

无末姿态要求下 Reeds-Shepp 车的最优路径导航

仝兆景, 陈炜圻, 高龙飞

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南焦作, 454000)

摘要 Reeds-Shepp 路径的计算受末姿态的影响,无法直接在无末姿态要求的导航场景中应用。文章对 Reeds-Shepp 路径的规划应用进行研究,提出在无姿态要求下 Reeds-Shepp 车的最优路径导航方法,以及对控制方案的生成规则。仿真数据证明了其在各种情形下的最优特性。利用该路径对导航方案进行设计能够有效降低自动驾驶车辆的行驶时间与运行成本,可广泛应用于军事工业以及民用的无人车、无人机、无人船等自动驾驶交通工具的导航系统,以实现控制其按最优路径行驶的目的。

关键词 Reeds-Shepp 车;路径规划;最优路径;无人驾驶;导航系统

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.009

中图分类号 TP273+.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0055-05

An Optimal Path Navigation without Goal Direction Requirements for Reeds-Shepp Car

TONG Zhaojing, CHEN Weiqi, GAO Longfei

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Aimed at the problems that the calculation of the Reeds-Shepp path is influenced by the final attitude, and can not be used directly in the navigation scene without goal direction requirements, this paper proposes an optimal path navigation scheme of Reeds-Shepp and the generation rules of control schemes. Its optimal characteristics in various environmental conditions are verified by the simulation. This path can be utilized for designing the navigation scheme, can effectively reduce the driving time and operation cost of the automatic driving vehicle, in one word, can be widely used in the navigation system of automatic driving vehicles such as UGV, UAV, USV and so on, realizing the purpose of driving them along with the optimal path under control.

Key words: Reeds-Shepp car; path planning; optimal path; pilotless; navigation system

随着自动驾驶技术日渐成熟,无人交通工具被广泛应用于军事工业^[1-3]、科学考察^[4]以及其他民用领域。要实现利用无人交通工具替代人工进行高效的运输作业,要求导航系统能够实现最优路径的

规划。

绝大多数最优路径规划导航是基于 Dubins 路径^[5]和 Reeds-Shepp 路径^[6]的。利用上述 2 种路径,人们设计出了无人车^[7-9]、无人机^[10-14]、无人

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1504623);河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF1615);河南省高等学校矿山信息化重点学科开放实验室开放基金(KY2015-07)。

作者简介: 仝兆景(1979—),男,河南南阳人,副教授,博士,主要从事智能检测、装备故障诊断方向的研究。E-mail:tong6661@163.com

引用格式: 仝兆景, 陈炜圻, 高龙飞. 无末姿态要求下 Reeds-Shepp 车的最优路径导航[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(1): 55-59. TONG Zhaojing, CHEN Weiqi, GAO Longfei. An Optimal Path Navigation without Goal Direction Requirements for Reeds-Shepp Car [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 55-59.

船^[15-16]等自动驾驶交通工具的最优路径规划导航方案。这些导航方案均是针对两位姿点之间的最优路径进行研究的。但在实际应用中,大多数情况只要求导航系统能够为导航对象提供尽快行驶到某一指定地点的指令,而不要求其以何种姿态到达末位置点,即始位姿点(Configuration)到末位置点(Coordinate)之间的最优路径导航。由于Dubins或Reeds-Shepp路径的计算均需要提供车辆行驶始末的位姿点,且结果受末点的车辆姿态的影响较大,无法直接应用于无末姿态要求下的导航。

本文提出一种无末姿态要求下Reeds-Shepp车的最优路径导航方法。该方法能够在不提供导航末位置点车辆姿态的情况下,寻找到最优的Reeds-Shepp路径,并提出该方法下车辆导航规则。本文将Reeds-Shepp车作为研究模型,但方法不局限于应用在无人车导航系统,无人机、无人船等自动驾驶交通工具同样适用本方案进行导航。仿真证明方案生成的路径在任意情况下均是最优的。

1 Reeds-Shepp车

Reeds-Shepp车以Dubins车为基础。Dubins车限定图1所示的简易汽车模型车速 $u_s \in \{0, 1\}$,分别对应停止和向前2种离散传动状态,车辆不允许向后运动或发生其他滑动^[5],且限定车辆以匀速度 v 行驶。而Reeds-Shepp车增加了向后行驶的速度状态^[6],即 $u_s \in \{-1, 0, 1\}$,进而丰富了车辆行驶路线的多样性。

本文选择Reeds-Shepp车作为研究模型。图1所示的Reeds-Shepp汽车模型为二维刚体,其车体坐标原点 (x, y) 在后轮轴中心,位姿点使用 $Q(x, y, \theta)$ 表示。并定义其转向角为 Φ ,最大转向角为 Φ_{\max} ,最小转弯半径为 ρ_{\min} 。

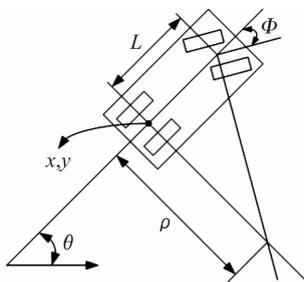


图1 简易汽车模型^[17]

2 最优路径模型

Reeds J. A., Shepp L. A. 证明了对于上述汽

车模型,其2个位姿点间的最优路径可只由0-1段直线段与0-3段过位姿点的最小转弯半径圆弧2种元素组成^[6],该路径被称为Reeds-Shepp路径。其中,最小转弯半径圆弧为车辆保持以最大转向角 Φ_{\max} 行驶出现的一段轨迹。

本文提出:在无末姿态要求下,车辆从始位姿点到末位置点的最优路径可只由0-1段最小半径圆弧与0-1段直线构成。该路径属于某一特定末姿态下的Reeds-Shepp路径,且该末姿态可求。因此该路径为无末姿态要求下的最优路径。

末姿态的确定方法分以下2种情形进行讨论。

2.1 末位置点位于转弯半径圆上和圆外

当末位置点位于转弯半径圆上时,显然最优路径仅由一段最小转弯半径圆弧构成。

当末位置点位于转弯半径圆外时,最优路径由一段直线段和至多一段最小转弯半径圆弧构成。当车辆和末位置点的连线与车辆方向在同一直线上时,最优路径仅为一段直线段。Dubins的研究^[5]证明了上述路径为此情形下两位姿点间的最优路径。

由于已知车辆始位姿点 $Q_S(x_S, y_S, \theta_S)$ 及最小转弯半径 ρ_{\min} ,可求得过起始位姿点、分别位于车辆左右的2个最小半径圆 C_L 、 C_R 的圆心:

$$\begin{cases} x = x_S \pm \rho_{\min} \cdot \sin(\theta_S) \\ y = y_S \pm \rho_{\min} \cdot \cos(\theta_S) \end{cases} \quad (1)$$

又 C_L 、 C_R 半径为 ρ_{\min} ,故可求得两圆的方程。

如图2所示,取末位置点一侧(以车身中轴线为分界线)的最小转弯半径圆 C_R ,再求其过末位置点的切线,取其中距离车辆最近的一个切点,记为 Q_M ,则圆弧 $Q_S Q_M$ 为路径中的圆弧段,线段 $Q_M Q_E$ 为路径中的直线段。图2中路径 P_{FR} 即为所示情形下的最优路径。

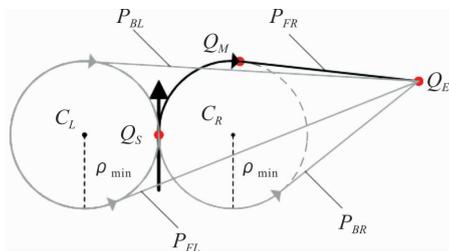


图2 末位点位于最小转弯半径圆上或圆外时的路径

2.2 末位置点位于转弯半径圆内

在精度要求高的导航场景中,常出现末位置点与车辆距离过近的情况。当末位置点位于转弯半径圆内,若仍按照2.1节所述方法进行路径规划,如图3中路径 P_{BR} 所示,所得最短路径的圆弧段弧度必将超过 π 。该路径显然不是最优路径。

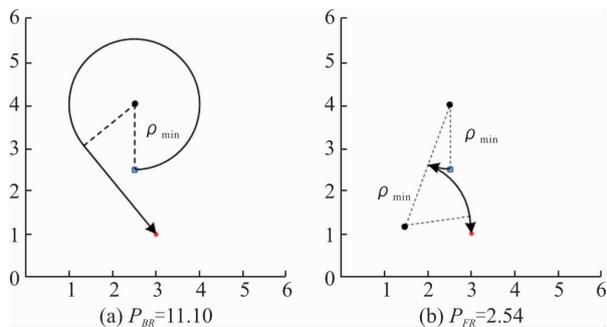


图 3 末位置点位于最小转弯半径圆内时的路径

当末位置点位于转弯半径圆内时,最优路径必由 2 段最小转弯半径圆弧构成,见图 3 中路径 P_{FR} 。Reeds J. A., Shepp L. A. 的研究^[6]证明了上述路径为此情形下 2 位姿点间的最优路径。

根据 2.1 所述方法,可确定如图 4 所示末位置点另一侧的最小转弯半径圆 C_L 。此时满足过末位置点 Q_E 、与 C_L 圆心距为 $2\rho_{min}$ 的圆有 2 个,取其中可使两圆交点距 Q_S 最近的圆记为 C_E ,切点记为 Q_M ,则圆弧 Q_SQ_M 、 Q_MQ_E 即为最优路径中的 2 段最小转弯半径圆弧。如图 4 中路径 P_{BL} 即为所示情形下的最优路径。

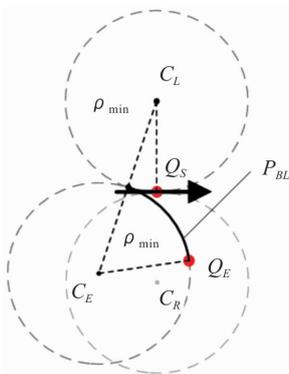


图 4 圆弧所在最小转弯半径圆的确定

3 导航应用

3.1 车辆控制规则

依据上述最优路径,可编写出车辆控制规则,从而将本路径应用于导航场景中。

车辆的姿态与车辆和末位置点之间的相对位置决定了车辆的行驶方向。若以末位置点 Q_E 作为坐标系原点,车辆始位姿点 Q_S 位于 4 个不同的象限时对应的导航规则将不同。图 5 展示了车辆在 4 个不同的象限中角度和位置的变化。

通常情况下,导航系统至少需要已知车辆在全局坐标系中的位置坐标 (x, y) 、车辆方向角 θ 、车辆最大转向角 Φ_{max} 以及末位置点位置坐标 (x_E, y_E) ,才能进行路径的计算。 (x, y) 与 (x_E, y_E) 为

导航系统通过 GPS 定位、图像处理等方法获得的已知数据,而车辆方向角 θ 通常是由车辆搭载的地磁计、陀螺仪等传感器获得并上传到系统的已知数据。导航系统将根据上述信息,计算出车辆转向角 Φ 及行驶速度 u_s 来控制车辆的行驶。记车辆与末位置点坐标连线与 x 轴的夹角为 β ,由于已知车辆位置坐标 (x, y) 及末位置点位置坐标 (x_E, y_E) ,易根据:

$$\beta = |\tan^{-1}(\frac{y - y_E}{x - x_E})| \quad (2)$$

求得夹角 β 值,取值范围为 $[0, 90]$ 。 θ 与 β 均以 x 轴正方向为 0° 方向, y 轴正方向为正方向。 θ 为车辆纵向中轴线的反向延长线(以车头方向为正方向)与 x 轴正半轴的夹角,其取值范围为 $[0, 360]$ 。

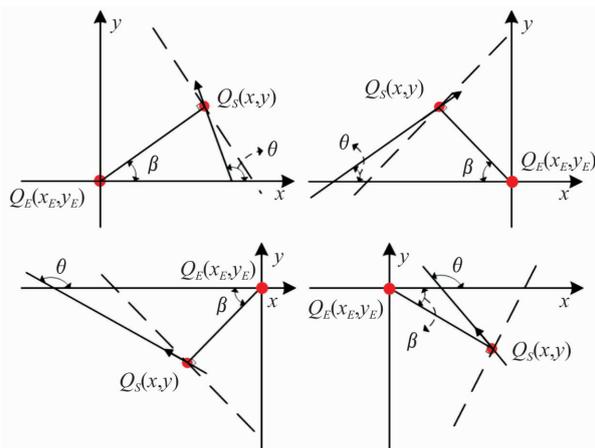


图 5 车辆在坐标系不同象限中角度和位置的变化

图 5 中虚线表示车辆与末位置点坐标连线的垂直线。可以直观地看出,若以该线为分界,当车头朝向末位置点位置的一方,此时车辆向前行驶 ($u_s = 1$) 为最优;反之,当车头朝向另一方,此时车辆向后行驶 ($u_s = -1$) 为最优。因此,可以得到表 1 所示最优速度方向 (u_s) 与 θ, β 的关系。

表 1 最优速度方向 (u_s) 与 θ, β 的关系

u_s	1	-1
第一象限 ($x \geq 0, y \geq 0$)	$90 + \beta < \theta < 270 + \beta$	其他
第二象限 ($x < 0, y \geq 0$)	$\theta < 90 - \beta$ 或 $\theta > 270 - \beta$	其他
第三象限 ($x < 0, y < 0$)	$\theta < 90 + \beta$ 或 $\theta > 270 + \beta$	其他
第四象限 ($x \geq 0, y < 0$)	$90 - \beta < \theta < 270 - \beta$	其他

定义车辆转向角 Φ 以车辆纵向中轴线正方向为 0° 方向,以图 5 所示横向中轴线正方向为正方向,取值范围为: $-90 \leq -\Phi_{max} \leq \Phi \leq \Phi_{max} \leq 90$,则此时

转向角 Φ 与 β 、 u_s 存在表 2 中所示关系。

根据上述关系式,即可按上文所述最优路径生成导航指令。导航系统可将本方案生成的指令通过无线传输等方式控制导航对象,从而实现最优路径导航的目的。

表 2 转向角(Φ)与 β 、 u_s 的关系

Φ	$u_s = 1$		$u_s = -1$	
	Φ_{\max}	$-\Phi_{\max}$	Φ_{\max}	$-\Phi_{\max}$
第一象限 ($x \geq 0, y \geq 0$)	$\theta > 180 + \beta$	其他	$\theta < \beta$	其他
第二象限 ($x < 0, y \geq 0$)	$\theta < 180 + \beta$	其他	$\theta > 180 - \beta$	其他
第三象限 ($x < 0, y < 0$)	$\theta > 180 - \beta$	其他	$\theta < 360 - \beta$	其他
第四象限 ($x \geq 0, y < 0$)	$\theta < \beta$	其他	$\theta < 180 + \beta$	其他

3.2 末位置点位于转弯半径圆内情形的时间成本

显然,图 3 中路径 P_{FR} 较路径 P_{BR} 更短。但由于该路径两圆弧的连接点发生了车辆行进方向的变化,对于大多数交通工具,存在速度 $u_s = 0$ 的临界值,因此需要经历加速和减速的过程。若导航系统需要兼顾加减速度时间开销,上述情况下的路径选择将影响到导航规则。

设车辆以匀速 v 行驶,速度对车辆行驶路径无影响(即车辆为二维刚体),Reeds-Shepp 车存在从速度 v 减速至 0 的最短时间 t_{de} ,及从速度 0 加速至 v 所需的最短时间 t_{ac} 。设上述情形下无行驶方向转换的路径长度为 S_0 ,有行驶方向转换的路径长度为 S_1 ,可得出两者的时间 t_0 与 t_1 为:

$$\begin{cases} t_0 = \frac{S_0}{V} \\ t_1 = t_{ac} + t_{de} + \frac{2S_1 - v(t_{ac} - t_{de})}{2v} \end{cases} \quad (3)$$

根据上述关系,即可从时间成本上,完成末位置点位于转弯半径圆内时 2 种路径的选择。

4 仿真对比验证

为验证本文提出的路径为最优,根据 3.1 所述的车辆控制规则编写了仿真程序。通过计算可能出现的所有路径的长度,检验长度最短的路径与上文介绍方法得出的最优路径是否一致,即可验证本路径模型的最优性。

情形 1:为检验末位置点位于车辆最小半径圆

外的情形,随机取车辆始位姿点为 $(2.5, 4.0, 90^\circ)$,最小转弯半径 ρ_{\min} 为 1.0,末位置点坐标为 $(4.0, 2.0)$ 。此时共存在 4 种路径 P_{FL} 、 P_{FR} 、 P_{BL} 、 P_{BR} ,仿真数据结果见图 6。

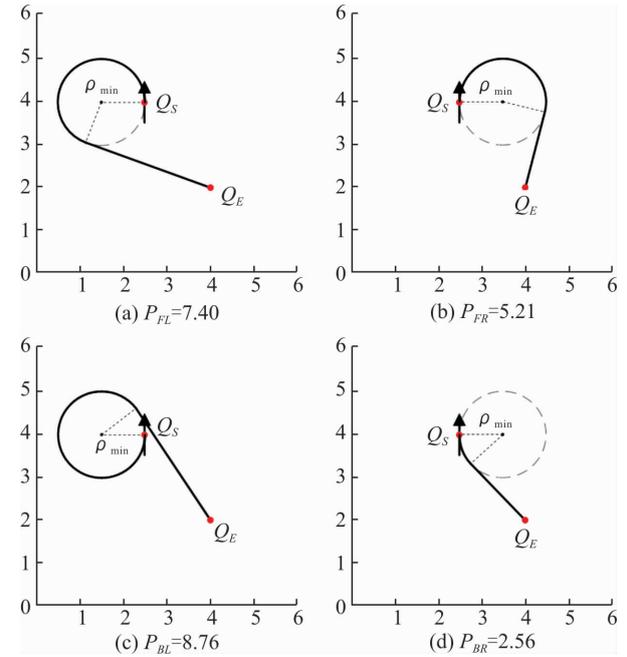


图 6 情形 1 仿真结果图

根据 2.1 节所述,此情形下应取末位置点一侧的最小转弯半径圆,作为路径圆弧段所在的圆,故排除路径 P_{FL} 和 P_{BL} ;过末位置点做切线时,应取切点最接近始位姿点的一条,故选取 P_{BR} 为最优路径。仿真数据表明,此情形下路径 P_{BR} 长度最短,与上文描述相符。

情形 2:为检验末位置点位于车辆最小半径圆内的情形,随机取车辆始位姿点为 $(2.5, 3.0, 0^\circ)$,最小转弯半径 ρ_{\min} 为 1.5,末位置点坐标为 $(3.0, 2.5)$ 。此时共存在 2 种路径 P_{FL} 、 P_{BL} ,仿真数据结果见图 7。

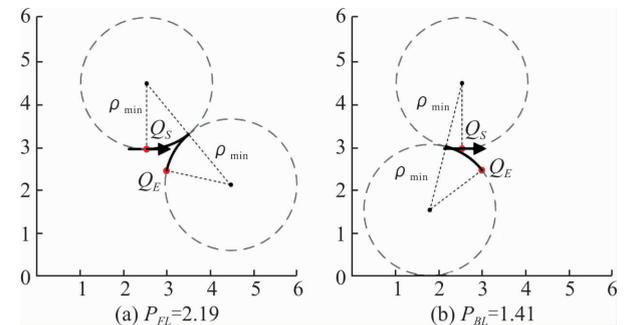


图 7 情形 2 仿真结果图

根据 2.2 节所述,此情形下路径中圆弧所在圆,应取两圆交点距始位姿点最近的一对,故应选取 P_{BL} 为最优路径。仿真数据表明,此情形下路径 P_{BL} 长度较短,与上文描述相符。

5 结语

本文以 Reeds-Shepp 车作为研究模型,对 Reeds-Shepp 路径的规划应用进行研究,提出在无姿态要求下 Reeds-Shepp 车的最优路径导航方法,以及对应控制方案的生成规则。仿真结果证明:本导航方法能够对 Reeds-Shepp 车进行各种情形下的最优路径规划,并生成准确的导航指令,以控制车辆按照最优路径行驶。

参考文献(References):

- [1] 万路军,姚佩阳,孙鹏,等. 有人-无人作战智能体任务联盟形成策略方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(3):10-14.
WAN L J, YAO P Y, SUN P, et al. Strategy of Manned-unmanned Combat Agents Task Coalition Formation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(3):10-14. (in Chinese)
- [2] 许晓平,周洲,范锐军,等. 基于察/打一体无人机平台的导弹发射模拟[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(5):11-15.
XU X P, ZHOU Z, FAN R J, et al. Numerical Simulation of Missile Launching from the R/S UAV[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2010, 11(5):11-15. (in Chinese)
- [3] PARK J, KIM J, SON N S. Passive Target Tracking of Marine Traffic Ships Using Onboard Monocular Camera for Unmanned Surface Vessel[J]. Electronics Letters, 2015, 51(13):987-989.
- [4] MANLEY J E. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development[C]// OCEANS 2008. Quebec City, IEEE, 2008:1-4.
- [5] DUBINS L E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents[J]. American Journal of Mathematics, 1957, 79(3):497-516.
- [6] REEDS J A, SHEPP L A. Optimal Paths for a Car that Goes Both Forward and Backward[J]. Pacific Journal of Mathematics, 1990, 145(2):367-393.
- [7] LEE S K, LEE S, NAM C, et al. Local Path Planning Scheme for Car-Like Vehicle's Shortest Turning Motion Using Geometric Analysis[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei:IEEE, 2010:4761-4768.
- [8] SUSSMANN H J. Shortest Paths for the Reeds-Shepp Car: A Worked out Example of the Use of Geometric Techniques in Nonlinear Optimal Control[Z]. SYCON 9110,1991.
- [9] DU X, LI X, LIU D, et al. Path Planning for Autonomous Vehicles in Complicated Environments [C]// IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing: IEEE, 2016:1-7.
- [10] CHITSAZ H, LAVALLE S M. Time-Optimal Paths for a Dubins Airplane[C]//2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA: IEEE, 2007:2379-2384.
- [11] DING X C, RAHMANI A R, EGERSTEDT M. Multi-UAV Convoy Protection: An Optimal Approach to Path Planning and Coordination[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(2):256-268.
- [12] LEE S, CHO A, KEE C. Integrated Waypoint Path Generation and Following of an Unmanned Aerial Vehicle[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2010, 82(5):296-304.
- [13] TECHY L, WOOLSEY C A. Minimum-Time Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Steady Uniform Winds[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(6):1736-1746.
- [14] 关震宇,杨东晓,李杰,等. 基于 Dubins 路径的无人机避障规划算法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(6):570-575.
GUAN Z Y, YANG D X, LI J, et al. Obstacle Avoidance Planning Algorithm for UAV Based on Dubins Path[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(6):570-575. (in Chinese)
- [15] KIM H, KIM D, SHIN J U, et al. Angular Rate-Constrained Path Planning Algorithm for Unmanned Surface Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2014, 84(4):37-44.
- [16] 胡蕾,高立娥,刘卫东,等. 基于 Dubins 曲线和改进 A* 算法的 AUV 路径规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(8):259-262.
HU Q, GAO L E, LIU W D, et al. AUV Path Planning Method Based on Improved A* Search and Dubins Curve[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(8):259-262. (in Chinese)
- [17] LAVALLE S M. Planning Algorithms [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

(编辑:徐楠楠)