



李恒年 著

# 地球静止卫星 轨道与共位控制技术

Geostationary Satellite Orbital Analysis  
and Collocation Strategies



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

# 地球静止卫星 轨道与共位控制技术

Geostationary Satellite Orbital Analysis and Collocation Strategies

李恒年 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

地球静止卫星轨道与共位控制技术 / 李恒年著.  
—北京:国防工业出版社,2010.10  
总装部队军事训练“十一五”统编教材  
ISBN 978-7-118-06806-1

I. ①地... II. ①李... III. ①人造地球卫星—同步  
轨道—控制—教材 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 152641 号

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
北京嘉恒彩色印刷有限公司  
新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 19 1/4 字数 339 千字  
2010 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 33.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474  
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

# 序

地球静止轨道的最早设计者是英国著名科幻家亚瑟·C·克拉克,在该轨道上卫星相对地球上的观测者是静止的,可以作为地球上任意两地无线电通信的中间平台。1963年由美国发射了第一颗静止轨道卫星-SynCom-2卫星,成功转播了1964年东京夏季奥运会,从此拉开了静止轨道发射和应用的序幕。到今天大约有300颗不同国家、不同组织的静止轨道卫星环绕在地球轨道上,担负着通信、导航和中继等任务。

地球静止轨道卫星在数十年的工作寿命期间,需要精心安排上百次轨道控制,维持卫星相对地球“静止”。轨道控制技术在精度、策略设计等方面,仍然在不断发展和进步。特别是为了提高定点经度利用率和达到通信备份的目的,需要双星或多星定点在同一经度,设计共位控制策略,避免共轨卫星发生物理碰撞和出现电子干扰,也成为地球静止轨道卫星控制的新课题。

本书作者在该领域耕耘20年,是我国研究该领域的杰出代表,制定的静止轨道定点控制、多星共轨控制策略、模型、算法,在我国静止轨道卫星长期管理中发挥着巨大的作用,也取得了成效显著的创新科研成果。本书在静止卫星高精度定点控制模型、双星及多星共位控制等算法上有显著创新,填补了国内在该方向研究上的空白,对我国航天测量与控制技术研究和具有重要作用。

李济生

2010年2月北京

# 前 言

地球静止轨道卫星虽然具有对地相对“静止”特点,被广泛应用于通信、导航等领域,但是由于其轨道运动周期与地球自转运动的通约性,地球扁状非球形引力使得地球静止轨道成为绕地轨道中最不稳定的轨道运动,在卫星寿命期内为保持这种“静止”特性,需要设计克服摄动运动的控制策略,特别是近年来静止轨道轨位资源稀缺,双星或多星需要定点在同一定点位置上,需要精心设计共轨策略及控制计算模型,对地球静止轨道卫星的定点精度提出更高要求,需要提出新的控制算法问题。如何在地球赤道平面内的同步高度上部署更多的卫星,已成为国内外研究的热点之一。

本书系统介绍了卫星轨道基础,静止卫星轨道运动规律,静止卫星轨道捕获及定点保持控制等技术,在此基础上,结合我国 20 多年来该领域的研究成果,突出研究了地球静止卫星多星共位技术,研究成果已经在我国的地球静止卫星轨道控制中得到验证,对于我国静止卫星轨道研究和应用具有重要价值。

西安卫星测控中心是我国地球静止卫星的管理和控制中心,由中心自主研发的地球静止卫星轨道控制和分析系统,是该类卫星管理和控制的先进系统平台,管理着我国军内外数十颗通信、导航地球静止轨道卫星,在“鑫诺”卫星通信公司管理着“鑫诺”一号和“鑫诺”二号通信卫星,并出口到尼日利亚和委内瑞拉等国。

本书撰写过程中,得到中心领导的大力支持,以及同事的无私帮助和亲人的默默奉献,并得到宇航动力学国家重点实验室的部分资助,在此一并表示感谢。

由于本书涉及较多的数学模型及算法,且引入符号较多,虽然作者在著书过程中,对每个公式进行了逐一推导,并进行了相应的数值计算,仍难免有疏漏之处,恳请读者批评和指正。

李恒年

2010 年 2 月 西安

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 理想静止轨道 .....	3
1.3 静止轨道卫星现状 .....	4
1.4 本书内容概况 .....	6
<b>第 2 章 卫星轨道基础</b> .....	9
2.1 概述 .....	9
2.2 地球运动 .....	10
2.2.1 平太阳日 .....	10
2.2.2 平恒星日 .....	11
2.2.3 春分点 .....	12
2.2.4 零子午面 .....	13
2.2.5 当地太阳时 .....	14
2.2.6 地球自转轴极移运动 .....	15
2.2.7 地球自转轴进动运动 .....	17
2.2.8 地球自转轴章动运动 .....	18
2.3 时间系统 .....	24
2.3.1 恒星时和世界时(UT1) .....	26
2.3.2 相对儒略日(MJD) .....	26
2.3.3 恒星时(GMST) .....	27
2.3.4 原子时(TAI) .....	30
2.3.5 协调世界时(UTC) .....	30
2.3.6 地方时(LT) .....	31
2.3.7 历书时(ET) .....	32
2.3.8 GPS 时(GPS) .....	32

2.3.9	时间系统关系 .....	33
2.4	空间度量坐标系 .....	34
2.4.1	J2000.0 地心惯性系 .....	35
2.4.2	历元平赤道坐标系 .....	36
2.4.3	历元真赤道坐标系 .....	38
2.4.4	准地球固连坐标系 .....	40
2.4.5	国际地球参考坐标系 .....	41
2.4.6	测站地平坐标系 .....	44
2.4.7	径切法坐标系 .....	46
2.4.8	质心轨道坐标系 .....	48
2.4.9	东南地坐标系 .....	49
2.4.10	卫星本体坐标系 .....	50
2.5	开普勒轨道 .....	54
2.5.1	开普勒根数与运动状态参数 .....	57
2.5.2	开普勒根数与度量坐标系 .....	59
2.5.3	静止轨道位置保持无奇点根数 .....	61
2.6	总结 .....	65
<b>第3章</b>	<b>静止轨道卫星运动 .....</b>	<b>66</b>
3.1	概述 .....	66
3.2	静止轨道卫星在惯性空间的运动 .....	66
3.3	静止轨道卫星相对定点位置的运动 .....	69
3.4	静止轨道卫星“8”字轨迹真相 .....	74
3.5	静止轨道卫星相对运动 .....	76
3.5.1	赤道平面相对运动轨迹 .....	77
3.5.2	子午平面相对运动轨迹 .....	78
3.5.3	切平面相对运动轨迹 .....	80
3.6	总结 .....	85
<b>第4章</b>	<b>静止轨道摄动运动 .....</b>	<b>86</b>
4.1	概述 .....	86
4.2	静止卫星摄动运动趋势 .....	86
4.3	静止轨道拉格朗日摄动方程 .....	89
4.3.1	漂移率矢量拉格朗日方程 .....	90

4.3.2	离心率矢量拉格朗日方程 .....	91
4.3.3	倾角矢量拉格朗日方程 .....	92
4.4	地球非球形摄动 .....	94
4.4.1	地球非球形静止轨道半径 .....	96
4.4.2	地球非球形引力半长轴摄动方程 .....	99
4.4.3	地球非球形引力漂移率摄动方程 .....	107
4.4.4	地球非球形引力平经度摄动方程 .....	109
4.4.5	地球非球形引力倾角矢量摄动方程 .....	117
4.4.6	地球非球形引力偏心率矢量摄动方程 .....	119
4.4.7	小结 .....	121
4.5	日月引力摄动 .....	121
4.5.1	日月引力摄动函数 .....	124
4.5.2	日月引力轨道漂移率摄动方程 .....	126
4.5.3	日月引力轨道偏心率摄动方程 .....	131
4.5.4	日月引力轨道倾角摄动方程 .....	134
4.5.5	日月星历计算 .....	141
4.5.6	小结 .....	145
4.6	太阳光压摄动 .....	145
4.6.1	太阳光压轨道漂移率矢量摄动方程 .....	147
4.6.2	太阳光压摄动静止轨道偏心率矢量运动 .....	149
4.6.3	太阳光压摄动静止轨道倾角矢量运动 .....	152
4.6.4	卫星光照条件方程 .....	153
4.6.5	小结 .....	154
4.7	总结 .....	155
<b>第5章 静止轨道谐波分解与平运动 .....</b>		<b>156</b>
5.1	概述 .....	156
5.2	谐波分解 .....	157
5.3	基函数 .....	157
5.4	奇异值分解 .....	158
5.5	漂移率矢量平运动 .....	160
5.6	偏心率矢量平运动 .....	164
5.7	倾角矢量平运动 .....	167
5.8	总结 .....	171



<b>第 6 章 静止轨道控制原理</b>	173
6.1 概述	173
6.2 静止轨道相对定点运动	173
6.3 静止轨道小偏差线性化方程	176
6.4 径向脉冲控制方程	178
6.5 切向脉冲控制方程	180
6.6 法向脉冲控制方程	184
6.7 脉冲推力控制方程	185
6.8 静止轨道连续推力控制方程	186
6.9 静止轨道卫星推力器的配置	188
6.10 总结	190
<b>第 7 章 静止卫星位置保持控制</b>	191
7.1 概述	191
7.2 静止卫星南北保持控制	194
7.2.1 平倾角保持圆	195
7.2.2 单星倾角控制目标	195
7.2.3 倾角控制量	196
7.2.4 倾角控制时刻	197
7.2.5 倾角控制实例	199
7.3 静止轨道东西保持控制	202
7.3.1 东西保持环	205
7.3.2 漂移率控制目标	208
7.3.3 漂移率控制量	209
7.3.4 偏心率控制目标	214
7.3.5 漂移率单脉冲控制	221
7.3.6 漂移率目标同向双脉冲控制	231
7.3.7 偏心率目标反向双脉冲控制	235
7.3.8 平经度目标三脉冲控制	241
7.4 总结	245
<b>第 8 章 静止轨道共位控制技术</b>	246
8.1 概述	246

8.2	相对运动坐标系 .....	248
8.3	静止轨道共位相对运动 .....	248
8.4	共位策略设计原则 .....	251
8.5	平经度隔离策略 .....	252
8.6	偏心率矢量隔离策略 .....	255
8.6.1	绝对偏心率隔离策略 .....	256
8.6.2	太阳指向超前目标 .....	258
8.6.3	相对偏心率隔离策略 .....	262
8.7	偏心率倾角矢量联合隔离策略 .....	266
8.7.1	独立控制双星倾角隔离策略 .....	269
8.7.2	独立控制四星倾角隔离策略 .....	273
8.7.3	协调控制联合隔离策略 .....	275
8.8	共位策略的安全性分析 .....	279
8.9	总结 .....	280
<b>附录 A</b>	<b>勒让德函数 .....</b>	<b>281</b>
<b>附录 B</b>	<b>地球非球形引力场 .....</b>	<b>283</b>
B.1	地球引力场递归算法 .....	286
B.2	引力场模型系数归一化 .....	288
B.3	引力场模型数据结构 .....	289
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>291</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>General Background</b>	1
1.1	Introduction	1
1.2	Ideal Geostationary Orbit	3
1.3	Longitude Distribution and Current Situation	4
1.4	The Conception Pictures of This Book	6
<b>Chapter 2</b>	<b>The Foundations of Orbit Motion</b>	9
2.1	Introduction	9
2.2	The Motion of the Earth	10
2.2.1	Solar Day	10
2.2.2	Sidereal Day	11
2.2.3	Equinox Direction	12
2.2.4	Primary Longitude	13
2.2.5	Local Solar Time	14
2.2.6	The Earth Motion and Polar Motion	15
2.2.7	The Earth Motion of the Precession Axis	17
2.2.8	The Earth Motion of Mutation	18
2.3	Time System	24
2.3.1	Sidereal Time and Universal Time(UT1)	26
2.3.2	Modified Julian Days(MJD)	26
2.3.3	Greenwich Mean Sidereal Time(GMST)	27
2.3.4	International Atomic Time(TAI)	30
2.3.5	Coordinated Universal Time(UTC)	30
2.3.6	Local Time(LT)	31
2.3.7	Ephemeris Time(ET)	32
2.3.8	GPS Time(GPS)	32
2.3.9	Mutual relations of Time System	33
2.4	Reference System	34

2. 4. 1	J2000. 0 Earth Centered Inertial System	35
2. 4. 2	Mean Equator and Equinox of Epoch	36
2. 4. 3	True Equator and Equinox of Epoch	38
2. 4. 4	Greenwich Meridian Fixed System	40
2. 4. 5	International Terrestrial Reference System	41
2. 4. 6	Local Tangential Coordinate System	44
2. 4. 7	Local Radial Tangential/Normal/Coordinate System	46
2. 4. 8	Satellite Fixed Orbital Coordinate System	48
2. 4. 9	Satellite Fixed East/South/Down Coordinate System	49
2. 4. 10	Satellite Body Coordinate System	50
<b>2. 5</b>	<b>Kepler Orbital Elements</b>	<b>54</b>
2. 5. 1	Kepler Orbit and Motion States	57
2. 5. 2	Kepler Orbit with Reference System	59
2. 5. 3	Station Keeping Elements	61
<b>2. 6</b>	<b>Summary</b>	<b>65</b>
<b>Chapter 3</b>	<b>The Motion of Geostationary Satellite</b>	<b>66</b>
<b>3. 1</b>	<b>Introduction</b>	<b>66</b>
<b>3. 2</b>	<b>The Geostationary Orbit</b>	<b>66</b>
<b>3. 3</b>	<b>The Linearised Motion</b>	<b>69</b>
<b>3. 4</b>	<b>The Truth of “8” Shaped Sub-satellite</b>	<b>74</b>
<b>3. 5</b>	<b>The Relative Motion</b>	<b>76</b>
3. 5. 1	The Orbit Motion Projected on Equator Plane	77
3. 5. 2	The Orbit Motion Projected on Meridian Plane	78
3. 5. 3	The Orbit Motion Projected on Horizontal Plane	80
<b>3. 6</b>	<b>Summary</b>	<b>85</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>Perturbation Motion of Geostationary Satellite</b>	<b>86</b>
<b>4. 1</b>	<b>Introduction</b>	<b>86</b>
<b>4. 2</b>	<b>Natural Evolution of GEO Satellite</b>	<b>86</b>
<b>4. 3</b>	<b>Lagrange Equations for GEO Satellite</b>	<b>89</b>
4. 3. 1	Lagrange Equations for Drift Vector	90
4. 3. 2	Lagrange Equations for Eccentricity Vector	91
4. 3. 3	Lagrange Equations for Inclination Vector	92
<b>4. 4</b>	<b>The Earth’s None Spherical Potential</b>	<b>94</b>
4. 4. 1	Synchronous Semi-Major Axis	96

4.4.2	Semi-Major Axis Evolution	99
4.4.3	Longitude Drift Evolution	107
4.4.4	Mean Longitude Evolution	109
4.4.5	Inclination Vector Evolution	117
4.4.6	Eccentricity Vector Evolution	119
4.4.7	Brief Summary	121
<b>4.5</b>	<b>The Solar and Lunar Attraction</b>	<b>121</b>
4.5.1	The Solar and Lunar Potential	124
4.5.2	Drift Vector Evolution Equations	126
4.5.3	Eccentricity Evolution Equations	131
4.5.4	Inclination Evolution Equations	134
4.5.5	The Solar and Lunar Ephemeris calculation	141
4.5.6	Brief Summary	145
<b>4.6</b>	<b>Solar Radiation Pressure (SRP)</b>	<b>145</b>
4.6.1	Drift Evolution Equations with SRP	147
4.6.2	Eccentricity Evolution Equations with SRP	149
4.6.3	Inclination Evolution Equations with SRP	152
4.6.4	Eclipses of the Solar by the Earth and the Moon	153
4.6.5	Brief Summary	154
<b>4.7</b>	<b>Summary</b>	<b>155</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>Harmonic Analysis of Station Keeping Elements</b>	<b>156</b>
5.1	Introduction	156
5.2	Harmonic Analysis	157
5.3	Basis Functions and Periodic Expansion	157
5.4	Determining the Coefficients with SVD Method	158
5.5	Longitude and Drift Harmonics	160
5.6	Eccentricity Vector Harmonics	164
5.7	Inclination Vector Harmonics	167
5.8	Summary	171
<b>Chapter 6</b>	<b>The Orbital Correction Principle</b>	<b>173</b>
6.1	Introduction	173
6.2	Relative Motion Equations	173
6.3	Linealized Equations	176
6.4	Orbit Correction Equation with Radial Impulse	178

6.5	Orbit Correction Equation with Tangential Impulse .....	180
6.6	Orbit Correction Equation with Normal Impulse .....	184
6.7	Pulse Correction Equations .....	185
6.8	Continuous Correction Equations .....	186
6.9	Onboard Thrust Configuration .....	188
6.10	Summary .....	190
<b>Chapter 7</b>	<b>Station Keeping Strategies and Calculation .....</b>	<b>191</b>
7.1	Introduction .....	191
7.2	The North/South Station Keeping Strategies and Calculation .....	194
7.2.1	Inclination Confined Circle and Deadband allocation .....	195
7.2.2	Strategies for Single Satellite .....	195
7.2.3	The Inclination Corrections .....	196
7.2.4	The Moment of Correction .....	197
7.2.5	The inclination Correction Simulation .....	199
7.3	The East/West Station Keeping Strategies and Calculation .....	202
7.3.1	Longitude Drift Parabola .....	205
7.3.2	Drift-Oriented Objective .....	208
7.3.3	The Drift Correction .....	209
7.3.4	The Eccentricity Correction .....	214
7.3.5	The Drift Oriented Single Pulse Maneuver .....	221
7.3.6	The Drift Oriented Dual Pulse Maneuver .....	231
7.3.7	The Eccentricity Oriented Dual Pulse Maneuver .....	235
7.3.8	The Mean Longitude Oriented Tri-Pulse Maneuver .....	241
7.4	Summary .....	245
<b>Chapter 8</b>	<b>The Positioning and Collocation Strategies .....</b>	<b>246</b>
8.1	Introduction .....	246
8.2	Orbit Offsets and Relative Motions .....	248
8.3	Relative Motion of Collocated Satellites .....	248
8.4	Principle of Collocation Strategy .....	251
8.5	Longitudinal Separation Strategies .....	252
8.6	Eccentricity Separation Strategies .....	255

8. 6. 1	Separation with Absolute Eccentricity Offsets	256
8. 6. 2	Solar Pointing Strategy	258
8. 6. 3	Relative Eccentricities Offsets	262
<b>8. 7</b>	<b>Combined Separation with Eccentricity and Inclination</b>	<b>266</b>
8. 7. 1	The Separation Strategy without Collaboration Plan	269
8. 7. 2	The Separation Strategy for four-GEO satellites	273
8. 7. 3	The Separation Strategy with Collaboration Plan	275
<b>8. 8</b>	<b>The Feasibility Analysis</b>	<b>279</b>
<b>8. 9</b>	<b>Summary</b>	<b>280</b>
<b>Appendix A</b>	<b>Legendre Polynomials</b>	<b>281</b>
<b>Appendix B</b>	<b>The Earth's Gravity Potential and Models</b>	<b>283</b>
B. 1	Recursions	286
B. 2	Gravitational Coefficients Normalization	288
B. 3	Gravitational Coefficients Matrix	289
<b>References</b>		<b>291</b>

# 第 1 章 概 论

## 1.1 概述

人类最早于 1957 年由苏联发射了第一颗人造卫星,即 Sputnik - 1 卫星,但人类对卫星轨道的研究却已经持续了近两个世纪。地球静止轨道的最早设计者是英国著名科幻家亚瑟·C·克拉克(1945 年),在其著作《空间信息中继(Extra - Terrestrial Relays)》<sup>[1]</sup>中指出:发射到地球赤道上空 36000km 高度的卫星,具有同地球自转速度一致的轨道角速度,因此,在该轨道上卫星相对地球上的观测者是静止的,可以作为地球上任意两地无线电通信的中间平台。1963 年由美国发射了第一颗静止轨道卫星,即 SynCom - 2 卫星,成功转播了 1964 年东京夏季奥运会,从此拉开了静止轨道发射和应用的序幕。到今天大约有 300 颗不同国家、不同组织的静止轨道卫星环绕在地球赤道上空 36000km 的轨道上,担负着不同目的的通信、导航、中继任务。

地球静止轨道卫星发射通常有三个飞行阶段:发射段、转移轨道段和静止轨道段,如图 1.1 所示。发射段:火箭将卫星送入地球同步转移轨道,其近地点约 200km,远地点等于或大于 36000km 的中间轨道,分别称为同步转移轨道(Geo-Synchronous Orbit GTO)或超同步转移轨道(Super GeoSynchronous Orbit SGT0),轨道倾角等于发射点地理纬度,例如:长征火箭由西昌卫星发射中心发射,同步转移轨道倾角约为 28.6°;而阿丽亚娜火箭由法属圭亚那发射,同步转移轨道倾角约为 7°。静止轨道段是地球静止轨道卫星的工作轨道,周期约为 24h 的圆轨道,且轨道平面与地球赤道平面相重合。

由转移轨道过渡到静止轨道称为轨道机动控制(图 1.2),对轨道机动控制误差的补偿控制称为静止轨道捕获控制,统称为静止轨道卫星定点控制。同步转移轨道倾角越大,卫星定点控制速度增量越大,因此,对静止轨道低纬度发射比高纬度发射降低卫星的能源消耗量,例如:西昌卫星发射中心发射倾角为 28.6°地球同步转移轨道,过渡到静止轨道的速度增量约为 1.8km/s,法属圭亚那发射倾角约为 7°的同步转移轨道,过渡到静止轨道的速度增量约为 1.5km/s。



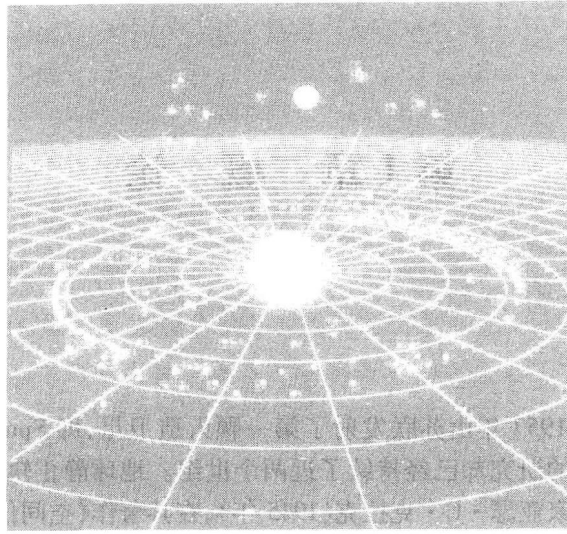


图 1.1 卫星空间分布

(数据来自北美航天编目网 [www.norad.org/tle](http://www.norad.org/tle), 位于赤道平面, 同步半径环上的卫星为地球静止轨道卫星, 环绕地球的为低轨近地卫星, 较远处为太阳, 比例按实际距离)

Fig 1.1 A Snapshot of Orbiting Satellites

(the cloud of Geo satellites populated the Geostationary ring above the Earth's equator)

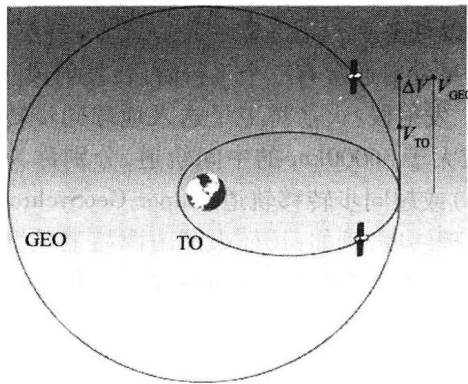


图 1.2 轨道机动控制

Fig 1.2 Geo transfer orbit by firing apogee motor

以典型卫星比冲为 300s 的推进系统, 同比卫星燃料消耗量占卫星总质量的百分比分别为 46% 和 40%, 即卫星到达目标静止轨道时的质量约为卫星进入同步转移轨道的 1/2。