出玻璃表面高达 500 mm 的不锈钢装饰条,降低难度和风险.

2　系统结构设计和功能实现

根据上述原则,本文对指挥塔倒锥面玻璃幕墙清洗机器人系统进行了结构设计,如图 2 所示. 图中表示的是针对玻璃幕墙 4 层结构的 4 套清洗机器人系统中的 1 套. 它由 2 个部分构成:

1) 安全保护和遍历运动驱动系统;

2) 机器人移动体——简称机器人.

2.1　机器人遍历运动的实现

安全保护和遍历运动驱动系统由机器人悬挂装置、同步带驱动装置、顶部轨道车、底部轨道车及环形导轨构成.

机器人通过活动铰链与悬挂装置铰接,以实现机器人与悬挂装置之间的快速脱开和连接,同时使机器人能相对悬挂装置绕 y 轴摆动. 同步带的两端固定在悬挂装置上,悬挂装置的活动滚轮套在另一侧同步带上以提高其稳定性.

同步带驱动装置的驱动电机安装在底部轨道车上,同步带回头轮安装在顶部轨道车上. 顶部和底部轨道车分别由独立的电机驱动.

当上、下轨道车沿轨道移动时,带动机器人沿 y 轴移动;当同步带驱动装置运转时,带动机器人沿 x 轴移动.

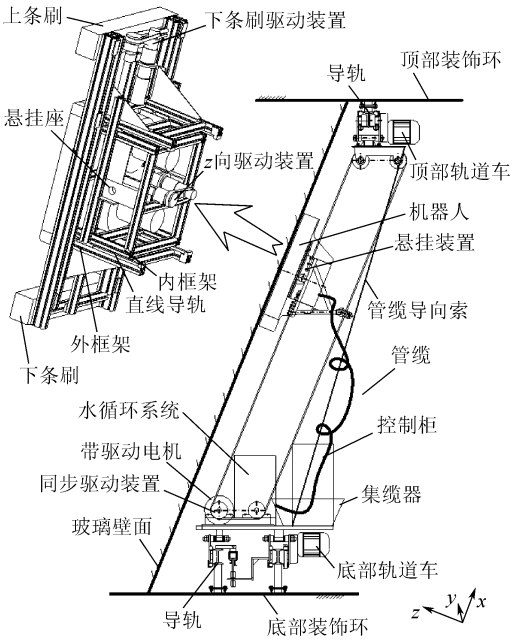

图 2 清洗机器人系统结构

2.2 机器人吸附和清洗功能的实现

机器人的外形尺寸为 800 mm×420 mm×320 mm(长×宽×高),由外框架、内框架、清洗条刷、吸附装置、z 向驱动装置和下条刷驱动装置等组成(图 2). 外框架和内框架之间由 4 条直线导轨构成滑动连接并由 z 向驱动装置驱动. 外框架是机器人的主体,清洗条刷、吸附装置和下条刷驱动装置均安装在外框架上. 吸附装置由吸附腔、负压发生器等组成,负压发生器采用小型离心式风机. 机器人与悬挂装置的悬挂座固定在内框架两侧,当内框架通过活动销轴铰接在悬挂装置上,外框架在 z 向驱动装置的驱动下相对内框架往复运动使吸附腔和条刷贴近或脱开壁面. 当外框架贴近玻璃,使吸附腔与壁面接触后,启动负压发生器即可产生足够的吸附力使机器人附着在壁面上,为清洗条刷提供清洗压力.

3 建筑误差对系统稳定性的影响

建筑结构的精度等级比机械系统低的多,给机器人系统的正常工作造成不利影响,主要包括 2 个方面:

1) 导轨的位置误差(如平行度)引起同步带张紧力沿圆周变化;

2) 幕墙面的几何误差(如局部凹陷)引起同步带侧拉机器人(图 3).

设同步带的长度为 L,带的伸长量为 Δl,则由变形产生的附加张紧力为

$$T_{\mathrm{f}} = \frac{K_{\mathrm{e}}\Delta l}{L \times 10^{-3}} \tag{1}$$

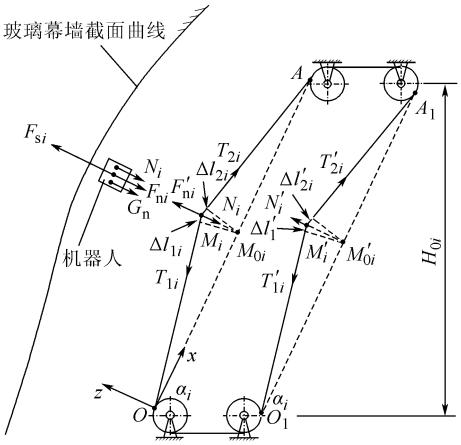

图 3 机器人及同步带受力简图

其中,K_{e} 为同步带的等效米刚度(取长度 1 m 所得的等效刚度).

机器人对壁面的正压力是评价吸附状况的一项重要指标,如图 3 所示,该机器人的吸附条件也是通过正压力给出:

$$N_i = F_{si} - (F_{ni} + G_{\mathrm{n}}) \geqslant N_{\min} \tag{2}$$

其中,N_i 为机器人对壁面的正压力;F_{si} 为吸附力;F_{ni} 为同步带对机器人的拉力;G_{ni} 为机器人重量的法向分量;$N_{\min}$ 为可靠吸附所需的最小正压力.

3.1 导轨平行度误差对张紧力的影响

设第 i 层同步带的设计高度为 H_{0i},H_i(其值沿圆周变化)为实际高度,则误差值 $\Delta h_i = H_i - H_{0i}$,若误差引起的附加张紧力为 T_{fi},考虑预紧力,由式(1)可得第 i 层同步带的总张紧力:

$$T_{zi} = T_{0i} + T_{fi} = T_{0i} + \frac{K_{\mathrm{e}}\Delta h_i}{H_{0i} \times 10^{-3}}$$
$$i = 1,2,3,4 \tag{3}$$

其中,T_{0i} 为预紧力. 由上式可知总张紧力与刚度 K_{e} 和误差值 Δh_i 成正比,与高度 H_{0i} 成反比.

3.2 幕墙几何误差对吸附条件的影响

设第 i 层同步带内侧边由点 M_{0i} 侧移至点 M_i,外侧边由点 M'_{0i} 侧移至点 M'_i. 为了计算简便,将悬挂装置上所有的作用力向点 M_i 和 M'_i 简化. 则点 M_i 所受到的力分别为:同步带内力 T_{1i}、T_{2i},外侧同步带的约束反力 N'_i,机器人的约束反力 F'_{ni},其中 $F'_{ni} = F_{ni}$. 点 M'_i 所受到的力分别为:同步带内力 T'_{1i},T'_{2i} 和反力 N'_i.

由同步带均匀拉伸假设,可知同步带内各处的张紧力相等,即 $T_{1i} = T_{2i} = T'_{1i} = T'_{2i} = T_{0i} + T_{fi}$. 其中,$T_{0i}$ 为第 i 层的预紧力;T_{fi} 为同步带侧向位移引起的附加张紧力,其大小可由式(1)求得. 由图 3 可知同步带的总伸长量为 Δl_{1i},Δl_{2i},$\Delta l'_{1i}$,$\Delta l'_{2i}$ 之

和,且 $\Delta l_{1i}=\Delta l'_{1i}$, $\Delta l_{2i}=\Delta l'_{2i}$. 在图 3 坐标系中,幕墙的几何误差与 x 坐标有关,用 $\Delta z_i(x)$ 表示,用数值方法求其值. 由式(1)可求同步带的附加张紧力:

$$T_{fi}=1\ 000K_e\left(\frac{A_i(x)\sin\alpha_i}{H_{0i}}-1\right)$$
$$i=1,2,3,4 \qquad (4)$$

其中

$$A_i(x)=\sqrt{x^2+\Delta z_i^2(x)}+\sqrt{\left(\frac{H_{0i}}{\sin\alpha_i}-x\right)^2+\Delta z_i^2(x)}$$

α_i 为同步带与水平面的倾斜角.

考虑到同步带的预紧力 T_{0i},由力平衡关系和式(4),求得同步带对机器人的约束反力

$$F_{ni}=F'_{ni}=\frac{2\Delta z_i(x)A_i(x)}{B_i(x)}\cdot\left\{T_{0i}+1\ 000K_e\left[\frac{A_i(x)\sin\alpha_i}{H_{0i}}-1\right]\right\}$$
$$i=1,2,3,4 \qquad (5)$$

其中

$$B_i(x)=\sqrt{[x^2+\Delta z_i^2(x)]+\left[\left(\frac{H_{0i}}{\sin\alpha_i}-x\right)^2+\Delta z_i^2(x)\right]}$$

将式(5)代入式(2)即可判断是否满足吸附条件.

4　结 束 语

根据前述设计原则和方法,研制了倒锥面幕墙清洗机器人系统. 该系统现已安装在机场指挥塔玻璃幕墙上,并进行了现场清洗作业. 由于机器人结构的简化和轻量化,保证了高空作业系统的安全性,同时提高了系统的可靠性. 在连续 4 d,共 32 h 的实际清洗作业中,该系统无故障完成了整个倒锥面玻璃幕墙外墙面的清洗作业,清洗效果良好,通过了现场验收. 试验过程中,进行了人工断电故障测试,系统在断电情况下没有发生滑落现象,可手动回收,证明了系统的可靠性和安全性.

参考文献 (**References**)

[1] Nishigami M, Mizushima T. Glass roof cleaning robot system 'Canadian Crab'[J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 1992, 10 (5): 40-42

[2] 刘淑霞, 王炎. 爬壁机器人技术的应用[J]. 机器人, 1999, 21 (2): 193-199
Liu Shuxia, Wang Yan. The application of wall-climbing robot [J]. Robot, 1999, 21 (2): 193-199(in Chinese)

[3] 张厚祥, 宗光华. 全气动擦窗机器人的实现[J]. 液压与气动, 2001, 22 (11): 5-8
Zhang Houxiang, Zong Guanghua. Pneumatic robot for glass-wall cleaning[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2001, 22 (11): 5-8(in Chinese)

[4] 王巍, 宗光华. 灵巧壁面移动机器人运动学和动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29 (9): 763-766
Wang Wei, Zong Guanghua. Research for the kinematics and dynamics models of a flexible glass-wall cleaning robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29 (9): 763-766 (in Chinese)

[5] 张厚祥, 唐伯雁,刘荣,等. 自主攀爬式曲面作业机器人设计研究[J]. 机器人, 2004, 26 (1): 1-6
Zhang Houxiang, Tang Boyan, Liu Rong, et al. Design of a self-scramble robot for spherical surface[J]. Robot, 2004, 26 (1): 1-6(in Chinese)

(责任编辑:彭　徽)