

ROUSHUN BINGLIAN JIGOU KONGJIAN GOUXING

ZONGHE LILUN JI ZHINENG KONGZHI YANJIU

柔顺、并联机构空间构型 综合理论及智能控制研究

朱大昌 陈德海 冯文结 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

柔顺、并联机构空间构型 综合理论及智能控制研究

朱大昌 陈德海 冯文结 著

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书针对目前柔顺、并联机构空间构型综合及其智能控制领域所涉及的并联机构空间构型综合及智能控制、全柔顺并联机构空间构型综合及智能控制等问题,详细阐述了并联机构空间构型综合,少自由度并联机构奇异位形,全柔顺并联机构空间构型综合及刚度模态矩阵分析,柔顺、并联机构智能控制系统的设计原则与方法。

本书可供从事柔顺、并联机构学及其智能控制研究工作的人员、大专院校机构学及智能控制专业的师生以及有意于在空间微纳尺度超精密定位与加工领域发展的企业的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

柔顺、并联机构空间构型综合理论及智能控制研究/
朱大昌,陈德海,冯文结著. —北京:冶金工业出版社,
2013.9

ISBN 978-7-5024-6386-1

I. ①柔… II. ①朱… ②陈… ③冯… III. ①机构学
IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 225757 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 禹 蕊 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6386-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 9 月第 1 版,2013 年 9 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 6.75 印张; 198 千字; 204 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



前 言

本书是国家自然科学基金资助项目“基于全柔顺并联支撑机构的空间微纳尺度超精密定位系统研究”（项目编号：51165009）、国家自然科学基金资助项目“纳米级精度微运动测量与柔顺机构微动平台微位移检测”（项目编号：51105077）及江西省自然科学基金资助项目“基于全柔顺并联支撑机构的空间微纳尺度超精密定位系统研究”（项目编号：20114BAB206008）的部分研究成果（以上研究项目依托单位为江西理工大学），主要是介绍柔顺、并联机构空间构型综合理论及其智能控制。

本书主要包括：

(1) 以螺旋理论及空间几何约束条件对并联机构空间构型进行综合。在各种约束存在条件下，分析并联机构动平台相应运动轨迹形式，为多刚体的位形分析提供可参考依据；对具有3支链5关节的三自由度纯移动并联机器人的奇异性进行分析与总结，并采用线性几何学图解形式直观给出其处于奇异位形；提出并联机构动平台关联运动这一概念，并针对4-RRCR型并联机构的支链配置形式进行运动性质仿真分析研究；采用螺旋理论对少自由度并联机构的速度反解及奇异性进行分析。

(2) 提出并联机构滑模变结构控制、模糊控制及同步控

II 《前 言

制技术，解决并联机构轨迹精确跟踪这一技术问题。

(3) 提出全柔顺并联机构空间构型综合方法。综合采用螺旋理论及空间三维结构拓扑优化设计方法，进行全柔顺并联机构空间构型综合及基于 Ansys 软件的全柔顺并联机构运动学、动力学特性仿真研究；提出全柔顺并联机构模态刚度矩阵的计算方法。

(4) 提出全柔顺并联机构振动控制策略。采用滑模变结构控制策略，建立全柔顺并联机构空间运动学、动力学模型，并进行控制系统的仿真研究。

由于作者的时间和水平有限，书中难免有不足和不妥之处，敬请读者批评指正，对此作者不胜感谢！

作 者

2013 年 6 月

目 录

1 并联机构构型综合与奇异位形分析	1
1.1 应用螺旋理论对并联机器人形位的分析与综合	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 螺旋理论概述	1
1.1.3 反螺旋系统性质	3
1.1.4 力偶约束分析	4
1.1.5 力约束分析	5
1.1.6 结论	10
1.2 基于螺旋理论的新型三自由度移动并联机器人 奇异性分析	10
1.2.1 引言	11
1.2.2 反螺旋理论概述	11
1.2.3 3P-4R 型移动并联机器人奇异分析	12
1.2.4 3P-4R 并联机器人奇异性图解	16
1.2.5 结论	16
1.3 4-RRCR 型并联机构动平台关联运动特性分析	17
1.3.1 引言	17
1.3.2 两种不同配置的 4-RRCR 型并联机构模型	18
1.3.3 模型 1 动平台运动性质分析	20
1.3.4 刚体传感器配置在约束矢量交点时的 仿真结果分析	22
1.3.5 结论	24
1.4 基于螺旋理论的少自由度机器人速度反解及 奇异性分析	25
1.4.1 引言	25

IV 《 目 录

1.4.2	速度映射关系及奇异性条件	25
1.4.3	操作空间独立运动矢量的确定	26
1.4.4	Stanford 型机器人奇异性分析	29
1.4.5	仿真研究	31
1.4.6	结论	32
1.5	基于螺旋理论的 3-RPS 型并联机器人运动学分析	33
1.5.1	引言	33
1.5.2	3-RPS 型并联机器人运动学分析	33
1.5.3	3-RPS 型并联机器人奇异性分析	35
1.5.4	结论	36
1.6	Analytical Identification of Limb Structures at Special Displacement for Parallel Manipulator	37
1.6.1	Introduction	37
1.6.2	Reciprocal Screw System	38
1.6.3	Identification of the Special Displacement of Limbs Structures	41
1.6.4	Conclusions	48
2	并联机构智能控制系统研究	50
2.1	基于模糊神经网络运算法则的并联机器人自适应控制研究	50
2.1.1	引言	50
2.1.2	并联机构液压伺服驱动器数学模型	51
2.1.3	具有模糊神经网络运算法则的自适应控制器设计	53
2.1.4	仿真研究	55
2.1.5	结论	56
2.2	3-RPS 并联机器人位置分析及控制仿真	58
2.2.1	引言	59
2.2.2	机构描述	60
2.2.3	位置分析	60
2.2.4	Matlab 建模	64

2.2.5	仿真对比分析	65
2.2.6	结论	68
2.3	Sliding Mode Synchronous Control for Fixture Clamps System Driven by Hydraulic Servo Systems	69
2.3.1	Introduction	70
2.3.2	Model of Hydraulic Servo Systems	72
2.3.3	The Sliding Mode Synchronous Control	75
2.3.4	Stability Analysis of Sliding Model Synchronous Controller	77
2.3.5	Simulations	79
2.3.6	Conclusions	80
2.4	Neural-adaptive Sliding Mode Control of 4-SPS(PS) Type Parallel Manipulator	82
2.4.1	Introduction	83
2.4.2	Motion Characteristic and Dynamic of 4-SPS(PS) Type Parallel Manipulator	84
2.4.3	Neural-adaptive Sliding Mode Controller	87
2.4.4	Stability Analysis of Controller	89
2.4.5	Simulations	90
2.4.6	Conclusions	90
2.5	Robust Tracking Control of 4-SPS(PS) Type Parallel Manipulator Via Adaptive Fuzzy Logic Approach	94
2.5.1	Introduction	94
2.5.2	Model of 4-SPS(PS) Type Parallel Manipulator	96
2.5.3	Adaptive Fuzzy Logic Approach	98
2.5.4	Experimental Results	102
2.5.5	Conclusions	103
3	全柔顺并联机构空间构型综合与刚度研究	108
3.1	2RPU-2SPS 全柔顺并联机构构型设计及刚度研究	108
3.1.1	引言	108

VI 《目 录》

3.1.2	结构简介	109
3.1.3	运动特性分析	109
3.1.4	2RPU-2SPS 柔性并联机构的设计及支链刚度 分析	111
3.1.5	2RPU-2SPS 全柔顺并联机构设计	111
3.1.6	2RPU-2SPS 柔性及全柔顺并联机构刚度对比研究	113
3.1.7	SPS 型柔性及全柔顺并联机构刚度对比研究	117
3.1.8	仿真对比研究	120
3.1.9	结论	121
3.2	四自由度全柔顺并联机构刚度分析	122
3.2.1	引言	123
3.2.2	四自由度并联机构的运动特性	123
3.2.3	四自由度全柔顺并联机构构型设计	125
3.2.4	四自由度全柔顺并联机构支链刚度研究	125
3.2.5	四自由度全柔顺并联机构支链刚度 Ansys 分析	130
3.2.6	结论	133
3.3	Structural Design of a 3-DoF UPC Type Rotational Fully Spatial Compliant Parallel Manipulator	134
3.3.1	Introduction	134
3.3.2	Geometry Constraint Conditions of a Conventional Parallel Manipulator	137
3.3.3	Topology of Optimization with Geometry Constraint Conditions	138
3.3.4	Stiffness of a Fully Compliant Parallel Manipulator	142
3.3.5	Simulations	146
3.3.6	Conclusions	148
4	全柔顺并联机构微分运动及振动抑制研究	152
4.1	Vibration Active Suppress of a 4-DoF Fully Compliant Parallel Manipulator Based on Discrete Time Sliding Mode Control	152

4. 1. 1	Introduction	152
4. 1. 2	Dynamic Model of 4-DoF Compliant Parallel Manipulator	154
4. 1. 3	Differential Kinematic Model of 4-DoF Compliant Parallel Manipulator	157
4. 1. 4	Sliding Mode Controller	161
4. 1. 5	Experimental Simulations	165
4. 1. 6	Conclusions	169
4. 2	Vibration Control of Smart Structure Using Sliding Mode Control with Observer	173
4. 2. 1	Introduction	174
4. 2. 2	Dynamic Modeling of Smart Structure	176
4. 2. 3	Control System Design	179
4. 2. 4	Experimental Investigation	183
4. 2. 5	Conclusions	192
4. 3	柔性并联机器人动力学建模	193
4. 3. 1	引言	194
4. 3. 2	系统动力学方程	194
4. 3. 3	算例	200
4. 3. 4	结论	204

1 并联机构构型综合与奇异位形分析

1.1 应用螺旋理论对并联机器人形位的分析与综合

本文采用螺旋理论对并联机器人的约束与运动问题进行了分析和总结。在各种约束存在条件下,分析了刚体平台相应的运动轨迹形式,为今后对多刚体的形位分析提供了可行的理论依据。

1.1.1 引言

与常规的串联机器人相比,并联机器人具有刚度大、精度高以及承载能力强等优点,但在实际运用中,由于六自由度并联机器人的运动空间小、机构设计复杂等原因,使得六自由度并联机器人的运用受到限制。因此,研究者的目光转向了少自由度并联机器人研究方面,但是由于少自由度并联机器人的机构设计涉及复杂的约束系统分析,在这方面,方跃法等^[1-3]采用螺旋理论对支链的形式进行了分析和综合,并在此基础上提出了关于少自由度并联机器人支链可能采取的组成形式。Herve等^[4]采用群论的方法设计出具有3个移动自由度的并联机器人机构。Kong等^[5]采用螺旋理论综合分析了具有平移性质的并联机器人机构构型。所有这些研究方法都是从几何学出发、凭借直觉判断对并联机器人可能的形位进行分析,具有一定的局限性。

本文依据螺旋理论对各个支链所产生的作用于动平台的约束进行了系统的分析和综合,并给出了设计并联机器人支链结构所遵循的一般规律,为并联机器人系统的机构设计提供了可行的途径。

1.1.2 螺旋理论概述

螺旋理论形成于19世纪,1900年,Ball完成经典著作《旋量

理论》，直到 1948 年 Dimenberg 在分析空间机构时，才再次运用了这个理论，此后，螺旋理论逐步为机构学所重视，并得到迅速发展^[6]。

数学中，一个旋量可以同时表示空间的一组对偶矢量，在机构学分析中，这一组对偶矢量可以表示为方向和位置，也可以表示为速度和角速度，如果从刚体力学的角度来定义旋量，则旋量又可用来表示力和力矩这一对矢量，因此，包含有 6 个标量（两个矢量）的旋量，对于研究空间机构的运动和动力学分析是至关重要的。

我们可以用一个单位螺旋来表示一条直线在空间中的方向和位置，这个单位螺旋 $\hat{\$}$ 包含了该直线的方位，形式如下：

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} s \\ s_0 + \lambda s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， s 为单位矢量，其方向为螺旋轴线方向，与所表示的直线方向一致； $s_0 = r \times s$ ， r 表示从坐标原点到直线上任意一点的矢径， s_0 则被称为直线到原点的线距； λ 为螺旋的节距。

当 $\lambda = 0$ 时，式 (1) 简化为以下形式：

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} s \\ s_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ r \times s \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 如果表示为一个运动形式，则为一个转动副，该转动副的轴线为 s ，与坐标原点的矢径为 r ， $r = 0$ 则表示该转动副的轴线通过坐标原点。式 (2) 如果表示为力形式，则表示一个纯力形式，该力的作用线方向为 s ，与坐标原点的矢径为 r ， $r = 0$ 则表示该纯力通过坐标原点。

当 $\lambda = \infty$ 时，式 (1) 简化为以下形式：

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} 0 \\ s \end{bmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 如果表示为一个运动形式，则为一个移动副，该移动副的移动方向为 s 。式 (3) 如果表示为力形式，则表示为一个纯力偶形式，该力偶的作用线方向为 s 。

由于组成支链的运动副的基本形式为转动副和移动副，其他复杂

的运动副可以通过这两种运动副的组合构成，例如：球面副可以通过三个共点不共面的转动副构成；圆柱副可以通过两个共轴线的移动副、转动副构成等。因此，在研究支链对动平台的约束问题上，我们假设支链的构成只有转动副和移动副，并不失一般性。

1.1.3 反螺旋系统性质

运动的反螺旋是约束力的概念，表示了物体在三维空间所受到的约束。两个螺旋分别表示为 \mathcal{S} 和 \mathcal{S}_r ，若这两个螺旋满足以下关系：

$$\mathcal{S} \circ \mathcal{S}_r = 0 \quad (4)$$

则 \mathcal{S} 和 \mathcal{S}_r 互为反螺旋，式 (4) 中，“ \circ ”表示互易积，该式等同于以下形式：

$$\begin{aligned} \mathcal{S} &= (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6), \quad \mathcal{S}_r = (s_{r1}, s_{r2}, s_{r3}, s_{r4}, s_{r5}, s_{r6}) \\ \mathcal{S} \circ \mathcal{S}_r &= s_4 s_{r1} + s_5 s_{r2} + s_6 s_{r3} + s_1 s_{r4} + s_2 s_{r5} + s_3 s_{r6} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

两个互为反螺旋的螺旋几何关系如图 1 所示。

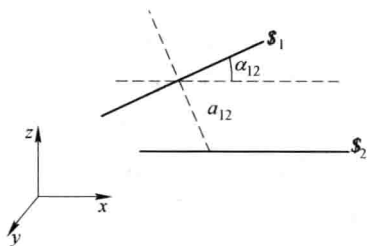


图 1 两个互为反螺旋之间的几何关系

设两螺旋的节距分别为 h_1 和 h_2 ，公法线长度为 a_{12} ，方向矢量之间的夹角为 α_{12} ，则两螺旋的互易积可表示为如下形式^[7]：

$$(h_1 + h_2) \cos \alpha_{12} - a_{12} \sin \alpha_{12} = 0 \quad (6)$$

下面采用式 (6) 进行动平台的约束分析。

假设一个支链由 n ($n \leq 6$) 个线性无关的运动副所组成，那么可以认为该支链为 n 阶螺旋系统，该支链对动平台产生的约束，即 n 阶螺旋系统的反螺旋系统为 $6 - n$ 阶，也就是该支链作用在动平台上的约束数为 $6 - n$ 个，表现为约束力形式，可以分为力、力偶以及两者

的组合形式,简化为基本的两种形式(力和力偶)进行分析,并不失其一般性。

1.1.4 力偶约束分析

1.1.4.1 单个力偶约束分析

纯力偶的形式可以表示为:

$$\hat{\mathcal{S}}_r = (0, s) \quad (7)$$

当物体受到这个力偶的作用时,表示物体没有作用线沿反螺旋轴线方向的角速度分量 $(s, 0)$,否则功将不为0,所以任何轴线平行于 s 方向的转动都将被约束。另外,任何与 s 斜交的轴线都将对反螺旋产生转动分量,这种情况也将被约束。由于力偶在方向不变的情况下平行移动它的作用线并不改变其对动平台作用效果,所以,当作用在动平台上的力偶系方向一致的时候,该力偶系简化为单一的力偶作用。按照以上的分析可知,被约束的运动形式为:

$$\mathcal{S} = (s, \mathbf{r} \times s) \quad (8)$$

式(8)说明,当动平台上合成的约束作用简化为一个纯力偶时,动平台具有5个自由度,包括3个沿任意方向的平移以及以 s 为法线、以平面内任意直线为轴线的两个转动自由度,转动的空间形式如图2所示。

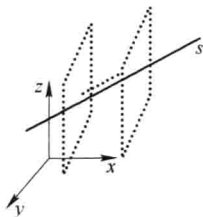


图2 单个力偶作用转动空间

1.1.4.2 两个力偶约束分析

两个纯力偶的形式可以表示为:

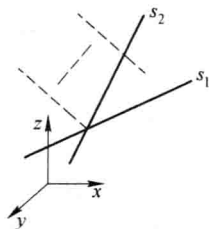
$$\hat{\mathcal{S}}_{r_1} = (0, s_1), \quad \hat{\mathcal{S}}_{r_2} = (0, s_2) \quad (9)$$

动平台上作用的两个纯力偶形式如式(9)所示,由前述可知,两个力偶平移的结果必是相交的共面矢量,如果两个矢量共轴,则简化为第一种情况,若不共轴则两个纯力偶轴线相交确定一个平面,那么允许的运动形式为:

$$\mathcal{S} = (s_1 \times s_2, \mathbf{r} \times (s_1 \times s_2)) = (s_1 \times s_2, (\mathbf{r} \times s_2)s_1 - (\mathbf{r} \times s_1)s_2) \quad (10)$$

式(10)说明,当动平台上合成的约束简化为两个共点共

面的纯力偶时, 动平台具有 4 个自由度, 包括 3 个任意方向的平移以及与 2 个方向矢量决定平面的一族与法线平行的线系, 转动的空间形式如图 3 所示。



1.1.4.3 三个力偶约束分析

3 个纯力偶的形式可以表示为: 图 3 两个相交共面力偶转动空间

$$\hat{\mathcal{S}}_{r1} = (0, s_1), \hat{\mathcal{S}}_{r2} = (0, s_2), \hat{\mathcal{S}}_{r3} = (0, s_3) \quad (11)$$

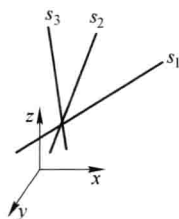


图 4 无转动空间

动平台上作用的 3 个纯力偶形式如式 (11) 所示, 如 3 个力偶作用线共轴则简化为第一种情况; 如 3 个力偶作用线共面则简化为第二种情况。当 3 个力偶作用线空间汇交时, 其最大线性无关组为 3, 限制了动平台三维空间的任意转动。由反螺旋约束条件可知, 此时动平台具有在空间三个方向上任意平移的运动特性, 其表现形式如图 4 所示。

1.1.5 力约束分析

1.1.5.1 单个力作用约束分析

当动平台存在纯力约束时, 动平台的移动被约束的同时, 其上的某些方向的转动同时被约束, 这就产生了不完全的自由度。单个纯力约束与力偶约束不同之处是: 纯力的作用点不能做空间平移。单个纯力约束的形式可以表示为:

$$\hat{\mathcal{S}}_r = (s_r, r \times s_r) \quad (12)$$

由于在与反螺旋线矢方向平行或相交的作用线上, 允许的运动螺旋的节距都为 0, 所以, 当以这些作用线为转轴转动时在纯力线矢方向上没有速度分量。当动平台上作用的力线矢系共轴时, 动平台具有 5 个自由度, 包括 3 个方向的转动和 2 个方向的移动。移动方向为以 s 为法线的平面内任意移动, 转动轴线由式 (13) 和式 (14) 所确定。

根据式(6)可知,当两线矢平行或相交时,存在以下关系:

$$\mathcal{S} \circ \mathcal{S}_r = -a_{12} \sin \alpha_{12} = 0 \quad (13)$$

所以任何能作为转动轴线的线矢量必须满足以下关系式:

$$s_r(r' \times s) + s(r \times s_r) = 0 \quad (14)$$

移动空间与转动空间形式如图5所示。图中, P 代表一族以 s 为法线的平面, 平面内任何移动为允许运动; r_1 代表以与方向矢量 s 上任何一点相交的直线为轴线的允许转动运动; r_2 代表以与方向矢量平行的直线为轴线的所允许的转动运动。

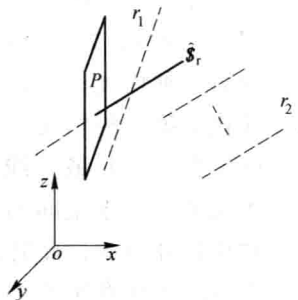


图5 单个力线矢的移动空间和转动空间

1.1.5.2 双线矢力作用约束分析

当动平台上有双线矢力约束作用时,该双线矢力的轴线为空间不共面、空间交错分布。由此两个空间交错的约束力线矢可约束动平台的两个移动方向,所允许的运动方向为同时与这两个线矢垂直的方向,这两个纯力线矢形式可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{r_1} &= (s_{r_1}, r_1 \times s_{r_1}) = (L_1, M_1, N_1, P_1, Q_1, R_1) \\ \mathcal{S}_{r_2} &= (s_{r_2}, r_2 \times s_{r_2}) = (L_2, M_2, N_2, P_2, Q_2, R_2) \end{aligned} \quad (15)$$

由于该两线矢力为空间交错形式,所以允许的移动形式可确定为:

$$\mathcal{S} = (s, r \times s) \quad (16)$$

式中, $s = \left(\frac{M_1 N_2 - M_2 N_1}{L_1 M_2 - L_2 M_1}, \frac{L_1 N_2 - L_2 N_1}{L_2 M_1 - L_1 M_2}, 1 \right)$ 。

允许的转动方向可确定如下:

- (1) 与两线矢同时相交的可作为转动轴线;

(2) 与 \hat{s}_{r1} 相交同时与 \hat{s}_{r2} 平行的可作为转动轴线;

(3) 与 \hat{s}_{r2} 相交同时与 \hat{s}_{r1} 平行的可作为转动轴线。

与两线矢同时相交的轴线组成的区域如图 6 所示, 所有以 \hat{s}_{r1} 和 \hat{s}_{r2} 线矢为顶点的线矢都可以作为转动轴线。

以第二种情况分析, 与 \hat{s}_{r2} 平行的平面可表示为两个线性无关的基平面, 所有与 \hat{s}_{r2} 平行的平面都可由这两个基平面的组合表示。两个线性无关的基平面表示为:

$$r_{p1}s_{p1} = s_{0p1}, \quad r_{p2}s_{p2} = s_{0p2} \quad (17)$$

式中, $s_{p1} = \left(-\frac{N_2}{L_2}, 0, 1 \right)$, $s_{p2} = \left(-\frac{M_2}{L_2}, 1, 0 \right)$ 。

组合平面的形式可以表示为: $k_1(r_{p1}s_{p1}) + k_2(r_{p2}s_{p2}) = k_1s_{0p1} + k_2s_{0p2}$
标准形式为:

$$r_p s_p = s_{0p} \quad (18)$$

线矢 \hat{s}_{r1} 与平行平面的交点坐标形式表示为:

$$r(ss_p) = s_p \times s_{01} + s_{0p}s \quad (19)$$

因此, 当直线线矢同时满足式 (18) 与式 (19) 时, 可以作为转动轴线, 如图 7 所示。

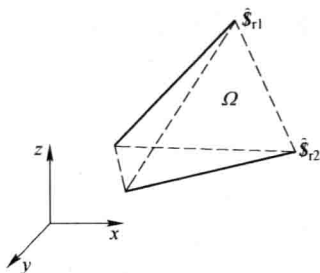


图 6 同时与两线矢力相交的转动轴线的确定 (Ω)

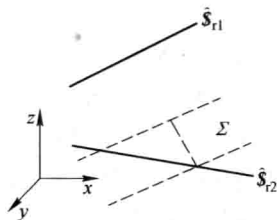


图 7 与两线矢力平行及相交的转动轴线确定 (Σ)

1.1.5.3 三线矢力作用约束分析

三线矢力同时作用在动平台上, 由于线矢力无保持其作用线平行移动不改变其作用效果的特性, 所以在进行其约束分析时分为以下儿