

# 轮式足球机器人动态性能研究\*

赵 臣 程 福 韩晓军 彭商贤  
(天津大学机械工程学院 天津 300072)

**摘要:** 轮式足球机器人在比赛过程中要频繁启、停和加、减速,经常以较高速度完成直行或曲线运动,每秒钟至少要调整30次位姿,因此应该具有良好的动态性能。从分析足球机器人受力出发,建立了足球机器人动态性能分析模型,分析了影响足球机器人动态特性的各种因素,得出了一系列有价值的结论,为设计高性能足球机器人提供了理论依据,对足球机器人的合理使用也具有指导价值。

**关键词:** 机器人学 足球机器人 动态性能 分析

**中图分类号:** TH232

## 0 前言

机器人足球作为多种高新技术集成的产物,一方面可为开展诸如多智能体系统协调与合作等问题研究提供一个较理想的试验平台,另一方面因其对抗性和博弈性,已成为一种新型、高趣味性、高智力比赛项目<sup>[1]</sup>。

足球机器人为机器人足球比赛的具体执行者,作为球员,其主要功能是根据策略算法算出的运动指令在一定的时间内实现要求的运动。在准确接收到运动指令后,机器人的运动情况主要取决于机器人本身,包括其控制系统的控制精度、驱动系统的传动精度以及足球机器人的动态特性等。实践表明,影响运动指令执行效果最大的是足球机器人的动态性能。为了设计出先进的足球机器人,有必要对足球机器人的动态特性进行深入的研究。

轮式足球机器人是足球机器人中最常见的一种<sup>[2]</sup>,其有三种形式(图1):双轮驱动式(常简称为轮式),履带式 and 全方位式。双轮驱动式足球机器人结构简单,运动速度高。将重点探讨该类足球机器人的动态性能。



图1 轮式足球机器人形式

双轮式足球机器人在比赛过程中要频繁启、停和加、减速,经常以较高速度完成直行或曲线运动,FIRA(Federation of international robot - soccer association)微型足球机器人<sup>[3]</sup>和 ROBOCUP(Robot

world cup)小型足球机器人<sup>[4]</sup>更要每秒钟调整至少30次位姿,因此,轮式足球机器人应该具有良好的动态性能,要求启、停迅速,转弯灵活,运动准确,没有滑动。如果动态性能不好,机器人抢点慢,常常贻误战机;在比赛中只能低速运行,很难作出高水平动作,对比赛成绩的影响相当大。

国内外对足球机器人动态性能的研究工作开展不多,许多球队在研制机器人时往往只顾及结构关系,很少考虑动态性能方面的要求,或者仅作些简单的计算。不少参数如最大加速度及转弯速度等通常依靠试验得到。有关参考文献也相当少见。参考文献[2]分析了各种可能的运动模式,建立了轮式足球机器人运动学模型,并提出了相应的机构设计要求。参考文献[3]给出了一套轮式足球机器人传动系统设计公式,可以计算出恒速条件下所需电动机力矩及功率。参考文献[4]提出应对足球机器人的动态性能进行研究。参考文献[5]分析了轮式足球机器人的运动学性能。下面将首先建立起轮式足球机器人的动力学模型,然后就相关问题——特别是关键问题——开展研究工作。

## 1 小车直行时动态性能分析

### 1.1 基本假设

双轮驱动足球机器人因电动机布置不同,主要呈现两种形式(图2)。一种形式为在车体中部两侧布置有两个驱动轮,由两个电动机分别进行控制;车体前后两端也各安装有一个从动轮,形成四点布置形式。第二种形式也有两个驱动轮,但只在一端装有一个从动轮,构成三点布置形式。由于小车是靠驱动轮利用摩擦运动的,因此不论何种布置形式实际上都是三点支撑——两个驱动轮+一个被动支撑轮——受力形式。为了获得尽可能大的驱动力,最

\* 国家863计划资助项目(2001AA422270)。20040209收到初稿,20040820收到修改稿

理想的措施是将小车的质量全都压在两个驱动轮上<sup>[5]</sup>。虽然从运动安全角度出发，小车的重心应该位于由三个受力点构成的三角形内，但是为了分析方便起见，文中仍将假设小车的重心完全位于驱动轮轴上。此外，由于从动轮受力很小，其转动惯量也不大，因此，在进行小车动态性能分析时，也将忽略从动轮的影响。

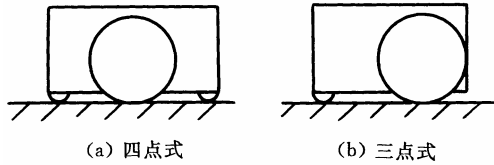


图 2 双轮驱动足球机器人支撑形式

### 1.2 直线加速时驱动轮受力分析

图 3 为轮式足球机器人直线加速时的受力分析图(忽略持球阻力和空气阻力)。

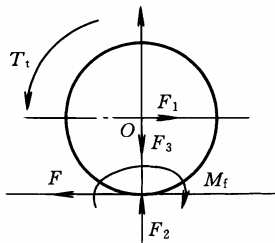


图 3 直线加速时驱动轮受力图

当车轮纯滚动时，车轮旋转角速度  $\omega$  与小车平移速度  $u$  及车轮半径  $r$  之间有如下关系

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{r} \frac{du}{dt} \quad (1)$$

根据平衡条件，有<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} F &= F_1 + m_d \frac{du}{dt} \\ F_r &= T_t - J \frac{d\omega}{dt} - M_f \\ F_2 &= F_3 + m_d g = mg \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $F$ ——作用于驱动轮上的赛场平面切向反作用力

- $F_1$ ——驱动轴作用于驱动轮的水平力
- $m_d$ ——驱动轮的质量之和
- $T_t$ ——电动机作用于驱动轮的转矩之和
- $J$ ——驱动轮的转动惯量之和
- $M_f$ ——驱动轮滚动阻力矩之和
- $F_2$ ——场地对两个驱动轮的支反力之和
- $F_3$ ——两个驱动轮载荷之和
- $m$ ——整个小车质量

$$\begin{aligned} M_f &= rF_f \\ F_f &= F_2 \mu \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $F_f$ ——驱动轮滚动阻力  
 $\mu$ ——滚动阻力系数

令  $F_t = \frac{T_t}{r}$  为驱动轮的驱动力，整理得

$$\begin{aligned} F_t &= F_1 + \left( m_d + \frac{J}{r^2} \right) \frac{du}{dt} + \frac{M_f}{r} = \\ &F_1 + mg\mu + \left( m_d + \frac{J}{r^2} \right) \frac{du}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知，在驱动轮直线加速过程中驱动力  $F_t$  要克服三部分阻力，即由驱动轴传来的阻力  $F_1$ 、驱动轮滚动阻力  $mg\mu$ 、驱动轮本身线加速阻力  $m_d \frac{du}{dt}$  及角加速阻力  $\frac{J}{r^2} \frac{du}{dt}$ 。

为了使驱动轮加速性能比较好，驱动轮质量要尽可能小些。由于驱动轮的转动惯量主要由与之固联的大齿轮决定，因此，驱动轮的半径可以适当大些。

### 1.3 车体受力分析

如图 4 所示，由力平衡条件得

$$\begin{aligned} F_1 &= m_b \frac{du}{dt} \\ F_3 &= m_b g \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $m_b$ ——车体部分(除从动轮、驱动轮外小车其余部分)质量

整理式(4)、(5)可得整个小车运动方程式

$$F_t = \left( m + \frac{J}{r^2} \right) \frac{du}{dt} + mg\mu \quad (6)$$

为了使小车具有良好的加速性能，车体质量要小些。

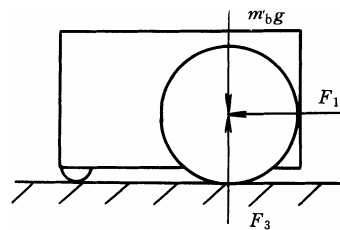


图 4 车体的受力分析

### 1.4 电动机经减速齿轮传递给驱动车轮的力矩 $T_t$

电动机经减速齿轮传递给驱动车轮的力矩可表示为

$$T_t = T_m i \eta_m \eta_i \quad (7)$$

- 式中  $T_m$ ——电动机输出转矩
- $\eta_m$ ——电动机效率
- $\eta_i$ ——从电动机到驱动轮传动效率
- $i$ ——从电动机到驱动轮转速比

### 1.5 小车驱动方程式

综合式(6)、(7)可得

$$\frac{T_m i \eta_m \eta_i}{r} = mg\mu + \left(m + \frac{J}{r^2}\right) \frac{du}{dt} \quad (8)$$

令  $m_c = m + \frac{J}{r^2}$ , 式(8)变为

$$m_c \frac{du}{dt} = \frac{i \eta_m \eta_i}{r} T_m - mg\mu \quad (9)$$

式(9)即为小车驱动方程式。为了使小车具有良好的加速性能, 应该选用高输出转矩电动机; 车体及车轮质量都要小些; 从电动机到驱动轮间的减速比要适当大些, 其最佳值可以根据曲线图得到。不能盲目加大减速比, 否则将导致传动效率下降并加大车轮转动惯量。

### 1.6 小车纯滚动充要条件

足球机器人策略子系统通常是按小车无滑动进行运动规划的。若出现滑动, 机器人就不能在要求时间内到达期望的位置, 其姿态也可能不准确, 从而影响比赛效果。

由式(9)知, 要使小车启动起来, 需  $\frac{du}{dt} > 0$ , 所以小车纯滚动前进的第一个条件为

$$\frac{i \eta_m \eta_i}{r} T_m > mg\mu \quad (10)$$

式(10)又称为小车驱动条件。由式(10)知, 适当增大传动比  $i$  和电动机转矩  $T_m$  可以增大小车驱动力, 有利于小车启动, 但这些措施只有在车轮与地面不发生滑动才有效。否则, 反而会因启动力过大而使小车驱动轮在原地打转, 或在前进过程中产生滑动, 降低小车运动可控性。

小车要想纯滚动前进, 除了受驱动条件制约外, 还受到车轮与地面附着条件的限制。

地面对车轮切向反作用力的极限值称为附着力  $F_{\max}$ , 它与驱动轮支反力成正比。设  $\varphi$  为车轮与场地间附着系数, 有

$$F_{\max} = \varphi F_2 \quad (11)$$

场地对车轮的切向反作用力不能大于附着力, 否则驱动轮将发生打滑现象。整理式(2)、(3)、(11)得小车纯滚动前进的第二个条件

$$\frac{i \eta_m \eta_i}{r} T_m \leq \left(m + \frac{J}{r^2}\right) \varphi g \quad (12)$$

显然电动机输出转矩不能过大。

式(10)、(12)确定了电动机的转矩范围

$$mg\mu < \frac{i \eta_m \eta_i}{r} T_m \leq \left(m + \frac{J}{r^2}\right) \varphi g \quad (13)$$

综合分析式(9)和(13)可知, 在不打滑前提下, 轮式机器人驱动电动机输出转矩越大越好, 车体及车轮质量越小越好。不过从式(13)得知, 若机器人质量过轻, 其配套电动机的转矩也必须很小, 否则

很容易造成打滑现象。在设计机器人时, 可以在式(9)和(13)限定的范围内, 通过计算得到一组较理想的参数值。下表为研制出的 TSR—1 微型足球机器人与韩国 YUJIN 公司生产的 YST—A 机器人比较情况。

表 参数比较

名 称	电动机	质量 $m/g$	驱动轮径 $r/mm$
TSR—1	4.2 W, 12 V	487	44
YSR—A	4.2 W, 12 V	510	40

此外, 由

$$F = F_1 + m_d \frac{du}{dt} = m_b \frac{du}{dt} + m_d \frac{du}{dt} = m \frac{du}{dt} \leq \varphi mg$$

得

$$\frac{du}{dt} \leq \varphi g \quad (14)$$

胶皮车轮与木质喷漆地面的附着系数为 0.4~0.6, 因此小车最大加速度不能超过  $4.90 \sim 5.88 \text{ m/s}^2$ 。在设计小车控制系统时, 对电动机启动电流要加以适当限值。

## 2 小车转弯时动态性能分析

小车转弯时, 其运动可分解为沿弧线的切向运动和绕瞬心的向心运动, 如图 5 所示。切向运动的力学分析与小车直线运动的情况相同。下面对向心运动加以分析。

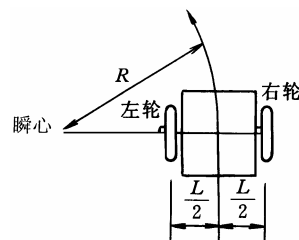


图 5 小车转弯时运动关系

转弯时, 驱动轮与地面间的附着力应该足够大, 以克服离心力的影响保证小车不产生侧滑。

设  $F_r$  为小车径向附着力, 有

$$F_r = mg\varphi \quad (15)$$

为了不产生侧滑, 小车的离心力应小于或等于其径向附着力

$$m \frac{u^2}{R} \leq F_r \quad (16)$$

式中  $u$  —— 小车瞬时切向速度

$R$  —— 小车瞬时转弯半径

整理得

$$\frac{u^2}{R} \leq g\varphi \quad (17)$$

上式表明, 小车转弯速度不能太大, 否则容易出现侧滑现象。根据式(17)可以计算出不同转弯半径下允许的小车最大线速度。

此外由式(17)还可看出, 小车转弯半径越小, 其线速度也应越小。在进行运动规划时必须注意这一点。当转弯半径较小时, 为了避免出现侧滑现象, 可以先让机器人原地旋转然后直行。

由图 5, 得

$$u = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (18)$$

式中  $v_R$ ——小车右轮线速度

$v_L$ ——小车左轮线速度

整理得

$$\frac{(n_{mR} + n_{mL})^2 \pi^2 r^2}{i^2 R} \leq g\varphi \quad (19)$$

式中  $n_{mR}$ ——小车右轮驱动电动机转速

$n_{mL}$ ——小车左轮驱动电动机转速

可见选用小转速电动机、增大传动比  $i$  或减小驱动轮半径  $r$  都可使小车转弯半径  $R$  变小, 增大小车转向灵活性。

此外, 根据运动学关系得

$$\frac{v_R - v_L}{L} = \frac{v_R}{R + L/2}$$

即

$$R = \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \frac{L}{2} = \frac{n_R + n_L}{n_R - n_L} \frac{L}{2} = \frac{n_{mR} + n_{mL}}{n_{mR} - n_{mL}} \frac{L}{2} \quad (20)$$

式中  $n_R$ ——小车右轮转速

$n_L$ ——小车左轮转速

式(20)表明在转速不变条件下, 减小左、右两驱动轮间的轮距  $L$  也可使小车转弯半径  $R$  减小, 有利于提高转向灵活性。

### 3 结论

推导出了双轮式足球机器人动态性能分析方程, 分析了影响足球机器人加、减速性能的各种因素, 推导出了小车纯滚动条件, 给出了动态条件下电动机参数计算公式, 为设计高性能足球机器人提供了理论依据, 对足球机器人的合理使用也具有指导价值。

为了使小车启、停迅速, 驱动轮质量、车体质量都要适当小些, 驱动轮半径要适当大些, 从电动机到驱动轮间的减速比值要适当大些。高输出转矩电动机对提高小车加速性能有利, 但不能过大。

为避免出现打滑现象, 小车驱动电动机启动电流不能太大, 电动机输出转矩也要在一定范围内。小车转弯时速度不能太大, 否则容易出现侧滑现象。

小车转弯半径越小, 其线速度也应越小。

采用小转速电动机、适当增大传动比可使小车转弯半径减小。缩短左、右两个驱动轮间的距离也有利于提高小车转向灵活性。

根据上述理论, 对所研制的微型足球机器人进行了改进。试验表明其动态性能有明显提高。

### 参 考 文 献

- 1 高大志, 张春晖, 徐心和. 机器人足球——智能机器人的新领域. 机器人, 1998, 20(4): 299~314
- 2 Campion G, Bastin G, D'Andrea-Novot B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 47~61
- 3 Murphy R. Miroso't'97 - Robotics competition corner. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23: 251~281
- 4 Kitano H. Robot Soccer World Cup I / Robocup-97. New York: Springer-Verlag, Berlin, 1998
- 5 Ding F, Zhao C, Zhang Z. Analysis of kinematical performance of micro soccer robot. In: Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2002, 1: 501~505
- 6 余志生. 汽车理论. 北京: 机械工业出版社, 1996

### STUDY ON DYNAMICAL PERFORMANCE OF WHEELED SOCCER ROBOT

Zhao Chen Chen Fu

Han Xiaojun Peng Shangxian  
(School of Mechanical Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Soccer robot needs start and stop frequently during the match. It should repeatedly accelerate and decelerate. It must adjust its position and orientation at least thirty times per second. For all these reasons, soccer robot must possess good dynamical performances. By analyzing the forces exerted on the robot, equations about the dynamical performances are derived. The factors influencing on the dynamical properties are analyzed and some valuable conclusions are obtained. To make the robot start rapidly the radius of the driving wheel should be properly big and the output torque of the motor be large. The start acceleration should not be greater than about half a gravity acceleration. The speed should not be too high in order to avoid side slide during curvilinear movement. They are important for the design of the robot with good dynamical performances and valuable for the use of the robot.

**Key words:** Robotics Soccer robot Dynamical performance Analysis

作者简介: 赵臣, 男, 1963年生, 博士, 教授。主要从事智能机器人及机电一体化研究工作。目前研究方向为足球机器人技术。

Email: zhaochen@tju.edu.cn